แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับเตาเผาอิฐดิน

นางสาวสาริศา เจริญใจ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODEL FOR CLAY BRICK KILN

Miss Sarisa Charoenjai

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Fuel Technology
Department of Chemical Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับเตาเผาอิฐดิน
โดย	นางสาวสาริศา เจริญใจ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คุณากร ภู่จินดา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คุณากร ภู่จินดา)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.ศราวุธ ภู่ไพจิตร์กุล)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สาริศา เจริญใจ : แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับเตาเผาอิฐดิน (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODEL FOR CLAY BRICK KILN) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.คุณากร ภู่จินดา{, 102 หน้า.

กระบวนการเผาอิฐดิน ถือเป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญที่สุดในการทำให้ตัวผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาเกิดการแข็งตัว จากข้อมูลอุตสาหกรรมท้องถิ่นของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา เตาเผาอิฐดินเกิดจากการนำอิฐดิบรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยประมาณ มีความกว้าง 7.5 ซม. ความยาว 15 ซม. และความสูง 4.5 ซม. มาเรียงซ้อนกันจนมีรูปร่างเป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใหญ่ที่มีขนาดความกว้าง 915 ซม. ความยาว 470 ซม. และ ความสูง 225 ซม. ในการจัดเรียงจะมีการเว้นช่องว่างสี่เหลี่ยมตามแนวตั้งที่มีขนาดความกว้าง 15 ซม. ความยาว 10 ซม. และ ความสูง 225 ซม. เชื่อมกับช่องว่างสี่เหลี่ยมตามแนวนอนที่มีขนาดความกว้าง 15 ซม. ความยาว 470 ซม. และ ความสูง 45 ซม. ทางด้านล่างของเตา โดยช่องว่างทั้งหมดจะถูกเติมด้วยแกลบจนเต็มก่อนจะทำการจุดไฟเผาจากช่องเปิดทางด้านล่างของเตา ผลที่ได้ พบว่า มีผลิตภัณฑ์อิฐดินเผากว่าร้อยละ 15 ที่ไม่ถูกเผา ดังนั้น งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะลดความซับซ้อนของการจัดเรียงอิฐดิน และปรับเปลี่ยนการออกแบบเตาเผาอิฐดินโดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid dynamics) แบบสามมิติ และทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ตามการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (2^k factorial design) โดยมีตัวแปรดำเนินการที่ศึกษาคือ ความสูงของเตาเผา (200-225 ซม.) ความสูง (45-60 ซม.) และ ความกว้าง (7.5-15 ซม.) ของช่องตามแนวนอนด้านล่างของเตา และมีตัวแปรตอบสนองที่ศึกษา คือ จำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้คุณภาพ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว รวมไปถึงเวลาที่ให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว ผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยความกว้างและความสูงของช่องตามแนวนอนด้านล่างเตาเผาส่งผลกระทบต่อเวลาที่ให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว แต่ในส่วนของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว และจำนวนปริมาตรรวมของก้อนผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่ได้คุณภาพนั้นจะขึ้นอยู่กับทั้ง 3 ตัวแปรดำเนินการ ซึ่งเมื่อนำผลจากการออกแบบการทดลองนี้ไปสร้างระบบจริง พบว่า เตาเผาอิฐดินที่สร้างตามรูปแบบที่เหมาะสมจะมีผลิตภัณฑ์อิฐดินเพียงร้อยละ 5 ที่ไม่ถูกเผา

ภาควิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2558	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม	....

5572139323 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY
KEYWORDS: COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS / EXPERIMENTAL DESIGN / DESIGN PARAMETER / CLAY BRICK KILN / KILN FIRING

SARISA CHAROENJAI: COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODEL FOR CLAY BRICK KILN. ADVISOR: ASST. PROF. DR.BENJAPON CHALERMSINSUWAN, CO-ADVISOR: ASST. PROF. DR.KUNAKORN POOCHINDA{, 102 pp.

One of the most critical steps in brick making is firing, performing to harden the bricks. According to the locale industry of Ayutthaya, many pieces of extruded clays are stacked into a box-shaped kiln. Dimension of individual clay brick is 7.5 cm in width, 15 cm in length and 4.5 cm in height. The conventional clay brick kiln has the dimension of 915 cm in width, 470 cm in length and 225 cm in height. The box-shaped kiln has equally-spaced rectangular vertical holes of 15 cm in width, 10 cm in length and 225 cm in height and horizontal holes of 15 cm in width, 470 cm in length and 45 cm in height at the bottom across two sides. Rice husk is filled in the holes of the kiln and used as the fuel for firing. However, approximately 15% of the bricks, stacking conventionally, are always not appropriately fired. Therefore, this research aimed at simplifying model and redesigning the clay brick kiln using three-dimensional computational fluid dynamics. The studied parameters for 2^3 factorial designs were kiln height (200 – 225 cm), horizontal holes width (7.5 – 15 cm) and height (45 – 60 cm). The total volume of quality brick stack, averaged steady-state temperature and time to reach a steady-state temperature were selected as the response parameters. The analysis of variance of 2^3 factorial design showed that the width and height of holes affected the time to reach steady-state but the averaged steady-state temperature and the total volume of quality brick stack were depended on all the three response. Then, a kiln was constructed according to the suitable model and only 5% of the bricks were not appropriately fired.

Department:	Chemical Technology	Student's Signature	....
Field of Study:	Fuel Technology	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2015	Co-Advisor's Signature	....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับเตาเผาอิฐดินฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คุณากร ภู่จินดา และ กรรมการภายใน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา ที่กรุณาให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ ตลอดจนการแก้ไขปรับปรุงงานวิจัยฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากขึ้น รวมไปถึงคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค ที่กรุณาให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านของงานวิจัยชิ้นนี้ เพื่อให้ผลงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา และ อาจารย์ ดร. ศราวุธ ภู่ไพจิตร์กุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณารับเชิญมาเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต และศูนย์วิจัยเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนงานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณ คุณยาย คุณป้า และคุณแม่ รวมไปถึงทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเป็นอย่างดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญรูปภาพ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตงานวิจัย..... 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

1.5 ขั้นตอนการวิจัย..... 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 อิฐดินเผาหรืออิฐมอญ..... 5

2.2 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์..... 10

2.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง..... 12

2.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิง..... 12

2.5 กลไกการถ่ายโอนความร้อน..... 13

2.6 การออกแบบการทดลอง..... 19

2.7 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ..... 27

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 34

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... 39

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

3.1 ข้อมูลเบื้องต้นในงานวิจัย 39
3.2 การจำลองพฤติกรรมกระบวนการในงานวิจัย 41
3.3 การจำลองปฏิกิริยาเคมี 47
3.4 การออกแบบช่องสำหรับการไหลของอากาศและการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการคำนวณ 49
3.5 การจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดิน 54
บทที่ 4 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง 61
4.1 การจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับแบบจำลองเตาเผาอิฐดิน 61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 90
5.1 สรุปผลการวิจัย 90
5.2 ข้อเสนอแนะ 92
รายการอ้างอิง 93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 102

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วย 18

ตารางที่ 2.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^3 22

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการออกแบบช่องสำหรับใส่เชื้อเพลิง และความสูงของเตา..................... 50

ตารางที่ 3.2 ขนาดของแบบจำลองทั้ง 8 แบบ 51

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผา ทั้ง 3 แบบจำลอง 57

ตารางที่ 3.4 การกำหนดอุณหภูมิที่ภาวะขอบเขตสำหรับการจำลองแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา 58

ตารางที่ 3.5 การกำหนดอุณหภูมิที่ภาวะขอบเขตสำหรับการจำลองแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา 59

ตารางที่ 3.6 การกำหนดอุณหภูมิที่ภาวะขอบเขตสำหรับการจำลองแบบมีการเกิดปฏิกิริยา 59

ตารางที่ 4.1 ผลปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา สำหรับการจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา 71

ตารางที่ 4.2 สรุปลำดับความสำคัญสำหรับตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 ด้าน 73

ตารางที่ 4.3 ตัวแปรดำเนินการที่คาดว่ามีผลการเปลี่ยนแปลงและระดับของตัวแปร...................... 77

ตารางที่ 4.4 การออกแบบการทดลองแบบ 2^3 ของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ และตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการจำลอง.. 77

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ของตัวแปรตอบสนองจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส 78

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ของตัวแปรตอบสนองอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว 78

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ของตัวแปรตอบสนองเวลาที่ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว 78

ตารางที่ 4.8 ผลปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา สำหรับการจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบ... 86

ตารางที่ 4.9 ผลการจำลองอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละแบบจำลอง 89

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 อิฐมอญ ... 6

รูปที่ 2.2 อิฐบล็อก ... 7

รูปที่ 2.3 อิฐมวลเบา หรือคอนกรีตมวลเบา ... 7

รูปที่ 2.4 การผึ่งอิฐดิบ ... 8

รูปที่ 2.5 ระหว่างการเผาอิฐดิน ... 9

รูปที่ 2.6 แผนผังการกระจาย ... 25

รูปที่ 2.7 แผนภาพกล่อง ... 25

รูปที่ 2.8 การแบ่งปริมาตรควบคุมออกเป็นเซลล์เล็กๆ : สี่เหลี่ยมทางด้านซ้ายแสดง node ที่ใช้กันทั่วๆ ไปในระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุม และรูปทางด้านขวาแสดงตัวกำกับปริมาณด้วยตัวอักษรใหญ่ในขณะที่พื้นที่หน้าตัดถูกกำกับด้วยตัวอักษรเล็ก ... 28

รูปที่ 3.1 รายละเอียดการจำลองเชิงเรขาคณิตในการคำนวณของเตาเผาอิฐดินที่ได้จากการสำรวจข้อมูลในอำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ... 39

รูปที่ 3.2 แบบจำลองเชิงเรขาคณิต ก.) ผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา) และ ข.) เตาเผาอิฐดินต้นแบบ ... 49

รูปที่ 3.3 รายละเอียดแบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ที่มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบของแบบจำลองต้นแบบ ... 51

รูปที่ 3.4 รายละเอียดแบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินที่มีการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลองต้นแบบ ... 52

รูปที่ 3.5 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยาในรูปแบบต่างๆ ที่ระนาบ X-Y ก.) แบบจำลองต้นแบบ, ข.) แบบจำลองที่ 2, ค.) แบบจำลองที่ 3, ง.) แบบจำลองที่ 4, จ.) แบบจำลองที่ 5, ฉ.) แบบจำลองที่ 6, ช.) แบบจำลองที่ 7 และ ซ.) แบบจำลองที่ 8 ... 53

รูปที่ 3.6 รายละเอียดแบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินในการกำหนดภาวะขอบเขต ... 54

รูปที่ 3.7 แผนภาพกระบวนการแก้ปัญหาแบบ Segregated ... 55

รูปที่ 4.1 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 1 (แบบจำลองต้นแบบ) ... 64

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.2 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 2............................. 64
รูปที่ 4.3 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 3............................. 64
รูปที่ 4.4 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 4............................. 65
รูปที่ 4.5 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 5............................. 65
รูปที่ 4.6 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 6............................. 65
รูปที่ 4.7 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 7............................. 66
รูปที่ 4.8 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 8............................. 66
รูปที่ 4.9 แผนภาพเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงที่ระหว่างแบบจำลองต้นแบบ และแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้น 67
รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองต้นแบบ 68
รูปที่ 4.11 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองที่ 2.......................... 68
รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองที่ 3.......................... 68
รูปที่ 4.13 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองที่ 4.......................... 69
รูปที่ 4.14 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองที่ 5.......................... 69
รูปที่ 4.15 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองที่ 6.......................... 69
รูปที่ 4.16 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองที่ 7.......................... 70
รูปที่ 4.17 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองที่ 8.......................... 70
รูปที่ 4.18 แผนภาพเปรียบเทียบผลของเวลาที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัวระหว่างแบบจำลองต้นแบบ และแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้น 72
รูปที่ 4.19 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลา 100 วินาที ของ ก.) แบบจำลองต้นแบบเปรียบเทียบกับ ข.) แบบจำลองที่ 5 และ ค.) แบบจำลองที่ 8... 74
รูปที่ 4.20 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลา 1,000 วินาที ของ ก.) แบบจำลองต้นแบบ เปรียบเทียบกับ ข.) แบบจำลองที่ 5 และ ค.) แบบจำลองที่ 8 75
รูปที่ 4.21 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลา 10,000 วินาที ของ ก.) แบบจำลองต้นแบบ เปรียบเทียบกับ ข.) แบบจำลองที่ 5 และ ค.) แบบจำลองที่ 8 75
รูปที่ 4.22 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลา 50,000 วินาที ของ ก.) แบบจำลองต้นแบบ เปรียบเทียบกับ ข.) แบบจำลองที่ 5 และ ค.) แบบจำลองที่ 8 76
รูปที่ 4.23 พื้นผิวตอบสนองปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส ที่มีความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และค่าความสูงของเตาเผาแตกต่างกันเมื่อมีค่าความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ขนาด 7.5 ซม. 81

รูปที่ 4.24 พื้นผิวตอบสนองอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว ที่มีความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และค่าความสูงของเตาเผาแตกต่างกัน เมื่อมีค่าความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ขนาด 7.5 ซม. 81

รูปที่ 4.25 พื้นผิวตอบสนองเวลาที่ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงที่ ที่มีความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และค่าความสูงของเตาเผาแตกต่างกัน เมื่อมีค่าความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ขนาด 7.5 ซม. 82

รูปที่ 4.26 พื้นผิวตอบสนองปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส ที่มีความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และค่าความสูงของเตาเผาแตกต่างกันเมื่อมีค่าความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ขนาด 15 ซม. 82

รูปที่ 4.27 พื้นผิวตอบสนองอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว ที่มีความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และค่าความสูงของเตาเผาแตกต่างกัน เมื่อมีค่าความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ขนาด 15 ซม 83

รูปที่ 4.28 พื้นผิวตอบสนองเวลาที่ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงที่ ที่มีความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และค่าความสูงของเตาเผาแตกต่างกัน เมื่อมีค่าความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ขนาด 15 ซม. 83

รูปที่ 4.29 รายละเอียดแบบจำลองเชิงเรขาคณิตสำหรับการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ที่มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบของแบบจำลองที่ 5 85

รูปที่ 4.30 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลา 50,000 วินาที ของ ก.) แบบจำลองต้นแบบ เปรียบเทียบกับ ข.) แบบจำลองที่ 5 87

รูปที่ 4.31 รายละเอียดของแบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการคำนวณสำหรับการจำลองพฤติกรรมที่มีการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลองที่ 5 88

รูปที่ ก.1 การเลือกเข้าคำสั่ง Compile โดยโปรแกรม ANSYS Fluent 98

รูปที่ ก.2 หน้าต่างคำสั่ง Compile ของโปรแกรม ANSYS Fluent 98

รูปที่ ก.3 หน้าต่างคำสั่งเลือกไฟล์รหัสต้นฉบับ 99

รูปที่ ก.4 หน้าต่างในการตั้งสมการปฏิกิริยา ภายในโปรแกรม ANSYS Fluent 99

รูปที่ ก.5 แสดงไฟล์รหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมี 101

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมอิฐดินเผาหรืออิฐมอญถือเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญมากต่อการพัฒนาระบบเศรษฐกิจและระบบอุตสาหกรรม ทั้งในระดับชุมชนและสังคมของประเทศ เนื่องมาจากเป็นอุตสาหกรรมที่มีการผลิตมาเป็นระยะเวลายาวนานโดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเป็นวัตถุดิบภายในประเทศทั้งหมด ด้วยคุณสมบัติที่มีความแข็งแรงทนทาน รับน้ำหนักได้ดี ขนาดพอเหมาะ และน้ำหนักเบา จึงเป็นวัสดุที่เป็นที่รู้จักและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย นอกจากการใช้งานในด้านของการก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างแล้วอิฐดินเผายังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการประดับตกแต่งได้ดีอีกด้วย แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตอิฐดินยังพบปัญหาที่สำคัญต่างๆ ทั้งคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอของวัตถุดิบ การออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ได้มาตรฐาน หรือแม้แต่สภาพอากาศในแต่ละฤดูกาลที่ส่งผลต่อการแข็งตัวของอิฐดิบ ซึ่งล้วนแต่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควร นอกจากนั้น ปัญหาที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ กระบวนการเผาผลิตภัณฑ์ที่มีผลให้ผลิตภัณฑ์อิฐดินมีคุณภาพไม่ดี ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากวัสดุที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงและเตาเผาแบบเปิดที่มีขนาดใหญ่ส่งผลให้อุณหภูมิที่เผาในแต่ละจุดไม่เท่ากัน จากการสำรวจเบื้องต้น พบว่า เตาเผาแบบเปิดที่มีอุณหภูมิไม่ถึง 800 องศาเซลเซียส จะทำให้การสุกตัวของผลิตภัณฑ์อิฐดินในแต่ละจุดไม่เท่ากัน มีผลให้ผลิตภัณฑ์อิฐดินที่ได้ มีคุณภาพไม่ดี มีการแตกหักของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา หรือผลิตภัณฑ์อิฐดินในบางส่วนต้องผ่านกระบวนการเผาซ้ำอีกครั้ง ทำให้เป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิต โดยผลิตภัณฑ์อิฐดินที่ผ่านกระบวนการเผาในระบบเตาแบบเปิดมีการแตกหักของผลิตภัณฑ์มากกว่าร้อยละ 15

จากปัญหาดังกล่าวจึงมีงานวิจัยหลายชิ้นที่ทำการวิจัยและศึกษาการปรับปรุงผลิตภัณฑ์อิฐดินดังกล่าวไม่ว่าจะเป็นการปรับปรุงในส่วนของการใช้วัตถุดิบให้เหมาะสมซึ่งผลการวิจัยที่ผ่านมาทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อิฐดินที่มีคุณภาพมากขึ้น และได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม นอกจากการปรับปรุงพัฒนาในเรื่องของวัตถุดิบให้เหมาะสมแล้ว อีกหนึ่งปัญหาที่สำคัญในกระบวนการผลิตที่ควรได้รับการพัฒนานั่นคือกระบวนการเผาอิฐดินที่เป็นขั้นตอนของการทำให้ผลิตภัณฑ์อิฐดินเกิดการแข็งตัว ซึ่งใน

งานวิจัยชิ้นนี้ได้มีการนำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computation Fluid Dynamics ; CFD) ที่สามารถสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตที่มีความซับซ้อน และสามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำมาช่วยในการสร้างแบบจำลองกระบวนการเผา เพื่อลดระยะเวลาในการทดลอง ค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบจริง และแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นสามารถแก้ไขได้ง่ายเมื่อมีพารามิเตอร์ที่ต้องการเพิ่มเติม นอกจากนั้นแล้วแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นยังสามารถบอกพฤติกรรมของกระบวนการที่สร้างขึ้น แบบจำลองกระบวนการผลิตอิฐดินเผาที่ถูกสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ทำเพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ใช้อยู่ในท้องถิ่น และเพื่อวิเคราะห์ปัญหา ออกแบบ พัฒนาและปรับปรุงกระบวนการเผารูปแบบการวางชิ้นงานอิฐดินที่ผ่านการอัดรีด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลิตภัณฑ์อิฐดินเผามีคุณภาพที่ดีและสม่ำเสมอ รวมทั้งต้องการลดระยะเวลาและการใช้เชื้อเพลิงในการเผาด้วย

นอกจากการนำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาช่วยในการจำลองแล้ว ยังได้นำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (2^k factorial design) มาช่วยในการวิเคราะห์ผล โดยตัวแปรดำเนินการในที่นี้คือ ความสูงของเตาเผา, ความสูง และความกว้างของช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ตามแนวนอนด้านล่างของเตา โดยมีตัวแปรตอบสนองที่ต้องการศึกษาคือ จำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่มีคุณภาพ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว และเวลาที่ให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ทำการปรับปรุง พัฒนาและออกแบบกระบวนการเผาผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา ด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณให้ผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่ได้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น เพื่อลดต้นทุนในการผลิต โดยทำการออกแบบ ปรับปรุงการวางอิฐดินเผาในรูปแบบต่างๆ แล้วสำรวจดูการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในกระบวนการเผาแต่ละจุด ทั้งนี้ให้อุณหภูมิเผาเฉลี่ยที่ภาวะคงตัวอยู่ที่ประมาณ 800 – 900 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาที่ให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัวน้อยลงกว่าต้นแบบ และมีจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐเผาที่มีคุณภาพดีเพิ่มขึ้น

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.) ออกแบบการทดลองโดยการกำหนดตัวแปรดำเนินการ และตัวแปรตอบสนองที่คาดว่าจะมีผลต่อกระบวนการเผาผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา โดยการศึกษาข้อมูลจากเตาเผาอิฐดินระบบจริง

2.) นำผลจากการออกแบบการทดลอง มาจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา

3.) นำผลจากการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินจากข้อข้างต้นมาเปรียบเทียบผลของตัวแปร เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุด ทั้งในด้านจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่มีคุณภาพ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว และ เวลาที่ให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว เพื่อนำไปใช้งานจริง และเป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แบบจำลองพฤติกรรกระบวนการเผาสำหรับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา ที่คาดว่าจะสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงในการเผาได้หากมีการเรียงอิฐที่เหมาะสมกว่าแบบเดิม นอกจากนั้นยังสามารถช่วยลดจำนวนผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่ไม่ได้มาตรฐาน ลดต้นทุน และลดระยะเวลาในการทดลองระบบเตาเผาจริงที่มีขนาดใหญ่ได้อีกด้วย

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านกระบวนการผลิตอิฐดินเผา รวมไปถึงงานวิจัยที่นำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณไปประยุกต์ใช้ นอกจากนั้น ยังศึกษาโปรแกรม ANSYS Fluent, โปรแกรม Gambit และโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับ Factorial Design
2. ออกแบบและวางแผนการทดลอง
3. วาดแบบจำลองเชิงเรขาคณิตสำหรับเตาเผาอิฐดินตามต้นแบบโดยใช้โปรแกรม Gambit ที่มีขนาดความกว้าง 915 ซม. ความยาว 470 ซม. และ ความสูง 225 ซม. ทำการสร้างแบบจำลองช่องว่างตามแนวนอนทางด้านล่างของเตาเผาสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับ

ใส่เชื้อเพลิง) ที่มีขนาด ความกว้าง 15 ซม. ความยาว 470 ซม. และ ความสูง 45 ซม. แล้วจึงทำการเชื่อมกับช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ตามแนวตั้งของเตาที่มีขนาดความกว้าง 15 ซม. ความยาว 10 ซม. และ ความสูง 225 ซม. จากพื้นด้านล่างของเตาเผา

4. จำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการสำเร็จรูป ANSYS Fluent
5. วิเคราะห์ผลการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับอิฐดิน
6. ออกแบบการทดลองเพื่อพัฒนาเตาเผาอิฐดินด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ในการทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อตัวแปรที่ต้องการจะศึกษาโดยตัวแปรดำเนินการในที่นี้คือ ความสูงของเตาเผา ความสูง และความกว้างของช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ตามแนวนอนด้านล่างของเตา โดยมีตัวแปรตอบสนองที่ต้องการศึกษาคือ จำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐเผาที่มีคุณภาพ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว และเวลาที่ให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว
7. จำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการสำเร็จรูป ANSYS Fluent จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล
8. วิเคราะห์ผลการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินต้นแบบ เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เพื่อเลือกแบบจำลองที่ให้ผลของตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุดทั้ง 3 ด้าน
9. จำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินที่มีการไหลของอากาศร้อน และจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินที่มีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ระหว่างอิฐดินเผา ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากแบบจำลองที่ให้ผลรวมของตัวแปรตามที่ดีที่สุดทั้ง 3 ด้าน
10. วิเคราะห์ผล สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อิฐดินเผาหรืออิฐมอญ

2.1.1 ความเป็นมา

หลังสิ้นสุดสงครามครั้งสุดท้ายในปี พ.ศ. 2300 ระหว่างชนชาติมอญกับพม่า ชาวมอญส่วนหนึ่งมีการอพยพเข้ามาตั้งถิ่นฐานอยู่ในเมืองไทยเนื่องจากการแพ้สงคราม การเข้ามาตั้งรกรากของชาวมอญกระจัดกระจายอยู่ไปทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย ไม่ว่าจะเป็นที่ราบริมแม่น้ำทางภาคกลางที่จังหวัดลพบุรี สระบุรี อยุธยาฯ หรือบางส่วนอพยพไปตั้งภูมิลำเนาอยู่แถบภาคเหนือ รวมไปถึงภาคอีสาน เช่นในจังหวัดเชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง นครราชสีมา และมีเพียงส่วนน้อยที่อพยพไปทางภาคใต้

หลักจากการตั้งถิ่นฐานแล้ว [1] ชาวมอญส่วนใหญ่ก็ยังคงประกอบอาชีพเดิมตามที่ตนถนัดครั้งอาศัยอยู่ในบ้านเมืองของตน ซึ่งอาชีพหลักของชาวมอญคือการทำเกษตรกรรม ค้าขาย รับราชการ และการทำเครื่องปั้นดินเผา อีกอาชีพเสริมของชาวมอญหลังฤดูเกษตรกรรมคือการทำอิฐดินเผา หรืออิฐมอญ จากการที่ชาวมอญมีฝีมือ และมีความชำนาญในการทำเครื่องปั้นดินเผา และอิฐดินเผา ซึ่งเป็นอาชีพที่สืบทอดกันมาเป็นเวลายาวนานนั้น ทำให้เกิดการผูกขาดการทำอิฐมาตั้งแต่ต้น และมีการสืบทอดมาสู่ลูกหลานจนกระทั่งปัจจุบัน จากความมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวของอิฐดินเผาชนิดนี้ทำให้ผู้คนที่พบเห็นอิฐที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ลักษณะผิวหยาบสีส้ม ที่มีขนาดความกว้างประมาณสองเท่าของความหนาและความยาวประมาณสองเท่าของความกว้างนี้ว่า “อิฐมอญ”

แต่เดิมการทำอิฐมอญจะใช้ดินที่นำมาจากแม่น้ำ ที่มีลักษณะเฉพาะ คือ มีเนื้อละเอียดปนทราย ไม่เหนียวมากจนเกินไป แต่ในปัจจุบันการใช้ดินแม่น้ำต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงมาก จึงหันมาใช้ดินจากพื้นที่ลุ่มแทน ซึ่งดินในพื้นที่ลุ่มจะมีลักษณะคล้ายดินแม่น้ำ นั่นคือ ดินจะมีลักษณะเป็นดินสองชั้น ชั้นบนเป็นดินเหนียวปนทรายมาก ส่วนชั้นล่างเป็นดินเหนียวล้วนๆ เมื่อนำมารวมกัน

แล้วจะได้ดินเหนียวปนทรายเนื้อดี นอกจากนั้น การทำอิฐมอญยังมีส่วนประกอบสำคัญอื่นที่ประกอบด้วยแกลบ ขี้เลื่อย และน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม แล้วหมักในบ่อผสมดิน ทำการนวดให้เข้าด้วยเครื่องทุ่นแรง จากนั้นจึงนำไปปั้นขึ้นรูปเป็นแผ่นยาว ก่อนจะตัดเป็นออกเป็นก้อนสี่เหลี่ยม ตากแดดให้แห้งพอสมควร และนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิสูงเป็นลำดับสุดท้าย อิฐที่ดีต้องจะมีลักษณะสีส้มสดทั่วทั้งก้อน สามารถรับน้ำหนักได้ดี ขนาดพอเหมาะ และน้ำหนักไม่มากนัก [2]

2.1.2 ลักษณะทั่วไปของอิฐแต่ละชนิด [3]

รูปที่ 2.1 อิฐมอญ [4]

2.1.2.1 อิฐมอญ

อิฐมอญ เป็นวัสดุที่ผลิตมาจากการนำดินเหนียวมาผสมกับส่วนประกอบต่างๆ ก่อนจะนำไปเผาเพื่อให้ได้วัสดุที่คงรูป มีความแข็งแรง อิฐมอญมักถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างต่างๆ เนื่องจากความเชื่อมั่นในเรื่องของความแข็งแรง คงทน สามารถรับน้ำหนักได้ดี และผลิตได้เองจากแรงงานในท้องถิ่นนอกจากนั้นแล้วอิฐมอญมีคุณสมบัติยอมให้ความร้อนถ่ายเทเข้า - ออกได้ง่าย และเก็บความร้อนไว้ในตัวได้เป็นเวลานานเหมาะกับงานก่อสร้าง จึงเป็นวัสดุที่เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย

2.1.2.2 อิฐบล็อก หรือคอนกรีตบล็อก

คอนกรีตบล็อกจะถูกผลิตในลักษณะอุตสาหกรรมมากกว่าอิฐมอญ ส่วนใหญ่จะมีลักษณะกลวง อิฐบล็อกเป็นที่นิยมใช้มากไม่ต่างจากอิฐมอญ เนื่องจากมีราคาถูก หาซื้อได้ง่าย และไม่มีปัญหาในขั้นตอนก่อสร้าง อีกทั้งยังสามารถทำงานได้รวดเร็วเพราะมีขนาดก้อนที่ใหญ่กว่าอิฐมอญ และจากลักษณะที่มีรูกลวงตรงกลางทำให้ช่องอากาศภายในนั้นเป็นฉนวนในการกันความร้อนที่ดี แต่

มีข้อเสีย คือ มีความเปราะ และแตกง่าย ไม่มีความแข็งแรงทนทาน และคุณภาพค่อนข้างจะต่ำกว่าอิฐมอญ

รูปที่ 2.2 อิฐบล็อก [5]

2.1.2.3 อิฐมวลเบา หรือคอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุที่นิยมมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากตัววัสดุเองมีคุณสมบัติที่โดดเด่นมากกว่าอิฐแบบอื่นๆ ทั้งในเรื่องการป้องกันความร้อนได้มากกว่า แต่ส่วนที่สำคัญที่สุดคือ ตัวเนื้อของวัสดุมีฟองอากาศเล็กๆ เป็นรูพรุนไม่ต่อเนื่องมากกว่าร้อยละ 75 ทำให้วัสดุมีน้ำหนักที่เบา ผลของความเบานี้จะช่วยให้ประหยัดโครงสร้าง อีกทั้งฟองอากาศเหล่านั้นยังเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีอีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 2.3 อิฐมวลเบา หรือคอนกรีตมวลเบา [6]

2.1.3 ขั้นตอนการผลิตอิฐมอญ หรืออิฐดินเผา [7, 8]

เราสามารถแยกขั้นตอนการผลิตอิฐออกได้ดังนี้

1. ขั้นตอนการเตรียมดิน เริ่มจากการเลือกดิน ให้มีลักษณะเป็นดินเหนียวปนทรายนำมาหมักในบ่อหมักเป็นเวลา 3 วัน จากนั้น นำแกลบ และเถ้ากลบเติมลงไป ผสมกวนส่วนประกอบทั้งหมดให้เข้ากัน

2. ขั้นตอนการขึ้นรูป โดยการนำดินอัดลงไปในแม่พิมพ์ที่ทำด้วยไม้ หรือโลหะ ใช้ไม้ หรือมือปาดให้ด้านบนเรียบเสมอกัน แล้วจึงนำอิฐดิบที่ถูกอัดเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมออกจากแม่พิมพ์

รูปที่ 2.4 การผึ่งอิฐดิบ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3. ขั้นตอนการผึ่งให้แห้ง จะนำอิฐดิบไปผึ่งให้แห้งหมาดๆ ก่อน หากนำอิฐดิบที่ยังเปียกอยู่มาเข้าเตาเผาในทันที ความชื้นที่ผิวของอิฐดิบจะถูกดึงออกอย่างรวดเร็วอาจทำให้อิฐดิบแตกได้เนื่องจากการหดตัวที่เร็วเกินไป

4. ขั้นตอนการเผา ขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญ และเป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการผลิตอิฐดินเผา เป็นขั้นตอนที่ทำให้อิฐดิบกลายเป็นอิฐที่มีความคงรูป แข็งแรงทนทานด้วยเตาเผาที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 9 ม. ที่อุณหภูมิ 800 - 900 องศาเซลเซียส เตาเผาอิฐดิบเริ่มจากการนำอิฐดิบที่ผ่านการผึ่งมาเรียงเป็นชั้นๆ โดยวางเรียงสลับกันเป็นช่องเพื่อให้มีพื้นที่สำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) แล้วจึงทำการล้อมรอบเตาเผาอิฐด้วยแผ่นแผ่นสังกะสี จากนั้น

ทำการใส่เชื้อเพลิงบริเวณต่างๆ ที่เป็นช่องว่าง ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้ทำหน้าที่ในการเผาคือแกลบ ความร้อนจะเพิ่มขึ้นทีละน้อยจนถึงความร้อน เมื่ออิฐดินเผาสุกจึงนำออกจากเตาเผา อิฐดินเผาที่สุกแล้วสามารถสังเกตได้จากการใช้สายตามองสีของอิฐ อิฐที่สุกแล้วจะมีสีส้มตลอดทั่วทั้งก้อน

รูปที่ 2.5 ระหว่างการเผาอิฐดิน

2.1.4 ลักษณะการทำงานของเตาเผา

เตาอิฐดินเผาที่เราทำการศึกษาเป็นเตาพื้นบ้านที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมของท้องถิ่นในการผลิตอิฐดินเผาของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ตัวเตาได้จากการนำอิฐดิบมาเรียงต่อกันเป็นชั้นๆ ให้มีขนาดโดยประมาณ 915 x 470 x 225 ซม. โดยมีการเรียงอิฐดิบสลับกันเพื่อให้เกิดช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ทั้งที่บริเวณด้านล่างของเตาตามแนวความกว้างและภายในเตาตามแนวความสูง โดยช่องทั้ง 2 บริเวณจะทำการเชื่อมต่อกัน หลังจากนั้นจึงทำการล้อมรอบเตาเผาอิฐด้วยแผ่นสังกะสีเพื่อควบคุมความร้อนไม่ให้กระจายออกไปนอกบริเวณเตาเผา โดยให้มีพื้นที่ระหว่างผนังอิฐชั้นนอกสุด กับแผ่นสังกะสีห่างจากกันประมาณ 10 ซม. ความสูงของกำแพงสังกะสีนี้ต้องสูงจากพื้นด้านล่างขึ้นมากกว่าแท่งอิฐดิบเล็กน้อย แล้วจึงทำการใส่เชื้อเพลิงบริเวณต่างๆที่เป็นช่องว่างทั้งหมด รวมไปถึงบริเวณด้านบนก็จะถูกปกคลุมไปด้วยแกลบเช่นกัน ปริมาณของแกลบที่ใช้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดเตา และจำนวนอิฐดิบเป็นหลัก หลังจากใส่แกลบเต็มบริเวณทั้งหมดก็จะทำการจุดไฟเผา โดยจะเริ่มจุดจากบริเวณด้านล่างจนรอบเตาเผา ไฟจะเผาแกลบและค่อยๆ ลุกลามขึ้นไปเรื่อยๆ จนทั่วทั้งเตา ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แกลบ

นั้นจะถูกถ่ายเทให้กับชิ้นงานอิฐดิบโดยการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนภายในเตา ในระหว่างการเผาต้องหมั่นตรวจดูเตาตลอดเวลา เกลี่ยและเติมแกลบอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ความร้อนแผ่กระจายอย่างทั่วถึง เพราะถ้าอิฐบางก้อนไม่ได้รับความร้อนเท่ากับอิฐก้อนอื่นๆ จะทำให้ได้อิฐที่ไม่สุก หรือบางก้อนมีลักษณะเป็นสีดำ กลายเป็นอิฐที่ไม่ได้มาตรฐานส่งผลให้ไม่สามารถนำไปขายได้ ซึ่งช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทำให้อิฐดิบกลายเป็นอิฐที่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน มอก. นั้นต้องอยู่ในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส [9]

2.2 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ [10, 11]

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์เป็นทฤษฎีสมดุลพลังงาน หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กฎการอนุรักษ์พลังงาน

เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการที่เกิดขึ้นสามารถเขียนในรูปสมการได้เป็น

2.2.1 สมดุลพลังงานสำหรับระบบมวลควบคุมหรือระบบปิด การเปลี่ยนแปลงจากสภาวะเริ่มต้นไปสู่สภาวะสุดท้ายจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการสมดุลพลังงานได้เป็น

$$Q - W_{sh} = m(\Delta u) + m\left(\frac{\Delta v^2}{2}\right) + mg(\Delta z) \tag{2.1}$$

เมื่อ Q คือ ความร้อนที่ถ่ายโอนข้ามขอบเขตของระบบ (กิโลจูล)

W_{sh} คือ งานที่ถ่ายเทข้ามขอบเขตของระบบ (กิโลจูล)

m คือ มวลเข้าระบบ (กิโลกรัม)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

Δu คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

$\Delta v^2/2$ คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของระบบ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

และ Δz คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ของระบบ (เมตร)

2.2.2 สมดุลพลังงานสำหรับระบบปริมาตรควบคุมหรือระบบเปิด นั่นคือ เมื่อมีการไหลเข้า และออกจากระบบ หากการไหลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

เรียกสมการในกรณีนี้ว่า สมการพลังงานไหลที่ภาวะคงตัว (Steady Flow Energy Equation: SFEE) เขียนได้เป็น

$$\Sigma Q - \Sigma W_{pv,system} = \Sigma m(\Delta h) + \Sigma m\left(\frac{\Delta v^2}{2}\right) + \Sigma mg(\Delta z) \quad (2.2)$$

เมื่อ	Q	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนข้ามขอบเขตของระบบ (กิโลจูล)
$W_{pv,system}$		คือ	อัตราการถ่ายเทงานจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของระบบที่ถ่ายเทข้ามขอบเขตของระบบ (กิโลจูล)
	m	คือ	อัตราการไหลของมวล (กิโลกรัม)
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)
	Δh	คือ	การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของของไหล (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
	$\Delta v^2/2$	คือ	การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของของไหล (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
และ	Δz	คือ	การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ของของไหล (เมตร)

2.2.3 สมดุลพลังงานสำหรับระบบที่มีการไหลที่ไม่คงตัว (Non – Steady flow systems) สมดุลพลังงานนี้สำหรับกรณีที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา สามารถเขียนสมการการเปลี่ยนแปลงพลังงานในช่วงเวลา t_1 และ t_2 ได้เป็น

$$\sum E_{system} = \text{พลังงานที่เข้าทั้งหมด – พลังงานที่ออกทั้งหมด}$$

$$= -\Delta E_{system} + Q - W'$$

$$\Delta E_{system} + \Delta E_{stream} = Q - W'$$

$$m_2(U + e_p + e_k)_2 - m_1(U + e_p + e_k)_1 + m_{out}(h + e_p + e_k)_{out}$$

$$-m_{in}(h + e_p + e_k)_{in} = Q - W' \quad (2.3)$$

เมื่อ	m_1	คือ	มวลของระบบที่ภาวะที่ 1
	m_2	คือ	มวลของระบบที่ภาวะที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

m_{in} คือ มวลที่ไหลเข้าระบบ

และ m_{out} คือ มวลที่ไหลออกระบบ

W' = $W_{sh} - W_{pv,system}$

2.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง [12]

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง คือ ปริมาณความร้อนที่ระบบจะได้รับจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในกรณีของของแข็งหรือของเหลวจะพิจารณาที่ 1 กิโลกรัม แต่หากเป็นเชื้อเพลิงแก๊สจะพิจารณาที่ 1 ลูกบาศก์เมตรในกรณีที่เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้มีส่วนประกอบของไฮโดรเจน ค่าความร้อนจะมี 2 ค่าขึ้นอยู่กับว่าผลิตผลที่ได้จากการเผาไหม้ถูกลดอุณหภูมิลงให้เท่ากับอุณหภูมิเดิมก่อนการเผาไหม้หรือไม่ ถ้าไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ถูกควบแน่นให้กลายเป็นน้ำ และคายความร้อนแฝงออกมา ทำให้ได้ปริมาณความร้อนมากขึ้น จะได้ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง (High heating value) ในทางตรงกันข้ามหากไม่มีการลดอุณหภูมิลง ปริมาณความร้อนที่ได้ก็จะน้อยลงเนื่องจากไอน้ำยังคงสภาพอยู่ในสถานะไอ เรียกว่า ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (Lower, Low หรือ Net heating value) ค่าความร้อนนี้สามารถคำนวณได้จากการคำนวณที่อาศัยส่วนประกอบของเชื้อเพลิงในการเผาไหม้นั้นๆ

2.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิง [12]

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นเป็นปฏิกิริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว พร้อมกับเกิดการลุกไหม้ และการคายความร้อนออกมา การเผาไหม้เชื้อเพลิงประกอบไปด้วยการออกซิเดชันของสารสันดาปชนิดต่างๆ ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วนๆ แต่จะใช้อากาศแทน โดยอากาศจะประกอบไปด้วยแก๊สออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก

ซึ่งหากพิจารณาเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และธาตุอื่นๆ ปะปนอยู่บ้าง เช่น ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) ดังนั้น เมื่อนำเชื้อเพลิงชีวมวลไปเผาไหม้ก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีพื้นฐานดังแสดงต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- การเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของคาร์บอน

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2 + 97,000 \quad \text{kcal / kmol} \quad (2.4)$$

- การเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จากการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ของคาร์บอน

$$C + (\frac{1}{2})O_2 \longrightarrow CO + 29,400 \quad \text{kcal / kmol} \quad (2.5)$$

- การเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จาการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

$$CO + (\frac{1}{2})O_2 \longrightarrow CO_2 + 67,600 \quad \text{kcal / kmol} \quad (2.6)$$

- การเกิดไอน้ำหรือน้ำจากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของแก๊สไฮโดรเจน

$$H_2 + (\frac{1}{2})O_2 \longrightarrow H_2O\ (\text{ไอ}) + 57,000 \quad \text{kcal / kmol} \quad (2.7)$$

$$H_2 + (\frac{1}{2})O_2 \longrightarrow H_2O\ (\text{ของเหลว}) + 68,300 \quad \text{kcal / kmol} \quad (2.8)$$

- การเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเกิดออกซิเดชันของซัลเฟอร์

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2 + 80,000 \quad \text{kcal / kmol} \quad (2.9)$$

2.5 กลไกการถ่ายโอนความร้อน [13-15]

การถ่ายโอนความร้อนจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ ระบบที่มีความแตกต่างกันของอุณหภูมิ โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จึงอาจนิยามการถ่ายโอนความร้อนได้ว่า เป็นการไหลของพลังงานในรูปแบบของความร้อน เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งให้กับแหล่งรับความร้อน

กลไกการถ่ายโอนความร้อนสามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะ คือ การนำความร้อน (Heat conduction) การพาความร้อน (Heat convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) การถ่ายโอนความร้อนด้วยกลไกต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น วัฏภาคของสาร ตัวกลางการถ่ายโอน หรือลักษณะการไหลของสาร เป็นต้น ในแต่ละกระบวนการการถ่ายโอนความร้อนอาจเกิดการถ่ายโอนความร้อนในลักษณะใดลักษณะหนึ่ง หรือเกิดมากกว่า 1 ลักษณะก็ได้

2.5.1 การถ่ายโอนความร้อนและกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

การถ่ายโอนความร้อน คือการถ่ายโอนพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อมีความแตกต่างกันของอุณหภูมิ จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ที่ระบุว่า “พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปหรือถูกถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง แต่ไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายให้สูญสลายไปได้” ดังนั้นระหว่างการทำงานของระบบหรือกระบวนการหนึ่งๆ จะสามารถเขียนได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมในระบบไม่ว่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างพลังงานรวมที่เข้าสู่ระบบและพลังงานที่ออกจากระบบ”

2.5.2 กลไกการถ่ายโอนความร้อน

<u>การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน</u> (Conduction heat transfer)

ดังที่กล่าวไปแล้วการถ่ายโอนความร้อน คือ การถ่ายโอนพลังงานที่เกิดขึ้นได้เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ การเกิดการนำความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิภายในวัตถุชิ้นหนึ่งๆ มีค่าไม่เท่ากันทุกจุด หรือเมื่อนำวัตถุชิ้นที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิมาสัมผัสกัน โดยตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดการนำความร้อนคือ ผลต่างของอุณหภูมิ มิติหรือรูปร่างของวัตถุ รวมไปถึงคุณสมบัติของวัตถุ ยิ่งผลต่างเหล่านี้มีมากเท่าไหร่ อัตราการนำความร้อนก็จะเปลี่ยนไปมากเท่านั้น

หากในกรณีที่อุณหภูมิทุกๆ จุดของวัตถุที่นำความร้อนมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะเรียกกรณีดังกล่าวว่า การนำความร้อนในภาวะคงตัว (Steady state heat conduction) ในทางตรงกันข้าม หากอุณหภูมิของวัตถุมีส่วนใดส่วนหนึ่ง หรือทั้งวัตถุเปลี่ยนแปลงตามเวลา ส่งผลให้อัตราการนำความร้อนเปลี่ยนตามเวลา จะเรียกกรณีนี้ว่า การนำความร้อนในภาวะไม่คงตัว (Unsteady state heat conduction) โดยทั่วไปการนำความร้อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สามารถถือว่าเป็นการนำความร้อนในภาวะคงตัว

- <u>การนำความร้อนของผนังแผ่นเดี่ยว</u>
  · <u>การนำความร้อนในแผ่นเรียบบาง</u> (Plane wall)

การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำในกรณีแผ่นเรียบบาง จะพิจารณาได้จากค่าอุณหภูมิที่ถ่ายเทจากด้านในของวัตถุหนึ่งสู่ด้านนอก นั่นคือมีการถ่ายเทพลังงานจากขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำ

นั่นแสดงว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอุณหภูมิแสดงดังสมการที่ (2.10)

$$\frac{q}{A} \propto \frac{\partial T}{\partial x} \tag{2.10}$$

เมื่อแทนด้วยสัดส่วนค่าคงที่จะได้ว่า

$$q = -kA\ \frac{\partial T}{\partial x} \tag{2.11}$$

เมื่อ	q	คือ	อัตราการถ่ายโอนความร้อน (วัตต์ต่อตารางเมตร)
	k	คือ	สภาพการนำความร้อนของวัสดุ (วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน)
	A	คือ	พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเท (เมตรกำลังสอง)
และ	$\frac{\partial T}{\partial x}$	คือ	ค่าอุณหภูมิในทิศทางที่ความร้อนไหล

- การนำความร้อนในทรงกระบอก (Cylinder heat conduction)

ในกรณีของทรงกระบอก การถ่ายโอนความร้อนจะเกิดขึ้นในตามแนวรัศมีเท่านั้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้น ดังนั้น จึงคิดได้ว่าเป็นการนำความร้อนในมิติเดียว นอกจากนั้นการนำความร้อนยังอยู่ภายใต้ภาวะคงตัวและไม่มีการกำเนิดความร้อนภายในตัวกลาง โดยอุณหภูมิที่รัศมีภายนอกและภายมีเท่ากับ T_1 และ T_0 ตามลำดับ จากการดุลพลังงานของทรงกระบอกแสดงได้ดังสมการที่ (2.12)

$$\frac{d}{dr} Q_r = 0 \tag{2.12}$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.12) จะได้

$$Q_r = C_1 \tag{2.13}$$

หากพิจารณากฎของฟูเรียร์สำหรับพิกัดทรงกระบอกจะได้อัตราการนำความร้อนผ่านผิวทรงกระบอกเขียนได้เป็นดังสมการที่ (2.14)

$$q_r = -kA\left(\frac{dT}{dx}\right) = -k(2\pi rL)\frac{dT}{dr} \tag{2.14}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ใดๆ ในผิวทรงกระบอกที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน

แทนสมการที่ (2.14) ในสมการที่ (2.13) จะได้

$$-k(2\pi rL)\frac{dT}{dr} = C_1 \tag{2.15}$$

จัดรูปสมการที่ (2.15) และทำการอินทิเกรตอีกครั้งจะได้ดังสมการที่ (2.16)

$$T = -\frac{C_1}{2\pi kL}\ln r + C_2 \tag{2.16}$$

แทนเงื่อนไขขอบเขตสำหรับหา C_1 และ C_2 โดยแทนเงื่อนไขขอบเขตที่ 1 ที่ $r = r_0$, $T = T_0$ ลงในสมการที่ (2.16) จะได้

$$C_1 = (T_1 - T_0)\frac{2\pi kL}{\ln r_0 - \ln r_1} = (T_0 - T_1)\frac{2\pi kL}{\ln r_1 - \ln r_0} \tag{2.17}$$

เมื่อแทนค่า C_1 ลงในสมการที่ (2.16) จะได้รูปแบบการไหลของอุณหภูมิคือ

$$\frac{T - T_0}{T_1 - T_0} = \frac{\ln r - \ln r_0}{\ln r_1 - \ln r_0} \tag{2.18}$$

และหากแทนค่า C_1 ในสมการที่ (2.15) จะได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนในทรงกระบอกเป็น

$$Q = 2\pi kL\frac{T_0 - T_1}{\ln\frac{r_1}{r_0}} = \frac{T_0 - T_1}{\frac{\ln r_1/r_0}{2\pi kL}} \tag{2.19}$$

เรียกเทอมของ $\frac{\ln r_1/r_0}{2\pi kL}$ ในสมการที่ (2.19) ว่าความต้านทานทางความร้อนของทรงกระบอก

การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา (Convection heat transfer)

การพาความร้อน คือการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านพื้นผิวของวัตถุต่างๆ โดยการเคลื่อนที่นั้นอาจเกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงกระทำภายนอก ซึ่งการเคลื่อนที่แบบนี้จะถูกเรียกว่า การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) และถ้าหากการ

เคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงลอยตัวหรือแรงพยุง (Buoyancy effect) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการความแตกต่างของความหนาแน่น และส่งผลให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหล การถ่ายโอนแบบดังกล่าวจะเรียกว่า การพาความร้อนแบบอิสระหรือแบบธรรมชาติ (Free or natural convection)

เมื่อพิจารณาระบบที่ประกอบไปด้วยแผ่นร้อนที่วางในแนวระนาบในอากาศเย็น พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิของแผ่นร้อนและอุณหภูมิของอากาศที่บริเวณผิวหน้าสัมผัสทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอากาศบริเวณที่ติดกับแผ่นร้อน ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศ ดังนั้นจะได้การถ่ายโอนความร้อนระหว่างอุณหภูมิของผนังร้อน T_s และอุณหภูมิของอากาศเย็น T_∞ จากสมการของนิวตัน (Newton’s law of cooling) ดังสมการที่ (2.20)

$$q = \frac{Q}{A} = h(T_s - T_\infty) \tag{2.20}$$

เมื่อ q คือ ฟลักซ์ของการถ่ายโอนความร้อน (วัตต์ต่อตารางเมตร)

Q คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อน (วัตต์)

และ h คือ สัมประสิทธิ์การโอนความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient)

หากทำการแยกชนิดของการการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนเป็น 2 ประเภท

1. การพาความร้อนแบบบังคับ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงภายนอกมากระทำ จนส่งผลให้รูปแบบของของไหลถูกกำหนดโดยแรงกระทำภายนอก นอกจากนี้ ยังพบว่าการแก้ปัญหาการพาความร้อนแบบบังคับนี้ต้องอาศัยการหารูปแบบของความเร็วของของไหลก่อน แล้วจึงจะสามารถหารูปแบบของอุณหภูมิได้ กลุ่มตัวแปรไร้หน่วยที่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อนแบบบังคับคือ ค่านัสเซลต์นัมเบอร์ (Nusselt number, Nu) ที่ขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลดส์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ (Plandtl number, Pr)

2. การพาความร้อนแบบอิสระหรือแบบธรรมชาติ เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหลซึ่งส่งผลให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิรูปแบบของของไหลถูกกำหนดโดย

แรงพยุงการแก้ปัญหาการพาความร้อนแบบนี้ต้องอาศัยการหารูปแบบของความเร็วควบคู่กันไปกับรูปแบบของอุณหภูมิกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยที่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อนแบบอิสระหรือแบบธรรมชาติ คือ ค่านัสเซลต์นัมเบอร์ (Nusselt number, Nu) ที่ขึ้นอยู่กับค่ากราสโฮฟนัมเบอร์ (Grashof number, Gr) และค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ (Plandtl number, Pr)

จากการศึกษาการพาความร้อนทั้ง 2 แบบ จะสามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์ได้กับลักษณะการพาความร้อนได้ดังนี้

การพาความร้อนแบบบังคับ $$Nu = CRe^{a}Pr^{b} \quad (2.21)$$

และ การพาความร้อนแบบอิสระ $$Nu = CPr^{d}Gr^{e} \quad (2.22)$$

โดยที่ค่า *C, a, b, d, e* เป็นค่าคงที่สามารถหาได้จากการทดลอง และค่าตัวแปรไร้หน่วยต่างๆ สามารถคำนวณได้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2. 1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วย

ชื่อเรียก	สูตรคำนวณ	สัญลักษณ์
นัสเซลต์นัมเบอร์	$\frac{hD}{k}$	Nu
เรย์โนลดส์นัมเบอร์	$\frac{\rho D v}{\mu}$	Re
พรันด์เทิลนัมเบอร์	$\frac{C_p \mu}{k}$	Pr
กราฟโฮฟนัมเบอร์	$\frac{g D^3 \rho^2 \beta \Delta T}{\mu^2}$	Gr

<u>การแผ่รังสีความร้อน</u> (Radiation heat transfer)

การแผ่รังสีความร้อน คือการปลอดปล่อยพลังงานในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนของอะตอม หรือโมเลกุล การถ่ายโอนในลักษณะการแผ่รังสีมีความแตกต่างกับการถ่ายโอนความร้อน

แบบอื่นๆ เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนไม่จำเป็นต้องมีตัวกลาง นอกจากนี้ การถ่ายโอนด้วยการแผ่รังสีความร้อนจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วที่ความเร็วเท่ากับความเร็วแสง และจะไม่มีการลดลงในภาวะสุญญากาศ วัตถุทุกชนิดสามารถปลดปล่อยความร้อนเนื่องจากอุณหภูมิของตัววัตถุเอง และเรียกพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาว่า ความร้อนของการแผ่รังสี (Thermal radiation) การถ่ายโอนการถ่ายโอนด้วยการแผ่รังสีสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's classic electromagnetic wave theory) หรือสมมติฐานของพลังค์ (Planck's hypothesis)

ฟลักซ์สูงสุดของการแผ่รังสีจากวัตถุที่อุณหภูมิ *T* สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของสเตฟาน-โบลต์สมานน์ (*Stefan-Boltzmann law*)

$$E_{\mathrm{b}} = \sigma T^4 \tag{2.23}$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์สมานน์ (5.6697×10^{-8} วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน^4)

และ E_{b} คือ กำลังการเปล่ง (Emissive power) ของวัตถุดำ

แต่หากพิจารณาในกรณีของการแผ่รังสีของวัตถุเทา (Gray body) ที่ปล่อยอุณหภูมิเดียวกันกับการแผ่รังสีของวัตถุดำที่เป็นแบบอุดมคติ (Ideal radiation) แล้ว จะพบว่าค่าฟลักซ์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาของวัตถุเทาจะมีค่าต่ำกว่าเป็นไปตามสมการที่ (2.24)

$$q = \varepsilon E_{\mathrm{b}} = \varepsilon \sigma T^4 \tag{2.24}$$

เมื่อ q คือ ค่าฟลักซ์ของการแผ่รังสีของวัตถุจริง (วัตต์ต่อตารางเมตร)

และ ε คือ สภาพเปล่งรังสี (Emissivity) เป็นตัวบอกประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวโดยเปรียบเทียบกับวัตถุดำ (-)

2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment)

การออกแบบการทดลอง (Design and analysis of Experiment) เป็นเทคนิคทางสถิติชั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าของกระบวนการเพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่เราต้องการ ซึ่งเทคนิคของการ

ออกแบบการทดลองนี้มีข้อแตกต่างจากวิธีการโดยทั่วไป นั่นคือวิธีการโดยทั่วไปจะเป็นการทดลองแบบลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า ซึ่งทั้ง 2 วิธีการที่กล่าวมาจะให้ผลตอบสนองตามที่เราต้องการได้ช้า ทำให้ผู้ทดลองต้องสูญเสียเวลาในการเก็บข้อมูลไปโดยเปล่าประโยชน์

2.6.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีการเก็บ และการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา ซึ่งขั้นตอนต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การนิยามปัญหา (Statement of the problem) เป็นการระบุว่าผู้ทดลองต้องการอะไรในการผลิต ในส่วนนี้จะต้องเกี่ยวข้องกับการตั้งวัตถุประสงค์

2. การเลือกปัจจัย และระดับของปัจจัย (Choice of factor, level, and range) เป็นการใช้หลักการทางทฤษฎี และประสบการณ์ เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยควรจะมีช่วงการทดลองอย่างไร

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of the response variable) การเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้ทดลองต้องแน่ใจว่าตัวแปรตอบสนองที่เลือกมานั้นสามารถให้ข้อมูลที่แม่นยำและถูกต้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4. การเลือกแบบการทดลอง (Choice of experiment design) เมื่อทำการกำหนดทรีตเมรนต์ (Treatment) และตัวแปรตอบสนองได้แล้ว ผู้ทดลองต้องทำการเลือกขนาดการทดลองที่จะทำ นั่นคือ จะทำการทดลองซ้ำกี่ครั้ง (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับในการทดลองข้อจำกัดในการสุ่ม (Radomization) และการบล็อก (Blocking)

5. การดำเนินการทดลอง (Performing the experiment) การดำเนินการ ต้องปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้

6. การวิเคราะห์ข้อมูล (Statisyical Analysis of data) ในการวเคราะห์ข้อมูลนี้ต้องใช้ความรู้ทางด้านสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์ และสรุปผล

7. การสรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusion and recommendations) หลังจากการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วต้องทำการสรุปผลการวิเคราะห์ และให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการให้ดีขึ้น

2.6.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของการทดลอง

1. วิธีปฏิบัติหรือทรีตเมนต์ คือ สิ่งที่ผู้ทดลองปฏิบัติต่อสิ่งทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2. ปัจจัย (Factor) คือ สิ่งที่คาดว่าจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเชิงคุณภาพ หรือปริมาณก็ได้ โดยสามารถแบ่งปัจจัยหลักๆ ออกได้ดังนี้ ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factors) และปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable factors)

3. ตัวแปรตอบสนอง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าตัวแปรตาม เป็นตัวแปรที่จะสะท้อนให้เห็นถึงตัวแปรอิสระ ในการทดลองหนึ่งๆ อาจจะวัดค่าตัวแปรตามได้มากกว่า 1 ก็ได้ โดยการเลือกตัวแปรตามที่ดีควรมีลักษณะที่มีความเชื่อถือได้ (Reliability) และมีความไว (Sensivity)

2.6.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลมักถูกนำมาใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายๆปัจจัย เมื่อผู้ทดลองต้องการจะศึกษาถึงผลร่วมที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การทดลองเชิงแฟกทอเรียลเป็นที่นิยมอย่างมากเนื่องจากเป็นแผนการทดลองที่ถือว่ามีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยหลายๆ ปัจจัย นอกจากนั้นแล้วยังสามารถแสดงระดับของปัจจัยต่างๆ ร่วมกันเพื่อตรวจสอบอิทธิพลต่างๆ ในการทดลองครั้งเดียว รูปแบบการทดลองจะแบ่ง (Treatment Combination) ออกได้เป็นแบบอิทธิพลหลัก (Main effect) และแบบอิทธิพลร่วม (Interaction effect)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบการทดลองในกรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยจะประกอบไปด้วย 2 ระดับ โดยปกติแล้วในการออกแบบจะแทนระดับสูงด้วยเครื่องหมาย (+) และแทนระดับต่ำด้วยเครื่องหมาย (-) ระดับต่างๆ เหล่านี้อาจจะเกิดจากการใช้ข้อมูลเชิงปริมาณ หรือข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้

2.6.4 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^3 [16]

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^3 เป็นการออกแบบการทดลองที่มีปัจจัยในการทดลองทั้งหมด 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยจะประกอบไปด้วย 2 ระดับ คือระดับสูง (+) และระดับต่ำ (-) รวมทั้งหมดมี 8 การทดลอง ดังแสดงในตาราง 2.2

ตารางที่ 2. 2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^3

Run	A	B	C	Combination
1	-	-	-	(1)
2	+	-	-	a
3	-	+	-	b
4	+	+	-	ab
5	-	-	+	c
6	+	-	+	ac
7	-	+	+	bc
8	+	+	+	abc

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การพิจารณาค่าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงผลของปัจจัยหลัก จะสามารถคำนวณได้จากค่าคอนแทรสต์ (Contrast) ซึ่งแสดงด้วยเครื่องหมายบวก และลบ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ยกตัวอย่างการคำนวณค่าคอนแทรสต์ได้ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณค่าคอนแทรสต์ของปัจจัยหลัก

$$A = \frac{1}{4n}[a - (1) + ab - b + ac - c + abc - bc] \quad (2.25)$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าคอนแทรสต์ของอันตรกิริยา

$$BC = \frac{1}{4n}[(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc] \quad (2.26)$$

และ

$$ABC = \frac{1}{4n}[abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] \quad (2.27)$$

หรือสามารถคำนวณได้จากสมการทั่วๆไปดังนี้

$$AB \dots K = \frac{2}{n2^k}(Contrast_{AB \dots K}) \quad (2.28)$$

และสมการสำหรับผลรวมกำลังสองของปัจจัยแต่ละตัวเป็น

$$SS_{AB \dots K} = \frac{1}{n2^k}(Contrast_{AB \dots K})^2 \quad (2.29)$$

เมื่อ n คือจำนวนในการทดลองซ้ำ (-)

เมื่อคำนวณหาค่าทั้งหมดจากสมการข้างต้นได้แล้ว ในส่วนถัดไปจะเป็นการนำค่าคำนวณที่ได้มาทำการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

2.6.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

เป็นการหาค่า $p - value$ โดยการคำนวณผ่านการวิเคราะห์ความแปรปรวนทั้งหมด เริ่มจากการคำนวณหาค่าผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Total Corrected Sum of Squares)

ค่าผลรวมกำลังสองทั้งหมดคำนวณได้จาก

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}(y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2.30)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$SS_T = SS_{Treatment} + SS_E \quad (2.31)$$

เมื่อ

$$SS_{Treatment} = n\sum_{i=1}^{a}(y_{i.} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2.32)$$

เมื่อ $SS_{Treatment}$ คือ ผลรวมกำลังสองเนื่องจากระดับ

SS_E คือ ผลรวมกำลังสองเนื่องจากความคลาดเคลื่อน

a คือ จำนวนปัจจัย

และ n คือ จำนวนการทำซ้ำ

ถัดมาจะทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Maen square: MS) ที่ได้จากการนำค่าผลรวมกำลังสองของแต่ละตัวหารด้วยระดับขั้นความเสรี โดยที่ระดับขั้นความเสรีของ $SS_{Treatment}$ มีค่าเท่ากับ a -1 และ SS_E มีค่าเท่ากับ $N - a$ เมื่อ $N = an$ ซึ่งจะได้ดังสมการที่ (2.33) และ (2.34) ตามลำดับ

$$MS_{Treatment} = \frac{SS_{Treatment}}{a-1} \tag{2.33}$$

และ

$$MS_E = \frac{SS_E}{N-a} \tag{2.34}$$

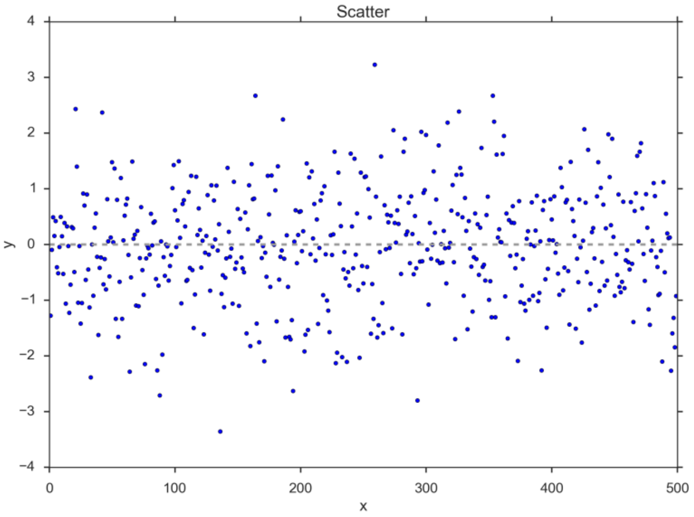
เมื่อได้ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณในข้างต้นแล้ว จึงนำมาแทนในสมการที่ (2.35) เพื่อคำนวณหาค่า $p - value$ หรือ F_0 เพื่อทดสอบสมมติฐานความเหมือนกันของความแปรปรวนในค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_0 = \frac{MS_{Treatment}}{MS_E} \tag{2.35}$$

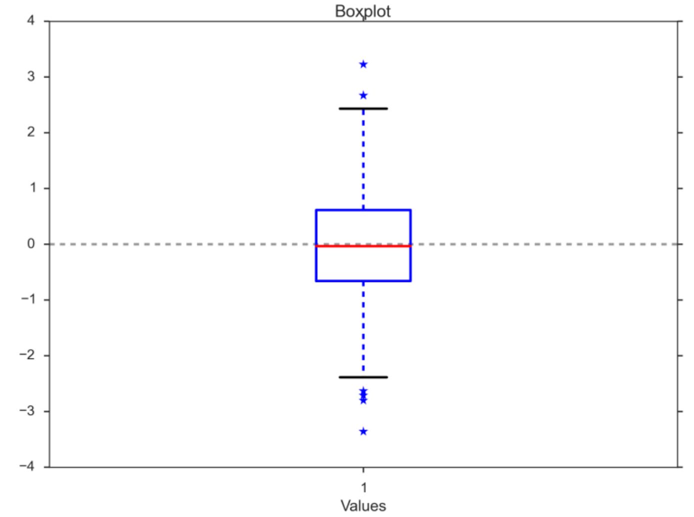
ค่า F_0 ที่ได้จากการคำนวณในสมการข้างต้น หากผลของค่า $F_0 > F_{\alpha,a-1,N-a}$ สามารถบอกได้ว่าสมมติฐานหลักถูกปฏิเสธ เนื่องจากความแตกต่างของข้อมูลนั้นมีค่าสูงเกินไป ในทางกลับกันหากผลของค่า $F_0 < F_{\alpha,a-1,N-a}$ แล้วแสดงว่าความแตกต่างของข้อมูลนั้นมีค่าน้อยเกินไป หรืออาจจะไม่แตกต่างกันเลย ทั้งนี้ยังสามารถวิเคราะห์ผลได้จากค่า $p - value$ นั่นคือ หากค่า $p - value < 0.05$ เมื่อมีระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 หมายถึง สมมติฐานหลักนั้นถูกปฏิเสธ หรือกล่าวได้อีกอย่าง คือ ปัจจัยนั้นมีส่งผลอย่างมีนัยสำคัญกับตัวแปรตอบสนองที่เราสนใจ

2.6.6 การวิเคราะห์แบบจำลองถดถอย

เพื่อทำการตรวจสอบสมมุติฐาน หลังจากทำการทดลอง และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติแล้ว ขั้นตอนสุดท้าย คือการสรุปผลการทดลอง ซึ่งจะแสดงให้เห็นอยู่ในรูปแบบของกราฟต่างๆ เช่น แผนผังการกระจาย (Scatter diagram) หรือ แผนภาพกล่อง (Box plot) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7 นอกจากการแสดงผลสรุปให้อยู่ในรูปของกราฟดังที่กล่าวมาแล้ว อีกวิธีของการนำเสนอผลสรุปรูปแบบอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น การสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regression model)



รูปที่ 2.6 แผนผังการกระจาย [17]



รูปที่ 2.7 แผนภาพกล่อง [17]

ในการทดลองส่วนใหญ่จะทำการแบ่งปัจจัยออกเป็น 2 ประเภท นั่นคือ ปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitive) ซึ่งส่วนใหญ่ปัจจัยประเภทนี้จะสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของระดับค่าเชิงตัวเลขได้ ยกตัวอย่างเช่น ความดัน อุณหภูมิ ความเร็ว หรือเวลา และอีกหนึ่งประเภทคือ ปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative) ปัจจัยประเภทนี้จะไม่สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของระดับค่าเชิงตัวเลขได้ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แม่นยำ เราอาจจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสองประเภทนี้ให้อยู่ในรูปแบบของสมการเอมพิริคัล (Empirical model) วิธีการสร้างสมการเอมพิริคัลในรูปแบบนี้เรียกว่า การสร้างแบบจำลองการถดถอย การสร้างแบบจำลองการถดถอยเป็นการวิเคราะห์

ความสัมพันธ์ของตัวแปรสองตัว หรือบางรูปแบบอาจมีตัวแปรที่เป็นค่าประมาณการมากกว่า 2 ค่า ซึ่งแบบจำลองการถดถอยสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ นั่นคือ การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression model) การถดถอยเชิงเส้นพหุ (Multiple linear regression model) และการถดถอยที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Polynomial regression model) ในงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์การถดถอยที่ประกอบไปด้วยตัวแปรที่เป็นค่าประมาณการ (Predictor: *X*) เป็นตัวแปรที่ไม่มีค่าคลาดเคลื่อน และตัวแปรตอบสนอง (Response: *Y*) เป็นตัวแปรที่มีความคลาดเคลื่อน หากตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันแล้ว แนวโน้มของกราฟที่จะได้จะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่หากตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กัน แนวโน้มของกราฟที่จะได้จะไม่ไปในทิศทางเดียวกัน และจะได้รูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายแสดงดังสมการที่ (2.36)

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \tag{2.36}$$

เมื่อ	y	คือ	ตัวแปรตาม
	X_1, X_2	คือ	ตัวแปรอิสระ
	β_0	คือ	ตัวกำหนดจุดตัดของระนาบ
	β_1, β_2	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยแบบบางส่วน (Partial regression coefficient) จะมีค่าเป็น 0.5 เท่าของค่าคอนแทรสต์
และ	ε	คือ	พจน์ของความผิดพลาดในแบบจำลอง

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง สามารถทำได้ด้วยการพลอตส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) หากแบบจำลองที่ได้มีความสัมพันธ์กันจะต้องได้กราฟแสดงระหว่างค่าตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนาย มีการกระจายตัวของข้อมูลแบบไม่มีรูปแบบเฉพาะ (Random) นอกจากวิธีดังกล่าวในการตรวจสอบความถูกต้องแล้ว เรายังสามารถใช้วิธีการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการหาค่าสัมประสิทธ์การตัดสินใจ (R-squared: R^2) จากแผนภาพกระจายปกติ (Normal probability ploy) ของส่วนตกค้างที่ได้จากแบบจำลองการทำนาย ซึ่งค่าสัมประสิทธ์การตัดสินใจเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกว่า ข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีความถูกต้องเหมาะสมเพียงใด ซึ่งค่าสัมประสิทธ์การตัดสินใจจะต้องอยู่ในช่วงระหว่าง 0-1 โดยหากค่าสัมประสิทธ์การตัดสินใจยิ่งเข้าใกล้ 1 ก็จะหมายความว่าแบบจำลองนั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.7 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD)

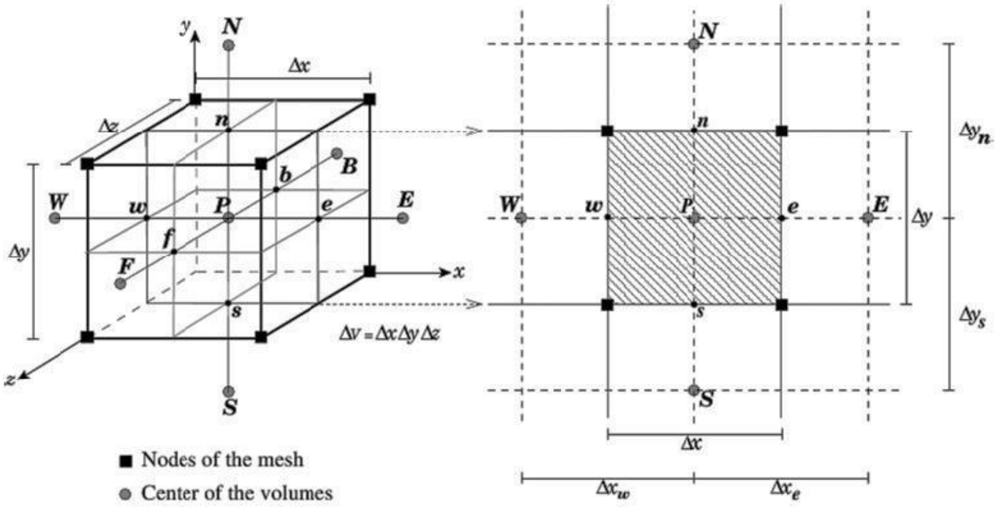
ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เป็นการรวบรวมความรู้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) มาสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตที่มีความซับซ้อนเพื่อวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ที่ต้องการความแม่นยำของผลการทดลอง โดยผลการทดลองจะผ่านจากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations) จนได้ผลลัพธ์ในรูปแบบที่หลากหลาย ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้หากมีพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ต้องการจนได้ผลตามที่ผู้ทดลองพอใจ ก่อนจะนำไปสร้างระบบการทดลองจริงซึ่งขั้นตอนของการทำงานของโปรแกรมนี้จะประกอบไปด้วย

1. กระบวนการขั้นต้น กระบวนการนี้จะเริ่มต้นจากการสร้างโดเมนของการไหลที่ต้องการทำการวิเคราะห์ จากนั้นจะทำการแบ่งโดเมนออกเป็นส่วนเล็กๆ ที่ได้ออกเป็นส่วนการคำนวณ (Mesh) ย่อยๆ ที่ตัดกันที่จุดต่อ (Grid) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะต้องนำไปคำนวณหาค่าของการไหล ในการแบ่งโดเมนนั้นๆ หากยิ่งมีความถี่ของตารางเซลล์มากผลลัพธ์ที่จะได้ก็จะมีความแม่นยำมากเช่นกัน

2. กระบวนการขั้นตอนการวิเคราะห์ วิธีการวิเคราะห์ที่เป็นที่นิยมเพื่อวิเคราะห์สภาวะกระบวนการ ในโปรแกรมนี้คือ ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุม (Finite volume method) ที่จะใช้หลักการของพลศาสตร์ของไหลเพื่อแบ่งปัญหาที่อยู่ในปริมาตรควบคุม ให้เป็นปริมาตรย่อย ซึ่งจะประกอบไปด้วยปัญหาการแพร่กระจาย (Diffusion) และปัญหาการแพร่ที่มีการพารวมอยู่ด้วย (Convection-diffusion)

3. กระบวนการขั้นท้าย เป็นส่วนของการหาผลเฉลยของการทดลอง โดยผลลัพธ์ที่ถูกแสดงออกมาจะมีหลากหลายรูปแบบ เช่น การสร้างแผนภาพคอนทัวร์ในทุกๆ จุดตลอดทั้งโดเมนของการไหล นอกจากนั้น ในส่วนนี้ยังสามารถทำให้ผู้ทดลองเข้าใจผลของการทดลองได้มากยิ่งขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.8 การแบ่งปริมาตรควบคุมออกเป็นเซลล์เล็กๆ : สี่เหลี่ยมทางด้านซ้ายแสดง node ที่ใช้กันทั่วๆ ไปในระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุม และรูปทางด้านขวาแสดงตัวกำกับปริมาณด้วยตัวอักษรใหญ่ในขณะที่พื้นที่หน้าตัดถูกกำกับด้วยตัวอักษรเล็ก [18]

2.7.1 การแบ่งโดเมนของการไหล

หลังจากการสร้างโดเมนของการไหลแล้ว เราจะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข นั่นคือระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุมทำการแบ่งโดเมนของการไหลออกเป็นส่วนการคำนวณเล็กๆ กำหนดตัวแปรไม่ทราบค่า (Unknown) ตรงกลางเซลล์ก่อนจะทำการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์บนปริมาตรควบคุม (Control volume) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จากนั้นจะทำการเปลี่ยนสมการอนุพันธ์เชิงย่อยให้เป็นสมการเชิงเส้น (System of algebra) ในการแก้ปัญหาในสมการการไหลของของไหลที่ประกอบไปด้วยเทอมของการแพร่กระจาย และเทอมของการพาของของไหลรวมอยู่ด้วยกันนี้สามารถใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุมที่แสดงในรูปแบบสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equation) ในรูปทั่วไปของตัวแปร ϕ ได้เป็น

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)+s_{\phi} \tag{2.37}$$

ดังที่กล่าวมาแล้ว สมการอนุพันธ์พื้นฐานจะประกอบไปด้วยเทอมของการแพร่กระจาย และเทอมของการพาซึ่งในสมการที่ (2.37) พจน์ที่แสดงเทอมของการพา คือ พจน์ที่ 2 และ 1 ทางด้านซ้ายมือ และพจน์ที่แสดงเทอมของการแพร่กระจายคือ พจน์ที่ 1 และ 2 ทางด้านขวามือ โดยที่พจน์แรกทางด้านซ้ายมือ คือ พจน์ที่บอกถึงความเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของการไหลตามเวลาที่

เปลี่ยนแปลงไป และพจน์สุดท้ายทางด้านขวามือ คือพจน์เพิ่มเติมอื่นๆ (Source term) เพื่อให้การคำนวณในส่วนนี้ง่ายขึ้น เราจะทำการเปลี่ยนสมการอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิต (Algebraic equation) ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า Discretization แล้วจึงทำการอินทิเกรตตลอดปริมาณควบคุม ดังนั้นจะได้สมการใหม่เป็น

$$\int_{CV}\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)dV+\int_{CV}\frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi)dV+\int_{CV}\frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi)dV$$

$$=\int_{CV}\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)dV+\int_{CV}\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)dV+\int_{CV}S_\phi\,dV \tag{2.38}$$

หากทำการพิจารณาแต่ละเทอมจะพบว่าสมการที่ (2.38) สามารถแยกได้เป็นสมการดังต่อไปนี้

ในแนวแกน *y*

$$\int_{CV}\frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi)dV=(\rho uA)_n\phi_n-(\rho uA)_s\phi_s=F_n\phi_n-F_s\phi_s \tag{2.39}$$

เทอมของการแพร่กระจายในแนวแกน *x*

$$\int_{CV}\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)dV=\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}A\right)_e-\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}A\right)_w$$

$$=D_e(\phi_E-\phi_P)-D_w(\phi_P-\phi_W) \tag{2.40}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในแนวแกน *y*

$$\int_{CV}\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)dV=\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial y}A\right)_n-\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial y}A\right)_s$$

$$=D_n(\phi_n-\phi_P)-D_s(\phi_P-\phi_S) \tag{2.41}$$

และเทอมสำหรับพจน์อื่นๆ

$$\int_{CV}S_\phi\,dV=S_\phi V \tag{2.42}$$

เมื่อ A_e, A_w, A_n, A_s คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตำแหน่งรอบๆปริมาตรควบคุม โดยที่ e (ตำแหน่งด้านขวา) , w (ตำแหน่งด้านซ้าย) , n (ตำแหน่งด้านบน) และ s (ตำแหน่งด้านล่าง) ของเซลล์

$F = \rho u A$ คือ สัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน

(ρ คือ ความหนาแน่น , u คือ ความเร็ว)

และ $D = \Gamma \frac{A}{\delta}$ คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย

(Γ คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่ , δ คือ ความยาว)

2.7.2 การแพร่กระจายความร้อน

การแก้ปัญหาการแพร่กระจายความร้อนในระบบหนึ่งมิติ สามารถใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุมในการแก้ปัญหาได้ โดยเริ่มต้นจากสมการควบคุมพื้นฐานสมการที่ (2.38) ในกรณีที่เราสนใจเฉพาะในเทอมของการแพร่กระจายความร้อน และต้องการแทน ϕ ด้วยอุณหภูมิ จะได้สมการใหม่เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{dT}{dx}\right) + S = 0$$

เมื่อทำการอินทิเกรตรอบปริมาตรควบคุมจะได้สมการเป็น

$$\int_w^e \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{dT}{dx}\right) + s\right] dx = 0$$

$$\left(\Gamma \frac{dT}{dx}\right)_e - \left(\Gamma \frac{dT}{dx}\right)_w + \int_w^e s\, dx = 0 \qquad (2.43)$$

จะเห็นได้ว่าสมการที่ (2.43) เป็นไปตามกฎอนุรักษ์พลังงาน นั่นคือ มีการรวมกันของฟลักซ์ความร้อนจากทางขาเข้า ทางขาออก และพจน์เพิ่มเติมอื่นๆ โดยที่สองเทอมแรกสามารถประมาณค่าได้จาก

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_e = \frac{T_E - T_P}{\Delta x} \quad \text{และ} \quad \left(\frac{dT}{dx}\right)_w = \frac{T_P - T_W}{\Delta x} \qquad (2.44)$$

และพจน์เพิ่มเติมอื่นๆ จะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปพีชคณิตได้เป็น

$$\int_w^e s\,dx = \int_w^e (S_C + S_P T)dx$$

$$= S_C \Delta x + S_P \int_w^e T\,dx$$

$$= (S_C + S_P T_P)\,\Delta x \tag{2.45}$$

เมื่อนำสมการที่ (2.44) และสมการที่ (2.45) แทนลงในสมการอินทิเกรตปริมาตรควบคุม จะได้สมการพีชคณิตสำหรับการแก้ปัญหาการแพร่กระจายความร้อนเป็น

$$\Gamma\frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} - \Gamma\frac{T_P - T_W}{(\delta x)_w} + (S_C + S_P T_P)\,\Delta x = 0 \tag{2.46}$$

2.7.3 การพาและการแพร่กระจายความร้อน

นอกจากการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุมในการแก้ปัญหาในเรื่องการแพร่กระจายความร้อนได้แล้ว เรายังสามารถนำมาช่วยในการแก้ปัญหาการพาและการแพร่กระจายความร้อนได้อีกด้วย การพาและการแพร่กระจายความร้อน ในระบบหนึ่งมิติ การเกิดทั้งสองเหตุการณ์พร้อมกัน สมการควบคุมพื้นฐานที่ (2.38) สามารถเขียนให้สอดคล้องกับกรณีนี้ได้เป็น

$$\frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + s_\phi \tag{2.47}$$

เมื่อทำการอินทิเกรตรอบปริมาตรควบคุม และสมมุติว่าระบบไม่สามารถผลิตความร้อนได้เอง เทอมที่ทำหน้าที่กำเนิดความร้อนก็จะถูกตัดทิ้งไป จึงจะได้สมการพีชคณิตสำหรับการแก้ปัญหาการพาและการแพร่กระจายความร้อนได้เป็น

$$\int_{CV}\frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi)dV = \int_{CV}\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)dV \tag{2.48}$$

เมื่อแทน $\int_{CV}\frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi)dV = (\rho uA)_e\phi_e - (\rho uA)_w\phi_w = F_e\phi_e - F_w\phi_w$

และ $\int_{CV}\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)dV = \left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}A\right)_e - \left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}A\right)_w = D_e(\phi_E - \phi_P) - D_w(\phi_P - \phi_W)$

$$\therefore (\rho uA)_e\phi_e - (\rho uA)_w\phi_w = \left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}A\right)_e - \left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}A\right)_w \quad (2.49)$$

การหาค่าของตัวแปร ϕ บนผิวปริมาตรควบคุมทั้งหมด ได้จากการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical scheme) ในงานวิจัยชิ้นนี้จะนำระเบียบวิธีการแบ่งช่วงแบบ Upwind differencing scheme ซึ่งการแบ่งช่วงแบบ Upwind differencing scheme นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบดังต่อไปนี้

1. ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง (First order upwind differencing scheme)

จากการประมาณค่าด้วยวิธีแบบ First order upwind differencing scheme สมมติให้ค่า ϕ ที่ interface มีค่าเท่ากับที่ Grid point ของผิวปริมาตรควบคุมด้านต้นกระแสของการไหล (Upstream) คือ

$\phi_e = \phi_P$ เมื่อ $F_e > 0$

$\phi_e = \phi_E$ เมื่อ $F_e < 0$

$\phi_w = \phi_W$ เมื่อ $F_w > 0$

$\phi_w = \phi_P$ เมื่อ $F_w < 0$

โดยที่ค่าของตัวแปร ϕ_n และ ϕ_s สามารถหาได้ในแบบเดียวกัน ซึ่งข้อดีของสมการนี้จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ จะไม่สามารถมีค่าติดลบได้ ทำให้ผลเฉลยสามารถลู่เข้าสู่คำตอบค่าใดค่าหนึ่งได้ ดังนั้น สมการพีชคณิตสามารถเขียนได้เป็น

$$a_P\phi_P = a_W\phi_W + a_E\phi_E + a_N\phi_N + a_S\phi_S + S_\phi V \quad (2.50)$$

เมื่อ $a_W = max[F_w , 0]$

$a_E = max[-F_e , 0]$

$a_N = max[-F_n , 0]$

$a_S = max[F_s , 0]$

โดยที่ $max[A , B]$ คือ ค่าสูงสุดของการเปรียบเทียบระหว่างค่า A และ B

2. ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง (Second order upwind differencing scheme)

วิธีนี้จะใช้หลักการคล้ายกับการประมาณค่าในระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง ส่วนที่ต่างกัน คือ การคำนวณหาค่า ϕ นี้เป็นแบบเชิงเส้นของค่าที่ตำแหน่งต้นกระแสการไหล เนื่องจากมีการเลือกจุดข้อมูลที่มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ความแม่นยำที่สูงกว่า และการลู่เข้าหาผลเฉลยจะทำได้ดีกว่า ดังสมการเป็น

$$\phi_e = \frac{3}{2}\phi_P - \frac{1}{2}\phi_W \qquad \text{เมื่อ} \qquad F_e > 0$$

$$\phi_e = \frac{3}{2}\phi_E - \frac{1}{2}\phi_{EE} \qquad \text{เมื่อ} \qquad F_e < 0$$

$$\phi_w = \frac{3}{2}\phi_W - \frac{1}{2}\phi_{WW} \qquad \text{เมื่อ} \qquad F_w > 0$$

$$\phi_w = \frac{3}{2}\phi_P - \frac{1}{2}\phi_E \qquad \text{เมื่อ} \qquad F_w < 0$$

2.7.4 การแก้ปัญหาด้วยวิธี SIMPLE

กระบวนการการหาคำตอบแบบ SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure-Liked Equations) ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาการไหล เนื่องจากในการแก้สมการความต่อเนื่อง ค่าความดันและความเร็วที่ได้ในผลเฉลยของสมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการอนุรักษ์มวลมักจะไม่มีความสอดคล้องกัน โดยการแก้ปัญหาแบบ SIMPLE เริ่มจากการกำหนดค่าความดันแรกค่าหนึ่ง เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเร็ว จากสมการอนุรักษ์โมเมนตัม แล้วจึงนำความเร็วค่านี้ย้อนกลับไปคำนวณหาค่าความดันอีกครั้งจากสมการอนุรักษ์มวล เพื่อนำไปสู่การคำนวณค่าความเร็วที่ถูกต้องเราจะใช้ Pressure-correction method ช่วยคำนวณค่าความดันให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ซึ่งค่า Pressure-correction method จะถูกนำกลับมาคำนวณหาค่าความเร็วและทำซ้ำจนกระทั่งได้ผลเฉลยลู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง การแก้ปัญหาด้วยวิธีการนี้จะทำให้ได้ค่าความดัน และค่าความเร็วที่มีความสัมพันธ์กันไปตามสมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม อย่างไรก็ตามการคำนวณจากข้างต้นจะมีความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งทำให้คำตอบที่ได้มีการลู่เข้าของคำตอบที่เร็วเกินไป และส่งผลให้ไม่เกิดการลู่เข้า เพื่อป้องกันไม่ให้คำตอบเปลี่ยนแปลงค่าที่ได้จากการคำนวณเร็วเกินไป จึงมีการใส่ค่า Under-relaxation factor เข้าไปเพื่อแก้ไขปัญหานี้ สามารถเขียนสมการหาค่าตัวแปรได้เป็น

CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\phi = \phi_{old} + \alpha\Delta\phi \tag{2.51}$$

เมื่อ ϕ_{old} คือ ตัวแปรจากการคำนวณในครั้งก่อน

α คือ Under-relaxation factor ($0 \leq \alpha \leq 1$)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพฤติกรรมของกระบวนการ รวมไปถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพัฒนาตัวผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาในด้านต่างๆ มีดังนี้

สุทัศน์ และคณะ [19] ศึกษาผลิตภัณฑ์อิฐมอญในจังหวัดสิงห์บุรีโดยการสุ่มตัวอย่างจากแหล่งผลิตจากผู้ผลิตจำนวนสามแหล่งมาวิเคราะห์ โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต คือดินจากท้องนาและเถ้าแกลบ พบว่า สารประกอบที่มีอยู่ในดินจากท้องนามีความใกล้เคียงกันนั่นคือ ซิลิกาเป็นส่วนประกอบที่มากที่สุดร้อยละ 60 มีสมบัติทำให้ผลิตภัณฑ์สุกตัวได้เร็วและมีความแข็งแรงรองลงมา คือ อะลูมินา ทำให้อิฐมีสมบัติทนไฟ และเหล็กที่ทำให้อิฐดินเผามีสีแดงเมื่อเผาเสร็จ จากการสำรวจขั้นตอนการผลิตที่ผู้ผลิตทำเป็นปกติสรุปได้ว่าปัจจัยหลักที่ทำให้คุณภาพของอิฐดินเผาไม่ดีเท่าที่ควร คือ สัดส่วนการผสมวัตถุดิบที่ใช้ผลิตอิฐดินเผาไม่สม่ำเสมอ ทำให้คุณสมบัติของอิฐดินเผาที่ได้มีค่าไม่สม่ำเสมอซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของอิฐดินเผาโดยตรง

คณะผู้วิจัยจึงทำการศึกษาถึงความเหมาะสมของสัดส่วนในการผสมวัตถุดิบและศึกษาอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสมสำหรับเผาอิฐ ผลการวิจัย พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของการผสมวัตถุดิบเป็นสัดส่วนของเถ้าแกลบ 3 ส่วนและดินจากท้องนา 5 ส่วน จึงจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด เนื่องจากหากใช้เถ้าแกลบต่ำ หรือสูงกว่านี้จะส่งผลต่อการสุกตัว การขึ้นรูป ความพรุนและความแข็งแรงของอิฐที่คุณภาพต่ำ และต้องทำการเผาที่อุณหภูมิ 800-850 องศาเซลเซียส เนื่องจากหากทำการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า หรือสูงกว่านี้จะส่งผลต่อการเกาะตัวกันของอนุภาคดิน การระเหยตัวออกไปของเถ้าแกลบที่ส่งผลต่อความพรุนของอิฐดินเผาด้วย ซึ่งจากผลการวิจัยดังกล่าวพบว่าชิ้นงานวิจัยนี้ผ่านมาตรฐานสากล 77-2545 ซึ่งผลงานวิจัยส่งผลให้อิฐดินเผามีมูลค่าที่สูงขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีขึ้นของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา

สุทัศน์ [20] ศึกษาผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา พบว่า ดินเหนียวจากท้องนาที่ทำมาใช้ผลิตมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญเหมือนกันคือ ซิลิกา รองลงมาคืออะลูมินา และเหล็กออกไซด์ ส่วนเถ้าแกลบองค์ประกอบหลักคือซิลิกา ซึ่งเมื่อทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดและร้อยละของการดูดซึมน้ำยังไม่เป็นไปตามมาตรฐาน เพื่อทดสอบผลในการผสมแกลบหรือเถ้าแกลบในชิ้นงานที่จะทำให้ผลติภัณฑ์มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ผู้วิจัยจึงทำการปรับปรุงส่วนผสมวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตโดยผสมแกลบและเถ้าแกลบลงไปร้อยละ 0-10 โดยน้ำหนัก และใช้วิธีการขึ้นรูป และการเผาแบบเดียวกับกลุ่มผู้ผลิต หลังจากนั้น นำมาทดสอบคุณสมบัติตามที่มาตรฐานอุตสาหกรรมอิฐก่อสร้างสามัญ ผลการวิจัย พบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตชิ้นงานคือเมื่อชิ้นงานมีการผสมเถ้าแกลบร้อยละ 2 โดยน้ำหนักจะทำให้อิฐดินเผามีความสามารถในการรับแรงอัด 6.20 เมกะพาสคัล มีความหนาแน่น 1.68 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และร้อยละของการดูดซึมน้ำเท่ากับ 15.20 เนื่องจากแกลบปริมาณมากมีผลทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการรับแรงอัดลดลงเพราะการสลายตัวของเถ้าแกลบระหว่างการเผา ทำให้ชิ้นงานมีความพรุนตัวมากขึ้นจึงมีผลต่อความหนาแน่นและความสามารถในการรับแรงอัด โดยที่ค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 601-2547 ความสามารถในการรับแรงอัดต้องไม่ต่ำกว่า 7 เมกะพาสคัล และร้อยละการดูดซึมน้ำต้องไม่เกิน 25 และค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 77-2545 ความสามารถในการรับแรงอัดต้องไม่ต่ำกว่า 10 เมกะพาสคัล และร้อยละการดูดซึมน้ำต้องไม่เกิน 22

Sun และคณะ [21] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของอิฐกลวงคอนกรีตที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดยาว 0.24 เมตร กว้าง 0.115 เมตร และสูง 0.09 เมตร และมีขนาดแต่ละช่องว่างภายในเป็นยาว 0.09 เมตร กว้าง 0.029 เมตร และสูง 0.09 เมตร เนื่องจากคอนกรีตอิฐกลวงถูกใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้นแทนอิฐดินเหนียวด้วยข้อดีหลายประการ เช่น ใช้ดินเป็นส่วนประกอบน้อย ประหยัดพลังงาน มีความแข็งแรงสูงและผลิตได้ง่าย แต่ยังคงมีปัญหาในเรื่องการเก็บรักษาความร้อน จึงต้องนำมาพัฒนาเพื่อลดปัญหาส่วนนี้โดยการใช้ขั้นตอนเชิงพันธุกรรมแบบผสม (Hybrid Genetic Algorithm; HGA) ให้ทำงานร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks; ANN) ในการสร้างแบบจำลองที่ซับซ้อน เพื่อคาดการณ์ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของค่าการนำความร้อนสมมูล (Equivalent Thermal Conductivity; ETC) ให้สัมพันธ์กับการออกแบบพารามิเตอร์ โดยค่าการนำความร้อนสมมูลได้จากระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume

Method; FVM) จากการจำลองสนามความร้อนของอิฐกลวงคอนกรีต เพื่อให้ได้ค่าการนำความร้อนสมมูลที่น้อยที่สุด ยังมีการออกแบบแถวช่องว่างภายในอิฐกลวงคอนกรีตโดยกำหนดว่าอิฐกลวงคอนกรีตที่ออกแบบมานั้นต้องมีขนาดเส้น รอบวงภายนอกเท่าเดิม ซึ่งแถวช่องว่างภายในอิฐกลวงคอนกรีตเหล่านี้มีผลต่อการถ่ายโอนความร้อน ผลจากการคำนวณแสดงให้เห็นว่าสามารถทำให้เก็บรักษาความร้อนได้ดีขึ้นโดยพบการลดลงของค่าการนำความร้อนสมมูลถึงร้อยละ 21.69 นอกจากนั้นการออกแบบแถวช่องว่างภายในอิฐกลวงคอนกรีต โดยการเพิ่มแถวส่งผลให้ค่าการนำความร้อนสมมูลลดลงด้วย เนื่องจากการมีแถวมากทำให้สามารถเก็บความร้อนได้มาก

Chanwal และคณะ [22] ศึกษาการพัฒนาการอบขนมปังโดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและรายละเอียดดัชนีการเกิดสีน้ำตาลของขนมปัง เนื่องจากเป็นส่วนที่บ่งบอกถึงรสชาติที่พึงปรารถนาของผู้บริโภค และคุณภาพของขนมปัง ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะขึ้นกับอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกขนมปัง และระยะเวลาในการอบ การสร้างแบบจำลองของกระบวนการอบขนมปังมีความซับซ้อนมากเพราะเป็นกระบวนการที่มีหลายพารามิเตอร์ในการศึกษาเช่น การระเหยของน้ำ การเกิด เจลาติไนเซชันของแป้ง ปริมาณการขยายตัว ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลและอื่นๆ ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำส่วนหนึ่งของเตาอบทางอุตสาหกรรมที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีรัศมี 56 ซม. และความสูง 42 ซม. ห้องเตาอบถูกสร้างขึ้นจากสแตนเลสและแหล่งให้ความร้อนภายในเตาอบควบคุมด้วย เทอร์โมมิเตอร์ทำให้อุณหภูมิเป็นไปตามที่กำหนด (เช่น 220 ± 2 องศาเซลเซียส) ส่วนอุณหภูมิภายในเตาอบและขนมปังวัดโดยใช้เทอร์มอคัปเปิลที่มีการเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูลในขนมปังตำแหน่งเทอร์มอคัปเปิลจุดที่หนึ่งอยู่ที่ตรงกลางของขนมปัง 4.25 ซม. จากพื้นผิวด้านบนของขนมปัง จุดที่สองที่ 6.5 ซม.จากตรงกลางไปทางด้านขวาและจุดที่สามคือ 4 ซม. จากตรงกลางไปที่ด้านบนของขนมปัง จากนั้นทำการจำลองเตาอบโดยใช้โปรแกรม GAMBIT และใช้โปรแกรม Fluent 6.3 ประมวลผลภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขตามที่กำหนด ผลจากแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับกระบวนการอบขนมปังที่พัฒนาขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการวัดผลอุณหภูมิจริงของขนมปังจากการทดลอง พบว่า การใช้แบบจำลองร่วมกับการรวมตัวกันของกระบวนการระเหย-ควบแน่น และความร้อนแฝงในระหว่างการเปลี่ยนเฟส จะสามารถทำนายผลได้แม่นยำยิ่งขึ้นเนื่องจากสามารถคาดการณ์อุณหภูมิของกระบวนการอบขนมปังหลังอุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส การประมวลผล พบว่า การอบที่เหมาะสม

ใช้เวลา 25 นาที บริเวณผิวด้านนอกขนมปังจะยังมีการเพิ่มอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องไปจนถึง 220 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิเศษขนมปังยังคงที่ที่ 98-99 องศาเซลเซียส การคำนวณแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกขนมปังทำให้ดัชนีการเกิดสีเพิ่มขึ้นไปสูงสุดที่ประมาณ 52 ซึ่งผลดังกล่าวมาบอกได้ว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลจากการทดลอง

Khatir และคณะ [23] ศึกษาการอบขนมปังด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยวิเคราะห์อุณหภาพการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน ใน 3 บริเวณภายในเตาอบขนาดเล็กเพื่อนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการอบขนมปังของเตาอบ ซึ่งปัญหาหลักที่คณะผู้วิจัยทำการศึกษาคือ การพัฒนาและการตรวจสอบการทดลองแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในส่วนอุณหภาพการไหลของอากาศในอุตสาหกรรม การพาความร้อนความเร็วสูงในเตาอบ โดยเตาอบที่ใช้มีขนาดยาว 9 เมตร กว้าง 1 เมตร และสูง 5 เมตร การตรวจสอบแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ แต่ละบริเวณแบ่งเป็น 2 ส่วน เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาแบบจำลองที่นำมาวิเคราะห์จึงจำลองเตาอบที่ว่างเปล่า แล้วทำการสร้างพื้นที่การคำนวณเรขาคณิตโดยการใช้โปรแกรม GAMBIT และทำการประมวลผลด้วย ANSYS FLUENT ผลการจำลองเปรียบเทียบกับการสัดการแจกแจงของอุณหภูมิและความเร็วอากาศในเตาอบ ด้วยการใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณรวมกับสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Reynolds Averaged Navier–Stokes; RANS) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถให้ข้อมูลในเชิงลึกมากกว่าที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากสามารถแสดงผลของการไหลของอากาศภายในเตาอบเมื่อใช้ความเร็วหัวฉีดที่ค่าต่างๆ กันและยังสามารถแสดงรูปแบบของการแจกแจงของอุณหภูมิที่ยากต่อการวัดในการทดลองจริง ซึ่งเป็นตัวที่สามารถบอกได้ว่าผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ได้นั้นจะมีคุณภาพตามที่ต้องการได้

Prasertsan และคณะ [24] ศึกษาการพัฒนาเตาเผาอิฐประสิทธิภาพสูง ด้วยการสร้างแบบจำลองเตาเผาชนิดระบายความร้อนลงผ่านคอมพิวเตอร์ โดยเตาเผาไหม้ชนิดนี้มีลักษณะประกอบไปด้วย 4 ห้องสำหรับรองรับขั้นตอนกระบวนการต่างๆ นั่นคือ กระบวนการการไล่ความชื้น การอุ่น การเผา และห้องสุดท้ายสำหรับกระบวนการปล่อยให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลง ห้องทั้ง 4 ถูกออกแบบให้แยกออกจากกันและมีการทำงานที่ต่อเนื่องตลอดเวลา โดยใช้หลักการหมุนเวียนความร้อน ผลจากการทดลองพบว่าค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในกระบวนการต่ำกว่า 2,300 กิโลจูลต่อ

กิโลกรัมอิฐ และตัวเตาเผามีประสิทธิภาพในการทำงานสูงถึงร้อยละ 62.6 แต่ยังต้องมีการพัฒนาปรับปรุงในส่วนอื่นๆ ต่อไปอีก

Prasertsan และคณะ [25] ศึกษาสภาพการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมอิฐดินในประเทศไทย พบว่า ปัญหาสำคัญที่ทำให้อุตสาหกรรมอิฐดินในประเทศต้องปิดตัวลงเกิดขึ้นเนื่องจากต้นทุนการผลิตในด้านพลังงานมีค่าสูง และเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการหายากขึ้น หากจำแนกออกเป็นต้นทุนด้านพลังงานที่เกิดจากการใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงนั้นจะมีมูลค่าสูงถึงร้อยละ 30 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด ในขณะที่ต้นทุนด้านพลังงานของเตาเผาที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงอยู่ที่ร้อยละ 6 – 7 ซึ่งหมายถึงว่ามีค่าการใช้พลังงานจำเพาะสำหรับเชื้อเพลิงไม้เป็น 1,580 – 3,790 กิโลจูลต่อกิโลกรัมอิฐ และมีค่าการใช้พลังงานจำเพาะ 670 – 5,420 กิโลจูลต่อกิโลกรัมอิฐ จากการทดลอง พบว่า หากทำการเปลี่ยนแปลงเตาเผาแบบเดิมมาเป็นเตาเผาแบบต่อเนื่อง จะให้ผลของการลดปริมาณการใช้พลังงานได้ถึงร้อยละ 60 นอกจากนั้น ยังต้องพัฒนาวัสดุก่อสร้างน้ำหนักเบา และเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้มาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นควบคู่กันไปด้วย

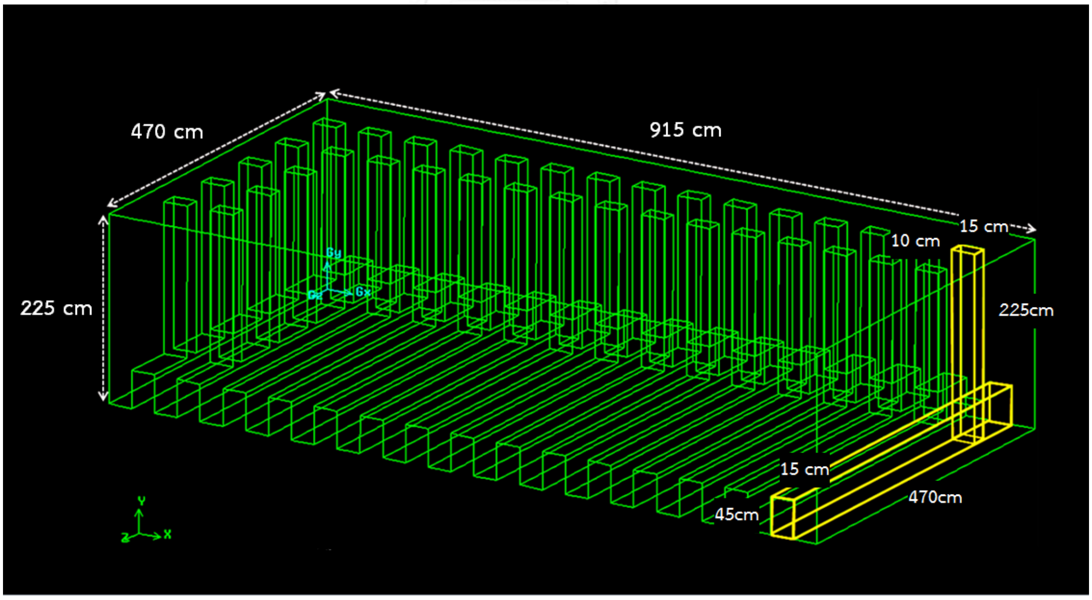
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ข้อมูลเบื้องต้นในงานวิจัย

การจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาเผาอิฐดินของกระบวนการผลิตอิฐดินเผา จากข้อมูลอุตสาหกรรมอิฐดินเผาของอำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เตาเผาอิฐดินที่นำมาจำลองเพื่อศึกษา จะมีขนาดเตาเผาที่ความกว้าง 915 ซม. ความยาว 470 ซม. และ ความสูง 225 ซม. มีช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ตามแนวของความกว้างทางด้านล่างของเตา ขนาดความกว้าง 15 ซม. ความยาว 470 ซม. และ ความสูง 45 ซม. แล้วจึงทำการเชื่อมกับช่องที่มีจุดประสงค์เดียวกันตามแนวความสูงของเตาที่มีขนาดความกว้าง 15 ซม. ความยาว 10 ซม. และ ความสูง 225 ซม. ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รายละเอียดการจำลองเชิงเรขาคณิตในการคำนวณของเตาเผาอิฐดินที่ได้จากการสำรวจข้อมูลในอำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

การจำลองพฤติกรรมของกระบวนการดังกล่าว มีลักษณะเป็นแบบจำลอง 3 มิติ มีการไหลของของไหลแบบวัฏภาคเดียว และสองวัฏภาค ซึ่งการไหลของของไหลแบบสองวัฏภาคนี้

จะตั้งสมมติฐานให้อนุภาคของของแข็ง และแก๊สประพฤติตัวคล้ายของไหล การจำลองจะถูกกำหนดให้อยู่ภายใต้ภาวะ 2 ภาวะ คือ ทำการพิจารณาการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับ เตาเผาอิฐดินภายใต้ภาวะแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา (Cold flow condition) และพิจารณาการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินภายใต้ภาวะแบบมีการเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในระบบ (Hot flow condition) โดยแก๊สจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบจากทางด้านล่างของเตาเผา ส่วนของแข็ง (ถ้ามี) จะถูกบรรจุอยู่ในเตาเผาที่เวลาเริ่มต้น จากที่กล่าวไปข้างต้นการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินภายใต้ภาวะแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 กรณี นั่นคือ 1. จำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินภายใต้ภาวะแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา เพื่อการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากเชื้อเพลิงร้อน และในกรณีที่ 2. จำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินภายใต้ภาวะแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ที่มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบ เพื่อศึกษาการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากอากาศร้อน ซึ่งทั้ง 2 กรณี จะสามารถอธิบายกระบวนการเผาของเตาเผาอิฐดินได้ต่างกัน และในส่วนของการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินภายใต้ภาวะแบบมีการเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในระบบ เป็นการจำลองเพื่อศึกษาผลช่วงอุณหภูมิในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับเตาเผาอิฐดิน

แบบจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินจะถูกแบ่งการจำลองออกเป็น 5 ส่วนหลักๆ คือ 1. จำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินของแบบจำลองต้นแบบภายใต้ภาวะแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ทั้งในกรณีที่ภาวะคงตัว (Steady state) และที่ภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) 2. ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) ต่อพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดิน 3. จำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินของแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ ภายใต้ภาวะแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ทั้งในกรณีที่ภาวะคงตัว (Steady state) และที่ภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) 4. จำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองต้นแบบ กับแบบจำลองที่มีผลของตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 ด้านดีที่สุด ภายใต้ภาวะแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ที่มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบ และ 5. จำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินของ

ช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ของเตาเผาอิฐดินภายใต้ภาวะแบบมีการเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในระบบ

3.2 การจำลองพฤติกรรมกระบวนการในงานวิจัย

3.2.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

ดังที่ได้กล่าวข้างต้น แบบจำลองที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ แบ่งเป็น แบบจำลองการไหลวัฏภาคเดียว (Single phase flow model) และแบบจำลองการไหลหลายวัฏภาค (Multiphase flow model) ที่ประกอบไปด้วยวัฏภาคแก๊ส-ของแข็ง ด้วยแนวคิดตามแบบของออยเลอเลียน (Eulerian Approach) [26] ซึ่งจะพิจารณาแบบจำลองที่มีลักษณะการไหลแบบต่อเนื่องโดยใช้สมการ Navier-Stoke สำหรับระบบที่ประกอบด้วยแก๊สและของแข็ง กระบวนการจะเหมาะในการใช้แนวคิดแบบออยเลอเลียนได้เมื่อวัฏภาคของของแข็งมีสมบัติคล้ายของไหล นั่นหมายถึงอนุภาคของของแข็งมีพฤติกรรมคล้ายกับโมเลกุลของแก๊ส ซึ่งจากสมบัติดังกล่าวนี้จึงได้มีการนำแบบจำลองทฤษฎีจลน์ของการไหลของของแข็ง (Kinetic Theory of Granular Flow: KTGF) มาใช้ร่วมด้วย เพื่อที่จะสามารถคำนวณค่าความหนืดและค่าความดันของของแข็งได้ ตามทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (Kinetic Theory of Gas) นั้น โดยปกติแล้วโมเลกุลของแก๊สจะมีการเคลื่อนที่แบบไม่มีระเบียบที่ความเร็วไม่คงที่และไม่เท่ากัน พฤติกรรมดังกล่าวเป็นผลอันเนื่องมาจากการชนกัน หรือกระทบกันกับผนังของโมเลกุล จึงทำให้ทิศทางมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทุกครั้งที่เกิดการชน นอกจากนั้น ยังมีการถ่ายโอนโมเมนตัมเกิดขึ้นด้วย หากพิจารณาตามกฎทรงพลังงานการชนจะมีอยู่สองประเภท คือการชนแบบยืนหยุ่น (Elastic Collosion) นั่นคือจะมีการชนในลักษณะที่ความเร็วเฉลี่ยและพลังงานจลน์มีค่าคงที่ ในขณะที่หากการชนเป็นไปในลักษณะชนกันเองระหว่างอนุภาคของของแข็งหรือชนกับผนัง มีผลทำให้เกิดการถ่ายโอนโมเมนตัมให้กันและกันแล้ว ยังทำให้เกิดการสูญเสียทั้งความเร็วและพลังงานจลน์การชนในลักษณะนี้จะเรียกว่าการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision)

แบบจำลองเตาเผาที่ถูกสร้างขึ้นต้องใช้ความรู้ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณควบคู่ไปกับความรู้ทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งการไหลของของไหลในการทดลองนี้จะสามารถอธิบายได้โดยสมการอนุรักษ์ (Conservation equations) พื้นฐานดังนี้ [27]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

<u>สมการอนุรักษ์มวล</u> (Mass conservation equations)

สำหรับการจำลองแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \tag{3.1}$$

สำหรับการจำลองแบบมีปฏิกิริยาเคมี

วัฏภาคแก๊ส (g)

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\varepsilon_g \rho_g U_g\right) = 0 \tag{3.2}$$

วัฏภาคของแข็ง (s)

$$\frac{\partial(\varepsilon_s \rho_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s U_s) = 0 \tag{3.3}$$

โดยที่ผลรวมของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเท่ากับแก๊สต้องเท่ากับหนึ่ง

$$\varepsilon_g + \varepsilon_s = 1 \tag{3.4}$$

เมื่อ	ε_g	คือ	สัดส่วนเชิงปริมาตรของวัฏภาคของแก๊ส (-)
	ε_s	คือ	สัดส่วนเชิงปริมาตรของวัฏภาคของแข็ง (-)
	ρ	คือ	ความดัน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	ρ_g	คือ	ความหนาแน่นของวัฏภาคของแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	ρ_s	คือ	ความหนาแน่นของวัฏภาคของของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	U	คือ	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)
	U_g	คือ	ความเร็วของวัฏภาคของแก๊ส (เมตรต่อวินาที)
	U_s	คือ	ความเร็วของวัฏภาคของของแข็ง (เมตรต่อวินาที)
และ	t	คือ	เวลา (วินาที)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

<u>สมการอนุรักษ์โมเมนตัม</u> (Momentum conservation equations)

สำหรับการจำลองแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = \nabla \cdot \tau - \nabla P + \rho \mathrm{g} \quad (3.5)$$

สำหรับการจำลองแบบมีปฏิกิริยาเคมี

วัฏภาคแก๊ส (g)

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g U_g)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\varepsilon_g \rho_g U_g U_g\right) = \nabla \cdot \tau_g - \varepsilon_g \nabla P_g + \varepsilon_g \rho_g \mathrm{g} + \beta(U_g - U_s) \quad (3.6)$$

วัฏภาคของแข็ง (s)

$$\frac{\partial(\varepsilon_s \rho_s U_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s U_s U_s) = \nabla \cdot \tau_s - \varepsilon_s \nabla P_s + \varepsilon_s \rho_s \mathrm{g} - \beta(U_g - U_s) \quad (3.7)$$

เมื่อ τ คือ ความเค้นของเทนเซอร์ (ปาสคาล)

τ_g คือ ความเค้นของเทนเซอร์ของวัฏภาคของแก๊ส (ปาสคาล)

τ_s คือ ความเค้นของเทนเซอร์ของวัฏภาคของของแข็ง (ปาสคาล)

P_g คือ ความดันของวัฏภาคของแก๊ส (ปาสคาล)

P_s คือ ความดันของวัฏภาคของของแข็ง (ปาสคาล)

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

และ β คือ แบบจำลองการต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสาม- วินาที)

<u>สมการอนุรักษ์พลังงาน</u> (Energy conservation equations)

สมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามสมการดังนี้

สำหรับการจำลองแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = -\frac{\partial P}{\partial t} + \tau_g : \nabla U \quad (3.8)$$

สำหรับการจำลองแบบมีปฏิกิริยาเคมี

วัฏภาคแก๊ส (g)

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g U_g)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\varepsilon_g \rho_g U_g h_g\right) = -\varepsilon_g \frac{\partial P}{\partial t} + \tau_g : \nabla U_g \tag{3.9}$$

วัฏภาคของแข็ง (s)

$$\frac{\partial(\varepsilon_s \rho_s U_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s U_s h_s) = -\varepsilon_s \frac{\partial P}{\partial t} + \tau_s : \nabla U_s \tag{3.10}$$

เมื่อ h คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะ

h_g คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของแก๊ส (Specific enthalpy of gas)

h_s คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของของแข็ง (Specific enthalpy of solid)

<u>สมการอนุรักษ์การไหลและสปีชีส์</u>

สำหรับการจำลองแบบมีปฏิกิริยาเคมี

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\varepsilon_g \rho_g Y_i v\right) = -\nabla \varepsilon_g J_i + \varepsilon R_{i,h_o} + R_{i,het} \tag{3.11}$$

โดยที่

$$J_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i \tag{3.12}$$

เมื่อ Y_i คือ สัดส่วนโดยมวลของสปีชีส์ *i*

J_i คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของสปีชีส์ *i* สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.12)

R_{i,h_o} คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของเกิดปฏิกิริยาเคมีเอกพันธ์ (homogeneous) ของสปีชีส์ *i*

$R_{i,het}$ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของเกิดปฏิกิริยาเคมีวิวิธพันธ์ (heterogeneous) ของสปีชีส์ *i*

และ $D_{i,m}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของสปีชีส์ *i*

สมการเสริม

สมการที่จะนำไปใช้ในสมการหลักนี้มีพื้นฐานจากทฤษฎีจลน์การไหลของของแข็ง ซึ่งจะเข้ามาช่วยในการคำนวณหาผลเฉลยของสมการข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว

ความเค้นเทนเซอร์

วัฏภาคของแก๊ส (g)

$$\tau_g = 2\varepsilon_g\mu_g\left[\frac{1}{2}\left[\nabla\cdot v_g + \left(\nabla\cdot v_g\right)^T\right] - \frac{1}{3}\left(\nabla\cdot v_g\right)I\right] \tag{3.13}$$

วัฏภาคของแข็ง (s)

$$\tau_s = 2\varepsilon_s\mu_s\left[\frac{1}{2}[\nabla\cdot v_s + (\nabla\cdot v_s)^T] - \varepsilon_s\left(\xi_s - \frac{1}{3}\mu_s\right)\nabla\cdot v_s\right] \tag{3.14}$$

เมื่อ I คือ เทนเซอร์เอกลักษณ์

μ_g คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้นของวัฏภาคของแก๊ส (กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที)

μ_s คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้นของวัฏภาคของของแข็ง (กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที)

และ ξ_s คือ ความหนืดรวมของวัฏภาคของของแข็ง (กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที)

ความดันของอนุภาคสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นจลนพลศาสตร์ และส่วนที่เกิดการชนกันของอนุภาคโดยตรงแล้วเกิดการถ่ายโอนโมเมนตัม

$$P_s = \varepsilon_s\rho_s\theta_s + 2\rho_s(1-e)\varepsilon_s^2 g_0\theta_s \tag{3.15}$$

เมื่อ e คือ ค่า Restitution coefficient ระหว่างอนุภาคของของแข็ง

$e = 1$ คือ การชนแบบยืดหยุ่นไม่มีการสูญเสียพลังงาน

$e = 0$ คือ การชนที่มีการสูญเสียพลังงานทั้งหมดระหว่างการชน

$0 < e < 1$ คือ การชนแบบไม่ยืดหยุ่นที่มีการสูญเสียพลังงานระหว่างการชน

และ g_0 คือ ฟังก์ชันการกระจายในแนวรัศมีของอนุภาคของของแข็ง

ความหนืดเนื่องจากความดันที่อยู่ในแนวสัมผัส สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_s = \frac{4}{5}\varepsilon_s\rho_s d_p g_0(1+e)\sqrt{\frac{\theta}{\pi}} + \frac{10\rho_s d_p\sqrt{\pi\theta}}{96(1+e)g_0\varepsilon_s}\left[1+\frac{4}{5}\varepsilon_s g_0(1+e)\right]^2 \quad (3.16)$$

เมื่อ d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของของแข็ง (เมตร)

ความหนืดรวมสามารถหาค่าได้จากค่าความต้านทานการอัดของอนุภาคของของแข็งต่อค่าการขยายตัวของอนุภาคของของแข็ง

$$\xi_s = \frac{4}{3}\varepsilon_s\rho_s d_p g_0(1+e)\left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{1/2} \quad (3.17)$$

ฟังก์ชันการกระจายในแนวรัศมีของอนุภาคของของแข็ง เป็นความน่าจะเป็นของการชนกันระหว่างอนุภาคของของแข็ง เมื่อสัดส่วนของอนุภาคของของแข็งนั้นอัดตัวกันอย่างหนาแน่น

$$g_0 = \left[1-\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,max}}\right)^{1/3}\right]^{-1} \quad (3.18)$$

เมื่อ $\varepsilon_{s,max}$ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของวัฏภาคของของแข็งที่สภาวะที่มีการอัดตัวกันอย่างหนาแน่น($\varepsilon_{s,max} = 0.06$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>แบบจำลองสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค</u> (Interphase exchange coefficient model, β_{gs})

<u>แบบจำลอง Wen และ Yu</u>

แบบจำลอง Wen และ Yu เหมาะกับระบบที่มีสัดส่วนของอนุภาคของแข็งแบบเบาบาง

$$\beta_{gs} = \frac{3}{4}\frac{(1-\varepsilon_g)\varepsilon_g}{d_p}\rho_g\left|v_g - v_s\right|C_{D0}\varepsilon_g^{-2.65} \quad (3.19)$$

เมื่อ $$C_D = \frac{24}{\varepsilon_g Re_s}\left[1 + 0.15\left(\left(1-\varepsilon_g\right)Re_s\right)^{0.687}\right] \quad (3.20)$$

และ $$Re_s = \frac{\rho_g d_p |v_s - v_g|}{\mu_g} \quad (3.21)$$

<u>แบบจำลอง Gidaspow</u>

แบบจำลอง Gidaspow เป็นแบบจำลองที่เกิดจากการรวมกันของ สมการในแบบจำลองของ Wen และ Yu สำหรับทำนายบริเวณที่มีสัดส่วนของอนุภาคของของแข็งเบาบาง และสมการของ Ergun สำหรับคำนวณในส่วนที่มีอนุภาคของของแข็งหนาแน่น

สำหรับในกรณีที่ $\varepsilon_g > 0.8$

$$\beta_{gs} = \frac{3}{4}\frac{(1-\varepsilon_g)\varepsilon_g}{d_p}\rho_g\left|v_g - v_s\right|C_{D0}\varepsilon_g^{-2.65} \quad (3.22)$$

สำหรับในกรณีที่ $\varepsilon_g \leq 0.8$

$$\beta_{gs} = \frac{150(1-\varepsilon_g)^2\mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + \frac{1.751-\varepsilon_g)|v_g-v_s|}{d_p} \quad (3.23)$$

3.3 การจำลองปฏิกิริยาเคมี [28]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในงานวิจัยนี้ในส่วนของการจำลองภาวะการไหลที่มีการเพิ่มเติมแบบจำลองปฏิกิริยาเคมีในกรณีแบบจำลองที่ 3 นั้น เราจะต้องทำการเพิ่มชุดสมการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ นั่นคือ ปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยกำหนดให้วัฏภาคของแก๊สประกอบไปด้วย แก๊สออกซิเจน, แก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์, แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไนโตรเจน ส่วนวัฏภาคของแข็งประกอบไปด้วย ชีวมวล โดยค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ นำมาจากงานวิจัยของ Rajan and Wen [29]

ซึ่งจะมีสมการปฏิกิริยาเคมีเชื้อเพลิงดังนี้

$$C(s) + O_2(g) \longrightarrow CO_2(g) \quad (3.24)$$

$$C(s) + \frac{1}{2} O_2(g) \longrightarrow CO(g) \quad (3.25)$$

มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็น

$$R_6 = \frac{6\alpha_{s1}\rho_{s1}Y_c}{d_{s1}\rho_c} k_6 Y_{O_2} \quad (3.26)$$

เมื่อ

$$k_6 = \frac{\frac{RT_{S1}}{M_C}}{\frac{1}{k_{cr}} - \frac{1}{k_{cd}}} \quad (3.27)$$

และ

$$\frac{1}{k_{cr}} = -8{,}910 \exp\left(\frac{-1.4947\times10^{8}}{RT_{S1}}\right) \quad ; \quad \frac{1}{k_{cd}} = \frac{Sh\varphi(D_g + \frac{\mu_g}{\rho_g Sct})M_C}{d_{s1}RT_g}$$

ปฏิกิริยาเคมีวิวิธพันธุ์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลนี้ ในโปรแกรม ANSYS Fluent สามารถที่ใส่สมการปฏิกิริยาเคมีเข้าไปได้โดยตรง ปฏิกิริยาเคมีจะถูกคำนวณตามสมการ Arrhenius ตามสมการที่ (3.28)

$$k_r = A_r \exp(-E_a/RT) \quad (3.28)$$

โดยที่ A_r คือ Pre-exponential factor สำหรับปฏิกิริยา

E_a คือ พลังงานกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยา (จูลต่อกิโลกรัมโมล)

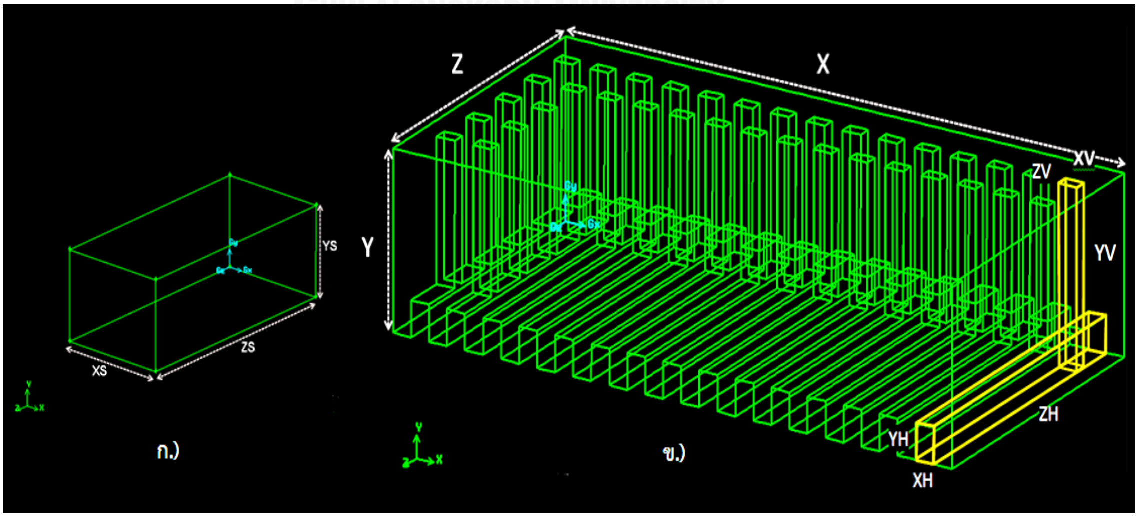
และ R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (จูลต่อกิโลกรัมโมล-เคลวิน)

การตั้งค่าปฏิกิริยาเคมีวิวิธพันธุ์ดังกล่าวจะต้องทำการเขียนโปรแกรมเพิ่มชุดสมการลงในโปรแกรม ANSYS Fluent ด้วยการเขียนภาษา C ลงในฟังก์ชัน User Define Function (UDF) โดยเขียนฟังก์ชัน อัตราการเกิดปฏิกิริยา และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเข้าไปเพื่อให้โปรแกรม ANSYS Fluent ทำการคำนวณ ซึ่งรายละเอียดของการเขียนฟังก์ชันนี้ จะอยู่ในภาคผนวก ก

3.4 การออกแบบช่องสำหรับการไหลของอากาศและการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการคำนวณ

3.4.1 การออกแบบเตาเผาอิฐดิน และช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง)

ในส่วนนี้เริ่มจากการศึกษาปัญหาของเตาเผาอิฐดินที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน ที่ชุมชนในอำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา พบว่า นอกจากการพัฒนาในด้านของการผสมวัตถุดิบ [1,18] ของดินเผาแล้วตัวแปรที่เราจะสามารถพัฒนาต่อยอดได้ นั่นคือ การปรับขนาดช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) โดยทำการออกแบบความสูง และความกว้างของช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ทางด้านล่างของเตาตามจำนวนเท่าของขนาดอิฐ และปรับความสูงของเตาตามความสามารถในการเรียงชั้นอิฐดิบ ซึ่งการออกแบบความกว้าง ความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ทางด้านล่างเตา และความสูงของเตาแล้ว จะได้ทั้งหมด 8 แบบจำลอง โดยค่าต่างๆ ที่ได้จากการพัฒนาออกแบบ จะแสดงในตารางที่ 3.1 และในตารางที่ 3.2 ซึ่งตัวแปรที่กำหนดดังตารางทั้งสองสามารถอ้างอิงได้จากรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นการแสดงการกำหนดตัวแปรของความสูงของเตาเผา ความกว้าง และ ความสูงของช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ภายในเตาที่ประกอบไปด้วยช่องว่างตามแนวของความกว้างของเตา และในทิศทางตามแนวตั้งของเตา



รูปที่ 3.2 แบบจำลองเชิงเรขาคณิต ก.) ผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา) และ ข.) เตาเผาอิฐดินต้นแบบ

หลังจากการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตสำหรับเตาเผาอิฐดินเผาข้างต้นทั้งหมด 8 แบบจำลอง ทำการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา และวิเคราะห์ผลจากการจำลองแล้ว เราจะทำการเลือกแบบจำลองที่มีผลรวมของตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 ด้านที่ดีที่สุด มาจำลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ ด้วยการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ที่มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบนั้น การสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตในกรณีนี้จะมีความซับซ้อนมากขึ้น นั่นคือ แบบจำลองจะถูกออกแบบให้มีผนังของสังกะสีล้อมรอบเตาเผาอิฐดิน โดยมีระยะห่างระหว่างเตาเผาอิฐดิน กับผนังสังกะสีขนาด 10 ซม. และมีความสูงห่างจากพื้นขึ้นมาขนาด 15 ซม. ซึ่งการสร้างแบบจำลองดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 3.3

สำหรับการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาแบบมีการเกิดปฏิกิริยา เราจะทำการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตเฉพาะในส่วนของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) สำหรับแบบจำลองต้นแบบเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่มีผลรวมของตัวแปรตามทั้ง 3 ด้านที่ดีที่สุด ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 3.4

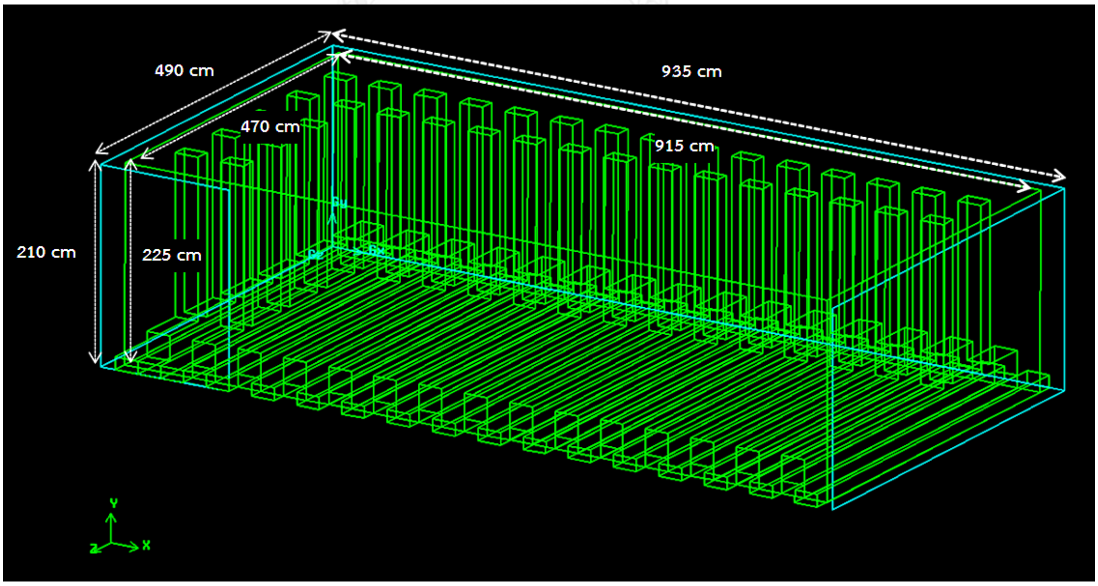
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการออกแบบช่องสำหรับใส่เชื้อเพลิง และความสูงของเตา

ความสูงเตาเผา (ซม.)	อัตราส่วน ความกว้างช่องอากาศ: ความกว้างอิฐ	อัตราส่วน ความสูงช่องอากาศ: ความกว้างอิฐ	ขนาดความกว้างช่องอากาศ (ซม.)	ขนาดความสูงช่องอากาศ (ซม.)
200	1XS	3XS	7.5	45
		4XS	7.5	60
	2XS	3XS	15	45
		4XS	15	60
225	1XS	3XS	7.5	45
		4XS	7.5	60
	2XS	3XS	15	45
		4XS	15	60

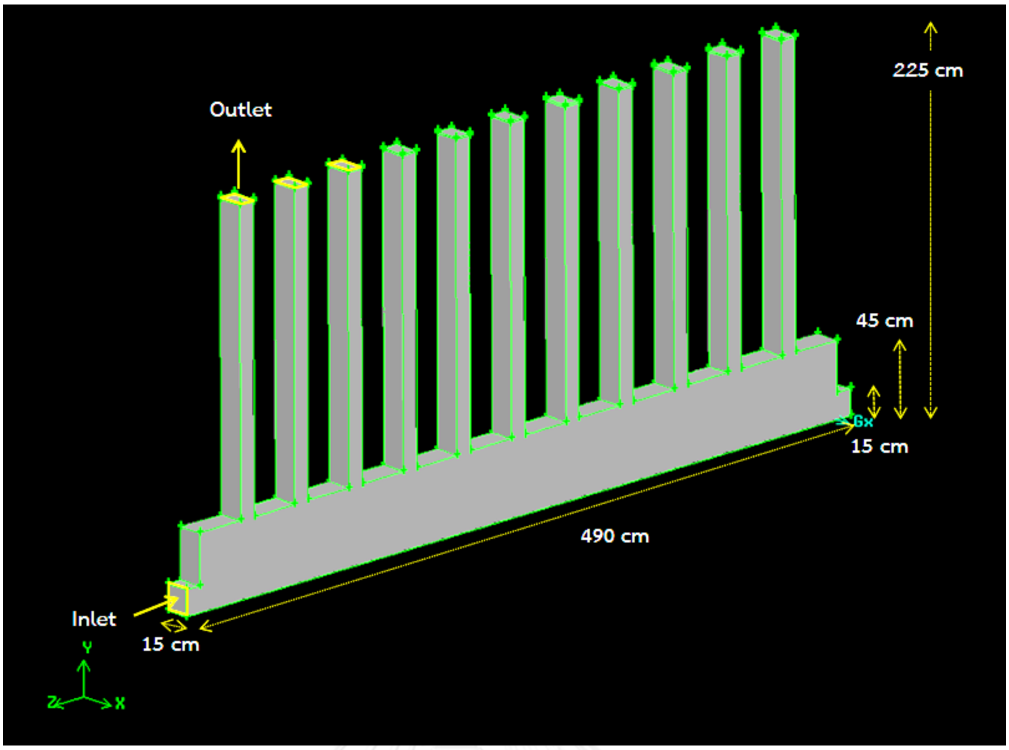
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.2 ขนาดของแบบจำลองทั้ง 8 แบบ

แบบจำลอง		1	2	3	4	5	6	7	8
ขนาดของเตาเผา (ซม.)	X	915	915	915	915	915	915	915	915
	Y	225	200	225	200	225	200	200	225
	Z	470	470	470	470	470	470	470	470
ขนาดช่องอากาศตามแนวความกว้างของเตา(ซม.)	XH	15	7.5	7.5	7.5	7.5	15	15	15
	YH	45	45	45	60	60	45	60	60
	ZH	470	470	470	470	470	470	470	470
ขนาดช่องอากาศตามแนวความสูงของเตา(ซม.)	XV	15	7.5	7.5	7.5	7.5	15	15	15
	YV	225	200	225	200	225	200	200	225
	ZV	10	10	10	10	10	10	10	10



รูปที่ 3.3 รายละเอียดแบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ที่มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบของแบบจำลองต้นแบบ



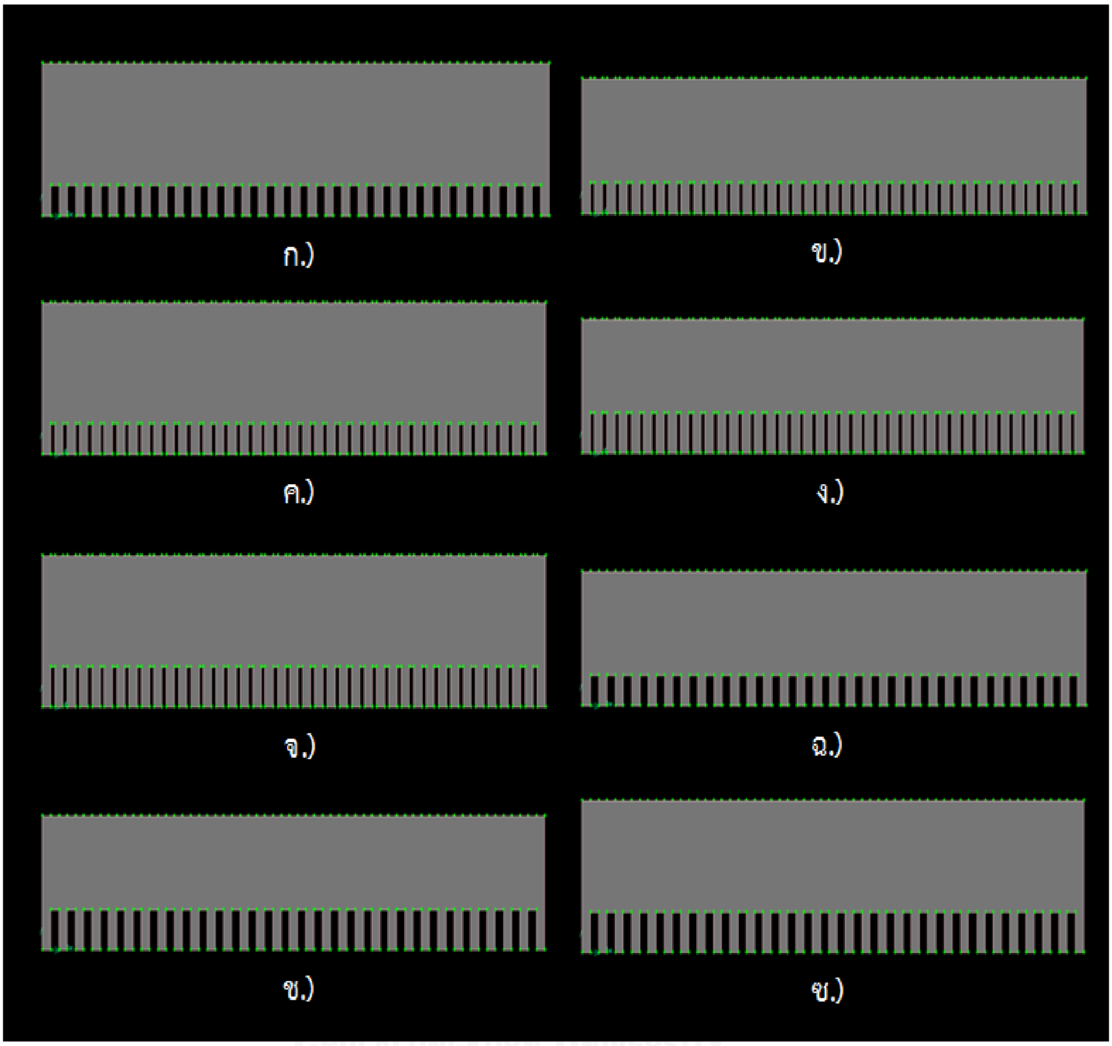
รูปที่ 3.4 รายละเอียดแบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินที่มีการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลองต้นแบบ

3.4.2 การสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการคำนวณ

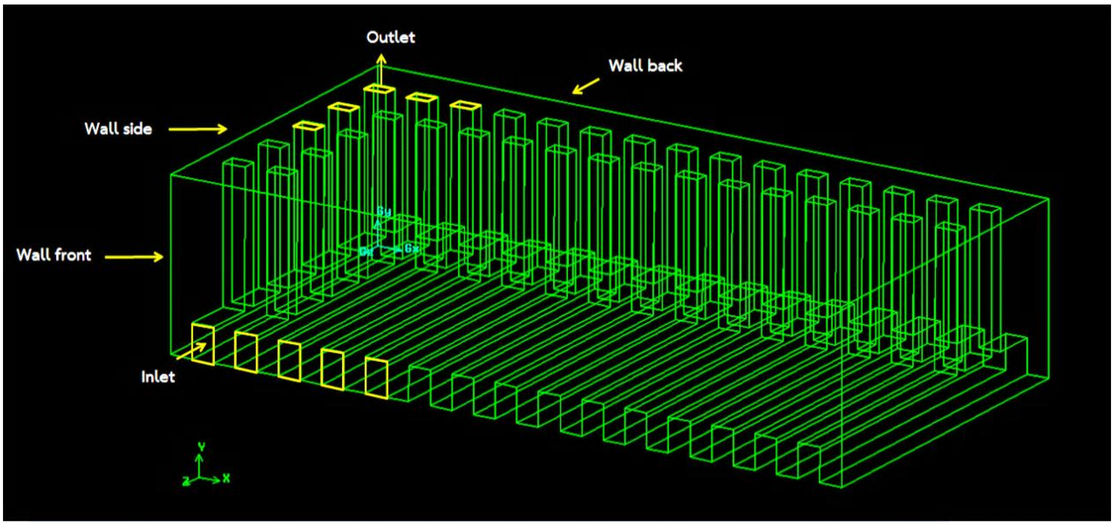
แบบจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาที่ใช้ในการคำนวณสำหรับเตาเผาอิฐดินถูกสร้าง (Geometry) ขึ้น และแบ่งพื้นที่การคำนวณ (Mesh) โดยโปรแกรม Gambit ในรูปที่ 3.5 เป็นการแสดงแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของแบบจำลองต้นแบบ และแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองสำหรับการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา โดยขนาดเตาเผาอิฐของแบบจำลองต่างๆ จะมีขนาดดังแสดงในตารางที่ 3.2

3.4.3 การกำหนดภาวะของเขต (Boundary)

การกำหนดภาวะขอบเขตจะถูกแยกเป็นส่วนๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยสามารถอธิบายได้คร่าวๆ ดังนี้ พื้นที่หน้าตัดของช่องทางด้านล่างของเตาจะถูกกำหนดให้เป็นสภาวะความเร็วของแก๊สขาเข้า (Velocity inlet) พื้นที่หน้าตัดของช่องทางด้านบนถูกกำหนดให้เป็นสภาวะความดันขาออก (Pressure outlet) และสำหรับบริเวณอื่นๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วถูกกำหนดให้เป็นสภาวะขอบเขตกำแพง (Wall)



รูปที่ 3.5 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยาในรูปแบบต่างๆ ที่ระนาบ X-Y ก.) แบบจำลองต้นแบบ, ข.) แบบจำลองที่ 2, ค.) แบบจำลองที่ 3, ง.) แบบจำลองที่ 4, จ.) แบบจำลองที่ 5, ฉ.) แบบจำลองที่ 6, ช.) แบบจำลองที่ 7 และ ซ.) แบบจำลองที่ 8



รูปที่ 3.6 รายละเอียดในการกำหนดภาวะขอบเขตของแบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดิน

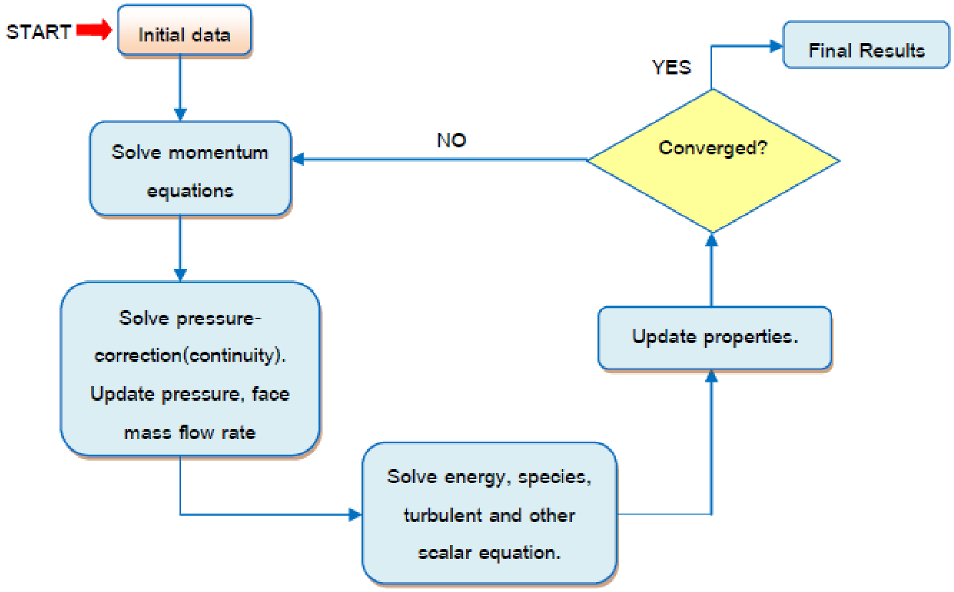
3.5 การจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดิน

หลังจากทำการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตด้วย Gambit แล้ว ขั้นตอนถัดมา คือ ขั้นตอนในการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดิน ซึ่งจะถูกจำลองโดยการใช้โปรแกรม ANSYS Fluent ที่มีขั้นตอนการจำลองคร่าวๆ ดังนี้ 1. เลือกสมการอนุรักษ์ (Conservation) และสมการเสริมที่ใช้ในการคำนวณ จากนั้น ทำการเลือกชนิดของแบบจำลองการไหล วัฏภาคเดียว หรือ หลายวัฏภาค คำนวณที่ภาวะคงตัว (Steady state) หรือภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) 2. วัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง (Material) 3. การตั้งค่าวัฏภาคต่างๆ 4. กำหนดค่าเริ่มต้น (Initial condition) และ 5. กำหนดจำนวนรอบของการทำซ้ำ (Iteration)

3.5.1 การกำหนดชนิดของตัวแก้ปัญหา

ในขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับแบบจำลองเตาเผาอิฐดิน ในขั้นต้นต้องทำการตรวจสอบหน่วยของแบบจำลองที่นำเข้ามาจากการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิต จากนั้นจึงทำการกำหนดชนิดของตัวแก้ปัญหา (Solver) ภายในโปรแกรม ANSYS Fluent โดยในงานวิจัยนี้ แบ่งการจำลองพฤติกรรมของกระบวนการออกเป็น 3 กรณี นั่นคือ การจำลองแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา การจำลองแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยาที่มีการป้อนอากาศร้อน และการจำลองแบบมีการเกิดปฏิกิริยา โดยทั้ง 3 กรณีจะทำการเลือกตัวแก้ปัญหาเป็นแบบ Segregated ซึ่ง

การแก้ปัญหาด้วยวิธีนี้จะทำการแก้ปัญหาสมการหลัก (Governing equation) เป็นลำดับทีละสมการ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งจะแสดงแผนภาพกระบวนการแก้ปัญหาโดยรวมในแบบของ Segregated



รูปที่ 3.7 แผนภาพกระบวนการแก้ปัญหาแบบ Segregated [25]

กระบวนแก้ปัญหาจะเริ่มจากการนำค่าคุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละวัฏภาคป้อนเข้าไปเป็นค่าตั้งต้นในการคำนวณ แต่ถ้าหากเป็นระหว่างขั้นตอนการคำนวณนั้นจะเป็นการนำค่าที่ได้รับจากการคำนวณในขั้นก่อนหน้าที่ยังไม่ลู่เข้ามาคำนวณสมการโมเมนตัมเพื่อหาค่าความเร็ว จากนั้นนำค่าความเร็วที่ได้ไปทำการตรวจสอบแล้วปรับค่าความดัน (Pressure-correction) เมื่อทำการปรับปรุงและแก้ไขแล้วจึงทำการปรับปรุงค่าสมบัติต่างๆ ที่จะใช้ในการคำนวณด้วยค่าที่คำนวณได้ใหม่ จึงจะสามารถทำการแก้ปัญหาสมการอนุรักษ์พลังงาน สมการของกระบวนการไหล และสมการเชิงสเกลาร์ (Scalar equation) อื่นๆ ในขั้นตอนสุดท้ายจะมีการตรวจสอบผลเฉลยว่าลู่เข้าหรือไม่ หากยังไม่ลู่เข้าจะนำค่าที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนนั้นกลับไปคำนวณซ้ำอีกรอบ (Iteration) จนกว่าค่าที่ได้จะลู่เข้า หรือเกินจำนวนรอบที่มากที่สุด (Max iteration) ที่กำหนดไว้

สำหรับการแก้ปัญหาการไหลหลายวัฏภาคดังในกรณีที่ 3 ของการจำลองแบบจำลองแบบมีการเกิดปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้ใช้แนวคิดแบบออยเลอเลียน (Eulerian Multiphase Model)

เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมเพราะสามารถกำหนดให้วัฏภาคของของแข็งมีลักษณะเป็นอนุภาค (Granular) และในส่วนของสมการการคำนวณเกี่ยวกับช่วงของการไหล ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การไหลแบบราบเรียบในการจำลองภาวะของทั้ง 3 กรณี

3.5.2 การกำหนดคุณสมบัติของแต่ละวัฏภาคที่ใช้ในการจำลอง

ขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินจะทำการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง ทั้งภาวะการไหลแบบไม่เกิดปฏิกิริยา และแบบเกิดปฏิกิริยา จะใช้คุณสมบัติทางกายภาพแต่ละวัฏภาคเหมือนกันดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งเป็นค่าพื้นฐานที่มีอ้างอิงอยู่ในฐานข้อมูลของ ANSYS Fluent สำหรับแบบจำลองการไหลที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาทั้ง 2 กรณี จะกำหนดให้ วัฏภาคแก๊สประกอบไปด้วยอากาศที่มีองค์ประกอบ ประกอบไปด้วยไนโตรเจนร้อยละ 71 โดยโมล, ออกซิเจนร้อยละ 22 โดยโมล และแก๊สเฉื่อยอื่นๆ ร้อยละ 1 โดยโมล และมีวัฏภาคของของแข็งกำหนดให้เป็นอิฐ และสำหรับแบบจำลองการไหลที่มีการเกิดปฏิกิริยาวัฏภาคของแก๊สหลักๆ จะประกอบไปด้วย แก๊สออกซิเจน, แก๊สไนโตรเจน, แก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์, และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และมีวัฏภาคของของแข็งกำหนดให้เป็นคาร์บอน และอิฐ หลังจากการกำหนดวัฏภาคแก๊สเป็นวัฏภาคหลัก (Primary phase) และวัฏภาคของของแข็งเป็นวัฏภาครอง (Second phase) ในส่วนของการคำนวณอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคของแรงต้านการเคลื่อนที่ (Interphase Drag Coefficient) กำหนดให้ใช้สมการของ Morsi-Alexander [26] และใช้สมการของ Gunn ในการคำนวณอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคของการถ่ายโอนความร้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาทั้ง 3 แบบจำลอง

วัสดุ	คุณสมบัติ	ค่าความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อตารางเมตร)	ค่าความจุความร้อน (จูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน)	ค่าการนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน)	ค่าความหนืด (กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที)
แก๊ส	O_2	1.2999	919.31	0.0246	1.919e-05
	CO	1.1233	1043	0.025	1.75e-05
	CO_2	1.7878	840.37	0.0145	1.37e-05
	CH_4	0.6679	2222	0.0332	1.087e-05
	C_2H_6	1.263	1731	0.0207	9.26e-06
	NO_2	-	piecewise	-	-
	SO_2	2.77	622.28	0.0104	1.2e-05
	N_2	1.138	1040.67	0.0242	1.663e-05
ของแข็ง	C	2000	1220	-	-
	Clay brick	1826	8e5	0.82	-

3.5.3 การกำหนดภาวะขอบเขตที่ใช้ในการจำลอง

ในการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดิน การกำหนดภาวะขอบเขตที่ใช้ในการจำลองจะเริ่มจากการกำหนดความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกในแนวแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิวโลก จากเตาเผาที่สร้างต้องกำหนดในทิศทางติดลบของแนวแกน Y ของเตาเผาเป็น 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ค่าความเร็วลมอยู่ที่ 0.25 เมตรต่อวินาที และค่าความดันภายในระบบมีค่าเท่ากับ 101,325 ปาสคัล ในส่วนของอุณหภูมิของการจำลองระบบจะถูกแบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังตารางที่ 3.4 3.5 และ 3.6 ซึ่งค่าของอุณหภูมิต่างๆ ที่แสดงในตารางเป็นข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลอุตสาหกรรมเตาเผาอิฐของการเผาเตาอิฐดินระบบจริง ในอำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ตารางที่ 3.4 การกำหนดอุณหภูมิที่ภาวะขอบเขตสำหรับการจำลองแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา

Boundary Condition	Boundary Type	Temperature (K)
Wall_back	Wall	673
Wall_inside	Wall	1,173
Wall_front	Wall	673
Wall_top	Wall	953
Wall_side	Wall	673
Wall_floor	Wall	Insulator

จากในตารางที่ 3.4 เป็นแบบจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา แต่มีการถ่ายโอนความร้อนด้วยการนำความร้อนเนื่องจากแบบจำลองนี้ มีการตั้งขอบเขตเงื่อนไขของผนังอิฐให้มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จึงเกิดการถ่ายโอนความร้อนด้วยการนำความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง แลกเปลี่ยนความร้อนกับบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ จนอุณหภูมิภายในเตามีค่าใกล้เคียงกัน สมมติฐานของการทดลองนี้คือ อิฐดินถูกรายล้อมไปด้วยเชื้อเพลิงร้อน ส่วนบริเวณด้านล่างของเตาเผาเงื่อนไขขอบเขตถูกกำหนดให้เป็นฉนวนความร้อน

ในตารางที่ 3.5 เป็นการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา แต่มีการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนของความเร็วขาเข้าที่อุณหภูมิ 1,073 เคลวิน มีสมมติฐานคือ การถ่ายโอนความร้อนจะเริ่มจากบริเวณทางเข้าของช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (หรือสำหรับใส่เชื้อเพลิง) มีการแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณดังกล่าว และกระจายไปทั่วทั้งเตา ด้วยความเร็วขาเข้าเป็น 0.25 เมตรต่อวินาที การจำลองนี้ทำเพื่อยืนยันผลการจำลองที่ได้ในส่วนก่อนหน้า

ตารางที่ 3.5 การกำหนดอุณหภูมิที่ภาวะขอบเขตสำหรับการจำลองแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา (มีการป้อนอากาศร้อนให้ระบบ)

Boundary Condition	Boundary Type	Temperature (K)
Brick	Solid	-
Hole	Fluid	-
Inlet	velocity-inlet	1,173
Outlet	pressure-outlet	-
Wall_back	Wall	573
Wall_inside	Wall	Couple
Wall_front	Wall	573
Wall_top	Wall	953
Wall_side	Wall	573
Wall_floor	Wall	303

ตารางที่ 3.6 การกำหนดอุณหภูมิที่ภาวะขอบเขตสำหรับการจำลองแบบมีการเกิดปฏิกิริยา

Boundary Condition	Boundary Type	Temperature (K)
Inlet	velocity-inlet	303
Outlet	pressure-outlet	-
Lid	carbon	-
Wall	wall	673

ในตารางที่ 3.6 เป็นการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบมีการเกิดปฏิกิริยา โดยเป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้ชีวมวลตามสมการในหัวข้อที่ 3.3 เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลภายในเตาเผาอิฐแล้ว จะได้ความร้อนออกมา แล้วจึงมีการถ่ายโอนความร้อนไปยังอิฐในบริเวณนั้นๆ ทำให้อิฐมีอุณหภูมิสูงขึ้น ตามลำดับ โดยจะทำการทดลองเพียงส่วนหนึ่งของเตาเผาอิฐ เพื่อยืนยันช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงเท่านั้น

3.5.4 การกำหนดขั้นเวลาที่ใช้ในการจำลอง

ขั้นตอนสุดท้ายในการจำลอง ก่อนที่โปรแกรมจะเริ่มทำการคำนวณ เราต้องทำการกำหนดค่าเริ่มต้น (Initialize condition) โดยในแบบจำลองสำหรับเตาเผาอิฐที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา และแบบจำลองสำหรับเตาเผาอิฐที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ที่มีการป้อนอากาศร้อนการกำหนดค่าเริ่มต้นจะเหมือนกันโดยกำหนดให้มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 300 เคลวิน

จากนั้น ทำการกำหนดการคำนวณ (Iteration) เพื่อให้ได้ผลจากการคำนวณลู่เข้าสู่คำตอบหรือใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ในทุกๆ หนึ่งเวลาคำนวณ (Time step) จะทำการคำนวณซ้ำ 40 ครั้งต่อหนึ่งเวลาคำนวณ สำหรับทั้งแบบจำลองที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมี และแบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยจะทำการคำนวณจนกว่าจะได้ผลเฉลยของแบบจำลองจะมีผลของอุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4

ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เราจะทำการแบ่งการทดลองออกเป็นส่วนๆ ส่วนแรกจะทำการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยาสำหรับเตาเผาอิฐดินที่ได้จากการสำรวจเตาเผาอิฐดินในอำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จากนั้น จะทำการออกแบบเตาเผาอิฐดินเพื่อการพัฒนาแบบจำลองเตาเผาอิฐดินจากตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่คาดว่าน่าจะมีผลต่อ จำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่มีคุณภาพ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว รวมไปถึงเวลาที่ให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว ก่อนจะนำผลที่ได้มาสร้างเตาเผาอิฐดินระบบจริง โดยจะทำการเลือกจากแบบจำลองที่ให้จำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่มีคุณภาพมากที่สุด เนื่องจากความต้องการในการลดต้นทุนของผู้ประกอบการสำหรับโรงเผาอิฐดินในอำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และเลือกแบบจำลองที่ให้ผลของทั้ง 3 ด้านดีเป็นอันดับหนึ่งมาทำการจำลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ โดยการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยาที่มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบ และการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบมีการเกิดปฏิกิริยาเพื่อทำศึกษาการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล และยืนยันผลที่เกิดขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1 การจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับแบบจำลองเตาเผาอิฐดิน

4.1.1 ตัวแปรดำเนินการและตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรดำเนินการและตัวแปรตอบสนองที่ศึกษาในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วย ตัวแปรดำเนินการมี ความสูงของเตาเผา (200 - 225 ซม.) ความสูง (45 - 60 ซม.) และความกว้าง (7.5 - 15 ซม.) ของช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (หรือสำหรับใส่เชื้อเพลิง) ตามแนวนอนด้านล่างของเตา โดยตัวแปรดำเนินการเหล่านี้ได้จากการศึกษาเตาเผาอิฐดินถึงตัวแปรที่จะสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ โดยที่การปรับเปลี่ยนค่านั้นๆ จะต้องไม่ส่งผลกระทบ และไม่ซับซ้อนมากจนเกินไป เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน เมื่อเทียบกับการเรียงอิฐดิบแบบเดิม และมีตัวแปรตอบสนองที่ต้องการศึกษาคือ จำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ อุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา

ภาวะคงตัว รวมไปถึงเวลาที่ให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นควรจะมีผลของจำนวนปริมาตรรวมของอิฐดินที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 800 - 900 องศาเซลเซียส สูงขึ้น มีผลของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัวที่เหมาะสมที่จะส่งผลต่อการแข็งตัวของอิฐดิน และคุณภาพของอิฐดิน ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัวต้องน้อยลงเพื่อประหยัดเวลา และเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผา

4.1.2 แบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา

การคำนวณในขั้นต้นของแบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา สำหรับใน 2 กรณีแรก คือ กรณีที่แบบจำลองสำหรับกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา และกรณีที่แบบจำลองสำหรับกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบ นี้จะใช้สมการในการหาผลเฉลยจากขั้นตอนวิธี SIMPLE ด้วยการแก้สมการระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุมเป็น สมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับอนุภาคของของไหล – ของแข็ง (สมการที่ 4.1)

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q \rho_q h_q\right) + \nabla \cdot \left(\alpha_q \rho_q \vec{u}_q h_q\right)$$
$$= -\alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \bar{\bar{\tau}}_q : \nabla \vec{u}_q - \nabla \cdot \vec{q}_q + S_q + \textstyle\sum_{p=1}^{n}\left(Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}\right) \quad (4.1)$$

เมื่อ $\dot{m}_{pq}$ คือ การถ่ายโอนมวลจากวัฏภาคของ p ไปวัฏภาคของ q

$\dot{m}_{qp}$ คือ การถ่ายโอนมวลจากวัฏภาคของ q ไปวัฏภาคของ p

h_q คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของวัฏภาคของ q (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

$\vec{q}_q$ คือ ฟลักซ์ความร้อน (วัตต์ต่อตารางเมตร)

Q_{pq} คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนระหว่างวัฏภาคของ p ไปวัฏภาคของ q (วัตต์)

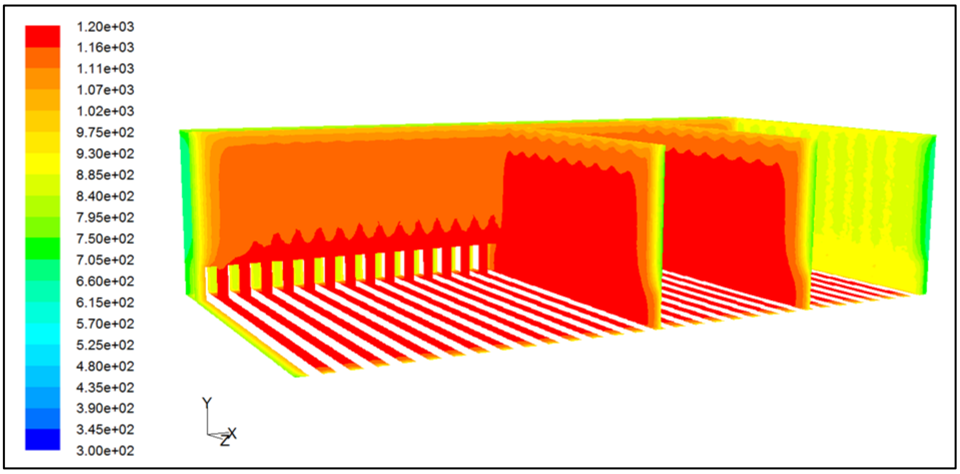
และ h_{qp} คือ ค่าเอนทัลปี (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

เพื่อให้การถ่ายโอนความร้อนนี้สอดคล้องกับการจำลองในขั้นต้นจึงทำการกำหนดให้ $Q_{pq} = -Q_{qp}$ และ $Q_{qq} = 0$

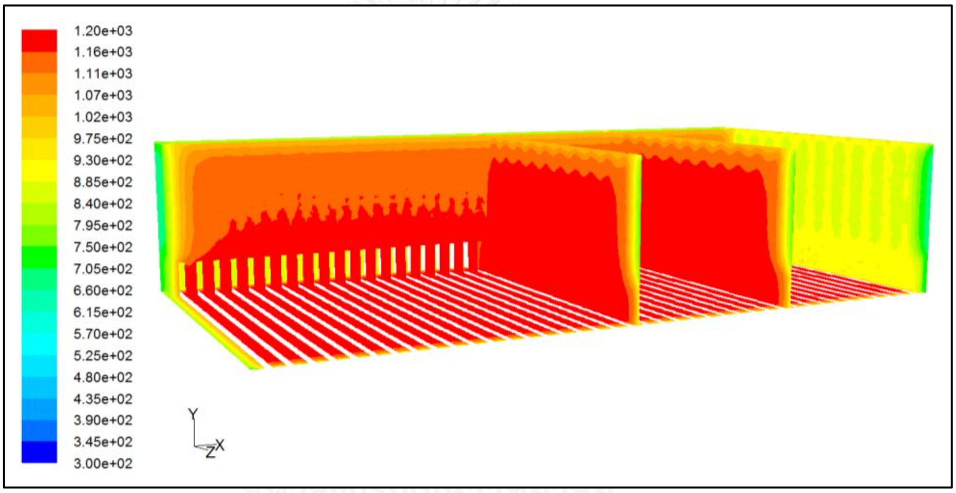
<u>การคำนวณที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา</u>

จากการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับแบบจำลองเตาเผาอิฐดินทั้ง 8 แบบ เพื่อทำการศึกษาผลของตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 เราจะนำแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่ถูกสร้างขึ้นสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบ 3 มิติ ทำการจำลองแบบจำลองในหนึ่งวัฏภาค การคำนวณที่ภาวะคงตัว (Steady state) มีวัสดุสำหรับการจำลองประกอบไปด้วย อิฐดิน ที่มีค่าความหนาแน่น 1,826 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความจุความร้อน 800,000 จูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน ค่าการนำความร้อน 0.82 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน และที่อากาศมีค่าความหนาแน่น 1.225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความจุความร้อน 1,006.43 จูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน ค่าการนำความร้อน 0.024 วัตต์ต่อเมตร- เคลวิน และมีค่าความหนืดเป็น 1.789×10^{-5} กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที จากนั้น ทำการกำหนดให้แบบจำลองมีความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกในแนวแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิวโลก กำหนดในทิศทางติดลบของแนวแกน Y ของเตาเผาเป็น 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง การกำหนดภาวะขอบเขตอื่นๆ จะเป็นไปตามที่แสดงในหัวข้อ 3.5.3 ดังตารางที่ 3.4 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการสำรวจอุตสาหกรรมเตาเผาอิฐดิน โดยกำหนดให้มีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการจำลองอยู่ที่ 300 เคลวิน

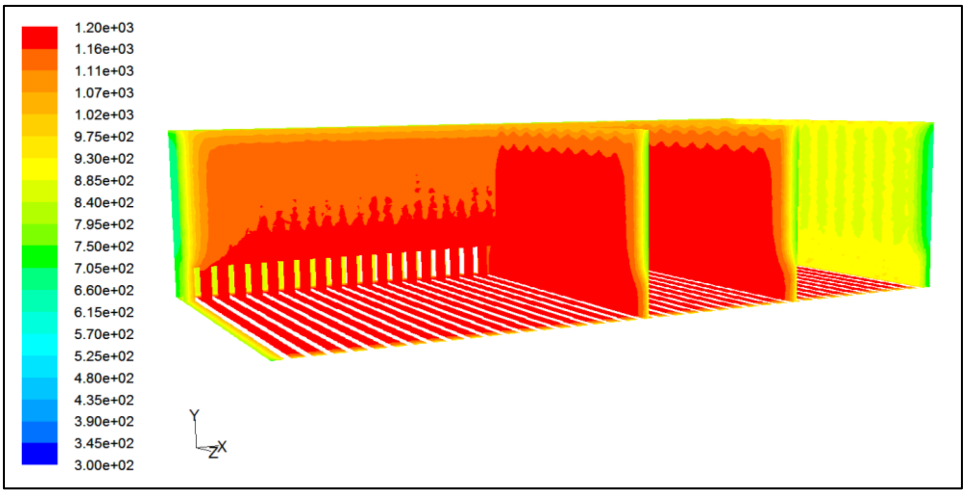
จากการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินที่ภาวะคงตัว พบว่าแบบจำลองทั้ง 8 แบบจำลอง มีการกระจายตัวของอุณหภูมิของเตาเผาอิฐดินเผาที่ภาวะคงตัวที่เป็นรูปแบบ มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ โดยค่าของอุณหภูมิแสดงได้ดังแถบสีด้านข้างของรูปภาพ บริเวณที่มีสีแดง คือบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงสุด อยู่ที่ 1,200 เคลวิน ในขณะที่ บริเวณที่มีสีน้ำเงินคือบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำสุด อยู่ที่ 300 เคลวิน นอกจากนั้น ยังพบว่า ทุกแบบจำลองมีอุณหภูมิบริเวณภายในเตาเผาอิฐดินมากกว่า 1,070 เคลวิน ยกเว้นที่บริเวณผนัง และบริเวณขอบของเตาเผาแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 -4.8



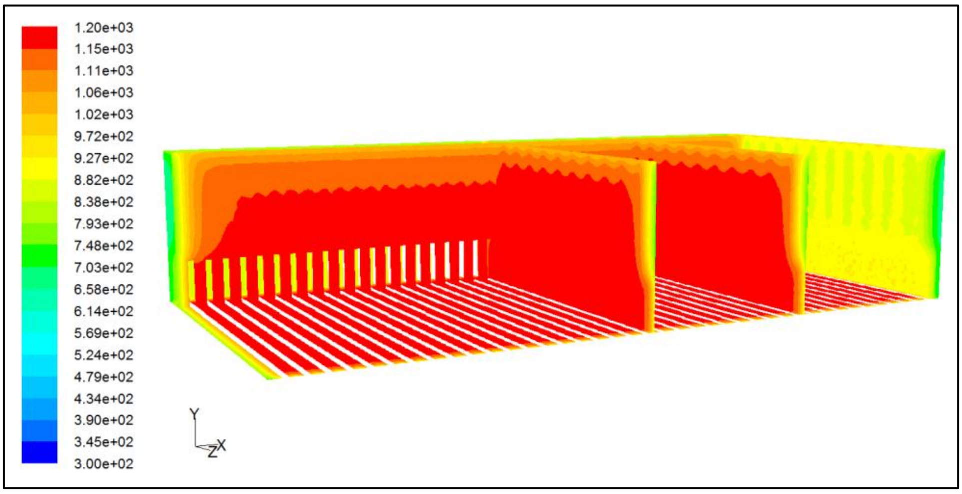
รูปที่ 4.1 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 1 (แบบจำลองต้นแบบ)



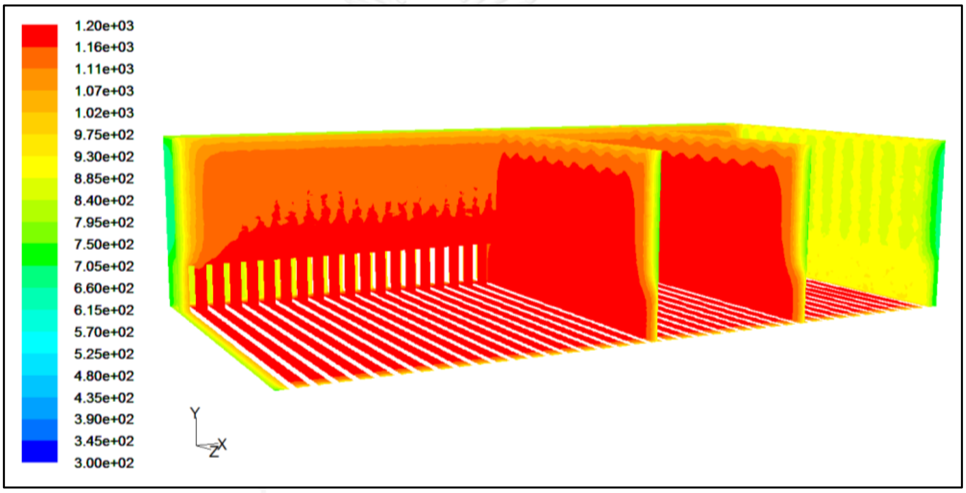
รูปที่ 4.2 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 2



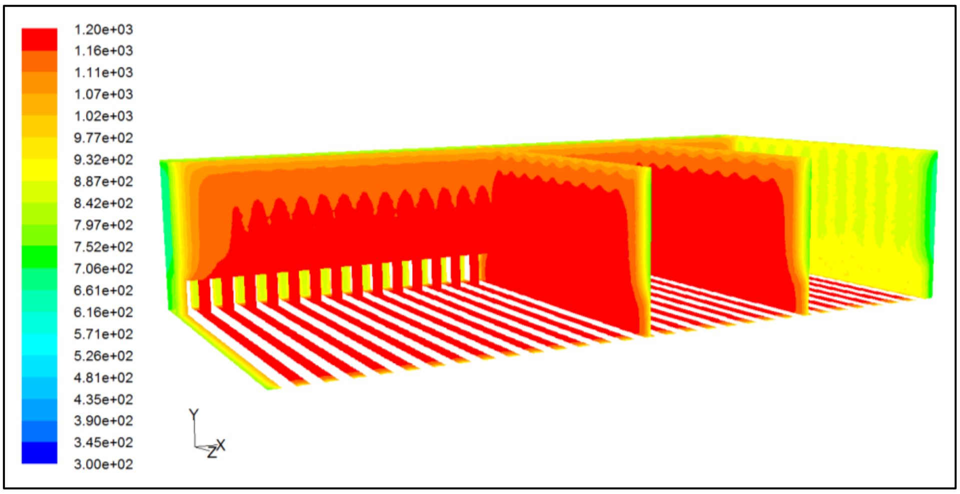
รูปที่ 4.3 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 3



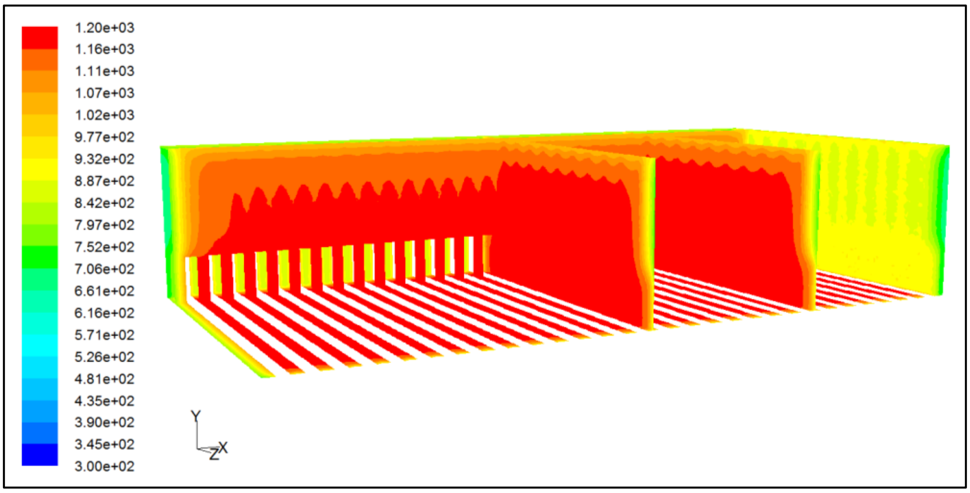
รูปที่ 4.4 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 4



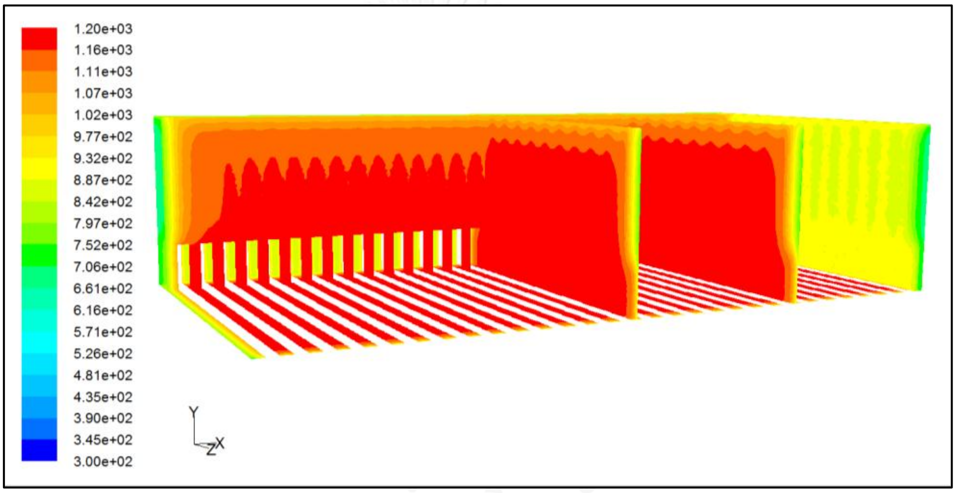
รูปที่ 4.5 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 5



รูปที่ 4.6 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 6



รูปที่ 4.7 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 7

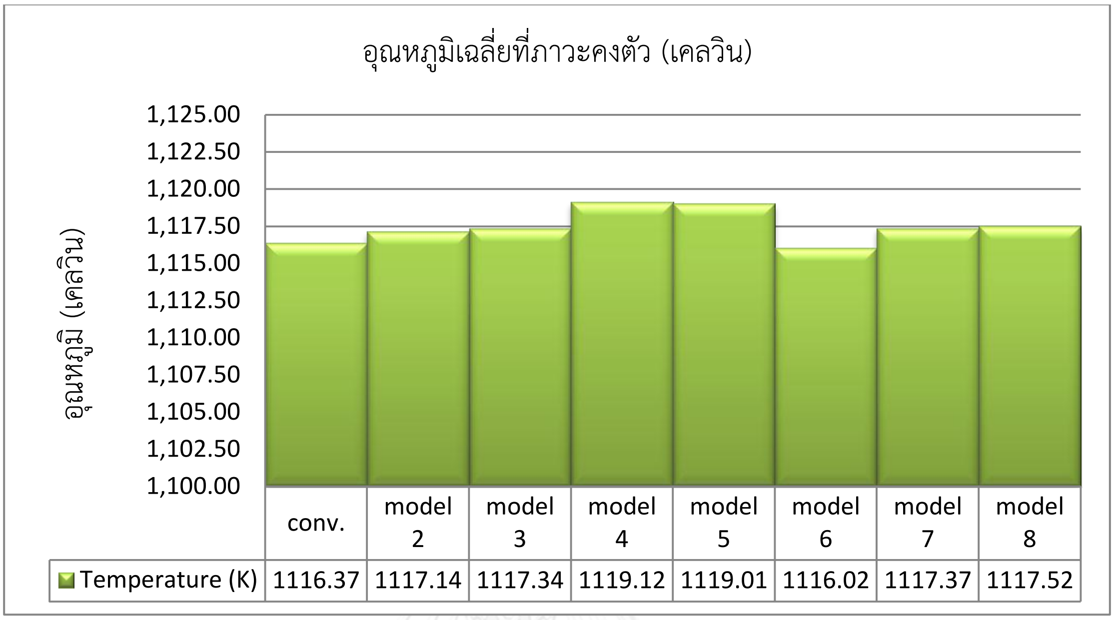


รูปที่ 4.8 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ 8

- <u>ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว</u>

หลังทำการจำลองกระบวนการโดยกำหนดให้มีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการจำลองอยู่ที่ 300 เคลวิน จากการเก็บผลเฉลยที่ภาวะคงตัว พบว่า แบบจำลองที่ให้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัวสูงที่สุด คือ แบบจำลองที่ 4, 5 และ 8 ตามลำดับ ตามที่ได้แสดงเป็นกราฟไว้ในรูปที่ 4.9 ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่มีขนาดความกว้างของช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (หรือสำหรับใส่เชื้อเพลิง) ที่ 7.5 ซม. นั้นมีค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัวสูงกว่าแบบจำลองที่มีความกว้างของช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (หรือสำหรับใส่เชื้อเพลิง) ที่ 15 ซม เนื่องจากการการกระจายตัวของช่องว่างที่มีขนาดความกว้าง 7.5 ซม. มีจำนวนถึง 40 ช่อง ซึ่งมากกว่าแบบจำลองที่มีขนาดช่องว่างความกว้างที่

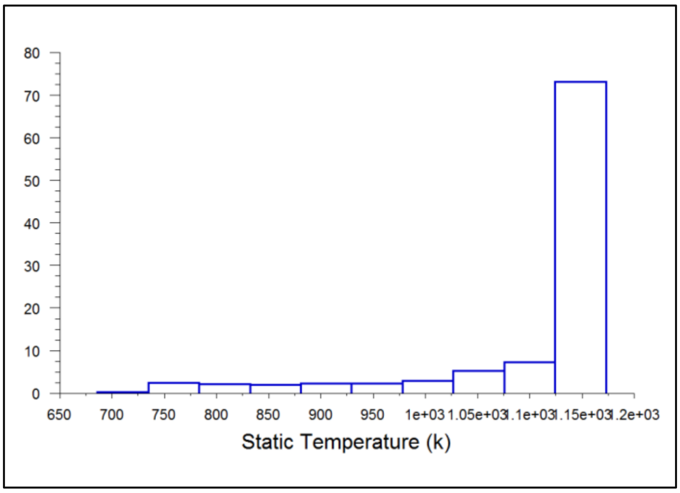
15 ซม. ดังนั้นการถ่ายโอนความร้อนระหว่างช่องว่าง กับผนังอิฐดินของแบบจำลองที่มีความกว้างของช่อง 7.5 ซม. จึงสูงกว่า



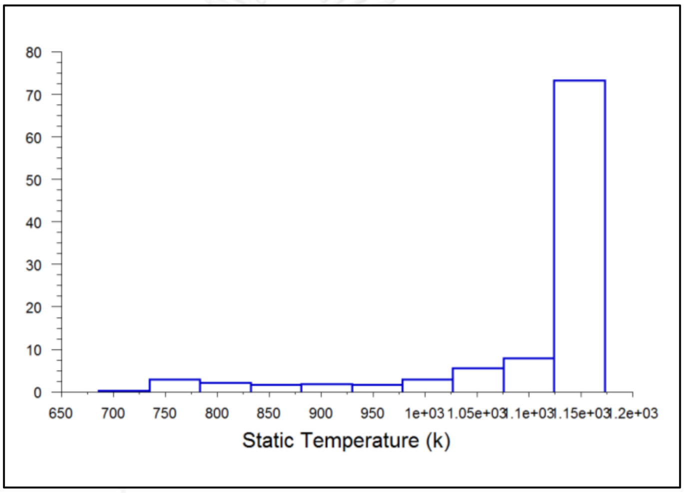
รูปที่ 4.9 แผนภาพเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงที่ระหว่างแบบจำลองต้นแบบ และแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้น

- <u>ผลของจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่ภาวะคงตัว</u>

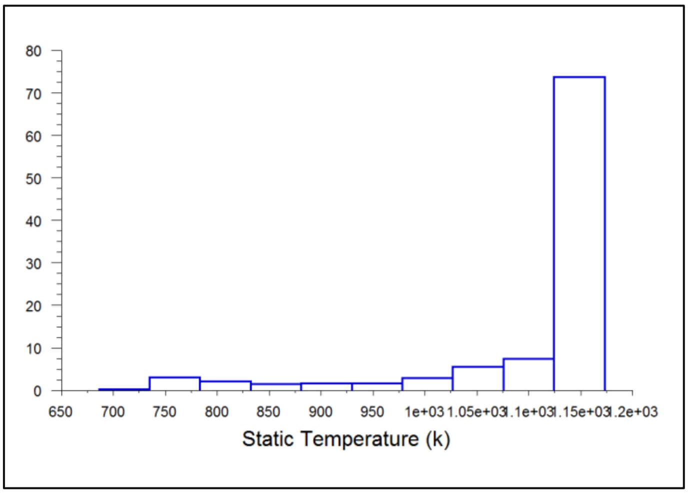
ผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่มีคุณภาพดี ตามมาตรฐาน มอก. ตัวผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาจะต้องถูกเผาที่อุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส จากการจำลองในงานวิจัยนี้ เมื่อทำการเก็บผลเฉลยที่ภาวะคงตัว พบว่า ผลของจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่ถูกเผาที่อุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส ของทั้ง 8 แบบจำลอง สามารถแสดงในรูปแบบของฮิสโตแกรม ในรูปที่ 4.10 – 4.17 ซึ่งค่าผลของจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่ถูกเผาที่อุณหภูมิในช่วงดังกล่าว สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.9 นอกจากนั้น ในตารางดังกล่าว ยังแสดงผลของจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณค่าจากการออกแบบไว้ด้วย



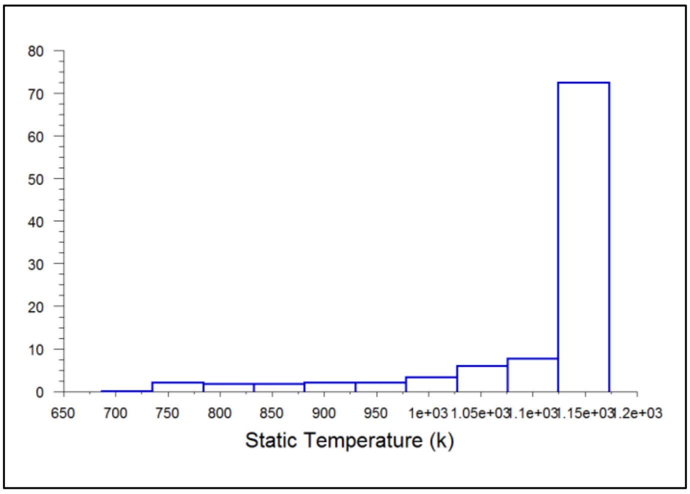
รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองต้นแบบ



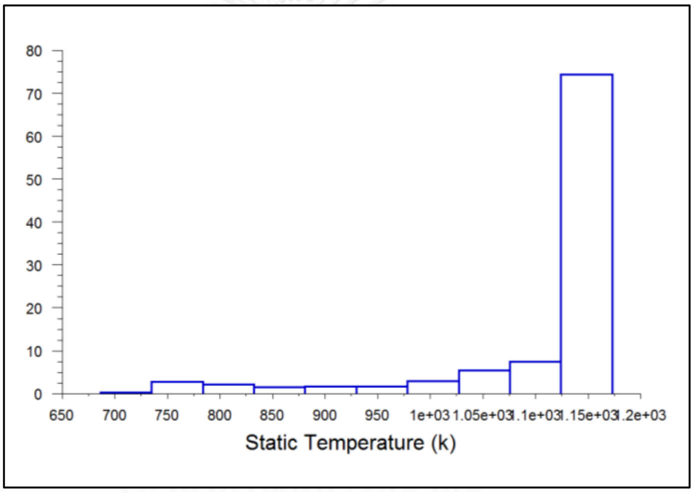
รูปที่ 4.11 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองที่ 2



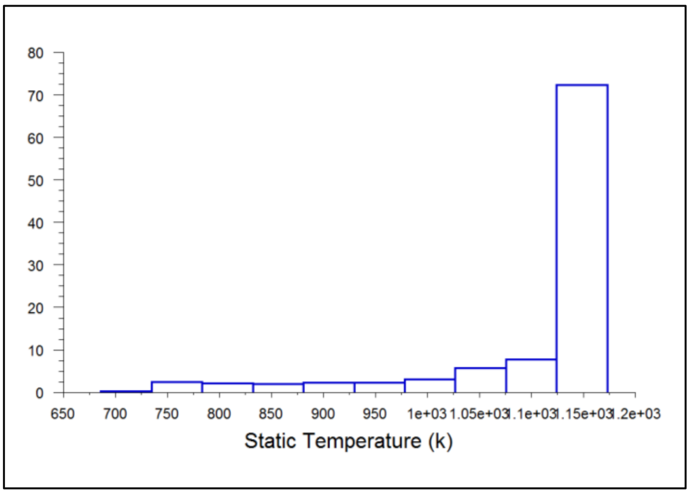
รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองที่ 3



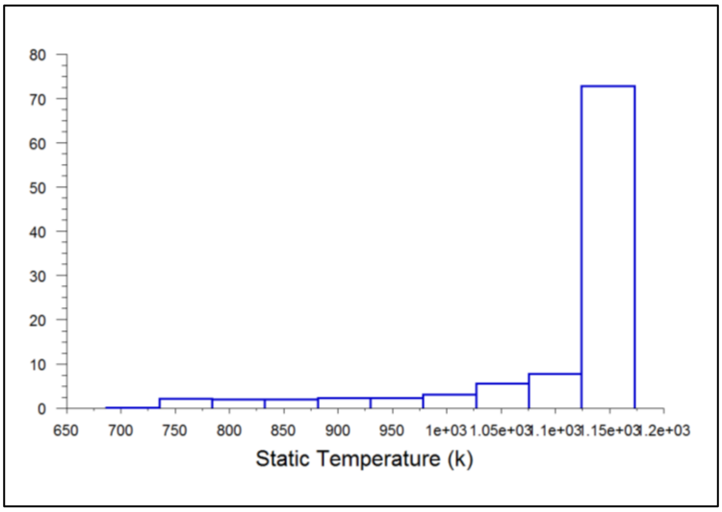
รูปที่ 4.13 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองที่ 4



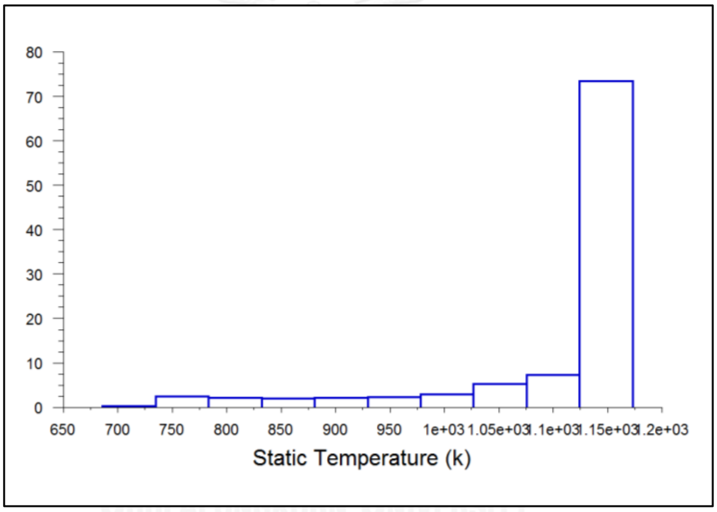
รูปที่ 4.14 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองที่ 5



รูปที่ 4.15 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองที่ 6



รูปที่ 4.16 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองที่ 7



รูปที่ 4.17 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวสำหรับแบบจำลองที่ 8

ผลที่ได้จากการจำลอง พบว่า การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของจำนวนปริมาตรรวมอิฐดินเผาทั้งหมด ขึ้นอยู่กับการออกแบบขนาดของเตาเผา และขนาดของช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (หรือสำหรับใส่เชื้อเพลิง) เป็นหลัก เพราะถ้าหากมีพื้นที่ของช่องว่างมาก ในขณะที่มีความสูงของเตาน้อย ก็จะทำให้จำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินที่จัดเรียงลดลงเมื่อเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ แต่หากพิจารณาที่ค่าร้อยละของอิฐดินเผาที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส จะพบว่า ทุกแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีค่าร้อยละปริมาตรรวมอิฐดินเผาที่มีคุณภาพดีกว่าแบบจำลองต้นแบบ โดยเฉพาะแบบจำลองที่มีความกว้างของช่อง 7.5 ซม. นั่นเพราะ เมื่อมีขนาดช่องว่างเล็กกว่า หมายถึงปริมาตรที่สามารถเรียงอิฐได้ก็จะมีสูงกว่า ซึ่งที่ความกว้างของช่อง 7.5 ซม. นี้ยังมี

การกระจายช่องว่างภายในเตาเผาอิฐดินมากกว่า เป็นผลให้การถ่ายโอนความร้อนดีกว่าแบบจำลองที่มีขนาดความกว้างขาเตา 15 ซม. ด้วย

จากปัญหาในงานอุตสาหกรรมอิฐดินเผาท้องถิ่น ในด้านผลของจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่ได้ มีการแตกหัก เสียหาย ที่มีมากถึงร้อยละ 15 ของจำนวนผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาทั้งหมด หากพิจารณาจากตารางที่ 4.1 แสดงผลจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาทั้งหมด และปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่มีคุณภาพ และสนใจตัวแปรตอบสนองเพียงจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่มีคุณภาพ จะพบว่า แบบจำลองที่สามารถแก้โจทย์ในข้อนี้ได้คือ แบบจำลองที่ 3 ซึ่งเมื่อได้มีการนำไปสร้างเตาเผาอิฐดินระบบจริง พบว่า มีการเพิ่มขึ้นของจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่มีคุณภาพ ลดการแตกหัก หรืออิฐดินที่ไม่ได้คุณภาพเหลือน้อยกว่าร้อยละ 5 ของจำนวนผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาทั้งหมด

ตารางที่ 4.1 ผลปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา สำหรับการจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา

แบบจำลองที่	ความสูงเตาเผา (ซม.)	ขนาดของช่องอากาศด้านล่าง (ซม.)		ร้อยละของจำนวนปริมาตรรวมผลิตภัณฑ์อิฐดินที่มีคุณภาพ	จำนวนปริมาตรรวมของผลิตอิฐดินเผา (ลบ.ซม.)	
		ความสูง	ความกว้าง		ทั้งหมด	ที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส
1 (ต้นแบบ)	225	45	15	84.941	191,291.209	162,484.666
2	200	45	7.5	86.079	182,051.282	156,708.046
3	225	45	7.5	86.949	206,291.209	179,368.238
4	200	60	7.5	86.914	178,095.238	154,790.318
5	225	60	7.5	87.405	202,335.165	176,851.028
6	200	45	15	86.048	168,058.608	144,611.729
7	200	60	15	86.536	162,124.542	140,296.057
8	225	60	15	86.294	185,357.143	156,708.046

<u>การคำนวณที่ภาวะไม่คงตัวของแบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา</u>

เพื่อทำการศึกษาผลของเวลาที่ให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัวนั้น การตั้งค่าเริ่มต้นในแบบจำลองนี้ จะมีความแตกต่างจากการจำลองในแบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ในการคำนวณที่สภาวะคงตัว คือ จะทำการจำลองแบบจำลองที่มีการไหลหนึ่งวัฏภาค มีการคำนวณที่ภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) พร้อมทั้งทำการคำนวณซ้ำ 40 ครั้งต่อหนึ่งเวลาคำนวณ

- <u>ผลของเวลาที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว</u>

สำหรับผลของเวลาที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัวในส่วนของการจำลองกระบวนการเผาอิฐดินนี้ต้องการได้ผลของเวลาที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่พัฒนาแล้วให้มีค่าต่ำลง เมื่อเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ ผลของการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งจะพบว่าแบบจำลองที่ให้ผลของเวลาที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัวต่ำที่สุด คือ แบบจำลองที่ 7, แบบจำลองที่ 8 และแบบจำลองที่ 6 ตามลำดับ

	conv.	model 2	model 3	model 4	model 5	model 6	model 7	model 8
Time	17.500	18.472	18.972	17.278	18.000	17.139	16.278	16.806

รูปที่ 4.18 แผนภาพเปรียบเทียบผลของเวลาที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัวระหว่างแบบจำลองต้นแบบ และแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้น

ผลของตัวแปรดำเนินการทั้ง 3 ด้าน จากการจำลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งในตารางประกอบไปด้วยผลของจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว และเวลาที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับการนำไปจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยาที่มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบ และการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบมีการเกิดปฏิกิริยา ในตารางที่ 4.2 จะทำการแสดงการเปรียบเทียบผล จากลำดับความสำคัญของแต่ละตัวแปรตอบสนอง โดยลำดับความสำคัญของตัวแปรตอบสนอง มาจากการศึกษาจากความต้องการพัฒนาภายในอุตสาหกรรมอิฐดินเผาท้องถิ่น ที่มีปัญหาในเรื่องจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้ รวมไปถึงการแตกหักของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาเมื่อมีการกระจายตัวของอุณหภูมิไม่ดี สามารถคำนวณตามสมการที่ (4.2) เพื่อทำการเลือกแบบจำลองที่มีผลดีที่สุดมาทำการจำลองในลำดับถัดไป

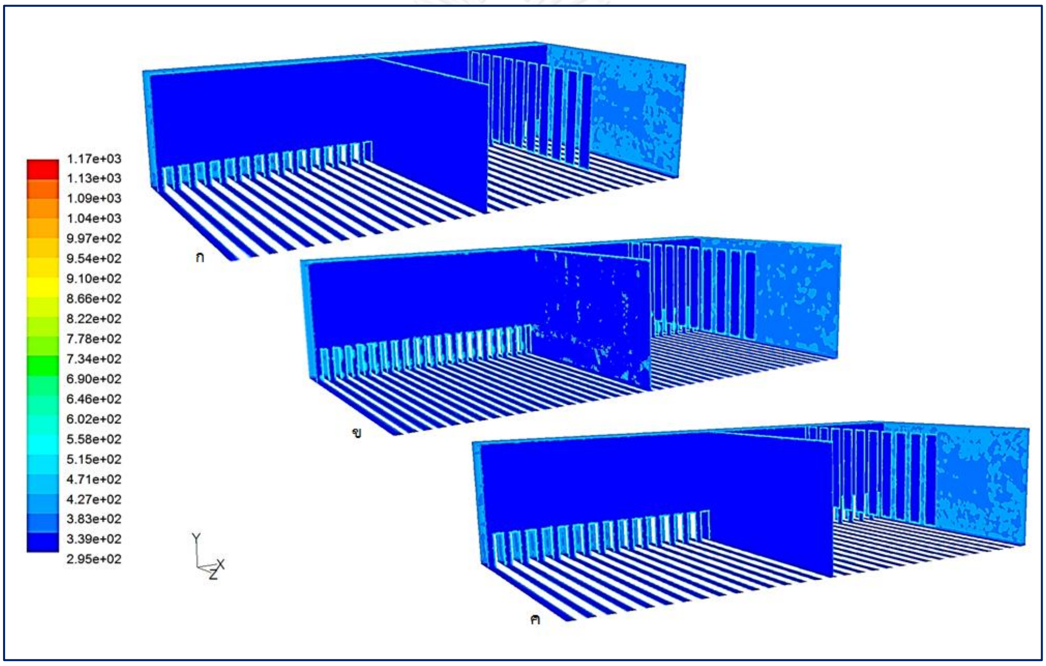
$$X = (a)\left(\frac{50}{100}\right) + (b)\left(\frac{25}{100}\right) + (c)\left(\frac{25}{100}\right) \tag{4.2}$$

ตารางที่ 4.2 สรุปลำดับความสำคัญสำหรับตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 ด้าน

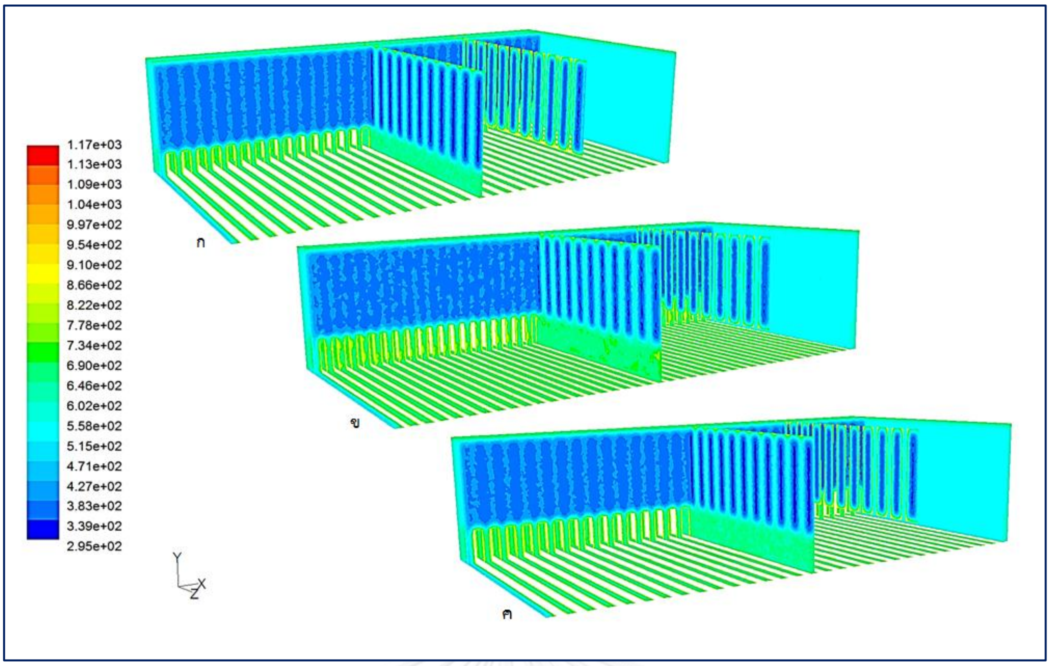
แบบจำลองที่	A	ลำดับ (a)	ร้อยละ	B	ลำดับ (b)	ร้อยละ	C	ลำดับ (c)	ร้อยละ	สรุปผลรวมลำดับ
1	164397.75	3	150	1116.37	7	175	17.50	5	125	450
2	156708.05	5	250	1117.14	6	150	18.47	7	175	575
3	179368.24	1	50	1117.34	5	125	18.97	8	200	375
4	154790.32	6	300	1119.12	1	25	17.28	4	100	425
5	176851.03	2	100	1119.01	2	50	18.00	6	150	300
6	144611.73	7	350	1116.02	8	200	17.14	3	75	625
7	140295.50	8	400	1117.37	4	100	16.28	1	25	525
8	159952.52	4	200	1117.52	3	75	16.81	2	50	325

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

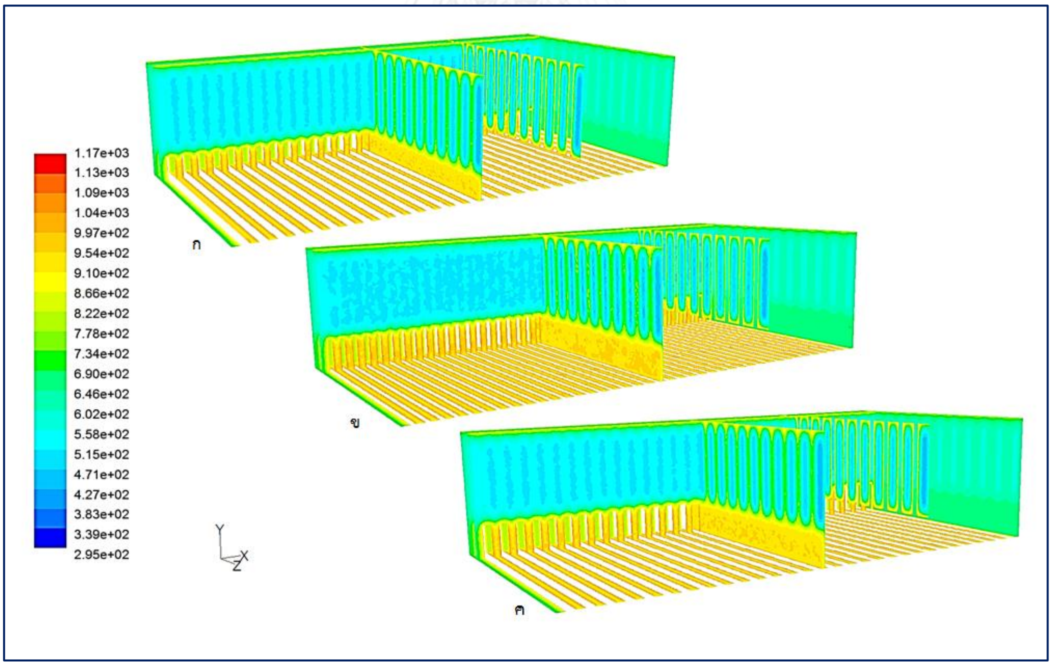
ผลรวมของลำดับความสำคัญสำหรับตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 ด้าน แสดงในตารางที่ 4.2 โดยที่ จำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ (A) อุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว (B) และเวลาที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว (C) จากตารางพบว่า แบบจำลองที่ให้ผลรวมของทั้งสามด้านที่เหมาะสำหรับนำไปพัฒนาต่อคือแบบจำลองแบบที่ 5 เพื่อเป็นการยืนยันผลจากตารางที่ 4.2 เราจึงทำศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองต้นแบบ กับแบบจำลองที่ 5 และแบบจำลองที่ให้ผลรวมของทั้งสามด้านดีเป็นอันดับที่สอง (แบบจำลองที่ 8) ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 4.19 - 4.22



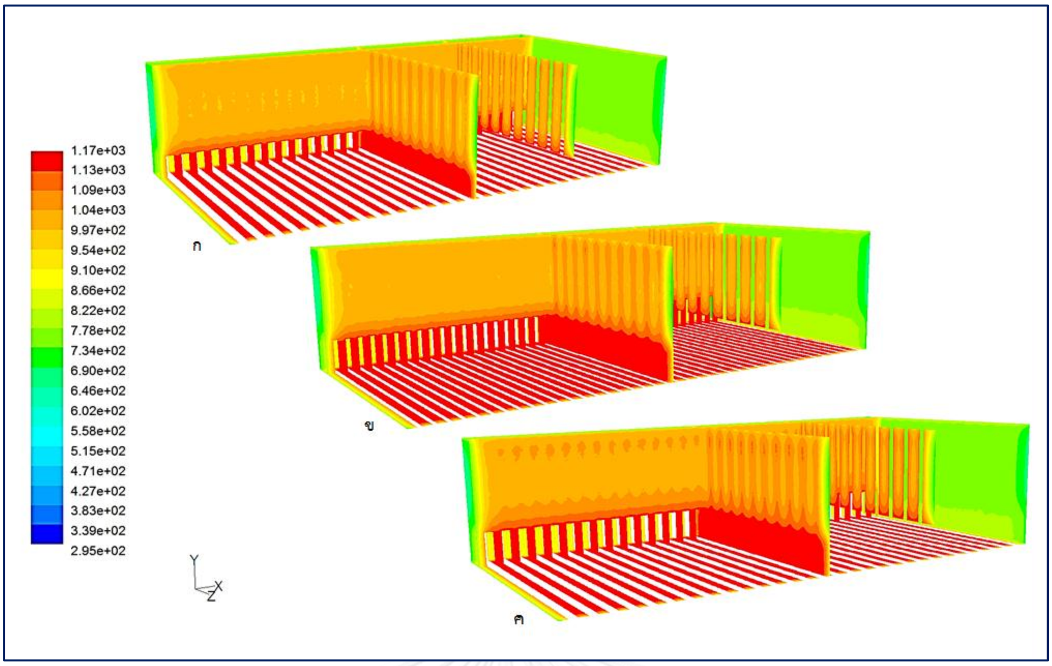
รูปที่ 4.19 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลา 100 วินาที ของ ก.) แบบจำลองต้นแบบเปรียบเทียบกับ ข.) แบบจำลองที่ 5 และ ค.) แบบจำลองที่ 8



รูปที่ 4.20 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลา 1,000 วินาที ของ ก.) แบบจำลองต้นแบบเปรียบเทียบกับ ข.) แบบจำลองที่ 5 และ ค.) แบบจำลองที่ 8



รูปที่ 4.21 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลา 10,000 วินาที ของ ก.) แบบจำลองต้นแบบเปรียบเทียบกับ ข.) แบบจำลองที่ 5 และ ค.) แบบจำลองที่ 8



รูปที่ 4.22 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลา 50,000 วินาที ของ ก.) แบบจำลองต้นแบบเปรียบเทียบกับ ข.) แบบจำลองที่ 5 และ ค.) แบบจำลองที่ 8

จากผลของรูปแบบการกระจายตัวที่แสดงข้างต้นในรูปที่ 4.11-4.14 แถบสีด้านข้างแสดงถึงค่าของอุณหภูมิ โดยสีแดงแสดงถึงอุณหภูมิที่สูงที่สุด (1,173 เคลวิน) และสีน้ำเงินแสดงถึงอุณหภูมิที่ต่ำที่สุด (300 เคลวิน) พบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองต้น และแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นทั้ง 2 แบบจำลอง มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่รวดเร็วกว่าและมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สูงกว่าแบบจำลองต้นแบบ เนื่องจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นทั้ง 2 แบบจำลอง มีพื้นที่หน้าตัดในการถ่ายโอนความร้อน และการกระจายตัวของช่องที่มากกว่าแบบจำลองต้นแบบจึงทำให้ได้ผลในการกระจายตัวของอุณหภูมิดีกว่าแบบจำลองต้นแบบ

4.1.3 ตัวแปรที่มีผลต่อการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดิน

เพื่อศึกษาแนวโน้มของกระบวนการเผาอิฐดินเผาให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น เราจึงนำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลมาช่วยในการวิเคราะห์ผลของการจำลองนี้ ด้วยวิธีการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง 2^3 ซึ่งจะประกอบไปด้วยตัวแปรดำเนินการทั้งหมด 3 ตัวแปร นั่นคือ ความสูงของเตาเผาอิฐดิน ความสูง และความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) โดยพิจารณาผลจากตัวแปรตอบสนอง 3 ตัวแปร นั่นคือ จำนวนปริมาตรรวม

ของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว และเวลาที่ให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว การจำลองค่าของตัวแปรดำเนินการทั้ง 3 ตัวแปร แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตัวแปรดำเนินการที่คาดว่ามีผลการเปลี่ยนแปลงและระดับของตัวแปร

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับ	
		-1	1
ความสูงของเตา (ซม.)	D	200	225
ความสูงของช่อง (ซม.)	E	45	60
ความกว้างของช่อง (ซม.)	F	7.5	15

การออกแบบการทดลอง (Experimental Design) จะสามารถจัดรูปแบบการทดลองที่มีประกอบไปด้วย 8 ชุดการทดลอง แสดงได้ดังตารางที่ 4.4 จากการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาผลของตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.4 การออกแบบการทดลองแบบ 2^3 ของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ และตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการจำลอง

แบบจำลองที่	ตัวแปรดำเนินการ			ตัวแปรตอบสนอง		
	D	E	F	ปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ (ลบ.ซม.)	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว (เคลวิน)	เวลาที่ให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว (ชม.)
1	225	45	15	164397.75	1116.37	17.50
2	200	45	7.5	156708.05	1117.14	18.47
3	225	45	7.5	179368.24	1117.34	18.97
4	200	60	7.5	154790.32	1119.12	17.28
5	225	60	7.5	176851.03	1119.01	18.00
6	200	45	15	144611.73	1116.02	17.14
7	200	60	15	140295.50	1117.37	16.28
8	225	60	15	159952.52	1117.52	16.81

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ของตัวแปรตอบสนองจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส

Source	Sum of Squares	DF	Mean Squares	F_0	p-value
Kiln height (D)	*1.13E+09*	*1*	*1.13E+09*	*1.83E+03*	*<0.0001*
Height (E)	*4.89E+07*	*1*	*4.89E+07*	*7.94E+01*	*0.0009*
Width (F)	*4.80E+08*	*1*	*4.80E+08*	*7.79E+02*	*<0.0001*
Residual	*2.46E+06*	*4*	*6.16E+05*		
Cor Total	*1.66E+09*	*7*			

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ของตัวแปรตอบสนองอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว

Source	Sum of Squares	DF	Mean Squares	F_0	p-value
Kiln height (D)	*0.171*	*1*	*0.171*	2.958	*0.1606*
Height (E)	*4.575*	*1*	*4.575*	79.369	*0.0009*
Width (F)	*3.430*	*1*	*3.430*	*59.494*	*0.0015*
Residual	*0.231*	*4*	*0.058*		
Cor Total	*8.406*	*7*			

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ของตัวแปรตอบสนองเวลาที่ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว

Source	Sum of Squares	DF	Mean Squares	F_0	p-value
Kiln height (D)	*0.557*	*1*	*0.557*	*27.903*	*0.0062*
Height (E)	*1.732*	*1*	*1.732*	*86.744*	*0.0007*
Width (F)	*3.125*	*1*	*3.125*	*156.522*	*0.0002*
Residual	*0.080*	*4*	*0.020*		
Cor Total	*5.494*	*7*			

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 ตัวแปร แสดงได้ดังตารางที่ 4.5 - 4.7 ในตารางที่ 4.5 เป็นการศึกษาตัวแปรตอบสนองจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวแปรดำเนินการทั้งสามตัวมีผลต่อจำนวนปริมาณของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด เนื่องจากให้ค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ตามทฤษฎีของการออกแบบการทดลองกำหนดไว้ว่า หากตัวแปรใดมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตัวแปรนั้นจะส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยมีลำดับความมีนัยสำคัญจากมากไปน้อยดังนี้ ค่าความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ความสูงของเตาเผาอิฐดิน และความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 เป็นการศึกษาตัวแปรตอบสนองอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว พบว่าตัวแปรดำเนินการที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัวคือ ความกว้าง และความสูงของช่อง เนื่องจากให้ค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งจากตารางที่ 4.5 นี้พบว่าแต่ตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญมากที่สุด คือ ความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ถัดมาคือความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และตัวที่ไม่มีผลต่ออุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัวคือความสูงของเตาเผาอิฐดิน

ตารางที่ 4.7 เป็นการศึกษาตัวแปรตอบสนองเวลาที่ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว พบว่าตัวแปรดำเนินการทั้ง 3 ตัวแปร มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อเวลาที่ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว เนื่องจากทั้ง 3 ตัวแปรดำเนินการให้ค่า p-value น้อยกว่า 0.05 แต่ตัวแปรที่มีผลมากที่สุด คือ ความกว้างของช่องตามแนวนอนสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ถัดมาคือความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และตัวที่มีผลน้อยที่สุด คือ ความสูงของเตาเผาอิฐดิน

ในส่วนถัดมาจะทำการหาแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression model) เพื่อให้ได้พื้นที่ผิวตอบสนอง (Response surface) สูงสุด ตัวแปรตอบสนองที่ใช้ในการจำลองการถดถอยนี้ประกอบไปด้วย 3 ตัวแปร จึงทำให้ได้แบบจำลองการถดถอยทั้งหมด 3 แบบจำลอง แสดงได้ดังสมการที่ (4.2), (4.3) และ (4.4) สมการที่ (4.2) เป็นแบบจำลองการถดถอยของตัวแปรตอบสนองจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส สมการที่ (4.3) เป็นแบบจำลองการถดถอยของตัวแปรตอบสนองอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว และสมการที่ (4.4) เป็นแบบจำลองการถดถอยของตัวแปรตอบสนองเวลาที่ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$Y_1 = 184450.55 + (11868.132*X_D) - (2472.527*X_E) - (7742.674*X_F) \quad (4.2)$$

$$Y_2 = 1116.3835 + (0.146*X_D) + (0.76*X_E) - (0.65*X_F) \quad (4.3)$$

$$Y_3 = 17.5556 + (0.26389*X_D) - (0.4653*X_E) - (0.625*X_F) \quad (4.4)$$

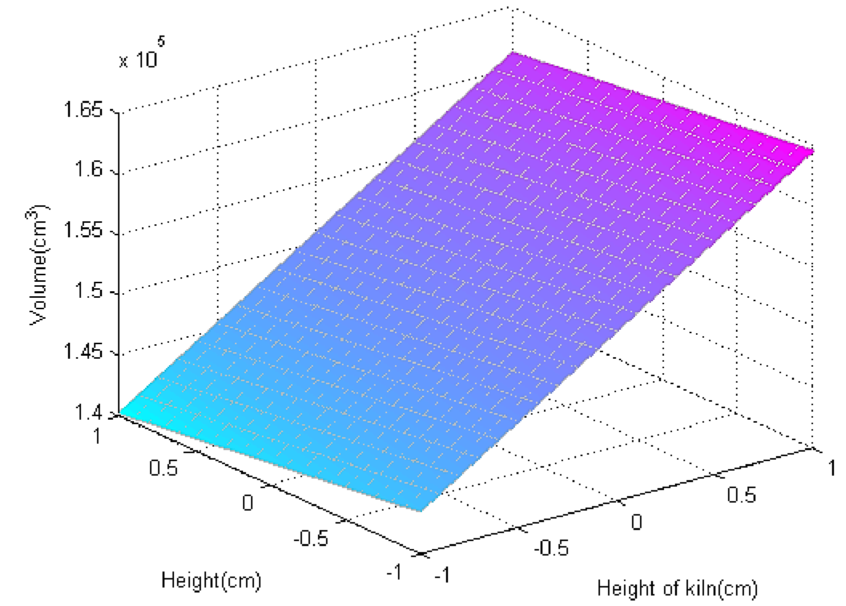
เมื่อ Y_1 คือ ปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส

Y_2 คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว

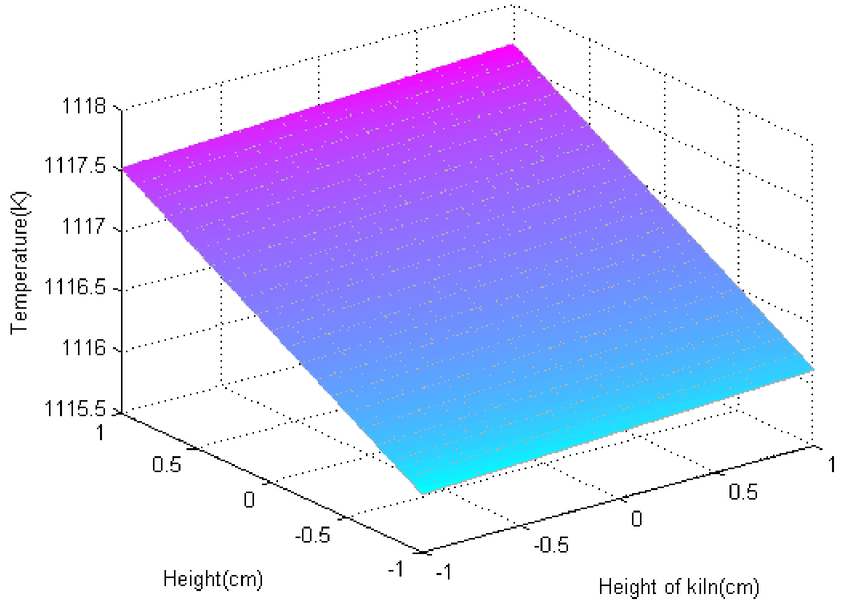
Y_3 คือ เวลาที่ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงที่

และ X_D, X_E, X_F คือ ค่ารหัสเข้าตัวแปร (Code variable) D (ความสูงของเตาเผา), E (ความสูงของช่อง) และ F (ความกว้างของช่อง) ตามลำดับ

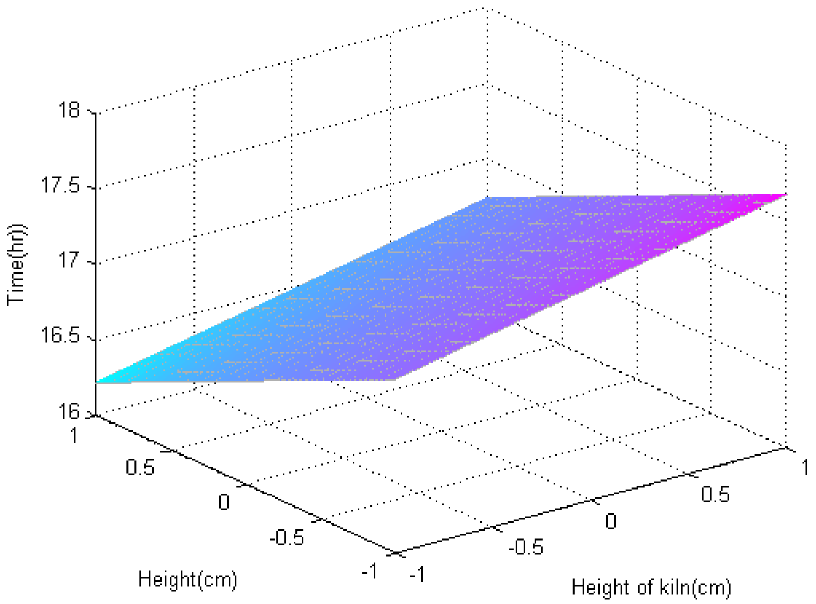
เมื่อนำสมการแบบจำลองการถดถอยนี้มาสร้างกราฟพื้นที่ผิวตอบสนองที่ความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) อยู่ที่ค่าต่ำ 7.5 ซม. ได้พื้นที่ตอบสนองสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 4.23, 4.24 และ 4.25 รูปที่ 4.23 แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนองจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส พบว่า จำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส จะมีค่ามากที่สุด เมื่อแบบจำลองเตาเผาอิฐดินนั้นมีค่าของความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) อยู่ที่ค่าต่ำ (45 ซม.) และต้องมีค่าความสูงของเตาเผาอยู่ที่ค่าสูง (225 ซม.) ถัดมาในส่วนของรูปที่ 4.24 แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนองอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัวจะมีค่าสูงสุด เมื่อแบบจำลองเตาเผาอิฐดินนั้นมีค่าของความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และค่าความสูงของเตาเผาอยู่ที่ค่าสูงทั้งคู่ นั่นคือ ค่าของความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) เป็น 60 ซม. และค่าความสูงของเตาเผาเป็น 225 ซม. และรูปภาพที่ 4.25 แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนองเวลาที่ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว พบว่าเวลาที่ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัวจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อค่าของความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) อยู่ที่ค่าสูง (60 ซม.) ในขณะที่มีค่าความสูงของเตาเผาอยู่ที่ค่าต่ำ (200 ซม.)



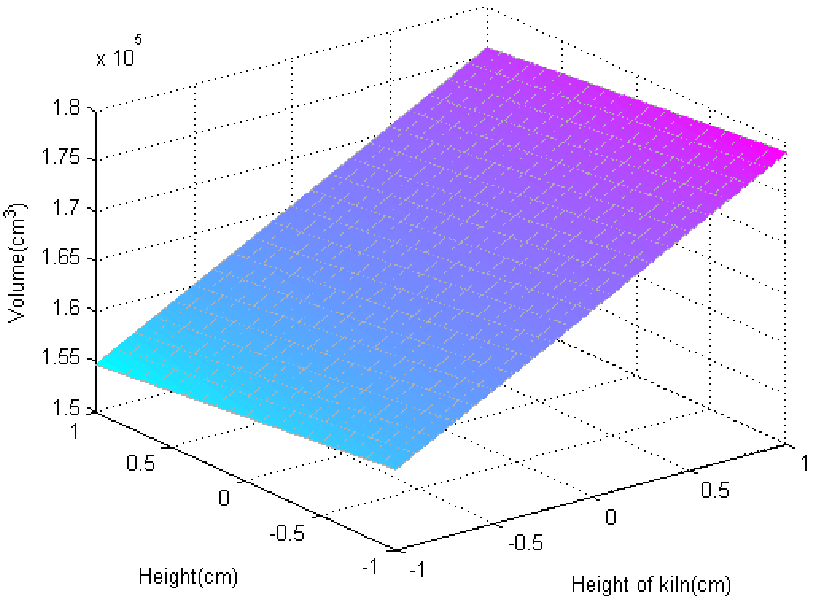
รูปที่ 4.23 พื้นผิวตอบสนองปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส ที่มีความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และค่าความสูงของเตาเผาแตกต่างกันเมื่อมีค่าความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ขนาด 7.5 ซม.



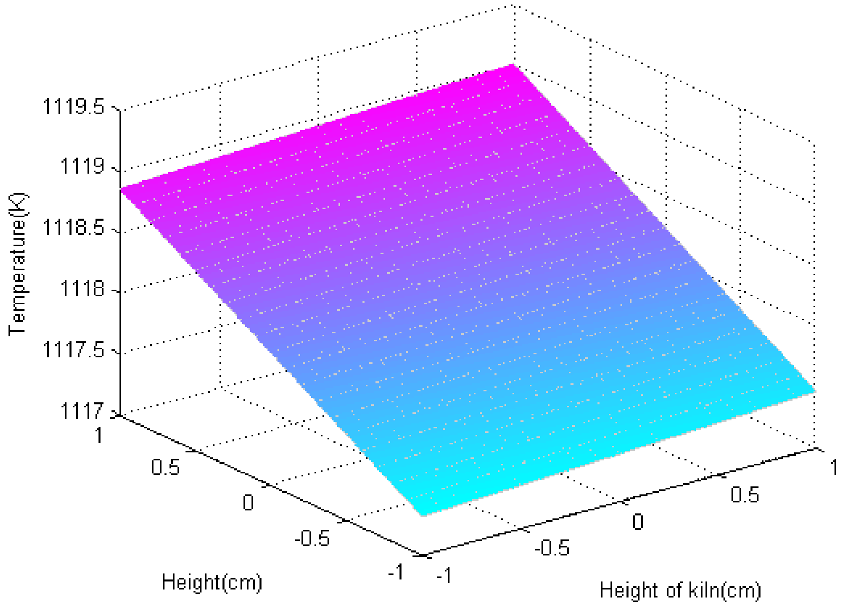
รูปที่ 4.24 พื้นผิวตอบสนองอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว ที่มีความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และค่าความสูงของเตาเผาแตกต่างกัน เมื่อมีค่าความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ขนาด 7.5 ซม.



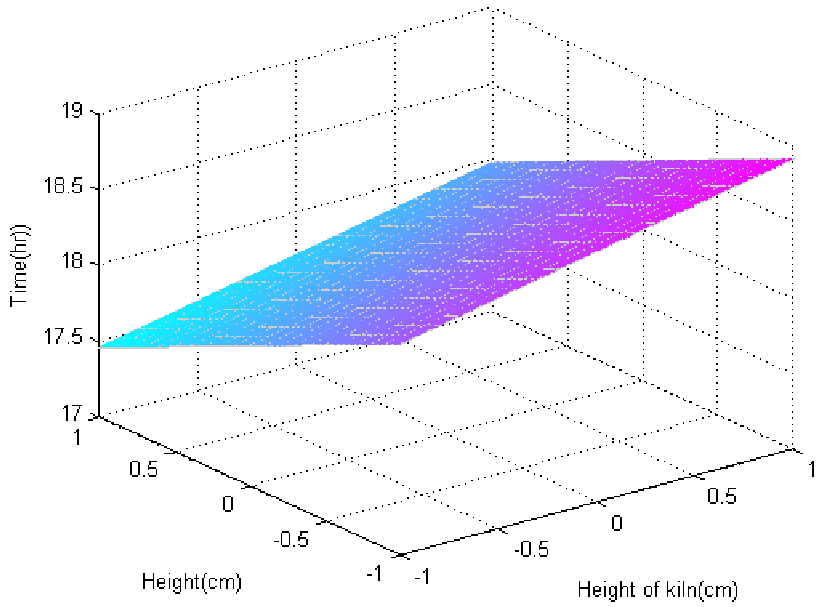
รูปที่ 4.25 พื้นผิวตอบสนองเวลาที่ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงที่ ที่มีความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และค่าความสูงของเตาเผาแตกต่างกัน เมื่อมีค่าความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ขนาด 7.5 ซม.



รูปที่ 4.26 พื้นผิวตอบสนองปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส ที่มีความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และค่าความสูงของเตาเผาแตกต่างกันเมื่อมีค่าความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ขนาด 15 ซม.



รูปที่ 4.27 พื้นผิวตอบสนองอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว ที่มีความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และค่าความสูงของเตาเผาแตกต่างกัน เมื่อมีค่าความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ขนาด 15 ซม



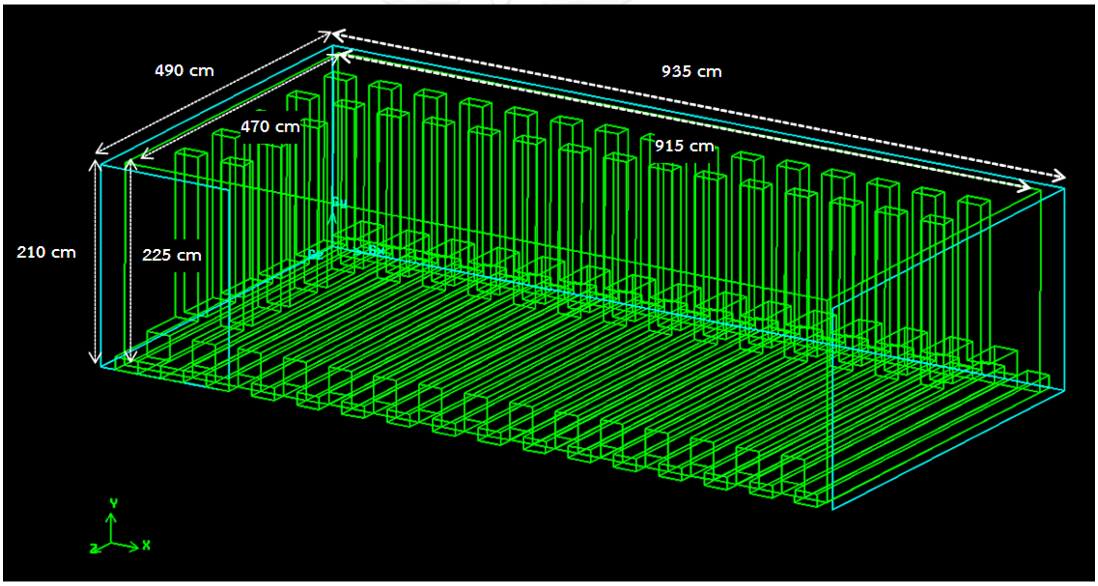
รูปที่ 4.28 พื้นผิวตอบสนองเวลาที่ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงที่ ที่มีความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และค่าความสูงของเตาเผาแตกต่างกัน เมื่อมีค่าความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ขนาด 15 ซม.

และเมื่อนำสมการแบบจำลองการถดถอยนี้มาสร้างกราฟพื้นที่ผิวตอบสนองที่ความกว้างของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) อยู่ที่ค่าต่ำ 15 ซม. ได้พื้นที่ตอบสนองสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 4.26, 4.27 และ 4.28 รูปที่ 4.26 แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนองจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส พบว่า จำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส จะมีค่ามากที่สุด เมื่อแบบจำลองเตาเผาอิฐดินนั้นมีค่าของความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) อยู่ที่ค่าต่ำ (45 ซม.) และต้องมีค่าความสูงของเตาเผาอยู่ที่ค่าสูง (225 ซม.) ถัดมาในส่วนของรูปที่ 4.27 แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนองอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัวจะมีค่าสูงสุดเมื่อแบบจำลองเตาเผาอิฐดินนั้นมีค่าของความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) และค่าความสูงของเตาเผาอยู่ที่ค่าสูงทั้งคู่ นั่นคือ ค่าของความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) เป็น 60 ซม. และค่าความสูงของเตาเผาเป็น 225 ซม. และรูปภาพที่ 4.28 แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนองเวลาที่ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว พบว่าเวลาที่ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัวจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อค่าของความสูงของช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) อยู่ที่ค่าสูง (60 ซม.) ในขณะที่มีค่าความสูงของเตาเผาอยู่ที่ค่าต่ำ (200 ซม.)

4.1.4 แบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาที่มีการป้อนอากาศร้อน

การจำลองแบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาที่มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบ ในส่วนนี้จะทำการศึกษาเพื่อยืนยันผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ว่ามีผลสอดคล้องกับแบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาหรือไม่ ด้วยการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดิน จากแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่ถูกสร้างขึ้นสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบ 3 มิติ ทำการจำลองแบบจำลองที่มีการไหลในหนึ่งวัฏภาค การคำนวณที่ภาวะคงตัวและไม่คงตัว มีวัสดุสำหรับการจำลองเดียวกับที่กล่าวไว้ในตอนต้น จากนั้น ทำการกำหนดให้แบบจำลองมีความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกในแนวแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิวโลก กำหนดในทิศทางติดลบของแนวแกน Y ของเตาเผาเป็น 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง การกำหนดภาวะขอบเขตอื่นๆ จะเป็นไปตามที่แสดงในหัวข้อ 3.5.3 ดังตารางที่ 3.5 เกิดปฏิกิริยา โดยกำหนดให้มีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการจำลองอยู่ที่ 300 เคลวิน พร้อมทั้งทำการคำนวณซ้ำ 40 ครั้งต่อหนึ่งเวลาคำนวณ

โดยแบบจำลองที่พัฒนาแล้วที่ถูกเลือกมาจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินในระบบนี้ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ คือ แบบจำลองที่ 5 แบบจำลองทั้งสองสำหรับการจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ที่มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบ แสดงดังรูปที่ 3.3 และ 4.29 ซึ่งแบบจำลองที่ 5 มีขนาดเตาเผาที่ความกว้าง 915 ซม. ความยาว 470 ซม. และ ความสูง 225 ซม. มีช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ตามแนวนอนทางด้านล่างของเตาขนาดความกว้าง 7.5 ซม. ความยาว 470 ซม. และ ความสูง 60 ซม. แล้วจึงทำการเชื่อมกับช่องที่มีจุดประสงค์เดียวกันตามแนวตั้งของเตาที่มีขนาดความกว้าง 7.5 ซม. ความยาว 10 ซม. และความสูง 225 ซม.



รูปที่ 4.29 รายละเอียดแบบจำลองเชิงเรขาคณิตสำหรับการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ที่มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบของแบบจำลองที่ 5

<u>การคำนวณที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ที่มีการป้อนอากาศร้อน</u>

- <u>ผลของจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่ภาวะคงตัว</u>

จากการจำลองที่ภาวะคงตัวของแบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ที่มีการป้อนอากาศร้อน พบว่า ผลของจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่ถูกเผาที่อุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส ของทั้ง 2 แบบจำลอง สามารถแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งผลจากการจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการจำลองในข้างต้นนั่นคือ แบบจำลองที่ 5 มีจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่ถูกเผาที่อุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส สูงกว่าแบบจำลองต้นแบบ

ตารางที่ 4. 8 ผลปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา สำหรับการจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบ

แบบจำลองที่	ความสูงเตาเผา (ซม.)	ขนาดของช่องอากาศด้านล่าง (ซม.)		ร้อยละของจำนวนปริมาตรรวมผลิตภัณฑ์อิฐดินที่มีคุณภาพ	จำนวนปริมาตรรวมของผลิตอิฐดินเผา	
		ความสูง	ความกว้าง		ทั้งหมด (ลบ.ซม.)	ที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส (ลบ.ซม.)
1 (ต้นแบบ)	225	45	15	86.781	191,291.209	166,004.424
5	225	60	7.5	92.264	202,335.165	186,682.571

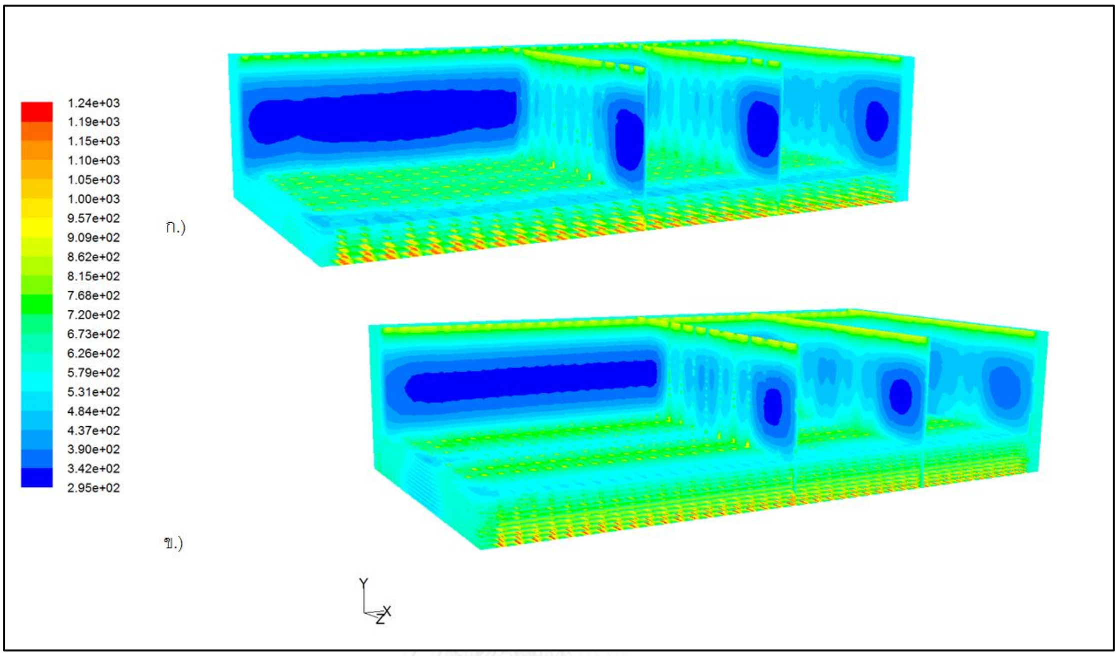
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

<u>การคำนวณที่ภาวะไม่คงตัวของแบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ที่มีการป้อนอากาศร้อน</u>

- <u>ผลของอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ</u>

ผลที่ได้จากการเก็บผลเฉลยจากการจำลอง แสดงดังรูปที่ 4.30 เพื่อศึกษากระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองต้นแบบ กับแบบจำลองที่ 5 พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลองที่ 5 สูงกว่าแบบจำลองต้นแบบ ซึ่งผลในส่วนนี้มีความสอดคล้องกับ การจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาในขั้นต้นนั้น จึงสามารถยืนยันได้ว่าการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยาทั้ง 2 กรณี มีผล

สอดคล้องกัน ดังนั้นไม่ว่าระบบจะมีการนำความร้อน หรือการพาความร้อนในกระบวนการก็ได้ผลการศึกษาเช่นเดิม

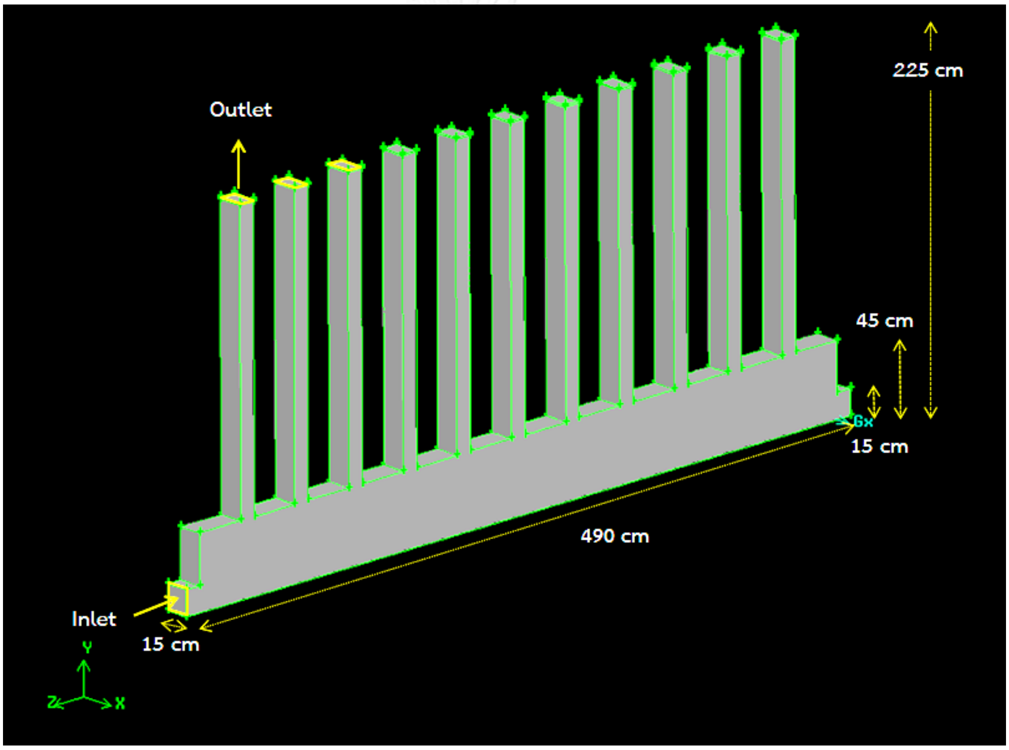


รูปที่ 4.30 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลา 50,000 วินาที ของ ก.) แบบจำลองต้นแบบเปรียบเทียบกับ ข.) แบบจำลองที่ 5

4.1.5 แบบจำลองที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในระบบ

การจำลองแบบจำลองที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในระบบ ของการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (หรือสำหรับใส่เชื้อเพลิง) ภายในเตาเผาอิฐดิน เพื่อศึกษาการช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล มีผลทำให้ได้ความร้อนสำหรับการถ่ายโอนให้ผนังอิฐดิน การจำลองดำเนินการภายใต้สภาวะไม่คงตัว เป็นแบบจำลองการไหลหลายวัฏภาคในแบบจำลองเชิงเรขาคณิตสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับแบบจำลองต้นแบบ และรูปที่ 4.31 สำหรับแบบจำลองที่ 5 ด้วยแนวคิดแบบออยเลอเลียน ที่สภาวะการจำลองแบบราบเรียบ ในส่วนของปฏิกิริยาเคมีสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่เพิ่มเข้ามาในการจำลองนี้ ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.3 การเลือกตัวแก้ปัญหาเป็นแบบ Segregated ที่แก้ปัญหาสมการอนุรักษ์พื้นฐานต่างๆ สมการของกระบวนการไหล และสมการเชิงสเกลาร์ (Scalar equation) อื่นๆ ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2 และกำหนดคุณสมบัติของแต่ละวัฏภาค

เป็นไปตามตารางที่ 3.3 ในส่วนของการคำนวณอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคของแรงต้านการเคลื่อนที่ (Interphase Drag Coefficient) กำหนดให้ใช้สมการของ Morsi-Alexander และใช้สมการของ Gunn ในการคำนวณอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคของการถ่ายโอนความร้อน การกำหนดภาวะขอบเขตที่ใช้ในการจำลองจะเริ่มจากการกำหนดความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกกำหนดในทิศทางติดลบของแนวแกน Y ของเตาเผาเป็น 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ค่าความเร็วลมอยู่ที่ 0.25 เมตรต่อวินาที และค่าความดันภายในระบบมีค่าเท่ากับ 101325 ปาสคัล ที่ภาวะขอบเขตอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 3.6 และการกำหนดการคำนวณแสดงดังหัวข้อที่ 3.5.4



รูปที่ 4.31 รายละเอียดของแบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการคำนวณสำหรับการจำลองพฤติกรรมที่มีการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลองที่ 5

ผลจากการจำลอง พบว่า ที่แบบจำลองทั้งสองมีเชื้อเพลิงเท่ากัน แบบจำลองที่ 5 มีการเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่าแบบจำลองต้นแบบ และแบบจำลองที่ 5 มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เวลาเดียวกันดีกว่าแบบจำลองต้นแบบ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการจำลองข้างต้น และงานวิจัยที่ผ่านมา ที่มีอุณหภูมิในการเผาไหม้เชื้อเพลิงสูงสุดอยู่ในช่วง 973 – 1,173 เคลวิน [30] ในตารางที่ 4.9 เป็นการแสดงผลของอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการจำลองในแต่ละแบบ ซึ่งจะพบว่าการกำหนด

ขอบเขตเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ได้จากการสำรวจในการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา และการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดินแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยาที่มีการป้อนอากาศร้อน ที่อุณหภูมิ 1,173 เคลวิน มีผลที่สอดคล้องกับงานวิจัย และช่วงอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับช่องว่างสำหรับการไหลของอากาศ (หรือสำหรับใส่เชื้อเพลิง) ภายในเตาเผาอิฐดิน ในแบบจำลองสุดท้าย

ตารางที่ 4.9 ผลการจำลองอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละแบบจำลอง

แบบจำลอง	ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา	ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ที่มีการป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ระบบ	มีการเกิดปฏิกิริยา	งานวิจัยอื่น [30]
อุณหภูมิ (เคลวิน)	1173	1173	953 – 1,127	973 – 1,173

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การสรุปผลการวิจัยสามารถแบ่งหัวข้อย่อยๆ ออกได้เป็น ดังนี้ 1. ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ และตัวแปรตอบสนองที่คาดว่าน่าจะมีผลกับการจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาสำหรับเตาเผาอิฐดิน 2. การเลือกแบบจำลองเตาเผาอิฐดินที่มีความเหมาะสมในการนำมาสร้างระบบจริง 3. จำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาของเตาเผาอิฐดินสำหรับแบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาที่มีการป้อนอากาศร้อน และ 4. การจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาของเตาเผาอิฐดินสำหรับแบบจำลองที่มีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิง

5.1.1 ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ และตัวแปรตอบสนอง

จากการศึกษาระบบเตาเผาอิฐดินที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ในชุมชนอำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ส่วนที่สามารถยังปรับปรุงได้ คือ ขนาดของช่องว่างที่บริเวณต่างๆ ของเตาหรือขนาดของเตาเผาอิฐดิน จึงนำมาสู่การศึกษาตัวแปรต้นที่เราใช้ในการวิจัยนี้ ผลที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล พบว่าแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขนาดของช่องว่างบริเวณต่างๆ ของเตาเผา และขนาดของเตาเผาอิฐดินนั่น มีผลของตัวแปรตามส่วนใหญ่เป็นไปในทางที่ดีกว่าเตาเผาอิฐดินต้นแบบ โดยสรุปได้ว่าปัจจัยความกว้างและความสูงของช่องตามแนวนอนด้านล่างเตาเผาส่งผลกระทบต่อเวลาที่ให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว แต่ในส่วนของการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลาต่างๆ และในส่วนของจำนวนปริมาณรวมของก้อนผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่มีคุณภาพนั้นจะขึ้นอยู่กับทั้ง 3 ปัจจัย

แบบจำลองที่ให้ตัวแปรตามที่ดีที่สุดในด้านต่างๆ มีดังนี้ แบบจำลองที่ให้จำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์มากที่สุดคือ แบบจำลองที่ 3 ที่มีจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงถึง 179,368.238 ลูกบาศก์เซนติเมตร และแบบจำลองที่ให้การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัวสูงที่สุดคือ แบบจำลองที่ 5 ที่มีอุณหภูมิ 844.95 องศาเซลเซียส รวมไปถึงแบบจำลองที่ 9 ที่ใช้เวลาที่ให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัวเร็วที่สุด

5.1.2 แบบจำลองเตาเผาอิฐดินที่มีความเหมาะสมในการนำมาสร้างระบบจริง

การเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่จะนำมาสร้างระบบจริงขึ้น เราจะเลือกจากแบบจำลองที่ให้จำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพมากที่สุด ตามความต้องการของโรงเผาที่ได้จากการสำรวจ นั่นคือ แบบจำลองที่ 3 ที่มีจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์สูงถึง 179,368.238 ลูกบาศก์เซนติเมตร มาสร้างระบบจริง โดยเมื่อมีการสร้างจริงได้ผลการเสียอิฐดินที่แตกหักลดน้อยลงกว่าร้อยละ 5 ที่มีขนาดเตาเผาดังนี้ ความกว้าง 915 ซม. ความยาว 470 ซม. และความสูง 200 ซม. มีช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ตามแนวนอนทางด้านล่างของเตา ขนาดความกว้าง 7.5 ซม. ความยาว 470 ซม. และความสูง 45 ซม. แล้วจึงทำการเชื่อมกับช่องที่มีจุดประสงค์เดียวกันตามแนวตั้งของเตาที่มีขนาดความกว้าง 7.5 ซม. ความยาว 10 ซม. และสูง 200 ซม. จากพื้นด้านล่างของเตาเผาแล้ว เตาเผาที่เหมาะสมที่จะนำมาสร้างระบบจริงอีกแบบจำลองหนึ่งน่าจะเป็นแบบจำลองที่ให้ผลของตัวแปรตามทั้ง 3 ด้านรวมกันดีมาเป็นอันดับหนึ่ง แบบจำลองที่ให้ตัวแปรตามทั้งสามด้านดีมาเป็นอันดับ 1 คือ แบบจำลองที่ 5 ที่มีขนาดเตาเผาดังนี้ ความกว้าง 915 ซม. ความยาว 470 ซม. และความสูง 225 ซม. มีช่องสำหรับการไหลของอากาศ (สำหรับใส่เชื้อเพลิง) ตามแนวนอนทางด้านล่างของเตา ขนาดความกว้าง 7.5 ซม. ความยาว 470 ซม. และความสูง 60 ซม. แล้วจึงทำการเชื่อมกับช่องที่มีจุดประสงค์เดียวกันตามแนวตั้งของเตาที่มีขนาดความกว้าง 7.5 ซม. ความยาว 10 ซม. และความสูง 225 ซม.จากพื้นด้านล่างของเตาเผา ที่มีจำนวนปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ 176,851.028 ลูกบาศก์เซนติเมตร การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัว 844.95 องศาเซลเซียส รวมไปถึงเวลาจำลองที่ให้อุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัวอยู่ที่ประมาณ 18 ชั่วโมง

5.1.3 การจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาของเตาเผาอิฐดินสำหรับแบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา และแบบจำลองที่มีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

สำหรับแบบจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาที่มีการป้อนอากาศร้อน เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดจากการพาความร้อนเนื่องจากอากาศร้อนเข้าสู่ระบบ และแบบจำลองที่มีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิง เพื่อศึกษาช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล มีผลทำให้ได้ความร้อนสำหรับการถ่ายโอนให้ผนังอิฐดิน เพื่อเป็นการยืนยันผลเฉลยในส่วนที่ 2 ที่ได้

จากการจำลอง เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองต้นแบบ กับแบบจำลองที่พัฒนาแล้ว แบบจำลองที่ 5 สำหรับการจำลองที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ที่มีการป้อนอากาศร้อน พบว่า แบบจำลองที่ 5 มีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวดีกว่าแบบจำลองต้นแบบ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัวมากกว่าแบบจำลองต้นแบบ โดยแบบจำลองต้นแบบมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัวที่ 1,078 เคลวิน ในขณะที่ แบบจำลองที่ 5 มีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ภาวะคงตัวที่ 1,093 เคลวิน และสำหรับการจำลองเกิดปฏิกิริยา พบว่า ที่เชื้อเพลิงของทั้งสองแบบจำลองเท่ากัน แบบจำลองที่ 5 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ดีกว่าแบบจำลองต้นแบบ และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางเดียวกับแบบจำลองที่ผ่านมา ซึ่งมีช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ที่ 953 – 1,127 เคลวิน ผลการทดลองของทั้ง 3 กรณี ที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมมีความสอดคล้องกัน โดยแบบจำลองที่ 5 มีความน่าเชื่อถือในการนำไปสร้างระบบเตาเผาอิฐดินขึ้นจริง เพื่อให้ได้ผลตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 ด้านที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาเตาเผาอิฐดินระบบจริงที่ใช้อยู่นั้น พบว่า การปรับปรุงแก้ไขในขั้นตอนการจัดเรียงนั้นค่อนข้างจะยุ่งยาก เนื่องจากในปัจจุบันการเรียงอิฐดิบจนเป็นเตาขนาดใหญ่ได้นั้นยังใช้กำลังคนในการสร้างขึ้น ซึ่งหากการจัดเรียงมีความซับซ้อนมากเกินไป จะทำให้ใช้เวลาในการผลิตอิฐดินมากกว่าเดิม รวมไปถึงต้นทุนในการจัดจ้างคนงานอีกด้วย นอกจากนั้น เรื่องรูปร่างของอิฐดินที่ไม่ได้มีสัดส่วนแต่ละด้านเท่ากันทุกก้อนก็เป็นอีกหนึ่งปัญหาสำคัญ เพราะเมื่อทำการจัดเรียงอาจทำให้เกิดการล้มของเตาเผาอิฐดินได้ ดังนั้นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขเพื่อการพัฒนาต่อยอด ควรจะเป็นปัจจัยอื่นๆ นอกจากที่เคยมีการศึกษามาแล้ว นั่นคือ อาจจะทำการศึกษา การเลือกใช้เชื้อเพลิงในการเผา โดยอาจจะมีการนำวัสดุเชื้อเพลิงใหม่ๆ ที่มีขนาดเล็กพอที่จะสามารถใส่เข้าไปในแต่ละช่องว่างตามบริเวณต่างๆของเตาเผา ที่มีค่าความจุความร้อนสูงกว่าแกลบ และมีต้นทุนที่ต่ำกว่า นอกจากนั้น การจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผา แบบเต็มรูปแบบก็เป็นอีกปัญหาที่สามารถนำมาพัฒนาปรับปรุงได้ เพื่อยืนยันผลของการจำลองให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ ให้ละเอียด ทั้งในเรื่องของการแบ่งพื้นที่การคำนวณในการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตสำหรับเตาเผาอิฐดิน หรือข้อจำกัดที่ไม่สามารถคำนวณอากาศที่ไหลผ่านบริเวณต่างๆ เช่น บริเวณที่มีความเหลื่อมกันของซอกอิฐดิน

รายการอ้างอิง

1. มอญ, in สยาม อารยะ 2537. p. 13-78.
2. แดงต้อย มาลี, อาชีพการทำอิฐ 2, Editor. 2542: สำนักพิมพ์ไทยวัฒนาพานิชน์.
3. วสันต์อินทีเรียร์คอนสทรัคเตอร์. วัสดุงานก่อสร้าง. Available from: http://www.meartprobuilt.com/buildingmetial/buildingmaterial.html.
4. *Brick Structure*. Available from: http://www.homestarthai.com/14891028/%E0%B8%AD%E0%B8%B4%E0%B8%90%E0%B8%A1%E0%B8%AD%E0%B8%8D.
5. *Concrete Masonry Unit Structure*. Available from: http://www.s-chaiwatana.com/products.html#).
6. *Autoclaved Aerated Concrete Structure*. Available from: http://www.hicem.com/en/knowledge_detail.php?bid=5.
7. รณิดา สัมฤทธิ์โพธิ์ทอง, องค์ความรู้ "การทำอิฐมอญ" ตำบลโพธิ์สามต้น อำเภอบางปะหัน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา. 2555.
8. รศ.ดร.วิชา ทรวงแสวง. ศิลปะ การช่าง การทำอิฐ Available from: http://ilwc.aru.ac.th/Content?ArtCraftThai/ArtCraftThai45.htm
9. ไชยยันต์ ปานะจานงค์ เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชา *Basic Material and Construction*
10. ศ.ดร. ปรีดา วิบูลย์สวัสดิ์, การวิเคราะห์พลังงาน, 1, Editor. 2529: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
11. ชัยศักดิ์ ชาตรีจันทร์สกุล, การจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมของเตาเผาเครื่องปั้นดินเผาในจังหวัดราชบุรี, in สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานคณะพลังงานและวัสดุ 2545, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
12. Yoshihiko Takamura, เทคนิคการประหยัดความร้อนในอุตสาหกรรม. 2543: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย — ญี่ปุ่น). p. 159 – 184
13. มะลิ หุ่นสม, in ปรากฏการณ์ถ่ายโอนโมเมนตัม ความร้อน และมวลขั้นพื้นฐาน. 2551: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
14. Brid, R.B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N.,, *Transport Phenomena*. 2nd Edition ed, ed. J.W. Sons. 2001.

15. ประกิต ชูหว่าง, การเพิ่มการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องแรกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นโดยผลกระทบร่วมของการเคลื่อนที่แบบสลับและกระตุ้นให้เกิดการปั่นป่วน, ในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2551, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

16. Douglas C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*. 5th Edition ed, ed. J.W. Sons. 2001.

17. Thomas Haslwanter. *Basic Principle for Numerical, Scotter plots & Box plots*. Available from: http://work.thaslwanter.at/Start/html/statsBasics.html.

18. L. M. de la Cruz and D. Monsivais, *Parallel numerical simulation of two-phase flow model in porous media using distributed and shared memory architectures.* Geofísica Internacional, 2014. **53**(1): p. 59-75.

19. สุทัศน์ จันบัวลา และคณะ, การพัฒนาผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาจังหวัดสิงห์บุรี. วารสารวิจัย มสด. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2552. **1**: p. 15-24.

20. สุทัศน์ จันบัวลา, การพัฒนาส่วนผสมผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาจังหวีดพระนครศรีอยุธยา และอ่างทอง. วารสารวิจัย มสด, 2555. **1**(5): p. 13-21.

21. Jiapeng Sun, L.F., Jing Han,, *Optimization of concrete hollow brick using hybrid genetic algorithm combining with artificial neural networks.* . International Journal of Heat and Mass Transfer 2010. **53**: p. 5509–5518.

22. N. Chanwal, D.I., K. S. M. S. Raghavarao, C. Anandharamakrishnan,, *Computational fluid dynamics modeling of bread baking process.* Food Research International, 2011. **44**: p. 978-983.

23. Zinedine Khatir, J.P., Harvey Thompson, Nik Kapur, Vassili Toropov, Malcolm Lawes, Daniel Kirk,, *Computational fluid dynamics (CFD) investigation of air flow and temperature distribution in a small scale bread-baking oven.* Applied Energy 2012. **89**: p. 89-96.

24. S. Prasertsan, T.T., G. Prateepchaikul and P. Kirirat,, *Development of an Energy – Efficient Brick Kiln.* International Journal of Energy Research, 1997. **21**: p. 1363-1383.

25. S. Prasertsan, G.P.a.N.C., *Energy Crisis in Birck Making Industry in Thailand.* , R&D Journal of the Engineering Institute of Thailand, 1995. **6**(1): p. 56-65.

26. D. Gidaspow, *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Description,* 1994.

27. *Fluent 6.2.16 User's Guide* 2003.

28. Wang Shuai, C.J., Liu Guodong , Lu Huilin, Zhao Feixiang, Zhang Yanan,, *Predictions of coal combustion and desulfurization in a CFB riser reactor by kinetic theory of granular mixture with unequal granular temperature.* Fuel Processing Technology 2014. **126**: p. 163-172.

29. R. Rajan, C.Y.W., *A comprehensive model for fluidized bed coal combustors.* AIChE Journal 1980. **26**: p. 642-655.

30. Jun Li, M.C.P., Paul L. Younger, Ian Watson, Mamdud Hossain, Stephen Welch,, *Characterization of biomass combustion at high temperatures based on an upgraded single particle model.* Applied Energy 2015. **156** p. 749–755.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

โปรแกรมเพิ่มเติมที่ใช้ในการจำลองภาวะบนโปรแกรม ANSYS Fluent

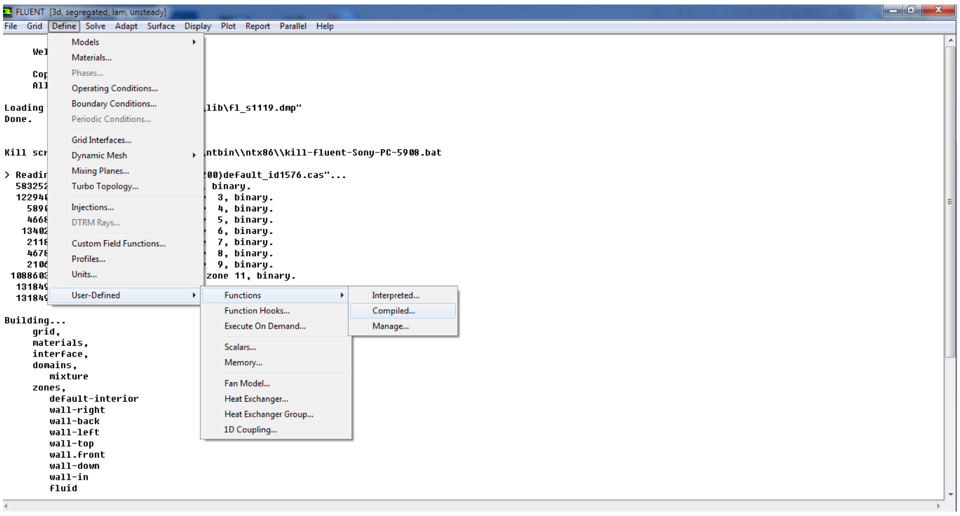
งานวิจัยส่วนนี้เป็นการจำลองกระบวนการเผาของเตาเผาอิฐดิน ในส่วนของการคำนวณปฏิกิริยาเคมีนั้น จะต้องทำการเขียนฟังก์ชันเพิ่มเติม ดังแสดงในบทที่ 3 ในส่วนของปฏิกิริยาเคมีตามสมการที่ (3.20) และ (3.21) ที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นสมการที่ (3.22) และสมการที่ (3.23)

การเขียนฟังก์ชันเพิ่มเติม เราสามารถเขียนขึ้นด้วยโปรแกรม User Define Function หรือ UDF ซึ่งเป็นการเขียนภาษา C จากนั้น จึงนำไฟล์ที่มีคำสั่งทั้งหมดบันทึกในรูปแบบไฟล์ udf.h ดังกล่าวไปทำการ Compile ในโปรแกรม ANSYS Fluent การเขียนคำสั่งสำหรับใช้งานสามารถเขียนได้จากหลากหลายโปรแกรม ยกตัวอย่างเช่น การเขียนคำสั่งจากโปรแกรมแก้ไขข้อความ (Text Editor) หรือ โปรแกรมที่ใช้แปลภาษา ซี (Dev C++) จากนั้น ทำการบันทึกข้อมูลเป็นแฟ้มนามสกุล C แล้วจึงนำไปแปลโปรแกรม (Interpreted) ให้อยู่ในรูป udfconfig โดยการเขียนคำสั่งทุกครั้งจะต้องเขียนคำสั่ง #include udf.h ขึ้นหัวแฟ้มเสมอ

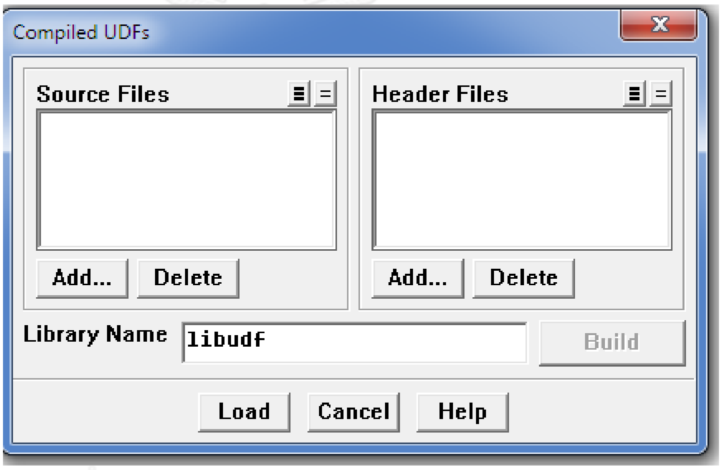
ขั้นตอนในการเรียกใช้ฟังก์ชันเพิ่ม และการใช้งานภายในโปรแกรม ANSYS Fluent

1. ทำการสร้างไฟล์ต้นฉบับของ UDF (udf.h) ในสารบบ (Directory) เดียวกับไฟล์ที่ใช้ดำเนินงานของโปรแกรม ANSYS Fluent
2. เริ่มโปรแกรม ANSYS Fluent ภายในสารบบเดียวกับข้อข้างต้น
3. โหลดไฟล์งานที่ต้องการ Compile เข้าสู่โปรแกรม ANSYS Fluent
4. เปิดหน้าต่างในการ Compile ไฟล์ UDF ภายใน โปรแกรม ANSYS Fluent จากคำสั่ง Define User --> Defined Functions --> Complied... ดังแสดงในรูปที่ ก.1
5. ในหน้าต่าง Compiled UDFs เป็นการเลือกไฟล์รหัสต้นฉบับโดยกดปุ่ม Add ภายใต้หัวข้อคำสั่ง Source Files ซึ่งจะเป็นการเปิดหน้าต่างเลือกไฟล์ (Select File) ขึ้นมาดังรูปที่ ก.2 หลังจากนั้นทำการเลือกไฟล์รหัสต้นฉบับที่ต้องการ Compiled รูปที่ ก.3
6. จากนั้นกดคำสั่ง Build เพื่อทำการ Compile รหัสต้นฉบับ UDF นำเข้าไฟล์ที่ทำการ Compile สำเร็จแล้วสู่โปรแกรม Fluent โดยการกดปุ่มคำสั่ง Load

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

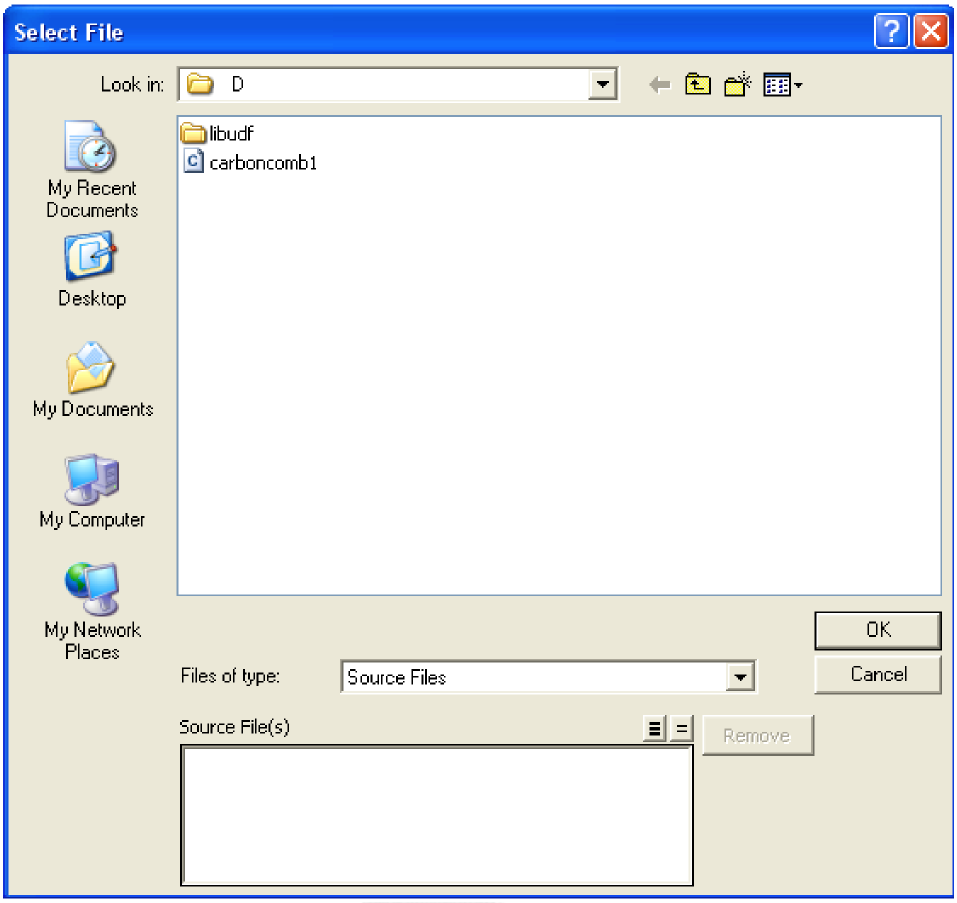


รูปที่ ก.1 การเลือกเข้าคำสั่ง Compile โดยโปรแกรม ANSYS Fluent

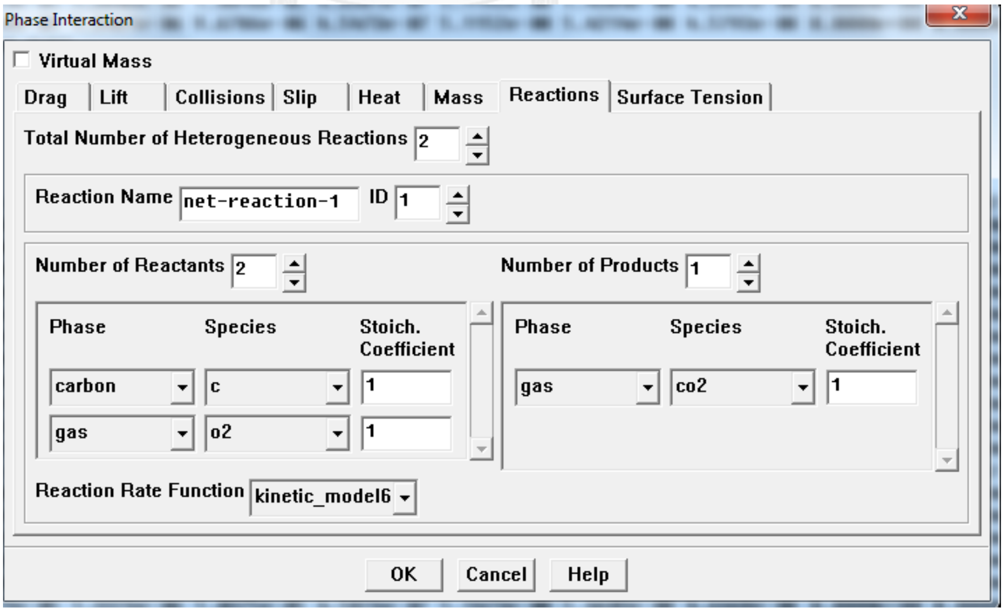


รูปที่ ก.2 หน้าต่างคำสั่ง Compile ของโปรแกรม ANSYS Fluent

7. หลังจากทำการนำเข้าเรียบร้อยแล้ว เราสามารถใช้งานฟังก์ชันที่เพิ่มเติมในโปรแกรม ANSYS Fluent ได้ อย่างในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการกำหนดค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และค่าคงที่ของปฏิกิริยาเคมีที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 ข้างต้นแล้ว โดยเข้าคำสั่ง Define --> Phase --> Interaction... แสดงดังรูปที่ ก.4 จากนั้นเลือกคำสั่ง Reactions และทำการใส่สมการปฏิกิริยาเคมีลงไปในส่วนของ Reaction Rate Function โดยให้เลือกแฟ้มที่เราทำการแปล UDF แล้ว



รูปที่ ก.3 หน้าต่างคำสั่งเลือกไฟล์รหัสต้นฉบับ



รูปที่ ก.4 หน้าต่างในการตั้งสมการปฏิกิริยา ภายในโปรแกรม ANSYS Fluent

รูปที่ ก.5 แสดงการเขียนคำสั่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมี สำหรับแบบจำลองพฤติกรรมกระบวนการเผาของเตาเผาอิฐดิน ซึ่งแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.3 การจำลองปฏิกิริยาเคมีในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 2 ปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาเคมีวิวิธพันธุ์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแสดงได้ดังนี้

สมการปฏิกิริยาเคมีเชื้อเพลิงดังนี้

$C(s) + O_2(g) \longrightarrow CO_2(g)$ ปฏิกิริยา (1)

$C(s) + \frac{1}{2}O_2(g) \longrightarrow CO(g)$ ปฏิกิริยา (2)

โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเป็น

$$R_6 = \frac{6\alpha_{s1}\rho_{s1}Y_c}{d_{s1}\rho_c}k_6Y_{O_2}$$

เมื่อ $$k_6 = \frac{\frac{RT_{S1}}{M_C}}{\frac{1}{k_{cr}}-\frac{1}{k_{cd}}}$$

$$\frac{1}{k_{cr}} = -8{,}910\exp(\frac{-1.4947\times10^8}{RT_{S1}})$$

และ $$\frac{1}{k_{cd}} = \frac{Sh\varphi(D_g+\frac{\mu_g}{\rho_g Sct})M_C}{d_{s1}RT_g}$$

```
#include "udf.h"
DEFINE_HET_RXN_RATE(kinetic_model6,c,t,hr,wk,yk,rr,rr_t)
```

---> *Include header file and define constant*

```
{
        Thread **pt = THREAD_SUB_THREADS(t);
        Thread *gas = pt[0];
        Thread *carbon = pt[1];
        real k6, kcr, kcd, Re, Sc, velo;
        real T_carbon = C_T(c,carbon);
                if(Data_Valid_P())
                {
                        kcr = 8910.0*exp((-1.4947*pow(10,8))/(UNIVERSAL_GAS_CONSTANT*T_carbon));
                        velo = sqrt(C_U(c,gas)*C_U(c,gas) + C_V(c,gas)*C_V(c,gas));
                        Re = C_R(c,gas)*650*pow(10,-4)*velo/C_MU_L(c,gas);
                        Sc = C_MU_L(c,gas)/(C_R(c,gas)*2.88*pow(10,-5));
                        kcd = (((2+(0.552*pow(Re,0.5)*pow(Sc,0.333)))*(2.88*pow(10,-5)+(C_MU_L(c,gas)/(C_R(c,gas)*Sc))))*wk[1][0])/(650*pow(10,-
4)*UNIVERSAL_GAS_CONSTANT*C_T(c,gas));
                        k6 = (UNIVERSAL_GAS_CONSTANT*T_carbon/wk[1][0])/((1/kcr)+(1/kcd));
                        *rr = (6*C_VOF(c,carbon)*C_R(c,carbon)*(yk[1][0])/(650*pow(10,-4)*1400))*k6*(yk[0][2]*C_R(c,gas)/(wk[0][2]));
                        *rr_t= *rr;
                }
}
```

---> *Reaction rate And kinetic constant function*

รูปที่ ก.5 แสดงไฟล์รหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสาริศา เจริญใจ เกิดเมื่อวันเสาร์ที่ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2532 กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร เมื่อปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University