

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อการออกแบบหัวเผาถ่านหินผง
ที่มีการหมุนวนก๊าซไอเสีย

NUMERICAL ANALYSIS FOR DESIGN OF PULVERIZED COAL BURNER
WITH FLUE GAS RECIRCULATION



T110501



กัณฑ์คุณ อุดมโชคปิติ
KANTAPON UDOMCHOKPITI

กช.
ก389ก
2553

ตจพญ.....
เลขทะเบียน..... 110501
วัน,เดือน,ปี..... - 4 พ.ย. 2553

b. 12259019
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-030-071

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**NUMERICAL ANALYSIS FOR DESIGN OF PULVERIZED COAL BURNER
WITH FLUE GAS RECIRCULATION**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2010
KMITL-2010-EN-M-030-071**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อการออกแบบหัวเผาถ่านหินผงที่มีการ หมุนวนก๊าซไอเสีย
นักศึกษา	นายกันตภณ อุดม โชคปิติ
รหัสนักศึกษา	50060301
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อออกแบบและศึกษาพฤติกรรมการทำงานและการปลดปล่อยมลภาวะของหัวเผาถ่านหินผงที่มีการหมุนวนก๊าซไอเสีย โดยมีขั้นตอนในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขทั้งหมด 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) วิเคราะห์เชิงตัวเลขเทียบผลของเจ็ทบีม[17] เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง ในด้านการเหนี่ยวนำกระแสการไหลเข้าสู่กระแสการไหลปฐมภูมิ 2) วิเคราะห์เชิงตัวเลขเทียบผลของการเผาไหม้ของถ่านหิน[18, 19] และ 3) วิเคราะห์เชิงตัวเลขของพฤติกรรมการทำงานและการปลดปล่อยมลภาวะของหัวเผาถ่านหิน โดยผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในขั้นตอนที่ 1 และ 2 ได้นำมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมหัวเผาถ่านหินในข้อที่ 3 ทำการศึกษาการทำงานและการปลดปล่อยมลภาวะของหัวเผาถ่านหินโดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนอัตราการไหลระหว่างอัตราการไหลปฐมภูมิและอัตราการไหลทุติยภูมิ (Mass flow rate ratio) ซึ่งศึกษาในช่วงที่หัวเผาถ่านหินทำงานอย่างมีประสิทธิภาพกำหนดโดยการสังเกตเห็นอุณหภูมิของก๊าซในท่อขยาย (diffuser) มากกว่า $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในลักษณะเป็นจุกร้อนในบริเวณดังกล่าว โดยได้แบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษา ได้แก่ 30:70, 32:68 และ 34:66 และทำการเปรียบเทียบการเกิดขึ้นของไนโตรเจนออกไซด์ระหว่างกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียและไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย จากการวิจัยพบว่า ที่เงื่อนไขการทำงานเดียวกัน ค่าการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ของกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียจะต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย โดยค่าการปลดปล่อยในกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียเท่ากับ 911 ppm และกรณีที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียเท่ากับ 1,547 ppm เนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้ในกรณีที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิที่สูงกว่า ด้วยอุณหภูมิที่สูงนี้จะช่วยเร่งปฏิกิริยาการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ ตามหลักจลนพลศาสตร์เชิงเคมี (Chemical Kinetics) อีกทั้งความเข้มข้นของออกซิเจนในบริเวณนั้นยังสูงกว่ากรณีที่มีการหมุนเวียนไอเสีย อีกด้วย เมื่อพิจารณาอัตราการก่อกำเนิดก๊าซ พบว่ามีการก่อกำเนิดสูงในบริเวณที่เกิดการเผา

ไหม้ของสารระเหย เป็นการบ่งชี้ว่า แหล่งสำคัญของ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์คือ Fuel NO โดยมี Prompt NO เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย สำหรับ Thermal NO ที่เกิดจาก Zeldovich mechanism จะมีความแตกต่างกันอยู่บ้างตามระดับอุณหภูมิ ที่เกิดขึ้นบริเวณ ห้องเผาไหม้ส่วนที่สอง ทำให้อัตราการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นแต่ไม่มากเท่าอิทธิพลของ Fuel NO



||

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Numerical Analysis for Design of Pulverized Coal Burner With Flue Gas Recirculation
Student	Mr. Kantapon Udomchokpiti
Student ID.	500603001
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk

Abstract

This thesis deals with a numerical analysis for design and performance assessment of pulverized coal burner with flue gas recirculation. It involves 3 main topics. Firstly, the numerical analysis of jet pump performance[17] for validation purpose of the model regarding flow entrainment into primary jet. Secondly, the numerical analysis of pulverized coal combustion[18, 19] for validation purpose of the combustion model. Finally, the numerical analysis of pulverized coal combustion and NO_x emission of the proposed burner, where the model parameters obtained from earlier analyses were adopted.

Performance and emission of this low-NO_x burner were assessed at various operating conditions, i.e.; the primary/secondary flow rate ratio. The value was chosen within a stable range, defined as the hot spot with temperature greater than 800 °C, which are; 30:70, 32:68 and 34:66. The effect of flue gas recirculation were also studied. It was found that the emission for the case with flue gas recirculation is lower, with the value of 911 ppm compared with 1,547 ppm for the case without flue gas recirculation. This is because of the kinetic rate of NO formation is promoted by higher temperature and higher oxygen concentration in the case without flue gas recirculation. As far as the source of NO is concerned, the contribution from fuel NO is dominant as seen that the majority of NO formation takes place at the interface of volatile-rich and oxygen-rich regions inside the burner. Insignificant amount of Prompt NO can be observed. Although Thermal NO contribute to the total rate of NO formation with higher amount being released in the case without flue gas recirculation, the effect is insignificant as compared to the contribution of Fuel NO.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อการออกแบบหัวเผาถ่านหินผงที่มีการหมุนวนก๊าซไอเสียสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยการให้คำปรึกษาและความกรุณาของจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. จารุวัตร เจริญสุข ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณนิวัฒน์ ภูเจริญ ที่ให้ความกรุณาในการสอนโปรแกรมและให้คำแนะนำที่ดีแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และสถานที่สำหรับการวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ ร่วมสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านที่ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จไปได้ด้วยดี

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายทางผู้วิจัยหวังว่าเนื้อหาทฤษฎีที่ใช้ในโปรแกรมที่รวมไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ศึกษาต่อไป

กันตภณ อุดมโชคปิติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	XVI
สารบัญรูป.....	XVII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XXV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.3 ถ่านหิน.....	5
2.3.1 การวิเคราะห์ถ่านหิน.....	7
2.3.2 การเผาไหม้ถ่านหิน.....	9
2.3.2.1 ความร้อนจากการเผาไหม้ถ่านหิน.....	9
2.3.2.2 การเผาไหม้ของสารระเหย.....	10
2.3.3 การเผาไหม้ซาร์.....	10
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานและการถ่ายเทความร้อน.....	12
3.1 ทฤษฎีพื้นฐานทาง CFD.....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 กฎการอนุรักษ์ของการเคลื่อนที่ของของไหล.....	12
3.1.1.1 สมการควบคุมของการไหลและการถ่ายเทความร้อน.....	12
3.1.1.1.1 การอนุรักษ์มวลในปัญหา 3 มิติ.....	13
3.1.1.1.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอนุภาคของไหล ในเทอมของชิ้นส่วนย่อยของไหล.....	15
3.1.1.1.3 สมการโมเมนตัมแบบ 3 มิติ.....	17
3.1.1.1.4 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ.....	20
3.1.1.2 สมการสถานะ.....	24
3.1.1.3 สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับของไหลแบบนิวโทเนียน.....	25
3.1.1.4 รูปแบบอนุรักษ์สำหรับสมการควบคุมของการไหลของของไหล.....	27
3.2 แบบจำลอง $k - \epsilon$	28
3.2.1 Standard $k - \epsilon$ Model.....	28
3.2.1.1 ภาพรวม.....	28
3.2.1.2 สมการการถ่ายเทสำหรับแบบจำลอง Standard $k - \epsilon$	29
3.2.1.3 การจำลองความหนืดปั่นป่วน.....	29
3.2.1.4 ค่าคงที่แบบจำลอง.....	29
3.2.2 RNG $k - \epsilon$ Model.....	30
3.2.2.1 ภาพรวม.....	30
3.2.2.2 สมการการถ่ายเทสำหรับแบบจำลอง RNG $k - \epsilon$	30
3.2.2.3 จำลองผลกระทบเนื่องจากความหนืด.....	31
3.3 การถ่ายเทความร้อน.....	31
3.3.1 บทนำ.....	32
3.3.2 แบบจำลองการนำและการพาความร้อน.....	32
3.3.2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน.....	32
3.3.2.1.1 สมการพลังงาน.....	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2.1.2 สมการพลังงานสำหรับแบบจำลอง การเผาไหม้แบบ Non-Premixed.....	33
3.3.2.1.3 การรวมพจน์การกระจายความหนืด.....	33
3.3.2.1.4 แหล่งกำเนิดพลังงานอันเนื่องจากปฏิกิริยา	34
3.3.2.1.5 แหล่งกำเนิดพลังงานเนื่องมาจากการแผ่รังสี.....	34
3.3.2.1.6 สมการพลังงานในบริเวณของแข็ง.....	34
3.3.2.1.7 ความไม่เป็น isotropic conductivity ในของแข็ง.....	35
3.3.2.2 ทฤษฎีการพาแบบธรรมชาติและการ ไหล โดยแรงลอยตัว.....	35
3.3.3 แบบจำลองการแผ่รังสี	36
3.3.3.1 ภาพรวมและข้อจำกัด.....	36
3.3.3.2 สมการการถ่าย โอนรังสี	37
3.3.3.3 ทฤษฎีแบบจำลองการแผ่รังสีที่ไม่ต่อเนื่อง (DO)	39
3.3.3.3.1 สมการแบบจำลอง DO	40
3.3.3.3.2 การเชื่อมต่อกับสมการพลังงานของแบบจำลอง DO.....	41
3.3.3.3.3 การแบ่งช่วงเชิงมุมและความละเอียดของการคำนวณ ในแต่ละช่วง (Angular Discretization and Pixelation).....	42
3.3.3.3.4 การกระเจิงที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง.....	45
3.3.3.3.5 ผลกระทบของอนุภาคในแบบจำลอง DO	45
3.3.3.3.6 ขอบเขตและการรักษาเงื่อนไขบริเวณเซลล์ที่ผนังที่บดแสง	46
3.3.3.3.7 ขอบเขตและการรักษาเงื่อนไขบริเวณเซลล์ที่ผนังกึ่งโปร่งแสง	48
3.3.3.3.8 ตัวกลางของแข็งกึ่งโปร่งแสง	55
3.3.3.3.9 การรักษาสภาวะขอบเขตผนังสเปกตรัมและขอบเขตสมมาตร.....	56
3.3.3.3.10 การรักษาสภาวะขอบเขตที่ขอบเขตพรีออติก.....	56
3.3.3.4 การแผ่รังสีในการไหลที่มีการเผาไหม้.....	56
3.3.3.4.1 The Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model	56
3.3.3.4.2 ผลกระทบเนื่องจากอนุภาคต่อสัมประสิทธิ์การดูดซับ.....	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3.5 การเลือกแบบจำลองการแผ่รังสี	58
บทที่ 4 ทฤษฎีการเผาไหม้และการก่อเกิดมลภาวะ.....	60
4.1 การเผาไหม้แบบ Non-Premixed.....	60
4.1.1 บทนำ.....	60
4.1.2 ทฤษฎีการเผาไหม้แบบ Non-Premixed และ Mixture Fraction.....	61
4.1.2.1 ทฤษฎี Mixture Fraction.....	61
4.1.2.1.1 ความหมายของ Mixture Fraction.....	61
4.1.2.1.2 สมการการถ่ายเทสำหรับ Mixture Fraction.....	63
4.1.2.1.3 แบบจำลอง Non-Premixed สำหรับ LES.....	64
4.1.2.1.4 Mixture Fraction เปรียบเทียบกับอัตราส่วนสมมูล.....	64
4.1.2.1.5 ความสัมพันธ์ของ f กับสัดส่วนมวลของสปีชีส์ ความหนาแน่นและอุณหภูมิ.....	65
4.1.2.2 การจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างความปั่นป่วน-สารเคมี.....	66
4.1.2.2.1 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น.....	67
4.1.2.2.2 ที่มาของปริมาณเฉลี่ยจาก Mixture Fraction ชั่วขณะ.....	67
4.1.2.2.3 รูปร่าง PDF ที่สมมุติ.....	68
4.1.2.3 การขยายตัวนอนแอดียาคติกของแบบจำลอง Non-Premixed.....	70
4.1.2.4 ตารางเคมี.....	72
4.1.2.4.1 ตารางค้นหาสำหรับระบบแอดียาคติก.....	72
4.1.2.4.2 ตารางค้นหา 3 มิติ สำหรับระบบนอนแอดียาคติก.....	74
4.1.3 ข้อจำกัดและกรณีพิเศษสำหรับการใช้แบบจำลอง Non-Premixed.....	76
4.1.3.1 ข้อจำกัดของ mixture fraction.....	77
4.1.3.2 การใช้แบบจำลอง Non-Premixed สำหรับเชื้อเพลิงเหลว และการเผาไหม้ถ่านหิน.....	81
4.1.3.3 การใช้แบบจำลอง Non-Premixed กับการรีไซเคิลก๊าซไอเสีย.....	81
4.1.3.4 การใช้แบบจำลอง Non-Premixed กับแบบจำลองก๊าซเฉลี่ย.....	82

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3.4.1 องค์ประกอบสารประกอบ.....	83
4.1.3.4.2 การประเมินคุณสมบัติ.....	84
4.2 การก่อเกิดมลพิษ.....	84
4.2.1 การก่อเกิด NOx.....	84
4.2.1.1 บทนำ.....	85
4.2.1.1.1 แบบจำลอง NOx.....	85
4.2.1.1.2 การก่อเกิดและการลด NOx ในเปลวไฟ.....	86
4.2.1.2 สมการควบคุมสำหรับการถ่ายเท NOx.....	86
4.2.1.3 การเกิด Thermal NOx.....	87
4.2.1.3.1 อัตราปฏิกิริยา Thermal NOx.....	87
4.2.1.3.2 การสมมติฐาน Quasi-Steady สำหรับ [N].....	88
4.2.1.3.3 อุณหภูมิสัมพันธ์กับ Thermal NOx.....	88
4.2.1.3.4 การคำนวณ Thermal NOx ที่ไม่คววถู.....	88
4.2.1.3.5 แนวทางสำหรับการกำหนดความเข้มข้น O อิสระ.....	89
4.2.1.3.6 แนวทางสำหรับการกำหนดความเข้มข้น OH อิสระ.....	90
4.2.1.3.7 สรุป.....	91
4.2.1.4 การก่อเกิด Prompt NOx.....	91
4.2.1.4.1 สถานะการเผาไหม้ของ Prompt NOx.....	92
4.2.1.4.2 กลไก Prompt NOx.....	92
4.2.1.4.3 สัดส่วนการก่อเกิด Prompt NOx.....	93
4.2.1.4.4 ปฏิกิริยาหลัก.....	93
4.2.1.4.5 กลวิธีในการจำลอง.....	93
4.2.1.4.6 อัตราการกำเนิด NOx สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนทั่วไป.....	94
4.2.1.4.7 ลำดับการเกิดปฏิกิริยาของออกซิเจน.....	95
4.2.1.5 การก่อเกิด Fuel NOx	95
4.2.1.5.1 พันธะเชื้อเพลิงไนโตรเจน.....	95

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1.5.2 เส้นทางการทำปฏิกิริยา.....	96
4.2.1.5.3 Fuel NO _x จากเชื้อเพลิงก๊าซและเชื้อเพลิงเหลว.....	97
4.2.1.5.4 Fuel NO _x จากถ่านหิน.....	102
4.2.1.5.5 เชื้อเพลิงไนโตรเจนสำหรับ HCN และ NH ₃ ระหว่างปฏิกิริยา.....	107
4.2.1.6 การเกิด NO _x จาก N ₂ O ระหว่างปฏิกิริยา.....	107
4.2.1.7 การลด NO _x โดยการเผาไหม้ซ้ำ.....	109
4.2.1.7.1 แนวทางการทำปฏิกิริยาอย่างฉับพลัน (Instantaneous Approach).....	109
4.2.1.7.2 แนวทางสมดุลบางส่วน.....	110
4.2.1.8 การลด NO _x โดย SNCR.....	113
4.2.1.8.1 การฉีดแอมโมเนีย.....	113
4.2.1.8.2 การฉีดยูเรีย.....	115
4.2.1.8.3 สมการถ่ายเทสำหรับยูเรีย H ₂ NCO และ NCO.....	116
4.2.1.8.4 การผลิตยูเรียเนื่องมาจากการฉีดสารทำปฏิกิริยา.....	117
4.2.1.8.5 การผลิต NH ₃ เนื่องมาจากการฉีดสารทำปฏิกิริยา.....	117
4.2.1.8.6 การผลิต H ₂ NCO เนื่องมาจากการฉีดสารทำปฏิกิริยา.....	118
4.2.1.9 การก่อเกิด NO _x ในการไหลปั่นป่วน.....	118
4.2.1.9.1 แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างความปั่นป่วน-สารเคมี.....	119
4.2.1.9.2 วิธี PDF.....	119
4.2.1.9.3 การแสดงออกโดยทั่วไปสำหรับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ย.....	119
4.2.1.9.4 อัตราปฏิกิริยาเฉลี่ย.....	120
4.2.1.9.5 ความอิสระทางสถิติ.....	120
4.2.1.9.6 The Beta PDF Option.....	120
4.2.1.9.7 The Gaussian PDF Option.....	121
4.2.1.9.8 การคำนวณวิธี σ^2	121
4.2.2 การก่อเกิด SO _x	122
4.2.2.1 บทนำ.....	122

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2.2 สมการควบคุมสำหรับการถ่ายเท SO _x	124
4.2.2.3 กลไกปฏิกิริยาออกซิเดชันสำหรับกำมะถัน.....	124
4.2.2.4 การผลิต SO ₂ และ H ₂ S ในเชื้อเพลิงก๊าซ.....	126
4.2.2.5 การผลิต SO ₂ และ H ₂ S ในเชื้อเพลิงเหลว.....	127
4.2.2.6 การเกิด SO ₂ และ H ₂ S จากถ่านหิน.....	127
4.2.2.6.1 SO ₂ และ H ₂ S จากซาร์.....	127
4.2.2.6.2 SO ₂ และ H ₂ S จากสารระเหย.....	128
4.2.2.7 การก่อเกิด SO _x ในการไหลปั่นป่วน.....	128
4.2.2.7.1 แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารเคมีและความปั่นป่วน.....	128
4.2.2.7.2 PDF.....	129
4.2.2.7.3 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ย.....	129
4.2.2.7.4 ตัวเลือก PDF.....	129
4.3 เฟสที่ไม่ต่อเนื่อง.....	129
4.3.1 บทนำ.....	130
4.3.2 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	130
4.3.2.1 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	131
4.3.2.2 การแพร่กระจายของอนุภาคอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน.....	131
4.3.2.3 การอินทิเกรตสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	134
4.3.3 กฎของสัมประสิทธิ์แรงลาก.....	137
4.3.3.1 กฎแรงลากของวัตถุทรงกลม.....	137
4.3.3.2 กฎแรงลากของ Stokes – Cunningham.....	138
4.3.3.3 ทฤษฎีแบบจำลองแรงลากไดนามิกส์.....	138
4.3.4 กฎการแลกเปลี่ยนมวลและความร้อน.....	139
4.3.4.1 Inert Heating or Cooling (Law 1/Law 6).....	140
4.3.4.2 การระเหยของหยดของเหลว (กฎข้อที่ 2).....	142
4.3.4.2.1 การถ่ายเทมวลในกฎข้อที่ 2.....	143

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.4.2.2 การถ่ายเทความร้อนไปยังหยดของเหลว.....	144
4.3.4.3 การเคี้ยวของหยดของเหลว (กฎข้อที่ 3).....	145
4.3.4.4 การปลดปล่อยสารระเหย (กฎข้อที่ 4).....	146
4.3.4.4.1 แบบจำลองอัตราคงที่.....	147
4.3.4.4.2 แบบจำลองอัตราคิเนติกเดี่ยว.....	148
4.3.4.4.3 แบบจำลองสองอัตรา (the Kobayashi model).....	148
4.3.4.4.4 แบบจำลอง CPD.....	149
4.3.4.4.5 การพองของอนุภาคระหว่างการปลดปล่อยสารระเหย.....	155
4.3.4.4.6 การถ่ายเทความร้อน ไปยังอนุภาค ระหว่างการปลดปล่อยสารระเหย.....	155
4.3.4.5 การเผาไหม้ที่ผิว (กฎข้อที่ 5).....	156
4.3.4.5.1 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวชนิดที่ถูกจำกัดด้วยการแพร่.....	157
4.3.4.5.2 แบบจำลองอัตราคิเนติก/ฟุ้งกระจายแบบจำกัด.....	157
4.3.4.5.3 แบบจำลอง Intrinsic.....	158
4.3.4.5.4 แบบจำลองพื้นผิวปฏิกิริยาหลายพื้นผิว.....	160
4.3.4.5.5 การถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างการเผาไหม้ซาร์.....	160
4.3.4.6 องค์ประกอบอนุภาคที่หลากหลาย (กฎข้อที่ 7).....	161
4.3.4.6.1 กฎของ Raoult.....	162
4.3.4.6.2 แบบจำลองก๊าซจริงของ Peng-Robinson.....	162
4.3.5 การคำนวณควบคู่ทางเดียวหรือสองทาง.....	162
4.3.5.1 การคำนวณควบคู่ระหว่างช่วงต่อเนื่องและเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง.....	163
4.3.5.2 การแลกเปลี่ยนโมเมนตัม.....	163
4.3.5.3 การแลกเปลี่ยนความร้อน.....	164
4.3.5.4 การแลกเปลี่ยนมวล.....	165
4.3.5.5 Under-Relaxation ของพจน์การแลกเปลี่ยน.....	166

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การกำหนดปัญหาและการตรวจสอบผลการคำนวณ.....	167
5.1 ขั้นตอนในการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล.....	167
5.1.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล.....	167
5.1.2 ขั้นตอนการประมวลผล.....	167
5.1.3 ขั้นตอนการแสดงผล.....	168
5.2 ขั้นตอนการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ในงานวิจัย.....	168
5.2.1 จำนวนเทียบผลการจำลองการไหลในเจ็ทปัด.....	168
5.2.2 จำนวนเทียบผลการจำลองการเผาไหม้ถ่านหินใน Pulverized coal burner.....	171
5.2.3 ออกแบบหัวเผาถ่านหินในโตรเจนออกไซด์ต่ำ (Low NOx Burner) บนทฤษฎีของเจ็ทปัด.....	177
5.2.4 จำนวนช่วงการทำงานและมลภาวะที่ปลดปล่อยออกมาของหัวเผาถ่านหิน ที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (Flue Gas Recirculation).....	179
5.2.5 จำนวนการทำงานและมลภาวะที่ปลดปล่อยออกมาของหัวเผาถ่านหิน ที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (Non-Flue Gas Recirculation).....	183
บทที่ 6 ผลการจำลองและวิจารณ์ผล.....	185
6.1 ผลการจำลองการไหลเทียบผลในเจ็ทปัด.....	185
6.1.1 ผลการจำลองการไหลเทียบผลในเจ็ทปัดที่อุณหภูมิเท่ากัน (Isothermal).....	185
6.1.2 ผลการจำลองการไหลเทียบผลในเจ็ทปัด ที่อุณหภูมิไม่เท่ากัน (Non-Isothermal).....	186
6.2 ผลการจำลองเทียบผลการเผาไหม้ถ่านหินใน Pulverized coal burner.....	187
6.2.1 ผลการจำลองการเผาไหม้.....	187
6.2.2 อภิปรายผลการจำลองเทียบผล.....	193
6.3 ผลการจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาถ่านหิน.....	195
6.3.1 ผลการจำลอง.....	195
6.3.1.1 ผลการจำลองการกระจายความเร็ว.....	197

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3.1.2 ผลการจำลองอัตราการระเหยของสารระเหย.....	202
6.3.1.3 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มี แหล่งกำเนิดจากสารระเหย.....	207
6.3.1.4 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากซาร์.....	212
6.3.1.5 ผลการจำลองอัตราการเผาไหม้ของสารระเหยและซาร์.....	217
6.3.1.6 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ.....	222
6.3.1.7 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจน.....	227
6.3.1.8 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของออกซิเจน.....	232
6.3.1.9 ผลการจำลองอัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของแอมโมเนีย.....	237
6.3.1.10 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของแอมโมเนีย.....	242
6.3.1.11 ผลการจำลองอัตราการเกิดและอัตราการสูญเสีย ของไฮโดรเจนไซยาไนด์.....	247
6.3.1.12 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์.....	252
6.3.1.13 ผลการจำลองอัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของ Fuel NO.....	257
6.3.1.14 ผลการจำลองอัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของ Prompt NO.....	262
6.3.1.15 ผลการจำลองอัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของ Thermal NO.....	267
6.3.1.16 ผลการจำลองอัตราการเกิดและอัตราการสูญเสีย ของไนโตรเจนออกไซด์.....	272
6.3.1.17 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์.....	277
6.3.1.18 ผลการจำลองอัตราการเกิดและอัตราการสูญเสีย ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	282
6.3.1.19 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	287
6.3.1.20 Power output ที่ได้จากการจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาถ่านหิน.....	291
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	292
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	292

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.1.1 สรุปผลการจำลองการไหลเทียบผลในเจ็ทบี้ม.....	292
7.1.2 สรุปผลการจำลองเทียบผลการเผาไหม้ถ่านหินใน Pulverized coal burner.....	292
7.1.3 สรุปผลการจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาถ่านหิน.....	293
7.2 วิจัยผลการศึกษาจำลองและข้อเสนอแนะ.....	294
7.2.1 วิจัยผลการศึกษาจำลองและข้อเสนอแนะการจำลองการไหลเทียบผลในเจ็ทบี้ม.....	294
7.2.2 วิจัยผลการศึกษาจำลองเทียบผลและข้อเสนอแนะการจำลองเทียบผล การเผาไหม้ถ่านหิน Pulverized coal burner.....	294
7.2.3 วิจัยผลการศึกษาจำลองและข้อเสนอแนะการจำลอง การเผาไหม้ของหัวเผาถ่านหิน.....	294
บรรณานุกรม.....	296
ภาคผนวก.....	307
ภาคผนวก ก. ตารางแจกแจงการกระจายขนาดและอัตราการไหลของอนุภาคถ่านหิน.....	308
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	310
ประวัติผู้เขียน.....	320

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สมการควบคุมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียนอัดตัวได้.....	27
4.1 อัตราคงที่สำหรับเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำที่แตกต่างกัน.....	112
4.2 กลไกการลดรูป 7 ขั้นตอนของยูเรียสำหรับ SNCR.....	115
4.3 กระบวนการสูญเสียของยูเรีย 2 ขั้นตอน.....	115
4.4 กลไกการลดรูปแล้ว 8 ขั้นตอนหลัก (อัตราการเกิดปฏิกิริยา = $AT^b \exp(-E/RT)$).....	125
4.5 ตารางแสดงการกำหนดกฎการแลกเปลี่ยนมวลและความร้อนสำหรับแต่ละประเภทของอนุภาค.....	140
4.6 ตัวแปรของโครงสร้างเคมีสำหรับ ^{13}C NMR สำหรับถ่านหิน 13 ประเภท.....	154
5.1 ค่าเงื่อนไขขอบที่ใช้คำนวณการไหลในเจ็ทบีม.....	169
5.2 กรณีสองกรณี 105 กรณี ที่ใช้ในการคำนวณ.....	171
5.3 ค่าเงื่อนไขขอบที่ใช้คำนวณการเผาไหม้ถ่านหิน.....	173
5.4 เงื่อนไขสมรรถนะที่ใช้กำหนดการออกแบบหัวเผาถ่านหิน.....	177
5.5 จำนวนกรณีและเงื่อนไขที่ศึกษาช่วงการทำงานของหัวเผาถ่านหิน.....	179
5.6 ค่าเงื่อนไขขอบที่ใช้คำนวณการทำงานของหัวเผาถ่านหินทั้ง 2 กรณี.....	179

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของสารองค์ประกอบในกระบวนการกลายเป็นถ่านหิน.....	7
2.2 การเผาไหม้ของถ่านหินผง.....	9
2.3 แบบจำลองการเผาไหม้ซาร์.....	10
3.1 ชั้นส่วนของของไหลสำหรับกฎการอนุรักษ์.....	12
3.2 การไหลของมวลเข้าและออกชั้นส่วนของไหล.....	13
3.3 องค์ประกอบของความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทาง ของชั้นส่วนของไหล.....	17
3.4 องค์ประกอบของความเค้นในทิศทาง x	17
3.5 องค์ประกอบของเวกเตอร์ฟลักซ์ความร้อน.....	20
3.6 การแผ่รังสีถ่ายเทความร้อน.....	37
3.7 ระบบพิกัดเชิงมุม.....	42
3.8 ผิวที่ไม่เกินมุมควบคุม.....	42
3.9 ผิวที่เกินมุมควบคุม.....	42
3.10 ผิวที่เกินมุมควบคุม (3 มิติ).....	43
3.11 Pixelation ของมุมควบคุม.....	43
3.12 การแผ่รังสี DO บนผนังที่บดแสง.....	45
3.13 การแผ่รังสีแบบ DO บนผนังกึ่งโปร่งแสงภายใน.....	48
3.14 การสะท้อนและหักเหของการแผ่รังสีที่ผิวร่วมระหว่างตัวกลางโปร่งแสงทั้งสอง.....	49
3.15 มุมวิกฤติ θ_c	50
3.16 เอเรดิเอชัน DO บนผนังกึ่งโปร่งแสงภายนอก.....	52
3.17 ความกว้างและทิศทางของลำแสงสำหรับลำแสงเอเรดิเอชันภายนอก.....	54
4.1 ความสัมพันธ์ของ f_{fuel} , f_{sec} และ f_{ox}	62
4.2 ความสัมพันธ์ของ f_{fuel} , f_{sec} และ p_{sec}	62
4.3 อธิบายโดยรูปของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น, $p(f)$	67
4.4 ตัวอย่างของรูปร่าง Double Delta Function PDF.....	69
4.5 ความเชื่อมโยงของค่าเฉลี่ย $\bar{\phi}$, บน \bar{f} , $\overline{f'^2}$ และแบบจำลองเคมี (แอเดียบาติกและระบบ single-mixture-fraction).....	70

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย $\bar{\phi}_i$ บน \bar{f} , $\overline{f'^2}$, \bar{H} , และแบบจำลองเคมี (นอนแอดคีย์เบติกและระบบ single-mixture-fraction).....	71
4.7 ระบบปฏิกิริยาที่ต้องใช้แบบจำลองนอนแอดคีย์เบติก Non-Premixed.....	72
4.8 แสดงถึงการอธิบายตารางค้นหาสำหรับปริมาณ $\bar{\phi}_i$ ที่เป็นฟังก์ชันของ \bar{f} และ $\overline{f'^2}$ ในระบบแอดคีย์เบติกของ single-mixture fraction.....	73
4.9 แสดงถึงการอธิบายตารางค้นหาสำหรับปริมาณ $\bar{\phi}_i$ เป็นฟังก์ชันของ f_{fuel} ในระบบแอดคีย์เบติกของ two-mixture-fraction.....	74
4.10 แสดงถึงการอธิบายตารางค้นหาสำหรับปริมาณ $\bar{\phi}_i$ ที่เป็นฟังก์ชันของ \bar{f} และ $\overline{f'^2}$ และค่าการสูญเสีย/เพิ่มความร้อนในระบบนอนแอดคีย์เบติกของ single-mixture fraction.....	75
4.11 แสดงถึงการอธิบายตารางค้นหาสำหรับปริมาณ $\bar{\phi}_i$ เป็นฟังก์ชันของ f_{fuel} , P_{sec} และค่าการสูญเสีย/เพิ่มความร้อนในระบบนอนแอดคีย์เบติกของ two-mixture-fraction.....	76
4.12 ระบบเชื้อเพลิงที่สามารถจำลองผลได้เมื่อใช้ single-mixture fraction.....	79
4.13 การกำหนดระบบทางเคมีซึ่งสามารถจำลองผลโดยใช้ two-mixture fraction.....	80
4.14 ระบบ Premixed ที่ไม่สามารถจำลองผลโดยใช้แบบจำลอง Non-Premixed.....	80
4.15 ใช้แบบจำลอง Non-Premixed กับแก๊สไอเสีย.....	82
4.16 เส้นทางปฏิกิริยาการเกิด Fuel NOx จากไนโตรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา.....	96
4.17 เส้นทางปฏิกิริยาการเกิด Fuel NOx จากไฮโดรไซยาไนด์ (HCN) ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา.....	97
4.18 เส้นทางปฏิกิริยาการเกิด Fuel NOx จากแอมโมเนีย (NH3) ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา.....	99
4.19 Coal Fuel NOx Scheme A.....	102
4.20 Coal Fuel NOx Scheme B.....	103
4.21 Coal Fuel NOx Scheme C.....	105
4.22 Coal Fuel NOx Scheme D.....	106
4.23 กลไก NOx ของ De Soete's กับเส้นทางการลด NOx.....	110
4.24 กลไกปฏิกิริยาที่เรียบง่ายสำหรับกระบวนการ SNCR.....	114
4.25 ทางเดินปฏิกิริยาถ่านหิน.....	150

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26	สภาวะขอบเขตของ "Wall Jet" สำหรับช่วงที่ไม่ต่อเนื่อง.....162
4.27	การถ่ายเทความร้อน, มวลและ โมเมนตัมระหว่างช่วงที่ต่อเนื่องและช่วงที่แยกตัว.....163
4.28	ผลกระทบของจำนวนการอัพเดทค่าบนพจน์แหล่งกำเนิดที่ใช้ในสมการการไหล.....166
5.1	แสดงขนาดของเจ็ทปี้มที่ใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์.....169
5.2	แสดงโดเมนและ Boundary condition ของเจ็ทปี้มที่ใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์.....169
5.3	โครงสร้างหัวเผาในห้องเผาไหม้.....172
5.4	ลักษณะของกริดที่ใช้ในการคำนวณการเผาไหม้ถ่านหิน.....172
5.5	ลักษณะของกริดที่บริเวณหัวฉีดของห้องเผาไหม้.....172
5.6	ลักษณะและขนาดของหัวเผาถ่านหิน.....178
5.7	ส่วนประกอบต่างๆ ของหัวเผาถ่านหิน.....178
5.8	หัวเผาถ่านหินในมุมมอง Isometric.....179
5.9	หัวเผาถ่านหินที่ไม่มีท่อหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (front view).....184
5.10	หัวเผาถ่านหินที่ไม่มีท่อหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (isometric view).....184
6.1	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันที่อัตราส่วน $d/D = 0.5$185
6.2	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันที่อัตราส่วน $d/D = 0.6$185
6.3	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันที่อัตราส่วน $d/D = 0.7$186
6.4	แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ.....186
6.5	แสดงการกระจายอุณหภูมิในเจ็ทปี้ม.....186
6.6	การกระจายความเร็วในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner.....187
6.7	การกระจายความเร็วที่บริเวณใกล้หัวฉีดของห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner.....187
6.8	เวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณ ใกล้หัวฉีดของห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner.....187
6.9	เวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณ ใกล้หัวฉีดของห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner [18].....188
6.10	การกระจายของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner.....188
6.11	การกระจายของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner [18].....188
6.12	การกระจายอุณหภูมิที่บริเวณ ใกล้หัวฉีดของห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner.....189
6.13	การกระจายอุณหภูมิที่บริเวณ ใกล้หัวฉีดของห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner [18].....189

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.14 (a) การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner [116].....	190
6.14 (b) การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner.....	190
6.15 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหยในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner.....	190
6.16 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหยในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner [18].....	191
6.17 การกระจายตัวของความเข้มข้นของออกซิเจนในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner.....	191
6.18 การกระจายตัวของความเข้มข้นของออกซิเจนในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner [18]..	192
6.19 การกระจายตัวของความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner.....	192
6.20 การกระจายตัวของความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner [18].....	193
6.21 ตัวอย่างผลการจำลอง.....	196
6.22 การกระจายความเร็วในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	197
6.23 การกระจายความเร็วในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	198
6.24 การกระจายความเร็วในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	199
6.25 การกระจายความเร็วในหัวเผาถ่านหินกรณี ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	200
6.26 อัตราการระเหยของสารระเหยในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	202
6.27 อัตราการระเหยของสารระเหยในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	203
6.28 อัตราการระเหยของสารระเหยในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	204
6.29 อัตราการระเหยของสารระเหยในหัวเผาถ่านหินกรณี ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	205
6.30 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากสารระเหย ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	207
6.31 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากสารระเหย ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	208
6.32 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากสารระเหย ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	209

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.33 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากสารระเหยในหัวเผาถ่านหิน กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	210
6.34 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากคาร์บอน ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	212
6.35 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากคาร์บอน ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	213
6.36 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากคาร์บอน ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	214
6.37 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากคาร์บอนในหัวเผาถ่านหิน กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	215
6.38 อัตราการเผาไหม้ของสารระเหยและคาร์บอนในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	217
6.39 อัตราการเผาไหม้ของสารระเหยและคาร์บอนในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	218
6.40 อัตราการเผาไหม้ของสารระเหยและคาร์บอนในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	219
6.41 อัตราการเผาไหม้ของสารระเหยและคาร์บอนในหัวเผาถ่านหิน กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	220
6.42 การกระจายตัวของอุณหภูมิในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	222
6.43 การกระจายตัวของอุณหภูมิในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	223
6.44 การกระจายตัวของอุณหภูมิในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	224
6.45 การกระจายตัวของอุณหภูมิในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	225
6.46 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	227
6.47 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	228
6.48 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	229
6.49 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนในหัวเผาถ่านหิน กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	230
6.50 การกระจายความเข้มข้นของออกซิเจนในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	232
6.51 การกระจายความเข้มข้นของออกซิเจนในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	233

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.52 การกระจายความเข้มข้นของออกซิเจนในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	234
6.53 การกระจายความเข้มข้นของออกซิเจนในหัวเผาถ่านหิน กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	235
6.54 อัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของแอมโมเนีย ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	237
6.55 อัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของแอมโมเนีย ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	238
6.56 อัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของแอมโมเนีย ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	239
6.57 อัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหิน กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	240
6.58 การกระจายความเข้มข้นของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	242
6.59 การกระจายความเข้มข้นของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	243
6.60 การกระจายความเข้มข้นของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	244
6.61 การกระจายความเข้มข้นของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหิน กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	245
6.62 อัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของไฮโดรเจนไซยาไนด์ ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	247
6.63 อัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของไฮโดรเจนไซยาไนด์ ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	248
6.64 อัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของไฮโดรเจนไซยาไนด์ ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	249
6.65 อัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของไฮโดรเจนไซยาไนด์ ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	250
6.66 การกระจายความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	252
6.67 การกระจายความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	253

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.68 การกระจายความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	254
6.69 การกระจายความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	255
6.70 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Fuel NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	257
6.71 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Fuel NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	258
6.72 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Fuel NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	259
6.73 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Fuel NO ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	260
6.74 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Prompt NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	262
6.75 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Prompt NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	263
6.76 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Prompt NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	264
6.77 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Prompt NO ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	265
6.78 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Thermal NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	267
6.79 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Thermal NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	268
6.80 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Thermal NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	269
6.81 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Thermal NO ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	270
6.82 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	272
6.83 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	273
6.84 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	274
6.85 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	275

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.86 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	277
6.87 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	278
6.88 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	279
6.89 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	280
6.90 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	282
6.91 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	283
6.92 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	284
6.93 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	285
6.94 การกระจายความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70.....	287
6.95 การกระจายความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68.....	288
6.96 การกระจายความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66.....	289
6.97 การกระจายความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย.....	290
6.98 Power output ที่ได้ในแต่ละกรณี.....	291

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_{BET}	BET พื้นที่ผิว, m^2/kg
A_p	พื้นที่ผิวของอนุภาค, m^2
a	สัมประสิทธิ์ดูดซับ, m^{-1}
a	ลำดับปฏิกิริยาออกซิเจน
C_D	สัมประสิทธิ์แรงลาก
$C_{i,s}$	ความเข้มข้น ไอที่ผิวของหยดของเหลว, $kgmol/m^3$
$C_{i,\infty}$	ความเข้มข้นเนื่องจากขนาดของก๊าซ, $kgmol/m^3$
c_p	ความจุความร้อนของอนุภาค, $J/kg-K$
c_{pg}	ความจุความร้อนของสปีชีส์ของก๊าซผลิตภัณฑ์, $J/kg-K$
c_{pp}	ความจุความร้อนของอนุภาค, $J/kg-K$
c_s	ความเข้มข้นของอนุภาค, kg/m^3
$D_{i,m}$	สัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายของไอ, m^2/s
d_p	เส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค, m
F_D	แรงลาก, N
F_s	สัมประสิทธิ์รูปร่างอนุภาค
G	การแผ่รังสี, W/m^2
H_{lat}	ความร้อนแฝงที่อุณหภูมิจุดเดือด, J/kg
h	เอนทาลปีสัมผัส, $kJ/kmol$
I	ความเข้มข้นของการแผ่รังสี
k	ค่าความนำความร้อน, $W/m.K$
k_c	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, m/s
L_e	eddy length scale
L_s	subgrid length scale
m_a	ปริมาณเชื้อเพลิงในอนุภาค, kg
m_p	มวลขณะปัจจุบัน, kg
\dot{m}_p	อัตราการไหลของมวลของอนุภาค, kg/s

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$m_{p,0}$	มวลขณะเริ่มต้นของอนุภาค, kg
$\dot{m}_{p,0}$	อัตราการไหลของมวลเริ่มต้นของการฉีดอนุภาค, kg/s
m_{pin}	มวลของอนุภาคบนเซลล์ที่เข้ามา, kg
m_{pout}	มวลของอนุภาคบนเซลล์ที่ออกไป, kg
N_i	โมลฟลักซ์ของไอ, $\text{kgmol/m}^2\text{-s}$
n	ดัชนีการสะท้อน
n	จำนวนอะตอมของคาร์บอนต่อ โมเลกุล
Pr	พลาตันดัมเบอร์
p	ความดัน, Pa
p_{sat}	ความดัน ไออิ่มตัว, Pa
\bar{p}_{NO}	ความดันบางส่วนเฉลี่ยของ NO, Pa
R	ค่าคงที่ก๊าซสากล, J/K mol
Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์
s	ความยาวเส้นทาง, m
S_c	อัตราการเผาไหม้ถ่าน, kg/s
Sc	Schmidt number, $\frac{\mu}{\rho D_{i,m}}$
Sc_t	turbulent Schmidt number
S_{NO-3}	อัตราการบริโภค NO, $\text{kg/m}^3\text{-s}$
$S_{p1,HCN}$	แหล่งกำเนิดของ HCN, $\text{kg/m}^3\text{-s}$
S_{pli}	แหล่งกำเนิดของ i , ซึ่ง $i = SO_2$ หรือ H_2S , $\text{kg/m}^3\text{-s}$
S_{vol}	แหล่งกำเนิดของสารระเหยที่กำเนิดขึ้นจากอนุภาคถ่านหินในสถานะก๊าซ, kg/s
T	อุณหภูมิ, K
\bar{T}	อุณหภูมิเฉลี่ย, K
T_{bp}	อุณหภูมิจุดเดือด, K
T_p	อุณหภูมิอนุภาค, K

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

T_{pin}	อุณหภูมิของอนุภาคบนเซลล์ที่เข้ามา, K
T_{pout}	อุณหภูมิของอนุภาคบนเซลล์ที่ออกไป, K
T_{vap}	อุณหภูมิการระเหยเป็นไอ, K
u	ความเร็วของไหล, m/s
u_p	ความเร็วอนุภาค, m/s
V	ปริมาตรเซลล์, m^3
X	สัดส่วนโมล
$Y_{N,char}$	สัดส่วนมวลในโตรเจนในถ่าน
$Y_{N,fuel}$	สัดส่วนมวลของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง
$Y_{N,vol}$	สัดส่วนมวลของไนโตรเจนในสารระเหย
$Y_{S,fuel}$	สัดส่วนมวลของกำมะถันในเชื้อเพลิง
$Y_{S,vol}$	สัดส่วนมวลของกำมะถันในสารระเหย
α_1, α_2	อีลด์แฟกเตอร์
ϵ_p	สัมประสิทธิ์แผ่รังสีของอนุภาค
κ	สัมประสิทธิ์การดูดซับ, m^{-1}
λ	เส้นทางอิสระเฉลี่ยของโมเลกุล, m
μ	ความหนืดของของไหล, kg/m.s
μ_t	turbulent viscosity, kg/m.s
ρ	ความหนาแน่น, kg/m^3
ρ_p	ความหนาแน่นของอนุภาค, kg/m^3
σ	ค่าคงที่สเตฟาน-โบลซ์แมน, $5.669 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$
σ^2	ความแปรปรวน
σ_s	สัมประสิทธิ์การกระเจิง, m^{-1}
Φ	ฟังก์ชันเฟส
\emptyset	อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศโดยมวล
R_{cf}	ขอบเขตอัตราปฏิกิริยาเฉลี่ยของเชื้อเพลิง, $kg/m^3 \cdot s$

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของ HCN, s^{-1}

\mathcal{R}_3 อัตราการลดลงของ NO, $gmol/m^2BET - s$



บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้ผลิตพลังงานเพื่อใช้กับโรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรมและการใช้ภายในครัวเรือน และยังเป็นแหล่งพลังงานที่มีปริมาณสำรองมากเป็นอันดับหนึ่ง และกระจายอยู่ตามภูมิภาคต่างๆ ทั่วโลก จึงทำให้ราคาค่อนข้างต่ำและมีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงมีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงมากกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ โดยในปี พ.ศ. 2538 การผลิตไฟฟ้าทั่วโลกจากถ่านหินมีปริมาณ 1,032 ล้านเมกะวัตต์ หรือคิดเป็นร้อยละ 34 ของปริมาณการผลิต และจากการคาดการณ์ขององค์การพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency : IEA) คาดการณ์ว่าจะมีการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินเพิ่มขึ้นเป็น 1,760 ล้านเมกะวัตต์ ในปี พ.ศ. 2563 นอกจากการผลิตไฟฟ้าแล้วยังมีการใช้ถ่านหินในการให้ความร้อนแก่ระบบต่างๆ โดยการเผาไหม้ถ่านหินจะปลดปล่อยมลภาวะทางอากาศหลายชนิด เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx), ซัลเฟอร์ออกไซด์ (SOx) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โดยในการศึกษาวิจัยนี้ได้ศึกษาการลดการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ซึ่งการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จาก ภาคอุตสาหกรรม ภาคธุรกิจ และ ที่อยู่อาศัยคิดเป็น 22% จากการผลิตทั้งหมด โดยหัวเผาที่ปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ต่ำที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดใหญ่ โดยส่วนใหญ่ใช้น้ำมันหัวเผา (Burner) ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งมีเทคโนโลยีที่สูงกว่าอาจจะทำให้ผู้ประกอบการรายเล็กที่มีองค์ความรู้ไม่มากนักอาจจะใช้เครื่องมือนี้ได้อย่างไม่ถูกต้องนักและตัวหัวเผาเองอาจจะไม่เหมาะกับชนิดของถ่านหินภายในประเทศ อีกทั้งตัวหัวเผายังมีราคาสูงอีกด้วย เป็นผลให้ต้นทุนของผู้ประกอบการสูงขึ้น เพื่อที่จะลดต้นทุนของผู้ประกอบการให้ต่ำลง การออกแบบหัวเผาถ่านหินที่ประกอบจากวัสดุที่หาได้ภายในประเทศและมีเทคโนโลยีที่เรียบง่ายใช้น้ำมัน สามารถช่วยประหยัดต้นทุนในการประกอบการ อีกทั้งยังช่วยลดการไหลออกของเงินตราไปยังต่างประเทศและส่งเสริมธุรกิจภายในประเทศอีกด้วย

1.2. วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา

การศึกษาเชิงคำนวณเพื่อออกแบบตัวหัวเผาถ่านหินที่นำก๊าซไอเสียมาหมุนเวียนเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ต่ำ ที่ออกแบบอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีการออกแบบเจ็ทปั๊ม (Jet Pump) และบนทฤษฎีการเผาไหม้ของถ่านหิน โดยทั้งหมดนี้จะศึกษาและคำนวณโดยใช้โปรแกรมคำนวณเชิงพลศาสตร์ (CFD)

1.3. สมมุติฐานของการศึกษา

ในการวิจัยครั้งนี้จะตั้งสมมุติฐานไว้ว่าการหมุนเวียนก๊าซไอเสียในห้องเผาไหม้นั้น จะช่วยลดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) เมื่อเปรียบเทียบกับการเผาไหม้ที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

1.4. ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษา โดยใช้โปรแกรมทาง CFD แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

1. ศึกษาทฤษฎีและคำนวณการไหลของอากาศที่มีอุณหภูมิเท่ากัน (Isothermal) และอุณหภูมิที่ไม่เท่ากัน (Non-Isothermal) ภายในเจ็ทปั๊ม (Jet Pump) โดยมีการเทียบผลกับการคำนวณก่อนหน้านี้ [17] เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและนำค่าสภาวะ (Boundary Condition) ที่หาได้จากการคำนวณเปรียบเทียบ นำไปกำหนดใช้ในการคำนวณการเผาไหม้ภายในหัวเผาถ่านหินต่อไป (หัวข้อ 5.2.1)

2. ศึกษาทฤษฎีและคำนวณการเผาไหม้ถ่านหิน โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณการเผาไหม้กับผลการคำนวณก่อนหน้านี้ [18,19,116] เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และนำค่าสภาวะที่หาได้จากการคำนวณเปรียบเทียบ นำไปกำหนดใช้ในการคำนวณการเผาไหม้ภายในหัวเผาถ่านหินต่อไป (หัวข้อ 5.2.2)

3. ออกแบบหัวเผาถ่านหินโดยอ้างอิงลักษณะจากรูปร่างของเจ็ทปั๊ม โดยขนาดของหัวเผาจะขึ้นกับผลการคำนวณที่ได้ในขั้นตอนที่ 1, 2 และอัตราการไหลและ Power Output ที่ต้องการ (หัวข้อ 5.2.3)

4. คำนวณหาช่วงการทำงานของหัวเผาถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย โดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง อัตราการไหลหลัก : อัตราการไหลรอง (Primary Mass Flow Rate : Secondary Mass Flow Rate)(อัตราการไหลที่หัว Nozzle : อัตราการไหลที่ Swirl ports) เพื่อหาช่วงการเผาไหม้ของหัวเผาที่มีเสถียรภาพ (หัวข้อ 5.2.4)

5. คำนวณการทำงานของหัวเผาถ่านหินแบบไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ กับหัวเผาถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (หัวข้อ 5.2.5)

1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของหัวเผาถ่านหินได้

2. สามารถนำหัวเผาถ่านหินที่ออกแบบได้นำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหรือในด้านอื่นๆ ได้
3. การนำก๊าซไอเสียมาหมุนเวียนในห้องเผาไหม้จะช่วยลดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) เมื่อเทียบกับการเผาไหม้ที่ไม่มีการนำก๊าซไอเสียมาหมุนเวียน
4. เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการศึกษาปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ต่ำจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านหิน หรือเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

2.1. บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาในเรื่องการเผาไหม้ถ่านหินในลักษณะต่างๆ โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ มาเป็นเครื่องมือในการศึกษาอีกชั้นหนึ่ง โดยมีข้อได้เปรียบเหนือกว่าการทดลอง อาทิเช่น ในกรณีที่บางบริเวณเครื่องมือวัดไม่สามารถเข้าถึง และสามารถแสดงผลได้หลายมุมมอง เป็นต้น

2.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J.M. Heikkinen, B.C.H. Venneker, G. di Nola, W. de Jong and H. Spliethoff. (2008) [12] จำลองผลการเผาไหม้ระหว่างถ่านหินผงกับเศษกระดูกไก่และกระดูกเนื้อป็น โดยแสดงให้เห็นว่าพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ FLUENT สามารถคำนวณการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ไม่จำเป็นต้องเป็นถ่านหินและมืองค์ประกอบธาตุเท่าใดก็ได้

K.-D. Tiggesa, F. Klaukea, C. Berginsa, K. Busekrusa, J. Niesbacha, M. Ehmann, C. Kuhra, F. Hoffmeistera, B. Vollmera, T. Buddenberga, Song Wub and Allan Kukoskib. (2009) [13] ได้ศึกษาเทคโนโลยีการเผาไหม้ถ่านหินในสเกลที่ใหญ่ของ โรงไฟฟ้าถ่านหิน โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างการเผาไหม้ภายใต้สภาวะ oxyfuel-fired และ air-fired ประกอบกับที่ Burner มี Swirler ประกอบอยู่ด้วย ทำให้อากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้เกิดการหมุนวนทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้ คล้ายคลึงกับผลที่ได้จากการจำลองเทียบผลของผู้จัดทำวิทยานิพนธ์

Lasse A. Rosendahl, Chungun Yin, Søren K. Kær, Klaus Friborg and Peter Overgaard. (2007) [14] ศึกษาการเผาไหม้ของเส้นเศษฟางข้าวเดนมาร์ก พบว่ากระบวนการเผาไหม้ที่บริเวณปากของ burner ที่มีหลายรูนั้นคล้ายคลึงกับผลที่ได้จากการจำลองเทียบผลของผู้จัดทำวิทยานิพนธ์

C.N. Eastwick, S.J. Pickering and A. Aroussi. (1999) [15] เปรียบเทียบโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ระหว่าง FLUENT และ FLOW3D 3.2 (CFX) โดยอ้างอิงกับผลการทดลองของ Aerodynamically Air Staged Burner (AASB) ขนาด 2.5 MW ซึ่งได้เปรียบเทียบในส่วน ความเร็ว, อุณหภูมิ, และความเข้มข้นของสปีชีส์ ซึ่งทั้งสองโปรแกรมนั้นให้ผลการคำนวณที่ต่างกันเล็กน้อย โดยสรุปแล้วทั้งสอง โปรแกรมได้ให้ผลการคำนวณที่มีแนวโน้มไปในทางที่ดี

N. Schaffel, M. Mancini, A. Szlek and R. Webber. (2009) [16] แนะนำการเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับในแต่ละส่วนของโมเดล เช่น แบบจำลอง P1 หรือ Discrete Ordinate สำหรับการแผ่รังสี แบบจำลอง standard $k - \epsilon$ สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน เป็นต้น

Changdong Sheng, Behdad Moghtaderi, Rajender Gupta and Terry F. Wall. (2004) [116] ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของถ่านหินผงที่มีส่วนผสมต่างกัน โดยใช้ตาราง PDF สองตารางร่วมกัน โดยการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนห้องเผาไหม้มีลักษณะใกล้เคียงกับผลการจำลองเทียบผลของผู้จัดทำวิทยานิพนธ์

R. P. van der Lans, P. Glarborg and K. Dam-Johansen. (1997) [118] ศึกษาผลกระทบค่า parameter ที่ส่งผลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินผงที่มี power output ที่ 100 kW พบว่าผลกระทบของแต่ละ parameter นั้นส่งผลต่อความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่วัดได้มีค่าตั้งแต่ 200-2,800 ppm

Shan Xue, Shi'en Hui, Taisheng Liu, Qulan Zhou, Tongmo Xu and Hongli Hu. (2009) [119] ทดลองเกี่ยวกับตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการใช้ไนโตรเจนออกไซด์ของการเผาไหม้ถ่านหินที่เตาขนาด 1 MW พบว่า อัตราส่วนอากาศปฐมภูมิ, ทุติยภูมิ, swirl number และส่วนผสมในถ่านหินล้วนส่งผลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ทั้งสิ้น

Hannes Stadler, Dragisa Ristic, Malte Forster, Anja Schuster, Reinhold Kneer and Gunter Scheffknecht. (2009) [120] ได้ทำการทดลองเพื่อลดไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากการเผาถ่านหินลิกไนต์และซับบีทูนินัส โดยใช้การเผาไหม้แบบ Flameless ซึ่งส่งผลให้ Thermal NO ลดลงและไนโตรเจนออกไซด์ทั้งหมดลดลง 15-17% โดยปริมาตร เมื่อเทียบกับ Swirl Burner มาตรฐาน

Yewen Tana, Eric Croisetb, Mark A. Douglasa and Kelly V. Thambimuthu. (2006) [121] ศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ของถ่านหินกับส่วนผสมระหว่างออกซิเจนกับก๊าซไอเสีย พบว่าเมื่อสัดส่วนของออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นมากตามไปด้วย

H. Nikzat, H. Pak, T. Fuse, Y. Hu, K. Ogyu, N. Kobayashi and M. Hasatani. (2004) [122] ทำการทดสอบการเผาไหม้ถ่านหินที่มีห้องเผาไหม้ลักษณะคล้ายคลึงกับ pulverized coal-air combustion burner โดยผลจากการทดสอบได้ผลการเผาไหม้อยู่ที่ 99.8% ที่ stoichiometric และปริมาณความเข้มข้น CO_2 อยู่ที่ 90% และปริมาณ NO_x อยู่ที่ 1,200-1,400 ppm ในก๊าซไอเสีย

2.3. ถ่านหิน [1,19]

ถ่านหิน (Coal) มีสถานะเป็นของแข็ง ไม่มีรูปผลึกที่แน่นอน โดยทั่วไปมีสีเข้มตั้งแต่สีน้ำตาลถึงดำสนิท ประกอบด้วยคาร์บอน สารระเหย ความชื้น และแร่ธาตุต่างๆ ในปริมาณน้อย ถ่านหินเป็น

ทรัพยากรธรรมชาติที่มีคุณค่ามากเพราะเป็นแหล่งพลังงานสำคัญ และสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้เป็นอย่างดี ถ่านหินเกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่ใช้เวลาหลายล้านปีของซากพืชภายใต้ความดันและความร้อนจนกลายเป็น พีต (Peat) ลิกไนต์ (Lignite) ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) บิทูมินัส (Bituminous) และแอนทราไซต์ (Anthracite) ตามลำดับ ถ่านหินตามแหล่งต่างๆ ในโลกนี้จึงมีคุณสมบัติแตกต่างกับขึ้นอยู่กับชนิดของซากพืช อายุการเปลี่ยนแปลงและสภาพสิ่งแวดล้อมตามแหล่งที่เกิด การจำแนกถ่านหินมีหลายระบบที่ใช้กันมาก ได้แก่ การจำแนกถ่านหินตามศักดิ์ (Rank) ค่าศักดิ์เป็นการวัดความสมบูรณ์ของการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาที่กลายเป็นถ่านหิน สถาบัน American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้กำหนดค่าคุณสมบัติของถ่านหินเป็นเกณฑ์โดยแยกการจำแนกถ่านหินออกเป็น พีต ลิกไนต์ ซับบิทูมินัส บิทูมินัส แอนทราไซต์ ลักษณะทั่วไปของประเภทถ่านหินที่ได้กล่าวมานี้อาจกล่าวโดยย่อได้ดังนี้

พีต (Peat) เป็นชั้นแรกในกระบวนการเกิดถ่านหิน ประกอบด้วยซากพืชซึ่งบางส่วนได้สลายตัวไปแล้ว แต่ซากพืชบางส่วนยังสลายตัวไม่หมด ยังมองเห็นเป็นลำต้น กิ่ง หรือใบ มีสีน้ำตาลถึงสีดำ มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ประมาณร้อยละ 50-60 โดยมวล มีปริมาณออกซิเจนและความชื้นสูงแต่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

ลิกไนต์ (Lignite) เป็นถ่านหินที่มีสีน้ำตาลผิวค้ำ มีซากพืชหลงเหลืออยู่เล็กน้อย มีคาร์บอนร้อยละ 60-75 มีออกซิเจนค่อนข้างสูง มีความชื้นสูงถึงร้อยละ 30-70 เมื่อติดไฟมีควันและเถ้าถ่านมาก มีความชื้นมาก เป็นถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า บ่มใบยาสูบ

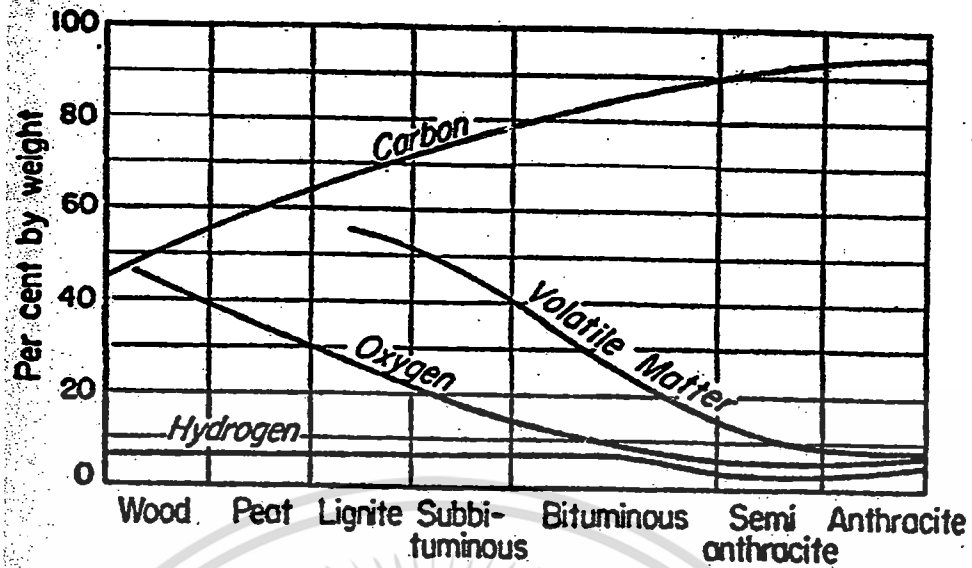
ซับบิทูมินัส (Subbituminous) เป็นถ่านหินที่ใช้เวลาในการเกิดนานกว่าลิกไนต์ มีสีน้ำตาลถึงสีดำ ผิวมีทั้งค้ำและน้ำมัน มีทั้งเนื้ออ่อนและเนื้อแข็ง มีความชื้นประมาณร้อยละ 25-30 มีคาร์บอนสูงกว่าลิกไนต์ เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพเหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้าและงานอุตสาหกรรม

บิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินที่ใช้เวลาในการเกิดนานกว่าซับบิทูมินัส เนื้อแน่น แข็ง มีสีน้ำตาลถึงสีดำสนิท ประกอบด้วยชั้นถ่านหินสีดำมันวาว ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการถลุงโลหะ และเป็นวัตถุดิบเพื่อเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงอื่นๆ

แอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินที่ใช้เวลาในการเกิดนานกว่าบิทูมินัส มีลักษณะดำเป็นเงา มันวาวมาก มีรอยแตกเว้าแบบก้นหอย มีปริมาณคาร์บอนประมาณร้อยละ 90-98 ความชื้นต่ำประมาณร้อยละ 2-5 มีค่าความร้อนสูงแต่ติดไฟยาก เมื่อติดไฟให้เปลวไฟสีน้ำเงิน ไม่มีควัน ใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมต่างๆ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของสารองค์ประกอบในกระบวนการกลายเป็นถ่านหิน [1]

จะเห็นได้ว่าเมื่อกระบวนการกลายเป็นถ่านหิน เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนจะเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์ของสารอื่นจะลดลง

2.3.1 การวิเคราะห์ถ่านหิน [1]

การวิเคราะห์ถ่านหินมีประโยชน์เพื่อ

- ก) การจำแนกถ่านหิน
- ข) การกำหนดราคาถ่านหินตามคุณภาพ
- ค) การควบคุมคุณภาพถ่านหิน
- ง) การเลือกใช้หรือออกแบบอุปกรณ์เผาไหม้
- จ) การคำนวณปริมาณ เช่น ปริมาณถ่านหินและปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้ เป็นต้น

การวิเคราะห์ถ่านหินมีสองแนวทาง คือ การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) โดยการวิเคราะห์แบบประมาณ มักรายงานค่าความร้อน (Calorific value หรือ Heating value) และปริมาณกำมะถัน และยังมี การวิเคราะห์หาปริมาณสารดังต่อไปนี้ คาร์บอนคงตัว สารระเหย ความชื้น ชี้อินทรีย์ ฯลฯ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ไม่ใช่เป็นการวิเคราะห์ที่ทำกันเป็นประจำ แต่เป็นการวิเคราะห์ที่มีประโยชน์ในการจัดประเภทของถ่านหิน และมีประโยชน์ในการคำนวณ เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ เช่น การคำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องการเพื่อการเผาไหม้ ซึ่งจะ

วิเคราะห์หาปริมาณของธาตุดังต่อไปนี้ คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ฯลฯ

ความชื้น (Moisture): ในถ่านหินแบ่งได้เป็น Free moisture และ Inherent moisture ซึ่ง Free moisture เป็นความชื้นส่วนที่ให้เราเห็นว่าถ่านหินนั้นชื้น ถ่านหินที่ชื้นมักเกาะติดกับภาชนะหรือเครื่องมือทำให้การไหลโดยน้ำหนักของมันเองได้ไม่ดี Inherent moisture คือความชื้นที่ยังเหลืออยู่ในถ่านหินหลังจากไล่ Free moisture ออกจากถ่านหินไปแล้ว เราอาจใช้ Inherent moisture เป็นแนวทางบอกระดับของถ่านหินได้ High rank coal มี Inherent moisture น้อยลิกไนต์อาจมี Inherent moisture มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นไม่มีคุณค่าทางด้านการให้ความร้อน ในการเผาไหม้ถ่านหินจะต้องสูญเสียค่าความร้อนเกือบ 0.1 เปอร์เซ็นต์ ต่อทุกๆ 1 เปอร์เซ็นต์ความชื้นในถ่านหิน

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

$$Q = [8080 \times \%C + 34460(\%H_2 - O_2/8) + 2250 \times \%S]/100 \quad (2.1)$$

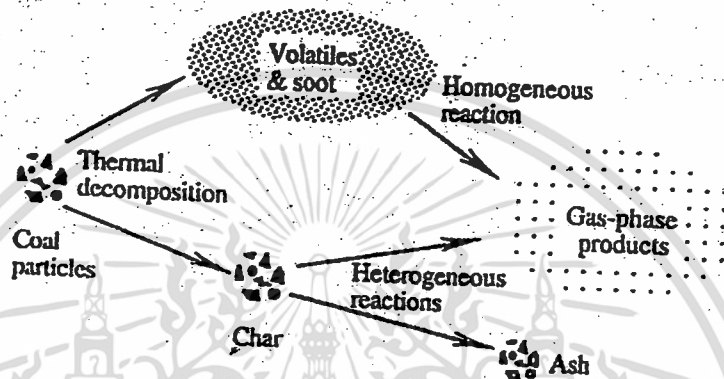
โดยที่ Q คือ ค่าความร้อนทั้งหมดที่มีหน่วยเป็น kcal/kg และ %C, %H₂, %O₂, %S เป็น เปอร์เซ็นต์คาร์บอน, เปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจน, เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนและเปอร์เซ็นต์กำมะถัน ในถ่านหินตามลำดับ Dulong's formula ใช้ประมาณค่าความร้อนทั้งหมดของถ่านหินประเภท High rank ได้แก่ ถ่านหินบิทูมินัส และ แอนทราไซต์ ได้ดี แต่ถ้าใช้กับถ่านหินประเภท Low rank แล้วค่าที่ได้จะไม่ค่อยถูกต้อง

Swelling property: ถ่านหินจำพวก High rank มักจะพองตัว (Swell) ที่อุณหภูมิสูง และ จะเกาะกับก้อนถ่านหินที่อยู่ข้างๆ รวมกันเป็นคาร์บอน ปรากฏการณ์นี้เรียก Agglutination หรือ Coking ถ่านหินพวกนี้เรียกรวมๆ ว่า Swelling หรือ Coking coal ตัวอย่างได้แก่ บิทูมินัส ส่วนถ่านหินพวก Low rank coal จะคงรูปร่างของมันอยู่ได้ที่อุณหภูมิสูง ถ่านหินพวกนี้ได้แก่ ลิกไนต์ และ ซับบิทูมินัส

Ash-fusion temperature: คืออุณหภูมิของขี้เถ้าที่เริ่มหลอม Ash-fusion temperature มีประโยชน์ในการออกแบบหรือเลือกใช้ชนิดของอุปกรณ์เผาไหม้

2.3.2 การเผาไหม้ถ่านหิน [2]

ถ่านหินแต่ละชนิดมีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลให้ชนิดของถ่านหินที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสสาร ช่วงเวลา อุณหภูมิ ฯลฯ ที่ถูกทับถม ถ่านหินแต่ละชนิดมีสสารส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และมีสสารอื่นๆ อีกปริมาณเล็กน้อยคือ ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และโลหะที่อยู่ในขี้เถ้า ถ่านหินผงเมื่อเข้าไปสู่บริเวณการเผาไหม้จะรวมกับออกซิเจน ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเผาไหม้ของถ่านหินผง [2]

2.3.2.1 ความร้อนจากการเผาไหม้ถ่านหิน

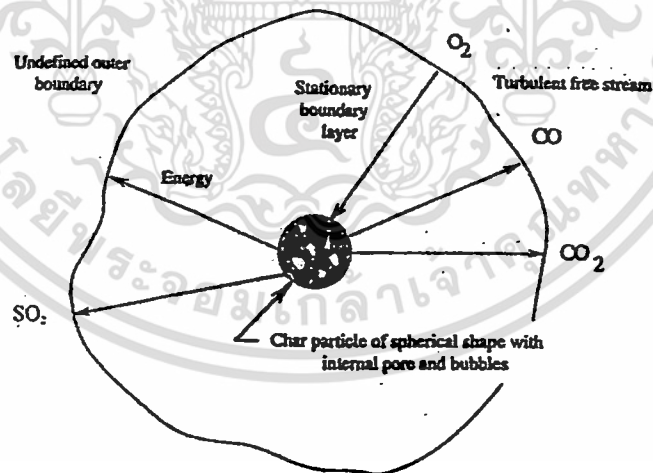
อนุภาคของถ่านหินถูกป้อนเข้าไปในบริเวณห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง ถ่านหินจะติดไฟและเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากการพาความร้อน (Convection) จากก๊าซรอบข้างและ การแผ่รังสีจากเปลวไฟ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิอาจจะสูงถึง 10^4 K/s ภายใต้ภาวะของเตาเผาแบบถ่านหินผง ที่อุณหภูมิเกิน 600 K อนุภาคของถ่านหินจะปลดปล่อยสารระเหย และน้ำมันดิน (Tar) รวมตัวกับออกซิเจน ซึ่งก่อให้เกิดความร้อน ก๊าซ และสสารต่างๆ เช่น คาร์บอน ไดออกไซด์ น้ำ ออกไซด์ของไนโตรเจน ออกไซด์ของกำมะถัน ฯลฯ ของแข็งที่เหลือ คือ ชาร์ (Char) ซึ่งมีสสารประกอบส่วนใหญ่ คือ คาร์บอนและสารไม่ติดไฟมีปริมาณเล็กน้อย ช่วงเวลาของถ่านหินที่ปลดปล่อยสารระเหยอยู่ใน ช่วง 5-100 มิลลิวินาที [3] มีตัวแปรหลายตัวที่ส่งผลกับอัตราการปลดปล่อยสารระเหย เช่น ลักษณะ ห้องเผาไหม้ ชนิดของถ่านหินขนาดของอนุภาค ความร้อนแฝงอุณหภูมิที่ทางออก ความดันของอากาศภายนอก ฯลฯ [4]

2.3.2.2 การเผาไหม้ของสารระเหย

การเผาไหม้ของสารระเหย ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีของสารระเหยพร้อมกับเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมรอบข้าง เช่น อุณหภูมิ องค์ประกอบทางเคมี และความเข้มข้นของก๊าซที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเผาไหม้ ตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอากาศพลศาสตร์ และกระบวนการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้นต้องมีข้อสมมุติอยู่บางประการเช่น ไม่คำนวณผลของอนุภาคเขม่า และการเผาไหม้ของสารระเหยสัมพันธ์กับอัตราการผสมแบบปั่นป่วนของสารระเหยกับออกซิเจน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้สารระเหยสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ 1) แบบจำลองที่อาศัยข้อมูลทางสถิติของการกวัดแกว่งเทอร์บิวเลนซ์ (Turbulent fluctuation) และค่าอัตราการผสม เช่น แบบจำลองที่พัฒนาโดย [5,6] 2) แบบจำลองที่อาศัยอัตราการสลายตัวของกระแสไหลวน (Eddy) โดย [7] แบบจำลองถูกพัฒนาโดยพิจารณาอัตราการแพร่กระจายแบบปั่นป่วนควบคู่กับความเข้มข้นของออกซิเจน สารระเหย และผลผลิตที่ได้จากการเผาไหม้ [8]

2.3.3 การเผาไหม้ซาร์

ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้ของแข็งซาร์ ที่เหลือจากการเผาไหม้ของสารระเหยอย่างกว้างขวาง ซึ่งรายละเอียดสามารถศึกษาได้จากงานวิจัยของ [9]



รูปที่ 2.3 แบบจำลองการเผาไหม้ซาร์ [10]

การเผาไหม้ซาร์เป็นปฏิกิริยาที่แตกต่างจากการเผาไหม้ของสารระเหย ซึ่งการเผาผลาญส่วนใหญ่จะอาศัยเวลาในการเผาไหม้ได้จากรายงานของ [11] เวลาที่เผาไหม้ของซาร์อยู่ในช่วงประมาณ 300 มิลลิวินาที ในทำนองเดียวกันกับการเผาไหม้ของซาร์ก่อให้เกิดปฏิกิริยาหลาย

ชนิดซึ่งไม่สามารถจำลองใช้กับเงื่อนไขง่ายๆ ได้มีการวิเคราะห์แบบจำลองการเผาไหม้ของ
ชาร์โดย [10] แบบจำลองปัจจุบันที่นำมาใช้ของการเผาไหม้ของชาร์ โดยคำนึงถึง 2
กระบวนการ คือ 1) อัตราการกระจายของออกซิเจนและความร้อนผ่านพื้นผิวของอนุภาค
2) อัตราการปฏิกิริยาพลังงานจลนพลศาสตร์ทางเคมี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐานและการถ่ายเทความร้อน

3.1 ทฤษฎีพื้นฐานทาง CFD

3.1.1 กฎการอนุรักษ์ในการเคลื่อนที่ของของไหล

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์สำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน ที่ประกอบด้วย กฎการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน [2] สิ่งนี้ได้นำไปสู่สมการควบคุมของการไหลรวมทั้งเงื่อนไขที่จำเป็น คือ เงื่อนไขเริ่มต้นและที่ขอบ เนื้อหาหลักที่ครอบคลุมในบทนี้ประกอบด้วย

- ระบบสมการ PDEs (Partial Differential Equations) ซึ่งควบคุมการไหลในพิกัดคาร์ทีเซียน (x, y, z)
- สมการสถานะ
- แนวคิดเกี่ยวกับความหนืดในรูปของ Newtonian ซึ่งนำไปสู่สมการ Navier – Stokes
- ความเหมือนกันในเชิงหลักการระหว่างสมการ PDEs ของ การไหลกับสมการการเคลื่อนย้าย (Transport Equations)

3.1.1.1 สมการควบคุมของการไหลและการถ่ายเทความร้อน

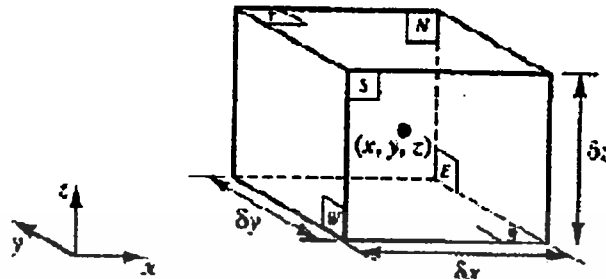
สมการควบคุมของการไหลของของไหลแทนถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ ดังนี้

- มวลของไหลไม่สูญหายไปไหน
- อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล (กฎข้อที่สองของนิวตัน)
- อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับผลรวมของอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนกับอัตราของงานที่กระทำในอนุภาคของไหล (กฎข้อหนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์)

ของไหลจะถูกพิจารณาว่ามีความต่อเนื่องสำหรับการวิเคราะห์การไหลของของไหลที่ระดับมหภาค คือพิจารณาที่สเกลระดับ $1 \mu\text{m}$ ขึ้นไป โครงสร้างและการเคลื่อนที่ระดับไมโครสเกล จึงไม่นำมาพิจารณา เราสนใจที่จะอธิบายพฤติกรรมของไหลในเทอมของคุณสมบัติในระดับมหภาค เช่น ความเร็ว ความดัน ความหนาแน่น อุณหภูมิ รวมทั้งอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเหล่านี้ เป็นต้น สิ่งนี้อาจจะคิดเป็นค่าเฉลี่ยของกลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลจำนวนมาก ดังนั้นจุดใดๆ ในของไหลนั้นจะมีคุณสมบัติของของไหลในระดับมหภาค ไม่ขึ้นกับอิทธิพลจากอนุภาคในระดับโมเลกุล เราพิจารณาชิ้นส่วนของไหลขนาดเล็กที่มีความยาวด้านเท่ากับ δx , δy และ δz ดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ชิ้นส่วนของของไหลสำหรับการอนุรักษ์

ผิวหน้าทั้งหกด้านจะถูกแทนด้วย N, S, E, W, T, B ซึ่งแทนถึงทิศทางในแนวเหนือ ใต้ ตะวันออก ตะวันตก บน และล่าง ตามลำดับ ศูนย์กลางของชิ้นส่วนอยู่ที่ตำแหน่ง (x, y, z) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นระบบของมวล โมเมนตัม และพลังงานของชิ้นส่วนของไหล จะสามารถสร้างสมการไหลของของไหลได้

คุณสมบัติของของไหลทั้งหมดจะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลา ดังนั้นเราจำเป็นต้องเขียน $\rho(x, y, z, t)$, $p(x, y, z, t)$, $T(x, y, z, t)$ และ $U(x, y, z, t)$ สำหรับความหนาแน่น ความดัน อุณหภูมิและเวกเตอร์ความเร็ว ตามลำดับ เพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อนในการเขียนค่าสัญลักษณ์แสดงคุณสมบัติดังกล่าว เราจะไม่ระบุตำแหน่งและเวลา เช่น ความดันที่ศูนย์กลาง (x, y, z) ของชิ้นส่วนของไหลที่เวลา t จะถูกแทนโดย p หรือการเปลี่ยนแปลงในทิศทาง x ของความดันที่ศูนย์กลาง (x, y, z) ที่เวลา t หนึ่งๆ จะถูกแทนโดย $\frac{\partial p}{\partial x}$ หลักการนี้จะถูกนำไปใช้สำหรับคุณสมบัติของไหลทั้งหมด

ชิ้นส่วนของไหลที่พิจารณานั้นมีขนาดเล็กมาก จนกระทั่งคุณสมบัติของไหลที่ผิวหน้าสามารถอธิบายได้อย่างแม่นยำด้วยสองพจน์แรกของสมการ Taylor ดังนั้นสำหรับตัวอย่างความดันที่ผิวหน้า e และ w ซึ่งทั้งคู่มีระยะห่างจากศูนย์กลางของชิ้นส่วนของไหลเท่ากับ $\frac{1}{2}\delta x$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$p - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \cdot \delta x \quad \text{และ} \quad p + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \cdot \delta x$$

3.1.1.1 การอนุรักษ์มวลในปัญหา 3 มิติ

ขั้นตอนแรกของการหาสมการอนุรักษ์มวลคือการพิจารณาถึงสมดุลมวลของชิ้นส่วนของไหลดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลใน} &= \text{อัตราการไหลสุทธิของมวล} \\ \text{ชิ้นส่วนของไหล} &\text{ที่เข้าไปในชิ้นส่วนของไหล} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

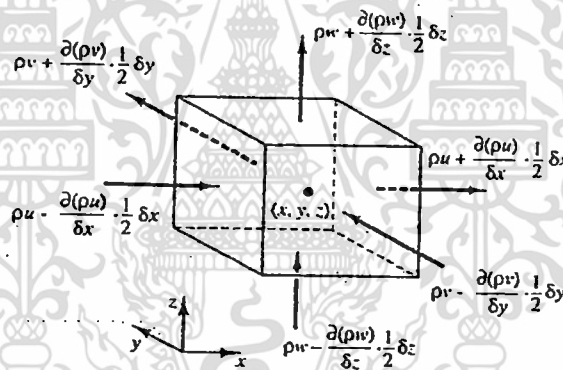
อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชั้นส่วนย่อยของไหลคือ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (3.1)$$

ต่อไปเราจำเป็นต้องหาอัตราการไหลโดยมวลผ่านพื้นผิวและชั้นส่วนย่อยซึ่งถูกให้โดยผลคูณของความหนาแน่น พื้นที่และความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น จากรูปที่ 3.2 จะพบว่า การไหลสุทธิของมวลเข้าสู่ชั้นส่วนย่อยผ่านพื้นผิวสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z \\ & + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\ & + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \end{aligned} \quad (3.2)$$

โดยการไหลเข้าสู่ชั้นส่วนที่ทำให้มวลของชั้นส่วนย่อยเพิ่มขึ้นถูกกำหนดให้เป็นบวก และมีค่าเป็นลบเมื่อมีการไหลออกจากชั้นส่วนย่อย



รูปที่ 3.2 การไหลของมวลเข้าและออกชั้นส่วนของไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลภายในชั้นส่วนย่อยนั้น เท่ากับอัตราของมวลสุทธิจากการไหลออกผ่านพื้นผิวของชั้นส่วนย่อย ซึ่งเมื่อย้ายข้างให้อยู่ในฝั่งเดียวกันเมื่อรวมกันแล้วจะหักล้างกันหมด เทอมทั้งหมดได้ถูกเรียบเรียงทางซ้ายของสมการและถูกหารด้วยปริมาตรของชั้นส่วนย่อย $\delta x \delta y \delta z$ ซึ่งจะได้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

หรือในรูปแบบของเทนเซอร์

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (3.4)$$

สมการ 3.4 นี้ คือสมการอนุพันธ์มวล หรือสมการความต่อเนื่อง 3 มิติ แบบการไหลไม่คงตัวและอัดตัวได้ เทอมแรกทางซ้ายมือคืออัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น (มวลต่อปริมาตร) ต่อเวลา เทอมที่สองอธิบายถึงการไหลสุทธิของมวลข้ามผ่านขอบเขตของปริมาตรเล็กๆนั้น มันจะถูกเรียกเป็นเทอมของการพา

สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (เช่น ของเหลว) ความหนาแน่นมีค่าคงที่และสมการที่ 3.4 จะกลายเป็น

$$\operatorname{div}(U) = 0 \quad (3.5)$$

หรือในรูปแบบเต็ม

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.6)$$

3.1.1.1.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหล ในเทอมของชิ้นส่วนย่อยของไหล

ในกฎของการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานนั้น จะมีการกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหล คุณสมบัติแต่ละอย่างของของไหลจะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง (x, y, z) ของของไหลและเวลา (t) ในการศึกษาที่เรากำหนดให้ค่าคุณสมบัติใดๆ ต่อหน่วยมวล ด้วยสัญลักษณ์ ϕ โดยการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ ϕ เทียบกับเวลาของอนุภาคของไหล $\frac{D\phi}{Dt}$ คือ

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial z} \frac{dz}{dt}$$

และโดยที่ $\frac{dx}{dt} = u$, $\frac{dy}{dt} = v$ และ $\frac{dz}{dt} = w$ หากแทนค่าดังกล่าวไปในสมการข้างบน จะได้ว่า

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + u \frac{d\phi}{dx} + v \frac{d\phi}{dy} + w \frac{d\phi}{dz} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + U \operatorname{grad}\phi \quad (3.7)$$

$\frac{D\phi}{Dt}$ เป็นนิยามของอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ϕ ต่อหน่วยมวล ในกรณีของสมการอนุพันธ์มวล เราสนใจที่จะพัฒนาสมการสำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยปริมาตร อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ϕ สามารถถูกแปลงให้เป็นคุณสมบัติเชิงปริมาตรได้โดยการคูณความหนาแน่น ρ เข้าไปกับเทอม $\frac{D\phi}{Dt}$ ดังนั้น

$$\rho \frac{D\phi}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial\phi}{\partial t} + U \operatorname{grad}\phi \right) \quad (3.8)$$

รูปแบบนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการอธิบายความเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของของไหล ในปริมาตรเล็กๆ ที่หยุดนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งๆ เป็นการนิยามความสัมพันธ์ระหว่าง: 1) อนุพันธ์ของคุณสมบัติ ϕ ของของไหล กับ 2) อัตราเปลี่ยนแปลงและการเคลื่อนย้ายของปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติ ϕ ในชิ้นส่วนหรือในปริมาตรย่อยๆ ของของไหลนั้น

ต่อไปนี้หากเราหันมาพิจารณากฎการอนุรักษ์ของมวล ค่าของมวลต่อหน่วยปริมาตร (ในที่นี้คือ ความหนาแน่น ρ) คือพารามิเตอร์ที่เราากำลังศึกษา เมื่อพิจารณาผลรวมของ: 1) อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นในปริมาตรเล็กๆ และ 2) ผลของการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการพาในสมการอนุรักษ์มวล (3.4) ก็คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U)$$

ดังนั้นรูปทั่วไปของ เทอมทั้งสองเทอมนี้ สำหรับคุณสมบัติใดๆ ของของไหล ϕ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi U) \tag{3.9}$$

สมการที่ 3.9 เทอมแรก คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ ϕ ต่อหน่วยปริมาตรบวกกับเทอมที่สอง คือการไหลสุทธิต่อหน่วยปริมาตรของ ϕ ที่ออกจากชิ้นส่วนย่อยในโดเมนของของไหล ซึ่งเราสามารถนำมาเขียนใหม่ เพื่อให้ได้ภาพความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของทั้งสองเทอมนี้กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ ϕ ของของไหล ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi U) = \rho \left[\frac{\partial\phi}{\partial t} + U \cdot \text{grad}\phi \right] + \phi \left[\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) \right] = \rho \frac{D\phi}{Dt} \tag{3.10}$$

เทอม $\phi \left[\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) \right]$ เท่ากับศูนย์เนื่องจากกฎอนุรักษ์มวล (3.4) จากความสัมพันธ์ดังแสดงใน (3.10) จะได้ว่า

อัตราการเพิ่มของปริมาณที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติ ϕ ในชิ้นส่วนย่อยของไหล	+ อัตราการไหลสุทธิของปริมาณที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติ ϕ ที่ออกจากชิ้นส่วนย่อยของไหล	= อัตราการเพิ่มของคุณสมบัติ ϕ ของของไหล
---	---	--

การเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมของอนุภาคของไหลทั้ง 3 ทิศทาง อ้างอิงแกนในพิกัดฉาก รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานซึ่งเป็นปริมาณสเกลลาร์นั้น สามารถแทนพารามิเตอร์ ϕ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของมันต่อหน่วยปริมาตร ตามที่นิยามไว้ใน (4.8) และ (4.10) สามารถแสดงได้ดังในตารางข้างล่างนี้

x-momentum	u	$\rho \frac{Du}{Dt}$	$\partial \frac{(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U)$
y-momentum	v	$\rho \frac{Dv}{Dt}$	$\partial \frac{(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U)$
z-momentum	w	$\rho \frac{Dw}{Dt}$	$\partial \frac{(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U)$
Energy	E	$\rho \frac{DE}{Dt}$	$\partial \frac{(\rho E)}{\partial t} + \text{div}(\rho E U)$

รูปแบบที่ให้ไว้ในตารางข้างบนนี้จะถูกนำไปใช้ในการสร้างสมการอนุรักษ์โมเมนตัม และพลังงานดังที่จะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดจากนี้

3.1.1.1.3 สมการโมเมนตัมแบบ 3 มิติ

กฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวไว้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหลเท่ากับผลรวมของแรง ที่กระทำต่ออนุภาคของไหล”

อัตราการเพิ่มโมเมนตัม = ผลรวมแรงที่กระทำ
ของอนุภาคของไหล ต่ออนุภาคของไหล

อัตราการเพิ่ม โมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของของไหลในทิศ x, y, z กำหนดโดย

$$\rho \frac{Du}{Dt} \quad \rho \frac{Dv}{Dt} \quad \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (3.11)$$

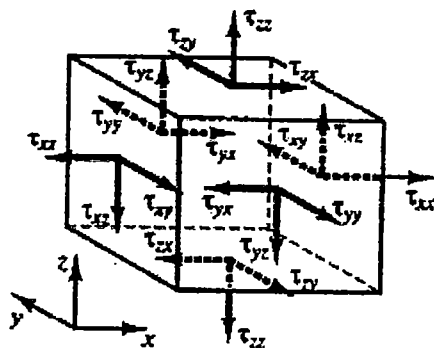
เราแบ่งประเภทของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหลเป็นสองแบบ คือ

- แรงกระทำที่ผิว (Surface forces) ได้แก่ แรงเนื่องจากความดัน แรงเนื่องจากความเค้นเฉือน
- แรงกระทำในปริมาตร (Body forces) ของชิ้นส่วนย่อยของของไหล ได้แก่ แรงโน้มถ่วง แรงหมุนหนีศูนย์กลาง แรงแม่เหล็ก ไฟฟ้า Coriolis Force เป็นต้น

โดยทั่วไปเทอมของแรงกระทำที่ผิวจะถูกจัดกลุ่มแยกออกต่างหาก และเทอมของแรงกระทำภายในปริมาตรจะถูกพิจารณาเป็นเทอมของการเพิ่มและลดโมเมนตัมแยกออกมาอีกเทอมหนึ่ง

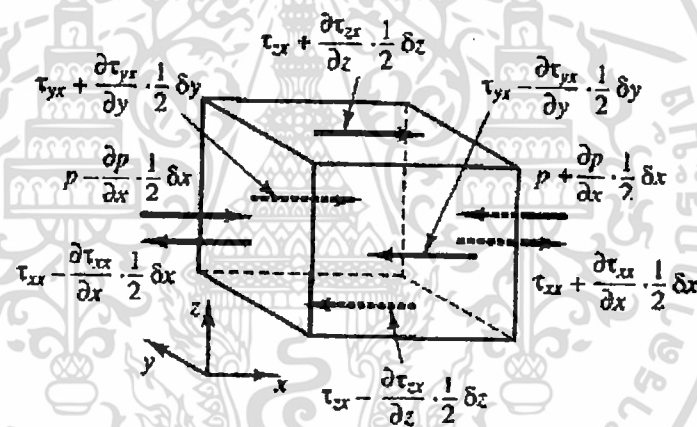
ความเค้นที่กระทำต่อชิ้นส่วนย่อยของของไหล สามารถนิยามได้ด้วยเทอมของความดัน และเทอมความเค้นย่อยเนื่องจากความหนืด μ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ความดันซึ่งมองว่าเป็นความเค้นตั้งฉาก ถูกแทนด้วย p ส่วนความเค้นเฉือนเนื่องจากความหนืดแทนโดย τ สัญลักษณ์ τ_{ij} ถูกประยุกต์ใช้เพื่อชี้ให้เห็นถึงทิศทางของความเค้นเนื่องจากความหนืด ตัวห้อย i และ j ใน τ_{ij} ชี้ให้เห็นถึงความเค้นย่อย ที่กระทำในทิศทาง j บนพื้นที่ที่มีเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง i นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างชัดแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทาง ของชิ้นส่วนของไหล

เริ่มแรกเราพิจารณาแรงกระทำในทิศทาง x เนื่องจากความดันและความเค้นย่อย τ_{xy} , τ_{yz} และ τ_{xx} ดังในรูปที่ 3.4 ขนาดของแรงที่กระทำบนพื้นผิวเกิดจากผลคูณของความเค้นและพื้นที่ และที่มีทิศทางเดียวกับแกนอ้างอิง โดยมีเครื่องหมายบวก และมีค่าเป็นเครื่องหมายลบเมื่อทิศทางตรงข้าม แรงสุทธิในทิศทาง x คือผลรวมของแรงย่อยที่กระทำบนชิ้นส่วนย่อยของไหลในทิศทางดังกล่าว



รูปที่ 3.4 องค์ประกอบของความเค้นในทิศทาง x

เมื่อพิจารณาผิวหน้าที่ E, W เราได้ว่า

$$\begin{aligned} & \left[\left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\ & + \left[- \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\ & = \left(- \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z \end{aligned} \quad (3.12a)$$

แรงสุทธิในทิศทาง x บนผิวหน้า N, S ได้ว่า

$$- \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad (3.12b)$$

แรงสุทธิในทิศทาง x บนผิวหน้า T, B ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z\right) \delta x \delta y + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z\right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (3.12c)$$

ผลรวมแรงต่อหน่วยปริมาตรทั้งหมดเนื่องจากความเค้นที่ผิวหน้าจะเท่ากับผลรวมของ (3.12a), (3.12b) และ (3.12c) ที่หารด้วยปริมาตรสุทธิ

$$\frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (3.13)$$

เทอมที่ปรากฏ ใน 3.13 นี้ยังไม่รวมการพิจารณาแรงกระทำภายในชิ้นส่วนของของไหล ซึ่งสามารถถูกรวมได้โดยการพิจารณาเป็นแหล่งสร้างหรือทำลายโมเมนตัม เป็นหน่วยของโมเมนตัมต่อปริมาตรต่อเวลาในทิศทาง x

ในขั้นตอนนี้สมการ โมเมนตัมในทิศทาง x หาได้โดยการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมในทิศทาง x และ อนุภาคการไหล (3.11) เท่ากับผลรวมของแรงในทิศทาง x ที่กระทำต่อชิ้นส่วนของไหลโดยความเค้นที่ผิว บวกกับอัตราการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนตัมในทิศทาง x เนื่องจากแรงภายในชิ้นส่วนของของไหลนั้นตามแนวแกน x

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (3.14a)$$

ในทำนองเดียวกันโมเมนตัมในทิศทาง y จะเขียนได้ว่า

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (3.14b)$$

และ โมเมนตัมในทิศทาง z คือ

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p+\tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (3.14c)$$

ความดันมีลักษณะเป็นความเค้นอัดตั้งฉาก (Compressive Normal Stress) ซึ่งโดยทั่วไปมีเครื่องหมายเป็นลบ ในกรณีที่มีความเค้นตั้งฉากเนื่องจากความหนืดมีลักษณะเป็นความเค้นดึง (Tensile Normal Stress) จะมีเครื่องหมายบวก

เทอมของการสร้างหรือสูญหายของโมเมนตัม $S_{Mx} = 0$, $S_{My} = 0$ และ $S_{Mz} = 0$ (3.14 a-c) คือแรงกระทำภายในของแต่ละทิศทาง ตัวอย่างเช่นแรงกระทำภายในเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจะถูกกำหนดให้มีค่า

$$S_{Mx} = 0, S_{My} = 0 \text{ และ } S_{Mz} = -\rho g$$

3.1.1.1.4 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ

สมการพลังงานถูกหาได้จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ที่กล่าวไว้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของอนุภาคของไหล เท่ากับอัตราการเพิ่มความดันแก่อนุภาคบวกกับอัตราการทำงานของอนุภาคการไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของของไหลต่อหน่วยปริมาตร คือ

$$\rho \frac{DE}{Dt} \quad (3.15)$$

งานที่กระทำโดยแรงบนพื้นผิว

อัตราการเกิดงานบนพื้นผิวของชิ้นส่วนของไหล จะเท่ากับผลคูณของแรงและความเร็วในทิศทางของแรง สำหรับแรงตามที่แสดงใน (3.12a - c) เฉพาะที่กระทำในทิศทาง x จะเกิดงานเท่ากับ

$$\begin{aligned} & \left[\left(pu - \frac{\partial(pu)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(\tau_{xx}u - \frac{\partial(\tau_{xx}u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \right. \\ & \left. \left(pu + \frac{\partial(pu)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left(\tau_{xx}u + \frac{\partial(\tau_{xx}u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\ & + \left[- \left(\tau_{yx}u - \frac{\partial(\tau_{yx}u)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \left(\tau_{yx}u - \frac{\partial(\tau_{yx}u)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \right] \delta x \delta z \\ & + \left[- \left(\tau_{zx}u - \frac{\partial(\tau_{zx}u)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \left(\tau_{zx}u - \frac{\partial(\tau_{zx}u)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \right] \delta x \delta y \end{aligned}$$

ดังนั้นเมื่อลดรูปแล้ว อัตราการเกิดงานสุทธิบนพื้นผิวเหล่านี้ ในทิศทาง x คือ

$$\left[\frac{\partial[u(-p+\tau_{xx})]}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (3.16a)$$

ส่วนประกอบย่อยของแรงเนื่องจากความเค้นพื้นผิวในทิศทาง y และ z ก็จะทำงานบนอนุภาคดังกล่าวเช่นกัน ในกระบวนการคิดแบบข้างต้นอัตราการเกิดงานบนอนุภาคของไหลเนื่องจากการทำงาน โดยแรงเหล่านี้สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\left[\frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial[v(-p+\tau_{yy})]}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (3.16b)$$

และ

$$\left[\frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial[w(-p+\tau_{zz})]}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (3.16c)$$

อัตราการเกิดงานทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตรของของไหลโดยแรงบนพื้นผิวทั้งหมด คือผลรวมของ (3.16 a - c) หากด้วยปริมาตร $\delta x \delta y \delta z$ เทอมของ p สามารถถูกจัดรวบรวมและเขียนในรูปแบบของไดเวอร์เจนท์ ดังนี้

$$-\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} = -\text{div}(pU)$$

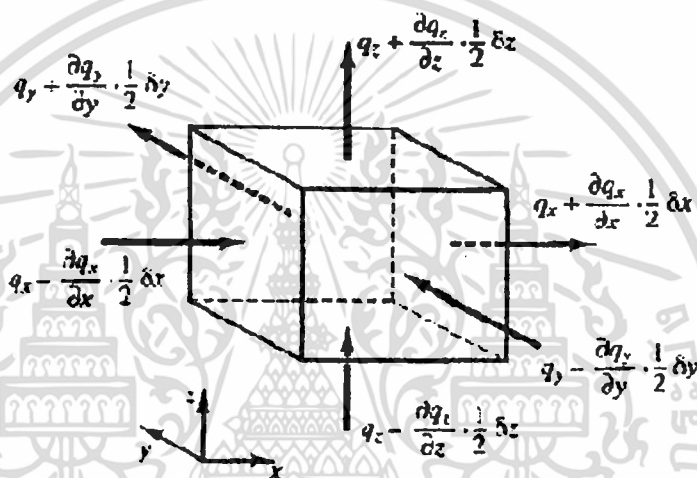
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นอัตราการเกิดงานรวมทั้งหมคบนชิ้นส่วนของของไหล โดยความเค้นบนพื้นผิว มีหน่วยเป็นปริมาณของพลังงานต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยปริมาตร

$$[-div(pU)] + \left[\begin{array}{l} \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \\ \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{array} \right] \quad (3.17)$$

ฟลักซ์เนื่องจากการนำความร้อน

เวกเตอร์ฟลักซ์ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ q ประกอบด้วยองค์ประกอบย่อย 3 ส่วนคือ q_x, q_y, q_z (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 องค์ประกอบของเวกเตอร์ฟลักซ์ความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิที่ชิ้นส่วนของไหล เนื่องจากฟลักซ์ของความร้อนทิศทาง x ถูกกำหนดโดยผลต่างระหว่างอัตราความร้อนที่เข้าผ่านผิวหน้า W กับอัตราความร้อนที่ออกจากผิวหน้า E

$$\left[\left(q_x - \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z = -\frac{\partial q_x}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \quad (3.18a)$$

ในทำนองเดียวกันอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิของไหลเนื่องจากฟลักซ์ของความร้อนในทิศทาง y และ z คือ

$$-\frac{\partial q_y}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \text{ และ } -\frac{\partial q_z}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (3.18b-c)$$

อัตราความร้อนสุทธิที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคของไหลต่อหน่วยปริมาตรครอบคลุมขอบเขตของชิ้นส่วนของไหล จะเท่ากับผลรวมของ (3.18a-c) ทหารด้วยปริมาตร $\delta x \delta y \delta z$

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} = -divq \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎของ Fourier ของการนำความร้อนอธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทปริมาณความร้อนต่อพื้นที่ (Heat flux) กับ ความแตกต่างอุณหภูมิต่อหน่วยความยาว

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_{yx} = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$

สิ่งนี้สามารถเขียนในรูปแบบของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{q} = -k \text{ grad } T \quad (3.20)$$

รวมสมการ (3.19) และ (3.20) ซึ่งจะได้ว่า อัตราการเพิ่มของความร้อนที่อนุภาคของไหล เนื่องจากการนำความร้อนผ่านพื้นผิวของชิ้นส่วนของของไหล

$$-\text{div } \mathbf{q} = \text{div}(k \text{ grad } T) \quad (3.21)$$

สมการพลังงาน

ในหัวข้อนี้เราจะมากล่าวถึงพลังงานจำเพาะของของไหล ซึ่งแทนด้วย E พลังงานของของไหลถูกนิยามเป็นผลรวมของพลังงานความร้อนภายใน i พลังงานจลน์ $\frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ และพลังงานศักย์โน้มถ่วง โดยมองว่าชิ้นส่วนของไหลมีการสะสมพลังงานศักย์โน้มถ่วง พลังงานภายในอาจไม่มีการรวมเอาพลังงานศักย์เข้าไว้ในนิยามก็ได้ หากมองว่าวัตถุกำลังทำงานในขณะที่เคลื่อนที่ในสนามความโน้มถ่วงของโลกโดยงานในส่วนนี้เรียกว่า งานเนื่องจากน้ำหนักของวัตถุซึ่งเป็น source term ในสมการพลังงาน มีหน่วยเป็นพลังงานต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลา

การอนุรักษ์พลังงานของชิ้นส่วนของไหล ทำได้โดยการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของของไหล (3.15) มีค่าเท่ากับ ผลรวมของการเกิดงานสุทธิบนชิ้นส่วนของไหล (3.17) และอัตราการเพิ่มของของไหลเนื่องจากพลัดซ์ความร้อน (3.21) และอัตราการเพิ่มของพลังงานเนื่องจากเทอมของ Source ดังนั้นสมการพลังงาน คือ

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\text{div}(p\mathbf{U}) + \left[\begin{array}{l} \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \\ \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{array} \right] + \text{div}(k \text{ grad } T) + S_E \quad (3.22)$$

ในสมการ 3.22 เรามี $E = i + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$

แม้ว่า (3.22) คือสมการพลังงานที่สมบูรณ์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ พลังงานภายในที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิของของไหล และพลังงานจลน์ที่สัมพันธ์กับความเร็วของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรามาจะพิจารณาพลังงานในแต่ละส่วนแยกจากกัน พลังงานจลน์ที่สัมพันธ์กับความเร็วของของไหลนั้นสามารถเขียนได้โดยการแปลงรูปของสมการโมเมนตัม กล่าวคือ ทำการคูณสมการโมเมนตัมในทิศทาง x (3.14 a) ด้วยความเร็ว u สมการโมเมนตัมในทิศทาง y ด้วยความเร็ว v และสมการโมเมนตัมในทิศทาง z (3.14c) ด้วยความเร็ว w และรวมผลลัพธ์เข้าด้วยกัน ก่อนทำการหารด้วย 2 สิ่งนี้ทำให้ได้สมการอนุรักษ์สำหรับพลังงานจลน์ดังข้างล่างนี้

$$\rho \frac{D[\frac{1}{2}(u^2+v^2+w^2)]}{Dt} = -u \cdot \text{grad } p + u \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + v \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + w \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + u \cdot S_M \quad (3.23)$$

ทำการลบ (3.23) จาก (3.22) และนิยาม source term ขึ้นใหม่เป็น $S_i = S_E - u \cdot S_M$ จึงทำให้ได้สมการพลังงานภายในดังนี้

$$\rho \frac{Di}{Dt} = -p \text{div } \mathbf{u} + \text{div}(k \text{grad } T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + S_i \quad (3.24)$$

ในการไหลแบบอัดตัวไม่ได้เรามี $i = cT$ ซึ่ง c คือค่าความร้อนจำเพาะและ $\text{div } \mathbf{u} = 0$ ซึ่งทำให้เราจัดเรียงสมการ (3.24) ไปในรูปของอุณหภูมิได้คือ

$$\rho c \frac{DT}{Dt} = \text{div}(k \text{grad } T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + S_i \quad (3.25)$$

สำหรับสมการไหลที่อัดตัวได้ (3.22) ถูกจัดรูปเป็นสมการสำหรับค่าเอนทาลปี และเนื่องจากค่าเอนทาลปีจำเพาะ h และค่าเอนทาลปีจำเพาะสัมบูรณ์ h_0 ของของไหลกำหนดได้โดย

$$h = i + \frac{p}{\rho} \quad \text{and} \quad h_0 = h + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$$

รวมสองนิยามนี้กับนิยามของพลังงานจำเพาะ E เข้าด้วยกัน เราจะได้

$$h = i + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) = E + \frac{p}{\rho} \quad (3.26)$$

แทนค่า (3.26) ไปในสมการ (3.22) และจัดเรียงเรียงบางอย่างทำให้ได้สมการพลังงานรวม

$$\frac{\partial(\rho h_0)}{\partial t} + \text{div}(\rho h_0 \mathbf{U}) = \text{div}(k \text{grad } T) + \frac{\partial p}{\partial t} \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + S_h \quad (3.27)$$

สมการ (3.24), (3.25) และ (3.26) ไม่ใช่สมการการอนุรักษ์พลังงานที่เพิ่มเติมเข้ามาใหม่ หากแต่เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของสมการพลังงาน (3.22)

3.1.1.2 สมการสถานะ

การเคลื่อนที่ของของไหลใน 3 มิติถูกอธิบายโดยระบบของสมการอนุพันธ์ย่อย 5 สมการคือ สมการอนุรักษ์มวล (3.4) สมการโมเมนตัมในทิศทาง x, y, z (3.14a – c) และสมการพลังงาน (3.24) ตัวไม่รู้ค่าประกอบด้วยตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ 4 ตัวคือ ρ, p, i และ T โดยต่อไปนี้จะจับประเด็นไปที่การเชื่อมโยงทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่างตัวแปร 4 ตัวนี้

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในเบื้องต้น ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ต่างๆ จะอยู่ภายใต้สมมุติฐานของสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งหมายความว่าในปัญหาหนึ่งๆ ที่ถึงแม้ความเร็วของของไหลจะมีค่าสูง และมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอย่างรวดเร็ว แต่ก็สมมุติให้ ของไหลสามารถปรับเปลี่ยนสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ไปสู่สภาวะใหม่อย่างรวดเร็วจากตำแหน่งหนึ่งสู่ตำแหน่งหนึ่งเช่นกัน นั่นคือของไหลยังคงอยู่ในสภาวะสมดุลตลอดเวลา มีเพียงเงื่อนไขยกเว้นบางอย่างกับการไหลที่เป็นแบบ Strong shockwave แต่บางกรณีการไหลประเภทนี้ก็สามารถใช้สมมุติฐานว่าของไหลอยู่ในสภาวะสมดุลได้ โดยให้ผลการจำลองได้ดีพอสมควร

ด้วยสมมุติฐานดังกล่าว เราจึงสามารถอธิบายสภาวะของสสารในสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ หากเรารู้ค่าตัวแปร 2 ตัว เราจะสามารถหาค่าตัวแปรตัวที่เหลือได้ ถ้าเราใช้ ρ และ T เป็นตัวแปรที่รู้ค่า เรามีสมการสถานะสำหรับความดัน p และพลังงานภายในจำเพาะ i

$$p = p(\rho, T) \text{ and } i = i(\rho, T) \quad (3.28)$$

สำหรับก๊าซสมบูรณ์สมการสถานะของมันซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีคือ

$$p = \rho RT \text{ and } i = C_v T \quad (3.29)$$

สมมุติฐานของสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์นี้ เมื่อนำมาใช้พิจารณาการไหลของของไหลที่อัดตัวได้ ยังช่วยเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างสมการพลังงานกับสมการอนุรักษ์มวล และสมการโมเมนตัม ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับการไหลนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามสมการสถานะ

การไหลของของไหลและก๊าซที่ความเร็วต่ำประพฤติตัวเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ เมื่อไม่มีการแปรเปลี่ยนของความหนาแน่น ก็จะทำให้ไม่มีการเชื่อมโยงระหว่าง

สมการพลังงานกับสมการอนุรักษ์มวลและสมการโมเมนตัม ในกรณีเช่นนี้เราสามารถหาคำตอบของสมการโมเมนตัม คือสนามการไหลได้โดยง่าย โดยการพิจารณาเพียงสมการอนุรักษ์มวลและสมการโมเมนตัมเท่านั้น และสามารถหาคำตอบของสมการพลังงาน คือการกระจายอุณหภูมิได้โดยแยกเพศหลังจากได้คำตอบของสนามการไหลแล้ว

3.1.1.3 สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับของไหลแบบนิวโทเนียน

สมการควบคุมประกอบด้วยตัวที่ไม่รู้ค่าคือ ความเค้นเนื่องจากความหนืดในแนวแกนย่อย τ_{ii} ในการไหลของของไหลนั้น ค่าความเค้นหนืดสามารถถูกอธิบายได้โดยอัตราการเสียรูปร่างที่ตำแหน่งใดๆ (หรืออัตราความเครียด) ในการไหล 3 มิติอัตราการเสียรูปร่างที่ตำแหน่งใดๆ ประกอบด้วยอัตราการเสียรูปร่างเชิงเส้นและอัตราเสียรูปร่างเชิงปริมาตร

ก๊าซทุกชนิดโดยส่วนมากมีคุณสมบัติเป็นแบบ Isotropic ในขณะที่ของเหลวบางชนิดที่ประกอบด้วยโมเลกุลของโพลีเมอร์ ในจำนวนที่มากพออย่างมีนัยสำคัญอาจจะประพฤติตัวเป็น Anisotropic หรือคุณสมบัติของความเค้นหนืดแบบขึ้นอยู่กับทิศทาง ซึ่งเป็นผลของการจัดเรียงตัวของโซ่โมเลกุลของโพลีเมอร์ ของไหลดังกล่าวอยู่นอกเหนือจากขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้และเราจะทำการศึกษาต่อไปโดยสมมุติว่าการไหลเป็น Isotropic

อัตราการเสียรูปร่างเชิงเส้นของชิ้นส่วนของไหลมี 9 องค์ประกอบใน 3 มิติ ในจำนวนนั้น มี 6 องค์ประกอบที่เป็นอิสระในของไหลแบบ Isotropic (Schlichting, 1979) ซึ่งถูกเขียนโดยสัญลักษณ์ e_{ij} ระบบการอ้างอิงในตัวห้อยต่อท้ายสัญลักษณ์ ซึ่งให้เห็นองค์ประกอบซึ่งเป็นระบบเดียวกับระบบอ้างอิงของความเค้น (ดูในหัวข้อ 3.1.4) มีองค์ประกอบของการเสียรูปร่างเชิงเส้นแบบตั้งฉากอยู่ 3 ตัว

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.30a)$$

นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบการเสียรูปร่างเชิงเส้นแบบเฉือนทั้ง 6 ด้านของชิ้นส่วนของไหลคือ

$$\begin{aligned} e_{xy} = e_{yx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & e_{xz} = e_{zx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ e_{yz} = e_{zy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.30b)$$

การเสียรูปร่างเชิงปริมาตรถูกให้โดย

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div}U \quad (3.30c)$$

ในของไหลแบบ Newtonian ความเค้นเนื่องจากความหนืดเป็นส่วนสำคัญ โดยตรงกับอัตราของการเสียรูปร่างของของไหล ตามกฎที่ว่าด้วยความหนืดของนิวตันในปริภูมิ 3 มิติสำหรับของไหลที่อัดตัวได้นั้น การไหลจะมีความหนืดเชื่อมโยงอย่างแปรผันตามค่าพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ 1) ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดที่หนึ่ง (Dynamic viscosity), μ ซึ่งจะเชื่อมโยงกับการเสียรูปเชิงเส้นของของไหล และ 2) ความหนืดที่สอง λ ที่จะเชื่อมโยงกับการเสียรูปเชิงปริมาตร ดังนั้นเราจะมืองค์ประกอบย่อยของความเค้นอยู่ทั้งหมด 9 ตัว โดยมี 6 ตัวในนั้นไม่ขึ้นแก่กันหรือเรียกว่ามีระดับอิสระ (degree of freedom) เท่ากับ 6

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} U & \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} U & \tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} U \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) & \tau_{yz} &= \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \tau_{zx} &= \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)\end{aligned}\quad (3.31)$$

ภาพของความเค้นในส่วนที่สองนั้นไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากผลของมันในทางปฏิบัติมีไม่มากนักสำหรับก๊าซ การประมาณค่าที่ดีคือ $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ (Schlichting, 1979) และเนื่องจากเราสมมุติว่าของเหลวเป็นแบบที่อัดตัวไม่ได้ ซึ่งจากสมการอนุรักษ์มวลคือ $\operatorname{div} U = 0$ ดังนั้นความเค้นหนืดจะเป็น 2 เท่าของอัตราการเสียรูปเชิงเส้น

แทนค่าความเค้นเฉือนข้างบน (3.31) ไปใน (3.14a-c) ทำให้ได้สมการซึ่งเรียกตามชื่อ Navier-Stokes ซึ่งเป็นนักวิทยาศาสตร์ในศตวรรษที่ 19 ที่ได้ค้นพบดังนี้

$$\begin{aligned}\rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} U \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_{Mx}\end{aligned}\quad (3.32a)$$

$$\begin{aligned}\rho \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} U \right] \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_{My}\end{aligned}\quad (3.32b)$$

$$\begin{aligned}\rho \frac{Dw}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} U \right] + S_{Mz}\end{aligned}\quad (3.32c)$$

เราสามารถจัดเรียงเทอมของความเค้นใหม่ ตัวอย่าง ในกรณีสมการ 3.32a ดังข้างล่าง

$$\begin{aligned}& \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} U \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \\ & \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \operatorname{div} U) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} U) + S_{Mx}\end{aligned}$$

ความเค้นหนืดในสมการที่เป็นองค์ประกอบในทิศทาง y และ z สามารถจัดใหม่

ในลักษณะเดียวกัน เราจะสร้างสมการ โมเมนตัมอย่างง่าย โดยการช้อนเทอมของความเค้นนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เค้นหนีตในเทอมของการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัม (source term) ดังนั้นจึงนิยามเทอมของการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมใหม่โดย

$$S_M = S_M + s_M \quad (3.33)$$

สมการ Navier-Stokes สามารถถูกเขียนในรูปแบบที่ใช้สำหรับการพัฒนาวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ดังนี้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } U) + S_{Mx} \quad (3.34a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } U) + S_{My} \quad (3.34b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } U) + S_{Mz} \quad (3.34c)$$

ถ้าเราใช้แบบจำลอง Newtonian สำหรับความเค้นหนีตในสมการพลังงานภายใน (3.24) เราจะได้

$$\rho \frac{Di}{Dt} = -p \text{div } U + \text{div}(k \text{grad } T) + \Phi + S_i \quad (3.35)$$

ผลกระทบทั้งหมดเนื่องจากความเค้นหนีตในสมการพลังงานภายในนี้ สามารถเขียนได้ในเทอมของฟังก์ชันการสลายตัว (Dissipation function) Φ ซึ่งหลังจากการปรับรูปแบบสมการสามารถแสดงได้ ดังนี้

$$\Phi = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} + \lambda (\text{div } U)^2 \quad (3.36)$$

การสลายตัวนี้เป็นค่าบวกเสมอเนื่องจากประกอบด้วยเทอมยกกำลังสองและแทนถึงการก่อกำเนิดของพลังงานภายในอันเป็นผลมาจากการเสีรูปทรงของชิ้นส่วนของไหล อีกนัยหนึ่งคือเป็นตัวเลขของพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหล และเปลี่ยนไปเป็นพลังงานภายในหรือความร้อน นั่นเอง

3.1.1.4 รูปแบบอนุกรมสำหรับสมการควบคุมของการไหลของของไหล

ตารางที่ 3.1 แสดงสมการอนุกรมมวล โมเมนตัม และพลังงาน ในรูปแบบของไดเวอร์เจนต์ เป็นสมการแบบ 3 มิติที่ขึ้นกับเวลา ของของไหลนิวโทเนียนที่อัดตัวได้

ตารางที่ 3.1 สมการควบคุมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียนอัดตัวได้

มวล	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0$	(3.4)
โมเมนตัม x	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx}$	(3.37a)
โมเมนตัม y	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My}$	(3.37b)
โมเมนตัม z	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz}$	(3.37c)
พลังงานภายใน	$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i U) = -p \text{div } \vec{u} + \text{div}(k \text{grad } T) + \Phi + S_i$	(3.38)
สมการสถานะ	$p = p(\rho, T) \text{ and } i = i(\rho, T)$	(3.28)
	$p = \rho RT \text{ and } i = C_v T$	(3.29)

เทอมการก่อกำเนิดของโมเมนตัม S_M และฟังก์ชันการสลายตัว Φ แสดงใน 3.32 และ 3.36 ตามลำดับ เป็นที่น่าสนใจที่ว่าสมมุติฐานสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ในหัวข้อ 3.1.1.2 ทำให้ได้สมการการไหล (PDEs) 5 สมการและสมการพีชคณิต 2 สมการรวมเป็น 7 สมการ ต่อมาเราใช้แนวคิดของของไหลนิวโทเนียนซึ่งอธิบายความเค้นหนืดในเทอมของความแตกต่างขององค์ประกอบความเร็วต่อหน่วยความยาว เป็นผลให้เกิดตัวไม่รู้ค่า 7 ตัว จำนวนที่เท่ากันของสมการและตัวไม่รู้ค่าของระบบนี้ สามารถถูกแก้ปัญหาได้ด้วยเงื่อนไขที่ขอบและค่าเริ่มต้น (Boundary and Initial condition)

3.2 แบบจำลอง $k - \epsilon$

3.2.1 Standard $k - \epsilon$ Model

3.2.1.1 ภาพรวม

เป็นแบบจำลองที่เรียบง่ายที่สุดของแบบจำลองความปั่นป่วนที่เป็นแบบจำลองสองสมการซึ่งวิธีแก้สมการการถ่ายเทสองสมการแยกกัน ได้แก่ turbulent velocity และ length scales สามารถกำหนดได้อย่างอิสระ แบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ ได้ใช้ในการคำนวณการไหลในงานวิศวกรรม เนื่องจากแบบจำลองนี้มีความเสถียร ประหยัด และมีความแม่นยำในช่วงการไหลปั่นป่วนที่กว้าง โดยนิยมใช้ในการไหลในอุตสาหกรรมและการจำลองการถ่ายเทความร้อน

แบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ [115] เป็นแบบจำลอง semi-empirical ที่อยู่บนพื้นฐานแบบจำลองสมการการถ่ายเทสำหรับพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการ

กระจายตัว (ϵ) แบบจำลองสมการการถ่ายเทสำหรับ k ได้มาจากสมการแม่นยำตรง ขณะที่แบบจำลองสมการการถ่ายเทสำหรับ ϵ ได้มาจากการใช้เหตุผลทางกายภาพบางประการ

ในการได้มาของแบบจำลอง $k - \epsilon$ ได้สมมุติฐานว่าการไหลนั้นเป็นปรับตัวเต็มที่แล้ว, และผลกระทบของความหนืดระดับโมเลกุลนั้นละทิ้งได้ ดังนั้นแบบจำลอง standard $k - \epsilon$ จะมีเฉพาะการไหลปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

3.2.1.2 สมการการถ่ายเทสำหรับแบบจำลอง Standard $k - \epsilon$

พลังงานจลน์ปั่นป่วน k และอัตราของการสลายพลังงานจลน์ปั่นป่วน ϵ ได้มาจากสมการการถ่ายเทต่อไปนี้ :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.37)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (3.38)$$

ในสมการนี้ G_k แสดงถึงการกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนความเร็วเฉลี่ย G_b เป็นการกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว Y_M แสดงถึงการสนับสนุนของการขยายตัวที่เปลี่ยนแปลงในความปั่นป่วนอัดตัวได้ต่ออัตราการกระจายทั้งหมด $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, และ $C_{3\epsilon}$ เป็นค่าคงที่ σ_k และ σ_ϵ เป็น Turbulent Prandtl numbers สำหรับ k และ ϵ ตามลำดับ S_k และ S_ϵ เป็นพจน์ที่กำหนดเอง

3.2.1.3 การจำลองความหนืดปั่นป่วน

ความหนืดปั่นป่วน (ไหลวน) μ_t คำนวณโดยการรวม k และ ϵ ดังนี้ :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.39)$$

ซึ่ง C_μ เป็นค่าคงที่

3.2.1.4 ค่าคงที่แบบจำลอง

ค่าคงที่แบบจำลอง $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ , σ_k และ σ_ϵ มีค่ามาตรฐานดังนี้ [115]:

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

ค่าคงที่เหล่านี้ได้กำหนดจากการทดลองกับอากาศและน้ำสำหรับพื้นฐานการไหลเฉือนปั่นป่วนรวมถึง การไหลเฉือนเอกพันธ์และการสลายตัวแบบ isotropic ของสนามความ

ปั่นป่วน โดยพบจากการทดลองที่ช่วงขอบเขตผนังที่กว้างและการไหลแบบไม่มีแรงเสียดทาน

3.2.2 RNG $k - \epsilon$ Model

3.2.2.1 ภาพรวม

แบบจำลอง RNG $k - \epsilon$ ได้มาจากการใช้เทคนิคทางสถิติ (เรียกว่า ทฤษฎีการทำให้เป็นกลุ่มมาตรฐาน) โดยจะมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกับแบบจำลอง standard $k - \epsilon$ แต่ได้รวมสิ่งเหล่านี้เข้าไปด้วย

- แบบจำลอง RNG ได้มีพจน์ที่เพิ่มเข้ามาในสมการ ϵ ซึ่งช่วยให้เพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลที่มีความเครียดเปลี่ยนแปลงกระทันหัน
- ผลกระทบสำหรับการหมุนวนบนการไหลปั่นป่วนได้รวมอยู่ในแบบจำลอง RNG ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำให้กับการไหลหมุนวน
- ทฤษฎี RNG ได้มีสูตรสำหรับ Turbulent Prandtl numbers โดยขณะที่ standard $k - \epsilon$ จะกำหนดให้เป็นค่าคงที่
- ขณะที่แบบจำลอง standard $k - \epsilon$ เป็นแบบจำลอง high-Reynolds-number ทฤษฎี RNG ได้มีสมการอนุพันธ์สำหรับความหนืดที่มีผลต่อการไหลซึ่งคำนวณสำหรับผลกระทบที่ low-Reynolds-number โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับที่บริเวณขอบเขตใกล้ผนัง

ในส่วนนี้เองที่ทำให้แบบจำลอง RNG $k - \epsilon$ มีความแม่นยำมากขึ้นและเชื่อถือได้สำหรับช่วงการไหลที่กว้างกว่าแบบจำลอง standard $k - \epsilon$. กล่าวอีกนัยหนึ่ง RNG อยู่บนพื้นฐานแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$ โดยได้มาจากสมการนาเวียร์-สโตก ใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า วิธี "renormalization group" (RNG) การวิเคราะห์ผลลัพท์ที่ได้จากแบบจำลองกับค่าคงที่ที่แตกต่างจากค่าในแบบจำลอง standard $k - \epsilon$ กล่าวคือ มีพจน์และฟังก์ชันที่เพิ่มเข้ามาในสมการการถ่ายเทสำหรับ k และ ϵ

3.2.2.2 สมการการถ่ายเทสำหรับแบบจำลอง RNG $k - \epsilon$

แบบจำลอง RNG $k - \epsilon$ มีความคล้ายคลึงกับรูปแบบของแบบจำลอง standard $k - \epsilon$:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการนี้ G_k แสดงถึงการกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องมาจากเกร็ดเฉยความเร็วเฉลี่ย G_b เป็นการกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องมาจากแรงลอยตัว Y_M แสดงถึงความผันผวนของการขยายตัว ในความปั่นป่วนอัดตัวได้ต่ออัตราการกระจายทั้งหมด ปริมาณ α_k และ α_ϵ คือ ประสิทธิภาพย้อนกลับของ Prandtl numbers สำหรับ k และ ϵ ตามลำดับ ส่วน S_k และ S_ϵ เป็นพจน์กำเนิดของ k และ ϵ ตามลำดับ นั่นเอง

3.2.2.3 จำลองผลกระทบเนื่องจากความหนืด

ในกระบวนการวิเคราะห์ที่พจน์ในทฤษฎี RNG ทำให้เราได้ความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์ของความหนืดปั่นป่วนดังต่อไปนี้

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\epsilon}\mu}\right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_\nu}} d\hat{\nu} \quad (3.40)$$

ซึ่ง

$$\hat{\nu} = \mu_{eff}/\mu$$

$$C_\nu \approx 100$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ 3.40 จะทำให้เราได้เทอมความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการถ่ายเทสุทธิต่อเนื่องมาจากความปั่นป่วนกับเทอมของค่า Effective Reynolds number ซึ่งจะช่วยให้แบบจำลองสามารถรองรับรูปแบบการไหลที่ค่า Reynolds number ต่ำได้เช่น ในกรณีการไหลใกล้ผนัง เป็นต้น

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.41)$$

โดย $C_\mu = 0.0845$ ได้มาโดยใช้ทฤษฎี RNG ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าของ C_μ นั้นใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดโดยการทดลอง 0.09 ที่ใช้ในแบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ โดยปกติแล้ว การคำนวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความหนืดเมื่อใช้รูปแบบ Reynolds number สูงๆ ที่มีอยู่ในสมการ 3.41 อย่างไรก็ตามเราสามารถเลือกใช้ความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันที่มีอยู่ในสมการที่ 3.40 ซึ่งจะใช้ในกรณีที่รวมค่า Reynolds number ต่ำเข้าไปในการคำนวณ

3.3 การถ่ายเทความร้อน

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อนรวมอันประกอบไปด้วย

3.3.1 บทนำ

3.3.2 แบบจำลองการนำและการพาความร้อน

3.3.3 แบบจำลองการแผ่รังสี

3.3.1 บทนำ

พลังงานความร้อนของการไหลในสสารที่อยู่ในพื้นที่หนึ่งที้อยู่ที่ถ่ายเทไปยังอีกพื้นที่หนึ่งเรียกว่าการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ การนำ, การพา, และการแผ่รังสี แบบจำลองทางกายภาพที่รวมการนำความร้อนและ/หรือการพาอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น จะเป็นแบบที่เรียบง่ายที่สุด (ส่วนที่ 3.3.2) ขณะที่การไหลที่ขับเคลื่อนด้วยแรงลอยตัวหรือการพาโดยธรรมชาติ (ส่วนที่ 3.3.2.2) และแบบจำลองการแผ่รังสี (ส่วนที่ 3.3.3) เป็นแบบจำลองที่ซับซ้อนมากขึ้น ในการเรียกใช้การถ่ายเทความร้อนที่ซับซ้อนเพียงใดนั้น ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา โดยจะต้องแก้สมการพลังงาน โดยรวมกับแบบจำลองทางความร้อนที่กำหนดไว้

3.3.2 แบบจำลองการนำและการพาความร้อน

ในการคำนวณสามารถรวมขอบเขตของของแข็งและ/หรือของเหลวเข้าไปในแบบจำลอง โดยจะลำดับปัญหาจากการผสมกันของความร้อนภายในของเหลวไปยังการนำความร้อนในของแข็ง เมื่อเลือกให้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน จะต้องกำหนดค่าทางกายภาพที่เกี่ยวข้อง สภาวะขอบเขตความร้อนและค่าคุณสมบัติของวัสดุซึ่งควบคุมการถ่ายเทความร้อนและ/หรือเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิในส่วนกำหนด

3.3.2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

3.3.2.2 ทฤษฎีการพาแบบธรรมชาติและ การไหลโดยแรงลอยตัว

3.3.2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

3.3.2.1.1 สมการพลังงาน

สมการพลังงานที่ใช้เป็นดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\bar{e}_{eff} \vec{v})) + S_h \quad (3.42)$$

ซึ่ง k_{eff} เป็นสัมประสิทธิ์การนำความร้อนประสิทธิผล ($k + k_t$ ซึ่ง k_t เป็นการนำความร้อนปั่นป่วน โดยนิยามให้สอดคล้องกับแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้) และ \vec{j}_j เป็นฟลักซ์การฟุ้งกระจายของสปีชีส์ j โดยพจน์ 3 พจน์แรกบนด้านขวามือของสมการ 3.42 แสดงถึงพลังงานที่ถ่ายเทเนื่องจากการนำ, การฟุ้งกระจายของสปีชีส์, และการกระจายของความหนืด ตามลำดับ S_h คือค่าของอัตราการก่อกำเนิด ซึ่งรวมถึงความร้อนของปฏิกิริยาเคมีและแหล่งกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรใดๆ นิยามในสมการ 3.42

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (3.43)$$

ซึ่งเอนทาลปีสัมพัทธ์ h นิยามสำหรับก๊าซในอุดมคติได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (3.44)$$

และสำหรับของไหลอัดตัวได้

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (3.45)$$

ในสมการ 3.44 และ 3.45 Y_j เป็นสัดส่วนมวลของสปีชีส์ j และ

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (3.46)$$

ซึ่ง T_{ref} เท่ากับ 298.15 K

3.3.2.1.2 สมการพลังงานสำหรับแบบจำลองการเผาไหม้แบบ Non-Premixed

โดยแบบจำลองเผาไหม้แบบ Non-Premixed Non-Adiabatic จะคำนวณเอนทาลปีทั้งหมดได้จากสมการพลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) + S_h \quad (3.47)$$

ซึ่งภายใต้สมมติฐานที่ Lewis number (Le) = 1 พจน์การนำและการฟุ้งกระจายของสปีชีส์จะรวมอยู่ในพจน์แรกของด้านขวาของสมการ ในขณะที่พจน์ของความร้อนที่เกิดจากความหนืดจะปรากฏเป็นส่วนหนึ่งในพจน์ที่ 2 ของด้านขวาของสมการ ค่าเอนทาลปีของผสม H นิยามดังนี้

$$H = \sum_j Y_j H_j \quad (3.48)$$

ซึ่ง Y_j เป็นสัดส่วนมวลของสปีชีส์ j และ

$$H_j = \int_{T_{ref,j}}^T c_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref,j}) \quad (3.49)$$

$h_j^0(T_{ref,j})$ เป็นเอนทาลปีการก่อเกิดของสปีชีส์ j และอุณหภูมิอ้างอิง $T_{ref,j}$

3.3.2.1.3 การรวมพจน์การกระจายความหนืด

สมการ 3.42 และ 3.47 ได้รวมพจน์การกระจายตัวของความหนืด ซึ่งได้อธิบายถึงพลังงานความร้อนที่เกิดมาจากความหนืดเนื่องในการไหล เมื่อใช้ pressure-based solver รูปแบบมาตรฐานของสมการพลังงานจะไม่ได้รวมไว้ (เพราะว่าส่วนมากความ

ร้อนที่เกิดจากความหนืดจะถูกละทิ้ง) ความร้อนที่เกิดจากความหนืดจะเริ่มมีความสำคัญเมื่อ Brinkman number (Br) มีค่าเข้าใกล้หรือมากกว่า 1 ซึ่ง

$$Br = \frac{\mu U_0^2}{k\Delta T} \quad (3.50)$$

และ ΔT แสดงถึงอุณหภูมิที่แตกต่างในระบบ

3.3.2.1.4 แหล่งกำเนิดพลังงานอันเนื่องมาจากปฏิกิริยา

แหล่งกำเนิดพลังงาน (S_h) ในสมการ 3.42 ได้ถูกรวมอยู่ในแหล่งกำเนิดของพลังงานอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี

$$S_{h,rxn} = -\sum_j \frac{h_j^0}{M_j} \mathcal{R}_j \quad (3.51)$$

ซึ่ง h_j^0 เป็นเอนทาลปีของการก่อกำเนิดของสปีชีส์ j และ \mathcal{R}_j โดยเป็นอัตราเชิงปริมาตรของการเกิดของสปีชีส์ j ในการใช้สมการพลังงานสำหรับการเผาไหม้ non-adiabatic non-premixed (สมการ 3.47) พลังงานของการก่อกำเนิดได้ถูกรวมอยู่ในนิยามของเอนทาลปี (ดูในสมการ 3.48) ดังนั้นปฏิกิริยาที่เป็นแหล่งกำเนิดของพลังงานจะไม่ได้รวมอยู่ใน S_h

3.3.2.1.5 แหล่งกำเนิดพลังงานเนื่องจากการแผ่รังสี

เมื่อเลือกใช้หนึ่งในแบบจำลองของการแผ่รังสี (S_h) ในสมการ 3.42 หรือ 3.47 ซึ่งจะรวมพจน์การแผ่รังสีไว้ สามารถดูรายละเอียดในส่วนที่ 3.3.3

3.3.2.1.6 สมการพลังงานในบริเวณของแข็ง

ในส่วนบริเวณที่เป็นของแข็ง สมการการถ่ายเทพลังงานจะมีรูปแบบเป็นดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v}\rho h) = \nabla \cdot (k\nabla T) + S_h \quad (3.52)$$

ซึ่ง

ρ = ความหนาแน่น

h = เอนทาลปีสัมผัส, $\int_{T_{ref,j}}^T c_{p,j} dT$

k = ค่าความนำความร้อน

T = อุณหภูมิ

S_h = แหล่งกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตร

พจน์ที่สองบนด้านซ้ายมือของสมการ 3.52 แสดงถึงการถ่ายเทพลังงานอันเนื่องมาจากการพาโดยการหมุนหรือการเคลื่อนที่ของของแข็ง โดยสนามความเร็ว \vec{v} จะคำนวณจากการเคลื่อนไหวที่ระบุไว้สำหรับบริเวณของแข็ง ซึ่งพจน์ทางด้านขวามือของสมการ 3.52 เป็นฟลักซ์ความร้อนเนื่องมาจากการนำและแหล่งกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรภายในบริเวณของแข็ง ตามลำดับ

3.3.2.1.7 ความไม่เป็น isotropic conductivity ในของแข็ง

เราสามารถกำหนดคุณสมบัติการนำความร้อนแบบ Anisotropic ได้ด้วยการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่แตกต่างกันในแต่ละทิศทาง ซึ่งพจน์การนำความร้อนแบบ anisotropic อยู่ในรูปดังนี้

$$\nabla \cdot (k_{ij} \nabla T) \quad (3.53)$$

ซึ่ง k_{ij} เป็นเมตริกซ์การนำความร้อน

3.3.2.2 ทฤษฎีการพาแบบธรรมชาติและการไหลโดยแรงลอยตัว

เมื่อความร้อนได้ถูกเพิ่มไปยังของไหลทำให้ความหนาแน่นของของไหลเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ การไหลจะถูกเหนี่ยวนำอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อมวลที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน แรงลอยตัวในการไหลที่มีการพาสามารถวัดได้จากอัตราส่วนของ Grashof number และ Reynolds number

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{g\beta\Delta TL}{\nu^2} \quad (3.54)$$

เมื่อค่านี้เข้าใกล้หรือมากกว่า 1 สามารถคาดได้ว่าแรงลอยตัวมีความรุนแรง และเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการขับเคลื่อนการไหล แต่ในทางกลับกัน ถ้าค่านี้มีค่าน้อยแรงลอยตัวอาจจะถูกละทิ้งได้ หนึ่ง ในการจำลองผลการไหลที่มีการพาแบบธรรมชาติเพียงอย่างเดียว ความรุนแรงของแรงลอยตัวในการไหลวัดได้จาก Rayleigh number

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3\rho}{\mu\alpha} \quad (3.55)$$

ซึ่ง β เป็นสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากความร้อน

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (3.56)$$

และ α เป็นสัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายอันเนื่องมาจากความร้อน

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3.57)$$

เมื่อ Rayleigh numbers น้อยกว่า 10^8 จะบ่งชี้ว่า การไหลลอยตัวเป็นแบบลามินาร์ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในช่วง $10^8 < Ra < 10^{10}$

3.3.3 แบบจำลองการแผ่รังสี

สำหรับข้อมูลการกำหนดค่าและการใช้แบบจำลองการแผ่รังสีได้แบ่งออกเป็นดังนี้

3.3.3.1 ภาพรวมและข้อจำกัด

3.3.3.2 สมการการถ่ายโอนรังสี

3.3.3.3 ทฤษฎีแบบจำลองการแผ่รังสีแบบ Discrete Ordinates (DO)

3.3.3.4 การแผ่รังสีในการไหลที่มีการเผาไหม้

3.3.3.5 การเลือกแบบจำลองการแผ่รังสี

3.3.3.1 ภาพรวมและข้อจำกัด

ในการคำนวณนั้นมีแบบจำลองการแผ่รังสีทั้งหมด 5 แบบซึ่งสามารถรวมลงไปได้กับการคำนวณการถ่ายเทความร้อน แต่ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะอธิบายเพียงเฉพาะแบบจำลองที่เลือกใช้ในการคำนวณเท่านั้น (DO)

การร้อนขึ้นหรือเย็นลงของพื้นผิวระหว่างการแผ่รังสีและ/หรือแหล่งกำเนิดหรือแหล่งรับความร้อนอันเนื่องมาจากการแผ่รังสีภายในสภาวะของไหลสามารถรวมลงไปในแบบจำลองได้จากการเลือกใช้แบบจำลองการแผ่รังสีเหล่านี้

- แบบจำลองการแผ่รังสีแบบ Discrete Ordinates (DO) [20, 21]
- แบบจำลองการแผ่รังสีแบบ P-1
- แบบจำลองการแผ่รังสีแบบ Rosseland
- แบบจำลองการแผ่รังสีแบบพื้นผิว ไปยังพื้นผิว (Surface-to-Surface)
- แบบจำลองการแผ่รังสีแบบถ่ายโอนไม่ต่อเนื่อง (DTRM)

ตัวอย่างของการใช้ที่เหมาะสมกับการจำลองผล โดยใช้การแผ่รังสีถ่ายเทความร้อนได้รวมไว้ดังนี้

- การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟ
- การแผ่รังสีจากพื้นผิวไปยังพื้นผิว
- การแผ่รังสีรวมกับการพาหรือการนำความร้อน

ทั้งนี้ควรจะรวมการแผ่รังสีความร้อนลงไปใน การจำลองผลเมื่อฟลักซ์รังสีความร้อน $Q_{rad} = \sigma(T_{max}^4 - T_{min}^4)$ มีจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการถ่ายเทเนื่องจากการนำหรือการพา

ข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของแบบจำลอง DO

แบบจำลอง DO ครอบคลุมช่วงความหนาของลำแสงทั้งหมดและสามารถแก้ไข้ปัญหาในช่วงการแผ่รังสีจากพื้นผิวสู่พื้นผิวที่มีการกระเจิงของการแผ่รังสีในการเผาไหม้และยังใช้ได้กับการแก้้ปัญหาของการแผ่รังสีที่ผนังกึ่งโปร่งแสง และแบบจำลองนี้ยังใช้ทรัพยากรในการคำนวณไม่มากนัก เทคนิคการจำลองแบบ DO นี้ จะทำการจำลองการแผ่รังสีแบบ gray radiation หรือ non-gray radiation โดยใช้แบบจำลองชนิด Gray-band อย่างไรก็ตาม การแก้้ปัญหาโดยการกำหนดมุมเป็นช่วงเล็กๆ อาจจะต้องใช้หน่วยประมวลผลอย่างมาก

ผลของ non-gray จะเหมาะสมสำหรับใช้กับตัวกลางที่มีสัมประสิทธิ์การดูดซึมสเปกตรัม α_λ ซึ่งจะแตกต่างกันในแต่ละชั้นเมื่อข้ามแถบสเปกตรัม แต่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยภายในแถบสเปกตรัม ตัวอย่างเช่น แก้วมีพฤติกรรมตอบสนองต่อการแผ่รังสีในลักษณะนี้ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้ไม่ได้จำลองพฤติกรรมต่อการแผ่รังสีของก๊าซอย่างเช่น คาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำ ซึ่งจะดูดซึมและปล่อยพลังงานออกมาในช่วงความถี่คลื่นที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน [22]

แบบจำลอง non-gray gas radiation ก็ยังอยู่ในช่วงกำลังพัฒนาต่อไป อย่างไรก็ตามผู้วิจัยบางคน [23] ได้ใช้แบบจำลอง gray-band เพื่อจำลองพฤติกรรมของก๊าซโดยการประมาณค่าของสัมประสิทธิ์การซึมซับภายในแต่ละแถบที่มีค่าคงที่

การใช้เทคนิค non-gray ข้างต้นนั้นสามารถใช้ได้กับทุกปัญหาที่มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองการแผ่รังสีแบบ DO ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่จะรวมปัจจัยต่างๆ ได้แก่ การกระเจิงของรังสี ความเป็น Anisotropy ความเป็นตัวกลางกึ่งโปร่งแสง และผลกระทบของอนุภาคเข้าไว้ด้วยกัน อย่างไรก็ตามผลของ non-gray ถูกสมมุติว่ามีสัมประสิทธิ์การดูดซับคงที่ภายในแต่ละช่วงความยาวคลื่น อย่างไรก็ตาม Weighted-sum-of-Gray-Gases Model (WSGGM) นี้ ไม่สามารถใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับในแต่ละแถบความถี่คลื่นได้ ด้วยเทคนิคนี้ เราสามารถกำหนดค่าการเปล่งรังสีที่ผนังซึ่งเป็นค่าคงที่ช่วงความถี่คลื่นที่กำหนดได้

3.3.3.2 สมการการถ่ายโอนรังสี

สมการการถ่ายโอนรังสี (RTE) สำหรับการดูดซับ, การเปล่งรังสี, และการกระเจิงที่ตำแหน่ง \vec{r} ในทิศทาง \vec{s} เป็นดังนี้

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r} + \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (3.58)$$

ซึ่ง

\vec{r} = เวกเตอร์ตำแหน่ง

\vec{r} = เวกเตอร์ทิศทาง

\vec{r}' = เวกเตอร์ทิศทางการกระจาย

s = ความยาวเส้นทาง

a = สัมประสิทธิ์ดูดซับ

n = ดัชนีการสะท้อน

σ_s = สัมประสิทธิ์การกระเจิง

σ = ค่าคงที่สเตฟาน-โบลซ์แมน ($5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

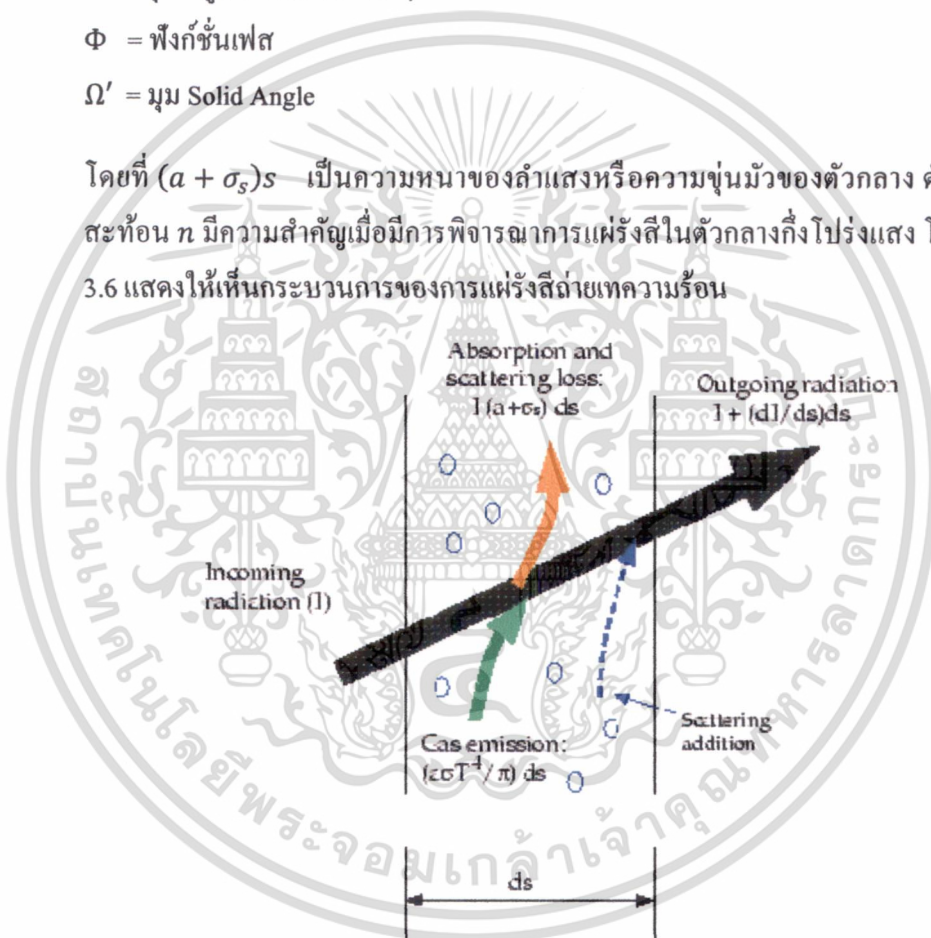
I = ความเข้มข้นของการแผ่รังสี ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่ง (\vec{r}) และทิศทาง (\vec{s})

T = อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนั้นๆ

Φ = ฟังก์ชันเฟส

Ω' = มุม Solid Angle

โดยที่ $(a + \sigma_s)s$ เป็นความหนาของลำแสงหรือความขุ่นมัวของตัวกลาง ดัชนีการสะท้อน n มีความสำคัญเมื่อมีการพิจารณาการแผ่รังสีในตัวกลางกึ่งโปร่งแสง โดยรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นกระบวนการของการแผ่รังสีถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 3.6 การแผ่รังสีถ่ายเทความร้อน

แบบจำลองการแผ่รังสีแบบ DTRM , P-1, Rosseland, และ DO นั้นต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ a ซึ่งสัมประสิทธิ์การดูดซับ a และสัมประสิทธิ์การกระเจิง σ_s นั้นเป็นค่าคงที่และ a ยังเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของ H_2O และ CO_2 ความยาวเส้นทางและความดันทั้งหมด โดยจะใช้แบบจำลอง Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model (WSGGM) สำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดซับที่หลากหลาย แบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแผ่รังสีแบบ DO สามารถจำลองการแผ่รังสีในตัวกลางกึ่งโปร่งแสงได้ คำนวณการสะท้อน n ของตัวกลางต้องได้มาจากการคำนวณสำหรับประเภทนี้ก่อนหน้าเท่านั้น เมื่อใช้แบบจำลอง Rosseland ต้องกำหนดค่าดัชนีการสะท้อนเองหรืออาจจะใช้ค่ามาตรฐานที่เท่ากับ 1

3.3.3.3 ทฤษฎีแบบจำลองการแผ่รังสีที่ไม่ต่อเนื่อง (DO)

แบบจำลองการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่ไม่ต่อเนื่อง (DO) จะทำการคำนวณสมการการถ่ายโอนรังสี Radiative Transfer Equation, (RTE) ตลอดช่วงมุมของการแผ่รังสี (Solid Angle) ซึ่งมีการแบ่งช่วงของมุมดังกล่าวที่แน่นอนจึงมีจำนวนของมุมของการแผ่รังสีอยู่จำนวนหนึ่ง โดยแต่ละมุมการแผ่รังสีจะสัมพันธ์กับทิศทาง S ที่กำหนดในระบบพิกัดฉาก (x, y, z) โดยเราสามารถกำหนดความละเอียดของช่วงมุม discretization มากน้อยตามต้องการ ซึ่งจะคล้ายคลึงกับการเลือกจำนวนค่ารังสีของแบบจำลอง DTRM แต่อย่างไรก็ตามการเลือกค่านี้ไม่ได้คล้ายคลึงกับแบบจำลอง DTRM ซะทีเดียว โดยแบบจำลอง DO จะไม่สามารถติดตามรังสีได้ หากแต่แบบจำลอง DO จะทำการแปลงสมการ 3.58 ไปเป็นสมการการถ่ายโอนการความเข้มข้นของการแผ่รังสี (Radiation Intensity Transport) ในรูปของสเปกตรัมที่แสดงอยู่ในระบบพิกัดฉาก จำนวนสมการการถ่ายโอนความเข้มข้นของการแผ่รังสีนี้จะมีเท่ากับจำนวนของทิศทางการแผ่รังสี S ที่ได้กำหนดไว้ในตอนต้น กระบวนการในการหาค่าตอบของความเข้มข้นในการแผ่รังสีในแต่ละทิศทางก็จะเหมือนกับการหาค่าตอบของสมการการถ่ายโอนมวลและโมเมนตัมของการไหลและการถ่ายโอนพลังงานนั่นเอง

เราสามารถเลือกวิธีการคำนวณได้ 2 แบบ ได้แก่ วิธีการคำนวณแบบไม่ขึ้นต่อกัน (uncoupled) และแบบขึ้นต่อกัน (coupled) กับสมการการถ่ายโอนพลังงาน โดยปกติแล้ววิธีการคำนวณแบบไม่ขึ้นต่อกันกับสมการพลังงานจะใช้ ค่าผันแปรอนุรักษ์ (conservative variant) ของแบบจำลอง DO ที่เรียกว่า วิธีปริมาตรจำกัด (Finite-Volume Scheme, [22]), ซึ่งใช้ร่วมกับเมชชนิดไร้ระเบียบ (unstructured meshes, [23]) และในกรณีที่คำนวณแบบไม่ขึ้นต่อกันนั้นสมการพลังงานและสมการความเข้มข้นของการแผ่รังสีจะคำนวณแยกจากกัน โดยสมมุติว่าไม่สร้างผลกระทบต่อกัน

ในกรณีที่เป็นการคำนวณแบบขึ้นต่อกันซึ่งการคำนวณจะต้องใช้วิธี coupled ordinates method (COMET, [25]) ซึ่งเป็นการคำนวณสมการพลังงานในแต่ละช่วงคลื่นและสมการความเข้มข้นในแต่ละเซลล์พร้อมกัน โดยสมมุติว่าทราบค่าของารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในพื้นที่รอบๆ เซลล์ที่คำนวณนั้น โดยข้อได้เปรียบของการใช้วิธีการคำนวณแบบขึ้นต่อกันนี้จะช่วยให้การคำนวณในส่วนอื่นๆที่ต้องใช้ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลของแบบจำลองนี้ ทำได้รวดเร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม การคำนวณเฉพาะในส่วนของการแผ่รังสี

แบบนี้จะส่งผลให้การปรับค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการบดบังรังสี และการกระเจิงของรังสีเป็นไปอย่างรวดเร็วขึ้นกว่าวิธีแรก แต่วิธีนี้ก็ทำให้การลู่เข้าของคำตอบช้าลงมากถ้าเป็นการคำนวณแบบ Sequential

3.3.3.3.1 สมการแบบจำลอง DO

แบบจำลอง DO จะคำนวณสมการถ่ายโอนรังสี (RTE) ในทิศทาง \vec{s} ของสนามของสมการ ดังนั้นสมการ 3.58 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') d\Omega' \quad (3.59)$$

ทั้งนี้ยังสามารถจำลองการแผ่รังสีแบบ non-gray ได้โดยใช้แบบจำลอง gray-band และสมการถ่ายโอนรังสี (RTE) สำหรับคำนวณความเข้มขึ้นของสเปกตรัม $I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a_\lambda + \sigma_s)I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = a_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') \quad (3.60)$$

ซึ่ง λ เป็นความยาวคลื่น a_λ เป็นสัมประสิทธิ์ดูดซับสเปกตรัมและ $I_{b\lambda}$ เป็นความเข้มของวัตถุดำซึ่งนิยามโดยฟังก์ชัน Planck นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การกระเจิง, ฟังก์ชันการกระเจิง, และดัชนีการสะท้อน n จะสมมุติว่าเป็นอิสระจากความยาวคลื่น

ในคำนวณการการแผ่รังสี non-gray DO นั้นจะแบ่งสเปกตรัมที่แผ่รังสีออกเป็น N ช่วงความยาวคลื่น ซึ่งไม่จำเป็นต้องเท่ากัน โดยช่วงความยาวคลื่นนั้นต้องกำหนดเองและสอดคล้องกับค่าในสูญญากาศ ($n = 1$) โดยที่ RTE เป็นผลรวมทั้งหมดในแต่ละช่วงความยาวคลื่น ซึ่งผลลัพธ์ในสมการถ่ายเทจะเป็นปริมาณ $I_\lambda \Delta\lambda$ โดยพลังงานจากการแผ่รังสีนั้นจะมีอยู่ในช่วงความยาวคลื่น $\Delta\lambda$ ซึ่งพฤติกรรมของก๊าซต่อรังสีในแต่ละแถบคลื่นจะสมมุติว่าเป็นวัตถุดำ โดยรังสีที่ปล่อยออกมาในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ λ_1 ถึง λ_2 ต่อหนึ่งหน่วย Solid Angle ของวัตถุดำสามารถเขียนได้ดังนี้

$$[F(0 \rightarrow n\lambda_2 T) - F(0 \rightarrow n\lambda_1 T)] n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (3.61)$$

ซึ่ง $F(0 \rightarrow n\lambda T)$ เป็นสัดส่วนของพลังงานการแผ่รังสีที่ปล่อยออกมาจากวัตถุดำ [22] ในช่วงความยาวคลื่นจาก 0 ถึง λ ที่อุณหภูมิ T ซึ่งอยู่ในตัวกลางที่มีดัชนีการสะท้อน n ในขณะที่ λ_2 และ λ_1 เป็นขอบเขตของช่วงความยาวคลื่นการแผ่รังสีทั้งหมด $I(\vec{r}, \vec{s})$ ในแต่ละทิศทาง \vec{s} ที่ตำแหน่ง \vec{r} คำนวณได้ดังนี้

$$I(\vec{r}, \vec{s}) = \sum_k I_{\lambda_k}(\vec{r}, \vec{s}) \Delta\lambda_k \quad (3.62)$$

ซึ่งผลรวมนี้เป็นการรวมทั้งหมดของทุกช่วงความยาวคลื่นทั้งนี้ ในส่วนของเงื่อนไขขอบเขตสำหรับแบบจำลอง non-gray DO จะมีการประยุกต์โดยอ้างอิงกับแถบคลื่นที่เกิดการแผ่ของรังสี โดยวิธีการคำนวณภายในแถบคลื่นจะเป็นแบบเดียวกันกับการใช้แบบจำลอง gray DO

3.3.3.2 การเชื่อมต่อกับสมการพลังงานของแบบจำลอง DO

เทคนิคการหาคำตอบที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างพลังงานและความเข้มข้นการแผ่รังสีที่เซลล์ (รู้จักกันในนาม COMET) [25] จะช่วยเร่งการลู่เข้าของ FVS (Finite Volume Scheme) ในการแผ่รังสีถ่ายเทความร้อน วิธีนี้ให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นสำหรับการคำนวณที่มีความหนาของลำแสงมากกว่า 10 โดยส่วนมากจะพบได้ในการหลอมแก้ว ซึ่งความได้เปรียบของแบบจำลองนี้จะเกิดขึ้นเมื่อการกระเจิงเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดลักษณะเช่นนี้ ส่งผลให้ความเชื่อมโยงระหว่างความเข้มข้นของรังสีในทิศทางใดๆต่อความเข้มข้นของรังสีในทิศทางอื่นมีค่าสูง โดยสมการพลังงานสำหรับวิธีคำนวณแบบขั้นต่อกันแสดงไว้ด้านล่างนี้

สมการพลังงานที่ 3.63 ได้จากการอินทิเกรตตลอดทั้งปริมาตรควบคุม i ทำให้ได้สมการพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องดังนี้

$$\sum_{j=i}^N \mu_{ij}^T T_j - \beta_i^T T_i - \alpha_i^T \sum_{k=1}^L I_i^k \omega_k - S_i^T S_i^h \quad (3.63)$$

ซึ่ง

$$\alpha_i^T = \kappa \Delta V_i$$

$$\beta_i^T = 16 \kappa \sigma T_i^3 \Delta V_i$$

$$S_i^T = 12 \kappa \sigma T_i^4 \Delta V_i$$

κ = สัมประสิทธิ์การดูดซับ

ΔV = ปริมาตรควบคุม

สัมประสิทธิ์ μ_{ij}^T และพจน์แหล่งกำเนิด S_i^h เกิดจากการทำการแปลงรูป (Discretization) ของพจน์การพาและพจน์การฟุ้งกระจาย รวมถึงพจน์อื่นนอกเหนือจากการแผ่รังสี

ทำการรวมสมการแปลงรูปแล้ว (Discretized form) ของสมการ RTE (3.59) และสมการพลังงาน เข้าด้วยกัน จะทำให้ได้สมการ 3.64 ดังนี้[25]

$$\vec{p}_i \cdot \vec{q}_i + \vec{r}_i = 0 \quad (3.64)$$

ซึ่ง

$$\vec{q}_i = \begin{bmatrix} I_i^1 \\ I_i^2 \\ \vdots \\ I_i^L \\ T_i \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

$$\vec{P}_i = \begin{bmatrix} M_{ii}^1 + \eta_i^{11} + \gamma_i^1 \omega_1 & \eta_i^{12} + \gamma_i^1 \omega_2 & \dots & \beta_i^1 \\ \eta_i^{21} + \gamma_i^2 \omega_1 & M_{ii}^2 + \eta_i^{22} + \gamma_i^2 \omega_2 & \dots & \beta_i^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\alpha_i^T \omega_1 & -\alpha_i^T \omega_2 & \dots & M_{ii}^T \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

$$\vec{r}_i = \begin{bmatrix} \sum_{j=1, j \neq i}^N \mu_{ij}^l I_j^l - S_i^1 - S_i^B \\ \vdots \\ \sum_{j=1, j \neq i}^N \mu_{ij}^Y T_j + S_i^T + S_i^h \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

ข้อจำกัดของ DO/Energy Coupling

ในส่วนนี้จะแสดงถึงกรณีที่ไม่แนะนำให้ใช้ DO/Energy coupling หรืออาจจะไม่เหมาะสมกับแบบจำลองบางอย่าง

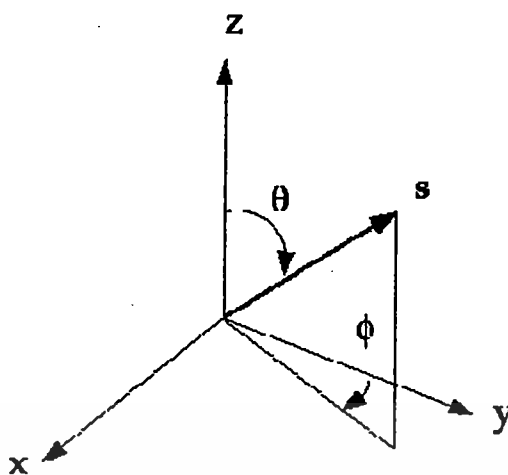
- DO/Energy coupling ไม่เหมาะสำหรับกรณีที่มีการเชื่อมต่อระหว่างพลังงานและทิศทางการเข้มข้นของการแผ่รังสีน้อย ซึ่งอาจจะเป็นผลให้การลู่เข้าของวิธีการนี้ช้าลงเมื่อเทียบกับกระบวนการวิธิตามลำดับ(sequential approach)
- DO/Energy coupling ไม่เหมาะสมกับแบบจำลองสถานะที่มีเปลือกหุ้ม
- DO/Energy coupling จะไม่สามารถใช้ได้เมื่อใช้กับการแก้สมการเอนทาลปีแทนการแก้สมการอุณหภูมิ โดยกรณีทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับการจำลองการเผาไหม้

3.3.3.3 การแบ่งช่วงเชิงมุมและความละเอียดของการคำนวณในแต่ละ

ช่วง (Angular Discretization and Pixelation)

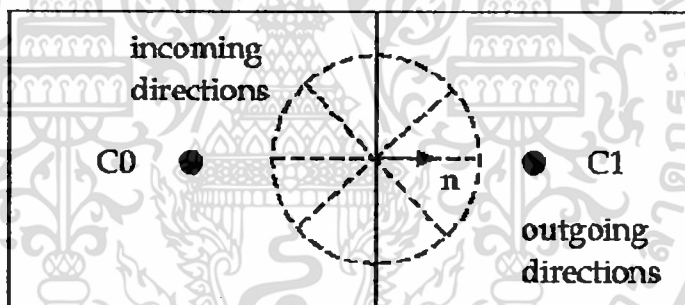
แต่ละออกเต้นท์(Octant) ของพื้นที่ทรงกลมรอบจุดเปล่งรังสีหรือดูดกลืนรังสีใดๆ ที่มีรัศมี 1 หน่วย ขนาด 4π จะถูกแบ่งย่อยออกเป็น จำนวน $N_\theta \times N_\phi$ ชั้นของขอบเขต ω_i ซึ่งเรียกว่ามุมควบคุม(control angle) มุม θ และ ϕ เป็นมุมโพลาร์และมุมอิมิซตามลำดับ โดยจะวัดตามระบบพิกัดฉาก (x, y, z) ตามที่แสดงในรูปที่ 3.7 การแบ่งช่วงของมุม θ และ ϕ กำหนดเป็น $\Delta\theta$ และ $\Delta\phi$ ตามลำดับ มีค่าเป็นค่าคงที่ ยกตัวอย่างเช่น ในการคำนวณ 2 มิติบนระนาบ (x,y) เราจะทำการคำนวณเพียง 4 ออกเต้นท์อันเนื่องมาจากความสมมาตรตามแนวแกน (z) เป็นผลให้ได้ทิศทางทั้งหมด $4N_\theta N_\phi$ ทิศทาง แต่ในการคำนวณแบบ 3 มิติ จะคำนวณทิศทางทั้งหมด $8N_\theta N_\phi$ ทิศทาง (ทั้ง 8 ออกเต้นท์) ในกรณีของแบบจำลอง non-gray จำนวนสมการ $4N_\theta N_\phi$ หรือ $8N_\theta N_\phi$ สมการจะถูกคำนวณที่ละช่วงคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



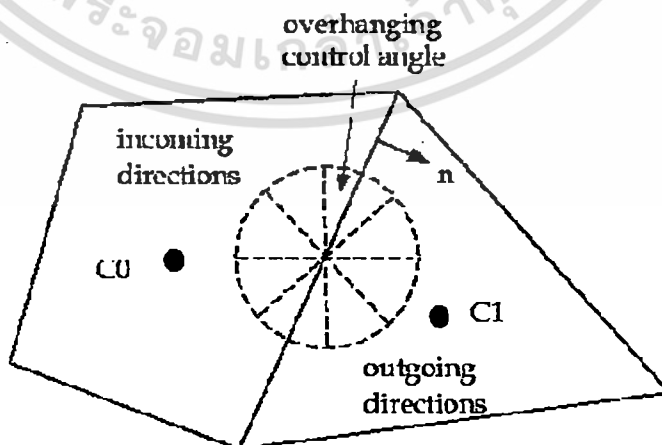
รูปที่ 3.7 ระบบพิกัดเชิงมุม

เมื่อมีการใช้กริดที่กีดจาก ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่เส้นแบ่งมุมกับผิวปริมาตรควบคุมจะเป็นเส้นตรงขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 สำหรับกริดที่มีโครงสร้างไม่เหมือนกริดทั่วไป ผิวปริมาตรควบคุมจะไม่ขนานกันกับเส้นแบ่งมุมตามที่แสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งจะนำไปสู่ปัญหาการเกินมุมควบคุม [26]



face f

รูปที่ 3.8 ผิวที่ไม่เกินมุมควบคุม

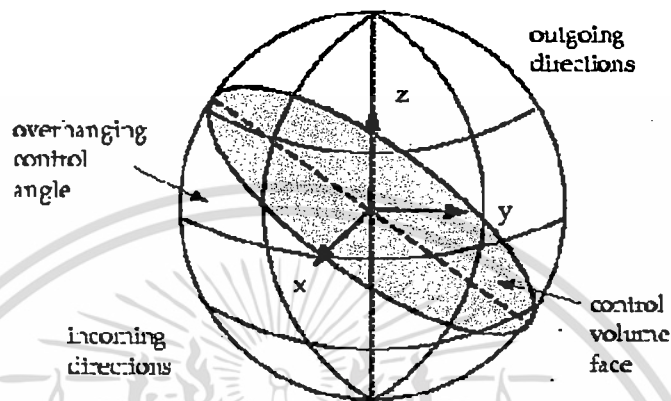


face f

รูปที่ 3.9 ผิวที่เกินมุมควบคุม

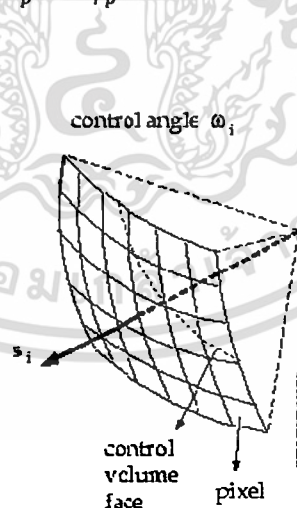
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยหลักแล้ว จะพบว่า มุมควบคุมในลักษณะนี้จะเปรียบเสมือนเป็นมุมรับหรือปลดปล่อยรังสีซึ่งไม่สอดคล้องกับขอบเขตของปริมาตรควบคุม ในทางการแผ่รังสีเสมือนกับเป็นการกางผิวปริมาตรควบคุมออกให้รับหรือปลดปล่อยรังสีมากขึ้นหรือน้อยลงแล้วแต่กรณี จะเห็นได้ว่ามุมบางส่วนก็จะเข้าไปและบางส่วนก็จะออกมายังผิว รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่าง 3 มิติของผิวที่เกินมุมควบคุม



รูปที่ 3.10 ผิวที่เกินมุมควบคุม (3 มิติ)

เมื่อผิวปริมาตรควบคุมตัดแบ่งทรงกลมแล้วจะแสดงให้เห็นเนื้อที่ของมุมที่มุมใดๆ ส่วนเส้นที่ตัดกันนั้นจะเป็นรูปวงกลม มุมควบคุมที่เกินอาจเกิดขึ้นจากผลของการสะท้อนและการหักเห ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ในกรณีนี้จะต้องคำนวณให้แม่นยำสำหรับเศษของมุมที่เกินออกมาหรือขาดไป ซึ่งจะคำนวณโดยใช้ pixelation [26] ในแต่ละส่วนที่เกินมาจากมุมควบคุมได้แบ่งออกเป็น $N_{\theta_p} \times N_{\phi_p}$ พิกเซล ตามที่แสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 Pixelation ของมุมควบคุม

พลังงานที่อยู่ในแต่ละพิกเซลจะถือว่ากำลังเข้าหรือออกไปยังพื้นผิว โดยแนวโน้มของส่วนที่เกินออกมาสามารถคำนวณสำหรับความละเอียดภายในพิกเซล ในการคำนวณสามารถเลือกความคมชัดของพิกเซลที่ใช้คำนวณได้ สำหรับปัญหาที่รวมการแผ่รังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

gray-diffuse จะมีค่ามาตรฐานอยู่ที่ 1×1 สำหรับปัญหาที่มีผิวสมมาตร พีรีออดิก สเปคตรัม หรือขอบเขตกึ่งโปร่งแสงจะแนะนำให้ใช้ค่า pixilation ไร่ที่ 3×3 และควรระวังไว้ว่าการเพิ่มจำนวนของ pixilation เข้าไปทำให้เปลืองทรัพยากรในการคำนวณมากขึ้น

3.3.3.4 การกระเจิงที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง

แบบจำลอง DO ในจะรองรับฟังก์ชันการกระเจิงที่หลากหลาย ซึ่งสามารถเลือกเป็นฟังก์ชันเพศที่เท่ากันทุกทิศทาง ฟังก์ชันเพศเชิงเส้นที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง ฟังก์ชันเพศ Delta-Eddington หรือฟังก์ชันเพศที่กำหนดเอง ฟังก์ชัน Delta-Eddington ได้มาจากรูปแบบต่อไปนี้

$$\Phi(\vec{s}, \vec{s}') = 2f\delta(\vec{s}, \vec{s}') + (1-f)(1 + C\vec{s} \cdot \vec{s}') \quad (3.68)$$

ซึ่ง f เป็นสัดส่วนการกระเจิงไปข้างหน้าและ $\delta(\vec{s}, \vec{s}')$ เป็นฟังก์ชัน Dirac delta พจน์ f ในสมการทำหน้าที่เป็นพจน์ดาวน์น้ำหนัก ยกตัวอย่างเช่นกรณี ที่ f เท่ากับ 1 จะหมายถึงความเข้มของการแผ่รังสีจะไม่มีการกระเจิงเลย เป็นต้น C เป็นสัดส่วนความไม่สมมาตร ดังนั้นเมื่อต้องการใช้ฟังก์ชันเพศ Delta-Eddington เราจะต้องกำหนดค่า f และ C ในกรณีที่ต้องการกำหนดลักษณะการกระเจิงจะกำหนดให้ฟังก์ชันเพศมีรูปแบบดังนี้

$$\Phi(\vec{s}, \vec{s}') = 2f\delta(\vec{s}, \vec{s}') + (1-f)\Phi^*(\vec{s}, \vec{s}') \quad (3.69)$$

เราจะต้องกำหนด Φ^* และสัดส่วนการกระเจิงไปข้างหน้า f ฟังก์ชันของการกระเจิง สำหรับวัตถุเหล่านี้มีให้เลือกใช้สำหรับการแผ่รังสีของวัตถุนิค Non-gray ด้วย อย่างไรก็ตาม ใดๆก็ตามพลังงานที่กระเจิงออกมาจะจำกัดอยู่ในแถบรังสีเดียวกันเท่านั้น

3.3.3.5 ผลกระทบของอนุภาคในแบบจำลอง DO

แบบจำลอง DO สามารถกำหนดผลกระทบที่เกิดจากเฟสอื่นที่เป็นอนุภาคของแข็งได้ด้วย ซึ่งในกรณีนี้จะต้องละทิ้งแหล่งกำเนิดของการกระเจิงอื่นๆ ที่มาจากก๊าซทั้งหมด โดยอิทธิพลของเฟสอนุภาคที่ปรากฏใน RTE จะแสดงได้ดังนี้

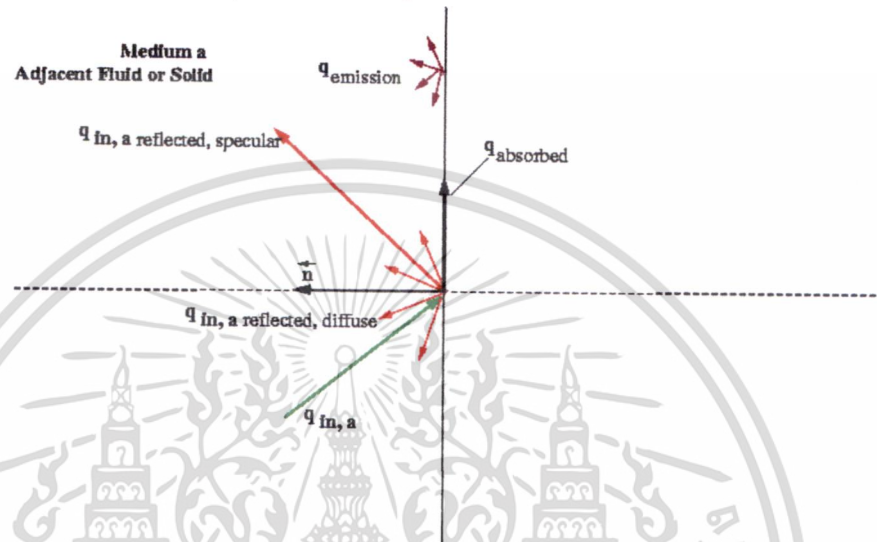
$$\nabla \cdot (I\vec{s}) + (a + a_p + \sigma_p)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma_T^4}{\pi} + E_p + \frac{\sigma_p}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}')\Phi(\vec{s}, \vec{s}')d\Omega' \quad (3.70)$$

ซึ่ง a_p เป็นสัมประสิทธิ์การดูดซับที่เท่ากันอันเนื่องมาจากการมีอยู่ของอนุภาค E_p เป็นการแผ่รังสีที่เท่ากัน σ_p เป็นสัดส่วนการกระเจิงสมมูล สำหรับการแผ่รังสี Non-gray การดูดซับการปลดปล่อย และการกระเจิงเนื่องมาจากเฟสของอนุภาค ได้ถูกรวมอยู่ในแต่ละช่วงความยาวคลื่น ในส่วนของการคำนวณการแผ่รังสี พจน์การปลดปล่อยและการดูดซับรังสีของอนุภาคได้รวมอยู่ในสมการพลังงานแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.3.6 ขอบเขตและการรักษาเงื่อนไขบริเวณเซลล์ที่ผนังทึบแสง

แบบจำลองการแผ่รังสี DO อนุญาตให้ข้อกำหนดของผนังทึบแสงอยู่ในโดเมนนี้ได้ (โดยมีของไหลหรือของแข็งอยู่ติดกับทั้ง 2 ด้านของผนัง) หรือภายนอกโดเมน (โดยมีของไหลหรือของแข็งติดกับผนังด้านเดียวเท่านั้น) ผนังทึบแสงจะถือว่าเป็นเหมือนวัตถุเทาถ้ามีการคำนวณการแผ่รังสีจากวัตถุเทา หรือ non-gray ถ้ามีการใช้แบบจำลอง non-gray DO รูปที่ 3.12 แสดงรูปแบบของการแผ่รังสีบนผนังทึบ



รูปที่ 3.12 การแผ่รังสี DO บนผนังทึบแสง

แผนผังในรูปที่ 3.12 แสดงการแผ่รังสีที่เกิดขึ้น $q_{in,a}$ บนด้าน a ของผนังทึบแสง การแผ่รังสีบางส่วนจะสะท้อน ฟุ้งกระจาย และสเปกตรัม จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนการฟุ้งกระจาย f_a สำหรับด้าน a ของผนังซึ่งถูกกำหนดเป็นเงื่อนไขขอบเขต

การแผ่รังสีที่เกิดขึ้นบางส่วนถูกดูดซับที่พื้นผิวของผนังและการแผ่รังสีบางส่วนเป็นการปลดปล่อยออกมาจากผิวของผนังตามที่แสดงในรูปที่ 3.12 การแผ่รังสีทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ถูกดูดซับที่ผิวผนังและทั้งหมดได้เปล่งรังสีกลับไป โดยขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การเปล่งรังสีและฟุ้งกระจายของพื้นผิวนั้น สำหรับแบบจำลอง non-gray DO นั้นเราจะต้องกำหนดความสามารถในการเปล่งรังสีของแต่ละช่วงความยาวคลื่น ซึ่งการแผ่รังสีจะไม่ส่งผ่านผนังทึบแสง

พลังงานจากการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นตกกระทบต่อผนังทึบซึ่งสามารถสะท้อนแสงกลับไปยังตัวกลางรอบๆและดูดซับโดยผนัง การแผ่รังสีที่สะท้อนสามารถฟุ้งกระจาย การสะท้อนและ/หรือสะท้อนสเปกตรัมขึ้นอยู่กับสัดส่วนการฟุ้งกระจาย f_a ถ้า q_{in} เป็นพลังงานการแผ่รังสีทั้งหมดที่เกิดขึ้นบนผนังทึบแสง ปริมาณดังต่อไปนี้จะเป็นค่าสำหรับผนังทึบแสง

- การเปล่งรังสีออกจากผิวของผนัง = $n^2 \epsilon_w \sigma T_w^4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พลังงานที่สะท้อนแบบฟุ้งกระจาย = $f_d(1 - \epsilon_w)q_{in}$
- พลังงานที่สะท้อนที่เป็นลำ = $(1 - f_d)(1 - \epsilon_w)q_{in}$
- การดูดซับที่ผิวผนัง = $\epsilon_w q_{in}$

ซึ่ง f_d เป็นสัดส่วนการฟุ้งกระจาย n เป็นดัชนีการหักเหของตัวกลางที่อยู่ติดกัน ϵ_w เป็นการเปล่งรังสีที่ผนัง σ เป็นค่าคงที่สเตฟาน-โบลซ์แมนและ T_w เป็นอุณหภูมิที่ผนัง การดูดซับที่พื้นผิวผนังจะสมมุติว่าความสามารถในการดูดซับนั้นเท่ากับการเปล่งรังสี สำหรับผนังที่มีแต่การฟุ้งกระจายอย่างเดียว f_d เท่ากับ 1 และไม่มีการสะท้อนพลังงานสเปกตรัม เช่นเดียวกับผนังที่มีแต่สเปกตรัมอย่างเดียว f_d จะเท่ากับ 0 และไม่มี การฟุ้งกระจายของพลังงานที่สะท้อน สัดส่วนการฟุ้งกระจายจะมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งจะมีผลต่อการฟุ้งกระจายและสะท้อนของพลังงานบางส่วน

การฟุ้งกระจายของผนังเทา

สำหรับการฟุ้งกระจายของการแผ่รังสีของวัตถุเทา ฟลักซ์ความร้อนของการแผ่รังสีที่เกิดขึ้น q_{in} ที่ผนังเป็นดังนี้

$$q_{in} = \int_{\Omega} I_{in} \cos^2 \theta \, d\Omega \quad (3.70)$$

ฟลักซ์การแผ่รังสีที่ออกจากพื้นผิวรวมเป็นดังนี้

$$q_{out} = (1 - \epsilon_w)q_{in} + n^2 \epsilon_w \sigma T_w^4 \quad (3.71)$$

ซึ่ง n เป็นดัชนีการสะท้อนสำหรับตัวกลางที่อยู่ติดกัน ϵ_w เป็นค่าการปลดปล่อยของผนัง σ เป็นค่าคงที่สเตฟาน-โบลซ์แมนและ T_w เป็นอุณหภูมิผนัง สมการนี้ยังใช้ได้กับการแผ่รังสีสเปกตรัมที่มีค่าการเปล่งรังสีเท่ากับศูนย์

ขอบเขตความเข้มข้นสำหรับทิศทางที่ฟุ้งออกทั้งหมด I_0 ที่กำหนดเป็นดังนี้

$$I_0 = \frac{q_{out}}{\pi} \quad (3.72)$$

การฟุ้งกระจายของผนัง Non-Gray

ในส่วนนี้เป็นชุดสมการพิเศษที่นำมาปรับใช้กับการฟุ้งกระจายของผนัง non-gray โดยสมการเหล่านี้สมมุติว่าความสามารถในการดูดซับนั้นเท่ากับการเปล่งรังสีที่ผิวผนัง สำหรับการฟุ้งกระจายรังสี non-gray ฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนที่ปรากฏ $q_{in,\lambda}$ ในช่วง $\Delta\lambda$ ที่ผนังเป็นดังนี้

$$q_{in,\lambda} = \Delta\lambda \int_{\Omega} I_{in,\lambda} \cos^2 \theta \, d\Omega \quad (3.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลักรังสีการแผ่รังสีความร้อนทั้งหมดออกจากผิวในช่วง $\Delta\lambda$ เป็นดังนี้

$$q_{out,\lambda} = (1 - \epsilon_{w\lambda})q_{in,\lambda} + \epsilon_{w\lambda}[F(0 \rightarrow n\lambda_2 T_w) - F(0 \rightarrow n\lambda_1 T_w)]n^2 \sigma T_w^4 \quad (3.74)$$

ซึ่ง $\epsilon_{w\lambda}$ เป็นค่าการแผ่รังสีที่ผนังในช่วงคลื่น $F(n, \lambda, T)$ ซึ่งได้มาจากฟังก์ชันการกระจายของพลังค์ ซึ่งค่าเหล่านี้ได้มาจากการเปล่งรังสีซึ่งแต่แถบการแผ่รังสีเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่ผิวของแหล่งกำเนิด โดยขอบเขตความเข้มข้นสำหรับทิศทางที่พุ่งออกทั้งหมด r ในแถบความยาวคลื่น $\Delta\lambda$ ที่ผนังเขียนได้ดังนี้

$$I_{0\lambda} = \frac{q_{out,\lambda}}{\pi\Delta\lambda} \quad (3.75)$$

3.3.3.3.7 ขอบเขตและการรักษาเงื่อนไขบริเวณเซลล์ที่ผนังกึ่งโปร่งแสง

ในการคำนวณสามารถกำหนดผนังกึ่งโปร่งแสง ได้ทั้งภายนอกและภายใน สำหรับแบบจำลอง DO ในกรณีของผนังกึ่งโปร่งแสง การแผ่รังสีที่เกิดขึ้นสามารถผ่านทะลุผนังและส่งผ่านไปยังตัวกลางที่ติดกัน (และเป็นไปได้ที่จะสะท้อน) ซึ่งจะสามารถสะท้อนกลับไปยังตัวกลางรอบๆ และดูดซับตลอดความหนาของผนัง โดยการส่งผ่านและการสะท้อนสามารถพุ่งกระจายและ/หรือพุ่งออกเป็นลำนั้น จะต้องกำหนดสัดส่วนการพุ่งกระจายสำหรับรังสีที่มีการส่งผ่านและการสะท้อน โดยส่วนที่เหลือจะเป็นการสะท้อนในลักษณะเป็นลำ สำหรับผนังกึ่งโปร่งแสงภายนอก มีแหล่งกำเนิดการแผ่รังสีที่เป็นไปได้สองแหล่งที่อยู่บนผนัง รังสีเออเรดิเอชันจากภายนอก โดเมนการคำนวณและการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นจากเซลล์ใน โชนของไหลหรือของแข็งที่อยู่ติดกับขอบเขตนั้น

สำหรับการแผ่รังสีแบบ non-gray สภาวะเงื่อนไขขอบเขตของผนังชนิดกึ่งโปร่งแสงจะถูกนำมาใช้สำหรับแต่ละช่วงแถบความยาวคลื่น พลังงานการแผ่รังสีภายในแถบคลื่นได้ถูกส่งผ่าน สะท้อน และหักเหเหมือนกับในกรณีวัตถุทึบ แต่จะไม่มี การส่งผ่าน สะท้อน และหักเหของพลังงานจากแถบคลื่นหนึ่ง ไปยังอีกแถบคลื่นหนึ่ง

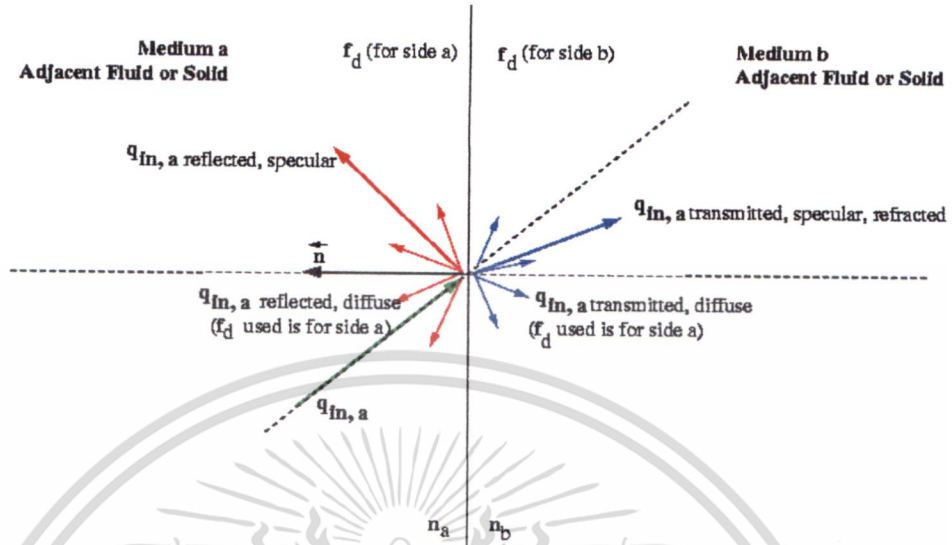
โดยปกติแล้วสมการ DO จะใช้แก้ปัญหาในส่วนหนึ่งของของไหลแต่ไม่ได้ใช้ใน โชนของของแข็ง ดังนั้นถ้ามี โชนของแข็งอยู่ติดกันกับผนังบาง ก็ควรที่จะกำหนด โชนของแข็งให้มีการแผ่รังสีที่เป็นส่วนหนึ่งของเงื่อนไขขอบเขต

ผนังกึ่งโปร่งแสงภายใน

รูปที่ 3.13 แสดงแผนผังของภายใน (สองด้าน) ผนังซึ่งประพฤติตัวเหมือนกึ่งโปร่งแสงและมีความหนาเป็นศูนย์ โดยพลังงานการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นจะแทนด้วย $q_{in,a}$ สามารถผ่านทะลุผนังกึ่งโปร่งแสงเฉพาะ ในกรณีที่อยู่ติดกับของแข็งหรือของเหลวที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในการแผ่รังสี ด้วยเหตุนี้จึงอนุญาตให้สามารถมีการแผ่รังสีต่อกันเกิดขึ้นได้ การแผ่รังสีต่อกันจะต้องกำหนดให้ผนังมีลักษณะแบบกึ่งโปร่งแสง



รูปที่ 3.13 การแผ่รังสีแบบ DO บนผนังกึ่งโปร่งแสงภายใน

พลังงานการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านทะลุไปยังผนังกึ่งโปร่งแสงโดยสามารถส่งผ่านแบบฟุ้งกระจายและแบบเป็นลำได้ การแผ่รังสีสามารถสะท้อนที่ผนังภายในกลับไปยังตัวกลางรอบๆ โดยครรชนหักเห n_a สำหรับตัวกลาง a มีความแตกต่างมากกว่าครรชนหักเห n_b สำหรับตัวกลาง b การสะท้อนของรังสีสามารถสะท้อนและฟุ้งกระจายสเปกตรัม โดยสัดส่วนของการฟุ้งกระจายกับการแผ่รังสีของสเปกตรัม ซึ่งส่งผ่านและสะท้อนขึ้นอยู่กับสัดส่วนการฟุ้งกระจายของผนัง ในกรณีของการฟุ้งกระจายและส่งผ่านสเปกตรัมอย่างเดียวกันและการสะท้อนบนผนังกึ่งโปร่งแสงจะแสดงในส่วนถัดไป

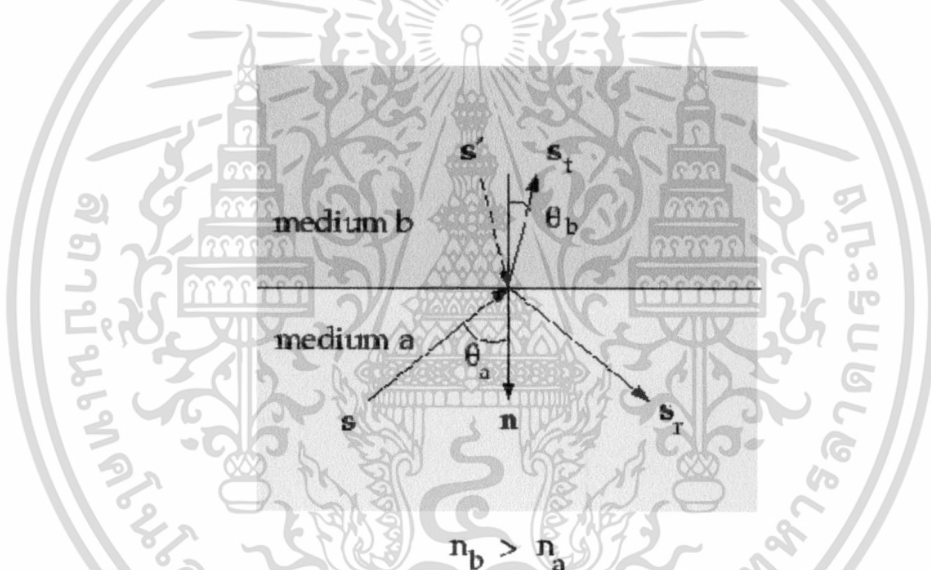
ถ้าผนังกึ่งโปร่งแสงมีความหนา เมื่อความหนาและสัมประสิทธิ์การดูดซับจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับของผนังบาง ถ้าความหนาของผนังหรือสัมประสิทธิ์การดูดซับอย่างใดอย่างหนึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อนั้นผนังจะไม่มีความสามารถในการดูดซับ ถึงแม้ว่าการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นสามารถถูกดูดซับได้ผนังกึ่งโปร่งแสงที่มีความหนา แต่จำไว้ว่า โดยปกติแล้วฟลักซ์ของรังสีที่ถูกดูดซับจะไม่มีผลกระทบต่อสมการพลังงานนอกจากจะใช้สมการในส่วนการนำความร้อน โดยส่วนนี้เองจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้เกิดการไม่สมดุลทางพลังงานและอาจจะได้สนามของอุณหภูมิที่ไม่คาดไว้ยกเว้นแต่ว่าจะใช้ฉนวน (มีเฉพาะ 3 มิติ) ซึ่งในกรณีนี้จะมีความสอดคล้องกันระหว่างพลังงานและการแผ่รังสี ถ้าผนังมีดูดซับ/ปลดปล่อยอาจจะดีกว่าแบบจำลองความหนากับเซลล์ของแข็ง ซึ่งจะไม่ได้รวมในส่วนของการแผ่รังสีจากผิวของผนังกึ่งโปร่ง

แสง (คือ เนื่องจากการกำหนดการเปล่งรังสีภายใน) ยกเว้นกรณีที่เกิดเมื่ออุณหภูมิเงื่อนไขที่สถานะขอบถูกกำหนด

สเปกตรัมผนังกิ่งโปร่งแสง

เมื่อพิจารณากรณีของผนังกิ่งโปร่งแสง เมื่อสัดส่วนการฟุ้งกระจาย f_a เท่ากับ 0 และพลังงานทั้งหมดของการส่งผ่านและสะท้อนที่ผนังกิ่งโปร่งแสงจะเป็นสเปกตรัมทั้งหมด

รูปที่ 3.14 แสดงการเดินทางของรังสีจากตัวกลางกิ่งโปร่งแสง a และดัชนีหักเหแสง n_a ไปยังตัวกลางกิ่งโปร่งแสง b และดัชนีหักเห n_b ในทิศทาง \vec{s} พื้นผิว a ผ่านด้านตัวกลาง a เช่นเดียวกับผิว b ผ่านตัวกลาง b เส้นตั้งฉาก \vec{n} สมมติว่าให้อยู่ที่ด้าน a ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้น $I_a(\vec{s})$ ซึ่งความเข้มข้นในทิศทาง \vec{s} บนด้าน a ของผนังร่วมจะสอดคล้องกับปริมาณบนด้าน b , $I_b(\vec{s})$.



รูปที่ 3.14 การสะท้อนและหักเหของการแผ่รังสีที่ผิวร่วมระหว่างตัวกลางโปร่งแสงทั้งสอง

ส่วนของพลังงานที่เกิดขึ้นบนผิวร่วมได้ถูกสะท้อนและที่เหลือนจะเป็นการส่งผ่าน โดยการสะท้อนเป็นสเปกตรัม ดังนั้นทิศทางของการสะท้อนรังสีเป็นดังนี้

$$\vec{s}_r = \vec{s} - 2(\vec{s} \cdot \vec{n})\vec{n} \quad (3.76)$$

การส่งผ่านรังสีจากตัวกลาง a ไปยังตัวกลาง b อยู่ภายใต้การหักเห ซึ่งทิศทางของการส่งผ่านพลังงาน \vec{s}_t ได้มาจาก Snell's law

$$\sin\theta_b = \frac{n_a}{n_b} \sin\theta_a \quad (3.77)$$

ซึ่ง θ_a เป็นมุมตกกระทบและ θ_b เป็นมุมการส่งผ่าน ตามที่แสดงในรูปที่ 3.14 สามารถอธิบายทิศทางได้ดังนี้

$$\vec{s}' = \vec{s}_t - 2(\vec{s}_t \cdot \vec{n})\vec{n} \quad (3.78)$$

การสะท้อนบนผิวร่วมที่ด้าน a [22]

$$r_a(\vec{s}) = \frac{1}{2} \left(\frac{n_a \cos \theta_b - n_b \cos \theta_a}{n_a \cos \theta_b + n_b \cos \theta_a} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{n_a \cos \theta_a - n_b \cos \theta_b}{n_a \cos \theta_a + n_b \cos \theta_b} \right)^2 \quad (3.79)$$

แสดงถึงสัดส่วนของพลังงานที่ถ่ายเทจาก \vec{s} ไปยัง \vec{s}' ที่เกิดขึ้น

ขอบเขตความเข้ม $I_{w,a}(\vec{s}_r)$ ในทิศทางพุ่งออก \vec{s}_r บนด้าน a ของผิวร่วมกำหนดจากองค์ประกอบการสะท้อนของรังสีที่พุ่งเข้าจากด้าน b ดังนั้น

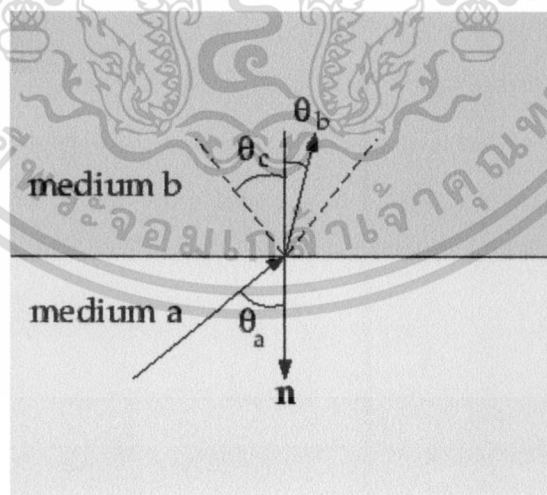
$$I_{w,a}(\vec{s}_r) = r_a(\vec{s})I_{w,a}(\vec{s}) + \tau_b(\vec{s}')T_{w,b}(\vec{s}') \quad (3.80)$$

ซึ่ง $\tau_b(\vec{s}')$ เป็นการส่งผ่านของด้าน b ในทิศทาง \vec{s} คล้ายคลึงกันกับรังสีที่พุ่งออกในทิศทาง \vec{s}_t บนด้าน b ของผิวร่วม $I_{w,a}(\vec{s}_t)$ ได้มาโดย

$$I_{w,b}(\vec{s}_t) = r_b(\vec{s}')I_{w,b}(\vec{s}') + \tau_a(\vec{s})T_{w,a}(\vec{s}) \quad (3.81)$$

ถ้าหกรณีที่ $n_a < n_b$ พลังงานส่งผ่านจากตัวกลาง a ไปยังตัวกลาง b ในมุมพุ่งเข้า 2π ต้องหักเหไปยังกรวยของมุมแหลม θ_c (ดูในรูปที่ 3.15) ซึ่ง

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_a}{n_b} \quad (3.82)$$



$$n_b > n_a$$

รูปที่ 3.15 มุมวิกฤติ θ_c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของการส่งผ่านสำหรับพลังงานรังสีที่ออกจากตัวกลาง b ไปยังตัวกลาง a เป็นรูปแบบกรวยมุมแหลม θ_c ซึ่งหักเหไปสู่มุมพุ่งออก 2π สำหรับมุมที่เกิดขึ้นมากกว่า θ_c การสะท้อนภายในทั้งหมดและพลังงานที่พุ่งเข้ามาทั้งหมดจะสะท้อนออกไปเป็นลำกลับไปยังตัวกลาง b ซึ่งสมการที่แสดงอยู่ทางด้านบนสามารถนำไปใช้กับกรณีทั่วไปของผนังกึ่งโปร่งแสงภายในซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 3.13

เมื่อตัวกลาง b เป็นด้านนอกของโดเมนเหมือนกันกรณีผนังกึ่งโปร่งแสงภายนอก $I_{w,b}(s')$ ที่อยู่ในสมการที่ 3.80 ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องกำหนดค่าสถานะขอบเขตเข้าไป เราสามารถกำหนดค่าของฟลักซ์รังสีที่พุ่งเข้ามาในรูปของขนาด ทิศทางลำแสง และ solid angle ตลอดทั้งฟลักซ์การแผ่รังสี จำไว้ว่าดัชนีหักเหของตัวกลางภายนอกจะสมมุติว่าเท่ากับ 1

การพุ่งกระจายที่ผนังกึ่งโปร่งแสง

พิจารณาในกรณีผนังกึ่งโปร่งแสง เมื่อสัดส่วนการพุ่งกระจาย f_d เท่ากับ 1 และพลังงานที่ส่งผ่านและสะท้อนรังสีทั้งหมดที่ผนังกึ่งโปร่งแสงจะเป็นการพุ่งกระจายเพียงอย่างเดียว

ในปัญหาทางวิศวกรรม ผิวนวมกึ่งโปร่งแสงอาจจะเป็นตัวสะท้อนที่มีการพุ่งกระจาย โดยกรณีที่มีการสะท้อนร่วม $r(s)$ ได้ถูกสมมุติว่าเป็นอิสระจาก s และเท่ากับค่าเฉลี่ยครึ่งวงกลม r_d สำหรับ $n = n_a/n_b > 1$, $r_{d,a}$ และ $r_{d,b}$ ได้กำหนดไว้โดย [27]

$$r_{d,a} = 1 - \frac{(1-r_{d,b})}{n^2} \quad (3.83)$$

$$r_{d,b} = \frac{1}{2} + \frac{(3n+1)(n-1)}{6(n+1)^2} + \frac{n^2(n^2-1)^2}{(n^2+1)^3} \ln\left(\frac{n-1}{n+1}\right) - \frac{2n^3(n^2+2n-1)}{(n^2+1)(n^4-1)} + \frac{8n^4(n^4+1)}{(n^2+1)(n^4-1)^2} \ln(n) \quad (3.84)$$

ขอบเขตความเข้มสำหรับทุกทิศทางที่พุ่งออกบนด้าน a ของผิวนวมเป็นดังนี้

$$I_{w,a} = \frac{r_{d,a}q_{in,a} + r_{d,b}q_{in,b}}{\pi} \quad (3.85)$$

เช่นเดียวกับด้าน b

$$I_{w,b} = \frac{r_{d,b}q_{in,b} + r_{d,a}q_{in,a}}{\pi} \quad (3.86)$$

ซึ่ง

$$q_{in,a} = - \int_{4\pi} I_{w,a} s' \cdot \vec{n} d\Omega, \quad s' \cdot \vec{n} < 0 \quad (3.87)$$

$$q_{in,b} = \int_{4\pi} I_{w,b} s' \cdot \vec{n} d\Omega, \quad s' \cdot \vec{n} \geq 0 \quad (3.88)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

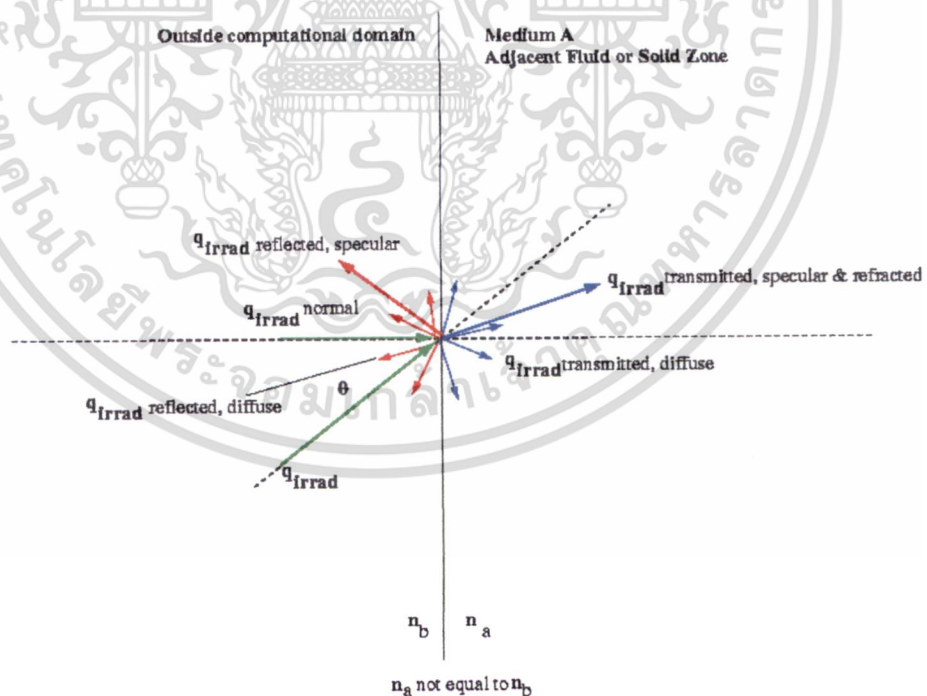
เมื่อตัวกลาง b เป็นด้านนอกของโดเมนการคำนวณ ในกรณีของผนังกึ่งโปร่งแสงภายนอก (รูปที่ 3.16) $q_{in,b}$ ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องกำหนดค่าสภาวะขอบเขตเข้าไป เราสามารถกำหนดค่าของฟลักซ์รังสีที่พุ่งเข้ามาในรูปของขนาด ทิศทางลำแสง และมุม solid angle ตลอดทั้งฟลักซ์การแผ่รังสี จำไว้ว่าดัชนีหักเหของตัวกลางภายนอกจะสมมุติว่าเท่ากับ 1

การฟุ้งกระจายบางส่วนของผนังกึ่งโปร่งแสง

สัดส่วนการฟุ้งกระจาย f_d สำหรับผนังกึ่งโปร่งแสงจะมีค่าระหว่าง 0 และ 1 ซึ่งผนังจะเกิดการฟุ้งกระจายและสะท้อนออกไปเป็นลำบางส่วน โดยในกรณีนี้จะคำนวณรวมการสะท้อนและการส่งผ่านฟลักซ์รังสีที่รวมเข้ากับทั้งองค์การฟุ้งกระจายและองค์ประกอบของลำรังสีเข้าร่วมในสมการ

ผนังกึ่งโปร่งแสงภายนอก

รูปที่ 3.16 แสดงให้เห็นถึงกรณีทั่วไปของลำแสงออเรดิเอชัน q_{irrad} ที่นำไปใช้กับผนังกึ่งโปร่งแสงภายนอกที่มีความหนาเป็นศูนย์และสัมประสิทธิ์การดูดซับที่ไม่เป็นศูนย์ของคุณสมบัติของสสาร โดยอ้างอิงจากผลกระทบการแผ่รังสีของความหนาผนังกึ่งโปร่งแสงในส่วนก่อนหน้า



รูปที่ 3.16 ออเรดิเอชัน DO บนผนังกึ่งโปร่งแสงภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลักซ์เอเรดิเอชันจะทะลุผ่านผนังกึ่งโปร่งแสงจากภายนอกโดเมนคำนวณ (รูปที่ 3.16) ไปยังของไหลที่อยู่ติดกันหรือตัวกลางที่เป็นของแข็ง α การส่งผ่านรังสีสามารถหักเห (เลี้ยวเบน) และลำรังสีที่กระจายและฟุ้งกระจาย โดยจะขึ้นอยู่กับดัชนีการหักเหและสัดส่วนการฟุ้งกระจายซึ่งจะต้องกำหนดค่าสภาวะขอบเขตเข้าไป ควรคำนึงไว้ว่าเมื่อมีองค์ประกอบการสะท้อนของ q_{irrad} เกิดขึ้นมาเมื่อนั้นดัชนีการสะท้อนของผนัง (n_b) จะไม่เท่ากับ 1

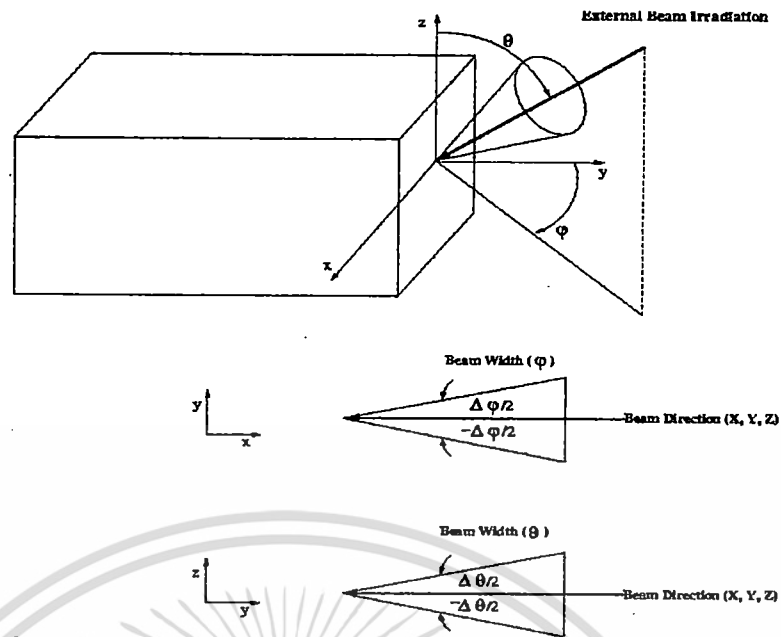
โดยฟลักซ์ที่ผนังกึ่งโปร่งแสงสามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$Q_{ext} = \epsilon_{external} \sigma T_{rad}^4 \quad (3.89)$$

สัดส่วนของพลังงานที่มาจากภายนอกจะเข้าสู่โดเมน โดยขึ้นอยู่กับ การส่งผ่านของผนังกึ่งโปร่งแสงภายใต้การพิจารณา ซึ่งพลังงานนี้จะกระจายตลอดทั้ง solid angle การแผ่รังสีที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นที่บริเวณด้านนอกของผนังกึ่งโปร่งแสง โดยจะอ้างอิงจากรายละเอียดของผนังภายในที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ เนื่องจากว่าผลกระทบจากการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นนั้นเหมือนกัน

ลำแสงเอเรดิเอชันกำหนดอยู่ในรูปของปริมาณ ทิศทางลำแสง และความกว้างของลำแสงซึ่งค่าเหล่านี้จะต้องกำหนดเอง ปริมาณของเอเรดิเอชันจะกำหนดอยู่ในรูปของฟลักซ์รังสีความร้อนที่เกิดขึ้น (W/m^2) โดยความกว้างลำแสงจะระบุในหน่วย solid angle ตลอดทั้งการกระจายของเอเรดิเอชัน (θ คือ ลำแสงและ φ คือ ขอบเขต) ความกว้างของลำแสงปกติจะอยู่ที่ 10^{-6} องศาซึ่งเหมาะสมสำหรับลำเส้นรังสีที่ขนานกัน ทิศทางของลำแสงกำหนดโดยเวกเตอร์ของจุดเซนทรอยด์ของ solid angle ถ้าเลือกรูปแบบทิศทางเอเรดิเอชันขนานกับลำแสงจะต้องกำหนดค่า q_{irrad} สำหรับเอเรดิเอชัน (รูปที่ 3.16) จะคำนวณและใช้ฟลักซ์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิว $q_{irrad,normal}$ ในการคำนวณการแผ่รังสีนี้

รูปที่ 3.17 แสดงให้เห็นแผนผังของทิศทางลำแสงและความกว้างของลำแสงของลำรังสีเอเรดิเอชัน ต้องกำหนดค่าเหล่านี้ (ปริมาณเอเรดิเอชัน) ให้เป็นส่วนหนึ่งของสภาวะขอบเขตสำหรับผนังกึ่งโปร่งแสง



รูปที่ 3.17 ความกว้างและทิศทางของลำแสงสำหรับลำแสงเอเรคชันภายนอก

ลำแสงเอเรคชันสามารถหักเหในตัวกลาง d โดยจะขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหซึ่งกำหนดเฉพาะของไหลหรือของแข็ง

ข้อจำกัด

เมื่อไม่มีฉนวนกันการนำความร้อน จะมีเพียงข้อจำกัดเดียวที่รองรับสำหรับการคำนวณการดูดซับและเปล่งรังสีของผนังกึ่งโปร่งแสงบาง โดยเฉพาะในกรณีที่มีการเปล่งรังสีหรือการดูดซับรังสีที่เกิดขึ้นในของแข็ง อย่างเช่น การดูดซับของความยาวคลื่นที่ยาวของรังสีในกระจกแก้ว ซึ่งการใช้โมเดลผนังกึ่งโปร่งแสงบางสามารถให้ผลลัพธ์ในการทำนายของอุณหภูมิที่ไม่เป็นไปตามกายภาพได้ โดยในแบบจำลอง 3 มิติ นี้สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดเหตุการณ์นี้ได้โดยเลือกให้มีการนำความร้อนของผนังสำหรับผนังบางหรือมีฉนวน ก็จะแนะนำให้เลือกให้ผนังแข็งที่มีความหนาที่มากกว่าความหนาของเซลล์

3.3.3.3.8 ตัวกลางของแข็งกึ่งโปร่งแสง

แบบจำลองการแผ่รังสี DO สามารถจำลอง โชนของแข็งที่มี โชนของไหลหรือของแข็งที่อยู่ติดกันเป็น ตัวกลางกึ่งโปร่งแสง ในส่วนนี้จะสมบูรณ์ได้โดยกำหนด โชนของแข็งร่วมกับการแผ่รังสีในส่วนของกำหนดค่าเงื่อนไขขอบ ซึ่งการจำลอง โชนของแข็งดังกล่าวกึ่งโปร่งแสงนั้นสามารถบรรยายละเอียดการกระจายของอุณหภูมิภายใน โชนกึ่งโปร่งแสง ซึ่งจะคำนวณสมการพลังงานต่อเซลล์บนพื้นฐานสำหรับของแข็งและจะให้ผลลัพธ์ในส่วนของการนำความร้อน โดยทั่วไปแล้วสมการ DO ใช้แก้ปัญหา

ในส่วนของไหล แต่ไม่ใช่ใน โชนของแข็ง ถ้าต้องการที่จะให้มีการคำนวณการแผ่รังสีในของแข็งจะต้องกำหนดในส่วนของสถานะเงื่อนไขขอบเขต

3.3.3.3.9 การรักษาสภาวะขอบเขตผนังสเปกตรัมและขอบเขตสมมาตร

ที่ผนังสเปกตรัมและขอบเขตแบบสมมาตร ทิศทางของรังสีสะท้อน \vec{s}_r จะสอดคล้องกับทิศทางที่พุ่งเข้า \vec{s} และได้มาโดยสมการ 3.76

$$I_w(\vec{s}_r) = I_w(\vec{s}) \quad (3.90)$$

3.3.3.3.10 การรักษาสภาวะขอบเขตที่ขอบเขตพีริออดิก

เมื่อมีการใช้สภาวะพีริออดิกจำเป็นจะต้องมีการกำหนด pixilation เพื่อที่จะแน่ใจได้ว่าพลังงานที่แผ่รังสีส่งผ่านระหว่างพีริออดิกและผิวพื้นหลังจะเป็นไปอย่างถูกต้อง โดยค่า Pixilation ที่แนะนำให้ใช้จะอยู่ระหว่าง 3×3 และ 10×10

3.3.3.4 การแผ่รังสีในการไหลที่มีการเผาไหม้

3.3.3.4.1 The Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model

Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model (WSGGM) เป็นการหาจุดสมดุลอย่างมีเหตุผลระหว่างแบบจำลองก๊าซเทาอย่างง่ายและแบบจำลองที่ซับซ้อนซึ่งนำไปสู่การคำนวณการดูดซับแถบคลื่นที่เฉพาะเจาะจง โดยข้อสันนิษฐานอย่างง่ายของ WSGGM ก็คือ การสัมประสิทธิ์การเปล่งรังสีทั้งหมดตลอดระยะทาง s สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\epsilon = \sum_{i=0}^I a_{\epsilon,i}(T)(1 - e^{-k_i ps}) \quad (3.91)$$

ซึ่ง $a_{\epsilon,i}$ เป็นสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักของการเปล่งรังสีสำหรับสปีชีส์ก๊าซที่สมมุติขึ้นมา i th ของก๊าซเทา โดยปริมาณที่อยู่วงเล็บเป็นสัมประสิทธิ์การเปล่งรังสีของสปีชีส์ก๊าซที่สมมุติขึ้นมา i th ของก๊าซเทา k_i เป็นสัมประสิทธิ์การดูดซับ p เป็นผลรวมของความดันย่อยของการดูดซับของก๊าซทั้งหมดและ s เป็นความยาวเส้นทาง สำหรับ $a_{\epsilon,i}$ และ k_i จะต้องใช้ค่าจาก [29] และ [30] ซึ่งค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบก๊าซ และ $a_{\epsilon,i}$ ก็ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย เมื่อความดันทั้งหมดไม่เท่ากับ 1 atm จะมีการใช้กฎสัดส่วนสำหรับ k_i (ดูในสมการ 3.97)

สัมประสิทธิ์ดูดซับที่ $i = 0$ กำหนดให้ค่าเป็นศูนย์เพื่อคำนวณสเปกตรัมระหว่างของเขตเงาสำหรับการดูดซับที่มีค่าสูง ($\sum_{i=1}^I a_{\epsilon,i} < 1$) และสัดส่วนถ่วงน้ำหนักสำหรับ $i = 0$ ได้มาจาก [30]

$$a_{\epsilon,0} = 1 - \sum_{i=1}^I a_{\epsilon,i} \quad (3.92)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับ $a_{\epsilon,i}$ ซึ่งสามารถประมาณได้โดยฟังก์ชันใดๆ แต่โดยส่วนมากประมาณโดยการใช้สมการนี้

$$a_{\epsilon,i} = \sum_{j=1}^J b_{\epsilon,i,j} T^{j-1} \quad (3.93)$$

ซึ่ง $b_{\epsilon,i,j}$ เป็นสัมประสิทธิ์การแปลงรังสีโพลีโนเมียลขึ้นกับอุณหภูมิก๊าซ สัมประสิทธิ์ $b_{\epsilon,i,j}$ และ k_i ประมาณได้จากการพิทสมการ 3.91 เพื่อบันทึกการแปลงรังสีทั้งหมดลงในตารางซึ่งได้มาจากการทดลอง [29, 31, 30]

ความสามารถในการดูดซับ α ของการแผ่รังสีจากผนังสามารถประมาณได้ในทางเดียวกัน [30] แต่ในการที่จะทำให้ปัญหาง่ายขึ้น จะสมมุติว่า $\epsilon = \alpha$ [32] ซึ่งข้อสมมุติฐานนี้จะสมเหตุสมผลยกเว้นแต่ว่าตัวกลางนั้นบางและอุณหภูมิผนังที่พิจารณาแตกต่างจากอุณหภูมิก๊าซ

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ $b_{\epsilon,i,j}$ และ k_i เป็นฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงตามค่า ps และ T ซึ่งสามารถสมมุติได้ว่าคงที่สำหรับช่วงของตัวแปรที่กว้าง ใน [30] สัมประสิทธิ์ค่าคงที่เหล่านี้แสดงถึงความสัมพันธ์ของความดันที่แตกต่างของคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ โดยจะสมมุติว่าความดันทั้งหมด p_T เท่ากับ 1 atm ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้แสดงใน [30] และมีค่าเป็นดังนี้ $0.001 \leq ps \leq 10.0 \text{ atm-m}$ และ $600 \leq T \leq 2400 \text{ K}$ สำหรับ $> 2400 \text{ K}$ ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้แนะนำโดย [29] ถ้า $k_i ps \ll 1$ สำหรับทั้งหมด i สมการ 3.91 ทำให้ง่ายขึ้นดังนี้

$$\epsilon = \sum_{i=0}^I a_{\epsilon,i} k_i ps \quad (3.94)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ 3.94 กับแบบจำลองก๊าซเท่ากับสัมประสิทธิ์การดูดซับ α ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของการแผ่รังสีตลอดทั้งระยะทาง s ใน WSGGM ซึ่งมีความแม่นยำเหมือนกับแบบจำลองก๊าซเท่าที่มีสัมประสิทธิ์การดูดซับดังสมการ 3.95

$$\alpha = \sum_{i=0}^I a_{\epsilon,i} k_i p \quad (3.95)$$

ซึ่งไม่ได้ขึ้นอยู่กับ s ซึ่งในกรณีทั่วไปแล้ว ค่า α จะประมาณได้ว่า

$$\alpha = -\frac{\ln(1-\epsilon)}{s} \quad (3.96)$$

ซึ่งการแปลงรังสี ϵ ของ WSGGM จะคำนวณโดยการใช้สมการ 3.91 ซึ่ง α กำหนดโดยสมการ 3.96 โดยขึ้นอยู่กับ s และการดูดซับรังสีความร้อนในโมเลกุลก๊าซ สมการ 3.95 ใช้เมื่อ $s \leq 10^{-4}$ เมตร และสมการ 3.96 ใช้สำหรับ $s > 10^{-4}$ เมตร จำไว้ว่าสำหรับ $s \approx 10^{-4}$ เมตร ค่าของ α จะทำนายโดยใช้สมการ 3.95 และ 3.96

ในการคำนวณต้องกำหนดค่า s เป็นความยาวลำแสงเฉลี่ยหรือรูปแบบขนาดเซลล์แบบจำลองจะอยู่บนพื้นฐานของความยาวลำแสงเฉลี่ยที่แนะนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีตัวกลางที่เกือบจะเป็นเนื้อเดียวกันและสนใจในการแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างผนังที่อยู่ใกล้กัน เราสามารถกำหนดความยาวลำแสงเฉลี่ยหรือจะให้โปรแกรมคำนวณก็ได้ ถ้าต้องการที่จะใช้ WSGGM โดยอ้างอิงบนขนาดของเซลล์ ค่า α ที่ทำนายได้จะเป็น mesh dependent (รู้จักกันในชื่อจำกัดของแบบจำลอง)

เมื่อ $p_{tot} \neq 1 \text{ atm}$

ตามทฤษฎีบายไว้ทางคำนวณ WSGGM จะสมมุติว่า p_{tot} เป็นความดัน (สถิตย) ของก๊าซทั้งหมดเท่ากับ 1 atm แต่ในกรณีซึ่ง p_{tot} ไม่เป็น 1 (เผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง) กฎสัดส่วนที่ได้แนะนำไว้ใน [33] จะถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความถูกต้อง เมื่อ $p_{tot} < 0.9 \text{ atm}$ หรือ $p_{tot} > 1.1 \text{ atm}$ ค่าของ k_i ในสมการ 3.91 และ 3.95 จะถูกกำหนดอัตราส่วนใหม่

$$k_i \rightarrow k_i p_{tot}^m \quad (3.97)$$

ซึ่ง m เป็นค่าไร้มิติที่ได้มาจาก [33] ซึ่งขึ้นอยู่กับความดันย่อยที่อุณหภูมิ T ของก๊าซที่มีการดูดซับที่ p_{tot}

3.3.3.4.2 ผลกระทบต่ออนุภาคอันเนื่องมาจากสัมประสิทธิ์การดูดซับ

ในการคำนวณนั้นสามารถรวมผลกระทบของอนุภาคที่เฟสไม่ต่อเนื่องต่อสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสี ซึ่งสามารถรวมเข้าไปได้ถ้าเลือกใช้แบบจำลอง P-1 หรือ DO เมื่อมีการใช้แบบจำลอง P-1 หรือ DO จะสามารถรวมการดูดซับรังสีโดยอนุภาคได้ ซึ่งผลกระทบเนื่องจากการเปล่งรังสี สะท้อน และกระเจิงของอนุภาคนั้นได้รวมเข้าอยู่ในการคำนวณของการถ่ายโอนรังสีความร้อน

3.3.3.5 การเลือกแบบจำลองการแผ่รังสี

ปัญหาหลักที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการเลือกแบบจำลองการแผ่รังสีก็คือ แบบจำลองการแผ่รังสีแบบใดจะมีความเหมาะสมกับปัญหามากที่สุด โดยสามารถตัดสินใจเลือกได้ตามปัจจัยเหล่านี้

ความหนาของลำแสง : ความหนาของลำแสง aL เป็นตัวบ่งชี้ที่ดีที่สุดสำหรับเลือกแบบจำลองที่ใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่ง L เป็นสเกลความยาวที่เหมาะสมสำหรับโดเมนสำหรับการไหลในห้องเผาไหม้ ตัวอย่างเช่น L เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ ถ้า $aL \gg 1$ โดยทางเลือกที่ดีที่สุดคือ แบบจำลอง P-1 และ Rosseland แบบจำลอง P-1 ควรจะใช้สำหรับความหนาของลำแสง > 1 สำหรับความหนาของลำแสง > 3 แบบจำลอง

Rosseland จะใช้ทรัพยากรในการคำนวณน้อยกว่าและแต่จะมีประสิทธิภาพมากกว่า สำหรับกรณีที่มีความหนาของลำแสงมากวิธี discretization กำลังสองจะเหมาะสมกับแบบจำลอง DO โดยแบบจำลอง DTRM และ DO จะคำนวณตลอดทั้งช่วงความหนาของลำแสงแต่จะใช้ทรัพยากรในการคำนวณมาก เพราะฉะนั้นควรเลือกแบบจำลอง "thick-limit" P-1 และ Rosseland เหมาะสำหรับปัญหาลำแสงบาง ($aL < 1$) แบบจำลอง DTRM และ DO เท่านั้นที่เหมาะสมสำหรับปัญหาลำแสงหนา

การกระเจิงและการเปล่งรังสี : แบบจำลอง P-1 Rosseland และ DO จะคำนวณการกระเจิง แต่ในขณะที่ DTRM จะละทิ้ง เนื่องจากแบบจำลอง Rosseland ใช้สภาวะการเลื่อนไหลของอนุภาคที่มีผนัง ซึ่งไม่ตอบสนองต่อการเปล่งรังสีของผนัง

ผลกระทบจากอนุภาค : มีเพียงแบบจำลอง P-1 และ DO ที่คำนวณการแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างก๊าซและอนุภาค

ผนังกึ่งโปร่งแสง (ภายนอกและภายใน) : มีเพียงเฉพาะแบบจำลอง DO ยอมให้จำลองผนังกึ่งโปร่งแสงได้หลายประเภท (เช่น แก้ว)

ผนัง specular : มีเพียงเฉพาะแบบจำลอง DO ยอมให้มีการจำลองการสะท้อนที่เป็นลำ (เช่น กระจกใส)

ผนัง specular บางส่วน : มีเพียงเฉพาะแบบจำลอง DO ยอมให้มีการจำลองการสะท้อนที่เป็นลำ (เช่น กระจกเลอะฝุ่น)

Non-gray radiation : มีเพียงเฉพาะแบบจำลอง DO ที่คำนวณ non-gray radiation โดยใช้แบบจำลอง gray band

แหล่งกำเนิดความร้อน : ในปัญหาที่มีแหล่งกำเนิดความร้อน แบบจำลอง P-1 อาจจะทำนายค่าฟลักซ์การแผ่รังสีที่เกินจากความเป็นจริง แบบจำลอง DO อาจจะเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการคำนวณการแผ่รังสีในกรณีนี้ และ DTRM ก็สามารถใช้ได้

การถ่ายโอนรังสีที่ไม่มีตัวกลาง : แบบจำลองระหว่างพื้นผิวกับพื้นผิว (S2S) เหมาะสมสำหรับปัญหาประเภทนี้ เนื่องจากแบบจำลองการแผ่รังสีแบบนี้เมื่อใช้กับการแผ่รังสีที่มีตัวกลาง แบบจำลองนี้จะคำนวณเพียงการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวกับพื้นผิวเท่านั้นทำให้ประสิทธิภาพที่ได้ไม่ค่อยจะดีนัก

ทฤษฎีการเผาไหม้และการก่อเกิดมลภาวะ

4.1 การเผาไหม้แบบ Non-Premixed

ในการเผาไหม้แบบ non-premixed นั้น เชื้อเพลิงและออกซิโดซ์เซอร์ถูกป้อนจากท่อทางเข้าหรือแหล่งที่แยกจากกัน ก่อนแพร่เข้าสู่บริเวณทำปฏิกิริยา โดยในส่วนนี้จะแตกต่างกับการเผาไหม้แบบ premixed ซึ่งตัวทำปฏิกิริยาได้ผสมกันในระดับโมเลกุลก่อนที่จะเผาไหม้ ตัวอย่างสำหรับการเผาไหม้แบบ non-premixed เช่น ห้องเผาไหม้ถ่านหินผง การเผาไหม้ของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลและในอ่างไฟ

ภายใต้สมมุติฐานที่ใช้สำหรับลักษณะการผสมกันของก๊าซแบบปั่นป่วน สัดส่วนย่อยของก๊าซผสมสามารถคำนวณได้จากพารามิเตอร์เดียว นั่นคือ Mixture fraction ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ f พารามิเตอร์นี้ถูกนิยามว่าเป็นสัดส่วนเชิงมวลของเชื้อเพลิง ที่มีอยู่ในสปีชีส์ต่างๆที่ผสมกันอยู่ในห้องเผาไหม้ หรือกล่าวโดยอีกนัยหนึ่งได้ว่า f คือสัดส่วนเชิงมวลของธาตุในเชื้อเพลิงที่เผาไหม้และไม่เผาไหม้ (คาร์บอน, ไฮโดรเจน ฯลฯ) ในสปีชีส์ทั้งหมด (CO_2 , H_2O , O_2 ฯลฯ) เพราะว่าอะตอมของธาตุได้ถูกอนุรักษ์ไว้ในปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นสมการควบคุมการถ่ายเทจะไม่มีความจำเป็นของแหล่งกำเนิด นอกจากนี้ ปัญหาการเผาไหม้ได้ถูกมองให้เป็นการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว (fast kinetic) เมื่อเทียบกับอัตราการผสมกันของกระแสมุขนวนปั่นป่วน ดังนั้น ความซับซ้อนเนื่องมาจากการเข้าใกล้อัตราปฏิกิริยาแบบไม่เชิงเส้นจะไม่นำมาคิด ปฏิกิริยาของสารเคมีสามารถจำลองเป็นแบบสมดุลได้ด้วยแบบจำลองสมดุลเคมี (Chemical equilibrium) เช่น แบบจำลองเปลวไฟราบเรียบคงที่ หรือแสดงได้จากสมดุลเคมีที่ใช้แบบจำลองเปลวไฟราบเรียบไม่คงที่ เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย

- 4.1.1 บทนำ
- 4.1.2 ทฤษฎีการเผาไหม้แบบ Non-Premixed และ Mixture Fraction
- 4.1.3 ข้อจำกัดและกรณีพิเศษสำหรับการใช้แบบจำลอง Non-Premixed
- 4.1.4 ทฤษฎีแบบจำลองเปลวไฟราบเรียบ

4.1.1 บทนำ

แบบจำลอง Non-premixed ของการเผาไหม้ถ่านหิน จะมีการจำลองการกระจายตัวของ mixture fraction ที่เป็นตัวแทนของเชื้อเพลิง สองชนิด คือ สารระเหย (Volatile) และ ถ่านชาร์ การกระจายตัวสำหรับสปีชีส์เดียวจะไม่ถูกคำนวณแยกออกจาก Mixture fraction แต่

จะเป็นค่าที่สัมพันธ์กับ Mixture fraction กล่าวคือความเข้มข้นของสปีชีส์จะได้มาจากการแปลงค่าของ Mixture fraction โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง Mixture fraction และ สปีชีส์ต่างๆที่แน่นอน ปฏิสัมพันธ์ของความปั่นป่วนและปฏิกิริยาเคมีจะถูกนำมาพิจารณา โดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (PDF)

4.1.2 ทฤษฎีการเผาไหม้แบบ Non-Premixed และ Mixture Fraction

ข้อมูลเกี่ยวกับการเผาไหม้แบบ non-premixed และทฤษฎีสัดส่วนของผสม ได้แสดงไว้เป็นส่วนๆ ดังนี้

- 4.1.2.1 ทฤษฎี Mixture Fraction
- 4.1.2.2 การจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างความปั่นป่วน-สารเคมี
- 4.1.2.3 การขยายตัวแบบไม่แอเดียแบติกของแบบจำลอง Non-Premixed
- 4.1.2.4 ตารางเคมี

4.1.2.1 ทฤษฎี Mixture Fraction

4.1.2.1.1 ความหมายของ Mixture Fraction

แบบจำลอง Non-premixed อยู่ภายใต้สมมติฐานอย่างง่ายบางประการ กล่าวคือ คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ และคุณสมบัติทางเคมีของของไหลจะสัมพันธ์กับ ปริมาณสเกลลาร์ที่เรียกว่า Mixture fraction, f พารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถเขียนในพจน์ของสัดส่วนของมวลอะตอมได้ดังนี้ [36]

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,OX}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,OX}} \quad (4.1)$$

ซึ่ง Z_i คือสัดส่วนเชิงมวลของธาตุ i

ตัวห้อย OX แสดงถึงค่าที่กระแสการไหลของธาตุ i ในกระแสของออกซิไดซ์เซอร์ที่เข้ามาในห้องเผาไหม้

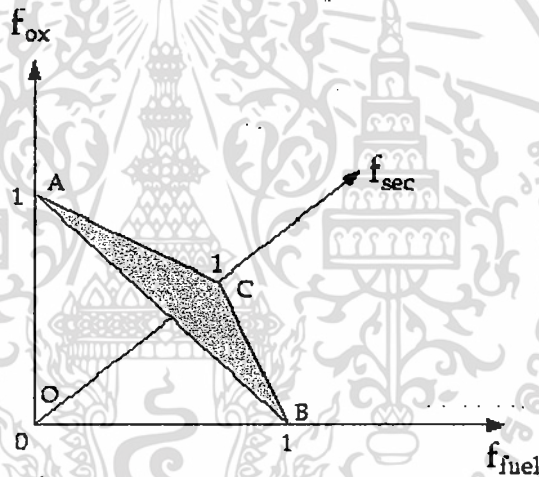
ตัวห้อย fuel แสดงถึงค่าที่กระแสการไหลของของธาตุ i ในกระแสของเชื้อเพลิงที่เข้ามาในห้องเผาไหม้

ถ้าสัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายสำหรับทุกสปีชีส์เท่ากันแล้ว สมการ 4.1 จะเหมือนกันสำหรับทุกๆ ธาตุ และส่งผลให้นิยามของสัดส่วนเชิงมวลจะมีเพียงนิยามเดียว ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากนิยามที่ให้ไว้จะพบว่า Mixture fraction ก็คือสัดส่วนเชิงมวลของธาตุที่ได้มาจากกระแสของเชื้อเพลิง นั่นเอง

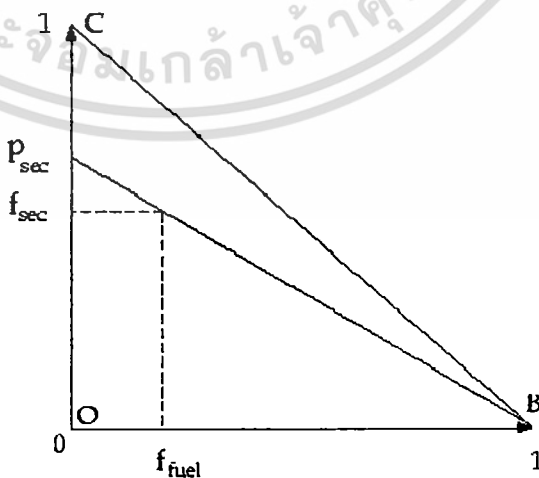
ถ้ากระแสการไหลรอง (กระแสของเชื้อเพลิงหรือออกซิเจนอื่น ๆ หรือกระแสการไหลที่ไม่เกิดปฏิกิริยา) ถูกนำมาคำนวณรวมด้วยกันแล้ว ค่าของ Fuel Mixture fraction กับค่าของ Secondary stream mixture fraction ก็คือ ค่าของสัดส่วนเชิงมวลของเชื้อเพลิง กับค่าของสัดส่วนเชิงมวลของ Secondary stream ตามลำดับ นั่นเอง ผลรวมของสัดส่วนเชิงมวลทั้งสามในระบบ (Mixture fraction ของเชื้อเพลิง Mixture fraction ของกระแสการไหลรอง และ Mixture fraction ของออกซิไดซ์เซอร์) จะเท่ากับ 1 ตลอด

$$f_{fuel} + f_{sec} + f_{ox} = 1 \tag{4.2}$$

โดยสมการนี้จะแสดงถึงจุดใดๆ บนระนาบพื้นผิว ABC (รูปที่ 4.1) ในบริเวณพื้นที่ที่มี Mixture fraction ของผลสมอยู่ ดังนั้น Mixture fraction ของผลสมทั้งสอง ได้แก่ f_{fuel} และ f_{sec} ไม่สามารถแปรเปลี่ยนอย่างอิสระมากนัก โดยค่าเหล่านี้จะอยู่เฉพาะภายในสามเหลี่ยม OBC ที่แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของ f_{fuel} , f_{sec} , และ f_{ox}



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของ f_{fuel} , f_{sec} , และ p_{sec}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแยกสามเหลี่ยม OBC ออกมาแสดงในรูปที่ 4.2 โดยพื้นฐาน Mixture fraction ของเชื้อเพลิงหลัก (f_{fuel}) สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ระหว่าง 0 ถึง 1 สำหรับกรณีที่มีเชื้อเพลิงหลักอย่างเดียว ขณะที่ Mixture fraction ของเชื้อเพลิงรองจะมีค่าไม่เกินจากเส้นที่ได้จากสมการที่ 4.3

$$f_{sec} = p_{sec} \times (1 - f_{fuel}) \quad (4.3)$$

ซึ่ง p_{sec} เป็นค่า Normalized mixture fraction ของเชื้อเพลิงรองและเป็นค่าที่ตัดกับแกน Mixture fraction ของเชื้อเพลิงรอง p_{sec} ที่มีค่าระหว่าง 0 และ 1 ที่ค่า f_{fuel} ใดๆ เช่น ในกรณีที่จุดใดๆ ในโดเมนมีค่า f_{ox} เท่ากับ 0 ค่าของ p_{sec} จะเท่ากับ 1 และค่าของ p_{sec} จะเท่ากับ 0 ก็เมื่อ f_{ox} เท่ากับ 1 โดยในห้องเผาไหม้จะมีค่าของ f_{ox} ระหว่าง 0 ถึง 1 เช่นกัน

ลักษณะสำคัญของ Normalized mixture fraction (p_{sec}) ก็คือ p_{sec} จะถูกสมมุติว่าเป็นอิสระทางสถิติจาก mixture fraction ของเชื้อเพลิงหลัก (f_{fuel}) ค่า p_{sec} นี้ไม่เป็นปริมาณอนุรักษ์ (conserved scalar) จะถูกใช้ในโปรแกรมเมื่อ Secondary Mixture Fraction ถูกเรียกใช้ ยกเว้นเมื่อมีการกำหนดขอบเขตความเข้มข้นของเชื้อเพลิงรอง ซึ่งจะแสดงอยู่ในพจน์ของ f_{sec}

4.1.2.1.2 สมการการถ่ายเทสำหรับ Mixture fraction

ภายใต้สมมุติฐานของการฟุ้งกระจายของสปีชีส์ที่เท่ากันนั้นสมการสปีชีส์สามารถลดรูปเหลือสมการ mixture fraction เพียงสมการเดียว (f) โดย source term เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีในสมการสปีชีส์นั้น ได้ถูกยกเลิก (เนื่องจากธาตุจะถูกอนุรักษ์ไว้ในปฏิกิริยาทางเคมี) ดังนั้น f จึงเป็นปริมาณที่ถูกอนุรักษ์ ขณะที่มีการสมมุติว่าสัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายของก๊าซ ใน Mixture fraction นั้นมีค่าเท่ากัน ซึ่งจะไม่เหมาะสมในการไหลแบบลามินาร์ แต่โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับว่าให้ใช้ได้ในการไหลแบบปั่นป่วนได้ซึ่งการพาแบบปั่นป่วนครอบคลุมถึงการฟุ้งกระจายของโมเลกุล ดังนั้น สมการ mixture fraction จะเป็นดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla(\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m + S_{user} \quad (4.4)$$

source term S_m คือพจน์ของการที่ถ่ายเทมวลเข้าไปสู่สถานะก๊าซจากเชื้อเพลิงเหลวหรืออนุภาค (เช่น ถ่านหิน) S_{user} เป็น source term

นอกจากนี้แล้วการแก้ปัญหาของ Favre mean mixture fraction เรายังจะต้องคำนวณสมการอนุรักษ์เพื่อหาค่า mixture fraction variance $\overline{f'^2}$ [37]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f'^2}) + \nabla(\rho \overline{v'f'^2}) = \nabla\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f'^2}\right) + C_g \mu_t (\nabla \overline{f})^2 - C_d \rho \frac{\epsilon}{k} \overline{f'^2} + S_{user} \quad (4.5)$$

ซึ่ง $f' = f - \bar{f}$ ค่าที่แนะนำสำหรับค่าคงที่ σ_t , C_g , และ C_d คือ 0.85, 2,86, และ 2.0, ตามลำดับ และ S_{user} เป็น source term เพิ่มเติมลงไปในการคำนวณ

สัดส่วนของผลสมที่แปรปรวนใช้ในแบบจำลอง อธิบายถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความปั่นป่วน-สารเคมี (ดูในส่วนที่ 4.1.2.2)

สำหรับปัญหาที่มี mixture fraction สองชนิด ได้แก่ $\overline{f_{fuel}}$ และ $\overline{f'_{fuel}}$ ได้มาจากสมการ 4.4 และ 4.5 โดยการแทน $\overline{f_{fuel}}$ ลงใน \bar{f} และ $\overline{f'_{fuel}}$ ลงใน $\overline{f'^2}$ และ $\overline{f_{sec}}$ ได้มาจากสมการ 4.4 โดยการแทน $\overline{f_{sec}}$ ลงใน \bar{f} ในขณะที่ $\overline{p_{sec}}$ จะคำนวณโดยใช้สมการ 4.3 ในขณะที่ $\overline{p'_{sec}}$ ซึ่งได้มาจากการแก้สมการ 4.5 พร้อมกับแทน $\overline{p_{sec}}$ ลงใน \bar{f} ซึ่งการประมาณค่าลำดับแรกนั้น ความแปรปรวนใน $\overline{p_{sec}}$ และ $\overline{f_{sec}}$ มีความสัมพันธ์อย่างมากต่อ $\overline{f_{fuel}}$ และสมการสำหรับ $\overline{p'_{sec}}$ มีความสำคัญเช่นเดียวกับ $\overline{f'_{fuel}}$

4.1.2.1.3 แบบจำลอง Non-Premixed สำหรับ LES

สำหรับการจำลองผลที่มีการหมุนวนสูง สมการการถ่ายเทไม่ได้ใช้ในการคำนวณในส่วน of mixture fraction variance แต่แบบจำลองจะเป็นดังนี้

$$\overline{f'^2} = C_{var} L_s^2 |\nabla \bar{f}|^2 \quad (4.6)$$

ซึ่ง

C_{var} = ค่าคงที่

L_s = subgrid length scale

ค่าคงที่ C_{var} ถูกคำนวณแบบไดนามิกเมื่อเลือกใช้ Dynamic Stress (โดยค่าปกติจะอยู่ที่ 0.5) ถ้าปริมาณฟลักซ์ไดนามิกถูกเลือกใช้ ความปั่นป่วน S_c (σ ในสมการ 4.4) จะถูกคำนวณแบบไดนามิก

4.1.2.1.4 Mixture fraction เปรียบเทียบกับอัตราส่วนสมมูล

นิยามของ Mixture fraction คือ ความสัมพันธ์ของค่าต่างๆที่วัดได้ในระบบที่เกิดปฏิกิริยาโดยทั่วไป เมื่อพิจารณาระบบการเผาไหม้ที่เรียบง่ายร่วมกับกระแสการไหลของเชื้อเพลิง (F) กระแสการไหลของออกซิเจน (O) และกระแสการไหลของผลิตภัณฑ์ (P) แล้วจะพบว่า อัตราส่วนปริมาณสัมพันธ์เป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ซึ่ง r เป็นอัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศโดยมวล ϕ แทนอัตราส่วนที่สมดุล ซึ่ง

$$\phi = \frac{(fuel/air)_{actual}}{(fuel/air)_{stoichiometric}} \quad (4.8)$$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสมการ 4.7 เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขของผสมทั่วไป โดยสามารถเขียนได้ดังนี้



ในด้านซ้ายของสมการเป็นสัดส่วนเชิงมวลสำหรับระบบทั้งหมด ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

$$f = \frac{\phi}{\phi + r} \quad (4.10)$$

สมการ 4.10 ทำให้สามารถคำนวณ mixture fraction ที่สภาวะอัตราส่วนปริมาณสัมพันธ์ ($\phi = 1$) หรือที่สภาวะเชื้อเพลิงหนา ($\phi > 1$), หรือที่สภาวะเชื้อเพลิงบาง ($\phi < 1$)

4.1.2.1.5 ความสัมพันธ์ของ f กับสัดส่วนเชิงมวลของสปีชีส์ ความหนาแน่นและอุณหภูมิ

การจำลอง mixture fraction เป็นวิธีที่ลดจำนวนสมการถ่ายโอนสปีชีส์สารเคมีลงเหลือหนึ่งหรือสอง mixture fraction ภายใต้ข้อสมมุติฐานของสมดุลเคมี โดยปริมาณทางเทอร์โมไดนามิกส์ และปริมาณทางเคมีทั้งหมด (สัดส่วนสปีชีส์, ความหนาแน่น, และอุณหภูมิ) จะมีความสัมพันธ์กับ mixture fraction

สำหรับ mixture fraction ที่อยู่ภายใต้ระบบแอเดียแบติกค่าของสัดส่วนเชิงมวล, ความหนาแน่น และอุณหภูมิ จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนสารผสมในขณะนั้นๆ (f)

$$\phi_i = \phi_i(f) \quad (4.11)$$

ถ้ากระแสการไหลเชื้อเพลิงรองได้ถูกรวมไว้ในการคำนวณ ค่าทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับ mixture fraction ของเชื้อเพลิงขณะนั้น (f_{fuel}) และ secondary partial fraction (p_{sec})

$$\phi_i = \phi_i(f_{fuel}, p_{sec}) \quad (4.12)$$

ในสมการ 4.11 และ 4.12 ϕ_i แสดงถึงสัดส่วนมวลสปีชีส์ขณะนั้น ได้แก่ ความหนาแน่นหรืออุณหภูมิ ในกรณีของระบบนอนแอดเดียบอดิกตัวแปรของผลกระทบของความร้อนที่ลด/เพิ่มเป็นดังนี้

$$\phi_i = \phi_i(f, H) \quad (4.13)$$

สมการที่ 4.13 สำหรับระบบที่มี mixture fraction เดียว ซึ่ง H คือ เอนทาลปี แต่ถ้าได้รวมกระแสการไหลทฤษฎีเข้าไปจะเป็นดังนี้

$$\phi_i = \phi_i(f_{fuel}, p_{sec}, H) \quad (4.14)$$

ตัวอย่างของระบบการไหลนอนแอดเดียแบบดิกที่รวมการแผ่รังสี การถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง การถ่ายเทความร้อนไปยัง/จากอนุภาคหรือหยดของเหลวที่แยกออกจากกัน และทางเข้าหลายทางที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน

มีวิธีทั้งหมดสามวิธีในแบบจำลองการเผาไหม้แบบ Non-premixed เพื่อจำลองอัตราการเผาไหม้ในลักษณะ Fast kinetics (ส่วนผสมอยู่ในสถานะสมดุลเสมอตลอดการเผาไหม้) วิธีแรกใช้เงื่อนไข Rich Flammability Limit (RFL) ในแบบจำลองที่สมดุล ด้วยเทคนิคนี้ บริเวณที่เชื้อเพลิงหนาได้ถูกกำหนดให้เป็นแบบการผสมระหว่างเชื้อเพลิงบริสุทธิ์ที่ยังไม่เผาไหม้ กับส่วนผสมที่เผาไหม้แล้วภายใต้สถานะสมดุลซึ่งมีลักษณะเป็นส่วนผสมบาง วิธีที่สองเป็นแบบจำลองเปลวไฟราบเรียบในสถานะคงตัว ซึ่งทำการจำลองปฏิกิริยาเคมีที่ไม่สมดุลอันเนื่องมาจากการที่เปลวไฟถูกขยายออกด้วยความปั่นป่วน วิธีที่สามเป็นแบบจำลองเปลวไฟแบบราบเรียบในสถานะไม่คงตัว ที่ซึ่งมีอัตราการผลิตสปีชีส์ที่ช้ากว่าอัตราการผลิตภายใต้สถานะสมดุลเคมี

4.1.2.2 การจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างความปั่นป่วน-สารเคมี

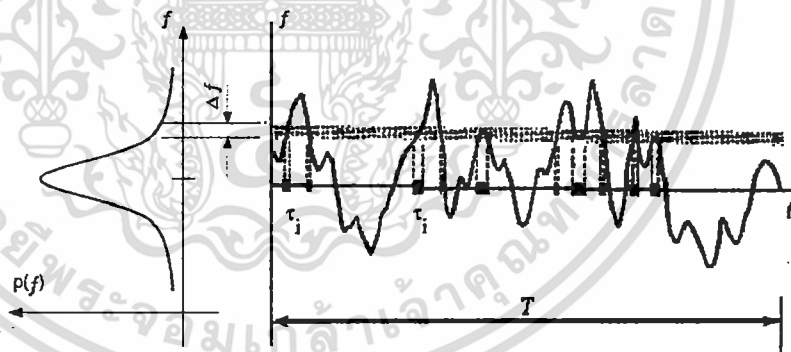
สมการ 4.11 ถึง 4.14 ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง mixture fraction และสัดส่วนสปีชีส์ ความหนาแน่น และอุณหภูมิ ภายใต้การสันนิษฐานแบบสมดุลเคมี ซึ่งทั้งหมดจะถูกทำนายภายใต้ปฏิกิริยาการไหลแบบปั่นป่วน อย่างไรก็ตามการจำลองการไหลที่มีปฏิกิริยาเคมีภายใต้ความปั่นป่วนนั้นเราจะสนใจค่าเฉลี่ยของปริมาณผันแปรเหล่านี้เท่านั้น ซึ่งค่าเหล่านี้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่มีความสัมพันธ์กับค่าฉบับพลัน โดยขึ้นอยู่กับแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างความปั่นป่วน-สารเคมี โปรแกรมทำการสมมุติรูปร่างของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (PDF) จะใกล้เคียงแบบจำลองเมื่อใช้แบบจำลอง non-premixed ซึ่งรูปร่าง PDF ที่สมมุติจะใกล้เคียงแบบจำลองที่อธิบายไว้ในส่วนต่อไป

4.1.2.2.1 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นสามารถเขียนให้อยู่ในรูป $p(f)$ ซึ่งสามารถนิยามได้ว่า เป็นสัดส่วนของช่วงของเวลาที่ของเหลวอยู่ในสภาวะที่บ่งชี้ได้ด้วยปริมาณในช่วง Δf ที่ขณะหนึ่งขณะใด ภายใต้ช่วงระยะเวลาสุทธิตัวยาวพอสมควร (ในที่นี้คือ อนันต์) ที่จะหาค่าเฉลี่ยของปริมาณ f นั้น รูปที่ 4.3 แสดงเวลาของ mixture fraction ที่จุดใดๆ ในการไหล (ด้านขวามือ) และฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของ f (ทางด้านซ้ายมือ) ค่าที่ผันแปรของ f แสดงบนด้านขวามือของรูป โดยบางส่วนของเวลาที่ใช้ไป กำหนดอยู่ในรูป $\Delta f \cdot p(f)$ แสดงบนด้านซ้ายของรูป โดยค่าดังกล่าวเป็นพื้นที่ใต้กราฟ ในช่วงที่กำหนด Δf เท่ากับสัดส่วนของเวลาซึ่ง f ที่ใช้ในช่วงนี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$p(f)\Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i T_i \quad (4.15)$$

ซึ่ง T เป็นสเกลเวลาและ T_i เป็นเวลาทั้งหมดซึ่ง f ใช้ในแถบ Δf รูปร่างของฟังก์ชัน $p(f)$ ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของความปั่นป่วนที่ผันผวนใน f โคนในทางปฏิบัติ $p(f)$ จะไม่ทราบค่า และเป็นโมเดลฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ซึ่งประมาณค่ารูปร่างของ PDF ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.3 อธิบายโดยรูปของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น $p(f)$

4.1.2.2.2 ที่มาของปริมาณเฉลี่ยจาก Mixture Fraction ช่วงขณะ

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น $p(f)$ อธิบายถึงลักษณะความผันผวนในขณะหนึ่งของ f ในการไหลปั่นป่วน สามารถใช้เพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยของตัวแปรซึ่งขึ้นอยู่กับ

f ความหนาแน่นถ่วงน้ำหนักสัดส่วนมวลสปีชีส์เฉลี่ยและอุณหภูมิสามารถคำนวณได้ (ระบบแอเดียแบบคิก) จากสมการ

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 p(f) \phi_i(f) df \quad (4.16)$$

สำหรับระบบสัดส่วนของผสมเดี่ยว เมื่อมีการไหลทุติยภูมิค่าเฉลี่ยจะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 \int_0^1 p_1(f_{fuel}) p_2(p_{sec}) \phi_i(f_{fuel}, p_{sec}) df_{fuel} dp_{sec} \quad (4.17)$$

ซึ่ง p_1 เป็น PDF ของ f_{fuel} และ p_2 เป็น PDF ของ p_{sec} ซึ่งสมมุติว่ามีความเป็นอิสระจากสถิติของ f_{fuel} และ p_{sec} ดังนั้น $p(f_{fuel}, p_{sec}) = p_1(f_{fuel}) p_2(p_{sec})$

ในทำนองเดียวกันเวลาเฉลี่ยความหนาแน่นของเหลว $\bar{\rho}$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\frac{1}{\bar{\rho}} = \int_0^1 \frac{p(f)}{p(f)} df \quad (4.18)$$

สำหรับระบบ single-mixture-fraction

$$\frac{1}{\bar{\rho}} = \int_0^1 \int_0^1 \frac{p_1(f_{fuel}) p_2(p_{sec})}{p(f_{fuel}, p_{sec})} df_{fuel} dp_{sec} \quad (4.19)$$

เมื่อมีกระแสการไหลทุติยภูมิ $p(f)$ หรือ $p(f_{fuel}, p_{sec})$ เป็นความหนาแน่นขณะนั้นได้มาจากการคำนวณโดยใช้สัดส่วนมวลสปีชีส์และอุณหภูมิขณะนั้นในสมการก๊าซในอุดมคติ

การใช้สมการ 4.16 และ 4.18 (หรือสมการ 4.17 และ 4.19) ยังเป็นเพียงการระบุรูปร่างของฟังก์ชัน $p(f)$ (หรือ $p_1(f_{fuel})$ และ $p_2(p_{sec})$) เพื่อที่จะกำหนดสถานะของไหลเฉลี่ยที่ทุกๆจุดในสนามการไหล

4.1.2.2.3 รูปร่าง PDF ที่สมมุติ

รูปร่างของ PDF ที่สมมุติ $p(f)$ อธิบายในโปรแกรมโดยหนึ่งในสองฟังก์ชันคณิตศาสตร์

- the double-delta function (กรณี two-mixture-fraction เท่านั้น)
- the β -function (กรณี single- and two-mixture-fraction)

Double-delta function ส่วนใหญ่จะคำนวณได้ง่าย ขณะที่ β -function ส่วนใหญ่จะใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ตรวจสอบโดย PDFs ซึ่งรูปร่างถูกสร้างขึ้นโดยฟังก์ชันนี้ขึ้นอยู่กับ mixture fraction เฉลี่ย \bar{f} และความแปรปรวน $\overline{f'^2}$ รายละเอียดของแต่ละฟังก์ชันได้อธิบายดังต่อไปนี้

The Double Delta Function PDF

Double delta function เป็นดังนี้

$$p(f) = \begin{cases} 0.5, & f = \bar{f} - \sqrt{\bar{f}'^2} \\ 0.5, & f = \bar{f} + \sqrt{\bar{f}'^2} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (4.20)$$

โดยฟังก์ชันนี้จะให้ค่าที่เหมาะสมเมื่อใกล้ $f = 1$ และ $f = 0$ ตัวอย่างของ double delta function ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ดังที่กล่าวไว้ด้านบนแล้วว่า double delta function PDF คำนวณได้ง่ายกว่าแต่มีความแม่นยำน้อยกว่า alternate - β function PDF เพราะว่าการคำนวณได้สมมุติว่ามีเพียงสองสถานะเท่านั้นที่มีอยู่ในการไหลปั่นป่วน ด้วยเหตุผลนี้ จะมีเพียงเฉพาะการคำนวณ two-mixture-fraction เท่านั้นซึ่งช่วยประหยัดทรัพยากรในการคำนวณได้



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างของรูปร่าง Double Delta Function PDF

The β -Function PDF

รูปร่าง β -Function PDF ได้มาจากฟังก์ชันต่อไปนี้ \bar{f} และ \bar{f}'^2

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1} df} \quad (4.21)$$

ซึ่ง

$$\alpha = \bar{f} \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}'^2} \right] - 1 \quad (4.22)$$

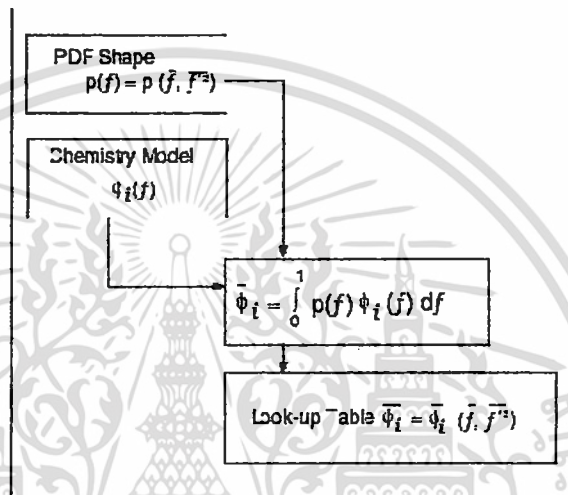
และ

$$\beta = (1 - \bar{f}) \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}'^2} \right] - 1 \quad (4.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่างของ PDF $p(f)$ เป็นฟังก์ชันของสองตัวแปรแรกเท่านั้น ได้แก่ mean mixture fraction \bar{f} และ mixture fraction variance $\overline{f'^2}$ ซึ่งโปรแกรมได้ให้การคำนวณ \bar{f} และ $\overline{f'^2}$ ที่แต่ละจุดของสนามการไหล (สมการ 4.4 และ 4.5) รูปร่าง PDF ที่สมมุติขึ้นสามารถคำนวณและใช้เป็นฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักเพื่อกำหนดค่าเฉลี่ยของสัดส่วนมวลสปีชีส์ ความหนาแน่นและอุณหภูมิที่ใช้ สมการ 4.16 และ 4.18 (หรือสำหรับระบบที่มีกระแสการไหลทุติยภูมิ ก็คือสมการ 4.17 และ 4.19)

ความเชื่อมโยงดังกล่าวแสดงใน รูปที่ 4.5 สำหรับ single mixture fraction



รูปที่ 4.5 ความเชื่อมโยงของค่าเฉลี่ย $\bar{\phi}_i$ บน \bar{f} , $\overline{f'^2}$ และแบบจำลองเคมี (แอเดียบาติกและระบบ single mixture fraction)

4.1.2.3 การขยายตัวแบบนอนแอเดียบาติกของแบบจำลอง Non-Premixed

ระบบที่มีปฏิกิริยาหลายระบบจะมีการถ่ายเทความร้อนผ่านขอบเขตผนัง, หยอดของเหลวและ/หรืออนุภาค ในกระแสการไหลดังกล่าว สภาวะเชิงความร้อนเคมีไม่ได้อัดแน่นเฉพาะ f อีกต่อไป แต่จะรวมถึงเอนทัลปี H โดยเอนทัลปีของระบบจะมีผลต่อการคำนวณสมมูลเคมี อุณหภูมิและสปีชีส์ของการไหลที่มีปฏิกิริยา เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเนื่องมาจากการสูญเสียความร้อนต้องนำมาพิจารณาด้วย เมื่อคำนวณค่าเฉลี่ยของปริมาณนั้นๆ จาก mixture fraction โดยเห็นได้จากสมการที่ 4.13

ในระบบนอนแอเดียบาติก ผลของความปั่นป่วนควรจะนำมาคิดด้วยโดยใช้เทคนิค Joint PDF, $p(f, H)$ การคำนวณของ $p(f, H)$ จะใช้ได้เพียงบางส่วนของงานทางวิศวกรรมทั้งหมด ปัญหาที่พบนั้นสามารถทำให้เรียบง่ายโดยสมมุติว่าเอนทัลปีที่ผันผวนไม่ขึ้นอยู่กับระดับของเอนทัลปี (เช่น สภาวะสูญเสียความร้อนไม่ได้มีผลต่อความผันผวนของเอนทัลปี) ภายใต้การสมมุติ $p(f, H) = p(f)\delta(H - \bar{H})$ และปริมาณเฉลี่ยได้คำนวณดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

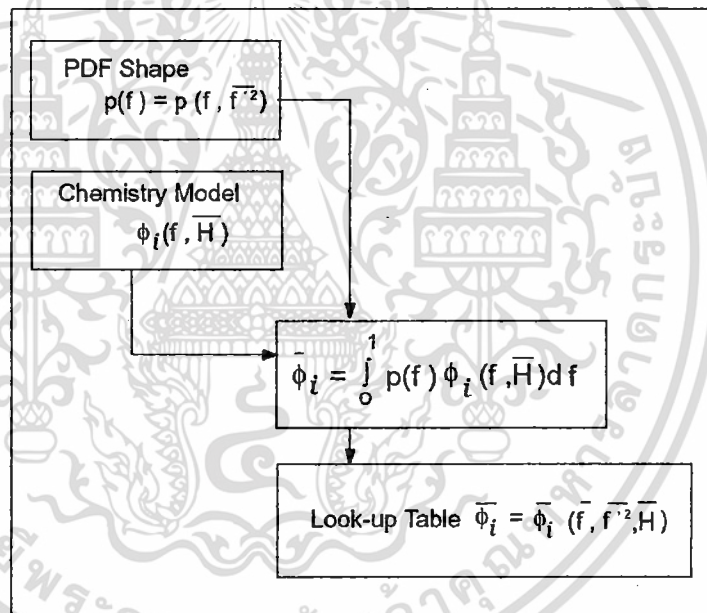
$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 \phi_i(f, \bar{H}) p(f) df \quad (4.24)$$

การคำนวณของ $\bar{\phi}_i$ ในระบบนอนแอดิยาติกต้องการวิธีการในการหาคำตอบ สำหรับแบบจำลองสมการการถ่ายเทของเอนทาลปีเฉลี่ย

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{H}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{H}) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \nabla \bar{H} \right) + S_h \quad (4.25)$$

ซึ่ง S_h เป็น source term เนื่องมาจากการแผ่รังสี การถ่ายเทไปยังขอบเขตผนัง และการแลกเปลี่ยนความร้อนกับส่วนที่กระจัดกระจายอยู่ในโดเมนของของไหลนั้น

รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของปริมาณเฉลี่ย (สัดส่วนมวลสปีชีส์ ความหนาแน่น และอุณหภูมิ) ระหว่างการทำนายในส่วนของ \bar{f} , \bar{f}'^2 และ \bar{H} ในระบบ non-adiabatic single-mixture-fraction



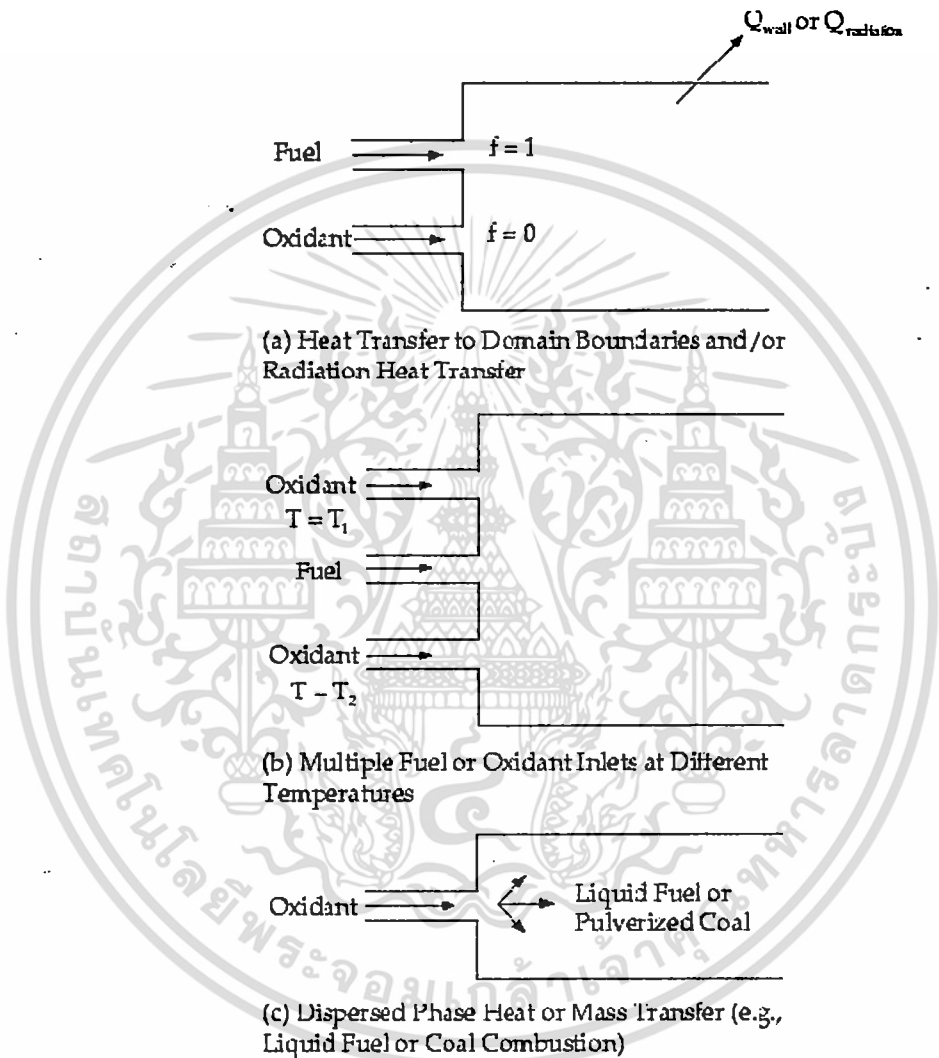
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย $\bar{\phi}_i$ บน \bar{f} , \bar{f}'^2 , \bar{H} และแบบจำลองเคมี (นอนแอดิยาติกที่เป็น single-mixture-fraction)

เมื่อมีการรวมกระแสการไหลทุติยภูมิเข้าไป ค่าเฉลี่ยจะคำนวณได้จาก

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 \int_0^1 \phi_i(f_{fuel}, p_{sec}, \bar{H}) p_1(f_{fuel}) p_2(p_{sec}) df_{fuel} dp_{sec} \quad (4.26)$$

ดังที่แสดงไว้ทางด้านบน การคิดผลของสภาวะนอนแอดิยาติกในจำลอง PDF มีความจำเป็นในหลายระบบที่มีการถ่ายเทความร้อนไปยังผนัง ซึ่งมีการแผ่รังสีรวมไว้ด้วย

นอกจากนี้ แบบจำลองนอนแอดีบาติกยังมีความจำเป็นในระบบที่รวมการใช้เชื้อเพลิงหรือออกซิไดซ์เซอร์หลายชนิด โดยมีอุณหภูมิที่ทางเข้าแตกต่างกัน สุดท้ายนี้ แบบจำลองนอนแอดีบาติกยังมีความจำเป็นต้องใช้สำหรับการไหลที่มีการฟุ้งกระจายของอนุภาค (เช่น ระบบที่มีการกระจายของเชื้อเพลิงเหลวหรือระบบเผาไหม้ถ่านหินผง) เมื่อการไหลได้รวมการถ่ายเทความร้อนไปยังส่วนที่ฟุ้งกระจายอยู่ในของไหลนั้น รูปที่ 4.7 แสดงถึงระบบหลายๆ ระบบซึ่งต้องรวมลักษณะนอนแอดีบาติกของแบบจำลอง PDF



รูปที่ 4.7 ระบบปฏิกิริยาที่ต้องใช้แบบจำลองนอนแอดีบาติก Non-Premixed

4.1.2.4 ตารางเคมี

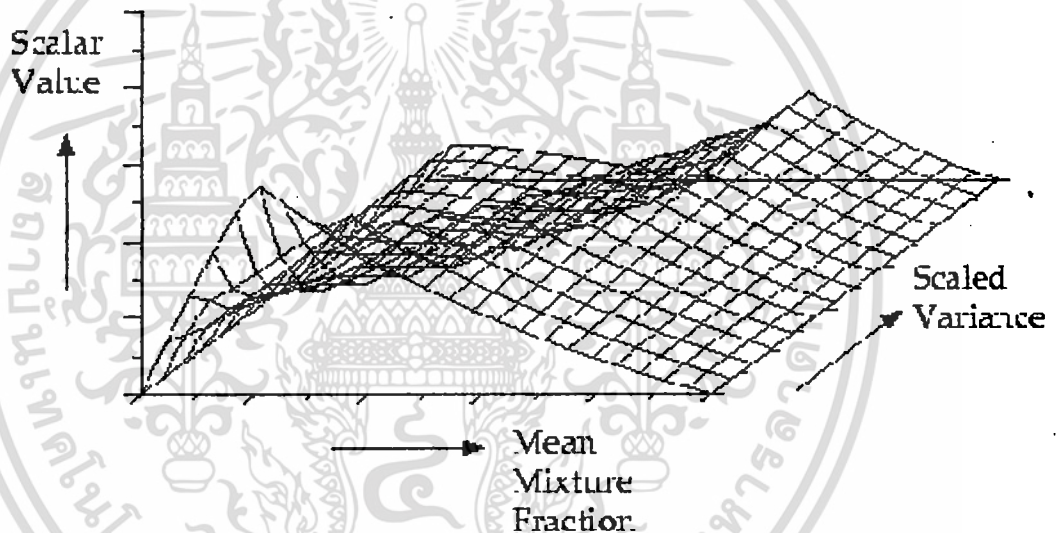
4.1.2.4.1 ตารางค้นหาสำหรับระบบแอดีบาติก

ในภาวะสมดุลแบบแอดีบาติก ที่เป็นแบบ single-mixture-fraction ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ความหนาแน่นเฉลี่ย และสัดส่วนสปีชีส์ เป็นฟังก์ชันของ f และ f'^2 เท่านั้น (สมการ

4.16 และ 4.21) โดยค่าที่ได้จากการคำนวณในแต่ละครั้งจะถูกบันทึกและเก็บค่าไว้ในตารางค้นหาและเรียกค่าออกมาใช้ระหว่างการจำลองผล

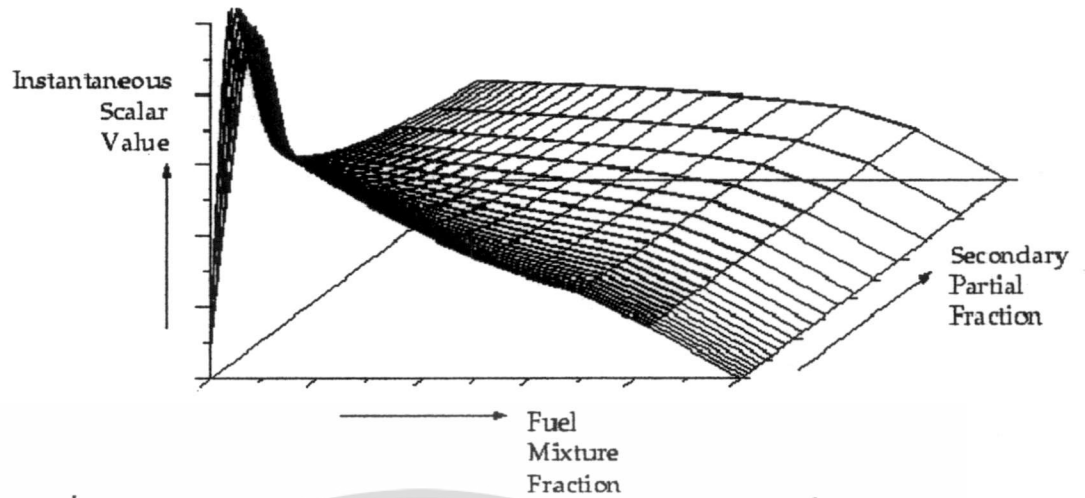
รูปที่ 4.8 แสดงถึงหลักการของตารางค้นหาที่สร้างขึ้น สำหรับระบบ single-mixture-fraction ค่าที่ได้จากการทำนายสำหรับ \bar{f} และ $\overline{f'^2}$ ที่จุดใดๆ ในโดเมนการไหลค่าเฉลี่ยของสัดส่วนมวล ความหนาแน่น หรืออุณหภูมิ ($\bar{\phi}_i$) ที่จุดนั้นสามารถได้มาจากการประมาณค่าจากช่วงของตาราง

รูปที่ 4.8 เป็นผลลัพธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการอินทิเกรตของสมการ 4.16 ตารางค้นหาแบบนี้จะมีหนึ่งตารางในแต่ละปริมาณทางสเกลาร์นั้นๆ (ได้แก่ สัดส่วนมวลสปีชีส์ ความหนาแน่น และอุณหภูมิ) สำหรับระบบแอเดียแบติก ที่ซึ่งเอนทัลปีขณะนั้นๆ เป็นฟังก์ชันต่อ mixture fraction ขณะนั้นๆ เท่านั้น ตารางค้นหาจะสามารถสร้างได้จากตัวแปร 2 มิติ เหมือนในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงถึงการอธิบายตารางค้นหาสำหรับปริมาณ $\bar{\phi}_i$ ที่เป็นฟังก์ชันของ \bar{f} และ $\overline{f'^2}$ ในระบบแอเดียแบติกของ single-mixture-fraction

สำหรับระบบที่มี two-mixture-fraction การสร้างและการประมาณค่าในช่วงของตารางค้นหา โดยมีตัวแปร 4 มิติ นั้น จะใช้ทรัพยากรในการคำนวณอย่างมาก โดยส่วนใหญ่โปรแกรมคำนวณทาง CFD จะตั้งเก็บค่าคุณสมบัติขณะนั้นๆ $\bar{\phi}_i$ เรียงใส่ตารางไว้ โดยเป็นฟังก์ชันของ mixture fraction ของเชื้อเพลิง f_{fuel} และ ค่า partial fraction ทุติยภูมิ p_{sec} (สมการ 4.12) และผลการอินทิเกรตกับ PDF ของปริมาณสเกลาร์ (สมการ 4.14) โดยจะมีการส่งค่าเหล่านี้กลับมายังโปรแกรมหลักระหว่างการคำนวณ ค่าที่ถูกแสดงภายใต้ค่าค้นหา 2 มิติ แสดงไว้ในรูปที่ 4.9

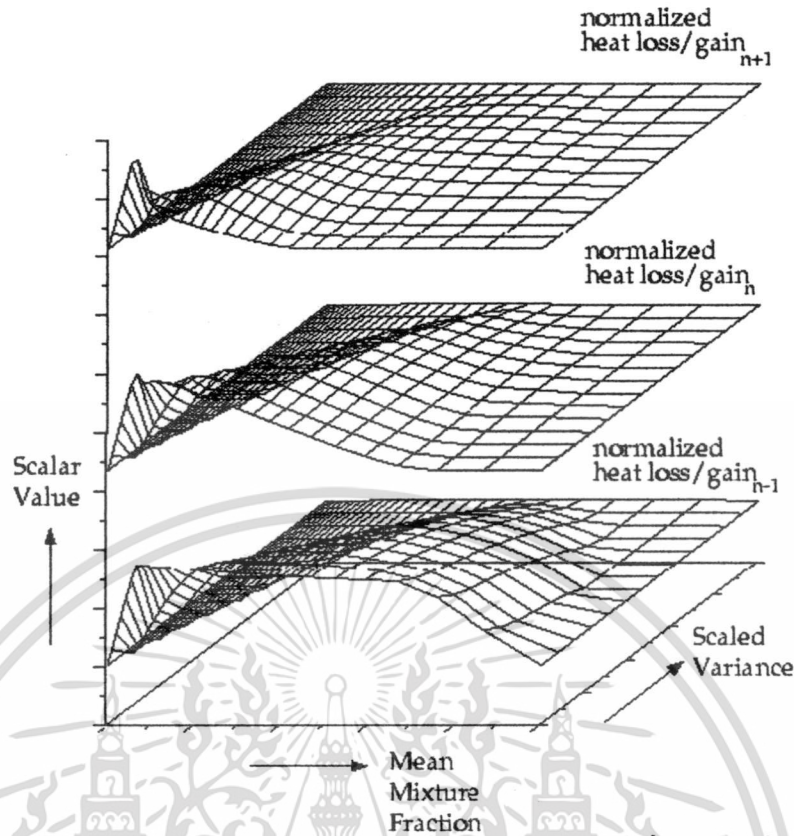


รูปที่ 4.9 แสดงถึงการอธิบายตารางค้นหาสำหรับปริมาณ ϕ_i เป็นฟังก์ชันของ f_{fuel} ในระบบแอเดียแบติกของ two-mixture-fraction

4.1.2.4.2 ตารางค้นหา 3 มิติ สำหรับระบบนอนแอเดียแบติก

ในระบบนอนแอเดียแบติก ซึ่งเอนทาลปีจะมีความสัมพันธ์กับ mixture fraction แบบไม่เป็นเชิงเส้น แต่จะขึ้นอยู่กับค่าเอนทาลปีที่เป็นไปได้ในแต่ละระบบ โดยผลลัพธ์ของระบบ single mixture fraction เป็นตารางค้นหา 3 มิติ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นเลเยอร์ของตาราง 2 มิติ โดยแต่ละชั้นจะสอดคล้องกับการรับหรือสูญเสียความร้อน โดยแผ่นแรกจะสอดคล้องกับการสูญเสียความร้อนที่สูงที่สุดของระบบ โดยแผ่นสุดท้ายจะสอดคล้องกับการรับความร้อนที่สูงที่สุดของระบบ ในขณะที่แผ่นที่มีการสูญเสียหรือรับความร้อนเป็นศูนย์สอดคล้องกับตารางแอเดียแบติก โดยแผ่นที่อยู่ระหว่างแผ่นที่เป็นแอเดียแบติกและแผ่นสุดท้ายจะสอดคล้องกับความร้อนที่รับเข้ามาและแผ่นที่อยู่ระหว่างแผ่นที่เป็นแอเดียแบติกและแผ่นแรกจะสอดคล้องกับการสูญเสียความร้อน

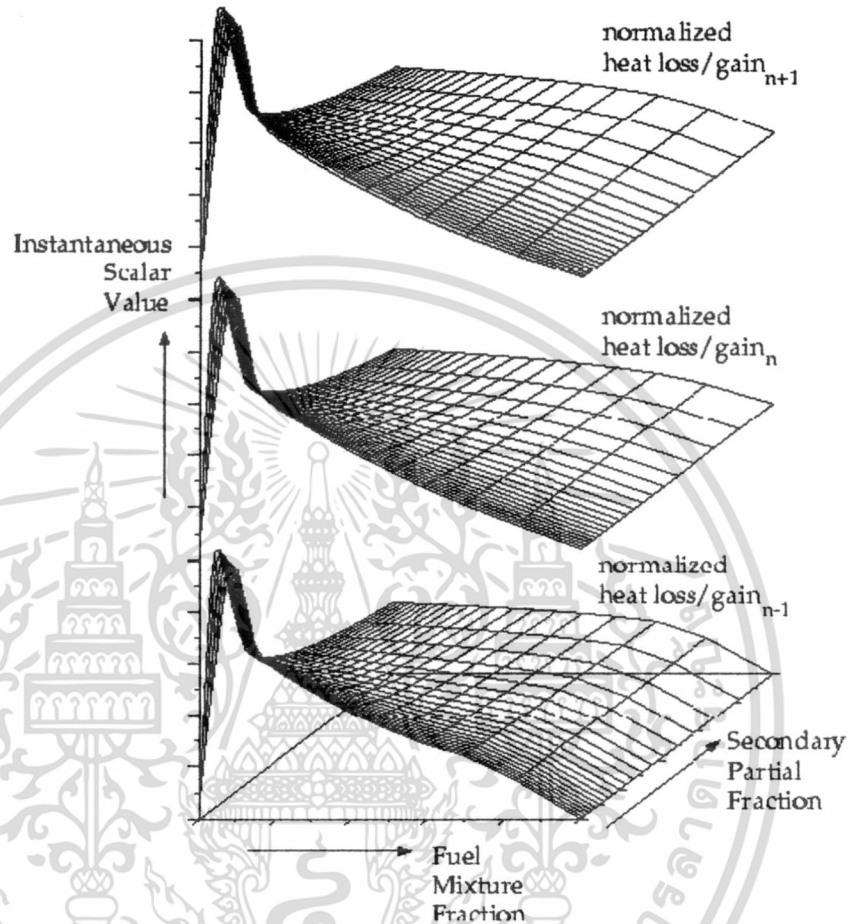
ตารางค้นหา 3 มิติ สามารถให้โปรแกรมกำหนดค่าของแต่ละสัดส่วนมวล ความหนาแน่น และอุณหภูมิจากการคำนวณค่าของ \bar{f} , \bar{f}'^2 และ \bar{H} ตาราง 3 มิติในรูปที่ 4.10 ได้แสดงผลจากการอินทิเกรตสมการ 4.24



รูปที่ 4.10 แสดงถึงการอธิบายตารางค้นหาสำหรับปริมาณ ϕ , ที่เป็นฟังก์ชันของ \bar{f} และ \bar{f}'^2 และค่าการสูญเสีย/เพิ่มความร้อนในระบบนอนแอดิแบติกของระบบ single-mixture fraction

สำหรับ non-adiabatic, two-mixture-fraction นั้นค่อนข้างที่จะสิ้นเปลืองทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณที่จะจัดเรียงและเรียกใช้สมการ 4.26 เนื่องจากสมการนี้ต้องการตาราง 5 มิติ ดังนั้น โปรแกรมจะตั้งค่า Default โดยสร้างตารางค้นหา 3 มิติ ซึ่งสร้างมาจากความสัมพันธ์ของสมการ 4.14 แทน ตาราง 3 มิติในรูปที่ 4.11 เป็นการอธิบายด้วยรูปของสมการ 4.14 ส่วนค่าความหนาแน่นเฉลี่ยนั้น จะได้จากการอินทิเกรตความหนาแน่นขณะนั้นๆ ตลอดทั้งช่วงของค่าเชื้อเพลิงและค่า secondary mixture fraction (ในสมการ 4.26) อีกทางเลือกหนึ่งเราสามารถสร้างตาราง 5 มิติ ขึ้นก่อนการคำนวณและทำการค้นหา ในขณะที่ทำการคำนวณในการสร้างตารางค้นหา 5 มิติ ต่อการคำนวณหนึ่งรอบนั้นสิ้นเปลืองทรัพยากรมาก แต่เมื่อสร้างแล้วการอินเทอโพลเตดตารางระหว่างแก้ปัญหาจะเร็วกว่าการอินเทอโพลเตดระหว่างคำนวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีจำนวนเซลล์มากจำเป็นที่จะต้องคำนวณหลายครั้งจนกว่าจะผลจะคู่เข้า

อนึ่ง เวลาที่ใช้ในการคำนวณสำหรับกรณี two-mixture-fraction จะมากกว่าปัญหา single-mixture-fraction ดังนั้นควรพิจารณาอย่างระมัดระวังในการเลือกใช้แบบจำลอง สัตว์ส่วนสารผสมสองชนิด



รูปที่ 4.11 แสดงถึงการอธิบายตารางค้นหาสำหรับปริมาณ ϕ_i เป็นฟังก์ชันของ f_{fuel} , p_{sec} และค่าการสูญเสีย/เพิ่มความร้อนในระบบบนอนแอดเดียแบติกของ two-mixture-fraction

4.1.3 ข้อจำกัดและกรณีพิเศษสำหรับการใช้แบบจำลอง Non-Premixed

4.1.3.1 ข้อจำกัดของ mixture fraction

4.1.3.2 การใช้แบบจำลอง Non-Premixed สำหรับเชื้อเพลิงเหลวหรือการเผาไหม้ถ่านหิน

4.1.3.3 การใช้แบบจำลอง Non-Premixed กับการรีไซเคิลก๊าซไอเสีย

4.1.3.4 การใช้แบบจำลอง Non-Premixed กับแบบจำลองของก๊าซเฉื่อย

4.1.3.1 ข้อจำกัดของ mixture fraction

ด้วยลักษณะจำเพาะของ ϕ_i (สัดส่วนมวลสปีชีส์, ความหนาแน่นหรืออุณหภูมิ) ที่ขึ้นต่อ f (สมการ 4.11 หรือ 4.13) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ระบบปฏิกิริยาต้องมีอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

- ระบบการทำปฏิกิริยาเคมีต้องเป็นประเภทควบคุมด้วยอัตราการฟุ้งกระจาย (diffusion control) ซึ่งเชื้อเพลิงและออกซิไดซ์เซอร์เข้าสู่ห้องเผาไหม้จากทางเข้าที่แยกจากกัน (การเผาไหม้จากเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้แบบสเปรย์และเปลวไฟจากเชื้อเพลิงผงจะอยู่ในประเภทนี้)
- Lewis number ต้องเท่ากับ 1 (ซึ่งส่วนนี้แสดงว่าสัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายสำหรับทุกๆ สปีชีส์และของเอนทาลปีนั้นเท่ากัน ซึ่งเป็นการประมาณค่าที่สมเหตุสมผลในการไหลปั่นป่วน)
- เมื่อใช้ single mixture fraction ต้องมีสภาวะดังต่อไปนี้ :
 - มีเชื้อเพลิงประเภทเดียวเท่านั้นที่เกี่ยวข้อง เชื้อเพลิงอาจจะประกอบขึ้นจากสปีชีส์ย่อยที่ทำปฏิกิริยา (เช่น 90% CH_4 และ 10% CO) ในกรณีที่มีทางเข้าของเชื้อเพลิงหลายทาง เชื้อเพลิงจะต้องมีองค์ประกอบย่อยเหมือนกัน และจะไม่สามารถใช้เชื้อเพลิงหลายชนิดที่มีองค์ประกอบต่างกัน (เช่น ทางเข้าแรกเป็น CH_4 และอีกทางเข้าเป็น CO) และจะเป็นเช่นเดียวกันกับกรณีการเผาไหม้ที่มีการฉีดแบบสเปรย์ หรือกรณีที่มีการเผาไหม้ของอนุภาค มีเพียงสารระเหยที่ออกจากอนุภาคเพียงองค์ประกอบเดียวเท่านั้นที่อนุญาต
 - ออกซิไดซ์เซอร์ประเภทเดียวเท่านั้นที่เกี่ยวข้อง ออกซิไดซ์เซอร์อาจจะประกอบไปด้วยสปีชีส์หลายๆ สปีชีส์ (เช่น 21% O_2 และ 79% N_2) และอาจจะรวมออกซิไดซ์เซอร์หลายชนิดเข้าไปด้วย โดยออกซิไดซ์เซอร์หลายชนิดต้องมีองค์ประกอบที่เหมือนกัน แต่จะไม่สามารถใช้ออกซิไดซ์เซอร์หลายชนิดที่มีองค์ประกอบต่างกัน (เช่น ทางเข้าแรกเป็นอากาศและอีกทางเข้าเป็นออกซิเจนบริสุทธิ์)
- เมื่อใช้ Two mixture fraction ระบบจะประกอบด้วยกระแสดการไหล 3 กระแส ซึ่งสามารถรวมเข้าไปได้ในระบบเดียวกัน โดยระบบต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้
 - มีสองกระแสดการไหลของเชื้อเพลิงสองชนิดที่มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน และมีหนึ่งกระแสดการไหลออกซิไดซ์เซอร์ แต่กระแสดการไหลของเชื้อเพลิงอาจจะเกิดจากการผสมกันของสปีชีส์ที่เข้าทำปฏิกิริยา (90% CH_4 และ 10% CO) ซึ่งอาจจะมาจากทางเข้าหลายๆ ทางของแต่ละกระแสดการไหลของ

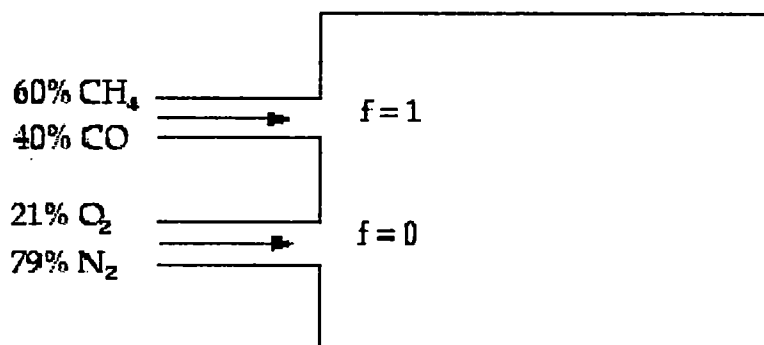
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงแต่ละชนิดต้องมีหนึ่งหรือสององค์ประกอบตามที่กำหนดไว้ (เช่น ทางเข้าแรกเป็น CH_4 และอีกทางเข้าเป็น CO)

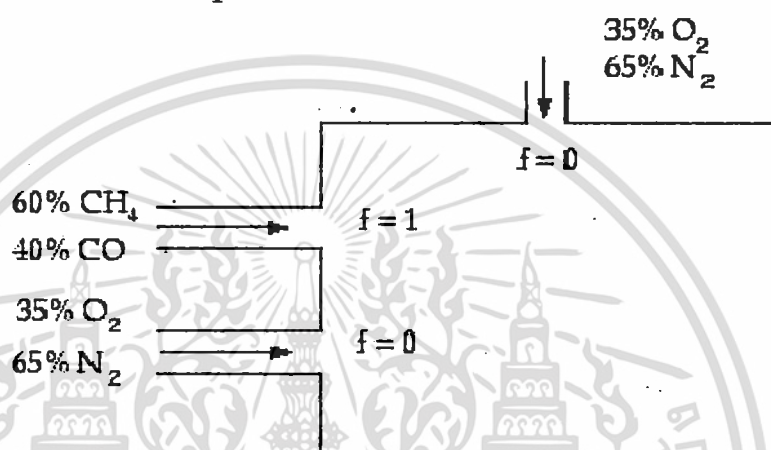
- ระบบเชื้อเพลิงผสมรวมถึงก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ถ่านหิน ของเหลว-ถ่านหิน ผสมกับออกซิไดซ์เซอร์ชนิดเดียว ในระบบที่มี ก๊าซ-ถ่านหิน หรือของเหลว-ถ่านหิน สารระเหยจากถ่านหินและชาร์ต้องถูกมองเป็นเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบเดียวและการไหลที่สองสามารถแทนด้วยเชื้อเพลิงอื่น อีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการเผาไหม้ถ่านหิน สารระเหย Volatile และก๊าซที่ออกมาจากชาร์ จะถูกติดตามแยกกันเนื่องจากเชื้อเพลิงแตกต่างกัน
- การไหลของออกซิไดซ์เซอร์สองชนิดที่มีองค์ประกอบที่แตกต่างกันและเชื้อเพลิงหนึ่งชนิด แต่ละออกซิไดซ์เซอร์อาจจะประกอบไปด้วยสปีชีส์ที่ผสมกัน ($\% \text{O}_2$ และ $79\% \text{N}_2$) ซึ่งอาจจะมีทางเข้าหลายทางสำหรับแต่ละออกซิไดซ์เซอร์ แต่ละทางเข้าของออกซิไดซ์เซอร์ต้องมีหนึ่งหรือสององค์ประกอบที่กำหนดไว้ (เช่น ทาง เข้าแรกเป็นอากาศและอีกทางเข้าเป็นออกซิเจนบริสุทธิ์ เป็นต้น)

• การไหลต้องเป็นแบบปั่นป่วน

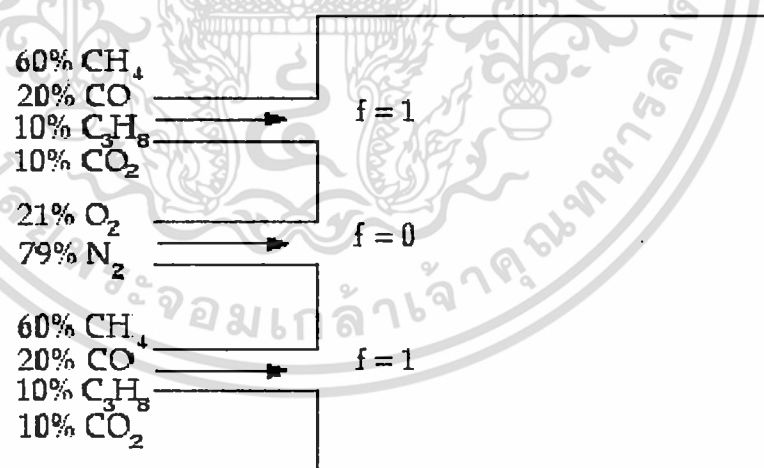
สิ่งสำคัญที่ต้องเน้นคือแบบจำลองนี้มีข้อจำกัดที่ต้องใช้กับการเผาไหม้แบบ non-premixed และใช้ไม่ได้กับการจำลองการเผาไหม้แบบ premixed โดยตรง เนื่องจากกระแสนการไหล premixed ที่ไม่เผาไหม้นั้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้จะมีลักษณะที่แตกต่างจากการเผาไหม้ที่ใช้สมมติฐานของสมดุลเคมีอย่างมาก อย่างไรก็ตาม สูตร mixture fraction ที่มีการพัฒนาต่อมา สำหรับการจำลองการเผาไหม้ชนิดที่มีการผสมบางส่วนก่อนการเผาไหม้ ซึ่งมีได้รวบรวมไว้ในวิทยานิพนธ์นี้ จะสามารถใช้ได้กับการจำลองการเผาไหม้แบบดังกล่าวได้ รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงถึงองค์ประกอบของห้องปฏิกิริยาซึ่งสามารถใช้ได้กับแบบจำลอง non-premixed รูปที่ 4.14 แสดงถึงการกำหนดค่า premixed ซึ่งไม่สามารถจำลองผลได้เมื่อใช้แบบจำลอง non-premixed



(a) Simple Fuel/Oxidant Diffusion Flame



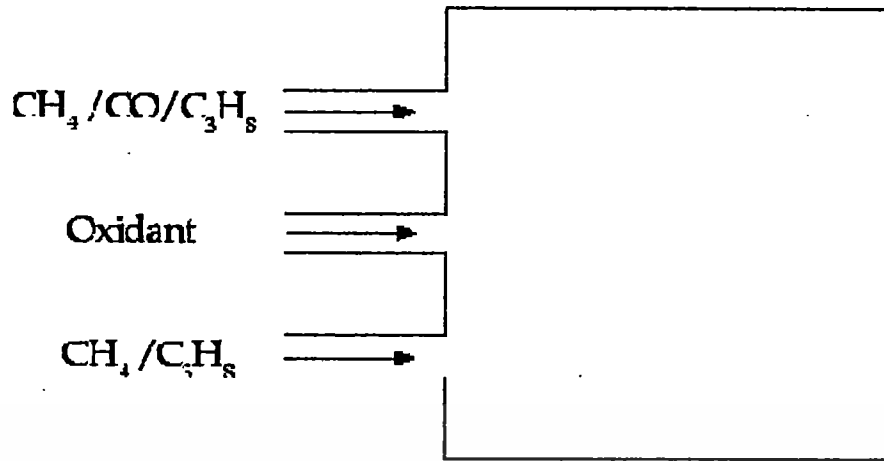
(b) Diffusion System Using Multiple Oxidant Inlets



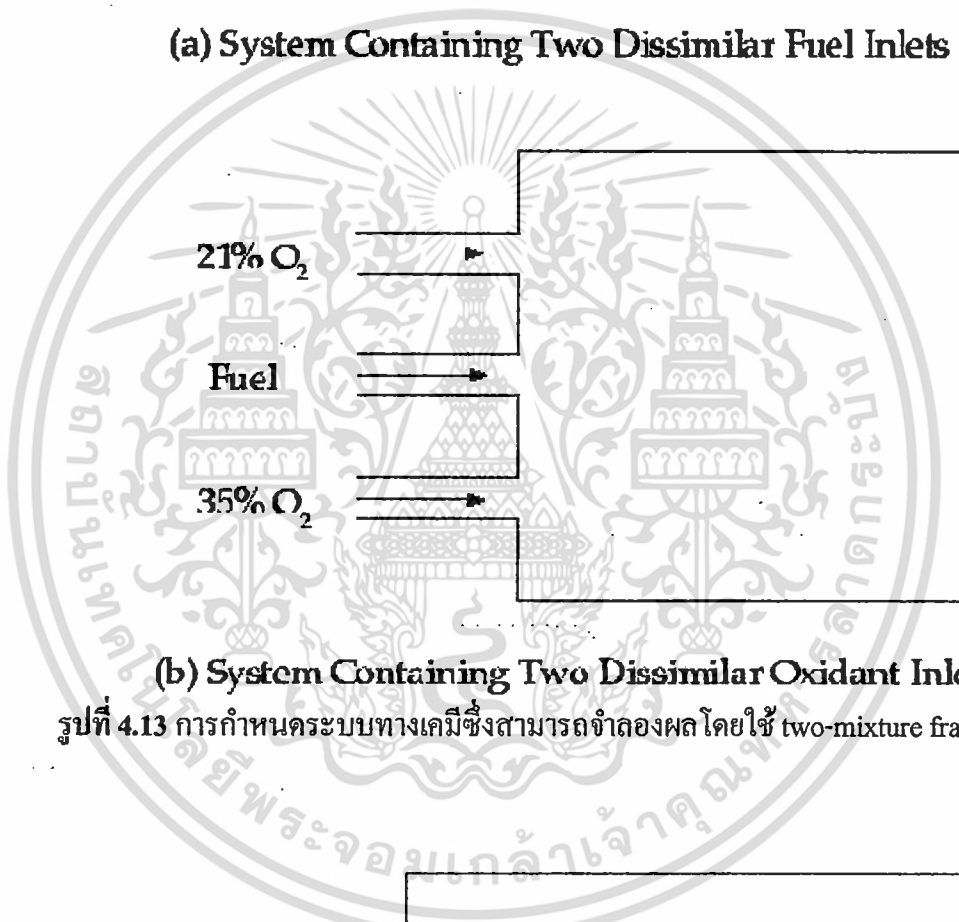
(c) System Using Multiple Fuel Inlets

รูปที่ 4.12 ระบบเชื้อเพลิงที่สามารถจำลองผลได้เมื่อใช้ single-mixture fraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

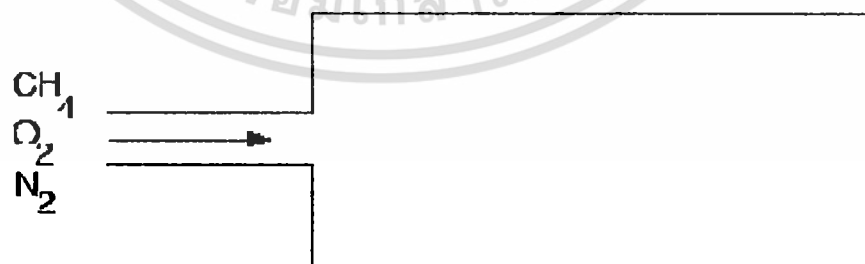


(a) System Containing Two Dissimilar Fuel Inlets



(b) System Containing Two Dissimilar Oxidant Inlets

รูปที่ 4.13 การกำหนดระบบทางเคมีซึ่งสามารถจำลองผลโดยใช้ two-mixture fraction



รูปที่ 4.14 ระบบ Premixed ที่ไม่สามารถจำลองผลโดยใช้แบบจำลอง Non-Premixed

4.1.3.2 การใช้แบบจำลอง Non-Premixed สำหรับเชื้อเพลิงเหลวและการเผาไหม้ถ่านหิน

ผู้ใช้สามารถใช้แบบจำลอง non-premixed ถ้าการจำลองผลได้รวมเชื้อเพลิงเหลวหรือ/และอนุภาคถ่านหิน ในกรณีที่เชื้อเพลิงสถานะก๊าซเข้ามาในโดเมนการคำนวณที่อัตราที่กำหนด โดยการระเหย การปลดปล่อยสารระเหยและกฎการเผาไหม้ซาร์ที่ครอบคลุมเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง ในกรณีของถ่านหิน สารระเหยและผลิตภัณฑ์ของซาร์สามารถกำหนดเป็นเชื้อเพลิงสองประเภทที่ต่างกัน (โดยการใช้ two-mixture fraction) หรือองค์ประกอบเดี่ยว off-gas (โดยการใช้ single-mixture fraction)

4.1.3.3 การใช้แบบจำลอง Non-Premixed กับการใช้เชื้อเพลิงไอเสีย

ขณะที่ปัญหาส่วนมากสามารถแก้ไขโดยใช้แบบจำลอง non-premixed ซึ่งได้รวมทางเข้าที่มีทั้งเชื้อเพลิงหรือออกซิเจนเพียงอย่างเดียว ($f = 0$ หรือ 1) เราสามารถกำหนดให้มีทางเข้าที่มีค่าของ Mixture fraction อยู่ระหว่าง 0 กับ 1 ($0 < f < 1$) ได้ โดยที่สมมติว่าเป็นก๊าซไอเสียที่ทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นสมบูรณ์ ซึ่งหมายถึงที่ทางเข้านี้แสดงถึงการหมุนวนก๊าซไอเสียนั่นเอง กรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.15 เนื่องจาก f เป็นปริมาณอนุรักษ์ ดังนั้นค่าของ mixture fraction ของก๊าซไอเสีย จะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{recycle\ exit} = (\dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{recycle}) f_{exit} \quad (4.27)$$

หรือ

$$f_{exit} = \frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{O_2}} \quad (4.28)$$

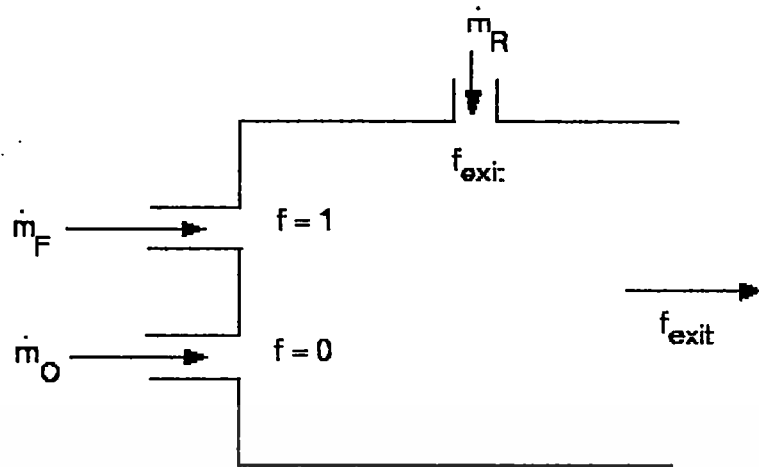
ซึ่ง f_{exit} เป็น mixture fraction ที่ทางออก (และ mixture fraction ของช่องที่ทางเข้าซึ่งนำก๊าซไอเสียกลับมา) \dot{m}_{O_2} เป็นอัตราการไหลเชิงมวลของออกซิเจนที่ทางเข้า ในขณะที่ \dot{m}_{fuel} เป็นอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงที่เข้ามา $\dot{m}_{recycle}$ เป็นอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซหมุนเวียนที่เข้ามา

ในกรณีที่รวมกระแสการไหลทุติยภูมิ จะได้ว่า

$$f_{fuel, exit} = \frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{sec}} \quad (4.29)$$

และ

$$p_{sec, exit} = \frac{\dot{m}_{sec}}{\dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{sec}} \quad (4.30)$$



รูปที่ 4.15 ใช้แบบจำลอง Non-Premixed กับแก๊สไอเสีย

4.1.3.4 การใช้แบบจำลอง Non-Premixed กับแบบจำลองก๊าซเฉื่อย

เพื่อจำลองผลกระทบของการเจือจางในการเผาไหม้ โดยไม่ต้องใช้ two mixture fractions โปรแกรมสามารถจำลองกระแสการไหลของก๊าซเฉื่อยที่เข้าสู่โดเมน กรณีเช่นนี้จะไม่เหมือนกับการใช้ secondary mixture fraction กล่าวคือก๊าซเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับเชื้อเพลิงหลักและออกซิไดซ์เซอร์ และองค์ประกอบทางเคมีไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากผสมแล้ว อย่างไรก็ตามก๊าซเฉื่อยมีผลต่อผลการคำนวณเนื่องจากมันมีผลกระทบต่อเอนทาลปี ความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่นของของผสม สมการอนุรักษ์ของก๊าซเฉื่อยเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho Y_I}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{c} \rho Y_I) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \nabla (Y_I) \right) \quad (4.31)$$

ซึ่ง

Y_I = inert stream tracer

Sc_t = turbulent Schmidt number

μ_t = turbulent viscosity

ρ = ความหนาแน่น

สมการ 4.31 ไม่มีเทอมของแหล่งกำเนิดหรือเทอมของการสูญหาย เพราะว่าเป็นปัญหาถูกลดรูปลงเพียงเพื่อการแกะรอยปริมาณสเกลาร์ และได้สมมุติว่าองค์ประกอบก๊าซเฉื่อยมีความสามารถในการฟุ้งกระจายภายใต้การไหลปั่นป่วนที่เหมือนกันกับก๊าซอื่น

4.1.3.4.1 องค์ประกอบสารประกอบ

คุณสมบัติของของผสมคำนวณได้จาก 1.) ค่าเฉลี่ย (\bar{f}) 2.) ความแปรปรวน (\bar{f}'^2) ของสัดส่วนของผสมในเซลล์ 3.) ตัวแปรบ่งชี้ความคืบหน้าของปฏิกิริยาเคมี (c เมื่อใช้แบบจำลอง premixed บางส่วน) 4.) เอนทาลปีของเซลล์ (H สำหรับการไหลที่ไม่สูญเสียความร้อน) และร่องรอยความเฉื่อย (Y_I) ของผสมเป็นการผสมผสานของสปีชีส์ที่เฉื่อยและสปีชีส์ที่ทำปฏิกิริยา แต่การค้นหาค่าในตาราง PDF นั้นต้องใช้ตัวแปรที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว ดังนั้นการปรับปรุงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อจะได้รวมผลกระทบของปริมาตรที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากสัดส่วนของธาตุเฉื่อยในของผสมนั้น แต่ยังคงสามารถใช้ตารางที่สร้างขึ้นก่อนหน้านี้ในการค้นหาค่าได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้ mean mixture fraction และ mixture fraction variance ที่ใช้เพื่อเข้าสู่ตาราง PDF หาได้ดังนี้

$$\bar{f}_I = \frac{\bar{f}}{1 - Y_I} \quad (4.32)$$

$$\bar{f}'_I{}^2 = \frac{\bar{f}'^2}{(1 - Y_I)^2} \quad (4.33)$$

ตัวแปรบ่งชี้ความคืบหน้าของปฏิกิริยาเคมี C จะไม่มีการปรับปรุงค่า อย่างไรก็ตามเอนทาลปีของเซลล์ต้องมีการปรับปรุงเพื่อรวมผลของเอนทาลปีของธาตุเฉื่อย เอนทาลปีของธาตุเฉื่อยและเอนทาลปีของธาตุที่ทำปฏิกิริยา หาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$H(T) = (1 - Y_I)H^{pdf}(T) + Y_I H^I(T) \quad (4.34)$$

ซึ่ง H เป็นเอนทาลปีของเซลล์ที่อุณหภูมิ T ในขณะที่ H^{pdf} เป็นเอนทาลปีของกระแสการไหลของ mixture-fraction ที่ทำปฏิกิริยา และ H^I เป็นเอนทาลปีของธาตุเฉื่อย ซึ่งได้สมมุติว่ากระแสการไหลของธาตุเฉื่อยและของธาตุที่ทำปฏิกิริยามีอุณหภูมิเดียวกัน แต่มีเอนทาลปีแตกต่างกัน ในการที่จะคำนวณอุณหภูมิภายในเซลล์นั้น จะต้องใช้สมการ 4.34 เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิ และสำหรับ ซึ่งจะบ่งชี้ถึงสัดส่วนของพลังงานในกระแสการไหลของธาตุเฉื่อยและธาตุที่ทำปฏิกิริยา

เอนทาลปีของธาตุเฉื่อยนิยามได้โดย

$$H^I(T) = \sum_{i=0}^{N_I} Y_i \int_{T_0}^T c_{p_i} dT \quad (4.35)$$

ซึ่ง Y_i อ้างถึงสัดส่วนมวลของสปีชีส์ i หมายถึง ธาตุเฉลี่ย T_0 หมายถึง อุณหภูมิ C_{p_i} เป็นความร้อนจำเพาะของสปีชีส์ i และ N_i เป็นจำนวนของสปีชีส์เฉลี่ย

4.1.3.4.2 การประเมินคุณสมบัติ

ความร้อนจำเพาะของของผสมประเมินโดยผสมกระแสการไหลของธาตุเฉลี่ยและธาตุที่ทำปฏิกิริยาในสมการต่อไปนี้

$$C_p(T) = (1 - Y_I)C_p^{pdf}(T) + Y_I C_p^I(T) \quad (4.36)$$

ความหนาแน่นของของผสมคำนวณโดยใช้วิธีเฉลี่ยฮาร์โมนิกของความหนาแน่นของกระแสการไหลของธาตุเฉลี่ยและธาตุที่ทำปฏิกิริยา

$$\rho(T) = \left[\frac{(1 - Y_I)}{\rho^{pdf}(T)} + \frac{Y_I}{\rho^I(T)} \right]^{-1} \quad (4.37)$$

ซึ่งความหนาแน่นก๊าซเฉลี่ย (ρ^I) คำนวณจากกฎก๊าซอุดมคติ

4.2 การก่อเกิดมลพิษ

ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยแบบจำลองการกำเนิดมลพิษ ได้แก่ ในโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)

4.2.1 การก่อเกิด NO_x

ในส่วนต่อไปนี้แสดงถึงทฤษฎีพื้นฐานของการทำนายการเกิด NO_x

- 4.2.1.1 บทนำ
- 4.2.1.2 สมการควบคุมสำหรับการถ่ายเท NO_x
- 4.2.1.3 การก่อเกิด Thermal NO_x
- 4.2.1.4 การก่อเกิด Prompt NO_x
- 4.2.1.5 การก่อเกิด Fuel NO_x
- 4.2.1.6 การก่อเกิด NO_x จาก NO ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา
- 4.2.1.7 การลด NO_x โดยการเผาซ้ำ
- 4.2.1.8 การลด NO_x โดย SNCR
- 4.2.1.9 การก่อเกิด NO_x ในการไหลปั่นป่วน

4.2.1.1 บทนำ

NO_x ที่ปล่อยออกมาส่วนมากประกอบไปด้วยไนโตรเจนออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ปริมาณต่ำกว่า (NO₂) และไนตรัสออกไซด์ (N₂O) NO_x เป็นสารตั้งต้นของควันชนิดที่ถูกกระตุ้นโดยแสงแดด (Photochemical Smog) เมื่อรวมกับความชื้นจะก่อให้เกิดฝนกรด และเป็นสาเหตุของการสูญเสียชั้นโอโซน ดังนั้น NO_x เป็นมลภาวะ โดยแบบจำลอง NO_x เป็นเครื่องมือที่จะทำให้เข้าใจการเกิด NO_x และช่วยในการออกแบบสำหรับควบคุม NO_x

4.2.1.1.1 แบบจำลอง NO_x

แบบจำลอง NO_x มีความสามารถในการจำลองการก่อเกิด thermal, prompt และ fuel NO_x ตลอดจนการเผาไหม้ NO_x ซ้ำที่เกิดในระบบการเผาไหม้ แบบจำลองอัตราการบิน NO_x พัฒนาจากแบบจำลองของ Department of Fuel and Energy at The University of Leeds ; England และจากบทความที่เผยแพร่ทั่วไป ซึ่ง NO_x ลดลงได้โดยการฉีดสารที่เรียกว่า reagent เข้าไปให้มีส่วนร่วมในการทำปฏิกิริยา ที่เรียกว่า Selective Noncatalytic Reduction (SNCR) ซึ่งสามารถจำลองได้พร้อมทั้งแบบจำลองของ intermediate species ได้แก่ N₂O ซึ่งสามารถจำลองได้พร้อมกัน

การทำนายการเกิด NO_x นั้น โปรแกรมจะทำการแก้สมการการถ่ายเทสำหรับความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ (NO) เมื่อมีแหล่งกำเนิด NO_x เกิดขึ้น โปรแกรมจะทำการคำนวณสมการการถ่ายเทสปีชีส์ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาการก่อตัวของ NO_x หรือที่เรียกว่า intermediate species (HCN และ/หรือ NH₃) ด้วย และเมื่อแบบจำลอง N₂O intermediate ได้ถูกเลือก สมการการถ่ายเทของ N₂O จะถูกนำไปคำนวณด้วย โดยสมการถ่ายเท NO_x จะถูกคำนวณบนสนามการไหลและผลจากการคำนวณของการเผาไหม้ กล่าวคือ NO_x เป็นกระบวนการที่เกิดหลังจากการเผาไหม้ เห็นได้ชัดว่ารูปแบบการเผาไหม้ที่ถูกค้องนั้นเป็นสิ่งที่จำเป็นก่อนการทำนาย NO_x อย่างเช่น การเกิด thermal NO_x จะเป็นสองเท่าทุกๆ อุณหภูมิ 90K ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเปลวไฟประมาณ 2,200K ซึ่งในส่วนนี้ต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษเพื่อที่จะได้มาซึ่งความถูกต้องของข้อมูลทางด้าน thermophysic และสภาวะขอบเขตที่กำหนดสำหรับแบบจำลองการเผาไหม้ ความปั่นป่วนที่เหมาะสม คุณสมบัติทางเคมี การแผ่รังสีและแบบจำลองย่อยอื่นๆ ต้องนำมาใช้ร่วมด้วย

ในความเป็นจริงแล้ว เราสามารถคาดหวังผลลัพธ์อย่างแม่นยำได้ถ้าข้อมูลที่ป้อนเข้าไปและแบบจำลองทางฟิสิกส์ที่เลือกมีความถูกต้อง ทั้งนี้ภายใต้สถานการณ์ส่วนใหญ่ การเปลี่ยนแปลงแนวโน้มของ NO_x อันเป็นผลของตัวแปรที่ศึกษา จะทำนายได้ผลดี แต่ปริมาณ

NOx ไม่สามารถคำนวณอย่างแม่นยำได้ การทำนายแนวโน้มที่ได้ผลนี้ จะช่วยลดจำนวนครั้งและค่าใช้จ่ายในการทดลองหามาตรการต่างๆ สำหรับการควบคุมการปลดปล่อย NOx ให้ลดลงได้

4.2.1.1.2 การก่อเกิดและการลด NOx ในเปลวไฟ

ในเปลวไฟลามินาร์และที่ระดับโมเลกุลภายในเปลวไฟที่ปั่นป่วน การก่อเกิดของ NOx สามารถแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนทางเคมีที่ชัดเจน ได้แก่ การก่อเกิด thermal NOx การก่อเกิด prompt NOx การก่อเกิด fuel NOx และ N₂O intermediate แรกเริ่ม thermal NOx ก่อตัวโดยการออกซิเดชันของไนโตรเจนในบรรยากาศในการเผาไหม้ prompt NOx เกิดโดยเกิดปฏิกิริยาที่มีความรวดเร็วที่บริเวณหน้าเปลวไฟ และ fuel NOx เกิดโดยออกซิเดชันของไนโตรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง ที่ระดับความดันที่สูงขึ้นและสถานะที่ออกซิเจนหนา NOx อาจก่อเกิดจากโมเลกุลไนโตรเจน (N₂) ผ่าน intermediate จาก N₂O ทั้งนี้ การเผาไหม้ช้าและกระบวนการ SNCR จะช่วยลดการก่อเกิด NOx ทั้งหมดได้โดยการคำนวณปฏิกิริยาของ NO กับไฮโดรคาร์บอนและแอมโมเนียตามลำดับ

4.2.1.2 สมการควบคุมสำหรับการถ่ายเท NOx

สมการการถ่ายเทมวลของสปีชีส์ NO จะมีในส่วนของ การพัฒนา การฟุ้งกระจาย การผลิตและการบริโภคของ NO และสปีชีส์ที่เกี่ยวข้อง โดยรูปแบบสมการนี้เป็นรูปแบบสมการทั่วไปได้มาจากหลักการพื้นฐานของการอนุรักษ์มวล ผลกระทบของเวลาในการกระบวนการเกิด NOx ในกรอบอ้างอิง Lagrangian ได้ถูกรวมไว้ในพจน์ของการพาในสมการควบคุมที่มีอยู่ในการอ้างอิง Eulerian สำหรับกระบวนการ thermal NOx และ prompt NOx นั้นจะมีเฉพาะสมการถ่ายเทของสปีชีส์ NO เท่านั้นที่นำมาใช้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO} \quad (4.38)$$

กระบวนการเกิด fuel NOx มีรายละเอียดตามที่อธิบายในส่วน 4.2.1.5 การติดตามสปีชีส์ระหว่างปฏิกิริยาที่มีไนโตรเจนอยู่นั้นมีความสำคัญ ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณในส่วนการถ่ายเทของสปีชีส์ HCN, NH₃ หรือ N₂O นอกเหนือจากสปีชีส์ NO

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{HCN}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{HCN}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{HCN}) + S_{HCN} \quad (4.39)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NH_3}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{NH_3}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NH_3}) + S_{NH_3} \quad (4.40)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{N_2O}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{N_2O}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{N_2O}) + S_{N_2O} \quad (4.41)$$

ซึ่ง Y_{HCN} , Y_{NH_3} , Y_{N_2O} และ Y_{NO} เป็นสัดส่วนมวลสำหรับ HCN, NH_3 , N_2O และ NO ในสถานะก๊าซและ D เป็นสัมประสิทธิ์ของการแพร่ source term S_{HCN} , S_{NH_3} , S_{N_2O} และ S_{NO} ถูกกำหนดสำหรับกระบวนการเกิด NOx ที่แตกต่างกัน

4.2.1.3 การเกิด Thermal NOx

การก่อเกิดของ thermal NOx กำหนดโดยปฏิกิริยาเคมีที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสูงที่รู้จักกันในชื่อของ Zeldovich mechanism โดยปฏิกิริยาควบคุมหลักของการก่อเกิดของ thermal NOx จากโมเลกุลของไนโตรเจนเป็นดังนี้



ปฏิกิริยาที่ 3 ได้แสดงถึงการก่อเกิดของ thermal NOx โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเข้าใกล้สภาวะอัตราส่วนที่ผสมพอดีและในส่วนผสมเชื้อเพลิงที่หนา



4.2.1.3.1 อัตราปฏิกิริยา Thermal NOx

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของปฏิกิริยาเหล่านี้ได้จากการวัดค่าในการทดลองมาหลายครั้ง [38, 39, 30] และข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองเหล่านี้มีการประเมินอย่างเข้มข้นโดย Baulch et al [41] และ Hanson และ Salimian [42] ซึ่งแสดงถึงสัมประสิทธิ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาสำหรับสมการ 4.42-4.44 ที่ใช้ในแบบจำลอง NOx ที่ให้ไว้ด้านล่าง ค่าเหล่านี้เลือกโดยการประเมินของ Hanson และ Salimian [42]

$$\begin{aligned} k_{f,1} &= 1.8 \times 10^8 e^{-38370/T} & k_{r,1} &= 3.8 \times 10^7 e^{-425/T} \\ k_{f,2} &= 1.8 \times 10^4 T e^{-4680/T} & k_{r,2} &= 3.81 \times 10^3 T e^{-20820/T} \\ k_{f,3} &= 7.1 \times 10^7 e^{-450/T} & k_{r,3} &= 1.7 \times 10^8 e^{-24560/T} \end{aligned}$$

ตัวแปรที่แสดงทางด้านบน $k_{f,1}$, $k_{f,2}$ และ $k_{f,3}$ เป็นค่าคงที่สำหรับปฏิกิริยาไปข้างหน้า 4.42-4.44, ตามลำดับ, และ $k_{r,1}$, $k_{r,2}$ และ $k_{r,3}$ เป็นค่าคงที่สำหรับปฏิกิริยาย้อนกลับ ค่าคงที่ทั้งหมดนี้มีหน่วยเป็น $m^3 / gmol \cdot s$

อัตราทั้งหมดของการเกิดปฏิกิริยาของ NO ของสมการ 4.42-4.44 เป็นดังนี้

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{f,1}[O][N_2] + k_{f,2}[N][O_2] + k_{f,3}[N][OH] - k_{r,1}[NO][N] - k_{r,2}[NO][O] - k_{r,3} \quad (4.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความเข้มข้นทั้งหมดมีหน่วยเป็น gmol/m^3

เพื่อที่จะคำนวณอัตราการเกิดของ NO และ N จำเป็นต้องทราบความเข้มข้นของ O, H, OH

4.2.1.3.2 การสมมุติฐาน Quasi-Steady สำหรับ [N]

อัตราการเกิดของ NOx จะสำคัญเฉพาะที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 1,800K) เพราะว่าจากลักษณะการยึดโยงกันทางพันธะเคมีของโมเลกุลไนโตรเจนจะต้องใช้การทำลายพันธะที่แข็งแรงของ N_2 ทั้ง 3 แขน (941 kJ/gmol) ผลก็คือต้องใช้พลังงานกระตุ้นสูงของปฏิกิริยา 4.42 ซึ่งทำให้เป็นตัวจำกัดอัตราการก่อตัวของ NOx ด้วยกลไกของ Zeldovich อย่างไรก็ตามพลังงานกระตุ้นที่ต้องใช้สำหรับการออกซิเดชันของอะตอมไนโตรเจนจะน้อยมาก เมื่อมีออกซิเจนที่เพียงพอ เช่นใน เปลวไฟที่มีเชื้อเพลิงบาง ด้วยเหตุนี้ อัตราของการบริโภคออะตอมไนโตรเจนอิสระจะเท่ากับอัตราการก่อเกิด ดังนั้นสภาวะ quasi-steady สามารถกำหนดเป็นเงื่อนไขของปฏิกิริยาได้ การบริโภคนี้ใช้ได้สำหรับการเผาไหม้ทั่วไปยกเว้นในการเผาไหม้ที่มีเชื้อเพลิงหนาแน่นมาก ซึ่งอัตราการเกิดจะกลายมาเป็น

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_{f,1}[\text{O}][\text{N}_2] \frac{\left(1 - \frac{k_{r,1}k_{r,2}[\text{NO}]^2}{k_{f,1}[\text{N}_2]k_{f,2}[\text{O}_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_{r,1}[\text{NO}]}{k_{f,2}[\text{O}_2] + k_{f,3}[\text{OH}]}\right)} \quad (\text{gmol/m}^3 \cdot \text{s}) \quad (4.46)$$

4.2.1.3.3 อุณหภูมิสัมพันธ์กับ Thermal NOx

จากสมการ 4.46 เป็นที่ชัดเจนว่าอัตราการเกิดของ NO จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า thermal NO จะสูงขึ้นตามอุณหภูมิแต่ไม่ขึ้นอยู่กับประเภทของเชื้อเพลิง ที่จริงแล้วขึ้นอยู่กับอัตราการก่อเกิดที่อธิบายโดย $k_{f,1}$ โดยอัตราการเกิดของ thermal NOx จะเป็นสองเท่าทุกๆ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 90K เมื่ออุณหภูมิของก๊าซเกิน 2,200K

4.2.1.3.4 การคำนวณ Thermal NOx ที่ไม่ควบคู่

เพื่อแก้สมการ 4.46 เราต้องทราบความเข้มข้นของอะตอมออกซิเจนและอนุมูลอิสระ OH รวมถึงความเข้มข้นของสปีชีส์ที่เสถียร (O_2 , N_2) ตามคำแนะนำของ Zeldovich จะพบว่ากลไกการก่อเกิด thermal NOx สามารถแยกคำนวณจากกระบวนการเผาไหม้หลัก โดยสมมุติค่าที่สมดุลของอุณหภูมิ สปีชีส์ที่เสถียร อะตอมออกซิเจน และอนุมูลอิสระ OH อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของอนุมูลอิสระและอะตอมออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบต้องมีมากกว่าระดับสมดุล ผลกระทบของสมดุลอะตอมออกซิเจนบางส่วนต่ออัตราการก่อเกิด NOx ได้มีการ

ตรวจสอบ [43] ภายใต้การเผาไหม้ของมีเทนกับอากาศที่การไหลแบบราบเรียบ ผลของการวิจัยนี้ได้บ่งชี้ถึงระดับของ NOx ที่สามารถทำนายได้ต่ำกว่าค่าจริง 28% ในบริเวณเปลวไฟเมื่อสมมุติความเข้มข้นของอะตอมออกซิเจนอยู่ในภาวะสมดุล

4.2.1.3.5 วิธีการกำหนดความเข้มข้น O อิสระ

มีการศึกษารายละเอียดเพียงเล็กน้อยของความเข้มข้นของอนุมูลอิสระในเปลวไฟที่ปั่นป่วน แต่งานวิจัยในอดีต [44] ได้แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์นี้ในเปลวไฟที่ปั่นป่วน โดยในปัจจุบันยังไม่มี การสรุปผลกระทบอันเนื่องมาจากสภาพสมดุลบางส่วนต่ออัตราการก่อเกิด NOx ในเปลวไฟปั่นป่วน ซึ่ง Peters และ Donnerhack [45] ได้แนะนำว่าสมดุลอนุมูลอิสระบางส่วนสามารถคำนวณเพิ่มขึ้นไม่เกิน 25% ใน thermal NOx และการเคลื่อนที่ของไหลมีผลที่เด่นชัดต่ออัตราการก่อเกิด NOx Bilger et al. [46] ได้แนะนำว่า ภายใต้เงื่อนไขในเปลวไฟที่ปั่นป่วน ผลของอะตอมออกซิเจนส่วนเกิน เป็นสิ่งสำคัญต่ออัตราการก่อเกิด NOx

เพื่อจัดการกับปัญหาความไม่แน่นอนจากผลของความปั่นป่วนนี้ วิธีนี้อาจใช้ควบคู่ไปกับกลไกการขยายตัวของ Zeldovich กับกลไกการเผาไหม้ของไฮโดรคาร์บอนที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา สปีชีส์ โดยวิธีนี้ได้ถูกใช้ก่อนหน้านี้สำหรับการวิจัยในอดีต [47] เพื่อกำหนดความเข้มข้นของอนุมูลอิสระของออกซิเจน เราต้องเลือกใช้หนึ่งในสามแนวทาง ได้แก่ แนวทางสมดุล แนวทางสมดุลบางส่วน และแนวทางการทำนายความเข้มข้นในแนวทางที่ได้พิจารณาไว้ข้างต้น

Method 1: แนวทางสมดุล

พลังงานจลน์ของอัตราการก่อเกิดของ thermal NOx ต้องต่ำกว่าอัตราออกซิเดชันไฮโดรคาร์บอนและ thermal NOx ส่วนมากก่อเกิดหลังจากการเผาไหม้ที่เสร็จสิ้นแล้ว

ดังนั้นกระบวนการก่อเกิด thermal NOx สามารถคำนวณแยกจากกลไกปฏิกิริยาเผาไหม้หลักและอัตราการก่อเกิด NOx สามารถคำนวณได้โดยสมมุติภาวะสมดุลของปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยวิธีนี้การคำนวณของอัตราการก่อเกิด thermal NOx สามารถทำได้ง่าย การตั้งสมมุติฐานว่าสสารอยู่ในสภาวะสมดุลนั้นเป็นสิ่งที่ยอมรับได้ เนื่องจากส่วนของอนุมูลอิสระที่พุ่งสูงเกินปกติไปมากนั้นมีอยู่น้อย และมีความสำคัญต่อการก่อกำเนิด NOx ไม่มากนัก [48] จากงานของ Westenberg [49] สมดุลความเข้มข้นของอะตอมออกซิเจนสามารถได้มาจาก

$$[O] = k_p [O_2]^{1/2} \quad (4.47)$$

โดยการรวมค่า k_p จะได้เป็น

$$[O] = 3.97 \times 10^5 T^{-1/2} [O_2]^{1/2} e^{-31090/T} \text{ gmol/m}^3 \quad (4.48)$$

ซึ่ง T เป็นหน่วยเคลวิน

Method 2: แนวทางสมดุลบางส่วน

การปรับปรุงวิธีที่ 1 สามารถทำได้โดยรวมผลของปฏิกิริยา ระหว่าง O_2 กับ third-body ในกระบวนการแตกตัวและรวมตัว



สมการ 4.48 แทนที่แล้วเป็นดังนี้ [50]

$$[O] = 36.64 T^{1/2} [O_2]^{1/2} e^{-27123/T} \text{ gmol/m}^3 \quad (4.50)$$

โดยทั่วไปแล้วจะนำไปสู่ความเข้มข้นบางส่วนของอะตอมออกซิเจนที่มากกว่าวิธีที่ 1

Method 3: แนวทางการทำนาย O

เมื่อความเข้มข้นของอะตอมออกซิเจน ได้จากการใช้แบบจำลองเคมีพิเศษซึ่งมีการจำลองการก่อกำเนิดและการถ่ายโอนโดยตรง (อย่างเช่น แบบจำลองเปลวไฟย่อยของแบบจำลอง non-premixed) $[O]$ จะได้จากสัดส่วนเชิงมวลออกซิเจนที่บริเวณนั้น

4.2.1.3.6 แนวทางสำหรับการกำหนดความเข้มข้นของอนุมูล OH อิสระ

ในการคำนวณจะต้องเลือกใช้หนึ่งในสามแนวทางต่อไปนี้เพื่อกำหนดความเข้มข้นของอนุมูลอิสระ คือ 1.) การแยกการคำนวณ OH จากการคำนวณ NO_x 2.) แนวทางสมดุลบางส่วน และ 3.) การใช้ผลการทำนายความเข้มข้น OH

Method 1: แนวทางแยกการคำนวณ OH จากการคำนวณ NO_x

ในแนวทางนี้ ปฏิกิริยาที่สามในกลไกการขยายตัวของ Zeldovich (สมการ 4.44) จะสมมติว่าละทิ้งได้ตลอดทั้งการสำรวจต่อไปนี้

$$k_3 [O_2]_{eq} \gg k_3 [OH]_{eq}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อสมมุติฐานอธิบายให้เห็นถึงสถานะเชื้อเพลิงบางและข้อสมมุติฐานเป็นเหตุเป็นผลสำหรับกรณีส่วนใหญ่

Method 2: แนวทางสมมูลบางส่วน

ในแนวทางนี้ ความเข้มข้นของ OH ในปฏิกิริยาที่สามในกลไกการขยายตัวของ Zeldovich กำหนดโดย [51, 52]

$$[OH] = 2.129 \times 10^{27} T^{-0.57} e^{-4595/T} [O]^{1/2} [H_2O]^{1/2} \text{ gmol/m}^3 \quad (4.51)$$

Method 3: แนวทางการทำนาย OH

ตามที่แนวทางการทำนาย O เมื่อความเข้มข้นของ OH อธิระสามารถทำนายได้อย่างดีเมื่อใช้แบบจำลองเคมีแบบพิเศษอย่างเช่น แบบจำลองเปลว ความเข้มข้นของ [OH] สามารถได้มาโดยตรงจากสัดส่วน OH

4.2.1.3.7 สรุป

สรุป อัตราการก่อเกิด thermal NO_x ทำนายโดยสมการ 4.46 โดยสมการนี้ต้องการค่าความเข้มข้นของอะตอมออกซิเจน ซึ่งจะคำนวณได้ด้วยการใช้สมการ 4.48 สำหรับการสันนิษฐานว่าสมดุล และสมการ 4.50 สำหรับการสันนิษฐานว่าสมดุลบางส่วนหรือใช้สัดส่วนมวลของออกซิเจนที่บริเวณนั้น ซึ่งสามารถเลือกได้ขณะกำหนดปัญหา ในพจน์ของสมการการถ่ายเทสำหรับ NO (สมการ 4.38) source term NO เนื่องจากกลไกของ thermal NO_x เป็นดังนี้

$$S_{thermal,NO} = M_{w,NO} \frac{d[NO]}{dt} \quad (4.52)$$

ซึ่ง $M_{w,NO}$ เป็นมวล โมเลกุลของ NO (kg/gmol) และ $\frac{d[NO]}{dt}$ คำนวณมาจากสมการ 4.46

4.2.1.4 การก่อเกิด Prompt NO_x

เป็นที่ทราบกันดีว่าระหว่างการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน อัตราการก่อเกิด NO_x นั้นมีความเป็นไปได้ที่จะมีมากกว่าการผลิตจากการออกซิเดชันโดยตรงของโมเลกุลไนโตรเจน (เช่น thermal NO_x)

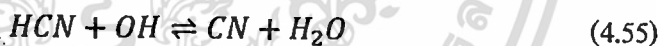
4.2.1.4.1 สถานะการเผาไหม้ของ Prompt NOx

การมีอยู่ของกลไกที่สองนั้น นำไปสู่การก่อเกิด NOx ซึ่งถูกระบุเป็นครั้งแรกโดย Fenimore [53] และกำหนดเป็นพจน์ "prompt NOx" มีหลักฐานอย่างชัดเจนว่า prompt NOx สามารถก่อเกิดอย่างมีนัยสำคัญในบางสถานะการเผาไหม้ได้ อย่างเช่น ที่สถานะอุณหภูมิต่ำ เชื้อเพลิงหนา และการเผาไหม้ที่ใช้เวลาน้อย หัวเผาไหม้แบบเบนราบ ระบบการเผาไหม้เป็นชั้น และการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้เครื่องยนต์กังหันก๊าซก็สามารถสร้างเงื่อนไขดังกล่าวได้ [54]

ปริมาณ prompt NOx ต่อ ปริมาณ NOx ทั้งหมดที่เกิดจากห้องเผาไหม้นั้นมีปริมาณที่น้อย อย่างไรก็ตาม ด้วยการปล่อย NOx ที่ลดลงไปจนมีระดับลงมาต่ำมาก โดยการใช้กลวิธีใหม่ (โดยการปรับปรุงหัวเผาและห้องเผาไหม้) ความสำคัญของ prompt NOx คาดได้ว่าจะเพิ่มขึ้น

4.2.1.4.2 กลไก Prompt NOx

Prompt NOx ส่วนมากจะอยู่ในเปลวไฟที่เชื้อเพลิงหนา ปฏิกริยามีความซับซ้อนและเกี่ยวพันกับสปีชีส์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกริยา โดยเส้นทางการเกิดปฏิกริยาที่ยอมรับโดยทั่วไป มีดังนี้



การแตกตัวของเชื้อเพลิง ได้ก่อให้เกิดสปีชีส์ย่อยจำนวนหนึ่ง ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของ NOx ในเปลวไฟของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน (เช่น CH, CH₂, C, C₂H) โดยส่วนใหญ่จะมาจาก CH (สมการ 4.53) และ CH₂ โดย



ผลิตภัณฑ์ของปฏิกริยาเหล่านี้สามารถนำไปสู่การก่อกำเนิดของแอมโมเนียและองค์ประกอบไซยาไนด์ซึ่งภายหลังเกิดปฏิกริยาการก่อกำเนิด NO โดยปฏิกริยาล้ำยกลึงกับที่เกิดขึ้นในการออกซิเดชันของเชื้อเพลิงไนโตรเจน ตัวอย่างเช่น



4.2.1.4.3 สัดส่วนการก่อเกิด Prompt NOx

การก่อกำเนิด Prompt NOx เป็นสัดส่วนกันกับเปอร์เซ็นต์ของอะตอมคาร์บอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรและ ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของไฮโดรคาร์บอนที่เป็นตัวให้กำเนิดมัน ปริมาณของ HCN ที่ก่อกำเนิดนั้นจะเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับความเข้มข้นของอนุมูลไฮโดรคาร์บอนซึ่งเพิ่มขึ้นตามค่าของอัตราส่วนสมมูล และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของการผลิต Prompt NOx กับค่าอัตราส่วนสมมูลจากน้อยไปหามาก จะพบว่าการผลิต Prompt NOx ก็จะเพิ่มขึ้นในตอนต้น จากนั้นจะผ่านจุดสูงสุด และสุดท้ายจะลดลงจนเนื่องจากออกซิเจนไม่เพียงพอ

4.2.1.4.4 ปฏิกริยาหลัก

ปฏิกริยา 4.53 เป็นปฏิกริยาหลักที่มีความสำคัญ จากการศึกษาเมื่อไม่นานมานี้ [55] การเปรียบเทียบการกระจายของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นสำหรับตำแหน่งที่มี NOx สูงสุด สอดคล้องกับจุดสูงสุดของ CH แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องอย่างใกล้ชิด จึงสามารถชี้ชัดได้ว่า NOx ส่วนใหญ่เกิดที่ฐานเปลวไฟเป็น prompt NOx ที่ก่อกำเนิดโดยปฏิกริยาของ CH ในแบบจำลองต่อไปนี้ สมมุติว่าปฏิกริยา 4.53 ความคุมอัตราการก่อกำเนิด

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_0[CH][N_2] \quad (4.59)$$

4.2.1.4.5 กลวิธีในการจำลอง

อย่างไรก็ตาม ยังมีความไม่แน่นอนของข้อมูลอัตราของปฏิกริยาทางด้านบน จากปฏิกริยา 4.53-4.57 สามารถสรุปได้ว่าการทำนายการก่อเกิด prompt NOx ภายในเปลวไฟต้องการคำนวณควบคู่ระหว่างจลนพลศาสตร์ของ NOx กับกลไกการเผาไหม้ไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจริง กลไกการเผาไหม้ไฮโดรคาร์บอนนั้นมีขั้นตอนที่เกี่ยวข้องหลายขั้นตอน ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ โดยกลไกเหล่านี้มีความซับซ้อนอย่างยิ่งและสิ้นเปลืองทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณมาก ในแบบจำลอง NOx ปัจจุบันได้ใช้ตัวแปรพลังงานจลน์ในภาพรวม ที่แปลงรูปได้มาโดย De Soete [56] ในวิธีดังกล่าว De Soete ได้เปรียบเทียบผลจากการทดลองของอัตราการก่อเกิด NOx ทั้งหมดกับอัตราของการก่อกำเนิดที่คำนวณไว้ โดยอินทิเกรตทุกช่วงของอัตราการเกิดปฏิกริยาทั้งหมดของ NOx และของ N₂ ซึ่ง De Soete แสดงให้เห็นว่าอัตราการก่อเกิด prompt NOx ทั้งหมดสามารถทำนายได้จาก

$$\frac{d[NO]}{dt} = (\text{overall prompt NOx formation rate}) - (\text{overall prompt N}_2 \text{ formation}) \quad (4.60)$$

ในระยะแรกของเปลวไฟนั้น prompt NOx จะก่อกำเนิดโดยอยู่ภายใต้สภาวะเชื้อเพลิงหนา ความเข้มข้นของออกซิเจนอะตอม O ที่สูงและอนุมูลไนโตรเจน N เกือบทั้งหมดจะก่อกำเนิด NOx มากกว่าจะรวมตัวกันเป็นไนโตรเจนโมเลกุล ดังนั้น ที่ภาวะดังกล่าว อัตราการก่อกำเนิด prompt NOx สามารถประมาณได้ว่าเท่ากับอัตราการก่อกำเนิด prompt NOx ทั้งหมด

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{pr}[O_2]^a[N_2][FUEL]e^{-E_a/RT} \quad (4.61)$$

สำหรับเปลวไฟ C₂H₄ (เอทิลีน) – อากาศ

$$k_{pr} = 1.2 \times 10^7 (RT/p)^{a+1}; \quad E_a = 251151 \text{ j/gmol}$$

ซึ่ง a เป็นอันดับปฏิกิริยาที่ขึ้นกับความเข้มข้นของออกซิเจน, R เป็นค่าคงที่ก๊าซสากลและ p เป็นความดัน (ทั้งหมดเป็นหน่วย SI) พบว่าอัตราการก่อกำเนิด prompt NOx เป็นปฏิกิริยาที่ขึ้นกับอันดับที่ 1 ของไนโตรเจนและความเข้มข้นของเชื้อเพลิง แต่ลำดับปฏิกิริยาออกซิเจน a จะขึ้นอยู่กับสภาวะที่ทดลอง

4.2.1.4.6 อัตราการก่อกำเนิด NOx สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนทั่วไป

สมการ 4.61 ได้ทดสอบกับผลการทดลองที่ทดลองไว้โดย Backmier et al [57] สำหรับของผสมและเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันหลายๆ แบบ การทำนายผลได้ชี้ว่า ความสามารถในการทำนายของแบบจำลองจะลดลงภายใต้สภาวะเชื้อเพลิงที่หนาและสำหรับเชื้อเพลิงที่มีไฮโดรคาร์บอนที่สูง เพื่อที่จะลดความผิดพลาด และทำนาย prompt NOx ได้อย่างเหมาะสมในทุกๆสภาวะ แบบจำลอง De Soete จะต้องปรับปรุงโดยการใช้ผลการทดลองที่เหมาะสมตัวประกอบ ได้ถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งใช้เป็นตัวแทนผลกระทบจากประเภทของเชื้อเพลิง คือจำนวนของอะตอมคาร์บอนและอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงสำหรับก๊าซไฮโดรคาร์บอน ดังนั้น สมการ 4.61 เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{d[NO]}{dt} = f k'_{pr}[O_2]^a[N_2][FUEL]e^{-E'_a/RT} \quad (4.62)$$

source term มีสาเหตุมาจากกลไกของ prompt NOx เป็นดังนี้

$$S_{prompt,NO} = M_{w,NO} \frac{d[NO]}{dt} \quad (4.63)$$

ในสมการด้านบน

$$f = 4.75 + 0.0819n - 23.2\phi + 32\phi^2 - 12.2\phi^3 \quad (4.64)$$

$$k'_{pr} = 6.4 \times 10^6 (RT/p)^{a+1}; \quad E'_a = 303474.125 \text{ J/gmol}$$

n เป็นจำนวนอะตอมของคาร์บอนต่อ โมเลกุลสำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน และ ϕ เป็นอัตราส่วนสมมูล สัดส่วนความถูกต้องเป็นค่าที่ได้มาจากการเทียบค่ากับผลการทดลอง ซึ่งจะใช้ได้กับ เชื้อเพลิงจำพวก aliphatic alkane ($C^n H^{2n+2}$) และที่อัตราส่วนสมมูล ระหว่าง 0.6 ถึง 1.6 สำหรับกรณีที่อยู่นอกเหนือจากนี้ ควรใช้ค่าตัวประกอบในขอบเขตที่เหมาะสม ค่าของ k'_{pr} และ E'_a พัฒนาโดย Department of Fuel and Energy ; The University of Leeds ; England

ในที่นี้ ค่าอัตราส่วนสมมูลที่ใช้ในสมการ หมายถึงอัตราส่วนสมมูลโดยรวมของ เปลวไฟไม่ใช่ค่าที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งต่างๆ ในโคเมนการไหล ในการจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาที่มีรูปทรงที่ซับซ้อนและมีหัวเผาหลายหัวอาจจะนำไปสู่ความไม่แน่นอนในการใช้ค่าของ ϕ ใดๆก็ตาม เนื่องจากผลกระทบของ prompt NOx ต่อ NOx ทั้งหมด มีค่าเพียงเล็กน้อย ซึ่งผลลัพธ์ไม่น่าจะเบี่ยงเบนไปมาก

4.2.1.4.7 ลำดับการเกิดปฏิกิริยาของออกซิเจน

ค่ายกกำลังของความเข้มข้นออกซิเจนขึ้นอยู่กับภาวะของเปลวไฟ สอดคล้องกับ De Soete [57] ค่านี้สัมพันธ์กับสัดส่วนโดยโมลของออกซิเจนในเปลวไฟ

$$\alpha = \begin{cases} 1.0, & X_{O_2} \leq 4.1 \times 10^{-3} \\ -3.95 - 0.9 \ln X_{O_2}, & 4.1 \times 10^{-3} \leq X_{O_2} \leq 1.11 \times 10^{-2} \\ -0.35 - 0.1 \ln X_{O_2}, & 1.11 \times 10^{-2} < X_{O_2} < 0.03 \\ 0, & X_{O_2} \geq 0.03 \end{cases} \quad (4.65)$$

4.2.1.5 การก่อเกิด Fuel NOx

4.2.1.5.1 พันธะเชื้อเพลิงไนโตรเจน

เป็นที่รู้กันดีว่าไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในอินทรีย์สารที่อยู่ในเชื้อเพลิงฟอสซิล แฉ่งและเหลว และมีส่วนที่ทำให้เกิด NOx ขึ้นระหว่างกระบวนการเผาไหม้ เชื้อเพลิงไนโตรเจนเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญของการปลดปล่อยมลภาวะไนโตรเจนออกไซด์ของเชื้อเพลิงน้ำมันเตาและถ่านหิน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไนโตรเจนที่ปะปนอยู่ จะอยู่ที่ประมาณ 0.3-2% ของน้ำหนักทั้งหมด การศึกษาแสดงให้เห็นว่าไนโตรเจนส่วนใหญ่ที่อยู่ในน้ำมันหนัก เช่นน้ำมันเตาจะอยู่ในรูปแบบ heterocycle และมีความเข้าใจโดยทั่วไปว่าองค์ประกอบของไนโตรเจนถ่านหินมีลักษณะคล้ายคลึงกัน [58] มีความเชื่อกันว่า โครงสร้าง heterocyclic ring ประเภท pyridine, quinoline และแอมมีน นั้น คือแหล่งสำคัญของ Fuel NO

4.2.1.5.2 เส้นทางปฏิกิริยา

การเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงไนโตรเจน ไปยัง NO_x ขึ้นอยู่กับลักษณะการเผาไหม้ที่บริเวณนั้นและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารประกอบพันธะไนโตรเจน สารประกอบพันธะเชื้อเพลิงที่ประกอบไปด้วยไนโตรเจนได้หลุดออกไปเป็นสถานะก๊าซเมื่อหยดเชื้อเพลิงหรืออนุภาคได้รับความร้อนในระหว่างขั้นตอนการปลดปล่อยสารระเหย จากการแยกตัวอันเนื่องมาจากความร้อนของสารประกอบเหล่านี้ (aniline, pyridine, pyrroles, ฯลฯ) ในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา อนุมูลประเภท HCN , NH_3 , N , CN , และ NH สามารถเกิดขึ้นและเปลี่ยนแปลงไปเป็น NO_x อนุมูลอิสระที่กล่าวมานั้น (อาจเรียกว่า secondary intermediate nitrogen compounds) จะเข้าสู่ปฏิกิริยาที่ต้องแข่งขันสองเส้นทาง กลไกทางเคมีนี้มีประเด็นที่ได้รับการตรวจสอบอย่างมากในรายละเอียด [59] ถึงแม้ว่าการก่อเกิดและสูญเสีย fuel NO_x ยังคงไม่สามารถทำความเข้าใจได้อย่างสมบูรณ์ แต่นักวิจัยหลายท่านก็สามารถเห็นพ้องตรงกันว่ากลไกสามารถทำให้ดูเข้าใจง่ายขึ้นได้ดังนี้



รูปที่ 4.16 เส้นทางปฏิกิริยาการเกิด Fuel NO_x จากไนโตรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา

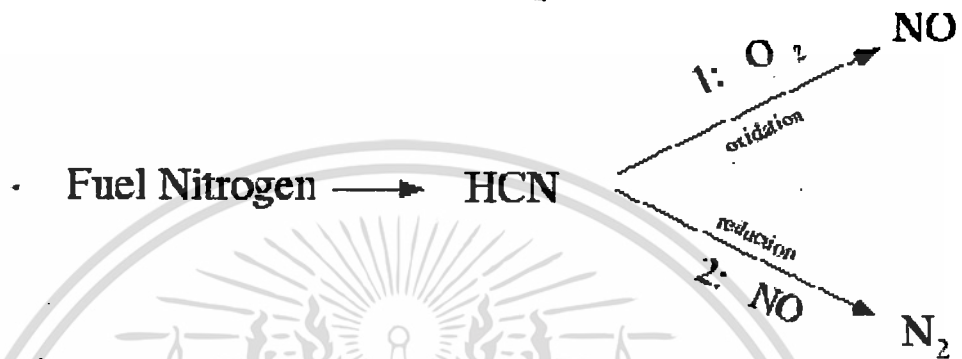
การตรวจสอบที่ผ่านมาไม่นานนี้ [60] ได้แสดงว่าไฮโดรเจนไซยาไนด์ดูเหมือนจะเป็นผลิตภัณฑ์หลักถ้าเชื้อเพลิงไนโตรเจนอยู่ในรูปแบบอโรแมติกหรือเป็นแบบวงกลม อย่างไรก็ตาม เมื่อเชื้อเพลิงไนโตรเจนปรากฏอยู่ในรูปแบบของ aliphatic amines แอมโมเนียจะกลายมาเป็นผลิตภัณฑ์หลักจากการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงไนโตรเจน

ในแบบจำลอง NO_x แหล่งกำเนิดของการปลดปล่อย NO_x ในรูปแบบเชื้อเพลิงก๊าซ, เชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงถ่านหินต้องพิจารณาแยกกัน ซึ่งอนุมูลไนโตรเจนที่เกิดระหว่างปฏิกิริยาจะถูกจัดกลุ่มเป็น HCN และ NH_3 หรือเป็นส่วนผสมของทั้งสองชนิด สมการการถ่ายเท (4.38 และ 4.39 หรือ 4.40) จะคำนวณหลังจากกำหนดค่า source term S_{HCN} , S_{NH_3} , และ S_{NO} จากประเภทเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน การอธิบายต่อไปนี้จะกล่าวถึงแหล่งกำเนิด fuel NO_x สำหรับ S_{NO} และ HCN , และแหล่งกำเนิด NH_3 สำหรับ S_{HCN} และ S_{NH_3}

4.2.1.5.3 Fuel NO_x จากเชื้อเพลิงก๊าซและเชื้อเพลิงเหลว

กลไกของเชื้อเพลิง NO_x สำหรับเชื้อเพลิงก๊าซและเชื้อเพลิงเหลวนั้นอยู่บนพื้นฐานทางกายภาพที่แตกต่างกันแต่มีเส้นทางปฏิกิริยาทางเคมีเดียวกัน

Fuel NO_x จากไฮโดรไซยาไนด์ (HCN) ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา
เมื่อ HCN เป็นสปีชีส์ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา



รูปที่ 4.17 เส้นทางปฏิกิริยาการเกิด Fuel NO_x จากไฮโดรไซยาไนด์ (HCN) ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา

source term ในสมการการถ่ายเทสามารถเขียนได้ดังนี้

$$S_{HCN} = S_{p1,HCN} + S_{HCN-1} + S_{HCN-2} \quad (4.66)$$

$$S_{NO} = S_{NO-1} + S_{NO-2} \quad (4.67)$$

การผลิต HCN ในเชื้อเพลิงก๊าซ

อัตราการผลิต HCN เท่ากับอัตราของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

$$S_{p1,HCN} = \frac{R_{cf} Y_{N,fuel} M_{w,HCN}}{M_{w,N}} \quad (4.68)$$

ซึ่ง

$S_{p1,HCN}$ = แหล่งกำเนิดของ HCN (kg/m³-s)

R_{cf} = ขอบเขตอัตราปฏิกิริยาเฉลี่ยของเชื้อเพลิง (kg/m³-s)

$Y_{N,fuel}$ = สัดส่วนมวลของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง

ขีดจำกัดความเร็วของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ยของเชื้อเพลิง R_{cf} คำนวณได้จากแบบจำลองการเผาไหม้ของ Magnussen ดังนั้นตัวเลือกก๊าซ fuel NO_x จะคำนวณได้ก็ต่อเมื่อมีการเลือกใช้ generalized finite-rate model

การผลิต HCN ในเชื้อเพลิงเหลว

อัตราการเกิดของ HCN เท่ากับอัตราการปล่อยเชื้อเพลิงเข้าไปสู่สถานะก๊าซโดยผ่านการระเหย

$$S_{p1,HCN} = \frac{S_{fuel} Y_{N,fuel} M_{w,HCN}}{M_{w,NV}} \quad (4.69)$$

ซึ่ง

$S_{p1,HCN}$ = เป็นแหล่งกำเนิดของ HCN ($\text{kg/m}^3\text{-s}$)

S_{fuel} = อัตราการปล่อยเชื้อเพลิงจากละอองของเหลวไปยังก๊าซ (kg/s)

$Y_{N,fuel}$ = สัดส่วนเชิงมวลของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง

V = ปริมาตรเซลล์ (m^3)

การบริโภค HCN

อัตราความสิ้นเปลืองของ HCN จากปฏิกิริยา (1) และ (2) ในกลไกข้างต้นจะเหมือนกันทั้งเชื้อเพลิงก๊าซและเชื้อเพลิงเหลวและได้มาโดย De Soete [56] ดังนี้

$$\mathcal{R}_1 = A_1 X_{HCN} X_{O_2}^a e^{-E_1/RT} \quad (4.70)$$

$$\mathcal{R}_2 = A_2 X_{HCN} X_{NO} e^{-E_2/RT} \quad (4.71)$$

ซึ่ง

$\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของ HCN (s^{-1})

T = อุณหภูมิ (K)

X = สัดส่วนเชิงโมล

$A_1 = 1.0 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$

$A_2 = 3.0 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$

$E_1 = 280451.95 \text{ J/gmol}$

$E_2 = 251151 \text{ J/gmol}$

ค่ายกกำลังของความเข้มข้นออกซิเจน a คำนวณจากสมการ 4.65

เนื่องจากสัดส่วนโมลสัมพันธ์กับสัดส่วนมวลต่อมวลโมเลกุลของสปีชีส์ ($M_{w,i}$) และของผสม ($M_{w,m}$)

$$X_i = Y_i \frac{M_{w,m}}{M_{w,i}} = \frac{Y_i}{M_{w,i}} \left(\frac{\rho RT}{p} \right) \quad (4.72)$$

แหล่งกำเนิด HCN ในสมการการถ่ายเท

อัตราการบริโภค HCN เชิงมวลซึ่งปรากฏอยู่ในสมการ 4.70 คำนวณได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{HCN-1} = -R_1 \frac{M_{w,HCN} p}{RT} \quad (4.73)$$

$$S_{HCN-2} = -R_2 \frac{M_{w,HCN} p}{RT} \quad (4.74)$$

ซึ่ง

S_{HCN-1}, S_{HCN-2} = อัตราการบริโภค HCN ในปฏิกิริยา 1 และ 2 ตามลำดับ ($\text{kg/m}^3\text{-s}$)

p = ความดัน (Pa)

T = อุณหภูมิเฉลี่ย (K)

R = ค่าคงที่ก๊าซสากล

แหล่งกำเนิด NO_x ในสมการการถ่ายเท

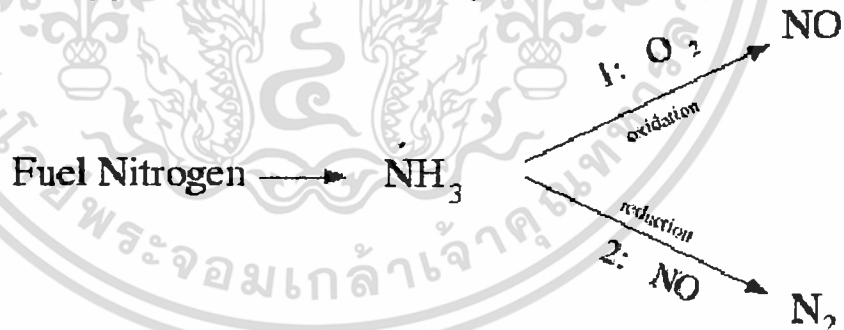
NO_x เกิดในปฏิกิริยาที่ 1 แต่ถูกทำลายในปฏิกิริยาที่ 2 แหล่งกำเนิดสำหรับสมการ 4.73 เหมือนกันทั้งเชื้อเพลิงแข็งและเหลว สามารถประเมินได้ดังนี้

$$S_{NO-1} = -S_{HCN-1} \frac{M_{w,NO}}{M_{w,HCN}} = R_1 \frac{M_{w,NOP}}{RT} \quad (4.75)$$

$$S_{NO-2} = -S_{HCN-2} \frac{M_{w,NO}}{M_{w,HCN}} = -R_2 \frac{M_{w,NOP}}{RT} \quad (4.76)$$

Fuel NO_x จากแอมโมเนีย (NH₃) ระหว่างปฏิกิริยา

เมื่อ NH₃ ถูกใช้เป็นสปีชีส์ที่เกิดระหว่างปฏิกิริยา



รูปที่ 4.18 เส้นทางปฏิกิริยาการเกิด Fuel NO_x จากแอมโมเนีย (NH₃) ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา

source term ในสมการการถ่ายเทสามารถเขียนได้ดังนี้

$$S_{NH_3} = S_{p1,NH_3} + S_{NH_3-1} + S_{NH_3-2} \quad (4.77)$$

$$S_{NO} = S_{NO-1} + S_{NO-2} \quad (4.78)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิต NH_3 ในเชื้อเพลิงก๊าซ

อัตราการเกิด NH_3 เท่ากับอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

$$S_{p1,NH_3} = \frac{R_{cf} Y_{N,fuel} M_{w,NH_3}}{M_{w,N}} \quad (4.79)$$

ซึ่ง

S_{p1,NH_3} = แหล่งกำเนิดของ NH_3 ($kg/m^3 \cdot s$)

R_{cf} = ชีดจำกัดของของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ยของเชื้อเพลิง ($kg/m^3 \cdot s$)

$Y_{N,fuel}$ = สัดส่วนเชิงมวลของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง

ชีดจำกัดของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ยของเชื้อเพลิง คำนวณได้จากแบบจำลองการเผาไหม้ของ Magnussen ดังนั้นตัวเลือกก๊าซ fuel NOx จะมีให้ใช้ก็ต่อเมื่อใช้ generalized finite-rate model

การผลิต NH_3 ในเชื้อเพลิงเหลว

อัตราการผลิต NH_3 เท่ากับอัตราการปล่อยเชื้อเพลิงเข้าไปสู่สถานะก๊าซโดยผ่านการระเหย

$$S_{p1,NH_3} = \frac{R_{fuel} Y_{N,fuel} M_{w,NH_3}}{M_{w,NV}} \quad (4.80)$$

S_{p1,NH_3} = เป็นแหล่งกำเนิดของ NH_3 ($kg/m^3 \cdot s$)

R_{fuel} = อัตราการปล่อยเชื้อเพลิงจากตะอองของเหลวไปยังก๊าซ (kg/s)

$Y_{N,fuel}$ = สัดส่วนมวลของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง

V = ปริมาตรเซลล์ (m^3)

การบริโภค NH_3

อัตราความสิ้นเปลืองของ NH_3 จากปฏิกิริยา (1) และ (2) ในกลไกข้างต้นจะเหมือนกันทั้งเชื้อเพลิงก๊าซและเชื้อเพลิงเหลว และได้มาโดย De Soete [56] ดังนี้

$$\mathcal{R}_1 = A_1 X_{NH_3} X_{O_2}^a e^{-E_1/RT} \quad (4.81)$$

$$\mathcal{R}_2 = A_2 X_{NH_3} X_{NO} e^{-E_2/RT} \quad (4.82)$$

ซึ่ง

$\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของ NH_3 (s^{-1})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T	= อุณหภูมิ (K)
X	= สัดส่วน โมล
A_1	= $4.0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$
A_2	= $1.8 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$
E_1	= 133,947.2 J/gmol
E_2	= 113,017.95 J/gmol

พารามิเตอร์บ่งชี้อิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากออกซิเจนซึ่งเป็นค่ายกกำลังของความเข้มข้น α คำนวณจากสมการ 4.65

เนื่องจากสัดส่วน โมลสัมพันธ์กับสัดส่วนมวลต่อมวล โมเลกุลของสปีชีส์ ($M_{w,i}$) และของผสม ($M_{w,m}$) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ 4.72

แหล่งกำเนิด NH_3 ในสมการการถ่ายเท

อัตราการบริโภคของ NH_3 ซึ่งปรากฏอยู่ในสมการ 4.77 คำนวณได้ดังนี้

$$S_{\text{NH}_3-1} = -\mathcal{R}_1 \frac{M_{w,\text{NH}_3} p}{RT} \quad (4.83)$$

$$S_{\text{NH}_3-2} = -\mathcal{R}_2 \frac{M_{w,\text{NH}_3} p}{RT} \quad (4.84)$$

ซึ่ง

$S_{\text{NH}_3-1}, S_{\text{NH}_3-2}$ = อัตราการบริโภค HCN ในปฏิกิริยา 1 และ 2 ตามลำดับ ($\text{kg/m}^3\text{-s}$)

p = ความดัน (Pa)

T = อุณหภูมิเฉลี่ย (K)

R = ค่าคงที่ก๊าซสากล

แหล่งกำเนิด NO_x ในสมการการเผาไหม้

NO_x เกิดในปฏิกิริยาที่ 1 แต่ถูกทำลายในปฏิกิริยาที่ 2 แหล่งกำเนิดสำหรับสมการ 4.78 เหมือนกันทั้งเชื้อเพลิงแข็งและเหลว ประเมินได้ดังนี้

$$S_{\text{NO}-1} = -S_{\text{NH}_3-1} \frac{M_{w,\text{NO}}}{M_{w,\text{NH}_3}} = \mathcal{R}_1 \frac{M_{w,\text{NO}} p}{RT} \quad (4.85)$$

$$S_{\text{NO}-2} = -S_{\text{NH}_3-2} \frac{M_{w,\text{NO}}}{M_{w,\text{NH}_3}} = -\mathcal{R}_2 \frac{M_{w,\text{NO}} p}{RT} \quad (4.86)$$

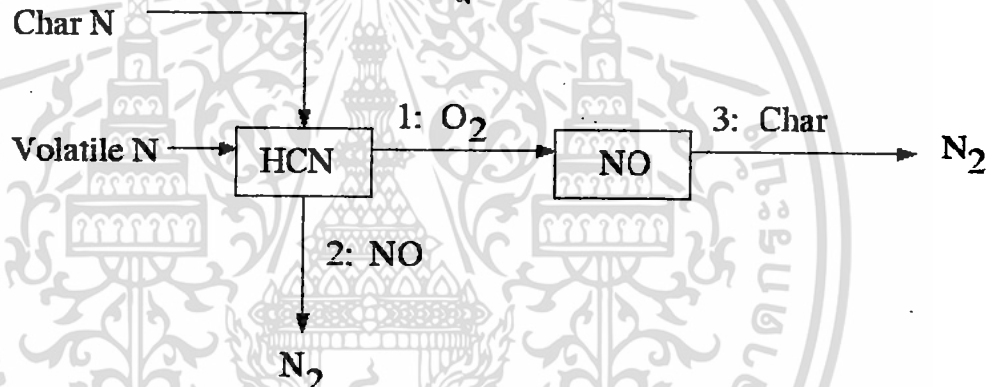
4.2.1.5.4 Fuel NO_x จากถ่านหิน

ไนโตรเจนในชาร์และสารระเหย

สำหรับถ่านหินสมมุติว่าเชื้อเพลิงไนโตรเจนได้กระจายตัวอยู่ในสารระเหยและในชาร์ เนื่องจากไม่มีเหตุผลสนับสนุนที่จะสมมุติว่าไนโตรเจนกระจายระหว่างสารระเหยและชาร์เท่ากัน สัดส่วนของไนโตรเจนในสารระเหยและถ่านชาร์ควรจะกำหนดแยกกัน เมื่อ HCN เป็นสปีชีส์ที่เป็นสารตั้งต้น กลไกการเกิดและการทำลาย NO_x จะถูกรวมเข้าไว้ด้วยกัน ขณะที่เมื่อ NH₃ เป็นสารตั้งต้น กลไกการเกิดและการทำลาย NO_x ก็จะเหมือนกันกับกรณีของ HCN

Coal Fuel NO_x Scheme A

กลไกแรกของ HCN สมมุติว่าไนโตรเจนในถ่านทั้งหมดเปลี่ยนไปเป็น HCN ซึ่งบางส่วนเปลี่ยนไปเป็น NO [61] เส้นทางการปฏิกิริยาแสดงให้เห็นดังนี้



รูปที่ 4.19 Coal Fuel NO_x Scheme A

ในกลไกแรกนี้ ฟันระไนโตรเจนในถ่านชาร์ทั้งหมดเปลี่ยนไปเป็น HCN ดังนี้

$$S_{char,HCN} = \frac{S_c Y_{N,char} M_{w,HCN}}{M_{w,NV}} \tag{4.87}$$

$$S_{char,NO} = 0 \tag{4.88}$$

ซึ่ง

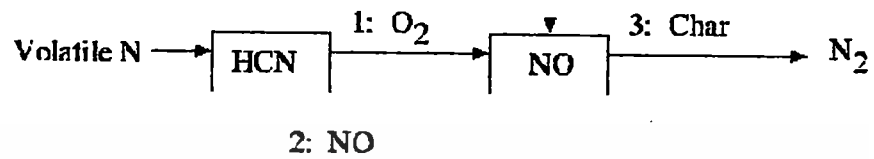
S_c = อัตราการเผาไหม้ถ่าน (kg/s)

$Y_{N,char}$ = สัดส่วนโดยมวลของไนโตรเจนในถ่านชาร์

V = ปริมาตรเซลล์ (m³)

Coal Fuel NOx Scheme B

กลไกที่สองของ HCN จะสมมุติว่าไนโตรเจนในถ่านทั้งหมดเปลี่ยนไปเป็น NO โดยตรง [61] เส้นทางการปฏิกิริยาแสดงให้เห็นดังนี้



รูปที่ 4.20 Coal Fuel NOx Scheme B

Lockwood [62] เสนอว่าไนโตรเจนในถ่านจะถูกปล่อยออกมาในสถานะก๊าซในรูปของ NO โดยตรง ซึ่งเป็นผลของถ่านชาร์ที่ถูกออกซิไดซ์ ถ้าเป็นไปตามแนวคิดนี้ จะได้ว่า

$$S_{char,HCN} = 0 \tag{4.89}$$

$$S_{char,NO} = \frac{S_c Y_{N,char} M_{w,NO}}{M_{w,NV}} \tag{4.90}$$

การเลือก HCN Scheme

กลไกที่สองของ HCN ข้างต้นมีแนวโน้มที่ปล่อย NOx มากกว่าแบบแรก โดยทั่วไปแล้วเป็นไปได้ยากที่จะกล่าวว่าจะเกิด NOx ภายใต้กลไกแบบหนึ่งมากกว่าอีกแบบหนึ่ง source term สำหรับสมการการถ่ายเทเป็นดังนี้

$$S_{HCN} = S_{pvc,HCN} + S_{HCN-1} + S_{HCN-2} \tag{4.91}$$

$$S_{NO} = S_{char,NO} + S_{NO-1} + S_{NO-2} + S_{NO-3} \tag{4.92}$$

พจน์ S_{HCN-1} , S_{HCN-2} , S_{NO-1} และ S_{NO-2} ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ดังนั้นเฉพาะแหล่งกำเนิดปฏิกิริยา heterogeneous S_{NO-3} source term NOx จากถ่านชาร์ $S_{char,NO}$ และพจน์การผลิต HCN ($S_{pvc,HCN}$) จะต้องถูกนำไปพิจารณา

การลดลงของ NOx บนพื้นผิวชาร์

ปฏิกิริยา heterogeneous ของการลดลง NO บนผิวชาร์ได้จำลองสอดคล้องกับ [63]

$$\mathcal{R}_3 = A_3 e^{-E_3/RT} \bar{p}_{NO} \quad (4.93)$$

ซึ่ง

$$\mathcal{R}_3 = \text{อัตราการลดลงของ NO (gmol/m}^2\text{BET - s)}$$

$$\bar{p}_{NO} = \text{ความดันย่อยเฉลี่ยของ NO (atm)}$$

$$E_3 = 142737.485 \text{ J/gmol}$$

$$A_3 = 230 \text{ gmol/m}^2\text{BET - s - atm}$$

$$T = \text{อุณหภูมิเฉลี่ย (K)}$$

ความดันย่อย \bar{p}_{NO} คำนวณ โดยใช้ Dalton's law

$$\bar{p}_{NO} = \bar{p}X_{NO}$$

อัตราการบริโภคของ NO เนื่องมาจากปฏิกิริยา 3 เป็นได้ดังนี้

$$S_{NO-3} = C_s A_{BET} M_{w,NO} \mathcal{R}_3$$

ซึ่ง

$$A_{BET} = \text{พื้นที่ผิว BET (m}^2\text{/kg)}$$

$$C_s = \text{ความเข้มข้นของอนุภาค (kg/m}^3\text{)}$$

$$S_{NO-3} = \text{อัตราการบริโภค NO (kg/m}^3\text{-s)}$$

พื้นที่ผิว BET

ปฏิกิริยา heterogeneous จะเกี่ยวกับชาร์เป็นหลักกระบวนการดูดซับโดยอัตรานั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อพื้นที่ผิวในรู ซึ่งพื้นที่ผิวในรูนี้รู้จักกันดีในชื่อพื้นที่ผิว BET มาจากชื่อนักวิจัยผู้ซึ่งคิดค้นทฤษฎีการดูดซับ (Brunauer, Emmett and Teller [64]) สำหรับตัวดูดซับตามท้องตลาดทั่วไป พื้นที่ผิวในรู (BET) มีช่วงระหว่าง 100,000 ถึง 2,000,000 m²/kg ขึ้นอยู่กับโครงสร้างพื้นผิวที่เล็กมากเหล่านั้น แต่สำหรับถ่านหิน พื้นที่ BET ทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 25,000 m²/kg ซึ่งใช้เป็นค่าทั่วไป แหล่งกำเนิดทั้งหมดของ HCN ($S_{pvc,HCN}$) เป็นการรวมตัวของส่วนที่มาจากสารระเหย ($S_{vol,HCN}$) และชาร์ ($S_{char,HCN}$)

$$S_{pvc,HCN} = S_{vol,HCN} + S_{char,HCN}$$

HCN จากสารระเหย

แหล่งกำเนิดของ HCN จากสารระเหยสัมพันธ์กับอัตราการปล่อยสารระเหย

$$S_{vol,HCN} = \frac{S_{vol} Y_{N,vol} M_{w,HCN}}{M_{w,N} V}$$

ซึ่ง

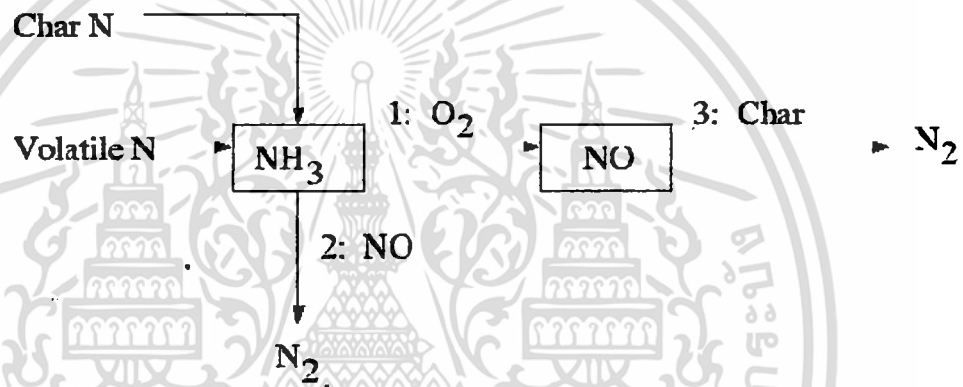
S_{vol} = แหล่งกำเนิดของสารระเหยที่กำเนิดขึ้นจากอนุภาคถ่านหินในสถานะก๊าซ (kg/s)

$Y_{N,vol}$ = สัดส่วนมวลของไนโตรเจนในสารระเหย

V = ปริมาตรเซลล์ (m^3)

Coal Fuel NO_x Scheme C

กลไกเริ่มต้นของ NH_3 จะสมมุติว่าซาร์ N ทั้งหมดเปลี่ยนไปเป็น NH_3 ซึ่งบางส่วนได้เปลี่ยนไปเป็น NO [61] โดยมีเส้นทางปฏิกิริยาแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.21 Coal Fuel NO_x Scheme C

ในแผนผังนี้ พันธะซาร์-ไนโตรเจนทั้งหมดจะเปลี่ยนไปเป็น NH_3 ดังนั้น

$$S_{char,NH_3} = \frac{S_c Y_{N,char} M_{w,NH_3}}{M_{w,N} V} \quad (4.94)$$

$$S_{char,NO} = 0 \quad (4.95)$$

ซึ่ง

S_c = อัตราการเผาไหม้ถ่าน (kg/s)

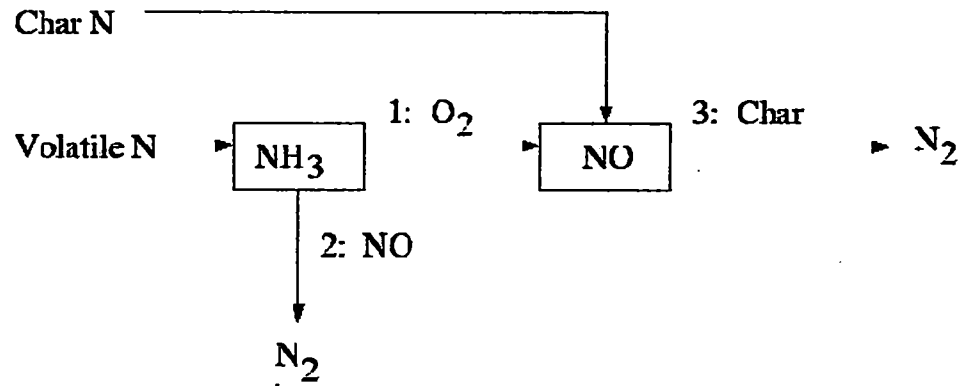
$Y_{N,char}$ = สัดส่วนมวลไนโตรเจนในถ่าน

V = ปริมาตรเซลล์ (m^3)

Coal Fuel NO_x Scheme D

กลไกที่สองของ NH_3 สมมุติว่าซาร์ N ทั้งหมดเปลี่ยนไปเป็น NO โดยตรง [62] เส้นทางปฏิกิริยาแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 Coal Fuel NOx Scheme D

จาก Lockwood [62] ชาร์ไนโตรเจนได้ถูกปล่อยออกมาเป็น NO ในสถานะก๊าซโดยตรง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นผลิตภัณฑ์ปล่อยออกจากการออกซิไดซ์อะตอมของไนโตรเจนชาร์ ถ้ายึดตามวิธีนี้จะได้

$$S_{char,NH_3} = 0 \quad (4.96)$$

$$S_{char,NO} = \frac{S_c Y_{N,char} M_{w,NO}}{M_{w,NV}} \quad (4.97)$$

การเลือก NH₃ Scheme

กลไกที่สองนี้มีแนวโน้มว่า NH₃ จะนำไปสู่การผลิต NO_x ที่มากกว่ากลไกแรก โดยทั่วไปแล้วยากที่จะกล่าวได้ว่ากลไกใดมีอิทธิพลมากกว่าอีกกลไกหนึ่ง source term สำหรับสมการการถ่ายเท คือ

$$S_{NH_3} = S_{pvc,NH_3} + S_{NH_3-1} + S_{NH_3-2} \quad (4.98)$$

$$S_{NO} = S_{char,NO} + S_{NO-1} + S_{NO-2} + S_{NO-3} \quad (4.99)$$

แต่ละเทอมของแหล่งกำเนิด S_{NH_3-1} , S_{NH_3-2} , S_{NO-1} , S_{NO-2} , และ $S_{char,NO}$ ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้นี้ ดังนั้นเฉพาะ source term NH₃, S_{pvc,NH_3} ต้องถูกนำมาพิจารณา แหล่งกำเนิดทั้งหมดของ NH₃ ได้รวมสารระเหย (S_{vol,NH_3}) และ ชาร์ (S_{char,NH_3})

$$S_{pvc,NH_3} = S_{vol,NH_3} + S_{char,NH_3} \quad (4.100)$$

NH₃ จากสารระเหย

แหล่งกำเนิดของ NH₃ จากสารระเหยจะสัมพันธ์กับอัตราการปล่อยของสารระเหย

$$S_{vol,NH_3} = \frac{S_{vol} Y_{N,vol} M_{w,NH_3}}{M_{w,NV}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง

S_{vol} = แหล่งกำเนิดของสารระเหยที่กำเนิดขึ้นจากอนุภาคถ่านหินในสถานะก๊าซ (kg/s)

$Y_{N,vol}$ = สัดส่วนมวลของไนโตรเจนในสารระเหย

V = ปริมาตรเซลล์ (m^3)

การคำนวณของแหล่งกำเนิดสัมพันธ์กับพันธะไนโตรเจน-คาร์บอนโดยขึ้นอยู่กับกลไก fuel NOx ที่เลือกใช้

4.2.1.5.5 เชื้อเพลิงไนโตรเจนสำหรับ HCN และ NH_3 ระหว่างปฏิกิริยา

ในกรณีที่มีเชื้อเพลิงเป็นของแข็ง ทั้ง HCN และ NH_3 สามารถถูกสร้างขึ้นและเป็นสปีชีส์ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา ภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูงเพียงพอ [65] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในถ่านหินคุณภาพต่ำ (ลิกไนต์) ได้แสดงให้เห็นว่ามีการผลิต NH_3 มากกว่า HCN ถึง 10 เท่า แต่ในขณะที่ถ่านหินที่คุณภาพสูง (บิทูมินัส) จะผลิตเฉพาะ HCN [66] ซึ่งการศึกษาโดย Winter et al. [67] ได้แสดงให้เห็นว่า สำหรับถ่านหินบิทูมินัส เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่าง HCN/ NH_3 ในอัตราส่วน 9:1 จะให้ค่าการทำนาย NOx ที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สปีชีส์ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว Liu และ Gibbs [68] ได้ทดสอบเกี่ยวกับต้นไม้-ชีวมวล (เศษไม้) ซึ่งในทางกลับกัน Liu และ Gibbs ได้แนะนำอัตราส่วนของ HCN/ NH_3 ไว้ที่อัตราส่วน 1:9 อันเนื่องมาจากอายุของเชื้อเพลิงที่น้อยกว่า

โดยผลจากการทดลองทั้งหมดได้ชี้ให้เห็นว่า ความสามารถในการระบุดังกล่าวของไนโตรเจนที่ปลดปล่อยออกมาในรูปของ HCN และในรูปของ NH_3 นั้นเป็นสิ่งสำคัญ การแบ่งสัดส่วนของเชื้อเพลิงไนโตรเจนสามารถทำได้เมื่อ HCN หรือ NH_3 เป็นสปีชีส์ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาการผลิต NOx ซึ่งแนวคิดนี้จะใช้ได้กับเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหินและชีวมวลเป็นส่วนใหญ่ โดยเส้นทางปฏิกิริยาและแหล่งกำเนิดสำหรับ HCN หรือ NH_3 นั้นได้อธิบายไว้ในส่วนที่ผ่านมาแล้ว

4.2.1.6 การเกิด NOx จาก N_2O ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา

Melte และ Pratt [69] เสนอว่ากลไกระหว่างปฏิกิริยาไกลแรกของการก่อเกิดของ NOx จากโมเลกุลของไนโตรเจน (N_2) เกิดผ่านไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ในกรณีนี้ไนโตรเจนเข้าไปในระบบการเผาไหม้โดยเป็นองค์ประกอบหนึ่งของการเผาไหม้และเป็นส่วนหนึ่งของอากาศที่เข้ามาเนื่องจากการเผาไหม้ให้เบาบางลง ภายใต้สภาวะที่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งเป็นสภาวะที่ความดันสูงและมีออกซิเจนที่หนา ภาวะที่กล่าวนี้เป็นส่วนที่ช่วยสนับสนุนให้

เกิดการก่อตัวของ NOx ถึง 90% ระหว่างการเผาไหม้ ซึ่งทำให้เราต้องให้ความสำคัญกับของ อุปกรณ์อย่างเช่น ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซและเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน เพราะว่าในระยะหลัง อุปกรณ์เหล่านี้มีทำงานที่มีอุณหภูมิต่ำลง เพื่อหลีกเลี่ยงการก่อเกิด Thermal NOx ดังนั้นกลไกการเกิด N₂O จึงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญเพิ่มขึ้น จากการสำรวจพบว่าประมาณ 30% ของ NOx เกิดขึ้นในระบบลักษณะนี้ มีสาเหตุมาจาก N₂O

กลไก N₂O ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาอาจจะมีผลต่อระบบการเผาไหม้ที่ดำเนินการในรูปแบบปราศจากเปลวไฟ (เช่น การเผาไหม้แบบเจือจาง, การเผาไหม้แบบปราศจากเปลวไฟ, การออกซิเดชันแบบปราศจากเปลวไฟและระบบ FLOX) การเผาไหม้ในรูปแบบปราศจากเปลวไฟนี้ เชื้อเพลิงและออกซิเจนถูกทำให้มีความเจือจางสูงในก๊าซเชื้อเพลิง จึงทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้และความร้อนถูกปลดปล่อยในบริเวณที่มีการแพร่กระจายสูง ที่เรียกว่า diffuse zone วิธีนี้จะช่วยหลีกเลี่ยงการเกิดอุณหภูมิสูงได้ ซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิด thermal NOx นักวิจัยพบว่า N₂O ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาอาจจะทำให้เกิดการก่อตัวของ NOx ได้ถึง 90% ในสถานะที่ปราศจากเปลวไฟ และที่เหลือคือ prompt NOx โดยความสัมพันธ์ของการก่อเกิด NOx จาก N₂O ได้ถูกพบโดยทางอ้อม และได้มีการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี โดยนักวิจัยหลายท่าน [70, 71, 72, 73, 74]

กลไกการเกิด NOx จาก N₂O ระหว่างปฏิกิริยา

รูปแบบของกลไกที่เรียบง่ายที่สุด [69] นำไปใช้ในการคำนวณสองปฏิกิริยา พื้นฐานแบบย้อนกลับได้



ซึ่ง M เป็น third body ทั่วไป เพราะว่าปฏิกิริยาแรกได้เกี่ยวข้องกับ third body โดยกลไกนี้เกิดขึ้นที่ความดันสูงๆ ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองนี้ เกี่ยวข้องกับอนุมูลออกซิเจน O ทำให้กลไกนี้เกิดขึ้นที่สถานะออกซิเจนหนา แม้ว่าจะใช้ไม่ได้ในบางกรณี ก็มักจะสมมุติว่าอนุมูลอะตอมออกซิเจนทั้งหมดนั้น เกิดจากการแยกตัวของโมเลกุลออกซิเจนเพียงแหล่งเดียว



ซึ่งสองคดล้องกับ kinetic rate laws โดยอัตราการเกิด NOx ผ่านกลไก N₂O ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาเป็นดังนี้

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2(k_{f,2}[N_2O][O] - k_{r,2}[NO]^2) \quad \text{gmol/m}^3 - \text{s} \quad (4.104)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะแก้สมการ 4.104 ต้องคำนวณ $[N_2O]$ และ $[O]$ ก่อน โดยปกติแล้วจะสมมติว่า N_2O เป็นสภาวะ quasi-steady ($d[N_2O]/dt = 0$) ซึ่งมีความหมายว่า

$$[N_2O] = \frac{k_{f,1}[N_2][O][M] + k_{r,2}[NO]^2}{k_{r,1}[M] + k_{f,2}[O]} \quad (4.105)$$

ระบบของสมการ 4.104-4.105 สามารถแก้หาค่าสำหรับอัตราการเกิด NO_x ได้ เมื่อทราบค่าความเข้มข้นของ N_2 , O_2 , และ M ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาสำหรับสมการ 4.101 และ 4.102 และค่าคงที่สมดุลของสมการ 4.103 ทั้งนี้ การปรากฏของ NO ในสมการ 4.102 บ่งชี้ถึงการเชื่อมโยงของกลไก N_2O กับกลไก thermal NO_x และ (กลไก NO_x อื่นๆ)

$$\begin{aligned} k_{f,1} &= 4.44 \times 10^{32} T^{-8.358} e^{-28234/T} & k_{r,1} &= 4.00 \times 10^8 e^{-28234/T} \\ k_{f,2} &= 2.90 \times 10^7 e^{-11651/T} & k_{r,2} &= 1.45 \times 10^{-29} T^{9.259} e^{-11651/T} \end{aligned}$$

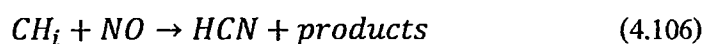
ตัวแปรที่แสดงไว้ด้านบน $k_{f,1}$ และ $k_{f,2}$ เป็นค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าสำหรับสมการ 4.104 และ 4.105 $k_{r,1}$ และ $k_{r,2}$ เป็นค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับ หน่วยของ $k_{f,2}$, $k_{r,1}$ และ $k_{r,2}$ เป็น $m^3/gmol\cdot s$ ขณะที่หน่วยของ $k_{f,1}$ เป็น $m^6/gmol^2\cdot s$

4.2.1.7 การลด NO_x โดยการเผาไหม้ซ้ำ

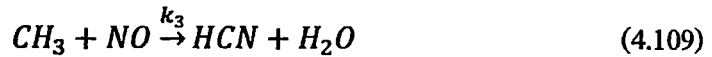
การออกแบบระบบเผาไหม้ที่ซับซ้อนสำหรับบอยเลอร์ อยู่บนพื้นฐานเทคโนโลยี air-and fuel-staging โดยรวมตัวแปรหลายอย่างและความสัมพันธ์ระหว่างกัน และตัวแปรเหล่านี้ได้รวมอัตราส่วนผสมเฉพาะที่ อุณหภูมิและสนามความเข้มข้นของสารเคมี การกระจายของ residence time สนามความเร็วและรูปแบบการผสม การประยุกต์เทคนิคดังกล่าว นั้นจะประสบความสำเร็จมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นกับการควบคุมพารามิเตอร์เหล่านี้ให้เหมาะสมเพื่อที่จะไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของ boiler ในช่วงกลางยุค 90 แบบจำลองสามารถจำลองจลนเคมีของการทำลาย NO_x ในบริเวณที่เผาไหม้ซ้ำของระบบเผาไหม้เป็นขั้น ดังที่ได้อธิบายข้างล่างนี้

4.2.1.7.1 แนวทางการทำปฏิกิริยาอย่างฉับพลัน (Instantaneous Approach)

กลไกการเผาไหม้ NO_x ขั้นต้นที่เป็นเส้นทางที่ซึ่ง NO ทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอน จึงทำให้มีปริมาณลดลง



ปฏิกิริยาการเผาไหม้ซ้ำ 3 ปฏิกิริยา สำหรับ $1600 \leq T \leq 2100 \text{ K}$



ถ้าอุณหภูมิอยู่ภายนอกช่วง จะไม่มีการคำนวณการเผาไหม้ NO ซ้ำ

ค่าคงที่สำหรับปฏิกิริยาข้างที่เหล่านี้ได้มาจาก Bowman [75] และมีหน่วยเป็น $\text{m}^3 / \text{gmol-s}$

$$k_1 = 1 \times 10^8; k_2 = 1.4 \times 10^6 e^{-550/T}; k_3 = 2 \times 10^5$$

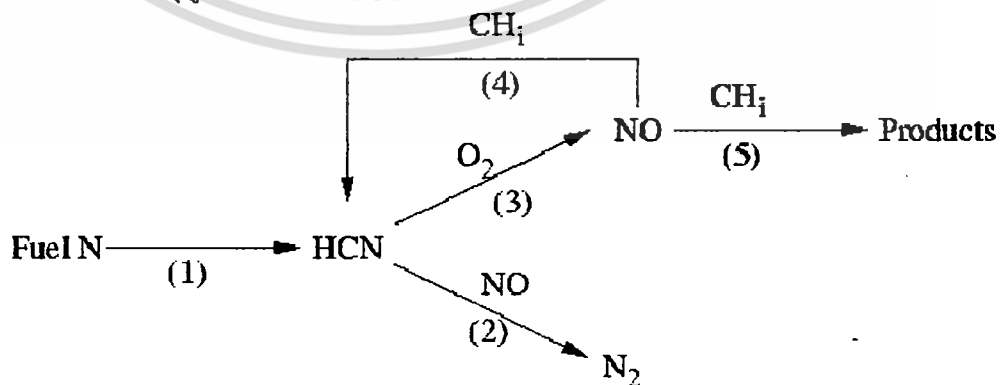
อัตราการเปลี่ยนแปลงของ NO เนื่องมาจากการเผาไหม้ซ้ำเป็นดังนี้

$$\frac{d[NO]}{dt} = -k_1[CH][NO] - k_2[CH_2][NO] - k_3[CH_3][NO] \quad (4.110)$$

และsource termสำหรับกลไกการเผาไหม้ซ้ำในสมการการถ่ายเท NO สามารถคำนวณได้ดังนี้ เพื่อที่จะคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลง NO เนื่องจากการเผาไหม้ซ้ำ จะได้ความเข้มข้นของ CH, CH₂ และ CH₃ ซึ่งได้มาจากผลการคำนวณการเผาไหม้ ดังนั้น เมื่อจะใช้วิธีนี้ ในการ ลด NOx ต้องแน่ใจว่าได้รวมสปีชีส์ CH, CH₂ และ CH₃ เข้าไปในการกำหนดขอบเขตของปัญหาด้วย

4.2.1.7.2 แนวทางสมดุลบางส่วน

แนวทางสมดุลบางส่วนอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองที่เสนอ โดย Kandamby et al [76] และแบบจำลองได้รวมเส้นทางการลด NOx เพิ่มเติมจากแบบจำลองโดยรวมของ De Soete [56] ซึ่งอธิบายถึงกลไกการเกิด/ทำลายของ NOx ในเปลวไฟของถ่านหินผง การคำนวณการลดNOx ที่ได้เพิ่มเส้นทางการทำลาย NOx ในบริเวณเชื้อเพลิงหนาที่มีการเผาไหม้ซ้ำโดยอนุมูล CH



รูปที่ 4.23 กลไก NOx ของ De Soete's กับเส้นทางการลด NOx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองนี้สามารถใช้ร่วมกับแบบจำลองการเผาไหม้แบบ eddy-dissipation ทำให้ไม่ต้องกำหนดค่าความเข้มข้นของอนุมูล CH การคำนวณจะอิงสถานะสมดุลบางส่วนของอนุมูลอิสระ CH ตัวเชื้อเพลิงที่นำมาเผาไหม้ซ้ำนี้อาจถูกกำหนดให้เสมือนเป็น CH_4 , CH_3 , CH_2 , หรือ CH สำหรับประเด็นที่ว่า เชื้อเพลิงเหล่านี้จะกำหนดให้เหมาะสมได้อย่างไรนั้น ยังเป็นที่ถกเถียงกันอยู่ อย่างไรก็ตามแนวทางคร่าวๆ ที่พอจะใช้ได้คือพิจารณา อัตราส่วนของ C/H ของเชื้อเพลิงนั่นเอง ค่าคงที่ 4.0×10^4 เป็นค่าที่แนะนำให้ใช้เป็นปริมาณสมดุลบางส่วนของอนุมูล CH เพื่อที่จะลดความรุนแรงของอัตราการทำปฏิกิริยาของ HCN กับ NO ในแบบจำลองการเผาไหม้ซ้ำ ค่านี้ได้มาโดยนักวิจัยที่พัฒนาแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบค่า NO_x ที่คำนวณได้กับผลการทดลอง

กลไกการลด NO_x

ในบริเวณเชื้อเพลิงหนาที่มีการเผาไหม้ซ้ำ การออกซิเดชันของ HCN ได้หยุดลงและ NO ที่ก่อเกิดในบริเวณการเผาไหม้หลักจะถูกบริโภคโดยปฏิกิริยารีดักชันกับ HCN ไปสู่ N_2 อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของ NO อาจลดลงเนื่องจากทำปฏิกิริยากับอนุมูลของ CH ซึ่งมีอยู่ในบริเวณที่มีการเผาไหม้ซ้ำ โดยปฏิกิริยาต่อไปนี้จะพิจารณาเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญทั้งหมดของ NO ที่ลดลงโดยอนุมูล CH



ปฏิกิริยาเหล่านี้จะอธิบายทั้งหมดโดยเพิ่มในส่วนของเส้นทาง (4) และ (5) ในรูปที่ 6.1.1 นำไปสู่การก่อกำเนิด HCN และอนุมูลใน โครเจนอิสระอีกเล็กน้อย ถ้าสมมุติว่ามีเทนเป็นก๊าซที่มีการเผาไหม้ซ้ำ อัตราการลดลง NO ทั้งหมดแทนได้ดังนี้

$$R_4 = (k_a x_1 + k_b x_2^2)[CH_4][NO] \quad (4.114)$$

$$R_5 = (k_c x_1^3 x_2)[CH_4][NO] \quad (4.115)$$

ซึ่ง

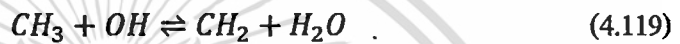
$$x_1 = \frac{[H]}{[H_2]}; \quad x_2 = \frac{[OH]}{[H_2O]}$$

ดังนั้น source term ที่เพิ่มเข้าไปของสมการการถ่ายเท HCN และ NO เนื่องจากปฏิกิริยาเผาไหม้ซ้ำเป็นดังนี้

$$\frac{d[HCN]}{dt} = 4 \times 10^{-4} \mathcal{R}_4 \quad (4.116)$$

$$\frac{d[NO]}{dt} = -4 \times 10^{-4} (\mathcal{R}_4 + \mathcal{R}_5) \quad (4.117)$$

ต้องใช้สมมุติฐานบางประการ เพื่อประเมินอัตราคงที่ k_a k_b และ k_c และองค์ประกอบ X_1 และ X_2 สำหรับเปลวไฟที่ไฮโดรคาร์บอนแบบผสมกันขณะเผาไหม้ (Diffusion flame) อัตราการทำให้ปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถกำหนดได้อย่างเหมาะสมเพื่อให้ปฏิกิริยาอยู่ภายใต้สภาวะสมดุลบางส่วน



ดังนั้น อัตราคงที่คำนวณได้ดังนี้

$$k_a = k_1 \frac{k_{f,4} k_{f,5}}{k_{r,4} k_{r,5}}; \quad k_b = k_2 \frac{k_{f,4} k_{f,5} k_{f,6}}{k_{r,4} k_{r,5} k_{r,6}}; \quad k_c = k_3 \frac{k_{f,4} k_{f,5} k_{f,6} k_{f,7}}{k_{r,4} k_{r,5} k_{r,6} k_{r,7}}$$

ซึ่ง k_1 , k_2 และ k_3 เป็นค่าคงที่ของอัตราการทำให้ปฏิกิริยาสำหรับสมการ 4.112- 4.114 โดยคงที่ของอัตราการทำให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับสำหรับสมการ 4.119-4.122 คือ $k_{f,4} - k_{f,7}$ และ $k_{r,4} - k_{r,7}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังสมมุติว่า $X_1 = 1$ เพราะว่าการเข้มข้นของอนุมูลอิสระ H หลังเปลวไฟแบบผสมกันระหว่างการเผาไหม้ (Diffusion flame) จะมีปริมาณเท่ากับ โมเลกุลของ ไฮโดรเจน $[H_2]$ นอกจากนี้ ความเข้มข้นของอนุมูล OH สามารถประมาณได้โดยการพิจารณาจากปฏิกิริยา



ในสภาวะสมดุลบางส่วน นำไปสู่ ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$X_2 = \frac{k_{r,8}}{k_{f,8}}$$

ค่าคงที่ของอัตราการทำปฏิกิริยา k_a , k_b และ k_c สำหรับประเภทเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันได้แสดงไว้ในรูปแบบ Arrhenius ในตาราง 4.1 [77] อัตราคงที่ทั้งหมดมีหน่วยเป็น $m^3/gmol\cdot s$ และค่าทั้งหมดของ E มีหน่วยเป็น $J/gmol$

ตารางที่ 4.1 อัตราคงที่สำหรับเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำที่แตกต่างกัน

Equivalent	k_a			k_b			k_c		
Fuel Type	A	b	E	A	b	E	A	b	E
CH ₄	5.30×10^9	-1.54	27977	3.31×10^{13}	-3.33	15090	3.06×10^{11}	-2.64	77077
CH ₃	0.37×10^9	-1.54	27977	0.23×10^{13}	-3.33	15090	0.21×10^{11}	-2.64	77077
CH ₂	0.23×10^7	-1.54	27977	0.14×10^{11}	-3.33	15090	0.13×10^9	-2.64	77077
CH	0.0	0.0	0.0	0.63×10^8	-3.33	15090	0.58×10^6	-2.64	77077

สำหรับสมการ 4.133

$$k_{f,8} = 1.02 \times 10^5 T^{1.60} e^{-13802/RT}; \quad k_{r,8} = 4.52 \times 10^5 T^{1.60} e^{-80815/RT}$$

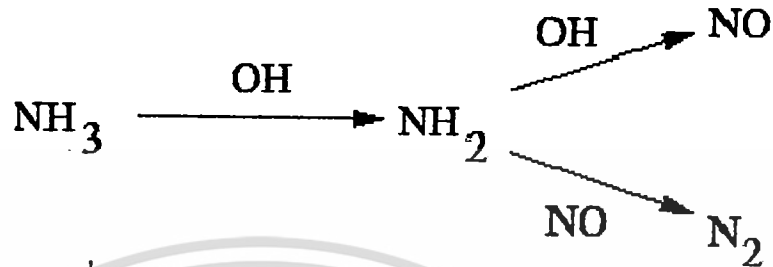
4.2.1.8 การลด NOx โดย SNCR

วิธี Selective Noncatalytic Reduction of NOx (SNCR) ได้อธิบายไว้ครั้งแรกโดย Lyon [78] ซึ่งเป็นวิธีที่ลดการปลดปล่อย NOx จากการเผาไหม้โดยการฉีดตัวทำปฏิกิริยาอย่างเช่น แอมโมเนีย (NH₃) หรือ ยูเรีย (CO(NH₂)₂) เข้าไปในห้องเผาไหม้ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ NO ในก๊าซไอเสียเพื่อจะก่อให้เกิด N₂ อย่างไรก็ตาม ตัวทำปฏิกิริยาสามารถถูกออกซิไดซ์ได้อย่างดีและทำให้เกิด NOx ได้ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสามารถในการลด NOx จะลดลง ในขณะที่การแตกตัวในการเริ่มต้นปฏิกิริยากลับเพิ่มขึ้น [79] ดังนั้น วิธีนี้จะสามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิแคบๆ ช่วงหนึ่งเท่านั้น โดยที่ระดับต่ำสุดของอุณหภูมิที่ปฏิกิริยาลด NOx นั้นถูกกำหนดโดยเวลาของการทำปฏิกิริยาคด้วย

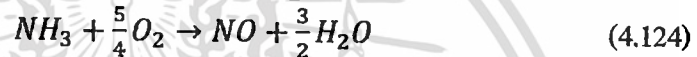
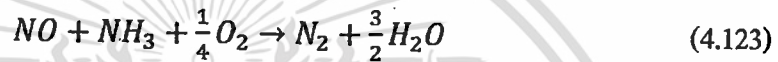
4.2.1.8.1 การฉีดแอมโมเนีย

นักวิจัยหลายท่านได้จำลองกระบวนการนี้จากปฏิกิริยาพื้นฐานจำนวนมากแบบจำลองแบบ Empirical ที่เรียบง่าย ได้ถูกนำเสนอโดย Fenimore [80] ซึ่งพัฒนาขึ้นจากการทดลอง อย่างไรก็ตามแบบจำลองดังกล่าวไม่เหมาะกับการใช้จริงในทางปฏิบัติ ต่อมา Ostberg และ Dam-Johansen [81] ได้เสนอว่า มีขั้นตอนอยู่สองขั้นตอนที่อธิบายถึง

กระบวนการ SNCR ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งเริ่มต้นด้วยปฏิกิริยาเดี่ยวแล้วตามด้วยสองเส้นทางปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขนานกัน : เส้นแรกนำไปสู่การลด NO และอีกเส้นทางนำไปสู่การก่อเกิด NO



รูปที่ 4.24 กลไกปฏิกิริยาอย่างง่ายสำหรับกระบวนการ SNCR



ค่ายกกำลังสำหรับปฏิกิริยาของ NO และ NH_3 ที่ 4% โดยปริมาตร O_2 และอัตราคงที่ k_r และ k_{OX} (สำหรับสมการ 4.124 และ 4.125 ตามลำดับ) ถูกกำหนดจากผลการทดลองของ Brouwer et al. [82] ในขณะที่ค่ายกกำลังสำหรับปฏิกิริยาของ NO ได้พบว่ามีความเป็น 1 สำหรับสมการ 4.124 และลำดับของ NH_3 พบว่ามีค่าเป็น 1 สำหรับปฏิกิริยาทั้งสอง ดังนั้นอัตราปฏิกิริยาสำหรับ NO และ NH_3 ที่ 4% โดยปริมาตร O_2 ได้ถูกเสนอไว้ดังนี้

$$\mathcal{R}_{\text{NO}} = -k_r[\text{NO}][\text{NH}_3] + k_{OX}[\text{NH}_3][\text{O}_2] \quad (4.125)$$

$$\mathcal{R}_{\text{NH}_3} = -k_r[\text{NO}][\text{NH}_3] - k_{OX}[\text{NH}_3][\text{O}_2] \quad (4.126)$$

อัตราคงที่ k_r และ k_{OX} ได้มีหน่วยเป็น $\text{m}^3/\text{gmol}\cdot\text{s}$ และกำหนดเป็นดังนี้

$$k_r = 4.24 \times 10^2 T^{5.30} e^{-E_r/RT}; \quad k_{OX} = 3.50 \times 10^{-1} T^{7.65} e^{-E_{OX}/RT}$$

ซึ่ง $E_r = 349937.06 \text{ J/gmol}$ และ $E_{OX} = 524487.005 \text{ J/gmol}$

แบบจำลองนี้ได้ให้การทำนายอย่างสมเหตุสมผลสำหรับกระบวนการ SNCR ในถ่านหินผงและการใช้ในการเผาไหม้แบบฟลูอิโดซ์เบด โดยแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือค่าของอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ตำแหน่งหัวฉีดแอมโมเนีย ช่วงเวลาในการที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นภายใต้ช่วงอุณหภูมิต่างๆ, สัดส่วนโมลระหว่าง NH_3 กับ NO, และผลกระทบของสารเติมแต่งที่ช่วยในการเผาไหม้ แบบจำลองนี้ให้ผลการลด NO_x มากกว่าที่ควรจะเป็นกรณีที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา สูงกว่าอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณการจำลองที่สูงกว่านี้ไม่มากเกินไปกว่าค่าที่ได้จากการจำลองอย่างละเอียด ที่พัฒนาโดย Miller และ Bowman [79]

โดยทั่วไปกระบวนการ SNCR จะเกิดขึ้นเมื่อ NH_3 มีอยู่ในเปลวไฟเหมือนกับเชื้อเพลิง N ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา ด้วยเหตุผลนี้ ถึงแม้ว่าแบบจำลอง SNCR จะไม่ได้ใช้และไม่มีการฉีดสารที่ใช้เป็นตัวกระทำปฏิกิริยาก็ตาม กระบวนการ SNCR ตามธรรมชาติก็จะยังคงมีอยู่ในเปลวไฟ ในช่วงของอุณหภูมิหรือ "window" ซึ่ง SNCR อาจเกิดขึ้นในช่วง $1073 \text{ K} < T < 1373 \text{ K}$

4.2.1.8.2 การฉีดยูเรีย

ยูเรียเป็นสารที่ใช้เป็นตัวกระทำปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการ SNCR ซึ่งคล้ายคลึงกับการฉีดแอมโมเนียและได้ใช้ในโรงไฟฟ้าเพื่อลดการปล่อย NO ได้อย่างดี สารที่ใช้เป็นตัวกระทำปฏิกิริยาทั้งสอง คือ ยูเรียและแอมโมเนีย มีขอบเขตหลักเช่นเดียวกับการลด NO_x การใช้ยูเรียแทนการใช้แอมโมเนียเป็นตัวลดการเกิด NO_x นั้นมีความน่าสนใจกว่าเพราะว่าสะดวกในการจัดเก็บการขนถ่ายและการจัดการ

กระบวนการ SNCR ที่ใช้นั้นเป็นการผสมผสานกันระหว่างกระบวนการที่เรียกว่า Thermal DeNO_x (การทำ SNCR ด้วยแอมโมเนีย) และ RAPRENO_x (การทำ SNCR ด้วยการฉีดกรด cyanuric ที่เมื่อทำให้ร้อนแล้วจะแตกตัวเป็นกรด isocyanic) เพราะ ยูเรีย มักจะแตกตัวไปเป็นแอมโมเนีย และกรด isocyanic

ปัญหาของกระบวนการ SNCR ที่ใช้ยูเรียนั้น คือการเสื่อมสลายของ HNCO ลงอย่างช้าๆ และเกิดปฏิกิริยาที่นำไปสู่ N_2O และ CO สามารถเพิ่มการปลดปล่อยมลภาวะชนิดอื่นแทน NO ยูเรียน่าจะเกี่ยวข้องกับการปล่อยมลภาวะที่ประกอบไปด้วยคาร์บอนอย่างมีนัยสำคัญ อย่างเช่น CO และ HNCO

จากการตรวจสอบโดยการทดลอง [83] ได้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ SNCR ที่ใช้ยูเรียนี้ใช้ได้ผลในช่วงอุณหภูมิแคบๆ ซึ่งทำงานในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ Thermal DeNO_x (เป็นการเปรียบเทียบที่ค่าเดียวกันของอัตราส่วนไนโตรเจนในสารทำปฏิกิริยาต่อไนโตรเจนในก๊าซ NO ที่ป้อนเข้ามา ซึ่งกำหนดด้วย พารามิเตอร์ β ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของค่า β มีผลให้ประสิทธิภาพของการลดการปลดปล่อย NO_x ดีขึ้น ขณะที่ผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของ O_2 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่พิจารณา

แบบจำลองที่จะกล่าวต่อไปนี้ ถูกเสนอโดย Brouwer et al. [82] เป็นแบบจำลองที่ถูกลดรูปเหลือกลไกการทำปฏิกิริยาเพียง 7 ขั้นตอน Brouwer et al. [82] สมมุติว่ายูเรียได้สลายตัวทันที และสมมุติว่า 1 โมลของยูเรียผลิต NH_3 ได้ 1.1 โมล และ HNCO 0.9 โมล

ขณะที่ Rota et al. [83] ได้เสนอกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่มีอัตราจำกัดสองขั้นตอน สำหรับการสลายตัวของยูเรียไปเป็นแอมโมเนียและ HNCO

กลไกการลดรูป 7 ขั้นตอนได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และกลไกการสลายของยูเรีย 2 ขั้นตอนได้แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 กลไกการลดรูป 7 ขั้นตอนของยูเรียสำหรับ SNCR

Reaction	A	b	E
$NH_3 + NO \rightarrow N_2 + H_2O + H$	4.24×10^2	5.30	349,937.06
$NH_3 + O_2 \rightarrow NO + H_2O + H$	3.50×10^{-1}	7.65	524,487.005
$HNCO + M \rightarrow H + NCO + M$	2.40×10^8	0.85	284,637.8
$NCO + NO \rightarrow N_2O + CO$	1.00×10^7	0.00	-1,632.4815
$NCO + OH \rightarrow NO + CO + H$	1.00×10^7	0.00	0
$N_2O + OH \rightarrow N_2 + O_2 + H$	2.00×10^6	0.00	41,858.5
$N_2O + M \rightarrow N_2 + O + M$	6.90×10^{17}	-2.5	271,075.646

ตารางที่ 4.3 กระบวนการสลายของยูเรีย 2 ขั้นตอน

Reaction	A	b	E
$CO(NH_2)_2 \rightarrow NH_3 + HNCO$	1.27×10^4	0	65,048.109
$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_2$	6.13×10^4	0	87,819.133

ซึ่งหน่วยของ A ในตารางที่ 4.2 และ 4.3 คือ m-gmol-sec และ E มีหน่วยเป็น J/gmol

4.2.1.8.3 สมการถ่ายเทสำหรับยูเรีย HNCO และ NCO

เมื่อใช้แบบจำลอง SNCR กับการฉีดยูเรีย สมการการถ่ายเทซึ่งได้คำนวณโดยสมการการถ่ายเทมวล 3 สมการที่ได้เพิ่มเข้าไปสำหรับ ยูเรีย, HNCO และ NCO

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{CO(NH_2)_2}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{CO(NH_2)_2}) = \nabla \cdot (\rho D Y_{CO(NH_2)_2}) + S_{CO(NH_2)_2} \quad (4.127)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{HNCO}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{HNCO}) = \nabla \cdot (\rho D Y_{HNCO}) + S_{HNCO} \quad (4.128)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{NCO}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{NCO}) = \nabla \cdot (\rho D Y_{NCO}) + S_{NCO} \quad (4.129)$$

ซึ่ง $Y_{CO(NH_2)_2}$, Y_{HNCO} และ Y_{NCO} เป็นสัดส่วนมวลของยูเรีย, HNCO และ NCO ในสถานะก๊าซ source term $S_{CO(NH_2)_2}$, S_{HNCO} และ S_{NCO} ได้กำหนดอย่างสอดคล้องกับสมการอัตราที่

อยู่ในตารางที่ 4.2 และ 4.3 และ source term ที่เพิ่มเข้าไปเนื่องจากการฉีดสารปฏิกิริยา source term ที่เพิ่มเข้าไปเหล่านี้ได้กำหนดในส่วนถัดไป source term ในสมการการถ่ายเทสามารถเขียนได้ดังนี้

$$S_{CO(NH_2)_2} = S_{pl,CO(NH_2)_2} + S_{CO(NH_2)_2-reac} \quad (4.130)$$

$$S_{HNCO} = S_{pl,HNCO} + S_{HNCO-reac} \quad (4.131)$$

$$S_{NCO} = S_{NCO-reac} \quad (4.132)$$

นอกจาก source term สำหรับทั้งสามสปีชีส์ source term ที่เพิ่มเข้าไปสำหรับ NO, NH₃ และ N₂O ได้กำหนดตามนี้ด้วย โดยควรที่จะเพิ่มไว้ในการคำนวณแหล่งกำเนิดก่อนหน้านี้

$$S_{NO} = S_{NO-reac} \quad (4.133)$$

$$S_{NH_3} = S_{pl,NH_3} + S_{NH_3-reac} \quad (4.134)$$

$$S_{N_2O} = S_{N_2O-reac} \quad (4.135)$$

source term S_{i-reac} สำหรับ i^{th} สปีชีส์ได้กำหนดจากสมการอัตราที่อยู่ในตารางที่ 4.2 และ 4.3

4.2.1.8.4 การผลิตยูเรียเนื่องมาจากการฉีดสารทำปฏิกิริยา

อัตราของการผลิตยูเรียเท่ากับอัตราของการปล่อยสารเข้าไปทำปฏิกิริยาในสถานะก๊าซผ่านการระเหย

$$S_{pl,CO(NH_2)_2} = \frac{S_{reagent}}{V} \quad (4.136)$$

ซึ่ง $S_{reagent}$ เป็นอัตราการปล่อยสารที่ทำปฏิกิริยาจากหยดของเหลวไปยังสถานะก๊าซ (kg/s) และ V เป็นปริมาตรเซลล์ (m³)

4.2.1.8.5 การผลิต NH₃ เนื่องมาจากการฉีดสารทำปฏิกิริยา

แบบจำลองการสลายตัวสามารถเพิ่มเข้าไปในการคำนวณได้ เมื่ออัตราการผลิตของ NH₃ เป็นสัดส่วนกับอัตราปล่อยสารทำปฏิกิริยาไปเป็นสถานะก๊าซโดยผ่านการระเหย

$$S_{pl,NH_3} = MCF_{NH_3} \frac{S_{reagent}}{V} \quad (4.137)$$

ซึ่ง $S_{reagent}$ เป็นอัตราของการปล่อยสารทำปฏิกิริยาจากหยดของเหลวไปยังสถานะแก๊ส (kg/s) MCF_{NH_3} เป็นสัดส่วน โมลของ NH_3 ในส่วนผสม $NH_3/HNCO$ ที่เกิดมาจากการสลายตัวของยูเรียและ V เป็นปริมาตรเซลล์ (m^3)

4.2.1.8.6 การผลิต HNCO เนื่องมาจากการฉีดสารทำปฏิกิริยา

แบบจำลองการสลายตัวของยูเรียสามารถเพิ่มเข้าไปในการคำนวณได้ เมื่ออัตราการผลิตของ HNCO เป็นสัดส่วนกันกับอัตราปล่อยสารเข้าไปทำปฏิกิริยาในสถานะก๊าซโดยการระเหย

$$S_{pl,HNCO} = MCF_{HNCO} \frac{S_{reagent}}{V} \quad (4.138)$$

ซึ่ง $S_{reagent}$ เป็นอัตราของการปล่อยสารทำปฏิกิริยาจากหยดของเหลวไปยังสถานะแก๊ส (kg/s) MCF_{HNCO} เป็นสัดส่วน โมลของ NH_3 ในส่วนผสม $NH_3/HNCO$ ที่เกิดมาจากการสลายตัวของยูเรียและ V เป็นปริมาตรเซลล์ (m^3)

สัดส่วนการเปลี่ยนแปลง โมล (MCF) สำหรับ NH_3 และ HNCO สามารถกำหนดได้ เช่น ถ้า 1 โมล ของยูเรียแยกไปเป็น NH_3 1.1 โมล และ HNCO 0.9 โมล ดังนั้น $MCF_{NH_3} = 0.55$ และ $MCF_{HNCO} = 0.45$ โดยถ้าเลือกใช้ตัวเลือกนี้ สำหรับการแยกตัวของยูเรีย แล้ว $S_{pl,CO(NH_2)_2} = 0$

อย่างไรก็ตาม ค่าที่ถูกตั้งไว้สำหรับการแยกตัวของยูเรียคือกระบวนการที่ผ่านปฏิกิริยาที่ให้ไว้ในตารางที่ 4.3 ในกรณีนี้ source term S_{pl,NH_3} และ $S_{pl,HNCO}$ มีค่าเป็นศูนย์

4.2.1.9 การก่อเกิด NOx ในการไหลปั่นป่วน

กลไกของปฏิกิริยาเคมีของการก่อเกิดและการทำลายของ NOx ที่อธิบายในส่วนก่อนหน้านี้นี้ ได้มาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ทำการศึกษาเปลวไฟ premixed ภายใต้การไหลแบบราบเรียบ หรือใน shock-tube ที่สภาวะการฟุ้งกระจายของ โมเลกุลได้ถูกควบคุมไว้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ในระบบการเผาไหม้ทั่วไป การไหลจะมีความปั่นป่วนสูง ส่งผลให้เกิดการผสมแบบปั่นป่วน เกิดความผันผวนของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสปีชีส์ ซึ่งมีผลต่อลักษณะของเปลวไฟ

ความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราการก่อตัวของ NOx อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสปีชีส์ต่าง ๆ นั้น ไม่มีความเป็นเชิงเส้นอย่างมาก ดังนั้น หากใช้ค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งมาใช้ในแบบจำลองเพื่อทำนายอัตราการก่อตัว NOx ก็จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นความผัน

ผวนของอุณหภูมิและส่วนผสมทางเคมีจะต้องนำมาพิจารณาค่าด้วย โดยอธิบายได้ในลักษณะของความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่บ่งชี้ถึงการผันแปรกับเวลาของคุณสมบัติเหล่านี้

4.2.1.9.1 แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างความปั่นป่วน-สารเคมี

ในการคำนวณการเผาไหม้แบบปั่นป่วน ต้องทำการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ย (ในรูปสมการที่ถ่วงน้ำหนักค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งด้วยความหนาแน่น) ซึ่งเป็นสมการรูปทั่วไปที่อธิบายการกระจายของอุณหภูมิ ความเร็ว และความเข้มข้นสปีชีส์ หรือสัดส่วนของผสมเฉลี่ย และค่าความแปรปรวน ในส่วนของการคำนวณความเข้มข้น NO_x นั้น อัตราเฉลี่ยของการก่อเกิด NO_x ต้องถูกคำนวณที่แต่ละจุดใน โดเมน โดยใช้ข้อมูลจากสนามการไหลเฉลี่ยที่จุดนั้นๆ โดยวิธีสำหรับจำลองอัตราปฏิกิริยาปั่นป่วนเฉลี่ย สามารถอ้างอิงบนพื้นฐานของทั้งวิธีชั่วขณะ [84] หรือเทคนิคฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (PDF) [85]

4.2.1.9.2 วิธี PDF

วิธี PDF ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความมีประสิทธิภาพในการใช้อธิบายในทฤษฎีการไหลแบบปั่นป่วน [86] สำหรับแบบจำลอง NO_x ที่มีอยู่ในโปรแกรมเชิงพาณิชย์นั้นจะใช้แบบจำลองเพื่อทำนายการปลดปล่อย NO_x ชนิดที่ใช้ PDF ตัวแปรเดี่ยวหรือตัวแปรร่วม ที่อยู่ในพจน์ของอุณหภูมิ สัดส่วนมวลสปีชีส์ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ปรับค่าแล้ว หรืออาจเป็นการรวมกันระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสอง

ในกรณีที่แบบจำลองแบบ Non-premixed หรือแบบ Premixed บางส่วน ถูกใช้เป็นแบบจำลองของการเผาไหม้ เราจะพบว่า แบบจำลองถูกแสดงได้ในรูปของฟังก์ชันของความน่าจะเป็นที่แสดงในรูปของ Mixture fraction(s) จำนวนหนึ่งหรือสองตัวแล้วแต่กรณี ค่าเหล่านี้สามารถหาได้จากคำตอบของสมการการถ่ายเทของ Mixture fraction นั้นเอง

4.2.1.9.3 การแสดงออกโดยทั่วไปสำหรับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ย

อัตราปฏิกิริยาความปั่นป่วนเฉลี่ย \bar{w} สามารถอธิบายได้ในพจน์ของอัตราที่ขณะใด ๆ w และฟังก์ชันความน่าจะเป็นชนิดตัวแปรเดี่ยวหรือตัวแปรร่วม รูปแบบโดยทั่วไปแสดงดังนี้

$$\bar{w} = \int \dots \int w(V_1, V_2, \dots) P(V_1, V_2, \dots) dV_1 dV_2 \dots \quad (4.139)$$

ซึ่ง V_1, V_2, \dots เป็นอุณหภูมิและ/หรือความเข้มข้นสปีชีส์ที่หลากหลาย P เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (PDF)

4.2.1.9.4 อัตราปฏิกิริยาเฉลี่ย

PDF ใช้สำหรับถ่วงน้ำหนักปฏิกิริยาของการผลิต NO (สมการ 4.52) ทำการอินทิเกรตตลอดทั้งช่วงที่เหมาะสมเพื่อที่จะได้อัตราปฏิกิริยาบ้นป่วนเฉลี่ย จะได้ว่า

$$\bar{S}_{NO} = \int S_{NO}(V_1)P_1(V_1)dV_1 \quad (4.140)$$

หรือ สำหรับสองตัวแปรร่วม

$$\bar{S}_{NO} = \iint S_{NO}(V_1, V_2)P_1(V_1, V_2)dV_1dV_2 \quad (4.141)$$

ซึ่ง \bar{S}_{NO} เป็นอัตราความบ้นป่วนเฉลี่ยของการผลิต NO โดย S_{NO} เป็นอัตราของการผลิตที่ได้มาจากสมการ 4.52 สำหรับ $P_1(V_1)$ และ $P_1(V_1, V_2)$ เป็น PDFs ที่ตัวแปร V_1 และ PDFs ที่ตัวแปร V_1, V_2 เป็นตัวแปรต้น ตามลำดับ ซึ่งวิธีเดียวกันนี้ใช้ได้สำหรับพจน์กำเนิด HCN หรือ NH_3

สมการ 4.140 หรือ 4.141 ต้องอินทิเกรตที่ทุกๆ โหนดและทุกๆ ครั้งของการคำนวณ สำหรับ PDF ของอุณหภูมิ ขอบเขตของการอินทิเกรตได้กำหนดจากค่าต่ำสุดและสูงสุดของอุณหภูมิในการเผาไหม้ สำหรับ PDF ของ mixture fraction ขอบเขตของการอินทิเกรตในสมการ 4.140 หรือ 4.141 กำหนดได้จากค่าที่เก็บไว้ในตารางค้นหาที่ได้ทำการคำนวณไว้แล้ว

4.2.1.9.5 ความอิสระทางสถิติ

ในกรณีของ PDF สองตัวแปร จะสมมุติว่าตัวแปร V_1 และ V_2 เป็นอิสระทางสถิติ ดังนั้น $P_1(V_1, V_2)$ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P_1(V_1, V_2) = P_1(V_1)P_2(V_2) \quad (4.142)$$

4.2.1.9.6 The Beta PDF Option

เราสามารถกำหนด P เป็น two-moment beta function ที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณการเผาไหม้ [87, 88] สมการสำหรับ beta function มีลักษณะเป็นดังนี้

$$P(v) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} v^{\alpha-1}(1-v)^{\beta-1} = \frac{v^{\alpha-1}(1-v)^{\beta-1}}{\int_0^1 v^{\alpha-1}(1-v)^{\beta-1}dv} \quad (4.143)$$

ซึ่ง $\Gamma(\)$ เป็นแกมมาฟังก์ชัน α และ β ขึ้นอยู่กับ \bar{m} เป็นค่าเฉลี่ยของปริมาณที่พิจารณา และความแปรปรวน σ^2

$$\alpha = \bar{m} \left(\frac{\bar{m}(1-\bar{m})}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (4.144)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta = (1 - \bar{m}) \left(\frac{\bar{m}(1-\bar{m})}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (4.145)$$

เทอม Beta function นั้นมีค่าความแปรปรวน V เป็นตัวแปรอิสระ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ดังนั้น ค่าความแปรปรวนของ อุณหภูมิ จะต้องถูกปรับแก้ก่อนนำไปใช้ คำนวณค่าของ อุณหภูมิเฉลี่ย

4.2.1.9.7 The Gaussian PDF Option

เราสามารถกำหนดค่า P ให้เป็นกระจายแบบ Gaussian ที่ถูกตัดปลายของความถี่หนาแน่นการกระจาย ด้วย delta functions โดยฟังก์ชันความหนาแน่นสะสมสำหรับ Gaussian PDF (G_{CDF}) อาจแสดงในพจน์ของ error function ได้ดังนี้

$$G_{CDF} = \frac{1}{2} \left(1 + erf\left(\frac{m - \bar{m}}{\sqrt{2}\sigma^2}\right) \right) \quad (4.146)$$

ซึ่ง $erf(\)$ เป็น error function m เป็นปริมาณที่กำลังพิจารณา และ \bar{m} และ σ^2 เป็นค่าเฉลี่ยและค่าแปรปรวนของ m ตามลำดับ error function อาจแสดงในพจน์ของ gamma function ที่ไม่สมบูรณ์ $gammp(\)$

$$\begin{aligned} \text{for } m < 0: erf(m) &= -gammp(0.5, m^2) \\ \text{for } m \geq 0: erf(m) &= gammp(0.5, m^2) \end{aligned} \quad (4.147)$$

4.2.1.9.8 การคำนวณวิธี σ^2

ความแปรปรวน σ^2 สามารถคำนวณได้โดยแก้สมการการถ่ายเทระหว่างการคำนวณการเผาไหม้หรือช่วงหลังจากการคำนวณมลภาวะ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\sigma^2) + \nabla(\rho\bar{c}\sigma^2) = \nabla\left(\frac{\mu t}{\sigma_t} \nabla\sigma^2\right) + C_g\mu_t(\nabla\bar{m})^2 - C_d\rho\frac{\epsilon}{k}\sigma^2 \quad (4.148)$$

ซึ่งค่าคงที่ σ_t , C_g และ C_d มีค่า 0.85, 2.86 และ 2.0 ตามลำดับ

ลักษณะการกระจายตัวดังที่กล่าวข้างต้นนั้นจะใช้คำนวณเฉพาะค่าของอุณหภูมิเท่านั้น โดยวิธีการแก้ปัญหาแบบนี้จะใช้ทรัพยากรในการคำนวณอย่างมาก ดังนั้นจึงไม่เหมาะสำหรับ post-processing treatment สำหรับการทำนายสนามของ NOx ดังนั้นการแก้ปัญหาสมการการถ่ายเทสำหรับสปีชีส์ จะคำนวณค่าของความแปรปรวน σ^2 บนพื้นฐานของรูปแบบการประมาณค่าของสมการการถ่ายเทความแปรปรวน (วิธีนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า algebrage form) รูปแบบการประมาณจะสมมุติว่าความแปรปรวนของการเกิดขึ้นเท่ากับความแปรปรวนของการทำลาย โดยเป็นไปตามสมการนี้

$$\sigma^2 = \frac{\mu_t k C_g}{\rho \epsilon C_d} (\nabla \bar{m})^2 = \frac{\mu_t k C_g}{\rho \epsilon C_d} \left[\left(\frac{\partial \bar{m}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{m}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{m}}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (4.149)$$

ในพจน์ภายในวงเล็บเป็นอัตราการสลายตัวของตัวแปรอิสระ
สำหรับ PDF ในพจน์ของ mixture fraction ตัวแปรสัดส่วนของผสมได้คำนวณในส่วนของการคำนวณการเผาไหม้พื้นฐาน ซึ่งไม่มีความต้องการเพิ่มเติมสำหรับ σ^2

4.2.2 การก่อเกิด SOx

ในส่วนต่อไปนี้จะรวบรวมข้อมูลทางทฤษฎีที่ใช้ในแบบจำลองการเกิด SOx

- 4.2.2.1 บทนำ
- 4.2.2.2 สมการควบคุมสำหรับการถ่ายเท SOx
- 4.2.2.3 กลไกปฏิกิริยาออกซิเดชันสำหรับกำมะถัน
- 4.2.2.4 การผลิต SO₂ และ H₂S ในเชื้อเพลิงก๊าซ
- 4.2.2.5 การผลิต SO₂ และ H₂S ในเชื้อเพลิงเหลว
- 4.2.2.6 การผลิต SO₂ และ H₂S จากถ่านหิน
- 4.2.2.7 การก่อเกิด SOx ในการไหลปั่นป่วน

4.2.2.1 บทนำ

กำมะถันมีอยู่ในถ่านหินเป็นอินทรีย์กำมะถัน, pyretic และซัลเฟต [89] และที่อยู่ในเชื้อเพลิงเหลวส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบอินทรีย์สาร [90] โดยมีสัดส่วนประมาณ 0.5% ถึง 3% โดยมวล การปลดปล่อย SOx ทั้งหมดเกิดขึ้นจากการออกซิเดชันของพันธะเชื้อเพลิงกำมะถัน ระหว่างกระบวนการเผาไหม้ โดยที่เชื้อเพลิงกำมะถันได้ถูกออกซิไดซ์ไปเป็น SO₂ และ SO₃ ซึ่งก๊าซ SOx บางส่วนจะควบแน่นบนอนุภาค โดยละลายในน้ำและได้กลายเป็นกรดซัลฟิวริกหรืออาจตอบสนองต่อการเกิดซัลเฟต ขณะที่การปลดปล่อย SOx เป็นสาเหตุหลักของฝนกรด อนึ่ง SO₃ ก็มีส่วนในการสนับสนุนการปลดปล่อยของอนุภาคและเป็นสาเหตุของการกัดกร่อนของอุปกรณ์การเผาไหม้ ยิ่งไปกว่านั้นมีความสนใจเพิ่มขึ้นในส่วนของปฏิสัมพันธ์ของชนิดกำมะถันกับไนโตรเจนออกไซด์ [90] โดยระดับของ NO ได้รับผลมาจากกำมะถันที่มีอยู่ โดยมีหลักฐานที่ชี้เฉพาะว่าระดับ thermal NO (ส่วนที่ 4.2) ลดลงในส่วนของ SO₂ อย่างไรก็ตามผลกระทบขององค์ประกอบกำมะถันในการก่อเกิด fuel NOx ยังคงไม่ชัดเจน

การปลดปล่อยกำมะถันควบคุม โดยจากแหล่งกำเนิดและจากเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ มลภาวะที่เกิดจากกำมะถันสามารถกักไว้ได้ระหว่างกระบวนการเผาไหม้ อย่างเช่น การขจัดสีแบบเปียกและแห้ง หม้อกำเนิดไอน้ำที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเป็นแหล่งกำเนิดมลภาวะ SO_x ที่ใหญ่ที่สุด โดยคำนวณได้ประมาณ 50% จากการปลดปล่อยทั้งหมด [91] สำหรับเชื้อเพลิงที่มีความเข้มข้นของกำมะถันสูง สถานการณ์ความเข้มข้นของ SO_x ควรจะดำเนินการแก้ไขร่วมกับการคำนวณการเผาไหม้หลัก โดยแบบจำลองปฏิกิริยา ซึ่งการจำลองการเกิด SO_x เป็นไปตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. กำมะถันที่ปล่อยออกจากเชื้อเพลิง

สำหรับเชื้อเพลิงเหลว สามารถสมมุติว่ากำมะถันได้ปล่อยออกมาเป็น H₂S [90] อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้มีความซับซ้อนมากขึ้นเมื่อเป็นกรณีของถ่านหิน ซึ่งบางส่วนของกำมะถันได้แยกออกมาเป็นในสถานะก๊าซระหว่างการปลดปล่อยสารระเหย เช่น H₂S, SO₂, COS, และ CS₂, ขณะที่กำมะถันส่วนในส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในชาร์เพื่อที่จะออกซิไดซ์ที่ขั้นตอนภายหลัง เปอร์เซ็นต์ของซัลเฟอร์ที่ยังคงเหลืออยู่ในถ่านหินขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน [89]

2. ปฏิกิริยาของกำมะถันในสถานะก๊าซ

ในเปลวไฟที่ออกซิเจนหนาแน่นปฏิกิริยอกำมะถันที่มีมาก ได้แก่ SO, SO₂ และ SO₃ แต่ในที่มีความเข้มข้นออกซิเจนที่ต่ำกว่า H₂S, S₂ และ SH ยังคงเป็นสัดส่วนที่สำคัญ ขณะที่ SO₃ ละทิ้งได้ [90] ใน PCGC-3 และในผลจากการทำงานของ Norman et al. [92] สปีชีส์กำมะถันในสถานะก๊าซจะสมมุติว่าอยู่ในภาวะสมดุล

3. การกักกำมะถันในตัวดูดซับ

สำหรับเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันต่ำ สามารถสมมุติได้ว่ากำมะถันส่วนใหญ่ถูกปล่อยออกไปในรูปของ H₂S โดยอัตราของการปลดปล่อยสามารถกำหนดได้คล้ายคลึงเช่นกันกับพันธะของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง สำหรับชาร์ S สามารถสมมุติว่า SO₂ ถูกผลิตโดยตรงที่อัตราเดียวกันกับการเผาไหม้ของชาร์ สมการการถ่ายเทสำหรับ H₂S, SO₂, SO, SH, และ SO₃ ได้รวมกันและปฏิกิริยาที่เหมาะสมได้พัฒนาขึ้นตามที่อธิบายไว้ในส่วนถัดไป

4.2.2.2 สมการควบคุมสำหรับการถ่ายเท SO_x

ในการคำนวณสมการการถ่ายเทมวลสำหรับ SO₂ ซึ่งแทนเข้าไปในส่วนการพา การฟุ้งกระจาย การผลิตและการบริโภคของ SO₂ และสปีชีส์ที่เกี่ยวข้อง โดยทั่วไปแล้ววิธีนี้จะได้มาจากหลักการพื้นฐานของการอนุรักษ์มวล ผลกระทบของเวลาในกลไกของ SO_x กรอบอ้างอิงของ Lagrangian ได้รวมเข้าไปในพจน์การพาในสมการควบคุมโดยเขียนในกรอบอ้างอิงของ Eulerian ถ้าเชื่อเพลิงทั้งหมดถูกสมมุติว่าเปลี่ยนไปเป็น SO₂ โดยตรงและผลิตภัณฑ์อื่นๆ และสปีชีส์ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยาให้สมมุติว่าละทิ้งได้ ดังนั้นเฉพาะสมการการถ่ายเท SO₂ เท่านั้นที่ต้องการ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{SO_2}) + \nabla(\rho \vec{v} Y_{SO_2}) = \nabla(\rho D \nabla Y_{SO_2}) + S_{SO_2} \quad (4.150)$$

ดังที่อธิบายในส่วน 4.2.2.3 กลไกการเกิด SO_x ได้รวมปฏิกิริยาหลายอย่างของหลายสปีชีส์และการติดตามกัมมะถันที่มีอยู่ในสปีชีส์ระหว่างกลางปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่สำคัญ โปรแกรมได้คำนวณสมการการถ่ายเทสำหรับ H₂S, SO₃, SO, และ SH นอกจาก SO₂

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{H_2S}) + \nabla(\rho \vec{v} Y_{H_2S}) = \nabla(\rho D \nabla Y_{H_2S}) + S_{H_2S} \quad (4.151)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{SO_3}) + \nabla(\rho \vec{v} Y_{SO_3}) = \nabla(\rho D \nabla Y_{SO_3}) + S_{SO_3} \quad (4.152)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{SO}) + \nabla(\rho \vec{v} Y_{SO}) = \nabla(\rho D \nabla Y_{SO}) + S_{SO} \quad (4.153)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{SH}) + \nabla(\rho \vec{v} Y_{SH}) = \nabla(\rho D \nabla Y_{SH}) + S_{SH} \quad (4.154)$$

ซึ่ง Y_{SO_2} , Y_{H_2S} , Y_{SO_3} , Y_{SO} , และ Y_{SH} เป็นสัดส่วนมวลของ SO₂, H₂S, SO₃, SO, และ SH ในสถานะก๊าซ source term S_{SO_2} , S_{H_2S} , S_{SO_3} , S_{SO} , และ S_{SH} กำหนดโดยขึ้นอยู่กับรูปแบบของเชื้อเพลิงกัมมะถัน (SO₂ และ/หรือ H₂S) และการรวมของ SO₃, SO และ SH ในกลไกการเกิด SO_x

4.2.2.3 กลไกปฏิกิริยาออกซิเดชันสำหรับกัมมะถัน

รายละเอียดกลไกปฏิกิริยาสำหรับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้เสนอ โดย Kramlich [93] กลไกประกอบไปด้วยปฏิกิริยาย้อนกลับได้ 20 ปฏิกิริยาและรวม 12 สปีชีส์ (S, S₂, SH, SO, SO₂, H₂S, H, H₂, OH, H₂O, O, และ O₂) กลไกได้ลดรูปเหลือ 8 ขั้นตอนและ 10 สปีชีส์ (ซึ่ง S, และ S₂ ได้ถูกเอาออก) และการตรวจสอบในการจำลองผล Perfectly Stirred Reactor (PSR) และ Plug Flow Reactor (PFR) ตารางที่ 4.4 เป็นรายการกลไกที่ลดรูปที่ได้ โดยแสดงความคู่กับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ได้ปรับปรุงแล้ว สำหรับการคำนวณอัตราการลดลงของความเข้มข้นของ O และ OH ได้คำนวณด้วยการสมมุติสถานะสมดุลบางส่วนโดยใช้ค่า

ความเข้มข้นของ O_2 และ H_2O ในการคำนวณตามลำดับ สำหรับ N_2 ถูกพิจารณาเป็นตัวเจือจางในกลไกนี้ ปฏิกิริยาของกลไก 8 ขั้นตอนที่ลดรูปนี้สามารถย้อนกลับได้ โดยสำหรับแต่ละส่วนที่ติดกันของปฏิกิริยาที่ให้ไว้ในตารางที่ 4.4 นั้น จะมีปฏิกิริยาที่สองเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาแรก

ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,500 K กลไกที่ลดรูปที่ให้ไว้ในตารางที่ 4.4 จะให้ผลการคำนวณระดับความเข้มข้นของ SO_2 ใกล้เคียงกับที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกแบบละเอียด แต่จะให้ค่าของปริมาณ H_2S สูงกว่าเล็กน้อย สำหรับเงื่อนไขที่อุณหภูมิมากกว่า 1,500 K กลไกที่ลดรูปนี้ให้ผลการทำนายความเข้มข้นของ SO_2 และ H_2S ได้อย่างใกล้เคียง อย่างไรก็ตาม SO และ SH ไม่ได้มีความสัมพันธ์กันอย่างถูกต้องนักในกลไกที่ลดรูป หากเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยใช้กลไกแบบละเอียด

สิ่งที่พึงต้องพิจารณาในกลไกนี้ คือ อนุพลของ H และวิธีที่จะคำนวณความเข้มข้นของอนุพลชนิดนี้ในสนามการไหล แนวคิดที่เป็นที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้น กำหนดให้ความเข้มข้นของอนุพล H ที่มีอยู่ เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของ O ซึ่งสามารถประเมินได้จากวิธีสมดุลบางส่วน (ในส่วนของ 4.2.1.3) หรือวิธีสมดุล (ในส่วนของ 4.2.1.3) ที่มีอยู่ในแบบจำลอง โดยอาจกำหนดเป็นสัดส่วนระหว่างวิธีทั้งสองที่กล่าวมา

สำหรับ SO_3 อาจจะถูกนำมาคิดหรือไม่ในการคำนวณนั้น ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงกำมะถันที่ปล่อยออกมา (เช่น SO_2 และ H_2S) นอกจากนี้ H_2S อาจจะมีหรือไม่มีสำหรับการคำนวณก็ได้ การเลือกสัดส่วนการแบ่งตัวของเชื้อเพลิงกำมะถันไปเป็น SO_2 และ H_2S นั้น ยังไม่มีบทความใดที่ระบุการเลือกสัดส่วนพาร์ทิชันที่ถูกต้อง

ตารางที่ 4.4 กลไกการลดรูปแล้ว 8 ขั้นตอนหลัก (อัตราการผลิตปฏิกิริยา = $AT^b \exp(-E/RT)$)

Reaction	A	B	E
$H_2S+H \rightarrow SH+H_2$	1.819702E+07	0.00	7.484300E+03
$SH+H_2 \rightarrow H_2S+H$	9.375623E+06	0.00	6.253660E+04
$OH+H_2S \rightarrow H_2O+SH$	1.380385E+02	0.00	3.742150E+03
$H_2O+SH \rightarrow OH+H_2S$	3.104557E+07	0.00	1.218543E+05
$SO+OH \rightarrow HS+O_2$	1.621810E+08	0.00	2.565926E+03
$HS+O_2 \rightarrow SO+OH$	7.691299E+09	0.00	1.187023E+05
$SH+O \rightarrow SO+H$	3.548135E+08	0.00	2.687316E+03
$SO+H \rightarrow SH+O$	2.985385E+09	0.00	1.694600E+05

$O+H_2S \rightarrow SH+OH$	4.365162E+03	0.00	1.380493E+04
$SH+OH \rightarrow O+H_2S$	9.885528E+08	0.00	6.035996E+04
$SO+O_2 \rightarrow SO_2+O$	4.466832E+05	0.00	2.703222E+04
$SO_2+O \rightarrow SO+O_2$	1.663412E+06	0.00	7.613643E+04
$H+SH+M \rightarrow H_2S+M$	1.096478E+03	0.00	0.000000E+00
$H_2S+M \rightarrow H+SH+M$	8.669613E+14	0.00	3.819463E+05
$SO+O+M \rightarrow SO_2+M$	8.709647E+09	-1.80	0.000000E+00
$SO_2+M \rightarrow SO+O+M$	1.905464E+14	0.00	5.207365E+05

A มีหน่วยเป็น $m^3/gmol\cdot s$, E มีหน่วยเป็น $J/gmol$ (กำหนดให้ $1 \text{ cal} = 4.18585 \text{ J}$) หน่วยของ A ในปฏิกิริยาที่ 13 และ 15 มีหน่วยเป็น $m^6/gmol^2\cdot s$

นอกจากนี้ ปฏิกิริยาสองปฏิกิริยานี้จะทำให้กลไกการเกิด SO_x สมบูรณ์ ด้วยอัตราคงที่ได้จาก Hunter's work [94]



M = ก๊าซอาร์กอน หรือ ไนโตรเจน หรือ ออกซิเจน

$$k_{f_1} = 3.63 \times 10^2 \exp(+4185.85/RT) \quad m^6/gmol^2/sec$$

$$R = 8.313 \quad J/gmol - K$$

$$k_{r_1} = 7.41 \times 10^{14} \exp(-346123.75/RT) \quad m^3/gmol/sec$$



$$k_{r_2} = 1.2 \times 10^6 \exp(-39765.575/RT) \quad m^3/gmol/sec$$

ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสมการ 4.156 สามารถหาได้ โดยการใช้ค่าคงที่ของภาวะสมดุล (equilibrium constant) ของสมการนั้นๆ นั้นเอง

4.2.2.4 การผลิต SO_2 และ H_2S ในเชื้อเพลิงก๊าซ

อัตราการเกิดของ SO_2 และ H_2S เท่ากับอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

$$S_{pl,i} = \frac{R_{cf} Y_{S,fuel} M_{w,i}}{M_{w,S}} \quad (4.157)$$

ซึ่ง

$$S_{pl,i} = \text{แหล่งกำเนิดของ } i \text{ (kg/m}^3\cdot\text{s)} \text{ ซึ่ง } i = SO_2 \text{ หรือ } H_2S$$

R_{cf} = อัตราปฏิกิริยาขีดจำกัดเฉลี่ยของเชื้อเพลิง ($\text{kg/m}^3\text{-s}$)

$Y_{S,fuel}$ = สัดส่วนมวลของกำมะถันในเชื้อเพลิง

อัตราปฏิกิริยาขีดจำกัดเฉลี่ยของเชื้อเพลิง R_{cf} คำนวณจากแบบจำลองการเผาไหม้ของ Magnussen ดังนั้น การก่อเกิด SO_x จากเชื้อเพลิงก๊าซจะคำนวณได้ ก็ต่อเมื่อใช้ร่วมกับแบบจำลองอัตราการเผาไหม้แบบจำกัด

4.2.2.5 การผลิต SO_2 และ H_2S ในเชื้อเพลิงเหลว

อัตราการเกิดของ SO_2 และ H_2S จะเท่ากับอัตราปล่อยเชื้อเพลิงเข้าไปสู่สถานะก๊าซ เนื่องจากการระเหยของเชื้อเพลิง

$$S_{pl,i} = \frac{S_{fuel} Y_{S,fuel} M_{w,i}}{M_{w,S} V} \quad (4.158)$$

ซึ่ง

$S_{pl,i}$ = แหล่งกำเนิดของ i ($\text{kg/m}^3\text{-s}$) ซึ่ง $i = \text{SO}_2$ หรือ H_2S

S_{fuel} = อัตราของเชื้อเพลิงที่ปล่อยจากของเหลวไปยังก๊าซ (kg/s)

$Y_{S,fuel}$ = สัดส่วนมวลของกำมะถันในเชื้อเพลิง

V = ปริมาตรเซลล์ (m^3)

4.2.2.6 การเกิด SO_2 และ H_2S จากถ่านหิน

สำหรับถ่านหินได้สมมติว่ากำมะถันได้กระจายอยู่ในสารระเหยและชาร์ และเนื่องจากไม่มีเหตุผลที่จะสมมติว่ากำมะถันได้กระจายในสารระเหยและชาร์เท่ากัน ดังนั้น สัดส่วนของกำมะถันในสารระเหยและในชาร์ควรจะกำหนดแยกจากกัน

4.2.2.6.1 SO_2 และ H_2S จากชาร์

แหล่งกำเนิดของ SO_2 และ H_2S จากชาร์ที่สัมพันธ์กับอัตราการเผาไหม้ชาร์

$$S_{char,i} = \frac{S_c Y_{S,char} M_{w,i}}{M_{w,S} V} \quad (4.159)$$

ซึ่ง

S_c = อัตราการเผาไหม้ชาร์ (kg/s)

$S_{char,i}$ = แหล่งกำเนิดของ i ($\text{kg/m}^3\text{-s}$) ในชาร์ ซึ่ง $i = \text{SO}_2$ หรือ H_2S

$Y_{S,char}$ = สัดส่วนมวลของกำมะถันในชาร์

V = ปริมาตรเซลล์ (m^3)

4.2.2.6.2 SO_2 และ H_2S จากสารระเหย

แหล่งกำเนิดของ SO_2 และ H_2S จากสารระเหยสัมพันธ์กับอัตราการปล่อยสารระเหย

$$S_{vol,i} = \frac{S_{vol} Y_{S,vol} M_{w,i}}{M_{w,SV}} \quad (4.160)$$

ซึ่ง

$S_{vol,i}$ = การกำเนิดสารระเหยจากอนุภาคถ่านสู่สถานะก๊าซ (kg/s) ซึ่ง $i = SO_2$ หรือ

H_2S

$Y_{S,vol}$ = สัดส่วนมวลของกำมะถันในสารระเหย

V = ปริมาตรเซลล์ (m^3)

4.2.2.7 การก่อเกิด SO_x ในการไหลปั่นป่วน

กลไกโคเคนติกของการเกิดและการทำลาย SO_x ได้มาจากการทดลองในห้องแล็บใน โดยมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกับแบบจำลอง NO_x ในระบบการเผาไหม้ใดๆ ที่การไหลมีความปั่นป่วนสูง ผลลัพธ์กระบวนการผสมที่ปั่นป่วนในความผันผวนชั่วขณะของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสปีชีส์ซึ่งจะมีผลต่อลักษณะของเปลวไฟ

ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิด SO_x ทั้งหมด ได้แก่ อุณหภูมิและความเข้มข้นของสปีชีส์ซึ่งมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ถ้านำองค์ประกอบเวลาเฉลี่ยและอุณหภูมิไปใช้ในแบบจำลองใดๆ เพื่อทำนายอัตราการก่อเกิด SO_x เฉลี่ยจะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่ผิดพลาดของอัตราการก่อเกิด SO_x นั้นๆ ฉะนั้นอุณหภูมิและองค์ประกอบที่ผันผวนต้องนำไปคำนวณด้วยโดยพิจารณาฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นซึ่งอธิบายการแปรเปลี่ยนของคุณสมบัติเมื่อเทียบกับเวลา

4.2.2.7.1 แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารเคมีและความปั่นป่วน

การคำนวณการเผาไหม้แบบปั่นป่วน โปรแกรมจะคำนวณสมการนาร์เวียร์สโตกส์แบบถ่วงน้ำหนักด้วยความหนาแน่น โดยเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง สำหรับอุณหภูมิ ความเร็วและความเข้มข้นของสปีชีส์หรือ mixture fraction และค่าความแปรปรวน เพื่อที่จะคำนวณความเข้มข้นของ SO_2 และเวลาเฉลี่ยของอัตราการเกิด SO_2 ซึ่งจะต้องคำนวณที่แต่ละจุดในโดเมนโดยใช้ข้อมูลสนามการไหลเฉลี่ย

4.2.2.7.2 PDF

วิธี PDF ได้พิสูจน์แล้วว่ามิใช่ประโยชน์ในการใช้อธิบายทฤษฎีของการไหลปั่นป่วน [86] แบบจำลองจะใช้พารามิเตอร์ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบเดี่ยว หรือแบบผสม (single หรือ joint-variable PDF) ที่อยู่ในรูปของอุณหภูมิที่ปรับค่าแล้ว และค่าของความเข้มข้นเชิงมวล หรือทั้งสองค่า ในการทำนายการปลดปล่อย SO_x ในกรณีที่ใช้แบบจำลองการเผาไหม้แบบ non-premixed พารามิเตอร์ความหนาแน่นของความน่าจะเป็น จะอยู่ในรูปของ mixture fraction ค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระที่ต้องการใช้ สำหรับการสร้าง PDF นั้นจะ ได้มาจากการแก้สมการการถ่ายเท

4.2.2.7.3 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ย

อัตราปฏิกิริยาปั่นป่วนเฉลี่ยได้อธิบายไว้ในส่วนที่ 4.2.2.7 ของแบบจำลอง NO_x สามารถประยุกต์ใช้ได้กับแบบจำลอง SO_x ดังนั้น PDF ยังเหมาะกับการใช้สำหรับถ่วงน้ำหนักอัตราของการผลิต SO₂ ชั่วขณะใดๆ และทำการอินทิเกรตตลอดช่วงเวลาหนึ่งเพื่อได้มาซึ่งอัตราการผลิตปั่นป่วนเฉลี่ย ดังแสดงในสมการ 4.140 และ 4.141 ของแบบจำลอง NO_x

4.2.2.7.4 ตัวเลือก PDF

ความดัน P สามารถคำนวณแบบ Two-moment beta function หรือเป็นแบบ Clipped Gaussian function อย่างใดอย่างหนึ่ง ตามความเหมาะสมกับลักษณะการคำนวณการเผาไหม้ [87, 88] เช่นเดียวกับกรณีของแบบจำลอง NO_x สมการ 4.144-4.148 สามารถประยุกต์ใช้ได้กับแบบจำลอง SO_x เช่นกัน ซึ่งความแปรปรวน σ^2 คำนวณโดยการแก้สมการการถ่ายเทระหว่างการคำนวณการเผาไหม้ โดยใช้สมการ 4.149 หรือสมการ 4.150

4.3 เฟสที่ไม่ต่อเนื่อง

ในส่วนนี้ได้อธิบายถึงทฤษฎีการจำลองเฟสที่ไม่ต่อเนื่องของลากรัง (Lagrangian discrete phase) อันประกอบด้วย

- 4.3.1 บทนำ
- 4.3.2 ทฤษฎีการเคลื่อนไหวของอนุภาค
- 4.3.3 กฎสัมประสิทธิ์แรงลาก
- 4.3.4 กฎของการแลกเปลี่ยนมวลและความร้อน
- 4.3.5 ทฤษฎีแบบจำลอง Wall-Jet

- 4.3.6 การคำนวณควบคู่ทางเดียวหรือสองทาง

4.3.1 บทนำ

ความก้าวหน้าทางด้านวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลที่มีมากขึ้น ทำให้เราได้รับความเข้าใจที่ลึกซึ้งถึงพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของการไหลที่มีการผสมกันระหว่างของไหลและของแข็งหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าของไหลหลายสถานะ โดยปัจจุบันได้มีแนวทางสำหรับการคำนวณการไหลหลายสถานะอยู่ 2 แนวทาง ได้แก่ แนวทางของ ออยเลอร์-ลากรัง (Euler-Lagrange) และแนวทางของ ออยเลอร์-ออยเลอร์ (Euler-Euler)

ออยเลอร์-ลากรัง (Euler-Lagrange)

แบบจำลองเฟสที่ไม่ต่อเนื่องของลากรัง (Lagrangian discrete phase) จะถือว่าสถานะของไหลเป็นคอนทินิวอัม (continuum) โดยการหาคำตอบของสมการนาเวียร์-สโตกส์ ขณะที่เฟสของอนุภาค ไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ฟองหรือหยดของเหลว จะทำการหาคำตอบโดยติดตามกลุ่มของอนุภาค ฟองหรือหยดของเหลวตลอดทั่วทั้งสนามการไหลที่ได้คำนวณไว้แล้ว เฟสที่เกิดการแยกตัวนี้สามารถแลกเปลี่ยน โมเมนตัม, มวลและพลังงานกับสถานะของเหลวได้

ข้อสมมุติพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองชนิดนี้จะสมมุติว่าการแยกตัวครั้งที่สองนั้น จะมีสัดส่วนในปริมาตรที่ต่ำ ถึงแม้ว่ามวลที่ใส่เข้าไปจะมีค่ามาก ($m_{particle} \geq m_{fluid}$) ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ในงานทางด้านกาเผาไหม้ของผงถ่านหิน หรือละอองหยดน้ำมัน โดยเส้นโคจรของอนุภาคหรือหยดอนุภาคจะคำนวณที่ละจุดในลักษณะจุดต่อจุดตามขอบเขตที่กำหนดไว้ในระหว่างการคำนวณในส่วนของการไหล โดยส่วนนี้เองที่ทำให้แบบจำลองมีความเหมาะสมสำหรับจำลองผลของ spray dryer การเผาไหม้ถ่านหินและการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวและการไหลของอนุภาคที่หนักมาก แต่จะไม่เหมาะสมสำหรับจำลองผลของของผสมระหว่างของเหลวกับของเหลว ฟลูอิด ไคซ์เบสหรือการใช้ใดๆ ที่สัดส่วนปริมาตรของการแยกตัวครั้งที่สองไม่สามารถละทิ้งได้ (มีค่าสูง)

4.3.2 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของอนุภาค

- 4.3.2.1 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค
- 4.3.2.2 การแพร่กระจายความปั่นป่วนของอนุภาค
- 4.3.2.3 การอินทิเกรตสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค

4.3.2.1 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค

สมดุลแรงของอนุภาค

แบบจำลองจะทำการคำนวณวงโคจรของอนุภาค (ของแข็ง หรือหยด หรือฟอง) โดยอินทิเกรตสมดุลแรงบนอนุภาค โดยคำนวณบนกรอบอ้างอิงลากรัง ซึ่งสมดุลแรงที่เท่ากันระหว่างแรงเฉื่อยของอนุภาคกับแรงที่กระทำต่ออนุภาค สามารถเขียนได้ดังนี้ (สำหรับทิศทาง x ในพิกัดคาร์ทีเซียน)

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (4.161)$$

ซึ่ง F_x เป็นความเร่งที่เพิ่มเข้ามา (แรง/หนึ่งหน่วยมวลอนุภาค) พจน์ $F_D(u - u_p)$ เป็นแรงจุดต่อหนึ่งหน่วยมวลอนุภาคและ

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \quad (4.162)$$

ซึ่ง u เป็นความเร็วในส่วนของไหล u_p เป็นความเร็วอนุภาค μ เป็นความหนืดของของไหล ρ ความหนาแน่นของไหล ρ_p ความหนาแน่นของอนุภาคและ d_p เส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค Re เป็นเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ซึ่งกำหนดได้ดังนี้

$$Re \equiv \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (4.163)$$

4.3.2.2 การแพร่กระจายของอนุภาคอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน

การกระจายของอนุภาคเนื่องมาจากความปั่นป่วนในส่วนของไหลสามารถทำนายได้โดยใช้แบบจำลองการเดินทางแบบสุ่มหรือแบบจำลองกลุ่มหมอกอนุภาค ซึ่งแบบจำลองการเดินทางแบบสุ่ม (Random walk) ได้รวมผลกระทบของความผันผวนความเร็วที่ปั่นป่วนอย่างฉับพลันบนเส้นทางเดินของอนุภาค แบบจำลองได้ใช้หลักการเชิงสถิติในการกำหนดลักษณะของการกระจายของกลุ่มหมอกอนุภาคที่กระจายอยู่รอบๆ เส้นทางเดินเฉลี่ย ความเข้มข้นของอนุภาคภายในกลุ่มหมอกแสดงได้โดย Gaussian probability density function (PDF) รอบๆ เส้นทางเดินเฉลี่ย สำหรับแบบจำลองทางเดินของอนุภาคแบบสุ่ม จะมีเฉพาะการคำนวณการเกิดขึ้นหรือสลายตัวของความปั่นป่วนในเฟสต่อเนื่อง

อนึ่ง การแพร่กระจายของอนุภาคเนื่องจากความปั่นป่วนไม่สามารถคำนวณได้ ถ้าเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Spalart-Allmaras

การติดตามแบบสุ่ม

เมื่อการไหลเป็นแบบปั่นป่วน จะต้องทำการคำนวณเส้นทางเดินของอนุภาคโดยใช้ความเร็วของไหลเฉลี่ย \bar{u} ในสมการเส้นทางเดิน (สมการ 4.161) ซึ่งจะรวมค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของความเร็วของก๊าซที่ผันผวน (u') ไว้ด้วยเพื่อที่จะทำนายการแพร่กระจายของอนุภาคอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน

$$u = \bar{u} + u' \quad (4.164)$$

ในวิธีการจำลองทางเดินแบบสุ่ม การคำนวณการแพร่กระจายของอนุภาคเนื่องจากความปั่นป่วนโดยการอินทิเกรตสมการเส้นทางเดินสำหรับแต่ละอนุภาค โดยการใช้ความเร็วของไหลที่ฉับพลัน $\bar{u} + u'(t)$ และอินทิเกรตตลอดทั้งเส้นทางเดินของอนุภาค ผลกระทบแบบสุ่มของความปั่นป่วนที่มีต่อการแพร่กระจายของอนุภาคที่เกิดขึ้นก็สามารถนำมารวมไว้ในการคำนวณได้

ในการใช้วิธีการแบบสุ่ม (แบบจำลองทางเดินแบบสุ่ม) เพื่อที่จะกำหนดความเร็วก๊าซที่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ในแบบจำลองทางเดินแบบสุ่มที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Random Walk) นั้น องค์ประกอบความเร็วที่ผันแปรนั้นจะเป็นฟังก์ชันแบบ Discrete Piecewise Constant Functions ที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งค่าสุ่มเหล่านั้นจะเป็นค่าคงที่ตลอดทั้งช่วงเวลาที่ได้มาจากช่วงเวลาของการไหลวน

แบบจำลอง DRW อาจจะทำให้ผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามหลักกายภาพในการไหลที่มีการฟุ้งกระจายสูงและไม่เป็นเนื้อเดียวกันอย่างมาก ซึ่งอนุภาคจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอโดยที่ DRW จะแสดงมีแนวโน้มที่ให้ผลการกระจายตัวของกลุ่มอนุภาคในบริเวณที่มีความปั่นป่วนน้อย

ช่วงเวลาของการอยู่ในกระแสมุขวน

การทำนายการกระจายของอนุภาคจะใช้ช่วงเวลา T ซึ่งหมายถึงเวลาที่อนุภาคใช้ในขณะอยู่ในความปั่นป่วนในระยะทาง ds

$$T = \int_0^\infty \frac{u'_p(t)u'_p(t+s)}{u_p'^2} ds \quad (4.165)$$

ช่วงเวลาดังกล่าวเป็นส่วนสำคัญโดยตรงต่ออัตราการฟุ้งกระจายของอนุภาค เมื่อคาบเวลาที่มีค่ามาก แสดงถึงความปั่นป่วนในการไหลที่มากขึ้น ซึ่งสามารถแสดงการฟุ้งกระจายของอนุภาคได้ในพจน์ $\overline{u'_p^2}/T$ สำหรับอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเคลื่อนที่ไปกับของไหล (ความเร็วคลื่นไหลเป็น

ศูนย์) จะกลายเป็นเวลาถาวร (Lagrangian) ของของไหล T_L โดยช่วงเวลาตามนิยามสามารถประมาณได้ดังนี้

$$T_L = C_L \frac{k}{\epsilon} \quad (4.166)$$

ซึ่ง C_L ต้องถูกกำหนดเนื่องจากเป็นตัวแปรไม่ทราบค่าชัดเจน โดยการจับคู่กับการฟุ้งกระจายของอนุภาคขนาดเล็กที่มีปริมาณน้อย $\overline{u'u'} T_L$ กับอัตราการฟุ้งกระจายที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน ν_t/σ เราจะได้

$$T_L \approx 0.15 \frac{k}{\epsilon} \quad (4.167)$$

เมื่อใช้ร่วมกับแบบจำลอง $k - \epsilon$ และแบบจำลองที่อยู่ในกลุ่มนี้ ในขณะที่ค่า T_L จะหาได้จาก

$$T_L \approx 0.30 \frac{k}{\epsilon} \quad (4.168)$$

ถ้าใช้แบบจำลอง Reynolds stress model (RSM) [98]

แบบจำลองการเดินแบบสุ่มไม่ต่อเนื่อง

ในแบบจำลองการเดินแบบสุ่มไม่ต่อเนื่อง (DRW) หรือแบบจำลอง "eddy lifetime" นั้นปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคกับของไหลหมุนวนปั่นป่วนที่ไม่ต่อเนื่องจะถูกจำลอง ลักษณะของการหมุนวนจะจำแนกได้โดย

- การกระจายแบบ Gaussian ของความเร็วแปรวนแบบสุ่ม, u' , v' และ w'
- ขนาดของเวลาของความปั่นป่วน, τ_e

ค่าของ u' , v' และ w' ที่เกิดขึ้นในช่วงอายุการไหลวนปั่นป่วนนั้น จะถูกนำมาใช้คำนวณโดยสมมุติว่ามีลักษณะความน่าจะเป็นไปได้ ลักษณะของ Gaussian probability distribution ดังนั้น จะได้

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (4.169)$$

ซึ่ง ζ เป็นค่าการกระจายความน่าจะเป็นแบบสุ่มแบบปกติและค่า $\sqrt{u'^2}$ ทางด้านขวามือเป็นค่า RMS ของความเร็วแปรปรวน เนื่องจากทราบค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนในแต่ละจุดในการไหล ค่า RMS ของส่วนผันแปรของความเร็วของของไหลสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} = \sqrt{2k/3} \quad (4.170)$$

สมการที่ 4.170 ใช้สำหรับแบบจำลอง $k - \epsilon$ แบบจำลอง $k - \omega$ และแบบจำลองอื่นๆ ที่มีอยู่ในกลุ่มนี้ ถ้ามีการใช้แบบจำลอง RSM ความไม่เป็นไอโซโทรปีของความเค้นจะถูกรวมเข้าเพื่อใช้ในการหาค่าความเร็วผันผวน

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (4.171)$$

$$v' = \zeta \sqrt{v'^2} \quad (4.172)$$

$$w' = \zeta \sqrt{w'^2} \quad (4.173)$$

เมื่อมองในมุมพิกัดอ้างอิงที่ลักษณะของ โมเมนต์ของความปั่นป่วนมีความสมมาตร [99] สำหรับแบบจำลอง LES ความเร็วแปรปรวนจะเท่ากันในทุกๆทิศทาง เวลาบ่งชี้คุณลักษณะของการหมุนวนอาจถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่

$$\tau_e = 2T_L \quad (4.174)$$

ซึ่ง T_L ได้มาโดยสมการ 4.166 (สมการ 4.167 เป็นสมการมาตรฐาน) หรืออาจถูกกำหนดเป็นค่าสูงขึ้นรอบๆ T_L

$$\tau_e = -T_L \ln(r) \quad (4.175)$$

ซึ่ง r เป็นค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 และ T_L ได้มาจากสมการ 4.167 ซึ่งการคำนวณจากค่าแบบตื้นนี้จะให้ค่าที่สมจริงมากกว่า

เวลาที่อนุภาคใช้ในการข้ามการหมุนวนกำหนดโดย

$$t_{cross} = -\tau \ln \left[1 - \left(\frac{L_e}{\tau |u - u_p|} \right) \right] \quad (4.176)$$

ซึ่ง τ เป็นค่ารีแลกเซชัน (relaxation) ของเวลาของอนุภาค L_e เป็น eddy length scale และ $|u - u_p|$ เป็นขนาดของความเร็วสัมพัทธ์ อนุภาคจะถูกสมมุติว่ามีปฏิสัมพันธ์กับการหมุนวนของของไหลในช่วงเวลาตามช่วงอายุการหมุนวนของของไหลและเวลาในการข้ามการหมุนวนนั้น เมื่อเวลาของการมีปฏิสัมพันธ์นั้นมาถึงก็จะมีการคำนวณค่าความผันแปรของความเร็วใหม่ โดยใช้ค่า ζ ใหม่ จากสมการ 4.169

4.3.2.3 การอินทิเกรตสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค

สมการเส้น โคจรและสมการองค์ประกอบใดๆ ที่อธิบายถึงการถ่ายเทความร้อนหรือมวลไปยัง/จากอนุภาค คำนวณได้โดยการอินทิเกรตช่วงเวลาย่อยตลอดทั้งช่วงเวลาที่ไม

ต่อเนื่อง ซึ่งการอินทิเกรตในช่วงเวลาในสมการ 4.161 จะทำให้ได้ความเร็วอนุภาคที่แต่ละจุดตลอดเส้นทางโคจร โดยเส้นทางโคจรสามารถทำนายได้โดย

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (4.177)$$

สมการ 4.161 และ 4.177 เป็นชุดของสมการอนุพันธ์ปกติ และสมการ 4.161 สามารถแทนลงในแบบฟอร์มโดยทั่วไปดังต่อไปนี้

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p}(u - u_p) + a \quad (4.178)$$

ซึ่งพจน์ a รวมความเร่งเนื่องมาจากแรงอื่นๆ ทั้งหมดยกเว้นแรงจุด ซึ่งชุดนี้สามารถใช้สำหรับแก้หาค่าคงที่ u , a และ τ_p โดยใช้การอินทิเกรตเชิงวิเคราะห์สำหรับความเร็วอนุภาคที่ตำแหน่งใหม่ u_p^{n+1} จะได้

$$u_p^{n+1} = u^n + e^{\frac{\Delta t}{\tau_p}}(u_p^n - u^n) - a\tau_p \left(e^{\frac{\Delta t}{\tau_p}} - 1 \right) \quad (4.179)$$

ตำแหน่งใหม่ x_p^{n+1} สามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน ได้ดังนี้

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \Delta t(u^n + a\tau_p) + \tau_p \left(1 - e^{\frac{\Delta t}{\tau_p}} \right) (u_p^n - u^n - a\tau_p) \quad (4.180)$$

ในสมการนี้ u_p^n และ u^n แสดงถึงความเร็วของอนุภาคและความเร็วของไหลที่ตำแหน่งเก่า สมการ 4.179 และ 4.180 จะถูกใช้ในสมการเชิงวิเคราะห์ของวิธีการ Discretization ชุดของสมการ 4.161 และสมการ 4.177 สามารถแก้ได้โดยใช้วิธีการ Discretization เมื่อใช้ร่วมกับการแยกตัวของ Euler กับสมการ 4.178 จะได้

$$u_p^{n+1} = \frac{u_p^n + \Delta t \left(a + \frac{u^n}{\tau_p} \right)}{1 + \frac{\Delta t}{\tau_p}} \quad (4.181)$$

เมื่อประยุกต์วิธีกับ trapezoidal discretization กับสมการ 4.178 ตัวแปร u_p และ u_n บนด้านขวาจะเป็นค่าเฉลี่ย ขณะที่ความเร่ง a อันเนื่องมาจากแรงอื่นๆ ถูกกำหนดให้คงที่ในช่วงเวลา จะได้

$$\frac{u_p^{n+1} - u_p^n}{\Delta t} = \frac{1}{\tau_p}(u^* - u_p^*) + a^n \quad (4.182)$$

ค่าเฉลี่ย u_p^* และ u^* คำนวณจาก

$$u_p^* = \frac{1}{2}(u_p^n + u_p^{n+1}) \quad (4.183)$$

$$u^* = \frac{1}{2}(u^n + u^{n+1}) \quad (4.184)$$

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t u_p^* \cdot \nabla u^n \quad (4.185)$$

ความเร็วอนุภาคที่ตำแหน่งใหม่ $n + 1$ คำนวณโดย

$$u_p^{n+1} = \frac{u_p^n \left(1 - \frac{\Delta t}{2\tau_p}\right) + \frac{\Delta t}{\tau_p} \left(u^n + \frac{1}{2} \Delta t u_p^* \cdot \nabla u^n\right) + \Delta t a}{1 + \frac{\Delta t}{2\tau_p}} \quad (4.186)$$

สำหรับ implicit และ trapezoidal scheme ตำแหน่งอนุภาคใหม่จะคำนวณโดย trapezoidal discretization ของสมการ 4.177 โดยตลอด จะได้

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \frac{1}{2} \Delta t (u^n + u_p^{n+1}) \quad (4.187)$$

สมการ 4.177 และ 4.178 สามารถคำนวณโดยใช้แบบแผน Runge-Kutta ซึ่งเผยแพร่โดย Cash and Karp [105] สมการอนุพันธ์สามารถพิจารณาแบบเวกเตอร์ได้ ซึ่งทางด้านซ้ายมือเป็นอนุพันธ์ \dot{y} และทางด้านขวามือเป็นอาภิหาร์ฟังก์ชัน $f(t, y)$

$$\dot{y} = f(t, y) \quad (4.188)$$

จะได้

$$\dot{y}^{n+1} = \dot{y}^n + c_1 \vec{k}_1 + c_2 \vec{k}_2 + c_3 \vec{k}_3 + c_4 \vec{k}_4 + c_5 \vec{k}_5 + c_6 \vec{k}_6 \quad (4.189)$$

กับ

$$\vec{k}_1 = \Delta t f(t, \dot{y}^n)$$

$$\vec{k}_2 = \Delta t f(t + a_2 \Delta t, \dot{y}^n + b_{21} \vec{k}_1)$$

$$\vec{k}_3 = \Delta t f(t + a_3 \Delta t, \dot{y}^n + b_{31} \vec{k}_1 + b_{32} \vec{k}_2)$$

$$\vec{k}_4 = \Delta t f(t + a_4 \Delta t, \dot{y}^n + b_{41} \vec{k}_1 + b_{42} \vec{k}_2 + b_{43} \vec{k}_3)$$

$$\vec{k}_5 = \Delta t f(t + a_5 \Delta t, \dot{y}^n + b_{51} \vec{k}_1 + b_{52} \vec{k}_2 + b_{53} \vec{k}_3 + b_{54} \vec{k}_4)$$

$$\vec{k}_6 = \Delta t f(t + a_6 \Delta t, \dot{y}^n + b_{61} \vec{k}_1 + b_{62} \vec{k}_2 + b_{63} \vec{k}_3 + b_{64} \vec{k}_4 + b_{65} \vec{k}_5)$$

สัมประสิทธิ์ $a_2 \dots a_6, b_{21} \dots b_{65}$, และ $c_1 \dots c_6$ ได้มาจาก Cash and Karp [105]

สำหรับกรอบอ้างอิงแบบหมุน การอินทิเกรตจะให้ผลในส่วนกรอบอ้างอิงแบบหมุนกับพจน์พิเศษที่อธิบายในสมการ 4.166 และ 4.167 ซึ่งเหมาะกับระบบที่มีการหมุน เมื่อใช้กลไกที่มีการควบคุมความถูกต้อง โดยการอินทิเกรตเส้นโคจรจะต้องสำเร็จอย่างถูกต้อง

แบบแผนการวิเคราะห์นี้มีประสิทธิภาพมาก แต่ความแม่นยำจะลดลงเมื่อช่วงเวลามีค่ามากและอยู่ในสถานการณ์ที่ซึ่งอนุภาคไม่สมดุลของ hydrodynamic กับ การไหลที่ต่อเนื่อง แบบแผนทางคณิตศาสตร์ implicit และ trapezoidal ที่รวมกับ Automated Tracking Scheme Selection ทำให้การพิจารณาส่วนใหญ่เป็นการเปลี่ยนแปลงในส่วนของแรงที่กระทำต่ออนุภาคและส่วนใหญ่จะเลือกเป็นแบบแผนมาตรฐาน โดย The runge-kutta scheme จะแนะนำให้ใช้สำหรับการอินทิเกรตตลอดทั้งอนุภาคที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแรง

ขนาดของช่วงการอินทิเกรตของอนุพันธ์อันดับสูง ได้แก่ trapezoidal และ runge-kutta จะจำกัดอยู่ในช่วงที่มีเสถียรภาพช่วงหนึ่ง ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้ร่วมกับ Automated Tracking Scheme Selection

สำหรับอนุภาคที่ไรวลนั้นความเร็วของอนุภาคจะเท่ากับความเร็วของของไหล ซึ่งการแก้ปัญหาต้องใช้สมการเส้นทางโคจร 4.177 เท่านั้น ซึ่งความเร็วอนุภาค $u_p = u$ ที่ตำแหน่งใหม่ของอนุภาคตลอดทั้งเส้น โคจรจะถูกคำนวณด้วยสมการ 4.185 และ 4.187 กับ $u_p = u$

4.3.3 กฎของสัมประสิทธิ์แรงลาก

มีกฎอยู่หลายกฎสำหรับสัมประสิทธิ์แรงลาก C_D ที่สามารถเลือกใช้ได้ในแบบจำลอง Euler-Lagrange

- 4.3.3.1 กฎแรงลากของวัตถุทรงกลม
- 4.3.3.2 กฎแรงลากของ Stokes-Cunningham
- 4.3.3.3 กฎแรงลากที่เลขมัคสูงๆ
- 4.3.3.4 ทฤษฎีแบบจำลองแรงลากไดนามิก

4.3.3.1 กฎแรงลากของวัตถุทรงกลม

สัมประสิทธิ์แรงลาก C_D สำหรับอนุภาคผิวเรียบสามารถหาได้จาก

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (4.190)$$

ซึ่ง a_1, a_2 และ a_3 เป็นค่าคงที่ซึ่งใช้ตลอดทุกๆ ช่วงของ Re ที่ให้ไว้โดย Morsi and Alexander [106]

4.3.3.2 กฎแรงลากของ Stokes - Cunningham

สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็ก รูปแบบของ Stokes' drag law ทำได้ใน [108] ในกรณีนี้ F_D นิยามได้ดังนี้

$$F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_c} \quad (4.191)$$

องค์ประกอบ C_c เป็นค่าแก้ไข Cunningham ของ Stokes' drag law ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-(1.1d_p/2\lambda)}) \quad (4.192)$$

ซึ่ง λ เป็นเส้นทางการอิสระเฉลี่ยของโมเลกุล

4.3.3.3 ทฤษฎีแบบจำลองแรงลากโคเนนามิกส์

การกำหนดความแม่นยำของสัมประสิทธิ์แรงลากบนหยดของเหลวนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการสเปรย์ที่มีความแม่นยำ ซึ่งจะมีวิธีที่จะกำหนดสัมประสิทธิ์แรงลากของหยดของเหลวแบบโคเนนามิกส์สำหรับคำนวณรูปร่างของหยดของเหลวที่มีรูปทรงหลากหลายแบบ

แบบจำลองแรงลากโคเนนามิกส์สามารถใช้ได้ในกรณีส่วนใหญ่ ซึ่งเข้ากันได้ทั้ง TAB และแบบจำลองคลื่นสำหรับหยดที่แตกตัว เมื่อมีการจำลองการปะทะกัน ซึ่งการชนกันทำให้เกิดการผิดรูปและความเร็วจะเปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากการผิดรูปนั่นเอง

แบบจำลองแรงลากของหยดของเหลวหลากหลายแบบจะสมมุติว่าหยดของเหลวนั้นยังคงเป็นทรงกลมตลอดทั้งโคเนน ด้วยการสมมุติฐานนี้แรงจากของวัตถุทรงกลมกำหนดโดย [110]

$$C_{d,sphere} = \begin{cases} 0.424 & Re > 1000 \\ \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{2/3}\right) & Re \leq 1000 \end{cases} \quad (4.193)$$

อย่างไรก็ตามขณะที่หยดของเหลวทรงกลมเริ่มต้นเคลื่อนที่ผ่านก๊าซ รูปร่างจะเปลี่ยนรูปไปเมื่อ Weber number มีค่ามาก ในกรณีที่ถึงขีดสุด รูปร่างหยดของเหลวจะมีลักษณะใกล้เคียงกับแผ่นกลม อย่างไรก็ตามแรงลากของแผ่นกลมมากกว่าแรงลากทรงกลม เนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงลากขึ้นอยู่กับรูปร่างของหยดของเหลว แบบจำลองแรงลากนั้นสมมุติว่าหยดของเหลวเป็นทรงกลมที่ไม่ค่อยดีนัก แบบจำลองแรงลากโคเนนามิกส์จะคำนวณในส่วนผลกระทบของการผิดรูปของหยดของเหลว โดยแรงลากจะแปรผันเชิงเส้นระหว่างทรงกลม

(สมการ 4.193) และสัมพัทธ์ระหว่างแผ่นกลมที่ค่า 1.54 [110] โดยสัมประสิทธิ์แรงลากเป็นดังนี้

$$C_d = C_{d,sphere}(1 + 2.632y) \quad (4.194)$$

ซึ่ง y เป็นการผิดรูปของหยดของเหลว ดังที่กำหนดโดย

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{C_F \rho_g u^2}{C_b \rho_l r^2} - \frac{C_k \sigma}{\rho_l r^3} - \frac{C_d \mu_l dy}{\rho_l r^2 dt} \quad (4.195)$$

ขอบเขตของกรณีที่ไม่มีการผิดรูป ($y = 0$) จะได้สัมประสิทธิ์แรงลากของทรงกลม ขณะที่การผิดรูปสูงสุด ($y = 1$) จะได้สัมประสิทธิ์แรงลากที่สอดคล้องกับแผ่นกลม จำไว้ว่าสมการ 4.195 ได้มาจากแบบจำลอง TAB ของการแตกตัวของสเปรย์ แต่แบบจำลองแรงลากไดนามิกส์สามารถใช้ร่วมกับแบบจำลองการแตกตัว

4.3.4 กฎการแลกเปลี่ยนมวลและความร้อน

แบบจำลองเฟสที่ไม่ต่อเนื่องนั้นสามารถจำลองการเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคหรือระลอกของเหลวและผลกระทบของปฏิกิริยาเหล่านี้บนเฟสที่ต่อเนื่องได้ โดยความสัมพันธ์ของการแลกเปลี่ยนมวลและความร้อนที่หลากหลายอยู่ในพจน์ของ “Laws” ซึ่งจะสามารถใช้จำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์โดยใช้กฎเหล่านี้อธิบายได้

โดยกฎที่จะเลือกนั้นขึ้นอยู่กับประเภทของอนุภาคที่เลือกไว้ ซึ่งในส่วนของ การกำหนดคุณสมบัติของตำแหน่งที่มีการฉีดอนุภาคจะสามารถกำหนดประเภทของอนุภาคและจะต้องใช้ค่าที่เลือกในการกำหนดกฎของการส่งผ่านมวลและพลังงาน สำหรับทุกประเภทของอนุภาคได้นิยามไว้สำหรับกฎทางฟิสิกส์ไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงการกำหนดกฎการแลกเปลี่ยนมวลและความร้อน
สำหรับแต่ละประเภทของอนุภาค

Particle Type	Description	Laws Activated
Massless	-	-
Inert	inert/heating or cooling	1, 6
Droplet	heating/evaporation/boiling	1, 2, 3, 6
Combusting	heating; evolution of volatiles/swelling; heterogeneous surface reaction	1, 4, 5, 6
Multicomponent	multicomponent droplets/particles	7

ยิ่งไปกว่านั้นเราสามารถเพิ่มอนุภาคที่เผาไหม้ให้รวมการระเหยและการเคี้ยวของธาตุต่างๆ นอกจากกฎทางฟิสิกส์ข้างต้น เราอาจจะเพิ่มเติมกฎทางฟิสิกส์อื่นๆ ได้อีก เช่น การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปียกที่รวมเอาการระเหยกลายเป็นไอของสสารเป็นต้น ซึ่งสามารถอธิบายสถานะการถ่ายเทมวลและความร้อนที่มีอยู่ในตารางที่ 4.5 ได้อธิบายรายละเอียดในส่วนต่อไป

4.3.4.1 Inert Heating or Cooling (Law 1/Law 6)

กฎการร้อนขึ้นหรือเย็นลงแบบช้าๆ (กฎข้อที่ 1 และ 6) จะถูกใช้เมื่ออุณหภูมิอนุภาคนั้นน้อยกว่าอุณหภูมิการระเหยเป็นไอซึ่งแทนด้วย T_{vap} และหลังจากอัตราส่วนสสารระเหย $f_{v,0}$ ของอนุภาคนั้นได้ระเหยไปแล้ว ณ ที่สถานะนี้สามารถเขียนได้ดังนี้

กฎข้อที่ 1:

$$T_p < T_{vap} \quad (4.196)$$

กฎข้อที่ 6:

$$m_p \leq (1 - f_{v,0})m_{p,0} \quad (4.197)$$

ซึ่ง T_p คือ อุณหภูมิอนุภาค $m_{p,0}$ เป็นมวลขณะเริ่มต้นของอนุภาค และ m_p เป็นมวลขณะปัจจุบัน

กฎข้อที่ 1 ถูกนำมาใช้เมื่ออุณหภูมิจนของอนุภาค/หยดของเหลวเข้าใกล้อุณหภูมิระเหย ณ จุดนี้อนุภาค/หยดของเหลวที่ไม่เสถียรอาจจะเข้าข่ายของกฎการถ่ายเทมวล (2, 3, 4, และ/หรือ 5) และย้อนกลับไปยังข้อที่ 6 เมื่อสสารระเหยบางส่วนของอนุภาค/หยดของเหลวได้ถูกใช้ไป

(อุณหภูมิระเหย T_{vap} เป็นแบบจำลองคงที่ที่ใช้ในการกำหนดการระเหย การเดือดและการปล่อยสารระเหย)

เมื่อใช้กฎข้อที่ 1 หรือกฎข้อที่ 6 ในการคำนวณนั้น จะต้องใช้สมดุลความร้อนแบบง่ายเพื่อที่จะเชื่อมโยงอุณหภูมิของอนุภาค $T_p(t)$ เพื่อนำความร้อนและดูดซึม/ปล่อยออกของการแผ่รังสีที่บริเวณผิวอนุภาค

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \epsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (4.198)$$

ซึ่ง

m_p = มวลของอนุภาค (kg)

c_p = ความจุความร้อนของอนุภาค (J/kg-K)

A_p = พื้นที่ผิวของอนุภาค (m^2)

T = อุณหภูมิบริเวณช่วงที่ต่อเนื่อง (K)

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2-K)

ϵ_p = การปลดปล่อยออกของอนุภาค (ไร้มิติ)

σ = ค่าคงที่สเตฟาน-โบลซ์แมน ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2-K^4$)

θ_R = อุณหภูมิแผ่รังสี $\left(\frac{G}{4}\right)^{1/4}$

สมการที่ 4.198 สมมุติว่าไม่มีความต้านทานความร้อน หมายถึง อนุภาคมีอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นผิว

G เป็นการแผ่รังสีหน่วย W/m^2

$$G = \int_{\Omega=4\pi} I d\Omega \quad (4.199)$$

ซึ่ง I เป็นความเข้มของการแผ่รังสีและ Ω เป็น solid angle

การแผ่รังสีความร้อนของอนุภาคนี้อาจรวมเฉพาะเข้าไปเมื่อใช้ P-1 หรือแบบจำลองการแผ่รังสีแบบ Discrete Ordinates (DO) และยังสามารถกำหนดให้มีการแผ่รังสีไปยังอนุภาคอื่นๆ ได้ สมการ 4.198 ได้รวมในส่วนของเวลาที่ใช้ในการประมาณ โดยจะเป็นรูปแบบเชิงเส้น ซึ่งจะสมมุติว่าอุณหภูมิของอนุภาคเปลี่ยนแปลงช้ามากจากเวลาหนึ่งไปยังอีกเวลาหนึ่ง

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = A_p \{-[h + \epsilon_p \sigma T_p^3] T_p + [h T_\infty + \epsilon_p \sigma \theta_R^4]\} \quad (4.200)$$

ตามเส้นทางเดินของอนุภาคที่ได้คำนวณไว้ สมการที่ 4.200 ได้ถูกรวมเข้าไปเพื่อที่จะได้มาซึ่งอุณหภูมิของอนุภาคที่ตำแหน่งเวลาที่ผ่านไป ดังนี้

$$T_p(t + \Delta t) = \alpha_p + [T_p(t) - \alpha_p]e^{-\beta_p \Delta t} \quad (4.201)$$

ซึ่ง Δt เป็นช่วงเวลา

$$\alpha_p = \frac{hT_\infty + \epsilon_p \sigma \theta_R^4}{h + \epsilon_p \sigma T_p^3(t)} \quad (4.202)$$

และ

$$\beta_p = \frac{A_p (h + \epsilon_p \sigma T_p^3(t))}{m_p c_p} \quad (4.203)$$

เราสามารถแก้สมการ 4.200 ซึ่งเป็นการรวมกันระหว่างสมการถ่ายเทมวลโดยใช้ stiff coupled solver โดยสัมพันธ์กับการถ่ายเทความร้อน h ได้ใช้การประมาณโดยใช้ความสัมพันธ์ของ Ranz and Marshall [111, 112]

$$Nu = \frac{hd_p}{k_\infty} = 2.0 + 0.6Re_d^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4.204)$$

ซึ่ง

d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (m)

k_∞ = ค่าความนำความร้อนของช่วงที่ต่อเนื่อง (W/m-K)

Re_d = ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ขึ้นกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็ว

Pr = พลังงานคัมเบอร์ของช่วงที่ต่อเนื่อง ($c_p \mu / k_\infty$)

ท้ายที่สุด ความร้อนที่สูญเสียหรือได้เพิ่มขึ้นของอนุภาคของการคำนวณในแต่ละเซลล์จะเปรียบเสมือนแหล่งกำเนิดหรือแหล่งระบายความร้อนในการคำนวณย่อยของเฟสที่ต่อเนื่องของสมการพลังงาน ระหว่างกฎข้อที่ 1 ถึง ข้อที่ 6 อนุภาค/หยดของเหลวไม่ได้มีการแลกเปลี่ยนมวลกับเฟสที่ต่อเนื่องและไม่มีส่วนร่วมในปฏิกิริยาเคมีใดๆ

4.3.4.2 การระเหยของหยดของเหลว (กฎข้อที่ 2)

กฎข้อที่ 2 จะใช้ในการทำนายการระเหยจากเฟสที่ไม่ต่อเนื่องของหยดของเหลว โดยกฎข้อที่ 2 จะเริ่มต้นเมื่ออุณหภูมิของหยดของเหลวเข้าใกล้เคียงกับอุณหภูมิระเหย T_{vap} และต่อเนื่องจนกระทั่งหยดของเหลวเข้าใกล้จุดเดือด T_{bp} หรือจนกระทั่งสัดส่วนของสารระเหยในหยดของเหลวนั้นได้ถูกบริโภคไปจนหมดแล้ว

$$T_{vap} \leq T_p \leq T_{bp} \quad (4.205)$$

$$m_p > (1 - f_{v,0})m_{p,0} \quad (4.206)$$

การเริ่มต้นของกฎการระเหยจะกำหนดโดยการตั้งค่าของ T_{vap} โดยตัวแปรของแบบจำลองนั้นไม่ได้มีความสำคัญทางฟิสิกส์ เนื่องจากเมื่อการระเหยครั้งแรกเริ่มขึ้น (โดยที่อุณหภูมิของหยดของเหลวเข้าใกล้ถึงอุณหภูมิบริเวณทางเข้า) การระเหยจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องถึงแม้กระทั่งอุณหภูมิของหยดของเหลวลดลงต่ำกว่า T_{vap} การระเหยจะเริ่มหยุดเมื่ออุณหภูมิของหยดของเหลวลดลงต่ำกว่าจุดควิพอยซ์เท่านั้น ในกรณีที่หยดของเหลวยังคงอยู่ภายใต้กฎข้อที่ 2 แต่ไม่มีการคาดการณ์การระเหยจะไว้ และเมื่อเข้าใกล้ถึงจุดเดือด การระเหยของหยดของเหลวจะคำนวณด้วยอัตราการเดือด (กฎข้อที่ 3) โดยจะอธิบายในส่วนถัดไป

4.3.4.2.1 การถ่ายเทมวลในกฎข้อที่ 2

ในระหว่างกฎข้อที่ 2 อัตราการระเหยจะถูกควบคุมโดยเกรเดียนของการฟุ้งกระจายซึ่งฟลักซ์ของไอของเหลวจะอยู่ในสถานะก๊าซและจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของไอที่แตกต่างกันที่บริเวณผิวและขนาดของหยดนั้นๆ

$$N_i = k_c(C_{i,s} - C_{i,\infty}) \quad (4.207)$$

ซึ่ง

N_i = โมลฟลักซ์ของไอ ($\text{kgmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

k_c = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (m/s)

$C_{i,s}$ = ความเข้มข้นไอที่ผิวของหยดของเหลว (kgmol/m^3)

$C_{i,\infty}$ = ความเข้มข้นเนื่องจากขนาดของก๊าซ (kgmol/m^3)

หมายเหตุ กฎของการระเหยจะสมมติว่า N_i เป็นบวก (ระเหย) ถ้าสถานะ ณ ปัจจุบันนั้นค่า N_i เป็นลบ (อุณหภูมิหยดของเหลวลดลงต่ำกว่าจุดควิพอยซ์และสถานะการควบแน่นยังอยู่) โปรแกรมจะจัดการให้หยดของเหลวเป็นก๊าซเฉื่อย ($N_i = 0.0$) ซึ่งความเข้มข้นของไอที่บริเวณผิวของหยดของเหลวประเมินได้จากการสมมติว่าความดันบางส่วนของไอที่เชื่อมต่อกันนั้นเท่ากับความดันไออิ่มตัว p_{sat} ที่อุณหภูมิหยดของเหลว T_p

$$C_{i,s} = \frac{p_{sat}(T_p)}{RT_p} \quad (4.208)$$

ซึ่ง R เป็นค่าคงที่สากลของก๊าซ

ความเข้มข้นของไอของก๊าซสามารถรู้ได้จากสมการการถ่ายเทของสปีชีส์ i สำหรับการคำนวณการเผาไหม้แบบ nonpremixed หรือ partially premixed

$$C_{i,\infty} = X_i \frac{p}{RT_\infty} \quad (4.209)$$

ซึ่ง X_i เป็นสัดส่วนโมลของสปีชีส์ i และ p เป็นความดันสัมบูรณ์และอุณหภูมิของก๊าซ และ T_∞ เป็นอุณหภูมิก๊าซในบริเวณนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในสมการ 4.207 คำนวณจากความสัมพันธ์ Sherwood number correlation [111, 112]

$$Sh_{AB} = \frac{k_c d_p}{D_{i,m}} = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3} \quad (4.210)$$

ซึ่ง

$D_{i,m}$ = สัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายของไอ (m^2/s)

Sc = Schmidt number, $\frac{\mu}{\rho D_{i,m}}$

d_p = เส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค (หยดของเหลว) (m)

พลิกซ์ของไอได้มาจากสมการ 4.207 กลายมาเป็นที่มาของสปีชีส์ i ในสมการถ่ายเทสปีชีส์ในสถานะก๊าซหรือในสมการอัตราส่วนของผสมสำหรับการคำนวณการเผาไหม้แบบ nonpremixed

มวลของหยดของเหลวลดลงตามสมการนี้

$$m_p(t + \Delta t) = m_p(t) - N_i A_p M_{w,i} \Delta t \quad (4.211)$$

ซึ่ง

$M_{w,i}$ = น้ำหนักโมเลกุลของสปีชีส์ i (kg/kgmol)

m_p = มวลของหยดของเหลว (kg)

A_p = พื้นที่ผิวของหยดของเหลว (m^2)

4.3.4.2.2 การถ่ายเทความร้อนไปยังหยดของเหลว

ท้ายที่สุดแล้วอุณหภูมิของหยดของเหลวจะถูกปรับค่าตามสมดุลความร้อนเมื่อมีการคำนวณซ้ำ ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงในหยดของเหลวที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนแบบการพาและความร้อนแผ่ระหว่างหยดของเหลว

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p \epsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (4.212)$$

ซึ่ง

c_p = ความจุความร้อนของหยดของเหลว (J/kg-K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- T_p = อุณหภูมิของหยดของเหลว (K)
 h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2\text{-K}$)
 T = อุณหภูมิของระยะต่อเนื่อง (K)
 $\frac{dm_p}{dt}$ = อัตราการระเหย (kg/s)
 ϵ_p = ค่าความเปล่งรังสีของอนุภาค (ไร้มิติ)
 σ = ค่าคงที่สเตฟาน-โบลซ์แมน ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}^4$)
 θ_R = อุณหภูมิแผ่รังสี $\left(\frac{T}{4\sigma}\right)^{1/4}$ ซึ่ง T คือ ความเข้มข้นของการแผ่รังสี

การแผ่รังสีความร้อนไปยังอนุภาคได้รวมอยู่ในแบบจำลองการแผ่รังสี P-1 หรือ discrete ordinates เท่านั้น

4.3.4.3 การเดือดของหยดของเหลว (กฎข้อที่ 3)

กฎข้อที่ 3 ใช้ในการทำนายการเดือดของหยดของเหลวที่เฟสไม่ต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิของหยดของเหลวเข้าใกล้อุณหภูมิจุดเดือด T_{bp} และขณะที่มวลของหยดของเหลวมากกว่าสัดส่วนของสารที่ไม่ระเหย $(1 - f_{v,0})$

$$T_p \geq T_{bp} \quad (4.213)$$

และ

$$m_p > (1 - f_{v,0})m_{p,0} \quad (4.214)$$

เมื่ออุณหภูมิของหยดของเหลวเข้าใกล้จุดเดือด สมการอัตราการเดือดเป็นดังนี้ [113]

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{4k_{\infty}}{\rho_p c_{p,\infty} d_p} (1 + 0.23\sqrt{Re_d}) \ln \left[1 + \frac{c_{p,\infty}(T_{\infty} - T_p)}{h_{fg}} \right] \quad (4.215)$$

ซึ่ง

$c_{p,\infty}$ = ความจุความร้อนของก๊าซ (J/kg-K)

ρ_p = ความหนาแน่นของหยดของเหลว (kg/m^3)

k_{∞} = ค่าความนำความร้อนของก๊าซ (W/m-K)

สมการที่ 4.215 มาจากการสมมติการไหลแบบคงตัวที่ความดันคงที่ ทั้งนี้แบบจำลองอยู่ในเงื่อนไข $T_{\infty} > T_{bp}$ ในกรณีสำหรับการเดือดที่เกิดขึ้นและหยดของเหลวนั้นยังคงอยู่ที่อุณหภูมิ (T_{bp}) ตลอดทั้งกฎการเดือด เมื่อมีการใช้การถ่ายเทรังสีความร้อน จะต้องใช้สมการ

ที่ 4.215 มาเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สืบเนื่องมาจากการเริ่มต้นที่สมการ 4.212 และสมมติว่า อุณหภูมิหยดของเหลวที่นั่นคงที่ ได้ดังนี้

$$-\frac{dm_p}{dt} h_{fg} = hA_p(T_\infty - T_p) + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (4.216)$$

หรือ

$$-\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{2}{\rho_p h_{fg}} \left[\frac{k_\infty Nu}{d_p} (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \right] \quad (4.217)$$

ใช้สมการที่ 4.204 สำหรับความสัมพันธ์ของนซ์ซิลนัมเบอร์และการแทนที่พลาตันด์นัมเบอร์ ด้วยค่าคงที่จากการทดลอง สมการที่ 4.217 จะกลายเป็น

$$-\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{2}{\rho_p h_{fg}} \left[\frac{2k_\infty + [1 + 0.23\sqrt{Re_d}]}{d_p} (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \right] \quad (4.218)$$

กรณีที่ไม่มีการแผ่รังสี ผลที่ได้นี้จะตรงกับสมการที่ 4.215 ในภายใต้ข้อจำกัดที่ว่า เทอม logarithm ในสมการ 4.215 เข้าใกล้ 1 สมการ 4.218 จะถูกใช้เมื่อการแผ่รังสีเข้ามามีส่วนร่วม ในแบบจำลองและสมการที่ 4.215 เมื่อไม่มีการแผ่รังสี การถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีไปยังอนุภาคจะมีขึ้นก็ต่อเมื่อมีการใช้แบบจำลอง P-1 หรือ discrete ordinates และได้มีการใช้การถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีไปยังอนุภาคโดยใช้การแผ่รังสีระหว่างอนุภาค

หยดของเหลวจะต้องสมมติให้มีอุณหภูมิคงที่ขณะที่อัตราการเดือดได้นำมาใช้คำนวณร่วมด้วย เมื่อกฎการเดือดได้เข้ามามีส่วนในช่วงของเส้นทางเดินของอนุภาค พลังงานที่ต้องการในการระเหยนั้นจะเป็น (ลบ) ของ source term ในสมการพลังงานสำหรับสถานะก๊าซ ของเหลวที่ระเหยเข้าสู่สถานะก๊าซกลายเป็นสปีชีส์ i ตามที่กำหนดโดยป้อนจุดหมายปลายทางของสปีชีส์

4.3.4.4 การปลดปล่อยสารระเหย (กฎข้อที่ 4)

กฎการปลดปล่อยสารระเหยจะใช้กับการเผาไหม้ของอนุภาคเมื่ออุณหภูมิของอนุภาคเข้าใกล้ถึงอุณหภูมิระเหยกลายเป็นไอ T_{vap} และยังคงมีผลกระทบอยู่ขณะที่มวลของอนุภาค m_p มากเกินกว่ามวลของอนุภาคที่ไม่ระเหย

$$T_p \geq T_{vap} \text{ and } T_p \geq T_{bp} \quad (4.219)$$

และ

$$m_p > (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0} \quad (4.220)$$

ซึ่ง $f_{w,0}$ เป็นสัดส่วนมวลของสสารที่ระเหย/เดือด และเมื่อมีการเผาไหม้แบบเปียก (Wet Combustion) ($f_{w,0} = 0$) ตามที่แสดงโดยสมการ 4.219 อุณหภูมิจุดเดือด T_{bp} และอุณหภูมิที่ระเหย T_{vap} ควรจะกำหนดให้เท่ากับอุณหภูมิอื่นๆ เมื่อเลือกใช้กฎข้อที่ 4 และเมื่อมีการเผาไหม้แบบเปียก T_{bp} และ T_{vap} จะหมายถึงอุณหภูมิจุดเดือดและอุณหภูมิระเหยเป็นไอของสสารที่เผาไหม้เท่านั้น

แบบจำลองการระเหยของสารระเหยแบ่งออกเป็น 4 แบบคือ

- 4.3.4.4.1 แบบจำลองอัตราคงที่ (ค่ามาตรฐาน)
- 4.3.4.4.2 แบบจำลองอัตราคิเนติกเดี่ยว
- 4.3.4.4.3 แบบจำลองสองอัตรา (the Kobayashi model)
- 4.3.4.4.4 แบบจำลอง chemical percolation devolatilization (CPD)

โดยแต่ละแบบจำลองได้อธิบายไว้ในด้านล่าง

4.3.4.4.1 แบบจำลองอัตราคงที่

กฎอัตราการระเหยคงที่ควบคุมอัตราการปลดปล่อยสารระเหยที่อัตราคงที่ [114]

$$\frac{1}{f_{v,0}(1-f_{w,0})m_{p,0}} \frac{dm_p}{dt} = A_0 \quad (4.221)$$

ซึ่ง

m_p = มวลอนุภาค (kg)

$f_{v,0}$ = สัดส่วนของสารระเหยเริ่มต้นในอนุภาค

$m_{p,0}$ = มวลเริ่มต้นของอนุภาค (kg)

A_0 = อัตราคงที่ (s^{-1})

อัตราคงที่ A_0 กำหนดให้เป็นในส่วนของแบบจำลองที่จะต้องป้อนค่า ซึ่งค่ามาตรฐานจะอยู่ที่ $12 s^{-1}$ โดยค่านี้ได้มาจากการทดลองของ Pillai [115] จากการเผาไหม้ถ่านหิน การใช้ค่าอัตราการปลดปล่อยสารระเหยที่เหมาะสมนั้นต้องการอุณหภูมิในการระเหย ซึ่งจะควบคุมการเริ่มต้นของการระเหยต้องกำหนดให้ลงตัว โดยค่าในบทความงานวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าอยู่ที่อุณหภูมิการระเหยอยู่ที่ประมาณ 600 K [114]

4.3.4.4.2 แบบจำลองอัตราคีเนติกเดี่ยว

แบบจำลองอัตราการปลดปล่อยสารระเหยสมมุติว่าอัตราการปลดปล่อยสารระเหยเป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่ขึ้นอยู่กับสารระเหยที่มีเหลืออยู่ในอนุภาค [24]

$$-\frac{dm_p}{dt} = k[m_p - (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0}] \quad (4.222)$$

ซึ่ง

m_p = มวลอนุภาค (kg)

$f_{v,0}$ = สัดส่วนของสารระเหยเริ่มต้นในอนุภาค

$f_{w,0}$ = สัดส่วนมวลของสารที่ระเหย/เดือดในอนุภาค (ถ้าเป็นแบบจำลองการเผาไหม้เปียก)

$m_{p,0}$ = มวลเริ่มต้นของอนุภาค (kg)

k = kinetic rate (s^{-1})

$f_{v,0}$ เป็นสัดส่วนของสารระเหยในอนุภาค ควรจะกำหนดให้มีค่ามากกว่าเล็กน้อยสำหรับการคำนวณโดยประมาณ อัตราคีเนติก k กำหนดโดยป้อนค่า Arrhenius type pre-exponential factor และค่าพลังงานกระตุ้น

$$k = A_1 e^{-(E/RT)} \quad (4.223)$$

โดยค่า A_1 และ E เป็นค่ามาตรฐาน [24]

สมการที่ 4.222 ใช้สำหรับการวิเคราะห์โดยประมาณ

$$m_p(t + \Delta t) = (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0} + [m_p(t) - (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0}]e^{-k\Delta t} \quad (4.224)$$

ซึ่งได้มาจากการสมมุติว่าอุณหภูมิของอนุภาคแปรเปลี่ยนเพียงเล็กน้อยระหว่างช่วงเวลาที่ไม่ต้องเนื่องในการอินทิเกรต

4.3.4.4.3 แบบจำลองสองอัตรา (the Kobayashi model)

แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองอัตราการปลดปล่อยสารระเหยที่น่าเสนอโดย Kobayashi [28]

$$\mathcal{R}_1 = A_1 e^{-(E_1/RT_p)} \quad (4.225)$$

$$\mathcal{R}_2 = A_2 e^{-(E_2/RT_p)} \quad (4.226)$$

ซึ่ง \mathcal{R}_1 และ \mathcal{R}_2 เป็นอัตราที่สมบูรณ์ซึ่งอาจจะควบคุมการปลดปล่อยสารระเหยที่มากกว่าช่วงอุณหภูมิต่างๆ อัตราคิเนติกสองอัตราได้ถูกถ่วงดุลเพื่อให้ได้รูปแบบของการปลดปล่อยสารระเหยดังนี้

$$\frac{m_p(t)}{(1-f_{w,0})m_{p,0}-m_a} = \int_0^t (\alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2) \exp\left(-\int_0^t (\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2) dt\right) dt \quad (4.227)$$

ซึ่ง

$m_p(t)$ = สารระเหยที่ขึ้นอยู่กับเวลา t

$m_{p,0}$ = มวลอนุภาคเริ่มต้นที่หัวฉีด

α_1, α_2 = yield factors

m_a = ปริมาณเชื้อในอนุภาค

แบบจำลอง Kobayashi ต้องใช้ข้อมูลในส่วนของตัวแปรอัตราคิเนติก A_1, E_1, A_2 และ E_2 และผลของปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ α_1 และ α_2 โดยจะใช้ค่ามาตรฐานสำหรับ yield factors ที่ 0.3 สำหรับปฏิกิริยาแรก (ช้า) และ 1.0 สำหรับปฏิกิริยาที่สอง (เร็ว) โดยในบทความ [28] ได้แนะนำว่า α_1 ใช้สำหรับกำหนดสัดส่วนของสารระเหยซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์โดยประมาณ เนื่องจากอัตรานี้แสดงถึงการปลดปล่อยสารระเหยที่อุณหภูมิต่ำ ตัวแปรปฏิกิริยาที่สอง α_2 ควรจะกำหนดให้เข้าใกล้หนึ่ง ซึ่งเป็นผลผลิตของสารระเหยที่อุณหภูมิสูงมาก จากค่ามาตรฐาน สมการที่ 4.227 จะอินทิเกรตตลอดช่วงเวลา โดยสมมุติอุณหภูมิของอนุภาคนั้นคงที่ตลอดช่วงเวลาย่อยๆ ที่ทำการอินทิเกรต

4.3.4.4 แบบจำลอง CPD

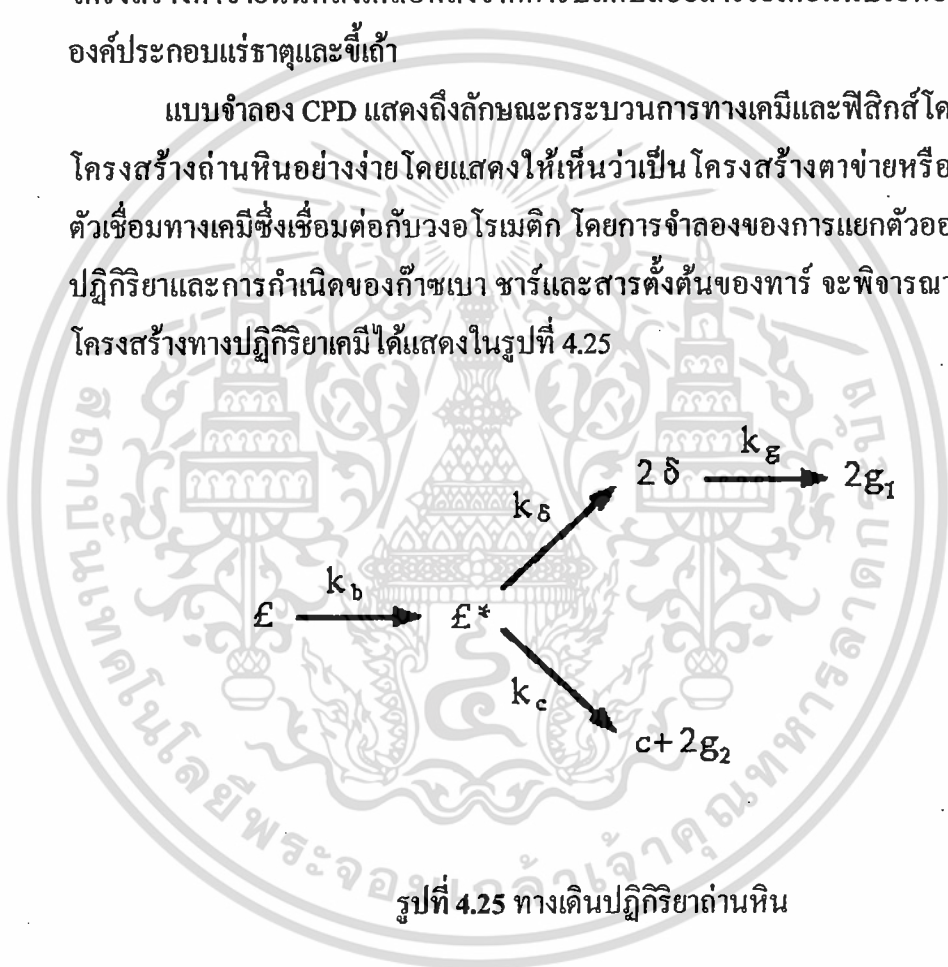
ตรงกันข้ามกับแบบจำลองการปลดปล่อยสารระเหยของถ่านหินก่อนหน้านี้ ซึ่งอยู่จะบนพื้นฐานจากการทดลอง แต่แบบจำลอง CPD เป็นแบบจำลองที่จำลองลักษณะพฤติกรรม การปลดปล่อยสารระเหยของถ่านหินที่ได้รับความร้อนอย่างรวดเร็ว โดยอยู่บนพื้นฐานทางเคมีและฟิสิกส์ของการเปลี่ยนรูปของถ่านหิน [34, 35, 40]

รายละเอียดโดยทั่วไป

ระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสของถ่านหิน พันธะที่ไม่คงตัวระหว่างวงแหวนอโรแมติก ใน โครงสร้างตาข่ายของถ่านหินได้ถูกแยกออก โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะแบ่งออกเป็นสองประเภท โดยประเภทแรกที่แยกออกมานั้นจะมีมวลโมเลกุลที่ต่ำ (และสอดคล้องกับความดัน

ไอที่สูง) และหลุดออกจากอนุภาคถ่านหินในรูปแบบก๊าซเบา และในส่วนอื่นๆ นั้นประกอบไปด้วยก๊าซทาร์ซึ่งมีมวลโมเลกุลสูงกว่า (และสอดคล้องกับความดันไอที่ต่ำ) และมีแนวโน้มที่จะยังคงอยู่ในถ่านหินเป็นเวลานานระหว่างการปลดปล่อยสารระเหย ในช่วงระยะเวลานี้จะเกิดการยึดติดใหม่กับโครงสร้างตาข่ายถ่านหิน (ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นการเชื่อมโยงแบบ crosslinking) ได้เกิดขึ้น มวลโมเลกุลที่สูงรวมตัวเข้ากับโครงสร้างที่เหลืออยู่ที่จะกล่าวได้ว่า เป็น metaplast โดยพฤติกรรมการอ่อนตัวลงของอนุภาคถ่านหินถูกกำหนดโดยปริมาณและธรรมชาติของ metaplast ที่กำเนิดขึ้นระหว่างการปลดปล่อยสารระเหย โดยสัดส่วนของโครงสร้างตาข่ายนั้นหลงเหลือหลังจากการปลดปล่อยสารระเหยนั้นประกอบด้วยชาร์และองค์ประกอบแร่ธาตุและซีเต้า

แบบจำลอง CPD แสดงถึงลักษณะกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์โดยพิจารณาจากโครงสร้างถ่านหินอย่างง่าย โดยแสดงให้เห็นว่าเป็น โครงสร้างตาข่ายหรือเครือข่ายของตัวเชื่อมทางเคมีซึ่งเชื่อมต่อกับวงอโรเมติก โดยการจำลองของการแยกตัวออกของทางเดินปฏิกิริยาและการกำเนิดของก๊าซเบา ชาร์และสารตั้งต้นของทาร์ จะพิจารณาให้เหมือนกับโครงสร้างทางปฏิกิริยาเคมีได้แสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ทางเดินปฏิกิริยาถ่านหิน

ตัวแปร \mathcal{L} แสดงถึงจำนวนของทางเดินปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ในโครงสร้างตาข่ายของถ่านหิน ขณะที่ได้รับความร้อน ทางเดินปฏิกิริยาเหล่านี้จะกลายเป็นชุดของทางเดินปฏิกิริยาของตัวเชื่อม \mathcal{L}^* สำหรับทางเดินปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นสองเส้นทาง ในทางเดินปฏิกิริยาแรกจะเกิดปฏิกิริยาเพื่อก่อตัวเป็น โมเลกุลลูกโซ่โดยโมเลกุลลูกโซ่อาจจะแยกออกจากวงอโรเมติกเพื่อก่อตัวเป็นก๊าซเบา g_1 ดังที่ตัวเชื่อมระหว่างวงอโรเมติกที่ใกล้เคียงได้ถูกแยกออก ดังนั้นจะมีส่วนของถ่านหินจำนวนหนึ่งถูกแยกออกจากโครงสร้างถ่านหิน โดยวงอโรเมติกที่แยก

ออกเหล่านี้เป็นทาร์ที่มีมวลโมเลกุลหนักซึ่งได้ฟอร์มตัวเป็น metaplast โดย metaplast ระเหยเพื่อก่อตัวเป็นถ่านทาร์ ขณะที่คอยเพื่อเกิดการระเหย metaplast จะสามารถรวมตัวกลับไปเป็นโครงสร้างถ่านหินที่เป็นตาข่ายได้ (crosslinking) และในส่วนอื่น ๆ นั้น ทางเดินปฏิกิริยาจะต่อกันกลายมาเป็นทางเดินปฏิกิริยาของชาร์ c โดยมีการปลดปล่อยก๊าซเบา g_2 ร่วมด้วย จำนวนทั้งหมดของทางเดินปฏิกิริยาในโครงสร้างถ่านหินสามารถแทนได้โดยตัวแปร p ซึ่ง $p = \mathcal{L} + c$

อัตราการเกิดปฏิกิริยา

ชุดตัวแปรเหล่านี้แสดงพฤติกรรมของโครงสร้างถ่านหินระหว่างการปลดปล่อยสารระเหย โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาและส่วนย่อยสามารถกำหนดได้ เริ่มด้วยการสมมุติว่าตัวเชื่อมที่เกิดปฏิกิริยาสามารถทำลายได้ที่อัตราเดียวกับอัตราที่สร้างขึ้นมา ($\frac{\partial \mathcal{L}^*}{\partial t} = 0$)

$$\frac{d\mathcal{L}}{dt} = -k_b \mathcal{L} \quad (4.228)$$

$$\frac{dc}{dt} = k_b \frac{\mathcal{L}}{\rho+1} \quad (4.229)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \left[2\rho k_b \frac{\mathcal{L}}{\rho+1} \right] - k_g \quad (4.230)$$

$$\frac{dg_1}{dt} = k_g \delta \quad (4.231)$$

$$\frac{dg_2}{dt} = 2 \frac{dc}{dt} \quad (4.232)$$

ซึ่งอัตราคงที่สำหรับการแตกตัวของตัวเชื่อมและขั้นตอนการปลดปล่อยก๊าซ k_b และ k_g จะเหมาะสมในรูปแบบของ Arrhenius กับ การกระจายของพลังงานกระตุ้น

$$k = A e^{-(E \pm E_\sigma)/RT} \quad (4.233)$$

ซึ่ง A , E และ E_σ คือ องค์ประกอบ pre-exponential พลังงานกระตุ้นและการกระจายความแปรปรวนในพลังงานกระตุ้น ตามลำดับ R เป็นค่าคงที่ก๊าซสากลและ T เป็นอุณหภูมิ อัตราส่วนของอัตราคงที่ $\rho = k_\delta/k_c$ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.9 ในแบบจำลองนี้ โดยอ้างอิงจากข้อมูลการทดลอง

การอนุรักษ์มวล

ความสัมพัทธ์มวลอนุรักษ์มีดังต่อไปนี้

$$g = g_1 + g_2 \quad (4.234)$$

$$g_1 = 2f - \sigma \quad (4.235)$$

$$g_2 = 2(c - c_0) \quad (4.236)$$

ซึ่ง f คือ สัดส่วนของทางเดินปฏิกิริยาที่แตกหัก ($f = 1 - p$) สถานะเริ่มต้นของระบบนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$c(0) = c_0 \quad (4.237)$$

$$\mathcal{L}(0) = \mathcal{L}_0 = p_0 - c_0 \quad (4.238)$$

$$\mathcal{L}(0) = 2f_0 = 2(1 - c_0 - \mathcal{L}_0) \quad (4.239)$$

$$g(0) = g_1(0) = g_2(0) = 0 \quad (4.240)$$

ซึ่ง c_0 เป็นสัดส่วนเริ่มต้นของทางเดินปฏิกิริยาของซาร์ p_0 เป็นสัดส่วนเริ่มต้นของตัวเชื่อมในโครงสร้างถ่านหินและ \mathcal{L}_0 เป็นสัดส่วนเริ่มต้นของตัวเชื่อมที่เป็นไปได้ในโครงสร้างถ่านหิน

สัดส่วนเชิงมวลที่เปลี่ยนแปลงในถ่านหิน

ชุดของสมการปฏิกิริยาสำหรับตัวแปร โครงสร้างถ่านหิน จำเป็นที่จะต้องมีความสัมพันธ์ของปริมาณเหล่านี้ต่อการเปลี่ยนแปลงมวลถ่านหินและสัมพันธ์กับการปลดปล่อยผลิตภัณฑ์สารระเหย เพื่อที่จะบรรลุเป้าหมายนี้ สัดส่วนที่เปลี่ยนแปลงของมวลถ่านหินนั้นเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลาสามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วน ได้แก่ ก๊าซเบา (f_{gas}) ทาร์ที่แยกตัวออกมาตอนต้น (f_{frag}) และซาร์ (f_{char}) ซึ่งเหล่านี้จะได้อธิบายโดยการใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้ ซึ่งได้อธิบายโดยการใช้ percolation lattice statistics :

$$f_{gas}(t) = \frac{r(g_1 + g_2)(\sigma + 1)}{4 + 2r(1 - c_0)(\sigma + 1)} \quad (4.241)$$

$$f_{frag}(t) = \frac{2}{2 + r(1 - c_0)(\sigma + 1)} [\Phi F(p) + r\Omega K(p)] \quad (4.242)$$

$$f_{char}(t) = 1 - f_{gas}(t) - f_{frag}(t) \quad (4.243)$$

ตัวแปร Φ , Ω , $F(p)$ และ $K(p)$ เป็นความสัมพันธ์ทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับการแยกตัวของทางเดินปฏิกิริยาซึ่งอยู่บนพื้นฐาน percolation lattice statistics และอธิบายได้ด้วยสมการเหล่านี้

$$\Phi = 1 + r \left[\frac{\mathcal{L}}{p} + \frac{(\sigma - 1)\delta}{4(1 - p)} \right] \quad (4.244)$$

$$\Omega = \frac{\delta}{2(1 - p)} - \frac{\mathcal{L}}{p} \quad (4.245)$$

$$F(p) = \left(\frac{p'}{p} \right)^{\frac{\sigma + 1}{\sigma - 1}} \quad (4.246)$$

$$K(p) = \left[1 - \left(\frac{\sigma + 1}{2} \right) p' \right] \left(\frac{p'}{p} \right)^{\frac{\sigma + 1}{\sigma - 1}} \quad (4.247)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

r เป็นอัตราส่วนมวลของทางเดินปฏิกิริยากับมวลขณะนั้น m_b/m_a ซึ่ง

$$m_b = 2M_{w,\delta} \quad (4.248)$$

$$m_a = M_{w,1} - (\sigma + 1)M_{w,\delta} \quad (4.249)$$

ซึ่ง $M_{w,\delta}$ และ $M_{w,1}$ เป็น โมเลกุลลูกโซ่และมวล โมเลกุลกลุ่มตามลำดับ โดย $\sigma + 1$ เป็นจำนวนพิกัดพันธะ ซึ่งกำหนดจากการวัด Solid-State Nuclear Magnetic Resonance (SSNMR) ซึ่งสัมพันธ์กับตัวแปรของโครงสร้าง และ p' เป็นรากที่สองของสมการต่อไปนี้ใน p (จำนวนทั้งหมดของทางเดินปฏิกิริยาในโครงสร้างถ่านหิน)

$$p'(1 - p')^{\sigma-1} = p(1 - p)^{\sigma-1} \quad (4.250)$$

ในการคำนวณมวลใน metaplast (ส่วนที่เป็นน้ำมันดิน) นั้น ส่วนที่กลายเป็นไอจะถือว่าเป็นลักษณะที่คล้ายกับการระเหยแบบจับปล้น ซึ่งสมมุติว่าสมดุลสถานะ ไอ/ของเหลวบนช่วงเวลาที่ต้องสนองอย่างรวดเร็วต่อเส้นทางเดินของปฏิกิริยา ซึ่งการประมาณ ไอ/ของเหลวที่เวลาใดๆ ความสัมพันธ์ของความดันไอกับรูปแบบของ Raoult's Law นั้นจะถูกใช้ โดยความดันไอจะขึ้นกับตัวแปรพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการคำนวณความดันที่ได้จากการปลดปล่อยสารระเหย สำหรับในส่วน metaplast ที่กลับมายึดติดกับ โครงสร้างของถ่านหินอีกครั้งนั้น อัตราการ cross-linking สามารถหาได้จากสมการนี้

$$\frac{dm_{cross}}{dt} = m_{frag} A_{cross} e^{-(E_{cross}/RT)} \quad (4.251)$$

ซึ่ง m_{cross} เป็นมวลทั้งหมดที่ยึดติดใหม่กับ โครงสร้าง m_{frag} เป็นมวลทั้งหมดในส่วนของทาร์ที่แยกออกมาก่อนหน้า (metaplast) และ A_{cross} และ E_{cross} เป็นพารามิเตอร์บ่งชี้อัตราการเกิดปฏิกิริยา

การกำหนดค่า CPD

การกำหนดค่าให้ชุดของสมการและอัตราคงที่ที่สอดคล้องกันสำหรับใช้ในแบบจำลอง CPD โดยจำนวนของค่าคงที่นั้นต้องกำหนดเพื่อให้ใช้สำหรับแบบจำลองนี้เป็นสำคัญ สำหรับความสัมพันธ์ที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ สามารถแสดงได้ว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นค่าที่ไม่ขึ้นกับชนิดของถ่านหิน [34]

- $A_b, E_b, E_{\sigma b}, A_g, E_g$ และ $E_{\sigma g}$ สำหรับอัตราคงที่ k_b และ k_g
- A_{cross}, E_{cross} และ ρ

ค่าคงที่เหล่านี้ได้รวมอยู่ในสูตรของแบบจำลองย่อยและไม่ต้องกำหนดค่าหรือเปลี่ยนแปลง
ขณะเริ่มคำนวณปัญหา

มีตัวแปร 5 ตัวที่เพิ่มขึ้นมาของถ่านหินและต้องกำหนดระหว่างกรเริ่มคำนวณปัญหา

- สัดส่วนเริ่มต้นของเส้นทางปฏิกิริยาใน โครงข่ายถ่านหิน p_0
- สัดส่วนเริ่มต้นของเส้นทางปฏิกิริยาในชาร์ c_0
- lattice coordination number $\sigma + 1$
- มวล โมเลกุลกลุ่ม $M_{w,1}$
- มวล โมเลกุล side chain $M_{w,\delta}$

โดยตัวแปรสี่ตัวแรกเป็นปริมาณ โครงสร้างถ่านหินซึ่ง ได้มาจากข้อมูลการทดลอง NMR และ
ปริมาณตัวสุดท้าย แสดงถึงเส้นทางปฏิกิริยาชาร์ซึ่งอยู่ในถ่านหินหรือก่อตัวขึ้นในขณะเริ่มต้น
ของกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยที่ประเมินได้จากประเภทของถ่านหิน ค่าต่างๆสำหรับ
ตัวแปรอิสระของถ่านหินสำหรับถ่านหินที่หลากหลายประเภทได้แสดงอยู่ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตัวแปรของ โครงสร้างเคมีสำหรับ ^{13}C NMR สำหรับถ่านหิน 13 ประเภท

Coal Type	$\sigma + 1$	p_0	$M_{w,1}$	$M_{w,\delta}$	c_0
Zap (AR)	3.9	.63	277	40	.20
Wyodak (AR)	5.6	.55	410	42	.14
Utah (AR)	5.1	.49	359	36	0
Ill6 (AR)	5.0	.63	316	27	0
Pitt8 (AR)	4.5	.62	294	24	0
Stockton (AR)	4.8	.69	275	20	0
Freeport (AR)	5.3	.67	302	17	0
Pocahontas (AR)	4.4	.74	299	14	.20
Blue (Sandia)	5.0	.42	410	47	.15
Rose (AFR)	5.8	.57	459	48	.10
1443 (lignite, ACERC)	4.8	.59	297	36	.20
1488 (subbituminous, ACERC)	4.7	.54	310	37	.15
1468 (anthracite, ACERC)	4.7	.89	656	12	.25

AR แสดงถึงประเภทของถ่านหินทั้ง 8 ประเภทจาก Argonne premium sample bank [95, 96] Sandia
หมายถึงถ่านหินที่ทดสอบที่ Sandia National Laboratories [97] AFR หมายถึงถ่านหินที่ทดสอบที่
Advanced Fuel Research ACERC หมายถึงถ่านหิน 3 ประเภทที่ทดสอบที่ Advanced Combustion
Engineering Research Center

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4.4.5 การพองของอนุภาคระหว่างการปลดปล่อยสารระเหย

เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการผลิตปล่อยสารระเหยจะสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์การพอง C_{SW} ซึ่งสามารถกำหนดได้ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{d_p}{d_{p,0}} = 1 + (C_{SW} - 1) \frac{(1-f_{w,0})m_{p,0} - m_p}{f_{v,0}(1-f_{w,0})m_{p,0}} \quad (4.252)$$

ซึ่ง

$d_{p,0}$ = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางขณะเริ่มต้นปลดปล่อยสารระเหย

d_p = ขนาดของอนุภาค ณ ปัจจุบัน

ในพจน์ของ $\frac{(1-f_{w,0})m_{p,0} - m_p}{f_{v,0}(1-f_{w,0})m_{p,0}}$ เป็นอัตราส่วนของมวลที่มีการปลดปล่อยสารระเหยต่อมวลสุทธิของสารระเหยทั้งหมดที่มีอยู่ในอนุภาค เมื่อสัมประสิทธิ์การพองนี้เท่ากับ 1.0 ขนาดของอนุภาคจะคงที่ เมื่อสัมประสิทธิ์การพองนี้เท่ากับ 2.0 เส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดเป็นสองเท่าเมื่อสารระเหยทั้งหมดนั้น ได้ระเหยไปหมดแล้วและเมื่อสัมประสิทธิ์การพองนี้เท่ากับ 0.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้ายจะเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของขนาดเริ่มต้น

4.3.4.4.6 การถ่ายเทความร้อนไปยังอนุภาคระหว่างการปลดปล่อยสารระเหย

ความร้อนที่ถ่ายเทไปยังอนุภาคระหว่างกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยรวมถึงการพา การแผ่รังสี และความร้อนที่ใช้ระหว่างการปลดปล่อยสารระเหย

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p \epsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (4.253)$$

โดยปกติแล้ว สมการที่ 4.253 จะคำนวณโดยสมมติว่าอุณหภูมิและมวลของอนุภาคไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างช่วงเวลาที่พิจารณา Δt

$$T_p(t + \Delta t) = \alpha_p + [T_p(t) - \alpha_p] e^{-\beta_p \Delta t} \quad (4.254)$$

ซึ่ง

$$\alpha_p = \frac{hA_p T_\infty + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p \epsilon_p \sigma \theta_R^4}{hA_p + \epsilon_p A_p \sigma T_p^3} \quad (4.255)$$

และ

$$\beta_p = \frac{A_p (h + \epsilon_p \sigma T_p^3)}{m_p c_p} \quad (4.256)$$

4.3.4.5 การเผาไหม้ที่ผิว (กฎข้อที่ 5)

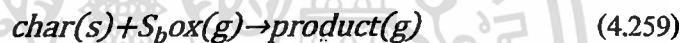
หลังจากองค์ประกอบสารระเหยในอนุภาคนั้นระเหยเสร็จสมบูรณ์แล้ว พื้นผิวอนุภาคจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นซึ่งจะถูกบริโภคเฉพาะส่วนที่เผาไหม้ได้ f_{comb} กฎข้อที่ 5 จะต้องถูกนำมาใช้ (สำหรับอนุภาคที่เผาไหม้ได้) หลังจากสารระเหยเกิดขึ้น

$$m_p < (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0} \quad (4.257)$$

และจนกระทั่งสัดส่วนที่เผาไหม้ได้นี้ถูกบริโภค

$$m_p > (1 - f_{v,0} - f_{comb})(1 - f_{w,0})m_{p,0} \quad (4.258)$$

เมื่อสัดส่วนที่เผาไหม้ได้ f_{comb} ได้ถูกบริโภคไปในกฎข้อที่ 5 อนุภาคที่เผาไหม้ได้อาจจะมีชี้อัดหลงเหลืออยู่ซึ่งจะวนกลับไปยัง inert heating law ในกฎข้อที่ 6 ด้วยการยกเว้นสำหรับแบบจำลองผิวที่เกิดปฏิกิริยาหลายพื้นผิว กฎการเผาไหม้ที่ผิวจะบริโภคองค์ประกอบที่เกิดปฏิกิริยาของอนุภาคซึ่งควบคุมโดยอัตราส่วนปริมาณสัมพัทธ์ที่ต้องการ S_b ของปฏิกิริยาที่เผาไหม้ที่ผิว



ซึ่ง s_b ได้กำหนดในพจน์ของมวลของออกซิเจนต่อมวลของคาร์บอนและสปีชีส์ออกซิเจนและสปีชีส์ผลิตภัณฑ์โดยต้องกำหนดชนิดของผลิตภัณฑ์ในการคำนวณด้วย

แบบจำลอง 4 แบบ สำหรับจำลองปฏิกิริยาที่ผิวที่ไม่เหมือนกันสำหรับการเผาไหม้ของอนุภาค

- 4.3.4.5.1 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวชนิดที่ถูกจำกัดด้วยการแพร่ (แบบจำลองมาตรฐาน)
- 4.3.4.5.2 แบบจำลองอัตราการเคลื่อนที่/ฟุ้งกระจายแบบจำกัด
- 4.3.4.5.3 แบบจำลองตามธรรมชาติ
- 4.3.4.5.4 แบบจำลองพื้นผิวปฏิกิริยาหลายพื้นผิว

แต่ละแบบจำลองได้อธิบายไว้ในส่วนถัดไป

4.3.4.5.1 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวชนิดที่ถูกจำกัดด้วยการแพร่

แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวชนิดที่ถูกจำกัดด้วยการแพร่ซึ่งเป็นแบบจำลองมาตรฐาน จะสมมุติว่าผิวที่เกิดปฏิกิริยาดำเนินปฏิกิริยาต่อไปตามอัตราที่กำหนดโดยการฟุ้งกระจายของก๊าซของตัวออกซิแดนซ์ไปยังพื้นผิวของอนุภาค

$$\frac{dm_p}{dt} = -4\pi d_p D_{i,m} \frac{Y_{Ox} T_{\infty} \rho}{S_b (T_p + T_{\infty})} \quad (4.260)$$

ซึ่ง

$D_{i,m}$ = สัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายสำหรับออกซิแดนซ์ (m^2/s)

Y_{Ox} = สัดส่วนมวลของออกซิแดนซ์ในก๊าซ

ρ = ความหนาแน่นของก๊าซ (kg/m^3)

S_b = stoichiometry ของสมการ 4.259

สมการที่ 4.259 ได้มาจากแบบจำลองของ Baum and Street [114] ซึ่งพลังงานคิเนติกที่ช่วยให้เกิดอัตราปฏิกิริยาที่พื้นผิวนั้นจะถูกละทิ้ง แบบจำลองอัตราปฏิกิริยาการฟุ้งกระจายแบบจำกัด จะสมมุติว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากมวลของอนุภาคลดลงเป็นผลให้ความหนาแน่นลดลงและอนุภาคซาร์จะมีความพรุนมากขึ้น

4.3.4.5.2 แบบจำลองอัตราคิเนติก/ฟุ้งกระจายแบบจำกัด

แบบจำลองอัตราคิเนติก/ฟุ้งกระจายแบบจำกัดสมมุติว่าพื้นผิวปฏิกิริยา กำหนดโดยการเคลื่อนที่หรืออัตราการฟุ้งกระจาย ซึ่งจะต้องใช้แบบจำลองของ Baum and Street [114] และ Field [100] มีสัมประสิทธิ์อัตราการแพร่เป็นดังนี้

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_{\infty}/2)]^{0.75}}{d_p} \quad (4.261)$$

และอัตราคิเนติก

$$\mathcal{R} = C_2 e^{-(E/RT_p)} \quad (4.262)$$

จะได้อัตราการเผาไหม้ซาร์

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{Ox} \frac{D_0 \mathcal{R}}{D_0 + \mathcal{R}} \quad (4.263)$$

ซึ่ง A_p เป็นพื้นที่ผิวของหยดของเหลว (πd_p^2) และ p_{Ox} เป็นความดันบางส่วนของสปีชีส์ออกซิแดนซ์ในก๊าซรอบๆ อนุภาคที่เผาไหม้และอัตราคิเนติก \mathcal{R} รวมเข้ากับผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวภายในของอนุภาคซาร์ (intrinsic reaction) และการฟุ้งกระจายผ่านรูสมการ 4.262 สร้างขึ้นใหม่จากพจน์ของสัดส่วนมวลออกซิแดนซ์ Y_{Ox} เป็นดังนี้

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p \frac{\rho R T_\infty Y_{OX}}{M_{w,OX}} \frac{D_0 \mathcal{R}}{D_0 + \mathcal{R}} \quad (4.264)$$

ขนาดอนุภาคสมมุติว่ายังคงที่ในแบบจำลองนี้แต่ในขณะที่ความหนาแน่นสามารถลดลงได้

4.3.4.5.3 แบบจำลอง Intrinsic

แบบจำลอง intrinsic นี้อ้างอิง Smith's model [101] สมมุติว่า order ของปฏิกิริยานี้เท่ากับหนึ่ง คล้ายกับแบบจำลองคิเนติก/ฟุ้งกระจายซึ่งแบบจำลอง intrinsic จะสมมุติว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวนั้น ได้รวมผลกระทบของการฟุ้งกระจายและปฏิกิริยาเคมี (ดูในสมการ 4.263) แบบจำลอง intrinsic ใช้สมการ 4.261 เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์อัตราการฟุ้งกระจาย D_0 แต่อัตราเคมี \mathcal{R} ได้แสดงอย่างชัดเจนในพจน์ของสารเคมีและอัตราการฟุ้งกระจายผ่านรูพรุน

$$\mathcal{R} = \eta \frac{d_p}{6} \rho_p A_g k_i \quad (4.264)$$

η เป็นองค์ประกอบประสิทธิผลหรืออัตราส่วนของการเผาไหม้จริงต่ออัตราที่เกิดขึ้นถ้าไม่มีความต้านทาน การฟุ้งกระจายผ่านรูพรุนยังคงอยู่ [102]

$$\eta = \frac{3}{\phi^2} (\phi \coth \phi - 1) \quad (4.265)$$

ซึ่ง ϕ เป็น Thiele modulus

$$\phi = \frac{d_p}{2} \left[\frac{S_b \rho_p A_g k_i \rho_{OX}}{D_e \rho_{OX}} \right]^{1/2} \quad (4.266)$$

ρ_{OX} เป็นความหนาแน่นของก๊าซ (kg/m^3) และ D_e เป็นสัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายที่บริเวณรูของอนุภาค สมมุติว่าขนาดของรูพรุนกระจายตัวแบบ unimodal และ Knudsen diffusion D_e นิยามได้ดังนี้

$$D_e = \frac{\theta}{\tau^2} \left[\frac{1}{D_{Kn}} + \frac{1}{D_0} \right]^{-1} \quad (4.267)$$

ซึ่ง D_0 เป็นสัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายโมเลกุลและ θ เป็นความพรุนของอนุภาคซาร์

$$\theta = 1 - \frac{\rho_p}{\rho_t} \quad (4.268)$$

ρ_p และ ρ_t เป็นความหนาแน่นปรากฏและความหนาแน่นจริงตามลำดับ

τ (ในสมการ 4.267) เป็นความคดเคี้ยวของรูพรุน ค่ามาตรฐานจะอยู่ที่ $\sqrt{2}$ ซึ่งสอดคล้องกับมุมที่ตัดระหว่างช่องและผิวภายนอกเฉลี่ยที่ 45° [102]

D_{Kn} เป็นสัมประสิทธิ์ที่กระจายของ Knudsen

$$D_{Kn} = 97.0 \bar{r}_p \sqrt{\frac{T_p}{M_{w,ox}}} \quad (4.269)$$

ซึ่ง T_p เป็นอุณหภูมิของอนุภาคและ \bar{r}_p เป็นขนาดของช่องของอนุภาคซาร์ ซึ่งสามารถวัดความพรุนได้โดย mercury porosimetry ซึ่งรูพรุนขนาดใหญ่ ($\bar{r}_p > 150\text{\AA}$) จะมีอยู่มากในซาร์ที่เกรดต่ำขณะที่รูพรุนขนาดเล็ก ($\bar{r}_p < 10\text{\AA}$) มีอยู่มากในซาร์ที่เกรดสูง [102]

A_g (ในสมการที่ 4.264 และ 4.266) คือพื้นที่เฉพาะภายในของอนุภาคซาร์ ซึ่งสมมุติว่าแบบจำลองนี้ยังคงคงที่ระหว่างการเผาไหม้ซาร์ ข้อมูลสำหรับพื้นที่ผิวภายในกระบวนกรไพโรไลซิสที่หลากหลายสามารถหาได้ใน [103] ค่าเฉลี่ยของพื้นที่ผิวภายในระหว่างการเผาไหม้ซาร์นั้นสูงกว่าซาร์ที่ผ่านกระบวนกรไพโรไลซิส [102] สำหรับตัวอย่างการประมาณค่าเฉลี่ยของซาร์ของถ่านหินมีค่า $300 \text{ m}^2/\text{g}$ [104] k_i (ในสมการ 4.264 และ 4.266) เป็นลักษณะการเกิดปฏิกิริยาแบบ intrinsic ซึ่งเป็นรูปแบบของ Arrhenius

$$k_i = A_i e^{-(E_i/RT_p)} \quad (4.270)$$

ซึ่ง pre-exponential factor A_i และพลังงานกระตุ้น E_i สามารถวัดได้ในซาร์แต่ละประเภท โดยค่าเหล่านี้ได้มาจากการใช้วิธี least squares เพื่อหาข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับช่วงข้อมูลที่กว้างของความพรุนของคาร์บอน รวมถึงซาร์ [103] สามารถใช้ได้ ในการให้ข้อมูลลักษณะของขนาดอนุภาคซาร์ (และความหนาแน่น) ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเผาไหม้ ซึ่งสามารถกำหนดรูปแบบการเผาไหม้ α โดยเชื่อมโยงถึงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่อสัดส่วนลำดับของการเผาไหม้หมด U (ซึ่ง $U = 1 - m_p/m_{p,0}$) โดย [107]

$$\frac{d_p}{d_{p,0}} = (1 - U)^\alpha \quad (4.271)$$

ซึ่ง m_p เป็นมวลอนุภาคซาร์และตัวห้อยเลข 0 หมายถึงสถานะเริ่มต้น (คือ ขณะที่เริ่มต้นการเผาไหม้ซาร์) จำไว้ว่า $0 \leq \alpha \leq 1/3$ ซึ่งค่าขอบเขตอยู่ที่ 0 ถึง 1/3 ตามลำดับ ขนาดคงที่กับความหนาแน่นที่ลดลง (โซน 1) และขนาดที่ลดลงกับความหนาแน่นคงที่ (โซน 3) ระหว่างเผาไหม้ทั้งหมด ในโซนที่ 2 เป็นค่ากลาง $\alpha = 0.25$ สอดคล้องกับการลดลงของทั้งขนาดและความหนาแน่น ซึ่งได้ถูกพบว่าเป็นงานได้ดีสำหรับซาร์ที่มีความหลากหลาย [107]

เมื่อใช้แบบจำลองนี้ อัตราคงที่จะถูกใช้ในสมการเหล่านี้ 4.261, 4.264, 4.266, 4.267, 4.269, 4.270 และ 4.271

4.3.4.5.4 แบบจำลองพื้นผิวปฏิกิริยาหลายพื้นผิว

แบบจำลองปฏิกิริยาที่ผิวของหลายอนุภาคจะมีรูปแบบคล้ายคลึงกับแบบจำลองการเผาไหม้ที่พื้นผิวผนัง ซึ่งพื้นผิวสปีชีส์เป็น “พื้นผิวสปีชีส์ของอนุภาค” สำหรับแร่ธาตุผสมสามารถกำหนดแยกต่างหากได้ สปีชีส์บนผิวอนุภาคสามารถถูกใช้หมดไปหรือผลิตขึ้นโดยอัตราส่วนปริมาณสัมพันธ์ของปฏิกิริยาที่ผิวอนุภาค สปีชีส์บนผิวอนุภาคประกอบไปด้วยมวลของซาร์ที่เกิดปฏิกิริยาของอนุภาค ถ้าสปีชีส์บนผิวอนุภาคถูกใช้หมด องค์ประกอบของซาร์ที่เกิดปฏิกิริยาได้จะถูกใช้ตามลำดับถัดไป เมื่อมีสปีชีส์ถูกผลิตระหว่างปฏิกิริยา ผลผลิตสปีชีส์เหล่านี้จะถูกรวมเข้าไปในมวลของซาร์ ที่จำนวนใดๆ ของสปีชีส์บนผิวอนุภาคและจำนวนใดๆ ของพื้นผิวที่เกิดปฏิกิริยาสามารถกำหนดได้สำหรับอนุภาคที่เผาไหม้ใดๆ

การคิดหลายๆ ตำแหน่งนั้นสามารถกำหนดได้และปฏิกิริยาเผาไหม้ของอนุภาคสองคล้อยกับแบบจำลองหลายพื้นผิว ซึ่งสามารถใช้ร่วมกันในการคำนวณได้ พร้อมกับกฎการเผาไหม้ของอนุภาคตามด้วยกฎการเผาไหม้ซาร์ โดยแบบจำลองนี้อยู่บนพื้นฐานการศึกษาออกซิแดนซ์ของอนุภาคซาร์ แต่สามารถนำไปปรับใช้กับปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับก๊าซได้โดยไม่จำกัด เพียงแต่ปฏิกิริยาออกซิแดนซ์ของถ่านหินเท่านั้น

ข้อจำกัด

ข้อจำกัดของแบบจำลองของปฏิกิริยาหลายพื้นผิวมีดังนี้

- แบบจำลองนี้ไม่สามารถใช้ร่วมกับการติดตามทางเดินที่ไม่เสถียร
- แบบจำลองนี้ใช้ได้เฉพาะแบบจำลองการถ่ายเทสปีชีส์สำหรับปฏิกิริยาเชิงปริมาตร และใช้ไม่ได้สำหรับแบบจำลอง nonpremixed, premixed หรือ partially premixed combustion

4.3.4.5.5 การถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างการเผาไหม้ซาร์

พื้นผิวปฏิกิริยาบริโกลสปีชีส์ออกซิแดนซ์ในสถานะก๊าซ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ค่า source term (ลบ) ระหว่างการคำนวณสมการการถ่ายเทสำหรับสปีชีส์ ซึ่งคล้ายคลึงกับปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นแหล่งกำเนิดของสปีชีส์ในสถานะก๊าซ โดยผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาพื้นผิวที่ต่างชนิดกันจะปรากฏอยู่ในสถานะก๊าซเช่นเดียวกับสปีชีส์ที่กำหนดไว้ ซึ่งปฏิกิริยาที่พื้นผิวยังถูกบริโกลหรือผลิตพลังงานด้วย ภายใต้ปริมาณความร้อนของปฏิกิริยาที่กำหนดไว้

สมดุลความร้อนของพื้นผิวอนุภาคระหว่างเกิดปฏิกิริยา

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_\infty - T_p) - f_h \frac{dm_p}{dt} H_{reac} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (4.272)$$

โดย h_{reac} เป็นความร้อนที่ปล่อยออกจากปฏิกิริยาที่พื้นผิว ซึ่งเป็นพลังงานเพียงส่วนเดียว $(1 - f_h)$ ที่ผลิตโดยพื้นผิวปฏิกิริยาที่เป็นแหล่งกำเนิดในส่วนของสมการพลังงานในสถานะก๊าซ และสัดส่วนการดูดซึม f_h ความร้อนโดยตรง สำหรับการเผาไหม้ถ่านหินได้แนะนำให้ค่า f_h กำหนดค่าไว้ที่ 1.0 ถ้าว่านเผาไหม้หมดแล้วผลิตภัณฑ์จะเป็น CO และ 0.3 ถ้าว่านเผาไหม้หมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น CO₂ [109]

โดยปกติแล้วสมการ 4.272 จะวิเคราะห์โดยสมมุติมวลและอุณหภูมิของอนุภาคให้ไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาการคำนวณ ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ 4.272 เช่นกัน

4.3.4.6 องค์ประกอบอนุภาคที่หลากหลาย (กฎข้อที่ 7)

อนุภาคที่มีหลายองค์ประกอบสามารถอธิบายในรูปแบบของของผสมของสปีชีส์ภายในหยดของเหลว/อนุภาค มวลอนุภาค m เป็นผลรวมของมวลขององค์ประกอบทั้งหมด

$$m = \sum_i m_i \quad (4.273)$$

ความหนาแน่นของอนุภาค ρ_p สามารถเป็นได้ทั้งค่าคงที่หรือปริมาตรเฉลี่ย

$$\rho_p = \left(\sum_i \frac{m_i}{m \rho_i} \right)^{-1} \quad (4.274)$$

สำหรับอนุภาคที่มีมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบซึ่งค่อนข้างจะยุ่งยากที่จะกำหนดของขั้นตอนทั้งหมดของอนุภาคภายในหนึ่งกระบวนการ อย่างเช่น การเดือดหรือการร้อนขึ้น ดังนั้นสามารถที่จะใช้แบบจำลองโดยรวมกระบวนการทั้งหมดเข้าด้วยกันให้อยู่ในสมการเดียว source term สำหรับอุณหภูมิและองค์ประกอบของมวลซึ่งผลรวมของแหล่งกำเนิดจากกระบวนการบางส่วน

$$m_p c_p \left(\frac{dT_p}{dt} \right) = A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) + hA_p (T_\infty - T_p) + \sum_i \frac{dm_i}{dt} (h_{i,p} - h_{i,g}) \quad (4.275)$$

$$\left(\frac{dm_i}{dt} \right) = A_p M_{w,i} k_{c,i} (C_{i,s} - C_{i,\infty}) \quad (4.276)$$

สมการอุณหภูมิของอนุภาค T ประกอบไปด้วยพจน์สำหรับการแผ่รังสี การพาความร้อน (สมการ 4.198) และการระเหย การแผ่รังสีถ่ายเทความร้อนไปยังอนุภาคนี้นรวมเฉพาะการแผ่รังสีแบบ P-1 หรือ Discrete-Ordinates (DO) และการแผ่รังสีถ่ายเทความร้อนไปยังอนุภาคโดยใช้การคำนวณในส่วนการแผ่รังสีระหว่างอนุภาค

มวลขององค์ประกอบอนุภาค m_i เป็นผลกระทบเพียงอย่างเดียวที่เกิดจากการระเหย (สมการ 4.207) ซึ่ง $M_{w,i}$ เป็นน้ำหนักมวลโมเลกุลของสปีชีส์ i สัมประสิทธิ์ถ่ายเทมวล $k_{c,i}$ ขององค์ประกอบ i คำนวณจาก Sherwood correlation (สมการ 4.210) ความเข้มข้นของไอที่ผิวอนุภาค $C_{i,s}$ ขึ้นอยู่กับความดันไออิ่มตัวขององค์ประกอบ

4.3.4.6.1 กฎของ Raoult

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไอของสปีชีส์ $C_{i,s}$ บริเวณเหนือผิวและสัดส่วนโมลในช่วงที่ควบแน่น X_i^L อธิบายโดยกฎของ Raoult

$$C_{i,s} = \frac{p_i}{RT} = \frac{X_i^L p}{RT} \quad (4.277)$$

4.3.4.6.2 แบบจำลองก๊าซจริงของ Peng-Robinson

สำหรับการคำนวณของความเข้มข้นไอของสปีชีส์ $C_{i,s}$ ที่บริเวณเหนือพื้นผิวขึ้นอยู่กับความสามารถในการอัดตัวได้ของสภาวะก๊าซ Z^V ที่กำหนดลงไปในการคำนวณ

$$C_{i,s} = X_i^V \frac{p}{Z^V RT} \quad (4.278)$$

ข้อมูลของความดันไอจะไม่มี เมื่อธาตุของหยดของเหลวถูกเลือกเป็นองค์ประกอบของของผสม เพราะว่าไม่จำเป็นต่อการคำนวณ

4.3.5 การคำนวณควบคู่ทางเดียวหรือสองทาง

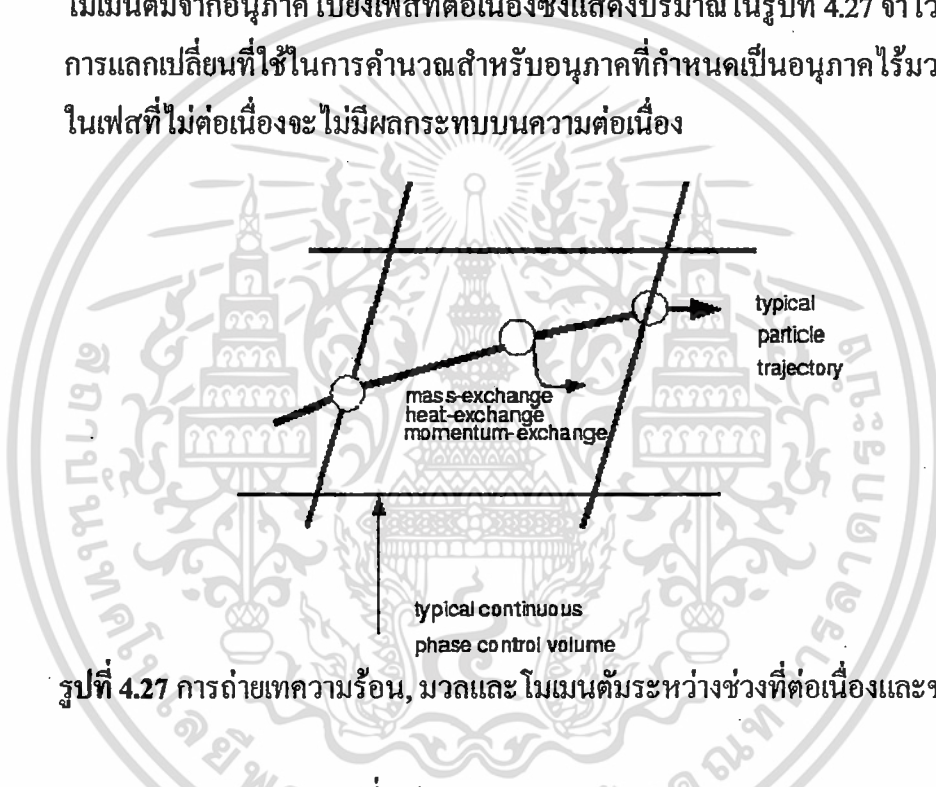
เราสามารถที่จะทำนายรูปผลของทางเดินอนุภาคหรือเรียกว่าเฟสที่ไม่ต่อเนื่องแบบการแยกตัวบนสนามการไหลต่อเนื่องคงที่ (an *uncoupled* approach or "one-way coupling") หรือสามารถรวมผลกระทบของเฟสที่ไม่ต่อเนื่องบน continuum (a *coupled* approach or "two-way coupling") ในการคำนวณแบบควบคู่กัน รูปแบบการไหลต่อเนื่องได้รับผลกระทบจากเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง (และในทำนองเดียวกัน) เราสามารถคำนวณสลับกันระหว่างสมการในเฟสที่ต่อเนื่องและเฟสที่ไม่ต่อเนื่องจนกระทั่งผลทั้งสองมาบรรจบกัน

- 4.3.5.1 การคำนวณควบคู่ระหว่างเฟสที่ต่อเนื่องและเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง
- 4.3.5.2 การแลกเปลี่ยนโมเมนตัม
- 4.3.5.3 การแลกเปลี่ยนความร้อน
- 4.3.5.4 การแลกเปลี่ยนมวล
- 4.3.5.5 Under-Relaxation ของพจน์การแลกเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5.1 การคำนวณควบคู่ระหว่างเฟสที่ต่อเนื่องและเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง

ในการคำนวณเส้นทางโคจรของอนุภาค จะเก็บค่าความร้อน, มวลและ โมเมนตัมที่เพิ่มหรือลดของกระแสการไหลของอนุภาคซึ่งเป็นไปตามเส้นทางโคจรและปริมาณเหล่านี้สามารถรวมกันในการคำนวณภายหลังจากการคำนวณเฟสที่ต่อเนื่อง ดังนั้น ขณะที่เฟสที่ต่อเนื่องกระทบต่อช่วงที่แยกตัวโดยตลอด เราสามารถรวมผลกระทบของเส้นทางโคจรของเฟสที่ไม่ต่อเนื่องบน continuum โดยการคำนวณควบคู่สองทางนี้จะถูกลงได้โดยการแก้ปัญหาสลับกันระหว่างสมการช่วงต่อเนื่องและสมการเฟสที่ไม่ต่อเนื่องจนกระทั่งผลในทั้งสองส่วน ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ปฏิสัมพันธ์ในส่วนนี้ได้แลกเปลี่ยนความร้อน, มวลและ โมเมนตัมจากอนุภาคไปยังเฟสที่ต่อเนื่องซึ่งแสดงปริมาณในรูปที่ 4.27 จำไว้ว่าถ้าไม่มีพจน์การแลกเปลี่ยนที่ใช้ในการคำนวณสำหรับอนุภาคที่กำหนดเป็นอนุภาคไร้มวล ซึ่งเส้นโคจรในเฟสที่ไม่ต่อเนื่องจะไม่มีผลกระทบบนความต่อเนื่อง



รูปที่ 4.27 การถ่ายเทความร้อน, มวลและ โมเมนตัมระหว่างช่วงที่ต่อเนื่องและช่วงที่แยกตัว

4.3.5.2 การแลกเปลี่ยนโมเมนตัม

การแลกเปลี่ยน โมเมนตัมจากเฟสต่อเนื่อง ไปยังเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง คำนวณ โดยดูการเปลี่ยนแปลง โมเมนตัมของอนุภาคที่ผ่านเข้าไปในแต่ละปริมาตรควบคุม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของ โมเมนตัมคำนวณได้จากโดยสมการ

$$F = \sum \left(\frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} (u_p - u) + F_{other} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad (4.279)$$

ซึ่ง

μ = ความหนืดของของเหลว

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาค

- d_p = เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค
 Re = เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สัมพัทธ์
 u_p = ความเร็วของอนุภาค
 u = ความเร็วของของไหล
 C_D = สัมประสิทธิ์แรงลาก
 \dot{m}_p = อัตราการไหลของมวลของอนุภาค
 Δt = ช่วงเวลา
 F_{other} = แรงอื่นๆ

การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมจะปรากฏเป็น momentum source ในสมการโมเมนตัมในเฟสต่อเนื่องในการคำนวณภายหลังใดๆ ของสนามการไหลต่อเนื่องและสามารถแสดงผลในรูปแบบของ contour

4.3.5.3 การแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนจากเฟสต่อเนื่องไปยังเฟสที่ไม่ต่อเนื่องนั้น จะต้องสมมติว่าการเปลี่ยนแปลงในพลังงานความร้อนของอนุภาคที่ผ่านไปยังแต่ละปริมาตรควบคุมในแบบจำลอง ในกรณีที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี (เช่น อนุภาคในกฎข้อที่ 5) การแลกเปลี่ยนความร้อนคำนวณได้ดังนี้

$$Q = \frac{\dot{m}_{p,0}}{m_{p,0}} [(m_{p,in} - m_{p,out}) [-H_{latfer} + H_{pyrol}] - m_{p,out} \int_{T_{ref}}^{T_{p,out}} c_{pp} dT + m_{p,in} \int_{T_{ref}}^{T_{p,in}} c_{pp} dT] \quad (4.280)$$

ซึ่ง

- $\dot{m}_{p,0}$ = อัตราการไหลของมวลเริ่มต้นของการฉีดอนุภาค (kg/s)
 $m_{p,0}$ = มวลเริ่มต้นของอนุภาค (kg)
 $m_{p,in}$ = มวลของอนุภาคบนเซลล์ที่เข้ามา (kg)
 $m_{p,out}$ = มวลของอนุภาคบนเซลล์ที่ออกไป (kg)
 c_{pp} = ความจุความร้อนของอนุภาค (J/kg-K)
 H_{pyrol} = ความร้อนของสารระเหยไพโรไลซิส (J/kg)
 $T_{p,in}$ = อุณหภูมิของอนุภาคบนเซลล์ที่เข้ามา (K)
 $T_{p,out}$ = อุณหภูมิของอนุภาคบนเซลล์ที่ออกไป (K)
 T_{ref} = อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับเอนทาลปี (K)
 H_{latfer} = ความร้อนแฝงที่สถานะอ้างอิง (J/kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนแฝงที่สภาวะอ้างอิง H_{latfer} สำหรับหยดของอนุภาคนี้อาจคำนวณเหมือนกับเอนทาลปีการก่อเกิดมาตรฐานของของเหลวและก๊าซและสัมพันธ์กับความชื้นที่จุดเดือดดังนี้

$$H_{latfer} = H_{lat} - \int_{T_{ref}}^{T_{bp}} c_{pg} dT + \int_{T_{ref}}^{T_{bp}} c_{pp} dT \quad (4.281)$$

ซึ่ง

c_{pg} = ความจุความร้อนของสปีชีส์ของก๊าซผลิตภัณฑ์ (J/kg-K)

T_{bp} = อุณหภูมิจุดเดือด (K)

H_{lat} = ความร้อนแฝงที่อุณหภูมิจุดเดือด (J/kg)

สำหรับเทอมที่เกี่ยวข้องกับสารระเหยของอนุภาคที่กำลังเผาไหม้ จะมีการกำหนดเงื่อนไขบางอย่างสามารถทำให้แน่ใจได้ว่า source term ของเอนทาลปีไม่ขึ้นอยู่กับที่อนุภาคประสบมาในอดีตของอนุภาค สูตรในการคำนวณต้องสอดคล้องกับทั้งส่วนของของไหลและของสารระเหย เนื่องจาก H_{latfer} ได้มาจากการแก้ไขค่า H_{lat} ซึ่งได้พิจารณาความจุความร้อนในอนุภาคและส่วนที่เป็นก๊าซ

$$H_{latfer} = H_{lat} - \int_{T_{ref}}^{T_{p,init}} c_{pg} dT + \int_{T_{ref}}^{T_{b,init}} c_{pp} dT \quad (4.282)$$

ซึ่ง

$T_{p,init}$ = อุณหภูมิเริ่มต้นของอนุภาค (K)

4.3.5.4 การแลกเปลี่ยนมวล

การถ่ายเทมวลจากเฟสที่ไม่ต่อเนื่องไปยังเฟสที่ต่อเนื่อง คำนวณได้โดยการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงมวลของอนุภาคที่ผ่านในแต่ละปริมาตรควบคุม ซึ่งคำนวณได้จาก

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \dot{m}_{p,0} \quad (4.283)$$

การแลกเปลี่ยนมวลที่เกิดขึ้นนี้จะเป็น source term ของมวลในสมการความต่อเนื่องในเฟสที่ต่อเนื่องและเป็นแหล่งกำเนิดของสปีชีส์ที่สามารถกำหนดค่าได้ ซึ่งแหล่งกำเนิดมวลจะรวมอยู่ในการคำนวณของสนามการไหลของเฟสที่ต่อเนื่อง

4.3.5.5 Under-Relaxation ของพจน์การแลกเปลี่ยน

การแลกเปลี่ยน โมเมนตัม, ความร้อนและมวลอยู่ภายใต้การควบคุมของ under-relaxed ระหว่างการคำนวณ ดังนั้น

$$F_{new} = F_{old} + \alpha(F_{calculated} - F_{old}) \quad (4.284)$$

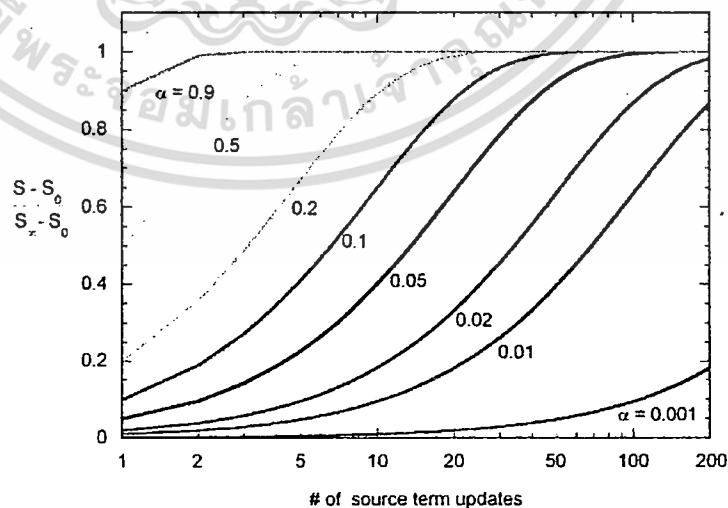
$$Q_{new} = Q_{old} + \alpha(Q_{calculated} - Q_{old}) \quad (4.285)$$

$$M_{new} = M_{old} + \alpha(M_{calculated} - M_{old}) \quad (4.286)$$

ซึ่ง α เป็น under-relaxation สำหรับอนุภาค โดยค่าปกติสำหรับ α คือ 0.5 ค่านี้อาจจะลดลงเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของการคำนวณควบคู่กันซึ่งค่าของ α จะไม่ส่งผลกระทบต่อการทำนายค่าสุดท้ายที่ได้

มีทางเลือกอยู่สองทางที่ใช้ในการอัปเดตค่า source term ของอนุภาคใหม่ F_{new} , Q_{new} และ M_{new} ทางเลือกแรกจะคำนวณ source term ใหม่และ source term ของอนุภาค $F_{calculated}$, $Q_{calculated}$ และ $M_{calculated}$ ที่เวลาเดียวกัน ทางเลือกที่สองจะอัปเดตค่า source term ใหม่ F_{new} , Q_{new} และ M_{new} ทุกๆ การคำนวณซ้ำ ขณะที่ source term อนุภาค $F_{calculated}$, $Q_{calculated}$ และ $M_{calculated}$ จะคำนวณทุกๆ การคำนวณซ้ำของแบบจำลองเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง ทางเลือกที่สองแนะนำสำหรับการไหลแบบชั่วขณะ ซึ่งอนุภาคจะถูกปรับปรุงทุกครั้งต่อช่วงเวลาการไหล

รูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่า source term S เมื่อนำมาใช้กับสมการการไหล โดยเปลี่ยนแปลงกับจำนวนของการอัปเดตสำหรับ under-relaxation ที่เปลี่ยนแปลง ในรูปที่ 4.28 S_{∞} เป็น source term สุดท้ายที่เข้าใกล้ค่าหลังจากอัปเดตค่าของ S_0 เป็นพจน์แหล่งกำเนิดเริ่มต้นของการคำนวณ ค่าของ S_0 โดยปกติแล้วเป็นศูนย์ ณ จุดเริ่มต้นของการคำนวณ



รูปที่ 4.28 ผลกระทบของจำนวนการอัปเดตค่าบน source term ที่ใช้ในสมการการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การกำหนดปัญหาและการตรวจสอบผลการคำนวณ

ในส่วนนี้เป็นการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้สำหรับทำการวิจัย และพร้อมทั้งทำการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution)

5.1 ขั้นตอนในการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล โดยทั่วไปประกอบไปด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอน

5.1.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล

ขั้นตอนการประมวลผล (Pre-processing) หมายถึงขั้นตอนเตรียมการ โดยระบุรายละเอียดของการกำหนดปัญหาและพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

1. การกำหนดลักษณะของปัญหา
2. การกำหนดขนาด จำนวนและรูปแบบการจัดวางกริด (Grid) คือ การสร้างและการจัดวางกริดบนแบบจำลองการไหล (Computational Domain) ให้มีความเหมาะสมซึ่งส่งผลถึงการประหยัดทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ
3. การกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณา
4. การกำหนดคุณสมบัติของของไหล
5. การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตและค่าเริ่มต้นให้กับปัญหาที่พิจารณา

5.1.2 ขั้นตอนการประมวลผล

ขั้นตอนการประมวลผล (Processing) หมายถึง ขั้นตอนการประยุกต์วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการนำไปใช้แก้ปัญหา โดยการคำนวณในงานวิจัยนี้ทั้งหมดเป็นระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยมีส่วนดังนี้

1. ทำการ discretize ไรซ์สมการ โดยการประมาณเทอมต่างๆ ด้วยแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical scheme) ที่เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต
2. ทำการแก้สมการพีชคณิตที่ได้จากการ discretize ไรซ์ผลลัพธ์ที่ได้ เรียกว่า ผลเฉลยโดยประมาณ

5.1.3 ขั้นตอนการแสดงผล

ขั้นตอนการแสดงผล (Post-Processing) หมายถึง กระบวนการแสดงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการประมวลผลโดยปกติประกอบด้วย ความเร็วในทิศทางแกนต่างๆ ความดัน และอุณหภูมิ ซึ่งอยู่ในรูปของตัวเลข เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมของไหลและสภาวะการไหลจำเป็นต้องสร้างผลลัพธ์ให้อยู่ในรูปของกราฟิก

5.2 ขั้นตอนการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ในงานวิจัย

ในงานวิจัยชิ้นนี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนการคำนวณทั้งหมด 5 ขั้นตอน ดังนี้

5.2.1 คำนวณเทียบผลการจำลองการไหลในเจ็ทบีม [17]

5.2.2 คำนวณเทียบผลการจำลองการเผาไหม้ถ่านหินใน Pulverized Coal Burner [18,19,116]

5.2.3 ออกแบบหัวเผาถ่านหินในโครเจนออกไซด์ต่ำ (Low NOx Burner) บนทฤษฎีของเจ็ทบีม

5.2.4 คำนวณช่วงการทำงานของหัวเผาถ่านหินที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (Flue Gas Recirculation)

5.2.5 คำนวณการทำงานและมลภาวะที่ปลดปล่อยออกมาของหัวเผาถ่านหินที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย เปรียบเทียบกับหัวเผาถ่านหินที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (Non-Flue Gas Recirculation)

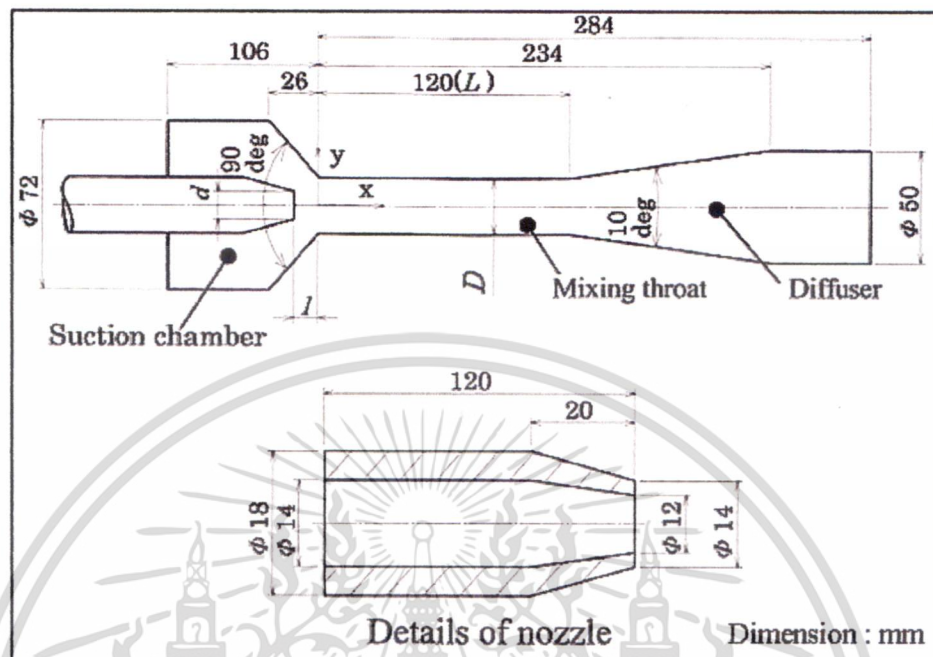
5.2.1 คำนวณเทียบผลการจำลองการไหลในเจ็ทบีม [17]

การคำนวณเทียบผลเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของการไหลในเจ็ทบีม [17] โดยใช้โปรแกรมทาง CFD เพื่อที่จะหาสภาวะของการไหลที่ดีที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขในส่วนถัดไป ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่

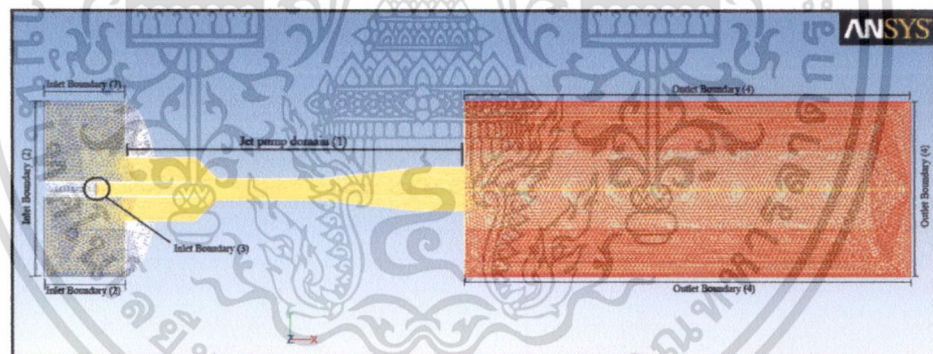
1. ศึกษาทฤษฎีต่างๆ เกี่ยวกับเจ็ทบีม และศึกษาลักษณะของเจ็ทบีมที่นำมาจำลองเทียบผล [17]

2. สร้างแบบจำลองการไหล (Computational Domain) ที่มีขนาดเท่ากับเจ็ทบีมที่นำมาศึกษาเทียบผล [17] โดยลักษณะของโดเมนที่ใช้ในการคำนวณมีลักษณะดังรูปที่ 5.2 ซึ่งได้มีการต่อขยายโดเมนทางด้านหน้า-หลังของตัวเจ็ทบีม เพื่อจำลองสภาวะแวดล้อมเจ็ทบีม โดยลักษณะของกริดที่ใช้เป็นแบบสามเหลี่ยม (T-Grid) และ convert เป็นกริด 6 เหลี่ยม (Polyhedral Grid) ซึ่ง กริดชนิดนี้จะช่วยประหยัดทรัพยากรและเวลาในการคำนวณ และยังช่วยให้ผลการคำนวณมีความแม่นยำมากขึ้น โดยขนาดของกริดนั้นจะมีขนาดเล็กที่บริเวณหัว nozzle เนื่องจากบริเวณนี้มีการเปลี่ยนแปลงของเกรเดียนต์ที่สูง กริดในบริเวณนี้จึงต้องมีความละเอียดสูง และเมื่อออกห่างจากบริเวณหัว nozzle จะขนาด

ใหญ่ขึ้นตามระยะห่างที่มากขึ้น เนื่องจากบริเวณที่ไกลจากหัว nozzle จะมีเกรเดียนต์ที่ต่ำกว่า จึงไม่จำเป็นต้องใช้กริดขนาดเล็กเพื่อประหยัดทรัพยากรในการคำนวณ



รูปที่ 5.1 แสดงขนาดของเจ็ทปั๊มที่ใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ [17]



รูปที่ 5.2 แสดง โดเมนและ Boundary condition ของเจ็ทปั๊มที่ใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์

3. กำหนดค่าเงื่อนไขขอบและค่าเริ่มต้นให้เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณา ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าเงื่อนไขขอบที่ใช้คำนวณการไหลในเจ็ทปั๊ม

Solver Type	Pressure-Based
Turbulent Model	RNG k-e , Standard Wall Function
Boundary Condition	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Inlet (3)	Velocity-inlet - Velocity Magnitude : 30 m/s Turbulence - Specification Method : Intensity and Hydraulic Diameter
- Inlet-axial (2)	Pressure-inlet Turbulence - Specification Method : Intensity and Hydraulic Diameter
- Inlet-radial (2)	Pressure-inlet Turbulence - Specification Method : Intensity and Hydraulic Diameter
- Outlet-axial (4)	Outflow
- Outlet-radial (4)	Outflow
- Symmetry Plane	Symmetry
Solution Methods	
- Scheme	SIMPLE
- Gradient	Green-Gauss Cell Based
- Pressure	Standard
- Momentum	Second Order Upwind
- Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
- Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind

4. เปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่ศึกษาในกรณีต่างๆ โดยเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ 3 ค่า
ได้แก่

4.1. อัตราส่วน d/D คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (Nozzle) กับเส้นผ่านศูนย์กลางของ throat เปลี่ยนแปลงค่าตั้งแต่ 0.5, 0.6 และ 0.7

4.2. อัตราส่วน L/D คือ อัตราส่วนระหว่างระยะทางจากหัวฉีดไปยังปากทางเข้า throat กับเส้นผ่านศูนย์กลางของ throat เปลี่ยนแปลงค่าตั้งแต่ 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3. อัตราส่วน M คือ อัตราส่วนอัตราการไหลปฐมภูมิ(เข้าทางหัวฉีด) กับอัตราการไหลทุติยภูมิ(เข้าทางช่องทางดูด) เปลี่ยนแปลงค่าตั้งแต่ 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2

ตารางที่ 5.2 กรณีทั้งหมด 105 กรณี ที่ใช้ในการคำนวณ

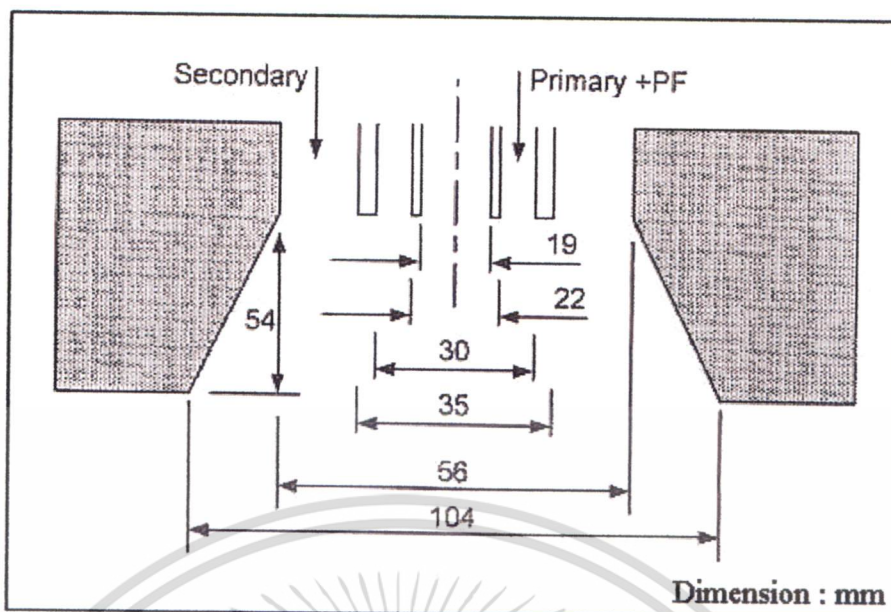
d/D	l/D	M	d/D	l/D	M	d/D	l/D	M
0.5	0.0	M = 0.1 – 1.2	0.6	0.0	M = 0.1 – 1.2	0.7	0.0	M = 0.1 – 1.2
	0.5	M = 0.1 – 1.2		0.5	M = 0.1 – 1.2		0.5	M = 0.1 – 1.2
	1.0	M = 0.1 – 1.2		1.0	M = 0.1 – 1.2		1.0	M = 0.1 – 1.2
	1.5	M = 0.1 – 1.2		1.5	M = 0.1 – 1.2		1.5	M = 0.1 – 1.2
	2.0	M = 0.1 – 1.2		2.0	M = 0.1 – 1.2		2.0	M = 0.1 – 1.2

5.2.2 จำนวนเทียบผลการจำลองการเผาไหม้ถ่านหินใน Pulverized Coal Burner [18,19,116]

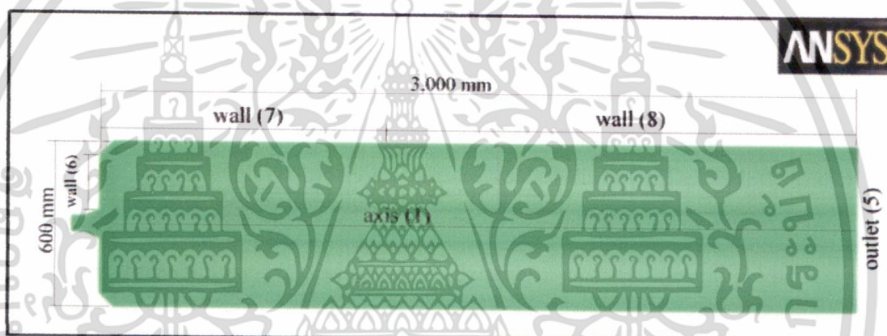
เป็นการคำนวณเทียบผลในส่วนการเผาไหม้ของ Pulverized coal burner [18,19] โดยโครงสร้างภายนอกของเผาที่ ICSTM มีลักษณะเป็นทรงกระบอกสมมาตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.6 เมตร และความยาวรวม 3.0 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเผา 0.056 เมตร โครงสร้างหัวเผาที่ใช้มีชื่อว่า Single Annular Orific (SAO) เพื่อที่จะหาสภาวะของการเผาไหม้ที่ดีที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขในส่วนถัดไป ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. ศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้และทฤษฎีของถ่านหิน รวมถึงศึกษาลักษณะและกลไกการทำงานของ Pulverized Coal Burner [18,19] ที่นำมาจำลองเทียบผล โดยทฤษฎีการเผาไหม้นั้นได้กล่าวเอาไว้ในส่วนที่ 4.1 และการทำงานของ Pulverized Coal Burner โดยมีการเผาไหม้ถ่านหินแบบที่มีออกซิเจนต่ำ อันเนื่องมาจากมีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียอยู่ภายใน ซึ่งช่วยลดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ลงได้

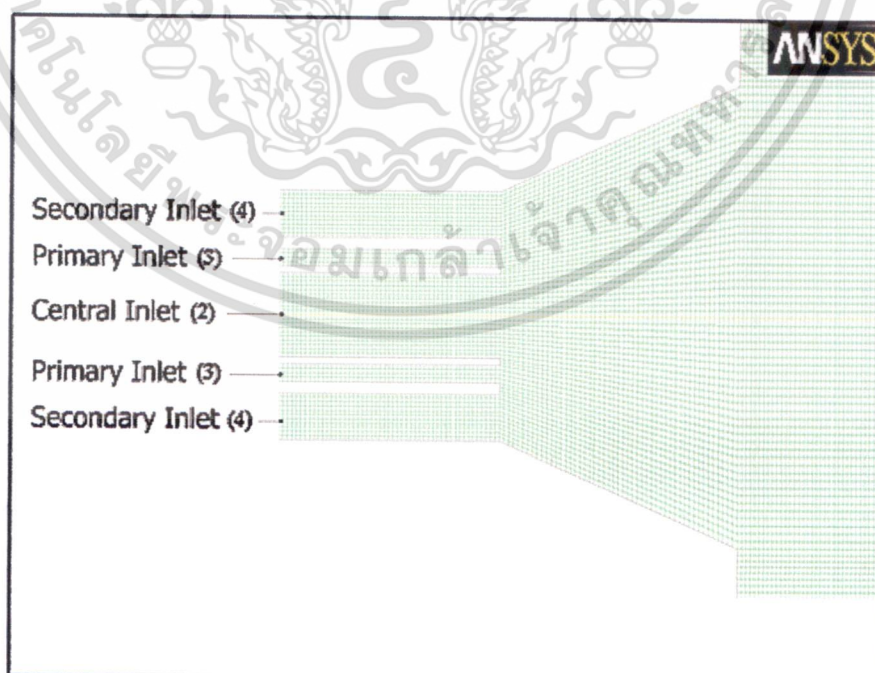
2. สร้างแบบจำลองการเผาไหม้ (Computational Domain) ที่มีขนาดเท่ากับห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner [18,19] ที่นำมาศึกษาเทียบผล โดยโดเมนที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบบนนี้ใช้กริดแบบ 2 มิติ โดยกริดที่บริเวณหัวเผานั้นมีความละเอียดมากกว่าที่ท้ายห้องเผาไหม้ เนื่องจากที่บริเวณที่หัวเผานั้นมีเกรเดียนและปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สูงมาก และขนาดของกริดจะใหญ่ขึ้นตามระยะห่างจากหัวเผา



รูปที่ 5.3 โครงสร้างหัวเสาในห้องเผาไหม้ [18]



รูปที่ 5.4 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการคำนวณการเผาไหม้อ่านหิน



รูปที่ 5.5 ลักษณะของกริดที่บริเวณหัวฉีดของห้องเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กำหนดค่าเงื่อนไขขอบและค่าเริ่มต้นให้เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณาตาม
ตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าเงื่อนไขขอบที่ใช้คำนวณการเผาไหม้ถ่านหิน

Solver Type	Pressure-Based
Turbulent Model	Standard k-e , Standard Wall Function
Radiation Model - Discrete Ordinates (DO)	Theta Division : 2 Phi Division : 2
Species - Non-Premixed Combustion - PDF Option - Probability Density Function - Chemistry - State Relation - Coal Calculator	Inlet Diffusion : Active Beta Equilibrium Non-Adiabatic Proximate Analysis - Volatile : 0.358 - Fixed Carbon : 0.537 - Ash : 0.042 - Moisture : 0.063 Ultimate Analysis (DAF) - C : 0.831 - H : 0.0435 - O : 0.0971 - N : 0.0129 - S : 0.0155 Coal As-Received HCV : 29.29 Mj/kg
NOx - Fuel Streams	Number of Fuel Streams : 2 Fuel Stream ID : 1 - PDF Stream : Primary - Fuel Species : C, H, O, N, S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<ul style="list-style-type: none"> - Thermal - Prompt - Fuel - Fuel Type 	<p>Fuel Stream ID : 2</p> <ul style="list-style-type: none"> - PDF Stream : Secondary - Fuel Species : C<S>, empirical-secondary <p>[O] Model : equilibrium</p> <p>Fuel Carbon Number : 1</p> <p>Equivalent Ratio : 1</p> <p>Solid</p> <p>N Intermediate : HCN / NH₃ / NO</p> <p>Char N Conversion : HCN / NH₃ / NO</p>
<p>SO_x</p> <ul style="list-style-type: none"> - Model - Fuel Streams - Fuel Streams Setting - Fuel Type - Formation Model Parameter 	<p>Sox Formation : Active</p> <p>Fuel Stream ID : 1</p> <ul style="list-style-type: none"> - PDF Stream : Primary <p>Fuel Stream ID : 2</p> <ul style="list-style-type: none"> - PDF Stream : Secondary <p>Solid</p> <p>S Intermediate : H₂S</p> <p>Char S Conversion : SO₂</p> <p>[O] Model : equilibrium</p>
<p>Discrete Phase Model</p> <ul style="list-style-type: none"> - Interaction - Physical Models - Injections 	<p>Interaction with Continuous Phase : Active</p> <p>Particle Radiation Interaction : Active</p> <p>Particle Type : Combusting</p> <p>Material : Coal-particle</p> <p>Devolatilizing Stream : Primary</p> <p>Char Stream : Secondary</p> <p>Point Properties : ภาดผนวก ก.</p>
<p>Material</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mixture <p>Fluid</p> <ul style="list-style-type: none"> - Air 	<p>PDF-Mixture</p> <ul style="list-style-type: none"> - Density

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>Solid</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aluminum <p>Combusting Particle</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coal-particle 	<ul style="list-style-type: none"> : PDF - Cp (Specific Heat) <ul style="list-style-type: none"> : Piecewise-Polynomial : Default Value Default Value - Combustible Fraction <ul style="list-style-type: none"> : Constant : 57.31056 % - Devolatilization Model <ul style="list-style-type: none"> : Single-rate <ul style="list-style-type: none"> : Pre-Exponential Factor : 382000 : Activation Energy : 7.4×10^7 j/kgmol - Combustion Model <ul style="list-style-type: none"> : Kinetic/Diffusion-limited <ul style="list-style-type: none"> : Mass diffusion-Limited Rate Constant <ul style="list-style-type: none"> : 5×10^{-12} : Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor : 0.002 : Kinetics-Limited Rate Activation Energy : 7.9×10^7 j/kgmol
<p>Boundary Condition</p> <ul style="list-style-type: none"> - Axis (1) - Central Inlet (2) - Primary Inlet (3) 	<p>Axis</p> <p>Mass-flow-inlet</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mass Flow Rate : 2.777×10^{-4} kg/s <p>Turbulence</p> <ul style="list-style-type: none"> - Specification Method <ul style="list-style-type: none"> : Intensity and Hydraulic Diameter <p>Thermal</p> <ul style="list-style-type: none"> - Total Temperature : 353 K <ul style="list-style-type: none"> : Boundary Temperature <p>Mass-flow-inlet</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mass Flow Rate : 8.833×10^{-3} kg/s <p>Turbulence</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 ออกแบบหัวเผาถ่านหินในโตรเจนออกไซด์ต่ำ (Low NO_x Burner) บนทฤษฎีของ เจ็ทเบิร์น

การออกแบบหัวเผาถ่านหินอ้างอิงอัตราส่วนขนาดมาจากผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของเจ็ทเบิร์นที่ได้ในหัวข้อที่ 5.2.1 โดยใช้อัตราส่วน $L/D = 0.5$ และ $d/D = 0.5$ ของเจ็ทเบิร์นซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด และสภาวะเงื่อนไข (Boundary Condition) ที่ดีที่สุดที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 5.2.2 โดยวัตถุประสงค์ของการออกแบบหัวเผาถ่านหินก็คือ เพิ่มการหมุนเวียนก๊าซไอเสียกลับมาใช้ในการเผาไหม้ (Flue Gas Recirculation) เพื่อลดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินในการศึกษาครั้งนี้ ได้ออกแบบหัวเผาถ่านหินทั้งหมด 2 แบบ คือ 1) หัวเผาถ่านหินที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (Flue Gas Recirculation) 2) หัวเผาถ่านหินที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (Non-Flue Gas Recirculation) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบว่าการนำก๊าซไอเสียมาหมุนเวียนในห้องเผาไหม้จะช่วยลดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ลงได้

ขั้นตอนการออกแบบหัวเผาถ่านหินมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดสมรรถนะของหัวเผาในหน่วยของ Power output (kW) ในกรณีนี้ต้องการที่ 100 kW เพื่อที่จะนำไปคำนวณปริมาณถ่านหินและปริมาณอากาศในการเผาไหม้ ในกรณีนี้สมมุติให้ประสิทธิภาพของหัวเผาถ่านหินอยู่ที่ 80% และปริมาณอากาศส่วนเกินอยู่ที่ 15%

ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขสมรรถนะที่ใช้กำหนดการออกแบบหัวเผาถ่านหิน

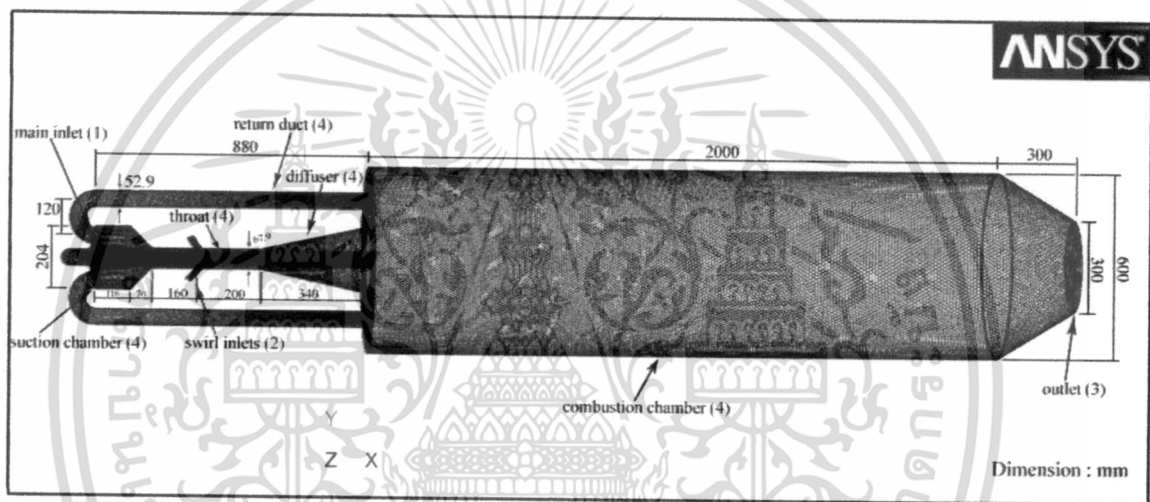
Burner Power Output	100 kW
Burner Efficiency	80 %
Excess Air	15 %
Coal Heating Value [18]	29.29 MJ/kg
Coal Mass Flow Rate	0.004267668 kg/s
Air Mass Flow Rate	0.054930995 kg/s

2. นำเจ็ทเบิร์นที่ใช้ในการคำนวณเทียบผลมาขยายตามอัตราส่วน (Scale up) ให้เหมาะสมกับปริมาณการไหลของอากาศ
3. เพิ่มท่อหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (Return Duct) จำนวน 4 ท่อ ซึ่งจะทำหน้าที่ดูดก๊าซไอเสียภายในห้องเผาไหม้ กลับมาหมุนเวียนภายในหัวเผา (ในการคำนวณกรณีที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียจะไม่มีการเพิ่มท่อหมุนเวียนก๊าซไอเสียเข้าไปในโดเมน)
4. เพิ่มท่อ Swirl Inlet ในแนวเส้นรอบวงรอบๆ throat จำนวน 4 ท่อ และทำมุม 30 องศา กับเส้นตั้งฉากกับ throat เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนให้กับการไหล

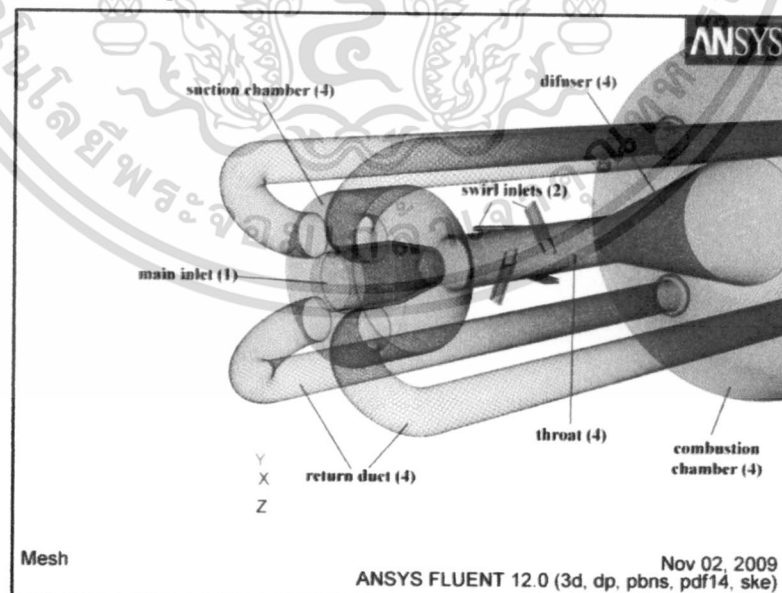
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ลดขนาดท่อบริเวณทางออก โดยทำมุมลดลง 30 องศา ทำให้ความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ถ่านหินถูกพัดพาออกไปจากโดเมน เพื่อป้องกันการสะสมตัวของ source term ของถ่านหินที่เกิดขึ้นระหว่างการคำนวณ

6. ทำการกำหนดขนาดของกริดภายในโดเมนหัวเผาถ่านหินที่ออกแบบไว้ โดยลักษณะของกริดจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับในส่วนที่ 5.2.1 ซึ่งขนาดของกริดที่บริเวณหัว nozzle, throat, swirl inlet และ บริเวณปากทางของท่อหมุนเวียนก๊าซไอเสียจะมีขนาดเล็กกว่าส่วนอื่นๆ เนื่องจากที่บริเวณดังกล่าวนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของเกรเดียนและการเกิดปฏิกิริยาที่สูง ดังนั้นจำนวนของกริดต้องมากเพียงพอ เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ ในแต่ละกริดนั้นอยู่ในช่วงที่พอเหมาะ ซึ่งจะช่วยให้การคำนวณนั้นมีโอกาสที่จะ converge มากขึ้น

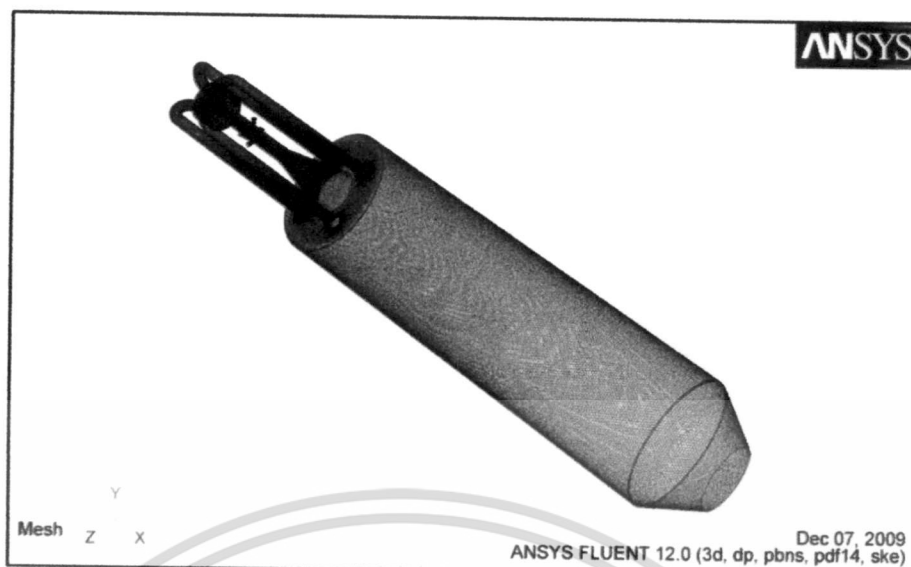


รูปที่ 5.6 ลักษณะและขนาดของหัวเผาถ่านหิน



รูปที่ 5.7 ส่วนประกอบต่างๆ ของหัวเผาถ่านหิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 หัวเผาถ่านหินในมุมมอง Isometric

5.2.4 จำนวนช่วงการทำงานและผลภาวะที่ปลดปล่อยออกมาของหัวเผาถ่านหินที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (Flue Gas Recirculation)

เป็นการจำลองผลเพื่อหาช่วงอัตราส่วนของอัตราการไหล (Primary Mass Flow Rate (%) : Secondary Mass Flow Rate (%)) โดย Primary Mass Flow Rate คือ อัตราการไหลของอากาศที่เข้าทาง Main Inlet และ Secondary Mass Flow Rate คือ อัตราการไหลของอากาศที่เข้าทาง Swirl Inlet) ที่ให้การเผาไหม้ที่มีเสถียรภาพสูงสุด โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนอัตราการไหลตั้งแต่ 100:0, 90:10, 80:20, , 10:90 และ 0:100 พบว่าในช่วงอัตราส่วน 34:66 ถึง 30:70 เป็นช่วงที่การทำงานที่มีเสถียรภาพสูงสุดจึงได้เลือกช่วงอัตราส่วนอัตราการไหลนี้มาศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้และการปลดปล่อยมลภาวะของหัวเผาถ่านหิน

ตารางที่ 5.5 จำนวนกรณีและเงื่อนไขที่ศึกษาช่วงการทำงานของหัวเผาถ่านหิน

Case	Primary Air (% , kg/s)	Secondary Air (% , kg/s × ports)
1	30, 0.01647930	70, 0.009612925 × 4
2	32, 0.01757792	68, 0.009338270 × 4
3	34, 0.01867654	66, 0.009063615 × 4

ตารางที่ 5.6 ค่าเงื่อนไขขอบที่ใช้คำนวณการทำงานของหัวเผาถ่านหินทั้ง 2 กรณี

Solver Type	Pressure-Based
Turbulent Model	Standard k-e , Standard Wall Function
Radiation Model	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<ul style="list-style-type: none"> - Discrete Ordinates (DO) 	<p>Theta Division : 2</p> <p>Phi Division : 2</p>
<p>Species</p> <ul style="list-style-type: none"> - Non-Premixed Combustion - PDF Option <ul style="list-style-type: none"> - Probability Density Function - Chemistry <ul style="list-style-type: none"> - State Relation - Energy Treatment - Coal Calculator - Setting 	<p>Inlet Diffusion : Active</p> <p>Beta</p> <p>Equilibrium</p> <p>Non-Adiabatic</p> <p>Proximate Analysis</p> <ul style="list-style-type: none"> - Volatile : 0.358 - Fixed Carbon : 0.537 - Ash : 0.042 - Moisture : 0.063 <p>Ultimate Analysis (DAF)</p> <ul style="list-style-type: none"> - C : 0.831 - H : 0.0435 - O : 0.0971 - N : 0.0129 - S : 0.0155 <p>Coal As-Received HCV : 29.29 Mj/kg</p>
<p>NOx</p> <ul style="list-style-type: none"> - Formation - Fuel Streams - Thermal - Prompt - Fuel 	<p>Fuel Stream ID : 1</p> <ul style="list-style-type: none"> - PDF Stream : Primary - Fuel Species : C, H, O, N, S <p>Fuel Stream ID : 2</p> <ul style="list-style-type: none"> - PDF Stream : Secondary - Fuel Species : C<S>, empirical-secondary <p>[O] Model : equilibrium</p> <p>Fuel Carbon Number : 1</p> <p>Equivalent Ratio : 1</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>Solid</p> <p>N Intermediate : HCN / NH₃ / NO</p> <p>Char N Conversion : HCN / NH₃ / NO</p>
<p>SOx</p> <p>- Model</p> <p>- Fuel Streams</p> <p>- Fuel Streams Setting</p> <p>- Fuel Type</p>	<p>SOx Formation : Active</p> <p>Number of Fuel Streams : 2</p> <p>Fuel Stream ID : 1</p> <p>- PDF Stream : Primary</p> <p>Fuel Stream ID : 2</p> <p>- PDF Stream : Secondary</p> <p>Solid</p> <p>S Intermediate : H₂S</p> <p>Char S Conversion : SO₂</p>
<p>Discrete Phase Model</p> <p>- Interaction</p> <p>- Tracking</p> <p>- Tracking Parameters</p> <p>- Physical Models</p> <p>- Options</p> <p>- Injections</p>	<p>Interaction with Continuous Phase : Active</p> <p>Max. Number of Steps : 7500</p> <p>Particle Radiation Interaction : Active</p> <p>Particle Type : Combusting</p> <p>Material : Coal-particle</p> <p>Diameter Distribution : Uniform</p> <p>Devolatilizing Stream : Primary</p> <p>Char Stream : Secondary</p> <p>Point Properties : ภาคผนวก ก.</p>
<p>Material</p> <p>- Mixture</p> <p>Fluid</p> <p>- Air</p>	<p>PDF-Mixture</p> <p>- Density</p> <p>: PDF</p> <p>- Cp (Specific Heat)</p> <p>: Piecewise-Polynomial : Default Value</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

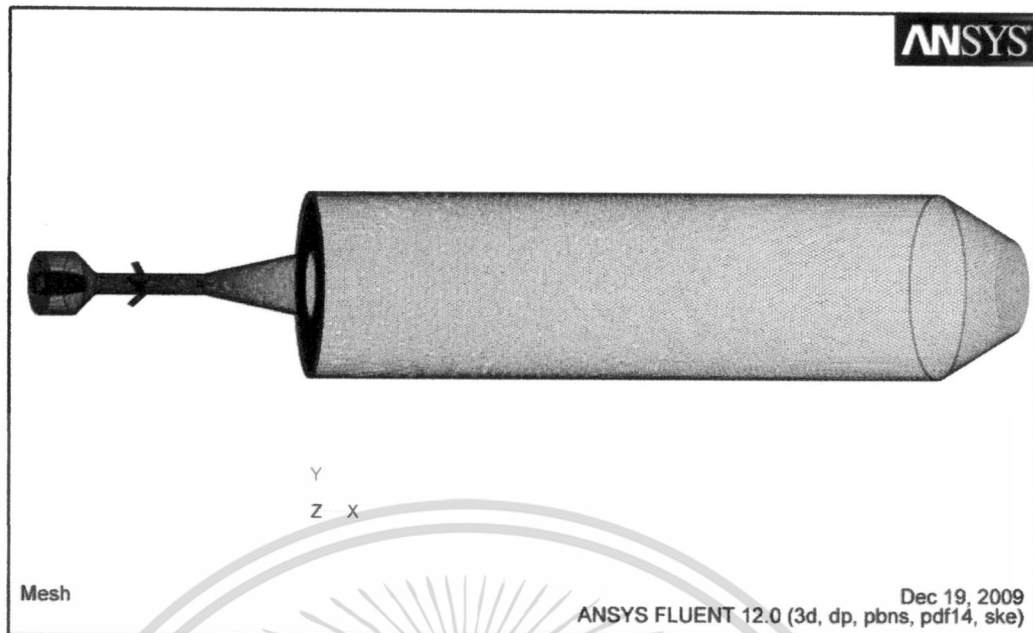
<p>Solid</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aluminum <p>Combusting Particle</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coal-particle 	<p>Default Value</p> <ul style="list-style-type: none"> - Combustible Fraction : Constant : 57.31056 % - Devolatilization Model : Single-rate : Pre-Exponential Factor : 382000 : Activation Energy : 7.4×10^7 j/kgmol - Combustion Model : Kinetic/Diffusion-limited : Mass diffusion-Limited Rate Constant : 5×10^{-12} : Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor : 0.002 : Kinetics-Limited Rate Activation Energy : 7.9×10^7 j/kgmol
<p>Boundary Condition</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inlet (1) - Swirl inlets (2) - Outlet (3) 	<p>Mass-flow-inlet</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mass Flow Rate : Table 5.5 <p>Turbulence</p> <ul style="list-style-type: none"> - Specification Method : Intensity and Hydraulic Diameter <p>Thermal</p> <ul style="list-style-type: none"> - Total Temperature : 300 K <p>Mass-flow-inlet</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mass Flow Rate : Table 5.5 <p>Turbulence</p> <ul style="list-style-type: none"> - Specification Method : Intensity and Hydraulic Diameter <p>Thermal</p> <ul style="list-style-type: none"> - Total Temperature : 300 K <p>Pressure outlet</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

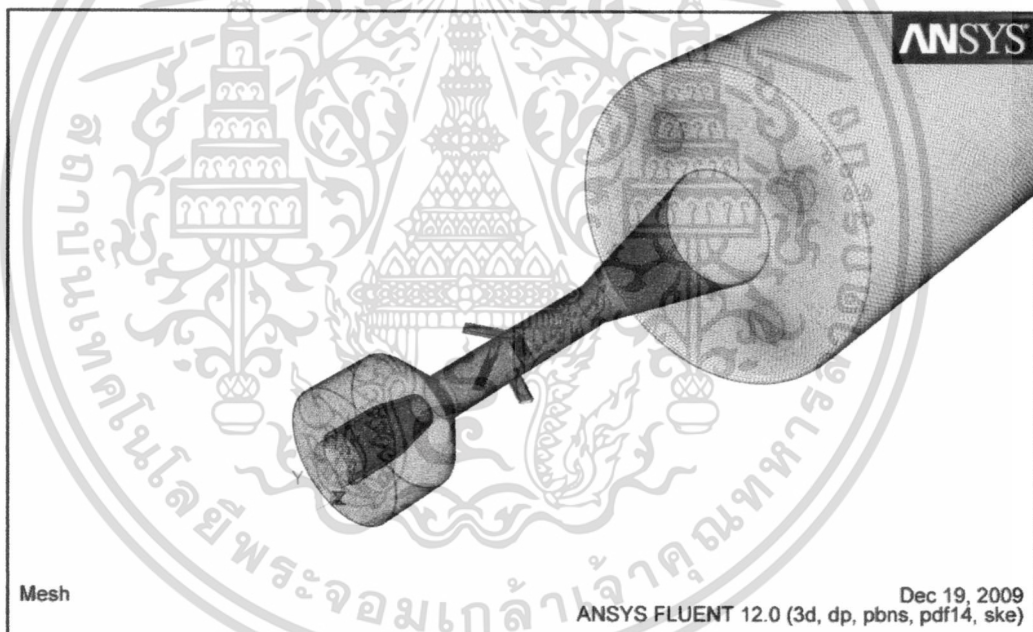
<ul style="list-style-type: none"> - Wall (4) - Thermal - DPM 	<p>Momentum</p> <ul style="list-style-type: none"> - Specification Method <li style="padding-left: 20px;">: Intensity and Hydraulic Diameter <p>Thermal Condition</p> <ul style="list-style-type: none"> - Temperature : Active - Temperature (K) : Constant : 1300 <p>** เมื่อเกิดการเผาไหม้ขึ้นแล้วจนกระทั่งเปลวไฟ คงที่ให้เปลี่ยนค่าเป็นดังนี้ **</p> <ul style="list-style-type: none"> - Heat Flux : Active - Heat Flux : Constant : 0 w/m² <p>Discrete Phase Model Conditions</p> <ul style="list-style-type: none"> - Boundary Cond. Type : Reflect
<p>Solution Methods</p> <ul style="list-style-type: none"> - Scheme - Gradient - Pressure - Another 	<p>SIMPLE</p> <p>Green-Gauss Cell Based</p> <p>Standard</p> <p>Second Order Upwind</p>

5.2.5 จำนวนการทำงานและมลภาวะที่ปลดปล่อยออกมาของหัวเผาถ่านหินที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (Non-Flue Gas Recirculation)

ในส่วนนี้เป็นการศึกษากรณีที่ไม่มีกำหวนเวียนก๊าซไอเสีย (Non-Flue Gas Recirculation) ซึ่งเป็นการสมมุติว่าปีดวาล์วที่บริเวณท่อหมุนเวียนก๊าซไอเสีย โดยการคำนวณได้ใช้อัตราส่วนอัตราการไหลที่ 30:70 เนื่องจากเป็นกรณีที่เกิดไนโตรเจนออกไซด์ น้อยที่สุดจึงได้นำอัตราส่วนอัตราการไหลนี้มาใช้คำนวณเพื่อเปรียบเทียบการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) กับกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (Flue Gas Recirculation) โดยอัตราการไหลที่ใช้อยู่ใน ตารางที่ 5.5 กรณีที่ 1 และเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) ใช้เงื่อนไขเดียวกับในส่วนที่ 5.2.4 (ตารางที่ 5.6)



รูปที่ 5.9 หัวเผาถ่านหินที่ไม่มีท่อหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (front view)



รูปที่ 5.10 หัวเผาถ่านหินที่ไม่มีท่อหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (isometric view)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล

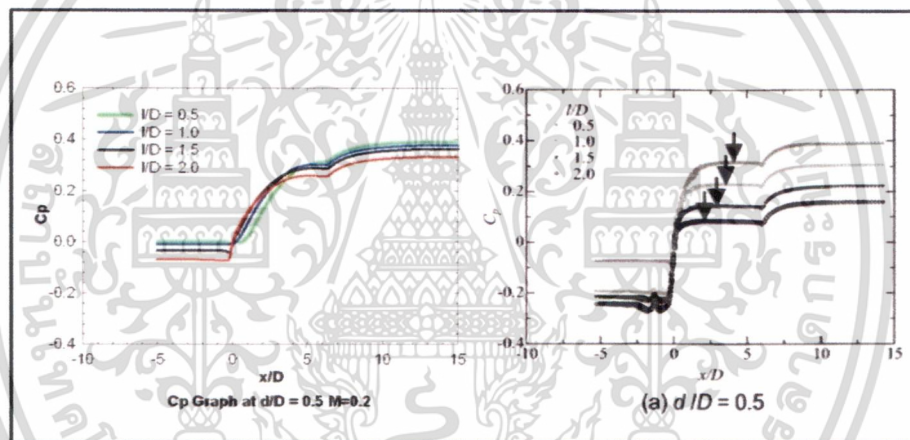
การจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาผ่านหินในโตรเจนออกไซด์ต่ำ (NO_x) ประกอบไปด้วย ผลการจำลอง 3 ส่วน ได้แก่

- 6.1. ผลการจำลองการไหลเทียบผลในเจ็ทบีม [17]
- 6.2. ผลการจำลองการเผาไหม้ผ่านหินใน Pulverized coal burner [18,19]
- 6.3. ผลการจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาผ่านหินในโตรเจนออกไซด์ต่ำ (NO_x)

6.1. ผลการจำลองการไหลเทียบผลในเจ็ทบีม [17]

6.1.1. ผลการจำลองการไหลเทียบผลในเจ็ทบีมที่อุณหภูมิเท่ากัน (Isothermal)

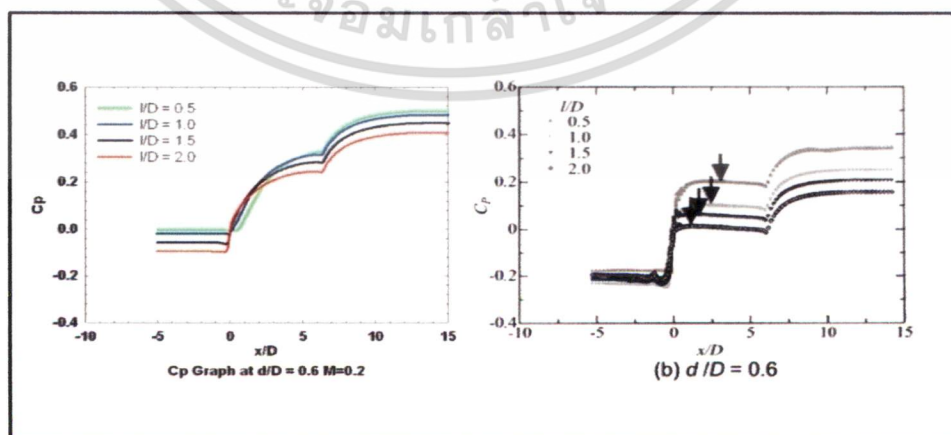
1. ผลการจำลองการกระจายความดัน (C_p) ภายในเจ็ทบีม ที่อัตราส่วน $d/D = 0.5$ และ $M = 0.2$



รูปที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันที่อัตราส่วน $d/D = 0.5$

2. ผลการจำลองการกระจายความดัน (C_p) ภายในเจ็ทบีม ที่อัตราส่วน $d/D = 0.6$

และ $M = 0.2$

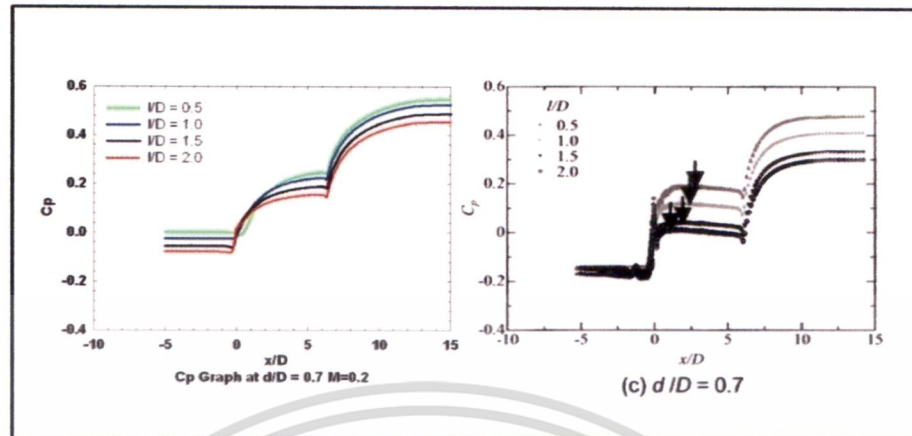


รูปที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันที่อัตราส่วน $d/D = 0.6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการจำลองการกระจายความดัน (C_p) ภายในเจ็ทปัด ที่อัตราส่วน $d/D = 0.7$

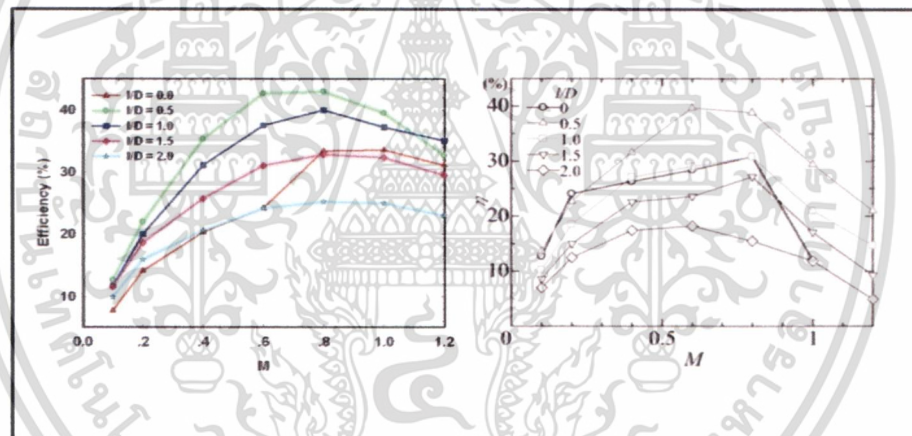
และ $M = 0.2$



รูปที่ 6.3 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันที่อัตราส่วน $d/D = 0.7$

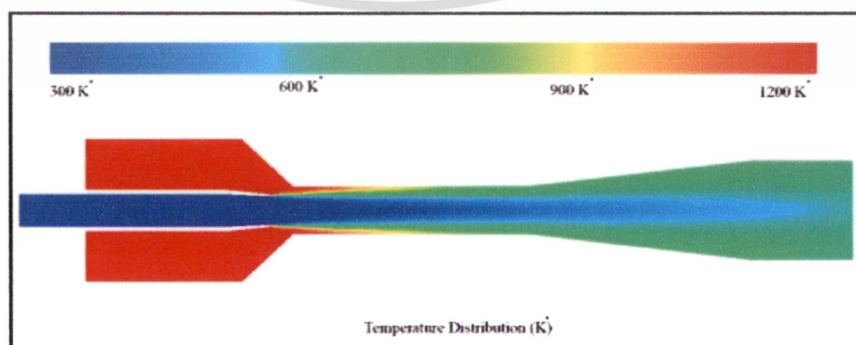
4. ผลการจำลองหาประสิทธิภาพเนื่องมาจากตำแหน่งของหัวฉีดที่อัตราส่วน

$d/D = 0.5$ และ $l/D = 0.5$



รูปที่ 6.4 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

6.1.2. ผลการจำลองการไหลเทียบผลในเจ็ทปัดที่อุณหภูมิไม่เท่ากัน (Non-Isothermal)



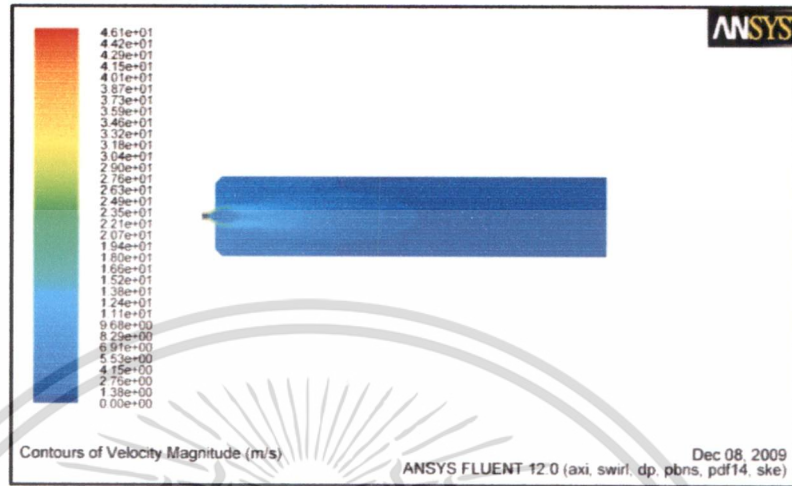
รูปที่ 6.5 แสดงการกระจายอุณหภูมิในเจ็ทปัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

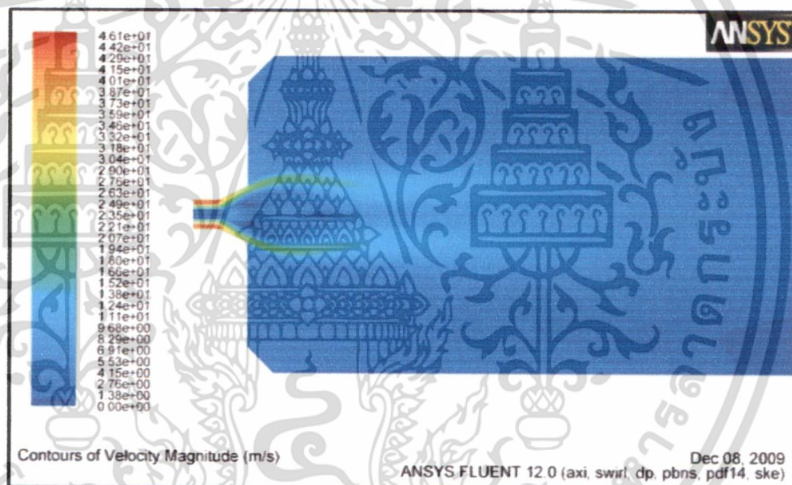
6.2. ผลการจำลองเทียบผลการเผาไหม้ถ่านหินใน Pulverized coal burner [18,19,116]

6.2.1. ผลการจำลองการเผาไหม้

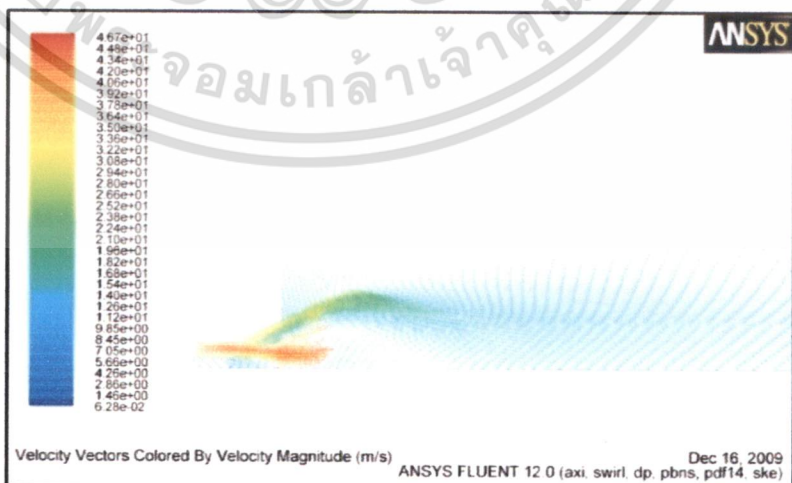
1. ผลการจำลองการไหลในห้องเผาไหม้



รูปที่ 6.6 การกระจายความเร็วในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner

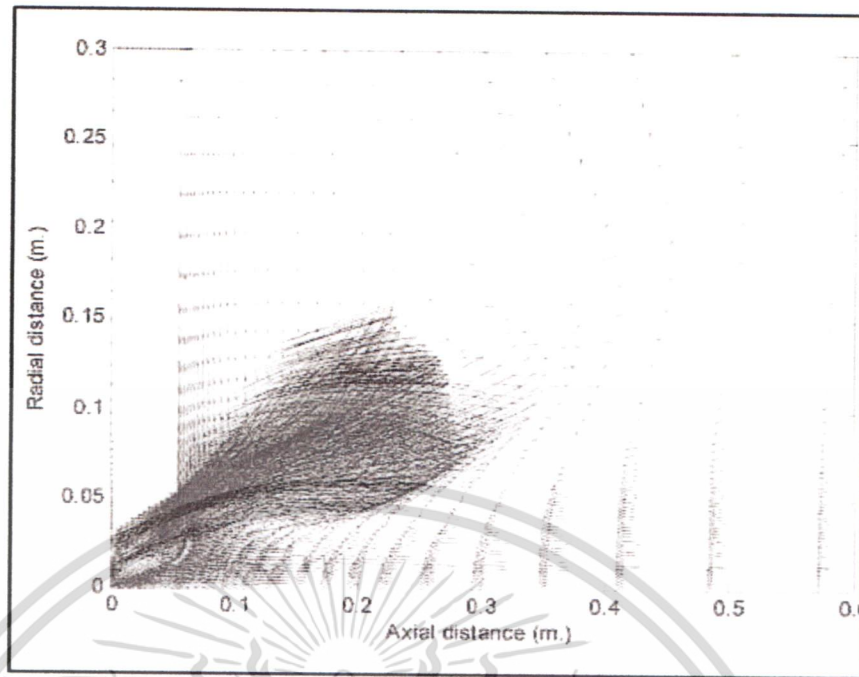


รูปที่ 6.7 การกระจายความเร็วที่บริเวณใกล้หัวฉีดของห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner



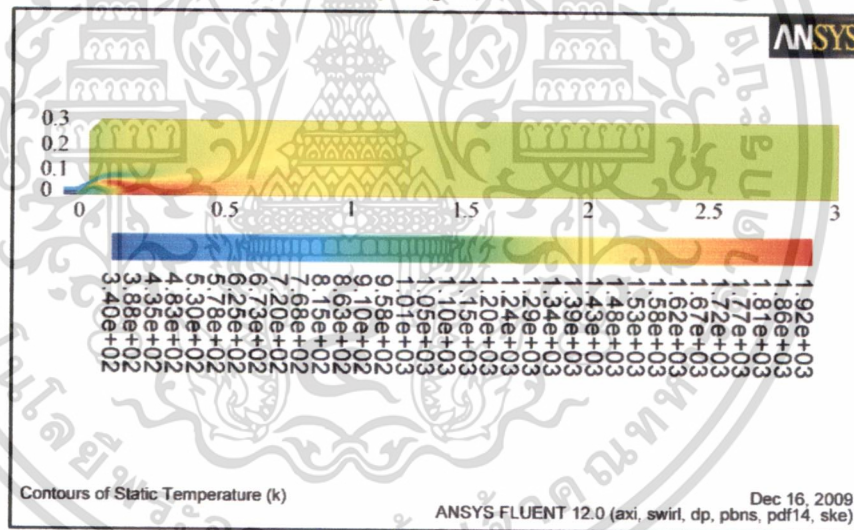
รูปที่ 6.8 เวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณใกล้หัวฉีดของห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

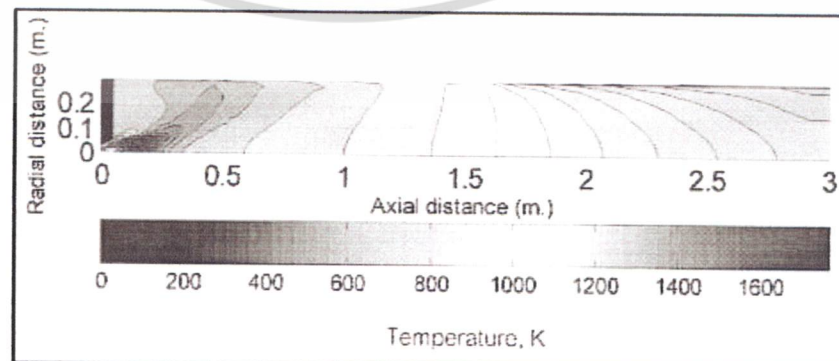


รูปที่ 6.9 เวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณใกล้หัวฉีดของห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner [18]

2. ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้

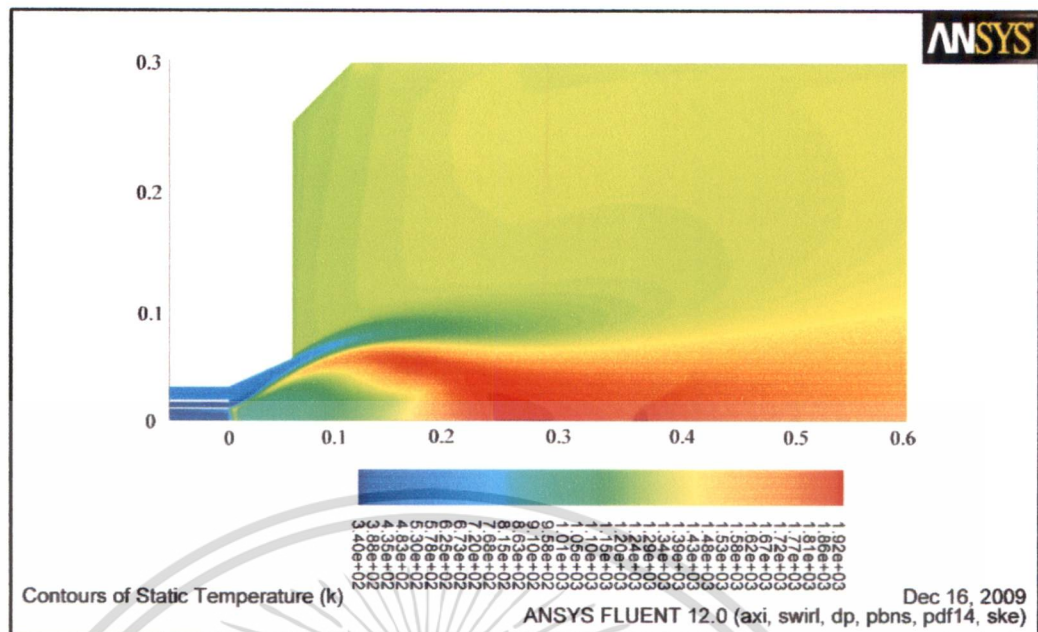


รูปที่ 6.10 การกระจายของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner

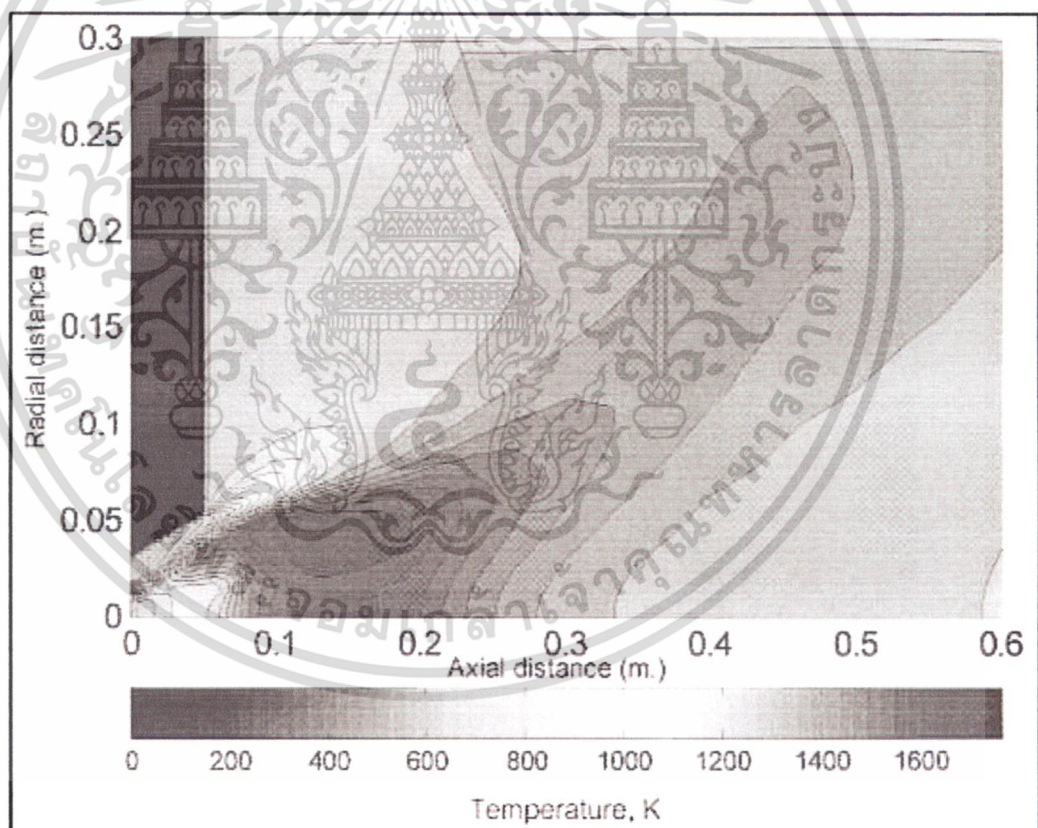


รูปที่ 6.11 การกระจายของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

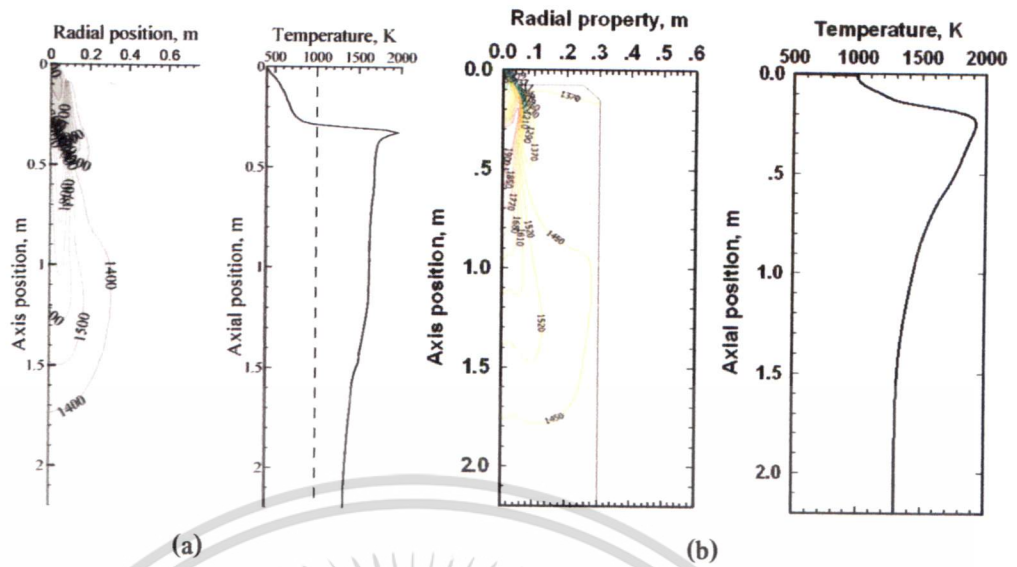


รูปที่ 6.12 การกระจายอุณหภูมิที่บริเวณใกล้หัวฉีดของห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner



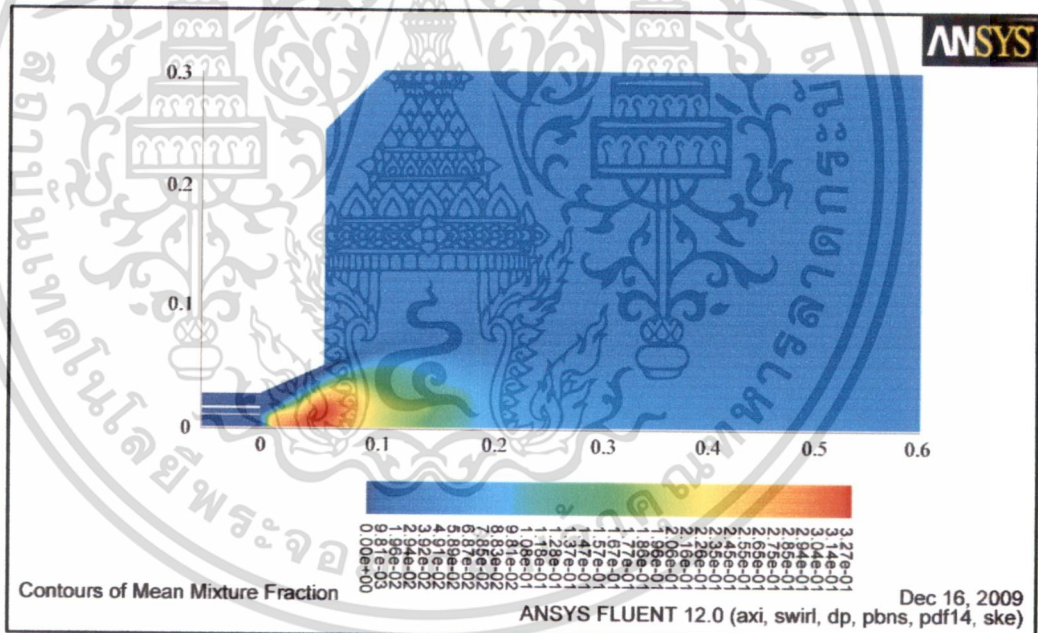
รูปที่ 6.13 การกระจายอุณหภูมิที่บริเวณใกล้หัวฉีดของห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



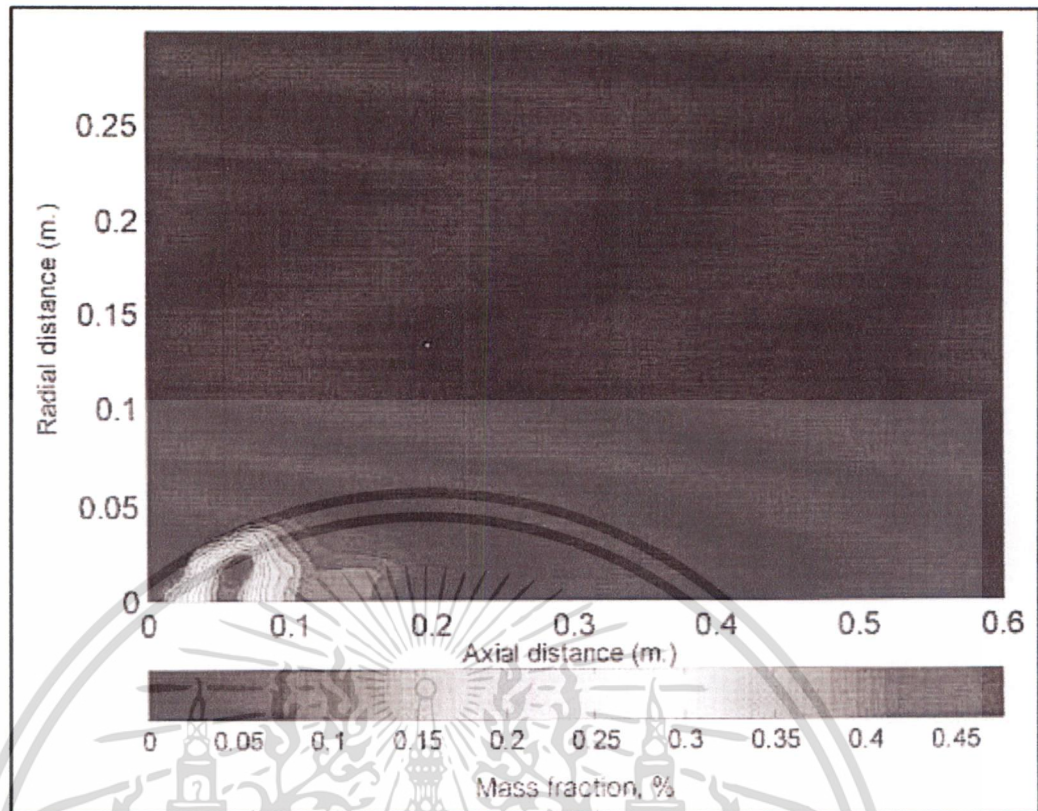
รูปที่ 6.14 (a) การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner [116]
 (b) การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner

3. ผลการจำลองการปลดปล่อยสารระเหยในห้องเผาไหม้



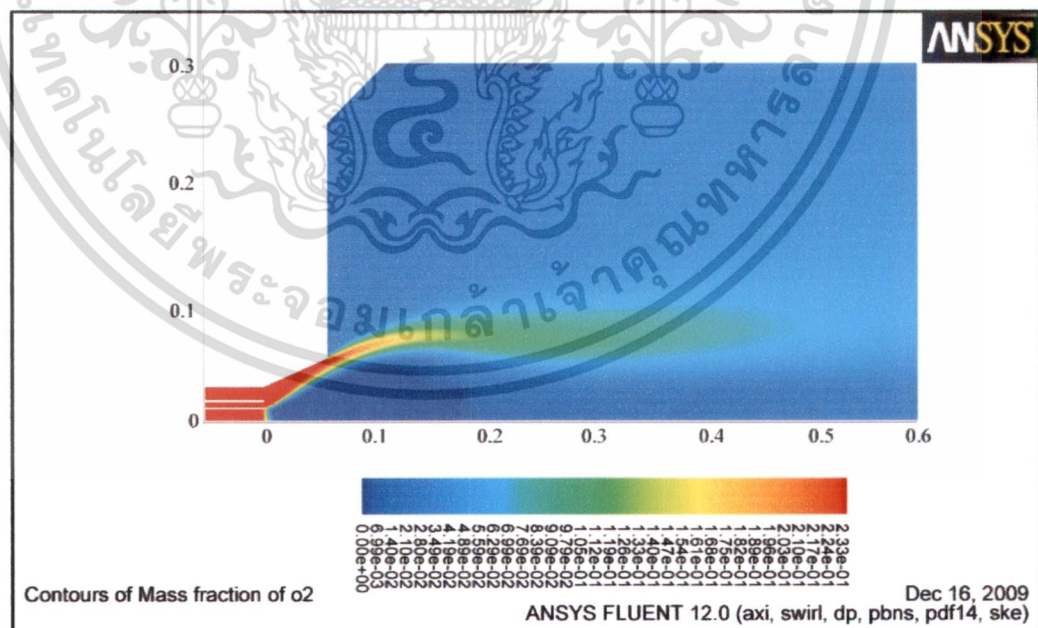
รูปที่ 6.15 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหยในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



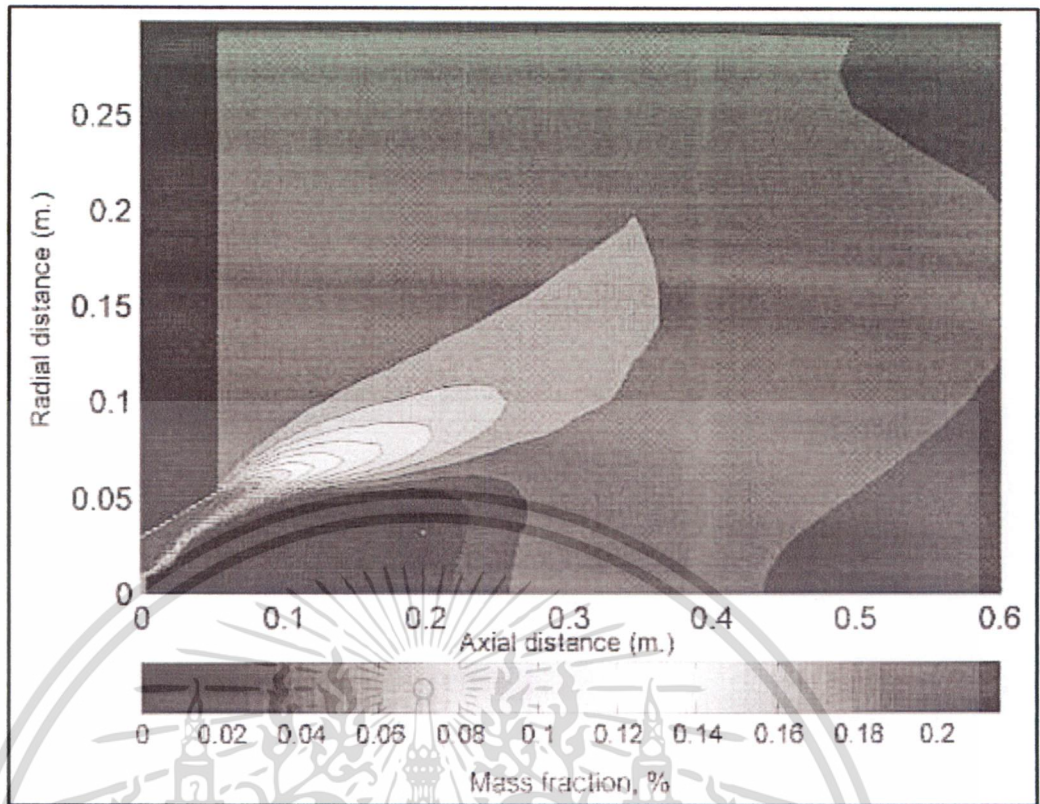
รูปที่ 6.16 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหยในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner [18]

4. ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้น O_2 ในห้องเผาไหม้



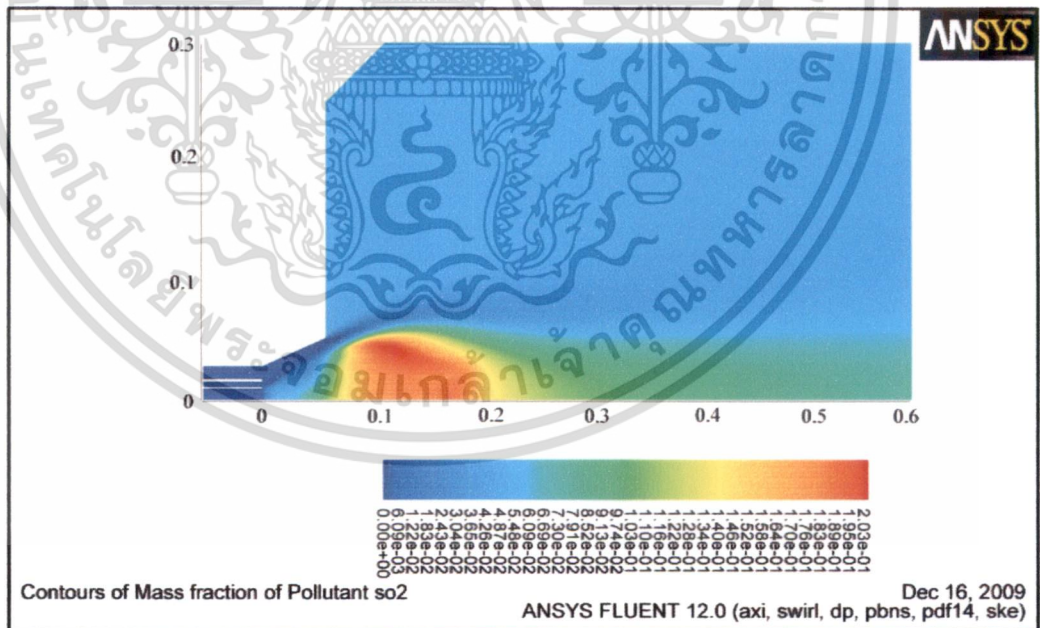
รูปที่ 6.17 การกระจายตัวของความเข้มข้นของออกซิเจนในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



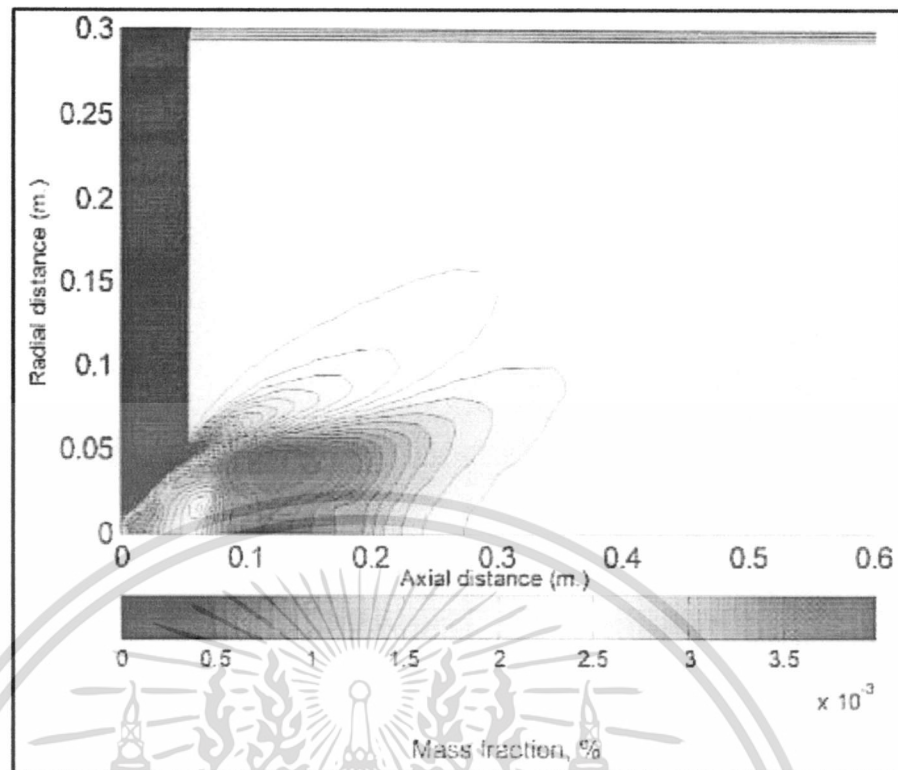
รูปที่ 6.18 การกระจายตัวของความเข้มข้นของออกซิเจนในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner [18]

5. ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้น SO₂ ในห้องเผาไหม้



รูปที่ 6.19 การกระจายตัวของความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในห้องเผาไหม้ Pulverized coal burner

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.20 การกระจายตัวของความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในห้องเผาไหม้
Pulverized coal burner [18]

6.2.2 อภิปรายผลการจำลองเทียบผล

ผลการจำลองในหัวข้อที่ 6.2 เป็นการแสดงผลการจำลองเทียบผลกับการจำลองผลก่อนหน้า [18,116] โดยแบ่งการเปรียบเทียบได้เป็นส่วนๆ ตามผลการจำลองก่อนหน้า ดังนี้

1. รูปที่ 6.6 และ 6.7 เป็นรูปที่แสดงความเร็ว (magnitude) การไหลของของไหลในห้องเผาไหม้ รูปที่ 6.8 เป็นสนามเวกเตอร์ความเร็วของของไหล เมื่อเปรียบเทียบกับรูปทั้ง 3 กับ รูปที่ 6.9 ซึ่งเป็นการจำลองการไหลก่อนหน้า[18] มีลักษณะแตกต่างกัน โดยการจำลองที่ได้มีลักษณะการไหลเป็นรูปดอกไม้ตูม โดยจะมีการไหลวนของของไหลอยู่ภายในตรงกลางดอกไม้ ตั้งแต่ระยะ $X = 0$ ถึง 0.2 เมตร ช่วยกักไอสารระเหยเอาไว้ช่วยให้เปลวไฟไม่หลุดออกจากฐาน ส่วนการจำลองก่อนหน้า[18] มีลักษณะการไหลเป็นรูปดอกไม้บานซึ่งของไหลจากตำแหน่งที่ห่างออกไปสามารถไหลย้อนกลับไปทางหัวฉีดบริเวณตรงกลางห้องเผาไหม้ ซึ่งจะช่วยให้ก๊าซไอเสียกลับมาอุ่นอากาศและไอสารระเหย

โดยความแตกต่างของรูปแบบการไหลนั้นเกิดจากการที่ใช้ Turbulent Model และ โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณนั้นแตกต่างกัน ทำให้ผลการจำลองที่ได้แตกต่างกัน แต่เมื่อเทียบกับผลการทดลอง[18] แล้วพบว่าผลการจำลองผลในครั้งนี้ให้ผลที่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง [116] มากกว่าการจำลองครั้งก่อน[18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. รูปที่ 6.10 และ 6.12 เป็นการกระจายของอุณหภูมิที่เกิดจากการเผาไหม้ โดยที่ฐานเปลวไฟจะอยู่ที่บริเวณหัวฉีด โดยลักษณะของเปลวไฟจะมีลักษณะพุ่งเป็นลำเป็นเส้นตรงเนื่องมาจากการสูญเสียของโมเมนตัมในทิศทางเส้นรอบวงที่รวดเร็ว ทำให้ความสามารถในการพัดพาเปลวไฟไปยังผนังไม่สามารถเอาชนะความดันที่สูงจากผนังสู่ตรงกลางห้องเผาไหม้ได้ เป็นผลให้พลังงานที่เกิดขึ้นกระจายตัวไปยังผนังน้อยกว่าการจำลองก่อนหน้านี้[18] ประกอบกับการหมุนวนแบบบีจะลดทอนความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลง เป็นผลให้อุณหภูมิที่ได้อยู่ที่ $\approx 1900\text{K}$ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 6.11 และ 6.13 เป็นการจำลองการเผาไหม้ก่อนหน้านี้[18] โดยตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุด ($\approx 1600\text{K}$) ซึ่งอุณหภูมิต่ำสุดที่ได้น้อยกว่าของการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากทิศทางของเปลวไฟนั้น ได้ถูกเหวี่ยงเข้าสู่ผนังห้องเผาไหม้ตามกระแสการไหล ทำให้ความเข้มข้นของพลังงานนั้นน้อยกว่า ประกอบกับการไหลหมุนวนในห้องเผาไหม้ นั้นมีลักษณะเป็นปลายเปิดทำให้เกิดการดูดก๊าซไอเสียที่บริเวณปลายห้องเผาไหม้ที่มี อุณหภูมิต่ำไหลวนกลับมา จึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้น เป็นผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำลง

3. รูปที่ 6.15 และ 6.16 เปรียบเทียบการกระจายความเข้มข้นของสารระเหย พบว่าสารระเหยที่ระเหยออกมานั้นจะการกระจายตัวอยู่ภายในกระแสหมุนวนตามการพัดพาของกระแสการไหล ทำให้สารระเหยมากระจุกตัวรวมกัน โดยการกระจุกตัวของสารระเหยที่ได้จะไม่กระจุกตัวเข้มข้นเท่าการจำลองก่อนหน้านี้[18] แต่จะครอบคลุมพื้นที่ที่มากกว่า

4. รูปที่ 6.17 และ 6.18 เปรียบเทียบให้เห็นถึงการกระจายความเข้มข้นของออกซิเจนที่มีอยู่ในห้องเผาไหม้ โดยทั้งสองรูปจะมีแนวโน้มการกระจายเหมือนกันตรงที่บริเวณตรงกลางของเปลวไฟ (บริเวณเส้นสมมาตร) จะมีความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำ เพราะว่าการเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดที่บริเวณนี้ ทำให้ออกซิเจนถูกบริโภคเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป แต่ขนาดของบริเวณที่ความเข้มข้นออกซิเจนต่ำนั้นจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของการไหล โดยการคำนวณก่อนหน้านี้จะมีบริเวณที่ความเข้มข้นออกซิเจนต่ำที่กว้างกว่า

5. รูปที่ 6.19 และ 6.20 เปรียบเทียบการกระจายความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ โดยการเกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ส่วนมากจะเกิดอยู่ที่บริเวณอุณหภูมิ 1400-1600 K ซึ่งความเข้มข้นและบริเวณที่เกิดการกระจุกตัวนั้นจะแตกต่างกันตามการพัดพาของกระแสการไหล โดยการจำลองผลก่อนหน้านี้ [18] จะเกิดการกระจุกตัวเข้มข้นอย่างชัดเจนตามการหมุนวนที่พิกัด (0.13,0.04) แต่จากการจำลองครั้งนี้การกระจุกตัวจะกว้างกว่า (ตั้งแต่ $x = 0.08$ ถึง 0.19) ตามการหมุนวนที่มีขนาดใหญ่กว่า

6.3. ผลการจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาถ่านหิน

การวิเคราะห์ผลการจำลองของหัวเผาถ่านหินมีทั้งหมด 2 กรณีหลัก ได้แก่ 1) หัวเผาถ่านหินที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (Flue Gas Recirculation) 2) หัวเผาถ่านหินที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (Non-Flue Gas Recirculation) โดยทั้ง 2 กรณีสามารถวิเคราะห์ผลการจำลองบนความเชื่อมโยงเรียงกันในแต่ละส่วน ได้ดังนี้

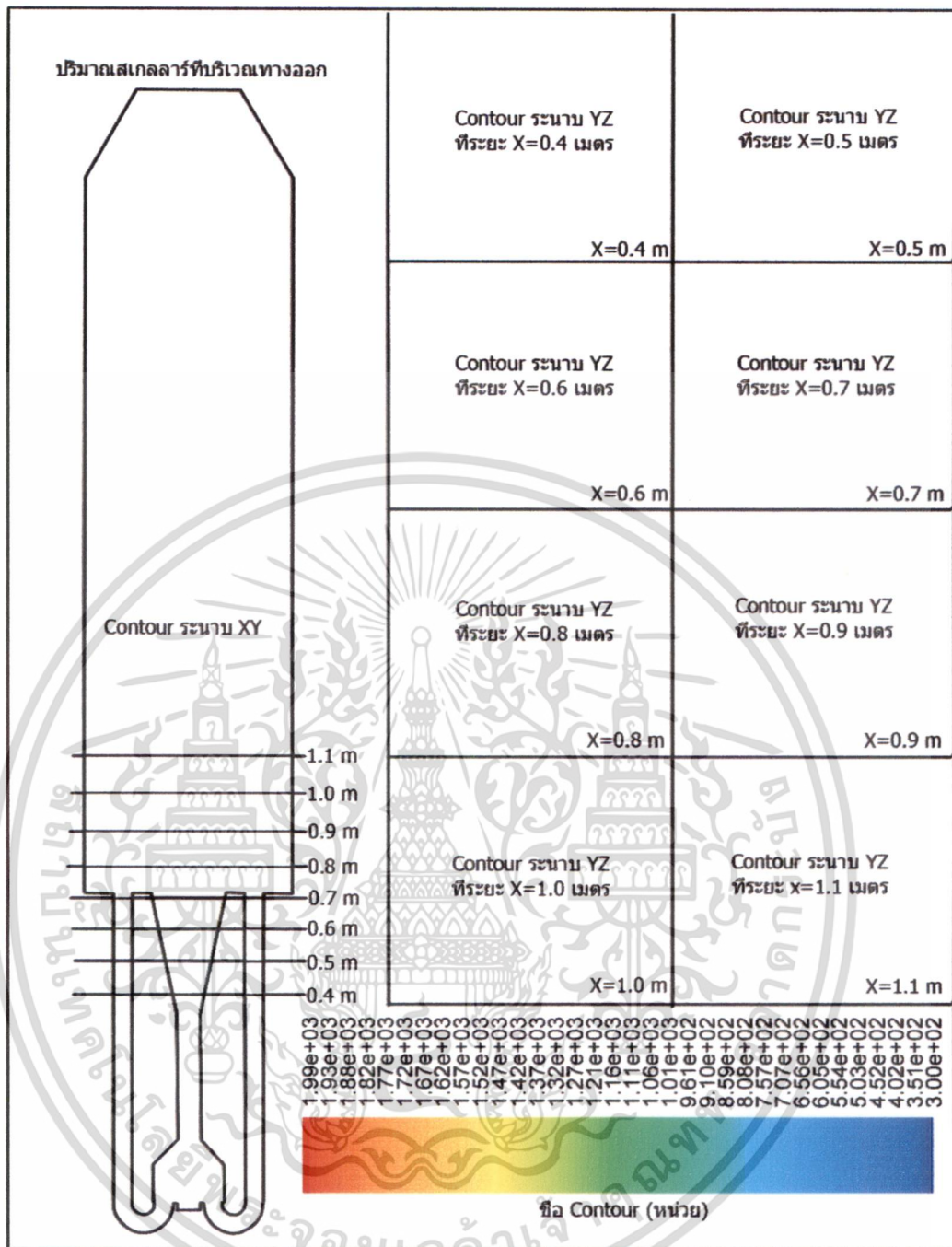


โดยการจัดเรียงผลการคำนวณของหัวเผาถ่านหินจะเรียงตามชนิดของ contour และจะแสดงผลการจำลองหัวเผาถ่านหินที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียขึ้นก่อนและตามด้วยแสดงผลการจำลองหัวเผาถ่านหินที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

6.3.1 ผลการจำลอง

ในหัวข้อนี้เป็นส่วนที่แสดงผลการจำลองในส่วนต่างๆ ของหัวเผาถ่านหินทั้งกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียและกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียที่ได้จากการคำนวณ เช่น ความเร็ว, อุณหภูมิ, ฯลฯ ในรูปแบบของเส้นแสดงรูปร่าง (contour) โดยได้แสดงอยู่ในระนาบ XY และ ระนาบ YZ โดยที่ระนาบ YZ จะมีทั้งหมด 8 ระนาบตามความยาวแกน X ตั้งแต่ 0.4, 0.5, 0.6, และ 1.1 เมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของเกร็ดเคียนที่ชัดเจน สามารถดูได้จากรูปตัวอย่าง (รูปที่ 21)

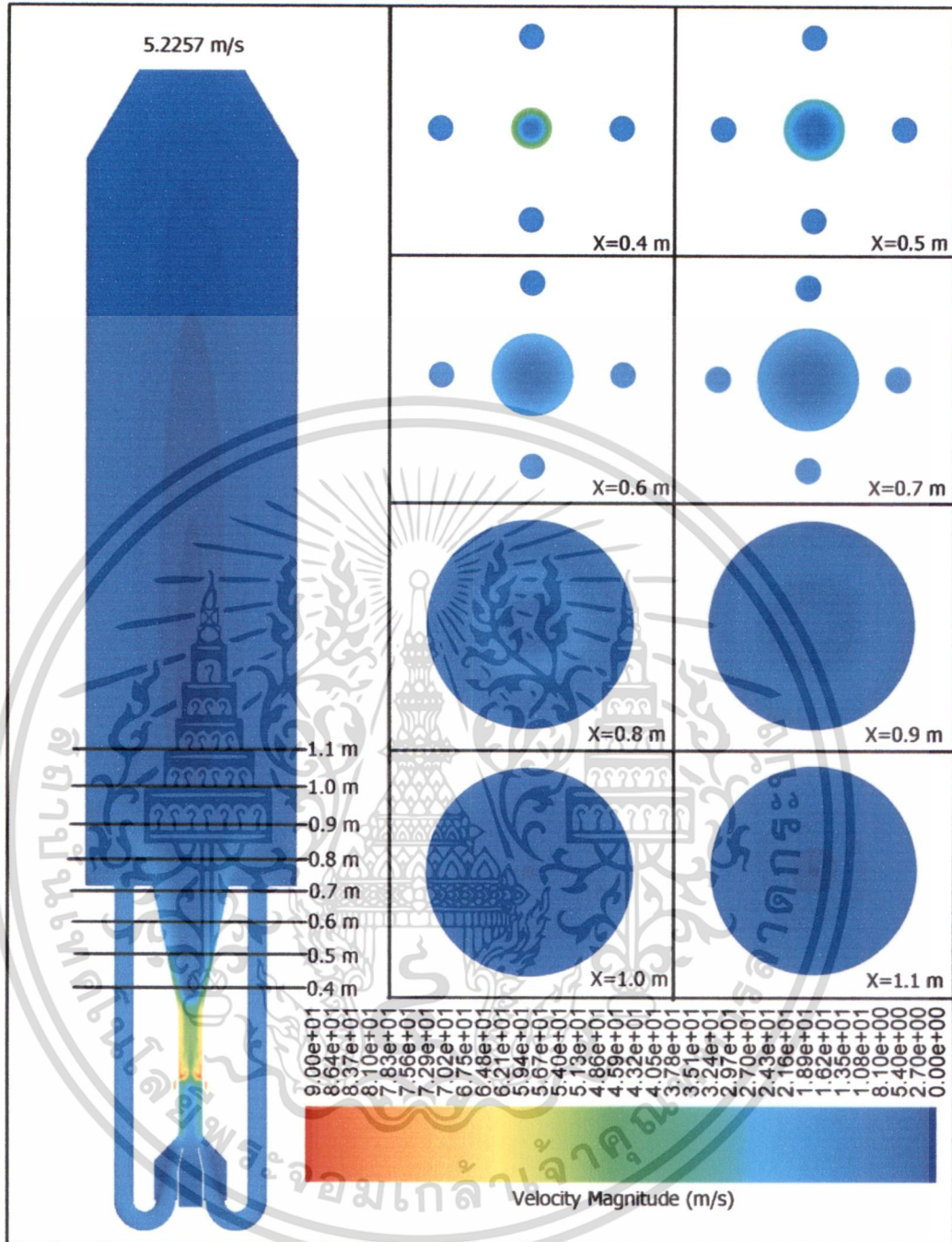
ในการเปรียบเทียบผลการจำลองนั้นสามารถทำได้เฉพาะกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียกับกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียเหมือนกันเท่านั้น จะไม่สามารถนำกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียมาเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียได้ เนื่องจาก contour ของผลการจำลองบางชนิดนั้นมีช่วงที่แตกต่างกันมาจึงไม่สามารถที่จะปรับให้ช่วงของ contour นั้นเท่ากันได้ ซึ่งจะส่งผลให้การอ่านค่ามีความผิดพลาดได้



รูปที่ 21 ตัวอย่างผลการจำลอง

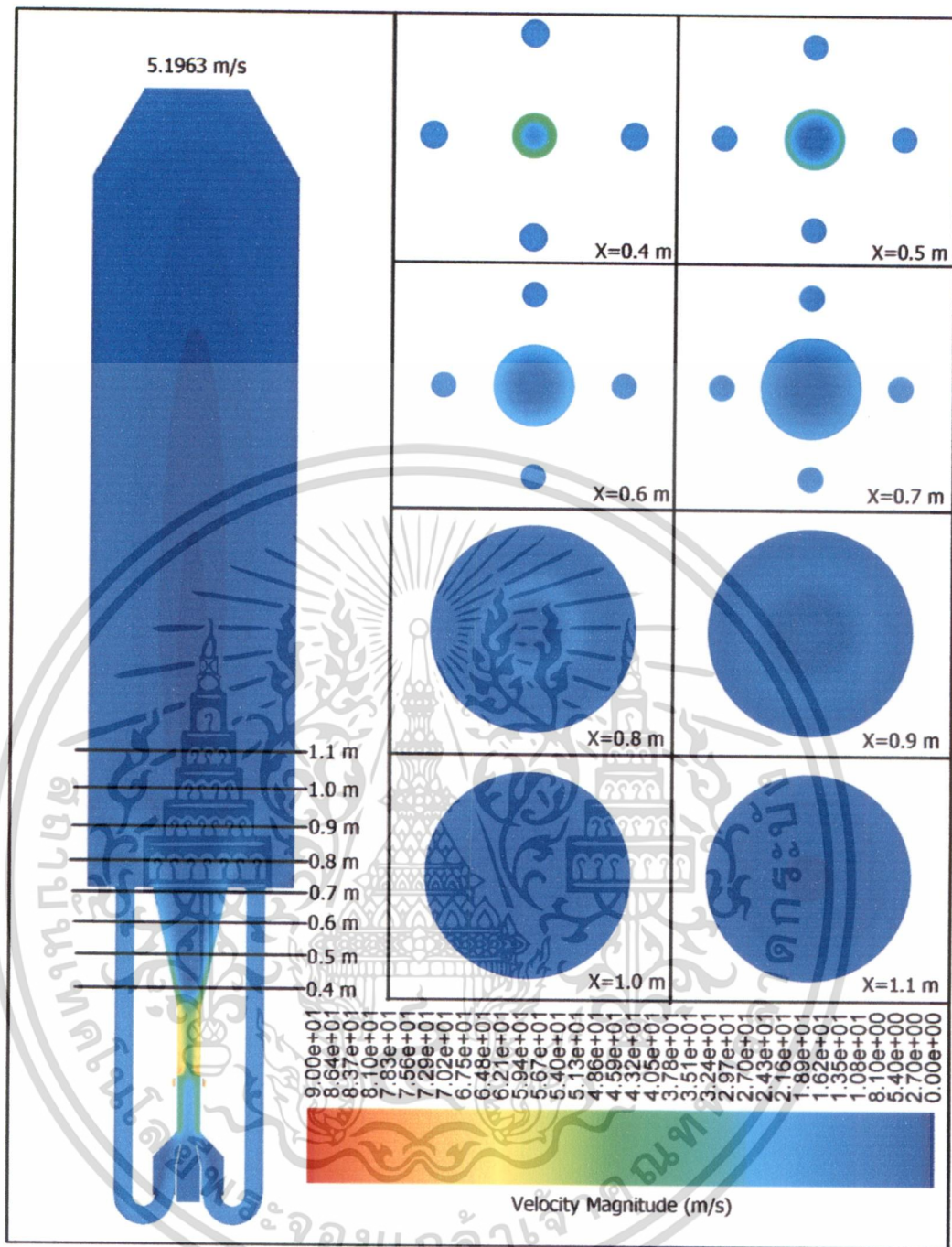
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1.1 ผลการจำลองการกระจายความเร็ว



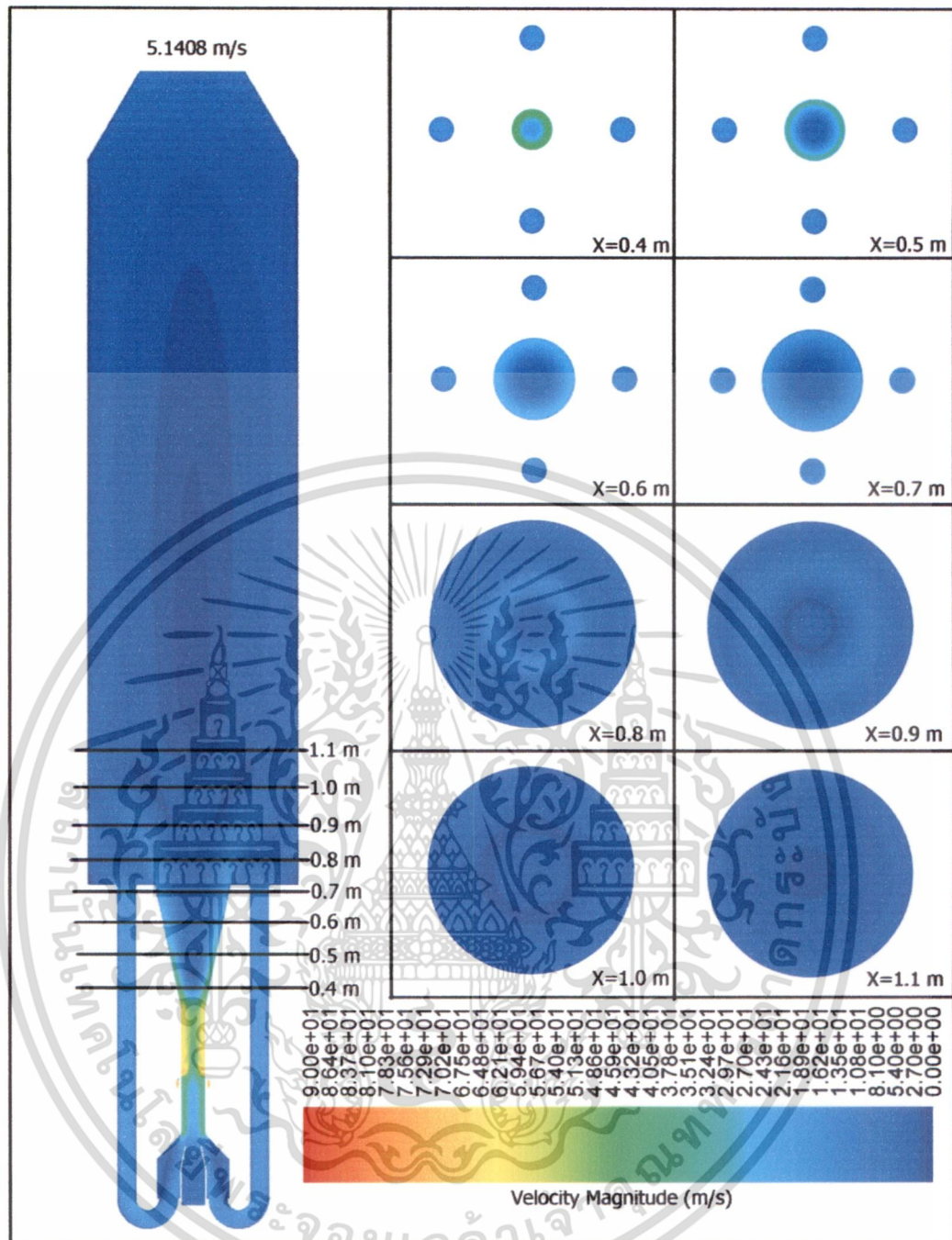
รูปที่ 6.22 การกระจายความเร็วในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



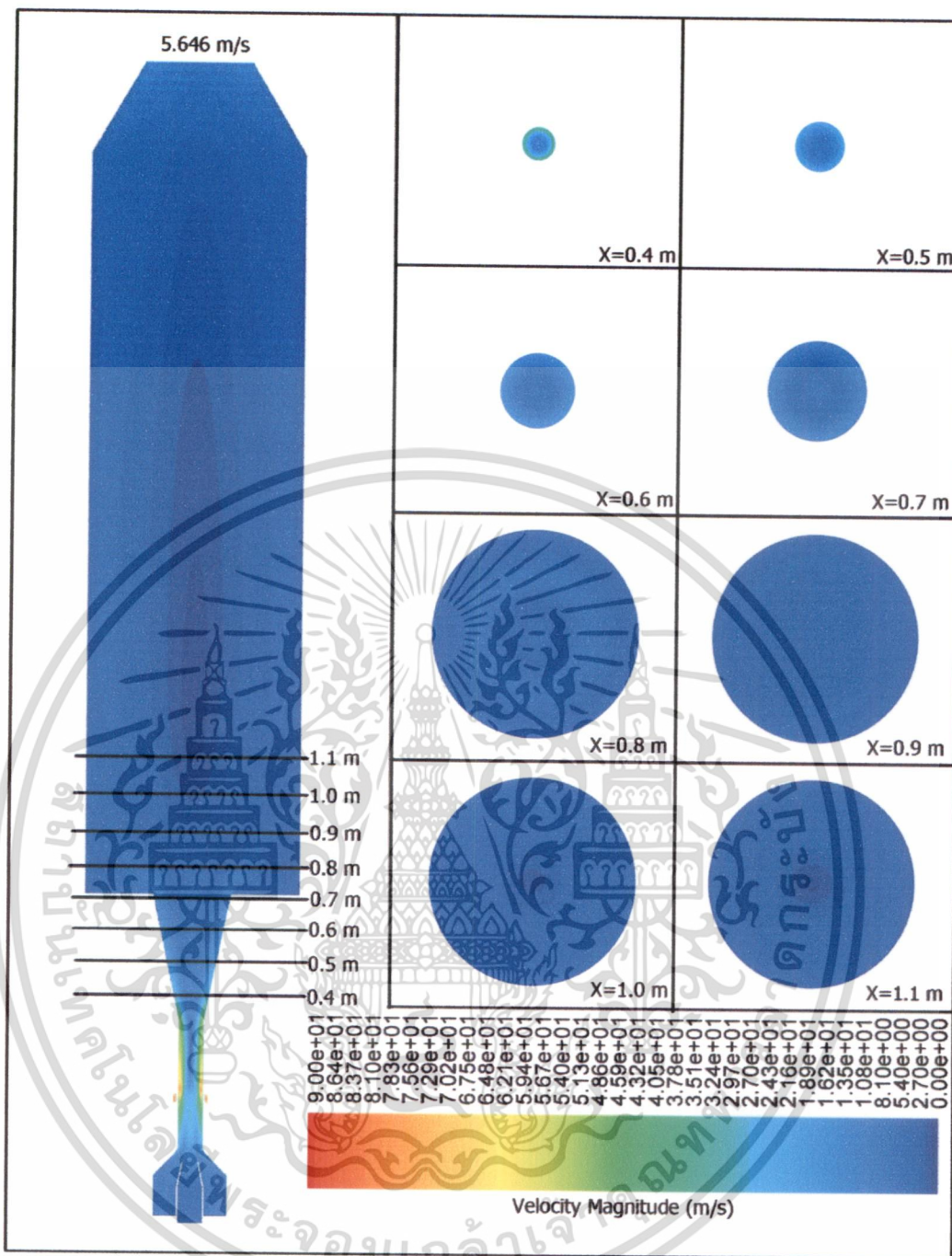
รูปที่ 6.23 การกระจายความเร็วในหัวเสาฉนวนหินกรรณี่ 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.24 การกระจายความเร็วในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.25 การกระจายความเร็วในหัวเผาผ่านหิ้นกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.22-6.24 เป็นรูปที่แสดงความเร็ว (magnitude) ของไหลในหัวเผาผ่านหิ้นแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าเมื่อสัดส่วนของการไหลทุติยภูมิ (Secondary Air) เพิ่มขึ้นส่งผลให้ของไหลมีความเร็วในแนวเส้นสัมผัสเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความดันภายในคัพฟิวเซอร์ลดลง ทำให้ก๊าซไอเสียไหลวนกลับเข้าไปในบริเวณคัพฟิวเซอร์มากขึ้น ซึ่งจะช่วยในการกักเก็บสารระเหยไว้ในกระให้เป็ผลดีต่อการรักษาเสีรภาพของการเผาไหม้

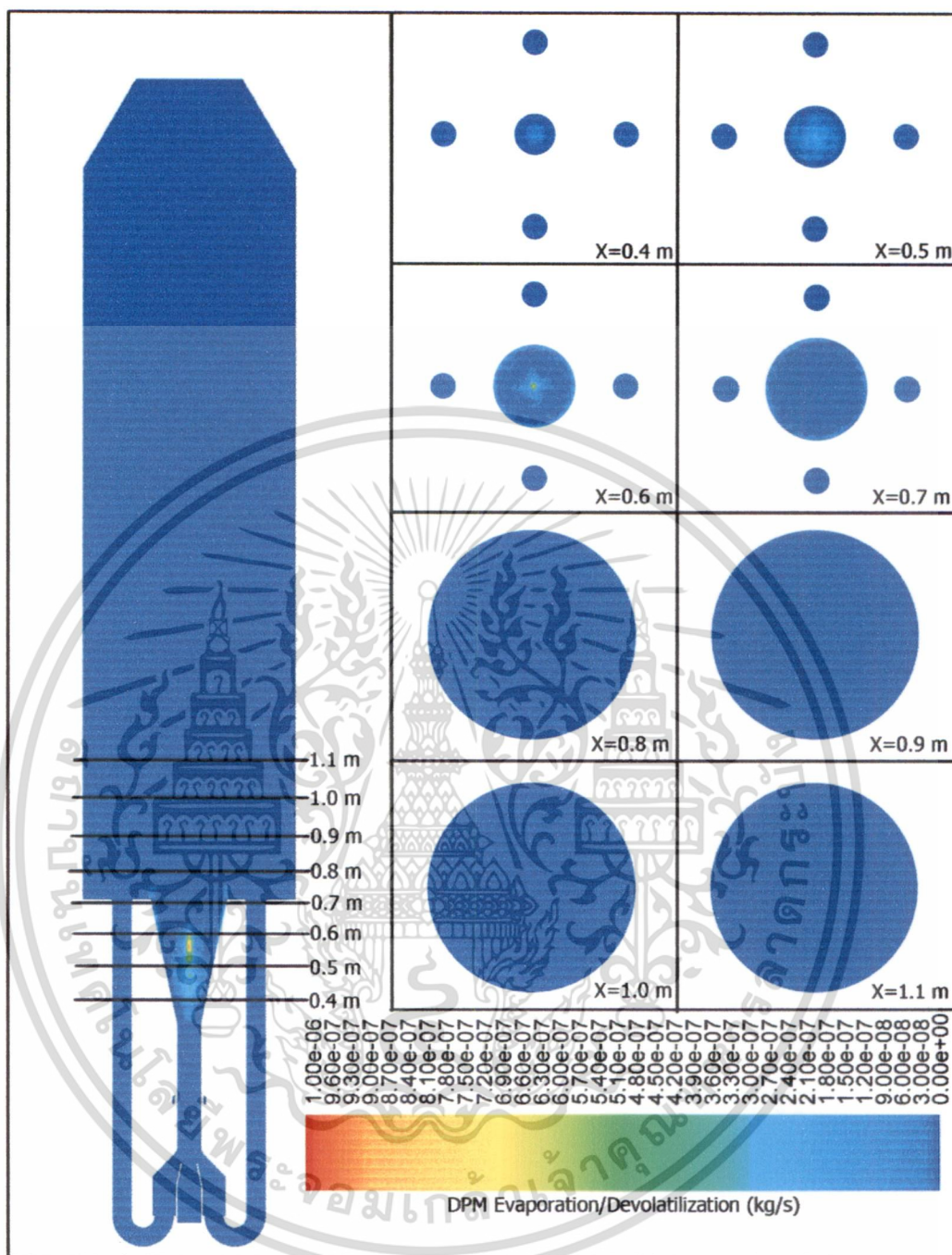
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.25 เป็นรูปที่แสดงความเร็ว (magnitude) ของไหลในหัวเผาถ่านหินแบบที่ไม่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ไอเสีย อันเนื่องมาจากไม่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ไอเสีย ทำให้ปริมาณของไหลที่ไหลผ่าน throat น้อยลง จึงไม่สามารถต้านทานการไหลย้อนกลับได้ เป็นผลให้ของไหลนั้นสามารถไหลเข้ามาถึงที่บริเวณตรงกลาง thorat



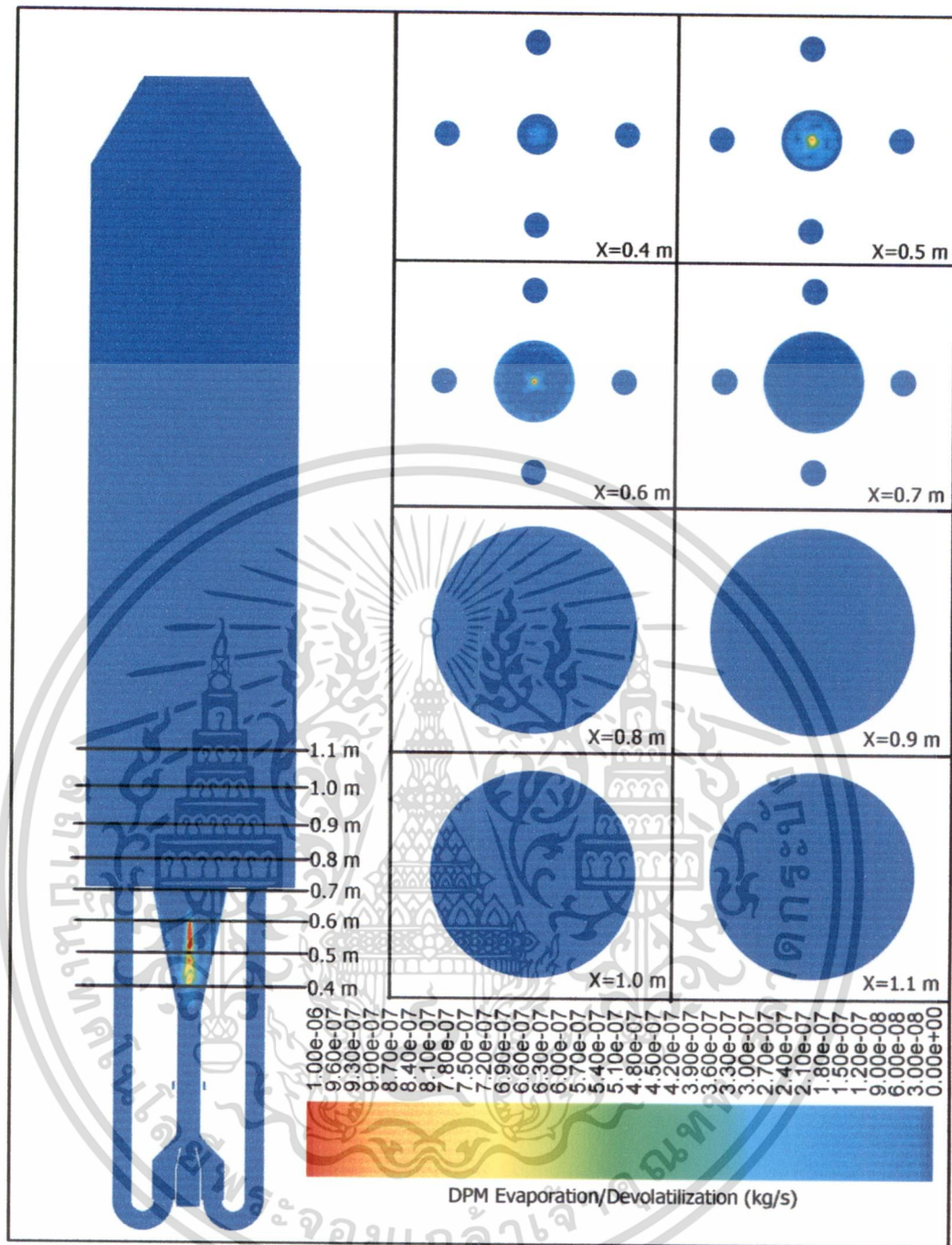
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1.2 ผลการจำลองอัตราการระเหยของสารระเหย



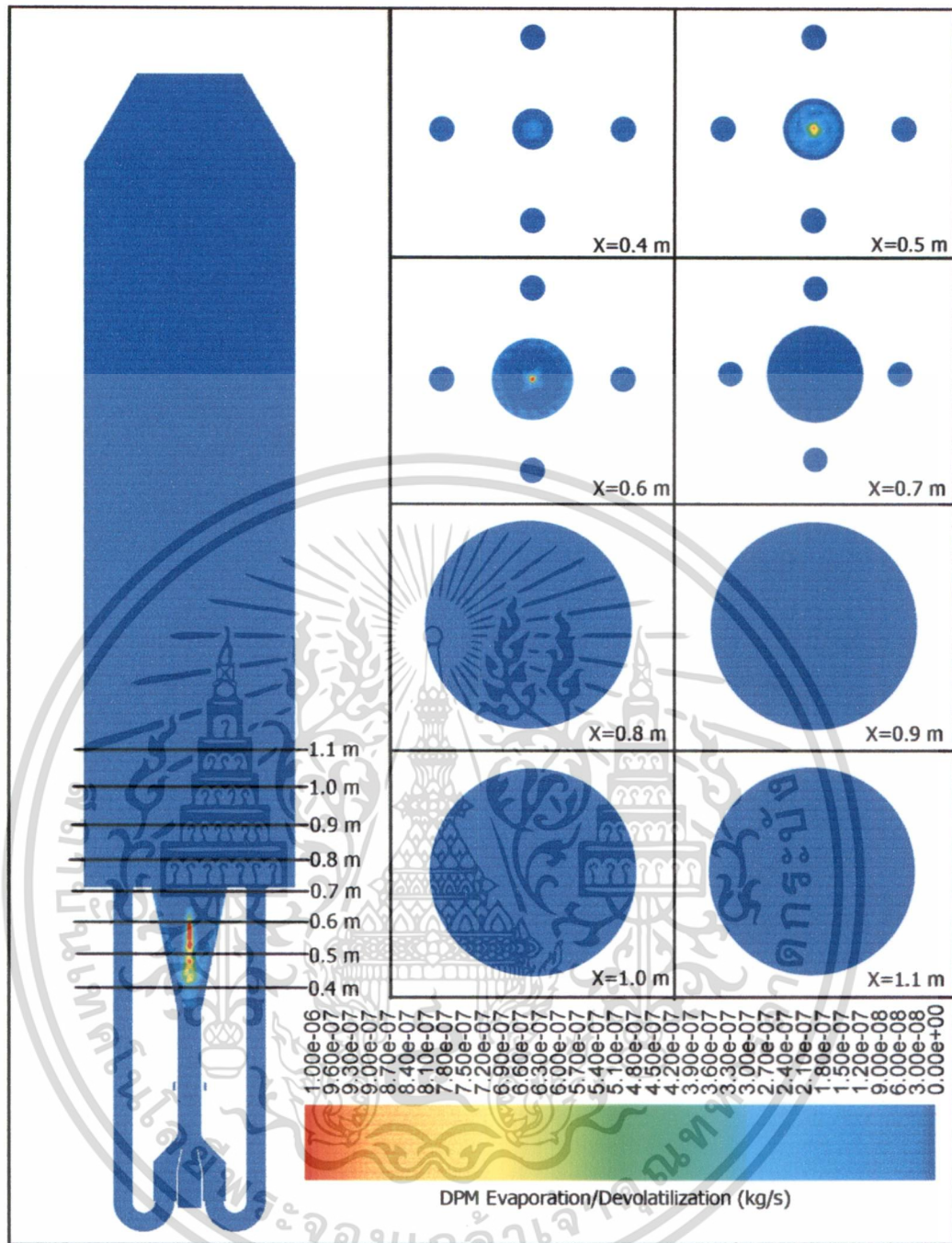
รูปที่ 6.26 อัตราการระเหยของสารระเหยในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



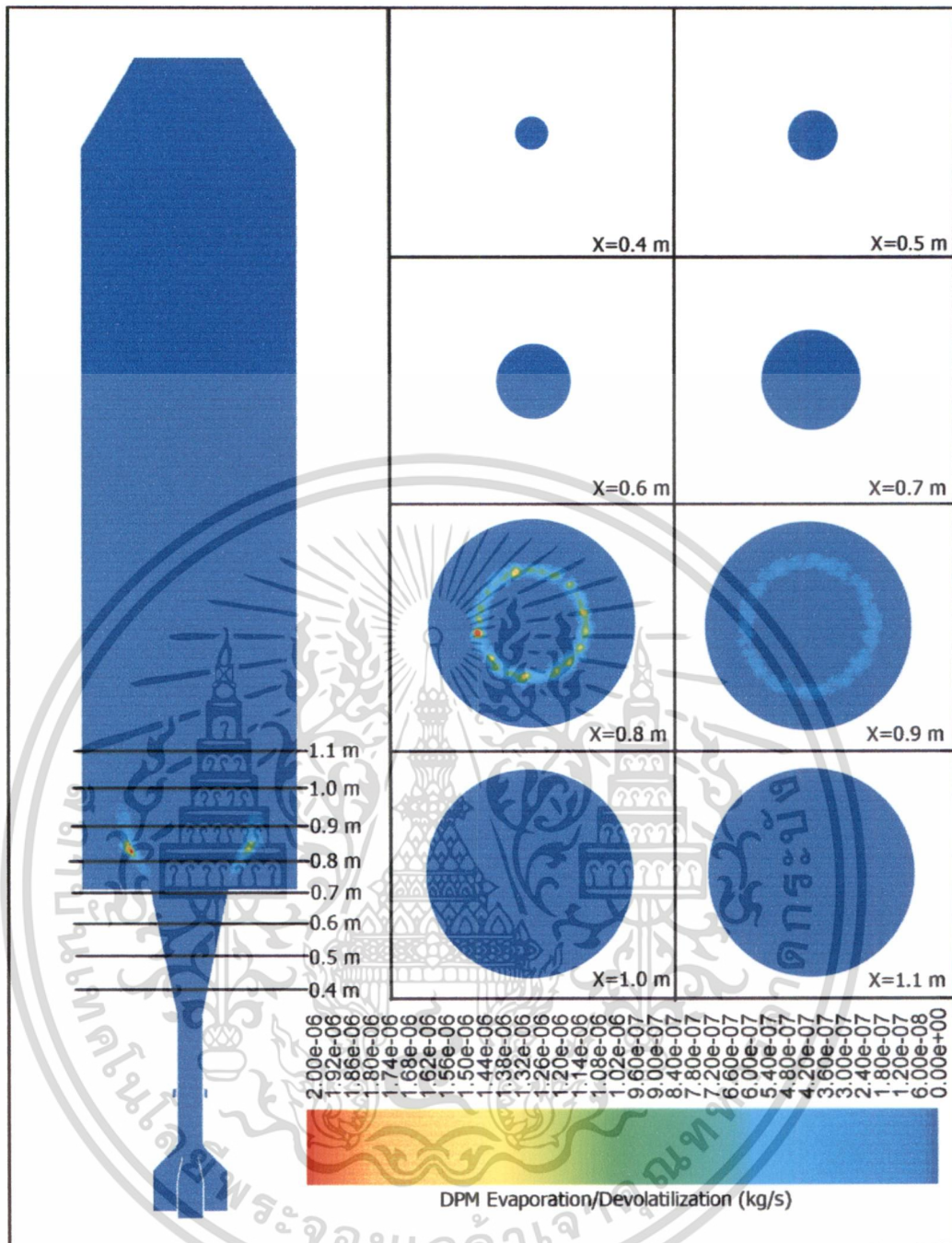
รูปที่ 6.27 อัตราการระเหยของสารระเหยในหัวเสาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.28 อัตราการระเหยของสารระเหยในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.29 อัตราการระเหยของสารระเหยในหัวเผาผ่านหินกรณี ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.26-6.28 แสดงถึงอัตราการระเหยของสารระเหยในถ่านหินในหัวเผาถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าการระเหยจะอยู่ในบริเวณคัพฟิวเซอร์ทั้งหมด (ที่ $X=0.4-0.65$ เมตร) โดยอัตราการระเหยในแต่ละกรณีจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่อนุภาคถ่านหินสัมผัสกับความร้อน โดยกรณีที่มีอัตราส่วนอัตราการไหลที่ 34:66 มีการระเหยเกิดขึ้นในอัตรามากที่สุดเนื่องจากความเร็วการไหลภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

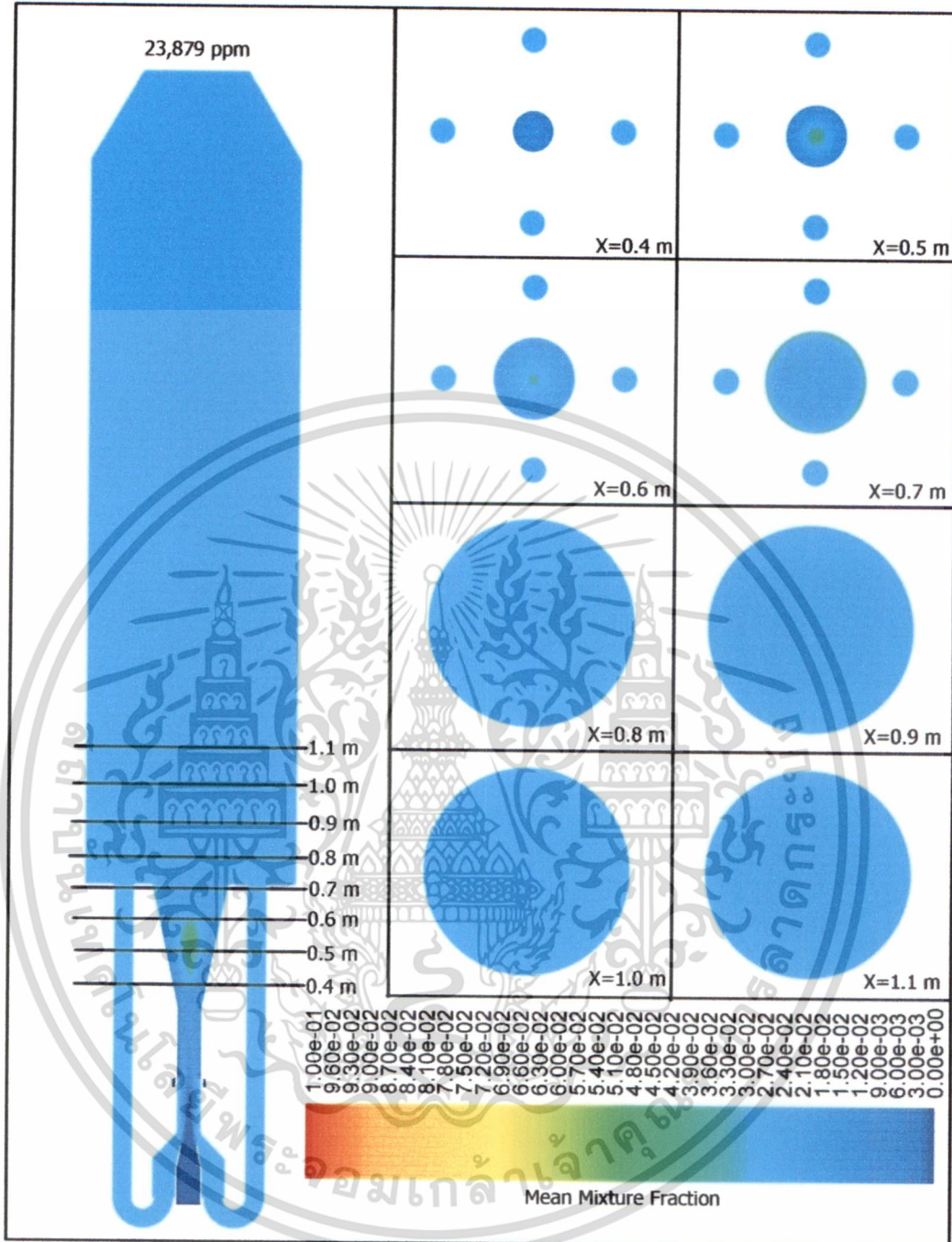
ดีฟิวเซอร์ต่ำกว่า 2 กรณีที่เหลือส่งผลให้เวลาที่ถ่านหินได้รับพลังงานมีมากขึ้น และประกอบกับอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงกว่าส่งผลให้เกิดอัตราการระเหยขึ้นมากที่สุด

รูปที่ 6.29 แสดงถึงอัตราการระเหยของสารระเหยในถ่านหินในหัวเผาถ่านหินแบบที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าเกิดการระเหยอยู่ที่บริเวณปากทางออกของดีฟิวเซอร์ในห้องเผาไหม้ (ที่ $X=0.8-0.9$ เมตร)ซึ่งมีบริเวณการระเหยที่กว้างกว่ากรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

จากทั้งกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียและกรณีที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย จะพบว่าตำแหน่งที่เกิดการระเหยจะตรงกันกับตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงและมีความเร็วของของไหลที่ต่ำ

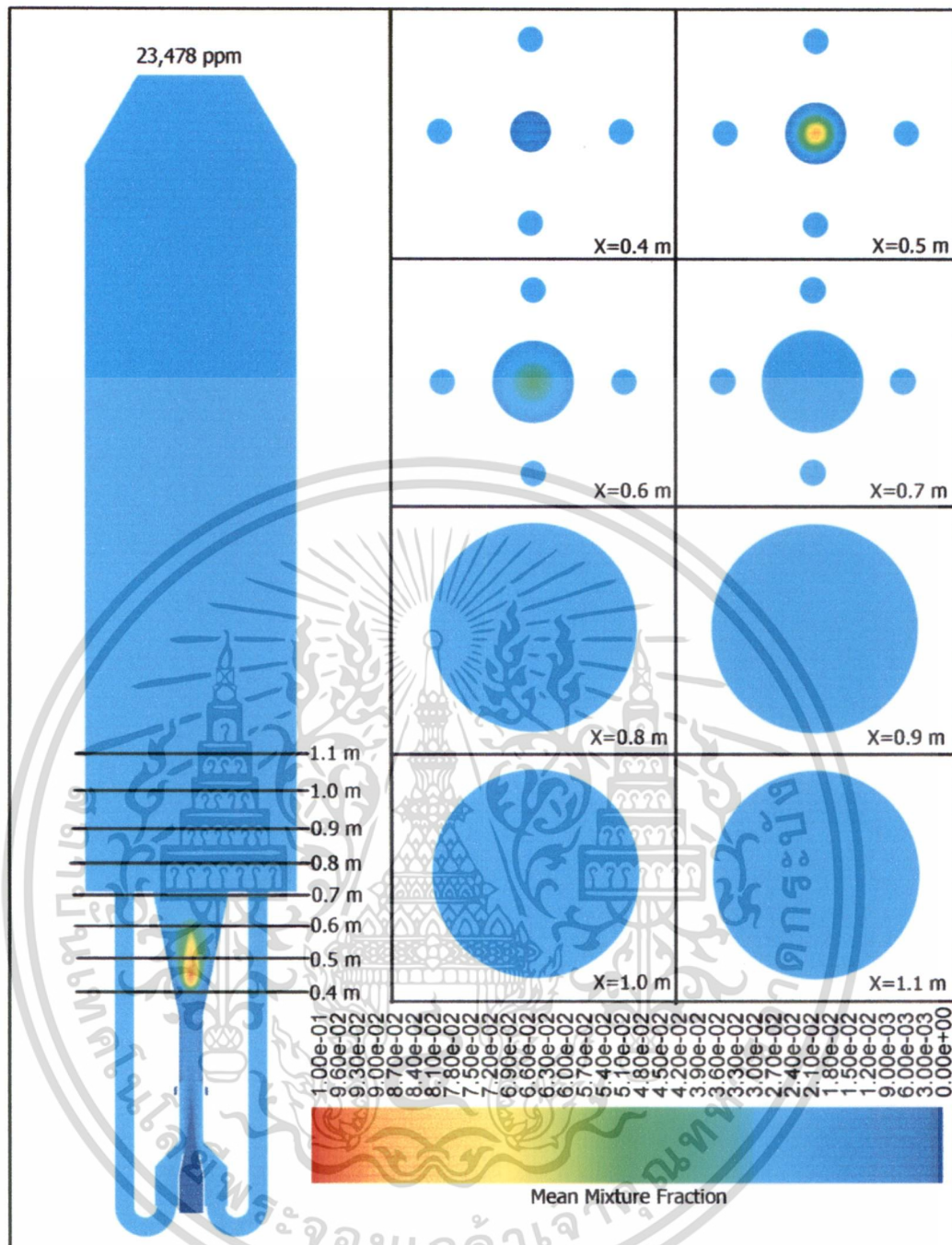


6.3.1.3 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากสารระเหย



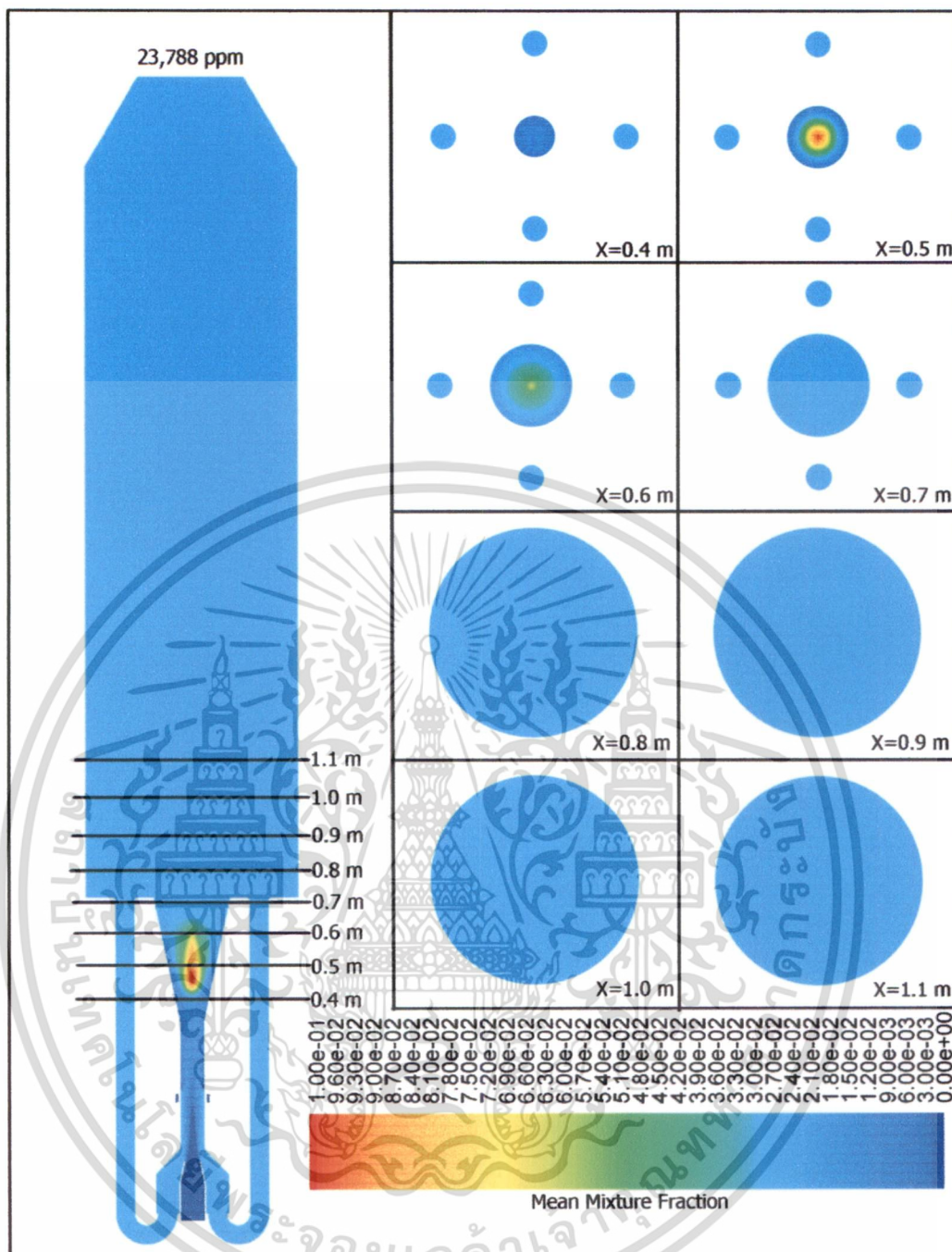
รูปที่ 6.30 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากสารระเหย
ในหัวเสาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.31 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากสารระเหย
ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

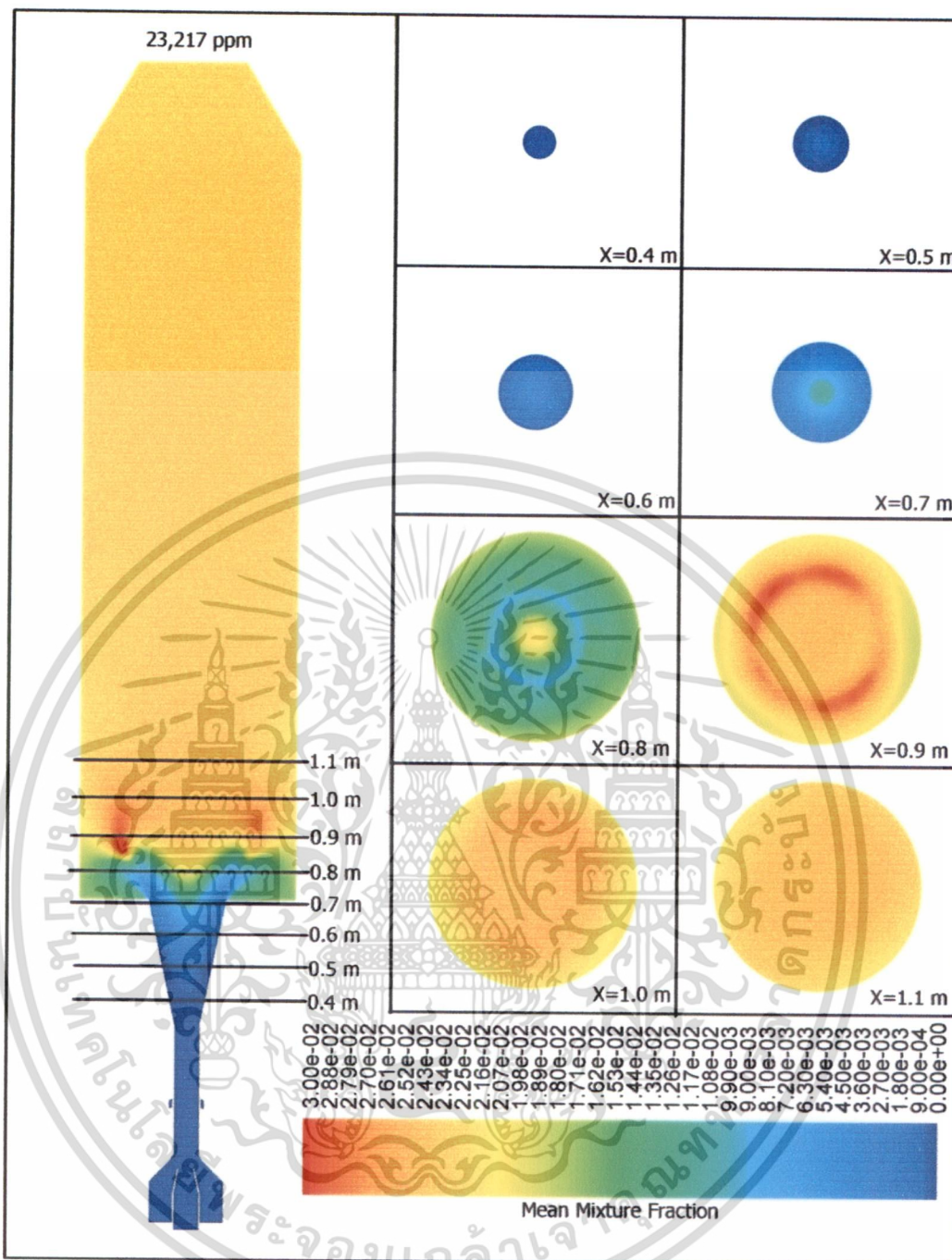
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.32 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากสารระเหย

ในหัวเสาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.33 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากสารระเหยในหัวเผาถ่านหินกรณี ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.30-6.32 แสดงการกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากสารระเหยในหัวเผาถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าการกระจุกตัวของสารระเหยจะอยู่บริเวณคัพฟิวเซอร์เนื่องมาจากการไหลย้อนกลับของของไหล ทำหน้าที่กักสารระเหยเอาไว้ โดยปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับผลการจำลองในส่วนที่ 6.2.1 โดยสารระเหยที่ออกจากบริเวณคัพฟิวเซอร์นั้นเป็นสารระเหยที่อยู่รูปของผลิตภัณฑ์ (มี C, H, O,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

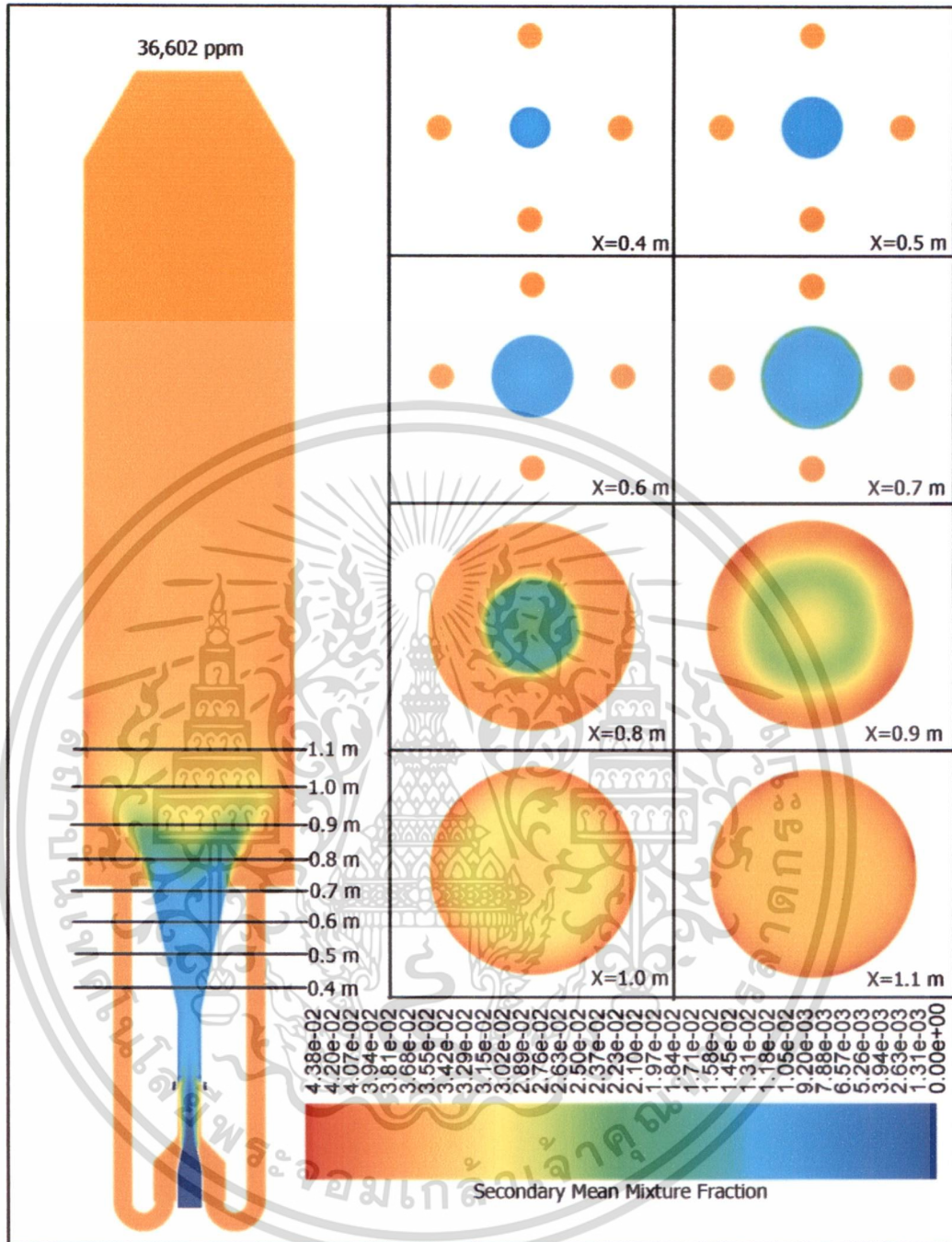
N และ S เป็นองค์ประกอบ) เนื่องจากสารระเหยที่ระเหยออกมานั้นได้ถูกเผาไหม้หมดในบริเวณดีฟิวเซอร์ (ไม่เกินตำแหน่ง $X=0.6$ เมตร)

รูปที่ 6.33 แสดงการกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากสารระเหยในหัวเผาถ่านหินแบบที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าสารระเหยส่วนมากจะเข้มข้นที่บริเวณ $X=0.85-1.05$ เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับที่มีการระเหย และสารระเหยจะถูกเผาไหม้หมดที่บริเวณ $X=1.1$ เมตร



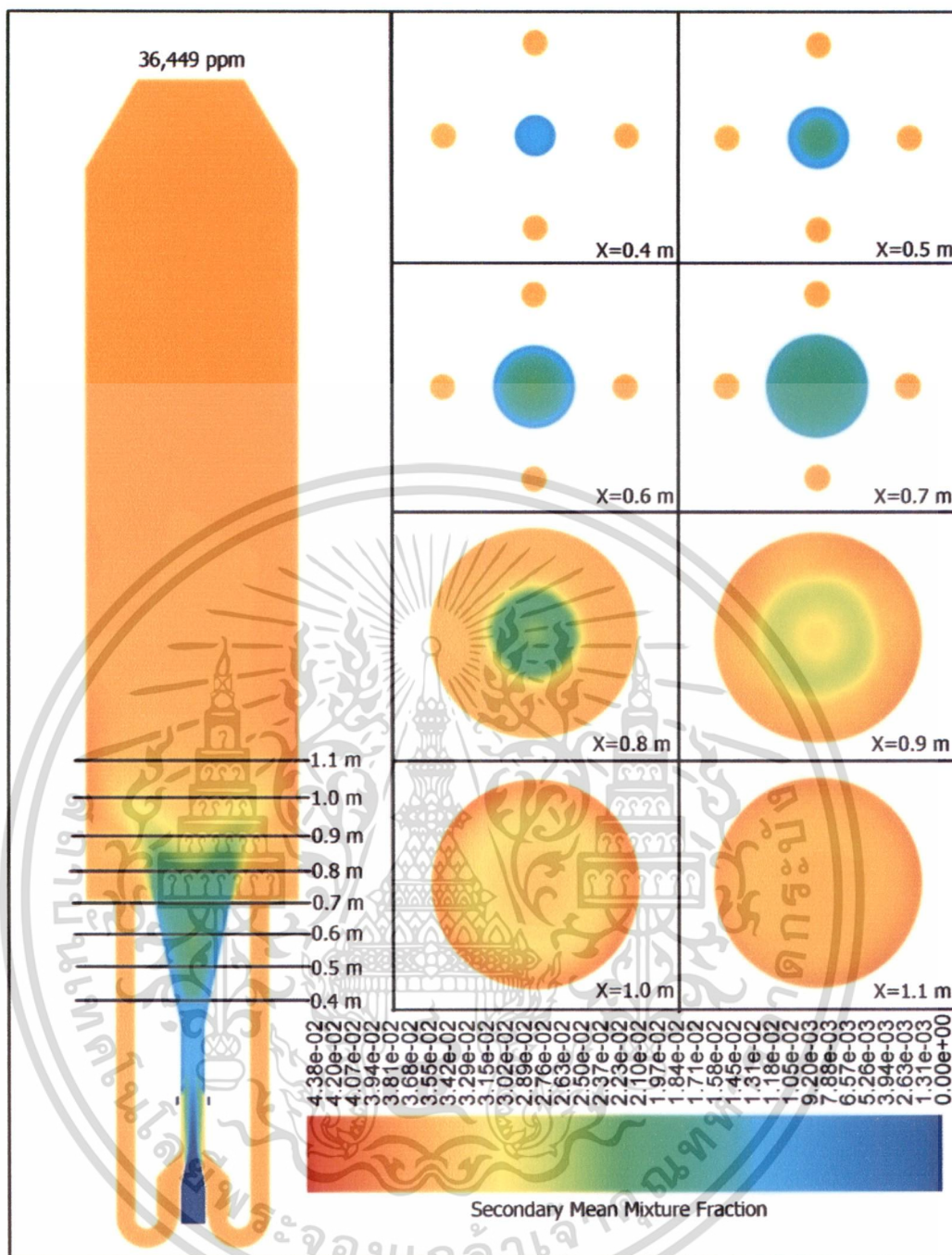
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1.4 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากขาร์



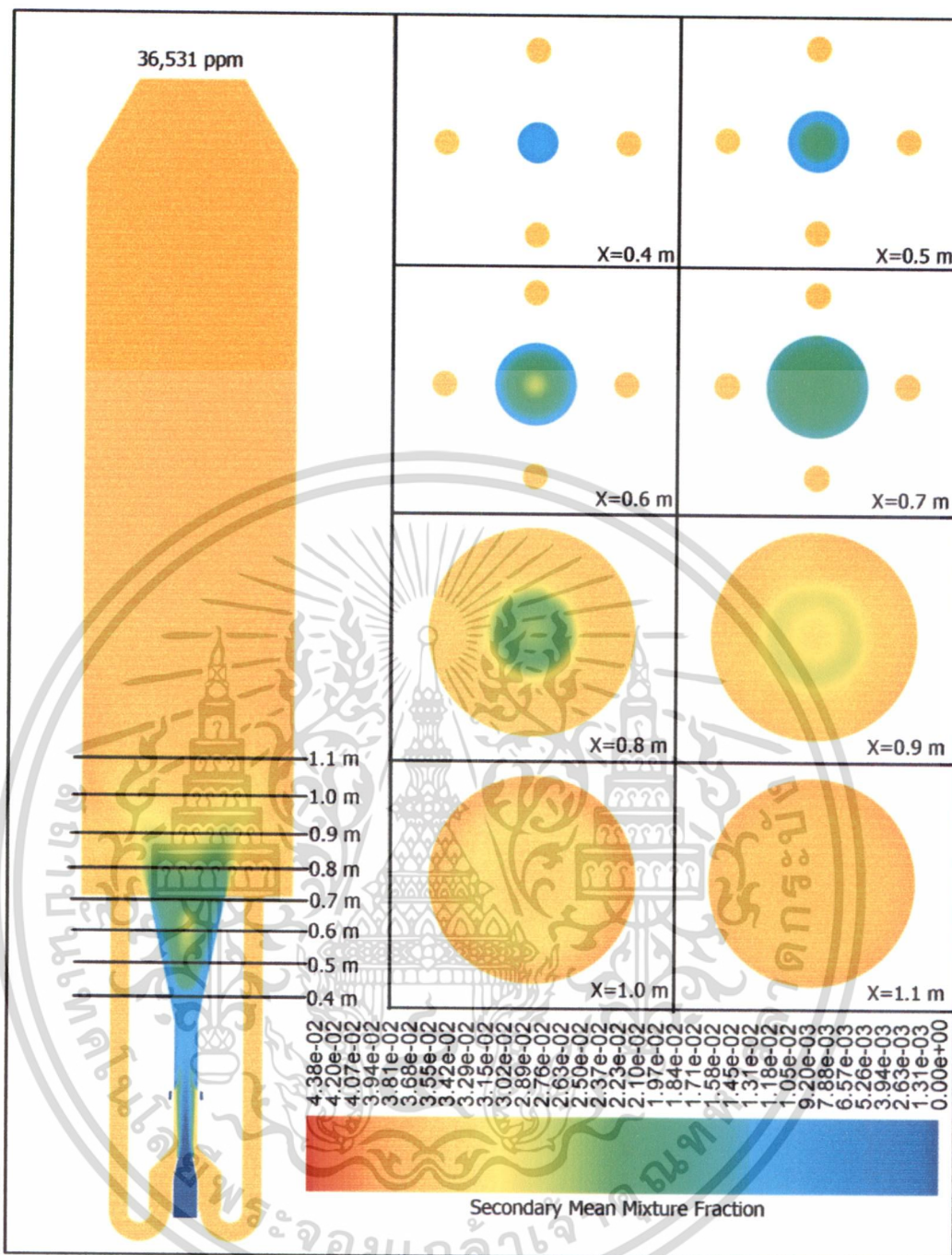
รูปที่ 6.34 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากขาร์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



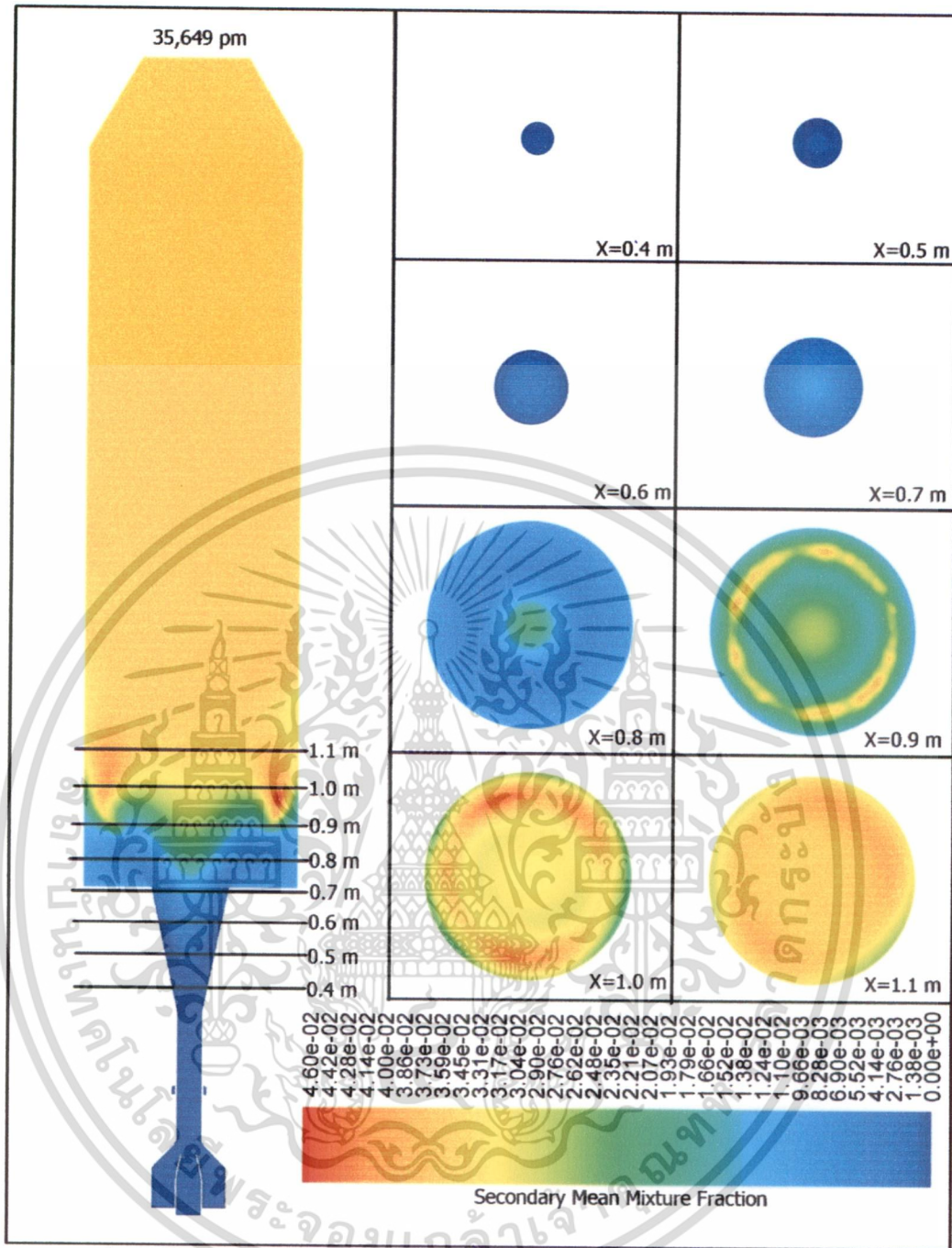
รูปที่ 6.35 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากขาร์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.36 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากขารในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.37 การกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากชาร์ในหัวเผาถ่านหิน
กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.34-6.36 แสดงกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากชาร์ในหัวเผาถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย ซึ่งชาร์จะเกิดหลังจากที่ถ่านหินปลดปล่อยสารระเหยออกไปหมดแล้ว โดยความเข้มข้นของชาร์จะสอดคล้องกับอุณหภูมิและลักษณะการไหล โดยในกรณีอัตราส่วนอัตราการใช้ 34:66 จะปลดปล่อยชาร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวดเร็วกว่า 2 กรณีที่เหลือ เพราะอุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่า โดยชาร์ที่เผาไหม้แล้วจะอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ (มี C, H, O, N และ S เป็นองค์ประกอบ)

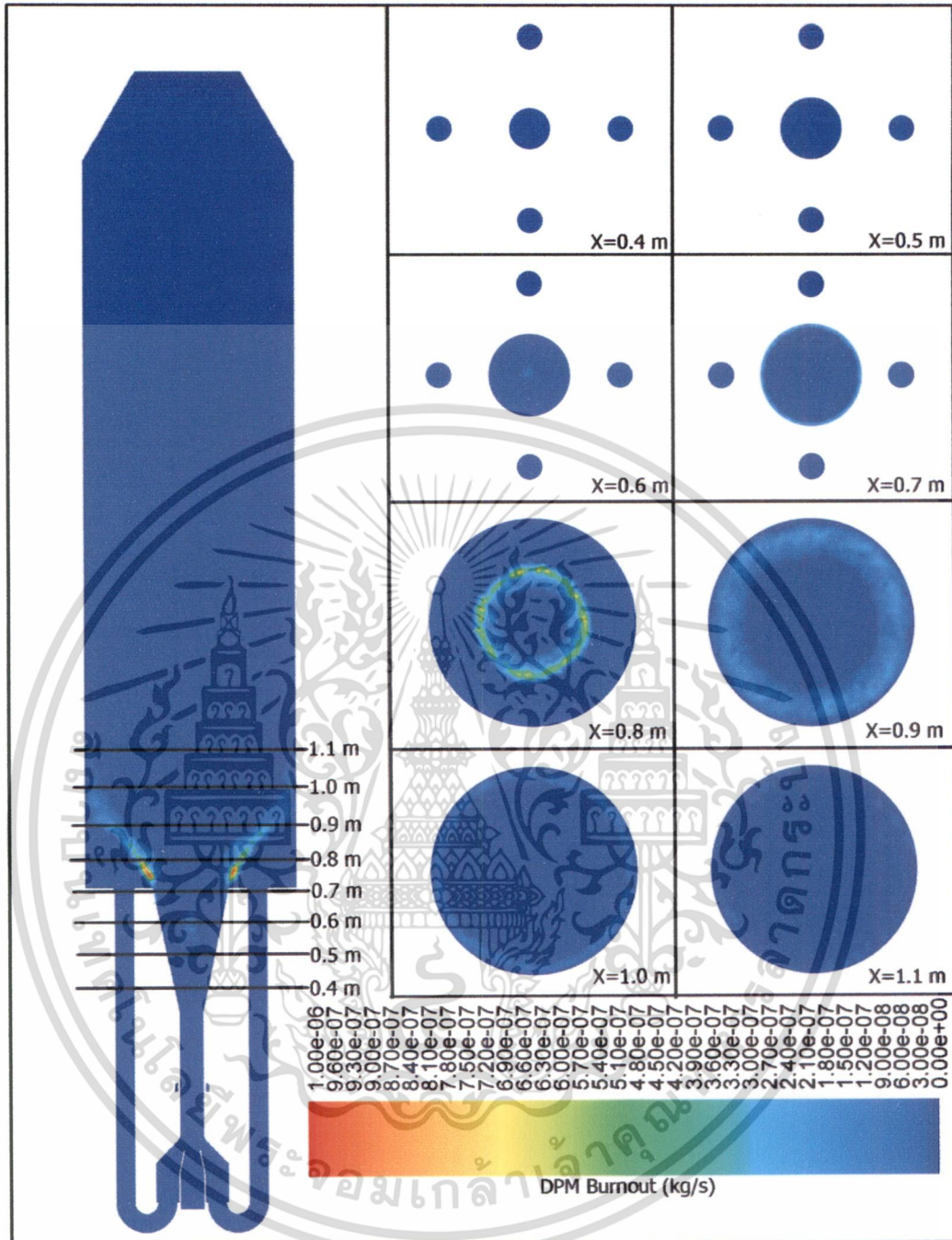
รูปที่ 6.37 แสดงกระจายความเข้มข้นของก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากชาร์ในหัวเผา ถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าชาร์นั้นถูกเผาไหม้หมดที่ระยะ $X \approx 1.2$ เมตร และถัดจากนั้นจะเป็นชาร์ที่อยู่ในรูปผลิตภัณฑ์

จากทั้งกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียและกรณีที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าตำแหน่งการเกิดชาร์นั้นจะอยู่ถัดจากตำแหน่งที่เกิดสารระเหย โดยระยะห่างนั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหลและอัตราการระเหย



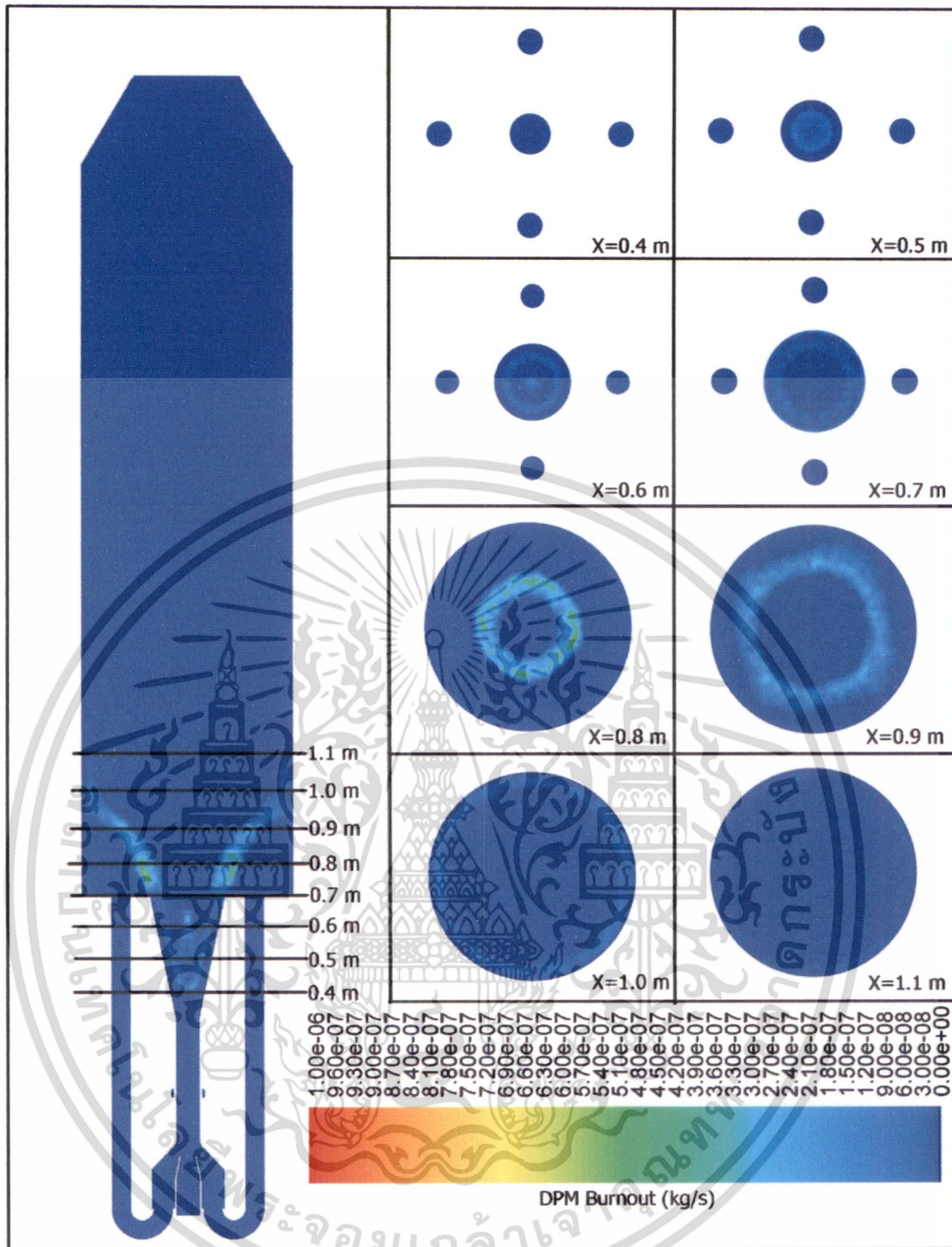
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1.5 ผลการจำลองอัตราการเผาไหม้ของสารระเหยและซาร์



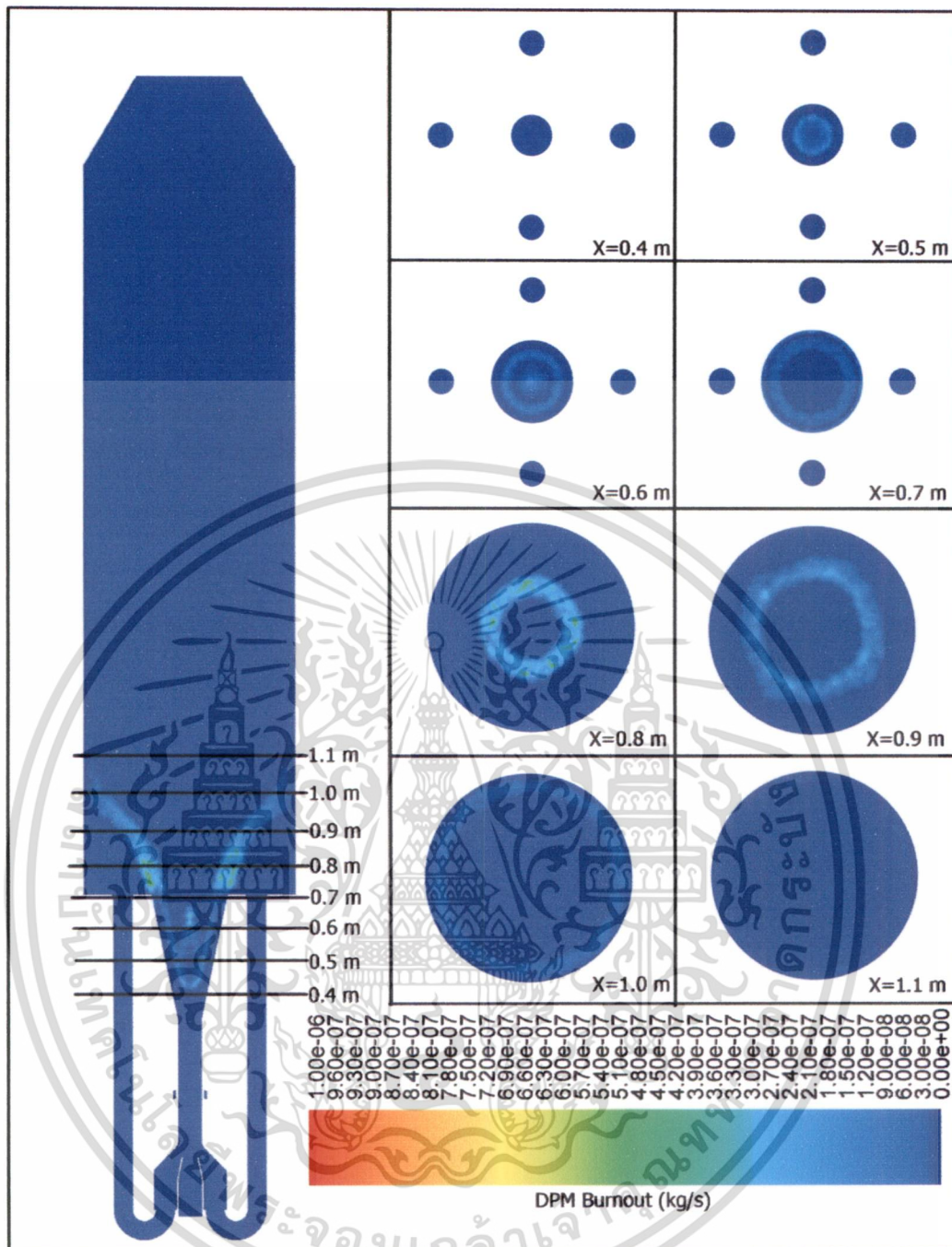
รูปที่ 6.38 อัตราการเผาไหม้ของสารระเหยและซาร์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



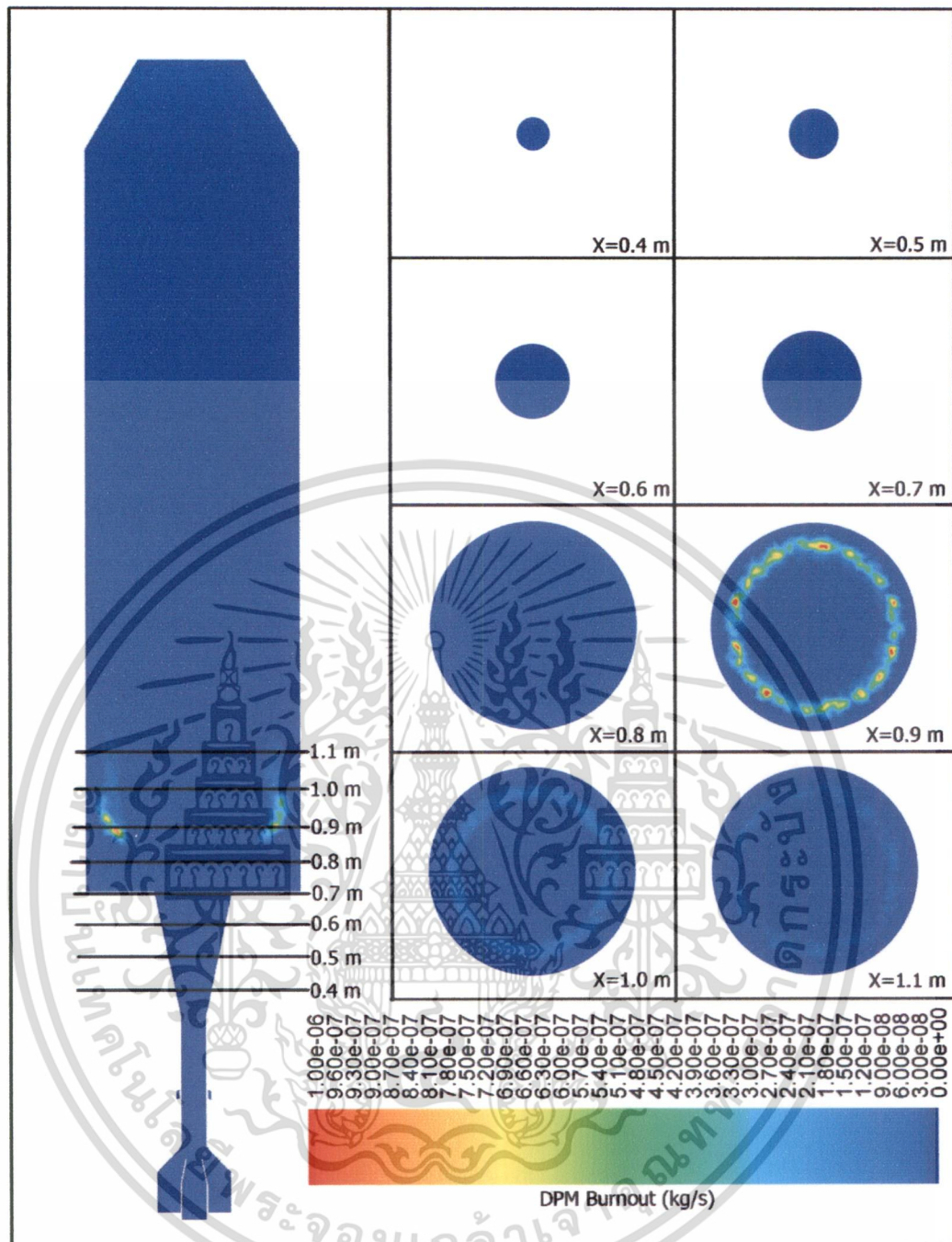
รูปที่ 6.39 อัตราการเผาไหม้ของสารระเหยและคาร์บอนในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.40 อัตราการเผาไหม้ของสารระเหยและคาร์บอนในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.41 อัตราการเผาไหม้ของสารระเหยและซาร์ในหัวเผาถ่านหิน
กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.38-6.40 แสดงอัตราการเผาไหม้ของสารระเหยและซาร์ในหัวเผาถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย จะพบว่าบริเวณที่เกิดการเผาไหม้จะอยู่ที่บริเวณตรงกลางคัพพีวเซอร์ ไปจนกระทั่งเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (ตั้งแต่ $X=0.4-1.1$ เมตร) โดยเส้นทางการเผาไหม้จะเกิดตามลักษณะการไหล ซึ่งการเผาไหม้ภายในคัพพีวเซอร์เป็นการเผาไหม้สารระเหย แต่การเผาไหม้ที่เลยจากคัพพีวเซอร์ไปนั้น เป็นการเผาไหม้ของซาร์ จากผลการจำลองพบว่ากรณีที่อัตราส่วนอัตราไหล 30:70 มีเส้นทางการเผาไหม้ไม่ต่อเนื่อง

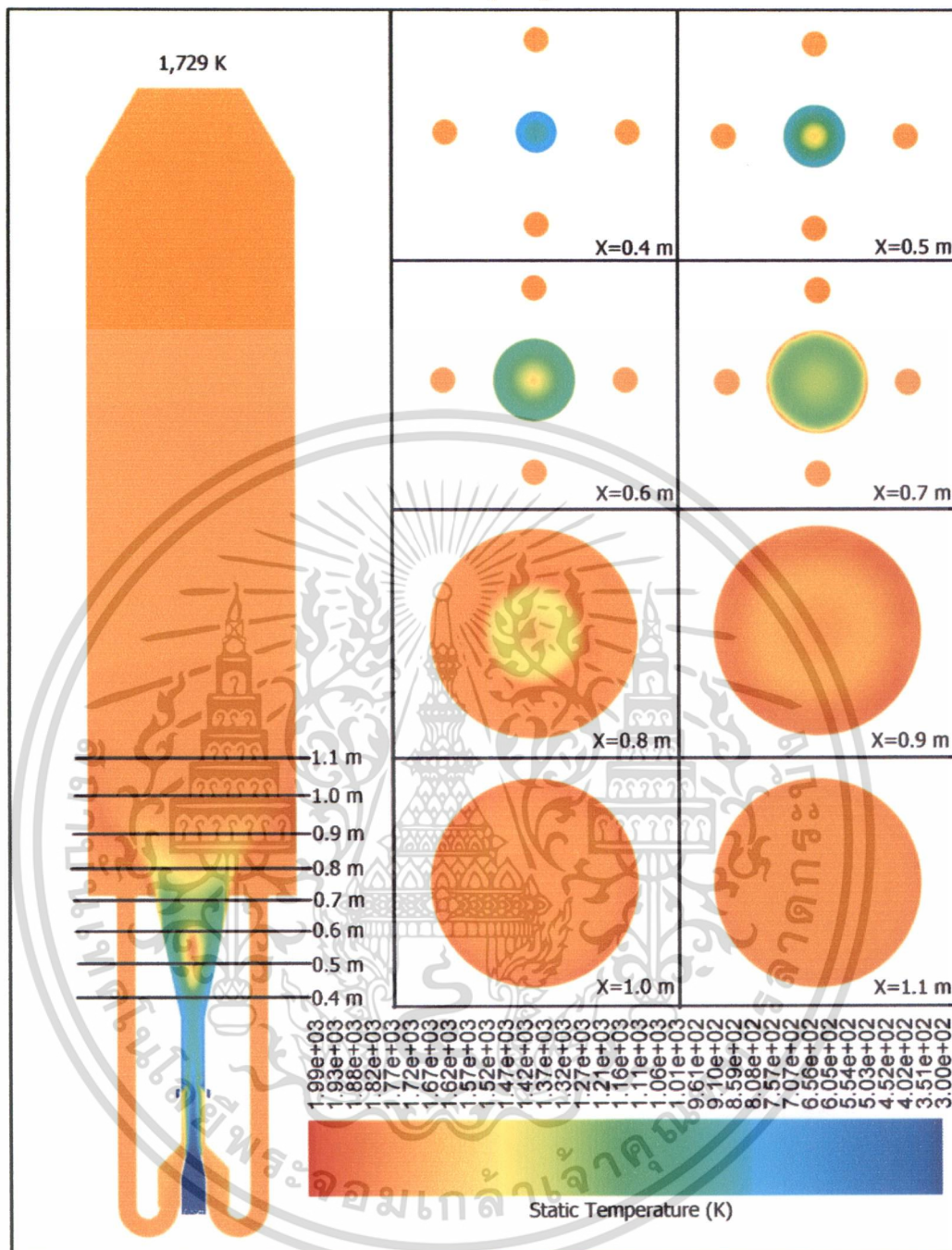
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความเร็วของของไหลที่บริเวณคิฟิวเซอร์มีมากกว่าความเร็วเปลวไฟทำให้เปลวไฟไม่สามารถดำรงอยู่ได้ และเมื่อออกมาจากคิฟิวเซอร์ การเผาไหม้จะเกิดเป็นปกติ แต่บริเวณการเผาไหม้ (ตั้งแต่ $X=0.7-0.8$ เมตร) จะแคบกว่า 2 กรณีที่เหลือเนื่องมาจากการบีบบังคับของของไหลที่ความเร็วแนวเส้นสัมผัสสูงกว่า

รูปที่ 6.41 แสดงอัตราการเผาไหม้ของสารระเหยและซาร์ในหัวเผาถ่านหินแบบที่ไม่มีกรหมุนเวียนก๊าซไอเสีย ในกรณีนี้การเผาไหม้จะเริ่มขึ้นที่ตำแหน่ง $X=0.85$ เมตร ซึ่งจะสอดคล้องกับตำแหน่งที่เกิดการระเหย และการเผาไหม้จะเกิดขึ้นสูงสุดที่ $X=0.9$ เมตร

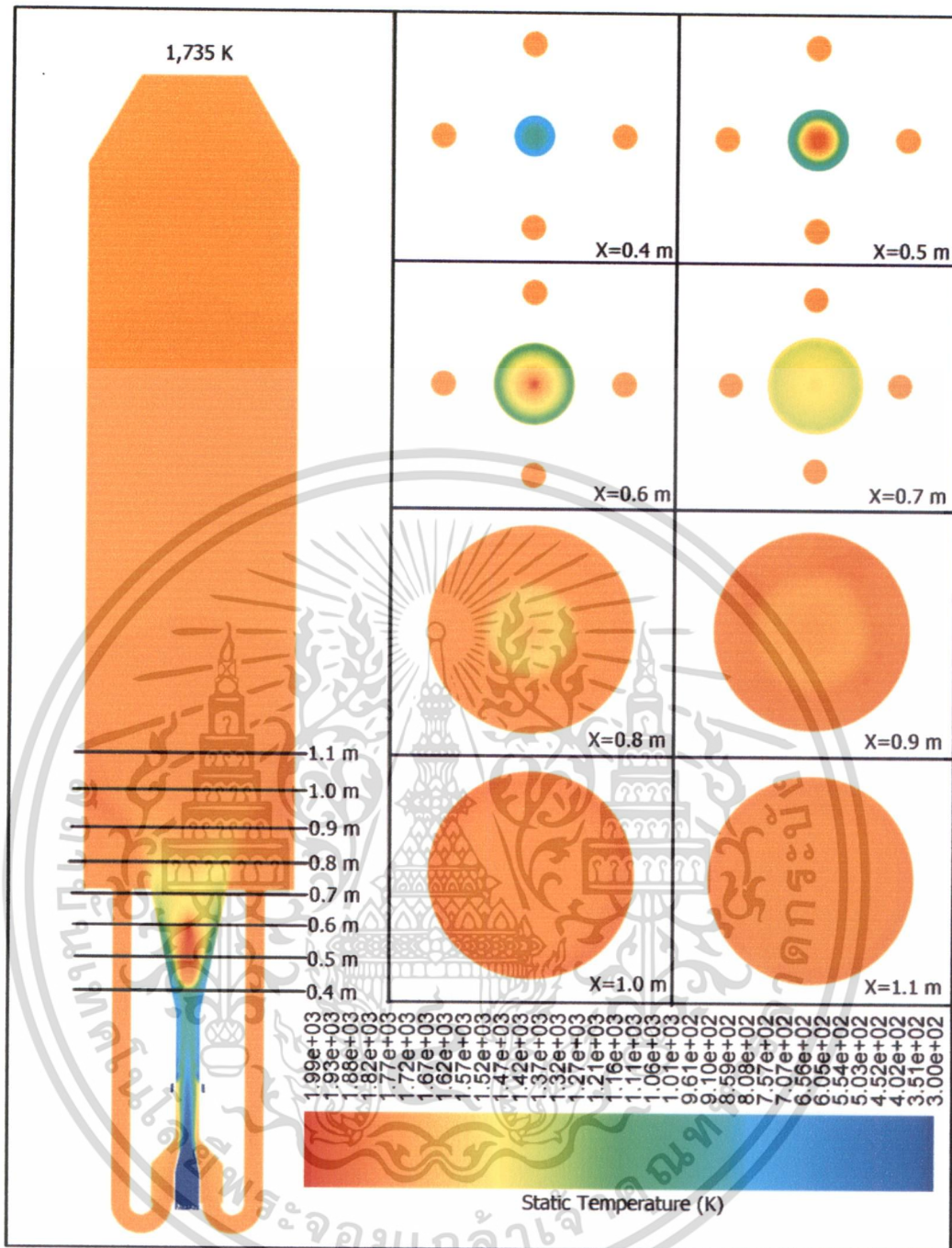


6.3.1.6 ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิ



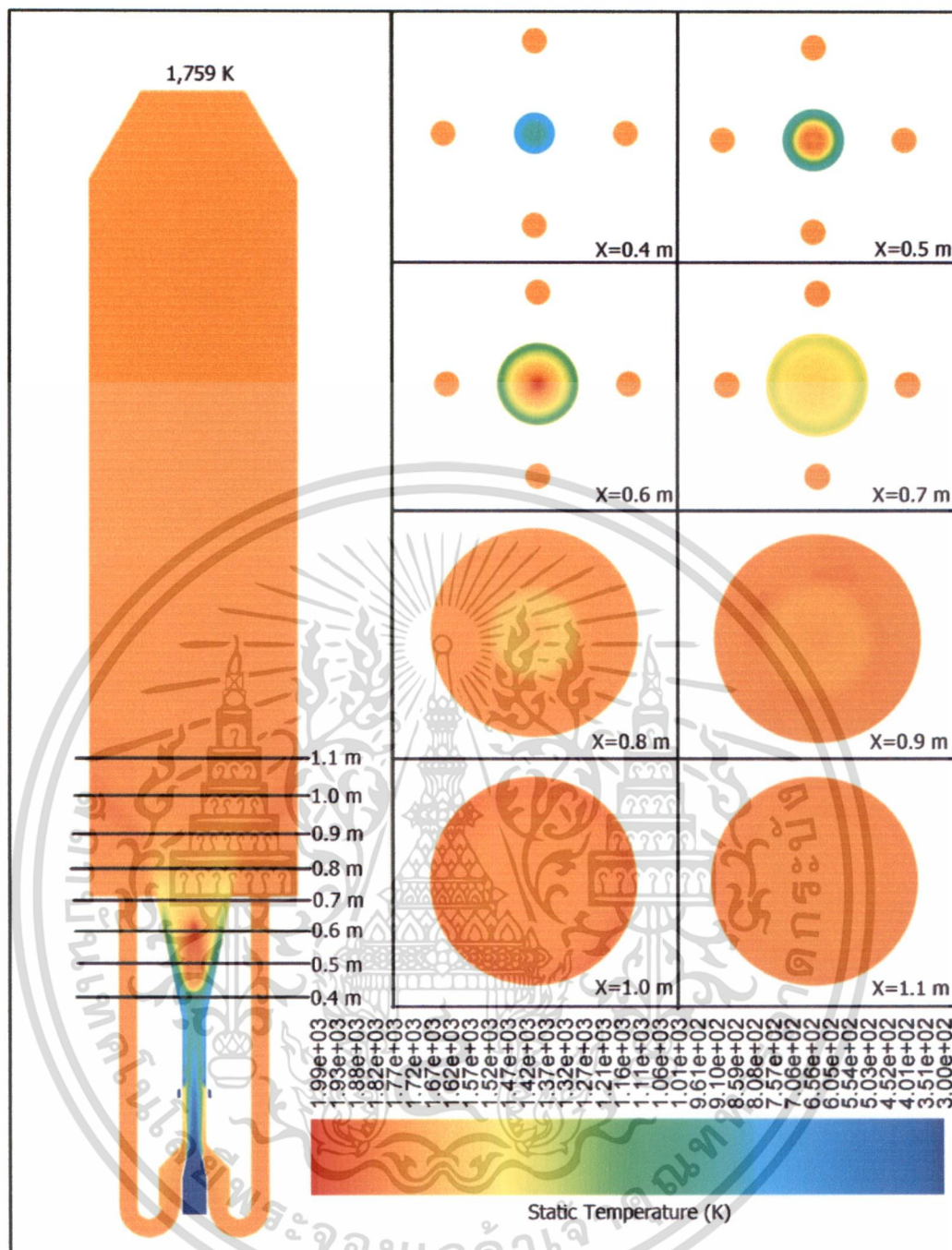
รูปที่ 6.42 การกระจายตัวของอุณหภูมิในหัวเผาถ่านหินในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



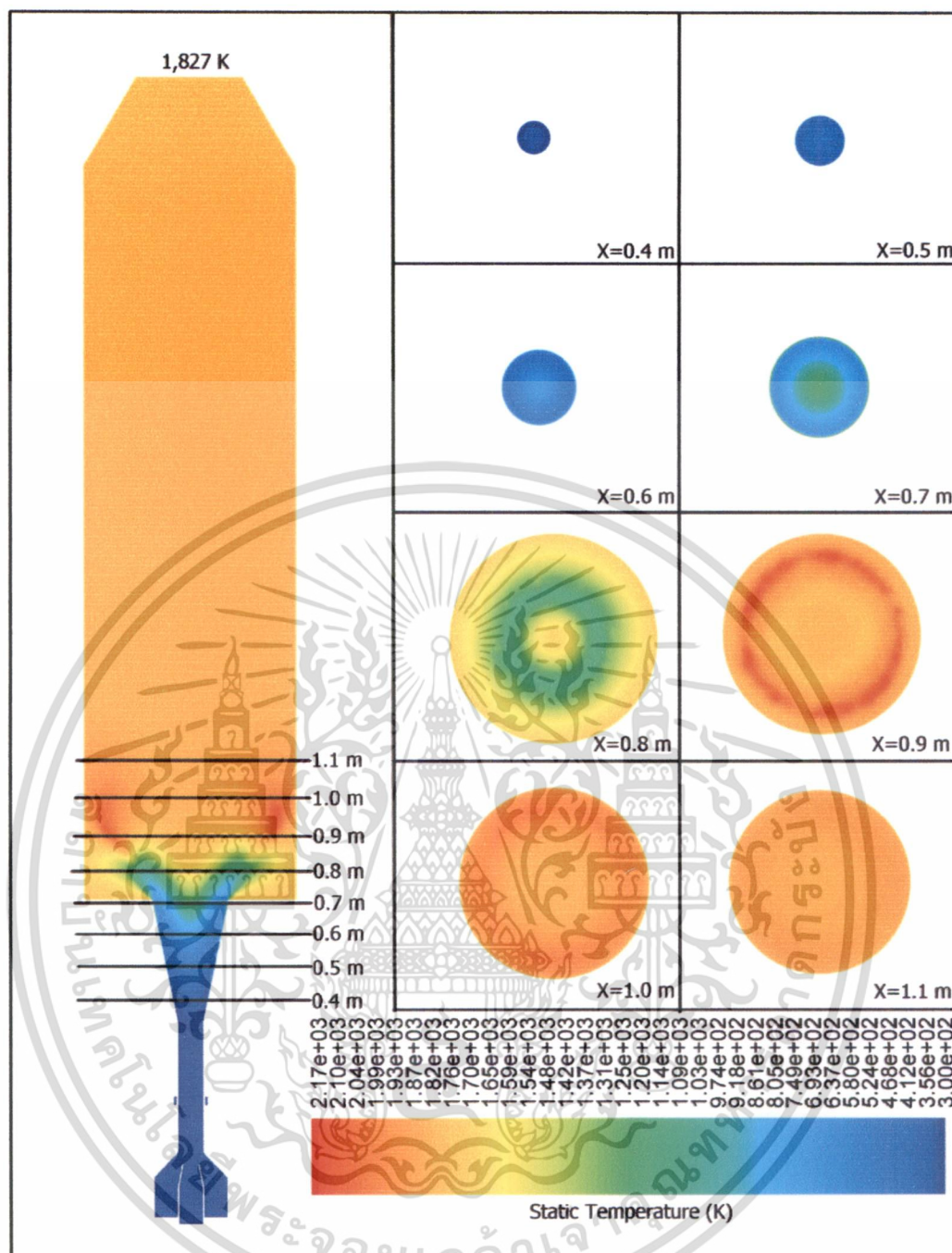
รูปที่ 6.43 การกระจายตัวของอุณหภูมิในหัวเผาถ่านหินในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.44 การกระจายตัวของอุณหภูมิในหัวเผาถ่านหินในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.45 การกระจายตัวของอุณหภูมิในหัวเผาถ่านหินในหัวเผาถ่านหิน
กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.42-6.44 แสดงการกระจายอุณหภูมิในหัวเผาถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย เห็นได้ว่าอุณหภูมิในแต่ละบริเวณนั้นจะสอดคล้องกับอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศและอัตราการเผาไหม้ ซึ่งอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งนั้นจะเป็นไปตามตาราง PDF (หัวข้อที่ 4.1.2.4) จากการจำลองผลพบว่าที่อัตราส่วนอัตราการไหล 30 : 70 ให้อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำที่สุด อันเนื่องมาจากผลของความเร็วยังคง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

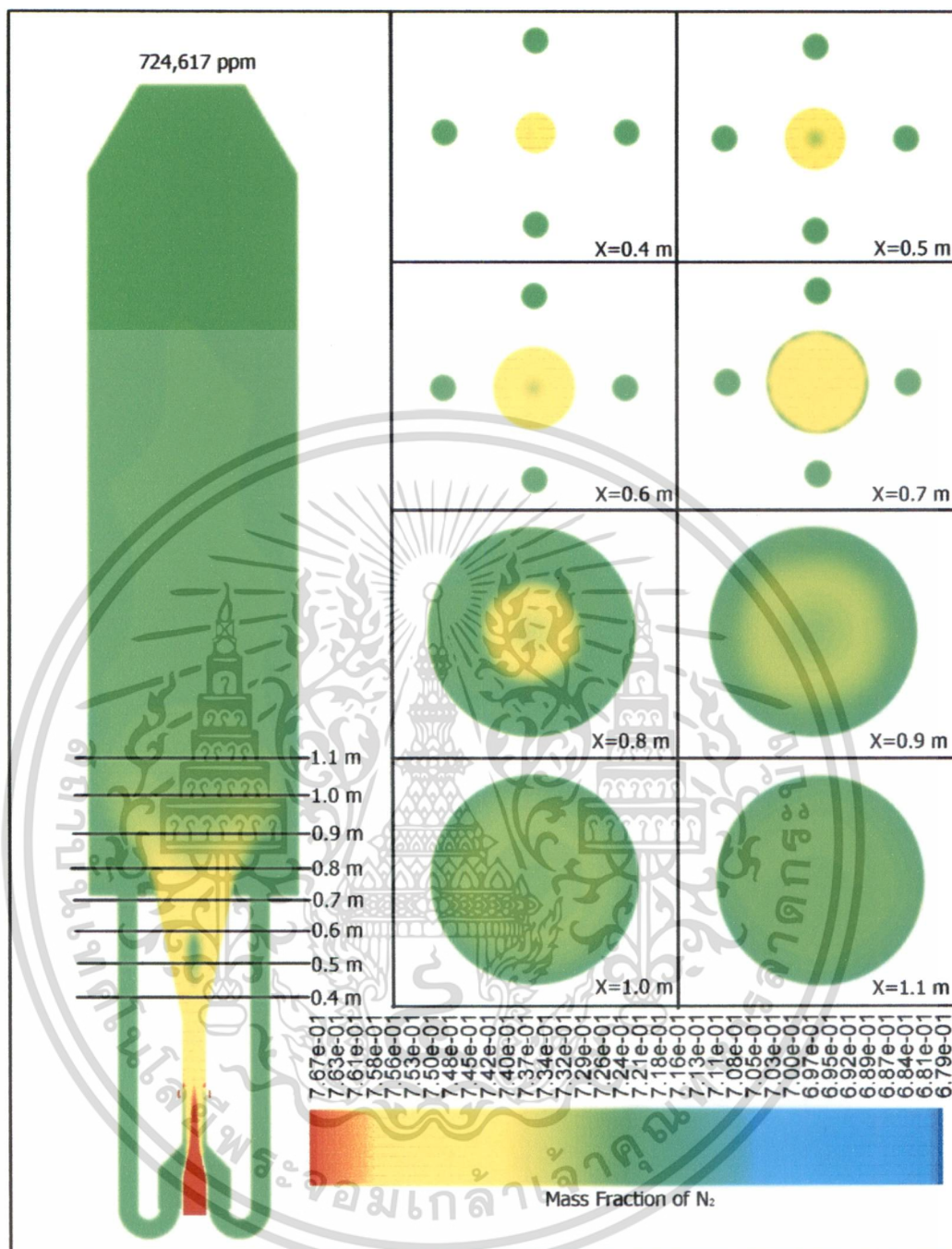
ไหลในแนวเส้นสัมผัสที่มากเป็นผลให้การดูดก๊าซไอเสียไหลวนกลับมาขัดขวางเผาไหม้ได้มากกว่า

รูปที่ 6.45 แสดงการกระจายอุณหภูมิในหัวเผาถ่านหินแบบที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดที่ได้นั้นมีมากกว่ากรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย อันเนื่องจากไม่มีก๊าซไอเสียมาชะลอการเผาไหม้



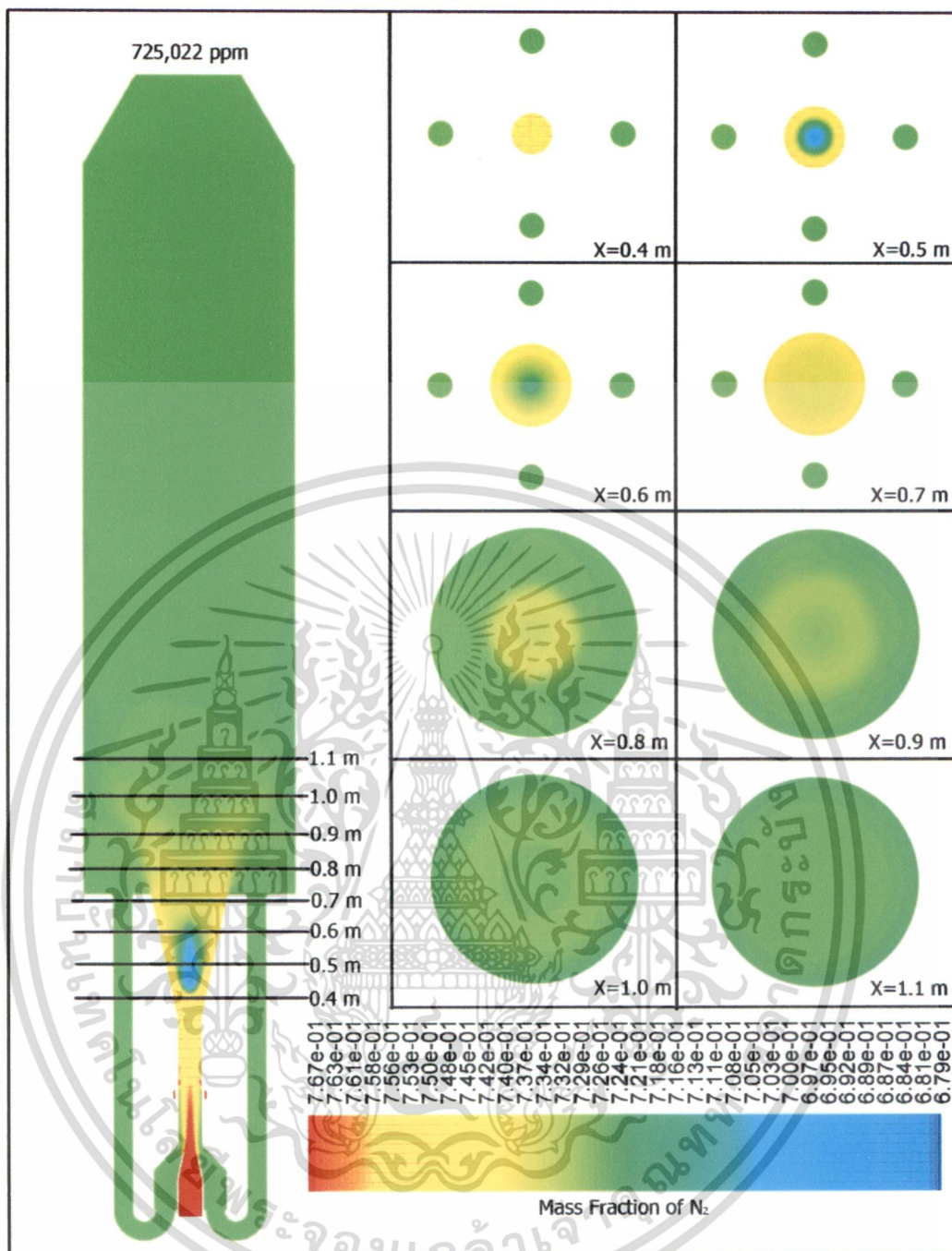
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1.7 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจน



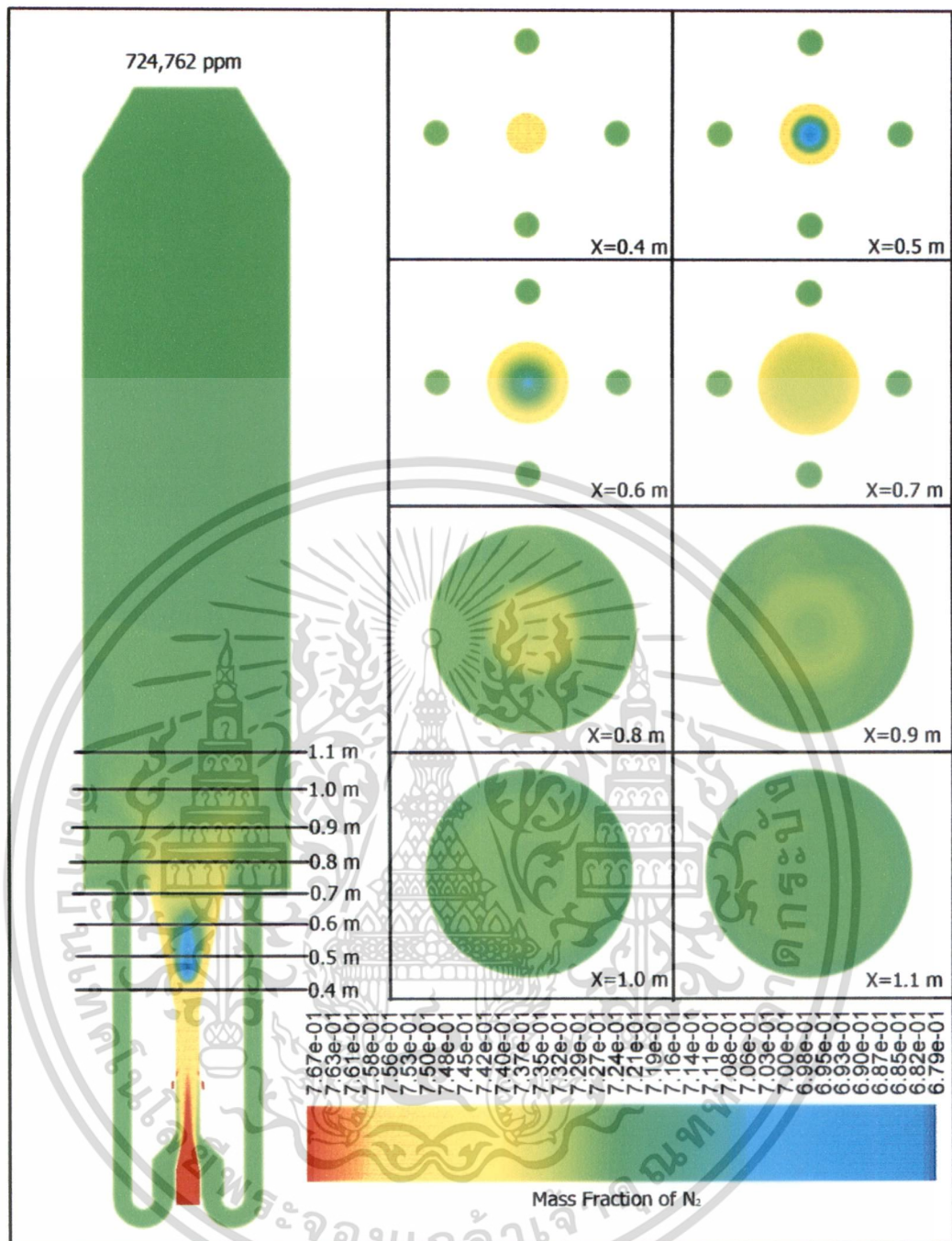
รูปที่ 6.46 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



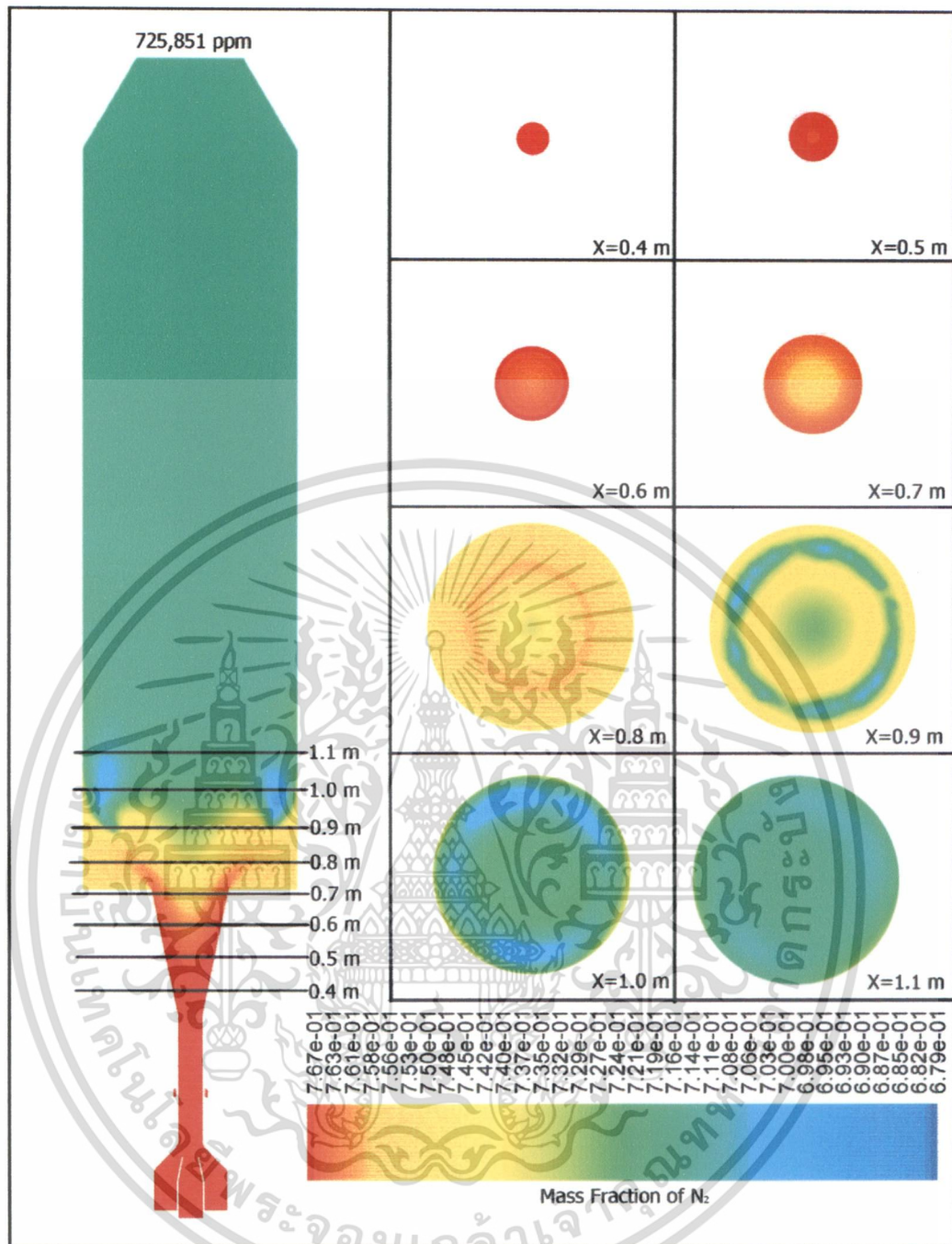
รูปที่ 6.47 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.48 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.49 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนในหัวเผาถ่านหิน
กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

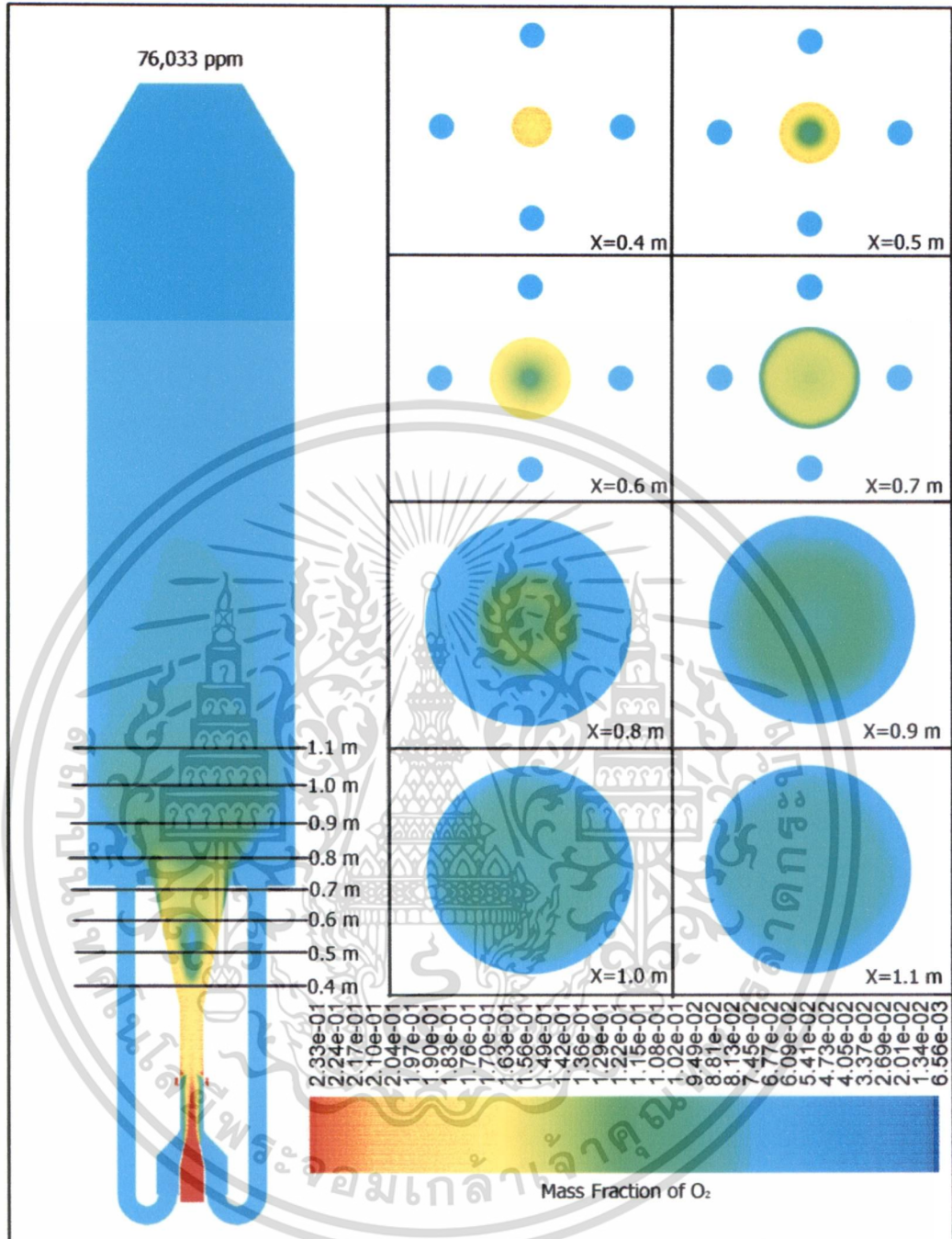
รูปที่ 6.46-6.48 การกระจายตัวของไนโตรเจนในหัวเผาถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย โดยความเข้มข้นของไนโตรเจนจะลดลงต่ำสุดที่บริเวณเปลวไฟในคัพพีวเซอร์เนื่องจากบริเวณนั้นมีการปลดปล่อยสารระเหยที่บริเวณดังกล่าวในปริมาณสูงทำให้ความเข้มข้นของไนโตรเจนเจือจางลง ซึ่งไนโตรเจนที่หายไปนั้นได้ถูกบริโภคและเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยกรณีอัตราส่วนอัตรา

การไหล 34:66 เป็นกรณีที่ความเข้มข้นในโตรเจนที่เปลวไฟในคัพฟิวเซอร์ลดลงต่ำมากที่สุดเนื่องจากกรณีนี้มีอัตราการเผาไหม้สูงที่สุด

รูปที่ 6.49 การกระจายตัวของไนโตรเจนในหัวเผาถ่านหินแบบไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าความเข้มข้นของไนโตรเจนจะลดลงต่ำสุดที่ระยะ $X=0.95$ เมตร เนื่องจากบริเวณนั้นมีอัตราการเผาไหม้ที่สูง

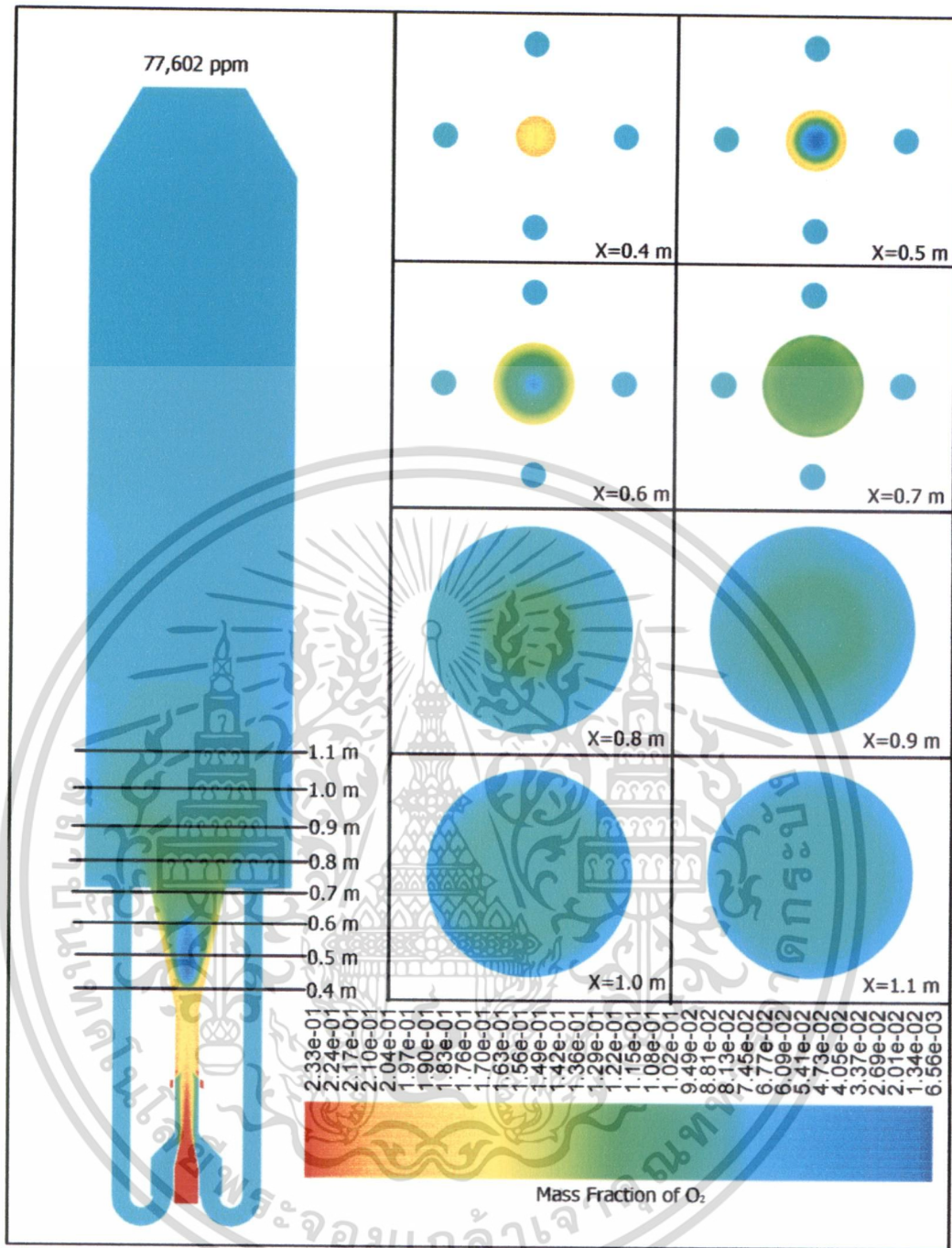


6.3.1.8 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของออกซิเจน



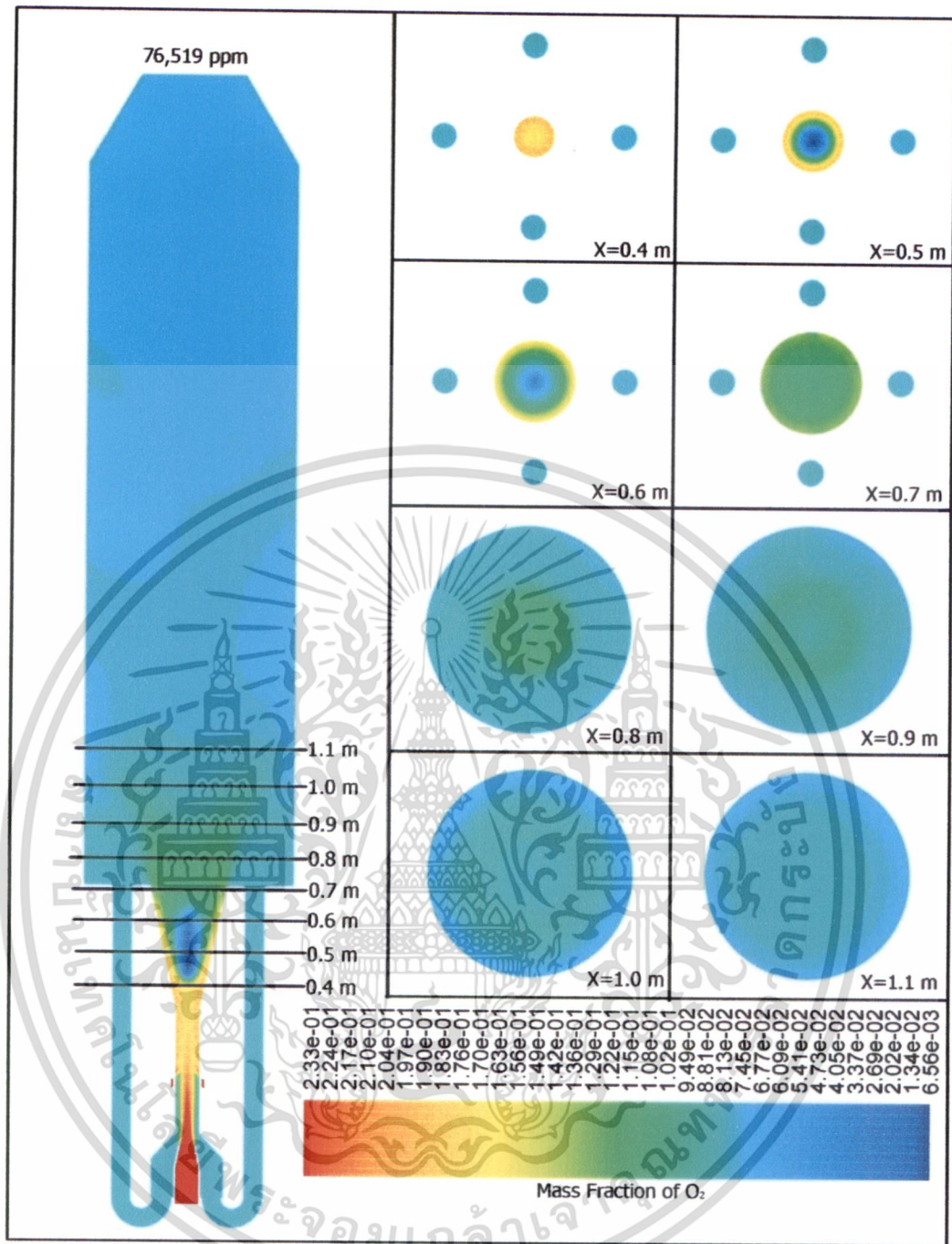
รูปที่ 6.50 การกระจายความเข้มข้นของออกซิเจนในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



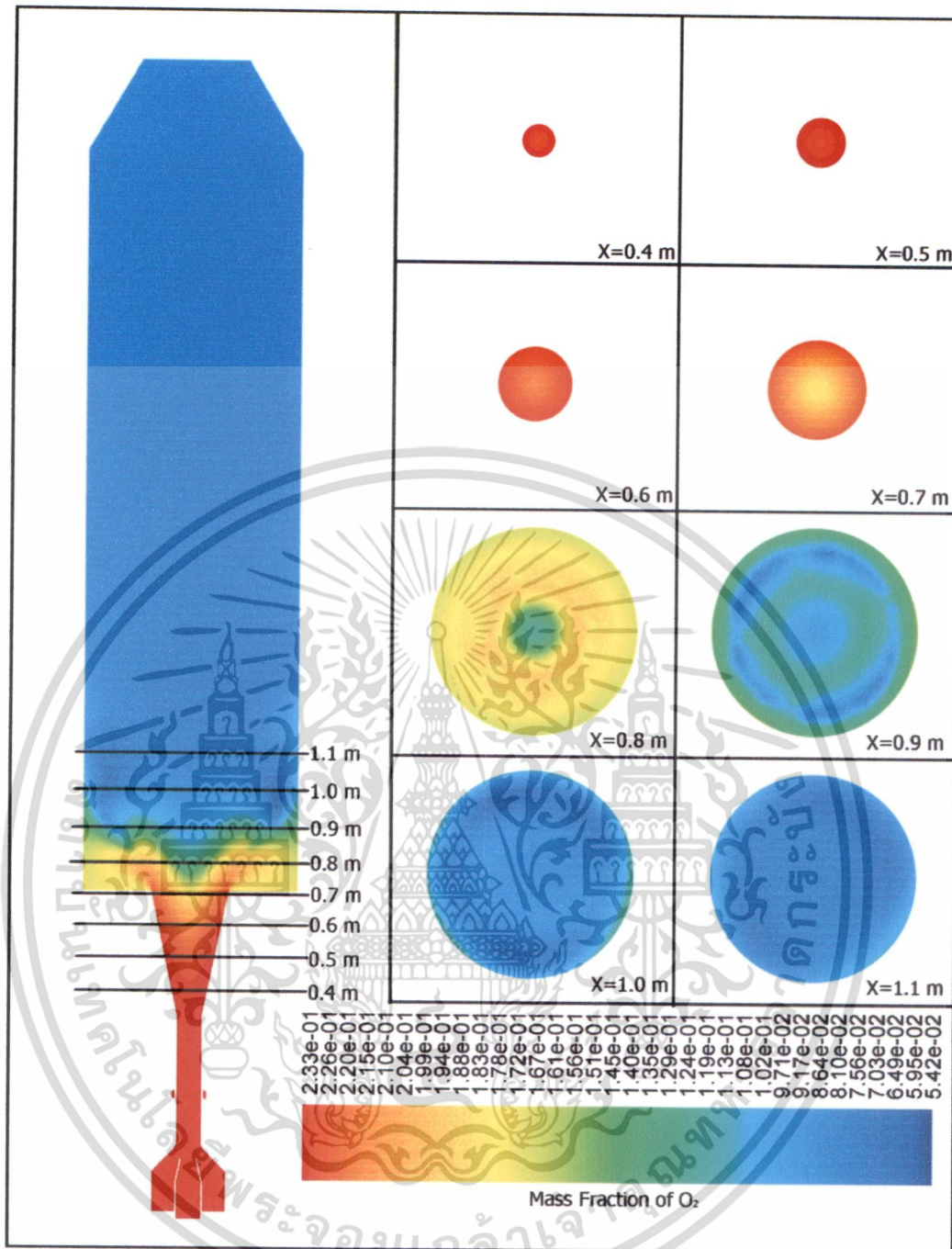
รูปที่ 6.51 การกระจายความเข้มข้นของออกซิเจนในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.52 การกระจายความเข้มข้นของออกซิเจนในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.53 การกระจายความเข้มข้นของออกซิเจนในหัวเผาถ่านหิน
กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.50-6.52 แสดงการกระจายความเข้มข้นของออกซิเจนในหัวเผาถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย โดยการกระจายความเข้มข้นของออกซิเจนลดลงต่ำสุดที่บริเวณเปลวไฟในคัพพีวเซอร์ (ระยะ $X=0.45-0.6$ เมตร) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้มากที่สุด เป็นผลให้ความเข้มข้นของออกซิเจนลดลงมากอย่างเห็นได้ชัด แต่แตกต่างกับกรณีของไนโตรเจน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาน้อยกว่ามาก โดยทำปฏิกิริยาเพียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

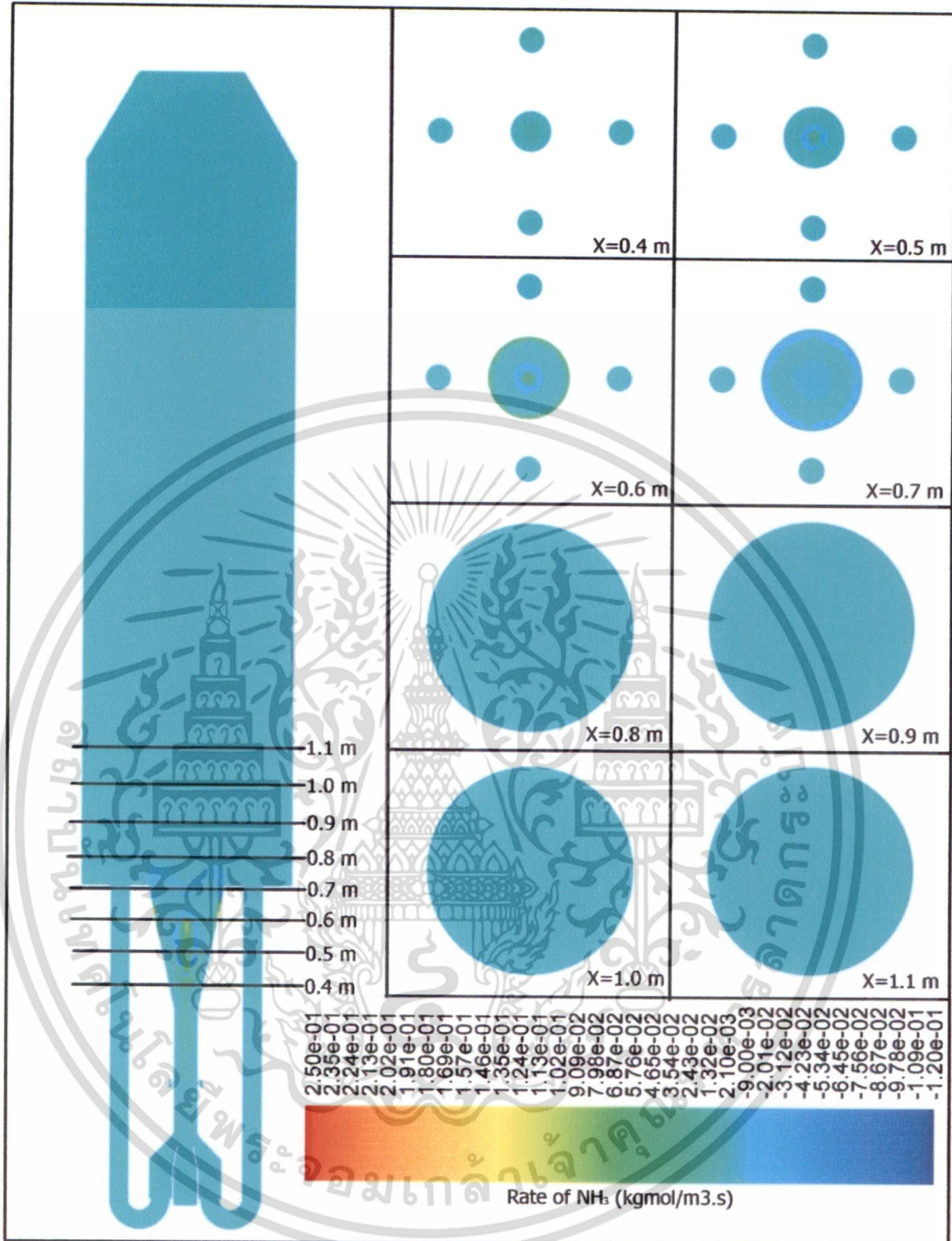
0.1% จากความเข้มข้นไนโตรเจนทั้งหมด จากผลการจำลองพบว่าความเข้มข้นของออกซิเจนจะแปรผกผันกับอัตราการเผาไหม้ โดยที่กรณีอัตราส่วนอัตราการไหล 34:66 เป็นกรณีที่ความเข้มข้นของออกซิเจนบริเวณในคิฟิวเซอร์ต่ำที่สุด

รูปที่ 6.53 แสดงการกระจายความเข้มข้นของออกซิเจนในหัวเผาถ่านหินแบบไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย จะสังเกตได้ว่าบริเวณที่ความเข้มข้นออกซิเจนลดลงต่ำมีความใกล้เคียงกันกับความเข้มข้นของไนโตรเจน ซึ่งจะสอดคล้องกับตำแหน่งของเปลวไฟ (ที่ตำแหน่ง $X=0.9$ เมตร)



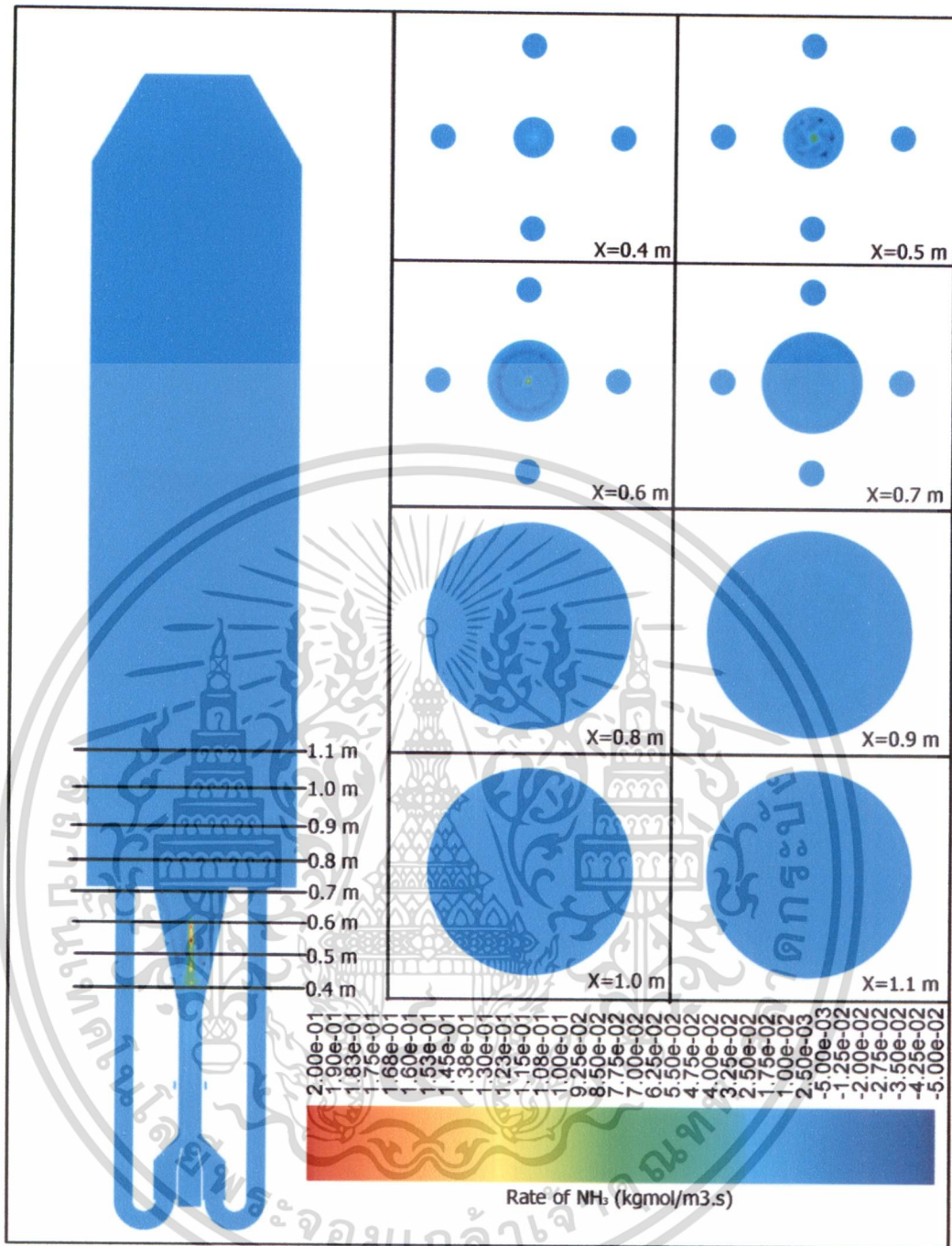
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1.9 ผลการจำลองอัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของแอมโมเนีย



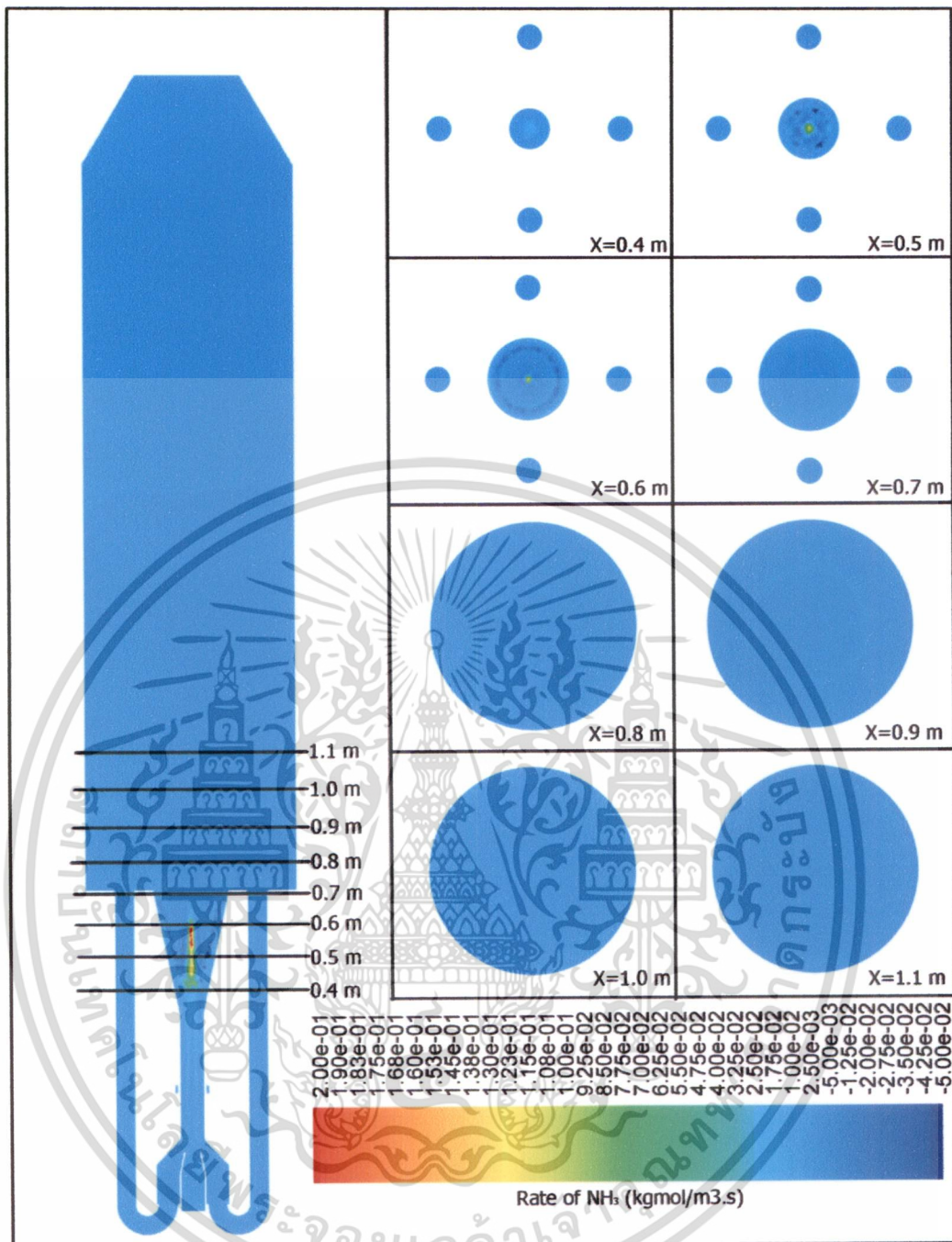
รูปที่ 6.54 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



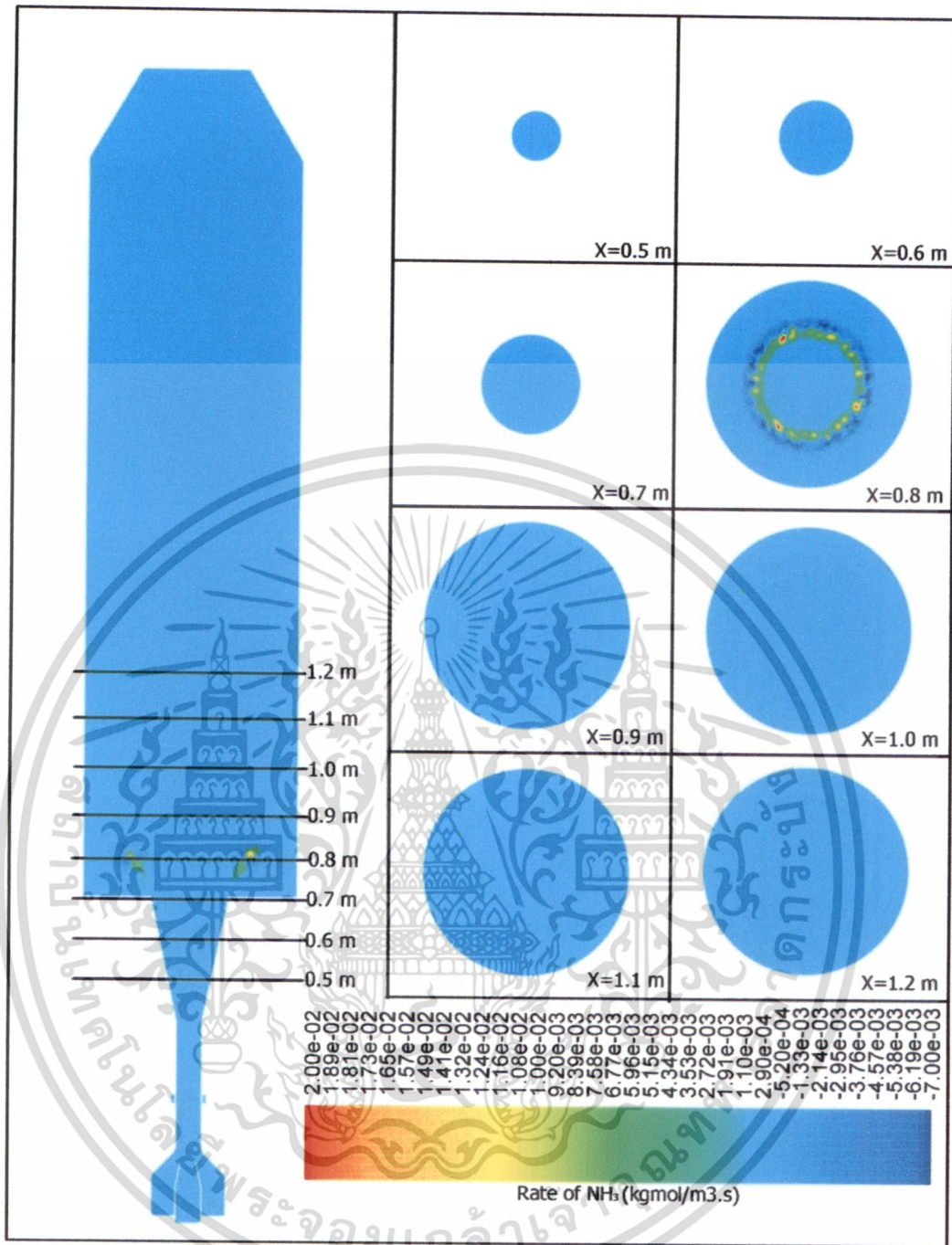
รูปที่ 6.55 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.56 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของแอมโมเนียในหัวเผาผ่านหिनกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.57 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหิน
กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.54-6.56 แสดงถึงอัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย แอมโมเนียส่วนมากจะเกิดจากการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสของสารระเหยไนโตรเจนและคาร์บอนไนโตรเจนเป็นส่วนน้อย (ตำแหน่งของอัตราการเกิดแอมโมเนียจะตรงกันกับตำแหน่งความเข้มข้นของสารระเหยมากกว่า) โดยอัตราการเกิดจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณอุณหภูมิสูงและความเข้มข้นออกซิเจนต่ำ

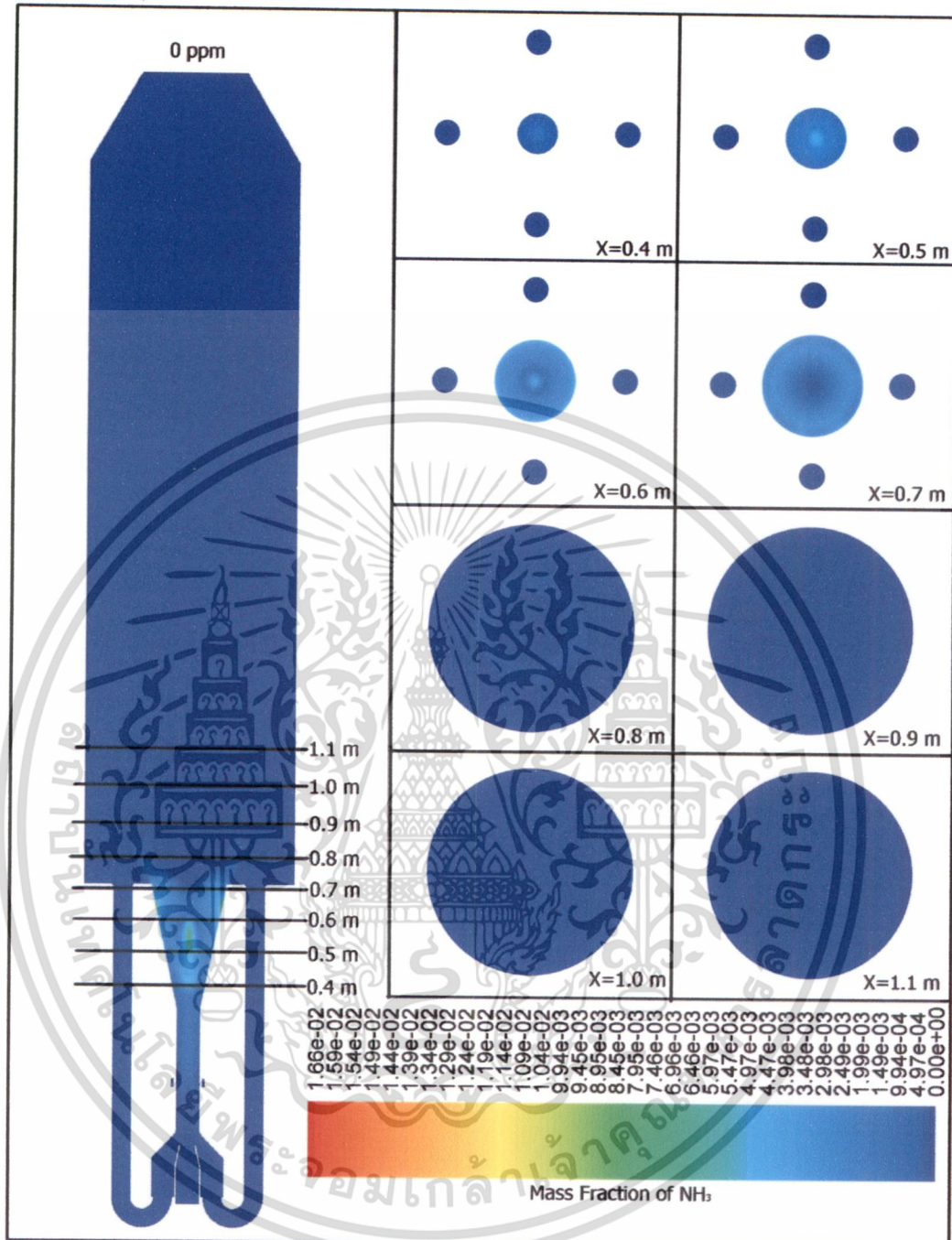
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ตรงกลางของเปลวไฟที่ตำแหน่ง $X=0.4-0.6$ เมตร) และแอมโมเนียจะถูกทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นไนโตรเจนออกไซด์ (Coal Fuel NO_x Scheme C และ D ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22) ที่บริเวณใกล้ผนังของดีฟิวเซอร์เพราะว่าที่บริเวณนั้นมีความเข้มข้นของออกซิเจนสูง (ที่ระยะ $X=0.4-0.7$ เมตร) ในกรณีที่ 34:66 จะมีอัตราการเกิดแอมโมเนียสูงที่สุดเพราะมีอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารระเหยมากกว่า 2 กรณีที่เหลือ

รูปที่ 6.57 แสดงถึงอัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหินแบบที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่ากลไกการเกิดแอมโมเนียนั้นเหมือนกันกับกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย แต่จะแตกต่างตรงที่ตำแหน่งการเกิด (ที่ระยะ $X=0.8$ เมตร)

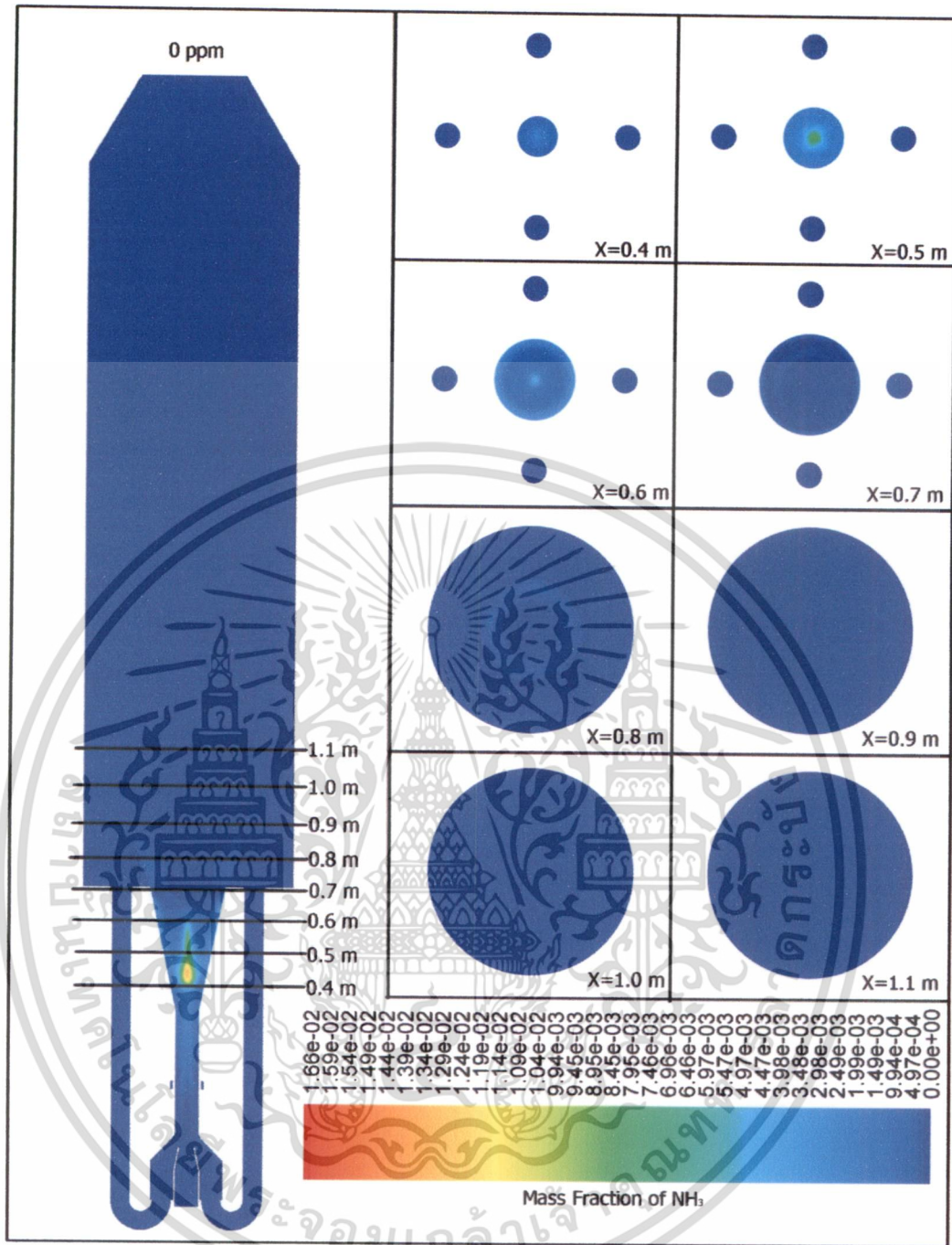


6.3.1.10 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของแอมโมเนีย



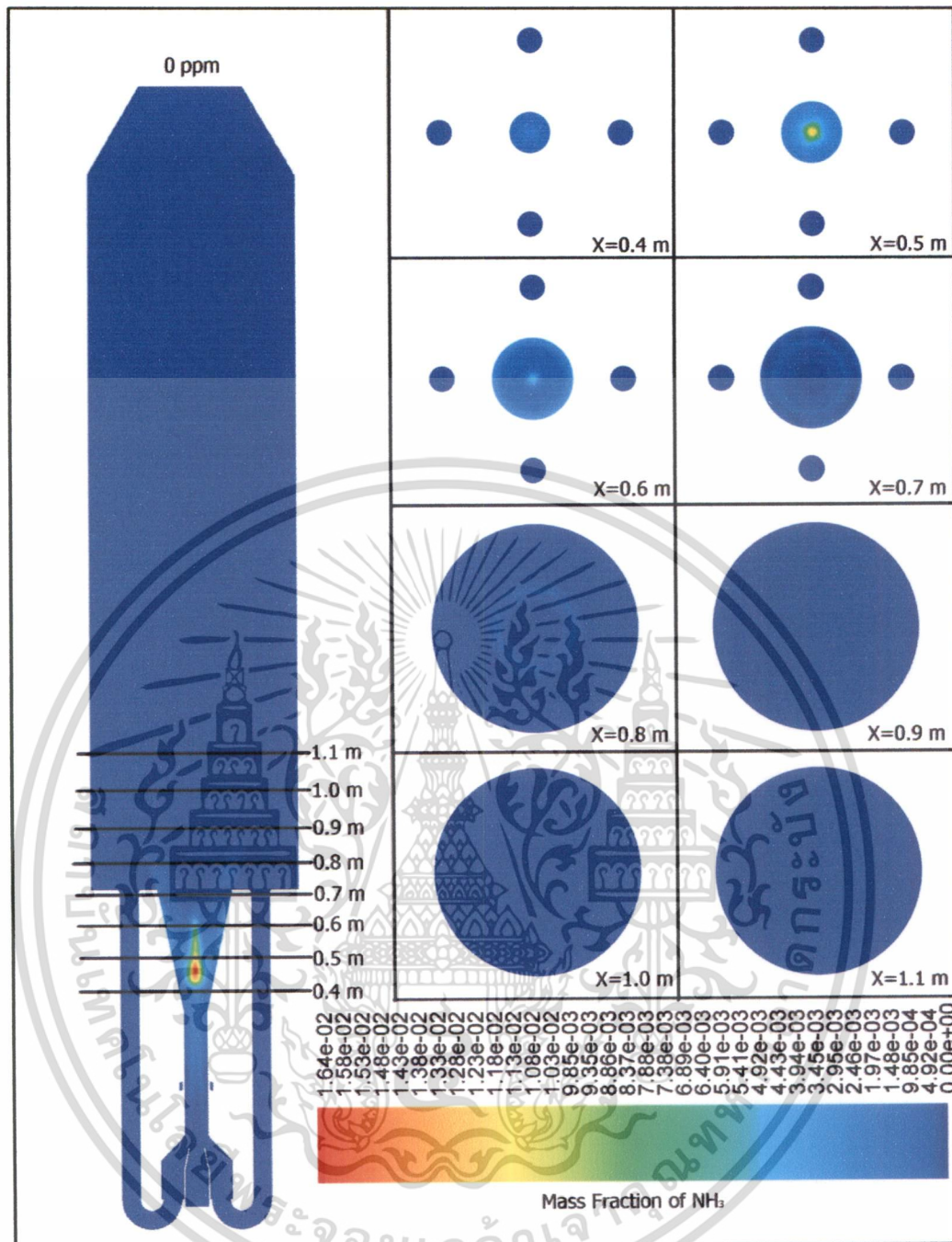
รูปที่ 6.58 การกระจายความเข้มข้นของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



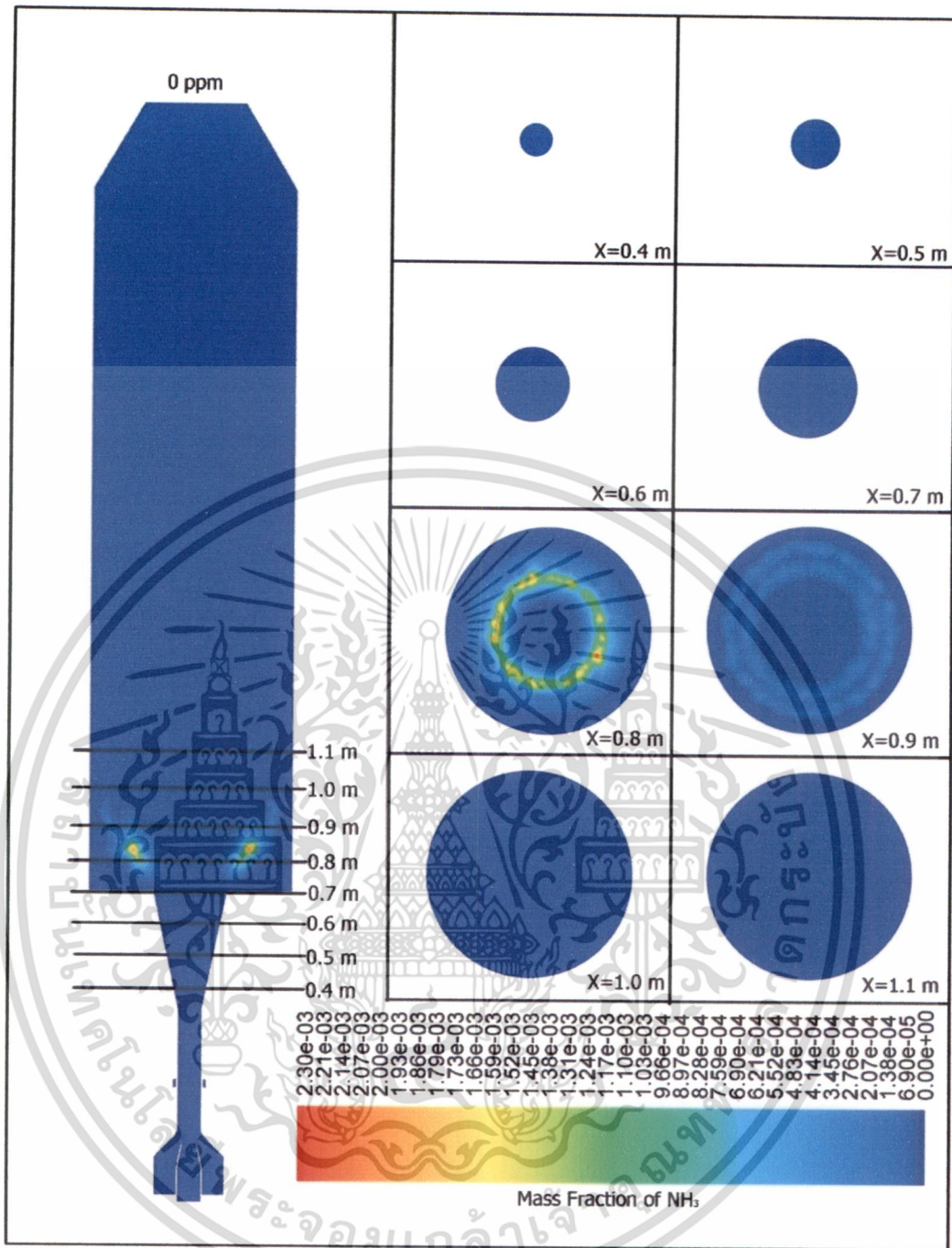
รูปที่ 6.59 การกระจายความเข้มข้นของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.60 การกระจายความเข้มข้นของแอมโมเนียในหัวเสาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.61 การกระจายความเข้มข้นของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหิน
กรณี ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.58-6.60 แสดงถึงการกระจายตัวของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าการกระจายตัวของแอมโมเนียนั้นสอดคล้องกับอัตราการเกิดและการสูญสลาย โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียจะมากที่สุดที่บริเวณตรงกลางคีย์ฟิวเซอร์ (ช่วงระยะ X=0.4-0.6 เมตร) และความเข้มข้นจะลดลงที่บริเวณใกล้ผนังคีย์ฟิวเซอร์ซึ่งเป็นบริเวณเดียวกันกับที่มีการสูญสลายของแอมโมเนีย (ช่วงระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X=0.4-0.7 เมตร) อันที่จริงแล้วแอมโมเนียได้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเปลี่ยนไปเป็นไนโตรเจนออกไซด์ตลอดทั้งความยาวของห้องเผาไหม้ที่เหลือ ตามสมการ

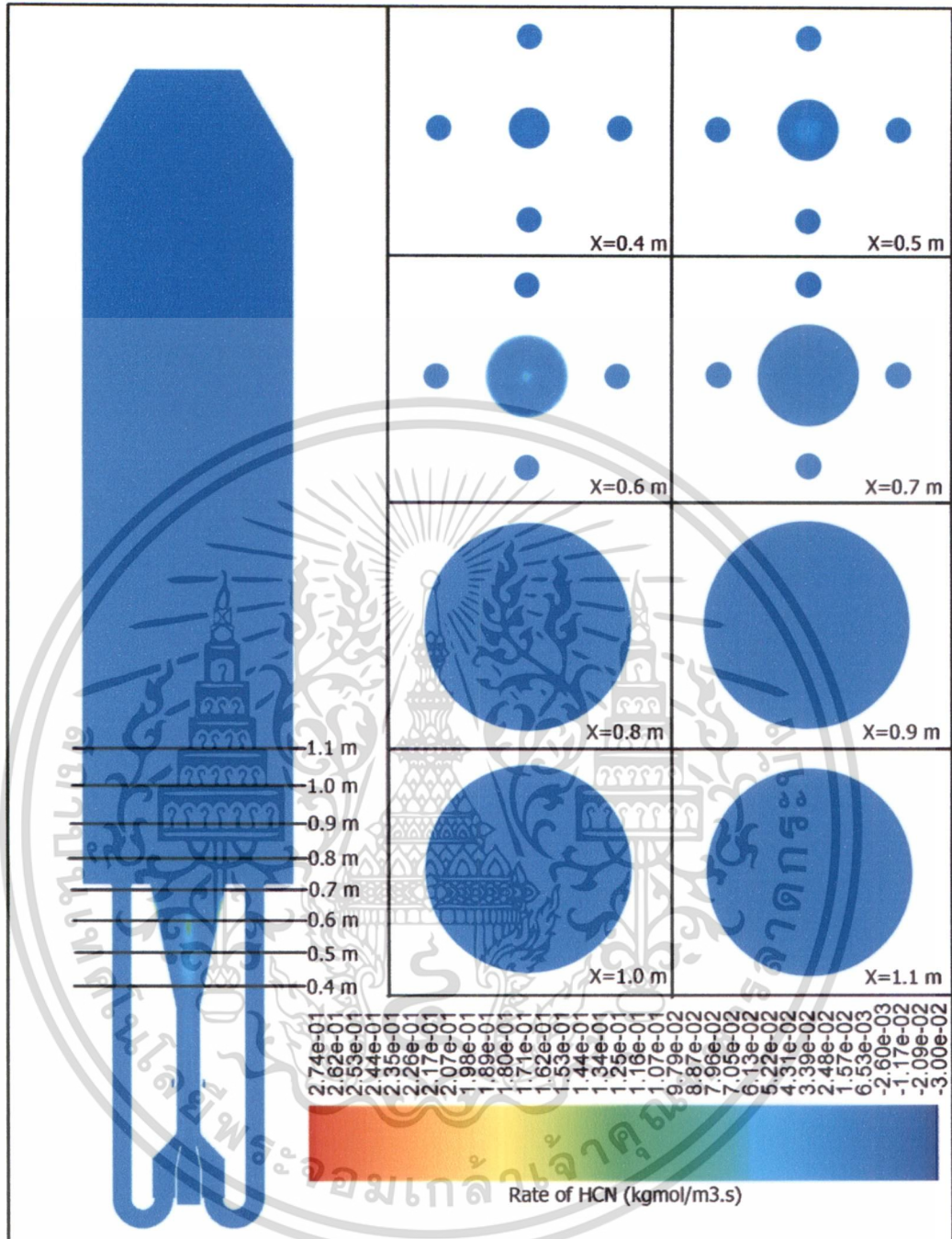
$$NH_3 + \frac{5}{4}O_2 \rightarrow NO + \frac{3}{2}H_2O$$
 โดยสังเกตได้จากความเข้มข้นของแอมโมเนียที่บริเวณทางออกมีค่าเป็นศูนย์

รูปที่ 6.61 แสดงถึงการกระจายตัวของแอมโมเนียในหัวเผาถ่านหินแบบที่ไม่มี การหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าการกระจายตัวความเข้มข้นของแอมโมเนีย นั้นจะ สอดคล้องกับตำแหน่งที่มีอัตราการเกิดที่มีค่าบวกและความเข้มข้นจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับออกซิเจนตลอดทั้งห้องเผาไหม้ จนกระทั่งความเข้มข้นของแอมโมเนียที่บริเวณทางออกมีค่าเป็นศูนย์เช่นเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

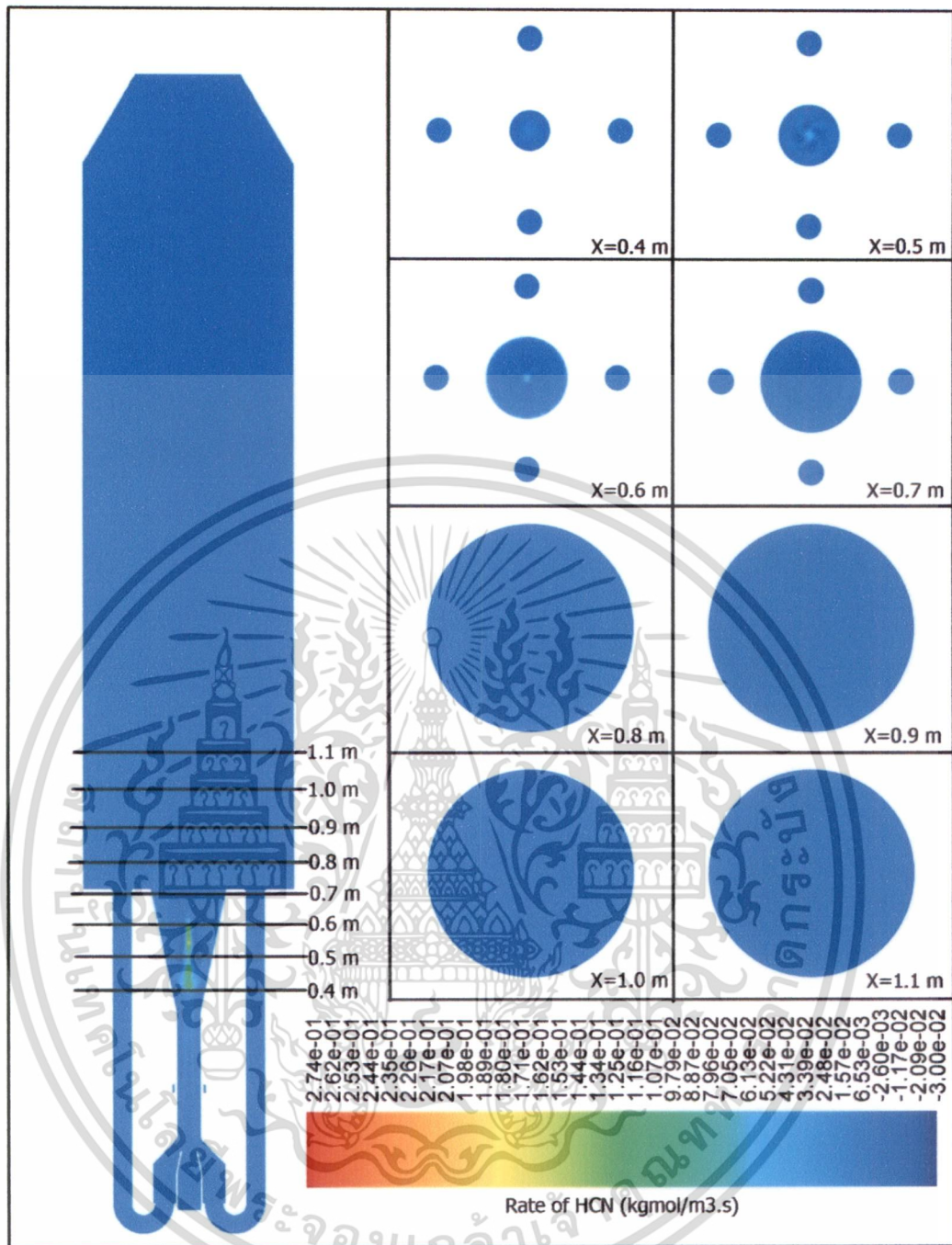
6.3.1.11 ผลการจำลองอัตราการเกิดและอัตราการสลายของไฮโดรเจนไซยาไนด์



รูปที่ 6.62 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของไฮโดรเจนไซยาไนด์

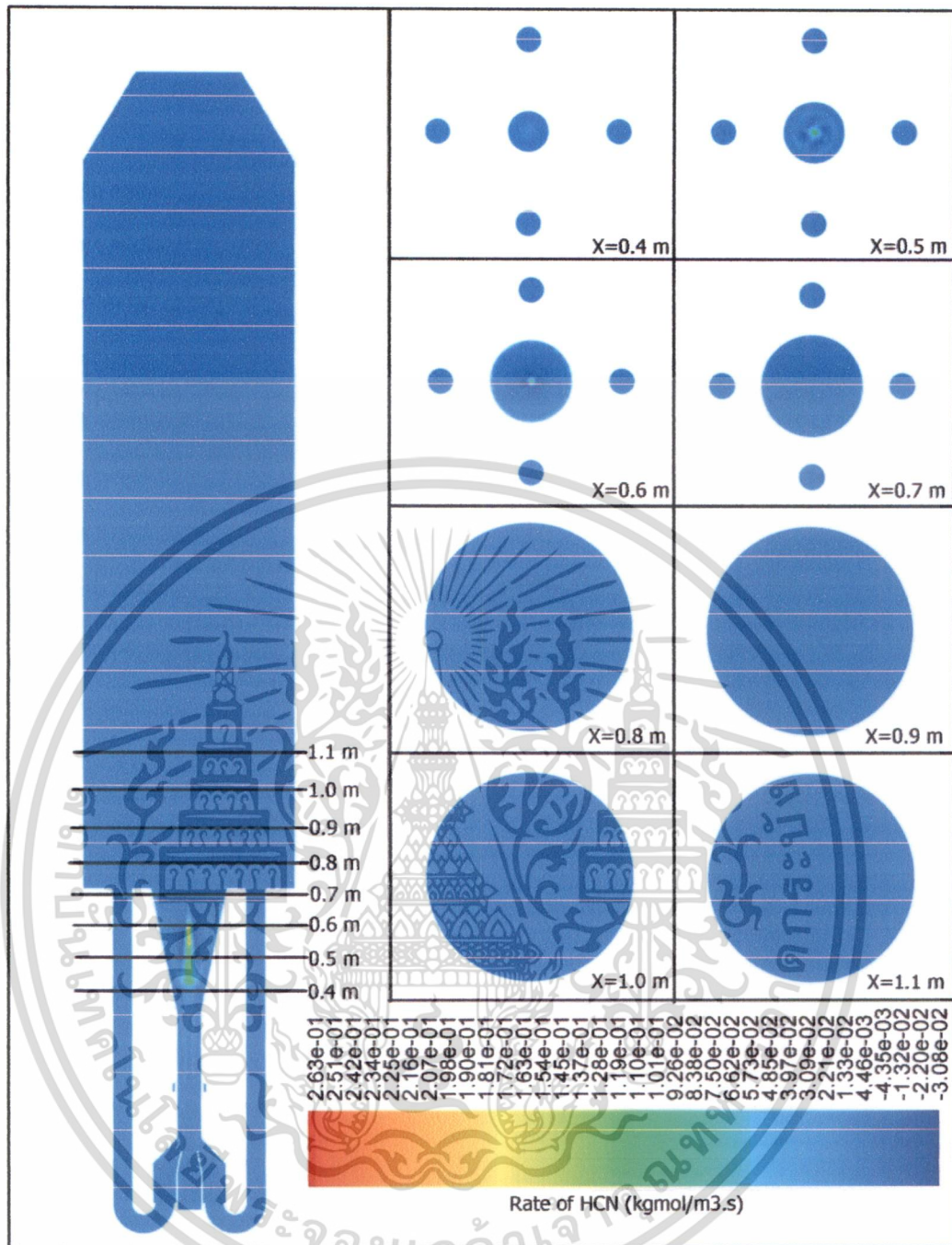
ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



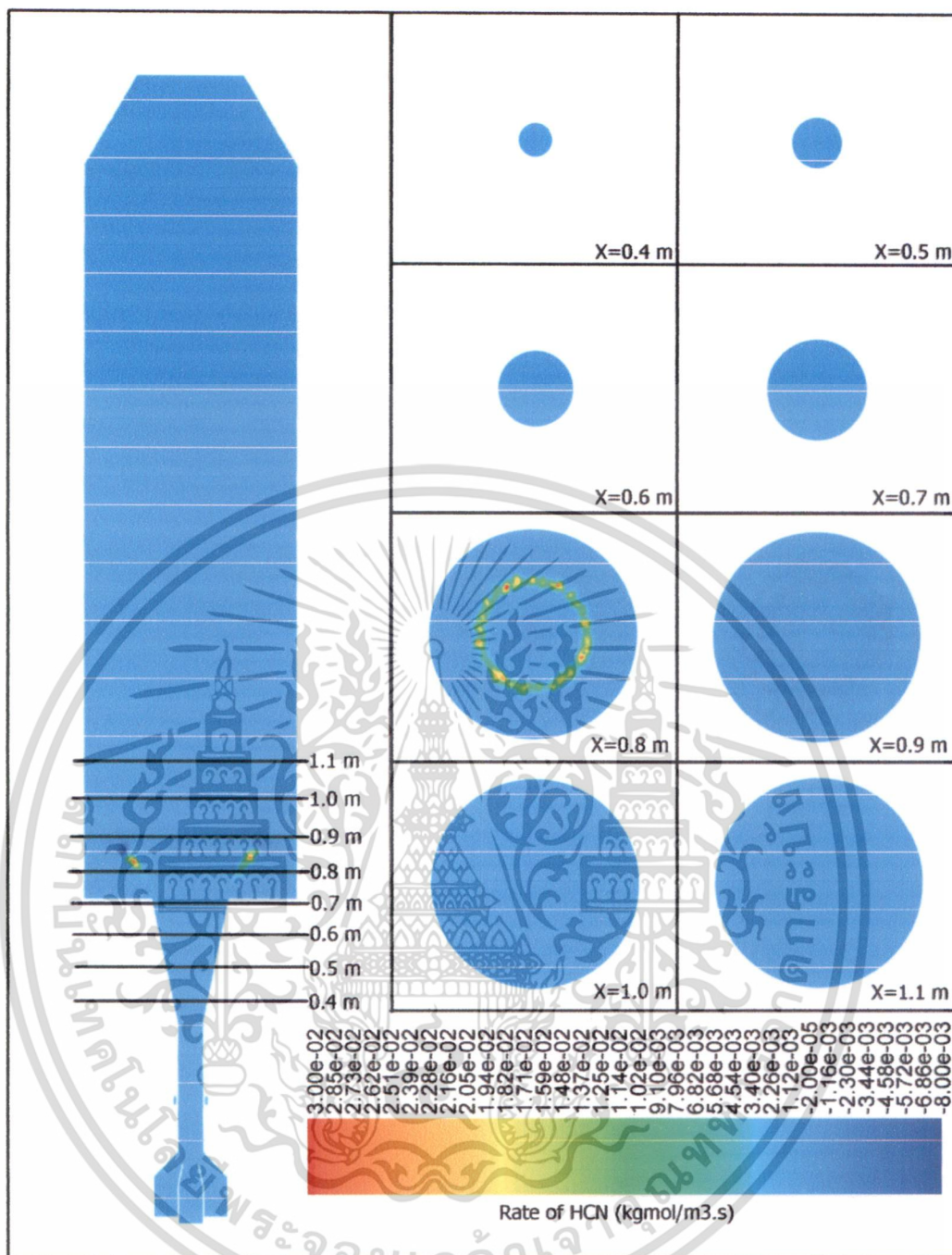
รูปที่ 6.63 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของไฮโดรเจนไซยาไนด์
ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.64 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหัวเผาถ่านหิน
ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.65 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.62 -6.64 แสดงถึงอัตราการเกิดและอัตราการสลายของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหัวเผาถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย จะสังเกตเห็นได้ว่าไฮโดรเจนไซยาไนด์ส่วนมากจะเกิดที่บริเวณตรงกลางคัพพีวเซอร์ (ที่ระยะ $X=0.4-0.65$ เมตร) เนื่องจากที่บริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงและความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำ โดยไฮโดรเจนไซยาไนด์เกิดจากการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสของสารระเหยในโตรเจนและ

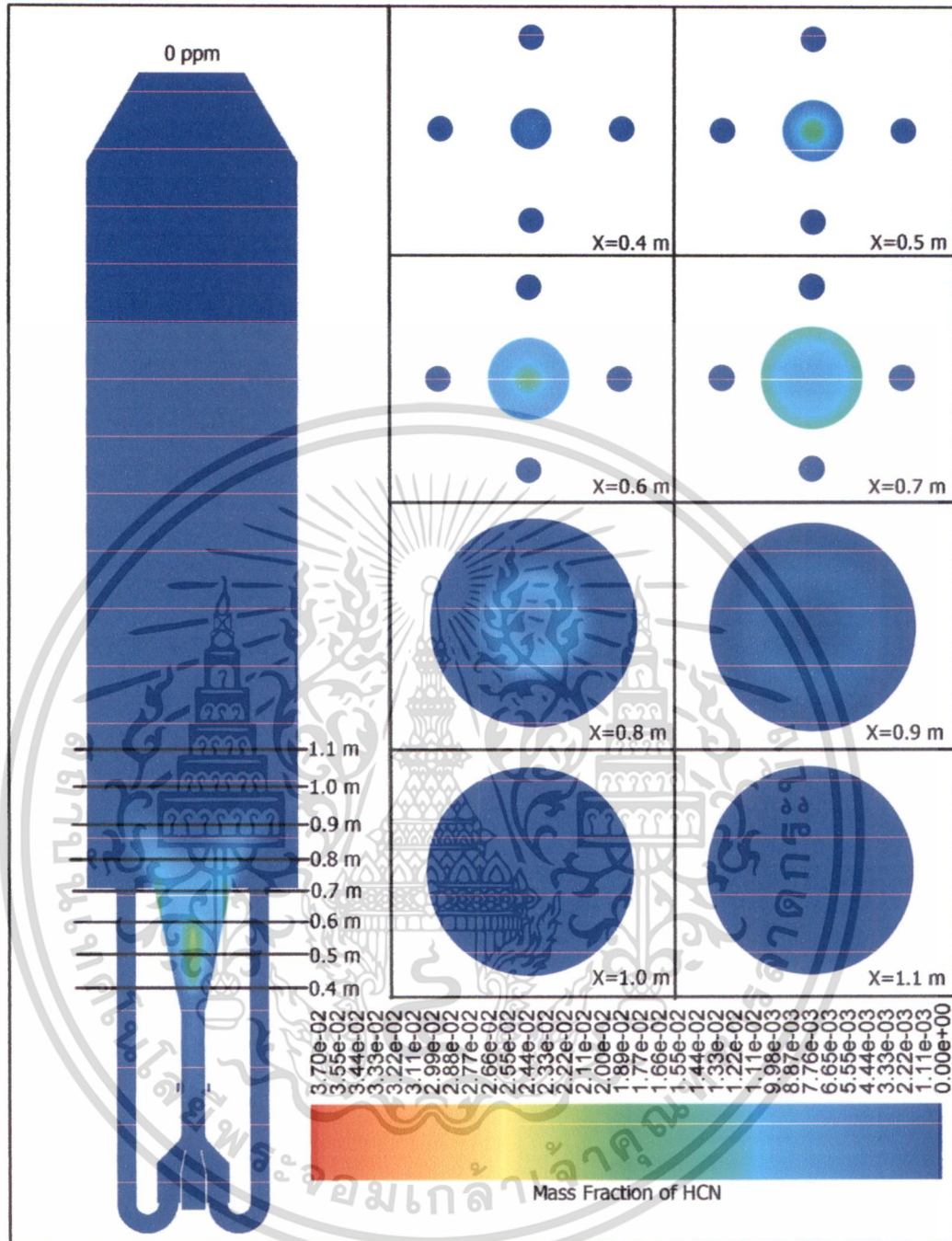
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซาร์ใน โตรเจน ถัดจากนั้นไฮโดรเจนไซยาไนด์ส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับออกซิเจนได้เป็นไนโตรเจนออกไซด์ และไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นก็จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไซยาไนด์ส่วนที่เหลือกลายเป็นไนโตรเจน (Coal Fuel NOx Scheme A และ B ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20) ทำให้เห็นอัตราปฏิกิริยามีค่าลบ เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมแล้วก็จะพบได้ว่าปฏิกิริยาที่ไฮโดรเจนไซยาไนด์ทำกับไนโตรเจนออกไซด์มีมากกว่าปฏิกิริยาที่ทำกับออกซิเจน เนื่องจากบริเวณที่มีอัตราปฏิกิริยาเป็นค่าลบนั้นมีความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่สูง

รูปที่ 6.65 แสดงถึงอัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหัวเผาถ่านหินแบบที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่ากลไกการเกิดไฮโดรเจนไซยาไนด์นั้นเหมือนกันกับกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียเช่นเดียวกัน แต่จะแตกต่างกันตรงที่ตำแหน่งการเกิด (ที่ระยะ $X \approx 0.85$ เมตร)

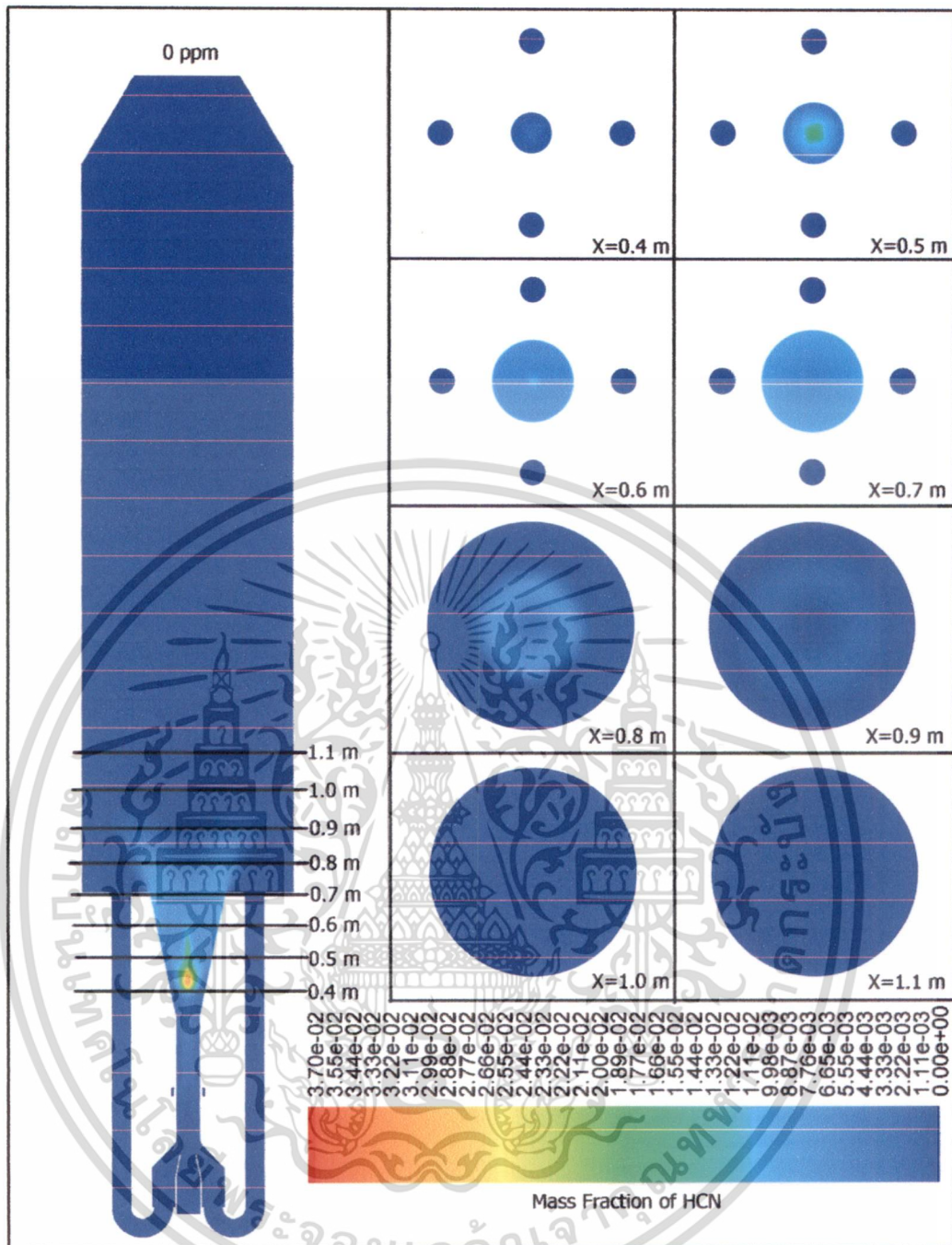


6.3.1.12 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์



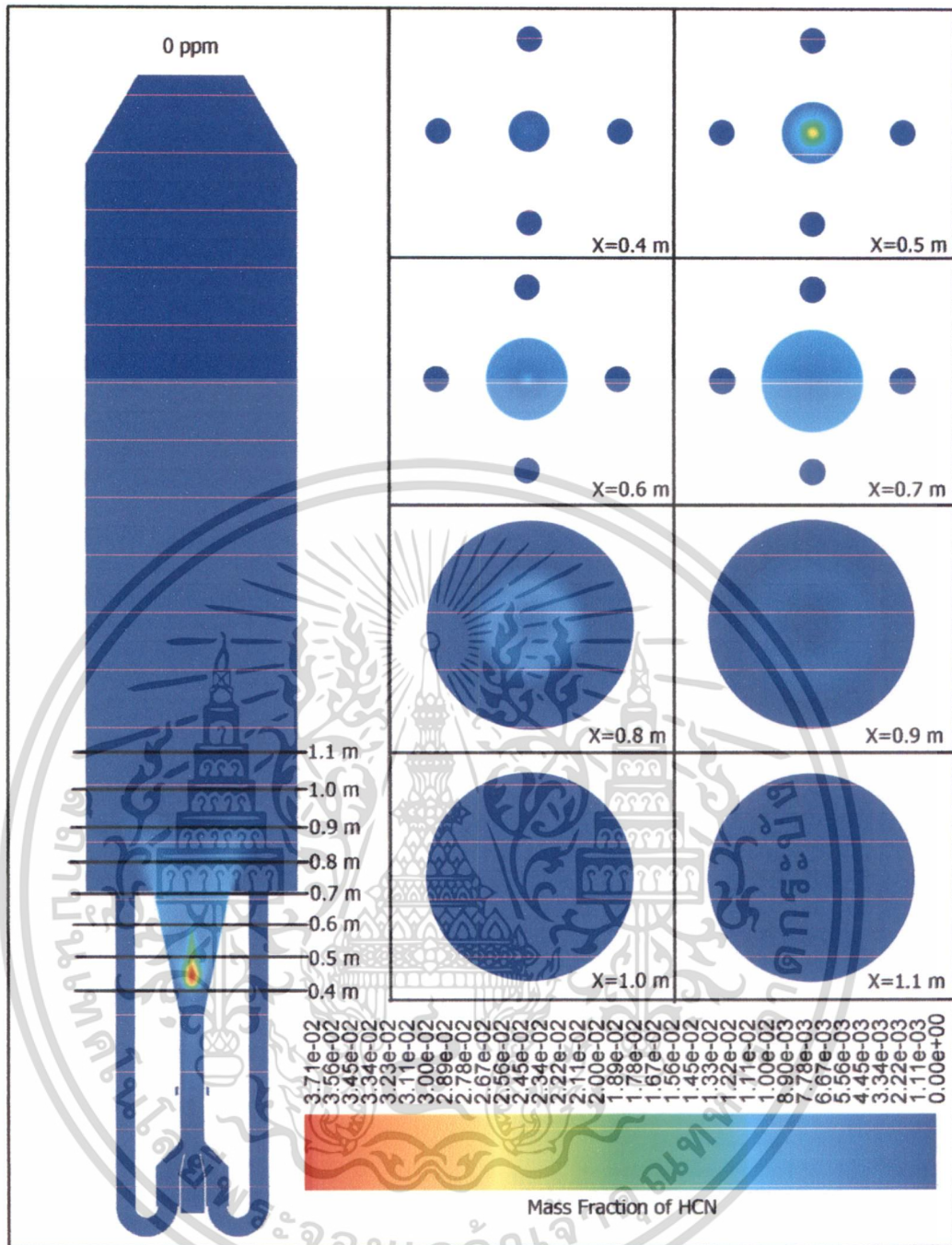
รูปที่ 6.66 การกระจายความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



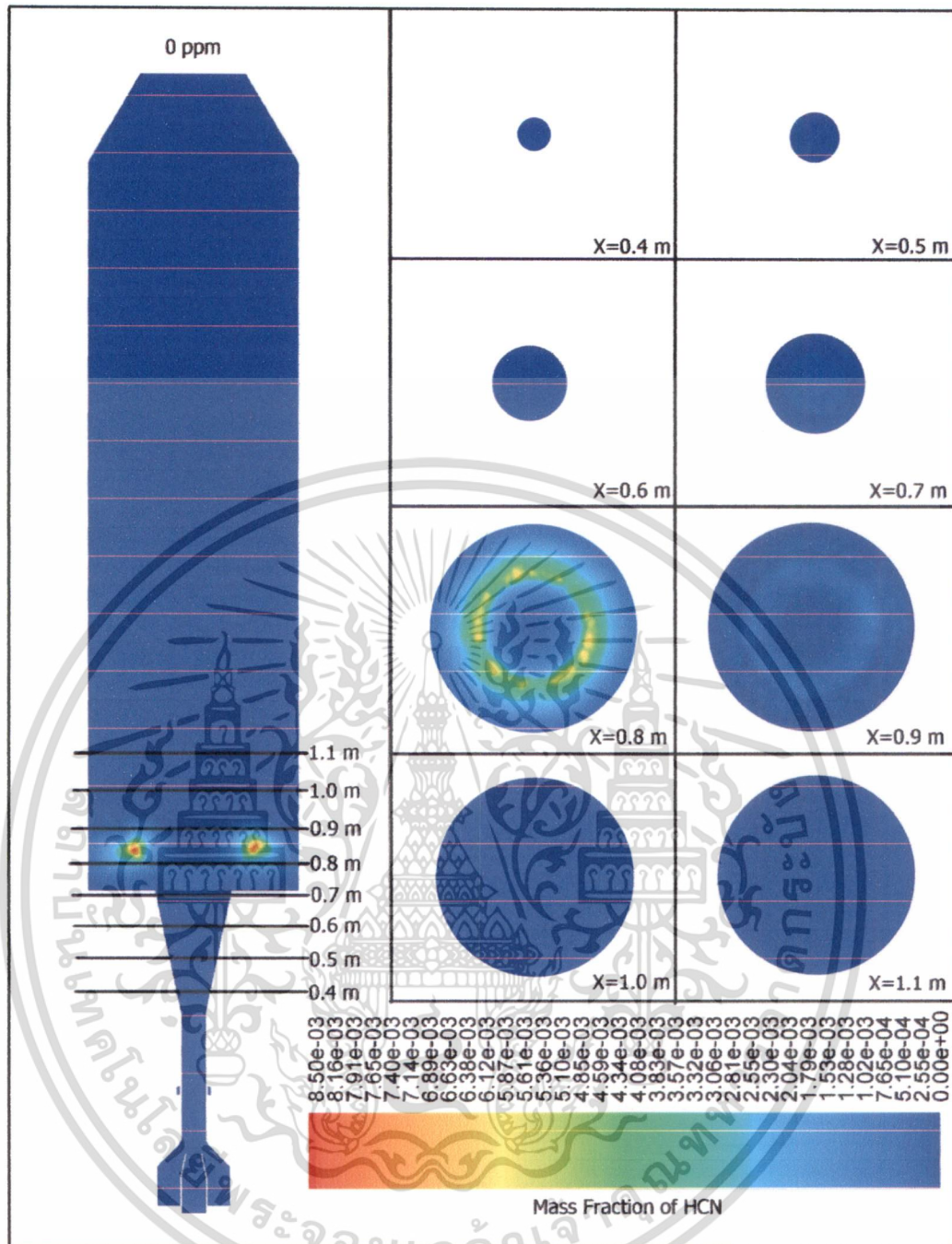
รูปที่ 6.67 การกระจายความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.68 การกระจายความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.69 การกระจายความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหัวเผาถ่านหิน
กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.66-6.68 แสดงถึงการกระจายตัวของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหัวเผาถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าตำแหน่งการกระจายตัวของความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์จะสอดคล้องกับตำแหน่งที่มีอัตราการเกิดของไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่มีค่าเป็นบวก โดยความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์จะมากที่สุดที่บริเวณตรงกลางดีฟิวเซอร์ (ช่วงระยะ $X=0.4-0.65$ เมตร) ซึ่งไฮโดรเจนไซยาไนด์ทั้งหมดที่เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

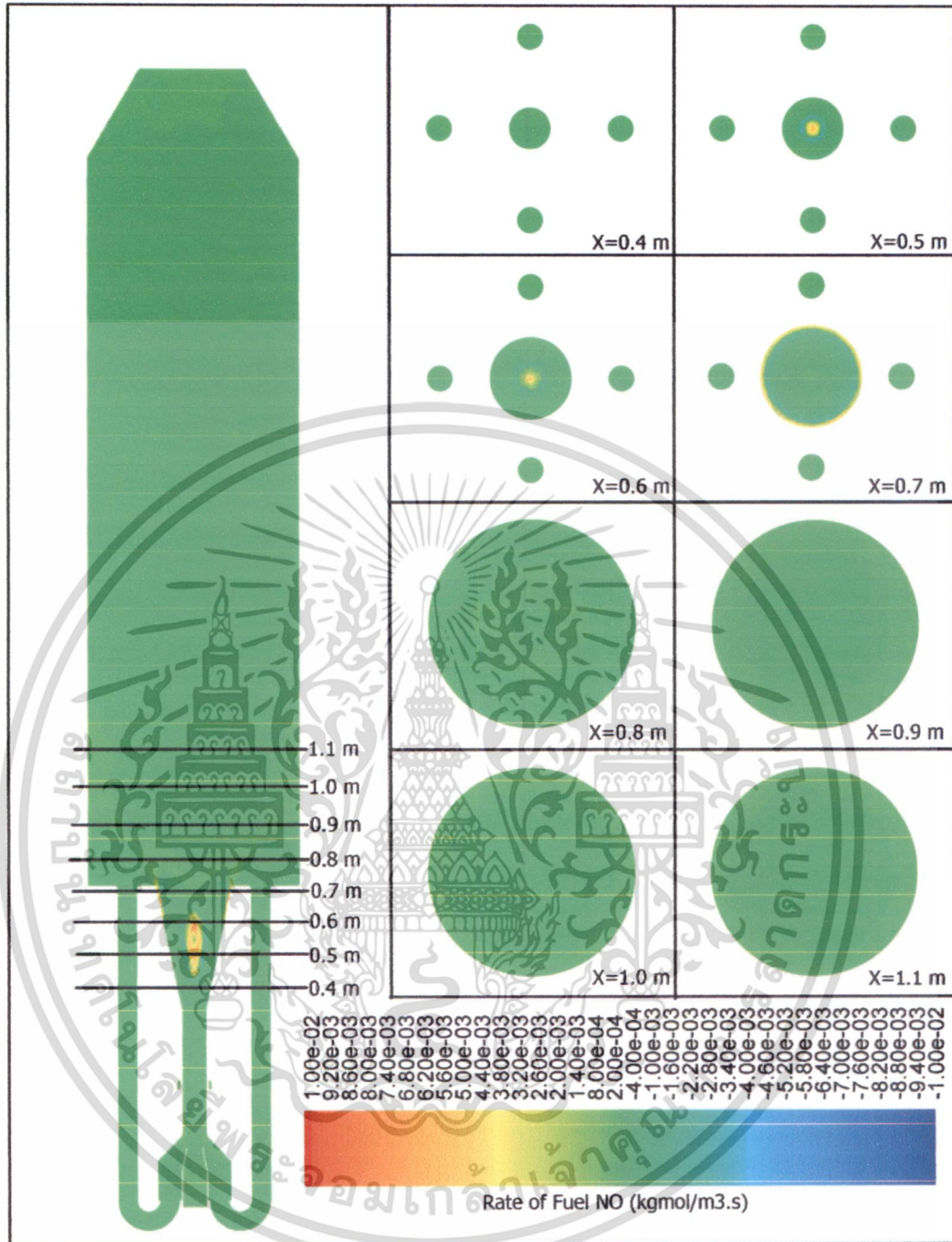
ขึ้นมาได้ถูกทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและไนโตรเจนออกไซด์เปลี่ยนไปเป็นไนโตรเจนออกไซด์และไนโตรเจนตลอดทั้งความยาวของห้องเผาไหม้ที่เหลือ จนกระทั่งความเข้มข้นที่บริเวณทางออกเป็นศูนย์

รูปที่ 6.69 แสดงถึงการกระจายตัวของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหัวเผาถ่านหินแบบที่ไม่มีกรรหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าการกระจายตัวความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์นั้นจะสอดคล้องกับตำแหน่งที่มีอัตราการเกิดที่มีค่าบวก (ที่ระยะ $X=0.85$ เมตร) และความเข้มข้นจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับออกซิเจนและไนโตรเจนออกไซด์ตลอดทั้งห้องเผาไหม้ จนกระทั่งความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่บริเวณทางออกมีค่าเป็นศูนย์เช่นเดียวกัน



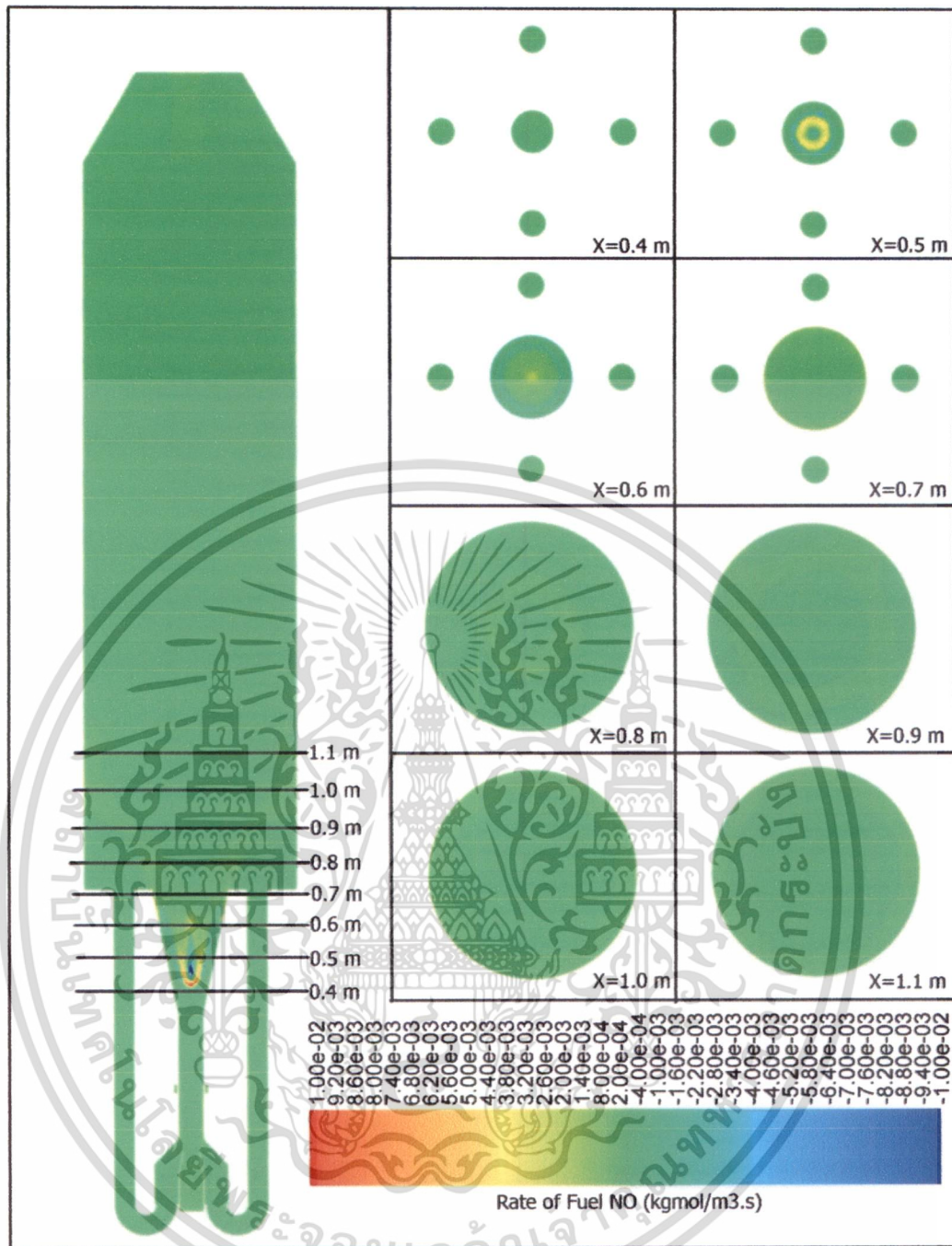
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1.13 ผลการจำลองอัตราการเกิดและอัตราการสลายของ Fuel NO



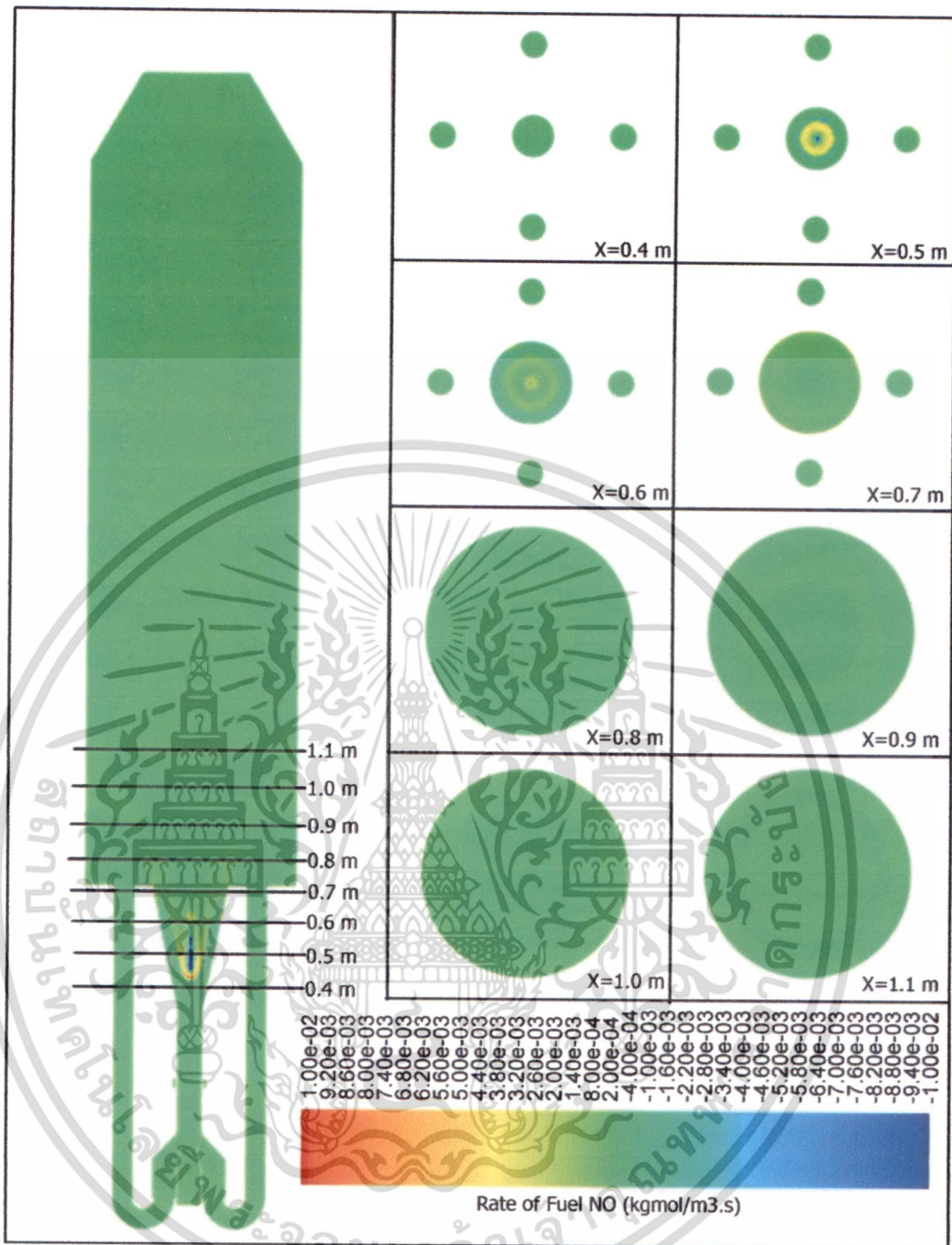
รูปที่ 6.70 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของ Fuel NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



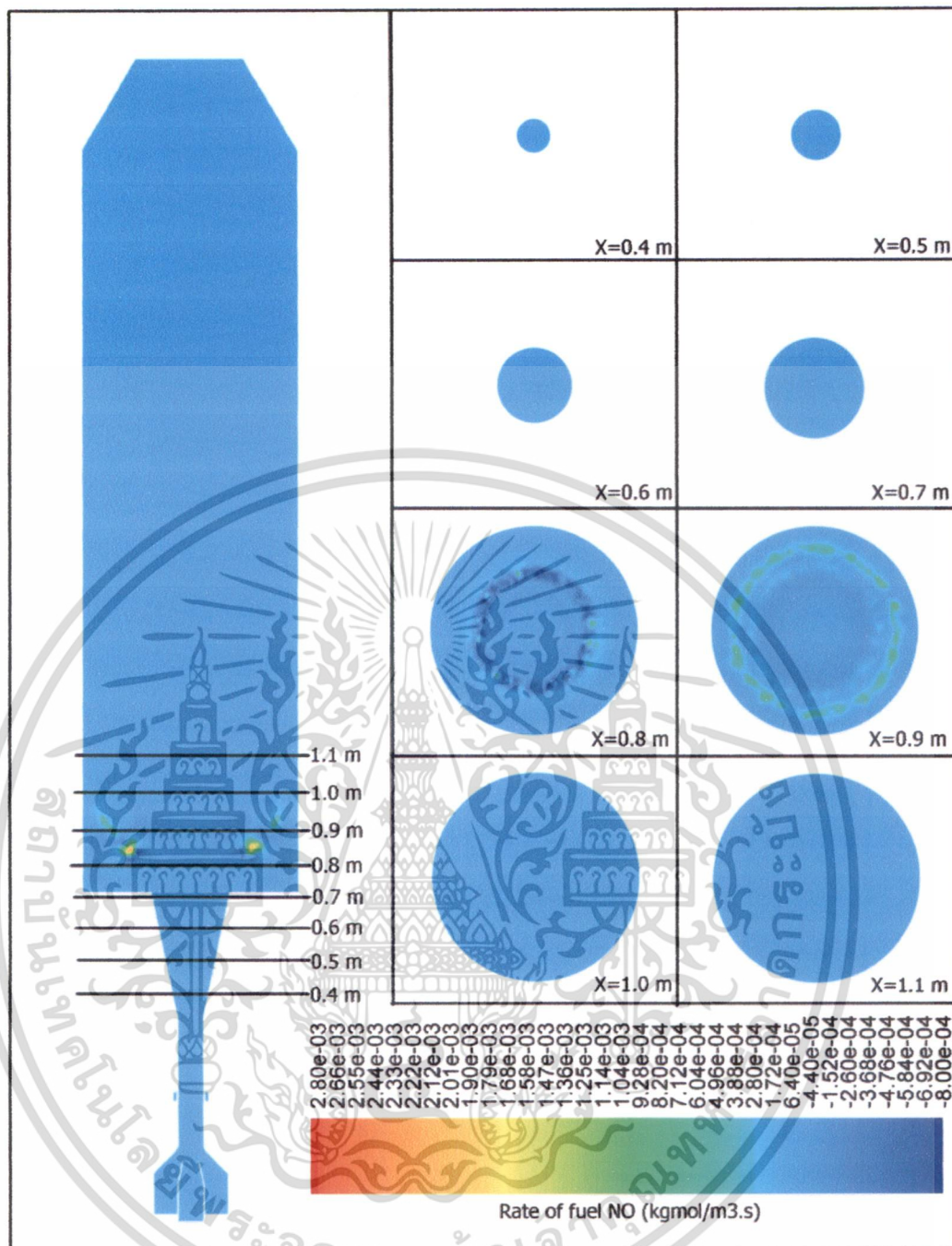
รูปที่ 6.71 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของ Fuel NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.72 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของ Fuel NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.73 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Fuel NO ในหัวเผาถ่านหิน
กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.70-6.72 นั้นแสดงถึงอัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Fuel NO ในหัวเผาถ่านหินกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย จากผลการจำลองแล้วจะเห็นได้ว่า บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่เห็นได้ชัดเจนจะอยู่ที่ช่วงระยะ $X=0.45-0.65$ เมตร ซึ่งบริเวณที่มี อัตราปฏิกิริยาการเกิด Fuel NO มากที่สุดจะอยู่ที่ $X=0.45$ เมตร เนื่องจากบริเวณนั้นเป็น บริเวณที่ไฮโดรเจนไซยาไนด์และแอมโมเนียที่เกิดมาจากเชื้อเพลิงไนโตรเจน มาพบกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิเจนที่ความเข้มข้นสูง โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดหลั่นตามความเข้มข้นของออกซิเจนที่ลดลง และที่บริเวณตรงกลางดีฟิวเซอร์ที่ระยะ $X=0.45-0.55$ เมตร นั้นเป็นบริเวณที่เกิดการสูญเสียของ Fuel NO เนื่องจาก Fuel NO ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไซยาไนด์และแอมโมเนียได้เป็นไนโตรเจน (Coal Fuel NOx Scheme A, B, C และ D) จึงเห็นอัตราการปฏิกิริยาที่บริเวณนั้นมีค่าลบ โดยเราสามารถคำนวณ source term ได้จากสมการ $S_{NO} = S_{char,NO} + S_{NO-1} + S_{NO-2} + S_{NO-3}$ โดย $S_{char,NO}$ เป็น source term ของ NO ที่เกิดจากคาร์บอนไนโตรเจน S_{NO-1} เป็น source term ของ NO ที่เกิดจาก HCN หรือ NH_3 ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน S_{NO-2} เป็น source term ของ NO ที่เกิดจาก HCN หรือ NH_3 ทำปฏิกิริยากับ NO และ S_{NO-3} เป็น source term ของ NO ที่ถูกดูดซับบนผิวซาร์ โดยค่าของแต่ละ source term คำนวณได้จาก $S_{char,NO} = \frac{S_c Y_{N,char} M_{w,NO}}{M_{w,NV}}$

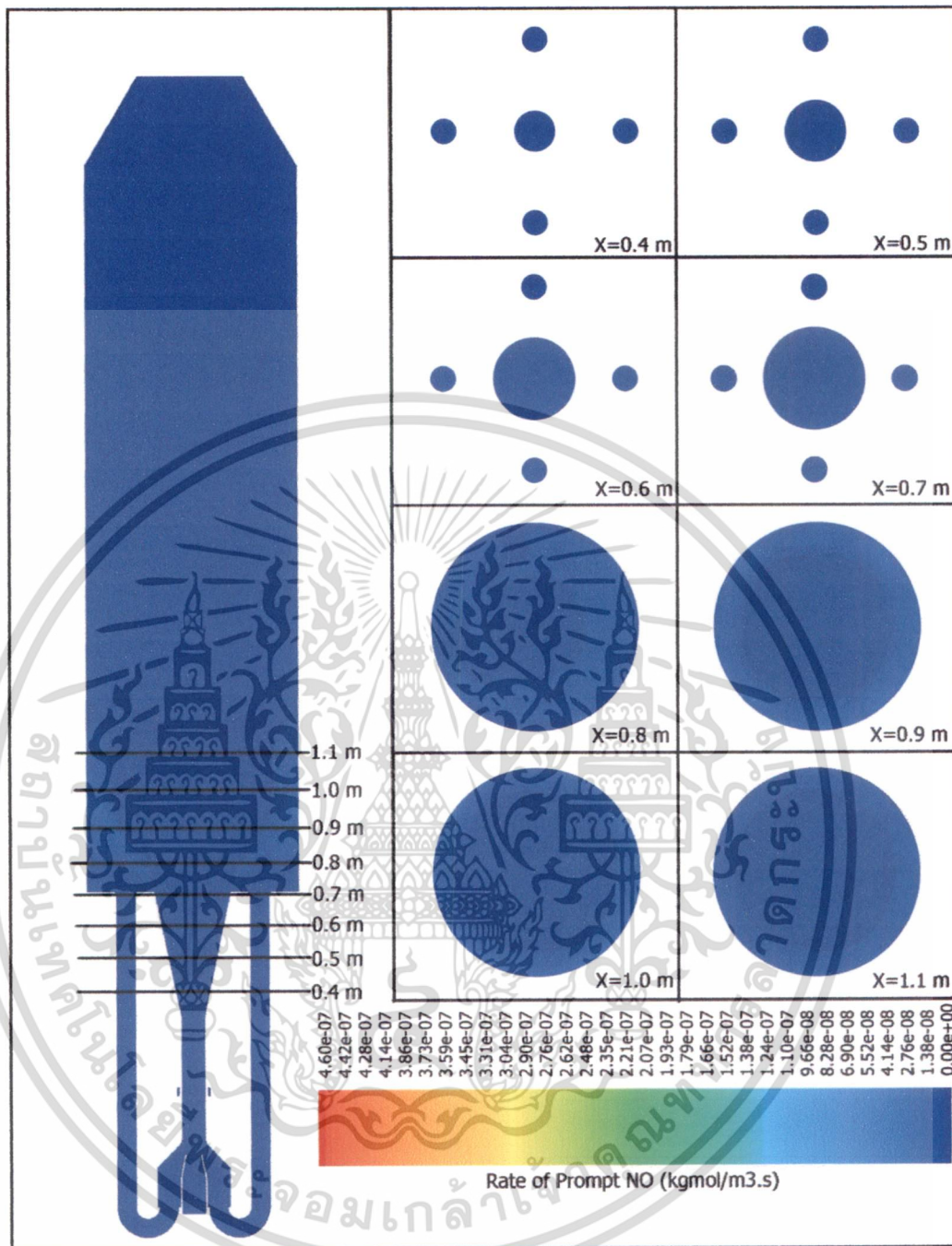
$$S_{NO-1} = -S_{HCN-1} \frac{M_{w,NO}}{M_{w,HCN}} = \mathcal{R}_1 \frac{M_{w,NOP}}{RT}, \quad S_{NO-2} = -S_{HCN-2} \frac{M_{w,NO}}{M_{w,HCN}} = -\mathcal{R}_2 \frac{M_{w,NOP}}{RT}$$

$$S_{NO-1} = -S_{NH_3-1} \frac{M_{w,NO}}{M_{w,NH_3}} = \mathcal{R}_1 \frac{M_{w,NOP}}{RT} \quad \text{และ} \quad S_{NO-2} = -S_{NH_3-2} \frac{M_{w,NO}}{M_{w,NH_3}} = -\mathcal{R}_2 \frac{M_{w,NOP}}{RT}$$

$$\text{และ } S_{NO-3} = C_s A_{BET} M_{w,NO} \mathcal{R}_3$$

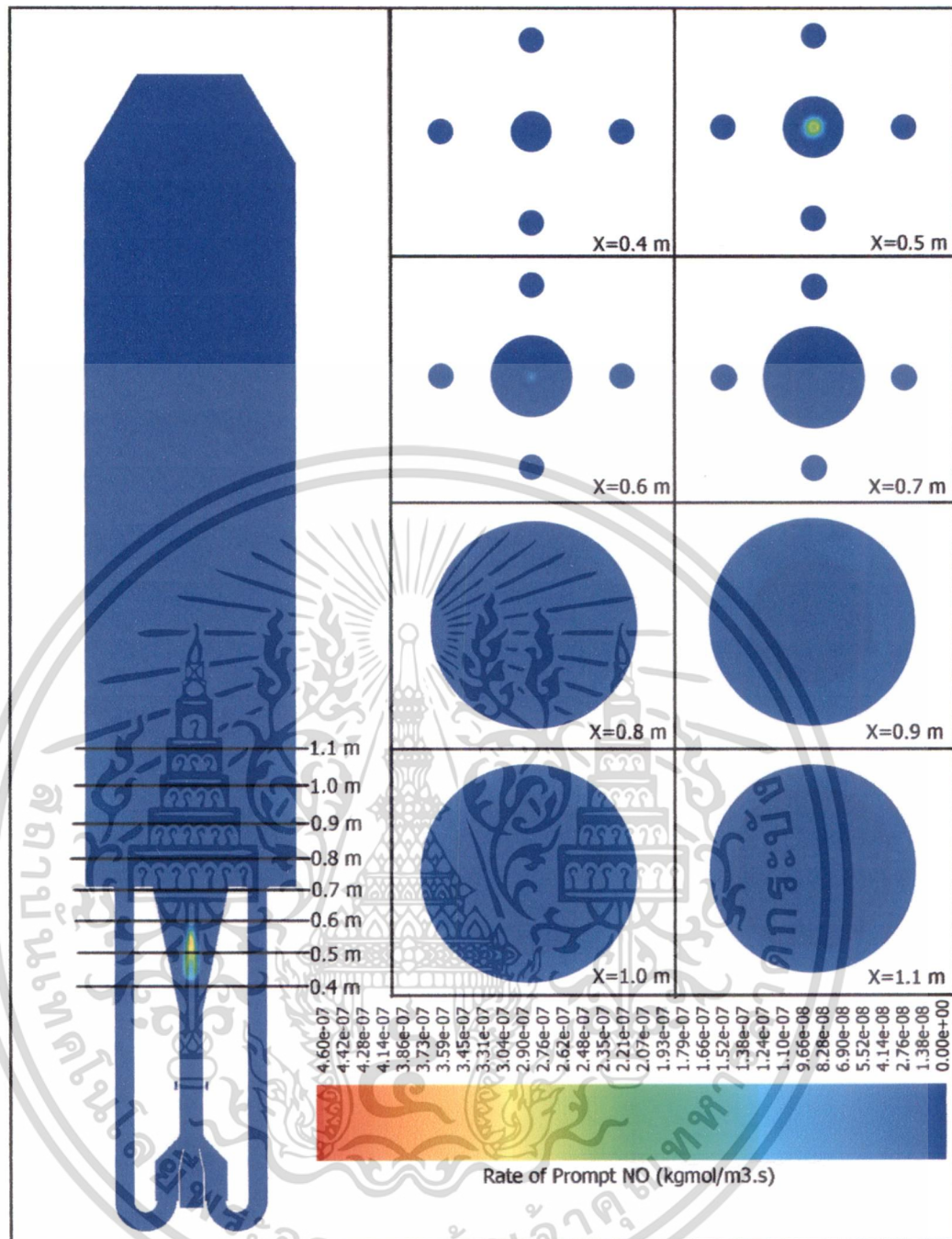
รูปที่ 6.73 นั้นแสดงถึงอัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของ Fuel NO ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าเกิดปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง $X=0.85$ เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนไซยาไนด์และแอมโมเนีย ตามเส้นทางเดินปฏิกิริยา Coal Fuel NOx Scheme A, B, C และ D เช่นเดียวกับกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

6.3.1.14 ผลการจำลองอัตราการเกิดและอัตราการสลายของ Prompt NO



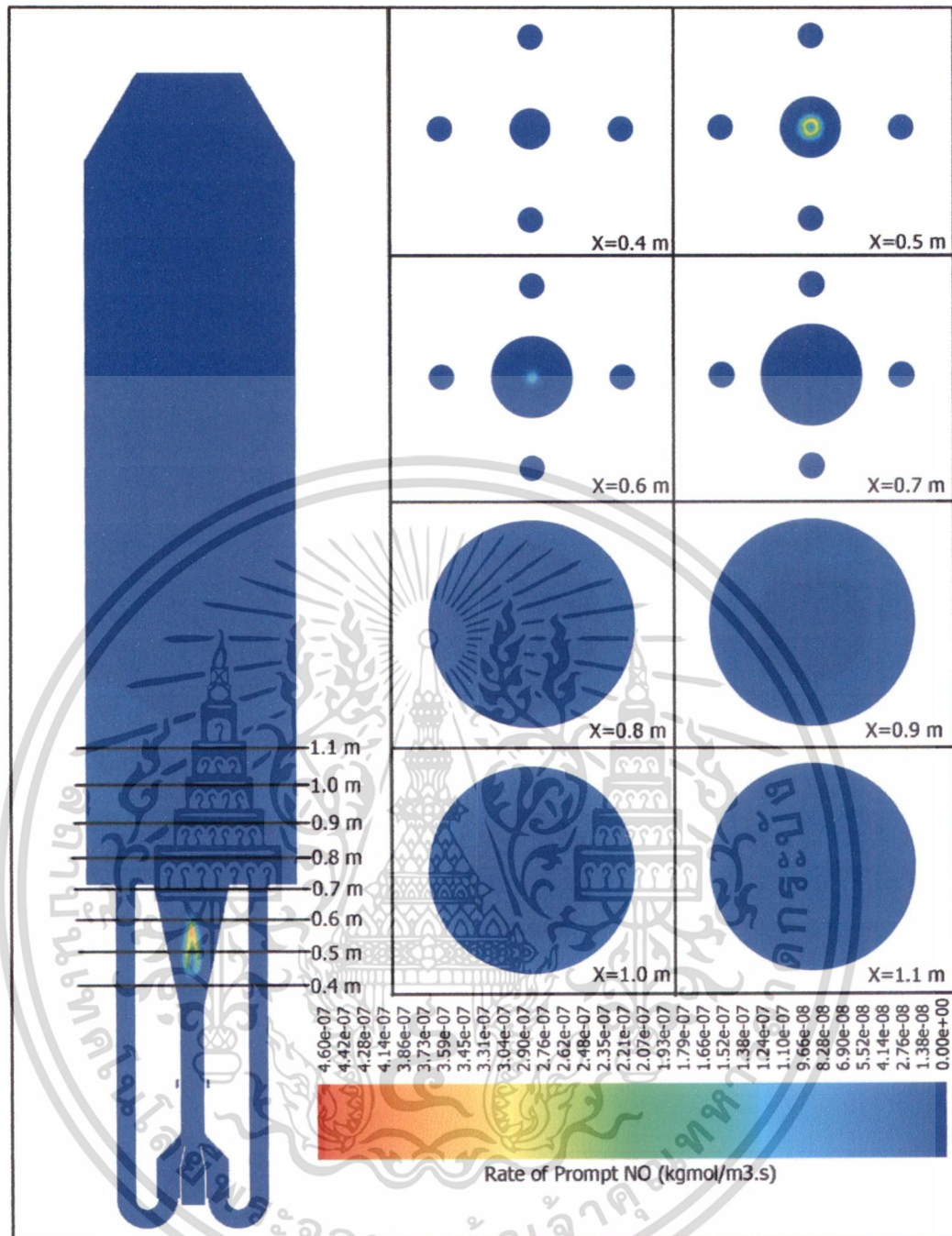
รูปที่ 6.74 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของ Prompt NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



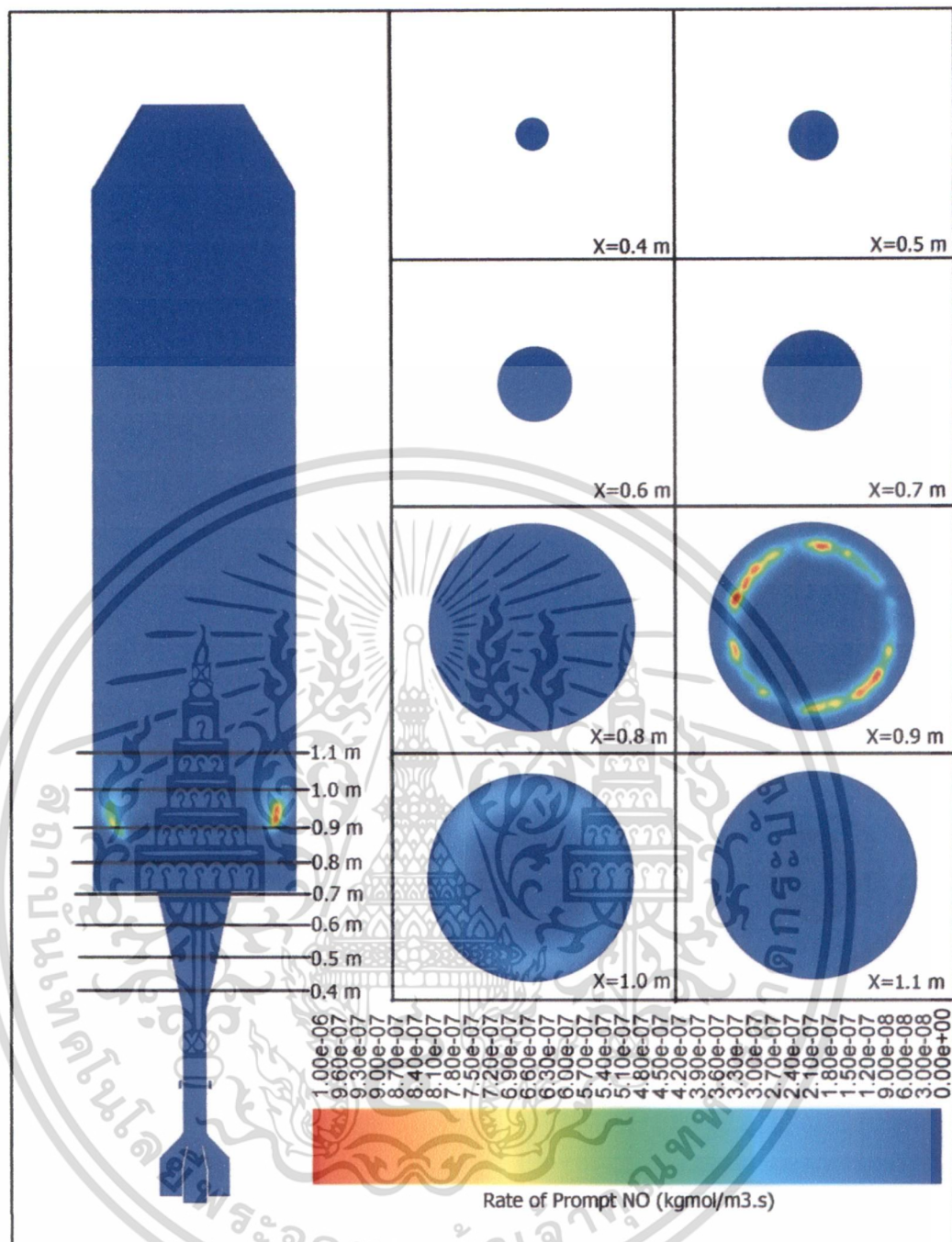
รูปที่ 6.75 อัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของ Prompt NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.76 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของ Prompt NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.77 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของ Prompt NO ในหัวเผาถ่านหิน
กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

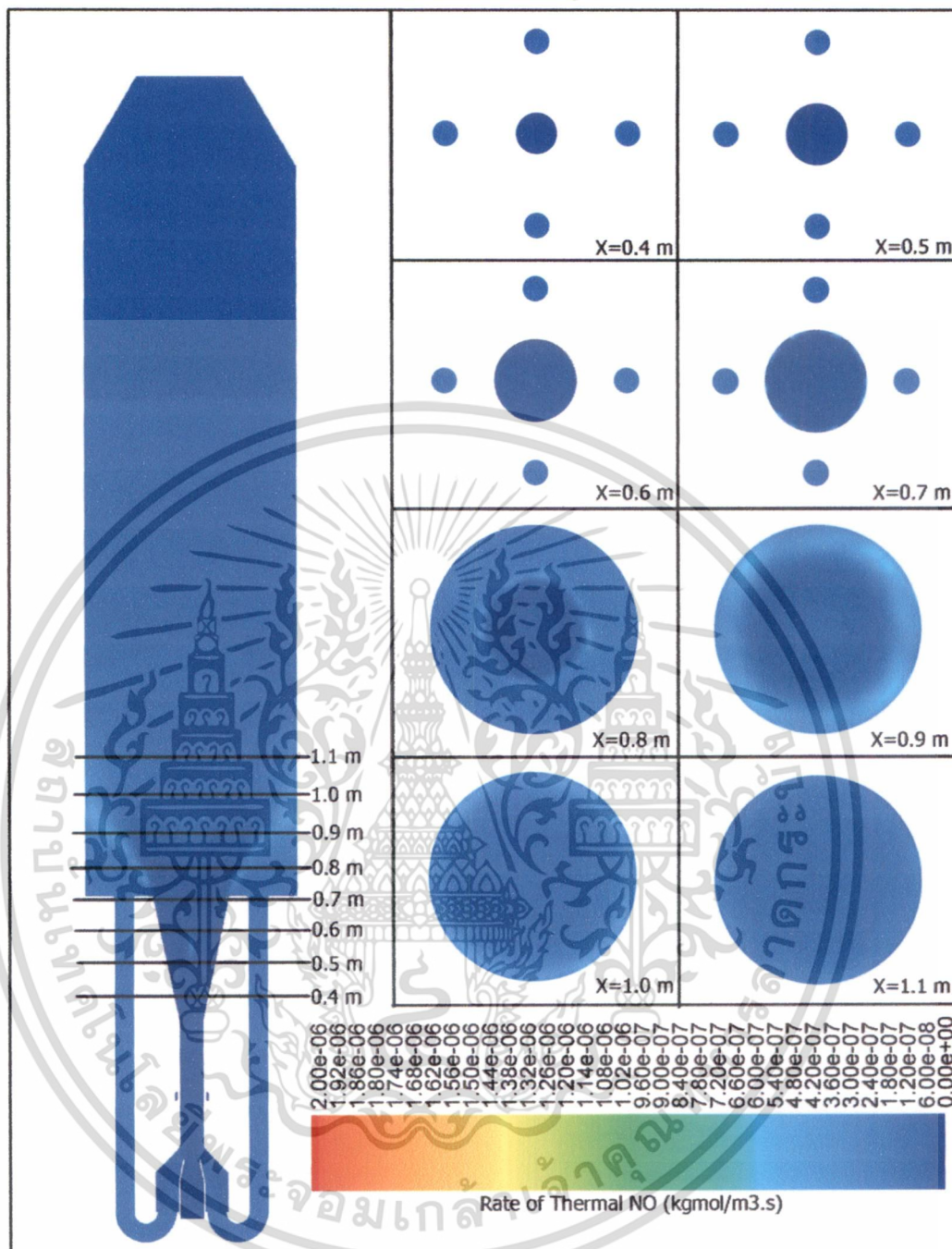
รูปที่ 6.74-6.76 แสดงถึงอัตราการเกิดและอัตราการสลายของ Prompt NO ในหัวเผาถ่านหินกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่า Prompt NO ส่วนมากเกิดตรงบริเวณเชื้อเพลิงหนาที่บริเวณหน้าไฟ โดยปฏิกิริยาจะมีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับสปีชีส์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยา ซึ่งเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นไปตามสมการ ดังนี้ $CH + N_2 \rightleftharpoons HCN + N$, $N + O_2 \rightleftharpoons NO + O$,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$HCN + OH \rightleftharpoons CN + H_2O$ และ $CN + O_2 \rightleftharpoons NO + CO$ ซึ่งการแตกตัวของเชื้อเพลิง ได้ก่อให้เกิดสปีชีส์ย่อยจำนวนหนึ่ง โดยสปีชีส์เหล่านี้เป็นแหล่งกำเนิดของ NO_x ในเปลวไฟของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน (เช่น CH , CH_2 , C , C_2H) จากผลการจำลองจะพบว่า Prompt NO มีแนวโน้มที่จะเกิดจากซาร์มากกว่าเกิดจากสารระเหย เนื่องจากตำแหน่งที่เกิด Prompt NO จะมีตำแหน่งใกล้เคียงซาร์มากกว่าสารระเหย (ที่ระยะ $X=0.45-0.65$ เมตร) ซึ่งอัตราการเกิด Prompt NO สามารถคำนวณได้จากสมการ $\frac{d[NO]}{dt} = f k'_{pr} [O_2]^a [N_2] [FUEL] e^{-E'_a/RT}$ จะเห็นได้ว่าถ้าความเข้มข้นของออกซิเจนและไนโตรเจนมีความเข้มข้นที่สูง อัตราการเกิด Prompt NO จะเพิ่มสูงตามไปด้วย

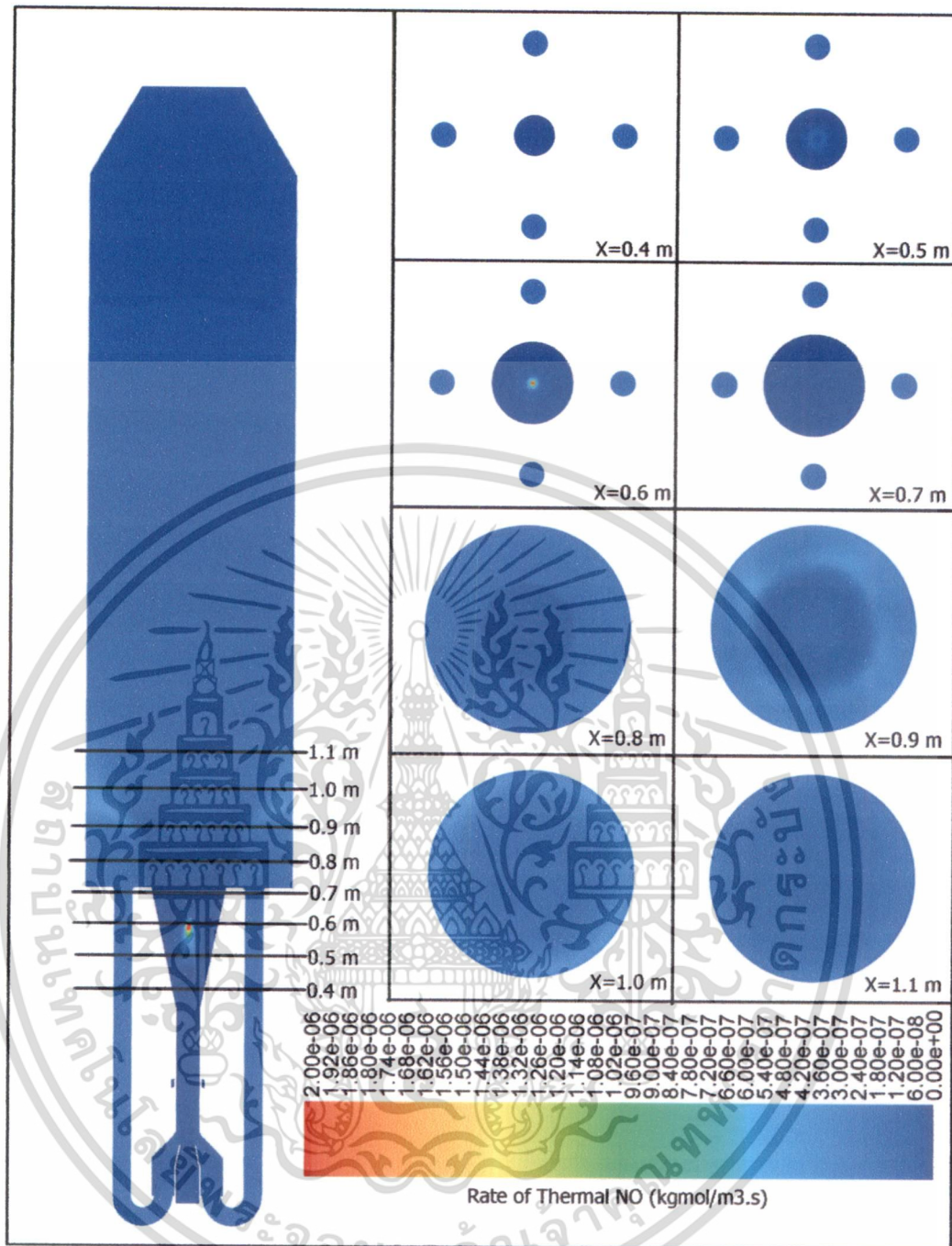
รูปที่ 6.77 แสดงถึงอัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Prompt NO ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าการเกิด Prompt NO ในกรณีนี้จะมีกลไกการเกิดจะเหมือนกับกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย โดยตำแหน่งที่มีปฏิกิริยาการเกิดมากที่สุด จะอยู่ที่ตำแหน่ง $X=0.9-1.0$ เมตร โดยถัดจากนั้นปฏิกิริยาจะลดลงตามความเข้มข้นของออกซิเจนที่ลดลง

6.3.1.15 ผลการจำลองอัตราการเกิดและอัตราการสลายของ Thermal NO



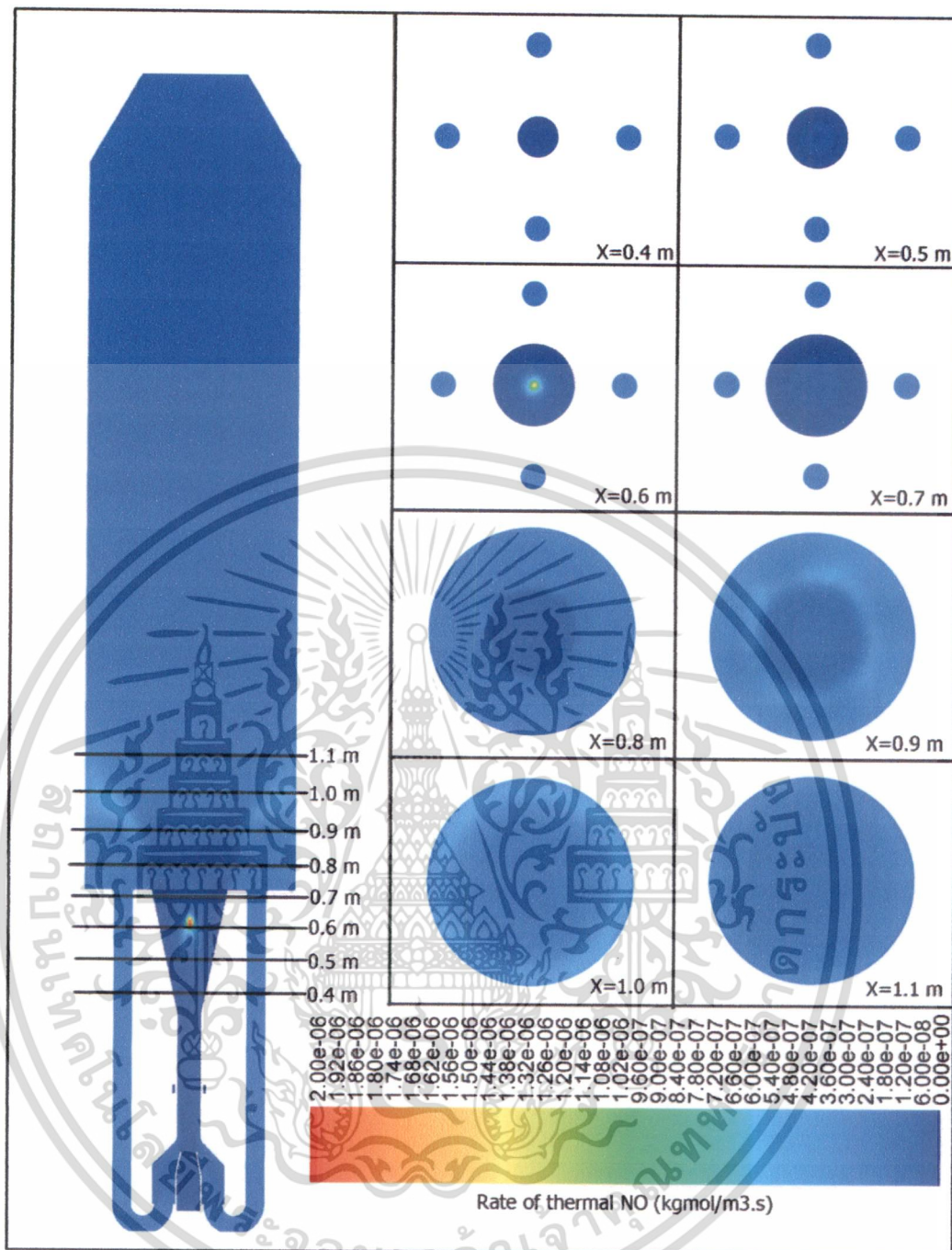
รูปที่ 6.78 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของ Thermal NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



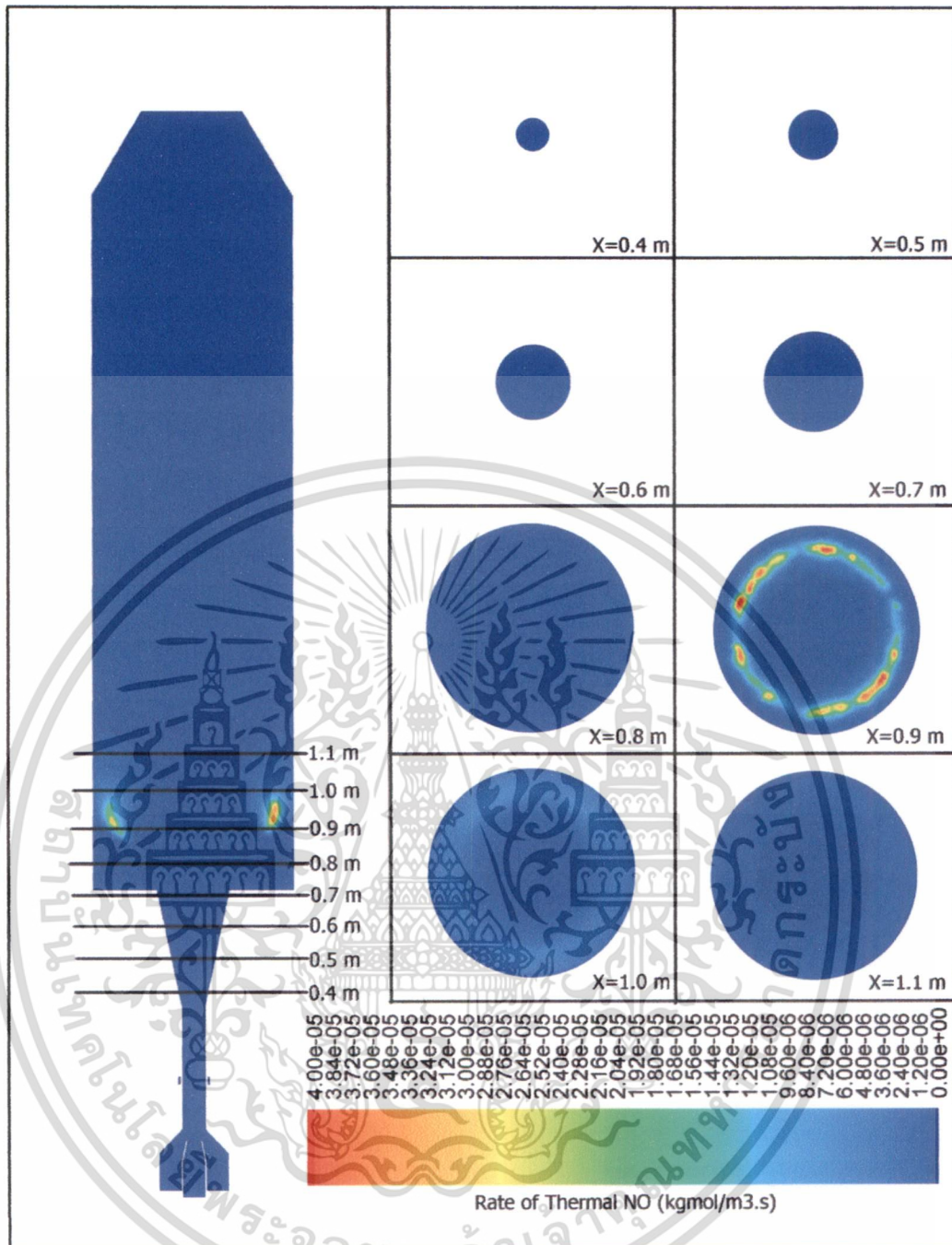
รูปที่ 6.79 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของ Thermal NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.80 อัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของ Thermal NO ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.81 อัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Thermal NO ในหัวเผาถ่านหิน
กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.78-6.80 แสดงถึงอัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของ Thermal NO ในหัวเผาถ่านหินกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย ซึ่ง Thermal NO กระบวนการ Zeldovich mechanism ซึ่งกระบวนการนี้จะป้ตามปฏิกิริยา $O + N_2 \rightleftharpoons N + NO$ และ $N + O_2 \rightleftharpoons O + NO$ ซึ่งจะถูควบคุมอัตราโดยอุณหภูมิและความเข้มข้น ตามสมการ $\frac{d[NO]}{dt} = k_{f,1}[O][N_2] + k_{f,2}[N][O_2] + k_{f,3}[N][OH] - k_{r,1}[NO][N] - k_{r,2}[NO][O] - k_{r,3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_{f,1} = 1.8 \times 10^8 e^{-38370/T}, k_{r,1} = 3.8 \times 10^7 e^{-425/T}$$

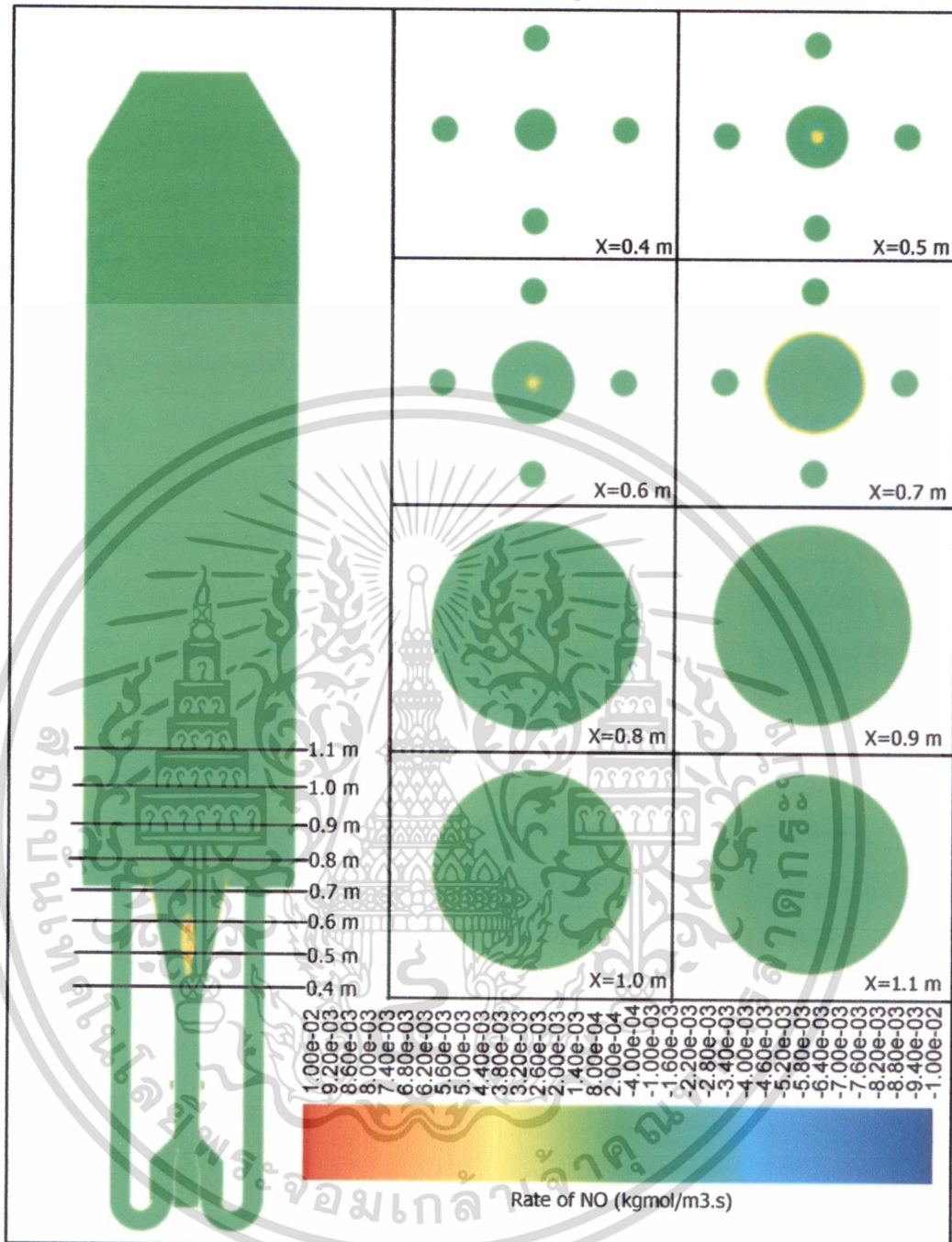
$$k_{f,2} = 1.8 \times 10^4 T e^{-4680/T}, k_{r,2} = 3.81 \times 10^3 T e^{-20820/T}$$

$k_{f,3} = 7.1 \times 10^7 e^{-450/T}$ และ $k_{r,3} = 1.7 \times 10^8 e^{-24560/T}$ เมื่อพิจารณาจากทั้งเจ็ดสมการแล้วพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะส่งผลให้อัตราการเกิดของ Thermal NO สูงขึ้นตามไปด้วย โดยส่วนมากจะเกิดในบริเวณที่มีอุณหภูมิมากกว่า 1,800 K เมื่อดูจากผลการจำลองแล้วก็จะพบว่า Thermal NO ส่วนมากจะอยู่ที่ตำแหน่ง $X=0.6$ เมตร

รูปที่ 6.81 แสดงถึงอัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของ Thermal NO ในหัวเผาถ่านหินกรณีที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย ซึ่งอัตราการเกิด Thermal NO จะมีมากที่สุดที่ระยะ $X=0.9-1.0$ เมตร เนื่องจากบริเวณนั้นมีอุณหภูมิการเผาไหม้มากกว่า 1,800 K



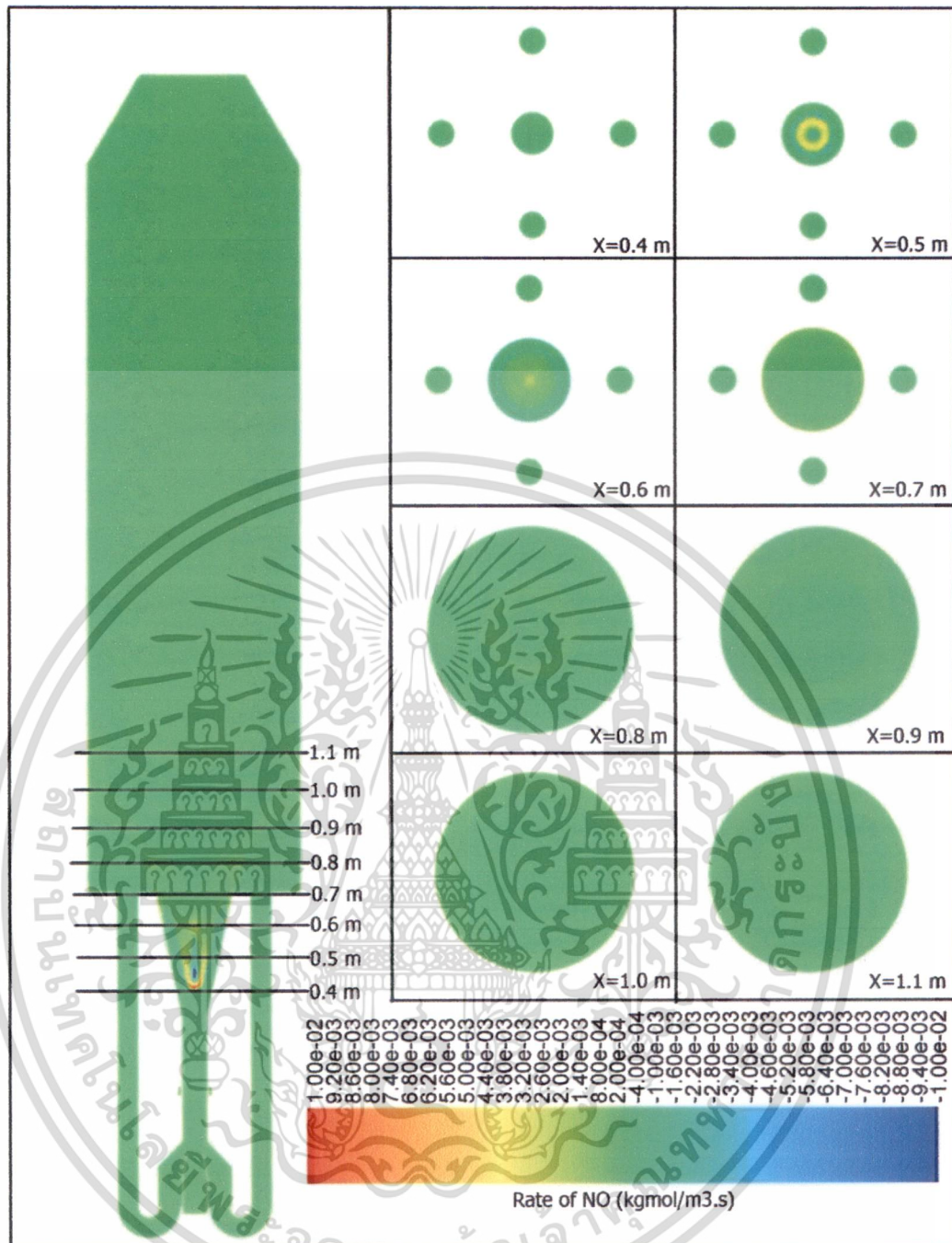
6.3.1.16 ผลการจำลองอัตราการเกิดและอัตราการสลายของไนโตรเจนออกไซด์



รูปที่ 6.82 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของไนโตรเจนออกไซด์

ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

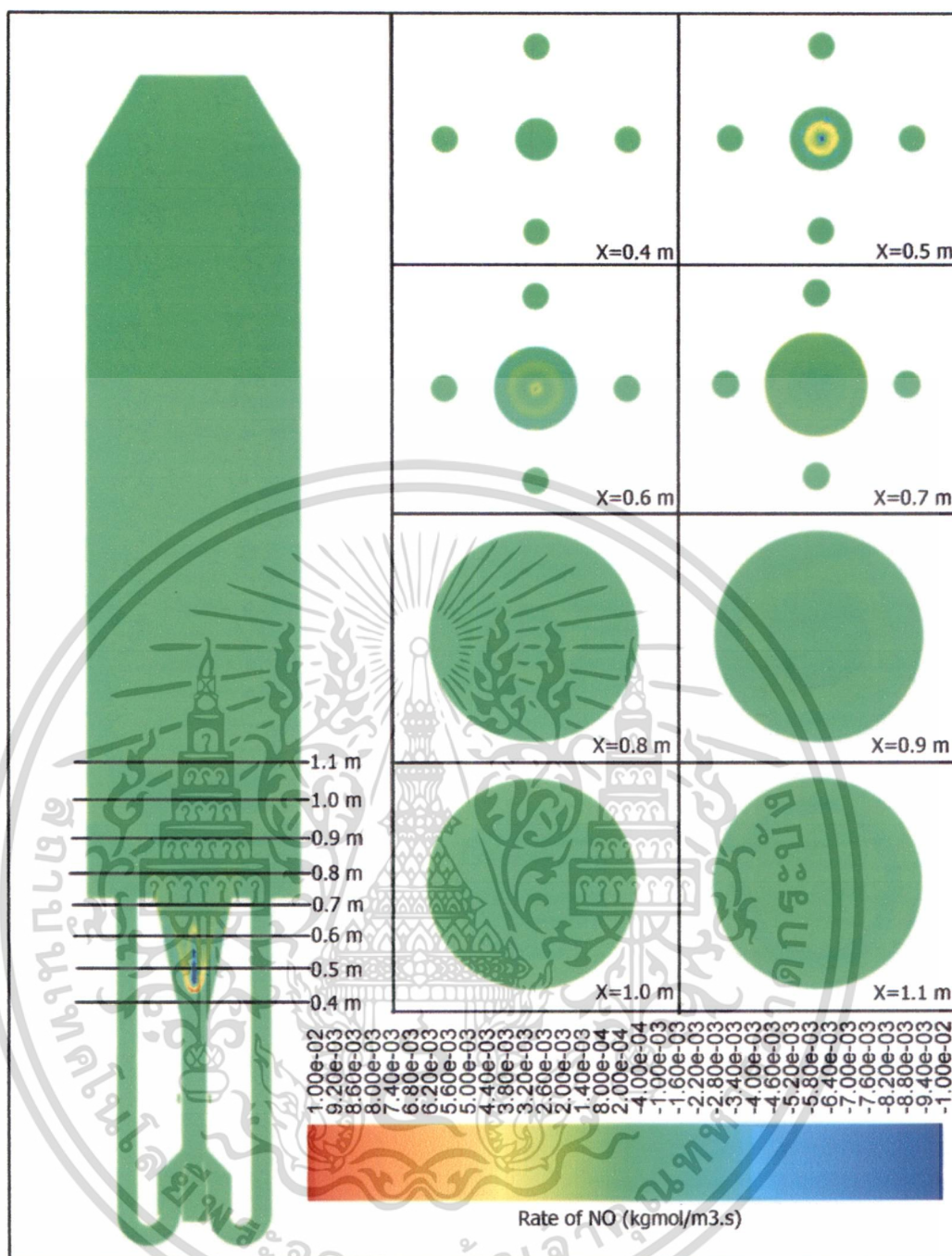
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.83 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของไนโตรเจนออกไซด์

ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

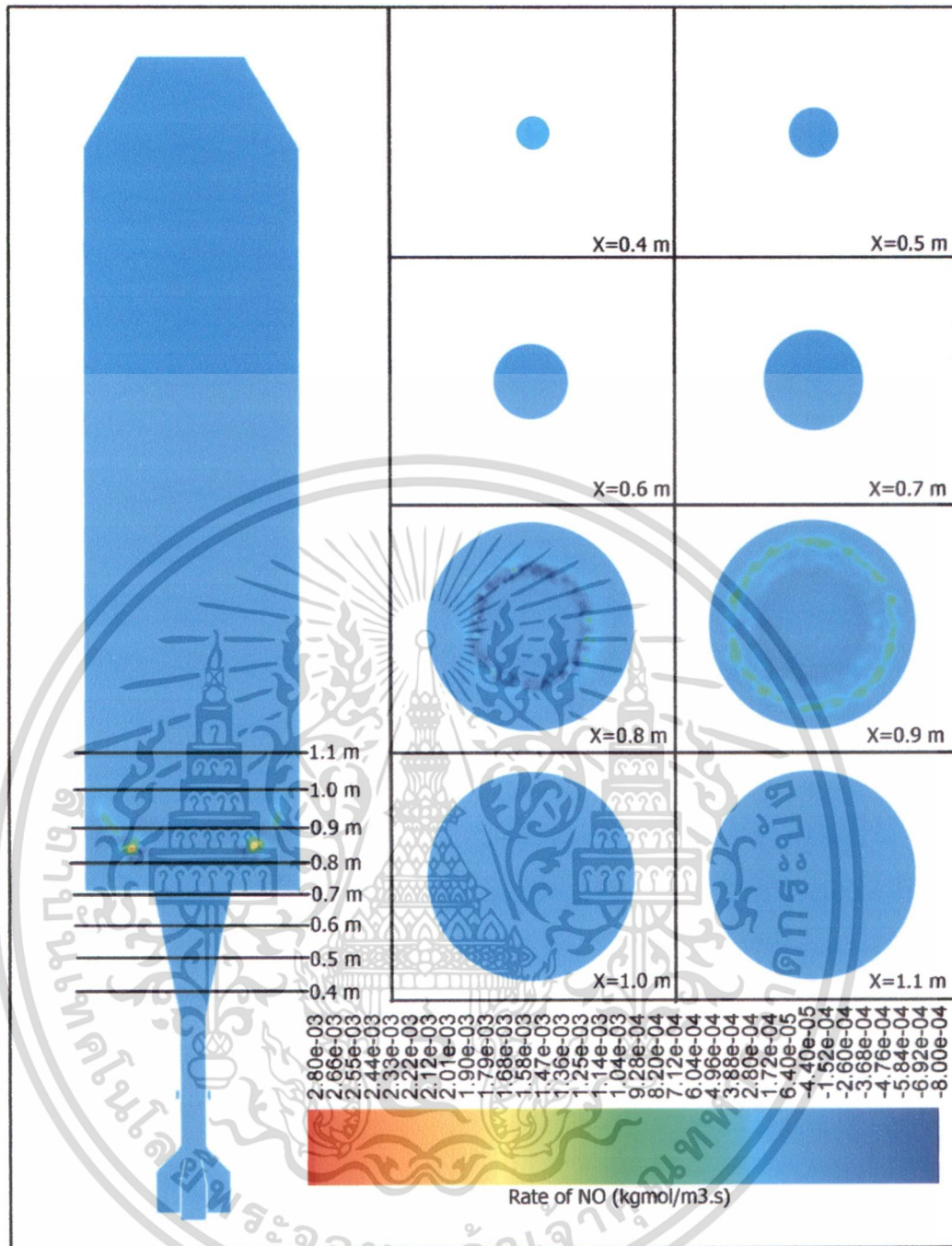
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.84 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของไนโตรเจนออกไซด์

ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.85 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.82-6.84 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย โดยผลการจำลองในส่วนนี้จะเป็นการรวมอัตราการเกิดและอัตราการสลายของ Thermal NO, Prompt NO และ Fuel NO เข้าไว้ด้วยกัน เมื่อพิจารณาจากอัตราโดยรวมทั้งหมดแล้วพบว่าอัตราการเกิด Total NO และ Fuel NO มี อัตราที่ใกล้เคียงกัน เพราะว่าอัตราของ Thermal NO และ Prompt NO

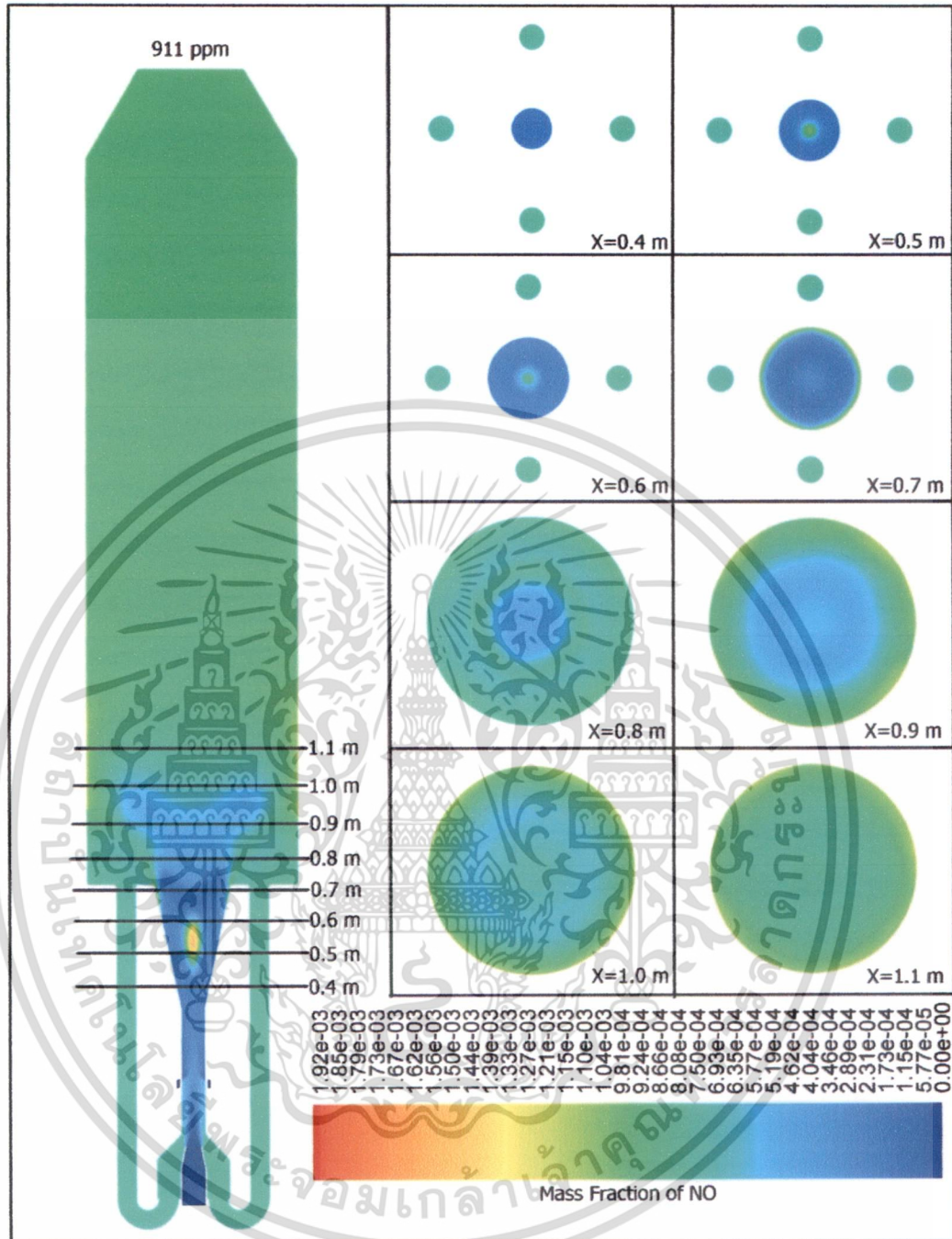
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยกว่า Fuel NO ถึง 1,000 เท่า จึงสรุปได้ว่า NO ส่วนมากเป็น Fuel NO และมีตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาที่เดียวกัน (ที่ระยะ $X=0.45-0.65$ เมตร) โดยพบว่าที่กรณี 30 : 70 มีการสูญเสียของไนโตรเจนออกไซด์น้อยกว่า โดยส่วนมากจะเป็นเกิดมากกว่า แต่ในกรณี 34 : 66 จะมีทั้งการเกิดและการสูญเสียที่รุนแรง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบในส่วนของพื้นที่ที่มีการเกิดปฏิกิริยา (ที่ระยะ $X = 0.5$ เมตร) นั้นจะพบว่ามีมากกว่าการสูญเสีย และเมื่อเทียบบริเวณที่เกิดปฏิกิริยากับกรณี 30 : 70 ที่ตำแหน่งเดียวกัน จะพบว่าที่กรณี 30 : 70 มีพื้นที่ที่เล็กกว่า จึงส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นน้อยกว่ากรณี 34 : 66

รูปที่ 6.85 อัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย นั้นมีอัตรา Total NO ใกล้เคียงกับ Fuel NO เช่นเดียวกับกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย และตำแหน่งปฏิกิริยา Total NO กับ Fuel NO มีตำแหน่งเดียวกัน (ที่ตำแหน่ง $X=0.85$ เมตร)

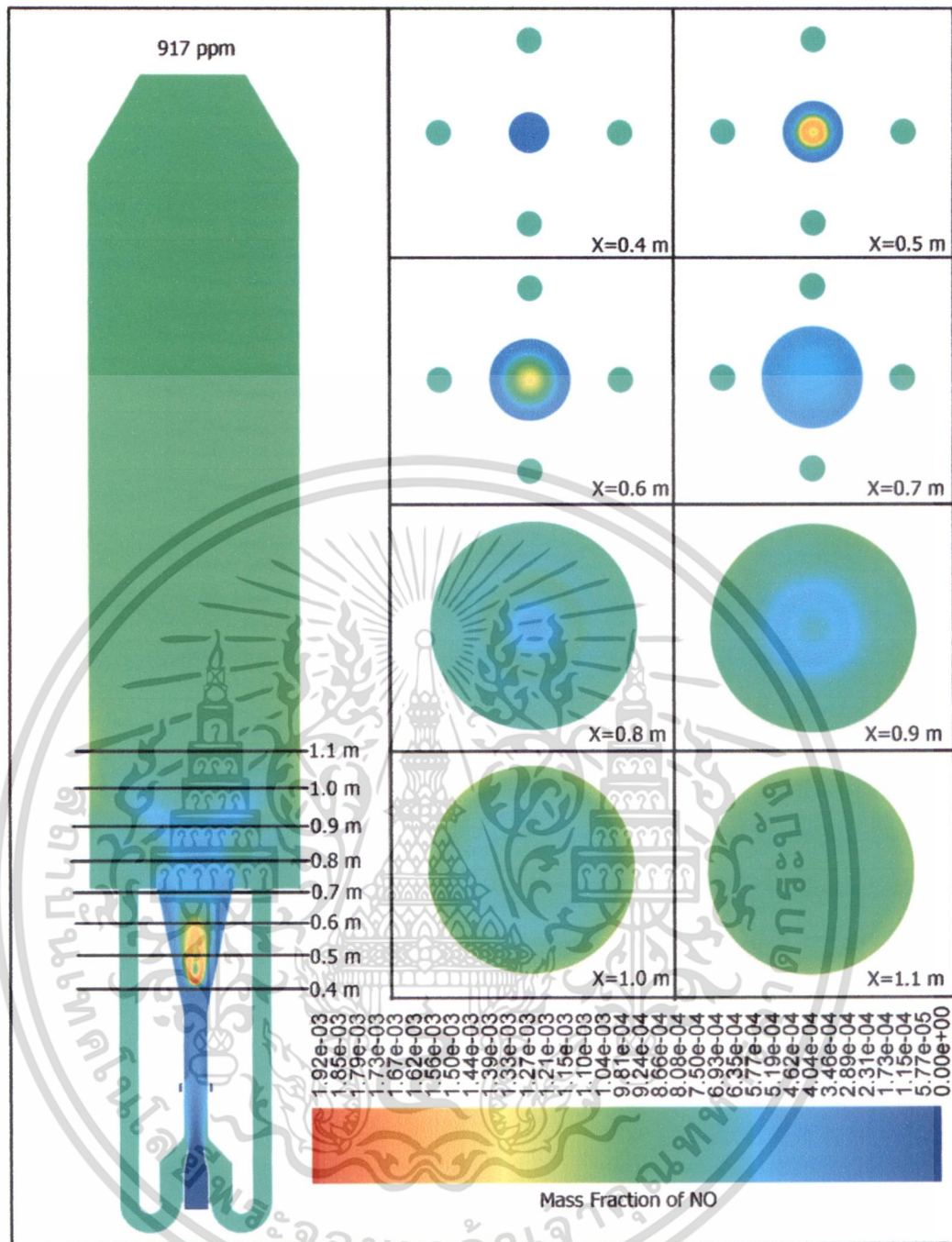
เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างทั้งสองกรณีจะพบว่า อัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ในกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียนั้นมีอัตราการเกิดที่สูงกว่าและมีอัตราการสูญเสียที่มากเช่นเดียวกัน แต่เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียจะพบว่ามีอัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียที่ต่ำกว่า แต่เมื่อเทียบสัดส่วนอัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียในกรณีนี้จะพบว่าอัตราการเกิดนั้นมีมากกว่าประกอบกับมีพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยาที่มากกว่ากรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย เป็นผลให้ไนโตรเจนออกไซด์ที่ทางออกของกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย นั้นมากกว่า

6.3.1.17 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์



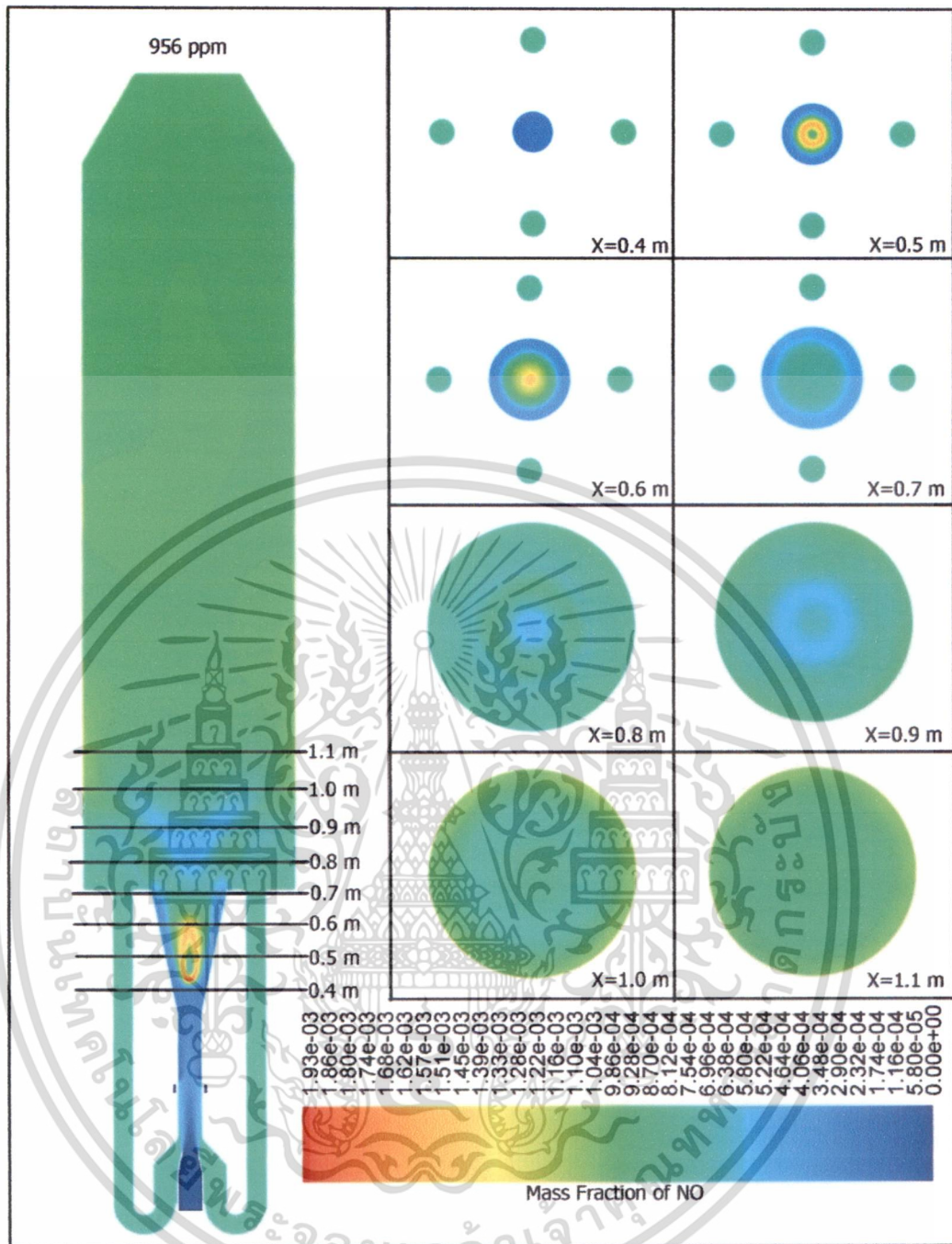
รูปที่ 6.86 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



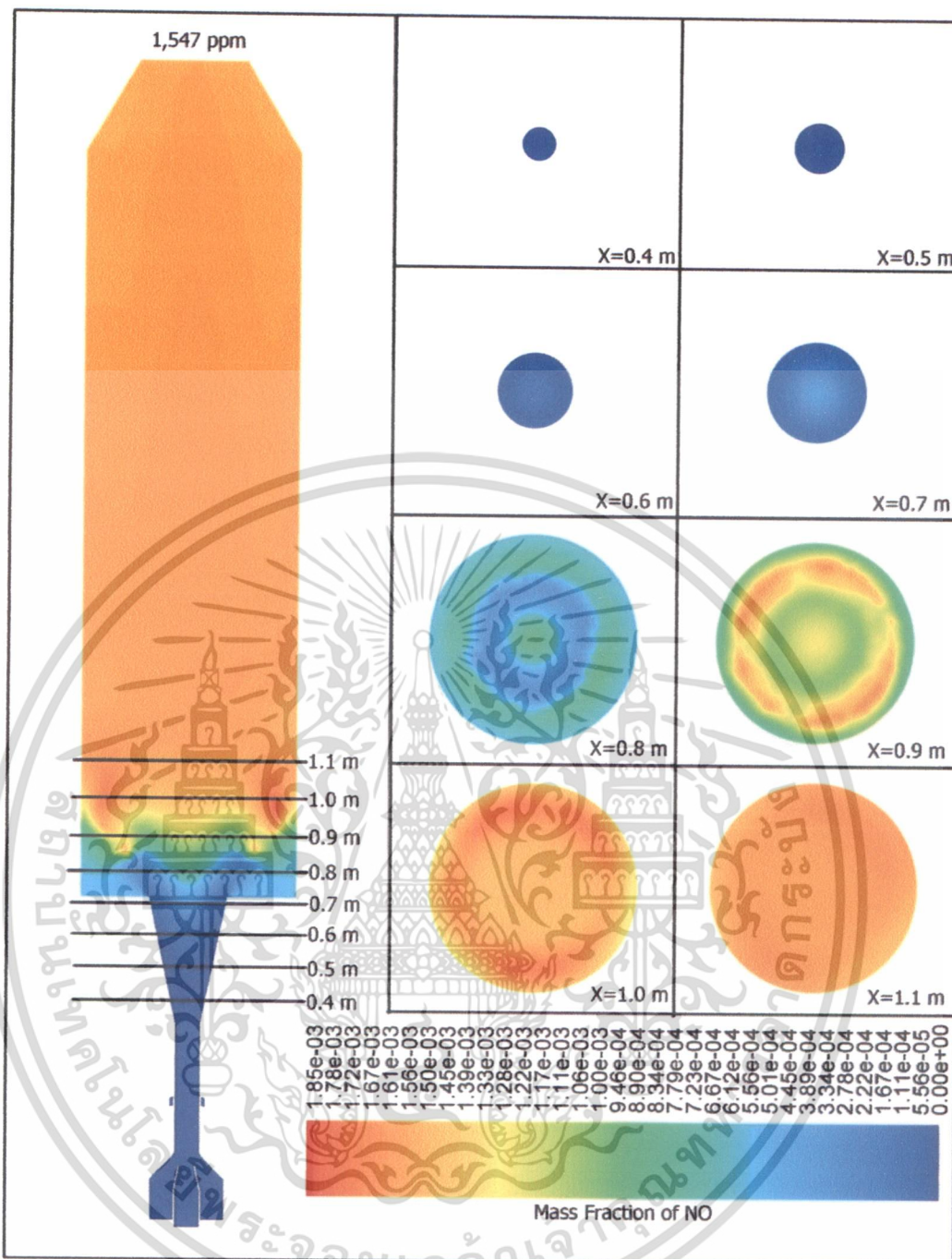
รูปที่ 6.87 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.88 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.89 การกระจายความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.86-6.88 แสดงถึงการกระจายตัวของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย สังเกตได้ว่าตำแหน่งและปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์จะสอดคล้องกับตำแหน่งปฏิบัติการเกิดของ Total NO โดยจากทั้ง 3 กรณี พบว่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่ทางออกนั้นไม่เท่ากัน เนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ได้ไม่เท่ากัน โดยกรณี 34:66 มีอุณหภูมิการเผาไหม้สูงที่สุด จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

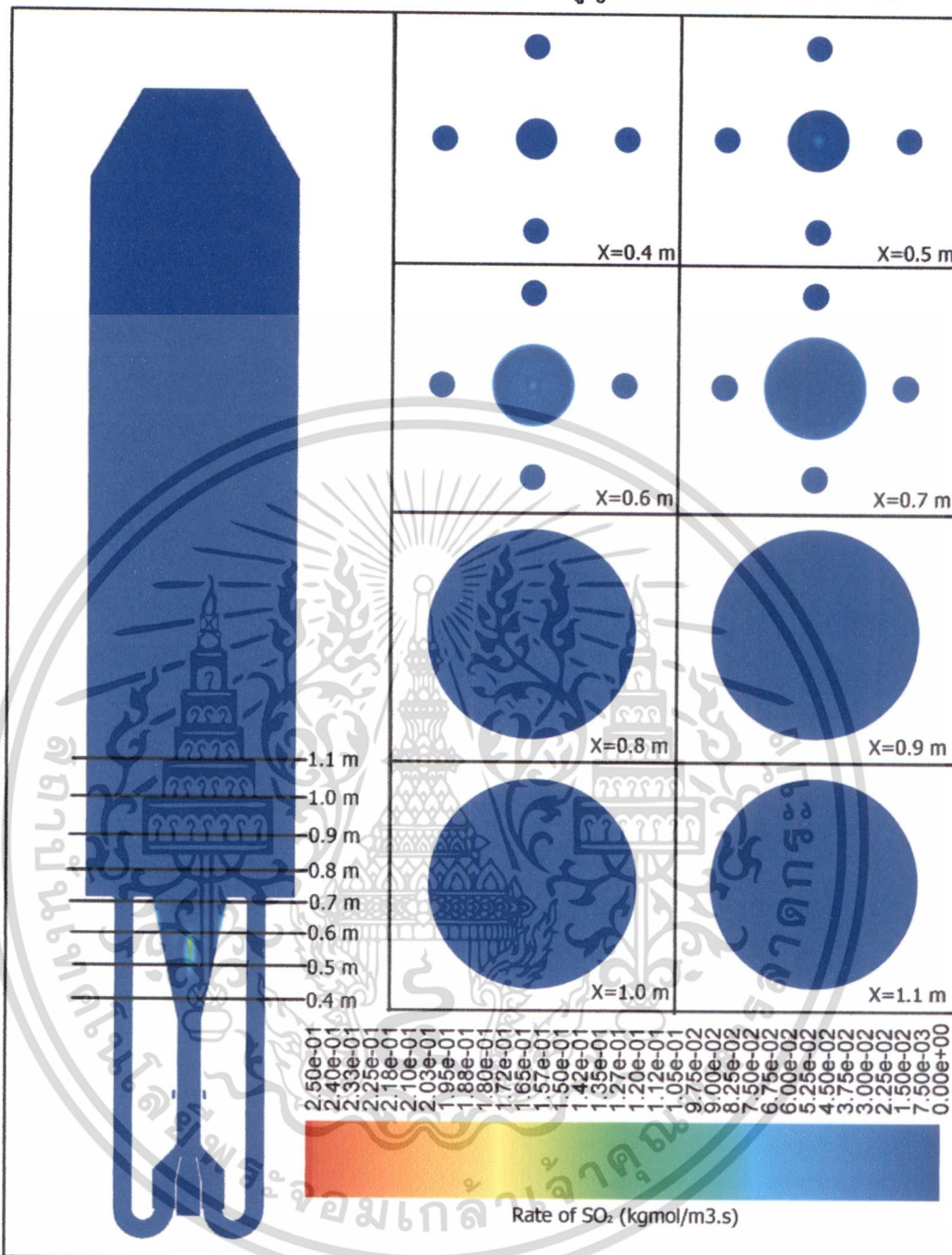
ส่งผลให้กรณีนี้มีความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่บริเวณทางออกมากขึ้นตามไปด้วย โดยไนโตรเจนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมานั้น ส่วนมากจะเป็น Fuel NO เพราะว่ามีอัตราการเกิดปฏิกิริยามากกว่า Thermal NO และ Prompt NO 1,000 เท่า จึงกล่าวได้ว่าไนโตรเจนออกไซด์ที่กระจายอยู่ในห้องเผาไหม้จะเป็น Fuel NO เป็นส่วนใหญ่

รูปที่ 6.89 แสดงถึงการกระจายตัวของไนโตรเจนออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่บริเวณทางออกนั้นมีมากกว่ากรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย โดยจะสอดคล้องกับอัตราการเกิดและการสูญเสีย ซึ่งความเข้มข้นส่วนใหญ่จะอยู่ที่บริเวณห้องเผาไหม้เนื่องจากมีปฏิกิริยาการสูญเสียน้อยกว่ามาก โดยความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่บริเวณทางออกจะอยู่ที่ 1,547 ppm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

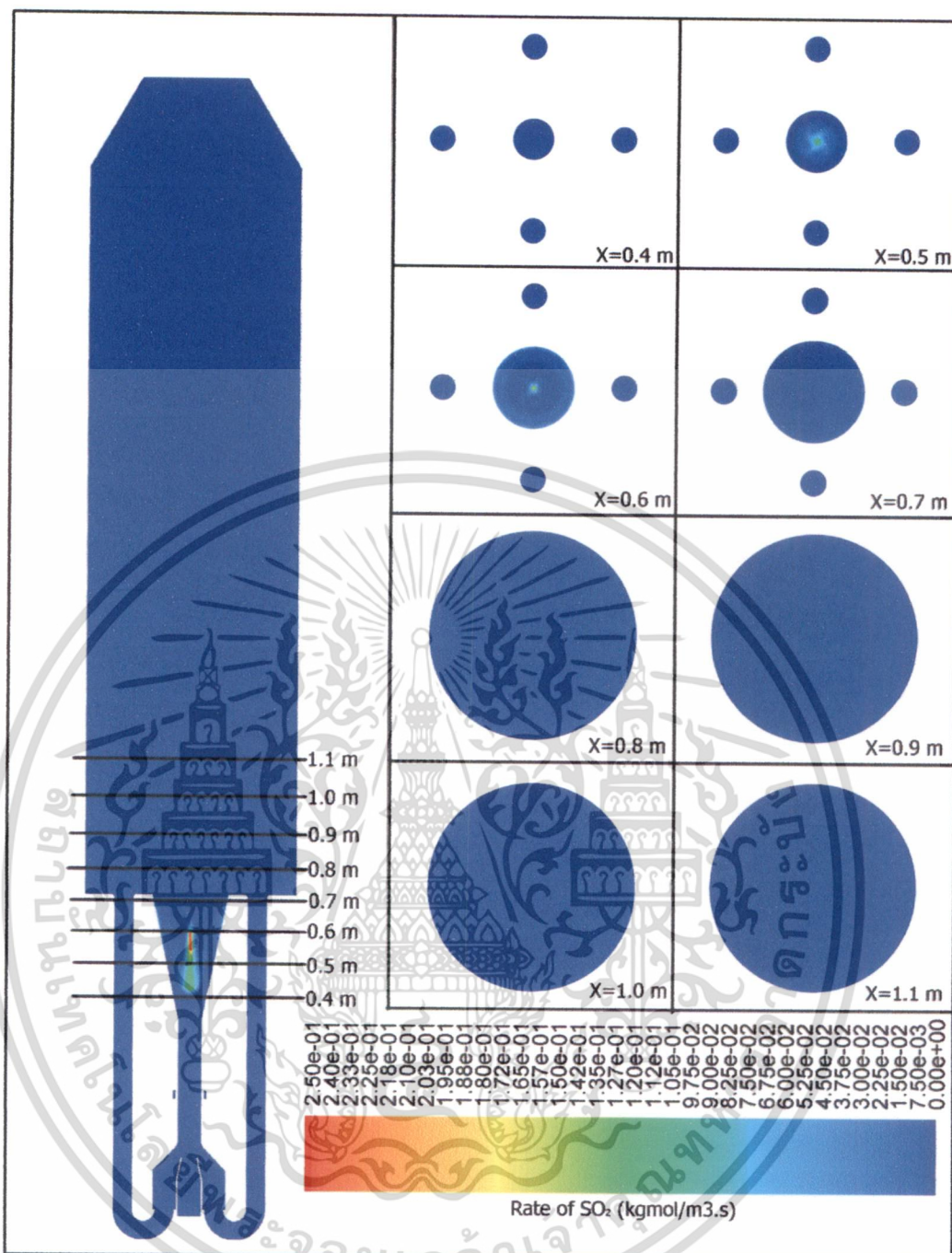
6.3.1.18 ผลการจำลองอัตราการเกิดและอัตราการสลายของซัลเฟอร์ไดออกไซด์



รูปที่ 6.90 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

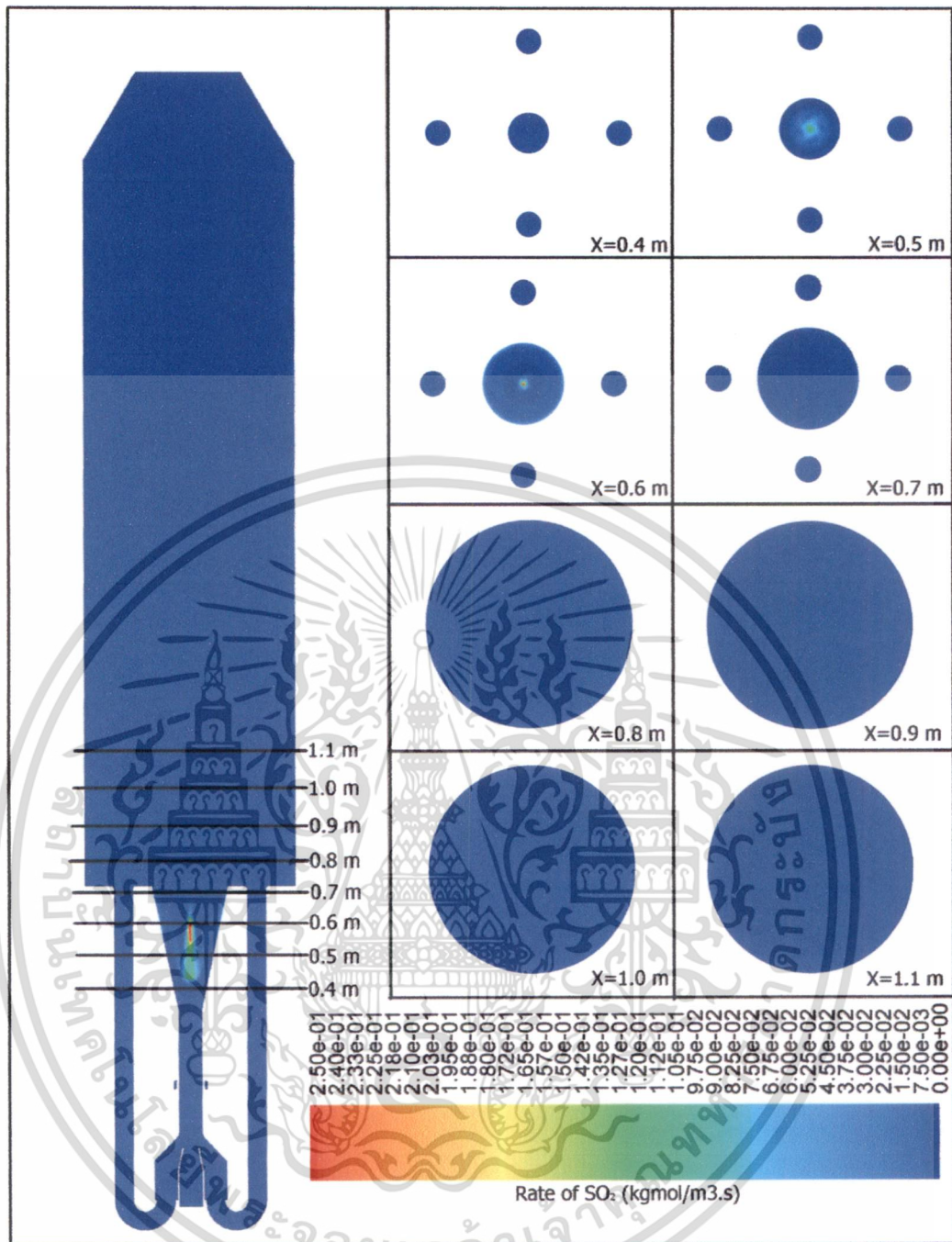
ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.91 อัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของซัลเฟอร์ไดออกไซด์
ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

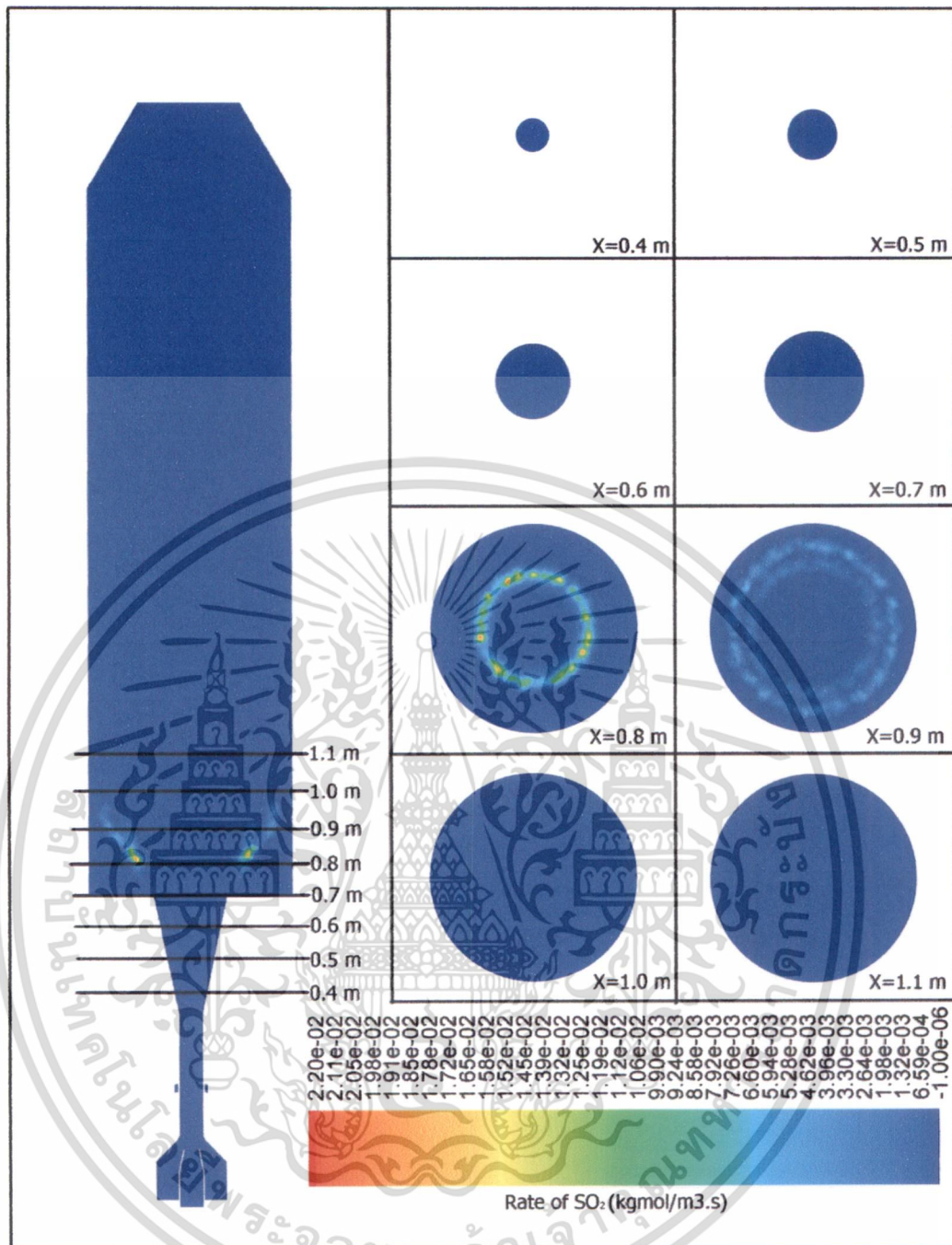
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.92 อัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.93 อัตราการเกิดและอัตราการสลายของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.90-6.92 แสดงถึงอัตราการเกิดและอัตราการสลายของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย ซึ่งซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดจาก 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องของไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยจากการจำลองพบว่าตำแหน่งการสลายตัวของไฮโดรเจนซัลไฟด์และตำแหน่งเกิดของซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ตำแหน่งเดียวกัน (ที่ระยะ X=0.4-0.65 เมตร) ดังสมการ

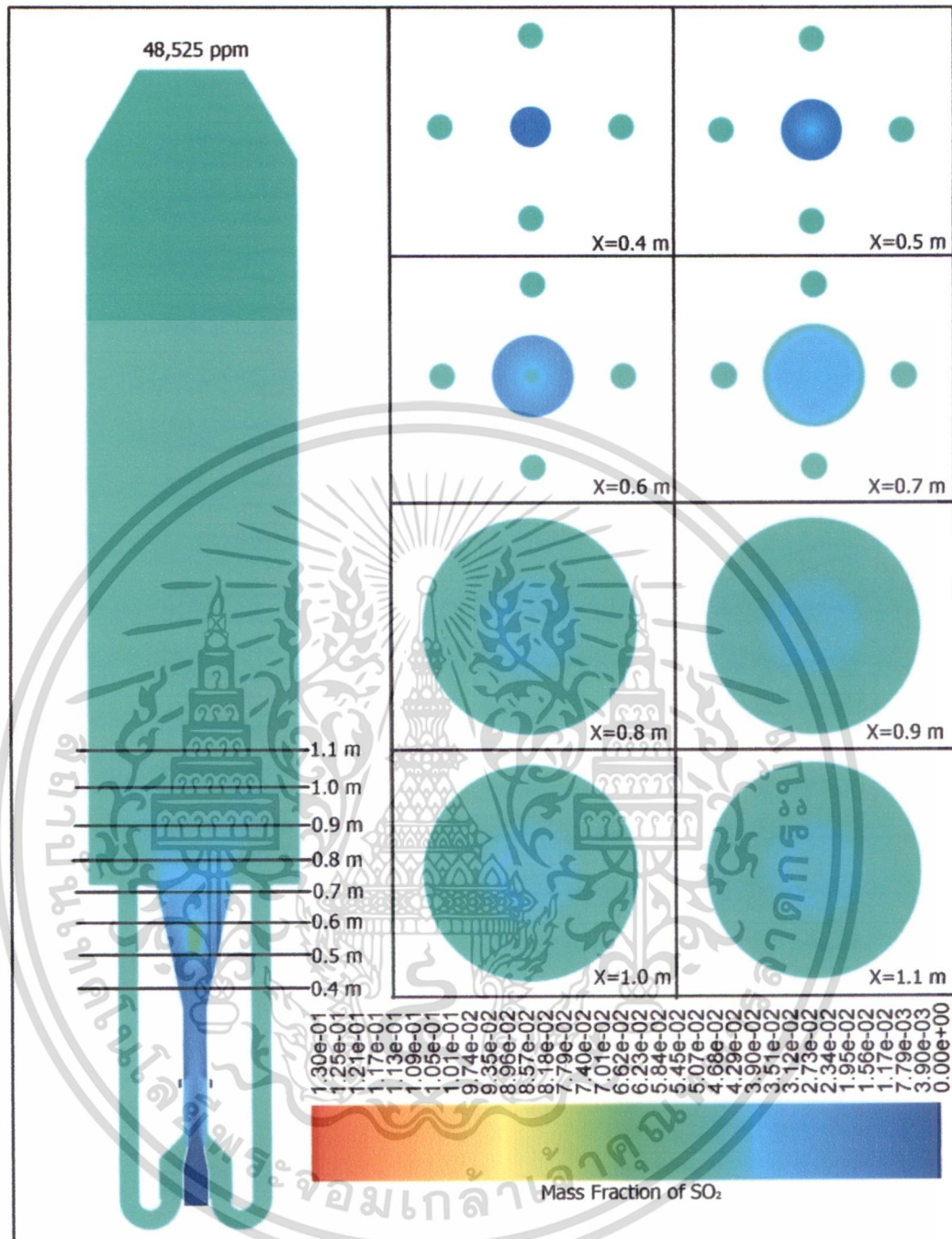
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$H_2S + O_2 \rightarrow SO_2 + H_2$ ส่วนที่สองเกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิมากกว่า 1,500 K ทำให้เกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยซัลเฟอร์ไดออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ขึ้นมา ซึ่ง source term ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นจะเป็นไปตามสมการ $S_{char,i} = \frac{ScY_{S,char}M_{w,i}}{M_{w,SV}}$ และ $S_{vol,i} = \frac{SvolY_{S,vol}M_{w,i}}{M_{w,SV}}$

รูปที่ 6.93 แสดงถึงอัตราการเกิดและอัตราการสูญสลายของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย เห็นได้ว่าตำแหน่งที่เกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะอยู่ที่บริเวณที่มีการเผาไหม้ที่อุณหภูมิมากกว่า 1,500 K เช่นเดียวกับกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

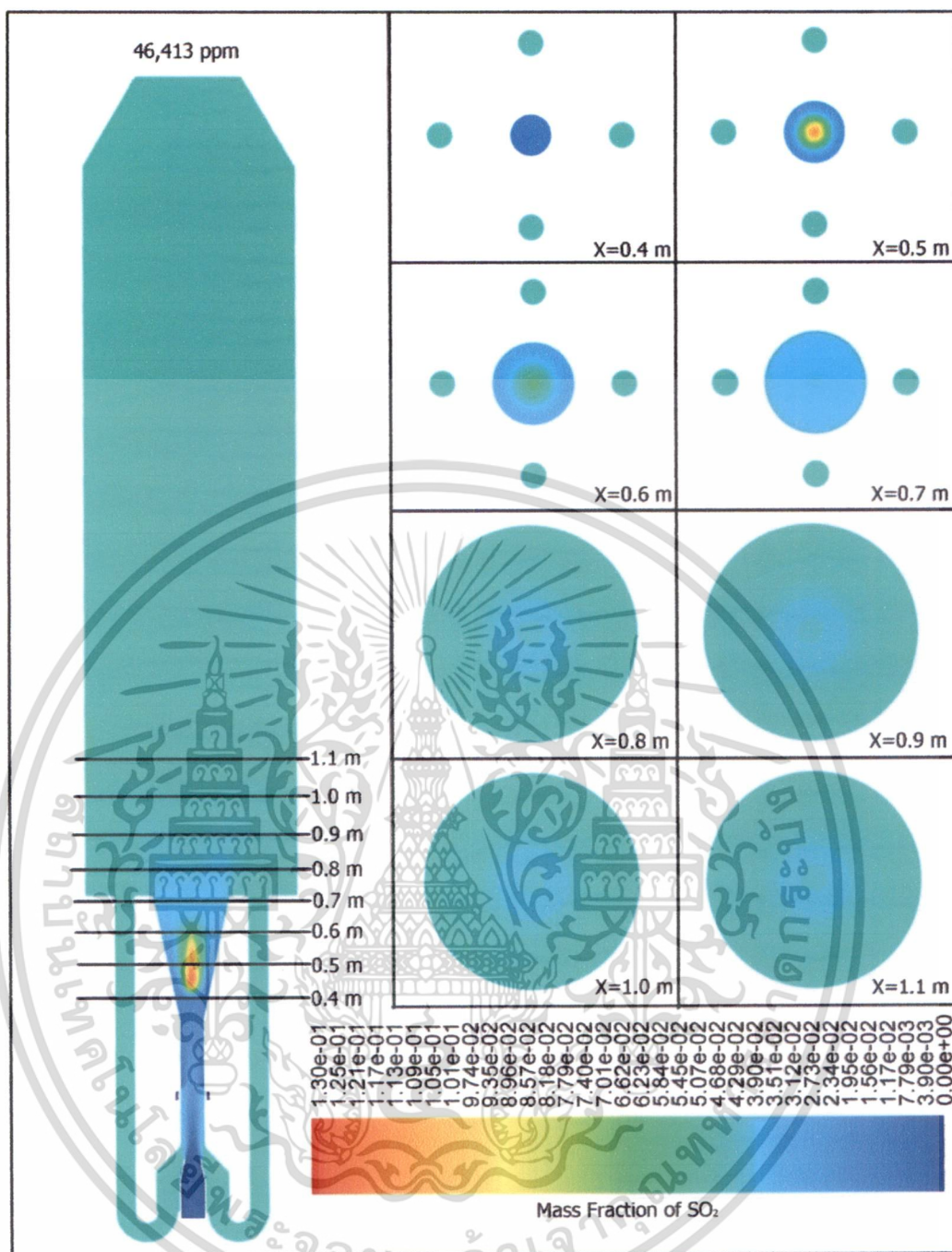


6.3.1.19 ผลการจำลองการกระจายความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์



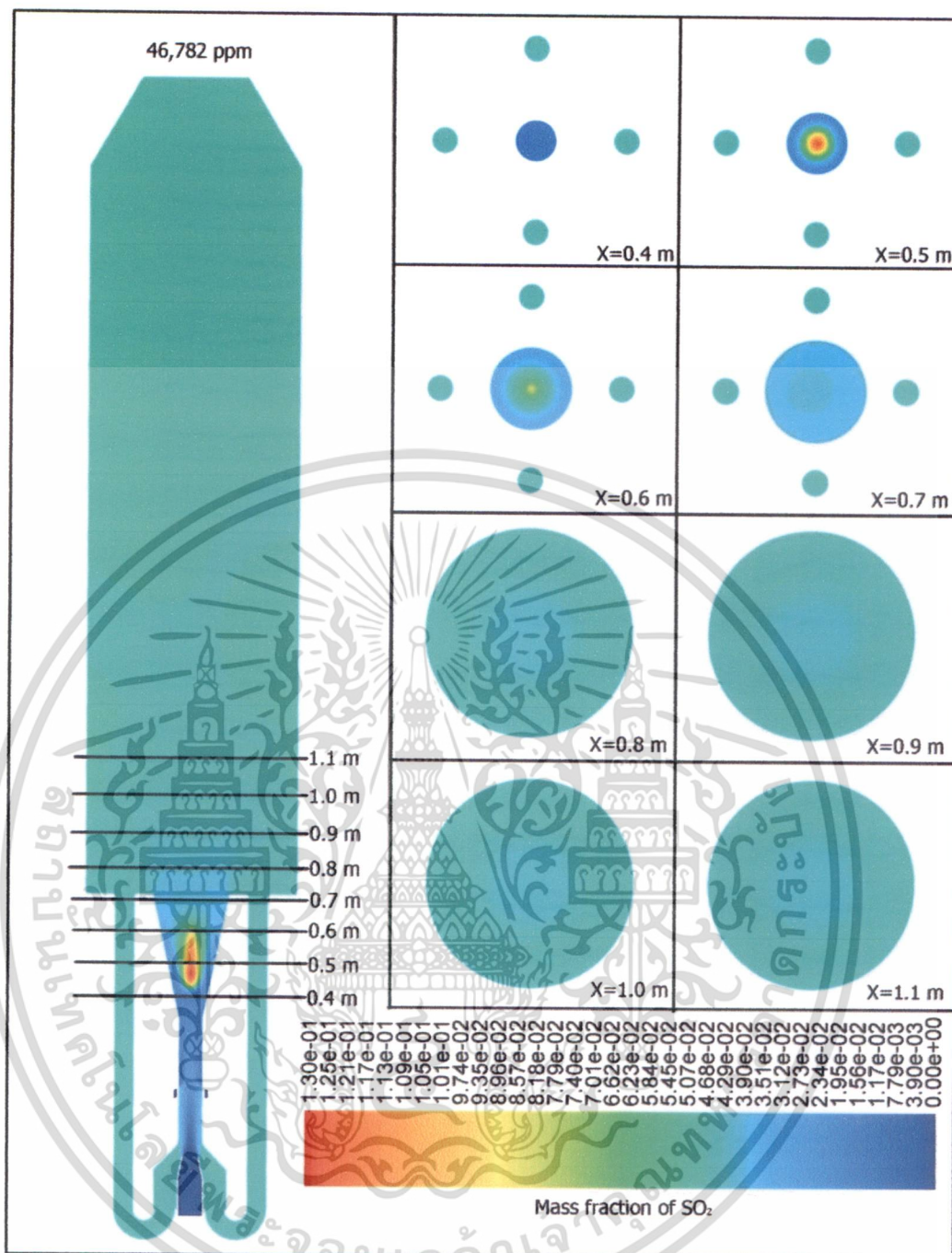
รูปที่ 6.94 การกระจายความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 30 : 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



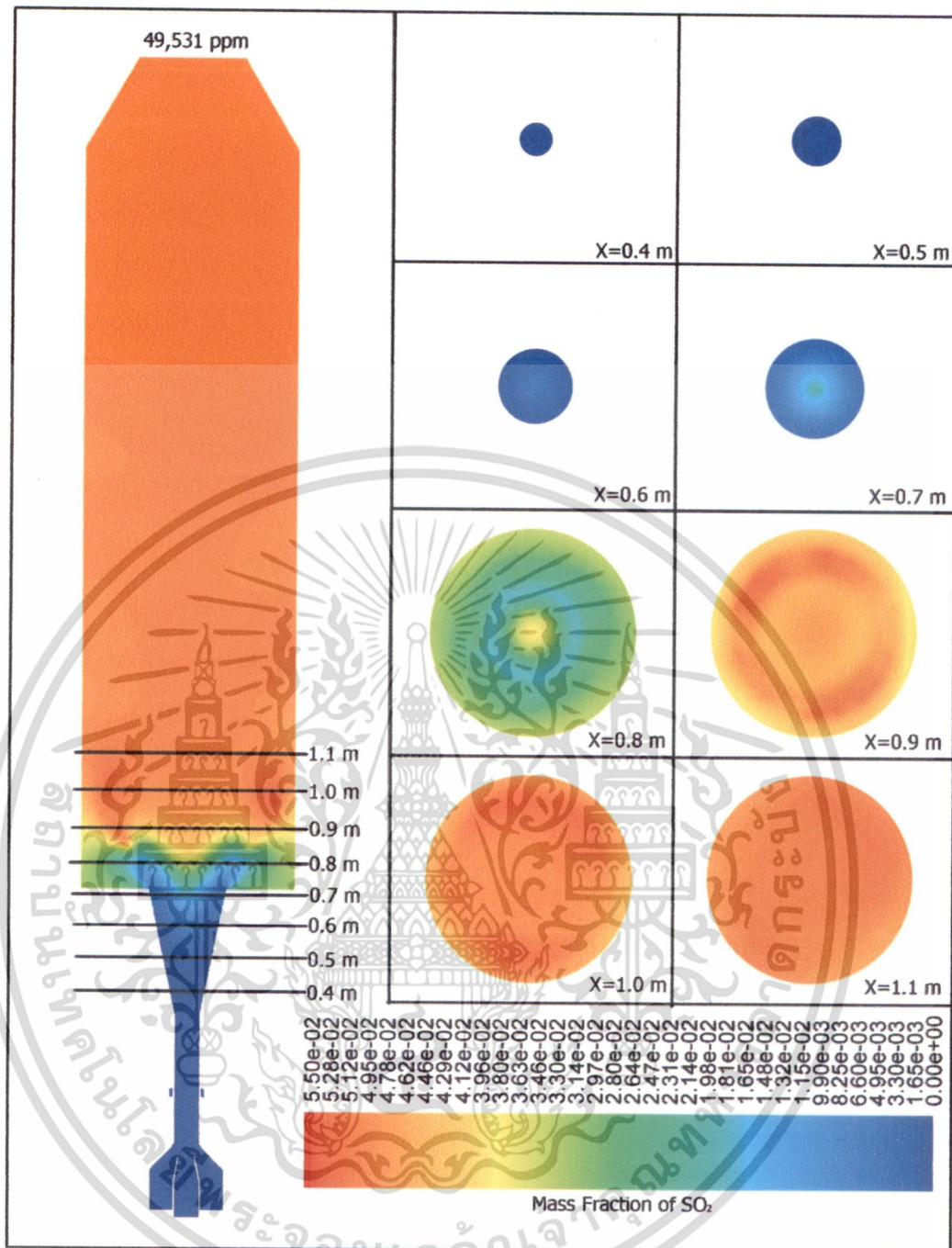
รูปที่ 6.95 การกระจายความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 32 : 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.96 การกระจายความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินกรณี 34 : 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



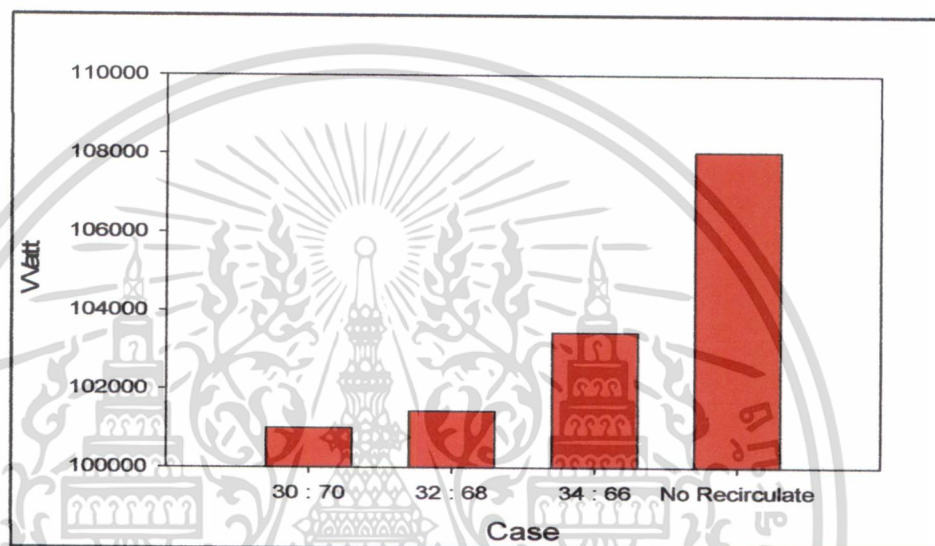
รูปที่ 6.97 การกระจายความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหิน
กรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย

รูปที่ 6.94-6.96 แสดงการกระจายความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินแบบที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าตำแหน่งความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะอยู่ที่บริเวณตรงกลางคัพฟิวเซอร์ (ที่ระยะ $X=0.4-0.65$ เมตร) เนื่องจากที่บริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีการกำเนิดและมีการไหลหมุนวนของการไหล จึงเกิดการพัดพาซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาสะสมที่บริเวณดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.97 แสดงการกระจายความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวเผาถ่านหินแบบไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย พบว่าความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะสูงบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ โดยมีตำแหน่งที่มีอัตราการเกิดสูง อยู่ที่ระยะ $X=0.95$ เมตร และความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ส่วนมากจะกระจายตัวอยู่ในห้องเผาไหม้ เนื่องจากมีอัตราการสูญเสียที่ต่ำ

6.3.1.20 Power output ที่ได้จากการจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาถ่านหิน



รูปที่ 6.98 Power output ที่ได้ในแต่ละกรณี

รูปที่ 6.98 เป็นกราฟเปรียบเทียบให้เห็นถึง Power output ที่ได้ในแต่ละกรณี โดยค่า Power output นี้เป็นค่าที่ลบค่า error ออกแล้ว โดยในกรณีที่ไม่มี การหมุนเวียนก๊าซไอเสียให้ Power output สูงที่สุด เนื่องจากไม่มีก๊าซไอเสียเข้ามาขัดขวางการเผาไหม้ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงสุด ส่งผลให้อัตราปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้นั้นมีอัตราที่มากขึ้น เป็นผลให้การปลดปล่อยพลังงานสูงขึ้นตามไปด้วย

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาสาระสำคัญของงานวิจัยที่ได้ดำเนินการ การอภิปรายสรุปและข้อเสนอแนะ สำหรับการศึกษาค้นคว้าต่อไปในอนาคตจะกล่าวในส่วนต่อจากนี้ไป

7.1 สรุปผลการวิจัย

7.1.1 สรุปผลการจำลองการไหลเทียบผลในเจ็ทปั๊ม

การคำนวณทางคณิตศาสตร์แสดงผลให้เห็น ดังต่อไปนี้

1. ประสิทธิภาพสูงที่สุดอยู่ที่ประมาณ 43% ที่ ($d/D = 0.5$, $l/D = 0.5$ และ $M = 0.8$)
2. การกระจายของค่า C_p เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน d/D ที่เพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่ออัตราส่วน l/D เพิ่มขึ้น โดยรูปแบบการกระจายตัวของค่า C_p มีแนวโน้มที่ไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยที่มีมาในอดีต แต่การเพิ่มขึ้นของกราฟ C_p นั้นจะไม่รวดเร็วเท่ากับผลการจำลองก่อนหน้านี้[17] เนื่องจากความหนืดที่แตกต่างกัน ทำให้ความสามารถในการเข้าสู่ uniform flow แตกต่างกันไป
3. จากการคำนวณที่ l/D ที่มีค่าต่ำ ประสิทธิภาพมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อ l/D ที่มีค่าสูงขึ้น ประสิทธิภาพมีแนวโน้มลดต่ำลงซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณก่อนหน้านี้[17] แต่ในช่วงอัตราส่วนการไหล M ตั้งแต่ 0.8 ขึ้นไปนั้นประสิทธิภาพนั้นตกลงแต่ไม่เทียบเท่ากับผลการคำนวณก่อนหน้านี้ [17]
4. เมื่อทำการศึกษากการไหลแบบ non-isothermal อุณหภูมิที่บริเวณคิฟฟิวเซอร์อยู่ที่ประมาณ 600 - 700 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอเพียงให้ถ่านหินปล่อยไอระเหยออกมาพร้อมแก่การเผาไหม้

7.1.2 สรุปผลการจำลองเทียบผลการเผาไหม้ถ่านหินใน Pulverized coal burner

จากการจำลองเทียบผลทั้งสองภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่คล้ายคลึงกันพบว่ามียังมีความแตกต่างของผลการจำลองในหลายๆ ส่วน โดยสาเหตุหลักที่สันนิษฐานไว้ คือ ความแตกต่างของโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณเพราะว่าลำดับขั้นตอนและวิธีการคำนวณในแต่ละโปรแกรมที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นส่วนที่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ไม่สามารถทราบได้ และข้อแตกต่างอีกส่วนหนึ่งก็คือ ขนาด, รูปแบบและจำนวนของกริดที่แตกต่างกัน

ลักษณะการไหลของการจำลองทั้งสองคำนวณภายใต้แบบจำลอง k- ϵ Model จากการจำลองทั้งสองได้ใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ Model เหมือนกันแต่อาจจะแตกต่างกันในส่วนการกำหนดเงื่อนไข

ย่อย โดยการจำลองภายหลังนั้น ได้กำหนดภายใต้เงื่อนไขที่ใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริง ประกอบกับความสามารถของโปรแกรมที่ให้ผลใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่าโปรแกรมก่อนหน้า (FAFNIR) ทำให้ผลการจำลองที่ได้มีความแตกต่างกัน โดยการจำลองครั้งล่าสุดมีความใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากกว่าการจำลองครั้งก่อน

จากผลการจำลองลักษณะการไหลที่แตกต่างกันเป็นผลให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีความแตกต่างกันไปด้วย สาเหตุอีกประการที่อาจจะมีผลต่อการเผาไหม้ คือ การกำหนดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่านหิน เนื่องจากการกระจายของอนุภาคถ่านหินที่กำหนดไว้ในการจำลองครั้งก่อน โปรแกรม FLUENT ไม่สามารถกำหนดให้เหมือนกันได้ สืบเนื่องจากผลกระทบของลักษณะการไหลและลำดับการเกิดของปฏิกิริยาทางเคมีที่แตกต่างกัน ร่วมกับการกำหนดเลือกปฏิกิริยาเคมีเป็นผลให้ตำแหน่งและปริมาณของความเข้มข้นของสสารที่ได้แตกต่างกัน

7.1.3 สรุปผลการจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาถ่านหิน

จากการจำลองผลทั้ง 4 กรณี (หัวเผาถ่านหินที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย 3 กรณี และหัวเผาถ่านหินที่ไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย 1 กรณี) แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของหัวเผาโดยสรุปดังต่อไปนี้

1. อัตราส่วนอัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ถ่านที่ 100 kW จะอยู่ในช่วง 30:70 ถึง 34:66 ถ้าอัตราการไหลปฐมภูมิตดลงทำให้ตำแหน่งเปลวไฟเลื่อนไปอยู่ใน Throat และถ้าอัตราการไหลทุติยภูมิตดลงจะส่งผลให้ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสลดลง ทำให้ความดันภายในดีฟิวเซอร์เพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้ตำแหน่งเปลวไฟเลื่อนไปทางห้องเผาไหม้ ถ้าหากอัตราส่วนอัตราการไหลมากกว่าหรือน้อยกว่าช่วง 30:70 – 34:66 จะทำให้การเผาไหม้ไม่มีเสถียรภาพ
2. ลักษณะการเผาไหม้ถ่านหินของหัวเผาถ่านหินแบบที่มีและไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเผาไหม้ของหัวเผาถ่านหินชนิดไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย มีการเผาไหม้ที่รุนแรงกว่า อันเนื่องมาจากไม่มีก๊าซไอเสียมาชะลอการเผาไหม้เป็นผลให้ power output ที่ได้มีค่ามากที่สุด
3. อุณหภูมิสูงสุดของกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย ได้แก่ กรณี 34:66 เนื่องจากกรณีนี้มีความเร็วของของไหลที่เหมาะสมเป็นผลให้การเผาไหม้มีเสถียรภาพสูงสุด ส่งผลให้อุณหภูมิสูงตามไปด้วย
4. ปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนออกไซด์ที่บริเวณทางออกในกรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียจะน้อยกว่ากรณีไม่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย เนื่องจาก 3 องค์ประกอบ ได้แก่ 1) การหมุนเวียน

ก๊าซไอเสียในห้องเผาไหม้นั้นเป็นการเจือจางความเข้มข้นของออกซิเจน ทำให้อัตราการเผาไหม้ของ ถ่านหินลดลง เป็นผลให้อุณหภูมิที่ได้ต่ำกว่ากรณีที่มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย 2) ความเข้มข้นของ ออกซิเจนที่ลดลงนั้นช่วยลดโอกาสที่เชื้อเพลิงใน โตรเจนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วได้เป็น Fuel NO ลดลง และ 3) การหมุนเวียนก๊าซไอเสียเป็นการช่วยให้ใน โตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นสามารถทำ ปฏิกิริยาและเปลี่ยน ไปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ได้ ซึ่งองค์ประกอบทั้ง 3 ข้อนั้น ช่วยลดการเกิด ในโตรเจนออกไซด์ลงได้

7.2 วิจารณ์ผลการจำลองและข้อเสนอแนะ

7.2.1 วิจารณ์ผลการจำลองและข้อเสนอแนะการจำลองการไหลเทียบผลในเจ็ทเบิร์น

ในผลการจำลองส่วนนี้เมื่อเทียบกับการจำลองก่อนหน้า [17] พบว่าผลการจำลองมีความ แตกต่างในเชิงปริมาณค่าต่างๆ แต่ในเชิงคุณภาพ ผลการจำลองสามารถให้แนวโน้มไปในทิศทาง เดียวกัน โดยผลการจำลองในเชิงปริมาณสามารถที่จะปรับเปลี่ยนค่าได้โดยเปลี่ยนค่าความหนืดของ ของไหล ซึ่งจะทำให้ค่าที่ได้นั้นมีความใกล้เคียงกับผลการจำลองก่อนหน้า [17] มากขึ้น โดยในส่วน เทคนิคนี้สามารถนำไปปรับใช้กับการจำลองการเผาไหม้และการทำงานของหัวเผ่าถ่านหินต่อไปได้

7.2.2 วิจารณ์ผลการจำลองเทียบผลและข้อเสนอแนะการจำลองเทียบผลการเผาไหม้ถ่านหินใน Pulverized coal burner

จากผลการจำลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการจำลองผลที่ใกล้เคียงความเป็น จริงนั้นแตกต่างกัน อันเนื่องมาจากความทันสมัยของ โปรแกรมที่ไม่เท่ากัน โดยความเป็นจริงแล้ว โปรแกรมที่มีความทันสมัยมากกว่าย่อมที่จะให้ผลที่ได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่า จากการจำลองเทียบ ผลที่ผ่านมา แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะเลือกใช้โปรแกรม FLUENT ในการจำลองการเผาไหม้ ของถ่านหินและนำเงื่อนไขขอบเขตที่หาได้จากการจำลองไปใช้ในการจำลองหัวเผ่าถ่านหินต่อไป

7.2.3 วิจารณ์ผลการจำลองและข้อเสนอแนะการจำลองการเผาไหม้ของหัวเผ่าถ่านหิน

จากผลการจำลองทั้งหมด พบว่าอุณหภูมิได้มีค่าสูงมากเป็นผลอันเนื่องมาจากการกำหนด เงื่อนไขขอบเขตของผนังเป็นผนังแบบอะเดียบาติก เนื่องจากการกำหนดค่าทั้งหมดให้ใกล้เคียงกับการ ทดลองนั้นทำได้ยาก จึงกำหนดเงื่อนไขขอบเขตทั้งหมดนั้นให้มีค่าให้เป็นอุดมคติ ซึ่งจะทำอุณหภูมิของ เปลวไฟนั้นสูงมากกว่าที่คาดการณ์ไว้ แต่อุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ภายใต้ตาราง PDF โดยข้อมูลผลการ จำลองเหล่านี้ สามารถนำไปใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงกับผลการทดลอง ซึ่งการทดลองจริงอุณหภูมิเปลวไฟที่

ได้นั้นย่อมต่ำกว่าที่จำลองไว้ จากงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้มีข้อเสนอแนะให้กับผู้ที่นำไปเป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาหัวเผาถ่านหินในโตรเจนออกไซด์ต่ำดังต่อไปนี้

1. ในการจำลองผลสามารถจำลองค่าอุณหภูมิให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น โดยสามารถกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของผนังให้มีการสูญเสียความร้อน ทำให้เปลวไฟมีอุณหภูมิต่ำลง
2. สามารถปรับเปลี่ยน Combustion Model จาก PDF Table เปลี่ยนเป็น Eddy Break Up ซึ่งอาจจะให้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่า
3. สามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งของหัวฉีด (อัตราส่วน V/D) ให้เหมาะสมกับเชื้อเพลิงและ Power Output ในแต่ละกรณี โดยแต่ละกรณีจะมีค่าอัตราส่วน V/D ที่เหมาะสมเพียงค่าเดียว
4. สามารถนำแบบจำลองที่ใช้คำนวณนำปรับเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่ใช้และอัตราส่วนอัตราการใช้ ซึ่งจะช่วยให้หัวเผาสามารถนำไปใช้กับสถานะที่หลากหลายมากขึ้น
5. สามารถปรับเปลี่ยนมุมของ Swirl Port ในมุมต่างๆที่นอกเหนือจาก 30 องศา เพื่อศึกษา ลักษณะการไหลในรูปแบบอื่นๆ
6. ความยาว Throat สามารถปรับลดลงได้ตามความต้องการ เนื่องจากความยาว Throat ที่มากเกินไป ไม่ได้ช่วยเพิ่มการผสมกันระหว่างของไหลทั้งสอง (กรณีที่ไม่มี Swirl Port) (ในกรณีที่มี Swirl Port นั้น Swirl Port จะทำหน้าที่สร้างความปั่นป่วนและเพิ่มการผสมกันระหว่างของไหลทั้งสอง)
7. ในการกำหนด parameter ของเงื่อนไขของการกำเนิดในโตรเจนออกไซด์ให้ถูกต้องนั้น มีความเป็นไปได้ที่ยากมาก ในการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขของการกำเนิดในโตรเจนออกไซด์ในได้ผลการจำลองที่ถูกต้องนั้นยังสามารถนำไปเป็นประเด็นในการศึกษาต่อไป เช่น เลือกแบบจำลองในการเผาไหม้เป็นแบบ eddy breakup, ขนาดอนุภาค และ การศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ขณะที่มีการ turn up หรือ turn down

บรรณานุกรม

- [1] เกริกชัย สุกาญจน์จทิ. **ไอน้ำและพลังงานจากถ่านหิน**. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2529. หน้า 2-14
- [2] Charoensuk J. **“The Application of Mathematical Model for Scaling Pulverized Coal Combustors.”** Ph.D Thesis. University of London and the Diploma of Membership of the Imperial College. 1996.
- [3] Kobayashi H., Howard J.B. and Sarofim A.F. **“Coal Devolatilization at High Temperature.”** The Sixteenth International Symposium on Combustion., The Combustion Institute., 1976
- [4] Howard H.C. **Pyrolytic Reaction of Coal. Chemistry of Coal Utilization. Supplementary Volume.** John Wiley & Sons. 1963. Pp. 340-394.
- [5] 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.
- [6] Lockwood F.C., Naguib A.S. **“The Prediction of the Fluctuations in the Properties of Free Round – Jet, Turbulent Diffusion Flames.”** Combustion and Flames., Vol.24, 1975.
- [7] Splading D.B. **“Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames.”** The Thirteenth International Symposium on Combustion., The Combustion Institute., 1971.
- [8] 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.
- [9] Smoot L.D., Pratt D.T. **Pulverized Coal Combustion and Gasification: Theory and Application for Continuous Flow Process.** New York : Plenum Publishing Corp. 1979.
- [10] Field M.A., Gill D.W., Morgan B.B. and Hawksley P.G.W. **Combustion of Pulverized Coal.** BCURA, Leatherhead, Surrey, England. Publisher : Cheney & Sons Ltd., Banbury, England .1967.
- [11] Pershing D.W., Wendt J.O.L. **“Pulverized Coal Combustion : The Influence of Flame Temperature and Coal Composition on Thermal and Fuel NOx.”** The sixteenth International Symposium on Combustion., The Combustion Institute., 1976.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] J.M. Heikkinen, B.C.H. Venneker, G. di Nola, W. de Jong, H. Spliethoff. **CFD Simulation and Experimental Validation of CO-Combustion of Chicken litter and MBM with Pulverized Coal in A Flow Reactor.** *Fuel Processing Technology* 89 (2008) 874–889.
- [13] K.-D. Tiggesa, F. Klaukea, C. Berginsa, K. Busekrusa, J. Niesbacha, M. Ehmann, C. Kuhra, F. Hoffmeistera, B. Vollmera, T. Buddenberga, Song Wub, Allan Kukoskib. **Conversion of Existing Coal-Fired Power Plants to Oxyfuel Combustion : Case Study with Experimental Results and CFD Simulations.** *Energy Procedia I* (2009) 549-556.
- [14] Lasse A. Rosendahl, Chunggen Yin, Søren K. Kær, Klaus Friborg, Peter Overgaard. **Physical Characterization of Biomass Fuels Prepared for Suspension Firing in Utility Boilers for CFD Modelling.** *Biomass and Bioenergy* 31 (2007) 318–325.
- [15] C.N. Eastwick, S.J. Pickering, A. Aroussi. **Comparisons of Two Commercial Computational Fluid DynamicsC in Modelling Pulverised Coal Combustion for A 2.5 MW Burner.** *Applied Mathematical Modelling* 23 (1999) 437±446.
- [16] N. Schaffel, M. Mancini, A. Szlek, R. Webber. **Mathematical Modeling of MILD Combustion of Pulverized Coal.** *Combustion and Flame* 156 (2009) 1771–1784.
- [17] Prabkeao C, Aoki K. **Study on the Optimum Mixing Throat Length for Drive Nozzle Position of the Central jet pump.** *Journal of Visualization*, Vol 8, No. 4(2005)347-355.
- [18] Punbusatakul N. **Numerical Simulation of Sulfur Dioxide Adsorption in A Vortex Flow Reactor.** Faculty of Engineering, KMITL (2004) ISBN 974-15-1052-7.
- [19] Daungviluilux P. **Mathematical Model of Sulfur Oxide Formation in Pulverized Coal Combustion.** Faculty of Engineering, KMITL (2000) ISBN 974-622-681-9.
- [20] E. H. Chui and G. D. Raithby. **Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite-Volume Method.** *Numerical Heat Transfer, Part B*, 23:269-288, 1993.
- [21] G. D. Raithby and E. H. Chui. **A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media.** *J. Heat Transfer*, 112:415-423, 1990.
- [22] M. F. Modest. **Radiative Heat Transfer. Series in Mechanical Engineering.** McGraw-Hill, 1993.

- [23] W. A. Fiveland and A. S. Jamaluddin. **Three-Dimensional Spectral Radiative Heat Transfer Solutions by the Discrete Ordinates Method**. HTD Vol. 106, Heat Transfer Phenomena in Radiation, Combustion and Fires, pp. 43-48, 1989.
- [24] S. Badzioch and P. G. W. Hawksley. **Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles**. Ind. Eng. Chem. Process Design and Development, 9:521-530, 1970.
- [25] S. R. Mathur and J. Y. Murthy. **Coupled ordinates method for multigrid acceleration of radiation calculations**. J. of Thermophysics and Heat Transfer, 13(4):467-473, 1999.
- [26] J. Y. Murthy and S. R. Mathur. **A Finite Volume Method For Radiative Heat Transfer Using Unstructured Meshes**. AIAA-98-0860, January 1998.
- [27] R. Siegel and C. M. Spuckler. **Effect of Refractive Index and Diffuse or Specular Boundaries on a Radiating Isothermal Layer**. J. Heat Transfer, 116:787-790, 1994.
- [28] H. Kobayashi, J. B. Howard, and A. F. Sarofim. **Coal Devolatilization at High Temperatures**. In 16th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute, 1976.
- [29] A. Coppalle and P. Vervisch. **The Total Emissivities of High-Temperature Flames**. Combustion and Flame, 49:101-108, 1983.
- [30] T. F. Smith, Z. F. Shen, and J. N. Friedman. **Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model**. J. Heat Transfer, 104:602-608, 1982.
- [31] M. K. Denison and B. W. Webb. **A Spectral Line-Based Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary RTE Solvers**. J. Heat Transfer, 115:1002-1012, 1993.
- [32] M. F. Modest. **The Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary Solution Methods in Radiative Transfer**. J. Heat Transfer, 113:650-656, 1991.
- [33] D. K. Edwards and R. Matavosian. **Scaling Rules for Total Absorptivity and Emissivity of Gases**. J. Heat Transfer, 106:684-689, 1984.
- [34] T. H. Fletcher and A. R. Kerstein. **Chemical percolation model for devolatilization: 3. Direct use of C NMR data to predict effects of coal type**. Energy and Fuels, 6:414, 1992.
- [35] T. H. Fletcher, A. R. Kerstein, R. J. Pugmire, and D. M. Grant. **Chemical percolation model for devolatilization: 2. Temperature and heating rate effects on product yields**. Energy and Fuels, 4:54, 1990.
- [36] Y. R. Sivathanu and G. M. Faeth. **Generalized State Relationships for Scalar Properties in Non-Premixed Hydrocarbon/Air Flames**. Combustion and Flame, 82:211-230, 1990.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [37] W. P. Jones and J. H. Whitelaw. **Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review.** *Combustion and Flame*, 48:1-26, 1982.
- [38] J. Blauvens, B. Smets, and J. Peters. In 16th Symp. (Int'l.) on Combustion. **The Combustion Institute**, 1977.
- [39] W. L. Flower, R. K. Hanson, and C. H. Kruger. In 15th Symp. (Int'l.) on Combustion, page 823. **The Combustion Institute**, 1975.
- [40] D. M. Grant, R. J. Pugmire, T. H. Fletcher, and A. R. Kerstein. **Chemical percolation model of coal devolatilization using percolation lattice statistics.** *Energy and Fuels*, 3:175, 1989.
- [41] D. L. Baulch, D. D. Drysdall, D. G. Horne, and A. C. Lloyd. **Evaluated Kinetic Data for High Temperature Reactions**, volume 1,2,3. Butterworth, 1973.
- [42] R. K. Hanson and S. Salimian. **Survey of Rate Constants in H/N/O Systems.** In W. C. Gardiner, editor, *Combustion Chemistry*, page 361, 1984.
- [43] M. Missaghi, M. Pourkashanian, A. Williams, and L. Yap. **In Proceedings of American Flame Days Conference, USA, 1990.**
- [44] M. C. Drake, R. W. Pitz, M. Lapp, C. P. Fenimore, R. P. Lucht, D. W. Sweeney, and N. M. Laurendeau. In 20th Symp. (Int'l.) on Combustion, page 327. **The Combustion Institute**, 1984.
- [45] N. Peters and S. Donnerhack. In 18th Symp. (Int'l.) on Combustion, page 33. **The Combustion Institute**, 1981.
- [46] R. W. Bilger and R. E. Beck. In 15th Symp. (Int'l.) on Combustion, page 541. **The Combustion Institute**, 1975.
- [47] J. A. Miller, M. C. Branch, W. J. McLean, D. W. Chandler, M. D. Smooke, and R. J. Kee. In 20th Symp. (Int'l.) on Combustion, page 673. **The Combustion Institute**, 1985.
- [48] M. C. Drake, S. M. Correa, R. W. Pitz, W. Shyy, and C. P. Fenimore. **Superequilibrium and Thermal Nitric Oxide Formation in Turbulent Diffusion Flames.** *Combustion and Flame*, 69:347-365, 1987.
- [49] A. A. Westenberg. **Comb. Sci. Tech.**, 4:59, 1971.
- [50] J. Warnatz. **NOx Formation in High Temperature Processes.** University of Stuttgart, Germany.

- [51] D. L. Baulch et al. **Evaluated Kinetic Data for Combustion Modelling**. J. Physical and Chemical Reference Data, 21(3), 1992.
- [52] C. Westbrook and F. Dryer. **Chemical Kinetic Modelling of Hydrocarbon Combustion**. Prog. Energy Comb. Sci., page 1, 1984.
- [53] C. P. Fenimore. **Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames**. In 13th Symp. (Int'l.) on Combustion, page 373. The Combustion Institute, 1971.
- [54] F. J. Barnes, J. H. Bromly, T. J. Edwards, and R. Madngezewsky. **NO_x Emissions from Radiant Gas Burners**.
- [55] K. K. Pillai. **The Influence of Coal Type on Devolatilization and Combustion in Fluidized Beds**. J. Inst. Energy, page 142, 1981. Journal of the Institute of Energy, 155:184-188, 1988.
- [56] G. G. De Soete. **Overall Reaction Rates of NO and N Formation from Fuel Nitrogen**. In 15th Symp. (Int'l.) on Combustion, pages 1093-1102. The Combustion Institute, 1975.
- [57] F. Backmier, K. H. Eberius, and T. Just. **Comb. Sci. Tech.**, 7:77, 1973.
- [58] T. Just and S. Kelm. **Die Industry**, 38:76, 1986.
- [59] J. A. Miller and G. A. Fisk. **Chemical and Engineering News**, 31, 1987.
- [60] T. J. Houser, M. Hull, R. Alway, and T. Biftu. **Int. Journal of Chem. Kinet.**, 12:579, 1980.
- [61] L. D. Smoot and P. J. Smith. **NO_x Pollutant Formation in a Turbulent Coal System**. In Coal Combustion and Gasification, page 373, Plenum, Plenum, NY, 1985.
- [62] F. C. Lockwood and C. A. Romo-Millanes. **Mathematical Modelling of Fuel - NO Emissions From PF Burners**. J. Int. Energy, 65:144-152, September 1992.
- [63] J. M. Levy, L. K. Chen, A. F. Sarofim, and J. M. Beer. **NO/Char Reactions at Pulverized Coal Flame Conditions**. In 18th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute, 1981.
- [64] S. Brunauer. **The Absorption of Gases and Vapors**. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1943.

- [65] P. F. Nelson, A. N. Buckley, and M. D. Kelly. **Functional Forms of Nitrogen in Coals and the Release of Coal Nitrogen as NO_x Precursors (HCN and NH)**. In 24th Symposium (Int'l) on Combustion, The Combustion Institute, page 1259, 1992.
- [66] I. Naruse, Y. Yamamoto, Y. Itoh, and K. Ohtake. **Fundamental Study on NO Formation/Decomposition Characteristics by Means of Low-Temperature Pulverized Coal Combustion**. In 26th Symposium (Int'l) on Combustion, The Combustion Institute, pages 3213-3221, 1996.
- [67] F. Winter, C. Wartha, G. Löffler, and H. Hofbauer. **The NO and NO Formation Mechanism During Devolatilization and Char Combustion Under Fluidized Bed Conditions**. In 26th Symposium (Int'l) on Combustion, The Combustion Institute, pages 3325-3334, 1996.
- [68] H. Liu and B. M. Gibbs. **Modeling of NO and NO Emissions from Biomass-Fired Circulating Fluidized Bed Combustors**. *Fuel*, 81:271-280, 2002.
- [69] P. C. Melte and D. T. Pratt. **Measurement of Atomic Oxygen and Nitrogen Oxides in Jet Stirred Combustion**. In 15th Symposium (Int'l) on Combustion, The Combustion Institute, pages 1061-1070, 1974.
- [70] R. S. Barlow, G. J. Fiechtner, C. D. Carter, and J. Y. Chen. **Experiments on the Scalar Structure of Turbulent CO/H**
- [71] S. M. Correa. **A Review of NO_x Formation Under Gas-Turbine Combustion Conditions**. *Combustion Science and Technology*, 87:329-362, 1992.
- [72] P. Glarborg, J. E. Johnsson, and K. Dam-Johansen. **Kinetics of Homogeneous Nitrous Oxide Decomposition**. *Combustion and Flame*, 99:523-532, 1994.
- [73] R. C. Steele, P. C. Malte, D. G. Nichol, and J. C. Kramlich. **NO_x and NO in Lean-Premixed Jet-Stirred Flames**. *Combustion and Flame*, 100:440-449, 1995.
- [74] D. Tabacco, C. Innarella, and C. Bruno. **Theoretical and Numerical Investigation on Flameless Combustion**. *Combustion Science and Technology*, 2002.

- [75] C. T. Bowman. **Chemistry of Gaseous Pollutant Formation and Destruction**. In W. Bartok and A. F. Sarofim, editors, *Fossil Fuel Combustion*. J. Wiley and Sons, Canada, 1991.
- [76] N. Kandamby, G. Lazopoulos, F. C. Lockwood, A. Perera, and L. Vigevano. **Mathematical Modeling of NO_x Emission Reduction by the Use of Reburn Technology in Utility Boilers**. In ASME Int. Joint Power Generation Conference and Exhibition, Houston, Texas, 1996.
- [77] K. M. Leung and R. P. Lindsted. **Detailed Kinetic Modeling of C1-C3 Alkane Diffusion Flames**. *Combustion and Flame*, 102:129-160, 1995.
- [78] R. K. Lyon. **The NH-NO-O Reaction**. *Int. Journal of Chem. Kinetics*, 8:315-318, 1976.
- [79] J. A. Miller and C. T. Bowman. **Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion**. *Prog. in Energy and Comb. Sci.*, 15:287-338, 1989.
- [80] C. P. Fenimore. **Destruction of NO by NH in Lean Burnt Gas**. *Combustion and Flame*, 37:245, 1980.
- [81] M. Ostberg and K. Dam-Johansen. **Empirical Modeling of the Selective Non-Catalytic Reduction of NO: Comparison with Large-Scale Experiments and Detailed Kinetic Modeling**. *Chem. Engineering Science*, 49(12):1897-1904, 1994.
- [82] J. Brouwer, M. P. Heap, D. W. Pershing, and P. J. Smith. **A Model for Prediction of Selective Non-Catalytic Reduction of Nitrogen Oxides by Ammonia, Urea, and Cyanuric Acid with Mixing Limitations in the Presence of CO**. In 26th Symposium (Int'l) on Combustion, The Combustion Institute, 1996.
- [83] R. Rota, D. Antos, E. F. Zanoelo, and M. Morbidelli. **Experimental and Modeling Analysis of the NO_xOUT Process**. *Chemical Engineering Science*, 57:27-38, 2002.
- [84] F. A. Williams. **Turbulent Mixing in Nonreactive and Reactive Flows**. Plenum Press, New York, 1975.

- [85] J. Janicka and W. Kollmann. **A Two-Variable Formulation for the Treatment of Chemical Reactions in Turbulent H-Air Diffusion Flames.** In 17th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute, 1978.
- [86] J. Janicka and W. Kollmann. **A Numerical Study of Oscillating Flow Around a Circular Cylinder.** Combustion and Flame, 44:319-336, 1982.
- [87] G. Hand, M. Missaghi, M. Pourkashanian, and A. Williams. **Experimental Studies and Computer Modelling of Nitrogen Oxides in a Cylindrical Furnace.** In Proceedings of the Ninth Members Conference, volume 2. IFRF Doc No K21/g/30, 1989.
- [88] M. Missaghi. **Mathematical Modelling of Chemical Sources in Turbulent Combustion.** PhD thesis, The University of Leeds, England, 1987.
- [89] User manual for 1993 version pulverized coal gasification and combustion 3-dimensional (pcgc-3). Advanced Combustion Engineering Research Center, **Brigham Young University**, 1993.
- [90] L. J. Molero de Blas. **Pollutant Formation and Interaction in the Combustion of Heavy Liquid Fuels.** PhD thesis, University of London, London, England, 1998.
- [91] B. H. Chowdhury. **Emission Control Alternatives for Electric Utility Power Plants.** Energy Sources, 18(4):393-406, October 1996.
- [92] J. Norman, M. Pourkashanian, and A. Williams. **Modelling the Formation and Emission of Environmentally Unfriendly Coal Species in Some Gasification Processes.** Fuel, 76(13):1201-1216, October 1997.
- [93] J. C. Kramlich. **The Fate and Behavior of Fuel-Sulfur in Combustion Systems.** PhD thesis, Washington State University, Washington, USA, 1980.
- [94] S. C. Hunter. **Formation of SO₃ in gas turbines.** Transactions of the ASME, 104:44-51, 1982.
- [95] M. S. Solum, R. J. Pugmire, and D. M. Grant. **Energy and Fuels**, 3:187, 1989.

- [96] K. S. Vorres. User's handbook for the Argonne premium coal sample bank. **Argonne National Laboratory**, supported by DOE contract W-31-109-ENG-38, September 1989.
Also K. S. Vorres, ACS Div. Fuel Chem. preprint, 32:4, 1987.
- [97] T. H. Fletcher and D. R. Hardesty. **Compilation of Sandia coal devolatilization data: Milestone report.** Sandia Report SAND92-8209, 1992.
- [98] B. J. Daly and F. H. Harlow. **Transport Equations in Turbulence.** Phys. Fluids, 13:2634-2649, 1970.
- [99] Q. Zhou and M. A. Leschziner. Technical report, 8th Turbulent Shear Flows Symp., **Munich**, 1991.
- [100] M. A. Field. **Rate of Combustion Of Size-Graded Fractions of Char from a Low Rank Coal between 1200 K-2000 K.** Combustion and Flame, 13:237-252, 1969.
- [101] I. W. Smith. The Combustion Rates of Coal Chars: A Review. In 19th Symp. (Int'l.) on Combustion, pages 1045-1065. **The Combustion Institute**, 1982.
- [102] N. M. Laurendeau. **Heterogeneous Kinetics of Coal Char Gasification and Combustion.** Prog. Energy Comb. Sci., 4:221-270, 1978.
- [103] I. W. Smith. **A variable order Runge-Kutta method for initial value problems with rapidly varying right-hand sides.** ACM Transactions on Mathematical Software, 16:201-222, 1990.
- [104] S. Charpenay, M. A. Serio, and P. R. Solomon. In 24th Symp. (Int'l.) on Combustion, pages 1189-1197. **The Combustion Institute**, 1992.
- [105] J. R. Cash and A. H. Karp. **A variable order Runge-Kutta method for initial value problems with rapidly varying right-hand sides.** ACM Transactions on Mathematical Software, 16:201-222, 1990.
- [106] S. A. Morsi and A. J. Alexander. **An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems.** J. Fluid Mech., 55(2):193-208, September 26 1972.
- [107] I. W. Smith. **Combustion and Flame**, 17:421, 1971.

- [108] H. Ounis, G. Ahmadi, and J. B. McLaughlin. **Brownian Diffusion of Submicrometer Particles in the Viscous Sublayer.** *Journal of Colloid and Interface Science*, 143(1):266-277, 1991.
- [109] R. K. Boyd and J. H. Kent. **Three-dimensional furnace computer modeling.** In 21st Symp. (Int'l.) on Combustion, pages 265-274. The Combustion Institute, 1986.
- [110] A. B. Liu, D. Mather, and R. D. Reitz. **Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays.** SAE Technical Paper 930072, SAE, 1993.
- [111] W. E. Ranz and W. R. Marshall, Jr. Evaporation from Drops, Part I. *Chem. Eng. Prog.*, 48(3):141-146, March 1952.
- [112] W. E. Ranz and W. R. Marshall, Jr. Evaporation from Drops, Part II. *Chem. Eng. Prog.*, 48(4):173-180, April 1952.
- [113] K. K. Y. Kuo. **Principles of Combustion.** John Wiley and Sons, New York, 1986.
- [114] M. M. Baum and P. J. Street. **Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles.** *Combust. Sci. Tech.*, 3(5):231-243, 1971.
- [115] B. E. Launder and D. B. Spalding. **Lectures in Mathematical Models of Turbulence.** Academic Press, London, England, 1972.
- [116] Changdong Sheng, Behdad Moghtaderi, Rajender Gupta, Terry F. Wall. **A Computational Fluid Dynamics Based Study of The Combustion Characteristics of Coal Blends in Pulverised Coal-Fired Furnace.** *Fuel* 83 (2004) 1543-1552
- [117] Noe Piedad-Sanchez, Luis Martinez, Alian Izart, Isabel Suarez-Ruiz, Marcel Elie, Cedric Mentrer, Frederic Lannuzel. **Artificial Maturation of A High Volatile Bituminous Coal From Asturias (NW Spain) in A Confined Pyrolysis System Part II. Gas Production During Pyrolysis and Numerical Simulation.** *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 74(2005)77-87
- [118] R. P. van der Lans, P. Glarborg and K. Dam-Johansen. **Influence of Process Parameters on Nitrogen Oxide Formation in Pulverized Coal Burner.** *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 23. pp. 349-377 (1997)
- [119] Shan Xue, Shi'en Hui, Taisheng Liu, Qulan Zhou, Tongmo Xu and Hongli Hu.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Experimental investigation on NO_x emission and carbon burnout from a radially biased pulverized coal whirl burner.** *Fuel Processing Technology* 90 (2009) 1142–1147
- [120] Hannes Stadler, Dragisa Ristic, Malte Forster, Anja Schuster, Reinhold Kneer and Gunter Scheffknecht. **NO_x-emissions from flameless coal combustion in air, Ar/O₂ and CO₂/O₂.** *Proceedings of the Combustion Institute* 32 (2009) 3131–3138
- [121] Yewen Tana, Eric Croisetb, Mark A. Douglasa and Kelly V. Thambimuthu. **Combustion characteristics of coal in a mixture of oxygen and recycled flue gas.** *Fuel* 85 (2006) 507–512
- [122] H. Nikzat, H. Pak, T. Fuse, Y. Hu, K. Ogyu, N. Kobayashi and M. Hasatani. **Characteristics of Pulverized Coal Burner Using a High-Oxygen Partial Pressure.** *Chemical Engineering Research and Design* (2004), 82(A1): 99–104



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

ตารางแจกแจงการกระจายขนาดและอัตราการไหลของอนุภาคด้านหิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

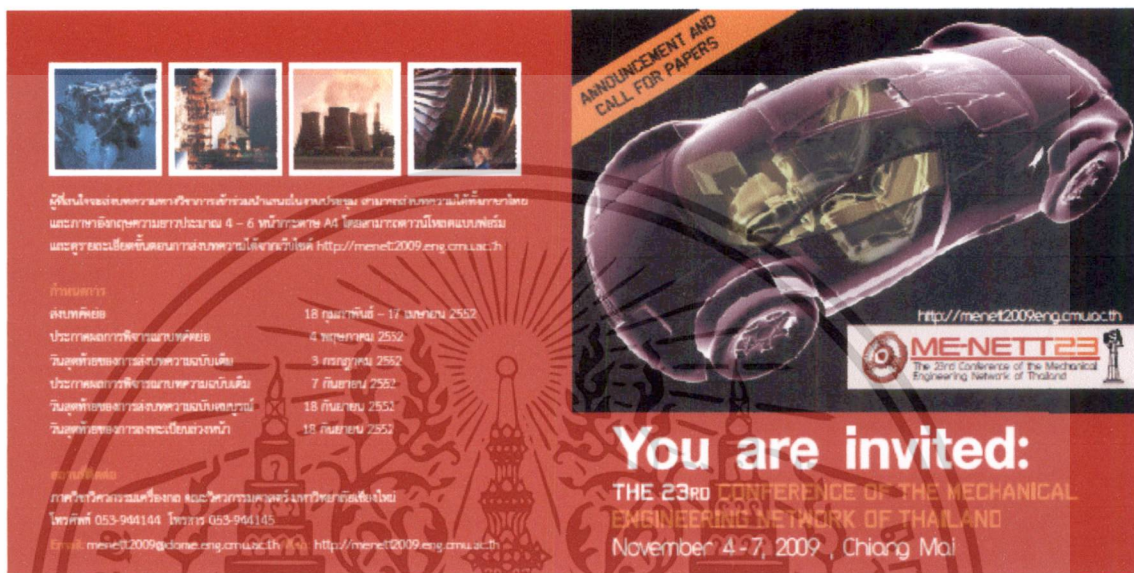
ตารางที่ ก-1 แจกแจงการกระจายขนาดและอัตราการไหลของอนุภาคถ่านหิน

No.	Diameter (μm)	Temperature (k)	Total Flow Rate (kg/s)
Injection-0	0.50	300	0.0000004268
Injection-1	2.50	300	0.0000000000
Injection-2	4.50	300	0.0000059747
Injection-3	6.50	300	0.0001105326
Injection-4	8.50	300	0.0005232161
Injection-5	11.00	300	0.0001779618
Injection-6	14.00	300	0.0001997269
Injection-7	17.00	300	0.0002176511
Injection-8	20.00	300	0.0002317344
Injection-9	23.00	300	0.0002398429
Injection-10	26.00	300	0.0001745476
Injection-11	29.00	300	0.0001741209
Injection-12	32.00	300	0.0001724138
Injection-13	35.00	300	0.0001685729
Injection-14	38.00	300	0.0001638785
Injection-15	43.00	300	0.0001971663
Injection-16	50.00	300	0.0001852168
Injection-17	57.00	300	0.0001715603
Injection-18	64.00	300	0.0001574770
Injection-19	71.00	300	0.0001421133
Injection-20	77.00	300	0.0007762888
Injection-21	82.00	300	0.0000742574
Injection-22	87.00	300	0.0000029874

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ANNOUNCEMENT AND CALL FOR PAPERS

<http://menet2009.eng.cmu.ac.th>

ME-NETT 23
The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand

You are invited:
THE 23RD CONFERENCE OF THE MECHANICAL ENGINEERING NETWORK OF THAILAND
November 4-7, 2009, Chiang Mai

กำหนดการ

ลงทะเบียน	18 กุมภาพันธ์ - 17 เมษายน 2552
ประกาศผลการพิจารณาขอรับทุน	4 พฤษภาคม 2552
วันสุดท้ายของการส่งบทความต้นฉบับ	3 กรกฎาคม 2552
ประกาศผลการพิจารณาขอรับทุนฉบับเต็ม	7 กันยายน 2552
วันสุดท้ายของการส่งบทความฉบับสมบูรณ์	18 กันยายน 2552
วันสุดท้ายของการลงทะเบียนล่วงหน้า	15 กันยายน 2552

สถานที่จัดงาน
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
โทรศัพท์ 053-944144 โทรสาร 053-944145
E-mail: menet2009@one.cmu.ac.th <http://menet2009.eng.cmu.ac.th>



ME-NETT 23
The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand

การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23
4 - 7 พฤศจิกายน 2552, เชียงใหม่

จัดโดย
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ร่วมกับสมาคมวิศวกรรมไทย

หัวข้อบทความวิจัย

A&ME	Aerospace and Marine Engineering
AMM	Applied Mechanics, Material and Manufacturing
CS	Computation and Simulation Techniques
DR	Dynamic Systems, Robotics and Control
ETM	Energy Technology and Management
TSF	Thermal Systems and Fluid Mechanics
AEC	Alternative Energy and Combustion
BME	Biomechanics

ความสนใจและรายละเอียดการประชุม
งานประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยจัดขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเวทีให้คณาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย และนักวิชาการในสาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยและหน่วยงานต่าง ๆ ส่งบทความและขอทุนวิจัยเพื่อสนับสนุนผลงานทางวิชาการ และนำเสนอพร้อมวีดิทัศน์ประกอบ และจัดอันดับต่าง ๆ และเป็นภาคเสริมให้มีการวิจัยเชิงข้ามสาขาวิชาการที่เข้มแข็ง ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีที่มีคุณภาพ สามารถนำไปใช้จริงได้จริง และสามารถแก้ปัญหาที่มีอยู่ในปัจจุบันอย่างทันท่วงทีและยั่งยืน พร้อมทั้งนำไปสู่การเสริมพลังกับปัญหาที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เป้าหมายของงานประชุมวิจัยและขอทุนวิจัยคือได้แก่อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



CST

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23
4 - 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

**การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการประยุกต์เพื่อ
พัฒนาเจ็ทปั๊มสำหรับการขนถ่ายอนุภาคกำหนด
Validation of mathematical model and its application for the development of jet
pump for transportation of pulverized coal fuel**

นายภัทรภณ อุตมโชคมีดี*, วท.ศ.จำลอง ปริมาณแก้ว, วท.ศ.จารุวิตร เจริญสุข

วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

* E-mail : linkinpark_pbs@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 086-329-0040

บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงถึงการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเจ็ทปั๊มต้นแบบ โดยจุดประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์(CFD) เมื่อนำมาประยุกต์กับปัญหาของเจ็ทปั๊ม โดยที่เจ็ทปั๊มเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ลำตัวรับป้อนผ่านพื้นผิวงแหวนแหวนด้านหน้า ซึ่งรูปแบบของการไหลและการกระจายของความดันภายในเจ็ทปั๊ม ถูกศึกษาภายใต้การปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ดังนี้(1) ตำแหน่งของหัวฉีด (D) (2) อัตราส่วนขนาดของหัวฉีดกับท่อช่วงผสม (d/D) (3) อัตราส่วนของอัตราไหล (M) การศึกษาทั้งหมดนั้นใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบ 3 มิติ การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของโปรแกรมทำโดยเปรียบเทียบในส่วนของประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลการทดลองของนักวิจัยก่อนหน้า [1] ซึ่งมีอัตราส่วนขนาดของหัวฉีดกับท่อช่วงผสม(d/D) อยู่ที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 ในส่วนของค่าความดันสถิตภายในสลายการไหลของเจ็ทปั๊มคำนวณได้จากภาวะตั้งสลับเป็น (1) ตำแหน่งของหัวฉีดจากทางเข้า D ตั้งแต่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 (2) อัตราส่วนของอัตราไหล M อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 1.2 การคำนวณเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงการกระจายของความดันในแต่ละช่วงของเจ็ทปั๊ม (Cp) ตลอดทั้งผืนของเจ็ทปั๊ม นอกจากนี้ยังพบได้ว่าประสิทธิภาพสูงสุดภายใต้ช่วงสภาวะเหล่านี้อยู่ที่ D = 0.5 และ D = 0.5 ซึ่งผลของประสิทธิภาพที่คำนวณได้นั้นมีความใกล้เคียงกับผลงานวิจัยในอดีต [1] นอกจากนี้ยังได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ไปใช้ในการคำนวณการไหลของอนุภาคที่ช่องทางดูดที่อุณหภูมิต่ำและอัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่ออุปกรณ์นี้ใช้เป็นส่วนหนึ่งของหัวเผาผ่านพื้นผิวง

คำหลัก Coal burner, Jet pump, Validation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Abstract

This paper describes a numerical prediction of mathematical model of jet pump prototype. The purpose of this research work is to check the reliability of mathematical calculation program (CFD) for the application on jet pump. The jet pump is a device to be used for feeding pulverized coal in a pulverized coal burner. The flow pattern and pressure distribution inside the jet pump is observed under certain operation range by adjusting four operational parameters as follows: (1) the position of nozzle (ND), (2) the ratio of the nozzle and throat (d/D), (3) the ratio of flow rates between the primary and the secondary jets (M). All calculations are performed with 3-dimensional flow domain. For validation purpose, comparison in term of efficiency is made with the simulation and the experimental results by previous researcher,[1]. The validation is carried out for the ratio of nozzle d/D of the jet pump at 0.5, 0.6 and 0.7. The static pressure in the jet pump is calculated under following configurations: (1) normalized position of the nozzle entrance (ND) at 0, 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0, (2) flow rate ratio, M is between 0.1 and 1.2. These calculation results demonstrate the distribution of pressure in each section of the jet pump which can be further post-processed to yield the static pressure coefficient (Cp) along the inner wall of the jet pump. It is also found that the maximum efficiency within this operation range is at $d/D = 0.5$ and $ND = 0.5$. The validated mathematical model is then used to perform the calculation for hot air entrainment at the suction chamber. This condition replicates flow aerodynamic and heat transfer when the device is used as part of pulverized coal combustor.

Keywords: Coal burner, Jet pump, Validation

บทนำ

1.1 เจ็ทปั๊ม

เจ็ทปั๊มเป็นแตกต่างจากปั๊มแบบหมุนทั่วไป เนื่องจากเจ็ทปั๊มประกอบไปด้วยส่วนที่ไม่เคลื่อนที่และไม่มีโครงสร้างที่เรียบง่าย เจ็ทปั๊มส่งผ่านโมเมนตัมจากการไหลปฐมภูมิ (Primary Flow) ความเร็วสูงไปยังการไหลทุติยภูมิ (Secondary Flow) ประกอบไปด้วย 4 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ หัวฉีด (Nozzle), ช่องทางดูด (Suction Chamber), ช่องแคบ (Throat), ดีฟิวเซอร์ (Diffuser) การที่ไม่มีส่วนเคลื่อนที่เคลื่อนที่ช่วยไม่ให้เกิดปัญหาการสึกกร่อน การเสียดสี และการหล่อลื่น เจ็ทปั๊มในส่วนนี้จะใช้ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่พิเศษ เพราะเจ็ทปั๊มนั้นมีปัญหาทางฮาธาออล ไนล์ยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปั๊มแบบอื่นๆ ในเจ็ทปั๊มจะมีของไหลปฐมภูมิ ความดันสูง(แก๊สหรือของเหลว) ผ่านเข้าไปในหัวฉีด เมื่อของไหลความดันสูงไหลเข้าไปในหัวฉีด ส่วนของพลังงานศักย์(ความดัน) จะเปลี่ยนไป

เป็นพลังงานจลน์ (ความเร็ว) การเปลี่ยนแปลงพลังงานนี้ทำให้เกิดการลดลงของความดันในส่วนของไหลที่ทางออกของหัวฉีด และเหนียวหน้าของไหลที่อยู่โดยรอบให้เคลื่อนที่ไปด้วยความหนืด ซึ่งของไหลทุติยภูมิความดันต่ำกว่าจะถูกดูดเข้าไปในช่องทางดูด ของไหลปฐมภูมิและทุติยภูมิเมื่อเข้าไปในช่องห้องแคบทำให้เกิดการส่งผ่านโมเมนตัมและพลังงานกันระหว่างของไหลนั้น เมื่อของไหลไหลผ่านดีฟิวเซอร์แล้วเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วของของไหลลดลง การลดลงของความเร็วของของไหลนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงในพลังงานจลน์ไปเป็นความดันซึ่งมีค่าสูงกว่าความดันของของไหลทุติยภูมิ การศึกษาครั้งนี้ เป็นการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลทางคณิตศาสตร์ 3 มิติโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ โดยแบบจำลองความปั่นป่วนนี้เหมาะสมกับการไหลที่มีความเคียวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (บริเวณที่ของไหลปฐมภูมิและทุติยภูมิ



CST

ภาพบันทึก) เพราะว่ามี การเพิ่มสมการไอเทอมของ S เข้ามาทำให้การคำนวณในส่วนนี้แม่นยำขึ้นและยังเหมาะกับของไหลที่มีค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์สูงๆ

1.2 หัวเผาถ่านหินแบบเจ็ทปั๊ม

หัวเผาถ่านหิน (Jet Pump Coal Burner) ที่เป็น การวิจัยต่อเนื่องจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์นี้ มี โครงสร้างหลักเหมือนกับเจ็ทปั๊มแต่จะมีช่องใส่ถ่านหิน (coal inlet port), ท่อดูดไอเสีย (flue gas recirculation port) และกล่องไฟ (fire box) รูปที่ 1 แสดงให้เห็น รูปร่างของหัวเผาถ่านหิน



รูปที่ 1 แสดงถึงรูปร่างของหัวเผาถ่านหิน

2. การคำนวณทางคณิตศาสตร์

2.1 เจ็ทปั๊ม

รูปที่ 2 แสดงแผนภาพของเจ็ทปั๊มที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ การคำนวณความดันสถิต และการกระจายของความดันในเจ็ทปั๊มทำได้จากการใช้ของทางคณิตศาสตร์โดย การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้

- อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดกับเส้นผ่าศูนย์กลางช่วงผสม $d/D = 0.5 - 0.7$
- อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดกับระยะทางจากทางเข้าช่วงผสมไปยังปลายหัวฉีด $LD = 0 - 2.0$
- อัตราส่วนของอัตราการไหล $M = Q_1 / Q_2$ (Q_1 : อัตราการไหลปฐมภูมิ, Q_2 : อัตราการไหลทุติยภูมิ) = 0.1 - 1.2
- ความเร็วของไหลของหัวฉีด $V_j = 30 \text{ m/s}$ (ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์, $Re = V_j \times d / \nu = 360,000$ ν : kinematic viscosity)
- จำนวนกริดที่ใช้ ประมาณ 80,000 ถึง 100,000 ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในตารางที่

ตารางที่ 1 แสดงสภาวะการคำนวณ CO2 (isothermal flow)

Turbulent model		RNG k- ϵ model
Grid		T-grid convert to polyhedra
Calculation method		Simple
Boundary condition	(1) Jet pump	Wall law , Symmetry plane
	(2) Inlet boundary	Mass flow inlet
	(3) Inlet boundary	Velocity inlet ($V_j = 30 \text{ m/s}$)
	(4) Outlet boundary	Outflow
Reynolds number (velocity of nozzle)		360,000 ($V_j = 30 \text{ m/s}$)
Number of grid		80,000-100,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



CST



รูปที่ 2 แสดงขนาดของเจ็ทปั๊มที่ใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์[1]



รูปที่ 3 แสดงโดเมนและ Boundary condition ของเจ็ทปั๊มที่ใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 3 แสดงถึงโดเมนของของไหลที่ใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ (แสดง 180 องศา) เราได้ทำการต่อขยายโดเมนออกไปในส่วนบริเวณด้านหน้า - หลัง ของเจ็ทปั๊มเพื่อจำลองสภาวะแวดล้อมโดยรอบ ในการคำนวณนี้ ได้กำหนดโดเมนเพียง 1 ใน 6 หรือ 80 องศา เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องมากขึ้นภายใต้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่จำกัด

2.2 พัวศาคำนึงถึงแบบเจ็ทปั๊ม

เงื่อนไขในการคำนวณหาสมการศาสตร์ของหัว

พัวศาคำนึงถึงดังนี้

- 1) อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดกับระยะทางจากท่อน้ำเข้าจนหมดไปยังปลายหัวฉีด $d/D = 0.5$

2) อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อผสม $d/D = 0.5$

- 3) อุณหภูมิที่ทางเข้าบริเวณของท่อน้ำเข้า = 1200 K
- สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงสภาวะการคำนวณ (non-isothermal flow)

Turbulent model	ReNG k-ε model	
Calculation method	Simple	
Boundary condition	(1) Jet pump	Wall law , Symmetry plane
	(2) Inlet boundary	Pressure inlet , Temperature = 1200 K
	(3) Inlet boundary	Velocity inlet ($V_j = 30$ m/s)
	(4) Outlet boundary	Outflow
Reynolds number (velocity of nozzle)	360,000 ($V_j = 30$ m/s)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



CST

3. ผลลัพธ์ (Isothermal flow)

3.1 การกระจายความดันและความเร็ว

จากรูปที่ 4 – 6 แสดงถึงสัมประสิทธิ์ ความดันสถิตย์, C_p สำหรับ $d/D = 0.5, 0.6, 0.7$ สำหรับตำแหน่งหัวฉีดของ $VD = 0 - 2.0$ ขณะที่รูปที่อิงท้ายด้วย (ก) เป็นผลการจำลองที่ขบผล และรูปที่อิงท้ายด้วย (ข) เป็นผลการจำลองของงานวิจัยที่มีมาในอดีต [1] ซึ่งทั้งหมดจำลองที่ $M = 0.2$ สัมประสิทธิ์ ความดันสถิตย์, C_p นิยามโดย

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\rho v_\infty^2 / 2} \quad (1)$$

ซึ่ง P คือ ความดันสถิตย์ในช่วงผลและช่องทางจุด

P_∞ คือ ความดันบรรยากาศ

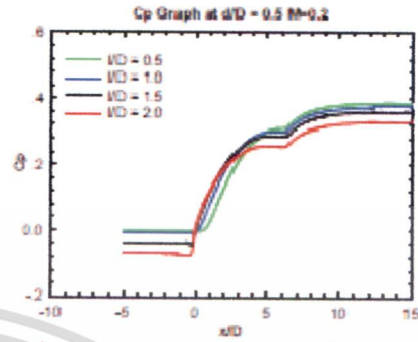
ρ คือ ความหนาแน่น

v_∞ คือ ความเร็วของของไหลที่หัวฉีด

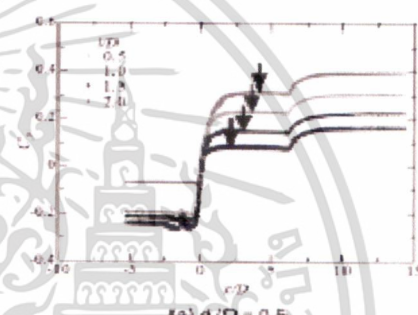
จากรูป 4(ก), 5(ก) และ 6(ก) การกระจายของ C_p ในช่องทางจุดมีความสม่ำเสมอแสดงว่าความคล้ายคลึงมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันที่ลักษณะการกระจายของ C_p ไม่ขึ้นกับอัตราส่วนของหัวฉีด d/D หรือตำแหน่งหัวฉีด VD เนื่องจากกระแสวนในช่วงนี้มีส่วนมากทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงของ C_p ที่เกิดจากความเสียดทานได้น้อยมาก

เมื่อค่า VD เพิ่มขึ้น ค่า C_p ค่อยๆลดลงอันเนื่องมาจาก ค่า VD ที่สูงขึ้นให้ระยะทางที่การไหลปฐมภูมิเหนี่ยวนำการไหลทุติยภูมิให้เกิดความดันที่ลดลงได้มากขึ้น ค่า C_p ในบริเวณนั้นจึงมีแนวโน้มที่ลดลง

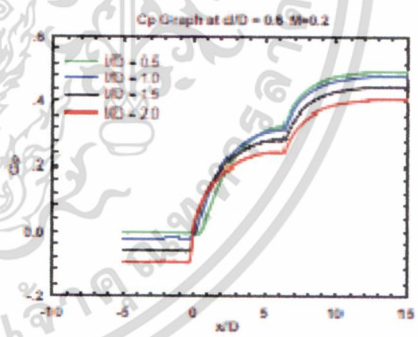
ในทิศทางเข้า throat ความเร็วของไหลรวมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าสูงสุดในช่วงที่ทำให้ค่า C_p เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่ง รูปแบบการไหลนั้นเริ่มเข้าสู่ uniform flow ค่า C_p จะเริ่มคงที่ ในส่วนตีฟิวเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันและค่า C_p เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4(ก) แสดงค่า C_p จากการคำนวณที่ $d/D = 0.5$ และ $M = 0.2$



รูปที่ 4(ข) แสดงค่า C_p จากการคำนวณที่ $d/D = 0.5$ และ $M = 0.2$ [1]

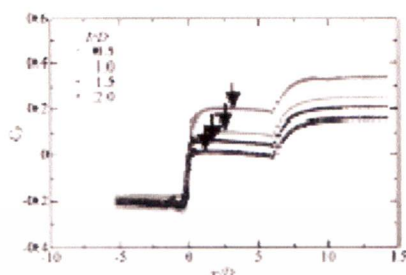


รูปที่ 5(ก) แสดงค่า C_p จากการคำนวณที่ $d/D = 0.6$ และ $M = 0.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



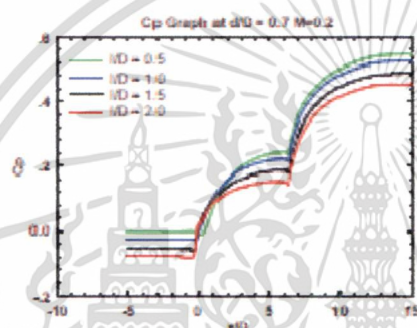
CST



(b) $d/D = 0.6$

รูปที่ 5(ข) แสดงค่า C_p จากการคำนวณที่ $d/D = 0.6$

และ $M = 0.2$ [1]



รูปที่ 8(ก) แสดงค่า C_p จากการคำนวณที่ $d/D = 0.7$

และ $M = 0.2$



(c) $d/D = 0.7$

รูปที่ 8(ข) แสดงค่า C_p จากการคำนวณที่ $d/D = 0.7$

และ $M = 0.2$ [1]

จากการเปรียบเทียบกราฟค่า C_p ระหว่างรูป (ก) และ (ข) เห็นได้ชัดเจนว่าความชันของค่า C_p ที่เพิ่มขึ้นนั้นมีความแตกต่างกัน ในส่วนการคำนวณผล [1] กราฟจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วเรียบเป็นเส้นตรง ซึ่งจะแตกต่างจากการคำนวณในปัจจุบัน กราฟจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงบริเวณตีฟิวเจอร์ ในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าการเข้าสู่ uniform flow นั้นแตกต่างกัน บ่งบอกได้ว่าความหนาแน่นแตกต่างกัน

ในส่วนกราฟช่วงตีฟิวเจอร์จะมีความชันเพิ่มขึ้นเมื่อ ค่า d/D เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดมีขนาดใหญ่อขึ้นส่งผลให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นเพราะความเร็วของไหลที่หัวฉีดคงที่ ทำให้ความเร็วของไหลที่บริเวณ throat สูงขึ้น เป็นไปตามหลักการความต่อเนื่อง (Continuity) และการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) จะส่งผลให้กราฟ C_p ในบริเวณตีฟิวเจอร์สูงขึ้นเมื่อค่า d/D เพิ่มขึ้น

3.2 ประสิทธิภาพเนื่องมาจากตำแหน่งหัวฉีด

รูปที่ 7(ก) แสดงถึงประสิทธิภาพของเจ็ทปัมที่ระยะ $ND = 0.0 - 2.0$ ที่ $d/D = 0.5$ ประสิทธิภาพนิยามโดย

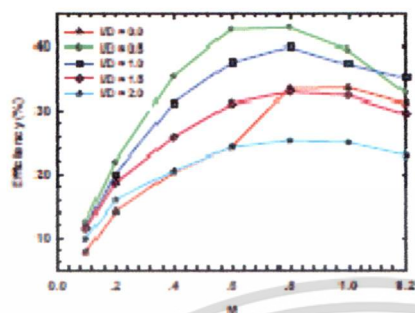
$$\eta = \frac{M \cdot N}{Q_1} = \frac{Q_2 (P_2 - P_1)}{Q_1 (P_1 - P_2)} \quad (2)$$

- โดยที่ Q_1 คือ อัตราการไหลปฐมภูมิ
- Q_2 คือ อัตราการไหลทุติยภูมิ
- P_1 คือ ความดันสถิตที่ทางออก
- P_2 คือ ความดันสถิตที่หัวฉีด
- P_3 คือ ความดันสถิตที่ช่องทางดูด
- M คือ อัตราส่วนของอัตราการไหล
- N คือ อัตราส่วนความดัน

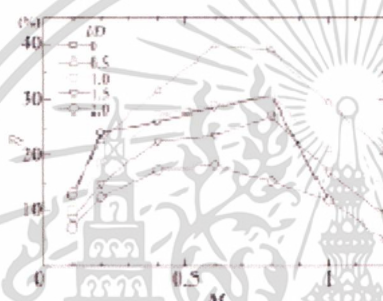
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



CST



รูปที่ 7(ก) แสดงถึงประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 7(ข) แสดงถึงประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณ

จากการเปรียบเทียบกราฟประสิทธิภาพระหว่างรูปที่ 7(ก) – 7(ข) กราฟทั้งสองนี้ให้ประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณที่ VD ที่มีค่าประสิทธิภาพมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อ VD ที่มีค่าสูงขึ้นประสิทธิภาพมีแนวโน้มลดลง สามารถอธิบายได้โดยการพิจารณาจากสมการประสิทธิภาพ(2)

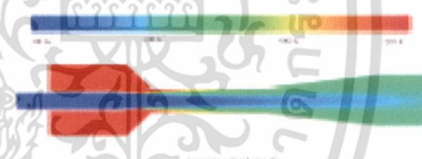
- 1) ในเทอมของ $P_2 - P_1$ มีค่าใกล้เคียงกันทุกๆ ค่า VD (สังเกตได้จากกราฟ Cp)
- 2) ในส่วนเทอมของ $P_2 - P_1$ มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น P_1 และ P_2 ลดลงแต่ P_1 ลดลงมากกว่า)
- 3) ในเทอมของ $P_2 - P_1$ มีแนวโน้มที่ลดลง $P_1 - P_2$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนอัตราการทำงานเพิ่มขึ้น (P_1 เพิ่มขึ้นแต่ P_2 ลดลง)

ผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์ทั้งหมดขึ้นอยู่กับสมการที่กำหนดในแต่ละขอบเขต โดยค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ทั้งหมดเป็นค่ามาตรฐาน(default) จากการคำนวณโดยรวมทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการคำนวณทั้งสองครั้งมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเกิดจากการเปิดขอบเขตที่ขอบเขตเท่านั้น

วิธีการคำนวณที่ได้ทั้งหมดนั้นจะนำไปใช้ในการคำนวณในส่วน non-isothermal flow ต่อไป

4. ผลลัพธ์ (non-isothermal flow)

รูปที่ 8 แสดงถึงการกระจายของอุณหภูมิภายในเจ็ทปัม ซึ่งในการตั้งสภาวะของอุณหภูมิได้กำหนดให้ อุณหภูมิที่ทางเข้าปฐมภูมิ (primary flow) เท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 300 K และอุณหภูมิที่ทางเข้าทุติยภูมิ (secondary flow) เท่ากับอุณหภูมิไอเสีย (flue gas) เท่ากับ 1200 K [2]จากรูปจะเห็นได้ว่า บริเวณลิฟท์วอร์วินั้นมีอุณหภูมิประมาณ 600 - 750 K ซึ่งที่อุณหภูมิช่วงนี้ตามพื้นจะเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอซึ่งจะมีความพร้อมที่จะติดไฟ



รูปที่ 8 แสดงการกระจายของอุณหภูมิภายในเจ็ทปัม

5. วิเคราะห์ผลการจำลอง

การคำนวณทางคณิตศาสตร์แสดงผลให้เห็นดังต่อไปนี้

- 1) ประสิทธิภาพสูงที่สุดอยู่ที่ประมาณ 43% ที่ (c/D = 0.5, VD = 0.5 และ M = 0.8)
- 2) การกระจายของค่า Cp เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน VD ที่เพิ่มขึ้นแต่จะลดลงเมื่ออัตราส่วน VD เพิ่มขึ้น โดยรูปแบบการกระจายตัวของค่า Cp มีแนวโน้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



CST

ที่ไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยที่มีมาในอดีต แต่การเพิ่มขึ้นของกราฟ Cp นั้นจะไม่รวดเร็วเท่ากับผลการจำลองก่อนหน้า[1] เนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ทำให้ความสามารถในการเข้าสู่ Uniform flow แตกต่างกัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; 2547

- 3) จากการคำนวณที่ VD ที่มีค่าต่ำ ประสิทธิภาพมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อ VD ที่มีค่าสูงขึ้นประสิทธิภาพมีแนวโน้มลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณก่อนหน้า[1] แต่ในช่วงอัตราส่วนการไหล M ค้างแค่ 0.8 ขึ้นไปนั้นประสิทธิภาพนั้นตกลงแต่ไม่เทียบเท่ากับผลการคำนวณก่อนหน้า[1]
- 4) เมื่อทำการศึกษากาที่โหมดแบบ non-isoenthalpy อุณหภูมิที่บริเวณตีพิวเซอร์อยู่ที่ประมาณ 600 - 700 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอเพียงให้กำเนิดพลาสมาไอระเหยออกมา หรือเกิดการเผาไหม้

6. สรุป

ผลจากการคำนวณที่ได้นั้นแนวโน้มของค่า Cp และประสิทธิภาพที่ได้มีความใกล้เคียงกับแบบจำลองก่อนหน้านั้น [1] พอเพียงที่จะสรุปได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีคุณภาพในด้านความแม่นยำถือเพียงพอก็จะนำไปศึกษาและสร้างตัวแบบทางด้านอื่นต่อไป

7. ถิ่นคติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณนายฉวีวัฒน์ ภูเจริญ ที่คอยแนะนำองค์ความรู้และเทคนิคที่เป็นประโยชน์ในการวิจัย ทำให้การวิจัยนี้สำเร็จลงไปด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Prabkeed C, Aoki K. Study on the Optimum Mixing Throat Length for Drive Nozzle Position of the Central jet pump. Journal of Visualization 2005; Vol.8 No.4 .

[2] นิตินันท์ บัญญัติบุญยกุล การจำลองเชิงคำนวณของการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในห้องปฏิบัติการการไหลแบบหมุนวน. บัณฑิตวิทยาลัย สถาบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นายกันตภณ อุดมโชคปิติ

วัน เดือน ปีเกิด 14 ธันวาคม พ.ศ. 2527

ประวัติการศึกษา:

พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

พ.ศ. 2549/2 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

ผลงานที่เคยได้รับการตีพิมพ์

พ.ศ. 2552 “ Validation of mathematical model and its application for the development of jet pump for transportation of pulverized coal fuel ”