



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การจำลองเชิงตัวเลขลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอก
โดย นายดวงพล ลิ้มธรรมมิตร์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

17 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปุมยศ วัลลิกุล)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.มณฑิไล นรสิงห์)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สุนิรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย)

การจำลองเชิงตัวเลขลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอก

นายดวงพล ลิ้มธรรมมหิศร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายดวงพล ลิ้มธรรมมหิศร
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การจำลองเชิงตัวเลขลักษณะการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งรูปทรงกระบอก
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปุมยศ วัลลิกุล
อาจารย์ ดร.มณพีไล นรสิงห์
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

การใช้ประโยชน์และการพัฒนาถ่านอัดแท่งรูปทรงกระบอกเพื่ออุตสาหกรรมต่างๆ รวมทั้งสามารถใช้ในครัวเรือนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเป็นโจทย์วิจัยที่ซับซ้อน ในการวิจัยนี้จะใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยต่อโจทย์วิจัยดังกล่าว โดยการคำนวณหารูปร่างเปลวไฟภายใต้เงื่อนไขสภาวะที่กำหนดอัตราการสันดาปของถ่านอัดแท่งจากการวัดอัตราการสูญเสียเชิงมวลในการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งรูปทรงกระบอกในเครื่องวัดสมดุลความร้อนเพื่อนำมาเป็นข้อมูลในแบบจำลองเบิร์ค - ชูแมน (Burke - Schumann) ถึงแม้ว่าแบบจำลองจะมีข้อจำกัดต่างๆ มากมายแต่ผลของรูปร่างของเปลวไฟที่ได้มานั้นมีความสมเหตุสมผลกัน ซึ่งได้จากการจากการคำนวณรูปร่างเปลวไฟที่ได้ถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งนี้สองประเภทที่ต่อเนื่องตามลำดับคือ เปลวไฟแบบอันเดอร์เวนทีเลตเต็ดไซลินดริคัลฟเลม (Underventilated Cylindrical Flame) ที่บริเวณช่องอากาศในตัวถ่าน และเปลวไฟแบบโอเวอร์เวนทีเลตเต็ดไซลินดริคัลฟเลม (Overventilated Cylindrical Flame) ที่ด้านนอกบนผิวด้านบนของถ่าน แบบจำลองและการแก้ปัญหาสามารถตรวจสอบได้โดยการเปรียบเทียบกันการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขกับการแก้ปัญหาผลแม่นยำตรง ซึ่งผลที่ได้จากการแก้ปัญหาทั้งสองวิธีนั้นพบว่าสอดคล้องกันได้ดีมาก การเปรียบเทียบความสูงเปลวไฟที่ได้จากการจำลองและการวัดจริงแสดงให้เห็นว่าเปลวไฟที่ได้จากการจำลองสั้นกว่าเปลวไฟของจริงซึ่งเป็นผลมาจากการตั้งสมมุติฐานที่ไม่เป็นจริง โดยเฉพาะการให้การสันดาปเป็นอย่างสมบูรณ์โดยเฉพาะบริเวณการเผาไหม้ของแบบจำลองภายในถ่าน อย่างไรก็ตามผลของรูปร่างเปลวไฟที่ได้นี้จะนำข้อมูลในการออกแบบรูปร่างถ่านและเตาที่เหมาะสมต่อไป

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 93 หน้า)

คำสำคัญ : ถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอก , รูปร่างของเปลวไฟ , ดิฟฟิวชันฟเลม ,
แบบจำลองเบิร์ค - ชูแมน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr. Duangpahol Limthammahisorn
Thesis Title : Numerical Simulation of Combustion in A Cylindrical Shape Coal
Briquette
Major Field : Mechanical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisors : Assistant Professor Dr. Pumyos Vallikul
Dr. Monpilai Narasingha
Academic Year : 2006

Abstract

Numerical modeling of flame shapes for the combustion of coal briquette used in industry and household is advanced. The briquette is of cylindrical shape with air channel passing vertically through the briquette. From a given measured rate of mass loss of burning of coal briquette within an in-house thermo-balance, the flame shapes can be located based on Burke-Schmann model. Although the model imposes very tight constraints on the combustion and flow processes, the resulting flame shapes are justified. It has been found from the calculation results that there are two consecutive flame shapes existing in the briquette: underventilated flame in the air channel within the briquette and overventilated flame above the surface of the briquette. The model and the solution have been verified by comparing between the exact and numerical solutions. It is shown that the numerical and exact solutions for both flames agree very well. The simulated flame heights from the models have been validated with measured one. It was found that the simulated flames underestimated the height of the real flame. This is resulted from the unjustified complete combustion assumption, particularly of the first model. The flame shapes will be used to determine the optimum shapes of the briquette and of the furnace.

(Total 93 pages)

Keywords : Coal Briquette, Flame Shape, Diffusion Flame, Burke-Schmann model

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปทุมศ วัลลิกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.มณไพ์ ไหล นรสิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด รวมทั้ง อาจารย์ ดร.สุนิรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้ด้วย และทุนการวิจัยบางส่วนได้รับจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้มา ณ ที่นี้ด้วย

ทำยนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา เพื่อนๆ และน้องๆ ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ดวงพหล ลิ้มธรรมมหิศร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 งานค้นคว้าและงานวิจัยที่มีปรากฏมาก่อน	1
1.3 วัตถุประสงค์	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.5 วิธีการวิจัย	4
1.6 ขั้นตอนการวิจัย	4
1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวกับเปลวไฟและการเผาไหม้	7
2.1 การเผาไหม้และการเกิดเปลวไฟตามธรรมชาติ	7
2.2 พฤติกรรมการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงแข็ง	9
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การแพร่ของก๊าซในแข็ง	10
2.4 อุปกรณ์ช่างหาอัตราการสูญเสียมวล	15
2.5 หลักการชวบบเซลโดวิก (Shvab Zel 'Dovic Formulation) สำหรับการเผาไหม้	17
2.6 สมมุติฐานพื้นฐานของเบิร์ค - ชูแมน (Burke - Schumann)	19
บทที่ 3 ปัญหาทางคณิตศาสตร์และผลเฉลยการเผาไหม้ถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอก	23
3.1 พฤติกรรมการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิง	23
3.2 การสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิง	25
3.3 การแก้ปัญหามาจากสมมุติฐานของเบิร์ค - ชูแมนในถ่านเชื้อเพลิง	29
3.4 การแก้ปัญหาคงตัวเลข (Numerical Solution) ในถ่านเชื้อเพลิง	31
3.5 การแก้ปัญหาคงแน่นอนตรง (Exact Solution) ในถ่านเชื้อเพลิง	33
3.6 แมสแฟรกชัน (Mass Fraction) ของก๊าซองค์ประกอบ	39
3.7 การแก้ปัญหาคงความร้อน	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการจำลองในถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอก	45
4.1 เงื่อนไขเริ่มต้นในแบบจำลองภายในถ่าน	46
4.2 รูปร่างของเปลวไฟในแบบจำลองภายในถ่าน	47
4.3 แมสแฟรกชันที่ผิวของเปลวไฟในแบบจำลองภายในถ่าน	48
4.4 แมสแฟรกชันในแบบจำลองภายในถ่านที่ระดับความสูงต่างๆ	48
4.5 อุณหภูมิของเปลวไฟในแบบจำลองภายในถ่าน	50
4.6 เงื่อนไขเริ่มต้นในแบบจำลองบนผิวถ่าน	52
4.7 รูปร่างของเปลวไฟในแบบจำลองบนผิวถ่าน	55
4.8 แมสแฟรกชันที่ผิวของเปลวไฟในแบบจำลองบนผิวถ่าน	56
4.9 แมสแฟรกชันในแบบจำลองบนผิวถ่านที่ระดับความสูงต่างๆ	57
4.10 อุณหภูมิของเปลวไฟในแบบจำลองบนผิวถ่าน	58
4.11 ก๊าซผสมที่ได้จากแบบจำลองบนผิวถ่าน	61
บทที่ 5 เงื่อนไขเริ่มต้นและในแบบจำลองของจริง	63
5.1 เงื่อนไขเริ่มต้นและในแบบจำลองของจริง	63
5.2 รูปร่างของเปลวไฟในแบบจำลองของจริง	64
5.3 แมสแฟรกชันที่บริเวณผิวของเปลวไฟในแบบจำลองของจริง	65
5.4 แมสแฟรกชันในแบบจำลองของจริงที่ระดับความสูงต่างๆ	66
5.5 อุณหภูมิของเปลวไฟในแบบจำลองของจริง	67
5.6 ก๊าซผสมที่ได้จากแบบจำลองของจริง	68
5.7 ผลของรูปร่างเปลวไฟจากการทดลองจริง	69
บทที่ 6 สรุปผลแบบจำลอง	73
6.1 การสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่ง	73
6.2 แบบจำลองภายในถ่าน	73
6.3 แบบจำลองบนผิวถ่าน	74
6.4 แบบจำลองของจริง	76
6.5 ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารอ้างอิง	79
ภาคผนวก ก ค่าที่ใช้ในการคำนวณ	81
ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี (Heat of Reaction)	82
ความร้อนจำเพาะ (Heat Capacity)	83
ค่าการแพร่กระจายเชิงมวล (Mass Diffusivity)	84

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข งานวิจัยที่ได้นำเสนอในงานวิชาการ SEE 2006	85
ประวัติผู้วิจัย	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
3-1	เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองสำหรับแก้ปัญหาคิงตัวเลข	32
3-2	สมการที่ใช้ในแก้ปัญหาคิงตัวเลขทั้งสองแบบจำลอง	33
3-3	เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองในรูปไร้มิติ	34
3-4	ค่าของตัวแปร $f(\xi)$ ตามเงื่อนไขเริ่มต้น	37
3-5	สมการที่ใช้ในแก้ปัญหาคิงตัวเลขผลเฉลยตรง	38
4-1	องค์ประกอบของถ่านเชื้อเพลิง	45
4-2	สูตรเคมีสารประกอบของถ่านเชื้อเพลิงในรูป $C_xH_yO_xN_yS_z$	45
4-3	สารต่างๆ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาทางเคมีของสมการ (3-1)	46
4-4	แมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ในแบบจำลองภายในถ่าน	48
4-5	ผลของอุณหภูมิที่มากที่สุดในแบบจำลองภายในถ่าน	51
4-6	แมสแฟรกชันของก๊าซผสมที่ได้จากแบบจำลองภายในถ่าน	52
4-7	องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในแบบจำลองบนผิวถ่านเชื้อเพลิง	53
4-8	สารต่างๆ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาทางเคมีของสมการ (3-2) สำหรับคิงตัวเลข	54
4-9	สารต่างๆ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาทางเคมีของสมการ (3-2) สำหรับผลเฉลยตรง	54
4-10	แมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ในแบบจำลองบนผิวถ่าน	57
4-11	ผลของอุณหภูมิที่มากที่สุดในแบบจำลองบนผิวถ่าน	61
4-12	แมสแฟรกชันของก๊าซผสมที่ได้จากแบบจำลองบนผิวถ่าน	61
5-1	เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองของจริง	63
5-2	แมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ในแบบจำลองของจริง	65
5-3	ผลของอุณหภูมิที่มากที่สุดในแบบจำลองของจริง	68
5-4	แมสแฟรกชันของก๊าซผสมที่ได้จากแบบจำลองของจริง	69
5-5	ผลของความสูงของเปลวไฟ	70
ก-1	ความร้อนของปฏิกิริยาทางเคมีในกระบวนการเผาไหม้	82
ก-2	ความร้อนจำเพาะของสารเคมีที่อยู่ในกระบวนการเผาไหม้	83
ก-3	ค่าการแพร่เชิงความร้อนของสารเคมีที่อยู่ในกระบวนการเผาไหม้	84

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 การกำจัดสารปนเปื้อนในดินด้วยความร้อน	10
2-2 แบบจำลองของสารปนเปื้อนที่อยู่ในดิน	11
2-3 ผลเฉลยความเข้มข้นก๊าซ และของเหลวที่เวลาต่างๆ	15
2-4 แผนผังกึ่งระบบซึ่่งน้ำหนัก	16
2-5 แบบจำลองของการสั่นดาปของเบิร์ต - ชูแมน	19
3-1 ถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปกระบอก	23
3-2 แบบจำลองของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอก	24
3-3 ถ่านอัดแท่งจริงและแบบจำลองถ่าน	26
3-4 แบบจำลองทางกายภาพและเสมือนจริงในแบบจำลองบนผิวถ่าน	28
3-5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิง	30
3-6 แบบจำลองการแพร่กระจายเข้าหากันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ	39
4-1 รูปร่างเปลวไฟของแบบจำลองภายในถ่าน	47
4-2 ผลของแมสแฟรกชันในแบบจำลองภายในถ่านที่ระดับความสูงต่างๆ	49
4-3 รูปร่างเปลวไฟที่ได้จาก $[\beta_T]_{\text{crit}}$ และ $[\gamma_T]_{\text{crit}}$ ในแบบจำลองภายในถ่าน	50
4-4 ผลของอุณหภูมิในแบบจำลองภายในถ่าน	51
4-5 รูปร่างเปลวไฟของแบบจำลองบนผิวตัวถ่านเชื้อเพลิง	55
4-6 ผลของแมสแฟรกชันในแบบจำลองบนผิวถ่านที่ระดับความสูงต่างๆ	58
4-7 รูปร่างของเปลวไฟที่ได้จาก $[\beta_T]_{\text{crit}}$ และ $[\gamma_T]_{\text{crit}}$ ในแบบจำลองบนผิวถ่าน	59
4-8 ผลของอุณหภูมิในแบบจำลองบนผิวถ่าน	60
5-1 รูปร่างของเปลวไฟของแบบจำลองของจริงเทียบกับแบบจำลองเก่า	64
5-2 ผลของแมสแฟรกชันในแบบจำลองของจริงที่ระดับความสูงต่างๆ	66
5-3 รูปร่างของเปลวไฟที่ได้จาก $[\beta_T]_{\text{crit}}$ ในแบบจำลองของจริง	67
5-4 ผลของอุณหภูมิในแบบจำลองของจริง	68
5-5 รูปร่างของเปลวไฟที่ได้จากการทดลองจริง	70

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์และคำย่อ

C_p	ความร้อนจำเพาะ (Heat Capacity)
D	ค่าการแพร่กระจายเชิงมวล (Mass Diffusivity)
f	มิกซ์เจอร์แฟรกชัน (Mixture Fraction)
f_{st}	มิกซ์เจอร์แฟรกชัน (Mixture Fraction) ที่ผิวของเปลวไฟ
ΔH_r	ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี (Heat of Reaction)
k	ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)
r	ความยาวตามรัศมี
T	อุณหภูมิ
V_z	อัตราความเร็วตามแนวสูง
W	มวลโมเลกุล
Y	แมสแฟรกชัน (Mass Fraction)
z	ความยาวตามแนวสูง
β	ตัวแปรคู่ควบ (Coupling Function) ระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน
β_T	ตัวแปรคู่ควบ (Coupling Function) ระหว่างอุณหภูมิกับออกซิเจน
ε	ค่าความพรุนของถ่านเชื้อเพลิง
ρ	ความหนาแน่น
v'	สัมประสิทธิ์สโตยจิโอเมตริก (Stoichiometric) ของตัวทำปฏิกิริยา
v''	สัมประสิทธิ์สโตยจิโอเมตริก (Stoichiometric) ของผลิตภัณฑ์

สัญลักษณ์และคำย่อย่อย

A	อากาศ
F	เชื้อเพลิง
N	ไนโตรเจน
O	ออกซิเจน
P	ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้
j	ท่อขนาดเล็ก
s	ท่อขนาดใหญ่

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

m	แถวที่ m
n	แนวที่ n

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้ประโยชน์จากการเผาไหม้และการพัฒนาถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอกเพื่ออุตสาหกรรมรวมทั้งสามารถใช้ในครัวเรือนได้โดยให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดนั้นเป็นโจทย์วิจัยที่ซับซ้อน ทั้งนี้เพราะเชื้อเพลิงอัดแท่งซึ่งประกอบขึ้นจาก วัสดุประสาน เชื้อเพลิงแข็ง และวัสดุเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ ทำให้การกำหนดลักษณะเฉพาะของการสันดาปทำได้โดยยาก งานวิทยานิพนธ์นี้เสนอที่จะดำเนินการวิจัยเพื่อค้นหาหลักเกณฑ์เฉพาะของการสันดาปภายใต้เงื่อนไขสมภาวะที่ทำให้อัตราการสันดาปของเชื้อเพลิงอัดแท่งอยู่ในอัตราที่เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ องค์ประกอบเชื้อเพลิงเป็นอย่างไรประกอบด้วย C , H , N , O , และ S โดยใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับผลจากการทดลอง

การคำนวณจะคำนึงถึงลักษณะรูปร่าง อัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตร และลักษณะการไหลของก๊าซผ่านถ่านอัดแท่ง จึงทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายแทนรูปร่างจริงที่ซับซ้อน และการวิเคราะห์การเผาไหม้โดยใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข (CFD) ด้วยวิธีการประมาณด้วยวิธีการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์บนซอฟต์แวร์แมทแล็บ (MATLAB) เป็นหลักการคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งมีข้อดีคือ สามารถแยกศึกษาและทำความเข้าใจกลไกที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ในลักษณะต่างๆ ได้ ทั้งนี้การเทียบเคียงระหว่างการจำลองเชิงตัวเลขกับผลการทดลองเผาเชื้อเพลิงโดยตรงจะใช้ความสูงเปลวไฟที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับการวัดได้จากการทดลองโดยตรง

1.2 งานค้นคว้าและงานวิจัยที่มีปรากฏมาก่อน

เนื่องจากถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอกมีหลายชนิดและหลายส่วนผสมที่สามารถนำไปใช้ความร้อนทางเคมีจากส่วนผสมของเชื้อเพลิง ดังนั้นการเลือกที่วัสดุเหมาะสมที่จะทำให้ควบคุมการให้พลังงานและกำจัดกาจากการเผาไหม้ได้ดีขึ้น รวมทั้งการกำหนดปฏิกิริยาทางเคมีขององค์ประกอบทั้งหลายของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งนั้น จึงปรากฏงานวิจัยหลายชิ้นที่ได้วิธีที่ต่างกันในการศึกษาการสันดาปในเชื้อเพลิงแข็งอาทิเช่น

A. M. Kanury [1] ค้นหาและรวบรวมคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการสันดาปในเตาเผา โดยการพัฒนาแบบจำลองอย่างง่าย โดยสร้างสมมุติฐานคุณสมบัติ และตัวแปรต่างๆ แล้วทำการทดลองโดยการเผาเชื้อเพลิงชีวภาพในเตาเผาเพื่อหา

อัตราการสูญเสียเชิงมวล (Mass Loss) ของเชื้อเพลิงชีวภาพแล้วนำไปคำนวณเชิงตัวเลขหาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวภาพอย่างแม่นยำ

A. C. Fernandez-Pello [2] วิเคราะห์กระบวนการลุกไหม้ของเปลวไฟภายใต้เงื่อนไขของวัสดุและสภาพแวดล้อมต่างๆ โดยทำการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อหากลไกที่ควบคุมกระบวนการลุกไหม้ของเปลวไฟ รวมทั้งข้อกำหนดที่จำเป็นต่อการพัฒนาในการวิเคราะห์การลุกไหม้ของเปลวไฟที่ต้องซึ่งข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขนี้เอาไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการลุกไหม้ของเปลวไฟของจริงแล้วได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงมากพอที่หากลไกสำคัญของลุกไหม้เปลวไฟ

Arvind Atreya [3] วิเคราะห์การลุกไหม้ของเปลวไฟตามแนวขนานกับผิวของเชื้อเพลิงซึ่งเป็นไม้แปรรูปโดยมีรูปร่างลักษณะเหมือนจานแบนเรียบ โดยการคำนวณเชิงตัวเลขการนำพา (Transport) ของเชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นก๊าซจากบริเวณเผาไหม้ไปยังบริเวณที่ไม่มีการเผาไหม้แบบสองมิติ ในการคาดการณ์การลุกไหม้ของเปลวไฟตามบริเวณผิวที่เกิดการเผาไหม้มาเปรียบเทียบกับผลจากข้อมูลจริง แต่ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดอยู่ที่ว่าชาร์ (Char) ของวัสดุที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นจะต้องคุณสมบัติเหมือนกับไม้เท่านั้น

J. L. Ellzey [4] ทำการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขรูปร่างเปลวไฟโดยนำแบบจำลองการเผาไหม้แบบพรีมิกซ์เฟลม (Premix Flames) แบบความเร็วต่ำของ Patnaik , et al. [5] และแบบจำลองเจ็ทเฟลม (Jet Flames) ของ Lackey [6] มาประยุกต์ใช้ในแบบจำลองแล้วนำมาเปรียบเทียบกับรูปร่างเปลวไฟที่ได้จากการวิเคราะห์ของเบิร์ค - ชูแมน (Burke - Schumann) พบว่ากลไกที่สำคัญต่อกระบวนการเผาไหม้แบบดิฟฟิวชันเฟลม (Diffusion Flames) นอกจากคุณสมบัติการไหลและการแพร่ของก๊าซแล้วยังมีการปลดปล่อยความร้อน (Heat Release) ซึ่งเป็นความร้อนสูญเสียหายไปเนื่องจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ความหนืด และผลจากแรงโน้มถ่วงของก๊าซ

Jose L. Torero , et al [7] คำนวณตัวเลขการถ่ายเทมวล (Mass Transfer Number) จากระยะต่างๆ ของการลุกไหม้ของเปลวไฟโดยใช้ชวบเซลโดวิก (Shvab Zel 'Dovic) แบบดั้งเดิมของ Emmons [8] โดยที่ตัวเลขการถ่ายเทมวลเป็นอัตราความร้อนของออกซิเจนเทียบกับความร้อนของเชื้อเพลิงซึ่งตัวเลขการถ่ายเทมวลนี้เป็นบอกลักษณะการลุกไหม้ของเปลวไฟ และใช้ขอบเขตเงื่อนไข (Boundary Conditions) เป็นตัวเลขการถ่ายเทมวลแล้วเปรียบเทียบกับข้อมูลตัวเลขการถ่ายเทมวลของ Vietoris , et al. [9] ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลอง

Amir Eghlimi , et al. [10] พิจารณาลักษณะการสันดาปของชาร์โดยใช้แบบจำลองซึ่งใช้โปรแกรมฟลูเอนท์ (Fluent) สร้างแบบจำลองแบบจำลองได้สองแบบ ได้แก่ แบบจำลองการแพร่ของก๊าซที่ผิวอนุภาคของชาร์ของ Baum and Street [11] และแบบจำลองภายในตัวเนื้อชาร์ (Intrinsic Model) ของ Smith [12] ซึ่งพิจารณาผลการแพร่และปฏิกิริยาทางเคมีภายในเนื้อของชาร์ แล้วนำผลของอัตราการสูญหาย (Burn off) ของชาร์ที่คำนวณได้ในแบบจำลองทั้งสองมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองแล้วได้ผลใกล้เคียงกันมาก

JoAnn S. Lighty , Geoffrey D. Silcox , et al. [13] ศึกษาพฤติกรรมของสารปนเปื้อนในดินโดยสร้างแบบจำลองดินเป็นก้อนๆ โดยจะใช้สารพี - ไซลีน (p - xylene) ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวเป็นสารปนเปื้อนที่อยู่ในดินแล้วใช้เครื่องทำความร้อนแบบฉายรังสี (Radiant Heater) ให้ความร้อนแก่ดินเพื่อให้ความร้อนแก่ดินแล้วจะเกิดการระเหยของสารปนเปื้อนเนื่องจากการความสามารถในการดูดซึม (Absorption) ของดิน และนำผลอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาเปรียบเทียบกับผลอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองจริงซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองมีผลที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นผลที่ได้จากแบบจำลองนี้นำไปเป็นข้อมูลไปแก้ปัญหาคุณภาพของดินเนื่องจากสารปนเปื้อน เนื่องจากการระเหยสารปนเปื้อนในดิน

ยุทธานและอัมรินทร์ [14] ได้ออกแบบและสร้างเครื่องวัดสมมูลความร้อนเพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิและอัตราการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิง โดยนำเอาข้อมูลอัตราการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิงซึ่งได้จากการวัดมวลของถ่านที่หายไปเนื่องจากเผาไหม้มาเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเผาถ่านจนเหลือแต่ขี้เถ้าจะได้อัตราเชิงมวล (Mass Rate) ของเชื้อเพลิงเพื่อนำมาหาความเร็วการไหลของแบบจำลองทั้งสอง (เนื้อหาในบทที่ 3 และ 4)

James G. Quintiere [15] กล่าวถึงกระบวนการเกิดของเปลวไฟ โดยแบ่งไปตามลักษณะการเกิดของไฟในสภาพแวดล้อมต่างๆ และความเร็วอัตราการเกิดปฏิกิริยา William Bartok and Adel F. Sarofim [16] ศึกษาพฤติกรรมการระเหยกลายเป็นก๊าซของเชื้อเพลิงของแข็ง (Devolatilization of The Solid Fuel) เป็นหลัก ซึ่งสอดคล้องกับการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ โดยเฉพาะในส่วนเปลวไฟที่เกิดในสภาวะก๊าซสามารถอธิบายได้ว่าเป็นการเกิดเปลวไฟในลักษณะดีฟิวชันเฟลม (เนื้อหาในบทที่ 2) การเกิดเปลวไฟลักษณะนี้เป็นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งในส่วนที่เป็นก๊าซที่ระเหยออกจากถ่าน

แบบจำลองการสันดาปที่ใช้ในการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แบบจำลองของเบิร์ค - ชูแมน จาก Kenneth K Kuo [17] ส่วนวิธีแก้สมการจากแบบจำลองใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลขจาก Klaus A. Hoffmann and Steve T. Chiang [18] ซึ่งเป็นการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Solution) และศึกษาการแก้สมการแบบเบสเซลส์ดิฟเฟอเรนเชียล (Bessel 's Differential Equation) จาก Advanced Engineering Mathematics ของ Erwin Kreszig [19] เป็นการคำนวณผลแม่นยำตรง (Exact Solution) ในส่วนข้อมูลคุณสมบัติของไหลของแบบจำลองจาก Yunus A. Çengel and Michael A. Boles [20] และข้อมูลคุณสมบัติความร้อนของก๊าซในแบบจำลองใช้จาก Heat Transfer A Basic Approach ของ M. N. Özisik [21]

1.3 วัตถุประสงค์

จำลองเชิงตัวเลขพลศาสตร์การไหลของการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอก เพื่อให้ทราบกลไกของกระบวนการสันดาป และเพื่อเป็นข้อมูลจากผลการจำลองเชิงตัวเลขรูปร่างเปลวไฟ อัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ การกระจายความเข้มข้นก๊าซ

องค์ประกอบและการกระจายอุณหภูมิจากการสันดาป ใช้เป็นข้อแนะนำเพื่อปรับปรุงองค์ประกอบวัสดุที่ใช้ทำถ่านและรูปร่างของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ตลอดจนใช้สำหรับการออกแบบและสร้างเตาเผาสำหรับอุตสาหกรรมที่มีฟังก์ชันการทำงานเหมาะสมกับการใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งต่อไป

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 เชื้อเพลิงสำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้เชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งรูปทรงกระบอก

1.4.2 ศึกษาเปลวไฟที่เกิดขึ้นในช่องอากาศในถ่านอัดแท่งลีกไนต์และเปลวไฟที่เกิดขึ้นบนผิวถ่าน

1.4.3 ใช้ข้อมูลความสูงเปลวไฟจากการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการจำลองเชิงตัวเลข

1.4.4 การแก้ปัญหาการจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ โดยเขียนโปรแกรมบนซอฟต์แวร์ที่ใช้แมทแล็บ (MATLAB) ณ. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

1.4.5 สำหรับปัญหาที่มีสมการและค่าขอบเขตมาตรฐาน จะคำนวณโดยใช้ผลเฉลยแบบแม่นยำเพื่อยืนยันผลจากการคำนวณเชิงตัวเลข

1.5 วิธีการวิจัย

จากการทำการวิเคราะห์การเผาไหม้ อัตราการเผาไหม้ของถ่านที่ได้จากเครื่องวัดสมดุลความร้อน [14] และจากองค์ประกอบของถ่านที่ใช้ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารระเหย [17] กระบวนการเผาไหม้ของถ่านจะเป็นการเผาไหม้ของสารระเหยภายนอกเนื้อถ่าน และเปลวไฟเป็นแบบดิฟฟิวชันเฟลม ข้อมูลอัตราการเผาไหม้ที่ได้จากเครื่องวัดสมดุลความร้อน [14] จะใช้เป็นค่าอัตราการป้อนเชื้อของแบบจำลอง

กระบวนการเผาไหม้แบบดิฟฟิวชันเฟลมจะวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองของเบิร์ค - ชูแมน ซึ่งให้ผลลัพธ์เป็นรูปร่างเปลวไฟและก๊าซองค์ประกอบ สามารถคำนวณหาโดยใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลข และยืนยันผลลัพธ์ด้วยผลเฉลยแบบแม่นยำที่ได้จากการแก้ปัญหาแบบจำลองของเบิร์ค - ชูแมน [17] ผลของความยาวเปลวไฟจากการจำลองด้วยแบบจำลองจะนำมาเปรียบเทียบกับความยาวของเปลวไฟที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

1.6 ขั้นตอนการวิจัย

1.6.1 ศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยและตำราวิชาการที่ได้มีมาในอดีตเพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยนี้ แล้วศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข (CFD) เพื่อนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

1.6.2 ศึกษากระบวนการเผาไหม้แบบดิฟฟิวชันเฟลมและพฤติกรรมการระเหยกลายเป็นก๊าซของเชื้อเพลิงแข็ง

1.6.3 ศึกษาการแพร่กระจายของก๊าซโดยใช้แบบจำลองการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนที่อยู่ในดิน แล้วศึกษาแบบจำลองการสันดาปดิฟฟิวชันเฟลมของเบิร์ค – ชูแมน

1.6.4 นำข้อมูลแบบจำลองในขั้นที่ 1.6.3 มาสร้างแบบจำลองการสันดาปในถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอกโดยนำข้อมูลอัตราการเผาไหม้ที่ได้จากเครื่องสมมูลความร้อนมาคำนวณด้วยโปรแกรมแมทแล็บ

1.6.5 นำผลจากแบบจำลองที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ได้จากการคำนวณผลแม่นยำตรง และเปรียบเทียบความยาวเปลวไฟที่วัดได้จากการทดลอง

1.6.6 ปรับเปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตแบบจำลองให้สอดคล้องกับการสันดาปในถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอกของจริงให้มากที่สุด

1.6.7 จัดทำวิทยานิพนธ์

1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย

1.7.1 ข้อมูลเชิงวิชาการสำหรับกำหนดลักษณะเฉพาะของการสันดาปของเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งจากการทดสอบ

1.7.2 เงื่อนไขและแบบจำลองการไหลของก๊าซผ่านเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งเพื่อใช้สำหรับการคำนวณการให้ความร้อนจากการสันดาป และเป็นข้อมูลเพื่อการออกแบบห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดแท่งสำหรับเตาเผาอุตสาหกรรมแบบต่างๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีเกี่ยวกับเปลวไฟและการเผาไหม้

การใช้ประโยชน์จากการเผาไหม้และการพัฒนาเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอกเพื่ออุตสาหกรรมต่างๆ รวมทั้งนำไปใช้ในครัวเรือนได้โดยให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดนั้นเป็นโจทย์วิจัยที่ซับซ้อน ทั้งนี้เพราะเชื้อเพลิงอัดแท่งซึ่งประกอบขึ้นจากวัสดุประสาน เชื้อเพลิงแข็ง ฯลฯ ทำให้การกำหนดลักษณะเฉพาะของการสันดาปทำได้โดยยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษากระบวนการเผาไหม้ตามธรรมชาติและพฤติกรรมของการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงแข็ง โดยที่เชื้อเพลิงอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง , ของเหลว , หรือก๊าซก็ได้ เพื่อรับรู้ถึงลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งได้ชัดเจนดังบรรยายไว้ในหัวข้อ 2.1

ในหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3 ได้อธิบายกลไกการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง และแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การแพร่ของก๊าซในเนื้อวัสดุของเชื้อเพลิงแข็งตามลำดับ ซึ่งผู้วิจัยใช้แบบจำลองดังกล่าวในการสร้างความเข้าใจเรื่องการทำเนิดและการแพร่ของก๊าซเชื้อเพลิงภายในเนื้อของเชื้อเพลิงแข็ง หัวข้อ 2.6 แสดงสมมุติฐานและสมการการของการเผาไหม้ของก๊าซเชื้อเพลิงกับอากาศหลังจากที่ก๊าซเชื้อเพลิงได้แพร่ออกจากเชื้อเพลิงแข็งสู่บรรยากาศ ทฤษฎีในส่วนท้ายนี้เป็นเนื้อหาหลักที่จะได้ประยุกต์กับปัญหาเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งจะได้แสดงในรายละเอียดในบทที่ 3 ต่อไป

2.1 การเผาไหม้และการเกิดเปลวไฟตามธรรมชาติ

กระบวนการเผาไหม้ในธรรมชาติ [15] นั้น สามารถแบ่งตามลักษณะสาเหตุการเกิดเปลวไฟได้ 4 กระบวนการ ได้แก่

2.1.1 ดิฟฟิวชันเฟลม (Diffusion Flames)

เป็นกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเมื่อเชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นก๊าซ (Fuel Gas) แพร่หาออกซิเจนเพื่อไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยเชื้อเพลิงและออกซิเจนอยู่คนละด้านของเปลวไฟ เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของก๊าซทั้งสองต่างกัน ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทเชิงมวล ในลักษณะการแพร่ของเชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นก๊าซและออกซิเจนเข้าสู่เปลวไฟ ซึ่งทั้งนี้จะต้องมีสัดส่วนการผสมและปริมาณพลังงานกระตุ้นปฏิกิริยาพอเหมาะ เปลวไฟที่เกิดจากกระบวนการนี้สามารถยกตัวอย่างได้แก่ เปลวไฟที่อยู่บนเทียน โดยเปลวไฟจากเทียนจะทำให้ขี้ผึ้งของเทียนจะระเหยออกไปเป็นเชื้อเพลิงในสถานะก๊าซไปทำกับออกซิเจนทำให้เปลวไฟ กลไกการเผาไหม้นี้ดำเนินต่อไปจนกว่าขี้ผึ้งจะระเหยไปจนหมดหรือไม่มีออกซิเจนมากพอที่ทำปฏิกิริยาการเผาไหม้

เปลวเทียนดังกล่าวข้างต้นมีลักษณะการเผาไหม้และการไหลของก๊าซเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) สามารถจัดเป็นเปลวแบบลามินาร์ดีฟิวชันเฟลม (Laminar Diffusion Flames) ซึ่งกระบวนการเผาไหม้ถูกควบคุมโดยการแพร่ของสารประกอบบริสุทธิ์ (Pure Substance) และในกรณีอื่นๆ ที่เปลวไฟที่มีความสูงมากกว่า 1 ฟุตขึ้นไปโดยประมาณ เปลวไฟจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและมีลักษณะลูกของเปลวไฟแบบปั่นป่วน (Turbulence) จะสามารถจัดเปลวไฟชนิดว่าเป็นเทอร์บูเลนซ์ดีฟิวชันเฟลม (Turbulence Diffusion Flames) สำหรับเปลวไฟที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้อยู่ภายใต้สมมุติฐานที่เปลวไฟเป็นเปลวไฟแบบลามินาร์

2.1.2 สโมล์เดอร์ริง (Smoldering)

เป็นกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งจะเกิดขึ้นก้นระหว่างออกซิเจนในอากาศไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง (Solid Fuel) ทำให้ผิวที่บริเวณทำปฏิกิริยากับออกซิเจนโดยจะลุกลาม (Growing) ลึกลงไปในผิวของแข็ง ซึ่งความเร็วของลุกไหม้ของกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง แต่โดยทั่วไปความเร็วในการลุกลามของไฟที่เกิดจากกระบวนการนี้จะอยู่ที่ประมาณที่ 1 - 5 มิลลิเมตรต่อวินาที เมื่ออุณหภูมิที่ผิวเชื้อเพลิงมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ในกระบวนการนี้จะเกิดการเผาไหม้จนเกิดเปลวไฟได้เมื่อมีความร้อนรวมถึงอัตราการไหลของอากาศมากขึ้น ตัวอย่างของกระบวนการเผาไหม้นี้ได้แก่ การไหม้ของบุหรี เป็นต้น

2.1.3 สปอนเทเนียสคอมบัสชัน (Spontaneous Combustion)

เมื่อเชื้อเพลิงที่ได้สัมผัสกับอากาศภายใต้สภาวะที่เกื้อหนุนให้ปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จนทำให้ไม่เกิดการเผาไหม้หรือถ้าเกิดการเผาไหม้ก็จะมีลักษณะช้ามากคล้ายกับลักษณะการเผาไหม้ในกระบวนการแบบสโมล์เดอร์ริง พลังงานที่ปลดปล่อยจากปฏิกิริยาเคมีจะไปชดเชยกับพลังงานความร้อนที่จากเชื้อเพลิงถ่ายโอนให้กับสิ่งแวดล้อม ถึงอย่างไรก็ตามหากอัตราการสูญเสียความร้อนน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมี จะทำให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงจะสูงขึ้น ซึ่งนำมาสู่การเกิดขึ้นปฏิกิริยาทางเคมีเร็วขึ้นและเกิดการเป็นเผาไหม้ในที่สุด ดังนั้นเมื่อใดก็ตามเมื่อมีการกักเก็บเชื้อเพลิงจำนวนมาก โอกาสที่เกิดการเผาไหม้ลักษณะนี้จะสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ต้องขึ้นอยู่กับอัตราสูญเสียความร้อน (Heat Loss) ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงและอากาศนั้น ตัวอย่างของการเผาไหม้ตัวเอง เช่น การลุกไหม้ด้วยตัวเองของถ่านหิน

2.1.4 พรีเม็กซ์เฟลม (Premix Flames)

เป็นกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดจากการรวมตัวของเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซกับออกซิเจนในอากาศก่อนจะมีการจุดระเบิด ซึ่งพบกระบวนการเผาไหม้นี้ได้จากการทำงานในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนโดยเมื่อมีการจุดระเบิดซึ่งเป็นการเผาไหม้ในปริมาตรจำกัดทำให้เกิดความดันในกระบอกสูบนั่นสูงขึ้นกะทันหัน เนื่องจากการระเบิดของเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากบริเวณจุดระเบิดนั่นเอง

จากกระบวนการเผาไหม้ตามธรรมชาติทั้งสี่นี้ จะพบว่า ในเชื้อเพลิงของแข็งที่ศึกษาจะมี

กระบวนการเผาไหม้ผสมกัน 3 กระบวนการได้แก่ สปอนแทเนียสคอมบัสชัน แบบสโมล์เดอร์ริง และดีฟิวชันเฟลมตามลำดับ ซึ่งกระบวนการเผาไหม้ทั้งสามนี้จะนำมาพิจารณาพฤติกรรมของการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงของแข็งได้ในหัวข้อต่อไป

2.2 พฤติกรรมของการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงของแข็ง

ในเชื้อเพลิงแข็ง [16] ทั่วไปประกอบด้วยธาตุที่เป็นองค์ประกอบของการสันดาป เช่น คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และอาจสารประกอบอื่นๆ เช่น ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน เป็นต้น โดยมีระดับความชื้นอยู่ในเชื้อเพลิงอยู่ที่ 2 - 20 % ของเชื้อเพลิงแข็งในระดับปกติแต่อาจจะมีระดับความชื้นสูงถึง 70 % ของเชื้อเพลิงของแข็งซึ่งจะขึ้นอยู่กับการเก็บรักษาด้วย ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงของแข็งมีอยู่ 4 ส่วนด้วยกัน คือ ความชื้น (Moisture) , เชื้อเพลิงของแข็งดิบ (Raw Fuel) , ชาร์ (Char) , และขี้เถ้า (Ash) และในส่วนพฤติกรรมของการเผาไหม้ในของแข็งนั้น จะมีอยู่ 2 ส่วน ได้แก่

2.2.1 การระเหยกกลายเป็นก๊าซของเชื้อเพลิงแข็ง (Devolatilization of The Solid Fuel)

เมื่อเชื้อเพลิงแข็งดิบได้รับความร้อนสูงพอที่สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ โดยเปอร์เซ็นต์ของความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งทั้งหมดจะสลายไปจากเชื้อเพลิงแข็งอย่างง่ายดายตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นและจะทำให้ก๊าซแพร่ออกจากตัวเชื้อเพลิง ในส่วนที่เกิดการเปลี่ยนสถานะสามารถดูได้จากน้ำหนักที่หายไปของน้ำหนักตั้งต้นของเชื้อเพลิงแข็ง และในกระบวนการนี้ใช้เวลาเพียงเสี้ยววินาทีจนถึงหลายนาทิจาจะขึ้นอยู่กับขนาด ประเภทของถ่าน และรวมไปถึงอุณหภูมิของของแข็งด้วย

2.2.2 ปฏิกิริยาการรวมตัวออกซิเจนที่ชาร์ (Oxidation of The Residual Char)

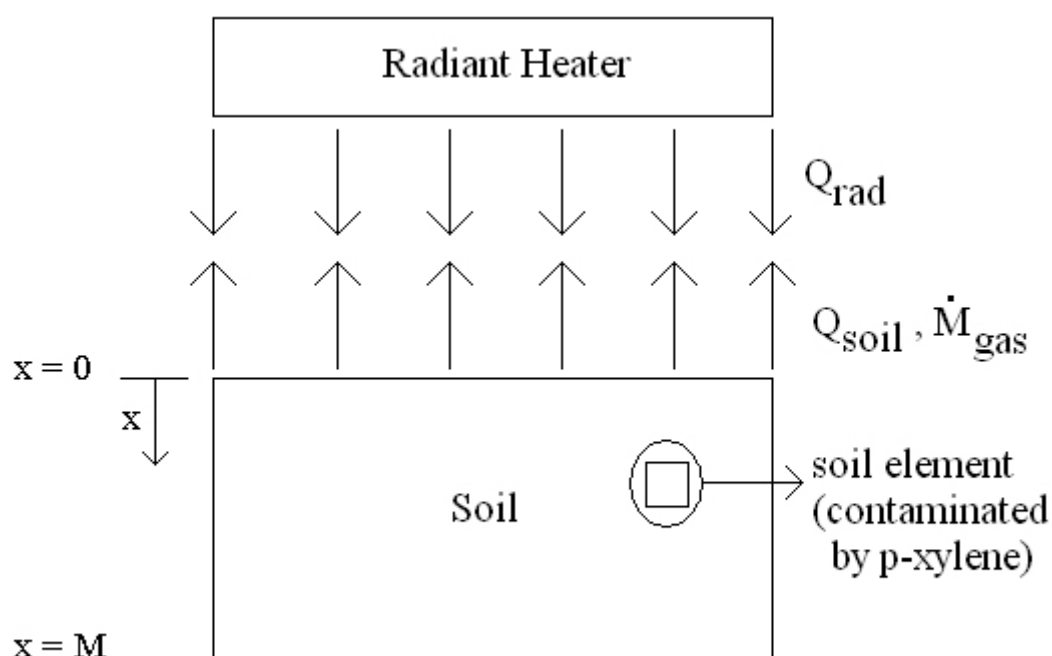
ชาร์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่มีอุณหภูมิสูง โดยออกซิเจนจะแพร่และทำปฏิกิริยาที่ผิวของชาร์ แต่พฤติกรรมในส่วนการทำปฏิกิริยาออกซิเจนที่ชาร์นี้จะเกิดช้ากว่าในพฤติกรรมการระเหยกกลายเป็นก๊าซของเชื้อเพลิงแข็ง การเผาไหม้จากพฤติกรรมในส่วนนี้จะเกิดขึ้นช้าหรือเร็ว นั้น จะขึ้นอยู่กับขนาด ประเภท อุณหภูมิ ความดันของเชื้อเพลิงแข็ง คุณสมบัติของเชื้อเพลิงในส่วนของชาร์ และความเข้มข้นของออกซิเจนที่จะทำปฏิกิริยาด้วย

จากสองพฤติกรรมของการเผาไหม้ที่ได้กล่าวมานี้ อาจเกิดพร้อมกันก็ได้ ถ้าเชื้อเพลิงแข็งมีอัตราความร้อนสูงมากๆ และจากการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้นี้จะพบว่าการศึกษาในส่วนปฏิกิริยาการรวมตัวออกซิเจนกับชาร์มีความซับซ้อนเกินกว่าจะทำการศึกษาในงานวิทยานิพนธ์นี้ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาในส่วนการระเหยกกลายเป็นก๊าซของเชื้อเพลิงของแข็งเท่านั้น โดยจะศึกษาการเกิดสารระเหยและการแพร่ของก๊าซจากภายในของแข็งสู่บรรยากาศโดยใช้แบบจำลองของการทำความสะอาดดิน [13] เป็นตัวอย่าง

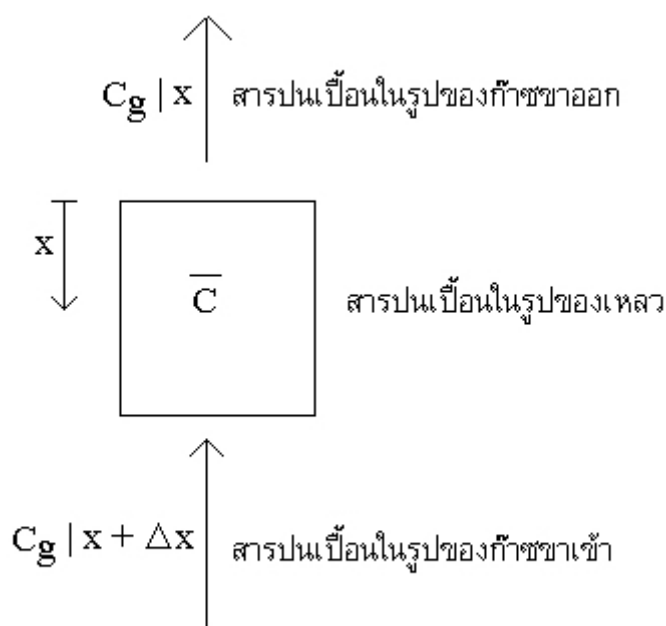
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การแพร่ของก๊าซในแข็ง

สำหรับการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีส่วนผสมหลักเป็นเศษถ่านหิน ลิกไนต์ โดยมีองค์ประกอบคาร์บอนอยู่ในรูปของสารระเหยเป็นหลัก โดยสารระเหยนี้จะแพร่ผ่านรูพรุนในเนื้อถ่านออกมาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศภายนอกเนื้อถ่านเมื่อถ่านเชื้อเพลิงได้รับความร้อน

ในการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดสารระเหยและการแพร่ของก๊าซจากภายในของแข็งสู่บรรยากาศจะยกปัญหาการทำความสะอาดดินโดยใช้ความร้อนเป็นแบบจำลองเพื่อการศึกษา การเกิดสารระเหยและการแพร่ของก๊าซจากภายในของแข็งสู่บรรยากาศ



ภาพที่ 2-1 การกำจัดสารปนเปื้อนในดินด้วยความร้อน



ภาพที่ 2-2 แบบจำลองของสารปนเปื้อนที่อยู่ในดิน

จากภาพที่ 2-1 เป็นแบบจำลองการทำความสะอาดดินโดยความร้อนซึ่งประกอบด้วยดินและเครื่องทำความร้อนด้วยรังสีและสารปนเปื้อนที่อยู่ในดินนี้จะใช้สารพีไซลีน (p-xylene) เป็นสารปนเปื้อนอยู่ในรูปของเหลว เมื่อให้ความร้อนแก่ดินแล้วทำให้สารปนเปื้อนในรูปของเหลวจะระเหยกลายเป็นก๊าซและแพร่ออกไปจากเนื้อดินผ่านรูพรุนของเนื้อดิน โดยที่มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่อยู่ในรูปทั้งของเหลวและก๊าซเป็นตัวแสดงปริมาณของสารระเหยและการแพร่ของก๊าซจากภายในของแข็งสู่บรรยากาศ และความร้อนจะเป็นตัวที่ทำให้สารปนเปื้อนที่อยู่ในดินทั้งที่เป็นของเหลวและก๊าซระเหยแล้วแพร่ออกจากดินไปตามรูพรุนของดินสู่บรรยากาศข้างนอกซึ่งความร้อนจะมีลักษณะการกระทำได้ดังกล่ามาแล้วจนกว่าสารปนเปื้อนที่อยู่ในดินหมดไป

และจากแบบจำลองในภาพที่ 2-2 นี้สามารถใช้สมการต่างๆ เพื่อหาผลเฉลยหรือผลลัพธ์ของปัญหานี้ได้โดยสามารถเขียนเป็นสมการของสารปนเปื้อนในรูปก๊าซ ของเหลว และอุณหภูมิ

2.3.1 ความเข้มข้นของก๊าซ

ความเข้มข้นของก๊าซในดินขึ้นอยู่กับ การแพร่กระจายของก๊าซในดินและความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงของสารปนเปื้อนที่อยู่ในดิน ดังนั้นจะคำนวณหาความเข้มข้นของก๊าซในดินได้โดย

$$\left[\begin{array}{c} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{ความเข้มข้นของก๊าซ} \\ \text{ต่อเวลา} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{ความเข้มข้นของก๊าซ} \\ \text{ต่อพื้นที่} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{ความเข้มข้นของสาร} \\ \text{ปนเปื้อนในดินต่อเวลา} \end{array} \right]$$

$$\frac{\partial C_g}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\text{eff}} \frac{\partial C_g}{\partial x} \right) - \frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} \quad \text{โดยที่ } 0 < x < M \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial C_g}{\partial x} = 0 \quad \text{โดยที่ } x = M \quad (2-2)$$

$$C_g = 0 \quad \text{โดยที่ } x = 0 \quad (2-3)$$

โดยที่

C_g คือ ความเข้มข้นของก๊าซ ($\text{kg} / (\text{mol} \cdot \text{m}^3)$)

t คือ เวลา (s)

x คือ ความลึกของดิน (m)

ε คือ ความพรุนของดิน

ρ คือ ความหนาแน่นของดิน (kg / m^3)

$\bar{C}$ คือ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในดิน ($\text{kg} / (\text{mol} \cdot \text{kg of soil})$) สามารถดูได้ในหัวข้อ 2.3.2

D_{eff} คือ สภาพแพร่ยังผล (Effective Diffusivity, m^2 / s) สามารถคำนวณจาก

$$D_{\text{eff}} = \varepsilon^2 D_{\text{ab}}$$

โดยที่

D_{ab} คือ สภาพแพร่โมเลกุล (Molecular Diffusivity, m^2 / s) สามารถคำนวณจาก

$$D_{\text{ab}} = 7.0 \times 10^{-6} [T/298]^{1.5}$$

2.3.2 ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในดิน

ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในดินจะสูญหายเนื่องจากความร้อนที่อยู่ในดินจึงมีการแพร่กระจายในดิน ดังนั้นการคำนวณหาความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในดินได้โดย

$$\left[\begin{array}{l} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{ความเข้มข้นของสาร} \\ \text{ปนเปื้อนในดินต่อเวลา} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{ส่วนประกอบต่างๆ} \\ \text{ในดิน 1 อนุภาค} \end{array} \right]$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{12D_{ab}}{d_p^2} \frac{(1-\epsilon)}{\rho} (C_g - C_{sat}) \quad \text{โดยที่ } x > 0 \quad (2-4)$$

$$\bar{C} = 0 \quad \text{โดยที่ } x = 0 \quad (2-5)$$

โดยที่

d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคดิน (m)

C_{sat} คือ ความเข้มข้นของก๊าซที่ผิวของอนุภาคดิน ($\text{kg} / (\text{mol} \cdot \text{m}^3)$) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$C_{sat} = \frac{A}{R_1 T} \exp\left(\frac{\Delta H_{ad}}{RT}\right) \quad (2-6)$$

โดยที่

A คือ พรีเอ็กซ์โพเนนเชียลแฟกเตอร์ (Preexponential Factor , atm)

R คือ ค่าคงที่ก๊าซ (Gas Constant , cal / (g·mol·K))

R_1 คือ ค่าคงที่ก๊าซ (Gas Constant , $\text{m}^3 \cdot \text{atm} / (\text{kg} \cdot \text{mol})$)

ΔH_{ad} คือ ความร้อนของการดูดซับ (Heat of Adsorption , cal / (g·mol)) คำนวณได้จาก

$$\Delta H_{ad} = -\Delta H_{vap} \quad \text{ถ้า } \bar{C} > C_{crit} \quad (2-7)$$

และ

$$\Delta H_{ad} = H_1 \ln (\bar{C} / C_{crit}) - \Delta H_{vap} \quad \text{ถ้า } \bar{C} < C_{crit} \quad (2-8)$$

โดยที่

ΔH_{vap} คือ ความร้อนของการระเหย (Heat of Vaporization , cal / (g·mol))

H_1 คือ ความร้อนที่ได้การทดลองจริง (cal / (g·mol))

C_{crit} คือ ความเข้มข้นวิกฤต (Critical Concentration , $\text{kg} / (\text{mol} \cdot \text{m}^3)$)

2.3.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิในดินจะมีการแพร่ความร้อนในดินซึ่งสามารถคำนวณอุณหภูมิภายในดินได้โดย

อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลา = อัตราการแพร่กระจายของอุณหภูมิต่อพื้นที่

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{โดยที่ } 0 < x < M \quad (2-9)$$

โดยที่

T คือ อุณหภูมิ (K)

α คือ สภาพแพร่ความร้อน (Thermal Diffusivity , m^2 / s) คำนวณได้จาก

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

โดยที่

k คือ สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity , $W / (m \cdot K)$)

C_p คือ ความจุความร้อน (Heat Capacity , $J / (kg \cdot K)$)

อุณหภูมิที่บริเวณผิวด้านบนของดินจะเกิดความร้อนขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทความร้อน การนำความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนที่บริเวณผิวดิน ดังนั้น

$$q_{\text{conv}} + q_{\text{cond}} + q_{\text{rad}} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\sigma e}{k} (T^4 - T_s^4) + \frac{h}{k} (T - T_g) \quad \text{โดยที่ } x = 0 \quad (2-10)$$

โดยที่

σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน - บอลต์สแมนน์ (Stefan - Boltzmann Constant) จะมีค่า

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

e คือ สภาพเปล่งรังสี (Emissivity)

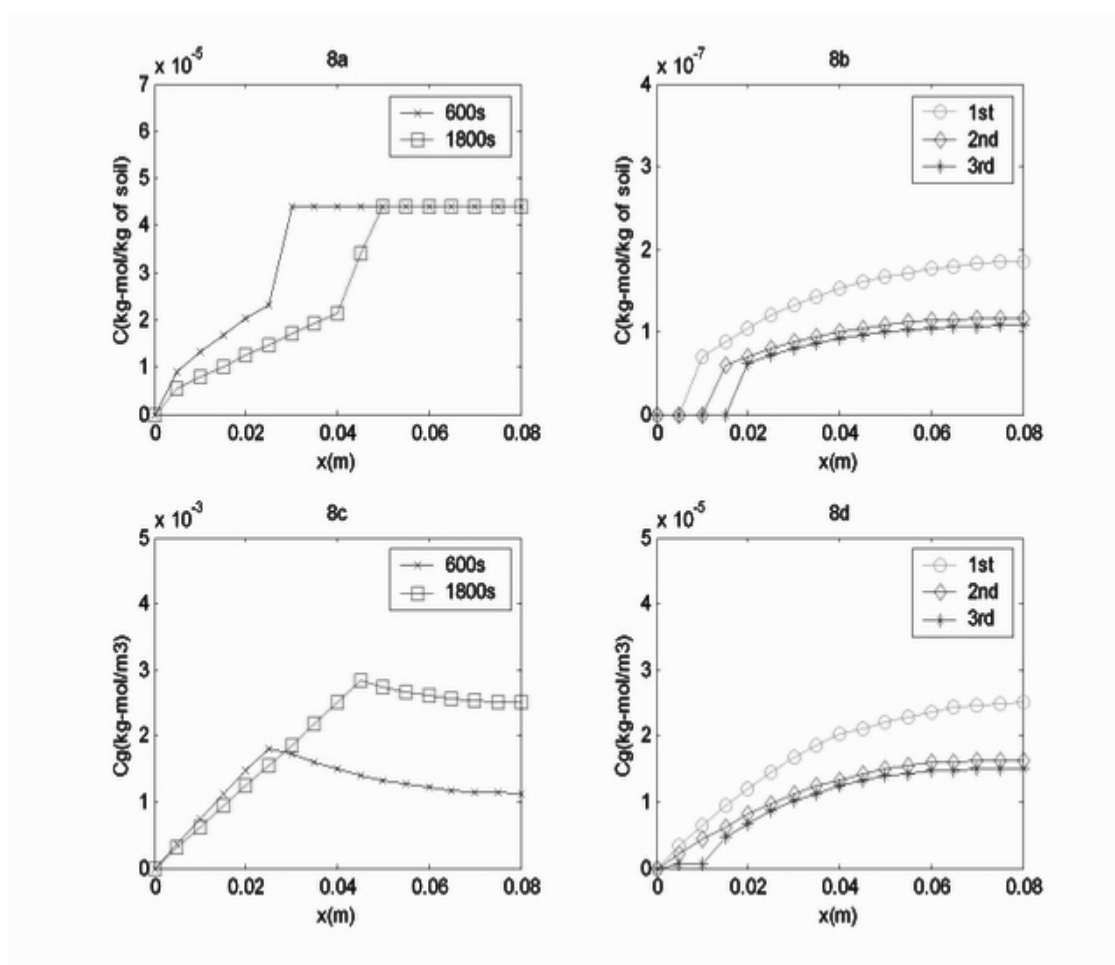
h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (Heat - Transfer Coefficient , $W / (m^2 \cdot K)$)

T_s คือ อุณหภูมิของเครื่องทำความร้อนด้วยรังสี (Radiant Heater , K)

T_g คือ อุณหภูมิของก๊าซที่อยู่เหนือผิวดิน (K)

อุณหภูมิที่บริเวณผิวด้านล่างของดินกำหนดคุณสมบัติทางความร้อนเป็นผนัง ดังนั้น

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{โดยที่ } x = M \quad (2-11)$$

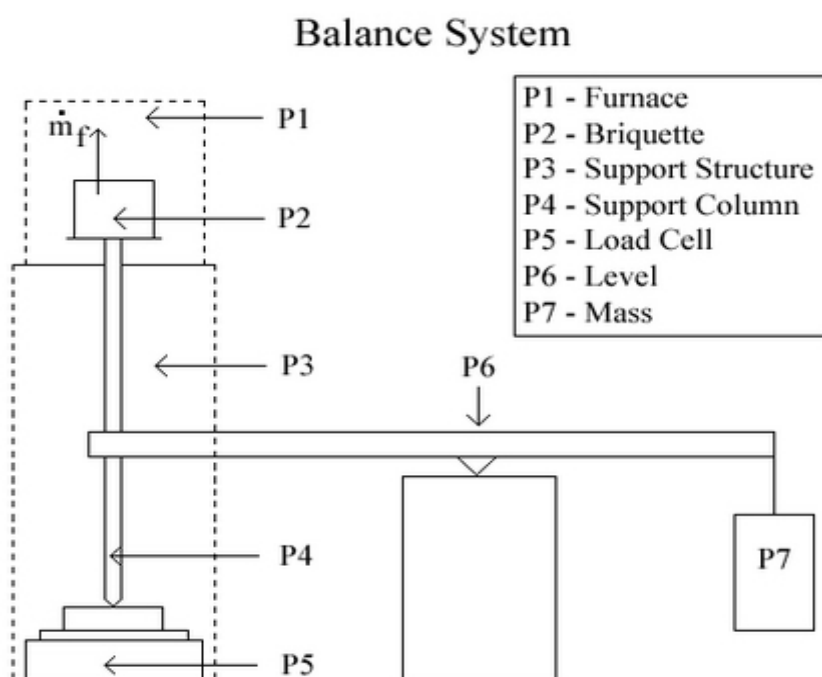


ภาพที่ 2-3 ผลเฉลยความเข้มข้นก๊าซ และของเหลวที่เวลาต่างๆ

2.4 อุปกรณ์ฆ่าเชื้ออากาศสูญเสียมวล

แม้เทียบเคียงกับแบบจำลองของกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งโดยเฉพาะส่วนของการแพร่ของก๊าซเชื้อเพลิงผ่านรูพรุนในเชื้อเพลิงแข็งก็ตาม แต่การระเหยในกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งมีความซับซ้อนมากกว่าการระเหยในแบบจำลองการทำความสะอาดดินโดยใช้ความร้อน โดยเฉพาะกระบวนการการเป็นไอของกระบวนการการระเหย (Devolatilization) ของเชื้อเพลิงเป็นการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นก๊าซ แต่สารปนเปื้อนที่อยู่ในดินนั้นจะเป็น

การเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นก๊าซ เพราะฉะนั้นสามารถทำการหาอัตราการเผาไหม้ (Burning Rate) ของเชื้อเพลิงด้วยการวัดหาค่าโดยตรงโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักที่ออกแบบโดย ยุทธนาและอัมรินทร์ [14] ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 แผนผังระบบชั่งน้ำหนัก

ภาพที่ 2-4 แสดงแผนผังระบบชั่งน้ำหนักเนื่องจากไม่สามารถชั่งน้ำหนักของถ่านโดยตรงเนื่องจากมวลของถ่าน (P2) และก้านชั่งน้ำหนัก (P4) รวมกันมีน้ำหนักมากกว่า 300 กรัม ดังนั้นใช้ถ่าน (P6) มายึดติดกับก้านชั่งน้ำหนักและใช้ก้อนน้ำหนัก (P7) มาถ่วงน้ำหนักของถ่านเพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดในการชั่งน้ำหนักของมวลของถ่าน (P2) และก้านชั่งน้ำหนัก (P4) ออกไป

และจากเครื่องชั่งน้ำหนักดังภาพที่ 2-4 นี้จะสามารถหาอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ โดยให้น้ำหนักที่หายไปของถ่านในขณะทำการเผาไหม้เทียบกับเวลาที่เผาไหม้ ซึ่งอัตราการหายไปของมวลเชื้อเพลิงแข็งจะใช้เป็นอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านอัดแท่งแล้วจะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองการเกิดเปลวไฟจากการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิงต่อไป

2.5 หลักการชวบเซลโดวิก (Shvab Zel 'Dovic Formulation) สำหรับการเผาไหม้

ในการศึกษาการไหลของเชื้อเพลิงตามรูปพิกัดของถ่านเชื้อเพลิงนั้นจะพิจารณาการไหลสถานะคงตัว (Steady - State) ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคอนทินิวิตี้ (Equations of Continuity) [17] ของสาร n จะได้

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla Y_n - (\rho V) Y_n] = -\omega_n \quad (2-12)$$

โดยที่

D คือ สภาวะแพร่เชิงมวล (Mass Diffusivity , m^2 / s)

Y_n คือ แผลกส่วนของสาร n (Mass Fraction of n)

V คือ ความเร็วการไหล (m^2 / s)

ω_n คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสาร n ($kg / (m^3 \cdot s)$)

จากสมการ (2-12) มาเขียนในรูปจำนวนโมล

$$\alpha_n = \frac{Y_n}{W_n (v_n'' - v_n')} \quad (2-13)$$

$$M_n = \frac{\omega_n}{W_n (v_n'' - v_n')} \quad (2-14)$$

โดยที่

W_n คือ มวลโมเลกุลของสาร n ($kg / kmol$)

v_n' คือ สัมประสิทธิ์สโตยจิโอเมตริกของตัวทำปฏิกิริยาของสาร n (Stoichiometric Coefficient of Reactant of n , kmol)

v_n'' คือ สัมประสิทธิ์สโตยจิโอเมตริกของตัวผลิตภัณฑ์ของสาร n (Stoichiometric Coefficient of Product of n , kmol)

นำสมการ (2-13) และ (2-14) มาแทนในสมการ (2-12) จะได้

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla \alpha_n - (\rho V) \alpha_n] = -M_n \quad (2-15)$$

แล้วให้ “n” ในสมการ (2-15) เป็นเชื้อเพลิงและออกซิเจนแล้วจะได้

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla \alpha_F - (\rho V) \alpha_F] = -M_F \quad (2-16)$$

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla \alpha_O - (\rho V) \alpha_O] = -M_O \quad (2-17)$$

พิจารณาการถ่ายเทความร้อนของก๊าซของค์ประกอบ n ด้วยสมการอนุรักษ์เชิงพลังงาน จะได้

$$\nabla \cdot \left[\frac{k}{C_p} \nabla (C_p T) - (\rho V) \cdot (C_p T) \right] = -\omega_n \Delta H_r \quad (2-18)$$

จากสมการ (2-18) จะแก้ปัญหาแบบชเวสโดวิก (Shvab Zel 'Dovic Formulation) ซึ่งกำหนดเงื่อนไข $Le = 1$ หรือ $\rho D = k / C_p$ ดังนั้นจะได้รูปสมการใหม่เป็น

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla (C_p T) - (\rho V) \cdot (C_p T)] = -\omega_n \Delta H_r \quad (2-19)$$

จากสมการ (2-19) จัดรูปใหม่ให้อยู่ในหน่วยพลังงานต่อมวลของออกซิเจนจะได้

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla \alpha_T - (\rho V) \alpha_T] = -M_O \quad (2-20)$$

โดยให้

$$\alpha_T = \frac{C_p T}{\Delta H_r W_O (v''_O - v'_O)} \quad (2-21)$$

โดยที่

ΔH_r คือ ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี (Heat of Reaction , J / kg of oxygen)

เนื่องจากตัวแปร M_F และ M_O ในสมการ (2-16) , (2-17) และ (2-20) มีค่าเท่ากันแล้วสร้างตัวแปรคู่ควบ (Coupling Function) สำหรับเชื่อมเพลิงกับออกซิเจน (β) และอุณหภูมิกับออกซิเจน (β_T) จะได้

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla \beta - (\rho V) \beta] = 0 \quad (2-22)$$

และ

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla \beta_T - (\rho V) \beta_T] = 0 \quad (2-23)$$

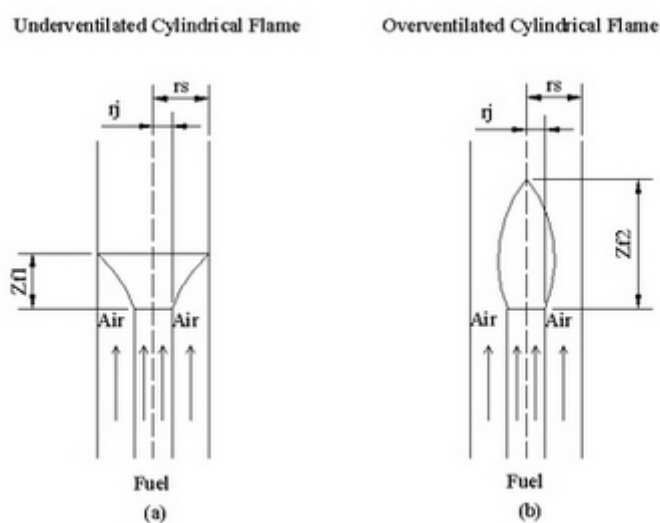
โดยที่

β คือ ตัวแปรคู่ควมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ($\beta = \alpha_F - \alpha_O$, kg^{-1})

β_T คือ ตัวแปรคู่ควมระหว่างอุณหภูมิกับออกซิเจน ($\beta_T = \alpha_T - \alpha_O$, kg^{-1})

2.6 สมมุติฐานพื้นฐานของเบิร์ค - ชูแมน (Burke - Schumann)

จากหัวข้อที่แล้วนั้นได้กล่าวถึงการไหลของเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ แต่ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาเฉพาะกระบวนการเผาไหม้แบบดิฟฟิวชันเฟลมเท่านั้น เพราะฉะนั้นแบบจำลองที่จะใช้ในการศึกษาการเผาไหม้นี้จะใช้แบบจำลองการสันดาปของเบิร์ค - ชูแมน [17] ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 แบบจำลองของการสันดาปของเบิร์ค - ชูแมน (จาก [17])

จากภาพที่ 2-5 จะพบว่า เปลวไฟในแบบจำลองนี้เกิดจากเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซในท่อเล็กแพร่กระจายหาออกซิเจนในอากาศในท่อใหญ่ที่อยู่ร่วมศูนย์กลางกัน เปลวไฟที่ได้จากแบบจำลองนี้จะมีอยู่สองชนิดด้วยกัน คือ

1. อันเดอร์เวนติเลทเต็ดเฟลม (Underventilated Cylindrical Flame)

เปลวไฟชนิดนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่ออากาศที่ต้องการในการเผาไหม้สมบูรณ์ไม่เพียงพอ โดยจะทำให้ทิศทางการลุกลามของเปลวไฟเลี้ยวโค้งเข้าหาออกซิเจนในอากาศซึ่งจะมีรูปร่างลักษณะ

และความสูงของเปลวไฟได้เท่ากับค่า Z_{f1} ดังภาพที่ 2 - 5a

2. โอเวอร์เวนติเลตเต็ดเฟลม (Overventilated Cylindrical Flame)

เปลวไฟชนิดนี้จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับอันเดอร์เวนติเลตเต็ดเฟลมคือ จะเกิดขึ้นในกรณีอากาศที่มีมากเกินไปพอต่อความต้องการในการเผาไหม้สมบูรณ์ โดยทำให้ทิศทางการลุกลามของเปลวไฟเลี้ยวโค้งเข้าหาเชื้อเพลิงซึ่งจะมีรูปร่างลักษณะและความสูงของเปลวไฟได้เท่ากับค่า Z_{f2} ดังภาพที่ 2 - 5b

เบิร์คและชูแมนได้ตั้งสมมุติฐานเกี่ยวกับการการสันดาปของดิฟฟิวชันเฟลม (Diffusion Flame) อย่างง่าย โดยสร้างแบบจำลองดังภาพที่ 2 - 5 และคุณสมบัติต่าง ๆ ของแบบจำลองนี้มีดังนี้

2.6.1 ณ บริเวณจุดปล่อยของก๊าซ ความเร็วการไหลของเชื้อเพลิงและออกซิเจนในอากาศในแต่ละท่อ มีความเร็วคงที่ , เท่ากัน และมีทิศทางการไหลไปตามท่อในแต่ละท่อ เป็นผลจากการแปรเปลี่ยนของรัศมีในแต่ละท่อเป็นอัตราส่วน “ $r_j^2/(r_s^2 - r_j^2)$ ”

2.6.2 ความเร็วของเชื้อเพลิงและออกซิเจนในอากาศที่พุ่งขึ้นออกจากท่อแต่ละท่อที่อยู่ในเปลวเพลิงนั้นจะมีความเร็วเท่ากันกับความเร็ว ณ บริเวณจุดปล่อยของก๊าซ (ไม่คิดความสูญเสียภายในท่อ (Friction Loss))

2.6.3 ค่า ρD เป็นค่าคงที่

2.6.4 การแพร่กระจายของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในอากาศในตามแกนยาวจะน้อยมากจนไม่มีผลต่อการแพร่กระจายเมื่อเทียบกับการแพร่กระจายตามแนวรัศมี

$$\frac{\partial^2 Y_i}{\partial r^2} \gg \frac{\partial^2 Y_j}{\partial z^2}$$

2.6.5 เนื่องจากการผสมของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในอากาศเกิดจากการแพร่กระจายเท่านั้น ดังนั้นความเร็วตามแนวรัศมีจึงเท่ากับ 0 ($V_r = 0$)

2.6.6 ปฏิกริยาทางเคมีของการเผาไหม้เป็นการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ ($\phi = 1$, ณ. ผิวของเปลวไฟ)

จากข้อสมมุติฐานของเบิร์คและชูแมนนี้จะนำสมการ (2-22) และ (2-23) มาจัดรูปสมการใหม่แล้วจะได้

$$\frac{\partial \beta}{\partial z} = \frac{D}{V_z r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \beta}{\partial r} \right) \quad (2-24)$$

และ

$$\frac{\partial \beta_T}{\partial z} = \frac{D}{V_z r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \beta_T}{\partial r} \right) \quad (2-25)$$

โดยมีขอบเขตเงื่อนไข (Boundary Condition) จากภาพที่ 2-5 คือ
ในสมการ (2-24)

$$\beta = \beta_F = -\frac{(Y_F)_{z=0}}{W_F v'_F} \quad \text{โดยที่} \quad 0 \leq r \leq r_j, z = 0$$

$$\beta = \beta_O = \frac{(Y_O)_{z=0}}{W_O v'_O} \quad \text{โดยที่} \quad r_j \leq r \leq r_s, z = 0$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial r} = 0 \quad \text{โดยที่} \quad r = 0 \text{ หรือ } r = r_s, z > 0$$

และในสมการ (2-25)

$$\beta_T = (\beta_T)_F = -\frac{(C_P)_F T}{\Delta H_r W_O v'_O} \quad \text{โดยที่} \quad 0 \leq r \leq r_j, z = 0$$

$$\beta_T = (\beta_T)_O = \frac{(Y_O)_{z=0}}{W_O v'_O} - \frac{(C_P)_A T}{\Delta H_r W_O v'_O} \quad \text{โดยที่} \quad r_j \leq r \leq r_s, z = 0$$

$$\frac{\partial \beta_T}{\partial r} = 0 \quad \text{โดยที่} \quad r = 0 \text{ หรือ } r = r_s, z > 0$$

โดยที่

r คือ ความยาวตามรัศมี (m)

z คือ ความสูง (m)

r_j คือ รัศมีของท่อเล็ก (m)

r_s คือ รัศมีของท่อใหญ่ (m)

การสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอกนั้น จะใช้สมมุติฐานตามแบบจำลองการสันดาปของเบิร์ค – ชูแมนในการคำนวณรูปร่างเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการสันดาปของก๊าซเชื้อเพลิงที่ระเหยจากถ่านอัดแท่งและอากาศภายนอก

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลเฉลยการเผาไหม้

ถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอก

จากการเผาไหม้และการเกิดเปลวไฟ รวมทั้งพฤติกรรมของการเผาไหม้ของของแข็งที่ได้กล่าวมาในบทที่แล้วนั้นเป็นหลักฐานพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอกในภาพที่ 3-1 การเผาไหม้จะทำการศึกษาเฉพาะในส่วนที่เป็นก๊าซเท่านั้น โดยอัตราการเชิงมวลของก๊าซเชื้อเพลิงที่แพร่ออกจากก้อนถ่านหาโดยตรงจากการชั่งน้ำหนักถ่านที่หายไปต่อเวลาดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4 ส่วนการเผาไหม้ของก๊าซเชื้อเพลิงกับอากาศจะใช้หลักการแบบชเวบเซลโดวิกและสมมติฐานของเบิร์ค - ชูแมนตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ



(a) Front View



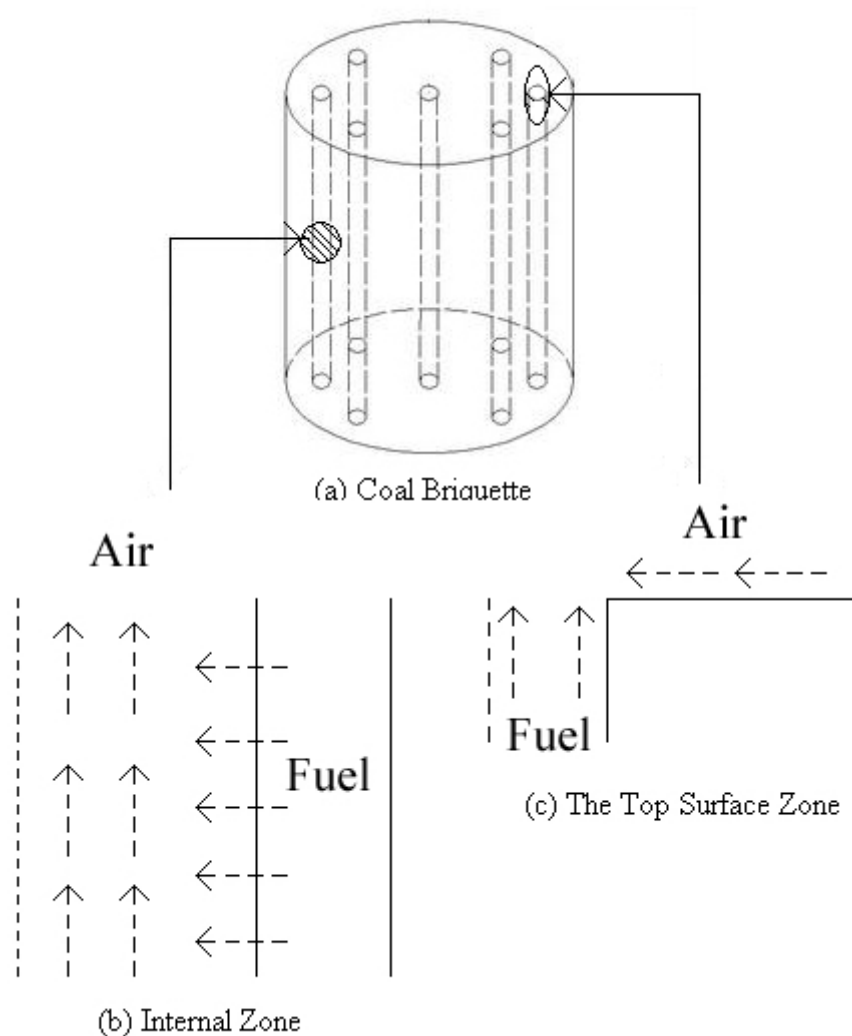
(b) Top View

ภาพที่ 3-1 ถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอก

3.1 พฤติกรรมการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิง

จากภาพที่ 3-1 ขนาดของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอกมีความสูง 12 ซม. (ในภาพที่ 3-1a) มีรัศมีของตัวถ่าน 6 ซม. โดยมีช่องอากาศอยู่จำนวน 16 ช่องและแต่ละช่องอากาศมีรัศมี 0.5 ซม. (ในภาพที่ 3-1b) จากลักษณะของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งดังกล่าวพบว่า

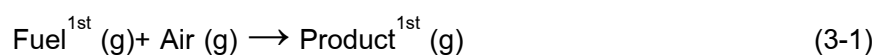
พฤติกรรมการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งเป็น 2 ส่วนคือ บริเวณภายในถ่านและบริเวณผิวของถ่านดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 แบบจำลองของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอก

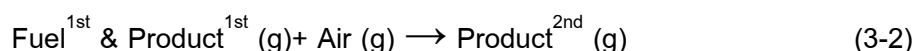
3.1.1 บริเวณภายในถ่าน (Internal Zone)

อากาศในช่องอากาศจะไหลผ่านไปตามช่องอากาศ และเชื้อเพลิงในรูพรุนของถ่านจะแพร่หาอากาศในช่องอากาศ (ภาพที่ 3-2b) ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ดังสมการ



3.1.2 บริเวณด้านบนของถ่าน (The Top Surface Zone)

เชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ในช่องอากาศจะไหลออกจากช่องอากาศแล้วจะแพร่หาอากาศข้างนอกและทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ช่องอากาศ (ภาพที่ 3-2c) จะได้สมการ



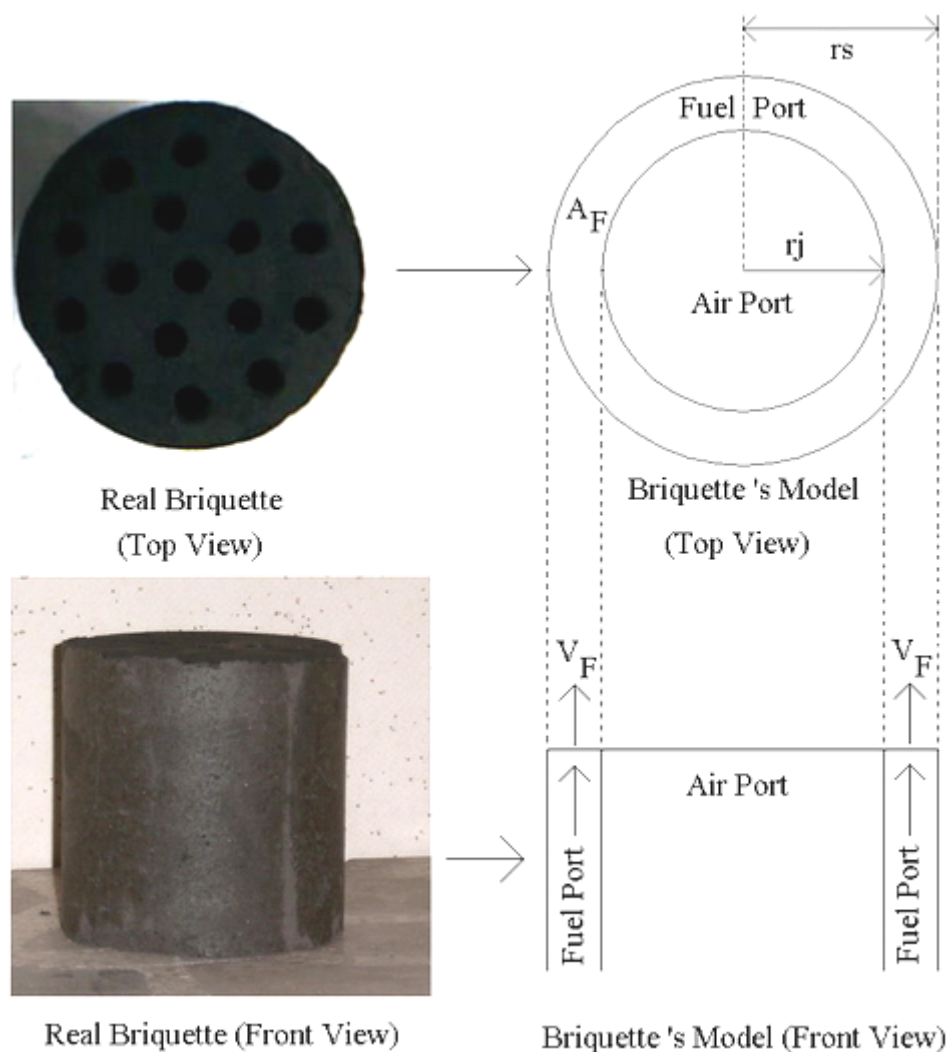
กรณีนี้จะเกิดเมื่อการเผาไหม้บริเวณภายในถ่านเป็นแบบแอนเดอร์เวนติเลทเต็ดเฟลมและภายใต้ $\text{Product}^{1\text{st}}$ เป็นตัวทำเจือจาง (Diluent)

3.2 การสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิง

เนื่องจากพฤติกรรมของเชื้อเพลิงและออกซิเจนในอากาศทั้งสองส่วนดังภาพที่ 3-2 นั้นจะสอดคล้องกันกับแบบจำลองการสันดาปของดีฟฟิวชันเฟลมอย่างง่ายดังภาพที่ 2-5 เพราะฉะนั้นการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอกนั้นจึงแบ่งจำลองเป็น 2 ส่วน คือ แบบจำลองภายในถ่านและแบบจำลองบนผิวของถ่าน

3.2.1 แบบจำลองภายในถ่าน

เป็นการจำลองการแพร่กระจายของเชื้อเพลิงทั้งหมดที่อยู่ในรูปพรุนของถ่านเชื้อเพลิงให้เป็นการไหลผ่านช่องวงแหวนเพียงช่องเดียว ในขณะที่เดียวกันรวมเอาการไหลของอากาศทุกช่องให้เป็นไหลเพียงช่องเดียว เช่นเดียวกับดังภาพที่ 3-3 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนถ่านอัดแท่งจริง (Real Briquette) มาเป็นแบบจำลองถ่าน (Briquette 's Model) โดยหาค่า r_j และ r_s ในแบบจำลองคำนวณหาค่าได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3-3 ถ่านอัดแท่งจริงและแบบจำลองถ่าน

หาค่า r_j โดยกำหนดให้ปริมาตรช่องอากาศในแบบจำลองเสมือนจริงมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรรวมช่องอากาศในแบบจำลองทางกายภาพจะได้

$$\pi \times (r_j)^2 = 16 \times \pi \times (0.5)^2$$

$$r_j = 2 \text{ ซม.}$$

หาค่า r_s โดยคำนวณจากความพรุนรวม (Bulk Porosity) ของถ่านเชื้อเพลิง (ϵ) ซึ่งเป็นสัดส่วนปริมาตรของรูพรุนของถ่านเชื้อเพลิงกับเนื้อถ่านทั้งหมด โดยค่าความพรุนของเชื้อเพลิงนั้นจะใช้ค่าความพรุนรวมของดินเนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเนื้อดินและถ่านเชื้อเพลิงมี

องค์ประกอบเหมือนกัน ดังนั้นค่าความพรุนรวมของถ่านมีค่า $\varepsilon \sim 0.35$ โดยประมาณ และสามารถคำนวณ r_s จาก

ปริมาตรเชื้อเพลิงในแบบจำลอง = $\varepsilon \times$ ปริมาตรเนื้อถ่านทั้งหมด

$$\pi \times (r_s^2 - 2^2) = 0.35 \times \pi \times (6^2 - 2^2)$$

$$r_s = 3.89 \sim 4 \text{ ซม.}$$

อัตราการเผาไหม้เชิงมวลของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้จากเครื่องชั่งน้ำหนักตั้งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4 คือ $\dot{m}_F = 4.3448 \times 10^{-5} \text{ kg / s}$ จะนำมาใช้คำนวณหาความเร็วเพื่อใช้ในแบบจำลองของการเผาไหม้ภายในถ่านโดยคำนวณความเร็วได้ดังนี้

$$V_F = \frac{\dot{m}_F}{A_F \rho_F}$$

โดยที่

A_F คือ พื้นที่วงแหวนของแบบจำลอง (m^2) ซึ่งเชื้อเพลิงไหลผ่านดังแสดงในภาพที่ 3-3

ρ_F คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg / m^3) ซึ่งคำนวณได้จากก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas)

[15] จะได้

$$\rho_F = \frac{P_{\text{atm}}}{R_F T_{\text{ini}}} = \frac{(101325)}{(8314.37 / 58.22)(298.15)} = 2.38 \text{ kg / m}^3$$

โดยที่

P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศ (Pa)

T_{ini} คือ อุณหภูมิห้อง (K)

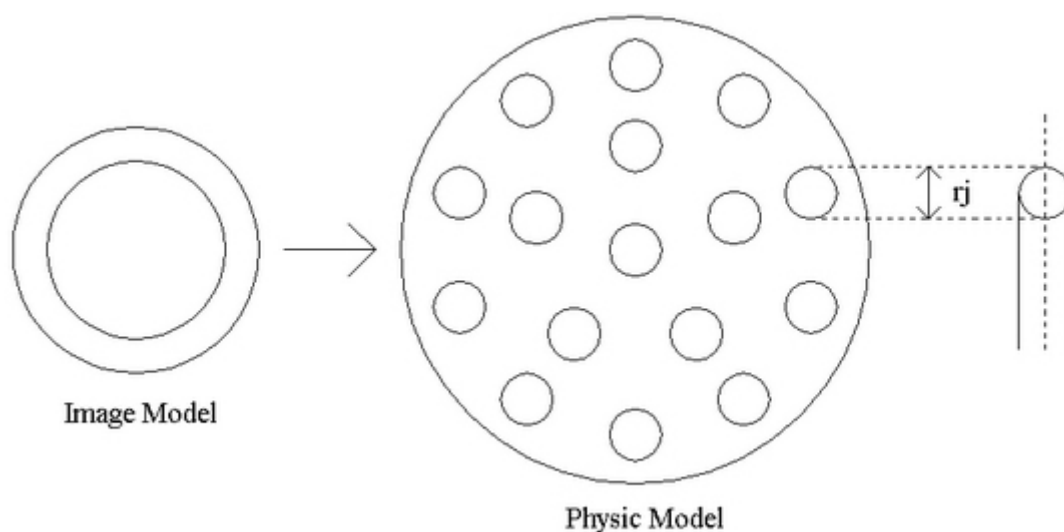
R_F คือ ค่าคงที่ก๊าซ (Gas Constant , J / (kg·K)) ของเชื้อเพลิง

ดังนั้น

$$V_F = \frac{(4.34 \times 10^{-5})}{(\pi(0.06^2 - 0.02^2)) \cdot (2.38)} = 4.84 \times 10^{-3} \text{ m / s}$$

3.2.2 แบบจำลองบนผิวถ่าน

เป็นการจำลองการไหลของเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ในแบบจำลองภายใน ถ่านไหลออกจากช่องอากาศแล้วแพร่กระจายหาออกซิเจนที่อยู่ข้างนอก ดังนั้นแบบจำลองบนผิวของถ่านนี้จะเปลี่ยนแบบจำลองเสมือนจริงให้เป็นแบบจำลองทางกายภาพดังภาพที่ 3-4 โดยใช้ช่องอากาศในแบบจำลองทางกายภาพเพียงหนึ่งช่องเท่านั้น หาค่า r_j และ r_s ได้โดย



ภาพที่ 3-4 แบบจำลองทางกายภาพและเสมือนจริงในแบบจำลองบนผิวถ่าน

ค่า r_j ในแบบจำลองแบบจำลองบนผิวถ่านนั้นใช้รัศมีช่องอากาศหนึ่งช่องในแบบจำลองทางกายภาพดังแสดงในภาพที่ 3 - 4 จะได้

$$r_j = 0.5 \text{ ซม.}$$

ค่า r_s ในแบบจำลองบนผิวถ่านนั้นจะสามารถใช้อัตราความเร็วการไหลของเชื้อเพลิงในแบบจำลองภายในถ่านเนื่องจากอัตราความเร็วการไหลของเชื้อเพลิงมีค่าคงที่และจะเท่ากับออกซิเจนตามสมมุติฐานของเบิร์ค - ชูแมนที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.6 ดังนั้นจะได้ความเร็วของอากาศ

$$V_F = V_A = 4.84 \times 10^{-3} \text{ m / s}$$

ส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ($\dot{m}_A$) ในแบบจำลองบนผิวถ่านนั้นจะใช้อัตราการไหลของอากาศในแบบจำลองภายในถ่าน ซึ่งคำนวณจาก

$$\dot{m}_A = \rho_A [A_A]^{1st} V_A = 7.17 \times 10^{-5} \text{ kg / s}$$

โดยที่

$[A_A]^{1st}$ คือ พื้นที่ของหน้าตัดของท่ออากาศของแบบจำลองในภาพที่ 3-3

หลังจากนั้นนำความเร็วและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมาคำนวณหา r_s ได้ดังนี้

$$\rho_A = \frac{\dot{m}_A}{A_A V_A}$$

$$r_s = \sqrt{\frac{\dot{m}_A}{\pi \rho_A V_A} + r_j^2}$$

$$r_s = \sqrt{\frac{(7.17 \times 10^{-6})}{\pi(1.18) \cdot (4.84 \times 10^{-3})} + 0.5^2} = 2.06 \sim 2 \text{ ซม.}$$

3.3 การแก้ปัญหาจากสมมุติฐานของเบิร์ค – ชูแมนในถ่านเชื้อเพลิง

จากสมมุติฐานของเบิร์คและชูแมนที่ได้ในหัวข้อที่ 2.6 มาแก้ปัญหาโดยนำสมการ (2-22) มาจัดรูปใหม่แล้วจะได้

$$\frac{V_z}{D} \frac{\partial \beta}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \beta}{\partial r} \right) = 0$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial z} = \frac{D}{V_z r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \beta}{\partial r} \right) \quad (3-3)$$

และจากสมการ (2-23) สามารถจัดรูปใหม่ได้เช่นเดียวกันกับสมการ (2-22) จะได้

$$\frac{\partial \beta_T}{\partial z} = \frac{D}{V_z r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \beta_T}{\partial r} \right) \quad (3-4)$$

สมการ (3-3) และ (3-4) เป็นสมการการถ่ายโอนปริมาณสเกลาร์ (scalar) β และ β_T ซึ่งเป็นตัวแทนของสัดส่วนมวลและพลังงาน การเปลี่ยนแปลงของปริมาณทั้งสองเป็นแบบสองมิติตามแกน z และ r โดยในแนวแกน z เป็นการพา ส่วนตามแกน r เป็นการแพร่ พารามิเตอร์ 2

ตัวคือ ความเร็วการพา (V_z) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ในการวิเคราะห์ถือว่าเป็นค่าคงที่ โดยที่ความเร็วการพาสามารถนำค่าความเร็วของเชื้อเพลิงมาใช้ได้เลยตามข้อสมมุติฐานของ เบิร์คและชูแมนที่ได้ในหัวข้อที่ 2.6 ดังนั้น

$$V_z = V_F = 4.84 \times 10^{-3} \text{ m / s}$$

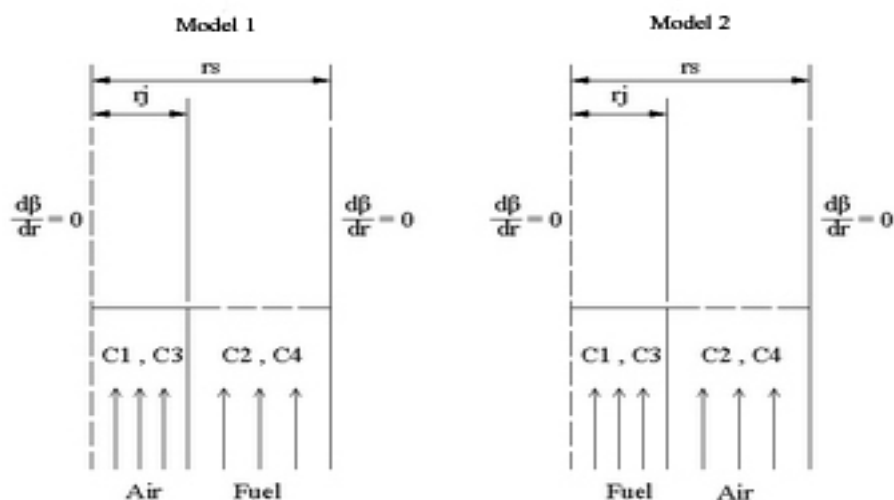
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแบบจำลองนั้น (วิธีการคำนวณสามารถดูได้จากภาคผนวก ก) สามารถคำนวณออกมา จะได้

$$D = \alpha = 1.55 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \text{ (ในแบบจำลองภายในถ่าน)}$$

$$D = \alpha = 1.68 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \text{ (ในแบบจำลองบนผิวถ่านด้วยการคำนวณเชิงตัวเลข)}$$

$$D = \alpha = 1.67 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \text{ (ในแบบจำลองบนผิวถ่านด้วยการคำนวณผลแม่นยำตรง)}$$

และจากแบบจำลองดังภาพที่ 3-3 และ 3-4 นั้นสร้างแบบจำลองการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิงดังภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิง

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังภาพที่ 3-5 นี้กำหนดให้แบบจำลองที่ 1 (Model 1) แทนแบบจำลองภายในถ่านและแบบจำลองที่ 2 (Model 2) แทนแบบจำลองบนผิวถ่าน และจาก

แบบจำลองทั้งสองนี้สามารถนำมาแก้ปัญหาผลเชิงตัวเลขและผลแม่นยำตรงในหัวข้อ 3.4 และ 3.5 ต่อไป

3.4 การแก้ปัญหาผลเชิงตัวเลข (Numerical Solution) ในถ่านเชื้อเพลิง

สำหรับการไหลโดยสัดส่วนเชิงมวลและพลังงานของก๊าซทั้งสองที่บริเวณขอบเขตทางเข้า ดังแสดงในภาพที่ 3-5 สามารถคำนวณอยู่ในรูปของ β และ β_T จะได้

บริเวณขอบเขตทางเข้าของเชื้อเพลิง จะได้ค่า β และ β_T ที่บริเวณขอบเขตทางเข้าเป็น

$$\beta_F = \frac{(Y_F)_{z=0}}{W_F(0-v'_F)} - \frac{(0)}{W_O(0-v'_O)} = -\frac{(Y_F)_{z=0}}{W_F v'_F} \quad (3-5)$$

และ

$$(\beta_T)_F = \frac{(C_P)_F T}{\Delta H_r W_O(0-v'_O)} - \frac{(0)}{W_O(0-v'_O)} = -\frac{(C_P)_F T}{\Delta H_r W_O v'_O} \quad (3-6)$$

บริเวณขอบเขตทางเข้าของอากาศ จะได้ค่า β และ β_T ที่บริเวณขอบเขตทางเข้าเป็น

$$\beta_O = \frac{(0)}{W_F(0-v'_F)} - \frac{(Y_O)_{z=0}}{W_O(0-v'_O)} = \frac{(Y_O)_{z=0}}{W_O v'_O} \quad (3-7)$$

และ

$$(\beta_T)_O = \frac{(C_P)_A T}{\Delta H_r W_O(0-v'_O)} - \frac{(Y_O)_{z=0}}{W_O(0-v'_O)} = \frac{(Y_O)_{z=0}}{W_O v'_O} - \frac{(C_P)_A T}{\Delta H_r W_O v'_O} \quad (3-8)$$

และหลังจากที่ได้สมการ (3-3) และ (3-4) แล้วสามารถแก้ปัญหาเชิงตัวเลขได้โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ที่บริเวณทางเข้าของก๊าซทั้งสองในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในภาพที่ 3-5 ทั้งสองได้จากตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองสำหรับแก้ปัญหาเชิงตัวเลขจากภาพที่ 3-5

เงื่อนไขขอบเขต			แบบจำลองภายในถ่าน		แบบจำลองบนผิวถ่าน	
z	r		β	β_T	β	β_T
z = 0	$0 \leq r \leq r_j$		C1 = β_o	C3 = $(\beta_T)_o$	C1 = β_F	C3 = $(\beta_T)_F$
	$r_j \leq r \leq r_s$		C2 = β_F	C4 = $(\beta_T)_F$	C2 = β_o	C4 = $(\beta_T)_o$
z > 0	r = 0	r = r_s	$\frac{\partial \beta}{\partial r} = 0$, $\frac{\partial \beta_T}{\partial r} = 0$			

แล้วนำสมการ (3-3) และ (3-4) มาคำนวณเชิงตัวเลขด้วยอิมพลิสิต - เซนทรัลดิฟเฟเรนซ์ [18] (Implicit - Central Difference) จะได้

$$\beta_{m,n-1} = \beta_{m,n} - \left(\frac{D}{V_z} \right) \left[\left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{2r\Delta r} \right) \beta_{m+1,n} - \frac{2}{\Delta r^2} \beta_{m,n} + \left(\frac{1}{\Delta r^2} - \frac{1}{2r\Delta r} \right) \beta_{m-1,n} \right] \quad (3-9)$$

$$(\beta_T)_{m,n-1} = (\beta_T)_{m,n} - \left(\frac{D}{V_z} \right) \left[\left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{2r\Delta r} \right) (\beta_T)_{m+1,n} - \frac{2}{\Delta r^2} (\beta_T)_{m,n} + \left(\frac{1}{\Delta r^2} - \frac{1}{2r\Delta r} \right) (\beta_T)_{m-1,n} \right] \quad (3-10)$$

จัดสมการ (3-9) และ (3-10) อยู่ในสมการเมตริกซ์ จะได้

$$[\beta_{m,n}] = [a]^{-1} [\beta_{m,n-1}] \quad (3-11)$$

$$[(\beta_T)_{m,n}] = [a]^{-1} [(\beta_T)_{m,n-1}] \quad (3-12)$$

โดยที่ $[a]^{-1}$ ไม่เป็นซิงกูลาร์เมตริกซ์ (Singular Matrix)

จากเงื่อนไขขอบเขตที่ $r = 0$ และ $r = r_s$ ดังแสดงในตารางที่ 3 - 1 กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของ β และ β_T เทียบกับแกน r ไม่มี ดังนั้นที่ $r = 0$ ใช้การประมาณค่า β และ β_T ด้วยฟอร์เวิร์ดดิฟเฟอเรนซ์ (Forward Different) และแบ็คเวิร์ดดิฟเฟอเรนซ์ (Backward Different) ที่ $r = r_s$ ได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 สมการที่ใช้ในการแก้ปัญหาลำดับตัวเลขทั้งสองแบบจำลอง

เงื่อนไข	สมการที่ใช้ในการแก้ปัญหา
$0 < r < r_s, z > 0$	สมการที่ (3-11) และสมการที่ (3-12)
$r = 0, z > 0$	$\beta_{m,n} = \frac{4\beta_{m+1,n} - \beta_{m+2,n}}{3}$
	$(\beta_T)_{m,n} = \frac{4(\beta_T)_{m+1,n} - (\beta_T)_{m+2,n}}{3}$
$r = r_s, z > 0$	$\beta_{m,n} = \frac{4\beta_{m-1,n} - \beta_{m-2,n}}{3}$
	$(\beta_T)_{m,n} = \frac{4(\beta_T)_{m-1,n} - (\beta_T)_{m-2,n}}{3}$

3.5 การแก้ปัญหาคำถามตรง (Exact Solution) ในถ่านเชื้อเพลิง

เปลี่ยนรูปสมการ (3-3) และ (3-4) ให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรไร้มิติโดยที่
ตัวแปรอิสระ r ทำให้เป็นตัวแปรไร้มิติ โดยหารด้วยค่าคงที่ r_s จะได้

$$\xi \equiv \frac{r}{r_s} \quad (3-13)$$

ตัวแปรอิสระ z ทำให้เป็นตัวแปรไร้มิติ โดยหารด้วยค่าคงที่ $V_z r_s^2 / D$ จะได้

$$\eta \equiv \frac{zD}{V_z r_s^2} \quad (3-14)$$

ตัวแปรตาม β ทำให้เป็นตัวแปรไร้มิติ โดยหารด้วยค่าคงที่ $(Y)_{z=0} / W_F v'_F$ จะได้

$$\gamma \equiv \beta \frac{W_F v'_F}{(Y_F)_{z=0}} \quad (3-15)$$

ตัวแปรตาม β_T ทำให้เป็นตัวแปรไร้มิติโดยหารด้วยค่าคงที่ $\frac{\Delta H_r (Y_O)_{z=0} - [C_P]_{Air} T_{z=0}}{\Delta H_r W_O v'_O}$

จะได้

$$\gamma_T = \beta_T \frac{\Delta H_r W_O v'_O}{\Delta H_r (Y_O)_{z=0} - [C_p]_{Air} T_{z=0}} \quad (3-16)$$

นำตัวแปรจากสมการ (3-13) ถึง (3-16) มาแทนค่าในสมการ (3-3) และ (3-4) จะได้

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \eta} = \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial \gamma}{\partial \xi} \right) \quad (3-17)$$

$$\frac{\partial \gamma_T}{\partial \eta} = \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial \gamma_T}{\partial \xi} \right) \quad (3-18)$$

หลังจากที่ได้สมการ (3-17) และ (3-18) แล้วใช้เงื่อนไขขอบเขต ณ. บริเวณจุดปล่อยก๊าซ ทั้งสองในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสองได้ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองในรูปไร้หน่วย

เงื่อนไขขอบเขต		แบบจำลองภายในถ่าน		แบบจำลองบนผิวถ่าน	
η	ξ	γ	γ_T	γ	γ_T
$\eta = 0$	$0 \leq \xi \leq C$	$C1 = v$	$C3 = 1$	$C1 = -1$	$C2 = v_T$
	$C \leq \xi \leq 1$	$C2 = -1$	$C4 = v_T$	$C3 = v$	$C4 = 1$
$\eta > 0$	$\xi = 0$	$\xi = 1$	$\frac{\partial \gamma}{\partial \xi} = 0, \frac{\partial \gamma_T}{\partial \xi} = 0$		

โดยที่

$$C \equiv \frac{r_j}{r_s} \quad (3-19)$$

$$v = \frac{(Y_O)_{z=0} W_F v'_F}{(Y_F)_{z=0} W_O v'_O} \quad (3-20)$$

$$v_T = \frac{[C_p]_{Fuel} T_{z=0}}{[C_p]_{Air} T_{z=0} - \Delta H_r (Y_O)_{z=0}} \quad (3-21)$$

จากสมการ (3-17) และ (3-18) สามารถแก้ปัญหาโดยใช้สมการเบสเซลส์ดีฟเฟอเรนเชียล [14] (Bessel's Differential Equation) โดยกำหนดให้ γ และ γ_T แทนด้วยตัวแปร L จะได้

$$L(\xi, \eta) = M(\xi) \cdot N(\eta) \quad (3-22)$$

หาอนุพันธ์ของ L อยู่ในรูปของ M และ N จะได้

$$\frac{\partial L}{\partial \eta} = \frac{\partial}{\partial \eta} (M \cdot N) = M \cdot N' \quad (3-23)$$

และ

$$\frac{\partial L}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial \xi} (M \cdot N) = N \cdot M' \quad (3-24)$$

นำสมการ (3-23) และ (3-24) มาแทนในสมการ (3-10) และ (3-11) จะได้

$$M \cdot N' = \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi M' \cdot N) = \left(\frac{1}{\xi} M' \cdot N + M'' \cdot N \right)$$

$$\frac{N'}{N} = \frac{1}{M} \left(M'' + \frac{1}{\xi} M' \right) = -s^2 \quad (3-25)$$

จากสมการ (3-25) จะได้

$$\frac{N'(\eta)}{N(\eta)} = -s^2$$

$$N(\eta) = C_m \cdot e^{-s^2 \eta} \quad (3-26)$$

และ

$$\frac{1}{M} \left(M'' + \frac{1}{\xi} M' \right) = -s^2$$

$$M''(\xi) + \frac{1}{\xi} M'(\xi) + s^2 M(\xi) = 0 \quad (3-27)$$

กำหนดให้ $p = s\xi$ แล้วนำมาแทนสมการ (3-27) จะได้

$$M''(\xi) + \frac{s}{p} M'(\xi) + s^2 M(\xi) = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial M}{\partial p} \cdot \frac{\partial p}{\partial \xi} \right) + \frac{s}{p} \frac{\partial M}{\partial p} \cdot \frac{\partial p}{\partial \xi} + s^2 M = 0$$

$$M''(p) + \frac{1}{p} M'(p) + M(p) = 0 \quad (3-28)$$

จากสมการ (3-28) ใช้เบสเซลฟังก์ชัน (Bessel Function) โดยให้ $n = 0$ จะได้

$$J_0 = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m x^{2m}}{2^{2m} (m!)^2}$$

และจากสมการ (3-28) จัดให้รูปสมการเบสเซลจะได้

$$M(p) = J_0(p) + E_0(p)$$

แต่เนื่องจากที่ $p = 0$ จะทำให้ $E_0(p=0) = -\infty$ ดังนั้น $M(p) = J_0(p)$
จากเงื่อนไขขอบเขตในตารางที่ 3-3 จะได้

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \xi} = N \frac{\partial M(\xi)}{\partial \xi} = N \frac{\partial}{\partial \xi} [J_0(\xi)] = 0$$

$$J_1(\xi) = 0$$

ดังนั้นถ้า $J_1(p) = 0$ โดยที่ $p = \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ และจาก $p = s\xi$ จะได้

$$\xi = \frac{\phi_n}{s}$$

แต่เนื่องจาก ξ มีค่ามากที่สุดที่ $\xi = 1$ จะได้

$$s = \phi_n$$

ดังนั้นจัดรูปสมการ (3-22) ใหม่จะได้

$$L(\xi, \eta) = C_m J_0(\phi_n \xi) e^{-\phi_n^2 \eta} \quad (3-29)$$

แล้วจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปอนุกรม (Series) จะได้

$$L(\xi, \eta) = \sum_{m=0}^{\infty} C_m J_0(\phi_n \xi) e^{-\phi_n^2 \eta} = C_0 + \sum_{m=1}^{\infty} C_m J_0(\phi_n \xi) e^{-\phi_n^2 \eta} \quad (3-30)$$

และสามารถหา C_0 และ C_m ได้โดย

$$C_0 = \frac{2}{\xi_{\max}} \int_0^1 \xi f(\xi) d\xi \quad (3-31)$$

และ

$$C_m = \frac{1}{|J_0(\phi_n)|^2} \int_0^1 \xi f(\xi) J_0(\phi_n \xi) d\xi \quad (3-32)$$

ตัวแปร $f(\xi)$ จากสมการ (3-31) และ (3-32) ถูกแทนที่ด้วยเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) ในตารางที่ 3-3 จะได้

ตารางที่ 3-4 ค่าของตัวแปร $f(\xi)$ ตามเงื่อนไขเริ่มต้น

	$0 \leq \xi \leq C, \eta = 0$		$C \leq \xi \leq 1, \eta = 0$	
	γ	γ_T	γ	γ_T
แบบจำลองภายในถ่าน	$f(\xi) = v$	$f(\xi) = 1$	$f(\xi) = -1$	$f(\xi) = v_T$
แบบจำลองบนผิวถ่าน	$f(\xi) = -1$	$f(\xi) = v_T$	$f(\xi) = v_T$	$f(\xi) = 1$

แล้วเปลี่ยนตัวแปร L ในสมการ (3-30) ให้อยู่ γ และ γ_T จะได้

$$\gamma = (1+v)C^2 - 1 + 2C(1+v) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\phi_n} \frac{J_1(C\phi_n)}{[J_0(\phi_n)]^2} J_0(\phi_n \xi) e^{-\phi_n^2 \eta} \quad (3-33)$$

$$\gamma_T = v_T + (1-v_T)C^2 + 2C(1-v_T) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\phi_n} \frac{J_1(C\phi_n)}{[J_0(\phi_n)]^2} J_0(\phi_n \xi) e^{-\phi_n^2 \eta} \quad (3-34)$$

$$\gamma = v - (1+v)C^2 - 2C(1+v) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\phi_n} \frac{J_1(C\phi_n)}{[J_0(\phi_n)]^2} J_0(\phi_n \xi) e^{-\phi_n^2 \eta} \quad (3-35)$$

$$\gamma_T = 1 - (1-v_T)C^2 - 2C(1-v_T) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\phi_n} \frac{J_1(C\phi_n)}{[J_0(\phi_n)]^2} J_0(\phi_n \xi) e^{-\phi_n^2 \eta} \quad (3-36)$$

จากสมการ (3-33) ถึง (3-36) ที่แก้ปัญหโดยใช้เบสเซลฟังก์ชันนี้คำนวณหาค่า γ และ γ_T ซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3-5

จากเงื่อนไขขอบเขตที่ $r = 0$ และ $r = rs$ ดังแสดงในตารางที่ 3-3 จะกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของ γ และ γ_T เทียบกับแกน r ไม่มีเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของ β และ β_T ดังนั้นแล้วที่ $r = 0$ ใช้การประมาณค่า γ และ γ_T ด้วยฟอร์เวิร์ดดิฟเฟอเรนซ์และที่ $r = rs$ ใช้การประมาณค่า γ และ γ_T ด้วยแบ็คเวิร์ดดิฟเฟอเรนซ์ได้ดังแสดงใช้ในตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 สมการที่ใช้ในแก้ปัญหาผลแม่นยำตรง

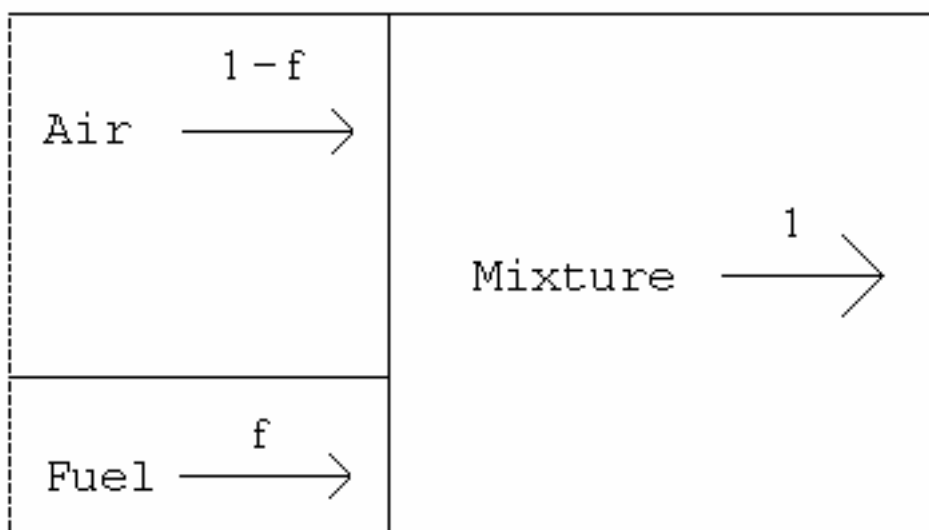
เงื่อนไข	สมการที่ใช้ในการแก้ปัญหา	แบบจำลอง
$0 < \xi < 1, \eta > 0$	สมการที่ (3-33) และสมการที่ (3-34)	แบบจำลองภายในถ่าน
	สมการที่ (3-35) และสมการที่ (3-36)	แบบจำลองบนผิวถ่าน
$\xi = 0, \eta > 0$	$\gamma(0, \eta) = \frac{4\gamma(\Delta\xi, \eta) - \gamma(2\Delta\xi, \eta)}{3}$	ทั้งสองแบบจำลอง
	$\gamma_T(0, \eta) = \frac{4\gamma_T(\Delta\xi, \eta) - \gamma_T(2\Delta\xi, \eta)}{3}$	
$\xi = 1, \eta > 0$	$\gamma(1, \eta) = \frac{4\gamma(1 - \Delta\xi, \eta) - \gamma(1 - 2\Delta\xi, \eta)}{3}$	
	$\gamma_T(1, \eta) = \frac{4\gamma_T(1 - \Delta\xi, \eta) - \gamma_T(1 - 2\Delta\xi, \eta)}{3}$	

3.6 แมสแฟรกชัน (Mass Fraction) ของก๊าซองค์ประกอบ

แมสแฟรกชัน (Mass Fraction) คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของสารใดสารหนึ่งต่อมวลรวมทั้งหมด โดยในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่บริเวณใดๆ จะมีองค์ประกอบของแมสแฟรกชัน (Y_{Cps}) ในรูปของเชื้อเพลิง (Y_F) และออกซิเจน (Y_O) คือ

$$Y_{Cps} = Y_F - (W_F V'_F / W_O V'_O) Y_O$$

และการผสมของเชื้อเพลิงและออกซิเจนในแบบจำลองของเบิร์คและชูแมนนั้นมีคุณสมบัติการแพร่ของก๊าซ ดังนั้นการไหลของเชื้อเพลิงและออกซิเจนจะไม่ขึ้นอยู่กับต้นทางการไหล (Sources) และปลายทางการไหล (Sinks) ของก๊าซทั้งสองจึงคุณสมบัติเชิงอนุรักษ์ (Conserved Property) ซึ่งแสดงภาพแบบจำลองดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 แบบจำลองการแพร่กระจายเข้าหากันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ

จากภาพที่ 3-6 นั้นจะกำหนดบริเวณที่มีการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์ที่อัตรารวมเป็น 1 โดยเชื้อเพลิงมีค่าสัมประสิทธิ์ที่อัตรา f และออกซิเจนในอากาศมีค่า $1 - f$ แล้วจะได้ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของแมสแฟรกชัน ณ บริเวณที่มีการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในอากาศเป็น

$$[Y_{Cps}]_F f + [Y_{Cps}]_A (1 - f) = [Y_{Cps}]_M$$

$$f = \frac{[Y_{Cps}]_M - [Y_{Cps}]_A}{[Y_{Cps}]_F - [Y_{Cps}]_A}$$

$$f = \frac{[Y_F - (W_F v'_F / W_O v'_O) Y_O]_M - [Y_F - (W_F v'_F / W_O v'_O) Y_O]_A}{[Y_F - (W_F v'_F / W_O v'_O) Y_O]_F - [Y_F - (W_F v'_F / W_O v'_O) Y_O]_A} \quad (3-37)$$

โดยเรียกตัวแปรตาม f ในสมการ (3-37) นี้ว่า มิกซ์เจอร์แฟรกชัน (Mixture Fraction)

นำ $-W_F v'_F$ มาหารทั้งเศษและส่วนในสมการ (3-37) จะได้

$$f = \frac{[(-Y_F / W_F v'_F) - (-Y_O / W_O v'_O)]_M - [(0 / W_F v'_F) - (-Y_O)_{z=0} / W_O v'_O]_A}{[(-Y_F)_{z=0} / W_F v'_F - (0 / W_O v'_O)]_F - [(0 / W_F v'_F) - (-Y_O)_{z=0} / W_O v'_O]_A}$$

$$f = \frac{[(\alpha_F) - (\alpha_O)]_M - \beta_O}{\beta_F - \beta_O}$$

$$f = \frac{\beta - \beta_O}{\beta_F - \beta_O} \quad (3-38)$$

ในส่วนของการแก้ปัญหาผลแม่นยำตรงนั้น สามารถคำนวณจากสมการ (3-38) จะได้

$$f = \frac{(\gamma) - (v)}{(-1) - (v)}$$

$$f = \frac{v - \gamma}{v + 1} \quad (3-39)$$

ส่วนมิกซ์เจอร์แฟรกชันที่บริเวณผิวเปลวของไฟนั้น คำนวณจากสมการ (3-37) จะได้

$$f_{st} = \frac{[(0) - (W_F v'_F / W_O v'_O)(0)]_M - [(0) - (W_F v'_F / W_O v'_O)(Y_O)_{z=0}]_A}{[(Y_F)_{z=0} - (W_F v'_F / W_O v'_O)(0)]_F - [(0) - (W_F v'_F / W_O v'_O)(Y_O)_{z=0}]_A}$$

$$f_{st} = \frac{(W_F v'_F / W_O v'_O)(Y_O)_{z=0}}{(Y_F)_{z=0} + (W_F v'_F / W_O v'_O)(Y_O)_{z=0}} \quad (3-40)$$

โดยที่ตัวแปร f_{st} เป็นมิชเชอร์แฟรกชันของการเผาไหม้สมบูรณ์ แล้วนำค่า f จากสมการ (3-37) และค่า f_{st} จากสมการ (3-40) มาคำนวณหาแมสแฟรกชันของเชื้อเพลิงและออกซิเจนในอากาศ รวมทั้งไนโตรเจนและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่อไป

3.6.1 แมสแฟรกชันของเชื้อเพลิงและออกซิเจน

สามารถคำนวณได้จากผลต่างของสมการ (3-37) และ (3-40) จะได้

$$\frac{Y_F - (W_F v'_F / W_O v'_O) Y_O}{(Y_F)_{z=0} + (W_F v'_F / W_O v'_O) (Y_O)_{z=0}} = f - f_{st} \quad (3-41)$$

ในการคำนวณแมสแฟรกชันของเชื้อเพลิงและออกซิเจนแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ ค่า $f < f_{st}$ และค่า $f > f_{st}$

ในกรณีค่า $f < f_{st}$ นั้นจะมีออกซิเจนเหลืออยู่ดังนั้น $Y_F = 0$ และลดรูปในสมการ (3-41) โดยกำหนดเงื่อนไขบริเวณทางเข้าของอากาศโดยที่ $f = 0$ จะได้

$$\frac{(0) - (W_F v'_F / W_O v'_O) (Y_O)_{z=0}}{(Y_F)_{z=0} + (W_F v'_F / W_O v'_O) (Y_O)_{z=0}} = (0) - f_{st}$$

$$(Y_F)_{z=0} = (Y_O)_{z=0} \left(\frac{W_F v'_F}{W_O v'_O} \right) \left(\frac{1}{f_{st}} - 1 \right) \quad (3-42)$$

แล้วนำสมการ (3-42) มาแทนค่าในสมการ (3-41) จะได้

$$\frac{(0) - (W_F v'_F / W_O v'_O) Y_O}{(Y_O)_{z=0} (W_F v'_F / W_O v'_O) [(1/f_{st}) - 1] + (W_F v'_F / W_O v'_O) (Y_O)_{z=0}} = f - f_{st}$$

$$\frac{-Y_O f_{st}}{(Y_O)_{z=0}} = f - f_{st}$$

ดังนั้นจะได้

$$Y_O = (Y_O)_{z=0} \left(1 - \frac{f}{f_{st}} \right) \quad (3-43)$$

และในกรณีค่า $f > f_{st}$ นั้นจะมีเชื้อเพลิงเหลืออยู่ดังนั้น $Y_O = 0$ และลดรูปในสมการ (3-41) โดยกำหนดเงื่อนไขบริเวณทางเข้าของอากาศโดยที่ $f = 1$ จะได้

$$\frac{(Y_F)_{z=0} - (W_F v'_F / W_O v'_O)(0)}{(Y_F)_{z=0} + (W_F v'_F / W_O v'_O)(Y_O)_{z=0}} = (1) - f_{st}$$

$$(Y_O)_{z=0} = (Y_F)_{z=0} \left(\frac{W_O v'_O}{W_F v'_F} \right) \left(\frac{f_{st}}{1 - f_{st}} \right) \quad (3-44)$$

แล้วนำสมการ (3-44) มาแทนค่าในสมการ (3-41) จะได้

$$\frac{Y_F - (W_F v'_F / W_O v'_O)(0)}{(Y_F)_{z=0} + (W_F v'_F / W_O v'_O) \{ (Y_F)_{z=0} (W_O v'_O / W_F v'_F) [f_{st} / (1 - f_{st})] \}} = f - f_{st}$$

$$\frac{Y_F (1 - f_{st})}{(Y_F)_{z=0}} = f - f_{st}$$

ดังนั้นจะได้

$$Y_F = (Y_F)_{z=0} \left(\frac{f - f_{st}}{1 - f_{st}} \right) \quad (3-45)$$

3.6.2 แมสแฟรกชันของไนโตรเจนและผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้

3.6.2.1 ในแบบจำลองภายในถ่าน

เนื่องจากในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงนั้นไนโตรเจนจะไม่ทำปฏิกิริยาทางมีกับเชื้อเพลิงเหมือนกับออกซิเจนดังนั้นจึงมีคุณสมบัติเชิงอนุรักษ์เหมือนกันจะได้

$$Y_N + (Y_N)_{z=0} f = (Y_N)_{z=0}$$

$$Y_N = (Y_N)_{z=0} (1 - f) \quad (3-46)$$

และผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในแบบจำลองในถ่าน จะได้

$$Y_P = 1 - Y_N - Y_O - Y_F \quad (3-47)$$

จากนั้นหาแมสแฟรกชันของคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้โดย

$$Y_n = Y_p \cdot \frac{W_n(v''_n - v'_n)}{\sum_{n=1}^N W_n(v''_n - v'_n)} \quad (3-48)$$

3.6.2.2 ในแบบจำลองบนผิวถ่าน

ผลจากการมีเชื้อเพลิง ในโตรเจน และผลิตภัณฑ์เหลือจากการเผาไหม้ในแบบจำลองภายในถ่าน ดังนั้นจะได้แมสแฟรกชันในโตรเจนรวม (Y_N) เป็น

$$Y_N = (Y_N \text{ จาก Model 1}) + (Y_N \text{ ใน Model 2})$$

$$Y_N = (Y_N)^{1st} \frac{f - f_{st}}{1 - f_{st}} + (Y_N)_{z=0} (1 - f) \quad (3-49)$$

ถ้าใช้สมการ (3-47) คำนวณหาแมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์แล้วจะได้แมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์รวมทั้งหมด (Y_p) แต่สามารถหาแมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์เฉพาะแบบจำลองบนผิวถ่านได้โดย

$$(Y_p)^{2nd} = Y_p - (Y_p)^{1st} \frac{f - f_{st}}{1 - f_{st}} \quad (3-50)$$

หลังจากนั้นนำแมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์เฉพาะแบบจำลองบนผิวถ่านที่คำนวณได้ในสมการ (3-50) มาคำนวณหาแมสแฟรกชันของคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์รวมได้โดย

$$Y_n = (Y_n \text{ จาก Model 1}) + (Y_n \text{ ใน Model 2})$$

$$Y_n = (Y_n)^{1st} \frac{f - f_{st}}{1 - f_{st}} + (Y_p)^{2nd} \cdot \frac{W_n(v''_n - v'_n)}{\sum_{n=1}^N W_n(v''_n - v'_n)} \quad \text{โดยที่ } f > f_{st} \quad (3-51)$$

แต่ในกรณี $f < f_{st}$ ในแบบจำลองบนผิวถ่านนั้นสามารถคำนวณแมสแฟรกชันของไนโตรเจนได้จากสมการ (3-46) และแมสแฟรกชันของคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากสมการ (3-48)

3.7 การแก้ปัญหาคำถามร้อน

เมื่อหาแก้ปัญหามาสมแฟรกชันออกซิเจนและสมการจากตารางที่ 3-2 และ 3-4 แล้วจะสามารถหาอุณหภูมิได้โดย

3.7.1 อุณหภูมิที่ได้จากการแก้ปัญหาลำดับตัวเลข

จากตัวแปรคู่ควบของอุณหภูมิกับออกซิเจนจะได้

$$\beta_T = \alpha_T - \alpha_O$$

$$\beta_T = \frac{C_p T}{\Delta H_r W_O (v''_O - v'_O)} - \frac{Y_O}{W_O (v''_O - v'_O)}$$

$$T_{i,j} = \frac{\Delta H_r [Y_O]_{i,j} - [\beta_T]_{i,j} \Delta H_r W_O v'_O}{[C_p]_{i,j}} \quad (3-52)$$

3.7.2 อุณหภูมิที่ได้จากการแก้ปัญหาลำดับผลเฉลย

นำสมการ (3-9) มาใส่ในสมการ (3-52) จะได้รูปสมการสำหรับการแก้ปัญหาคำถามร้อนแบบผลเฉลยเป็น

$$T = \frac{\Delta H_r Y_O - \gamma_T \{ \Delta H_r (Y_O)_{z=0} - [C_p]_{Air} T_0 \}}{C_p} \quad (3-53)$$

การสร้างแบบจำลองและการแก้ปัญหาลำดับตัวเลขในรูปแบบต่างๆ ที่ได้กล่าวมาในบทนี้เป็นการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอกเพื่อแสดงผลของรูปร่างเปลวไฟที่เกิดขึ้นบนถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอกและนำไปแก้ปัญหาคำถามร้อนโดยหาอุณหภูมิที่บริเวณผิวของเปลวไฟซึ่งจะได้กล่าวถึงบทต่อไป

บทที่ 4

ผลการจำลองในถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอก

จากการสร้างแบบจำลองและการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขที่ได้กล่าวมาในบทที่แล้วนั้นจะได้ผลของการแก้ปัญหาแบบจำลองเชิงตัวเลขการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอก โดยใช้ซอฟต์แวร์แมทแล็บในการแก้ปัญหาคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข (CFD) โดยที่ถ่านเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นถ่านเชื้อเพลิงลิกไนต์ซึ่งองค์ประกอบต่างๆ ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 องค์ประกอบของถ่านเชื้อเพลิง

	% โดยมวล
คาร์บอน	30.30
ไฮโดรเจน	3.79
ออกซิเจน	22.45
ไนโตรเจน	0.64
ซัลเฟอร์	1.10
ขี้เถ้า และอื่นๆ	41.72

จากตารางที่ 4-1 ถ่านเชื้อเพลิงจะมีอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเชื้อเพลิงและส่วนที่เป็นขี้เถ้า แต่ส่วนที่ใช้ในแบบจำลองนั้นจะใช้เพียงส่วนที่เป็นเชื้อเพลิงเท่านั้น ดังนั้นสามารถจัดอยู่ในสูตรเคมีสารประกอบ $C_vH_wO_xN_yS_z$ ได้ในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 สูตรเคมีสารประกอบของถ่านเชื้อเพลิงในรูป $C_vH_wO_xN_yS_z$

คาร์บอน	$v = 30.30 / 12 = 2.53$
ไฮโดรเจน	$w = 3.79 / 1 = 3.79$
ออกซิเจน	$x = 22.45 / 16 = 1.40$
ไนโตรเจน	$y = 0.64 / 14 = 0.05$
ซัลเฟอร์	$z = 1.10 / 32 = 0.03$

4.1 เงื่อนไขเริ่มต้นในแบบจำลองภายในถ่าน

สูตรเคมีที่ได้จากตารางที่ 4-2 นั้นสามารถนำมาแก้สมการปฏิกิริยาการเผาไหม้ทางเคมีในสมการ (3-1) จะได้ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 สารต่างๆ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาทางเคมีของสมการ (3-1)

	สูตรเคมีและตัวเลขในสมการเคมี
Fuel ^{1st}	$C_{2.53}H_{3.79}O_{1.40}N_{0.05}S_{0.03} \text{ (g)}$
Air	$2.81[O_2 \text{ (g)} + 3.79N_2 \text{ (g)}]$
Product ^{1st}	$2.53CO_2 \text{ (g)} + 1.90H_2O \text{ (g)} + 0.03SO_2 \text{ (g)} + 10.59N_2 \text{ (g)}$

โดยบริเวณทางเข้าของเชื้อเพลิงมีแมสแฟรกชันของเชื้อเพลิงเริ่มต้นเป็น

$$(Y_F)_{z=0} = 1.00$$

และบริเวณทางเข้าของอากาศมีแมสแฟรกชันของออกซิเจนและไนโตรเจนเริ่มต้นเป็น

$$(Y_O)_{z=0} = 0.21 \text{ และ } (Y_N)_{z=0} = 0.79$$

แล้วคำนวณหา β_F , β_O , $(\beta_T)_F$ และ $(\beta_T)_O$ ในหัวข้อที่ 3.4 เพื่อจะนำไปแก้ปัญหาคิ่งตัวเลขโดยใช้สมการในตารางที่ 3-2 จะได้

$$\beta_F = 171.76 \times 10^{-4}$$

$$\beta_O = 23.35 \times 10^{-4}$$

$$(\beta_T)_F = 1.97 \times 10^{-4}$$

$$(\beta_T)_O = 25.39 \times 10^{-4}$$

และคำนวณ C , v และ v_T ในหัวข้อที่ 3.5 เพื่อจะนำไปแก้ปัญหาคิ่งผลแม่นยำตรงโดยใช้สมการในตารางที่ 3-5 จะได้

$$C = 0.5$$

$$\nu = 0.14$$

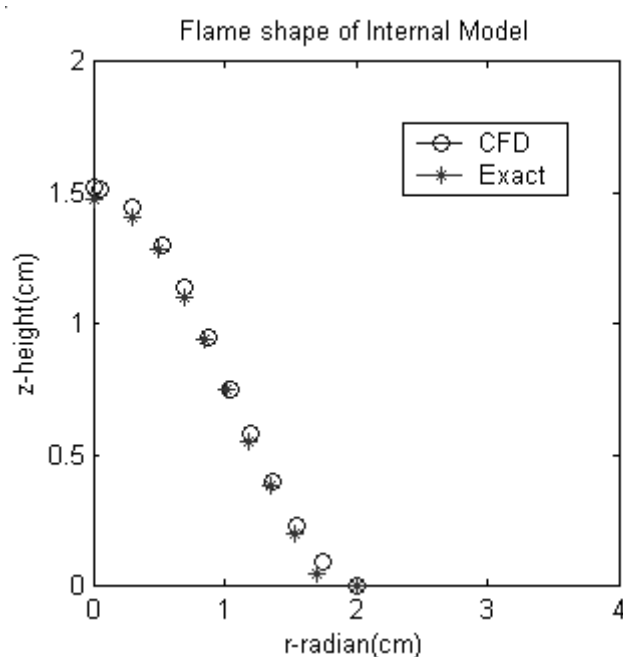
$$\nu_T = 7.77 \times 10^{-2}$$

โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศของแบบจำลองภายในถ่านในหัวข้อที่ 3.3 มีค่าเท่ากับ

$$D = 1.55 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

4.2 รูปร่างของเปลวไฟในแบบจำลองภายในถ่าน

นำค่า $\beta = 0$ มาเขียนกราฟด้วยแมทแล็บเพื่อให้ได้รูปร่างเปลวไฟ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากค่า $\gamma = 0$ ด้วยแมทแล็บเช่นเดียวกันเพื่อให้ได้รูปร่างเปลวไฟดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 รูปร่างเปลวไฟของแบบจำลองภายในถ่าน

จากภาพที่ 4-1 จะพบว่ารูปร่างเปลวไฟที่ได้จากการคำนวณทั้งสองวิธีนั้นต่างก็ให้รูปร่างเปลวไฟที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นค่า β ที่ได้จากการคำนวณแบบ CFD และค่า γ ที่ได้จากการ

คำนวณแบบผลแม่นยำตรงจึงมีสอดคล้องพอที่ใช้แทนกันได้

4.3 แอมสแฟรกชั้นที่ผิวของเปลวไฟในแบบจำลองภายในถ่าน

เนื่องจากที่ผิวเปลวไฟนั้นเชื้อเพลิงและออกซิเจนทำปฏิกิริยาการเผาไหม้จนหมด ดังนั้นจะได้มิกซ์เจอร์แฟรกชั้นที่บริเวณผิวของเปลวไฟจากการคำนวณในสมการ (3-40) เป็น

$$f_{st} = \frac{[(58.22 \times 1)/(32 \times 2.81)](0.21)}{(1.00) + [(58.22 \times 1)/(32 \times 2.81)](0.21)} = 0.12$$

แล้วหาค่าแอมสแฟรกชั้นที่ผิวเปลวไฟของไนโตรเจนจากสมการ (3-46) แล้วจะได้

$$Y_N = (0.79)(1 - 0.12) = 0.70$$

และแอมสแฟรกชั้นของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้จากสมการ (3-47) แล้วจะได้

$$Y_p = 1 - (0.70) - (0) - (0) = 0.30$$

หลังจากนั้นหาแอมสแฟรกชั้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากสมการ (3-48) แล้วจะได้ตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 แอมสแฟรกชั้นของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ในแบบจำลองภายในถ่าน

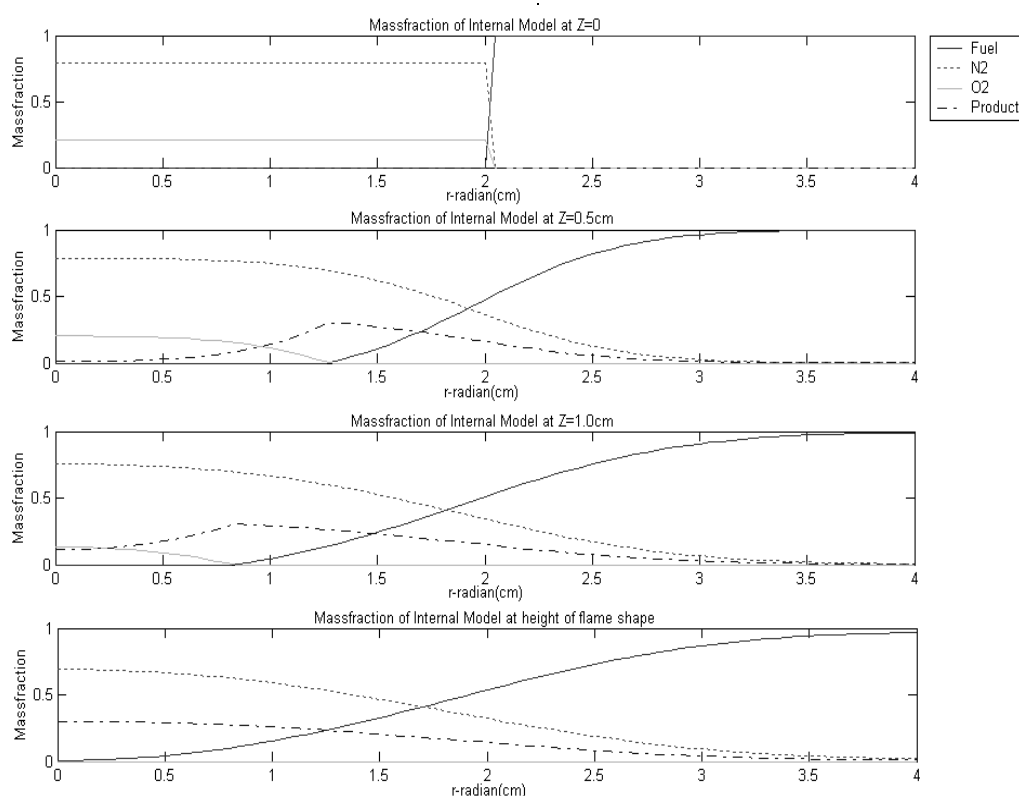
ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้	Y_n
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	23.15×10^{-2}
ไอน้ำ (H_2O)	7.11×10^{-2}
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)	0.20×10^{-2}

หลังจากนั้นหาค่าความร้อนจำเพาะรวมที่บริเวณผิวของเปลวไฟ (วิธีการคำนวณสามารถดูได้จากภาคผนวก ก) จะได้

$$C_p = 1053.09 \text{ J / (kg} \cdot \text{K)}$$

4.4 แมสแฟรกชันในแบบจำลองภายในถ่านที่ระดับความสูงต่าง ๆ

คำนวณแมสแฟรกชันของเชื้อเพลิง , ออกซิเจน , ไนโตรเจน , และผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้รวมจากสมการในหัวข้อที่ 3.6 ซึ่งจะได้ผลของแมสแฟรกชัน ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยจะยกผลของแมสแฟรกชันที่ระดับความสูง $z = 0, 0.5 \text{ cm}, 1.0 \text{ cm}$, และที่ความสูงของเปลวไฟเป็นตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-2 ผลของแมสแฟรกชันในแบบจำลองภายในถ่านที่ระดับความสูงต่างๆ

จากภาพที่ 4-2 พบว่า จุดที่แมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้มีค่ามากที่สุดจะตรงกับจุดตัดระหว่างแมสแฟรกชันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนซึ่งแมสแฟรกชันของเชื้อเพลิงและออกซิเจนจะมีค่าเป็น 0 พอดี และในขณะเดียวกันนั้นถ้าดูกราฟที่แสดงผลของแมสแฟรกชันที่ระดับความสูงของเปลวไฟ จะพบว่าออกซิเจนจะหมดไปกับปฏิกิริยาการไหม้แต่ยังมีเชื้อเพลิงอยู่ ดังนั้นเปลวไฟที่ได้ในแบบจำลองภายในถ่านนี้เป็นอันเดอร์เวนติเลทเต็ดไฮลิคดริคอลลแฟม

4.5 อุณหภูมิของเปลวไฟในแบบจำลองภายในถ่าน

แก้ปัญหาคritical temperature ของเปลวไฟในแบบจำลองภายในถ่านโดยนำค่า β_T และแมสแฟรกชันของออกซิเจนที่คำนวณได้แล้วมาหาอุณหภูมิในสมการ (3-52) และ (3-53) ด้วยแมทแล็บแล้วหาค่า $[\beta_T]_{\text{crit}}$ และ $[\gamma_T]_{\text{crit}}$ โดยเทียบบัญญัติไตรยางกับค่า β และ γ จะได้

$$\frac{(25.39 \times 10^{-4}) - [\beta_T]_{\text{crit}}}{(25.39 \times 10^{-4}) - (1.97 \times 10^{-4})} = \frac{(23.35 \times 10^{-4}) - (0)}{(23.35 \times 10^{-4}) - (-171.76 \times 10^{-4})}$$

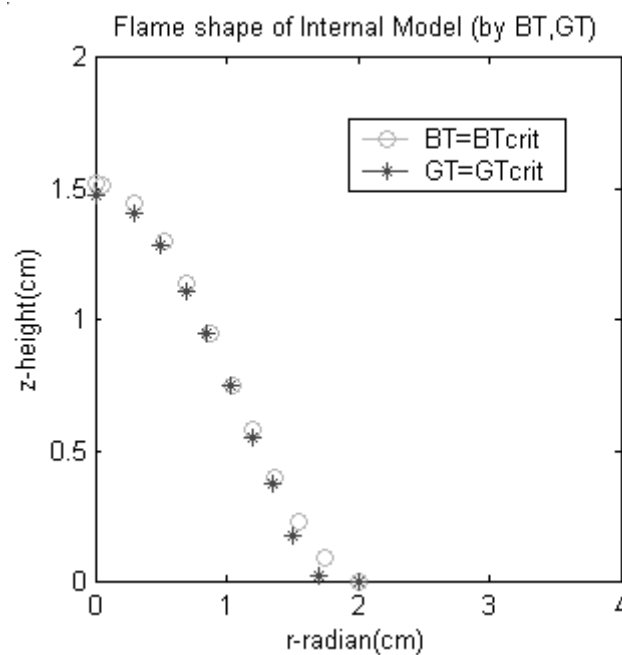
$$[\beta_T]_{\text{crit}} = 22.59 \times 10^{-4}$$

และ

$$\frac{(1) - [\gamma_T]_{\text{crit}}}{(1) - (7.77 \times 10^{-2})} = \frac{(0.14)}{(0.14) - (-1)}$$

$$[\gamma_T]_{\text{crit}} = 0.89$$

แล้วนำ $[\beta_T]_{\text{crit}}$ และ $[\gamma_T]_{\text{crit}}$ ไปเขียนกราฟรูปร่างเปลวไฟเช่นเดียวกันกับภาพที่ 4-1 จะได้ดังภาพที่ 4-3

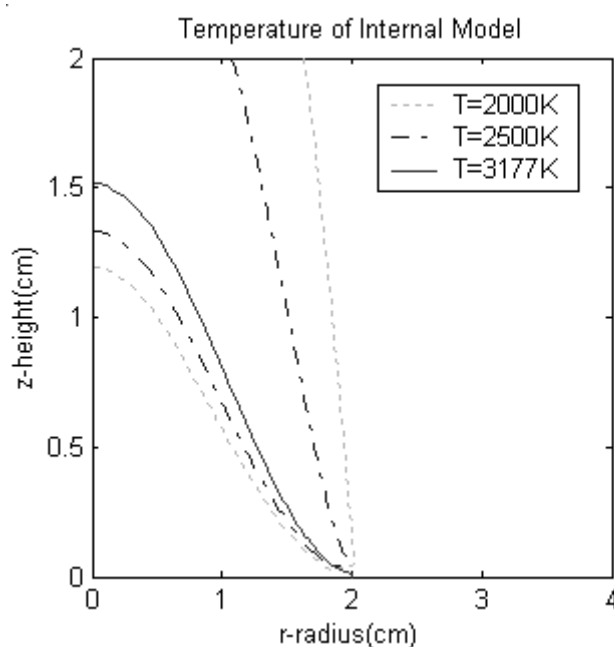


ภาพที่ 4-3 รูปร่างเปลวไฟที่ได้จาก $[\beta_T]_{\text{crit}}$ และ $[\gamma_T]_{\text{crit}}$ ในแบบจำลองภายในถ่าน

จากภาพที่ 4-3 พบได้ว่า รูปร่างเปลวไฟที่ได้จากการเขียนกราฟโดยใช้ค่า $[\gamma_T]_{\text{crit}}$ และ $[\beta_T]_{\text{crit}}$ เมื่อนำเอาไปเปรียบเทียบแล้วจะมีลักษณะเหมือนกับกราฟในภาพที่ 4-1 ดังนั้นอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณหา $[\gamma_T]_{\text{crit}}$ และ $[\beta_T]_{\text{crit}}$ นี้เป็นอุณหภูมิที่ผิวของเปลวไฟมากที่สุดด้วย แต่เนื่องจากมิกซ์เจอร์แฟรกชันที่คำนวณในสมการ (3-38) และ (3-39) มีค่าเท่ากันดังนั้นสามารถนำค่า $[\beta_T]_{\text{crit}}$ มาหาอุณหภูมิสูงสุดได้จากสมการ (3-52) จะได้

$$T_{\text{max}} = 3176.74 \text{ K}$$

และจะได้กราฟอุณหภูมิดังภาพที่ 4-4



ภาพที่ 4-4 ผลของอุณหภูมิในแบบจำลองภายในถ่าน

แล้วนำมาเปรียบเทียบอุณหภูมิที่คำนวณทั้งสองทฤษฎีได้ดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ผลของอุณหภูมิที่มากที่สุดแบบจำลองภายในถ่าน

	อุณหภูมิ (K)	% ความผิดพลาด
เชิงตัวเลข	3176.12	0.41
ผลแม่นยำตรง	3189.18	

จากผลในตารางที่ 4-5 จะพบว่าความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณเชิงตัวเลขน้อยมาก เมื่อดูจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดโดยเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณจากผลแม่นยำ แต่เนื่องจาก อุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการคำนวณแบบผลแม่นยำในแบบจำลองภายในถ้ำนั้นมากกว่า อุณหภูมิ T_{max} ซึ่งไม่น่าจะเกิดขึ้นได้ และน่าจะเป็นผลมากจากการคำนวณ γ และ γ_T ที่เป็น ผลรวมที่ไม่สิ้นสุดของเบสเซลส์ฟังก์ชันในสมการ (3-33) และ (3-34)

4.6 เงื่อนไขเริ่มต้นในแบบจำลองบนผิวถ้ำ

หลังจากคำนวณได้รูปร่างเปลวไฟและอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละวิธีแล้ว แต่เนื่องจากยังมีการ แพร่ของก๊าซในแบบจำลองอยู่และข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองบนผิวถ้ำนั้นจำเป็นต้อง สอดคล้องสมมติฐานของเบิร์ค - ชูแมนโดยตัดผลจากการแพร่ของก๊าซในการไหลที่ทางเข้าของ ก๊าซในแบบจำลองบนผิวถ้ำด้วย ดังนั้นหาค่า β และ γ ต่อไปแบบจำลองภายในถ้ำต่อไป จนค่า β และ γ คงที่ซึ่งจะได้

$$[\beta]^{1st} = -1.22 \times 10^{-2} \text{ และ } [\gamma]^{1st} = -0.72$$

แล้วนำ $[\beta]^{1st}$ และ $[\gamma]^{1st}$ มาหาแมสแฟรกชันจากสมการในหัวข้อที่ 3.6 แล้วจะได้แมสแฟรกชัน ของก๊าซผสมดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 แมสแฟรกชันของก๊าซผสมที่ได้จากแบบจำลองบนผิวถ้ำ

	CFD	ผลแม่นยำ
แมสแฟรกชันของเชื้อเพลิง	71.05×10^{-3}	71.60×10^{-2}
แมสแฟรกชันของออกซิเจน	0	0
แมสแฟรกชันของไนโตรเจน	20.13×10^{-2}	19.75×10^{-2}
แมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้		
แมสแฟรกชันของคาร์บอนไดออกไซด์	6.70×10^{-2}	6.57×10^{-2}
แมสแฟรกชันของไอน้ำ	2.06×10^{-2}	2.02×10^{-2}
แมสแฟรกชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์	0.06×10^{-2}	0.06×10^{-2}
รวม	1.00	1.00

นำผลจากตารางที่ 4-6 คำนวณค่าความร้อนจำเพาะรวมและอุณหภูมิ โดยใช้ $[\beta_T]^{1st}$ และ $[\gamma_T]^{1st}$ ซึ่งคำนวณมาได้

$$[\beta_T]^{1st} = 7.94 \times 10^{-4} \text{ และ } [\gamma_T]^{1st} = 0.31$$

แล้วนำ $[\beta_T]^{1st}$ มาคำนวณหาอุณหภูมิได้จากสมการ (3-51) จะได้

$$C_p = 1002.52 \text{ J / (kg} \cdot \text{K) , } T = 1173.34 \text{ K}$$

และนำ $[\gamma_T]^{1st}$ มาคำนวณหาอุณหภูมิได้จากสมการ (3-53) จะได้

$$C_p = 1002.13 \text{ J / (kg} \cdot \text{K) , } T = 1157.24 \text{ K}$$

ผลของแมสแฟรกชันที่แสดงในตารางที่ 4-6 และอุณหภูมิที่คำนวณได้ทั้งสองทฤษฎีนั้นจะมีความใกล้เคียงกันมากถ้านำผลที่ได้ในแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกัน โดยที่ผลของแมสแฟรกชันและอุณหภูมิที่คำนวณมาได้นี้จะเป็นข้อมูลที่จะใช้การคำนวณในแบบจำลองส่วนบนผิวถ่านโดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในแบบจำลองต่อไปนี้จะมีความสมบัติของผสม โดยจะคิดสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวลได้ดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในแบบจำลองส่วนบนผิวถ่านเชื้อเพลิง

	% โดยมวล	
	CFD	ผลแม่นยำตรง
เชื้อเพลิงจากแบบจำลองภายในถ่าน	71.05	71.60
ไนโตรเจน	20.13	19.75
คาร์บอนไดออกไซด์	6.70	6.57
ไอน้ำ	2.06	2.02
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	0.06	0.06

จากสารผสมในตารางที่ 4-7 นั้นสามารถนำมาแก้สมการปฏิกิริยาการเผาไหม้ทางเคมีในสมการ (3-2) จะได้ดังตารางที่ 4-8 สำหรับแก้ปัญหาแบบ CFD และตารางที่ 4-9 สำหรับแก้ปัญหาแบบผลแม่นยำตรง

ตารางที่ 4-8 สารต่างๆ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาทางเคมีของสมการ (3-2) สำหรับเชิงตัวเลข

	สูตรเคมีและตัวเลขในสมการเคมี
Fuel ^{1st} & Product ^{1st}	$C_{2.53}H_{3.79}O_{1.40}N_{0.05}S_{0.03} (g) + 0.58N_2(g) + 0.12CO_2(g) + 0.09H_2O(g) + 0.01SO_2(g)$
Air	$2.81[O_2 (g) + 3.79N_2 (g)]$
Product ^{2nd}	$2.65CO_2 (g) + 1.99H_2O (g) + 0.04SO_2 (g) + 11.17N_2 (g)$

คำนวณ β_F , β_O , $(\beta_T)_F$ และ $(\beta_T)_O$ ในหัวข้อที่ 3.4 เช่นเดียวกับแบบจำลองภายในถ่าน เพื่อจะนำไปแก้ปัญหาลำดับเชิงตัวเลขจะได้

$$\beta_F = -122.05 \times 10^{-4}$$

$$\beta_O = 23.35 \times 10^{-4}$$

$$(\beta_T)_F = 7.94 \times 10^{-4}$$

$$(\beta_T)_O = 25.39 \times 10^{-4}$$

โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศของแบบจำลองบนผิวถ่านในหัวข้อที่ 3.3 สำหรับการคำนวณลำดับเชิงตัวเลขมีค่าเท่ากับ

$$D = 1.68 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

ตารางที่ 4-9 สารต่างๆ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาทางเคมีของสมการ (3-2) สำหรับผลแม่นยำตรง

	สูตรเคมีและตัวเลขในสมการเคมี
Fuel ^{1st} & Product ^{1st}	$C_{2.53}H_{3.79}O_{1.40}N_{0.05}S_{0.03} (g) + 0.57N_2(g) + 0.12CO_2(g) + 0.09H_2O(g) + 0.01SO_2(g)$
Air	$2.81[O_2 (g) + 3.79N_2 (g)]$
Product ^{2nd}	$2.65CO_2 (g) + 1.99H_2O (g) + 0.04SO_2 (g) + 11.16N_2 (g)$

และคำนวณ C , v และ v_T ในหัวข้อที่ 3.5 เพื่อจะนำไปแก้ปัญหาคำนวณผลแม่นยำได้

$$C = 0.25$$

$$v = 0.19$$

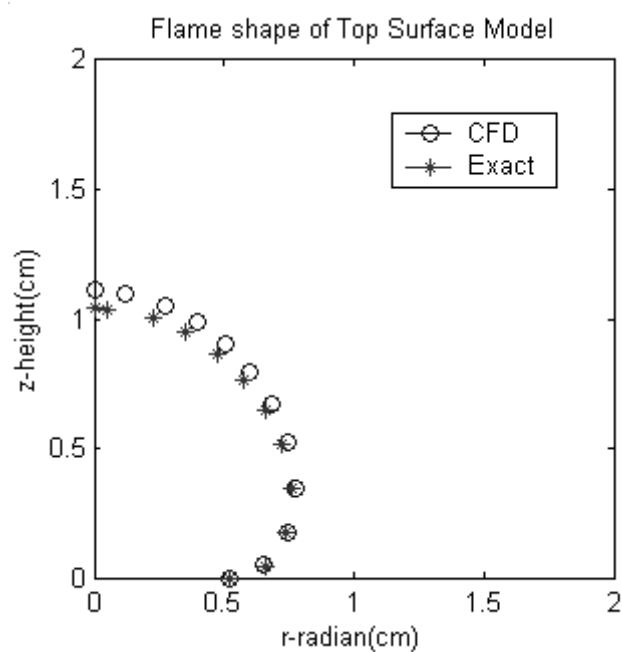
$$v_T = 0.31$$

โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศของแบบจำลองบนผิวถ่านในหัวข้อที่ 3.3 สำหรับการคำนวณผลแม่นยำมีค่าเท่ากับ

$$D = 1.67 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

4.7 รูปร่างของเปลวไฟในแบบจำลองบนผิวถ่าน

แก้ปัญหาลักษณะเดียวกับแบบจำลองภายในตัวถ่านเชื้อเพลิงโดยนำค่า $\beta = 0$ และ $\gamma = 0$ มาเขียนเป็นกราฟเพื่อให้ได้รูปร่างเปลวไฟดังภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-5 รูปร่างเปลวไฟของแบบจำลองบนผิวตัวถ่านเชื้อเพลิง

จากภาพที่ 4-5 จะพบว่ารูปร่างของเปลวไฟที่ได้จากการคำนวณทั้งสองนั้นต่างก็ให้รูปร่างของเปลวไฟที่ใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าจะไม่เท่ากันกับในแบบจำลองภายในตัวถ่านเชื้อเพลิง แต่เนื่องจากข้อมูลที่ใช้คำนวณจากตารางที่ 4-7 จะไม่เหมือนกัน แต่ค่า β ที่ได้จากการคำนวณแบบ CFD และค่า γ ที่ได้จากการคำนวณผลแม่นยำตรงสามารถใช้แทนกันได้

4.8 แมสแฟรกชันที่ผิวของเปลวไฟในแบบจำลองบนผิวถ่าน

จะได้มิกซ์เจอร์แฟรกชันที่บริเวณผิวของเปลวไฟจากการคำนวณในสมการ (3-40) ทั้งในการคำนวณเชิงตัวเลข

$$f_{st} = \frac{[(58.22 \times 1)/(32 \times 2.81)](0.21)}{(71.05 \times 10^{-2}) + [(58.22 \times 1)/(32 \times 2.81)](0.21)} = 1.61 \times 10^{-1}$$

และคำนวณผลตรง

$$f_{st} = \frac{[(58.22 \times 1)/(32 \times 2.81)](0.21)}{(71.60 \times 10^{-2}) + [(58.22 \times 1)/(32 \times 2.81)](0.21)} = 1.60 \times 10^{-1}$$

แล้วหาค่าแมสแฟรกชันที่บริเวณผิวเปลวไฟของไนโตรเจนจากสมการ (3-48) แล้วจะได้ผลการคำนวณเชิงตัวเลข

$$Y_N = (20.13 \times 10^{-2}) \frac{(1.61 \times 10^{-1}) - (1.61 \times 10^{-1})}{1 - (1.61 \times 10^{-1})} + (0.21)[1 - (1.61 \times 10^{-1})] = 66.31 \times 10^{-2}$$

และผลการคำนวณผลแม่นยำตรง

$$Y_N = (19.75 \times 10^{-2}) \frac{(1.60 \times 10^{-1}) - (1.60 \times 10^{-1})}{1 - (1.60 \times 10^{-1})} + (0.21)[1 - (1.60 \times 10^{-1})] = 66.39 \times 10^{-2}$$

จากนั้นหาแมสแฟรกชันรวมของคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้โดยใช้สมการ (3-51) แล้วจะได้ตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 แมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ในแบบจำลองบนผิวถ่าน

ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้	Y_n	
	CFD	ผลแม่นยำตรง
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	25.56×10^{-2}	25.50×10^{-2}
ไอน้ำ (H_2O)	7.85×10^{-2}	7.83×10^{-2}
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)	0.28×10^{-2}	0.28×10^{-2}

หลังจากนั้นหาค่าความร้อนจำเพาะรวมที่บริเวณผิวของเปลวไฟซึ่งจะได้ผลการคำนวณเชิงตัวเลข

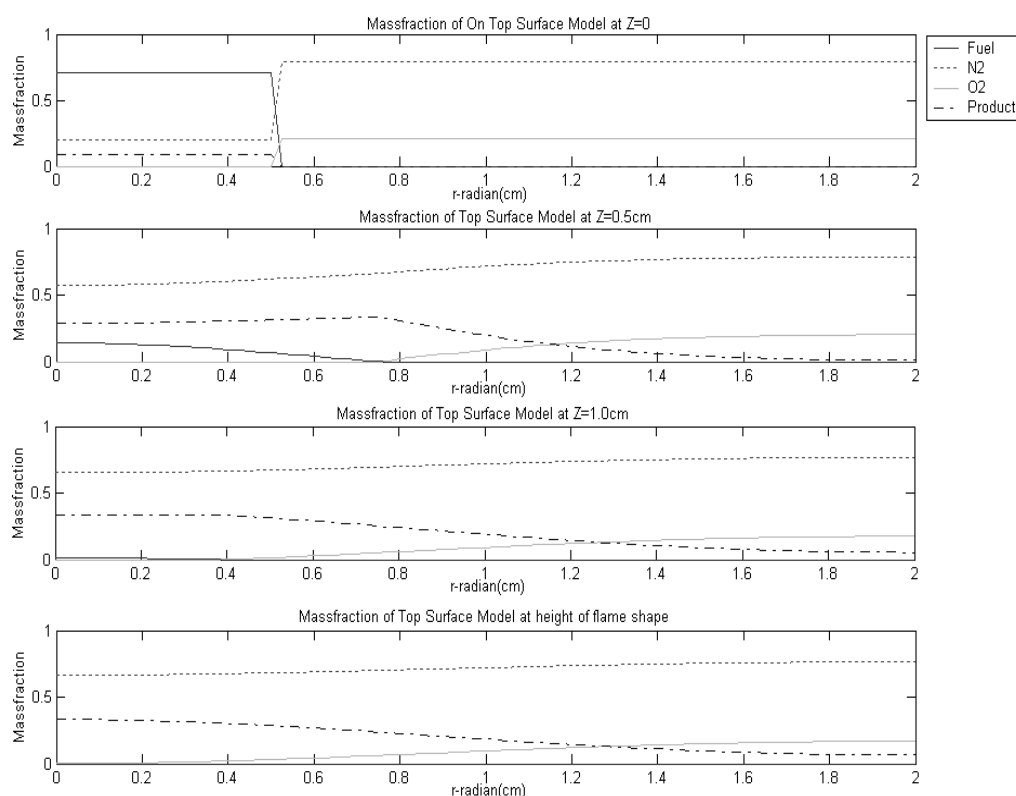
$$C_p = 1054.74 \text{ J / (kg}\cdot\text{K)}$$

และผลการคำนวณผลแม่นยำตรง

$$C_p = 1054.70 \text{ J / (kg}\cdot\text{K)}$$

4.9 แมสแฟรกชันในแบบจำลองบนผิวถ่านที่ระดับความสูงต่างๆ

คำนวณแมสแฟรกชันของเชื้อเพลิง ออกซิเจน ไนโตรเจน และผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้จากสมการในหัวข้อที่ 3.6 ซึ่งจะได้ผลของแมสแฟรกชัน ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยจะยกผลของแมสแฟรกชันที่ระดับความสูง $z = 0$, 0.5 cm , 1.0 cm , และที่ความสูงของเปลวไฟเป็นตัวอย่างเช่นเดียวกับในแบบจำลองภายในถ่านดังแสดงในภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4-6 ผลของแมสแฟรกชันในแบบจำลองบนผิวถ่านที่ระดับความสูงต่างๆ

ผลของแมสแฟรกชันจากภาพที่ 4-6 จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับในภาพที่ 4-2 คือ แมสแฟรกชันของคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมากที่สุดจะตรงกับจุดตัดระหว่างแมสแฟรกชันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนซึ่งแมสแฟรกชันของเชื้อเพลิงและออกซิเจนจะมีค่าเป็น 0 พอดีเหมือนกัน และในขณะเดียวกันนั้นถ้าดูกราฟที่แสดงผลของแมสแฟรกชันที่ระดับความสูงของเปลวไฟ พบว่าเชื้อเพลิงจะหมดไปกับปฏิกิริยาการไหม้แต่ยังมีออกซิเจนอยู่ซึ่งตรงข้ามกับผลของแมสแฟรกชันในภาพที่ 4-2 เพราะฉะนั้นเปลวไฟที่ได้ในแบบจำลองบนผิวถ่านนี้เป็นโอเวอร์เวนติเลตเตดไซลินดริคอลเฟลม

4.10 อุณหภูมิของเปลวไฟในแบบจำลองบนผิวถ่าน

แก้ปัญหาค่าอุณหภูมิของเปลวไฟในแบบจำลองบนผิวถ่านโดยนำค่า β_T และแมสแฟรกชันของออกซิเจนที่คำนวณได้แล้วมาหาอุณหภูมิในสมการ (3-52) และ (3-53) ด้วยแมทแล็บแล้วหาค่า $[\beta_T]_{crit}$ และ $[\gamma_T]_{crit}$ โดยเทียบบัญญัติไตรยางกับค่า β และ γ เช่นเดียวกันกับในแบบจำลองภายในถ่านจะได้

$$\frac{(25.39 \times 10^{-4}) - [\beta_T]_{\text{Crit}}}{(25.39 \times 10^{-4}) - (7.94 \times 10^{-4})} = \frac{(23.35 \times 10^{-4}) - (0)}{(23.35 \times 10^{-4}) - (-122.05 \times 10^{-4})}$$

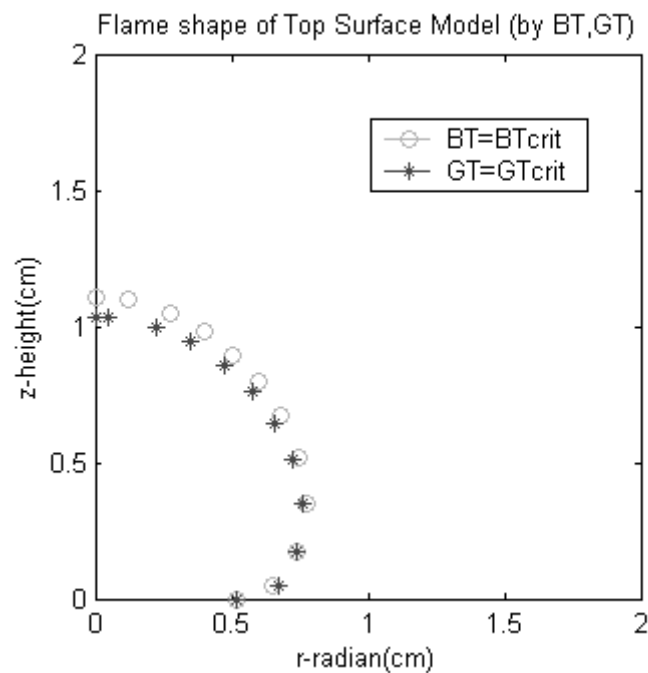
$$[\beta_T]_{\text{Crit}} = 22.59 \times 10^{-4}$$

และ

$$\frac{(1) - [\gamma_T]_{\text{Crit}}}{(1) - (0.31)} = \frac{(0.19)}{(0.19) - (-1)}$$

$$[\gamma_T]_{\text{Crit}} = 0.89$$

แล้วนำค่า $[\gamma_T]_{\text{Crit}}$ และ $[\beta_T]_{\text{Crit}}$ มาเขียนกราฟรูปร่างเปลวไฟเซนเดียวกันกับภาพที่ 4-5 จะได้ดังภาพที่ 4-7



ภาพที่ 4-7 รูปร่างเปลวไฟที่ได้จาก $[\beta_T]_{\text{Crit}}$ และ $[\gamma_T]_{\text{Crit}}$ ในแบบจำลองบนผิวถ่าน

จากภาพที่ 4-7 นั้นจะพบว่ารูปร่างของเปลวไฟที่ได้จากการเขียนกราฟโดยใช้ค่า $[\gamma_T]_{\text{Crit}}$ และ $[\beta_T]_{\text{Crit}}$ มาเปรียบเทียบกับแล้วพบว่าทับซ้อนกันเกือบจะพอดีเหมือนกันเหมือนกับกราฟในภาพที่ 4-5 ดังนั้นอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณหา $[\gamma_T]_{\text{Crit}}$ และ $[\beta_T]_{\text{Crit}}$ นี้เป็น

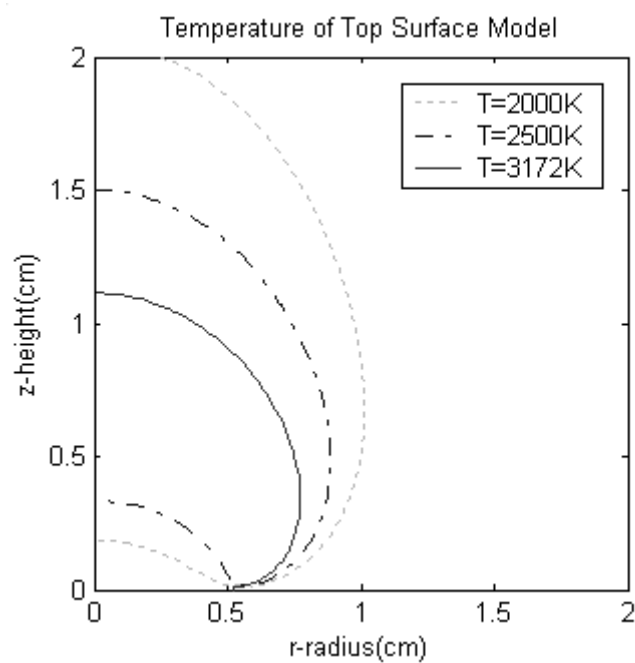
อุณหภูมิที่ผิวของเปลวไฟมากที่สุดด้วยเซนเดียวกับในแบบจำลองภายในตัวถ่านเชื้อเพลิงจึงหาอุณหภูมิด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขในสมการ (3-52) จะได้

$$T_{\max} = 3171.85 \text{ K}$$

และอุณหภูมิด้วยการคำนวณผลแม่นยำตรงในสมการ (3-53) จะได้

$$T_{\max} = 3171.97 \text{ K}$$

และจะได้กราฟอุณหภูมิดังภาพที่ 4-8



ภาพที่ 4-8 ผลของอุณหภูมิในแบบจำลองบนผิวถ่าน

แล้วนำมาเปรียบเทียบอุณหภูมิที่คำนวณทั้งสองทฤษฎีได้ดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ผลของอุณหภูมิที่มากที่สุดในแบบจำลองบนผิวถ่าน

	อุณหภูมิ (K)	% ความผิดพลาด
เชิงตัวเลข	3171.60	0.01
ผลแม่นยำตรง	3171.86	

ผลที่แสดงในตารางที่ 4-11 พบว่าความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณเชิงตัวเลขน้อยมาก เมื่อดูจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดโดยเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณจากผลแม่นยำตรง และจากอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการคำนวณทั้งสองวิธีในแบบจำลองบนผิวถ่านนั้นมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิ T_{max} ซึ่งจะสอดคล้องกับความเป็นจริงมากกว่าเมื่ออุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากตารางที่ 4-5

4.11 ก๊าซผสมที่ได้จากแบบจำลองบนผิวถ่าน

หลังจากคำนวณได้รูปร่างเปลวไฟและอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละวิธีแล้วหาค่า β และ γ คงที่ เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 4.6 จะได้

$$[\beta]^{2nd} = 1.39 \times 10^{-3} \text{ และ } [\gamma]^{2nd} = 0.12$$

หลังจากนั้นหาแมสแฟรกชันจากสมการในหัวข้อที่ 3.6 แล้วจะได้แมสแฟรกชันของก๊าซผสมที่ได้จากแบบจำลองบนผิวถ่านดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 แมสแฟรกชันของก๊าซผสมที่ได้จากแบบจำลองบนผิวถ่าน

	CFD	ผลแม่นยำตรง
แมสแฟรกชันของเชื้อเพลิง	0	0
แมสแฟรกชันของออกซิเจน	12.48×10^{-2}	12.78×10^{-2}
แมสแฟรกชันของไนโตรเจน	73.85×10^{-2}	74.06×10^{-2}
แมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้		
แมสแฟรกชันของคาร์บอนไดออกไซด์	10.37×10^{-2}	9.98×10^{-2}
แมสแฟรกชันของไอน้ำ	3.19×10^{-2}	3.07×10^{-2}
แมสแฟรกชันของซิลเฟอร์ไดออกไซด์	0.11×10^{-2}	0.11×10^{-2}
รวม	1.00	1.00

นำผลจากตารางที่ 4-12 คำนวณค่าความร้อนจำเพาะรวมและอุณหภูมิ โดยใช้ $[\beta_T]^{2nd}$ และ $[\gamma_T]^{2nd}$ ซึ่งคำนวณมาได้

$$[\beta_T]^{2nd} = 24.26 \times 10^{-4} \text{ และ } [\gamma_T]^{1st} = 0.96$$

แล้วนำ $[\beta_T]^{2nd}$ มาคำนวณหาอุณหภูมิได้จากสมการ (3-51) จะได้

$$C_p = 1030.12 \text{ J / (kg}\cdot\text{K)} , T = 1492.10 \text{ K}$$

และนำ $[\gamma_T]^{2nd}$ มาคำนวณหาอุณหภูมิได้จากสมการ (3-53) จะได้

$$C_p = 1029.52 \text{ J / (kg}\cdot\text{K)} , T = 1451.14 \text{ K}$$

ผลของแมสแฟรกชันและอุณหภูมิที่ได้จากตารางที่ 4-12 จะมีความใกล้เคียงกันมากถ้านำผลที่ได้ในแต่ละวิธีการคำนวณมาเปรียบเทียบกันเช่นเดียวกันกับในแบบจำลองภายในตัวถ่านเชื้อเพลิง แต่ผลที่ได้ในตารางที่ 4-12 นี้มาเปรียบเทียบกับสภาพข้างนอกซึ่งมีอากาศเท่านั้นแล้วพบว่าไม่สอดคล้องกัน ดังนั้นจึงนำแบบจำลองบนผิวถ่านในบทนี้มาปรับเปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตให้สอดคล้องสภาพข้างนอกซึ่งมีอากาศมากเกินไปในการเผาไหม้โดยจะกล่าวไว้ในบทต่อไป

บทที่ 5

การแก้ปัญหในแบบจำลองของจริง

เนื่องจากในแก้ปัญหบางปัญหานั้นไม่อาจสามารถแก้ได้เหมือนกับสมการในตารางที่ 3-5 ดังนั้นการแก้ปัญหจาก CFD เป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อหาคำตอบหรือผลลัพธ์ของปัญหาที่ต้องการโดยยกตัวอย่างของแบบจำลองหนึ่งซึ่งต้องใช้การแก้ปัญหจาก CFD เท่านั้น และในแบบจำลองนี้เป็นการปรับปรุงจากแบบจำลองบนผิวถ่านโดยกำหนดหรือปรับเปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงให้มากที่สุด

5.1 เงื่อนไขเริ่มต้นและในแบบจำลองของจริง

ใช้แบบจำลองที่ 2 ในภาพที่ 3-5 เป็นแบบจำลองของจริงโดยใช้ข้อมูลสารผสมของ CFD ในตารางที่ 4-7 และแก้สมการปฏิกิริยาการเผาไหม้ทางเคมีในตารางที่ 4-8 แต่เปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตเพื่อให้ใกล้กับสภาพความเป็นจริงดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองของจริง

เงื่อนไขขอบเขต		แบบจำลองบนผิวถ่าน	
z	r	β	β_T
z = 0	$0 \leq r \leq r_j$	$C1 = \beta_F$	$C3 = (\beta_T)_F$
	$r_j \leq r \leq r_s$	$C2 = \beta_o$	$C4 = (\beta_T)_o$
z > 0	r = 0	$\frac{\partial \beta}{\partial r} = 0$	
	r = r_s	$\beta_o, (\beta_T)_o$	

ใช้ค่า β_F , β_o , $(\beta_T)_F$ และ $(\beta_T)_o$ ในหัวข้อที่ 4.6 จะได้

$$\beta_F = -122.05 \times 10^{-4}$$

$$\beta_o = 23.35 \times 10^{-4}$$

$$(\beta_T)_F = 7.94 \times 10^{-4}$$

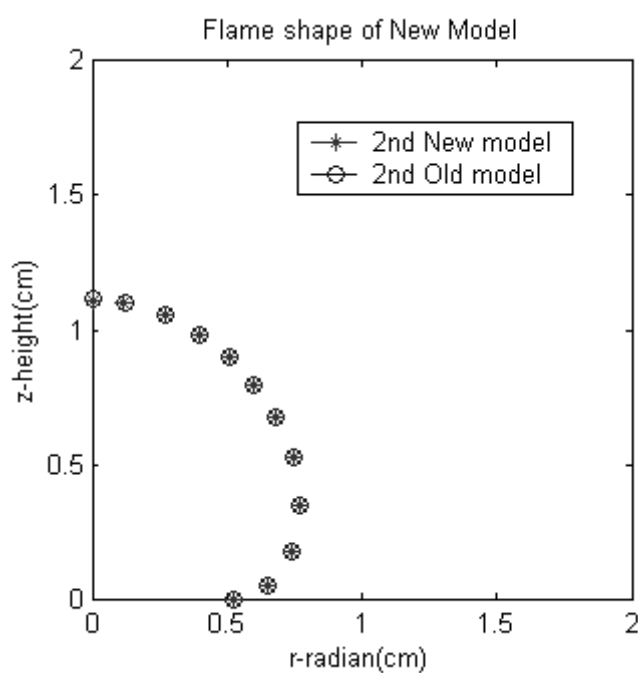
$$(\beta_T)_O = 25.39 \times 10^{-4}$$

แล้วนำไปคำนวณโดยใช้สมการในตารางที่ 3-2 มาแก้ปัญหาโดยใช้สัมประสิทธิ์การแพร่เชิงมวลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศของเชิงตัวเลขในแบบจำลองบนผิวถ่านอันเดิมในบทที่ 4 มีค่าเท่ากับ

$$D = 1.68 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

5.2 รูปร่างของเปลวไฟในแบบจำลองของจริง

นำค่า $\beta = 0$ มาเขียนเป็นกราฟด้วยเมทแล็บเพื่อให้ได้รูปร่างเปลวไฟในแบบจำลองของจริงแล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลจากรูปร่างเปลวไฟในแบบจำลองบนผิวถ่านในบทก่อนหน้าด้วยเมทแล็บเช่นเดียวกันดังภาพที่ 5-1



ภาพที่ 5-1 รูปร่างของเปลวไฟของแบบจำลองของจริงเทียบกับแบบจำลองเก่า

จากภาพที่ 5-1 จะพบว่ารูปร่างของเปลวไฟที่ได้จากแบบจำลองของจริงนี้จะใกล้เคียงกันกับรูปร่างของเปลวไฟที่ได้จากแบบจำลองเก่ามากจนเป็นเปลวไฟอันเดียวกัน ถึงแม้ว่ามาจากการคำนวณวิธีเดียวกันแต่เงื่อนไขขอบเขตไม่เหมือนกันก็ตาม

5.3 แมสแฟรกชันที่ผิวของเปลวไฟในแบบจำลองของจริง

หามิกซ์เจอร์แฟรกชันที่บริเวณผิวของเปลวไฟได้โดยใช้มิกซ์เจอร์แฟรกชันที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขในหัวข้อ 4.8 จะได้

$$f_{st} = 1.61 \times 10^{-1}$$

แล้วหาแมสแฟรกชันที่บริเวณผิวเปลวไฟของไนโตรเจนได้โดยใช้แมสแฟรกชันที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขในหัวข้อ 4.8 จะได้

$$Y_N = 66.31 \times 10^{-2}$$

และแมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้รวม

$$Y_P = 33.69 \times 10^{-2}$$

จากนั้นหาแมสแฟรกชันรวมของคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้โดยใช้สมการ (3-51) แล้วจะได้ตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 แมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ในแบบจำลองของจริง

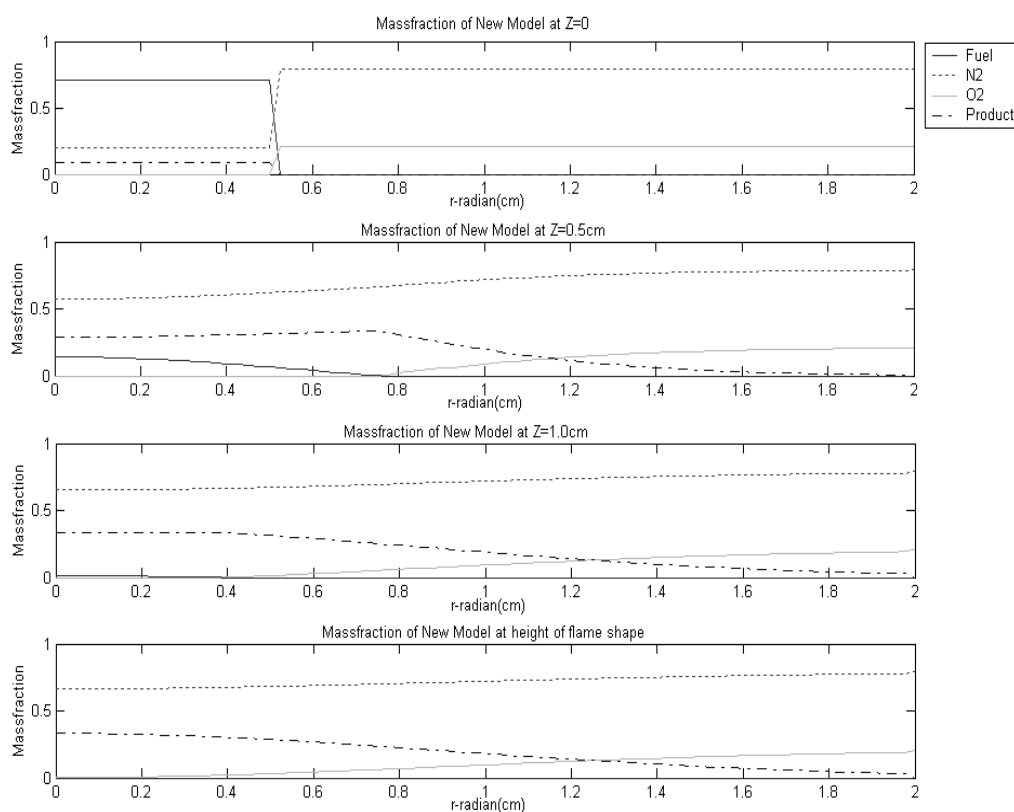
ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้	Y_n
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	25.56×10^{-2}
ไอน้ำ (H_2O)	7.85×10^{-2}
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)	0.28×10^{-2}

แล้วหาค่าความร้อนจำเพาะรวม จะได้

$$C_p = 1054.74 \text{ J / (kg}\cdot\text{K)}$$

5.4 แมสแฟรกชันในแบบจำลองของจริงที่ระดับความสูงต่าง ๆ

คำนวณแมสแฟรกชันของเชื้อเพลิง , ออกซิเจน , ไนโตรเจน , และผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้รวมจากสมการในหัวข้อที่ 3.6 ซึ่งจะได้ผลของแมสแฟรกชัน ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยจะยกผลของแมสแฟรกชันที่ระดับความสูง $z = 0, 0.5 \text{ cm}, 1.0 \text{ cm}$, และที่ความสูงของเปลวไฟเป็นตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 5-2



ภาพที่ 5-2 ผลของแมสแฟรกชันในแบบจำลองของจริงที่ระดับความสูงต่าง ๆ

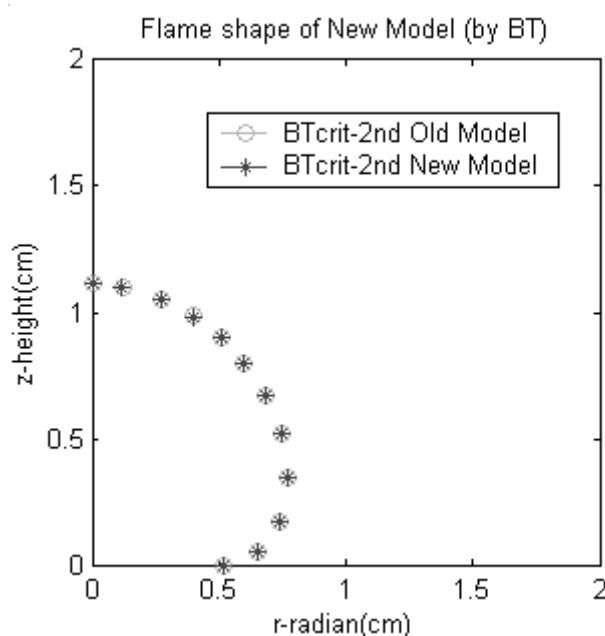
จากภาพที่ 5-2 จะมีลักษณะเหมือนกับในภาพที่ 4-6 เนื่องจากรูปร่างของเปลวไฟที่ได้ในภาพที่ 5-1 จะเห็นได้ว่า รูปร่างของเปลวไฟทั้งสองแบบจำลองทับซ้อนกันพอดี เพราะฉะนั้นแมสแฟรกชันของคาร์บอนไดออกไซด์ , ไอน้ำ , และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่บริเวณผิวของเปลวไฟใช้มิกซ์เจอร์แฟรกชันที่บริเวณผิวของเปลวไฟเชิงตัวเลขในแบบจำลองบนผิวถ่านในบทยที่แล้วนั่นเอง จึงทำให้ค่า β_F , β_O , $(\beta_T)_F$ และ $(\beta_T)_O$ ที่ใช้ในแบบจำลองใหม่เป็นค่าเดียวกันในแบบจำลองบนผิวถ่านในบทยที่แล้วด้วย ดังนั้นจึงทำให้เปลวไฟที่ได้ในแบบจำลองที่ปรับปรุงจากแบบจำลองบนผิวถ่านนี้เป็นโอเวอร์เวนติเลทเต็ดไฮโดรคาร์บอนเฟลมเช่นเดียวกับในแบบจำลองบนผิวถ่าน

5.5 อุณหภูมิของเปลวไฟในแบบจำลองของจริง

แก้ปัญหาค่าอุณหภูมิของเปลวไฟในแบบจำลองบนผิวถ่านโดยนำค่า β_T และแมสแฟรคชันของออกซิเจนที่คำนวณได้แล้วมาหาอุณหภูมิในสมการ (3-52) ด้วยแมทแล็บ แต่เนื่องจากค่า β_F , β_O , $(\beta_T)_F$ และ $(\beta_T)_O$ ในแบบจำลองของจริงเป็นค่าเดียวกันในแบบจำลองบนผิวถ่านเช่นเดียวกันกับมิกซ์เจอร์แฟรคชันที่บริเวณผิวของเปลวไฟดังนั้นค่า $[\beta_T]_{\text{Crit}}$ จะได้

$$[\beta_T]_{\text{Crit}} = 22.59 \times 10^{-4}$$

แล้วนำค่า $[\beta_T]_{\text{Crit}}$ มาเขียนกราฟรูปร่างเปลวไฟเช่นเดียวกันกับภาพที่ 5-1 จะได้ดังภาพที่ 5-3

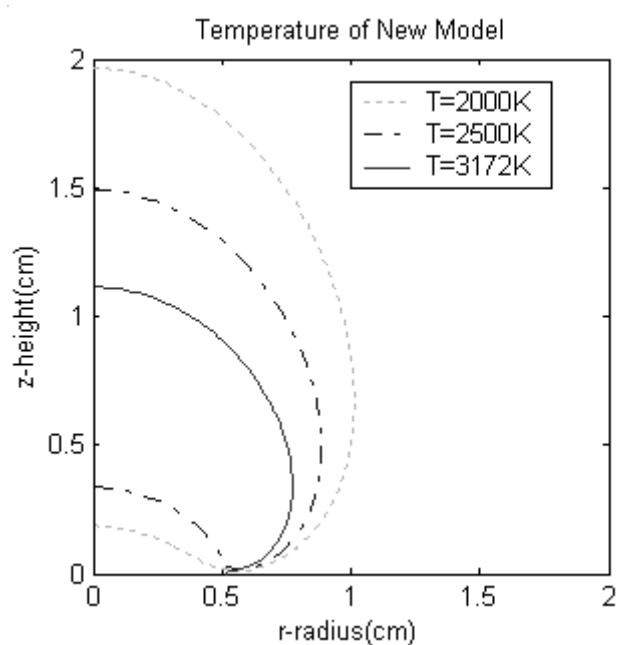


ภาพที่ 5-3 รูปร่างของเปลวไฟที่ได้จาก $[\beta_T]_{\text{Crit}}$ ในแบบจำลองของจริง

จากภาพที่ 5-3 จะพบว่ารูปร่างของเปลวไฟที่ได้จากการเขียนกราฟโดยใช้ค่า $[\beta_T]_{\text{Crit}}$ ทั้งแบบจำลองบนผิวถ่านในบทที่ 4 และของจริงในบทที่ 5 แล้วนำมาเปรียบเทียบกันแล้วพบว่าทับซ้อนกันพอดีเหมือนเส้นเดียวกันเหมือนกับกราฟในภาพที่ 5-1 เพราะฉะนั้นอุณหภูมิสูงสุดที่ผิวของเปลวไฟสามารถใช้ค่าเดียวกับแบบจำลองบนผิวถ่านจะได้

$$T_{\text{max}} = 3171.85 \text{ K}$$

และจะได้กราฟอุณหภูมิดังภาพที่ 5-4



ภาพที่ 5-4 ผลของอุณหภูมิในแบบจำลองของจริง

แล้วนำมาเปรียบเทียบอุณหภูมิที่คำนวณได้ดังตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-3 ผลของอุณหภูมิที่มากที่สุดในการจำลองของจริง

	อุณหภูมิ (K)
แบบจำลองของจริง	3171.85
แบบจำลองเก่า (เชิงตัวเลขในตารางที่ 4 - 11)	3171.60
% ความผิดพลาด	0.01

ผลจากตารางที่ 5-3 พบว่าความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณในแบบจำลองของจริงเรียกว่าไม่มีเลยเมื่อดูจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดโดยเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขในแบบจำลองบนผิวถ่านในบทที่ 4 เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงขอบเขตเงื่อนไขในแบบจำลองบนผิวถ่านไม่ได้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมากนัก

5.6 ก๊าซผสมที่ได้จากแบบจำลองของจริง

หลังจากคำนวณได้รูปร่างเปลวไฟและอุณหภูมิสูงสุดได้แล้วหาค่า β คงที่จะได้

$$[\beta]^{\text{New}} = 23.35 \times 10^{-4}$$

แล้วหาแมสแฟรกชันจากสมการในหัวข้อที่ 3.6 แล้ว จะได้แมสแฟรกชันของก๊าซผสมที่ได้จากแบบจำลองของจริงดังตารางที่ 5-4 จะได้

ตารางที่ 5-4 แมสแฟรกชันของก๊าซผสมที่ได้จากแบบจำลองของจริง

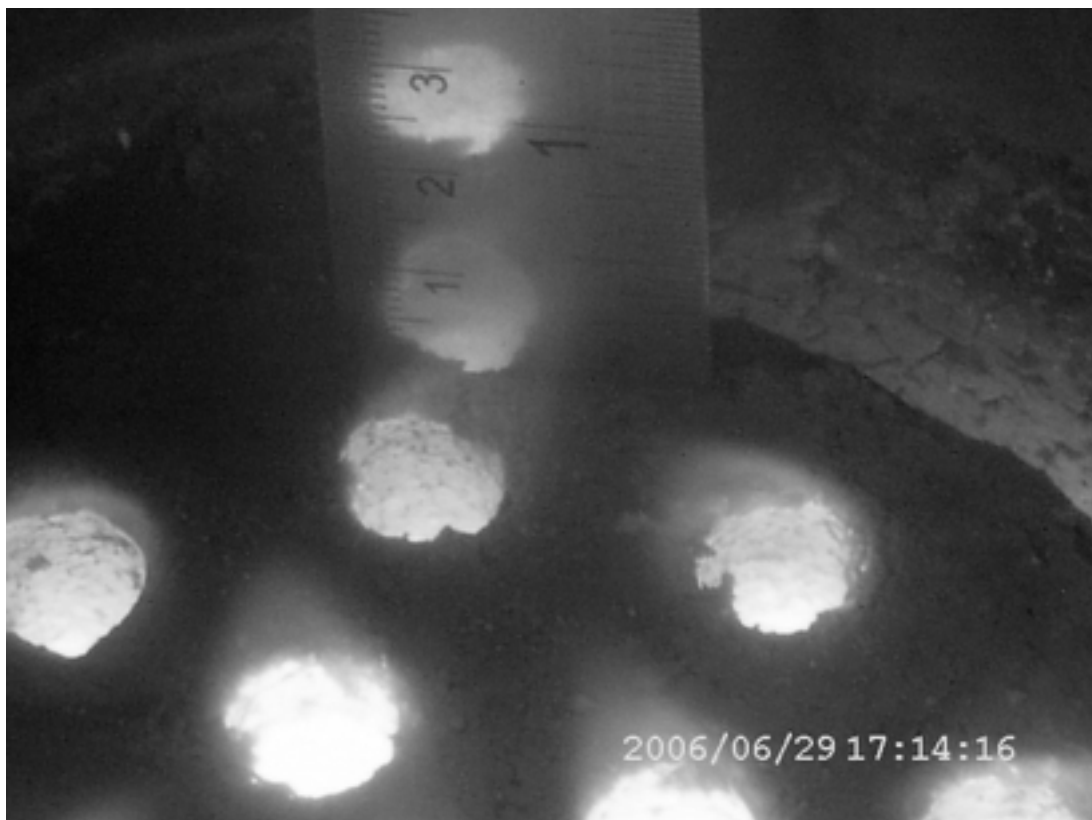
	แบบเก่า (บทที่ 4)	แบบใหม่ (บทที่ 5)
แมสแฟรกชันของเชื้อเพลิง	0	0
แมสแฟรกชันของออกซิเจน	12.48×10^{-2}	0.21
แมสแฟรกชันของไนโตรเจน	73.85×10^{-2}	0.79
แมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้		
แมสแฟรกชันของคาร์บอนไดออกไซด์	10.37×10^{-2}	0.00
แมสแฟรกชันของไอน้ำ	3.19×10^{-2}	0.00
แมสแฟรกชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์	0.11×10^{-2}	0.00
รวม	1.00	1.00

ผลจากตารางที่ 5-4 พบว่า แมสแฟรกชันในแบบจำลองแบบใหม่เริ่มสอดคล้องกับสภาพเป็นที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองบนผิวถ่านอันเก่า โดยผลของแมสแฟรกชันที่ได้จากตารางนี้จะเห็นได้ว่าเป็นองค์ประกอบของอากาศนั่นเอง

ผลของรูปร่างของเปลวไฟในภาพที่ 5-1 และ 5-3 รวมทั้งผลในตารางที่ 5-2 พบว่ารูปร่างเปลวไฟของแบบจำลองทั้งสองนั้นใกล้เคียงกันมากจนทับซ้อนกันพอดี แต่เมื่อนำมาเทียบผลในตารางที่ 5-4 แล้วพบว่ามีความแตกต่างกันพอสมควร ดังนั้นแบบจำลองของเบิร์ค - ชูแมนสามารถใช้นำมาแก้ปัญหาเพื่อหารูปร่างและอุณหภูมิของเปลวไฟที่ผิวของเปลวไฟเท่านั้น

5.7 ผลของรูปร่างเปลวไฟจากการทดลองจริง

เนื่องจากมีการทดลองจุดไฟเพื่อดูรูปร่างของเปลวไฟของจริงเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับความสูงของเปลวไฟที่คำนวณได้ในแบบจำลองซึ่งดูได้จากภาพที่ 5-5



ภาพที่ 5-5 รูปร่างของเปลวไฟที่ได้จากการทดลองจริง

จากภาพที่ 5-5 สามารถวัดความสูงของเปลวไฟที่ได้จากการทดลองจริงได้ 1.5 ซม. แล้วนำไปเปรียบเทียบความสูงของเปลวไฟในแบบจำลองบนคอมพิวเตอร์ที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขในบทที่ 4 และแบบจำลองที่ได้รับการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตในบทที่ 5 ดังตารางที่ 5-5

ตารางที่ 5-5 ผลของความสูงของเปลวไฟ

	ความสูงของเปลวไฟ (cm)
แบบจำลองบนคอมพิวเตอร์ในบทที่ 4	1.11
แบบจำลองที่ได้รับการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตในบทที่ 5	1.11
ผลจากการทดลองจริง	1.50

จากผลที่ได้ในตารางที่ 5-5 พบว่าความสูงที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลองบนคอมพิวเตอร์ในบทที่ 4 และแบบจำลองที่ได้รับการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตในบทที่ 5 เมื่อนำมาเปรียบเทียบผลจากการทดลองจริงดังภาพที่ 5-5 แล้วพบว่ามีความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองอยู่เล็กน้อยทั้งนี้

เนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขณะทำการวัดความสูงของเปลวไฟนั้นเป็นการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ซึ่งแตกต่างกับในแบบจำลองซึ่งเป็นการเผาไหม้สมบูรณ์ แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดในการทดลองตั้งแต่ อุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกผล , เวลาที่ใช้ในการทดลอง , และสถานที่ที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่ได้เอื้ออำนวยมากพอที่ทำการทดลองได้หลายๆ ครั้ง ถึงอย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลองที่ปรับปรุงในบทนี้จะป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบถ่านอัดแท่งเชื้อเพลิงรวมทั้งเตาที่ใช้ในการเผาถ่านเชื้อเพลิงต่อไป

บทที่ 6

สรุปผลแบบจำลองและข้อเสนอแนะ

6.1 การสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่ง

รูปร่างถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอกจากภาพที่ 3-1 เป็นรูปถ่ายของถ่านเชื้อเพลิงที่นำมาสร้างแบบจำลองมีขนาดความสูง 12 ซม. และมีรัศมีของตัวถ่าน 6 ซม. โดยจะมีช่องอากาศอยู่จำนวน 16 ช่อง รัศมี 0.5 ซม. ถูกลำสร้างแบบจำลองโดยพิจารณาจากกระบวนการเผาไหม้และพฤติกรรมของการเผาไหม้ในของแข็งแล้วพบว่าก๊าซเชื้อเพลิงแพร่ออกจากถ่านเมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้นจึงตั้งสมมุติฐานว่าก๊าซเชื้อเพลิงระเหยออกจากถ่านทั้งหมด ดังนั้นอัตราการป้อนเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้จากมวลของถ่านที่หายไปจากการเผาไหม้เทียบกับเวลาที่ใช้ในการเผาจนเหลือแต่ขี้เถ้าซึ่งจะได้จากเครื่องวัดสมดุลความร้อน

จากการแพร่ของเชื้อเพลิงออกจากถ่านนั้นเป็นกระบวนการเผาไหม้แบบดิฟฟิวชันเฟลม จึงสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ในถ่านเชื้อเพลิงโดยใช้แบบจำลองการสันดาปของเบิร์ค - ชูแมน ซึ่งจะใช้ตัวแปรคู่ความระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน (β) และตัวแปรคู่ความระหว่างอุณหภูมิกับออกซิเจน (β_T) ในการคำนวณรูปร่างของเปลวไฟในแบบจำลอง

ในแบบจำลองภายในถ่านจะเป็นแบบจำลองของเบิร์ค - ชูแมนที่มีการปรับปรุงใหม่โดยที่ท่อเล็กเป็นทางเข้าของอากาศและในขณะที่ย่อใหญ่จะเป็นทางเข้าของเชื้อเพลิงซึ่งในแบบจำลองของเบิร์ค - ชูแมนแบบดั้งเดิมนั้นจะมีลักษณะตรงข้ามคือ ท่อเล็กเป็นทางเข้าของเชื้อเพลิงและท่อใหญ่เป็นทางเข้าของอากาศ

ในแบบจำลองบนผิวถ่านด้านบนนั้นจะมีรูปร่างเหมือนกับรูปร่างถ่านจริง เพื่อสามารถนำรูปร่างเปลวไฟในแบบจำลองนี้มาเปรียบเทียบกับรูปร่างเปลวไฟเกิดขึ้นจริง

6.2 แบบจำลองภายในถ่าน

ค่า β และ γ ที่คำนวณในแบบจำลองภายในถ่านนี้ถูกนำมาเขียนกราฟหารูปร่างของเปลวไฟโดยเขียนกราฟค่า $\beta = 0$ และ $\gamma = 0$ จะได้รูปร่างของเปลวไฟดังภาพที่ 4-1 เป็นกราฟเปรียบเทียบรูปร่างเปลวไฟของแบบจำลองภายในถ่านที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข ($\beta = 0$) กับผลแม่นยำตรง ($\gamma = 0$) พบว่า รูปร่างของเปลวไฟที่ได้ในแต่ละวิธีต่างก็ให้ผลที่ใกล้เคียงกันมากและมีค่าความผิดพลาดโดยเทียบจากความสูงของเปลวไฟที่คำนวณได้ทั้งสองวิธีอยู่ที่ 2.76 % ถือว่าเป็นค่าความผิดพลาดที่เล็กน้อย ดังนั้นรูปร่างเปลวไฟที่คำนวณจากค่า β ในแบบจำลองภายในถ่านนี้จึงความเชื่อถือพอที่ใช้ในการคำนวณแมสแฟรกชันต่อไป

เนื่องจากแมสแฟรกชันของเชื้อเพลิงและออกซิเจนจะหมดไปที่ผิวของเปลวไฟ ดังนั้นที่ผิวของเปลวไฟจะเหลือแต่ไนโตรเจนและผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้เท่านั้นโดยแมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้จะมีค่ามากที่สุดและเป็นแมสแฟรกชันคงที่ที่ผิวของเปลวไฟเนื่องจากค่ามิกซ์เจอร์แฟรกชันที่ผิวของเปลวไฟ (f_{st}) นั้นคงที่ในแบบจำลองภายในถ่านและผลของแมสแฟรกชันดังภาพที่ 4-2 เป็นผลของแมสแฟรกชันในแบบจำลองภายในถ่านที่ระดับความสูงต่างๆ พบว่า แมสแฟรกซ์ของออกซิเจนหมดไป ขณะที่แมสแฟรกชันของเชื้อเพลิงยังคงเหลือ ดังนั้นแล้วจึงจัดเปลวไฟที่เกิดขึ้นในแบบจำลองภายในถ่านเป็นอันเตอร์เวนต์เลทเต็ดเฟลม

ค่า β_T และ γ_T ที่คำนวณในแบบจำลองภายในถ่านนี้ถูกนำมาเขียนกราฟหารูปร่างของเปลวไฟเช่นเดียวกับ β และ γ โดยเขียนกราฟค่า $\beta_T = [\beta_T]_{crit}$ และ $\gamma_T = [\gamma_T]_{crit}$ ซึ่ง $[\beta_T]_{crit}$ และ $[\gamma_T]_{crit}$ นี้จะได้จากเทียบบัญญัติไตรยางค์กับ $\beta = 0$ และ $\gamma = 0$ จะได้รูปร่างของเปลวไฟดังภาพที่ 4-3 ซึ่งเป็นกราฟเปรียบเทียบรูปร่างเปลวไฟของแบบจำลองภายในถ่านที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข ($\beta_T = [\beta_T]_{crit}$) กับผลแม่นยำตรง ($\gamma_T = [\gamma_T]_{crit}$) พบว่า รูปร่างของเปลวไฟที่ได้ในแต่ละวิธีต่างก็ให้ผลที่ใกล้เคียงกันมากเช่นเดียวกับรูปร่างของเปลวไฟที่ได้จาก β และ γ และมีความผิดพลาดโดยเทียบจากความสูงของเปลวไฟที่คำนวณได้ทั้งสองวิธีอยู่ที่ 2.82 % ถือว่าเป็นค่าความผิดพลาดที่เล็กน้อยเช่นเดียวกัน ดังนั้นรูปร่างเปลวไฟที่คำนวณจากค่า β_T ในแบบจำลองภายในถ่านนี้จึงความเชื่อถือพอที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิต่อไป

จากผลการคำนวณอุณหภูมิที่ได้เชิงตัวเลขและผลแม่นยำตรงในตารางที่ 4-5 ซึ่งเป็นผลของอุณหภูมิที่สูงสุดที่ได้จากการคำนวณในแต่ละจุดของแบบจำลองภายในถ่านพบว่า ผลคำนวณได้จากเชิงตัวเลขนั้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยมากเมื่อดูจากค่าความผิดพลาดโดยเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณจากผลแม่นยำตรงโดยที่ค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 0.41 % แต่อุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการคำนวณแบบผลแม่นยำตรงในแบบจำลองภายในถ่านมากกว่าอุณหภูมิสูงสุดที่คำนวณโดยตรงจาก $[\gamma_T]_{crit}$ ซึ่งไม่น่าจะเกิดขึ้นได้ในความเป็นจริงซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการคำนวณ γ และ γ_T ที่เป็นผลรวมที่ไม่สิ้นสุดของเบสเซลส์ฟังก์ชันในสมการ (3-33) และ (3-34)

ผลจากตารางที่ 4-6 เป็นผลของแมสแฟรกชันของก๊าซที่ได้จากแบบจำลองภายในถ่านซึ่งได้จากการคำนวณค่า $[\beta]^{1st} = -1.22 \times 10^{-2}$ และ $[\gamma]^{1st} = -0.72$ พบว่า แมสแฟรกชันที่ได้การคำนวณทั้งเชิงตัวเลขและผลแม่นยำตรงมีความแตกต่างกันจึงทำให้ก๊าซผสมที่มีเชื้อเพลิงที่เหลือจะรวมกับไนโตรเจนและผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้จะไหลออกไปทางช่องอากาศและผลจากตารางที่ 4-7 นี้เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในแบบจำลองบนผิวถ่านคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวลและเป็นข้อมูลที่ใช้คำนวณเป็นอัตราการป้อนเชื้อเพลิงสำหรับแบบจำลองการไหลบนผิวถ่าน

6.3 แบบจำลองบนผิวถ่าน

ค่า β และ γ ที่คำนวณในแบบจำลองบนถ่านนี้ถูกนำมาเขียนกราฟหารูปร่างของเปลวไฟโดยเขียนกราฟค่า $\beta = 0$ และ $\gamma = 0$ จะได้รูปร่างของเปลวไฟดังภาพที่ 4-5 เป็นกราฟเปรียบเทียบ

เทียบรูปร่างเปลวไฟของแบบจำลองบนผิวถ่านที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข ($\beta = 0$) กับผลแม่นยำ ($\gamma = 0$) แล้วจะพบว่า รูปร่างของเปลวไฟที่ได้ในแต่ละวิธีต่างก็ให้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก เช่นเดียวกันในแบบจำลองภายในถ่านและมีค่าความผิดพลาดโดยเทียบจากความสูงของเปลวไฟที่คำนวณได้ทั้งสองวิธีอยู่ที่ 7.15 % เมื่อนำมาเทียบค่าผิดพลาดในแบบจำลองภายในถ่านพบว่าค่าความผิดพลาดในแบบจำลองบนผิวถ่านมีมากกว่าในแบบจำลองภายในถ่าน เนื่องจากอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงโดยมวลที่ได้จากการคำนวณทั้งสองวิธีในแบบจำลองภายในถ่านมีความแตกต่างกัน แต่รูปร่างเปลวไฟที่คำนวณได้จากค่า β ในแบบจำลองบนผิวถ่านนี้มีความเชื่อถือพอที่ใช้ในการคำนวณแมสแฟรกชันต่อไปเช่นเดียวกับแบบจำลองภายในถ่าน

แมสแฟรกชันที่ผิวของเปลวไฟในแบบจำลองบนผิวถ่านนั้นจะเหลือแค่ไนโตรเจนและผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้เช่นเดียวกับแบบจำลองภายในถ่าน โดยแมสแฟรกชันของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้จะมีค่ามากที่สุดและเป็นแมสแฟรกชันคงที่ที่ผิวของเปลวไฟเนื่องจากมีกซ์เจอร์แฟรกชันที่ผิวของเปลวไฟ (f_{st}) นั้นคงที่ในแบบจำลองบนผิวถ่านและผลของแมสแฟรกชันดังภาพที่ 4-6 เป็นผลของแมสแฟรกชันในแบบจำลองบนผิวถ่านที่ระดับความสูงต่างๆ พบว่าแมสแฟรกชันของเชื้อเพลิงหมดไป ขณะที่แมสแฟรกชันของออกซิเจนยังเหลืออยู่ ดังนั้นจึงจัดเปลวไฟที่เกิดขึ้นในแบบจำลองบนผิวถ่านเป็นโอเวอร์เวนติเลตเฟลม

ค่า β_T และ γ_T ที่คำนวณในแบบจำลองภายในถ่านนี้ถูกนำมาเขียนกราฟหารูปร่างของเปลวไฟเช่นเดียวกับ β และ γ โดยเขียนกราฟค่า $\beta_T = [\beta_T]_{crit}$ และ $\gamma_T = [\gamma_T]_{crit}$ ซึ่ง $[\beta_T]_{crit}$ และ $[\gamma_T]_{crit}$ นี้ได้จากการเทียบบัญญัติไตรยางค์กับ $\beta = 0$ และ $\gamma = 0$ เช่นเดียวกับในแบบจำลองภายในถ่านซึ่งจะได้รูปร่างของเปลวไฟดังภาพที่ 4-7 เป็นกราฟเปรียบเทียบรูปร่างเปลวไฟของแบบจำลองภายในถ่านที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข ($\beta_T = [\beta_T]_{crit}$) กับผลแม่นยำ ($\gamma_T = [\gamma_T]_{crit}$) จะพบว่า รูปร่างของเปลวไฟที่ได้ในแต่ละวิธีต่างก็ให้ผลที่ใกล้เคียงกันมากเช่นเดียวกับรูปร่างของเปลวไฟที่ได้จาก β และ γ และมีค่าความผิดพลาดโดยเทียบจากความสูงของเปลวไฟที่คำนวณได้ทั้งสองวิธีอยู่ที่ 7.15 % ซึ่งเท่ากับค่าความผิดพลาดที่ได้รูปร่างเปลวไฟจาก β และ γ ดังนั้นรูปร่างเปลวไฟที่คำนวณจากค่า β_T ในแบบจำลองภายในถ่านนี้จึงมีความเชื่อถือพอที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิต่อไป

จากผลการคำนวณอุณหภูมิที่ได้เชิงตัวเลขและผลแม่นยำในตารางที่ 4-11 ซึ่งจะเป็นผลของอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการคำนวณในแต่ละจุดของแบบจำลองบนผิวถ่าน พบว่า ผลของคำนวณเชิงตัวเลขนั้นมีความคลาดเคลื่อนจากการน้อยมากเมื่อดูจากค่าความผิดพลาดโดยเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณจากผลแม่นยำโดยค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 0.01 % ถือว่ามีความใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นอุณหภูมิที่คำนวณทั้งสองวิธีมีผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกันมากนักและมีความเชื่อถือได้พอสมควร

ผลจากตารางที่ 4-12 เป็นผลของแมสแฟรกชันของก๊าซผสมที่ได้แบบจำลองบนผิวถ่านซึ่งได้จากการคำนวณค่า $[\beta]^{2nd} = 24.96 \times 10^{-4}$ และ $[\gamma]^{2nd} = 0.96$ พบว่า แมสแฟรกชันที่ได้

การคำนวณทั้งเชิงตัวเลขและผลแม่นยำตรงเหลือแค่แมสแฟรกชันของออกซิเจน ไนโตรเจน และผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้เท่านั้น ดังนั้นจะได้ก๊าซผสมที่ไหลออกสู่บรรยากาศจะประกอบด้วย ออกซิเจน ไนโตรเจน และผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้

6.4 แบบจำลองของจริง

จากการปรับปรุงแบบจำลองบนผิวถ่านโดยเปลี่ยนค่าในเงื่อนไขขอบเขตให้สอดคล้องกับสภาพภายนอกให้มากที่สุด ซึ่งนำผลของรูปร่างเปลวไฟของแบบจำลองที่ปรับปรุงใหม่ที่คำนวณเชิงตัวเลขจาก CFD มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองเดิมที่คำนวณด้วยวิธีเดียวกันนี้ ซึ่งจะแสดงผลได้ดังภาพที่ 5-1 ซึ่งเป็นกราฟเปรียบเทียบรูปร่างของเปลวไฟในแบบจำลองบนผิวถ่านที่ปรับเปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตในบทที่ 5 กับแบบจำลองบนผิวถ่านอันเดิมในบทที่ 4 จะพบว่ารูปร่างของเปลวไฟของแบบจำลองทั้งสองนี้ทับซ้อนกันพอดีเนื่องจากเชื้อเพลิงในแบบจำลองบทที่ 5 นี้ใช้เชื้อเพลิงอันเดียวกับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการคำนวณจากเชิงตัวเลขของแบบจำลองบนผิวถ่านในบทที่ 4 นั้นเอง ทำให้ผลแฟรกชันดังภาพที่ 5-2 ซึ่งผลแมสแฟรกชันของแบบจำลองในบทที่ 5 ที่ระดับความสูงต่างๆ ของเชื้อเพลิง , ออกซิเจน , ไนโตรเจน , และผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ที่ระดับความสูงต่างๆ มีผลลัพธ์เหมือนกราฟในภาพที่ 4-6 เป็นผลแมสแฟรกชันของแบบจำลองบนผิวถ่านในบทที่ 4 ที่ระดับความสูงต่างๆ มีผลลัพธ์เหมือนกัน ทำให้อุณหภูมิที่คำนวณได้ในบทที่ 5 จะใกล้เคียงกับการคำนวณเชิงตัวเลขของแบบจำลองบนผิวถ่านในบทที่ 4 โดยดูได้จากผลได้จากตารางที่ 5-3 ซึ่งผลของอุณหภูมิที่มากที่สุดจากการคำนวณเชิงตัวเลขในบทที่ 4 และ 5 พบว่า มีความใกล้เคียงกันมากจะเกือบจะเป็นค่าเดียวกันด้วย

ผลจากตารางที่ 5-4 ซึ่งผลของแมสแฟรกชันของก๊าซผสมที่ได้จากแบบจำลองของจริงพบว่า เหลือออกซิเจนกับไนโตรเจนเท่านั้นที่ไหลออกสู่บรรยากาศและก๊าซผสมนี้มีองค์ประกอบของแมสแฟรกชันโดยมีออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบซึ่งตรงกับมีองค์ประกอบของแมสแฟรกชันของอากาศนั่นเอง ดังนั้นแบบจำลองบนผิวถ่านที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ในบทที่ 5 นี้แบบจำลองที่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในการเผาไหม้ถ่านเชื้อเพลิง

เนื่องจากแบบจำลองบนผิวถ่านที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ในบทที่ 5 เป็นมิติทางกายภาพของช่องอากาศช่องหนึ่ง ดังนั้นจึงมีการเปรียบเทียบรูปร่างเปลวไฟของจริงวัดความสูงเปลวไฟซึ่งได้ผลการเปรียบเทียบความสูงของเปลวไฟดังตารางที่ 5-5 โดยความสูงของเปลวไฟที่ได้จากวัดของจริงอยู่ที่ 1.5 cm แต่ในแบบจำลองอยู่ที่ 1.1 cm จึงมีความแตกต่างๆ อยู่พอสมควรทั้งนี้เพราะการเผาไหม้ในการทดลองอาจเป็นการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ก็ได้ซึ่งแตกต่างกับการเผาไหม้ในแบบจำลองนั้นเป็นการเผาไหม้สมบูรณ์ ถึงอย่างไรก็ตามก็เป็นแบบจำลองที่สามารถคาดการณ์รูปร่างของเปลวไฟของจริงได้และข้อมูลเพื่อมาใช้ประโยชน์ในการออกแบบเตาแบบหรือถ่านเชื้อเพลิงต่อไป

แต่ในแบบจำลองที่ปรับปรุงนี้ไม่ได้ทำการคำนวณด้วยผลแม่นยำตรงนั้นเนื่องจากไม่สามารถแก้ออกมาเป็นสมการสำเร็จเหมือนในตารางที่ 3-5 ได้ ดังนั้นการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขด้วยจาก CFD จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับในกรณีที่ไม่สามารถแก้ปัญหาด้วยผลแม่นยำได้เหมือนในแบบจำลองที่ปรับปรุงใหม่นี้

6.5 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากผู้เขียนได้ลองทำการแก้ไขปรับปรุงและปรับเปลี่ยนโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ อยู่ตลอดทำให้ผลของแบบจำลองได้ผลของรูปร่างของเปลวไฟ , แมสแฟรกชัน , และอุณหภูมิของเปลวไฟในบทที่ 4 และ 5 ให้ผลที่น่าเชื่อถือได้ แต่เนื่องจากมีเวลาจำกัดในการการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ที่ใช้ในการจำลอง รวมทั้งการแก้ปัญหาพร้อมกันระหว่างสมการมวลและพลังงาน ควบคู่กันนั้นยังคงเป็นปัญหาที่น่าท้าทาย ผู้เขียนหวังว่าแบบจำลองดังกล่าวนี้จะเป็นต้นแบบในพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองต่อไป เพื่อประโยชน์ในการศึกษาเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้แบบดีฟิวชันเฟลม ตลอดจนนำไปสู่การออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของถ่านอัดแท่งและออกแบบห้องเผาไหม้ที่เหมาะสมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Kanury, A. M. "Combustion Characteristics of Biomass Fuels." Combustion Science and Technology. 97 (1994) : 469-491.
2. Fernandez – Pello, A. C. "Flame Spread Modeling." Combustion Science and Technology. 39 (1984) : 119-134.
3. Atreta, A. "Fire Growth on Horizontal Surface of Wood." Combustion Science and Technology. 39 (1984) : 163-194.
4. Ellzey, J. L. "A Study of Confined Diffusion Flames." Combustion and Flame. 84 (1991) : 249-264.
5. Patnaik, G., et al. "Time-Dependent Computational Studies of Premixed Flames in Microgravity" 22nd Int. Symposium on Combustion. Pittsburgh, 1989 : 1517.
6. Laskey, K. J. A Numerical Study of An Unsteady Diffusion Flame.
Ph.D.Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Carnegie-Mellon University, 1989
7. Torero, Jose L. "Estimation of A Total Mass Transfer Number From The Standoff Distance of A Spreading Flame." Combust. Sci. and Tech. 174 (2002) : 187-203.
8. Emmons, H. "The Film Combustion of Liquid Fuel." Z. Angew. Math. Mech. 36 (1956) : 60.
9. Vietoris, T., Joulain, P., and Torero, Jose L., Experimental Observations on The Geometry and Stability of A Laminar Diffusion Flame in Micro-Gravity. Poitiers : Sixth International Symposium on Fire Safety Science, France, July 5-9(1999).
10. Eghlimi, A., et al. "Computational Modelling of Char Combustion Based on The Structure of Char Particles." Second International Conference on CFD in The Minerals and Process Industries. 6-8 December 1999 : 141-144.
11. Baum, M. M., and Street, P. J. "Predicting The Combustion Behaviour of Coal Particles." Combust. Sci. Tech. 3 (1971) : 231-243.
12. Smith, I. W. "The Combustion Rate of Coal Chars : A Review." 19th Int. Symp. on Combustion. 1982 : 1045-1065.

13. Lighty, JoAnn S., et al. "Fundamental for The Thermal Remediation of Contaminated Soil. Particle and Bed Desorption Models." Environ. Sci. Technol. 24 (1990) : 750-757.
14. ยุทธนา กล้าศึก และอัมรินทร์ วงศ์เศรฐ์. การออกแบบและสร้างเครื่องวัดสมดุลความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่ง. ปรินซ์นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2547.
15. Quintiere, James G. Principles of Fire Behavior. New York : Delmar Publishers, 1998.
16. Bartok, William, and Sarofim, Adel F. Fossil Fuel Combustion. New York : John Wiley & Sons, 1991.
17. Kuo, Kenneth K. Principle of Combustion. New York : John Wiley & Sons, 1986.
18. Hoffmann, Klaus A., and Chiang, Steve T. Computational Fluid Dynamics. Vol.1. 4th ed. Kansas : Engineering Education SystemTM, 2000.
19. Kreszig, Erwin. Advanced Engineering Mathematics. 8th ed. New York : John Wiley & Sons, 1999.
20. Çengel, Yunus A., and Boles, Michael A. Thermodynamics An Engineering Approach., International Edition. 4th ed. New York : The McGraw-Hill Companies, Inc., 2002.
21. Özisik, M. N. Heat Transfer A Basic Approach., International Editions. Singapore : The McGraw-Hill Company, 1985.

ภาคผนวก ก

ค่าที่ใช้ในการคำนวณ

ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี (Heat of Reaction)

ตารางที่ ก-1 ความร้อนของปฏิกิริยาทางเคมีในกระบวนการเผาไหม้

สารเคมี	H (J)
ถ่านเชื้อเพลิง	16898400
ออกซิเจน	0
ไนโตรเจน	0
คาร์บอนไดออกไซด์	– 995610000
ไอน้ำ	– 459458000
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	– 8905200

จากตารางที่ ก-1 สามารถหาความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีทั้งหมดได้จาก

$$\Delta H_r = (\sum H_{\text{product}} - \sum H_{\text{reactant}}) / (W_{\text{O}_2} |v''_{\text{O}_2} - v'_{\text{O}_2}|)$$

$$\Delta H_r = - 1.6469 \times 10^7 \text{ J / kg of oxygen.}$$

ความร้อนจำเพาะ (Heat Capacity)

ตารางที่ ก-2 ความร้อนจำเพาะของสารเคมีที่อยู่ในกระบวนการเผาไหม้

สารเคมี	C_p (J / (kg·K))
ถ่านเชื้อเพลิง	979.90
ออกซิเจน	919.08
ไนโตรเจน	1038.35
คาร์บอนไดออกไซด์	844.96
ไอน้ำ	1869.77
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	1230.54

จากตารางที่ ก-2 สามารถหาความร้อนจำเพาะรวมเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีทั้งหมดได้จาก

$$C_p = Y_n \sum [C_p]_n \quad (\text{ก-1})$$

ค่าการแพร่เชิงมวล (Mass Diffusivity)

ค่าการแพร่กระจายเชิงมวลสามารถคำนวณได้จาก

$$D = D_{ab} = \sqrt{D_a \cdot D_b} \quad (\text{ก-2})$$

แต่เนื่องจาก $Le = 1$ ดังนั้น

$$D = \frac{k}{\rho C_p} = \alpha \quad (\text{ก-3})$$

ตารางที่ ก-3 ค่าการแพร่กระจายเชิงความร้อนของสารเคมีที่อยู่ในกระบวนการเผาไหม้

สารเคมี	$\alpha' \text{ (m}^2 / \text{s)}$
ถ่านเชื้อเพลิง	1.09×10^{-5}
ออกซิเจน	2.21×10^{-5}
ไนโตรเจน	2.18×10^{-5}
คาร์บอนไดออกไซด์	1.05×10^{-5}
ไอน้ำ	1.45×10^{-7}
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	1.04×10^{-7}

จากตารางที่ ก-3 สามารถหาค่าการแพร่กระจายเชิงความร้อนของผสมได้จาก

$$\alpha = \sum_{i=1}^n Y_i \alpha_i \quad (\text{ก-3})$$

จากสมการ (ก-3) สามารถหาค่าการแพร่กระจายเชิงความร้อนของอากาศจะได้

$$\alpha_A = (0.21) \alpha_O + (0.79) \alpha_N = 2.19 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

แล้วหาค่าการแพร่เชิงมวลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศในแบบจำลองภายในถ่านจาก (ก-1) จะได้

$$D = \sqrt{(1.09 \times 10^{-5}) \cdot (2.19 \times 10^{-5})} = 1.5462 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

ภาคผนวก ข

งานวิจัยที่ได้นำเสนอในงานวิชาการ SEE 2006

Numerical Simulation of Combustion Flames in A Cylindrical Shape Coal Briquette

Duangphol Limthammahisorn¹, Monpilai Narasingha², and Punyos Vallikul³

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800,
 Tel : 0-9218-5742, Fax: 02-5869541, Email : pangpoundmama@hotmail.com

²Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800,
 Tel : 0-2913-2500 ext. 8241, 8230, Email : mhc@kmitnb.ac.th

³The Waste Incineration Research Center,
 King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok 10800,
 Tel : 0-2913-2500 ext. 8321, Email : pyy@kmitnb.ac.th

Abstract: Numerical modeling of flame shapes for the combustion of coal briquette used in industry and household is advanced. The briquette is of cylindrical shape with air channel passing vertically through the briquette. From a given measured rate of mass loss of burning of coal briquette within an in-house thermo-balance, the flame shapes can be located based on Burke-Schumann model. Although the model imposes very tight constraints on the combustion and flow processes, the resulting flame shapes are justified. It has been found from the calculation results that there are two consecutive flame shapes existing in the briquette: underventilated flame in the air channel within the briquette and overventilated flame above the surface of the briquette. The model and the solution have been verified by comparing between the exact and numerical solutions. It is shown that the numerical and exact solutions for both flames agree very well. The flame shapes will be used to determine the optimum shapes of the briquette and of the furnace.

Keywords: Coal Briquette, Flame Shape, Diffusion Flame, Burke-Schumann model

1. INTRODUCTION

Energy per unit mass of low bulk-density solid fuels increases when they are in briquette form. A briquette, in many situations, is the blend of different fuels, then it allows utilization of chemical heats of the mixed fuel. Correct choice of the binding materials and of the additives provide selective ways to control the emissions and to clean up of the residue. To assess the reactivity of a multi-component fuel briquette, a thermo-balance [1] has been used to determine the mass loss against time of the briquette under combustion environment. Combustion model of solid fuel can theoretically be formed from its flame's study. Torero et al [2] used the classical Shvab-Zel'dovich approach, proposed by Euteneur [3], together with boundary-layer-type assumptions to estimate a total mass transfer number from the standoff distance of spreading flames. In this study, we use the fuel mass loss data obtained from the burning of the coal briquette of lignite in an in-house thermo-balance [4] to represent the input fuel mass flow rate (assumed in gas phase). The combustion model proposed is similar to that the Burke-Schumann laminar diffusion flame with Shvab-Zel'dovich approach [5].

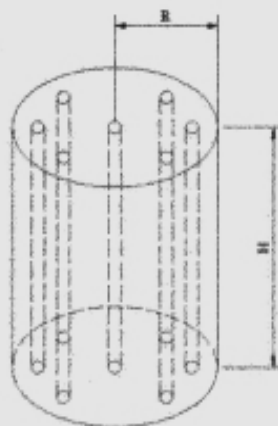


Figure. 1 Coal Briquette Model

Sketch of the coal briquette used in this study is shown in figure 1. The briquette is of a cylindrical form ($R = 6$ cm and $H = 12$ cm) with 16 air channels each of 0.5 cm-radius. Numerical modeling for combustion flames for this briquette is divided into two zones: the first zone is internal zone where the flame is confined within the air channel of the briquette, the second zone is the top surface zone where the flame is on the top surface above each hold of the air channel. It is postulated that the flame within the first zone is "Underventilated Cylindrical Flame" where all oxygen has been consumed at the flame front while the fuel is excessive then the flame is bended toward the air side. On the other hand for the top surface zone where oxygen is excessive, the flame is "Overventilated Cylindrical Flame", bending toward the fuel side. Figure 2 shows the schematic diagrams for such flames. It is particular for this study that, for the internal zone, the flaming process is of reverse to the case given by the Burke-Schumann's model, i.e. the air flows through the center core while the fuel flows through the concentric ring (Figure 2a).

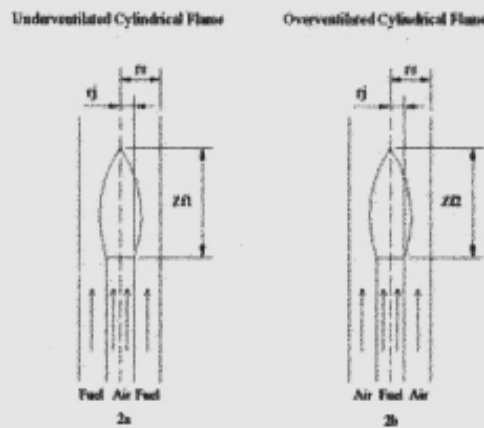


Figure. 2 The simple modeling combustion of diffusion flames by "Burke – Schumann"

In this study, exact solutions for such reverse Burke-Schumann flame, has been solved for the internal zone in term of Bessel function of dimensionless variables. The solutions are the couple functions [5] where the flame shape follows the line of zero couple functions. Exact solution for the top surface zone follows the classical Burke-Schumann flame model. The numerical solutions based on finite different schemes are then solved and used to compare with the obtained analytical flame shapes in order to verify the derived analytical solutions. To determine mass fraction and temperature, mixture fraction is first defined in term of the couple functions. The mixture fractions are in turn used to determine mass fraction of the species. The gaseous temperature is finally found using the mass fraction of oxygen and the coupling function of temperature (see section 2.3).

2. METHODOLOGY

2.1 Transport equations

Within the combustion zone ($Zf1$ and $Zf2$ zones shown in figure 2) the transport process is reactive diffusion control of the fuel and oxygen streams. The conservation of species equations can be written as

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla Y_i] - (\rho V) Y_i = -\omega_i \quad (1)$$

where ω_i has a negative sign because it represents the rate of consumption of mass of species i . If Fuel + Oxygen in air $\rightarrow$ Product represents the overall chemical reaction in the diffusion flame, then the "i" species then stand for F, O and P respectively. Write the transported property in unit mass using the following parameters: W_i , v_i'' and v_i' , which are molecular weight, stoichiometric number of reactant and product respectively, we then define

$$\alpha_i = \frac{Y_i}{W_i(v_i'' - v_i')} \quad (2)$$

$$M_i = \frac{\omega_i}{W_i(v_i'' - v_i')} \quad (3)$$

Substitute eqns. (2)-(3) into eqn. (1) yields

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla \alpha_i] - (\rho V) \alpha_i = -M_i \quad (4)$$

When "i" represents fuel and oxygen:

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla \alpha_F] - (\rho V) \alpha_F = -M_F \quad (5)$$

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla \alpha_O] - (\rho V) \alpha_O = -M_O \quad (6)$$

Recall the Shvab - Zel'dovich formulation where $Le = 1$ or $\rho D = \frac{k}{C_p}$. The energy equation, after setting the Lewis number equal to one, can be written in the similar form to that of eqn (4)

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla \alpha_T - (\rho V) \alpha_T] = -M_O \quad (7)$$

where

$$\alpha_T = \frac{C_p T}{\Delta H_f W_O (v_O - v_O^*)} \quad (8)$$

The sources terms M_T and M_O in eqns. (5) to (7) can be omitted by defining the "coupling functions" for species and temperature as β ($= \alpha_T - \alpha_O$) and β_T ($= \alpha_T - \alpha_O$) respectively. Eqs (5) to (7) can then be simplified further to

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla \beta - (\rho V) \beta] = 0 \quad (9)$$

and

$$\nabla \cdot [\rho D \nabla \beta_T - (\rho V) \beta_T] = 0 \quad (10)$$

Note that from eqn. (3), $M_T = M_O$.

2.2 Burke-Schumann's Assumption and Problem Formulation

Burke-Schumann assumes the following assumptions for laminar diffusion flames:

1. At port position, the velocities of air and fuel are constant, equal, and uniform across their respective tubes.
2. The velocity of the fuel and air up the duct in the region of the flame is the same as the velocity at port (or no tube friction loss).
3. " ρD " is constant.
4. Diffusion in the axial direction is negligible in comparison with that in the radial direction.
5. Mixing is caused by diffusion only, and the radial velocity component is equal to zero: $v_r = 0$
6. Reaction take place at $\phi = 1$ (at the flame surface).

From these assumptions, eqns. (9) and (10) become

$$\frac{\partial \beta}{\partial x} = \left(\frac{V_x}{D} \right) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \beta}{\partial r} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial \beta_T}{\partial x} = \left(\frac{V_x}{D} \right) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \beta_T}{\partial r} \right) \quad (12)$$

Combustion modeling of the coal briquette is divided into two zones, the internal zone and the top surface zone. The internal zone models the combustion flame within the air channel while the top surface zone models the combustion flame at the top surface, above the air channel of the briquette.

To model the geometry of the internal zone, we first lump up all air channels into a single fictitious air channel. Given the size of the briquette (see the appendix), then the numerical value of r_i for the internal zone model can be calculated. We use the void fraction for soil, ε , appearing in [6] to represent the void fraction of the briquette in this study. This is because the coal briquette's structure composes mostly from clay. With this void fraction and the given value of total volume of the briquette, the total void volume can then be determined (or void volume = $\varepsilon \times$ volume of briquette). We assume further that the void's volumes are lumped up to a single fictitious volume, concentric to the fictitious air channel and with the same height to that of the briquette. The fictitious void volume contains fuel in gas phase at standard atmosphere. This allows us to calculate the numerical value of r_e for the internal zone model. Figure 2a locates r_i , r_e while table 1 gives the exact values.

The mass flow rate of fuel input to the internal zone is set to be equal to the rate of mass loss measured during the combustion of the briquette within an in-house thermo-balance[4]. The fuel is assumed to be in the gas phase of a simplified chemical formula $C_{10}H_8N_2O_4S_8$. The elemental analysis (by mass) of the fuel is assumed to be similar to that of Thai lignite (see Appendix for value of a to c). The gas fuel is assumed to be ideal and at the standard atmosphere. With the given mass flow rate, the calculated density and the fictitious void cross-sectional area of the fuel flow, the velocity of the fuel can then be determined (~ 4 mm/s, see table A2).

For the top surface zone, r_i is set equal to the real physical air channel radius. The fuel input to this region composes of the fuel and the combustion products exhausted from the internal zone. The mass flow rate of air input to the top surface zone is modeled to be just enough to completely burn the fuel input. The state of the air is again set at the atmospheric condition. Schematic diagram and boundary conditions for the transport equations are shown in Figure 3 and Table 1 respectively

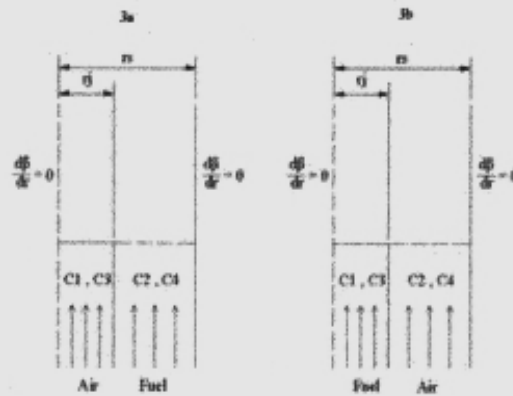


Figure 3 : Internal Model (3a) and On Surface Model (3b)

Table 1 The Data of Internal Model and On Surface Model from Fig. 3

	rj (cm)	rs (cm)	β		β_T	
			C1	C2	C3	C4
Model 1	2.00	4.00	$\frac{(Y_O)_{z=0}}{W_O v'_O}$	$\frac{(Y_F)_{z=0}}{W_F v'_F}$	$\frac{(Y_O)_{z=0}}{W_O v'_O} - \frac{[C_P]_{Air} T_{z=0}}{\Delta H_r W_O v'_O}$	$\frac{-[C_P]_{Fuel} T_{z=0}}{\Delta H_r W_O v'_O}$
Model 2	0.50	2.00	$\frac{(Y_F)_{z=0}}{W_F v'_F}$	$\frac{(Y_O)_{z=0}}{W_O v'_O}$	$\frac{-[C_P]_{Fuel} T_{z=0}}{\Delta H_r W_O v'_O}$	$\frac{(Y_O)_{z=0}}{W_O v'_O} - \frac{[C_P]_{Air} T_{z=0}}{\Delta H_r W_O v'_O}$

2.3 Analytical Solutions for Flames

To solve the above problem analytically, we transform the equation in to dimensionless form. Independent variables r and z are nondimensionalized into

$$\xi = \frac{r}{r_s} \quad (13)$$

and

$$\eta = \frac{zD}{v_z r_s^2} \quad (14)$$

while the dependent variables β and β_T are nondimensionalized into

$$\gamma = \beta \frac{W_F v'_F}{(Y_F)_{z=0}} \quad (15)$$

and

$$\gamma_T = \beta_T \frac{\Delta H_r W_O v'_O}{\Delta H_r (Y_O)_{z=0} - [C_P]_{Air} T_{z=0}} \quad (16)$$

respectively. Eqs. (11) and (12) are replaced by their dimensionless forms as

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \eta} = \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial \gamma}{\partial \xi} \right) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \gamma_T}{\partial \eta} = \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial \gamma_T}{\partial \xi} \right) \quad (18)$$

Boundary conditions for each case are transformed correspondingly as given in table 2 as

Table 2 The Data of Internal Model and On Surface Model in dimensionless from Fig. 3

	C	$\xi = 0$	$\xi = 1$	γ		γ_T	
				C1	C2	C3	C4
Model 1	0.5	$\frac{\partial \gamma}{\partial \xi} = 0$	$\frac{\partial \gamma}{\partial \xi} = 0$	v	-1	1	v_T
Model 2	0.25	$\frac{\partial \gamma}{\partial \xi} = 0$	$\frac{\partial \gamma}{\partial \xi} = 0$	-1	v	v_T	1

where the constants shown in the table are $C = \frac{r_0}{r_1}$, $v = \frac{(Y_O)_{z=0} W_F v_F}{(Y_F)_{z=0} W_O v_O}$, and $v_T = \frac{[C_p]_{Fuel} T_{z=0}}{[C_p]_{Air} T_{z=0} - \Delta H_f (Y_O)_{z=0}}$ respectively.

From given boundary conditions given in table 2, we can solve Eqs. (17)-(18) into the form of Bessel Function of first kind, order $n = 0$ and $n = 1$. The solutions for each zone is shown below

The internal model solution:

$$\gamma = (1+v)C^2 - 1 + 2C(1+v) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\phi_n} \frac{J_1(C\phi_n)}{[J_0(\phi_n)]^2} J_0(\phi_n \xi) e^{-\phi_n^2 \eta} \quad (19)$$

$$\gamma_T = v_T + (1-v_T)C^2 + 2C(1-v_T) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\phi_n} \frac{J_1(C\phi_n)}{[J_0(\phi_n)]^2} J_0(\phi_n \xi) e^{-\phi_n^2 \eta} \quad (20)$$

The top surface model solution:

$$\gamma = v - (1+v)C^2 - 2C(1+v) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\phi_n} \frac{J_1(C\phi_n)}{[J_0(\phi_n)]^2} J_0(\phi_n \xi) e^{-\phi_n^2 \eta} \quad (21)$$

$$\gamma_T = 1 - (1-v_T)C^2 - 2C(1-v_T) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\phi_n} \frac{J_1(C\phi_n)}{[J_0(\phi_n)]^2} J_0(\phi_n \xi) e^{-\phi_n^2 \eta} \quad (22)$$

Temperature can be then be calculated from

$$T = \frac{\Delta H_f Y_O}{C_p} - \frac{\gamma_T (\Delta H_f (Y_O)_{z=0} - [C_p]_{Air} T_{z=0})}{C_p} \quad (23)$$

Note that the above equation determining temperature requires the knowledge of the mass fraction of oxygen Y_O . To determine the mass fraction, few steps of calculation are required (see[5]). Such calculation steps are shown here.

2.4 Numerical Solution

Eqs. (12) and (13) are also solved at discrete points (m, n) using finite different approximation [8]

$$\frac{\beta_{m,n} - \beta_{m,n-1}}{\Delta z} = \frac{D}{V_z} \left(\frac{1}{r} \frac{\beta_{m+1,n} - \beta_{m-1,n}}{2\Delta r} + \frac{\beta_{m+1,n} - 2\beta_{m,n} + \beta_{m-1,n}}{\Delta r^2} \right) \quad (23)$$

$$\frac{[\beta_T]_{m,n} - [\beta_T]_{m,n-1}}{\Delta z} = \frac{D}{V_z} \left(\frac{1}{r} \frac{[\beta_T]_{m+1,n} - [\beta_T]_{m-1,n}}{2\Delta r} + \frac{[\beta_T]_{m+1,n} - 2[\beta_T]_{m,n} + [\beta_T]_{m-1,n}}{\Delta r^2} \right) \quad (24)$$

Forward differences is used to determine β at $r = 0$ and backward differences is used to determine β at $r = r_z$, hence

$$\beta_{m,n} = \frac{4\beta_{m-1,n} - \beta_{m-2,n}}{3} \quad (25)$$

$$[\beta_T]_{m,n} = \frac{4[\beta_T]_{m-1,n} - [\beta_T]_{m-2,n}}{3} \quad (26)$$

at $r = 0$ and $r = r_z$ respectively. The numerical solutions are used for comparison purpose.

3. RESULTS AND CONCLUSION

Flame shapes in the internal and the top surface zones follows the line of $\beta = 0$ or the line of maximum temperature. This means that if we were to plot the lines of $\beta = 0$ and the lines of maximum temperature from both analytical and numerical solutions, those lines should be coincided. Such the four lines are shown in figure 4a for the internal zone and in figure 4b for the top surface zone. The four lines in each zone are almost coincide, showing the agreement between the analytical and the numerical solutions. This verifies also the proposed analytical schemes the "inverse" Brucke-Schumann flame. It has also been shown as the postulations that within the internal zone the flame is under ventilated flame and the within the top surface zone the flame is over ventilated flame. The value of flame height and the maximum flame temperature are shown in Table 3. The flame height for the first model is fictitious while for the top surface zone, the predicted height is for the real flame. Recall that the dimensions of the second model are the physical dimensions of the single air channel of the briquette. Therefore the resulting flame shape from the calculation represents its physical flame's shape. Although the predicted flame height given in the Table 3 is under predicted comparing with the real flame (which is about 1.5-2 cm.), they are, however, in the same order of magnitude. Note also that the maximum temperatures are extremely high. This is because of adiabatic flame temperature approximation in the calculations. Further works have to be done to improve the solutions by relaxing those tight assumptions imposed on the problem.

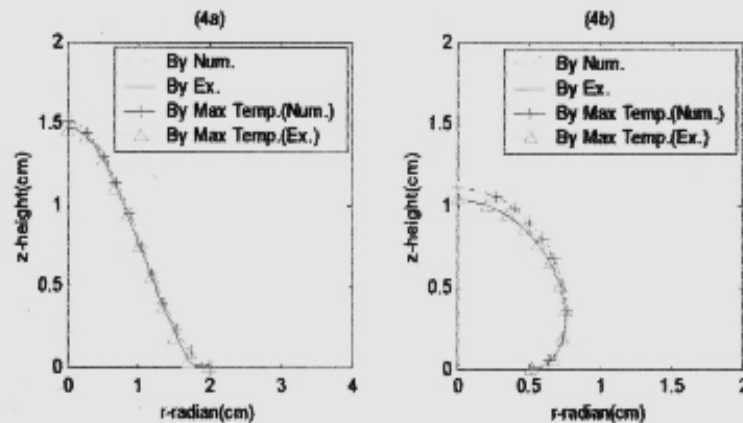


Figure. 4 The simulation of flame shape from Exact Solution and Numerical Solution

Table 3 Result from Simulation of Internal coal briquette model and On surface coal briquette model.

	Internal coal briquette model		On surface coal briquette model	
	Numerical Solution	Exact Solution	Numerical Solution	Exact Solution
Height (cm.)	1.5224	1.4755	1.1165	1.0351
Max. Temperature (K)	3176	3189.1	3176.3	3174

4. Glossary

Nomenclature

- V_z Velocity in Z axis, m/s
 D Mass Diffusivity between Fuel with Air, m^2/s
 r Radius, m
 z Height, m
 k thermal conductivity, W/(m·K)
 Y Massfraction
 W Molar mass, kg/kmol
 C_p Heat Capacity, J/kg·K
 T Temperature, K
 ΔH Heat of Reaction between Fuel with Oxygen, J/kg of Oxygen

Greek Symbols

- ε Porosity of Coal Briquette ($\varepsilon = 0.35$)
 ρ Density, kg/m^3
 β Coupling Function by difference between Massfraction of Fuel with Oxygen, kg^{-1}
 β_T Coupling Function by difference between Temperature with Massfraction of Oxygen, kg^{-1}
 v'' Stoichiometric Coefficient of Product of Chemical Equation, kmol
 v' Stoichiometric Coefficient of Reactant of Chemical Equation, kmol

Subscripts

- F Fuel
A Air
O Oxygen
N Nitrogen
P Product from Combustion
j Smaller tube
s Larger tube
1 1st model
2 2nd model
m row m
n column n

5. REFERENCES

- [1] M. Huttunen, L. Kjilidman, J. Saastamoinen, 2004. Analysis of Grate Firing of Wood with Numerical Flow Simulation., IFRF Combustion Journal Article Number 200401, by VTT Technical Research Center of Finland., March 2004. pp. 1-18.
- [2] Jose L. Torero, 2002. ESTIMATION OF A TOTAL MASS TRANSFER NUMBER FROM THE STANDOFF DISTANCE OF A SPREADING FLAME., Combust. Sci. and Tech., 174(11&12), by Taylor & Francis, pp. 187-203
- [3] H. Emmons, 1956. The film combustion of liquid fuel, Z. Angew. Math. Mech., 36, 60.

- [4] Yutiana Glasng, Amarin Wongsetti, 2004. Design and Construction of Thermo - balance for Fuel Briquette., Department of Mechanical and Aerospace Engineering., Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok.
- [5] Kenneth K. Kuo, 1986. Principle of Combustion., by John Wiley & Sons.
- [6] JoAnn S. Lighty, Geoffrey D. Silcox, David W. Pershing, 1990. Fundamental for the Thermal Remediation of Contaminated Soil. Particle and Bed Desorption Models, Vic A. Cundy and David G. Linz, Environ. Sci. Technol., Vol. 24, No. 5, pp. 750-757.
- [7] H.Y. Wang, P. Joulain, J.M. Most, 1999 Modeling on burning of large-scale vertical parallel surface with fire-induced flow. Fire Safety Journal 32, by Elsevier Science Ltd., pp. 241-277.
- [8] Klaus A. Hoffmann, Steve T. Chiang, 2000. Computational Fluid Dynamics Vol. 1. 4th ed., by Engineering Education SystemTM.
- [9] Erwin Kreyszig, 1999. Advanced Engineering Mathematics. 8th ed., by John Wiley & Sons.
- [10] Yunus A. Çengel, Michael A. Boles, 2002. THERMODYNAMICS AN ENGINEERING APPROACH., INTERNATIONAL EDITION., 4th ed., by The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [11] M. Neocati Özışık, 1985. Heat Transfer A BASIC APPROACH., INTERNATIONAL EDITIONS., by The McGraw-Hill Company.

6. Appendixes

6.1 Elemental Analyses of Thai Lignite

Analyses by %mass of CHNOS for coal are 30.3, 3.79, 22.45, 0.64, 1.1 % respectively while the rest is ash.

6.2 Heat of Reaction

Table A-1 Properties at T = 298.15 K

	$H_f (J)$	$C_p [10]$	$\alpha' (m^2/s) [11]$
Coal Briquette	16898400	979.90	1.09×10^{-5}
Oxygen	0	919.08	2.21×10^{-5}
Nitrogen	0	1038.35	2.18×10^{-5}
Carbondioxide	-9.9561×10^3	844.96	1.05×10^{-5}
Vapor	-459458000	1869.77	1.45×10^{-7}
Sulferdioxide	-8905200	1230.54	1.04×10^{-7}

Heat of Reaction is calculated from

$$\Delta H_r = (\sum H_{\text{product}} - \sum H_{\text{reactant}}) / (W_O(v_{O''} - v_{O'}))$$

$$\Delta H_r = -1.6469 \times 10^7 \text{ J/kg of oxygen.}$$

6.3 Mass diffusivity

Mass diffusivity, is calculated by

$$D = D_{ab} = \sqrt{D_a \cdot D_b}$$

Since the Lewis number is set to be one (Le=1) then

$$D = \frac{k}{\rho C_p} = \alpha'$$

and we can calculate "Thermal Diffusivity of Mixture" by

$$\alpha' = \sum_{i=1}^n Y_i \alpha'_i$$

We can calculate α'_A for example by

$$\alpha'_A = (0.21) \alpha'_O + (0.79) \alpha'_N = 2.19 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

We can calculate D in 1st model for example by

$$D = \sqrt{\alpha'_F \cdot \alpha'_A} = 1.5462 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

6.4 Heat Capacity

We can calculate "Heat Capacity of Mixture" by $C_p = \sum_{i=1}^n Y_i [C_{p,i}]$

Table A-2 Property used in the models

	1 st Model	2 nd Model
V_x		4.843×10^{-3}
D, in numerical	1.5462×10^{-5}	1.6772×10^{-5}
D, in exact		1.6748×10^{-5}
$(Y_i)_{k=0}$ in numerical	1.00	0.71057
$(Y_i)_{k=0}$ in exact		0.71601
$(Y_O)_{k=0}$		0.21
$(Y_N)_{k=0}$		0.79

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายดวงพหล ลิ้มธรรมมหิศร
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การจำลองเชิงตัวเลขลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่งรูป
 ทรงกระบอก
 สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ประวัติ

เกิดเมื่อวันที่ 2 มกราคม 2521 ณ กรุงเทพมหานคร เป็นบุตรชายคนแรกของ นายประพนธ์ และนางอุดมลักษณ์ ลิ้มธรรมมหิศร ปัจจุบันพักอาศัยอยู่ที่ 958 ถนนจรัญสนิทวงศ์ 3 แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพมหานคร 10600

สำเร็จการศึกษาระดับการมัธยมปลาย จากโรงเรียนไตรมิตรวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร เมื่อปี พ.ศ. 2539 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขตองครักษ์ จังหวัดนครนายก สำเร็จการศึกษาใน พ.ศ. 2544 ด้วยเกรดเฉลี่ย 2.06