

แนวทางการวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับศึกษาการยึดเหนี่ยว
ระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีตทนไฟ

A FINITE ELEMENT APPROACH FOR BONDING IN ANCHORED
CASTABLE REFRACTORY STUDY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-030-133

แนวทางการวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับศึกษาการยึดเหนี่ยว
ระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีตทนไฟ

A FINITE ELEMENT APPROACH FOR BONDING IN ANCHORED
CASTABLE REFRACTORY STUDY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-030-133

A FINITE ELEMENT APPROACH FOR BONDING IN ANCHORED
CASTABLE REFRACTORY STUDY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018
KMITL-2018-EN-M-030-133



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ แนวทางการวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับศึกษาการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีตทนไฟ

Thesis Title A Finite Element Approach for Bonding in Anchored Castable Refractory Study

นักศึกษา นางสาวสาวิตรี วงศ์อาษา

รหัสประจำตัว 56601143

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-030-133

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ฐิตะพล	หุยนันท์	
รศ.ดร.จำลอง	ปราบแก้ว	
ผศ.ดร.เอกพจน์	ตันตราภิวัดน์	
ดร.จิตราภรณ์	วงศ์งาม	
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-301 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

ณ บดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์

แนวทางการวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับศึกษาการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีตทนไฟ

นักศึกษา

น.ส. สาวิตรี วงศ์อาษา

รหัสประจำตัว

56601143

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขา

วิศวกรรมเครื่องกล

ปี พ.ศ.

2561

อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์

ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร

บทคัดย่อ

ระบบหม้อเผาปูนซีเมนต์ ที่ประกอบไปด้วยคอนกรีตทนไฟ เหล็กยึด และเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ เมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานานทำให้เกิดการเสียหาย แตกหลุดร่อน ที่บริเวณคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด ซึ่งจากความเสียหายที่เกิดขึ้นทำให้ต้องมีการหยุดระบบเพื่อทำการซ่อมแซมในส่วนนี้เป็นประจำ ทำให้ค่าต้นทุนการผลิตของวัสดุสูงขึ้น การศึกษารูปแบบจำลองของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง คอนกรีตทนไฟ กับเหล็กยึด เป็นการศึกษาหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในระบบหม้อเผาปูนซีเมนต์เพื่อกำหนดแนวคิดในการออกแบบโลนนิ่งทนไฟและเป็นแนวทางในการเลือกใช้ รูปแบบเหล็กยึดที่เหมาะสม โดยงานวิจัยนี้ได้นำผลการทดลองและผลการจำลองรูปแบบพฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร จากงานวิจัยของคุณ อภิเดช มาเปรียบเทียบกับ การจำลองรูปแบบพฤติกรรมทางกลไม่เป็นเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล ซึ่งผลจากการจำลองพฤติกรรมทางกลไม่เป็นเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถลแสดงให้เห็นถึงค่าการกระจายความเค้นของคอนกรีตที่น้อยกว่า และใกล้เคียงความจริงมากกว่า ดังนั้นจึงได้นำรูปแบบพฤติกรรมทางกลไม่เป็นเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล มาเปรียบเทียบหาค่าการกระจายความร้อน และความเค้นที่ได้ จากการเปลี่ยนรูปแบบการจำลองเหล็กยึดแต่ละชนิด (เหล็กยึดแบบแผ่นรูปตัว L, เหล็กยึดแบบแผ่นรูปตัว Y, เหล็กยึดแบบ Y-ROD) ทำให้ได้ผลการจำลองที่ค่าความเค้นวอนมิสเสซของเหล็กยึดสูงสุด และค่าความเค้นหลักสูงสุดที่คอนกรีตทนไฟแบบดิ่ง ที่เหล็กยึดแบบแผ่นรูปตัว Y สูงสุด เพราะรูปร่างของเหล็กแผ่นรูปตัว Y มีการขยายตัวมากที่สุด และค่าความเค้นที่ได้ แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของวัสดุเกิดการเสียหายเป็นที่เรียบร้อย ในส่วนของค่าความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟแบบกดเหล็กยึดชนิดแผ่นรูปตัว L มีค่าความเค้นกดสูงที่สุด เพราะด้านปลายสุดมีพื้นที่การขยายตัวของเหล็กยึดมากที่สุดและค่าความเค้นหลักสูงสุดแบบกดที่ได้จากคอนกรีตทั้งสามชนิด มีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นทนต่อแรงกดของคอนกรีตจึงทำให้วัสดุยังไม่เกิดความเสียหายในกรณีนี้

Thesis Title	A Finite Element Approach for Bonding in Anchored Castable Refractory Study
Student	Ms. Savithree Wongasa
Student ID	56601143
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst.Prof. Dr. Monsak Pimsan

Abstract

The cement rotary kiln system that consist of refractory concrete reinforced with anchors and shell, when exposed to a long duration of heat, could cause damages that include cracks in the areas of refractory concrete and anchor. The damages that occur could often time warrant the necessity to halt the system for repair works in this area which cause the rise in initial production cost of materials. This research proposes the development of a proper finite element model as a tool to analyse refractory strength and assist in the selection of suitable anchor available in three (L-Anchor, Y-Anchor And Y-ROD Anchor). This paper presents the experimental results and simulation results of the perfect bonds. Based on his research, Apidech compares the bond slip model. The results showed that the stress distribution of concrete in bond slip model was lower, It's more precise and realistic than the perfect bond model. Therefore, the bond-slip was utilised to compare the value of heat distribution and stress that arise from the changes in the type of steel .The simulation results indicate that the Y-Anchor shows the highest value for the maximum von Mises stress and the maximum principle stress of the tension because Y Anchor has the greatest expansion. And the three models has reached the point where damage has occurred with the material properties. For the maximum principle stress of the compression, the refractory concrete with L-Anchor was the highest because the expansion of the tip of the L-Anchor being the highest. And the stress value is obtained from all three types of concrete. It is less than the allowable stress therefore the material is not damaged in this case.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง แนวทางการวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการศึกษาการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีตทนไฟ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากความกรุณาและการให้คำปรึกษาที่มีคุณค่าจากอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาของข้าพเจ้า นายบุญเลิศ นางสมบูรณ์ วงศ์อาษา ครอบครัวของข้าพเจ้าและครอบครัวของคุณแม่ศิลาธรรม ที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุน ในทุกๆเรื่อง ขอขอบคุณ บริษัทสยามรีเฟคทอรี และ คุณอภิเดช จันทพันธ์ ที่กรุณาให้ข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัย ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ ทางด้านอุปกรณ์ และสถานที่สำหรับการวิจัย ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆด้าน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้คุณงามความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้มอบวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

สาวิตรี วงศ์อาษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	5
2.1 สรุปสาระสำคัญจากวรรณกรรม.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
3.1 สมการพื้นฐานสำหรับของแข็ง.....	7
3.2 สภาวะแวดล้อมในหม้อเผาปูนซีเมนต์.....	27
3.3 พฤติกรรมทางกลสำหรับวัสดุ.....	31
3.4 พันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีต.....	34
3.5 หลักการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึด.....	36
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
4.1 บทนำ.....	41
4.2 แนวคิดการออกแบบระบบไลน์นิ่งทนไฟ.....	41
4.3 การทดลอง.....	49
4.4 การศึกษาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาเดิม เกี่ยวกับพันธะแรงยึดเหนี่ยว.....	55
4.5 การศึกษาแบบจำลองโมเดล เพื่อเปรียบเทียบระหว่าง พันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลีนไถล และแบบยึดแน่นถาวร.....	56

สารบัญ (ต่อ)

4.6	รายละเอียดของคุณสมบัติวัสดุ สมบัติการเชื่อมต่อระหว่างผิว และหลักการกำหนด พื้นที่ผิวสัมผัสของพันธะยึดเหนี่ยวแบบเส้นใย	61
4.7	การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยการคำนวณ.....	68
บทที่ 5	ผลการวิจัย.....	71
5.1	บทนำ.....	71
5.2	ผลของการศึกษาเปรียบเทียบ กับผลการศึกษาเดิม เกี่ยวกับพันธะแรงยึดเหนี่ยว.....	72
5.3	ผลที่ได้จากการจำลองรูปแบบโมเดล ของพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร และผลที่ได้จากการจำลองรูปแบบโมเดลของพันธะแรงยึดเหนี่ยว แบบเส้นใยเทียบกับผลของการทดลอง	75
5.4	ผลของการจำลองโครงสร้างปูนซีเมนต์ แบบเส้นใย ถูกนำเสนอในเชิง เปรียบเทียบกันตามปัจจัยชนิดเหล็กยึด.....	82
5.5	ผลการวิเคราะห์แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กยึดแบบต่างๆ กับคอนกรีตซึ่งจะให้ค่าระยะห่าง ของเหล็กยึดที่เหมาะสมของเหล็กยึดแต่ละแบบ.....	101
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	104
6.1	สรุปผลการวิจัย.....	104
6.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	107
เอกสารอ้างอิง.....		108
ภาคผนวก ก.	บทความที่ได้ขึ้นประชุมเชิงวิชาการนานาชาติ.....	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	คุณสมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ สแตนเลส และเหล็กกล้าคาร์บอน..... 47
4.2	คุณสมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ สแตนเลส และเหล็กกล้าคาร์บอน..... 48
4.3	ผลของการสอบเทียบสัญญาณสเตรนเกจ..... 52
4.4	คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องของพันธะยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล และพันธะยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร..... 57
4.5	กำหนดพื้นที่ผิวสัมผัสและคุณสมบัติการเชื่อมต่อระหว่างผิว ของพันธะยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถลและพันธะยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร..... 59
4.6	คุณสมบัติของคอนกรีตทนไฟจากการทดลองแรงอัด..... 61
4.7	ข้อมูลสำหรับเห็นชั้นสทิฟเทนนิ่ง..... 64
4.8	ข้อมูลของอัตราส่วนความเค้นและความเครียด..... 66
5.1	รายละเอียดการวิเคราะห์ แบบจำลองจากปัจจัยของจำนวนและชนิดเหล็กยึด..... 88
5.2	แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นวอนมิสเซสที่เกิดขึ้นกับเหล็กยึดแต่ละชนิด..... 98
5.3	แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นหลัก ที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตจากปัจจัย ของชนิดเหล็กยึดแต่ละชนิด..... 101
6.1	รายละเอียดผลที่ได้จากการคำนวณ ทหาระยะห่างของเหล็กยึดแต่ละชนิด..... 107

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	ระบบแรงสมดุลร่วมกันของวัตถุ.....7
3.2	ปริมาตรของเอลิเมนต์ที่พิจารณาสำหรับสภาวะสมดุลภายใน.....9
3.3	การเปลี่ยนรูปร่างของเอลิเมนต์.....12
3.4	แผ่นราบภายใต้ภาระในระนาบ.....13
3.5	แรงกระทำที่ผิววัตถุ.....13
3.6	เอลิเมนต์ในพิกัดคาร์ทีเซียน.....16
3.7	การขยายตัวเนื่องจากความร้อน.....19
3.8	แสดงของแข็งที่มีการกระจายอุณหภูมิ.....19
3.9	แสดงของแข็งที่มีการกระจายอุณหภูมิและแรงเชิงกล.....20
3.10	แสดงการกระจายอุณหภูมิและแรงของของแข็งสามมิติมาเป็นการกำหนดสูตร ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 1 D.....20
3.11	แสดงการกระจายอุณหภูมิและแรงของของแข็งสามมิติมาเป็นการจำลอง แบบองค์ประกอบ Tetrahedral.....21
3.12	แสดงการกระจายอุณหภูมิและแรงของของแข็งสามมิติมาเป็นการจำลอง การรวมพลังงานกลและความร้อนพร้อมกัน.....21
3.13	แสดงการกระจายอุณหภูมิและแรงของของแข็งสามมิติมาเป็นการจำลอง การรวมพลังงานกลและความร้อนพร้อมกัน.....22
3.14	กระบวนการภายใต้หม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน.....28
3.15	ส่วนประกอบและโครงสร้างของหม้อเผาปูนซีเมนต์.....30
3.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงและอุณหภูมิของวัสดุทนไฟ.....31
3.17	ลักษณะการแตกหลุดร้อนของไลน์นิ่งทนไฟในหม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน.....31
3.18	แบบจำลองคอนกรีตเชิงโครงสร้างของ Popovics และ Thorenfeldt.....32
3.19	การตอบสนองแรงดึงของคอนกรีตเสริมแรงภายใต้การเสียหาย.....33
3.20	การตอบสนองความเค้น และความเครียด ของเหล็กเสริมแรง.....34
3.21	แบบจำลองแรงเสียดทานต่อแท่งเหล็กในคอนกรีต.....34
3.22	ฟังก์ชันเลขชี้กำลังในแบบจำลองแรงเสียดทานที่เสื่อมลง.....35

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23	ซอฟเฟ็น (Softened) ความสัมพันธ์แรงดันกับช่องว่าง.....36
3.24	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของไลน์นิ่งทไฟและระยะห่างเหล็กยึดชนิดกลม.....38
3.25	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของไลน์นิ่งทไฟและระยะห่างเหล็กยึดชนิดแผ่น.....38
3.26	คอนกรีตทไฟเสริมเหล็กยึดตามแนวนอน (เพดาน).....39
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนและอุณหภูมิของคอนกรีตทไฟ.....43
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะและอุณหภูมิของคอนกรีตทไฟ.....44
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน และอุณหภูมิของคอนกรีตทไฟ.....45
4.4	ผลการทดสอบการอัดตามแนวแกนของวัสดุทไฟแม็กซียมโครเมียม.....46
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตทไฟที่อุณหภูมิ 200, 600, และ 800°C.....47
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นและอุณหภูมิของคอนกรีตทไฟ.....47
4.7	ส่วนประกอบภายนอกชิ้นตัวอย่างทดลอง.....50
4.8	ส่วนประกอบภายในชิ้นตัวอย่างทดลอง.....50
4.9	ชิ้นตัวอย่างทดลองพร้อมติดตั้งสเตรนเกจ.....51
4.10	ชิ้นตัวอย่างทดลองพร้อมติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลตั้งแต่จุดที่ 1 ถึง 10.....51
4.11	ชิ้นตัวอย่างทดลองพร้อมติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลตั้งแต่จุดที่ 11 ถึง 14.....52
4.12	ชิ้นตัวอย่างทดลองพร้อมติดตั้งสเตรนเกจ.....53
4.13	เปรียบเทียบความเครียดระหว่างเครื่องทดสอบแรงดึงและสเตรนเกจ.....54
4.14	เครื่องมือสอบเทียบสายเทอร์โมคัปเปิล.....54
4.15	ชุดเครื่องมือ และอุปกรณ์การทดลอง.....55
4.16	แผนการให้ความร้อนที่ผิวด้านร้อน (Hot face) ของคอนกรีตทไฟ.....55
4.17	เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับภาระและการกระจัด.....56
4.18	ส่วนประกอบของแบบจำลอง.....57
4.19	เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับอุณหภูมิและการกระจัด (ก) ระบาย X-Y (ข) ระบาย Y-Z.....60

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากการแบ่งเอลิเมนต์..... 61
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัด และความเครียดของคอนกรีตทนไฟ ที่อุณหภูมิ 30, 200, 400, 600 และ 800 °C..... 62
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัด และความเครียดพลาสติกของคอนกรีตทนไฟ ที่อุณหภูมิ 30, 200, 400, 600 และ 800 °C..... 63
4.23	แบบจำลองเห็นชั้นสตีฟเฟนนิ่ง (Tension stiffening) แสดงลักษณะ ความเค้น กับความเครียดภายหลังการเสียหาย..... 64
4.24	การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเค้นดึง ต่อความเค้นดึงสูงสุด กับความแตกต่างระหว่างความเครียดโดยตรง และความเครียดที่ความเค้นดึงสูงสุด..... 64
4.25	ฟังก์ชันการเสียหายภายใต้ระนาบความเค้น 65
4.26	การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสัมผัส กับความหนาคอนกรีตที่ห่อหุ้ม..... 67
4.27	แบบจำลองแรงเสียดทานของสัมประสิทธิ์การเสื่อมลง..... 68
4.28	ฟังก์ชันเลขชี้กำลังในแบบจำลองแรงเสียดทานที่เสื่อมลงมีปฏิริยาต่อกันระหว่าง เหล็กยึด และคอนกรีต..... 68
4.29	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์..... 70
5.1	ผลของการจำลอง (ก) ความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีต (ข) ความเค้นวอนมิสเชสของเหล็ก..... 73
5.2	กราฟแสดงผลค่าความเค้นวอนมิสเชสที่เกิดขึ้นที่เหล็ก..... 73
5.3	กราฟแสดงผลค่าความเค้นหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นในคอนกรีต..... 74
5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยว และการลื่นไถล เทียบกันระหว่าง ผลของการศึกษา และผลของ Alaka..... 74
5.5	กราฟแสดงค่าความแตกต่างของแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถลระหว่าง ผลของ Alaka กับผลของการศึกษา การทดลอง..... 75
5.6	ผลของอุณหภูมิที่ผิวของคอนกรีตทนไฟ จุดที่ 1 (ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2..... 76

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 ผลของอุณหภูมิสถานะแวดล้อมใกล้คอนกรีตทนไฟ จุดที่ 2 ถึง จุดที่ 10 (ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2.....	76
5.8 ผลของอุณหภูมิผิวคอนกรีตทนไฟ เหล็กยึด และเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์ จุดที่ 11 ถึง จุดที่ 14 (ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2.....	77
5.9 ผลของความเครียดบนเหล็กยึด (ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2.....	77
5.10 ผลของการจำลอง (Perfect bond) (ก) การกระจายอุณหภูมิ (ข) ความเครียดเหล็กยึดตามแนวแกน Y (ค) ความเค้นวอนมิสเชส (Pa).....	78
5.11 ผลของการจำลอง (Bond slip) (ก) การกระจายอุณหภูมิ (ข) ความเครียดเหล็กยึดตามแนวแกน Y (ค) ความเค้นวอนมิสเชส (Pa).....	79
5.12 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการจำลองโมเดล แบบพฤติกรรมพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวรในสถานะคงตัว.....	80
5.13 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการจำลองโมเดล แบบพฤติกรรมพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถลในสถานะคงตัว.....	80
5.14 เปรียบเทียบผลของความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ (ก) พฤติกรรมทางกล แบบเชิงเส้นพันธะแบบยึดแน่นถาวร (ข) พฤติกรรมทางกล แบบไม่เป็นเชิงเส้นพันธะแบบลื่นไถล.....	81
5.15 เปรียบเทียบผลของความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด (ก) พฤติกรรมทางกล แบบเชิงเส้นพันธะแบบยึดแน่นถาวร (ข) พฤติกรรมทางกล แบบไม่เป็นเชิงเส้นพันธะแบบลื่นไถล.....	82
5.16 ผลของการถ่ายเทความร้อนตั้งแต่ผิวด้านร้อนถึงเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์.....	83
5.17 ผลของการกระจายอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟ ทั้ง 3 กรณี.....	84
5.18 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์ ทั้ง 3 กรณี	85
5.19 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 1.....	85
5.20 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 2.....	85
5.21 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 3.....	86

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.22 ค่าเฉลี่ยการลื่นไถลของเหล็กแผ่นชนิด L Anchor เปรียบเทียบด้านซ้ายและขวา.....	86
5.23 ค่าเฉลี่ยการลื่นไถลของเหล็กแผ่นชนิด Y Anchor เปรียบเทียบด้านซ้ายและขวา.....	87
5.24 ค่าเฉลี่ยการลื่นไถลของเหล็กกลมชนิด Y-ROD Anchor เปรียบเทียบด้านซ้ายและขวา.....	87
5.25 ส่วนตัด X-X และ Z-Z ระหว่างกลางเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 0, 60, 120, 180, 240 mm.....	88
5.26 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด บนส่วนตัด X-X	89
5.27 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับ Hot Face (0mm) บนส่วนตัด X-X.....	90
5.28 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 60mm บนส่วนตัด X-X	90
5.29 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 120mm บนส่วนตัด X-X	91
5.30 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 180mm บนส่วนตัด X-X	91
5.31 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 240mm บนส่วนตัด X-X	92
5.32 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด บนส่วนตัด Z-Z	93
5.33 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับ Hot Face (0mm) บนส่วนตัด Z-Z.....	94
5.34 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 60mm บนส่วนตัด Z-Z	94
5.35 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 120mm บนส่วนตัด Z-Z	95
5.36 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 180mm บนส่วนตัด Z-Z	95

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.37	กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 240mm บนส่วนตัด Z-Z96
5.38	ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 1.....97
5.39	ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 2.....97
5.40	ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 3.....97
5.41	แสดงผลของความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เหล็กยึดชนิด L.....98
5.42	แสดงผลของความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เหล็กยึดชนิด Y.....99
5.43	แสดงผลของความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เหล็กยึดชนิด Y-ROD.....99
5.44	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของคอนกรีตทนไฟ และระยะห่างของเหล็กยึดชนิดแผ่น100
5.45	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของคอนกรีตทนไฟ และระยะห่างของเหล็กยึดชนิดกลม101
5.46	แสดงลักษณะพื้นที่ของเซคเตอร์ริง101

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศ เพราะสามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมการก่อสร้าง และอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ ซึ่งส่งผลทำให้การใช้ปูนซีเมนต์ในประเทศเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการแข่งขันกันทางการตลาดของปูนซีเมนต์ที่รุนแรงขึ้น ทำให้ผู้ผลิตมีความต้องการที่จะลดต้นทุน และยืดเวลาการใช้งานของเครื่องจักรกล โดยเฉพาะหม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน (Rotary Cement Kiln) เป็นอุปกรณ์สำคัญในการผลิตปูนซีเมนต์ หม้อเผาปูนซีเมนต์ใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงเพื่อสร้างความร้อนให้แก่วัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal) ให้ได้อุณหภูมิประมาณ $1,200 - 1,400^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีตามลำดับ จนในที่สุดวัตถุดิบสำเร็จกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker) ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการทำให้ปูนเม็ดเย็นลง ในการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบสำเร็จนั้นจะเป็นการให้ความร้อนโดยตรงจากเปลวไฟของหัวเผาเพื่อป้องกันความร้อนจากกระบวนการผลิตจึงนำระบบโลนนิ่งมาใช้ภายในหม้อเผาปูนซีเมนต์ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วย วัสดุทนไฟที่มีเหล็กยึด (Anchor) ฝังอยู่ข้างในและเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กที่ยึดกับเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ ในขณะที่หม้อเผาปูนซีเมนต์ถูกใช้งาน วัสดุดังกล่าวจะอยู่ภายใต้ภาระทางความร้อนเป็นสำคัญ ก่อให้เกิดการขยายตัวจากความร้อนไม่เท่ากันของวัสดุในระบบโลนนิ่ง จึงทำให้เกิดปัญหาการแตกหลุดร้อนขึ้นในวัสดุทนไฟ ส่งผลให้ต้องหยุดซ่อมแซมโลนนิ่งทนไฟ ซึ่งการซ่อมแซมดังกล่าวส่งผลต่อปัจจัยการเดินเครื่องทำงานของหม้อเผาปูนซีเมนต์ ดังนั้นปัญหานี้สมควรได้รับการแก้ไขต่อไป

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการทำงานของหม้อเผาปูนซีเมนต์ทำให้พบเจอปัญหาอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงมากของหม้อเผาปูนซีเมนต์ ดังนั้นเพื่อรักษาการทำงานให้มีอุณหภูมิสูงและป้องกันความเสียหายของเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์จากอุณหภูมิสูง วัสดุทนไฟ (Refractory) จึงถูกนำมาสร้างเป็นระบบโลนนิ่งทนไฟ (Refractory lining) ประเภทของวัสดุทนไฟที่ใช้จะแตกต่างกันไปตามสภาวะภายในหม้อเผาปูนซีเมนต์ เช่น บริเวณทางออกและทางเข้า จะใช้วัสดุทนไฟประเภทคอนกรีตทนไฟ (Refractory castable) นอกจากนี้ จะใช้เป็นวัสดุทนไฟประเภทอิฐทนไฟ (Refractory brick) เป็นหลัก โครงสร้าง

ไลน์บริเวณทางออกมีลักษณะเป็นคอนกรีตทนไฟเสริมเหล็กยึด (Anchor) ซึ่งเหล็กยึดเป็นชนิดเหล็กแผ่นรูปตัว Y ถูกเชื่อมไว้กับเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์ ปัญหาที่สำคัญและความถี่ในการพบปัญหาในลักษณะที่เกิดกับบริเวณดังกล่าว สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบคือ [1]

- 1) การแตกและการหลุดร่อน เนื่องจากโดนความร้อนและอิทธิพลลมที่หมุนวนจากหม้อเย็น
- 2) การเสื่อมของวัสดุและการสูญเสียมวลของคอนกรีตทนไฟ เนื่องจากโดนกัดกร่อนของเม็ดปูน การเสียดสีของเม็ดปูน และปฏิกิริยาทางเคมีของละอองเม็ดปูน

นอกจากนั้นวัสดุไลน์นิ่งที่อยู่ภายใต้ภาระทางความร้อนที่แตกต่างกันจะนำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์ 3 แบบ คือ

- 1) เกรเดียนต์ความร้อน เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวด้านที่สัมผัสกับวัตถุติดและผิวด้านที่สัมผัสกับเปลือกหุ้มเสาซีเมนต์
- 2) ความแตกต่างของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนระหว่างเหล็ก (เปลือกหุ้มเสาและเหล็กยึด) และคอนกรีตทนไฟ [3,4,14,16]
- 3) วัฏจักรทางความร้อนระหว่างสัมผัสวัตถุติดและไม่สัมผัสวัตถุติด

ปรากฏการณ์เหล่านี้ อาจก่อให้เกิดความเค้นที่ผสมผสานไปด้วย ความเค้นดึง ความเค้นอัด และความเค้นเฉือน ความเค้นเหล่านี้อาจมีค่าสูงในไลน์นิ่งทนไฟ ดังนั้น สภาวะความเค้นจึงอาจเป็นสาเหตุของการแตก และปัญหาการหลุดร่อนในคอนกรีตทนไฟ ยิ่งไปกว่านั้น การขยายตัวจากความร้อนระหว่างคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดเป็นผลให้เกิดการก่อตัวของการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตทนไฟ ทำให้ความแข็งแรงเสื่อมลง จนนำไปสู่การเสียหายของไลน์นิ่งทนไฟในที่สุด ด้วยปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดความต้องการในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของไลน์นิ่งให้มากยิ่งขึ้น และลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาวัสดุทนไฟ

ดังนั้นผู้ใช้งานจึงหาวิธีการที่มีประสิทธิภาพเพื่อให้บรรลุเป้าหมายนี้ ด้วยการทำการศึกษาและทำความเข้าใจพฤติกรรมการเสียหายที่เกิดขึ้นในตัววัสดุหุ้มเสาปูนซีเมนต์ที่สภาวะการทำงานภายใต้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง การกระจายอุณหภูมิ และความเครียดที่เกิดขึ้นกับเหล็กยึดทั้งสามชนิด คือเหล็กยึดแบบแผ่นตัว L เหล็กยึดแบบแผ่นตัว Y และเหล็กยึดแบบ Y-ROD โดยการจำลองรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง คอนกรีตทนไฟกับเหล็กยึด แบบพฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวไม่ลื่นไถล กับพฤติกรรมทางกลไม่เป็นเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล และทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่เกิดขึ้น ผลของการศึกษารูปแบบจำลองดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงเหล็กยึดแบบแผ่นรูปตัว L เกิดความเค้นดึงน้อยที่สุด และมีค่าความเค้นที่เกิดบริเวณปูนซีเมนต์น้อยที่สุด นอกจากนี้เหล็ก

ยึดแบบแผ่นรูปตัว L ยังมีราคาถูกที่สุด เทียบกับการติดตั้งเหล็กยึดทั้งสองชนิดในคอนกรีตทนไฟที่มีพื้นที่เท่ากัน ซึ่งการศึกษานี้ทำให้ได้จุดมุ่งหมายที่จะสร้างเครื่องมือที่ช่วยในการออกแบบเหล็กยึดในคอนกรีตทนไฟที่เหมาะสมก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตคอนกรีตทนไฟต่อไป โดยผู้จัดทำหวังใจเป็นอย่างยิ่งว่าการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมอื่นๆ ไม่น้อย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) ทำการศึกษารูปแบบจำลองของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง คอนกรีตทนไฟ กับเหล็กยึด
- 2) เพื่อวิเคราะห์หาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริงจากการให้ความร้อนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของหม้อเผาปูนซีเมนต์ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่เกิดขึ้น
- 3) ศึกษา ผลของพันธะยึดเหนี่ยว ระหว่างคอนกรีตทนไฟ กับเหล็กยึด โดยใช้ รูปแบบ พฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวไม่ลื่นไถล กับพฤติกรรมทางกลไม่เป็นเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล
- 4) ศึกษาเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลงชนิดของเหล็กยึดทั้งสามชนิด โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และใช้วิธีจำลองรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง คอนกรีตทนไฟกับเหล็กยึดเป็นแบบพฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวลื่นไถล
- 5) เพื่อศึกษาหาการระยะห่างของเหล็กยึดที่เหมาะสมของแต่ละแบบ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1) ศึกษาการกระจายความเค้นในโครงสร้างหม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้ภาระทางความร้อนแบบคงตัว อุณหภูมิที่ส่วนต่างๆมีค่าคงที่ พฤติกรรมทางกลแบบไม่เป็นเชิงเส้น และการสัมผัสวัสดุแบบลื่นไถลได้
- 2) ทำการวิเคราะห์แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กยึดแบบแผ่นตัว L เหล็กยึดแบบแผ่นตัว Y เหล็กยึดและแบบ Y-ROD กับคอนกรีต
- 3) วัสดุมีความเป็นเนื้อเดียวกันแบบสม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน
- 4) หม้อเผาปูนซีเมนต์ ที่ทำการศึกษา เป็นหม้อเผาปูนซีเมนต์ที่โรงงานสระบุรี
- 5) คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กยึดเป็นแบบเดียวกันทั้งหมด
- 6) คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต เป็นแบบเดียวกันทั้งหมด

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ประกอบด้วย 6 บท บทนี้ (บทที่ 1) ทบทวนกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ โดยย่อ เพื่อให้เข้าใจความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา และขอบเขตของการศึกษา บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พฤติกรรมทางกลของวัสดุทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริมแรง และพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็ก บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย เป็นการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการทำงานของหม้อเผาปูนซีเมนต์ ระบบไลน์นิ่งทไฟ ปัจจัยที่ทำลายระบบไลน์นิ่งทไฟ พฤติกรรมวัสดุคอนกรีตทนไฟภายใต้ภาระทางความร้อนและนำเข้าสู่การศึกษาการกระจายความเค้น เนื่องจากความร้อนในหม้อเผาปูนซีเมนต์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ต่อจากนั้น เป็นการออกแบบการทดลอง การปฏิบัติการทดลอง การศึกษาพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีต บทที่ 5 ผลลัพธ์การวิจัย ในบทนี้ นำเสนอผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผลของการทดลอง ตลอดจนเปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองและการทดลอง แสดงค่าความเค้นที่ระดับต่างๆของวัสดุหม้อเผาปูนซีเมนต์ ผลของค่าสลิปที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆ การหาค่าระยะห่างของเหล็กยึดที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถเลือกใช้เหล็กยึดให้มีความเหมาะสมสอดคล้องกัน และบทที่ 6 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 สรุปสาระสำคัญจากวรรณกรรม

งานวิจัยเชิงทดลองเกี่ยวกับปัญหาเหล็กยึดคอนกรีตทนไฟ โดย Andrieux และคณะ [16] เพื่อศึกษาเกี่ยวกับความสำคัญของสนามความเค้นรอบๆเหล็กยึดภายใต้วัฏจักรทางความร้อน (Heating/Cooling) เป็นการทดลองในสภาวะการทำงานของหม้อไอน้ำของโรงงานอุตสาหกรรม โดยการใช้เตาเผาแบบพิเศษสร้างความร้อนให้แก่ชิ้นงานทดลอง ซึ่งมีเหล็กยึดอยู่ข้างในจำนวน 1 อัน เพื่อที่จะจำลองสภาวะทางกลเนื่องจากความร้อน การติดตามผลความเสียหายรอบๆเหล็กยึดในคอนกรีตทนไฟโดยวิธีการอะคูติคิมิชัน (Acoustic emission) และทำการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองสเมียร์รแครกกิง (Smearred crack model) ถูกใช้เพื่อจำลองการแตกร้าวประกอบเหตุการณ์นั้น ผลการศึกษาสรุปว่า การให้ความร้อนในตอนแรกทำให้เกิดการเสียหายมาก เพราะความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวระหว่างคอนกรีตทนไฟและเหล็ก และอิทธิพลของวัฏจักรทางความร้อน (Heating/Cooling) ต่อการเสียหายส่งผลกระทบต่อวงมาเมื่อเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนในตอนแรก ผู้วิจัยกล่าวว่าเพื่อป้องกันความเสียหายของวัสดุทนไฟในระหว่างการให้ความร้อนตอนแรกเหล็กยึดต้องเคลือบด้วยวัสดุที่เผาไหม้ในขณะที่ให้ความร้อนและทำให้เหล็กยึดมีอิสระที่จะขยายตัว

Chen และคณะ[14]ศึกษาโครงสร้างวัสดุทนไฟโดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและควบคุมการทดลองเพื่อศึกษาเหล็กยึดที่มีปฏิกิริยาต่อระบบไลน์นิ่งของวัสดุทนไฟแบบชั้นเดียวในท่อทรงกระบอก (เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ft) ที่อุณหภูมิ 760 °C พบว่าเหล็กยึดส่งผลกระทบต่อไลน์นิ่ง 2 ทางด้วยกัน คือ 1) การลดลงของอุณหภูมิในไลน์นิ่งใกล้ผิวด้านร้อน (Hot face) ก่อให้เกิดความเค้นดึงในแนวเส้นรอบวงในบริเวณนั้น และ 2) มีแนวโน้มผลัดกันให้วัสดุไลน์นิ่งออกจากผิวด้านร้อน เนื่องจากการขยายตัวจากความร้อนไม่เท่ากันระหว่างวัสดุไลน์นิ่งและวัสดุเหล็กยึด การทดลองแสดงให้เห็นว่าเปลือกหม้อด้านร้อน (Hot shell) มีแนวโน้มที่จะดึงออกจากไลน์นิ่งทำให้เหลือช่องว่างในเปลือกหม้อด้านร้อนกับเหล็กยึดการขยายตัวของเปลือกหม้อด้านร้อนสามารถสร้างความเค้นดึงในแนวเส้นรอบวงได้สูงในไลน์นิ่ง ผลทำให้เกิดการแตกในแนวรัศมีได้มาก ผู้วิจัยสรุปว่าเหล็กยึดที่ยึดหุ่ยน (เช่น การเคลือบ) ดูเหมือนจะดีกว่าแบบแข็งเกร็งสำหรับการติดตั้งในไลน์นิ่ง อย่างไรก็ตามผู้วิจัยกล่าวว่าเหล็กยึดแบบเรขาคณิตและเหล็กยึดแบบเคลือบดูเหมือนจะไม่ส่งผลกระทบต่อการกระจายความเค้นตามแนวเส้นรอบวงเป็นสำคัญ

งานวิจัยนำเสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับปัญหาของความเค้นยึดเหนี่ยว (Bond stress) ที่มีปฏิกิริยาต่อกันระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมแรง โดย Alaka [19] โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าความเค้นทั้งแนวรัศมีและแนวเส้นรอบวงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาตรคอนกรีตที่จัดเกาะเหล็กเสริมแรงซึ่งเป็นสาเหตุของการแตกในคอนกรีต

แบบจำลองคำนึงถึงการสูญเสียแรงดันสัมผัสและการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สัมผัสผิว ผู้วิจัยได้ทำการทดลองการดึงออก (Pull out test) เพื่อเปรียบเทียบผลกับแบบจำลอง ผลลัพธ์จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน

งานวิจัยของอภิเดช(2013)ได้ทำการหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริงจากการจำลองรูปแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการเฉลี่ยผลการทดลองสองครั้ง โดยการทดลองถูกดำเนินการภายใต้ภาวะความร้อน ที่มีแหล่งความร้อนจากเตาเผาที่ถูกสร้างขึ้นมา อุณหภูมิ 700 °C เพื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่างทดลองเฉพาะบริเวณนั้น โดยเทอร์โมคัปเปิล และสเตรนเกจ ถูกติดตั้งที่ชิ้นตัวอย่างทดลองเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิและความเครียดที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดสอบ โดยอภิเดชได้เสนอว่า การจำลองรูปแบบพันธะระหว่างเหล็กและคอนกรีต แบบลิ้นไถล ให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดสอบมากกว่า การจำลองรูปแบบพันธะระหว่างเหล็กและคอนกรีตแบบไม่ลิ้นไถล

งานวิจัยของ Lowes และคณะ [27] ได้นำเสนอพฤติกรรมเหล็กเสริมแรงในโครงสร้างคอนกรีตที่ถูกกำหนดโดยพันธะ. การจำลองพฤติกรรมของเหล็กเสริมแรงอย่างถูกต้อง โดยใช้โมเดลแบบต่อเนื่องความละเอียดสูงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อแสดงการตอบสนองของพันธะระหว่างเหล็กเสริมแรงกับคอนกรีต ที่บริเวณโดยรอบอย่างชัดเจน ผลการทดลองก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าการตอบสนองของพันธะบริเวณโดยรอบเป็นไปในทางไม่เชิงเส้นมากและมีผลกระทบต่อหลายปัจจัยเช่น สถานะความเค้นเครียดของคอนกรีต, สถานะความเค้นเครียดของเหล็กเสริมแรง และการสลิปของเหล็กเสริมแรงในอดีต ในงานวิจัยนี้ได้เสนอรูปแบบที่แสดงถึงผลกระทบต่อความแข็งแรงของพันธะที่ขึ้นกับปัจจัยเหล่านี้เทียบกับเวลา แบบจำลองนี้นำเสนอการจำลองพฤติกรรมบริเวณพันธะโซน ที่ตอบสนองภายใต้การโหลดตามแบบวัฏจักรและเหมาะสมสำหรับการใช้ในการสร้างแบบจำลององค์ประกอบ จำกัด ที่มีความละเอียดสูงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1. สมการพื้นฐานสำหรับของแข็ง

3.1.1. สมการสมดุลภายนอก

หากวัตถุอยู่ในสภาวะสมดุลภายใต้ภาระที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามที่กำหนดแรงปฏิกิริยาและโมเมนต์พัฒนาขึ้นที่จุดรองรับ แรงและโมเมนต์ภายนอกต้องสมดุล อีกนัยหนึ่ง สมการสมดุลของแรงและโมเมนต์สำหรับวัตถุรวม (สมการสมดุลจากภายนอก) ต้องสอดคล้องกัน ถ้า ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z , คือแรงวัตถุ (Body forces) Φ_x, Φ_y และ Φ_z คือ แรงผิว (Surface forces) P_x, P_y , และ P_z คือ ภาระภายนอก (ประกอบด้วยปฏิกิริยาที่จุดรองรับ เช่น B, C และ D ในรูปที่ 3.1) และ Q_x, Q_y และ Q_z คือ โมเมนต์ภายนอก(ประกอบด้วยปฏิกิริยาที่จุดรองรับ เช่น B, C และ D ในรูปที่ 3.1) สมการสมดุลภายนอกอาจกล่าวได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \int_s \bar{\Phi}_x ds + \int_v \phi_x dv + \sum P_x &= 0 \\ \int_s \bar{\Phi}_y ds + \int_v \phi_y dv + \sum P_y &= 0 \\ \int_s \bar{\Phi}_z ds + \int_v \phi_z dv + \sum P_z &= 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$



รูปที่ 3.1 ระบบแรงสมดุลร่วมกันของวัตถุ [10]

สำหรับสมดุลโมเมนต์

$$\int_s (\Phi_z y - \Phi_y z) ds + \int_v (\Phi_z y - \Phi_y z) dv + \sum Q_x = 0$$

$$\int_s (\Phi_x z - \Phi_z x) ds + \int_v (\Phi_x z - \Phi_z x) dv + \sum Q_y = 0 \quad (3.2)$$

$$\int_s (\Phi_y x - \Phi_x y) ds + \int_v (\Phi_y x - \Phi_x y) dv + \sum Q_z = 0$$

3.1.2 สมการสมดุลภายใน

เนื่องจากการประยุกต์ใช้ภาวะความเค้นจะพัฒนาขึ้นภายในวัตถุ หากเราพิจารณาเอลิเมนต์ของวัสดุภายในวัตถุ ต้องอยู่ในสภาวะสมดุลเนื่องจากความเค้นภายในพัฒนาขึ้น จึงนำไปสู่สมการที่เรียกว่า สมการสมดุลภายใน ตามทฤษฎีภาวะความเค้นที่จุดใดๆ ตรงแรงวัตถุถูกนิยามด้วย 9 องค์ประกอบในพจน์ของความเค้น และ ซึ่ง $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yx}, \sigma_{yz}, \sigma_{zy}, \sigma_{zx}$ และ σ_{xz} ซึ่ง 3 ตัวแรกเป็นองค์ประกอบของความเค้นตั้งฉาก และอีก 6 ตัวสุดท้ายเป็นองค์ประกอบของความเค้นเฉือน สมการสมดุลภายในสัมพันธ์กันกับ 9 องค์ประกอบของความเค้น สามารถได้มาโดยการพิจารณาสมดุลโมเมนต์และสมดุลแรงที่กระทำต่อปริมาตร แสดงในรูปที่ 3.2 สมดุลโมเมนต์รอบแกน x, y และ z สมมติให้ไม่มีโมเมนต์ของวัตถุจึงนำไปสู่ความสัมพันธ์

$$\sigma_{yx} = \sigma_{xy}, \quad \sigma_{zy} = \sigma_{yz}, \quad \sigma_{zx} = \sigma_{xz} \quad (3.3)$$

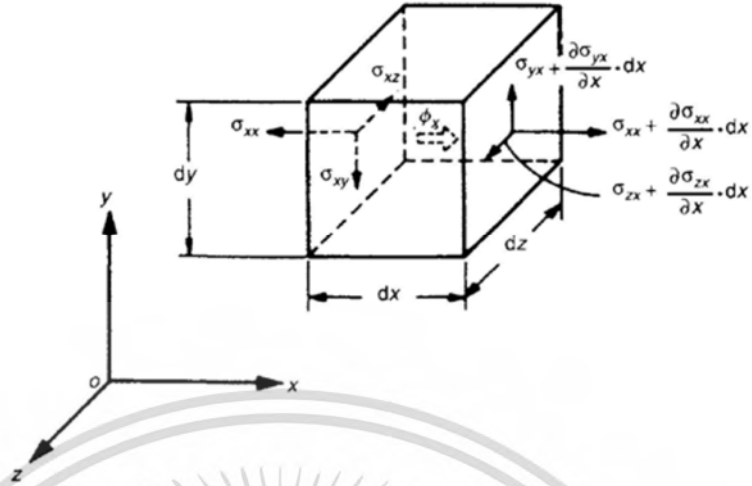
สมการเหล่านี้แสดงว่าภาวะความเค้นที่จุดใดๆ สามารถที่จะนิยามได้อย่างสมบูรณ์ด้วย 6 องค์ประกอบ $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yx}$ และ σ_{zx} สมดุลแรงในทิศทาง x, y และ z สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ได้ ดังนี้

$$\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right) + \phi_x = 0$$

$$\left(\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \right) + \phi_y = 0 \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) + \phi_z = 0$$

ที่ ϕ_x, ϕ_y และ ϕ_z คือ แรงวัตถุต่อหน่วยปริมาตรกระทำตามทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 ปริมาตรของเอลิเมนต์ที่พิจารณาสำหรับสภาวะสมดุลภายใน [10]

3.1.3 ความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด (Constitutive Relations)

สำหรับวัสดุแบบไอโซโทรปิก ในกรณีการยืดหยุ่นเชิงเส้นแบบไอโซโทรปิก 3 มิติของแข็ง ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดถูกกำหนดให้โดยกฎของฮุก (Hooke's law) เป็นดังนี้

$$\vec{\epsilon} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{Bmatrix} = [C] \vec{\sigma} + \vec{\epsilon}_0 \equiv [C] \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx0} \\ \epsilon_{yy0} \\ \epsilon_{zz0} \\ \epsilon_{xy0} \\ \epsilon_{yz0} \\ \epsilon_{zx0} \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

ที่ $[C]$ คือ เมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่นกำหนดให้เป็น ดังนี้

$$[C] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$\vec{\epsilon}_0$ คือ เวกเตอร์ความเครียดเริ่มต้น E คือ โมดูลัสของความยืดหยุ่น และ ν คือ อัตราส่วนปัวซองของวัสดุ ในกรณีของการให้ความร้อนวัสดุแบบไอโซเทอริก เวกเตอร์ความเครียดเริ่มต้นกำหนดให้เป็นดังนี้

$$\vec{\epsilon}_0 = \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{Bmatrix} = \alpha T \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

ที่ α คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน และ T คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง บางครั้งแสดงความหมายความเค้นในพจน์ของความเครียด โดยประกอบด้วยความเครียดเนื่องจากความร้อน จากสมการที่ (3.5) สามารถแทนกลับเพื่อให้ได้สมการ

$$\vec{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix} = [D](\vec{\epsilon} - \vec{\epsilon}_0) \equiv [D] \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{Bmatrix} - \frac{E\alpha T}{1-2\nu} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

ที่เมทริกซ์ $[D]$ ถูกกำหนดให้เป็น

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.1.4 ความสัมพันธ์ความเครียดกับการกระจัด

การเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุที่ยืดหยุ่นได้ (Elastic body) ภายใต้กำหนดให้ระบบใดๆ ด้วยเงื่อนไขการกระจายอุณหภูมิและภาระ สามารถที่จะอธิบายได้อย่างสมบูรณ์ด้วย 3 องค์ประกอบของการกระจัด u , v และ w ขนานกับทิศทาง x , y และ z ตามลำดับ โดยทั่วไปแต่ละขององค์ประกอบ

เหล่านี้ u , v และ w คือ ฟังก์ชันของพิกัด x , y และ z ก่อให้เกิดความเครียดในวัตถุที่สามารถที่จะแสดงได้ในพจน์ของการกระจัด u , v และ w ในส่วนนี้ สมมติการเปลี่ยนรูปร่างมีขนาดเล็ก เพื่อให้ความสัมพันธ์ความเครียดกับการกระจัดยังคงเป็นเชิงเส้น

เพื่อจะแสดงความหมายขององค์ประกอบความเครียดตั้งฉาก ε_{xx} และ ε_{yy} และองค์ประกอบความเครียดเฉือน ε_{xy} พิจารณาเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมขนาดเล็ก OACB ซึ่งด้าน (ของความยาว dx และ dy) ตั้งอยู่ขนานกับแกนพิกัดก่อนการเปลี่ยนรูปร่าง เมื่อวัตถุประสพกับการเปลี่ยนรูปร่างภายใต้การกระทำจากการกระจายตัวจากภาวะภายนอกและอุณหภูมิ เอลิเมนต์ OACB เปลี่ยนรูปร่างไปเป็นรูปร่าง O'A'C'B' ดังที่แสดงในรูปที่ 3.3 เราสังเกตได้ว่าเอลิเมนต์ OACB มี 2 ประเภทในการเปลี่ยนรูปร่าง คือ การเปลี่ยนแปลงในขนาดและอีกอย่างหนึ่ง คือ การเสียรูปเชิงมุม

เมื่อความเครียดตั้งฉากถูกนิยามตามที่มีการเปลี่ยนแปลงในความยาวหารด้วยความยาวเดิม องค์ประกอบความเครียด ε_{xx} และ ε_{yy} สามารถที่จะหาได้ ดังนี้

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\left[dx + \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) - u \right] - dx}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.10)$$

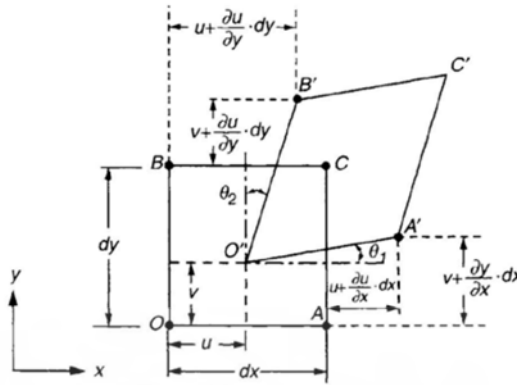
$$\varepsilon_{yy} = \frac{\left[dy + \left(v + \frac{\partial v}{\partial y} dy \right) - v \right] - dy}{dy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.11)$$

ความเครียดเฉือนถูกนิยามตามการลดลงในมุมด้านขวา ระหว่างเส้น OA และ OB ซึ่งที่มุมด้านขวา แต่ละมุมก่อนการเปลี่ยนรูปร่าง ด้วยเหตุนี้การแสดงความหมายของความเครียดเฉือน ε_{xy} สามารถที่จะได้มาเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xy} &= \theta_1 + \theta_2 \cong \tan \theta_1 + \tan \theta_2 \\ &= \frac{\left(v + \frac{\partial v}{\partial x} dx \right) - v}{\left[dx + \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) - u \right]} + \frac{\left(u + \frac{\partial u}{\partial y} dy \right) - u}{\left[dy + \left(v + \frac{\partial v}{\partial y} dy \right) - v \right]} \end{aligned}$$

ถ้าการกระจัดถูกสมมติให้มีขนาดเล็ก ε_{xy} สามารถที่จะแสดงได้เป็น ดังนี้

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (3.12)$$



รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนรูปร่างของเอลิเมนต์ [10]

การแสดงความหมายขององค์ประกอบความเครียดตั้งฉากที่เหลือ ε_{zz} และองค์ประกอบความเครียดเฉือน ε_{yz} และ ε_{zx} สามารถที่จะได้มาในแบบเดียวกันดังนี้

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3.14)$$

และ

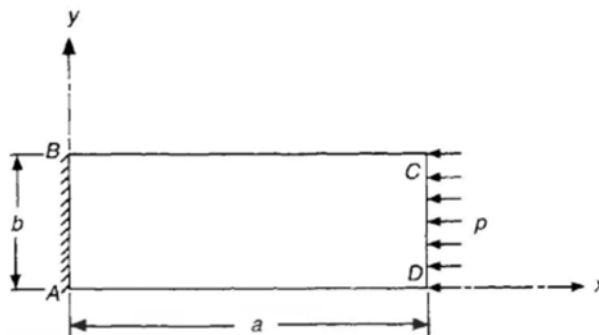
$$\varepsilon_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3.15)$$

3.1.1.5 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

เงื่อนไขขอบเขตสามารถเป็นไปได้ทั้งตามการกระจัดหรือตามความเค้น เงื่อนไขขอบเขตที่ต้องการตามการกระจัด บางการกระจัดเพื่อให้ได้ผลบางจุดบนขอบของวัตถุ ขณะที่เงื่อนไขขอบเขตที่ต้องการตามความเค้น ซึ่งก่อให้เกิดความเค้นจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุลกับแรงภายนอกที่ใช้กับบางจุดบนขอบของวัตถุ ตัวอย่างเช่น พิจารณาแผ่นแบนภายใต้ภาระในระนาบ แสดงในรูปที่ 3.4 ในกรณีนี้เงื่อนไขขอบเขตสามารถแสดงได้เป็น ดังนี้

เงื่อนไขขอบเขตการกระจัด $u = v = 0$ ตามขอบ AB และเงื่อนไขขอบเขตความเค้น

$$\sigma_{yy} = \sigma_{xy} = 0 \text{ ตามขอบ BC และ AD } \quad \sigma_{xx} = -p, \quad \sigma_{yy} = \sigma_{xy} = 0 \text{ ตามขอบ CD}$$

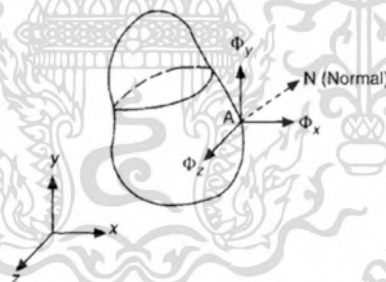


รูปที่ 3.4 แผ่นราบภายใต้ภาระในระนาบ [10]

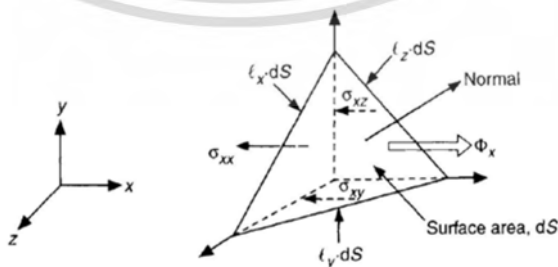
สำหรับสภาวะสมดุลก่อให้เกิดความเค้น และใช้แรงผิวที่จุด A ของรูปที่ 3.5 สมการดังต่อไปนี้ต้องสอดคล้องกัน

$$\begin{aligned} l_x \sigma_{xx} + l_y \sigma_{xy} + l_z \sigma_{xz} &= \Phi_x \\ l_x \sigma_{xy} + l_y \sigma_{yy} + l_z \sigma_{yz} &= \Phi_y \\ l_x \sigma_{xz} + l_y \sigma_{yz} + l_z \sigma_{zz} &= \Phi_z \end{aligned} \quad (3.16)$$

ที่ l_x, l_y และ l_z คือ ทิศทางทิศทางโคไซน์ที่พุ่งตรงออกมาตั้งฉาก (AN) ที่จุด A และ Φ_x, Φ_y และ Φ_z เป็นองค์ประกอบของแรงผิว (Traction) กระทำที่จุด A ในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ แรงผิว Φ_x, Φ_y และ Φ_z มีขนาดของแรงต่อหน่วยพื้นที่



(ก) องค์ประกอบของแรงที่ผิว



(ก) สมดุลของความเค้นภายในและแรงผิวรอบจุด A

รูปที่ 3.5 แรงกระทำที่ผิววัตถุ [10]

3.1.1.6 วิธีการแปรผัน (Variational Method)

หลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด พลังงานศักย์ของวัตถุที่ยึดหย่อนได้ ถูกนิยาม ดังนี้

$$\pi_p = \pi - W_p \quad (3.17)$$

ที่ π คือ พลังงานอันเกิดจากความเครียด และ W_p คือ งานบนวัตถุจากแรงภายนอก หลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุดสามารถที่จะกำหนดได้ดังนี้ กำหนดให้การกระจัดที่เป็นไปได้ทั้งหมด (u, v, w) วัตถุจะสมมุติให้มีความต่อเนื่องและเงื่อนไขขอบเขตการกระจัดนั้นสอดคล้องกัน สมการสมดุลทำให้พลังงานศักย์มีค่าต่ำที่สุด ถ้าพลังงานศักย์ π_p ถูกแสดงไว้ในพจน์ของการกระจัด u, v และ w หลักการหาค่าต่ำที่สุดของพลังงานศักย์ที่ภาวะสมดุลกำหนดให้ ดังนี้

$$\delta\pi_p(u, v, w) = \delta\pi(u, v, w) - \delta W_p(u, v, w) = 0 \quad (3.18)$$

สิ่งสำคัญที่จะต้องทราบการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวกับการกระจัดในสมการที่ (3.18) ส่วนของแรงและความเค้นถูกสมมุติให้คงที่ พลังงานจากความเครียดของวัตถุที่ยึดหย่อนแบบเชิงเส้นถูกกำหนดให้ดังนี้

$$\pi = \frac{1}{2} \int_V \vec{\epsilon}^T \sigma dV \quad (3.19)$$

ที่ V คือ ปริมาตรของวัตถุโดยการใช้ความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดของสมการที่ (3.8) พลังงานความเครียด ในความเครียดเริ่มต้น $\vec{\epsilon}_0$ สามารถแสดงได้ ดังนี้

$$\pi = \frac{1}{2} \int_V \vec{\epsilon}^T [D] \vec{\epsilon} dV - \int_V \vec{\epsilon}^T [D] \vec{\epsilon}_0 dV \quad (3.20)$$

งานจากแรงภายนอกสามารถที่จะแสดงได้ ดังนี้

$$W_p = \int_V \vec{\phi}^T \vec{U} \cdot dV + \int_{S_1} \vec{\Phi}^T \vec{U} dS_1 \quad (3.21)$$

$$\vec{\phi}^T = \begin{Bmatrix} \overline{\phi}_x \\ \overline{\phi}_y \\ \overline{\phi}_z \end{Bmatrix} = \text{เวกเตอร์ของแรงวัตถุที่รู้ค่า} \quad \vec{\Phi}^T = \begin{Bmatrix} \overline{\Phi}_x \\ \overline{\Phi}_y \\ \overline{\Phi}_z \end{Bmatrix} = \text{เวกเตอร์ของแรงผิวที่กำหนด}$$

$$\vec{U} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \text{เวกเตอร์การกระจัด และคือ พิวของวัตถุ ซึ่งแรงที่ผิวถูกกำหนดโดยการใช้สมการที่}$$

(3.18) และ (3.19) พลังงานศักย์ของวัตถุสามารถที่จะแสดงได้เป็น ดังนี้

$$\pi_p(u, v, w) = \frac{1}{2} \iiint_V \vec{\epsilon}^T [D] (\vec{\epsilon} - 2\vec{\epsilon}_0) dV - \iiint_V \vec{\phi}^T \vec{U} dV - \iint_{S_1} \vec{\Phi}^T \vec{U} dS_1 \quad (3.22)$$

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาของแข็งสามารถได้มาโดยใช้หลักการของพลังงานศักย์ เพื่อการได้มาของสมการสมดุลสำหรับปัญหา 3 มิติ ในส่วนนี้ เมื่อระดับความอิสระ (Degree of freedom) ของจุดต่อนั้นไม่รู้ค่าการกระจัด พลังงานศักย์ π_p ต้องแสดงไว้ในพจน์แรกของระดับความอิสระของจุดต่อ จากนั้น สมการสมดุลที่จำเป็นได้มาจากอนุพันธ์ย่อยอันหนึ่งของ π_p ที่เกี่ยวข้องแต่ระดับความอิสระของจุดต่อเท่ากับศูนย์ ขั้นตอนที่เกี่ยวข้องในการหาอนุพันธ์ของสมการสมดุลสามารถศึกษาได้จากตำรา [10]

3.1.2 สมการพื้นฐานสำหรับการถ่ายเทความร้อน

การแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนด้วยการวิเคราะห์ เพื่อให้ได้ผลเฉลยแม่นยำตรงนั้นมีขีดจำกัด ซึ่งวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถหาผลเฉลยโดยประมาณสำหรับปัญหาทั่วไปที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ โดยใช้หลักทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

3.1.2.1 สมการเชิงอนุพันธ์แบบควบคุมสำหรับวัตถุแบบ 3 มิติ (Governing Equation)

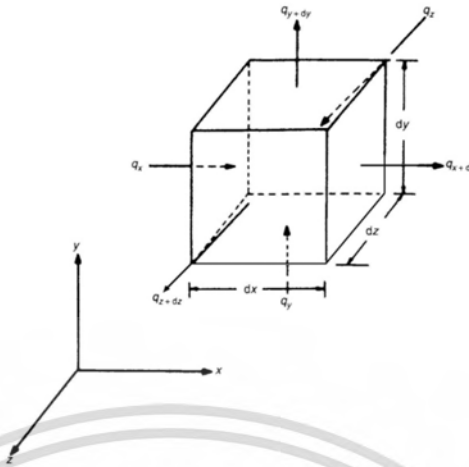
การพิจารณาเอลิเมนต์ของวัสดุในวัตถุของแข็ง ณ ตำแหน่งใดๆ ในวัสดุ 3 มิติ ที่มีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง ดังที่แสดงในรูปที่ 3.6 เอลิเมนต์ที่อยู่ในรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีขนาด dx, dy และ dz สมการสมดุลพลังงานอาจกล่าวได้ดังนี้

$$\text{ความร้อนไหลเข้าในช่วงเวลา } dt + \text{ความร้อนที่เกิดจากแหล่งภายในระหว่าง } dt = \text{ความร้อนไหลออกระหว่าง } dt + \text{การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในช่วง } dt \quad (3.23)$$

จากสมการ (3.23) สามารถจะแสดงสมการได้เป็น ดังนี้

$$(q_x + q_y + q_z)dt + \dot{q}dx dy dz dt = (q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz}) + \rho c dT dx dy dz \quad (3.24)$$

โดยที่ q_x = ความร้อนไหลเข้าสู่ผิวหน้าตำแหน่ง x



รูปที่ 3.6 เอลิเมนต์ในพิกัดคาร์ทีเซียน [10]

$$= -k_x A_x \frac{\partial T}{\partial x} = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} dy dz \quad (3.25)$$

q_{x+dx} = ความร้อนไหลออกจากผิวหน้าตำแหน่ง $x + dx$

$$= q_{x+dx} \approx q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx$$

$$= -k_x A_x \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x A_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \quad (3.26)$$

$$= -k_x \frac{\partial T}{\partial x} dy dx - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dz$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ และ c คือค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ, \dot{q} คือ อัตราการเกิดความร้อนต่อหน่วยปริมาตร (ต่อหน่วยเวลา), K_x คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุในทิศทาง x , A_x คือ พื้นที่ตั้งฉากในทิศทาง x โดยที่ความร้อนไหล = dy, dz , T คือ อุณหภูมิ, โดยแทนค่าสมการที่ (3.25) และ (3.26) และแสดงความหมายที่คล้ายกันสำหรับ q_y, q_{y+dy}, q_z และ q_{z+dz} ในสมการที่ (3.24) และทำการแบ่งแต่ละพจน์ด้วย dx, dy, dz, dt ได้ ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.27)$$

สมการที่ (3.27) เป็นสมการควบคุมเชิงอนุพันธ์ การนำความร้อนในวัตถุของแข็งแบบออร์โธทรอปิก (Orthotropic) หากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในทิศทาง x, y และ z คงที่ $k_x = k_y = k_z = k$ คุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบเดียวกัน (Isotropic body) วัตถุอยู่ในสภาวะคงที่และไม่มีแหล่งความร้อนใดๆ สมการที่ (3.27) จะสามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = 0 \quad (3.28)$$

3.1.2.2 สมการที่เกี่ยวข้องและเงื่อนไขขอบเขต

เนื่องจากสมการอนุพันธ์ที่ (3.28) เป็นอนุพันธ์อันดับสอง ประกอบด้วย 2 เงื่อนไขขอบเขตที่ต้องกำหนด เงื่อนไขขอบเขตที่เป็นไปได้ คือ

$$T(x, y, z, t) = T_0 \quad \text{สำหรับ } t > 0 \quad \text{บน } S_1 \quad (3.29)$$

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z + h(T - T_\infty) = 0 \quad \text{สำหรับ } t > 0 \quad \text{บน } S_3 \quad (3.30)$$

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน T_∞ คือ อุณหภูมิรอบนอก l_x, l_y, l_z คือ ทิศทางของโคไซน์ที่พุ่งตรงออกมาตั้งฉากกับขอบ S_1 คือ ขอบที่มีค่าของอุณหภูมิ กำหนดเป็น $T_0(t)$ S_3 คือ ขอบที่สูญเสียความร้อนจากการพา $h(T - T_\infty)$ ที่กำหนด และเงื่อนไขเริ่มต้น

$$T(x, y, z, t = 0) = \bar{T}_0(x, y, z) \quad \text{ใน } V \quad (3.31)$$

ที่ V คือ โดเมน (หรือปริมาตร) ของวัตถุของแข็ง และ \bar{T}_0 คือ การกระจายอุณหภูมิที่กำหนดในช่วงเวลาเป็นศูนย์

3.1.2.3 การกำหนดปัญหาในรูปแบบแปรผัน (Variational Form)

ปัญหาการนำความร้อนในแบบ 3 มิติสามารถที่ระบุในแบบแปรผัน (Variational) ที่สมมูลกันได้ทั้งหมดเป็น ดังนี้

$$I = \frac{1}{2} \iiint_V \left[k_x \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + k_y \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + k_z \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2 - 2 \left(\dot{q} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) T \right] dV \quad (3.32)$$

และสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตของสมการที่ (3.29) และ (3.30) และเงื่อนไขเริ่มต้นของสมการที่ (3.31) สมการที่ (3.30) จะถูกเพิ่มให้แก่ฟังก์ชันของสมการที่ (3.32) เพื่อที่ว่าเมื่อฟังก์ชันรวมกันจะถูก

ลดเงื่อนไขขอบเขตของสมการที่ (3.30) จะสอดคล้องโดยอัตโนมัติ สิ่งสำคัญที่เกี่ยวข้องกับสมการที่ (3.30) ถูกกำหนดให้มา ดังนี้

$$\iint_{S_3} \frac{1}{2} h(T - T_\infty)^2 dS_3 \quad (3.33)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันรวมที่สภาวะคงที่และไม่มีแหล่งความร้อนใดๆจะลดลงมาเป็น ดังนี้

$$I = \frac{1}{2} \iiint_V \left[k_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + k_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dV + \frac{1}{2} \iint_{S_3} \frac{1}{2} h(T - T_\infty)^2 dS_3 \quad (3.34)$$

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาการนำความร้อนสามารถได้มาโดยวิธีการแปรผัน (Variational approach) ในวิธีการนี้ พิจารณาค่าต่ำที่สุดของฟังก์ชัน I กำหนดให้โดยสมการที่ (3.35) ภายใต้ความสอดคล้องของเงื่อนไขขอบเขตของสมการที่ (3.29) และเงื่อนไขเริ่มต้นของสมการที่ (3.31) ขั้นตอนที่เกี่ยวข้องในการหาอนุพันธ์ของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถศึกษาได้จากตำรา[10]

$$T^{(e)}(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \vec{T}^{(e)} \quad (3.35)$$

3.1.3 สมการพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ความเค้นจากอุณหภูมิในวัสดุของแข็ง โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

กฎธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงวัสดุโดยส่วนมาก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้วัสดุมีรูปร่างใหญ่ขึ้น และเมื่ออุณหภูมิลดลง ขนาดวัสดุก็ลดลงด้วย โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในของแข็งมักจะทำให้เกิดผลกระทบดังนี้

- 1) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) และ ค่าความเค้นครากของวัสดุ (σ_y).
- 2) ความเค้นที่เกิดจากความร้อน จะถูกเพิ่มในกลไกที่ก่อให้เกิดความเค้นในโครงสร้างของแข็ง
- 3) ทำให้เกิดการคืบของวัสดุจนทำให้วัสดุมีความอ่อนแอและเสียหายที่อุณหภูมิสูง

กรณีความเค้นจากอุณหภูมิ ความเค้นในอุณหภูมิแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

- 1) อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสม่ำเสมอในของแข็งที่มีข้อ จำกัด ทางกายภาพ:

$$\sigma = -\alpha \Delta T \quad (3.36)$$

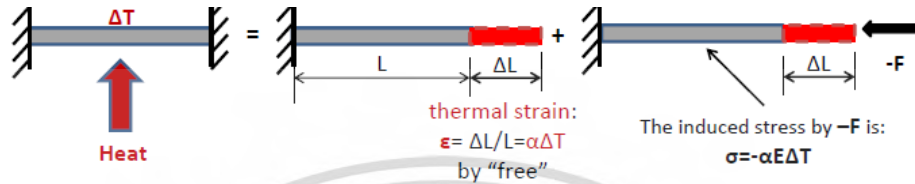
ที่

α = ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นสำหรับวัสดุที่อุณหภูมิองศาเซลเซียส ($^{\circ}C$)

ΔT = ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากจุดอ้างอิง

การแสดงออกดังกล่าวมาจากการซ้อนทับของสถานการณ์ต่อไปนี้
 การขยายตัวของแท่งโดยอิสระเป็นจำนวน $\Delta L = \alpha L \Delta T$

แรงเท่ากัน F "ดัน" กลับโดยปริมาณของ ΔL



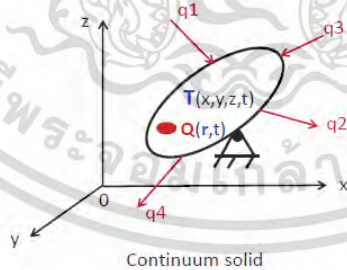
รูปที่ 3.7 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

2) ของแข็งที่มีการกระจายอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ: ความเครียดที่เกิดจากการกระจายอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอในของแข็งทำให้เกิด "restraints ภายใน" สำหรับการขยายตัวหรือการหดตัวของความร้อน

3) ของแข็งบางส่วนที่ถูกจำกัดเชิงกลควบคุม โดยการกระจายอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ลักษณะทั่วไปของโครงสร้างที่ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของภาวะความร้อน:

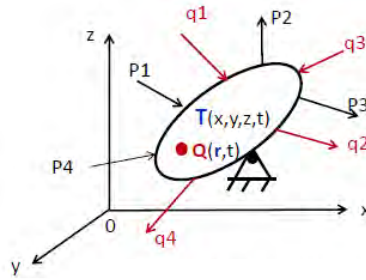
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t) = \rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (3.37)$$

การแก้ปัญหา $T(x, y, z, t)$ ของสมการข้างต้นเป็นขั้นตอนที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ ความเครียด ความร้อนของของแข็งในรูป 3.8.



รูปที่ 3.8 แสดงของแข็งที่มีการกระจายอุณหภูมิ

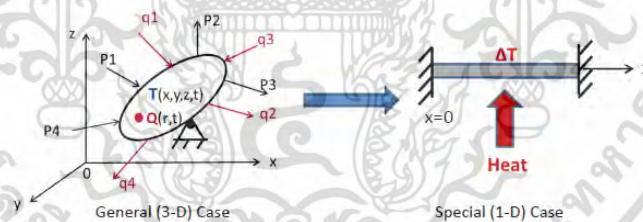
การสร้างสูตรไฟไนต์เอลิเมนต์ของความเครียดความร้อนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่เป็นของแข็ง



รูปที่ 3.9 แสดงของแข็งที่มีการกระจายอุณหภูมิและแรงเชิงกล

รูปแสดงของแข็งที่มีเขตข้อมูลอุณหภูมิ(กระจาย) $T(x, y, z, t)$ ที่ผลิตโดยแรงความร้อน Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 , และความร้อนด้วยตัวเอง Q . นอกจากนี้ยังต้องใช้แรงเชิงกล P_1, P_2, P_3, P_4 , คาดว่าของแข็งตอบสนองต่ออุณหภูมิและภาระทางกลพร้อมกัน โดย การเกิด การรวมกันทางกล อุณหภูมิ ความเครียด และความเค้น เพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลใหม่

นอกจากนี้เรายังตระหนักถึงความจริงที่ว่าของแข็งจะกลับไปเป็นรูปทรงเดิมที่ "ความเครียดฟรี" ในสถานะที่เมื่อทุกกองกำลังความร้อนและเครื่องกลจะถูกปล่อยออก (เราเรียกนี้ว่า "Unloading") พลังงานที่ทำให้เกิดการพองตัวของแข็งไปเป็นรูปทรงเดิมหลังการขนถ่าย คือ "พลังงานความเครียด" ที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุโดยแรงที่ใช้ (ความร้อนรวมและภาระทางกลในกรณีนี้) เราเริ่มต้นการกำหนดสูตรไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการพิจารณากรณี 1-D ง่าย ๆ ดังที่แสดงด้านล่าง



รูปที่ 3.10 แสดงการกระจายอุณหภูมิและแรงของแข็งสามมิติมาเป็นการกำหนดสูตรไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 1-D

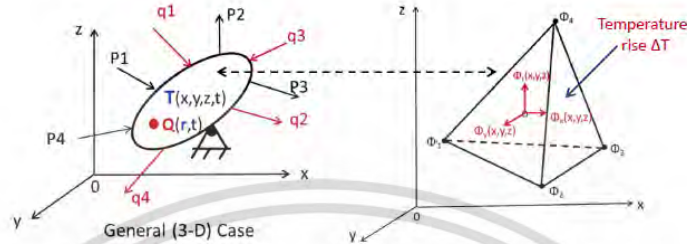
ปล่อยให้สายความร้อน εT เกิดขึ้นในแกน 1-D โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ΔT จะแสดงเป็น

$$\varepsilon T = \alpha \Delta T \quad (3.38)$$

เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปริมาณ "สเกลาร์" และความเครียดทางความร้อนในโครงสร้างของแข็ง เช่นในกรณีพิเศษของแถบ 1-D ความเครียดทางความร้อนเหนี่ยวนำโดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิหรือในบางกรณีอาจจะเพิ่มความเครียดเชิงกลตามกฎของฮุก:

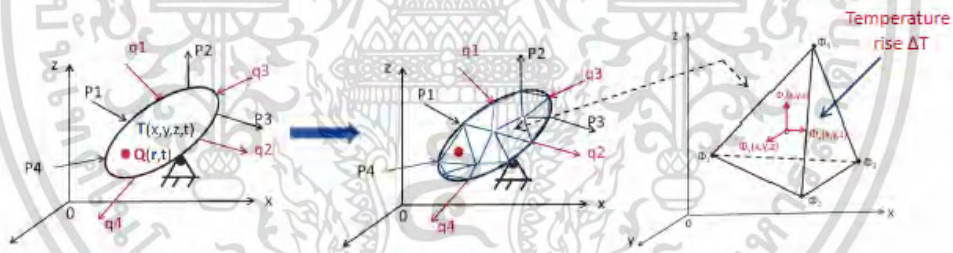
$$\varepsilon_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{E} + \varepsilon_T \quad (3.39)$$

ที่ E คือ ค่า Young's modulus of the rod material, และ ϵT is the induced thermal strain จากสมการที่ 3.38 ควรสังเกตว่าการขยายตัวทางความร้อนของสสารเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะไม่เท่ากันในทุกทิศทาง ดังนั้นเฉพาะความเครียดปกติ เท่านั้นที่ให้ผล



รูปที่ 3.11 แสดงการกระจายอุณหภูมิและแรงของของแข็งสามมิติมาเป็นการจำลองแบบองค์ประกอบ Tetrahedral

เราจะหาสูตรไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ความเค้นความร้อนของโครงสร้างของแข็งทั่วไป 3 มิติด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ต่างกันโดยสิ้นเชิงแบบจำลองเกี่ยวกับองค์ประกอบ tetrahedral ดังแสดงในรูปข้างต้น จะต้องเป็นภาระโหลดทางกลและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ΔT จากสมการ เราจะมีสูตรไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการรวมพลังงานทางกลและความร้อนที่กระทำต่อของแข็งพร้อมกัน



รูปที่ 3.12 แสดงการกระจายอุณหภูมิและแรงของของแข็งสามมิติมาเป็นการจำลองแบบการรวมพลังงานกลและความร้อนพร้อมกัน

1) ฟังก์ชัน อินเตอร์โพรเซชัน :

Nodal displacement s :

The element displacement is: $\{\delta(x,y,z)\}$ with three components:

$\delta_x(x,y,z)$ = องค์ประกอบเอลิเมนต์การเคลื่อนที่ ในแนวแกน X

$\delta_y(x,y,z)$ = องค์ประกอบเอลิเมนต์การเคลื่อนที่ ในแนวแกน Y

$\delta_z(x,y,z)$ = องค์ประกอบเอลิเมนต์การเคลื่อนที่ ในแนวแกน Z

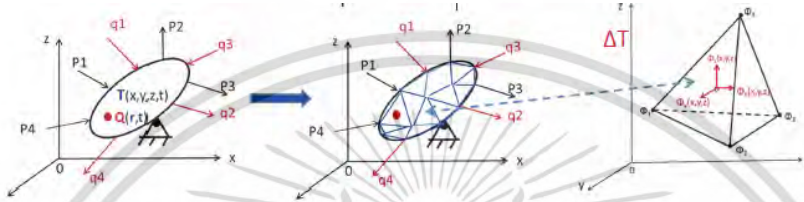
Nodal displacement s:

$$\{\ell\}^T = \{\ell_{1x} \ \ell_{1y} \ \ell_{1z} \ \ell_{2x} \ \ell_{2y} \ \ell_{2z} \ \ell_{3x} \ \ell_{3y} \ \ell_{3z} \ \ell_{4x} \ \ell_{4y} \ \ell_{4z}\}^T \quad (3.40)$$

$$\{\delta_{(x,y,z)}\} = [N_{(x,y,z)}] \{\ell\}$$

ที่ $[N_{(x,y,z)}] =$ ฟังก์ชันอินเตอร์โพรเซชัน

2) เอลิเมนต์ความเครียด กับ เอลิเมนต์การเคลื่อนที่:



รูปที่ 3.13 แสดงการกระจายอุณหภูมิและแรงของของแข็งสามมิติมาเป็นการจำลองแบบการรวมพลังงานกลและความร้อนพร้อมกัน

ความเครียดรวมในเอลิเมนต์ คือ:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_M\} + \{\varepsilon_T\} \quad (3.41)$$

ที่

$\{\varepsilon_M\}$ = การเหนี่ยวนำความเครียดโดยวิธีทางกล เช่น P1, P2, P3 และ P4.

$\{\varepsilon_T\}$ = การเหนี่ยวนำความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) โดย q1, q2, q3, q4 และ Q
การเหนี่ยวนำความเครียดทางความร้อนในเอลิเมนต์ที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแบบคงที่มีค่าเป็น:

$$\{\varepsilon_M\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_x(x, y, z) \\ \delta_y(x, y, z) \\ \delta_z(x, y, z) \end{Bmatrix}, \quad \{\varepsilon_T\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{T,xx} \\ \varepsilon_{T,yy} \\ \varepsilon_{T,zz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T \end{Bmatrix} \quad (3.42)$$

สมการ

$$\{\varepsilon_{(x,y,z)}\} = [D] \{\delta_{(x,y,z)}\} + [D_T] \{\delta T_{(x,y,z)}\} \quad (3.43)$$

มี 6 ส่วนประกอบของความเครียด ที่สอดคล้องกับความเค้นภายในของของแข็งที่มีรูปร่างผิดปกติ ส่วนประกอบความเครียดเหล่านี้เกี่ยวข้องกับ การเคลื่อนที่ของของแข็งที่เกิดจากแรงภายนอก เพราะการเปลี่ยนรูปร่างของของแข็งอย่างต่อเนื่องจะทำให้ของแข็งเปลี่ยนแปลงไปตลอด ดังนั้นความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_x(x, y, z) \\ U_y(x, y, z) \\ U_z(x, y, z) \end{Bmatrix} \quad (3.44)$$

หรือ $\{\varepsilon_{(x,y,z)}\} = [D]\{U_{(x,y,z)}\}$ (3.45)

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3.46) \quad [D_T] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

จากสมการ 3.42 เราจะได้

$$[D_T]\{\delta_{(x,y,z)}\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha\Delta T \\ \alpha\Delta T \\ \alpha\Delta T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.48)$$

เราจะใช้สมการที่ถูกตัดทอนจาก (3.43) นั่นคือ $\{ \epsilon (x,y,z) \} = [D]\{ \delta (x,y,z) \}$ ซึ่งใช้สำหรับการกำหนดสมการไฟไนท์เอลิเมนต์ในอนาคต

3) เอลิเมนต์ความเครียด และ โหนดของการเคลื่อนที่ด้วยเหตุนี้

$$\{ \epsilon \} = [D][N(x,y,z)]\{ \delta \} = [B(x,y,z)]\{ \delta \} \quad (3.49)$$

$$[B(x,y,z)] = [D][N(x,y,z)] \quad (3.50)$$

4) เอลิเมนต์ความเค้น และ การเคลื่อนที่ของเอลิเมนต์

$$\{ \sigma \} = [C]\{ \epsilon \} \quad (3.51)$$

ที่อีลัสติกของเมตริก $[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$

ดังนั้น $\{ \sigma \} = [C][B(x,y,z)]\{ \delta \}$ (3.52)

5) พลังงานความเครียดที่การเคลื่อนที่สำคัญ

$$U = \frac{1}{2} \int_v \{ \epsilon \}^T \{ \sigma \} dV \quad (3.53)$$

ด้วยเหตุนี้

$$U = \frac{1}{2} \int_v ([B(x,y,z)]\{l\})^T [C]([B(x,y,z)]\{l\}) dV \quad (3.54)$$

หรือ

$$U = \frac{1}{2} \int_v \{l\}^T [B(x,y,z)]^T [C][B(x,y,z)]\{l\} dV \quad (3.55)$$

การสร้างสมการเอลิเมนต์

- พลังงานความเครียด

พลังงานที่เป็นไปได้ในของแข็งที่มีการเสียรูปโดยแรงเชิงกลเป็นหลัก

$$U = \frac{1}{2} \int_v \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dv = \frac{1}{2} \int_v \left\{ \begin{matrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{zz} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{xz} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{matrix} \right\} dV$$

$$U = \frac{1}{2} \int_v (\varepsilon_{xx} \sigma_{xx} + \varepsilon_{yy} \sigma_{yy} + \varepsilon_{zz} \sigma_{zz} + \varepsilon_{xy} \sigma_{xy} + \varepsilon_{yz} \sigma_{yz} + \varepsilon_{xz} \sigma_{xz}) dV \quad (3.56)$$

ทั้งความเค้นและความเครียดเป็นส่วนประกอบของฟังก์ชัน (x, y, z) และ $dV = (dx)(dy)(dz)$ = ปริมาตรของจุดที่ให้ของแข็งเกิดการเสียรูปโดยแรงเชิงกล เราไม่ได้รวมความเครียดความร้อนในสมการพลังงานความเครียดเนื่องจากเป็นค่าคงที่ตามสมการ (3.43) ความเครียดทางความร้อนที่เกิดจากการขยายตัวทางความร้อน (หรือหดตัว) ที่ไหนต จะถือว่าเป็นแรงสำคัญ พลังงานความเค้นเป็นปริมาณที่เป็นสเกลาร์

พลังงานที่เป็นไปได้ในของแข็งที่มีการเปลี่ยนรูป โดยกำลังทางกลภายนอกเป็นหลัก:

งาน (W) = แรง × ระยะการเคลื่อนที่

แรงที่ทำให้เกิดการเสียรูป มีสองแบบ คือ

- 1) แรงแม่เหล็ก (มีการกระจายสม่ำเสมอทั่วปริมาตรของของแข็ง (V)), อย่างเช่น น้ำหนักเท่ากับแรงความร้อนความเครียด โดย ความร้อนคือ แรงแม่เหล็ก)
- 2) การยึดผิว อย่างเช่น ความดัน หรือ แรงที่มุ่งกระทำบนขอบเขตของพื้นผิว(s)

การหาค่าของงานทางคณิตศาสตร์

$$W = \int_v \{\delta(x, y, z)\}^T \{f\} dV + \int_s \{\delta(x, y, z)\}^T \{t\} dS \quad (3.57)$$

$$= \int_v \left\{ \begin{matrix} \delta_x(x, y, z) & \delta_y(x, y, z) & \delta_z(x, y, z) \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{matrix} \right\} dV$$

$$+ \int_s \left\{ \begin{matrix} \delta_x(x, y, z) & \delta_y(x, y, z) & \delta_z(x, y, z) \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{matrix} \right\} dS \quad (3.58)$$

ที่ $\{\delta(x, y, z)\}$ คือ เอลิเมนต์การเคลื่อนที่ของแข็ง ที่ $(x, y, z), \{f\}$ = แรงในตัววัสดุ และ $\{t\}$ = แรงดึงระหว่างผิว และ dS = ขอบเขตของชิ้นส่วนพื้นผิวที่ใช้แรงดึงผิว

พลังงานศักย์ในการเสีรูปของของแข็ง ขึ้นอยู่กับ แรงกลไกดั่งนั้น, พลังงานศักย์ ถูกเก็บไว้ใน การเสีรูปของของแข็ง ที่ $P=U-W$ หรือ

$$P=U-W=\frac{1}{2}\int_V\{\epsilon(x, y, z)\}^T\{\epsilon(x, y, z)\}dV-\left(\int_V\{\ell(x, y, z)\}^T\{f\}dV+\int_S\{\ell(x, y, z)\}^T\{t\}dS\right) \quad (3.59)$$

ตามหลักการแปรผันของ Rayleigh-Ritz สภาพสมดุลสำหรับการเสีรูปของของแข็ง ควรที่จะอยู่ในรูป

$$\frac{\partial P(\ell)}{\partial \{\ell\}} = 0$$

จากที่ สมการสำหรับ แต่ละเอลิเมนต์ อาจได้มาจาก

$$\frac{\partial P(\ell)}{\partial \ell_1} = 0, \frac{\partial P(\ell)}{\partial \ell_2} = 0, \frac{\partial P(\ell)}{\partial \ell_3} = 0, \dots$$

สมการเอลิเมนต์ โดยกระบวนการแปรผัน การแปรผันเกิดขึ้นได้ใน

$$\left(\int_V[B(x, y, z)]^T[C][B(x, y, z)]dV\{\ell\}\right) - \left(\int_V[N(x, y, z)]^T\{f\}dV\right) - \left(\int_S[N(x, y, z)]^T\{t\}dS\right) = 0 \quad (3.60)$$

เมื่อย้าย 2 สมการสุดท้ายมาทางด้านขวาของสมการ

$$\left(\int_V[B(x, y, z)]^T[C][B(x, y, z)]dV\{\ell\}\right) = \left(\int_V[N(x, y, z)]^T\{f\}dV\right) + \left(\int_S[N(x, y, z)]^T\{t\}dS\right) \quad (3.61)$$

เราอาจแสดงสมการ ด้วยสมการเอลิเมนต์ ดังนี้

$$[K_e]\{\delta\} = \{q\} \quad (3.62)$$

ที่

$$[K_e] = \int_V[B(x, y, z)]^T[C][B(x, y, z)]dV = \text{เมตริกซ์สติเฟนสเอลิเมนต์}$$

$$\{\delta\} = \text{องค์ประกอบการเคลื่อนที่ของโนดอล}$$

$$\{q\} = \int_V[N(x, y, z)]^T\{f\}dV + \int_S[N(x, y, z)]^T\{t\}dS = \text{องค์ประกอบการเคลื่อนที่ของโนดอล}$$

ใน สมการเมตริกแรงโนดอล: $\{f\}$ = แรงในตัววัสดุ และ $\{t\}$ = แรงดึงผิว รวมถึงแรงความดันบนขอบเขตพื้นผิวที่กำหนดของเอลิเมนต์

ความร้อนทางความเครียดที่โนดอลแรง ในการวิเคราะห์ความเค้นจากความร้อน

เนื่องจากความเป็นจริงที่เราไม่ได้รวมความเครียดทางความร้อน จากการคำนวณของพลังงานความเครียด “U” ในการคำนวณพลังงานศักย์ในการเสียรูปของแข็ง, ความเครียดทางความร้อน ถือว่าเป็นส่วนประกอบของแรงโนดอล ถูกเรียกว่า “แรงความร้อน” ทำหน้าที่ที่โหนดในสมการเอลิเมนต์ดังต่อไปนี้

$$[K_e]\{\delta\} = \{q\}$$

ที่ เมตริกซ์สติเฟนสเอลิเมนต์

$\{\delta\}$ = องค์ประกอบการเคลื่อนที่ของโหนด

$$\{q\} = \int_V [N(x, y, z)]^T \{f\} dV + \int_S [N(x, y, z)]^T \{t\} dS = \text{เมตริกซ์ที่จุดต่อ}$$

แรงร้อนความที่โหนด $\{f_T\} = \int_V [B]^T [C] \{\epsilon_T\} dV$ ได้จากการนำเสนอสมการอินทิกรัลทั่วไป ในส่วนที่เป็นตัวหนาในสมการ มีการนำเสนอสำหรับกรณีพิเศษ ดังต่อไปนี้

เราอาจนำเสนอแนวคิดที่ โหนดแรงกลไกความร้อนเป็นก้อน ในสมการดังนี้

$$[K_e]\{\delta\} = \{f_M\} + \{f_T\} \quad (3.63)$$

ที่

$\{\delta\}$ = เมตริกซ์การเคลื่อนที่ของจุดต่อ

$\{f_M\}$ = แรงกลที่จุดต่อ

$\{f_T\}$ = แรงความร้อน

การนำเสนอแนวคิดโดยทั่วไป สำหรับแรงโนดอลที่ถูกสนับสนุนโดย ความเครียดความร้อน

$$\{q_T\} = \int_V [B(x, y, z)]^T [C] \{\epsilon_T\} dV \quad (3.64)$$

3.2 สภาวะแวดล้อมในหม้อเผาปูนซีเมนต์

หม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน (Rotary cement kiln) เป็น อุปกรณ์สำคัญในการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง เพื่อสร้างความร้อนให้แก่วัตถุดิบ สำเร็จ (Raw meal) โดยเตาเผา ดังกล่าวจะควบคุมอุณหภูมิที่ 1450 °C Rotary Kiln แบ่งออกเป็นสี่ช่วงด้วยกัน คือ

ช่วงที่1 Drying เป็นช่วงที่ทำให้วัตถุดิบแห้งสำเร็จ อุณหภูมิประมาณ 200 °C

ช่วงที่2 Preheating เป็นช่วงที่ไล่ความชื้น ไอน้ำที่อยู่ในวัตถุดิบสำเร็จออกไปให้หมด มี

อุณหภูมิ ประมาณ 200 – 400 °C

ช่วงที่3 Calcining เป็นช่วงที่คอยไล่เอาก๊าซต่างๆออกไปเช่น ก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ โดนอุณหภูมิประมาณ 600 – 800°C

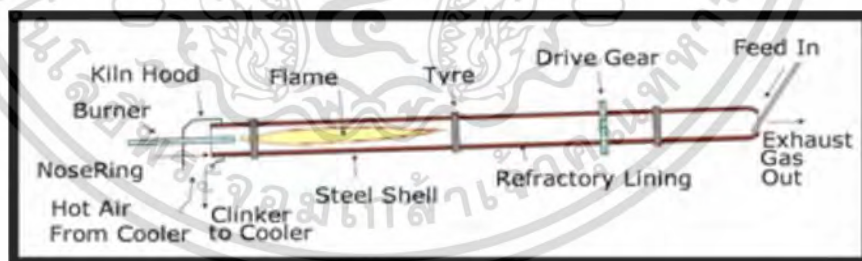
ช่วงที่4 Clinkering เป็นช่วงที่เกิดการหลอมเหลวของวัตถุดิบสำเร็จ โดยมีการ

เปลี่ยนแปลงเฟสมาในช่วงนี้ตามระดับอุณหภูมิ ช่วงนี้มีอุณหภูมิประมาณ 1300 – 1500 °C

3.2.1 ระบบไลน์นิ่งทไฟ ในหม้อเผาปูนซีเมนต์

เตาเผาโรงงานปูนซีเมนต์เป็นเตาเผาแบบหมุน ทำด้วยเหล็กกล้ารูปทรงกระบอกข้างในบุด้วยวัสดุทนไฟที่ทำด้วย อิฐทนไฟ หรือ คอนกรีตทนไฟ วัตถุประสงค์หลักของไลน์นิ่งทไฟเพื่อรักษาและปรับปรุงประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบ และเพื่อป้องกันเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์จากอุณหภูมิสูงและสภาวะแวดล้อมต่างๆ (Rotary Kiln)

หม้อเผา ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยชั้นของเปลือก ทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนชนิดแผ่นม้วน มีความหนา 50 mm เชื่อมประกอบเป็นรูปทรงกระบอก มีความยาว 230 m เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 m วางเป็นมุมเอียงและหมุนรอบตัวช้าๆ ปล่อยวัตถุดิบให้ไหลมาในท่อทางด้านต่ำสวนทางกับไฟที่พ่นเข้าไปโดยน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง เผาจนวัตถุดิบมีอุณหภูมิสูงประมาณ 1,500 °C ถัดจากนั้นเป็นชั้นของวัสดุทนไฟ บริเวณที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนจำเป็นต้องใช้คอนกรีตทนไฟ ซึ่งเป็นคอนกรีตแบบ ผสมเสริม สามารถเทหล่อเป็นรูปร่างตามต้องการ โดยมีเหล็กยึดอยู่ภายในเพื่อเสริมความแข็งแรง รายละเอียดแบบรูป (Drawing) ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 กระบวนการภายในหม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน

3.2.2 ปัจจัยที่ทำลายระบบไลน์นิ่งทไฟ

ปัจจัยหลักที่พิจารณาถึงระบบไลน์นิ่ง โดนทำลาย คือ การเสื่อมความแข็งแรงของคอนกรีตทนไฟที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติทาง กลของคอนกรีตทนไฟ นั่นคือ ความทนต่อแรงอัด ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและ ความเครียดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและ

ภาวะ แนวนอนของความแข็งแรงที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ คอนกรีตทนไฟสูญเสียความแข็งแรง เมื่อเข้าใกล้อุณหภูมิวิกฤต อุณหภูมิวิกฤตนั้นขึ้นอยู่กับจุดหลอมเหลวและความทนต่อไฟของวัสดุคอนกรีตทนไฟ ผลการสูญเสียความแข็งแรงทำให้เสียรูปทรง และสูญเสียความสามารถในการรับภาระ ซึ่งเป็นการสูญเสียที่ตามมาต่อ ความมั่นคงแข็งแรงของระบบโล่หนึ่ง โดยพบว่าลักษณะที่เกิดขึ้น สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ [1] คือ

1) การ เสื่อมลงของวัสดุและการสูญเสียมวลของคอนกรีตทนไฟ เนื่องจากโดนกัดกร่อนและการเสียดสีของ เม็ดปูน และปฏิกิริยาทางเคมีของละอองเม็ดปูน

2) การแตก และการหลุดร่อน เนื่องจากโดนความร้อนและอิทธิพลลมที่หมุนวนจากหม้อเย็น

อีกทั้งคอนกรีตทนไฟที่อยู่ภายใต้ภาระทางความร้อนที่แตกต่างกัน

อาจจะนำไปสู่การเกิด ปรากฏการณ์ ได้แก่

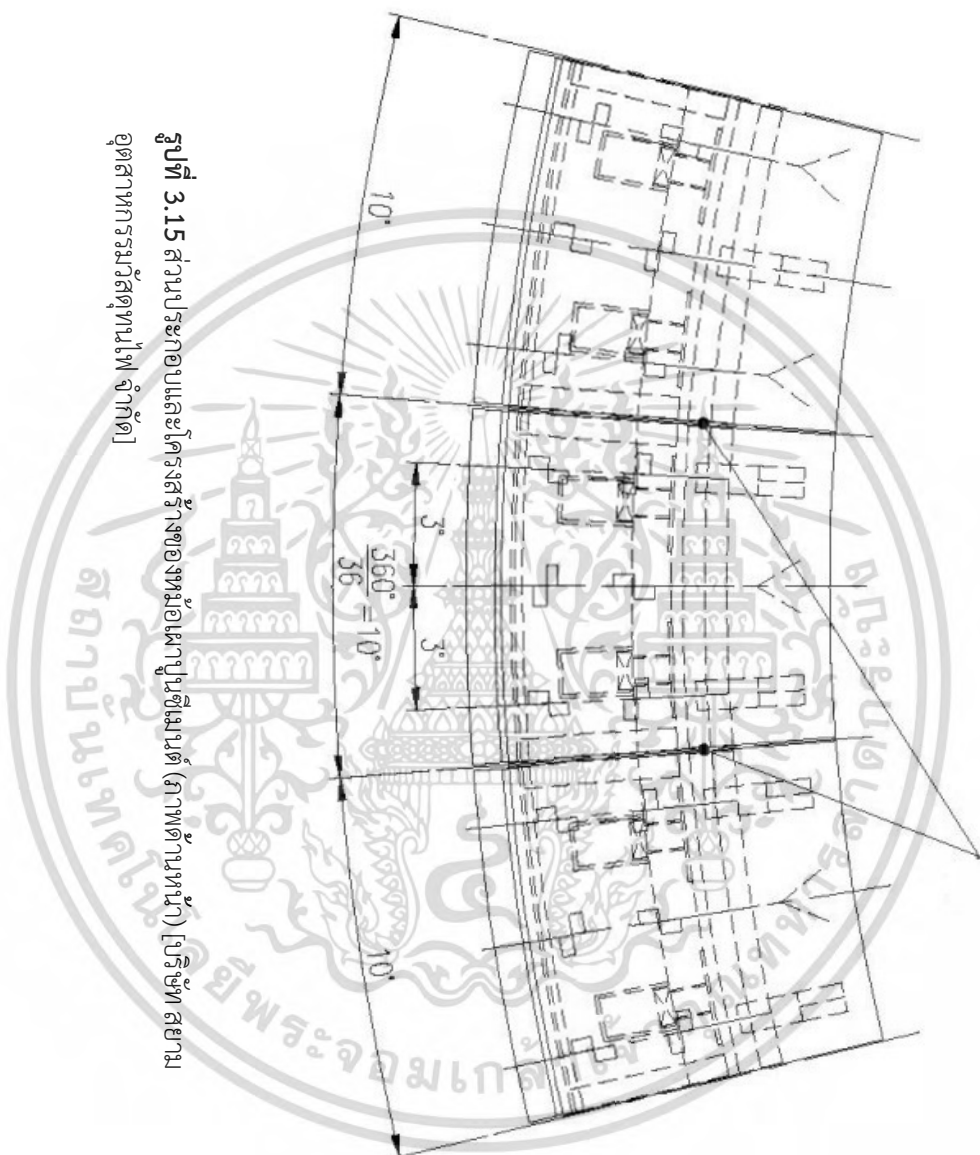
1) เกรเดียนท์ทางความร้อน เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวด้าน ร้อน (อุณหภูมิประมาณ 1,000 ถึง 1,400 °C) และผิวด้านเย็น (อุณหภูมิประมาณ 250 ถึง 350°C)

2) ความแตกต่างของการขยายตัวจากความร้อนระหว่างเหล็ก (เปลือกหม้อเผาและเหล็กยึด) และคอนกรีตทนไฟ

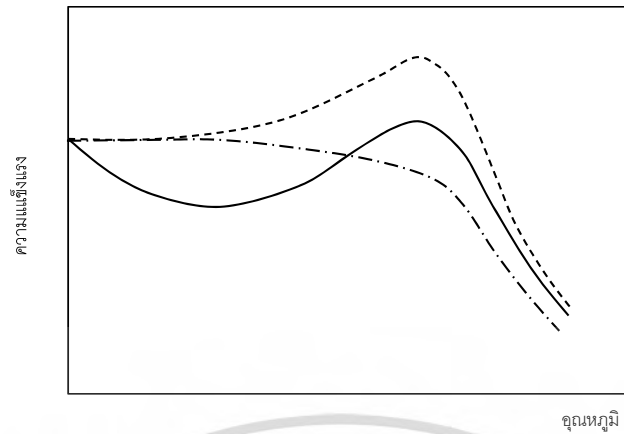
3) วัฏจักรความร้อนในระหว่างสัมผัสวัสดุดิบและไม่สัมผัสวัสดุดิบสลับกันไป

ปรากฏการณ์ดังกล่าว อาจก่อให้เกิดความเค้นที่ผสมผสานไปด้วย ความเค้นดึง ความเค้นอัด และความเค้นเฉือน ความเค้นเหล่านี้อาจมีค่าสูงต่อคอนกรีตทนไฟ ดังนั้น สภาวะความเค้นจึงอาจ เป็นสาเหตุของการแตก และปัญหาการหลุดร่อนในคอนกรีตทนไฟ การขยายตัวจากความร้อนระหว่างคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด เป็นผลกระทบทำให้เกิดการก่อตัวของการแตกร้าวภายในเนื้อคอนกรีตทนไฟ จึงทำให้ความแข็งแรงเสื่อมลง จนนำไปสู่การเสียหายของโล่หนึ่งในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.17

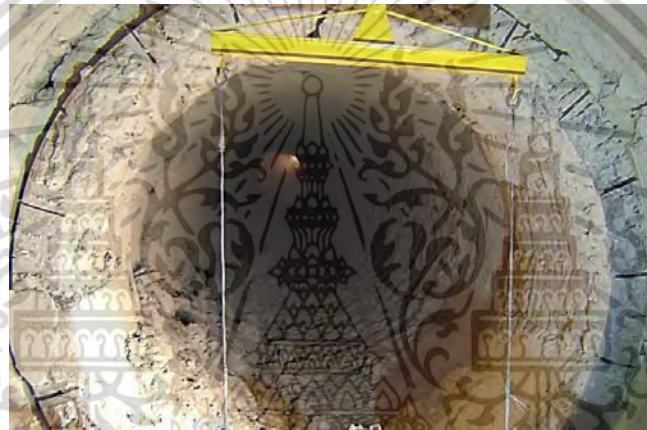
การเสียหายของคอนกรีตทนไฟแต่ละบริเวณมีความรุนแรงและความถี่ไม่เท่ากัน คอนกรีตทนไฟในแนวตั้งมีอายุการใช้งานสั้น เพราะคอนกรีตทนไฟถูกรองรับด้วย เหล็กยึดเท่านั้น ภาระที่เกิดขึ้นต่อเหล็กยึดมาจากน้ำหนักและภาระจากการขยายตัวของคอนกรีตทนไฟเป็นสำคัญ การออกแบบโล่หนึ่งทนไฟบริเวณนี้ต้องคำนึงถึง รูปทรงและจำนวนของเหล็กยึดด้วย ถ้า ปริมาณเหล็กยึดมากเกินไปอาจเป็นผลให้เกิดความเค้นสูงภายในเนื้อคอนกรีตทนไฟ และถ้าไม่ เพียงพออาจมีความเสี่ยงในการรับน้ำหนักของคอนกรีตทนไฟไม่ได้ [13]



รูปที่ 3.15 ส่วนประกอบและโครงสร้างของหม้อเผาปูนซีเมนต์ (ภาพด้านหน้า) [บริษัท สยาม
อุตสาหกรรมวัสดุไฟฟ้า จำกัด]



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงและอุณหภูมิของวัสดุทนไฟ [7,8]



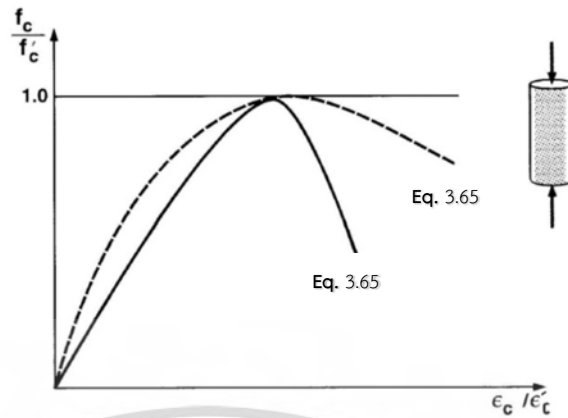
รูปที่ 3.17 ลักษณะการแตกและการหลุดร่อนของไลน์นิ่งทนไฟในหม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน [1]

3.3 พฤติกรรมทางกลของวัสดุ

3.3.1 พฤติกรรมทางกลสำหรับคอนกรีต

3.3.1.1 แบบจำลองพฤติกรรมการอัด

Popovics (1970) และ Thorenfeldt (1987) ได้พัฒนาแสดงวิธีการเพื่อให้ได้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดจากการอัดของคอนกรีต ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคอนกรีต f_c และสอดคล้องกับความเครียด ϵ_c ดังแสดงในรูปที่ 3.18 เป็นดังสมการความเค้นดัดอนุญาต (สมการที่ 3.87)



รูปที่ 3.18 แบบจำลองคอนกรีตเชิงโครงสร้างของ Popovics และ Thorenfeldt [25]

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{n(\epsilon_c/\epsilon'_c)}{n-1+(\epsilon_c/\epsilon'_c)^{nk}} \quad (3.65)$$

โดยที่

f'_c คือ ความเค้นอัดสูงสุดของคอนกรีต (MPa), ϵ'_c คือ ความเครียด เมื่อ f_c เข้าใกล้ f'_c , n คือ ปัจจัยของกราฟที่สอดคล้องกับค่า $E_c/(E_c - E'_c)$, E'_c คือ ความยืดหยุ่น (เมื่อ $\epsilon_c = 0$), $E'_c = f'_c/\epsilon'_c$, k คือ ปัจจัยเพื่อควบคุมความลาดชันของกราฟความเค้นและความเครียด ค่าคงที่ ϵ'_c, n, k คือ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่กำหนดโดย Collins และ Mitchell (1990) ซึ่งถูกแสดงในสมการที่ (3.66), (3.67), (3.68) และ (3.67) สำหรับคอนกรีตมีค่าความหนาแน่นปกติ n และ k สามารถหาได้ ดังนี้

$$\text{สำหรับ } \epsilon_c/\epsilon'_c \leq 1.0 \quad k = 1.0 \quad (3.66)$$

$$\text{สำหรับ } \epsilon_c/\epsilon'_c > 1.0 \quad k = 0.67 + \frac{f'_c}{62} \geq 1.0 \quad (3.67)$$

$$n = 0.8 + \frac{f'_c}{17} \quad (3.68)$$

ถ้า n, f'_c และ E_c ทราบค่า ความเครียดที่ความเค้นสูงสุดสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\epsilon'_c = \frac{f'_c}{E_c} \left(\frac{n}{n-1} \right) \quad (3.69)$$

โดยทำการคำนวณ k, n และ ϵ'_c จากสมการที่ (3.66) ถึง (3.68) ความเค้นอัดของคอนกรีต f_c สำหรับความเครียดต่างๆ สามารถคำนวณจากสมการที่ (3.70)

$$f_c = \frac{n(\epsilon_c/\epsilon'_c) \times f'_c}{n-1+(\epsilon_c/\epsilon'_c)^{nk}} \quad (3.70)$$

จากความเครียดทุกค่า ความเครียดพลาสติกถูกคำนวณโดยการใชสมการที่ (3.71) และ (3.72)

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_t - \varepsilon_{el} \quad (3.71)$$

$$\varepsilon_{el} = \frac{f_c}{E_c} \quad (3.72)$$

โดยที่

ε_t คือ ความเครียดรวม, ε_{el} คือ ความเครียดยืดหยุ่น, ε_{pl} คือ ความเครียดพลาสติก f_c คือ ความเค้นอัด ที่ ε_t และ E_c คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น

3.3.1.2 แบบจำลองพฤติกรรมการดึง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงและความเครียดดึงแบบเชิงเส้นถูกใช้กระทั่งความเค้นดึงหลักของคอนกรีตเข้าใกล้ความเค้นดึงสูงสุด f_t' โดยถูกประมาณค่า ดังสมการที่ (3.73)

$$f_t' = 0.6\sqrt{f_c} \quad (3.73)$$

เนื่องจากอิทธิพลของพันธะแรงยึดเหนี่ยว ความเค้นดึงสามารถพัฒนาในคอนกรีตระหว่างการแตกร้าว การเพิ่มขึ้นของรอยแตกร้าวในช่วงพื้นที่หลังการเสียหาย นั้นคือ ผลของการอธิบายพฤติกรรมการเสียหายของคอนกรีตเสริมเหล็กจากการถ่ายเทแรงดึงจากเหล็กเสริมแรงไปยังบริเวณพันธะระหว่างเหล็กเสริมแรงและคอนกรีต หรือเรียกว่า ค่าเพิ่มขึ้นสตีฟเฟนนิ่ง (Tension stiffening) ดังแสดงในรูปที่ 3.19 การตอบสนองของคอนกรีตเสริมแรงในแรงดึง ดังสมการที่ (3.74)

$$f_c = \begin{cases} E_c \varepsilon, & 0 < \varepsilon < \varepsilon_{cr} \\ \frac{f_t'}{1 + \sqrt{200\varepsilon}}, & \varepsilon > \varepsilon_{cr} \end{cases} \quad (3.74)$$

โดยที่ ε_{cr} ความเครียดที่แตกร้าว



รูปที่ 3.19 การตอบสนองแรงดึงของคอนกรีตเสริมแรงหลังจากการเสียหาย [25]

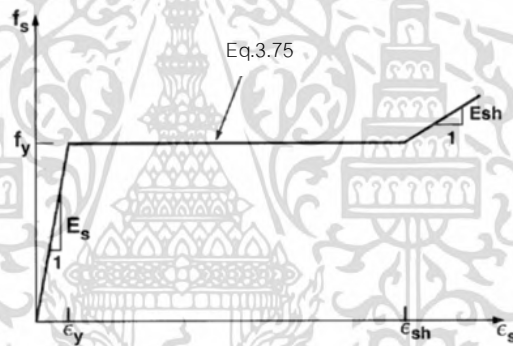
3.3.2 พฤติกรรมทางกลสำหรับเหล็กเสริมแรง

การตอบสนองของความเค้นและความเครียดแบบเชิงเส้นของเหล็กเสริมแรงสามารถแสดงในรูปที่ 3.20 ประกอบด้วย การตอบสนองเริ่มต้นแบบยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น จุดคราก และการเพิ่มความแข็งแรงโดยอาศัยความเครียดแบบเชิงเส้น จนกระทั่งแตกหัก ความเค้นเหล็กเสริมแรง f_{si} ในแรงดึง ถูกกำหนดให้ดังสมการที่ (3.75) ดังนี้

$$f_{si} = \begin{cases} E_s \varepsilon_{si}, & 0 < \varepsilon_{si} \leq \varepsilon_y \\ f_y, & \varepsilon_y < \varepsilon_{si} \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y + E_{sh} (\varepsilon_{si} - \varepsilon_{sh}) \leq f_u, & \varepsilon_{si} > \varepsilon_{sh} \end{cases} \quad (3.75)$$

โดยที่

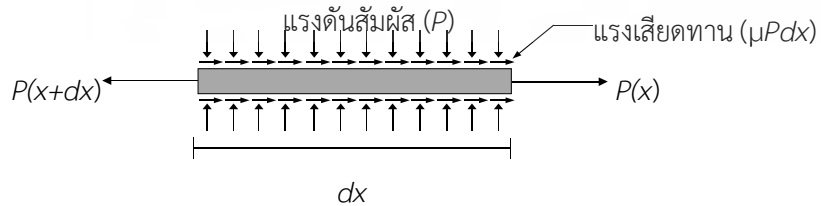
E_s คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น, ε_{si} คือ ความเครียดการเสริมแรง, ε_y คือ ความเครียดจุดคราก, ε_{sh} คือ ความเครียดที่จุดเริ่มการเพิ่มความแข็งแรงโดยอาศัยความเครียด, E_{sh} คือ โมดูลัสของการเพิ่มความแข็งแรงโดยอาศัยความเครียด, f_y คือ ความแข็งแรงจุดคราก และ f_u คือ ความแข็งแรงสูงสุด



รูปที่ 3.20 การตอบสนองความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมแรง [25]

3.4 พันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีต (Bond Stress)

ความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างพันธะแรงยึดเหนี่ยว u (kg/cm^2), แรงดันสัมผัส P และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ที่มีพันธะต่อกันระหว่างเหล็กและคอนกรีต กำหนดให้เป็นดังสมการที่ (3.76)



รูปที่ 3.21 แบบจำลองแรงเสียดทานต่อแท่งเหล็กในคอนกรีต [26]

$$u = \mu P \quad (3.76)$$

3.4.1 แบบจำลองสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

แบบจำลองถูกสมมุติว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเสื่อมลงแบบฟังก์ชันเลขชี้กำลัง จากค่าแบบสถิต (Static) กับค่าแบบจลน์ (Kinetic) ดัง สมการที่ (3.77)

$$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k)e^{-d_c \dot{\gamma}_{eq}} \quad (3.77)$$

โดยที่

μ_k คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์-สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่อัตราเลื่อนไหลสูงสุด, μ_s คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบสถิต-สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ซึ่งในตอนเริ่มต้นจะเป็นการเลื่อนไหลจากสภาวะที่ยึดติด ในแบบจำลองสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบสถิตสอดคล้องกับค่าที่อัตราเลื่อนไหลเป็นศูนย์, d_c คือ สัมประสิทธิ์การเสื่อมลง และ $\dot{\gamma}_{eq}$ คือ อัตราการเลื่อนไหลสมมูล [20]

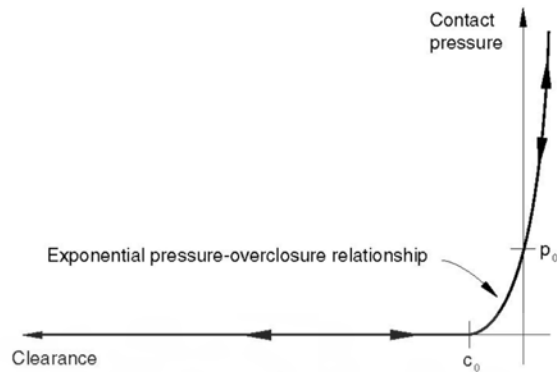
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่อการเลื่อนไหลถูกคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับการเลื่อนไหลที่มีพันธะต่อกันระหว่างเหล็กและคอนกรีต



รูปที่ 3.22 ฟังก์ชันเลขชี้กำลังในแบบจำลองแรงเสียดทานที่เสื่อมลง [20]

3.4.2 การจำลองแรงดันสัมผัส (Contact Pressure)

แบบจำลองการสัมผัสเป็นแบบซอฟเท็น (Softened) ซึ่งแรงดันที่สัมผัสในช่องว่างระหว่างผิวเป็นความสัมพันธ์แรงดันกับช่องว่าง สามารถกำหนดโดยใช้หลักการฟังก์ชันเลขชี้กำลัง รูปที่ 3.23 แสดงการสัมผัสแบบซอฟเท็นที่การเชื่อมต่อสัมผัสกัน ที่แกน x กำหนดเป็นช่องว่างระหว่างผิวสัมผัส และแกน y กำหนดเป็นแรงดัน ซึ่งกระทำตั้งฉากกับผิวสัมผัส ในการสัมผัสแบบซอฟเท็นพื้นผิวจะเริ่มต้นส่งถ่ายแรงดันสัมผัสในหนึ่งช่องว่างระหว่างพื้นผิว วัดในแนวสัมผัสที่ตั้งฉาก (ลดลงไปทาง c) แรงดันสัมผัสถูกส่งผ่านระหว่างพื้นผิว จากนั้นเพิ่มขึ้นแบบฟังก์ชันเลขชี้กำลัง ตามช่องว่างอย่างต่อเนื่องจนลดน้อยลงไป p^0 คือ แรงสัมผัสที่ช่องว่าง และ c คือ ช่องว่างระหว่างพื้นผิว ซึ่งแรงดันสัมผัสลดลงจนเป็นศูนย์ สมการที่ (3.78), (3.79), (3.80) และ (3.81) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสัมผัสและช่องว่างเป็น ดังนี้



รูปที่ 3.23 ซอฟต์แวร์ (Softened) ความสัมพันธ์แรงดันกับช่องว่าง [20]

$$p = 0 \quad \text{สำหรับ} \quad h \leq -c \quad (3.78)$$

$$p = \frac{p^0}{(\exp(1)-1)} \left[\left(\frac{h}{c} + 1 \right) \left(\exp\left(\frac{h}{c} + 1 \right) - 1 \right) \right] \quad \text{สำหรับ} \quad h > -c \quad (3.79)$$

$$\frac{dp}{dh} = 0 \quad \text{สำหรับ} \quad h \leq -c \quad (3.80)$$

$$\frac{dp}{dh} = \frac{p^0}{(\exp(1)-1)} \left[\frac{1}{c} \left(\frac{h}{c} + 2 \right) \left(\exp\left(\frac{h}{c} + 1 \right) - \frac{1}{c} \right) \right] \quad \text{สำหรับ} \quad h > -c \quad (3.81)$$

โดยที่

h คือ ช่องว่าง ระหว่าง พื้นผิวหลัก (Master) และผิวรอง (Slave) และ c คือ ช่องว่าง ระหว่าง พื้นผิวหลัก (Master) และผิวรอง (Slave) ที่แรงดันสัมผัสลดลงจนเป็นศูนย์

3.5 หลักการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึด

การกำหนดระยะห่างเหล็กยึดตามหลักทั่วไป (Rule of thumb) หรือสูตรคำนวณที่อาศัยความชำนาญในทางปฏิบัติ ระยะห่างเหล็กยึดมีแนวโน้มที่จะอยู่ในช่วง 200 ถึง 350 mm หากมีเหล็กยึดไม่เพียงพอแล้ว มีความเสี่ยงต่อส่วนรองรับคอนกรีตทนไฟ และหากเหล็กยึดถูกติดตั้งมากเกินไปแล้ว จะมีความเสี่ยงต่อความมั่นคงแข็งแรงของคอนกรีตทนไฟ ดังนั้น การหาระยะห่างเหล็กยึดเชิงทฤษฎี จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับหาระยะห่างเหล็กยึดในโครงสร้างโนสริง ดังนี้

3.5.1 เงื่อนไขการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึด

ปัจจัยที่กำหนดระยะห่างเหล็กยึดสำหรับรองรับคอนกรีตทนไฟ มีดังนี้

- 1) วัสดุของเหล็กยึด
- 2) คอนกรีตทนไฟที่ใช้สำหรับชั้นผิวด้านร้อน
- 3) ความหนาของชั้นผิวด้านร้อน
- 4) อุณหภูมิทำงานหม้อเผาปูนซีเมนต์
- 5) ตำแหน่งของคอนกรีตทนไฟ (เช่น แนวตั้ง, แนวนอน หรือเอียง)
- 6) รูปทรงของคอนกรีตทนไฟ
- 7) ขนาดของคอนกรีตทนไฟ
- 8) การมีอยู่ของความดันที่มีผลต่อคอนกรีตทนไฟ
- 9) วิธีการติดตั้ง
- 10) การเคลื่อนที่ทางกลของหม้อเผาปูนซีเมนต์หรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องและการมีอยู่ของแรงจากภายนอกที่อาจส่งผลกระทบต่อหม้อเผาปูนซีเมนต์

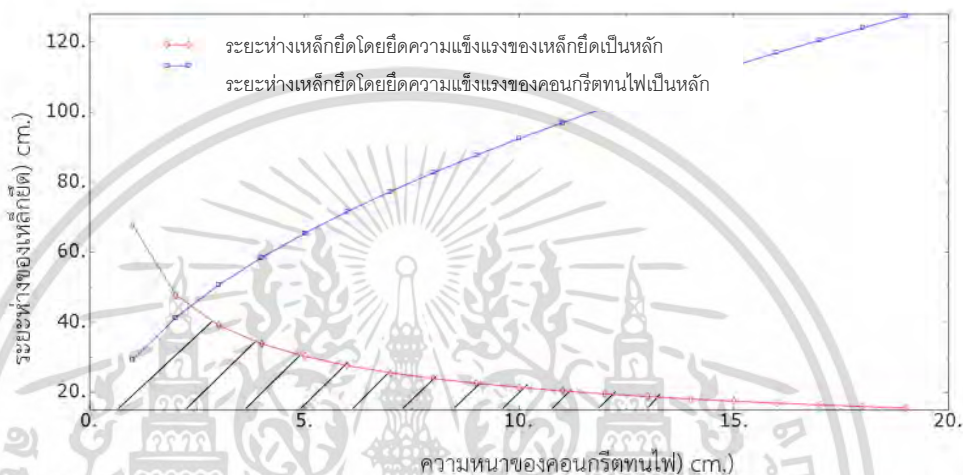
ความแข็งแรงของคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดอาจจะคำนวณได้บนพื้นฐานของเงื่อนไขจากข้อ 1 ถึง 6 ระยะห่างระหว่างเหล็กยึดเชิงทฤษฎีอาจจะได้มา แต่อย่างไรก็ตาม วิศวกรออกแบบต้องไม่ละเลยเงื่อนไขดังกล่าว ที่ไม่สามารถนำมาพิจารณาในการคำนวณ และต้องอาศัยประสบการณ์ที่ผ่านมา บนพื้นฐานของปัจจัยเหล่านี้เป็นหลักทั้งหมด นั่นคือ ระยะห่างของเหล็กยึดที่ปลอดภัยสามารถหาค่าได้ ตัวอย่างเช่น ในโรงงาน ปิโตรเคมี ระยะห่างระหว่างเหล็กยึดไลน์นิ่งของเครื่องปฏิกรณ์ตามทฤษฎี 300 mm ในทางปฏิบัติ ระยะห่างที่ยอมรับได้คือ 150 ถึง 200 mm ความแตกต่างระหว่างระยะเชิงทฤษฎีและระยะที่แท้จริงถูกคำนึงจากหลายๆ ปัจจัย การวิเคราะห์แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กยึดแบบต่างๆ กับคอนกรีต ซึ่งจะให้การะยะห่างของเหล็ก ยึดที่เหมาะสมของแต่ละแบบ

3.5.2 ปัจจัยที่พิจารณาเมื่อคำนวณหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึด

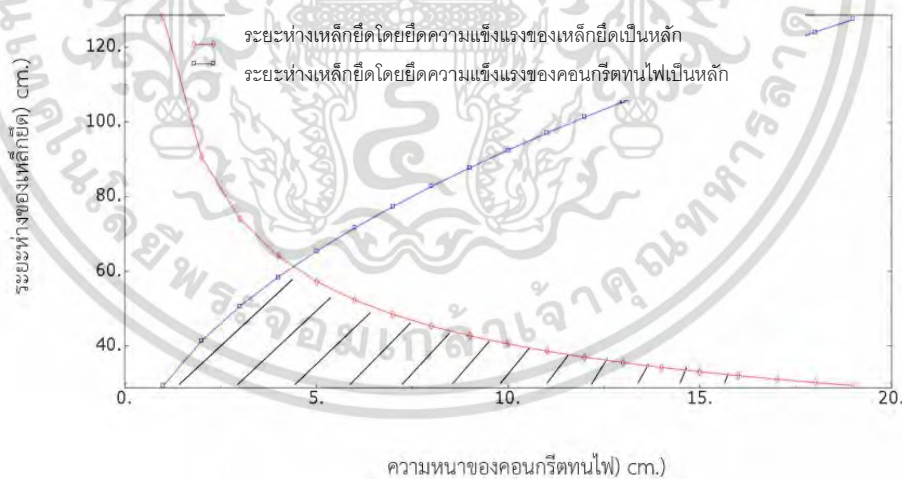
ระยะห่างเหล็กยึดอาจมีการคำนวณบนพื้นฐานของ 2 อย่างด้วยกัน คือ

- 1) ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของเหล็กยึดที่อุณหภูมิทำงานและน้ำหนักของคอนกรีตทนไฟที่รองรับ
 - 2) ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงที่อุณหภูมิทำงานและน้ำหนักของคอนกรีตทนไฟเอง
- ระยะห่างเหล็กยึดถูกคำนวณแยกจากกัน บนพื้นฐานของแต่ละวิธีการข้างต้น และน้อยมากที่ สองค่าได้ถูกนำมาใช้เป็นระยะห่างที่แท้จริง ระยะห่างคำนวณบนพื้นฐานดังกล่าวข้างต้น(สมการ 3.84) มีความสัมพันธ์ ดังแสดงรูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 กราฟช่วงที่อนุญาตของระยะห่างเหล็กยึด แสดงไว้ในพื้นที่แรงงอล้อมรอบด้วยเส้นโค้ง สำหรับค่าของระยะห่างเหล็กยึดกำหนดด้วยวิธีการดังที่ แสดงในกราฟ ได้แก่ วิธีที่ 1

กำหนดให้ระยะห่างน้อยกับการเพิ่มขึ้นในความหนาของคอนกรีตทนไฟ นั่นคือ การเพิ่มขึ้นในน้ำหนักของคอนกรีตทนไฟ วิธีที่ 2 ความหนาของคอนกรีตทนไฟมาก ความแข็งแรงมาก และระยะห่างเหล็กยึดมาก ซึ่งในหัวข้อที่ 4.15.1 ได้นำเสนอวิธีการคำนวณเพื่ออธิบายลักษณะกราฟ(รูปที่ 3.21 และรูปที่ 3.22) ที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของไลน์นิ่งทนไฟและระยะห่างเหล็กยึดชนิดกลม [18]



รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของไลน์นิ่งทนไฟและระยะห่างเหล็กยึดชนิดแผ่น [18]

3.4.3 การคำนวณหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดตามแนวนอน (เพดาน)

การหาค่าที่ถูกต้องเชิงทฤษฎีของระยะห่างเหล็กยึดจากความแข็งแรงเป็นสิ่งที่ยับยั้งมาก วิธีการดังต่อไปนี้อาจถูกนำมาใช้เพื่อหาระยะห่างโดยประมาณ เมื่อโลนนิ่งทนไฟอยู่ในตำแหน่งแนวนอน (เพดาน) โดยนำตัวแปรที่ได้จากสมการ 3.84 เป็นตัวกำหนดในคำนวณหาระยะห่างของเหล็กยึดที่เหมาะสมในคอนกรีตทนไฟเสริมเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.26 การคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของเหล็กยึดที่อุณหภูมิทำงานและน้ำหนักของคอนกรีตทนไฟที่รองรับ และความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงที่อุณหภูมิทำงานและน้ำหนักของคอนกรีตทนไฟเอง ดังนี้



รูปที่ 3.26 คอนกรีตทนไฟเสริมเหล็กยึดตามแนวนอน (เพดาน)

3.2.3.1 การหาค่าระยะห่างอนุญาตจากความแข็งแรงการดึงของเหล็กยึด

เมื่อ t_1 คือ ความหนาของคอนกรีตทนไฟ (cm), l_a คือ ระยะห่างเหล็กยึด (cm) สมมติว่าช่วงเท่ากันในทิศทางทั้งคู่, ρ_1 คือ ความหนาแน่นของวัสดุคอนกรีตทนไฟ (kg/cm^3), a คือ พื้นที่ตัดของเหล็กยึด (cm^2), σ_m คือ ความเค้นดึงที่อนุญาตของวัสดุเหล็กยึดที่อุณหภูมิทำงาน (kgf/cm^2) และ w คือ ภาระบนเหล็กยึดหนึ่งอัน (kg) โดยที่ ภาระบนเหล็กยึดหนึ่งอัน ดังสมการที่ 3.82

$$w = l_a^2 t_1 \rho_1 \quad (3.82)$$

สมมติว่า ความเค้นดึงอนุญาตต่อเหล็กยึดถูกกำหนดให้โดย ดังสมการที่ (3.81)

$$a \sigma_m \geq l_a^2 t_1 \rho_1 \quad (3.83)$$

โดยที่ ระยะห่างเหล็กยึด ดังสมการที่ (3.82)

$$l_a \leq \sqrt{\frac{a \sigma_m}{t_1 \rho_1}} \quad (3.84)$$

3.2.3.2 การหาค่าระยะห่างอนุญาตจากความแข็งแรงของคอนกรีตทนไฟ

เมื่อ t_1 คือ ความหนาของวัสดุคอนกรีตทนไฟ (cm), $l_r = l_a$ คือ ระยะห่างเหล็กยึด (cm) สมมติว่าช่วงเท่ากันในทิศทางตั้งคู่, ρ_1 คือ ความหนาแน่นของวัสดุคอนกรีตทนไฟ (kg/cm^3) โมเมนต์ดัดของคอนกรีตทนไฟ สมมติว่าภาระเนื่องจากน้ำหนักของคอนกรีตมีการกระจายตัวอย่างเท่าเทียมกันบนคานยี่น l_r ในความยาว และ $l_r t_1$

ในส่วนตัด กำหนดให้ คือ w ภาระเนื่องจากน้ำหนักของคอนกรีตทนไฟ (kg/cm) Z คือ ความยืดหยุ่นของส่วนตัด $l_r t_1$, M คือ โมเมนต์ดัดของคอนกรีตทนไฟ (kgf.cm), σ_r คือ ความเค้นดัดอนุญาตของคอนกรีตทนไฟที่อุณหภูมิทำงาน (kg/cm^2) โดยที่ โมเมนต์ดัดของคอนกรีตทนไฟ ดังสมการที่ (3.85)

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{2} w l_r^2 \\ w &= l_r t_1 \rho_1 \\ \therefore M &= \frac{1}{2} t_1 \rho_1 l_r^3 \end{aligned} \quad (3.85)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับโมเมนต์ ดังสมการที่ (3.86)

$$M = \sigma_r Z = \sigma_r \frac{1}{6} l_r t_1^2 \quad (3.86)$$

จากสมการที่ (3.83) และ (3.84) จะได้ความเค้นดัดอนุญาต ดังสมการที่ (3.87)

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} t_1 \rho_1 l_r^3 &= \sigma_r \frac{1}{6} l_r t_1^2 \\ \therefore \sigma_r &\geq \frac{3 \rho_1 l_r^2}{t_1} \end{aligned} \quad (3.87)$$

จากนั้นระยะห่างที่ยอมรับ ดังแสดงในสมการที่ (3.88)

$$l_r \leq \sqrt{\frac{\sigma_r t_1}{3 \rho_1}} \quad (3.88)$$

ซึ่งสมการที่ 3.84 และสมการที่ 3.88 สามารถอธิบายได้ด้วยการนำมาใช้ในการคำนวณในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.15

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 บทนำ

ระบบหม้อเผาปูนซีเมนต์ ที่ประกอบไปด้วยคอนกรีตทนไฟ เหล็กยึด และเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ เมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานานทำให้เกิดการเสียหาย แตกหลุดร่อน ที่บริเวณคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด ซึ่งจากความเสียหายที่เกิดขึ้นทำให้ต้องมีการหยุดระบบเพื่อทำการซ่อมแซมในส่วนนี้เป็นประจำ ทำให้ค่าต้นทุนการผลิตของวัสดุสูงขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษารูปแบบการจำลองโมเดล และทำความเข้าใจพฤติกรรมของการเสียหายที่เกิดขึ้นในตัววัสดุหม้อเผาปูนซีเมนต์ที่สภาวะการทำงานภายใต้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง เพื่อที่จะทำให้ได้จุดมุ่งหมายที่จะสร้างเครื่องมือที่ช่วยในการออกแบบเหล็กยึดในคอนกรีตทนไฟที่เหมาะสมก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตคอนกรีตทนไฟ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษา แนวคิดการออกแบบระบบไลน์นิ่งทนไฟ จากพฤติกรรมคุณสมบัติต่างๆของวัสดุ
- 2) ทำการทดลอง
- 3) การศึกษาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาดิเคิมเกี่ยวกับพันธะแรงยึดเหนี่ยว
- 4) การศึกษารูปแบบจำลองโมเดล เพื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบสลิ้นไถล (Bond-slip) และแบบยึดแน่นถาวร (Perfect bond) ภายใต้ภาระทางความร้อน
- 5) การศึกษารายละเอียดของคุณสมบัติวัสดุ คุณสมบัติการเชื่อมต่อระหว่างผิว และ หลักการกำหนดพื้นผิวสัมผัสของพันธะยึดเหนี่ยวแบบสลิ้นไถล
- 6) การศึกษาแบบจำลองของเหล็กยึดแต่ละชนิด (L-Anchor, Y-Anchor และ Y-ROD Anchor) โดยใช้รูปแบบการจำลองพฤติกรรมพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบสลิ้นไถล (Bond-slip)
- 7) การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยการคำนวณ

4.2 แนวคิดการออกแบบระบบไลน์นิ่งทนไฟ

การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของไลน์นิ่งทนไฟ และลด ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาไลน์นิ่งทนไฟ เป็นสิ่งที่จำเป็นในการออกแบบเพื่อพัฒนาระบบไลน์นิ่งทนไฟ ดังนั้น เพื่อให้บรรลุเป้าหมายดังกล่าวจึง ต้องการความเข้าใจเป็นพิเศษเกี่ยวกับ พฤติกรรมของวัสดุของคอนกรีตทนไฟ จำนวนและชนิดเหล็กยึดเหมาะสม เพื่อนำไปใช้กับระบบไลน์นิ่งทนไฟแบบใหม่ต่อไป งานวิจัยนี้ได้รับการเอื้อเฟื้อรายละเอียดแบบรูปหม้อเผาปูนซีเมนต์จาก บริษัท สยาม อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด ซึ่งเป็นหม้อเผาปูนซีเมนต์ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยมีส่วนประกอบ หลักๆ คือ

- 1) คอนกรีตทนไฟ ซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า Tufdura-S300
- 2) เหล็กยึดแบบตัวอักษร Y, L เหล็กแบนและเหล็กกลม ทำมาจากสแตนเลสเกรด SUS310S

4.2.1 วัสดุคอนกรีตทนไฟ

คอนกรีตทนไฟ มีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ อลูมินา (Al_2O_3), ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC), เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีอัตราส่วนผสม 48%, 30%, 0.6% และ 1.3% ตามลำดับ ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวบ่งชี้ชนิดของคอนกรีตทนไฟ (แคลเซียม ออกไซด์ 1 - 2.5% คือ คอนกรีตทนไฟชนิด Low cement) [6] การพัฒนาคอนกรีตทนไฟและการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ โดยบริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด คอนกรีตทนไฟทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดถึง $1,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีความหนาแน่นหลังจากกระบวนการทำให้แห้ง (Drying) ที่อุณหภูมิ $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่า $2,730\text{ kg/m}^3$ โมดูลัสของการหดหลังจากให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 และ $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่า 130 และ 140 kg/m^2 ตามลำดับ

คุณสมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อนและคุณสมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟและการจำลองคุณสมบัติของวัสดุที่สอดคล้องกันได้ถูกพัฒนาโดยยึดข้อมูลจากการทดสอบที่มี อยู่เป็นหลัก ซึ่งจะได้มีการนำมาเสนอในส่วนถัดไป

4.2.2 พฤติกรรมคอนกรีตทนไฟ

การออกแบบระบบไลน์นิ่งทนไฟ สำหรับสภาวะแวดล้อมภายในหม้อเผาปูนซีเมนต์ที่มีอุณหภูมิสูงจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมวัสดุและคุณสมบัติที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทั้ง 2 ปัญหา ด้วยกันคือ 1) ปัญหาทางความร้อน การวิเคราะห์ทางความร้อนสามารถทำได้ ทั้งการวิเคราะห์แบบสภาวะคงตัว คุณสมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อนที่ต้องการ คือ การนำความร้อน และการวิเคราะห์แบบสภาวะไม่คงตัว คุณสมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อนที่ต้องการ คือ การนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ และ ความหนาแน่น 2) ปัญหาทางความเค้นเนื่องจากความร้อน คุณสมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนที่ต้องการ คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน และ อัตราส่วนปัวซอง

พฤติกรรมทางกายภาพเนื่องจากความร้อนและพฤติกรรมทางกลเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟถูกศึกษาพบว่าพฤติกรรมดังกล่าวมีความซับซ้อน อาจจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ภาระ และ เวลา คุณสมบัติวัสดุเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับใช้กับแบบจำลอง เพื่อการทำนายที่ถูกต้องของพฤติกรรม ไลน์นิ่งทนไฟ แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลบางอย่างมีอยู่ไม่เพียงพอ โดยเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างความ เค้นและความเครียดของคอนกรีตทนไฟที่ระดับอุณหภูมิสูง การพัฒนาข้อมูลโดยการประมาณค่าแบบ นอกช่วงได้ถูกนำมาใช้ คุณสมบัติของคอนกรีตทนไฟที่ได้มาจากการทดสอบถูกนำเสนอด้วยผลลัพธ์ สมการถดถอย (Regression result) เพื่อแสดงพฤติกรรมของคอนกรีตทนไฟ

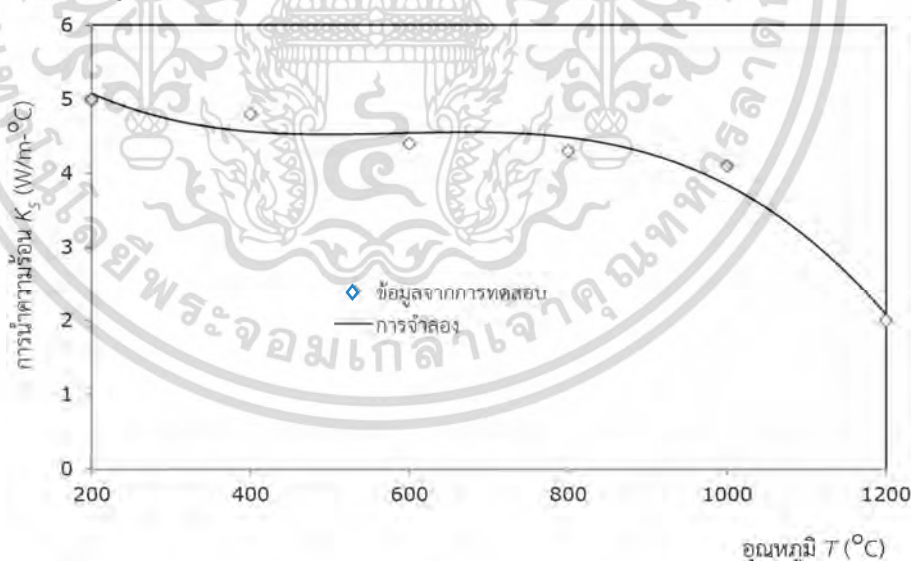
4.2.2.1 สมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ

คุณสมบัติทางความร้อนเป็นการตอบสนองของวัสดุต่อปฏิบัติการทางความร้อน เช่น การดูดซับพลังงานของของแข็งในรูปของความร้อนด้วยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและขนาดพลังงานจะ ถ่ายเทไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ถ้าวัสดุมีสองบริเวณที่มีอุณหภูมิต่างกัน การนำความร้อน ความร้อนจำเพาะและการขยายตัวเนื่องจากความร้อนเป็นคุณสมบัติทางความร้อนที่สำคัญของ คอนกรีตทนไฟในการนำไปใช้งาน

4.2.2.1.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นปรากฏการณ์การส่งผ่านความร้อนของวัสดุจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ สมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของวัสดุนี้ เรียกว่า การนำความร้อน ถูกแทนด้วย K_S ตามฟังก์ชันอุณหภูมิ (T) ถูกแสดงในรูปนิพจน์พหุนาม (Polynomial expression) พารามิเตอร์ของพหุนามได้มาโดยปรับข้อมูลโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least squared method) สำหรับคอนกรีตทนไฟภายใต้การพิจารณา ฟังก์ชันพหุนามอันดับสามถูกนำมาใช้สำหรับ $K_S(T)$ ข้อมูลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการของบริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด ค่า ข้อมูลของ K_S ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 1,200 °C ผลลัพธ์สมการถดถอยถูกแสดงในรูปที่ 4.1 ฟังก์ชัน พหุนามที่มีความสอดคล้องกับข้อมูลมากที่สุด คือ

$$K_S \text{ (W/m}^\circ\text{C)} = -1E - 087T^3 + 2E - 05T^2 - 0.0113T + 6.6333 \quad (4.1)$$



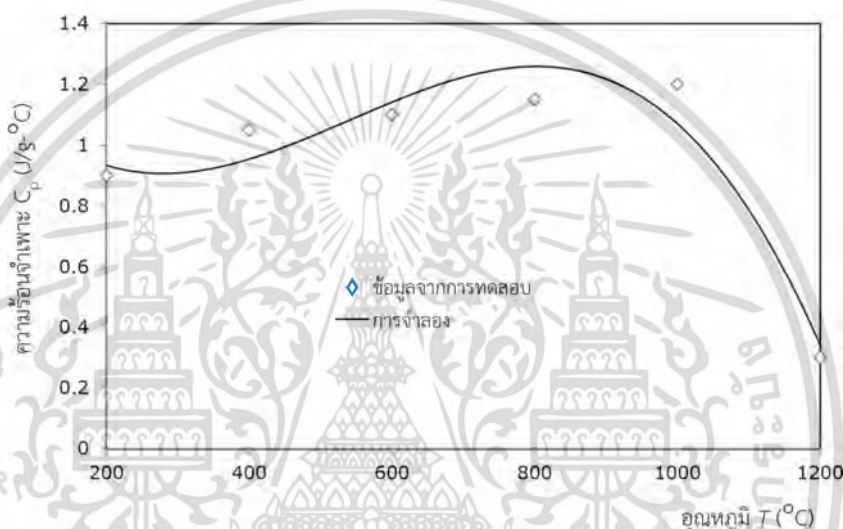
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนและอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟ

4.2.2.1.2 ความร้อนจำเพาะ

วัสดุของแข็งเมื่อได้รับความร้อนอุณหภูมิจะสูงขึ้นด้วยการดูดซับพลังงานบางส่วน สมบัติที่

แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับความร้อนจากบริเวณรอบนอก เรียกว่า ความร้อนจำเพาะ ถูกแทนด้วย C_p ฟังก์ชันตามอุณหภูมิ (T) ถูกแสดงในรูปนิพจน์พหุนาม โดยปรับข้อมูลโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ฟังก์ชันพหุนามอันดับสามถูกนำมาใช้สำหรับ $C_p(T)$ ข้อมูลการทดสอบจาก ห้องปฏิบัติการของบริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด ค่าข้อมูลของ C_p ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 1,200 °C ผลลัพธ์สมการถดถอย ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ฟังก์ชันพหุนามที่มีความสอดคล้องกับข้อมูลมากที่สุด คือ

$$C_p(\text{J/g}\cdot^{\circ}\text{C}) = -5 \times 10^{-9} T^3 + 8 \times 10^{-6} T^2 - 0.0033 T + 1.3167 \quad (4.2)$$

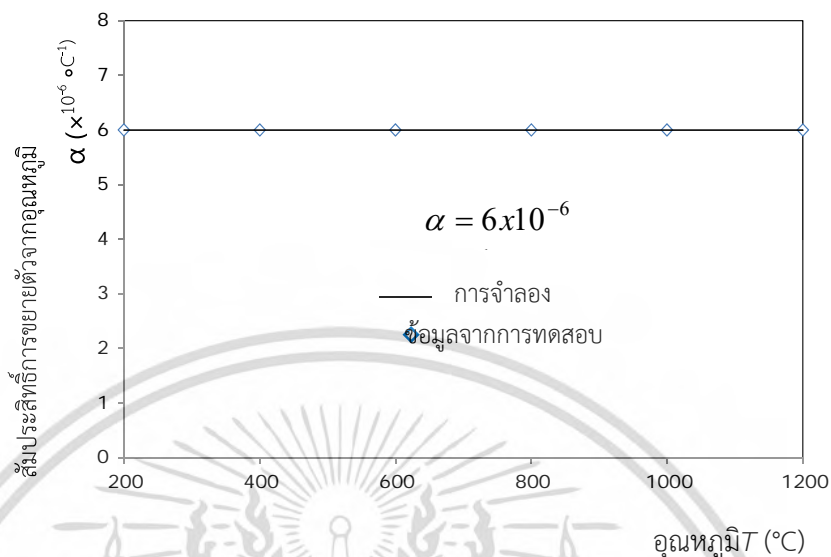


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะและอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟ

4.2.2.1.3 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

วัสดุทนไฟจะเกิดการขยายตัวเมื่อให้ความร้อนและหดตัวเมื่อลดอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงในความยาวต่ออุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟ สมบัติที่แสดงถึงปริมาณการขยายตัวของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนนี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์การขยายเนื่องจากความร้อน ถูกแทนด้วย (α) ข้อมูลการทดสอบจาก ห้องปฏิบัติการของบริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด ข้อมูลอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 1,200 °C ผลลัพธ์สมการถดถอย ดังแสดงใน รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงในความยาวต่ออุณหภูมิของวัสดุทนไฟ มีค่าคงที่ คือ

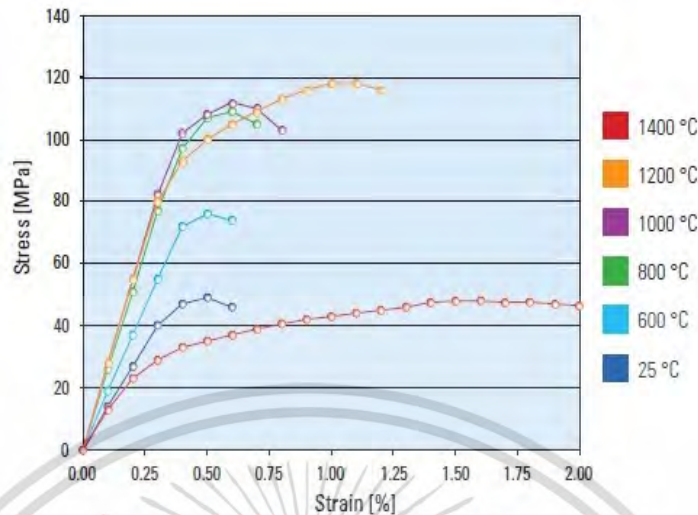
$$\alpha(^{\circ}\text{C}^{-1}) = 6 \times 10^{-6} \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนและอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟ

4.2.3 สมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ

พฤติกรรมคอนกรีตทนไฟที่อุณหภูมิสูงมีความคล้ายกันกับพฤติกรรมเซรามิกที่อุณหภูมิสูง จากการพิจารณาโดย McCullough และ Rigby [9] การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงต่ออุณหภูมิของอลูมินาคอนกรีตทนไฟ ผู้วิจัยได้เสนอไว้ 2 แบบด้วยกันคือ 1) การลดลงในความแข็งแรงที่ระดับอุณหภูมิ ในช่วง 400 ถึง 1,000 °C จากนั้นตามด้วยการเพิ่มขึ้นในความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,200 °C และ 2) การเพิ่มขึ้นในความแข็งแรงที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C จากนั้นตามด้วยการลดลงในความแข็งแรงที่ อุณหภูมิสูงกว่า 1,300 °C การเพิ่มขึ้นในความแข็งแรงของคอนกรีตทนไฟที่อุณหภูมิสูงมีความคล้ายกัน กับเซรามิก ในกรณีของคอนกรีตทนไฟเพิ่มขึ้นในความแข็งแรง ผู้วิจัยให้เหตุผลว่าลักษณะการผูกมัด ของเซรามิก ซึ่งเริ่มต้นจากอุณหภูมิประมาณ 1,125 °C แต่อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของโมดูลัส ความยืดหยุ่นต่ออุณหภูมิไม่มีความคล้ายกันกับเซรามิก รายงานโดย McCullough และ Rigby (1972) Triessnig และ คณะ (2006) [17] ได้นำเสนอผลการทดสอบการอัดตามแนวแกน ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุทนไฟชนิดแม็กนีเซียมโครเมียม ตลอดช่วงของ อุณหภูมิ (25 ถึง 1,400 °C) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ความเค้นสูงสุดแสดงถึงความแข็งแรงของชิ้นงาน ทดสอบตามอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ที่สำคัญโมดูลัสของความยืดหยุ่น และความแข็งแรงเปลี่ยนแปลงตาม อุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัดเจน พารามิเตอร์เหล่านี้เพิ่มขึ้นจนถึง 1,250 °C เมื่อเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,250 °C บริเวณที่เป็นเชิงเส้นของกราฟความเค้นและความเครียดลด น้อยลง



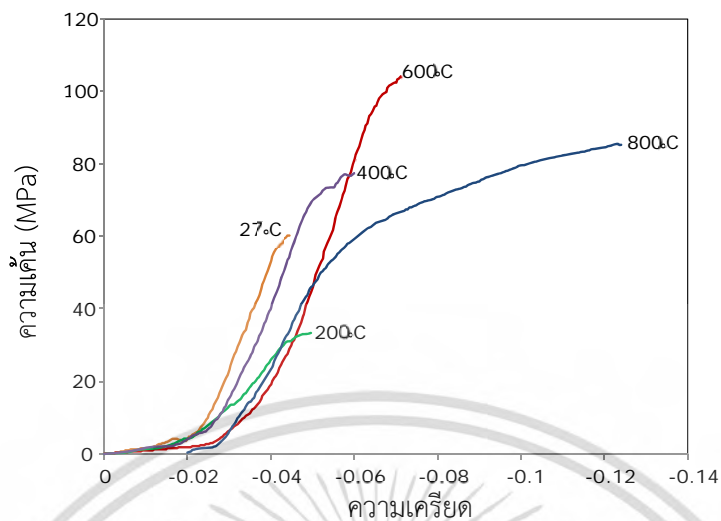
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการอัดตามแนวแกนของวัสดุทไฟแม็กเซียมโครเมียม [17]

สำหรับงานวิจัยนี้ วัสดุคอนกรีตทนไฟถูกส่งไปทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ระดับอุณหภูมิสูง ณ บริษัท Spectro Analytical Labs จำกัด แห่งประเทศอินเดีย ผลของการทดสอบดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 4.5

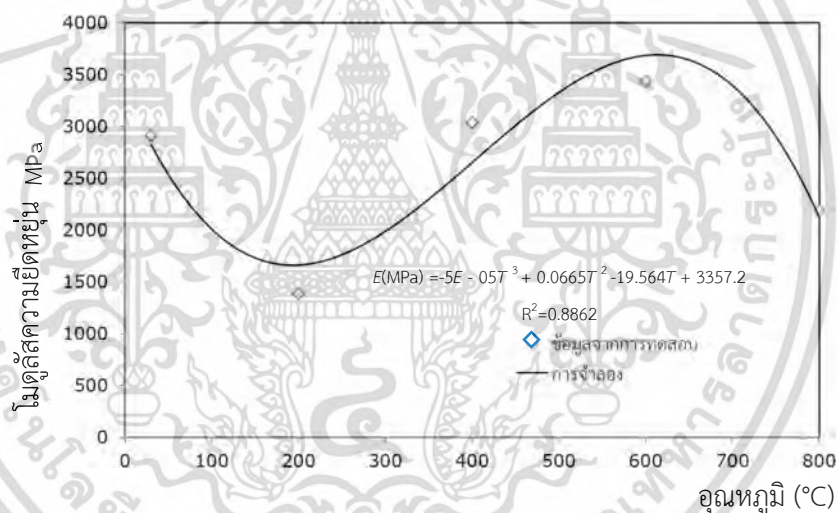
การหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นตามมาตรฐาน ASTM E111-4 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นถูกแทนด้วย E ฟังก์ชันตามอุณหภูมิ (T) ถูกแสดงไว้ด้วยนิพจน์พหุนาม โดยปรับข้อมูลโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ฟังก์ชันพหุนามอันดับสามถูกนำมาใช้สำหรับ $E(T)$ ข้อมูลการทดสอบจากบริษัท Spectro Analytical Labs จำกัด ค่าข้อมูลของ E ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 800 °C ผลลัพธ์สมการถดถอยถูกแสดงในรูปที่ 4.6 ฟังก์ชันพหุนามที่มีความสอดคล้องกับข้อมูลมากที่สุด คือ

$$E(\text{MPa}) = -5E - 0.05T^3 + 0.0665T^2 - 19.564T + 3357.2 \quad (4.4)$$

อัตราส่วนปัวซอง ถูกแทนด้วยอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตทนไฟในช่วงความเค้นและอุณหภูมิใช้งานมีค่าเฉลี่ยเป็น 0.24 จากห้องปฏิบัติการของบริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด นอกจากนี้วัสดุอื่นที่เกี่ยวข้องสำหรับการศึกษานี้ ได้แก่ สแตนเลส เกรด SUS310S และเหล็กกล้าคาร์บอน [11,12] คุณสมบัติของวัสดุทั้งหมดประกอบด้วย คุณสมบัติทางกลเนื่องจากความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และคุณสมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตทนไฟที่อุณหภูมิ 200, 400, 600 และ 800 °C



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นและอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟ

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ สแตนเลส และเหล็กกล้าคาร์บอน [11,12]

วัสดุ	อุณหภูมิ (°C)	โมดูลัสความยืดหยุ่น (GPa)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วนปัวซอง
คอนกรีตทนไฟ	30	2.912	30	0.24
	200	1.385		
	400	3.040		

	600	3.438		
	800	2.190		
สแตนเลส	100	200	20	0.30
	200	185		
	400	170		
	800	135		
เหล็กกล้า คาร์บอน	100	200.6	25	0.29
	200	197.2		
	300	193.7		
	400	191.0		
	500	186.8		
	600	182.0		
	700	174.4		

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ สแตนเลส และเหล็กกล้าคาร์บอน [11,12]

วัสดุ	อุณหภูมิ	การนำความร้อน	อุณหภูมิ	สัมประสิทธิ์การ
	(°C)	(W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	(°C)	ขยายตัวเนื่องจาก ความร้อน (×10 ⁻⁶ . °C ⁻¹)
คอนกรีตทนไฟ	200	5.0	200	6
	400	4.8	400	6
	600	4.4	600	6
	800	4.3	800	6
	1,000	4.1	1,000	6
	1,200	2.0	1,200	6
สแตนเลส	100	13.80	100	15.9
	200	13.95	500	17.1
	400	16.28	1,000	18.9

	500	18.70		
	600	19.77		
เหล็กกล้า คาร์บอน	100	47.77	100	11.70
	200	48.11	200	12.06
	300	47.25	300	12.42
	400	45.86	400	12.78
	500	44.48	500	13.14
	600	43.10	600	13.32
	700	41.71	700	13.68

4.3 การทดลอง

การทดลองถูกดำเนินการภายใต้ภาระทางความร้อน โดยมีแหล่งความร้อนจากเตาเผาที่ถูกรักษาไว้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้ความร้อนแก่ชิ้น ตัวอย่างทดลองเฉพาะบริเวณนั้น เทอร์โมคัปเปิลและสเตรนเกจถูกติดตั้งที่ชิ้นตัวอย่างทดลองเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิและความเครียด ผลของอุณหภูมิถูกนำมาประยุกต์ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้น นำผลทั้งการทดลองและการจำลองมาเปรียบเทียบ

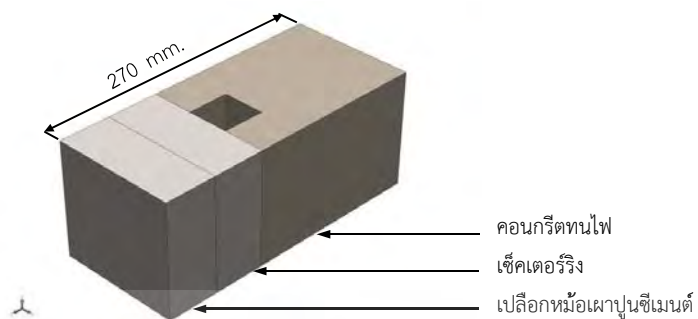
4.3.1 ชิ้นงานตัวอย่างทดลอง

เพื่อที่จะหาค่าความเครียดที่เหล็กยึด และให้การทดลองใกล้เคียงกับสถานะจริงมากที่สุด ดังนั้น ชิ้นงานตัวอย่างทดลองจึงถูกสร้างให้มีขนาดความหนาเท่ากับหม้อเผาปูนซีเมนต์ ซึ่งประกอบด้วย คอนกรีตทนไฟ เซ็คเตอร์ริง เปลือกหม้อเผา มีขนาดความหนา 170, 50 และ 50 mm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และภายในคอนกรีตมีเหล็กยึด 1 อันถูกเชื่อมกับเซ็คเตอร์ริง และติดตั้งสเตรนเกจที่บริเวณโคนเหล็กยึดด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ชิ้นตัวอย่างทดลองหลังจากติดตั้งสเตรนเกจแล้วเสร็จ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

4.3.2 เครื่องมือตรวจวัด

4.3.2.1 สเตรนเกจ (Strain Gage) สเตรนเกจ ยี่ห้อ KYOWA รุ่น KFU

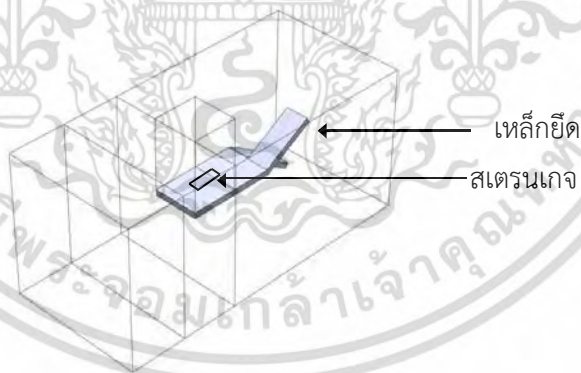
เป็นสเตรนเกจที่มีคุณสมบัติเฉพาะ โดยสามารถใช้งานได้ภายใต้อุณหภูมิ -196 ถึง 350 °C และสามารถชดเชยอุณหภูมิด้วยตัวเอง (Selftemperature compensation) ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 10 ถึง 300 °C



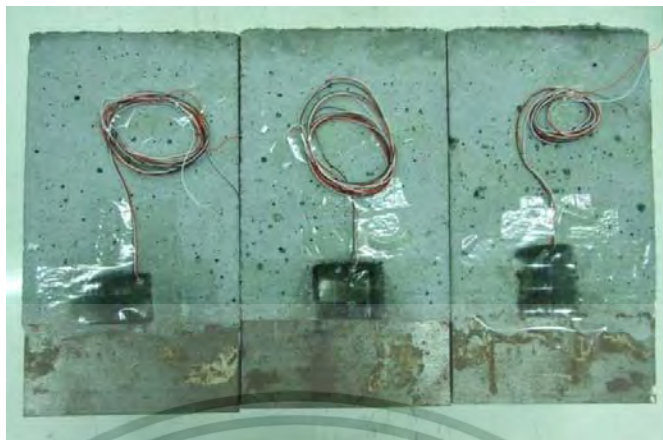
รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบภายนอกชิ้นตัวอย่างทดลอง

4.3.2.2 กล่องวงจรบริดจ์ (Bridge Box) กล่องวงจรบริดจ์ ยี่ห้อ KYOWA รุ่น DB-120P (สำหรับใช้กับสเตรนเกจ 120 Ω) ถูกเชื่อมต่อระหว่างแอมพลิไฟเออร์และสเตรนเกจ ด้วยวิธีการแบบ 1 สเตรนเกจ 3 สายสัญญาณ

4.3.2.3 สเตรนแอมพลิไฟเออร์ (Strain Amplifier) สเตรนแอมพลิไฟเออร์ ยี่ห้อ KYOWA ถูกเชื่อมต่อระหว่างกล่องวงจรบริดจ์และเครื่องเก็บ ข้อมูล โดยขยายสัญญาณการเปลี่ยนแปลงระดับไมโครจากสเตรนเกจ และตรวจจรับความรู้สึกตัว แปรทางกายภาพ แล้วเปลี่ยนค่าทางด้านเอาต์พุต



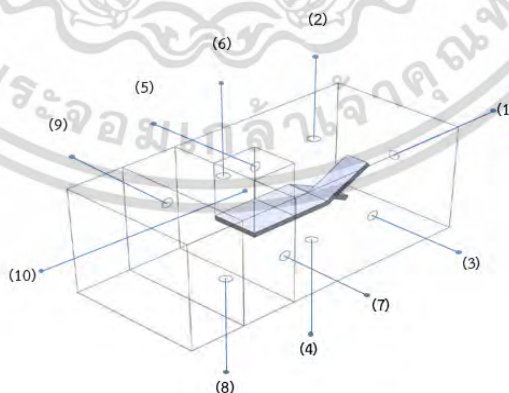
รูปที่ 4.8 ส่วนประกอบภายในชิ้นตัวอย่างทดลอง



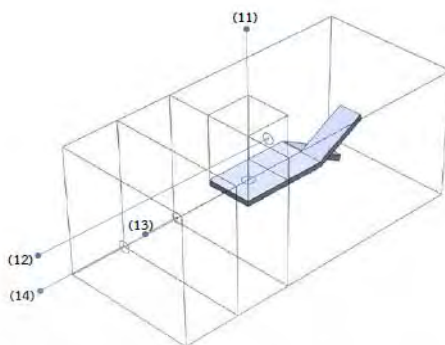
รูปที่ 4.9 ชั้นตัวอย่างทดลองพร้อมติดตั้งสเตรนเกจ

4.3.2.4 เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (Thermocouple type K)

เทอร์โมคัปเปิล คือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า สายเทอร์โมคัปเปิลถูกติดตั้งที่ชั้นตัวอย่างทดลองทั้งหมด 14 จุด โดยจุดที่ (1) ถูกติดตั้งที่ผิวคอนกรีตทนไฟ เพื่อวัดอุณหภูมิที่ได้รับจากขดลวดไฟฟ้า จุดที่ (2) ถึง (10) ถูกติดตั้งใกล้ผิวคอนกรีตทนไฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เพื่อวัดอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม ผลของอุณหภูมิดังกล่าวถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูลและนำข้อมูลเหล่านี้ไปกำหนดภาระและเงื่อนไขขอบเขตในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ในรูปที่ 4.11 แสดงจุดที่ 11 ถึง 14 เพื่อวัดอุณหภูมิ ผิวเหล็กยึด คอนกรีตทนไฟ ผิวระหว่างเปลือกหุ้มเฝ้าปูนซีเมนต์และเซ็คเตอร์ริง และผิวเปลือกหุ้มเฝ้าปูนซีเมนต์ ตามลำดับผลของอุณหภูมิดังกล่าวถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูลและนำข้อมูลเหล่านี้มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป



รูปที่ 4.10 ชั้นตัวอย่างทดลองที่ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลตั้งแต่จุดที่ 1 ถึง 10



รูปที่ 4.11 ชั้นตัวอย่างทดลองที่ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลตั้งแต่จุดที่ 11 ถึง 14

4.3.2.5 เครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) เครื่องเก็บข้อมูล ยี่ห้อ ADAM ประกอบด้วย 3 รุ่น ADAM-4520, ADAM-4018 และ ADAM-4017+ จำนวน 3, 2 และ 1 ตามลำดับ

4.3.2.6 คอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์ถูกใช้รับข้อมูลที่ส่งมาจากเครื่องเก็บข้อมูล ได้แก่ อุณหภูมิและสเตรน ข้อมูล เหล่านี้ถูกบันทึกโดยซอฟต์แวร์ **Advantech Adam/Apax.NET Utility** เวอร์ชัน 2.02.16 แบบ ทันทีทันใด (Real time)

ตารางที่ 4.3 ผลของการสอบเทียบสัญญาณสเตรนเกจ

สอบเทียบสัญญาณ ($\mu\epsilon$)	สัญญาณเอาต์พุต (v)	สอบเทียบสัญญาณ ($\mu\epsilon$)	สัญญาณเอาต์พุต (v)
100	0.006	1,000	0.06
200	0.012	2,000	0.12
300	0.018	3,000	0.18
400	0.024	4,000	0.24
500	0.030	5,000	0.30
600	0.036	6,000	0.36
700	0.042	7,000	0.42
800	0.048	8,000	0.48
900	0.054	9,000	0.54

4.3.3 การสอบเทียบเครื่องมือวัด

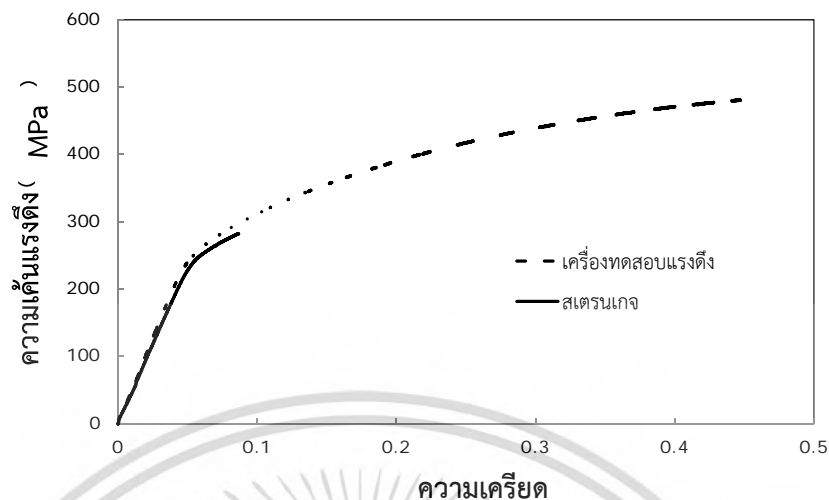
การทดลองยังดำเนินการไม่ได้ หากไม่ทำการสอบเทียบเครื่องมือวัด โดยเฉพาะสเตรนเกจ ถูกสอบเทียบสัญญาณ (Calibration signal) ตามคู่มือ Dynamic Strain Amplifier DPM-600 series ผลของการสอบเทียบสัญญาณ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 อีกทั้งยังดำเนินการสอบเทียบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง พร้อมติดสเตรนเกจที่ขึ้นตัวอย่าง ทดลอง (Specimen) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ค่าของทั้งเครื่องทดสอบแรงดึงและสเตรนเกจถูกนำมา เปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ปรากฏว่ามีความผิดพลาด (Error) เท่ากับ 9.55 เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดนี้อาจเกิดจากสเตรนเกจรุ่น KFU มีลักษณะหนาและแข็งกว่าสเตรนเกจรุ่นทั่วไปทำให้ ยึดหยุ่นได้น้อย นอกจากนี้ สายเทอร์โมคัปเปิล จำนวน 14 เส้น ถูกสอบเทียบด้วยเครื่องสอบเทียบ อุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ปรากฏว่าไม่มีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น



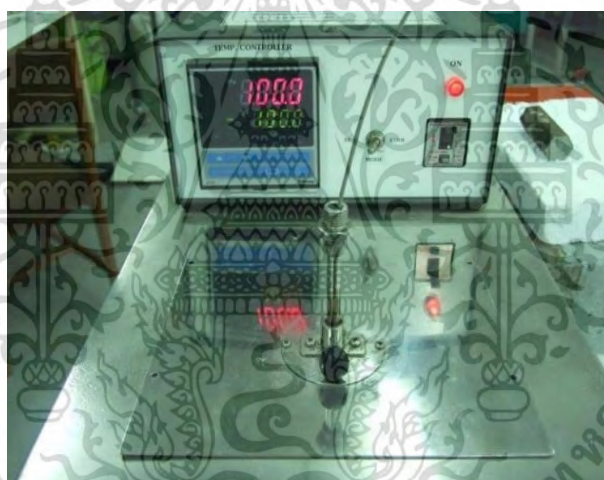
รูปที่ 4.12 ชิ้นตัวอย่างทดลองพร้อมติดสเตรนเกจ

4.3.4 ขั้นตอนการทดลอง

หลังจากจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองแล้วเสร็จ จากนั้น นำชิ้นตัวอย่างทดลองติดตั้งเข้ากับเตาเผาไฟฟ้า ต่อสายเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล ต่อสายสเตรนเกจเข้ากับกล่องวงจรบริดจ์ สเตรนแอมพลิไฟเออร์ และเครื่องเก็บข้อมูล ตามลำดับ ข้อมูลทั้งหมดจากเครื่อง เก็บข้อมูลถูกอ่านและบันทึกด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปในคอมพิวเตอร์ แผนผังวงจรเครื่องมือ อุปกรณ์การทดลอง และชุดเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองประกอบแล้วเสร็จ พร้อมทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบความเครียดระหว่างเครื่องทดสอบแรงดึงและสเตรนเกจ



รูปที่ 4.14 เครื่องมือสอบเทียบสายเทอร์โมคัปเปิล

อย่างไรก็ตาม เครื่องมือวัด อย่างเช่น สเตรนเกจ มีข้อจำกัดการใช้งานที่สภาวะอุณหภูมิสูงจึงทำให้ การ ทดลองไม่สามารถดำเนินการที่สภาวะอุณหภูมิทำงานจริงในเตาเผาปูนซีเมนต์ได้ ทำให้การ ทดลองต้องลดอุณหภูมิสูงสุดที่ผิวด้านร้อน (Hot face) เป็นอุณหภูมิ 700 °C

การทดลองเริ่มต้นจากการให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่างทดลองภายใต้การควบคุมปริมาณ ความร้อนด้วยโวลเตจเรกกูเลเตอร์(Voltage regulator) กำหนดให้อัตราความร้อนเพิ่มขึ้น (Heating rate) ประมาณ 2.5 °C /min จนถึงอุณหภูมิ 100 °C และคงรักษาอุณหภูมินี้ไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้น ดำเนินการให้ความร้อนในอัตราความเร็วดังกล่าว จนถึง อุณหภูมิ 200 °C และคง รักษา อุณหภูมินี้ไว้ประมาณ 30 นาที แผนการให้ความร้อนที่ผิวด้านร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.16

จนถึง อุณหภูมิ 700 °C และคงรักษาอุณหภูมินี้ตลอดการทดลองแล้วเสร็จ รวมเวลาทั้งสิ้นประมาณ 17 ชั่วโมง



รูปที่ 4.15 ชุดเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 4.16 แผนการให้ความร้อนที่ผิวด้านร้อน (Hot face) ของคอนกรีตทนไฟ

4.4 การศึกษาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาดูแลเกี่ยวกับพันธะแรงยึดเหนี่ยว

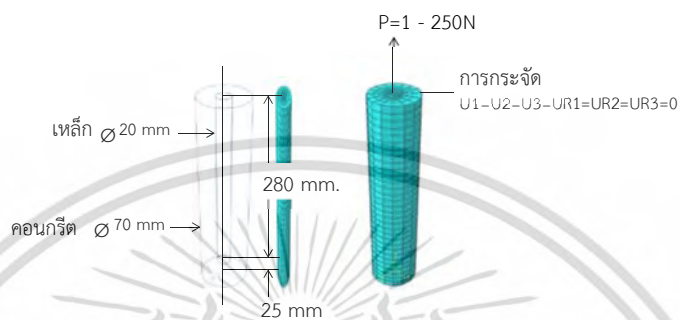
การตรวจสอบความถูกต้องของ แบบจำลองที่วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ถูกเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดย Alaka [19] เพื่อเป็นการแสดงว่าผลการจำลองพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่ได้จาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ซึ่งได้จำลองการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริมแรง (Pull out test) โดยแบบจำลองถูกกำหนดให้ พฤติกรรมทางกลของวัสดุเป็นแบบไม่เชิงเส้น พันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตเป็นแบบลื่นไถลได้ (Bond slip) ขนาดและเงื่อนไขขอบเขตดังแสดงในรูปที่ 4.17

โดย

U_1 = การกระจัดตามแนวแกน X ; UR_1 = การหมุนแบบอิสระ ตามแนวแกน X

U_2 = การกระจัดในแนวแกน Y ; UR_2 = การหมุนแบบอิสระ ตามแนวแกน Y

U_3 = การกระจัดในแนวแกน Z ; UR_3 = การหมุนแบบอิสระ ตามแนวแกน Z



รูปที่ 4.17 เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับการกระและการกระจัด

4.5 การศึกษาแบบจำลองโมเดล เพื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบ สิ้นไกล (Bond-slip) และแบบยึดแน่นถาวร (Perfect bond) ภายใต้ภาระทาง ความร้อน

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อคอนกรีตทนไฟและความเค้นวอน มีสเซอร์ของ เหล็กยึด อันเกิดจากพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวรและแบบสิ้นไกลระหว่างคอนกรีตทนไฟ และเหล็กยึด ภายใต้ภาระทางความร้อน การวิเคราะห์ดังกล่าวถูกดำเนินการด้วยโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการดำเนินการศึกษาได้แบ่งการจำลองรูปแบบออกเป็น 2 แบบ คือ 1)แบบ พันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบสิ้นไกล (Bond- slip) 2) แบบพันธะแรงยึดเหนี่ยวแน่นถาวร (Perfect bond) เพื่อให้ บรรลุผลสำเร็จโดยดำเนินการ ดังนี้

- 1) สร้างแบบจำลองตามขนาดจริง
- 2) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้อง(พันธะยึดเหนี่ยวแบบสิ้นไกลและพันธะยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร.)
- 3) กำหนดพื้นผิวสัมผัสและคุณสมบัติการเชื่อมต่อระหว่างผิว (พันธะยึดเหนี่ยวแบบสิ้นไกลและพันธะยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร)
- 4) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตและภาระทางความร้อน
- 5) สร้างตาข่าย (Mesh)

4.5.1 แบบจำลอง

แบบจำลองทั้งสอง(พันธะยึดเหนี่ยวแบบลิ้นไถลและพันธะยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร) ถูกสร้างให้มี ลักษณะเหมือนกับชิ้นตัวอย่างทดลอง ที่แบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งประกอบด้วย คอนกรีตทนไฟ เหล็กยึด เช็คเตอร์ริง และ เปลือกหุ้มเฝ้าปูนซีเมนต์ ขนาดเท่ากับชิ้นตัวอย่างทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.18



4.5.2 กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้อง (พันธะยึดเหนี่ยวแบบลิ้นไถลและพันธะยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร)

การกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนของพันธะยึดเหนี่ยวแบบลิ้นไถลและพันธะยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร สามารถอธิบายคุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกันดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้อง ของพันธะยึดเหนี่ยวแบบลิ้นไถลและพันธะยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร

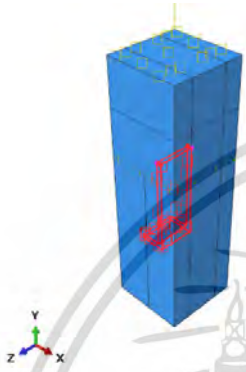

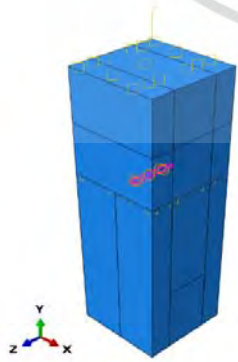
พื้นผิวสัมผัสระหว่างวัสดุ	แบบพันธะยึดเหนี่ยวแบบลิ้นไถล	แบบพันธะยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร
1)คุณสมบัติของคอนกรีตทนไฟ	1.1)พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตทนไฟเป็นคุณสมบัติแบบยืดหยุ่น และคุณสมบัติแบบพลาสติก (concreate sme	1.1)คุณสมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อน 1.2)คุณสมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ

	<p>1.2) เป็นคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ</p> <p>1.3) ข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบและการจำลองพฤติกรรม (ตารางที่ 4.4, กราฟที่แสดงพฤติกรรมแบบพลาสติก)</p>	<p>1.3) ข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบและการจำลองพฤติกรรม (ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2)</p>
<p>คุณสมบัติของเหล็กยึด (สแตนเลส)</p>	<p>2.1) พฤติกรรมทางกลของเหล็กยึดที่มีคุณสมบัติแบบยืดหยุ่น และคุณสมบัติแบบ พลาสติก</p> <p>2.2) ค่าที่ได้ นำมาจากการทดสอบของ [12]</p>	<p>2.1) คุณสมบัติทางกายภาพ เนื่องจากความร้อนของเหล็กยึด(สแตนเลส)</p> <p>2.2) ข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบและการจำลองพฤติกรรม(ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2)</p>
<p>คุณสมบัติของเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์(เหล็กกล้า คาร์บอน)</p>	<p>2.1) คุณสมบัติทางกายภาพ เนื่องจากความร้อนของเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ (เหล็กกล้าคาร์บอน)</p> <p>2.2) ข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบและการจำลองพฤติกรรม (ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2)</p>	<p>2.1) คุณสมบัติทางกายภาพ เนื่องจากความร้อนของเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ (เหล็กกล้าคาร์บอน)</p> <p>2.2) ข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบและการจำลองพฤติกรรม(ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2)</p>

4.5.3 กำหนดพื้นผิวสัมผัสและคุณสมบัติการเชื่อมต่อระหว่างผิว (พันธะยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถลและพันธะยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร)

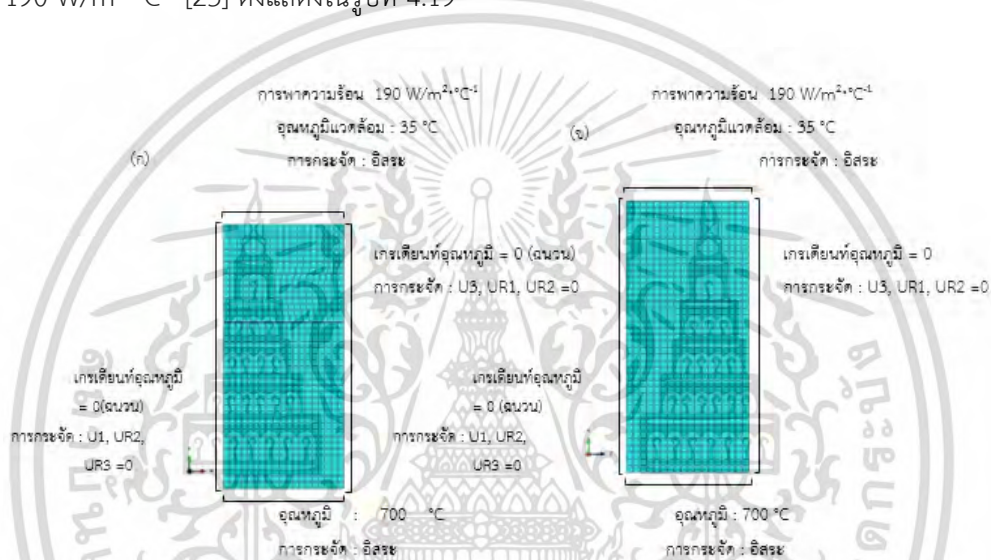
การกำหนดพื้นผิวสัมผัสและคุณสมบัติการเชื่อมต่อระหว่างผิว ของคอนกรีต ทนไฟ, เหล็กยึดและส่วนประกอบอื่นๆ ได้แบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ แบบพันธะยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถลและแบบพันธะยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร โดยมีรายละเอียดที่แตกต่างกันตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 กำหนดพื้นผิวสัมผัสและคุณสมบัติการเชื่อมต่อระหว่างผิว ของพันธะยึดเหนี่ยวแบบเส้นใยและพันธะยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร

พื้นผิวสัมผัสระหว่างวัสดุ	แบบพันธะยึดเหนี่ยวแบบเส้นใย	แบบพันธะยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร
<p>ผิวคอนกรีต กับ ผิวเหล็กยึด</p> 	<p>1)แบบจำลองแรงเสียดทานของสัมประสิทธิ์การเสื่อมลง</p> <p>2)แบบจำลองแรงดันสัมผัส</p> <p>3)ค่าการนำความร้อนระหว่างวัสดุ</p>	<p>1)การจำลองแบบยึดแน่นถาวร</p>
<p>ผิวคอนกรีต กับ เปลือกหุ้มเฝ้า</p> 	<p>1)ค่าการนำความร้อนระหว่างวัสดุ</p>	<p>1)การจำลองแบบยึดแน่นถาวร</p>
<p>ผิวเหล็กยึด กับ เปลือกหุ้มเฝ้า</p> 	<p>1)การจำลองแบบยึดแน่นถาวร</p>	<p>1)การจำลองแบบยึดแน่นถาวร</p>

4.5.4 เงื่อนไขขอบเขตและภาระทางความร้อนของพันธระ

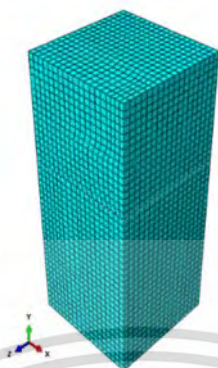
เงื่อนไขขอบเขตและภาระทางความร้อนของพันธระทั้งสอง (พันธระยึดเหนี่ยวแบบลิ้นไถลและพันธระยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร) ถูกกำหนดให้อยู่ภายใต้ภาระทางความร้อนเนื่องจากความเค้นจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อนมีขนาดใหญ่กว่าความเค้นจากแรงโน้มถ่วงมาก [24] กำหนดความร้อนที่อุณหภูมิ 700 °C (ไม่คำนึงถึงน้ำหนัก ของวัสดุทนไฟ) เงื่อนไขขอบเขตการกระจัดและอุณหภูมิด้านข้างมีค่าเป็นศูนย์ และ การถ่ายเทความร้อนออกสู่สภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิ 35 °C โดยการพาความร้อนแบบบังคับ มีสัมประสิทธิ์การพา ความร้อน $190 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}^{-1}$ [23] ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับอุณหภูมิและการกระจัด (ก) ระนาบ X-Y (ข) ระนาบ Y-Z

4.5.5 การสร้างตาข่าย (Mesh)

เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองถูกกำหนดเป็นแบบลูกบาศก์ (Hexahedral) 8 Node ทั้งแบบจำลองเหล็กยึดและคอนกรีตทนไฟ แบบจำลองหลังจากประยุกต์ใช้เอลิเมนต์สามารถสร้างตาข่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากการแบ่งเอลิเมนต์

4.6 รายละเอียดของคุณสมบัติวัสดุ คุณสมบัติการเชื่อมต่อระหว่างผิว และ หลักการกำหนดพื้นผิวสัมผัสของพันธะยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล

4.6.1 คุณสมบัติคอนกรีตทนไฟแบบยึดหยุ่น

คุณสมบัติของคอนกรีตทนไฟหาได้จากการทดสอบและการคำนวณประกอบด้วย ค่าความเค้นอัดสูงสุดและโมดูลัสความยืดหยุ่น ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติของคอนกรีตทนไฟจากการทดสอบแรงอัด

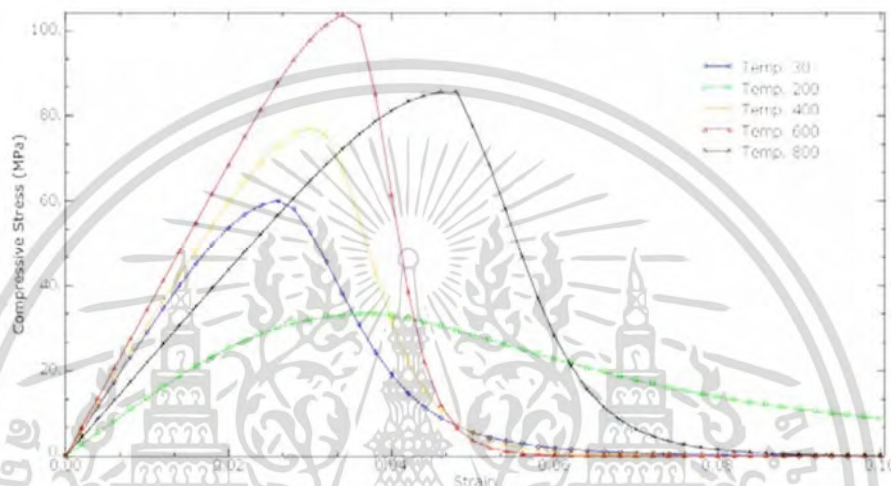
อุณหภูมิทดสอบ (°C)	ความเค้นอัดสูงสุด f_c (MPa)	โมดูลัสความยืดหยุ่น E_c (MPa)
27	60.2	2912
200	33.4	1385
400	77.4	3040
600	104.1	3438
800	85.6	2190

4.6.2 คุณสมบัติคอนกรีตทนไฟแบบพลาสติก

คุณสมบัติของคอนกรีตทนไฟแบบพลาสติก ประกอบด้วย พฤติกรรมแรงอัด และแบบจำลองคอนกรีตเมียร์แครกกิง (Concrete Smeared- Cracking) มีรายละเอียดดังนี้

4.6.2.1 พฤติกรรมแรงอัด

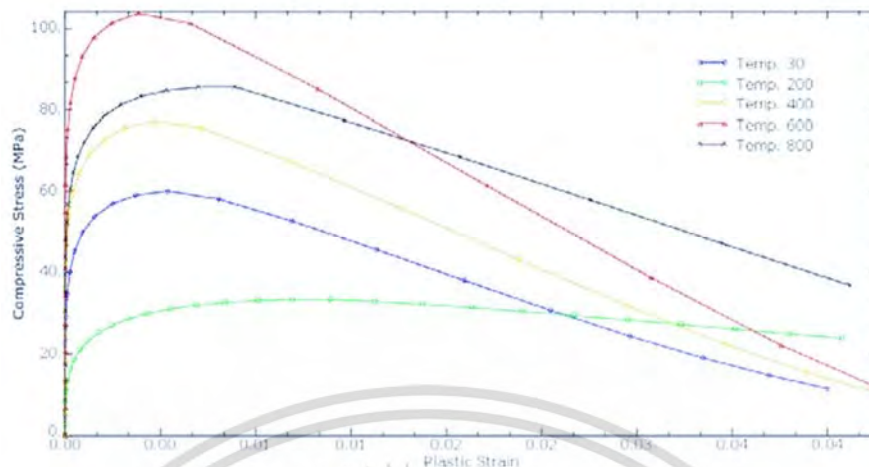
ความเค้นอัดของคอนกรีต f_c สำหรับความเครียดต่างๆ ถูกคำนวณจากสมการที่ (3.63) ผลของการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 4.21 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดสำหรับอุณหภูมิ 30, 200, 400, 600 และ 800 °C ความเครียดพลาสติกถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.69) และ (3.70) ตามลำดับ และสร้าง กราฟความเค้นอัดกับความเครียดพลาสติกของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดของคอนกรีตทนไฟ ที่อุณหภูมิ 30, 200, 400, 600 และ 800 °C

4.6.2.2 แบบจำลองคอนกรีตสเมียร์แครกกิง (Concrete-Smeared Cracking)

แบบจำลองคอนกรีตสเมียร์แครกกิง (Concrete smeared cracking) ถูกนำมาใช้เพื่อแสดงพฤติกรรมของคอนกรีตหลังจากแตกร้าว ในแบบจำลองสเมียร์แครก (Smeared crack) แต่ละรอยแตกร้าวเล็กๆ ไม่ได้ถูกพิจารณา การคำนวณลักษณะความสัมพันธ์ถูกดำเนินการอย่างเป็นอิสระ ที่แต่ละจุดทั้งหมดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และการปรากฏขึ้นของรอยแตกนำไปสู่การคำนวณ ซึ่งรอยแตกที่มีอิทธิพลต่อความเค้นและความแข็งแรงของวัสดุถูกนำมาเกี่ยวข้องกับทุกจุดทั้งหมด แบบจำลองประกอบด้วยพารามิเตอร์ ดังนี้



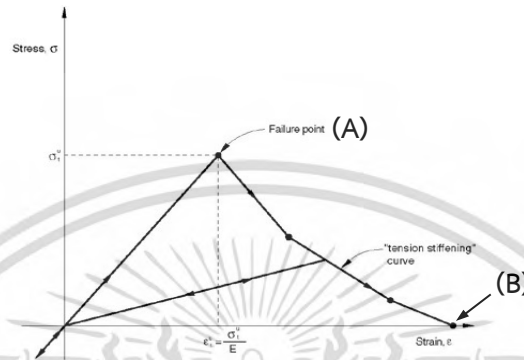
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดพลาสติกของคอนกรีตทนไฟ ที่อุณหภูมิ 30, 200, 400, 600 และ 800 °C

4.6.2.2.1 เ็นชั้นสทิฟเฟนนิ่ง (Tension- Stiffening)

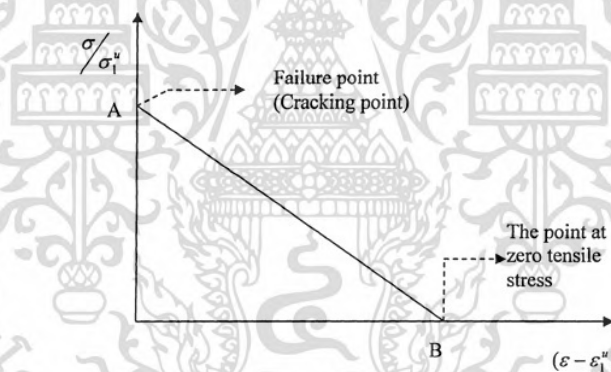
เ็นชั้นสทิฟเฟนนิ่งถูกนำมาใช้ในความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดหลังจากการเสียหาย ความเค้นหลังจากการเสียหายถูกใช้เป็นฟังก์ชันของความเครียดผ่านรอยแตกกว้าง ในรูปที่ 4.23 แสดง แบบจำลองเ็นชั้นสทิฟเฟนนิ่งที่ความเค้นดึงของคอนกรีตเป็นฟังก์ชันของความเครียดดึงคอนกรีต เริ่มแตกเมื่อคอนกรีตเข้าใกล้ค่าความเค้นดึงสูงสุด σ_1^u และหลังจากนั้น จุดที่ความเค้นดึงที่รอยแตก ถูกสมมติให้ลดลงเป็นค่าศูนย์แบบเชิงเส้น ซึ่งอธิบายพฤติกรรมสเตรนซอฟเ็นนิ่งของคอนกรีต รูปที่ 4.24 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของความเค้นดึงต่อความเค้นดึงสูงสุด (σ/σ_1^u) ความแตกต่างระหว่างความเครียดโดยตรงและความเครียดที่ความเค้นสูงสุด ($\epsilon - \epsilon_1^u$) ความเครียดที่ความเค้นดึงสูงสุดถูกสมมติว่า สเตรนซอฟเ็นนิ่งหลังจากการเสียหายลดลง ความเค้นเชิงเส้นเป็นศูนย์ที่ความเครียดทั้งหมดประมาณ 10 เท่า ของความเครียดที่ความเค้นดึงสูงสุด ความเครียดที่การเสียหายในคอนกรีตมาตรฐาน คือ 10^{-4} ตามคำแนะนำ เ็นชั้นสทิฟเฟนนิ่งนั้นลดลง ความเค้นที่ค่าศูนย์ที่ความเครียดทั้งหมดประมาณ 10^{-3} เป็นสิ่งมีเหตุผลตามคู่มือ [20] ความแตกต่าง ระหว่างความเครียดที่ความเค้นดึงสูงสุดและความเครียดที่ค่าศูนย์ คือ 0.0009 แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาในปัจจุบัน พารามิเตอร์นี้ถูกปรับ 0.001 ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ที่จุด A คือ จุดความเค้นดึง สูงสุด และจุด B คือ จุดเมื่อความเค้นดึงลดลงเป็นศูนย์ พิกัดของจุด A และ จุด B ถูกกำหนดในการ วิเคราะห์และถูกแสดงในตารางที่ 4.7

4.6.2.2.2 อัตราส่วนความเค้นและอัตราส่วนความเครียดเพื่อกำหนด พื้นผิวเสียหาย

โปรแกรม ABAQUS ใช้ อัตราส่วนการเสียหายเพื่อกำหนดรูปร่างของการเสียหายสำหรับ
แบบจำลองคอนกรีตทนไฟ สามารถป้อนข้อมูลทั้ง 4 ได้ดังนี้



รูปที่ 4.23 แบบจำลองเห็นชั้นสตีฟเฟ่นนิ่ง (Tension stiffening) แสดงลักษณะความเค้นกับความเครียดภายหลังการเสียหาย ตามคู่มือ ABAQUS [20]



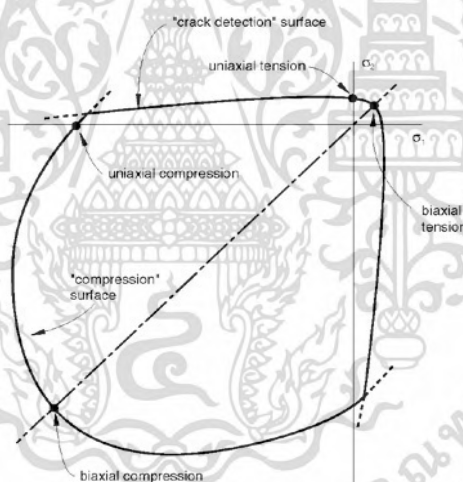
รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเค้นดึงต่อความเค้นดึงสูงสุด กับความแตกต่างระหว่างความเครียดโดยตรงและความเครียดที่ความเค้นดึงสูงสุด [19]

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลสำหรับเห็นชั้นสตีฟเฟ่นนิ่ง (Tension stiffening) [19]

$\frac{\sigma}{\sigma_1^u}$	$\varepsilon - \varepsilon_1^u$
1	0
0	0.001

- 1) อัตราส่วนของความเค้นอัดสูงสุดในสองแกนต่อความเค้นอัดสูงสุดในหนึ่งแกน ค่าเริ่มต้นของโปรแกรม คือ 1.16
- 2) ค่าสมบูรณของอัตราส่วนของความเค้นดึงในหนึ่งแกนที่เสียหายต่อความเค้นอัดสูงสุดใน หนึ่งแกน
- 3) อัตราส่วนของความเครียดพลาสติกที่ความเค้นอัดสูงสุดในสองแกนต่อความเครียดพลาสติกที่ความเค้นอัดสูงสุดในสองแกน ค่าเริ่มต้นของโปรแกรม คือ 1.28
- 4) อัตราส่วนของความเค้นดึงหลักที่แตกช้าในระนาบความเค้น เมื่อความเค้นหลักอื่นๆ ที่ ค่าแรงอัดสูงสุดต่อความเค้นดึงภายใต้แรงดึงในหนึ่งแกน ค่าเริ่มต้นของโปรแกรม คือ 1/3

ตามรูปที่ 4.25 แสดงพื้นระนาบความเค้นของคอนกรีต ที่ σ_1 และ σ_2 แสดงความเค้น หลักในทิศทาง 1 และ 2 ตามลำดับ ที่จุด “Biaxial tension stress” จำนวนความเค้นดึง ทั้งใน ทิศทาง 1 และ 2 เช่นเดียวกัน “Biaxial compression stress” จำนวนความเค้นอัดทั้งในทิศทาง 1 และ 2 “Compressive yield surface” แสดงอาการความไม่ยืดหยุ่นของคอนกรีต เมื่อความเค้น หลักเป็นแรงอัด “The crack detection surface” ความเค้นที่รอยแตกช้าเกิดขึ้น



รูปที่ 4.25 ฟังก์ชันการเสียหายภายใต้ระนาบความเค้น ตามคู่มือ ABAQUS [20]

ค่าเริ่มต้นของโปรแกรมถูกใช้สำหรับอัตราส่วนความเค้น 1 และ 4 และอัตราส่วน ความเครียด 3 เนื่องจากไม่สามารถหาข้อมูลได้ อัตราส่วนความเค้น 2 ถูกคำนวณจากสมการที่ (4.4) อัตราส่วนความเค้น 2 = (ความเค้นดึงในหนึ่งแกนที่เสียหาย)/(ความเค้นอัดสูงสุดในหนึ่งแกน)

$$\text{อัตราส่วนความเค้น}(2) = \frac{f_t'}{f_c'} \quad (4.4)$$

โดยที่ ความเค้นดึงสูงสุดของคอนกรีตถูกประมาณค่า โดยใช้สมการที่ (3.71) ดังนี้

$$f_t' = 0.6\sqrt{f_c'}$$

การป้อนข้อมูลของอัตราส่วนความเค้นและอัตราส่วนความเครียดถูกแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลของอัตราส่วนความเค้นและความเครียด

ที่อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วน 1	อัตราส่วน 2	อัตราส่วน 3	อัตราส่วน 4
30	1.16	0.07733	1.28	0.3333
200	1.16	0.10382	1.28	0.3333
400	1.16	0.06820	1.28	0.3333
600	1.16	0.05880	1.28	0.3333
800	1.16	0.06485	1.28	0.3333

4.6.3 การจำลองพันธะแรงยึดเหนี่ยวที่มีต่อกันระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีต

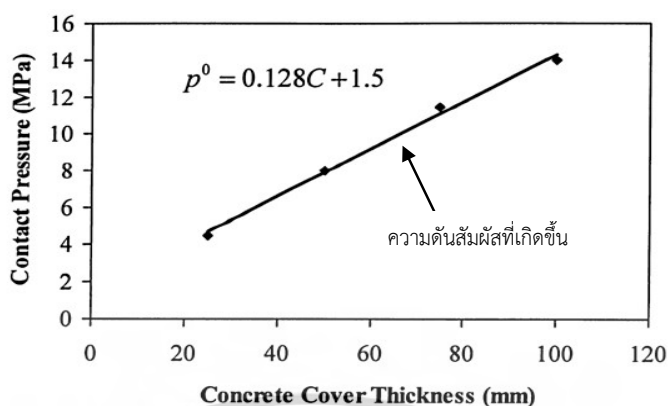
ปัญหาทางวิศวกรรมเกี่ยวกับพื้นผิวสัมผัสระหว่างสององค์ประกอบหรือมากกว่า ที่แรงที่ผิวสัมผัสกระทำบนวัตถุเมื่อวัตถุสัมผัสกัน ซึ่งถ้ามีแรงเสียดทานระหว่างผิวก็สามารถสร้าง ความต้านทานการเคลื่อนที่ขณะสัมผัสสำหรับวัตถุ ขั้นตอนกำหนดการสัมผัสในการจำลอง มี 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

- 1) กำหนดผิวของวัตถุ ซึ่งควรมีศักยภาพในการสัมผัส
- 2) กำหนดคุณสมบัติผิวที่มีปฏิกริยากับอีกผิวหนึ่ง
- 3) กำหนดการมีปฏิกริยาต่อผิวทางกลและทางความร้อนของแบบจำลอง ซึ่งครอบคลุมพฤติกรรมของผิวเมื่อสัมผัสกัน

4.6.3.1 การจำลองแรงดันสัมผัส (Contact Pressure) แบบจำลองแรงดันสัมผัสสำหรับพันธะระหว่างคอนกรีตและเหล็ก ในแบบจำลองแรงยึดเหนี่ยว ที่ p^0 แปรผันกับความหนาของคอนกรีตที่หุ้ม ความแตกต่างของ p^0 จะใช้การวิเคราะห์แบบสมการถดถอย สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสัมผัสที่ช่องว่างเป็นศูนย์และ ความหนาของคอนกรีตที่หุ้ม ซึ่งสามารถใช้เพื่อคำนวณแรงดันสัมผัสสำหรับคอนกรีต รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสัมผัสและความหนาของคอนกรีตที่หุ้ม สมการที่ (4.5) กำหนด ความสัมพันธ์ของแรงดันสัมผัสและความหนาของคอนกรีตที่หุ้ม

$$p^0 = 0.128C + 1.5 \quad (4.5)$$

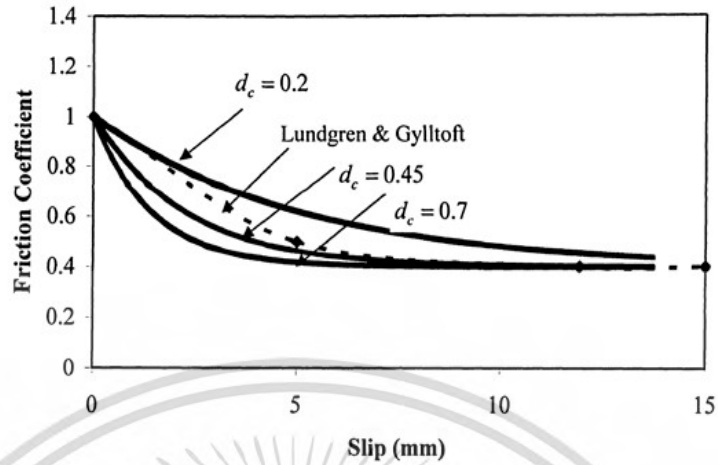
โดยที่ p^0 คือ ความดันสัมผัส และ C คือ ความหนาของคอนกรีตที่หุ้ม



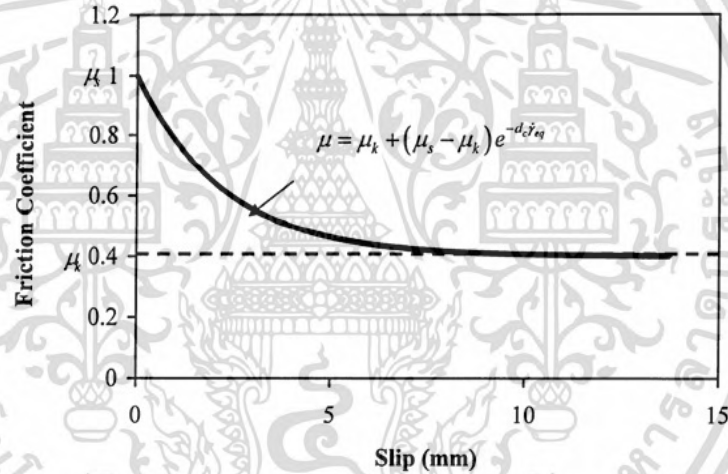
รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสัมผัสกับความหนาคอนกรีตที่ห่อหุ้ม [19]

4.6.3.2 การจำลองแรงเสียดทานที่มีพันธะต่อกันระหว่างเหล็กและ คอนกรีต

Lundgren และ Gylltoft (2000) ได้พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการลื่นไถลโดยใช้ผลทดลองของ Tepfers และ Olsson (1992) จากการพัฒนาโดย Lundgren และ Gylltoft ได้ค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบสถิต $\mu_s = 1$ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ คือ $\mu_k = 0.4$ และค่าเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันเลขชี้กำลังจากเงื่อนไขแบบสถิตเป็นแบบจลน์ ต่อมา Alaka ได้นำค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเหล่านี้มาปรับให้เหมาะสม ค่าความแตกต่างของ ฟังก์ชันการเชื่อมลง ซึ่งควรจะใช้น้อยกว่า 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับการลื่นไถลสำหรับค่าความแตกต่างของค่า d_c เห็นได้ชัดเจนว่ากราฟของ $d_c = 0.45$ จะเข้ากันได้ดีกับกราฟ Lundgren และ Gylltoft ดังนั้น แบบจำลองในส่วนนี้จึงอาศัย ข้อมูลดังต่อไปนี้ของ Alaka มาใช้สำหรับป้อนค่าในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบสถิต คือ $\mu_s = 1$ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ คือ $\mu_k = 0.4$ สัมประสิทธิ์การเชื่อมลง $d_c = 0.45$ ค่าดังกล่าวถูกใช้ในสมการที่ (3.73) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่อการลื่นไถลถูก คำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับการลื่นไถลที่มีพันธะต่อกันระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีตทนไฟ



รูปที่ 4.27 แบบจำลองแรงเสียดทานของสัมประสิทธิ์การเสียดล [19]



รูปที่ 4.28 ฟังก์ชันเลขชี้กำลังในแบบจำลองแรงเสียดทานที่เสียดลมีปฏิกริยาต่อกันระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีต [19]

4.7 การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยการคำนวณ

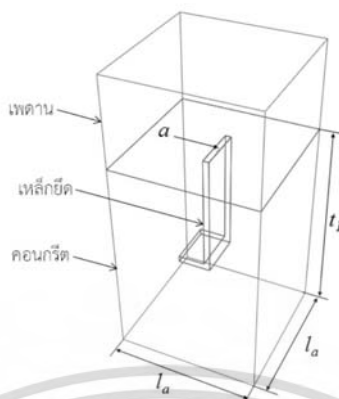
การคำนวณระยะห่างระหว่างเหล็กยึดมีความซับซ้อน เนื่องจากมีจำนวนของปัจจัยที่เกี่ยวข้องมาก เช่น ความหนาของเหล็กยึดชนิดของวัสดุทนไฟที่ใช้ และอื่นๆ ดังนั้น การหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดจึงเป็นค่าโดยประมาณ ด้วยการสมมติเงื่อนไขอย่างเข้มงวดที่สุด

สมมติฐานการคำนวณเบื้องต้น ดังนี้

- 1) คอนกรีตทนไฟแบบชั้นเดียว
- 2) ความเค้นดึงอนุญาตของเหล็กยึด เหล็กยึดถูกทำมาจากเหล็กสแตนเลสเกรด SUS310S ความเค้นดึงสูงสุด 448 kgf/cm^2 ที่ อุณหภูมิ $1,093 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [12] เนื่องจากความร้อนที่เปลี่ยนแปลง ทำให้คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป จึงกำหนดให้ค่าความปลอดภัย 20 [18] นั่นคือ $\sigma_m = 448/20 = 22.4 \text{ kgf/cm}^2$
- 3) ความหนาแน่นของคอนกรีตทนไฟ ข้อมูลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการของบริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟจำกัด คือ $\rho_1 = 0.00273 \text{ kg/cm}^2$
- 4) ความเค้นกดอนุญาตของคอนกรีตทนไฟ การคำนวณความเค้นกดนั้น โมดูลัสของการแตกของคอนกรีตทนไฟที่อุณหภูมิ $1,000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ คือ 140 kg/cm^2 ข้อมูลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการของบริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด และ กำหนดให้ปัจจัยความปลอดภัยเป็น 20 [18] นั่นคือ $\sigma_r = 140/20 = 7 \text{ kgf/cm}^2$
- 5) ชนิดของเหล็กยึด การคำนวณอยู่บนพื้นฐานชนิดของเหล็กยึดแบบง่าย คือ เหล็กยึดแบบ แผ่นแบนและแบบเส้นกลม พื้นที่หน้าตัด 2 cm^2 และ 0.56 cm^2 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ภายใต้ภาระแรงดึง
- 6) ระยะห่างระหว่างเหล็กยึดจะถือว่าเป็นเหมือนกันในทั้งสองทิศทางจากนั้น นำคุณสมบัติเหล่านี้แทนค่าในสมการที่ 3.82 และ สมการที่ 3.86 ผลการคำนวณ และนำเสนอในลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างเหล็กยึดและความหนาคอนกรีตทนไฟ

4.7.1 วิธีการคำนวณเพื่ออธิบายกราฟ

เมื่อ r_1 คือ ความหนาของคอนกรีตทนไฟ (cm), l_a คือ ระยะห่างเหล็กยึด (cm) สมมติว่าช่วงเท่ากันในทิศทางทั้งคู่, ρ_1 คือ ความหนาแน่นของวัสดุคอนกรีตทนไฟ (kg/cm^3), a คือ พื้นที่ตัดของเหล็กยึด (cm^2), σ_m คือ ความเค้นดึงที่อนุญาตของวัสดุเหล็กยึดที่อุณหภูมิทำงาน (kgf/cm^2) σ_r คือ ความเค้นกดที่อนุญาตของวัสดุเหล็กยึดที่อุณหภูมิทำงาน (kgf/cm^2) และ w คือ ภาระบนเหล็กยึดหนึ่งอัน (kg) โดยที่ ภาระบนเหล็กยึดหนึ่งอัน



รูปที่ 4.29 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

4.7.1.1 กรณีเหล็กยึดชนิดแผ่น

- การหาค่าระยะห่างที่ยอมรับได้ของเหล็กยึด

$$l_a \leq \sqrt{\frac{a \sigma_m}{t_1 \rho_1}}$$

แทนค่า ในสมการ

$$l_a \leq \sqrt{\frac{2 \times 22.4}{17 \times 0.00273}} \quad l_a \leq \sqrt{965.3}$$

$$l_a \leq 31.06 \text{ cm.}$$

เมื่อเปลี่ยนค่า t_1 ให้น้อยลงเรื่อยๆ ค่า l_a ที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังกราฟในรูปที่ 3.21

- การหาค่าระยะห่างที่ยอมรับได้ของคองกรีต

$$l_r \leq \sqrt{\frac{\sigma_r t_1}{3 \cdot \rho_1}}$$

แทนค่า ในสมการ

$$l_r \leq \sqrt{\frac{7 \times 17}{3 \times 0.00273}}$$

$$l_r \leq \sqrt{14529.9}$$

$$l_r \leq 120.5 \text{ cm.}$$

เมื่อเปลี่ยนค่า t_1 ให้น้อยลงเรื่อยๆ ค่า l_r ที่ได้จะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ ดังกราฟในรูปที่ 3.21

4.7.1.2 กรณีเหล็กยึดชนิดกลม

- การหาค่าระยะห่างที่ยอมรับได้ของเหล็กยึด

$$l_a \leq \sqrt{\frac{a\sigma_m}{t_1\rho_1}}$$

แทนค่า ในสมการ

$$l_a \leq \sqrt{\frac{0.56 \times 22.4}{17 \times 0.00273}}$$

$$l_a \leq \sqrt{270.28}$$

$$l_a \leq 16.44 \text{ cm}$$

เมื่อเปลี่ยนค่า t_1 ให้น้อยลงเรื่อยๆ ค่า l_a ที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังกราฟในรูปที่ 3.20

4.7.1.3 การหาค่าระยะห่างที่ยอมรับได้ของคอนกรีต

$$l_r \leq \sqrt{\frac{\sigma_r t_1}{3\rho_1}}$$

แทนค่า ในสมการ

$$l_r \leq \sqrt{\frac{7 \times 17}{3 \times 0.00273}}$$

$$l_r \leq \sqrt{14529.9}$$

$$l_r \leq 120.5 \text{ cm.}$$

เมื่อเปลี่ยนค่า t_1 ให้น้อยลงเรื่อยๆ ค่า l_r ที่ได้จะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ ดังกราฟในรูปที่ 3.20, 3.21

บทที่ 5

ผลการวิจัย

5.1 บทนำ

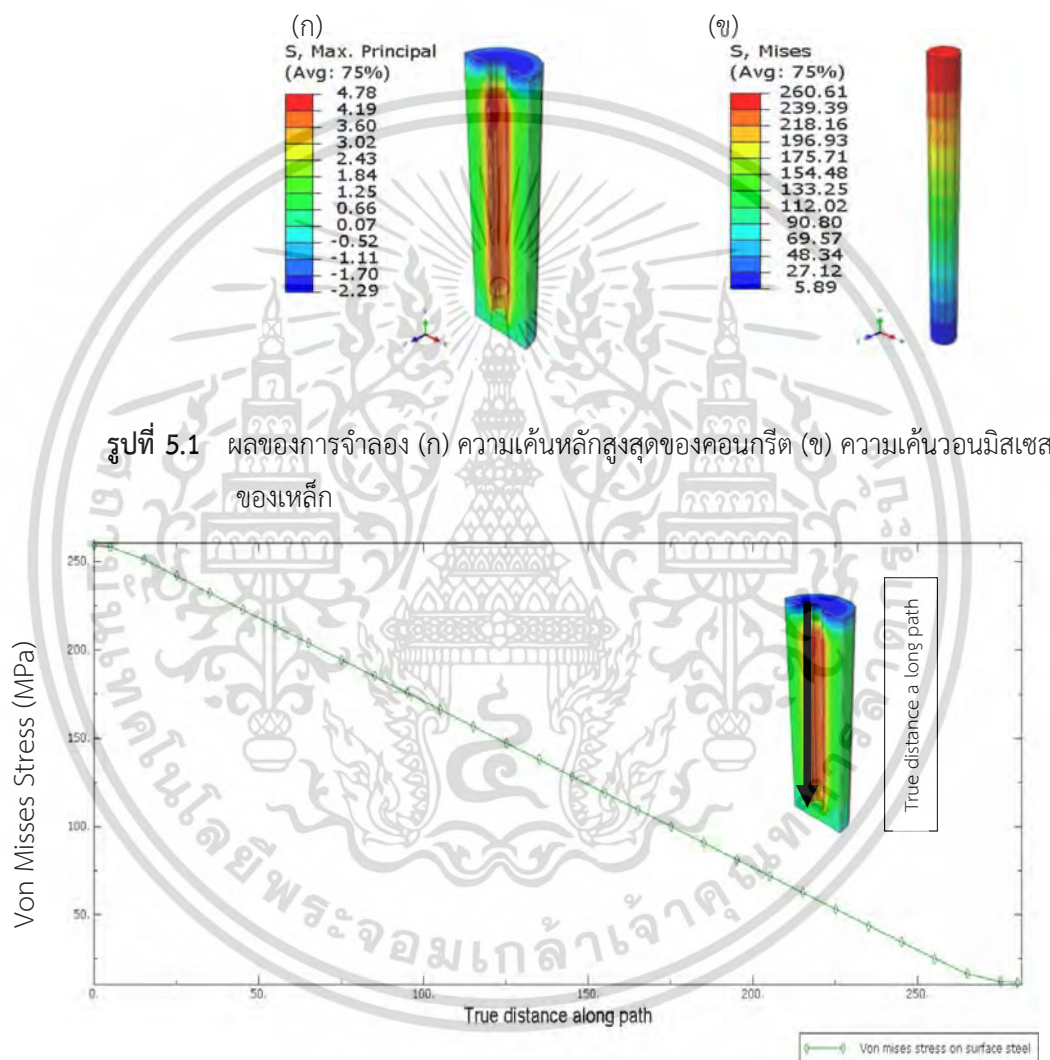
ในบทนี้ นำเสนอผลการวิจัย 4 ส่วนหลัก ได้แก่

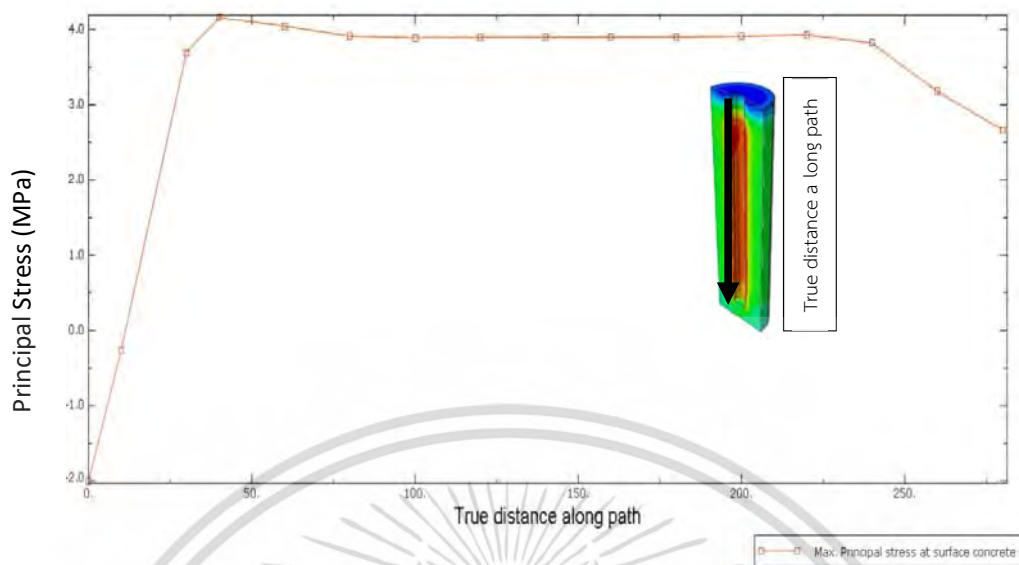
- 1) ผลของการศึกษาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาเดิมเกี่ยวกับพันธะแรงยึดเหนี่ยว
- 2) ผลที่ได้จากการจำลองรูปแบบโมเดลของพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร และผลที่ได้การจำลองรูปแบบโมเดลของพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถลเทียบกับ ผลการทดลอง โดยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้
 - 2.1) ผลของการทดลอง
 - 2.2) ผลของการจำลองพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร(Perfect bond)
 - 2.3) ผลของการจำลองพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล(Bond- slip)
 - 2.4) เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลอง กับผลการทดลอง
 - 2.5) ผลของการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล (Bond- slip) และแบบยึดแน่นถาวร (Perfect bond)
- 3) ผลของการจำลองโครงสร้างปูนซีเมนต์แบบลื่นไถล (Bond-slip) ถูกนำเสนอ ในเชิงเปรียบเทียบกันตามปัจจัยของชนิดเหล็กยึดทั้งสามชนิด (L-Anchor, Y-Anchor, Y-Rod Anchor) ซึ่งประกอบด้วย
 - 3.1) ผลการกระจายอุณหภูมิทั้งคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด
 - 3.2) ค่าการลื่นไถลของเหล็กยึดแต่ละชนิด
 - 3.3) ผลการกระจายความเค้นในคอนกรีตทนไฟ และเหล็กยึด ที่ระดับความลึกต่างๆ
 - 3.3.1) ผลการกระจายความเค้นที่ระดับความลึกต่างๆ ที่ส่วนตัดแกน X-X
 - 3.3.2) ผลการกระจายความเค้นที่ระดับความลึกต่างๆ ที่ส่วนตัดแกน Z-Z
 - 3.4) ผลการกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด
 - 3.5) ผลการกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อคอนกรีตทนไฟ
- 4) ผลการคำนวณระยะห่างของเหล็กยึดแบบต่างๆ กับคอนกรีตซึ่งจะให้ค่าระยะห่างของเหล็กยึดที่เหมาะสมของเหล็กยึดแต่ละแบบ

5.2 ผลของการศึกษาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาเดิมเกี่ยวกับพันธะแรงยึดเหนี่ยว

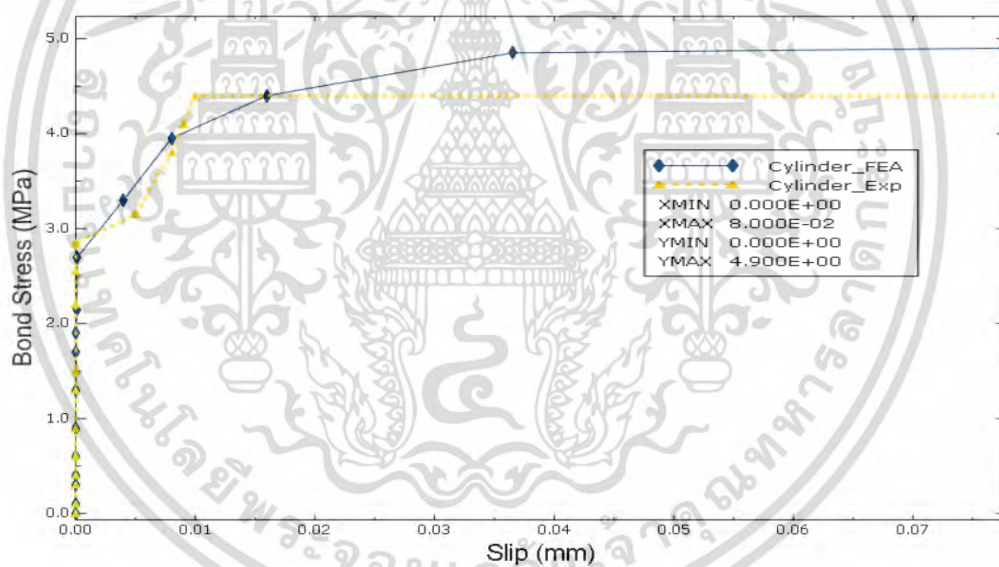
ผลของการจำลองพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตถูกเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดย Alaka [19] ซึ่งได้จำลองการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริมแรง (Pull out test) ผลของความเค้นหลักสูงสุดในคอนกรีตและความเค้นวอนมิสเชสของเหล็ก

ที่แรงดึง 250 N ดังแสดงในรูปที่ 5.1 การกระจายความเค้นในเนื้อคอนกรีตมีค่าสูงสุดที่ 4.78 MPa (รูปที่ 5.1) ตรงบริเวณที่สัมผัสกับเหล็กและจะลดลงเมื่ออยู่ห่างออกไป ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยว และการลื่นไถลถูกเปรียบเทียบกับกับของ Alaka ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ปรากฏว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกัน และสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แสดงให้เห็นว่าการจำลองรูปแบบพันธะของ Alaka สามารถนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมระหว่างเหล็กและคอนกรีตเสริมแรงแบบต่างๆได้



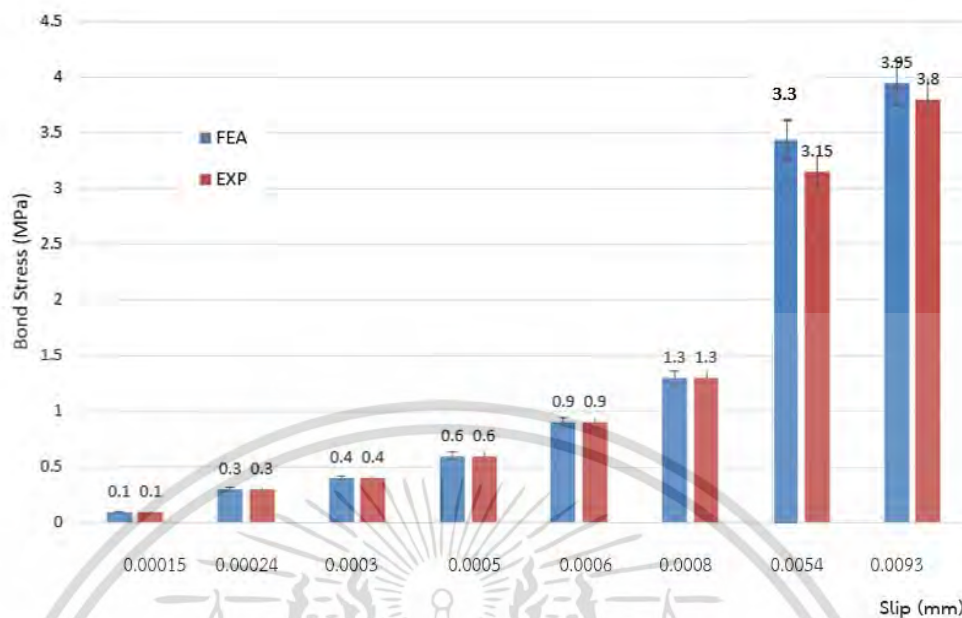


รูปที่ 5.3 กราฟแสดงผลค่าความเค้นหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นในคอนกรีต



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวการลื่นไถล เทียบกันระหว่าง ผลของการศึกษาของ Alaka

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยว และการลื่นไถล ในรูปที่ 5.4 จะได้ผลของการทดลองศึกษาพฤติกรรม เปรียบเทียบ กับผลของการโมเดล ตามแบบของ Alaka โดยแสดงค่าความแตกต่างของค่าพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถลประมาณ 5 % (รูปที่ 5.5)



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่าความแตกต่างระหว่างแรงยึดเหนี่ยวการลื่นไถลจากการทดลอง เทียบกับระหว่าง ผลของการศึกษาของ Alaka

5.3 ผลที่ได้จากการจำลองรูปแบบโมเดลของพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร และผลที่ได้จากการจำลองรูปแบบโมเดลของพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถลเทียบกับผลการทดลอง

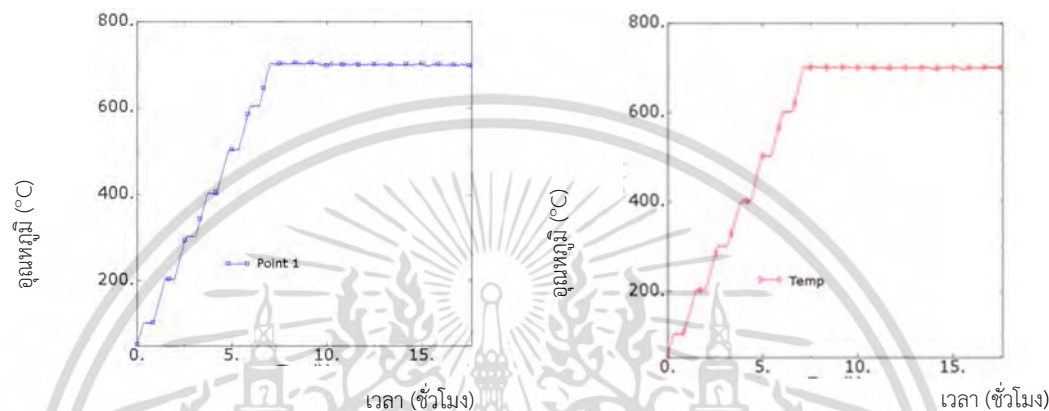
ผลการทดลองจากการให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่างถึงสองครั้งได้แสดงค่า อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณที่จุดวัดทั้ง 14 จุด และค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณหลักยึด จากนั้นได้นำค่าผลการทดลองที่ได้ ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองโมเดล โดยได้แบ่งผลการจำลองโมเดลออกเป็น 2แบบ ด้วยกัน คือ

- 1) ผลของพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร(Perfect bond)
- 2) ผลของการศึกษาพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล(Bond- slip) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

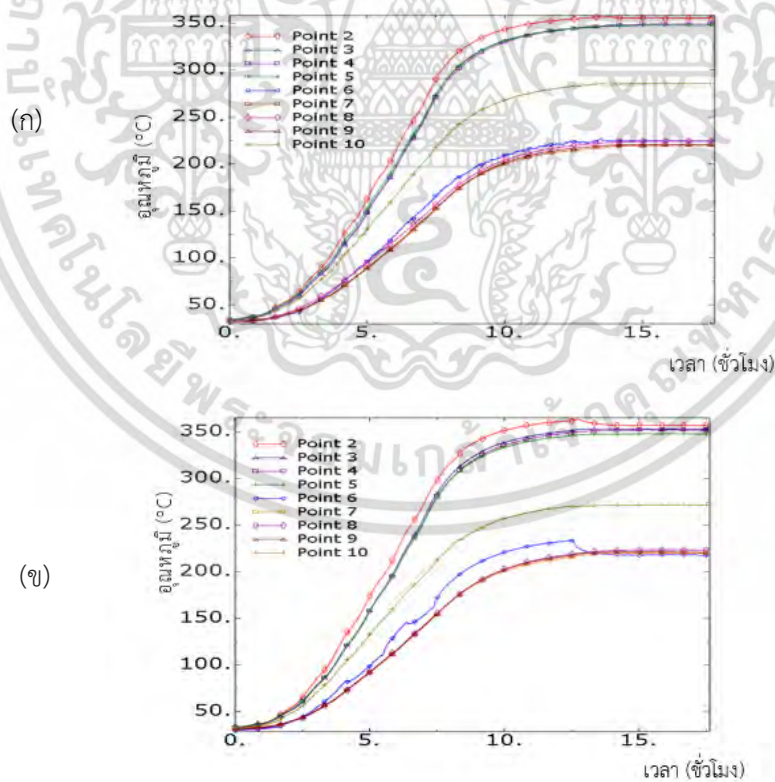
5.3.1 ผลของการทดลอง

การปฏิบัติการทดลองเพื่อหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากชิ้นงานทดลอง โดยการให้ความร้อนจำนวน 2 ครั้ง ใช้ระยะเวลาประมาณ 17.5 ชั่วโมงต่อ ครั้ง ผลจากการทดลองถูกบันทึกด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย ผลอุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตทนไฟ (จุดที่ 1) ดังแสดงในรูปที่ 5.6 โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่างทดลองจนมีอุณหภูมิ 700 °C และคงรักษาอุณหภูมินั้นไว้ตลอดจนกระบวนการเสร็จสิ้น ในเวลาเดียวกัน ทั้งผลอุณหภูมิสถานะแวดล้อมใกล้คอนกรีตทนไฟถูกบันทึก

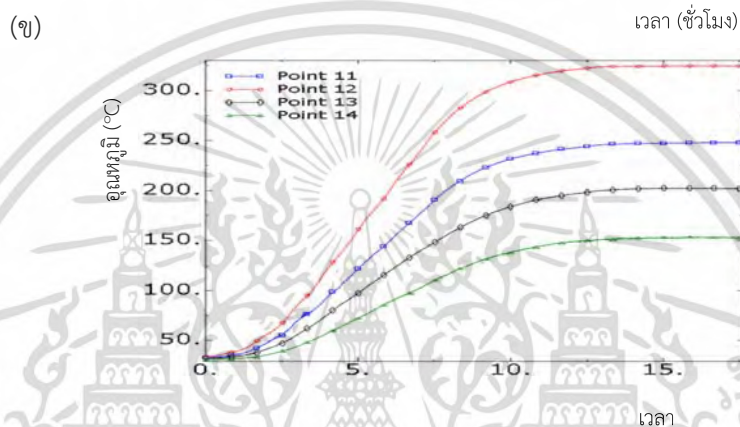
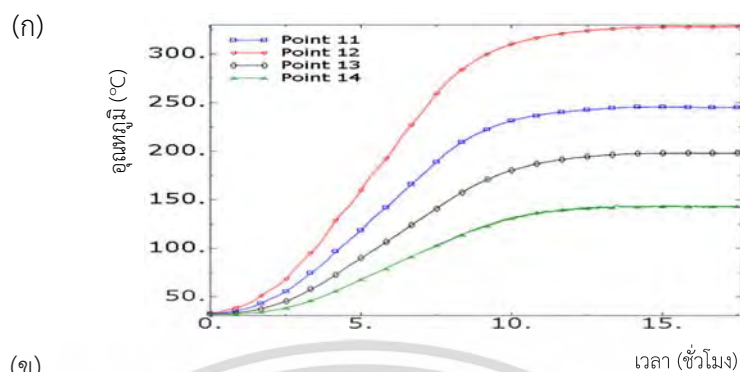
ไว้ (จุดที่ 2 ถึง 10) ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งผลอุณหภูมิจากการ ทดลองดังกล่าวจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ กับแบบจำลองในส่วนถัดไป และผลอุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตทนไฟวัสดุที่ใช้เป็นชนิด Low cement (Tufdura-S300) อุณหภูมิผิวเหล็กยึดโดยวัสดุที่ใช้เป็นสแตนเลส (SUS310S) และ อุณหภูมิผิวเปลือก หม้อเผาปูนซีเมนต์โดยใช้วัสดุเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (จุดที่ 11 ถึง 14) ดังแสดงในรูปที่ 5.8 รวมถึง ผลความเครียดเหล็กยึด ดังแสดงในรูปที่ 5.9 จะถูกนำมาเปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองรูปแบบ พื้นระบับยึดแน่นถาวรและการทดลองโดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นส่วนโครงสร้างหม้อเผาปูนซีเมนต์



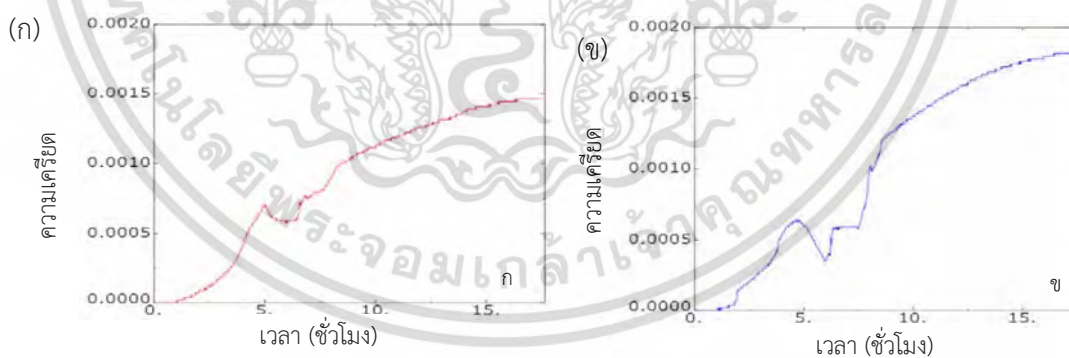
รูปที่ 5.6 ผลของอุณหภูมิที่ผิวของคอนกรีตทนไฟ จุดที่ 1 (ก)การทดลองครั้งที่ 1 (ข)การทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 5.7 ผลของอุณหภูมิสถานะแวดล้อมใกล้คอนกรีตทนไฟ จุดที่ 2 ถึง 10
(ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 5.8 ผลของอุณหภูมิผิวคอนกรีตทนไฟ เหล็กยึด และเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์ จุดที่ 11 ถึง 14 (ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2



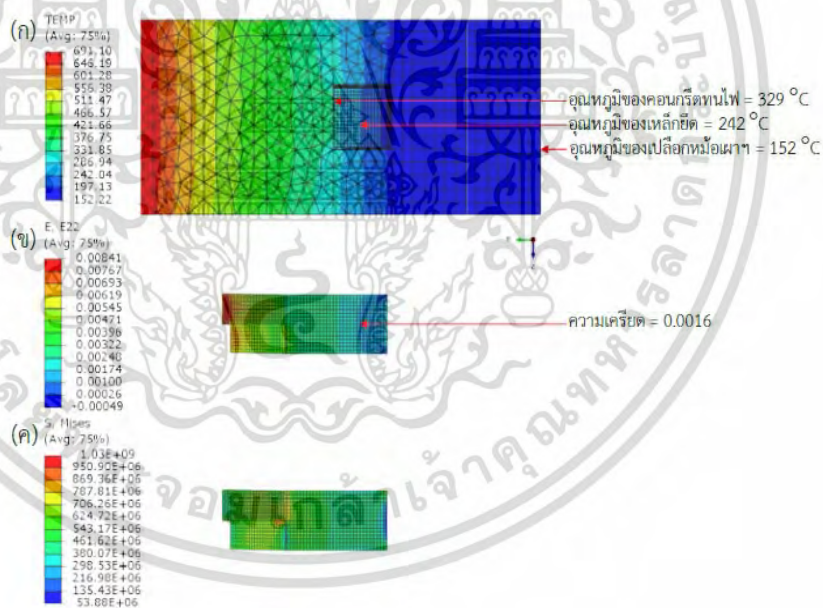
รูปที่ 5.9 ผลของความเครียดบนเหล็กยึด (ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2

จากรูปที่ 5.6 ลักษณะกราฟแสดงค่าผลของความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวคอนกรีตทนไฟตามการทดลองโดยเริ่มต้นจากการให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่างทดลองโดยกำหนดให้อัตราความร้อนเพิ่มขึ้น (Heating rate) ประมาณ 2.5 °C/min จนถึงอุณหภูมิ 100 °C และคงรักษาอุณหภูมินี้ไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้น ดำเนินการให้ความร้อนในอัตราความเร็วดังกล่าว จนถึง อุณหภูมิ 200 °C และคงรักษาอุณหภูมินี้ไว้ประมาณ 30 นาที จนถึงอุณหภูมิ 700 °C และคงรักษาอุณหภูมินี้ตลอด

การทดลองแล้วเสร็จ รวมเวลาทั้งสิ้นประมาณ 17.5 ชั่วโมง โดยค่าผลของความร้อนบริเวณใกล้คอนกรีตทนไฟ เหล็กยึด และเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์ ที่ได้รับการถ่ายเทความร้อนจากผิวคอนกรีตทนไฟที่มีค่าอุณหภูมิค่อยๆเพิ่มขึ้นจนถึง 350°C ทั้งสองครั้ง(รูปที่ 5.7 และ รูปที่ 5.8) และค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากการถ่ายเทความร้อนบนเหล็กยึด โดยลักษณะค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น(รูปที่ 5.9)

5.3.2 ผลของการจำลองโมเดลแบบพฤติกรรมพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร (Perfect bond)

ผลของการจำลองถูกนำเสนอ การกระจายอุณหภูมิ ความเครียดเหล็กยึดตามแนวแกน Y และความเค้นวอนมิสเชส ดังแสดงในรูปที่ 5.10 แสดงถึง การกระจายอุณหภูมิสูงสุดที่ 329°C , 242°C , 152°C โดยเริ่มจากด้านบนสุดของคอนกรีตทนไฟและถ่ายเทเข้าไปในเนื้อคอนกรีต เนื้อเหล็กยึดและเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์ ตามลำดับ สอดคล้องกับค่าความเครียดของเหล็กยึดที่เกิดจากการขยายตัวทางความร้อนโดยมีค่าความเครียดมากที่สุดบริเวณด้านบนสุดของเหล็กยึดที่ค่า 0.0016 และค่าการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในเหล็กยึดมีค่ามากที่สุดที่จุดเริ่มต้นของการแยกตัวของเหล็กยึด

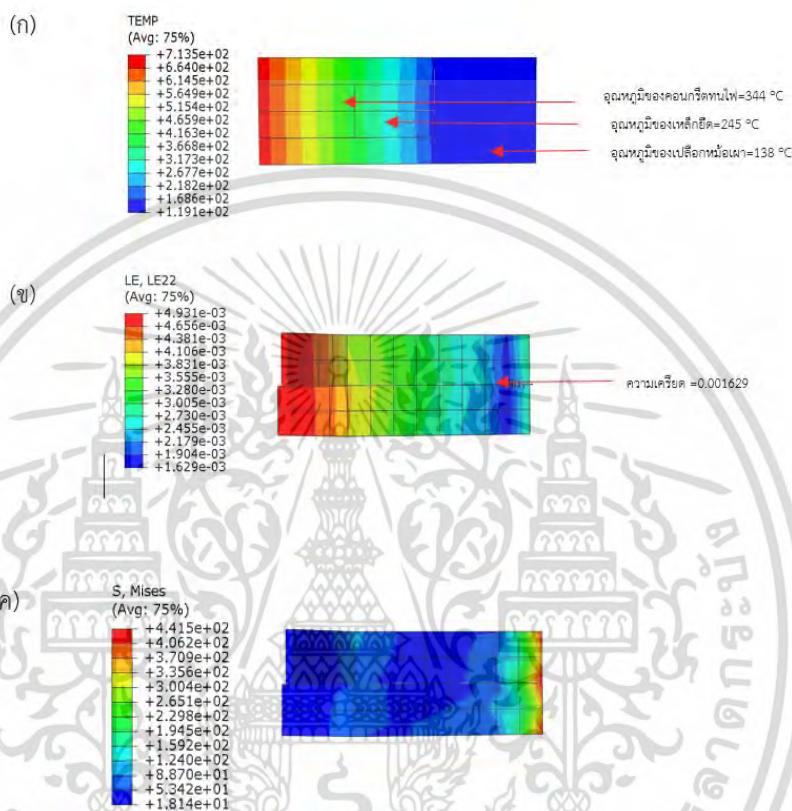


รูปที่ 5.10 ผลของการจำลอง (ก) การกระจายอุณหภูมิ (ข) ความเครียดเหล็กยึดตามแนวแกน Y (ค) ความเค้นวอนมิสเชส (Pa)

5.3.3 ผลของการจำลองโมเดลแบบพฤติกรรมพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล (bond slip)

ผลของการจำลองถูกนำเสนอ การกระจายอุณหภูมิ ความเครียดเหล็กยึดตามแนวแกน Y และความเค้นวอนมิสเชส ดังแสดงในรูปที่ 5.11 แสดงถึง การกระจายอุณหภูมิสูงสุดที่ 344°C , 245°C , 138

°C โดยเริ่มจากด้านบนสุดของคอนกรีตท่อนไฟและถ่ายเทเข้าไปในเนื้อคอนกรีต เนื้อเหล็กยึดและเปลือกหุ้มท่อปูนซีเมนต์ ตามลำดับ สอดคล้องกับค่าความเครียดของเหล็กยึดที่เกิดจากการขยายตัวทางความร้อนโดยมีค่าความเครียดมากที่สุดบริเวณด้านบนสุดของเหล็กยึดที่ค่า 0.001629 และค่าการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในเหล็กยึดมีค่ามากที่สุดที่โคนเหล็กยึด

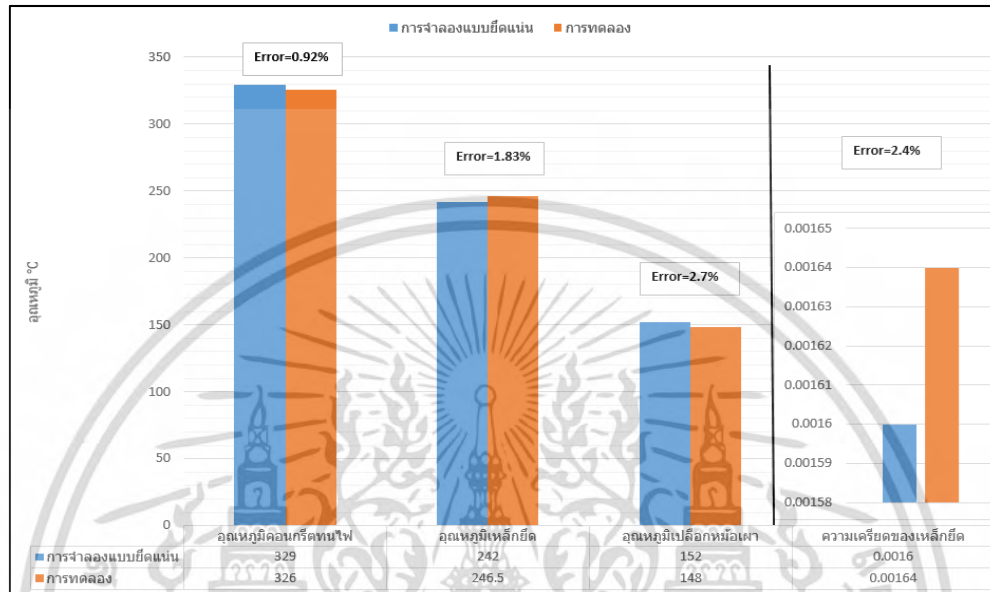


รูปที่ 5.11 ผลของการจำลอง (ก) การกระจายอุณหภูมิ (ข) ความเครียดเหล็กยึดตามแนวแกน Y (ค) ความเค้นวอนมิสเสส (Pa)

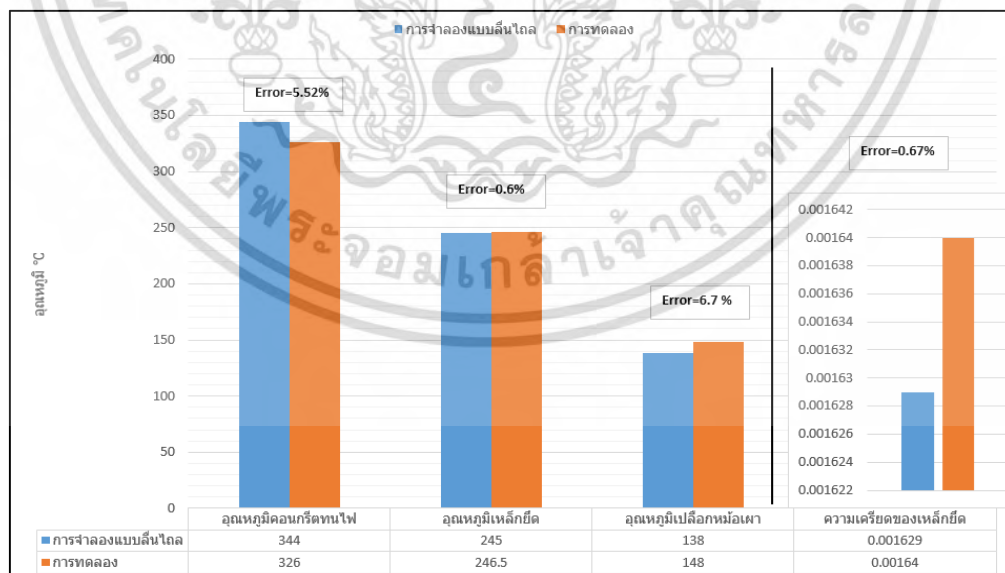
5.3.4 เปรียบเทียบผลของการจำลองกับผลของการทดลอง

การทดลองให้ผลทั้งอุณหภูมิและความเครียดเหล็กยึดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการทดลองถูกดำเนินการอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งผลอุณหภูมิและความเครียดเหล็กยึดไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา หรืออยู่ในสภาวะคงตัว สอดคล้องกับแบบจำลองที่ถูกดำเนินการในสภาวะคงตัวเช่นกัน ดังนั้น การเปรียบเทียบจึงนำผลการทดลองที่สภาวะคงตัว ได้แก่ อุณหภูมิคอนกรีตท่อนไฟ อุณหภูมิเหล็กยึด อุณหภูมิเปลือกหุ้มท่อปูนซีเมนต์ และ ความเครียดเหล็กยึด ซึ่งทั้งหมดเป็นผลเฉลี่ยจากการทดลอง จำนวน 2 ครั้ง

การเปรียบเทียบผลของการจำลองทั้งสองรูปแบบพฤติกรรม(พฤติกรรมพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวรและ พฤติกรรมพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล) กับการทดลองพร้อมค่าความผิดพลาด(Error) ดังแสดง ในรูปที่ 5.12 และ 5.13 ผลปรากฏว่าทั้งอุณหภูมิและความเครียดหลักยึดของการจำลองและการทดลองให้ผล ที่ใกล้เคียงกันและสอดคล้องกันเป็นอย่างดี



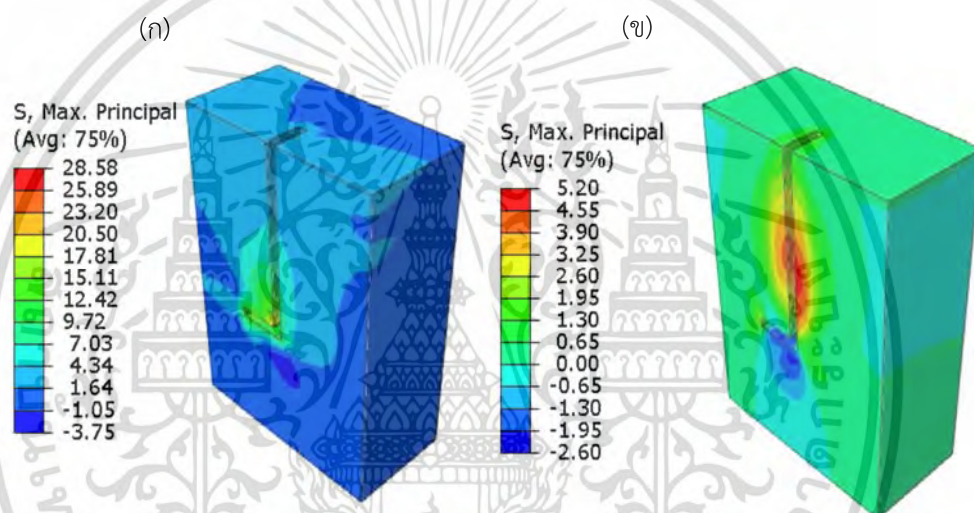
รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบผลของการทดลอง กับการจำลองโมเดลแบบพฤติกรรมพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร ในสภาวะคงตัว



รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบผลของการทดลอง กับการจำลองโมเดลแบบพฤติกรรมพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล ในสภาวะคงตัว

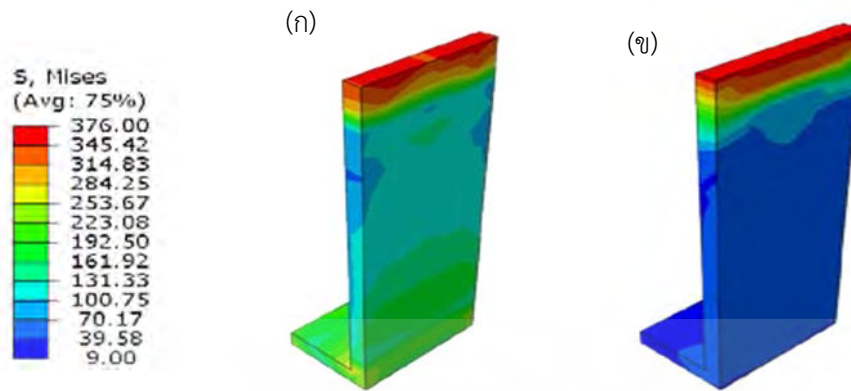
5.3.5 ผลของการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบสลิบไถล (Bond-slip) และแบบยึดแน่นถาวร (Perfect bond)

ผลของการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบสลิบไถล (Bond-slip) และแบบยึดแน่นถาวร (Perfect bond) ภายใต้ภาระทางความร้อน โดย อภิเดช ได้ศึกษาพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตทนไฟถูกกำหนดในแบบจำลอง พฤติกรรม ทางกลแบบเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและพันธะระหว่างคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดเป็นแบบ ยึดแน่นถาวร และ พฤติกรรมทางกลแบบไม่เชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและพันธะระหว่างผิว คอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดเป็นแบบสลิบไถล ผลที่ได้รับจากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่า แบบที่1 มีค่า ความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อคอนกรีตทนไฟมากกว่าแบบที่ 2 ประมาณ 5 เท่า



รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบผลของความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ (ก) พฤติกรรมทางกลแบบ เชิงเส้นพันธะแบบยึดแน่นถาวร (ข) พฤติกรรมทางกลแบบไม่เชิงเส้นพันธะแบบสลิบไถล

และการกระจายความเค้นเป็นไปในลักษณะที่แตกต่างกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 5.14 ส่วนความเค้น วอนมิสเสสของเหล็กยึดทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกันเฉพาะบริเวณโคนเหล็กยึด ถัดจากบริเวณนั้นการ กระจายความเค้นเริ่มแตกต่างกันทั้งตลอดช่วง ดังแสดงในรูปที่ 5.15 โดยทั่วไป การกระจายความเค้น ของคอนกรีตทนไฟควรจะอยู่ภายใต้ความเค้นดึงเมื่ออยู่ใกล้เหล็กยึดและลดน้อยลงเมื่ออยู่ห่างออกไป เพราะว่าเหล็กยึดขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้มากกว่าคอนกรีตทนไฟจึงไปดึงให้คอนกรีตทนไฟยึดตัวตามและผลักดันให้คอนกรีตทนไฟเหนือเหล็กยึดขึ้นไปอยู่ภายใต้ความเค้นอัด ดังนั้น พฤติกรรมทาง กลแบบไม่เชิงเส้นและการสัมผัสของวัสดุแบบสลิบไถลจึงให้ผลที่แม่นยำและเสมือนจริงมากกว่า [22]



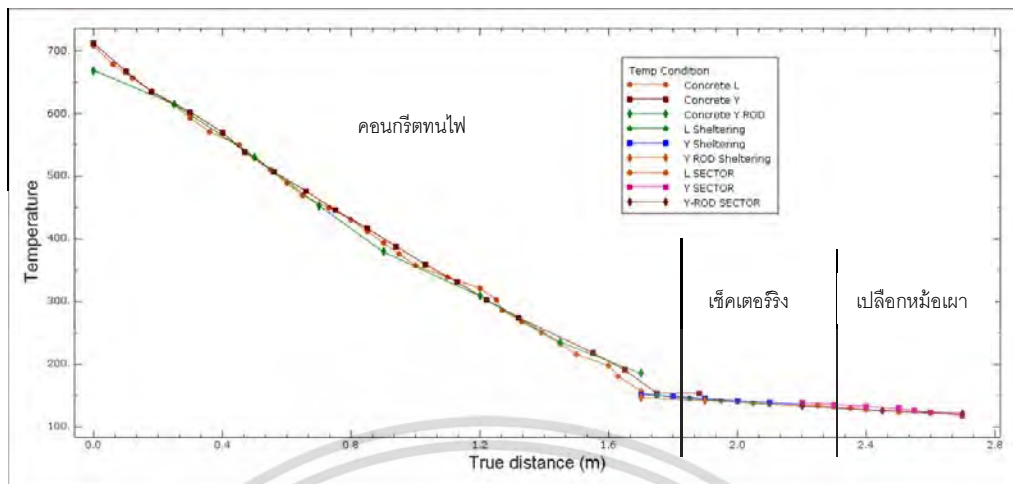
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบผลของความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึด(ก)พฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นพันธะแบบยึดแน่นถาวร (ข) พฤติกรรมทางกลแบบไม่เชิงเส้นพันธะแบบลื่นไถล

5.4 ผลของการจำลองโครงสร้างปูนซีเมนต์แบบลื่นไถล (Bond-slip) ถูกนำเสนอในเชิงเปรียบเทียบกันตามปัจจัยของชนิดเหล็กยึด

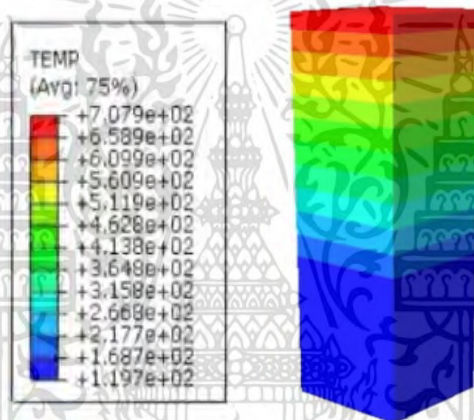
การมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างการกระจายความร้อนและการกระจายความเค้นในโครงสร้าง ปูนซีเมนต์ ด้วยปัจจัยจากพันธะและชนิดเหล็กยึด ผลจากการจำลองถูกนำเสนอทั้งการกระจายอุณหภูมิ และการกระจายความเค้นของคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด ดังนี้

5.4.1 การกระจายอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด

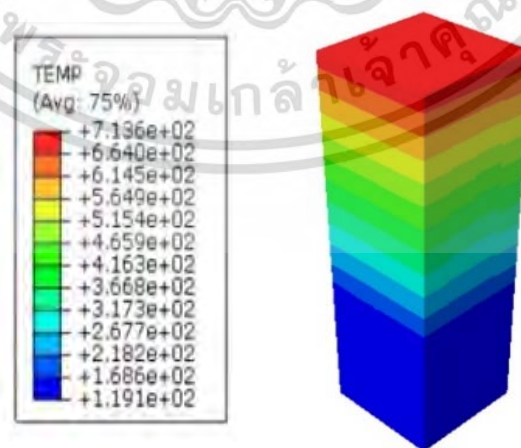
การถ่ายเทความร้อนจากผิวด้านร้อนของคอนกรีตทนไฟถึงเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์มีทั้งหมด 3 กรณี มีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.16 โดยตั้งแต่ผิวด้านร้อน ผิวด้านเย็น และเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์ มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 696, 150 และ 136 °C ตามลำดับ การกระจายอุณหภูมิทั้งคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดถูกนำเสนอทั้งหมด 3 กรณี โดยปรากฏว่าคอนกรีตทนไฟแต่ละกรณีเกิดกระจายอุณหภูมิเป็นไปในลักษณะเดียวกันและใกล้เคียงกัน เกิดอุณหภูมิสูงสุดตรงบริเวณด้านบนของผิวด้านร้อน ดังแสดงในรูปที่ 5.17 และส่งผลให้เหล็กยึดตรงบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงด้วย ดัง แสดงในรูปที่ 5.21 เมื่อพิจารณาเหล็กยึดทั้ง 3 ชนิดเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างกัน เพราะว่าปลายของเหล็กยึดอยู่ห่างจากผิวด้านร้อน ของคอนกรีตทนไฟไม่เท่ากัน ทำให้เหล็กยึดชนิดเหล็กแผ่นตัว Y เหล็กกลมตัว Y และ เหล็กแผ่นตัว L เกิดอุณหภูมิสูงสุด 455, 465 และ 461 °C ตามลำดับ



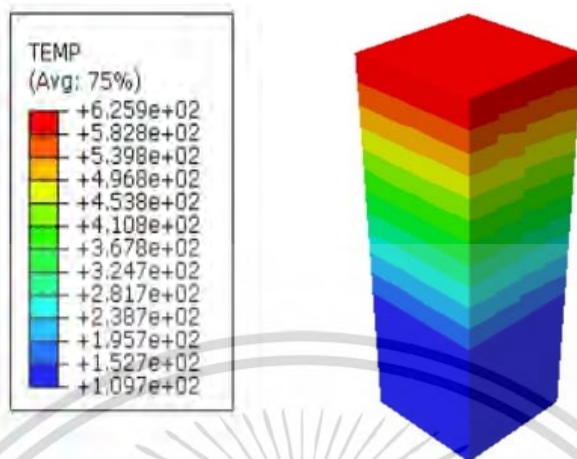
รูปที่ 5.16 ผลของการถ่ายเทความร้อนตั้งแต่ผิวด้านร้อนถึงเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์



กรณีที่ 1 L ANCHOR

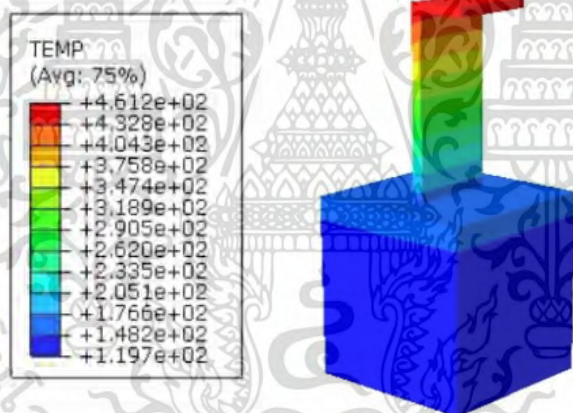


กรณีที่ 2 Y ANCHOR

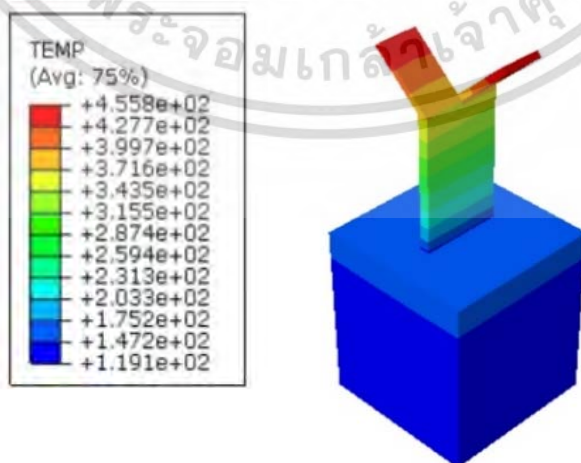


กรณีที่ 3 Y-ROD ANCHOR

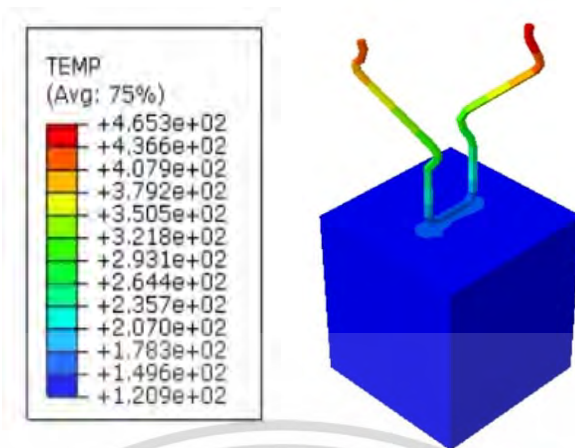
รูปที่ 5.17 ผลของการกระจายอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟ ทั้ง 3 กรณี



กรณีที่ 1 L ANCHOR

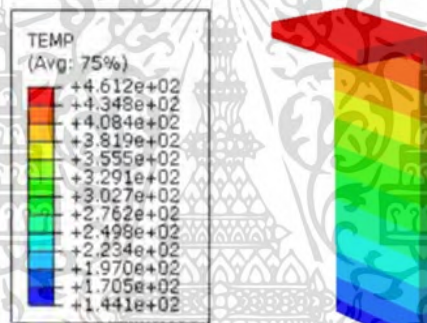


กรณีที่ 2 Y ANCHOR

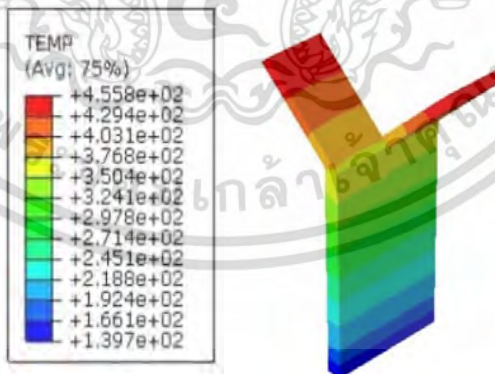


กรณีที่ 3 Y-ROD ANCHOR

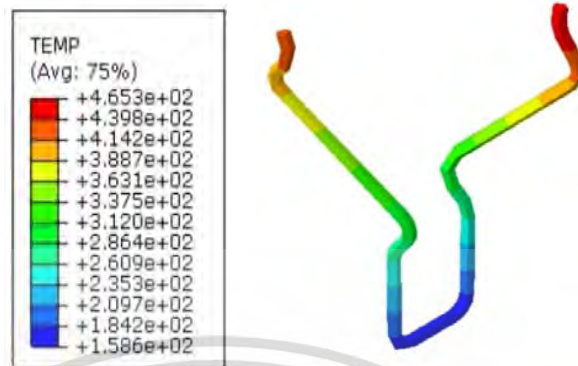
รูปที่ 5.18 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ ทั้ง 3 กรณี



รูปที่ 5.19 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 1



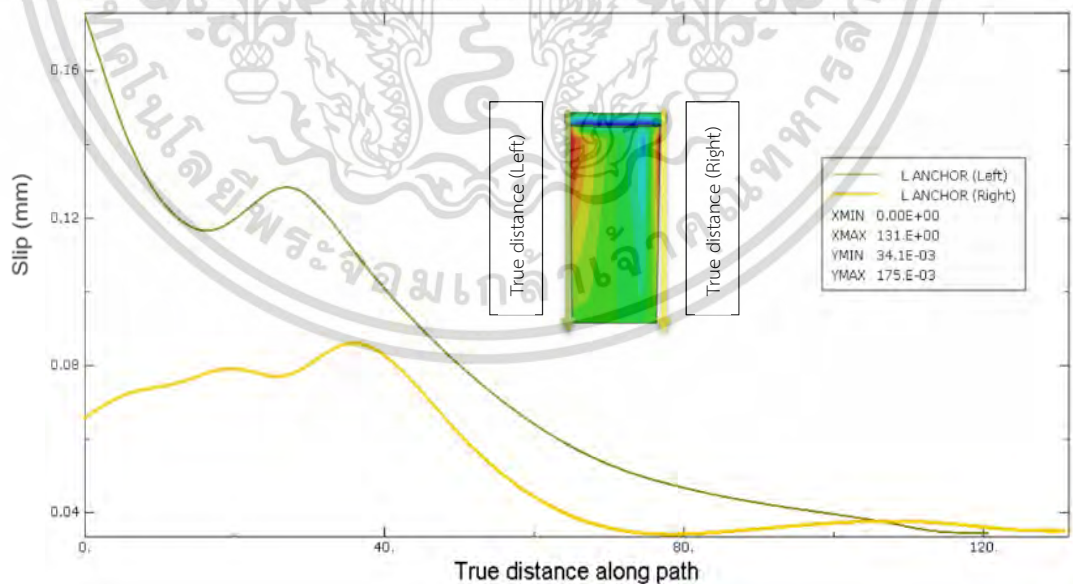
รูปที่ 5.20 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 2



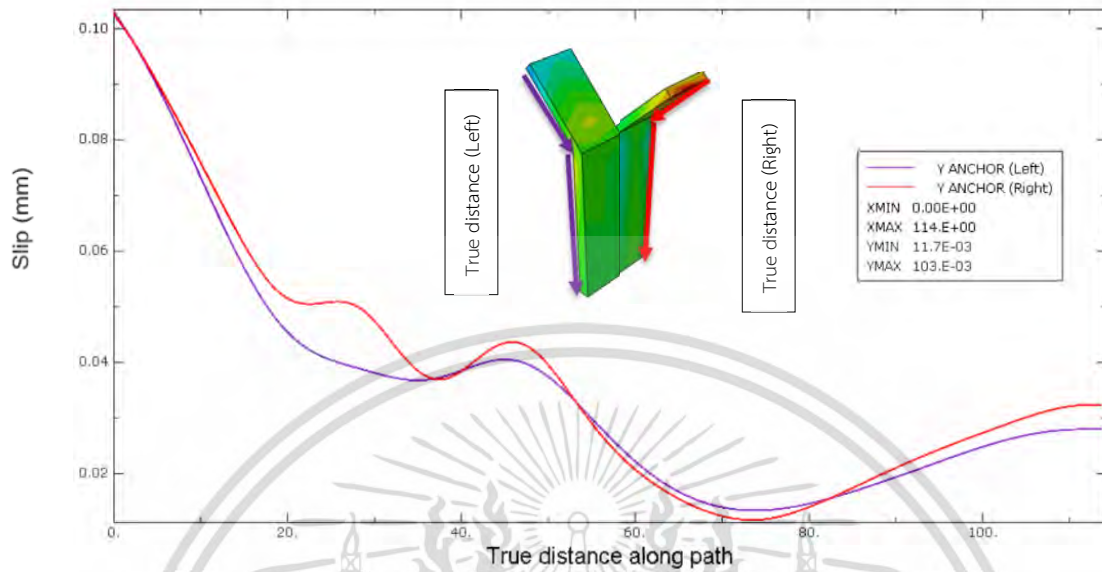
รูปที่ 5.21 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 3

5.4.2 ค่าการลื่นไถลของเหล็กยึดแต่ละชนิด

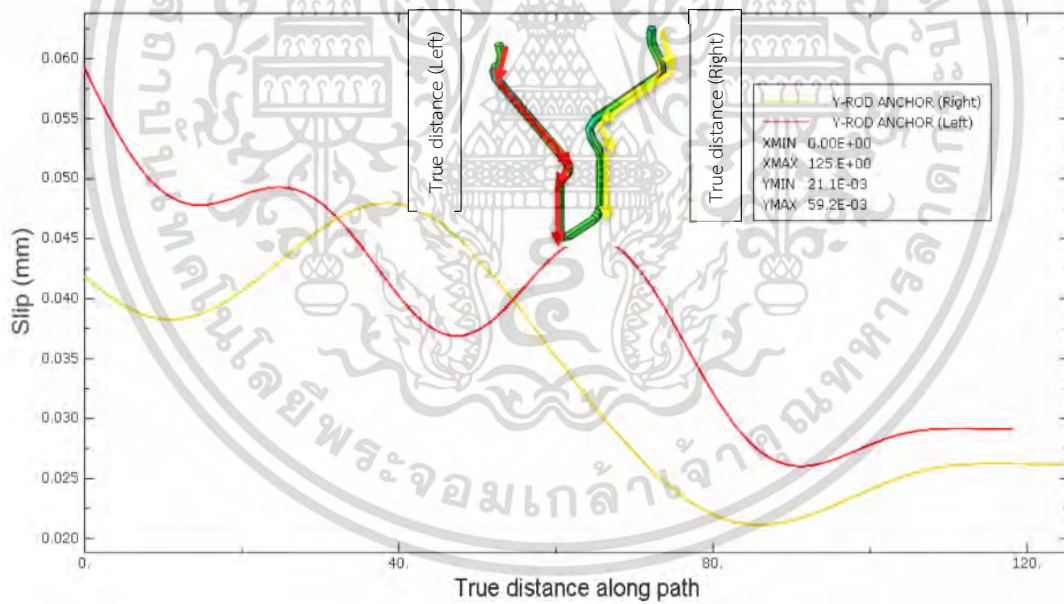
จากกราฟ(รูปที่ 5.22 -รูปที่ 5.24)แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของการลื่นไถลในทิศทางตรงข้ามกับการลื่นไถลของวัสดุ(CSLIP2) ของเหล็กยึดแต่ละแบบที่ระยะต่างๆ ซึ่งค่าเฉลี่ยของการลื่นไถลสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.175 mm, 0.103 mm, 0.059 mm ที่เหล็กยึดชนิดแผ่น L Anchor Y Anchor และ เหล็กยึดชนิดกลมแบบ Y-ROD Anchor ตามลำดับ เมื่อนำค่าเฉลี่ยของการลื่นไถลมาเปรียบเทียบกันระหว่างเหล็กยึดทั้งสามแบบ ผลปรากฏว่าค่าการเหล็กยึดชนิด L ANCHOR มีค่าเฉลี่ยการลื่นไถลสูงสุด เพราะมีค่าอุณหภูมิสูงสุดและระยะห่างระหว่างจุดยึดมากที่สุด จึงทำให้ค่าเฉลี่ยการลื่นไถลที่เกิดขึ้นบริเวณด้านบนของเหล็กยึดรูปตัว L ANCHOR มีค่าสูงที่สุดนั่นเอง



รูปที่ 5.22 ค่าเฉลี่ยการลื่นไถลของเหล็กแผ่น ชนิด L Anchor เปรียบเทียบด้านซ้ายและขวา



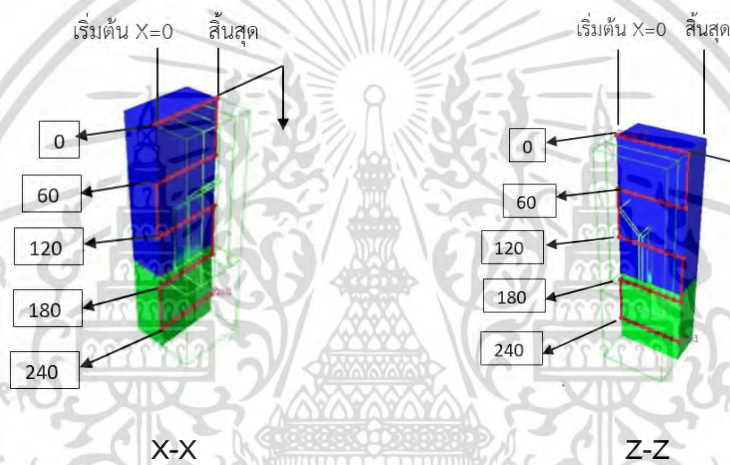
รูปที่ 5.23 ค่าเฉลี่ยการลื่นไถลของเหล็กกลม ชนิด Y Anchor เปรียบเทียบด้านซ้ายและขวา



รูปที่ 5.24 ค่าเฉลี่ยการลื่นไถลของเหล็กกลม ชนิด Y-ROD Anchor เปรียบเทียบด้านซ้ายและขวา

5.4.3 ผลการกระจายความเค้นในคอนกรีตทนไฟ และเหล็กยึด ที่ระดับความลึกต่างๆ

การกระจายความเค้นหลักสูงสุดในคอนกรีตทนไฟถูกนำเสนอผลจากปัจจัยของชนิดเหล็กยึด ผลจากแบบจำลองโครงสร้างหม้อเผาปูนซีเมนต์ปรากฏว่า การกระจายความเค้นในเนื้อคอนกรีตทนไฟ มีความซับซ้อนมาก โดยมีทั้งการเพิ่มขึ้นและลดลงของความเค้นในระนาบเดียวกัน และเมื่ออยู่ใกล้เหล็กยึดการกระจายความเค้นมีค่าสูงมาก ดังนั้น การวิเคราะห์ผลความเค้นจึงเลือกแนวตรงกลางระหว่างเหล็กยึดมาเป็นเกณฑ์ ตั้งแต่ระดับผิวคอนกรีตทนไฟ 0 mm จนถึงความลึก 240 mm ในส่วนตัด 2 ระนาบ ได้แก่ X-X และ Z-Z ดังแสดงในรูปที่ 5.25 รายละเอียดการ วิเคราะห์แบบจำลองกรณีที่ 1 ถึง 3 ที่ส่วนตัดและระดับความลึก ดังแสดงในตารางที่ 5.1



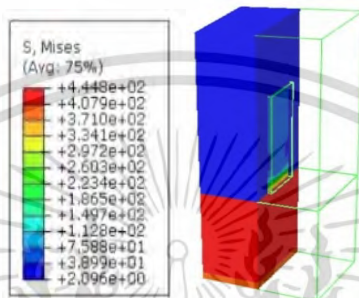
รูปที่ 5.25 ส่วนตัด X-X และ Z-Z ระหว่างกลางเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 0, 60, 120, 180, 240 mm.

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดการวิเคราะห์ แบบจำลองจากปัจจัยของจำนวนและชนิดเหล็กยึด

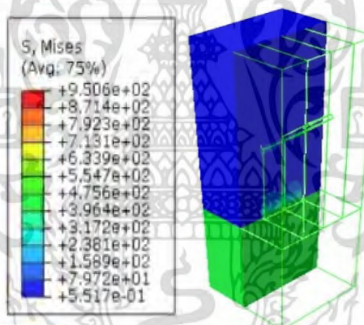
วิเคราะห์ผลความเค้นหลักสูงสุด	แบบจำลองกรณีที่	ส่วนตัด	ระดับความลึก (mm)
ปัจจัยชนิดเหล็กยึด	1	X-X	0
	2	Z-Z	60
			120
			180
			240
3			

5.4.3.1 การกระจายความเค้นของคอนกรีตทนไฟจากปัจจัยของชนิดเหล็กยึดในส่วนหน้าตัด X-X

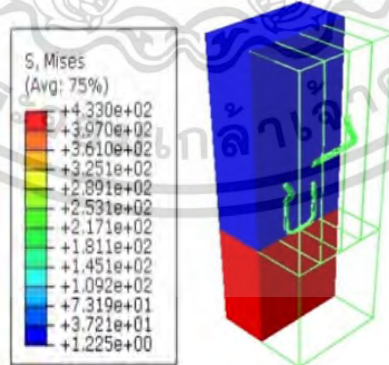
การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 1, 2 และ 3 บนส่วนตัด X-X ปรากฏว่าความเค้นมีความแตกต่างกัน เนื่องจากชนิดเหล็กยึดมีความต่างกัน จากรูปที่ 5.26 ส่งผลให้เกิดความเค้นดึงมากที่สุดที่เหล็กยึดแบบแผ่นตัว Y Anchor และจากกราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามเหล็กยึดชนิดต่างๆ (รูปที่ 5.27- รูปที่ 5.31) บนส่วนตัด X-X แสดงให้เห็นถึงค่าความเค้นดึงสูงสุดในเนื้อเหล็กบริเวณฐานเหล็กยึดของเหล็กแบบแผ่นรูปตัว Y ที่ระดับความลึกที่ 180 mm ดังแสดงในรูปที่ 5.30.



กรณีที่ 1 L ANCHOR SECTION X-X

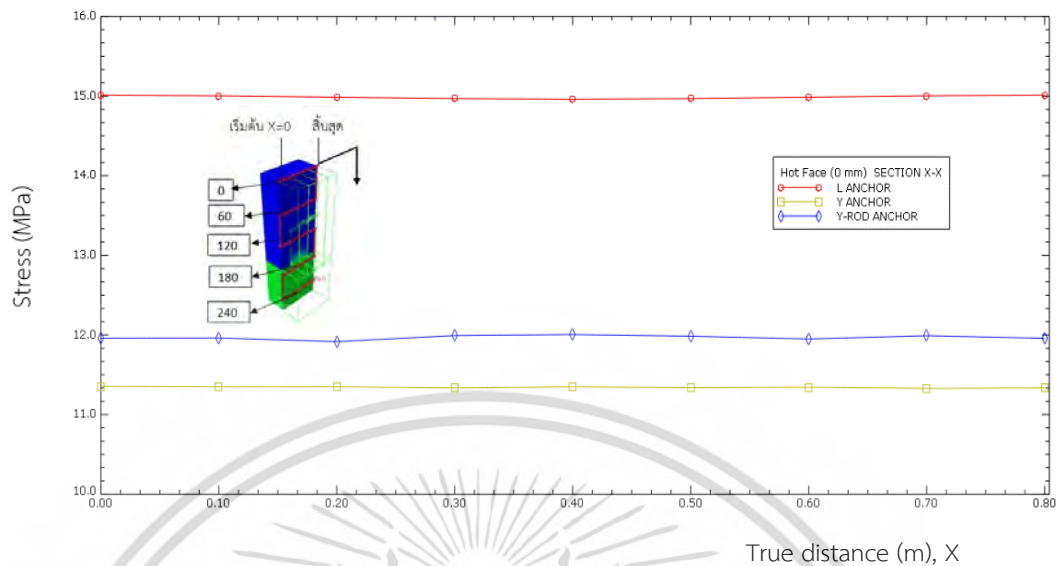


กรณีที่ 2 Y ANCHOR SECTION X-X

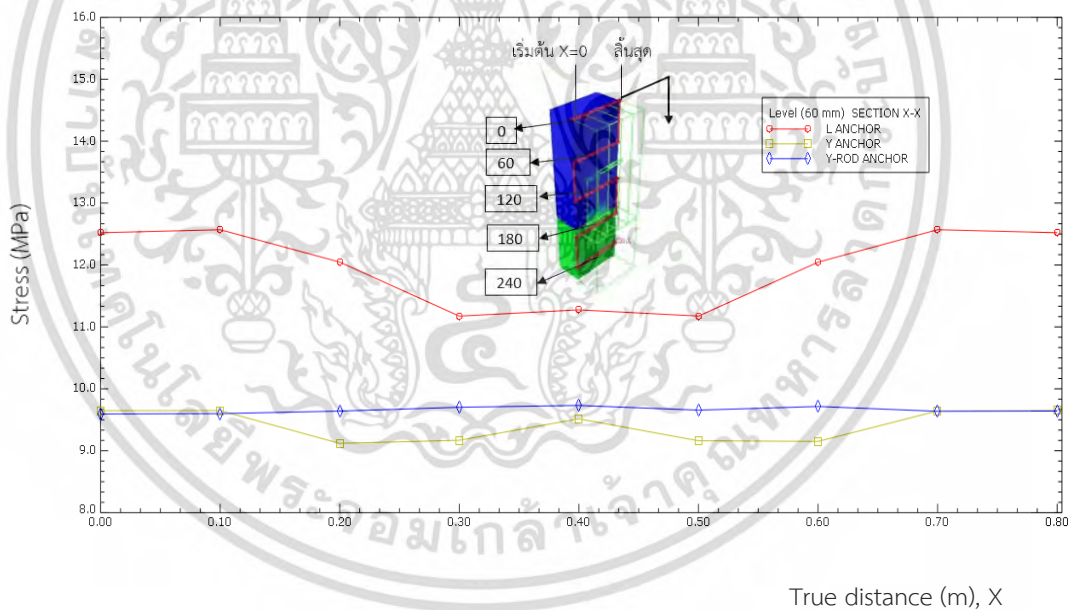


กรณีที่ 3 Y-ROD ANCHOR SECTION X-X

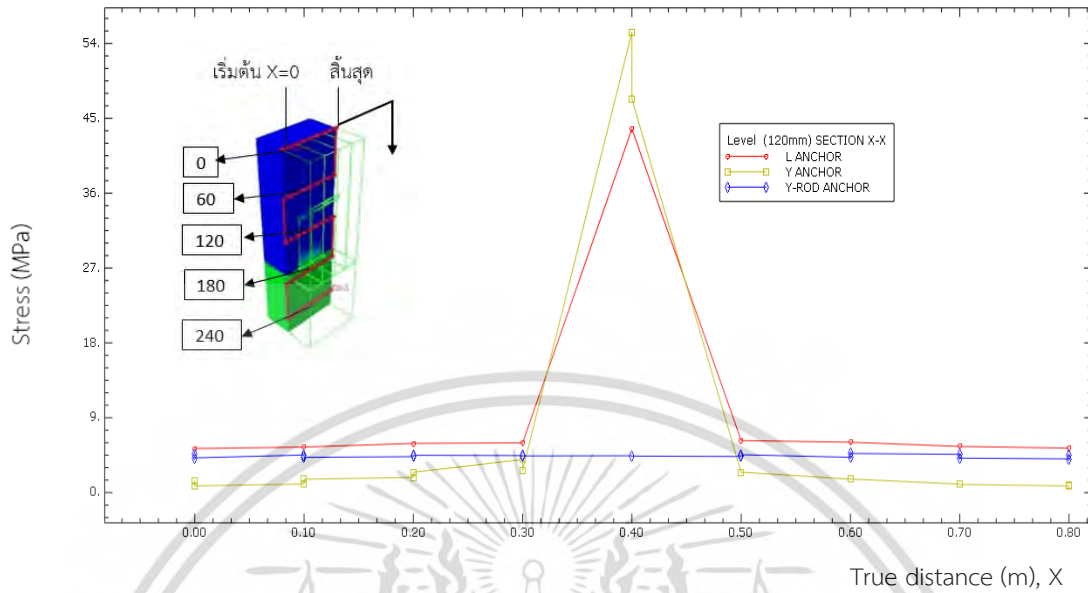
รูปที่ 5.26 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึดบนส่วนตัด X-X



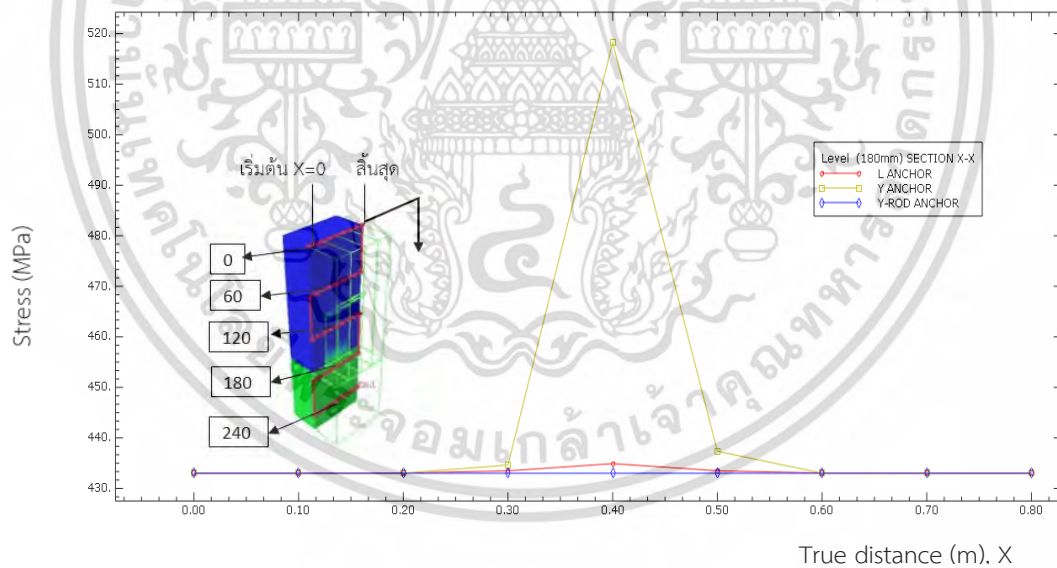
รูปที่ 5.27 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับ Hot Face (0mm) บนส่วนตัด X-X



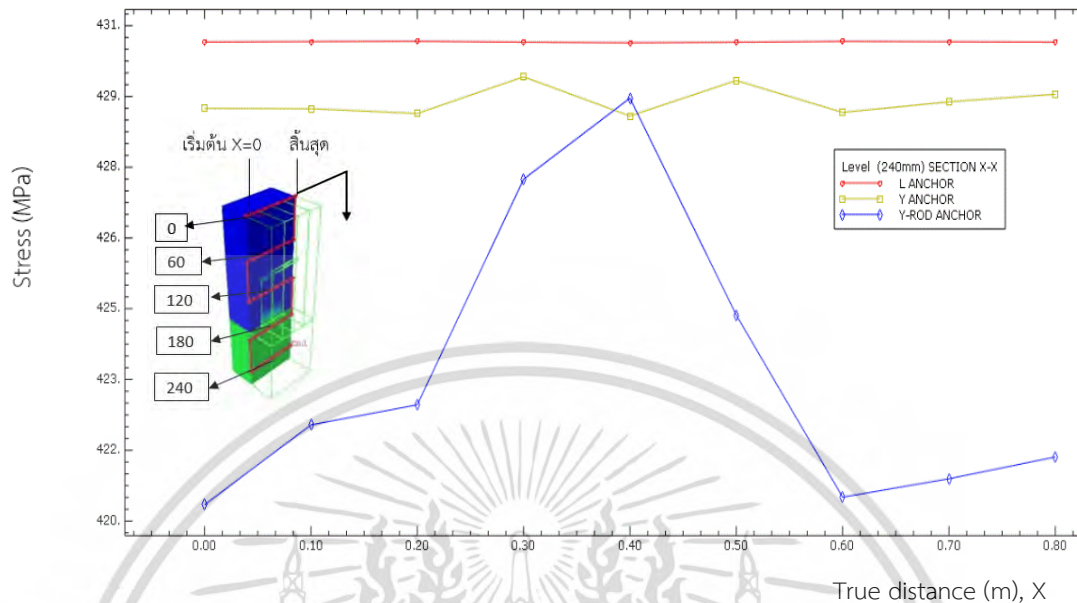
รูปที่ 5.28 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 60 mm บนส่วนตัด X-X



รูปที่ 5.29 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 120 mm บนส่วนตัด X-X



รูปที่ 5.30 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 180 mm บนส่วนตัด X-X

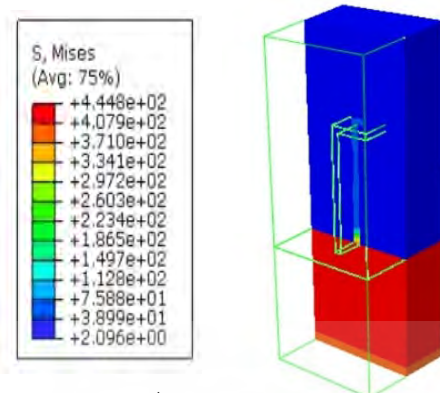


รูปที่ 5.31 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตท่อนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 240 mm บนส่วนตัด X-X

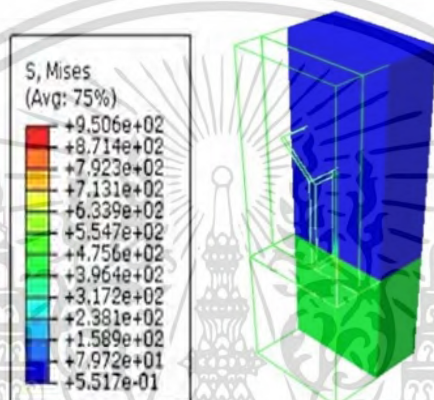
จากลักษณะของกราฟที่เกิดขึ้นในรูปที่ 5.29 แสดงให้เห็นถึงค่า Max. Principal stress ของคอนกรีตท่อนไฟที่มีเหล็กยึดแบบแผ่นรูปตัว L และ Y ที่ความลึก 120 mm มีค่าความเค้นสูงขึ้นมาบริเวณตรงกลางของคอนกรีตท่อนไฟ ซึ่งบริเวณนั้นเป็นพื้นที่ที่สัมผัสกับเหล็กยึดมากที่สุด และ คุณสมบัติของเหล็กยึดเมื่อได้รับความร้อนทำให้เกิดการขยายตัวมากกว่าคอนกรีตท่อนไฟ จึงทำให้ค่าความเค้นบริเวณนี้มีค่าสูงที่สุด

5.4.3.2 การกระจายความเค้นของคอนกรีตท่อนไฟจากปัจจัยของชนิดเหล็กยึดในส่วนหน้าตัด Z-Z

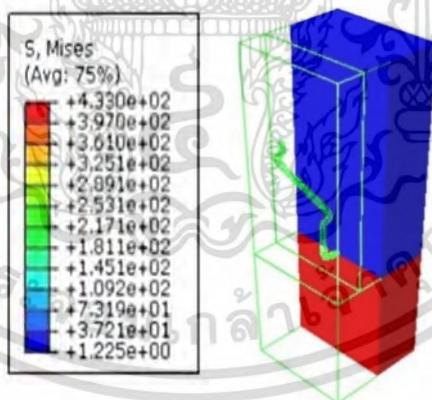
การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 1, 2 และ 3 บนส่วนตัด Z-Z ดังรูปที่ 5.32 ปรากฏว่าความเค้นมีความแตกต่างกัน เนื่องจากชนิดเหล็กยึดมีความต่างกัน ส่งผลให้เกิดความเค้นดึงมากที่สุดที่เหล็กแผ่นตัว Y Anchor มีค่า 950.6 Mpa



กรณีที่ 1 L ANCHOR SECTION Z-Z

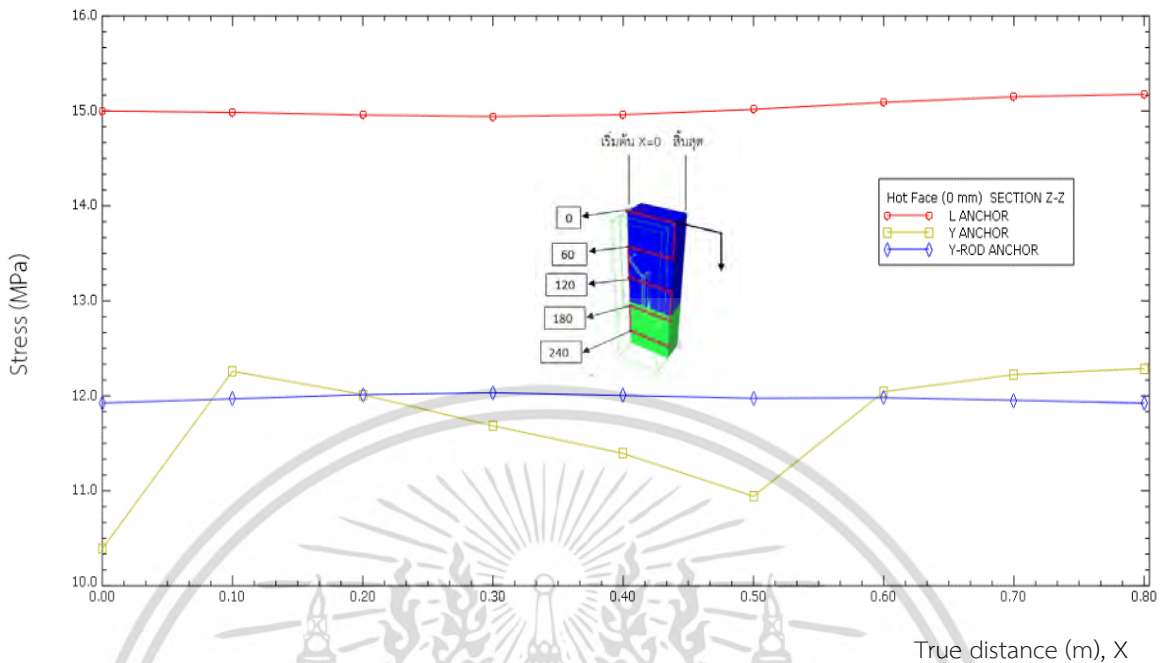


กรณีที่ 2 Y ANCHOR SECTION Z-Z

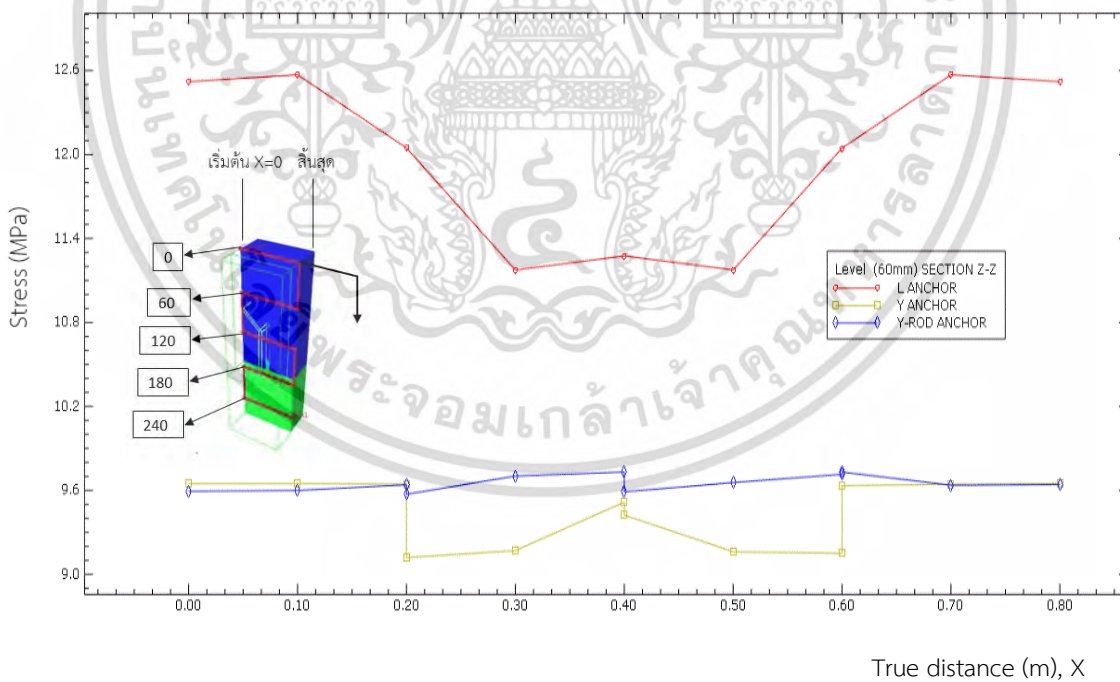


กรณีที่ 3 Y-ROD ANCHOR SECTION Z-Z

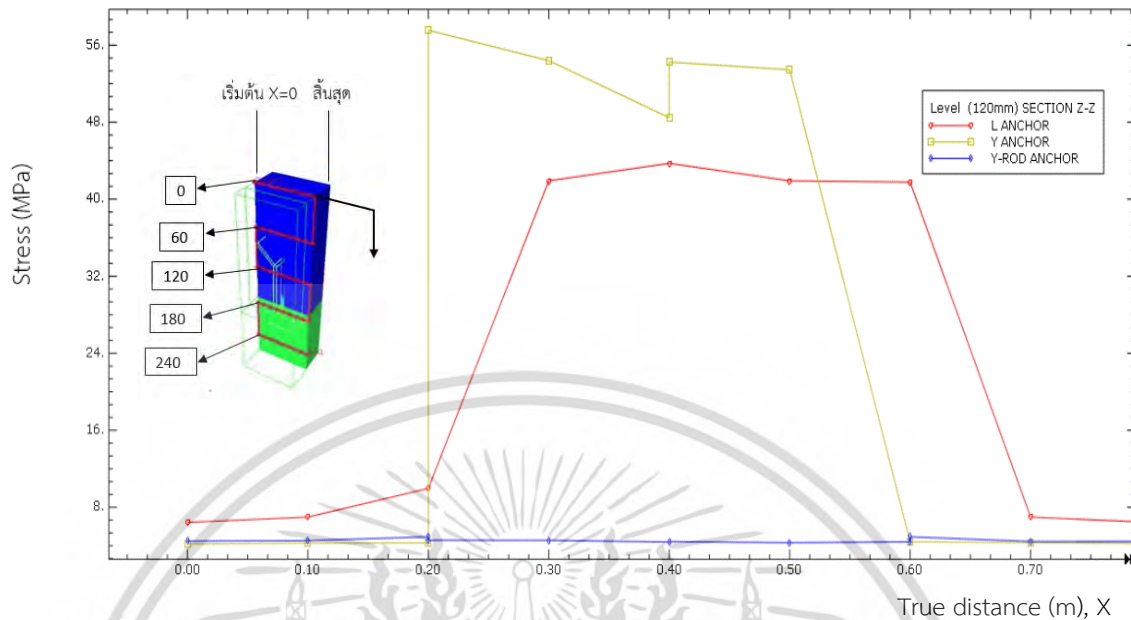
รูปที่ 5.32 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตตามชนิดเหล็กยึดบนส่วนตัด Z-Z



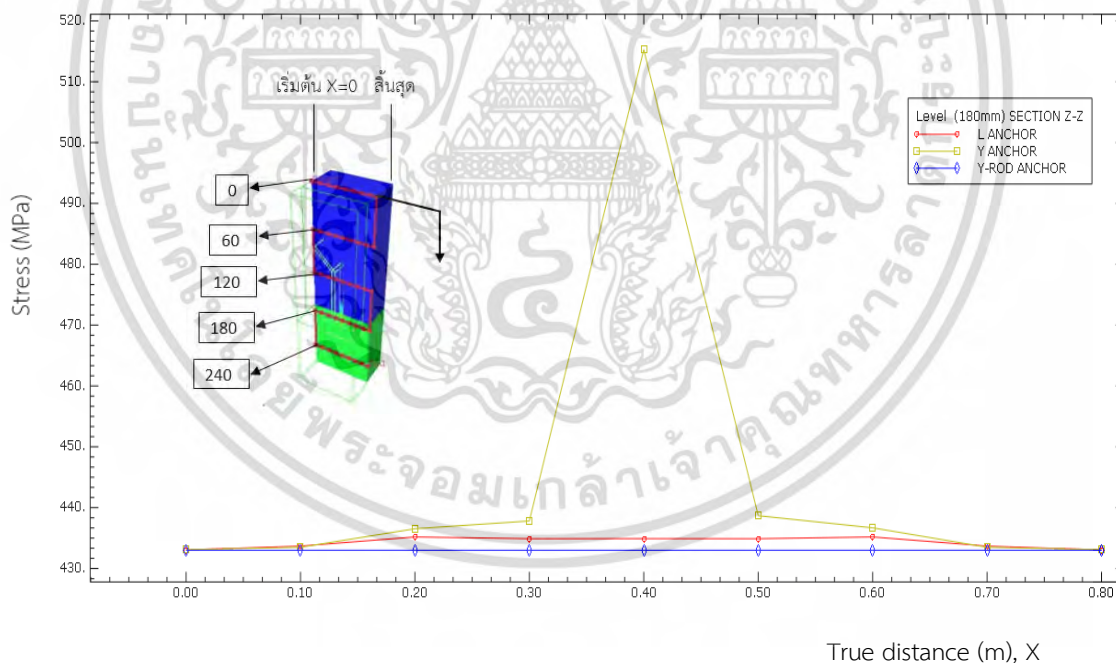
รูปที่ 5.33 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับ Hot Face (0mm) บนส่วนตัด Z-Z



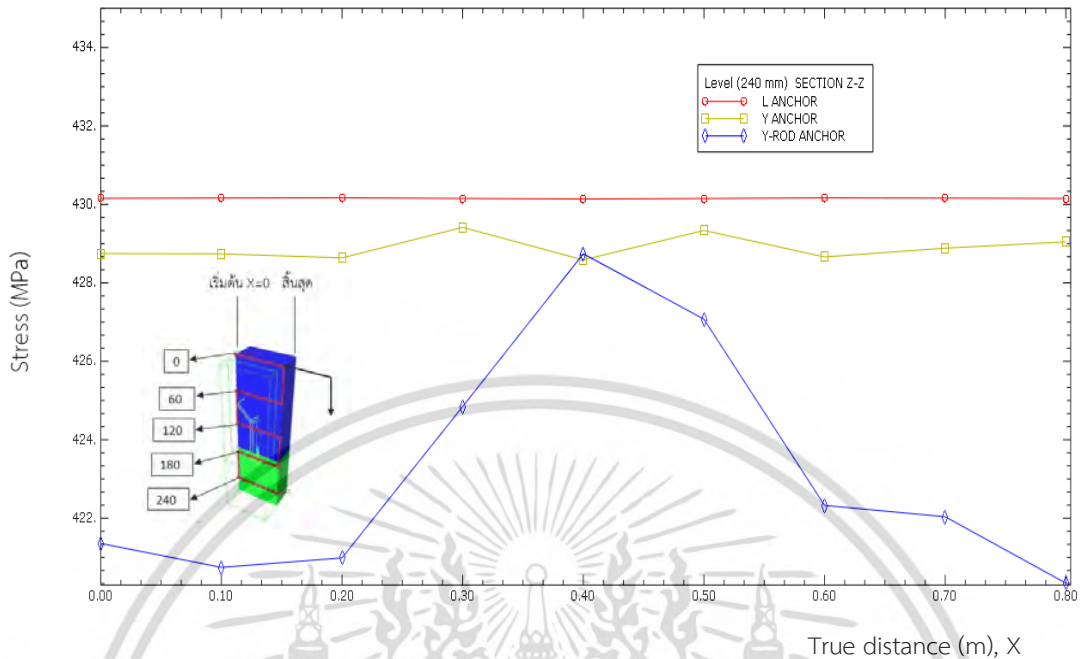
รูปที่ 5.34 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ ตามชนิดเหล็กยึด ที่ระดับความลึก 60mm บนส่วนตัด Z-Z



รูปที่ 5.35 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตบนไฟตามชนิดเหล็กยึดที่ระดับความลึก 120mm บนส่วนตัด Z-Z



รูปที่ 5.36 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตบนไฟตามชนิดเหล็กยึดที่ระดับความลึก 180mm บนส่วนตัด Z-Z

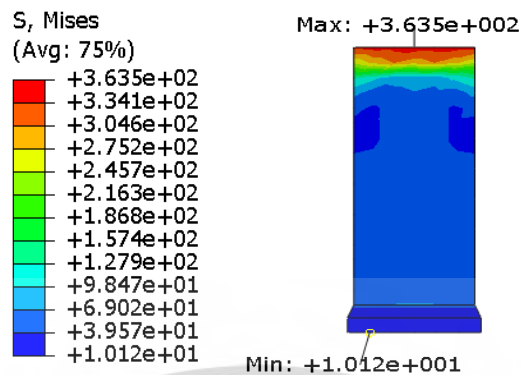


รูปที่ 5.37 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตหนไฟตามชนิดเหล็กยึดที่ระดับความลึก 240mm บนส่วนตัด Z-Z

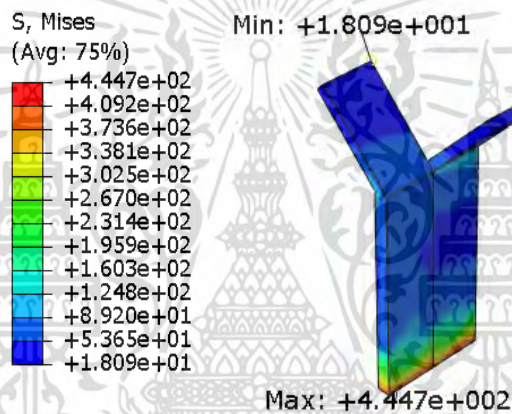
จากลักษณะของกราฟที่เกิดขึ้นในรูปที่ 5.34 เกิดค่าความเค้นที่ลดลงที่บริเวณโดยรอบตรงกลางของเหล็กยึด แบบแผ่นรูปตัว L และ Y แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการขยายตัวของเหล็กยึดที่ระดับความลึก 60 mm (ด้านบนของเหล็กยึด) มีลักษณะการขยายตัวในทิศทางตรงข้ามกับฐานของเหล็กยึด ทำให้ค่าความเค้นหลักของคอนกรีตมีขนาดลดลง อย่างไรก็ตาม ที่ระดับความลึก 120 mm (รูปที่ 5.35) ลักษณะค่าความเค้นที่บริเวณตรงกลางโดยรอบของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการขยายตัวของเหล็กยึดที่มีทิศทางเดียวกับคอนกรีตจึงทำให้ค่าความเค้นที่บริเวณโดยรอบของคอนกรีตเพิ่มขึ้นนั่นเอง

5.4.4 การกระจายค่าความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด แต่ละชนิด

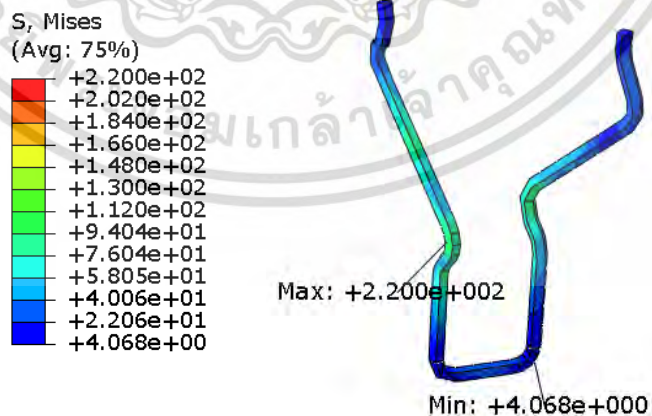
การกระจายค่าความเค้นของเหล็กยึดชนิดต่างๆ ถูกนำเสนอออกมาตามรูปที่ 5.38, 5.39, 5.40 ปรากฏว่าความเค้นมีความแตกต่างกัน เนื่องจากชนิดเหล็กยึดมีความต่างกัน ส่งผลให้เกิดความเค้นดึงมากที่สุดที่เหล็กแผ่นตัว Y Anchor ที่ค่า 444.7 MPa.



รูปที่ 5.38 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีนี้ที่ 1



รูปที่ 5.39 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีนี้ที่ 2




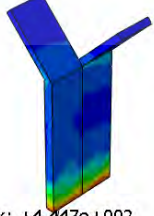
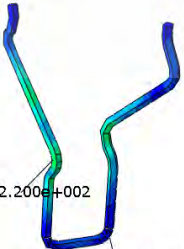
รูปที่ 5.40 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีนี้ที่ 3

การกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึดถูกนำเสนอทั้งหมด 3 กรณี โดยแบบจำลอง กรณีที่ 1, 2 และ 3 เป็นเหล็กยึดชนิดเหล็กแผ่นตัว L Y และ Y-ROD ตามลำดับปรากฏว่าความเค้นเกิดสูงสุดต่อเหล็กยึดชนิดที่ 1, 2 มีค่าความเค้นเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณฐานของเหล็กยึด อันเนื่องมาจากด้านบนของเหล็กได้รับความร้อนจึงเกิดการขยายตัวและเกิดความเค้นสะสมไปจนถึงปลายสุดของเหล็กยึด(ฐานเหล็กยึด) ในส่วนของเหล็กยึดชนิด Y-ROD ค่าความเค้นสูงสุดนั้นเกิดขึ้นบริเวณข้องอ(ดงรูป) เนื่องจากเหล็กยึดบริเวณที่ได้รับความร้อนสูงสุด เกิดการขยายตัวและเกิดความเค้นสะสมไปในทิศทางเดียวกัน จนกระทั่งเปลี่ยนทิศทางที่ข้องอ ดังนั้นเหล็กยึดจึงขยายตัวเนื่องจากความร้อนและเกิดความเค้นสะสมไปที่บริเวณข้องอของวัสดุ

ผลของค่าความเค้นวอนมิสเชสที่เกิดขึ้น ในเหล็กยึดทั้งสามชนิด คือ เหล็กยึดแบบแผ่นตัว L เหล็กยึดแบบเหล็กแผ่นตัว Y และเหล็กยึดแบบ Y-ROD มีค่าความเค้นวอนมิสเชสที่เกิดขึ้นสูงสุด คือ 363.5 Mpa, 438.8 MPa, 220 MPa ตามลำดับ เปรียบเทียบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเหล็กยึดแบบแผ่นตัว Y มีค่ามากที่สุด เพราะรูปร่างของเหล็กแผ่นรูปตัว Y มีการขยายตัวมากที่สุดทำให้เกิดค่าความเค้นวอนมิสเชสสูงที่สุด

จากค่าความเค้นของเหล็กยึดที่เกิดขึ้นทำให้ได้ค่าความเค้นสูงที่สุดเกิดขึ้นที่ เหล็กยึดแบบแผ่นรูปตัว Y ซึ่งมีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 444.7 MPa ที่อุณหภูมิ 450 °C โดยที่ผลทดสอบแรงดึง ของสแตนเลส เกรด SUS310S ที่อุณหภูมิดังกล่าว มีความเค้นจุดคราก (Yield point) และ ความทน ต่อแรงดึง (Tensile strength) เป็น 205 และ 515 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้ แบบจำลองมีความ เค้นสูงเกินกว่าความทนต่อแรงดึง ซึ่งทำให้เหล็กยึดเกิดการเสียรูปทรงได้ได้ที่บริเวณดังกล่าว และที่ความเค้นสูงสุดของวัสดุเหล็กยึดแบบแผ่นรูปตัว Y ได้ทำการเข้าสู่คุณสมบัติเชิงพลาสติกของวัสดุเป็นที่เรียบร้อย ในส่วนของรายละเอียดผลการวิเคราะห์หาค่าความเค้นวอนมิสเชสที่เกิดขึ้นกับเหล็กยึดแต่ละชนิด สามารถอธิบายได้ตามตารางที่ 5.2

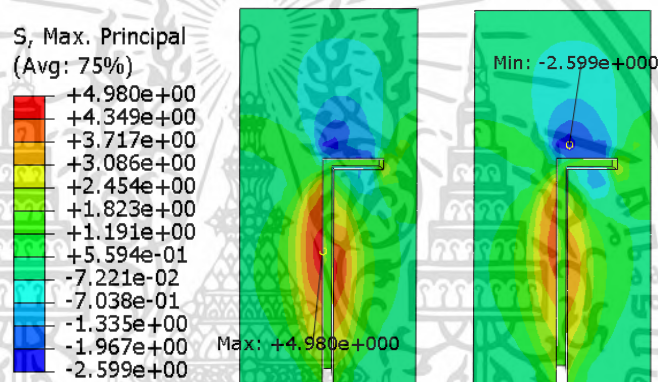
ตารางที่ 5.2 แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์หาค่าความเค้นวอนมิสเชส ที่เกิดขึ้นกับเหล็กยึดแต่ละชนิด

No.	ลักษณะ ชนิดเหล็กยึด ความเค้นที่เกิดขึ้น	เหล็กยึดแบบแผ่นรูปตัว L	เหล็กยึดแบบแผ่นรูปตัว Y	เหล็กยึดแบบ Y-ROD
1.	ผลของการจำลองโมเดลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	Min: +1.012e+001  Max: +3.635e+002	Min: +1.809e+001  Max: +4.447e+002	 Max: +2.200e+002 Min: +4.068e+000

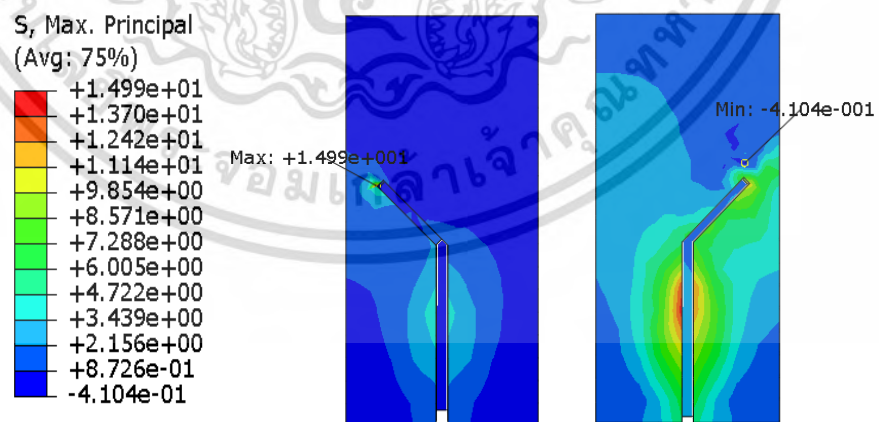
2.	ค่าความวอนมิสเสเค้นสูงสุด	363.5 MPa	444.7 MPa	220 MPa
3.	บริเวณจุดที่ความเค้นเกิดขึ้นสูงสุด	โคนเหล็กยึด	โคนเหล็กยึด	ข้องอ
4.	ลักษณะคุณสมบัติความเสียหาย	พลาสติก	พลาสติก	พลาสติก

5.4.5 การกระจายค่าความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟที่เหล็กยึด แต่ละชนิด

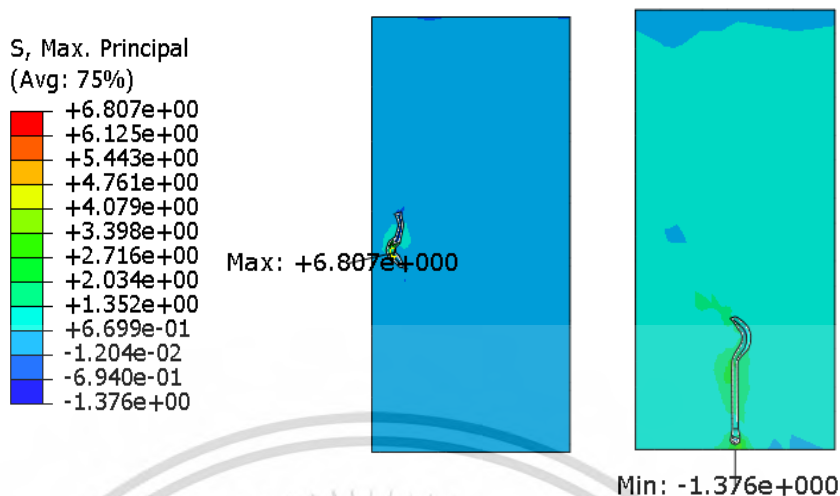
การศึกษา เปรียบเทียบผลของความเค้นจากพฤติกรรมทางกลแบบไม่เป็นเชิงเส้นผ่านระบบสั่นไถล โดยได้ทำการจำลอง เหล็กยึด ทั้งหมด 3 แบบ คือ 1) เหล็กยึดแบบแผ่นรูปตัว L 2) เหล็กยึดแบบแผ่นรูปตัว Y 3) เหล็กยึดแบบรูปตัว Y-ROD



รูปที่ 5.41 แสดงผลของความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เหล็กยึดชนิด L



รูปที่ 5.42 แสดงผลของความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เหล็กยึดชนิด Y



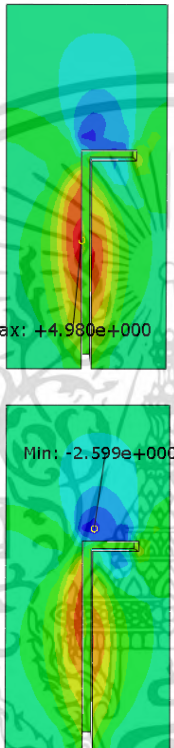
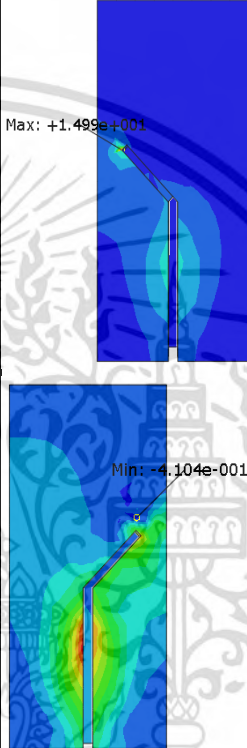
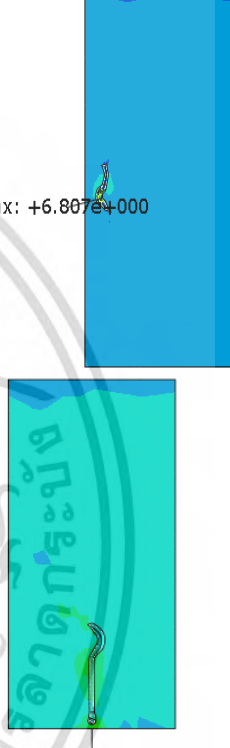
รูปที่ 5.43 แสดงผลของความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เหล็กยึดชนิด Y-ROD

จากรูปจะเห็นว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นมีทั้งพฤติกรรมของความเค้นดึงและความเค้นกด อยู่ในบริเวณวัสดุคอนกรีตเดียวกัน ซึ่งค่าความเค้นดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น ในคอนกรีต เสริมเหล็กชนิด เหล็กยึดตัว L เหล็กยึดตัว Y และ เหล็กยึดตัว Y-ROD มีค่า 4.98 MPa ,14.99 MPa, 6.87 MPa ตามลำดับ ซึ่งคอนกรีตมีค่า ความทนต่อแรงดึงที่ 3 MPa จึงทำให้วัสดุเข้าสู่คุณสมบัติในชั้นสทิฟเฟนนิ่ง ที่วัสดุ เกิดความเสียหายเรียบร้อยแล้วนั่นเอง

ในส่วนของค่าความเค้นกดสูงสุดที่เกิดขึ้น บริเวณคอนกรีตของเหล็กเสริมแรง แบบเหล็กยึดตัว L เหล็กยึดตัว Y และ เหล็กยึดตัว Y-ROD มีค่า 2.599 MPa, 0.41 MPa, 1.376.MPa ตามลำดับ ซึ่งคอนกรีตมีค่า ความทนต่อแรงกดที่ 35 MPa จึงทำให้วัสดุยังไม่เกิดความเสียหายในกรณีนี้

จากค่าความเค้นดึงและความเค้นกดที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตเหล็กยึดทั้งสามชนิดแสดงให้เห็นถึง ค่าความเค้นของคอนกรีตที่เกิดขึ้นกับเหล็กยึดทั้ง 3 แบบนั้น ชนิดเหล็กแผ่นตัว Y มีค่าความเค้น ดึง มากที่สุด เพราะ การขยายตัวของเหล็กยึดของเหล็กแผ่นตัว Y มีมากกว่า เหล็กยึดชนิดอื่น ในส่วนของความเค้นกดเหล็กยึดชนิดแผ่นรูปตัว L มีค่าความเค้นกดที่สูงที่สุด เพราะด้านปลายสุดมีพื้นที่การขยายตัวของเหล็กยึดมากที่สุด จึงทำให้คอนกรีตบริเวณนั้นถูกกดมากที่สุดนั่นเอง รายละเอียดผลการวิเคราะห์หาค่าความเค้นหลักที่เกิดขึ้นกับคอนกรีต ในเหล็กยึดแต่ละรูปแบบ สามารถอธิบายได้ตามตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นหลัก ที่เกิดขึ้นกับคอนกรีต จากปัจจัยของชนิดเหล็กยึดแบบต่างๆ

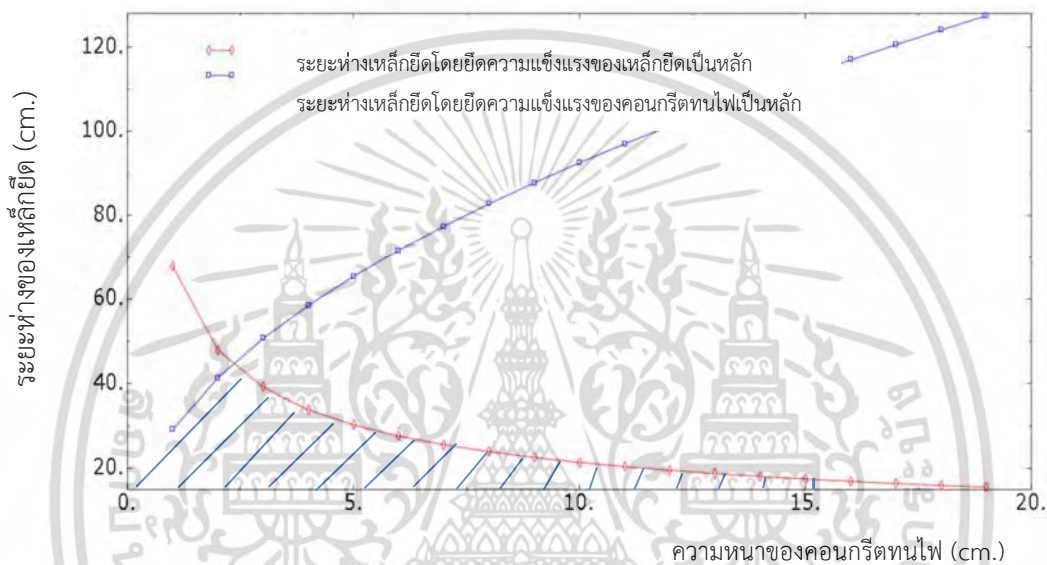
No.	ลักษณะ ชนิดเหล็กยึด ความเค้นที่เกิดขึ้น	เหล็กยึดแบบแผ่นรูปตัว L	เหล็กยึดแบบแผ่นรูปตัว Y	เหล็กยึดแบบ Y-ROD			
1.	ผลของการจำลองโมเดลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์						
2.	ค่าความเค้นหลักสูงสุด (MPa)	ความเค้นดึง 4.98	ความเค้นกด 2.599	ความเค้นดึง 14.99	ความเค้นดึง 6.807	ความเค้นกด 1.376	
3.	บริเวณจุดที่ความเค้นเกิดขึ้นสูงสุด	ตรงกลางเหล็กยึด	ตรงปลายเหล็กยึด	ตรงปลายเหล็กยึดด้านล่าง	ข้ออ	โคนเหล็กยึด	
4.	ลักษณะคุณสมบัติความเสียหาย	เห็นชั้นสทิฟเฟนนิ่ง	พฤติกรรมความเค้นกด	เห็นชั้นสทิฟเฟนนิ่ง	พฤติกรรมความเค้นกด	เห็นชั้นสทิฟเฟนนิ่ง	พฤติกรรมการความเค้นกด

5.5 ผลการวิเคราะห์แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กยึดแบบต่างๆ กับคอนกรีตซึ่งจะทำให้ค่าระยะห่างของเหล็กยึดที่เหมาะสมของเหล็กยึดแต่ละแบบ

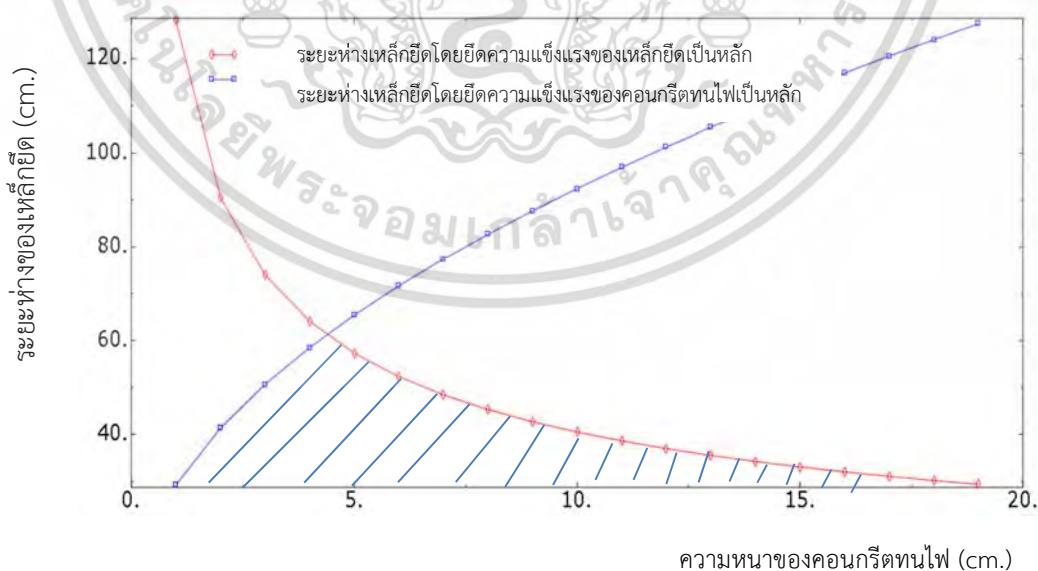
การหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดมีความซับซ้อนมากเพราะมีจำนวนของปัจจัยที่เกี่ยวข้องมาก เช่น อุณหภูมิทำงานของวัสดุทนไฟ คุณสมบัติของวัสดุทนไฟ เงื่อนไขขอบเขต เป็นต้น ดังนั้น การ

หาระยะห่างเหล็กยึดจึงเป็นค่าโดยประมาณ โดยที่สมมุติเงื่อนไขอย่างเข้มงวด ผลลัพธ์การคำนวณ ถูกนำเสนอในลักษณะกราฟทั้งเหล็กยึดชนิดแผ่นและกลม

ผลลัพธ์การคำนวณของเหล็กยึดชนิดแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 5.1 กราฟช่วงที่อนุญาตของ ระยะเหล็กยึดแสดงไว้ในพื้นที่แรงเงาล้อมรอบด้วยเส้นโค้ง หากนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองที่มีความหนาของคอนกรีตทนไฟ 17 cm มีค่าระยะห่างระหว่างเหล็กยึด 31 cm ทั้งนี้ ระยะห่างเหล็กยึด ที่ติดตั้งใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีระยะห่าง 12 cm



รูปที่ 5.44 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของคอนกรีตทนไฟและระยะห่างของเหล็กยึดชนิดแผ่น

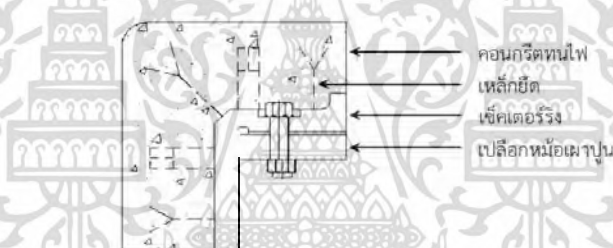


รูปที่ 5.45 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของคอนกรีตทนไฟและระยะห่างของเหล็กยึดชนิดกลม

ผลลัพธ์การคำนวณของเหล็กยึดชนิดกลม ดังแสดงในรูปที่ 5.2 กราฟช่วงที่อนุญาตของระยะเหล็กยึดแสดงไว้ในพื้นที่แรงเงาล้อมรอบด้วยเส้นโค้ง หากนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองที่มีความหนาของคอนกรีตหนาไฟ 17 cm มีค่าระยะห่างระหว่างเหล็กยึด 16.5 cm

ระยะห่างระหว่างเหล็กยึดเชิงทฤษฎีได้มาจากกำหนดเงื่อนไขพื้นฐาน แต่บางเงื่อนไขที่ไม่สามารถนำมาพิจารณาในการคำนวณได้ และต้องอาศัยประสบการณ์ที่ผ่านมาบนพื้นฐานของปัจจัยดังกล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้น ความแตกต่างระหว่างระยะเชิงทฤษฎีและระยะที่แท้จริงจึงต้องคำนึงจากหลายๆ ปัจจัยด้วยกัน

จากการวิเคราะห์หาระยะห่างของเหล็กยึดที่เหมาะสมของแต่ละแบบ ทำให้ได้จำนวนที่เหมาะสมของเหล็ก โดยเหล็กยึดชนิดแผ่นให้ผลคำนวณระยะห่าง 31 เซนติเมตรหากนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้กับส่วนของโนสริง(ดังรูปที่ 5.46) ซึ่งจากพื้นที่ทั้งหมดของโนสริงสามารถคำนวณได้ว่าจะต้องใช้เหล็กยึดชนิดแผ่นจำนวนอย่างน้อย 10 อัน ส่วนเหล็กยึดชนิดกลมให้ผลคำนวณระยะห่าง 16.5 เซนติเมตร หากนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้กับส่วนของโนสริง เหล็กยึดจะต้องมีจำนวนอย่างน้อย 15 อัน



รูปที่ 5.46 แสดงลักษณะพื้นที่ของเซ็คเตอร์ริง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การสร้างแบบจำลองโดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือในการ วิเคราะห์ถึง แนวทางการออกแบบในส่วนหม้อเผาปูนซีเมนต์ จากพฤติกรรมทางกลเนื่องจากความร้อน ซึ่ง สามารถสรุปผลการวิจัยแบ่งเป็นหัวข้อหลักๆ 5 หัวข้อ ดังต่อไปนี้

- 1) สรุปผลของการศึกษารูปแบบจำลองของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง คอนกรีตทนไฟ กับเหล็กยึด
- 2) สรุปผลการวิเคราะห์หาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริงจากการให้ความร้อนในกระบวนการผลิต ปูนซีเมนต์ของหม้อเผาปูนซีเมนต์ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่เกิดขึ้น
- 3) สรุปผลของพันธะยึดเหนี่ยว ระหว่างคอนกรีตทนไฟ กับเหล็กยึด โดยใช้ รูปแบบ พฤติกรรม ทางกลแบบเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวไม่ลื่นไถล เทียบกับกับพฤติกรรมทางกลไม่เป็นเชิงเส้นของ พันธะยึด เหนี่ยวแบบลื่นไถล
- 4) สรุปผลของการศึกษาเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลงชนิดของ เหล็กยึดทั้งสามชนิด โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และใช้วิธีจำลองรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง คอนกรีตทนไฟกับเหล็กยึด เป็นแบบพฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวลื่นไถล
- 5) สรุปผลของการศึกษาหาค่าระยะห่างของเหล็กยึดที่เหมาะสมของแต่ละแบบ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกดำเนินการสำหรับ งานวิจัยนี้ ซึ่ง สามารถสรุปผลการวิจัย ดังต่อไปนี้

- 1) สรุปผลของการศึกษารูปแบบจำลองของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง คอนกรีตทนไฟ กับ เหล็กยึด

เมื่อนำผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างคอนกรีตทนไฟ กับเหล็กยึด ตามงานวิจัยของ Alaka มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ปรากฏว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกัน และสอดคล้องกันอย่างดี แสดงให้เห็นว่าการจำลองรูปแบบพันธะของ Alaka สามารถนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมระหว่าง เหล็กและคอนกรีตเสริมแรงแบบต่างๆได้

- 2) สรุปผลการวิเคราะห์หาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริงจากการให้ความร้อนใน

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของหม้อเผาปูนซีเมนต์ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่เกิดขึ้น

จากการทดลองศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้าง คอนกรีตทนไฟ กับเหล็กยึด ด้วยการให้ความ ร้อนแก่วัสดุถึงสองครั้ง ทำให้ได้ผลการทดลองที่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง รูปแบบของโครงสร้าง คอนกรีตทนไฟ กับเหล็กยึด ที่การจำลอง 2 รูปแบบ ด้วยกันคือ 1) รูปแบบ

พฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวยึดแน่นถาวร กับ 2) รูปแบบพฤติกรรมทางกลไม่เป็นเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาด(Error)ที่เกิดขึ้น โดยปรากฏว่าค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่เหล็กยึดและค่าการกระจายอุณหภูมิของโครงสร้างคอนกรีต ทนไฟและเหล็กยึดที่การจำลองทั้งสองแบบ ให้ผลที่ใกล้เคียงกันและสอดคล้องกันกับการทดลอง เป็นอย่างดี

3) สรุปผลของพันธะยึดเหนี่ยว ระหว่างคอนกรีตทนไฟ กับเหล็กยึด โดยใช้ รูปแบบ พฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวไม่ลื่นไถล เทียบกับกับพฤติกรรมทางกลไม่เป็นเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล

ผลที่ได้รับจากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นพันธะแบบยึดแน่นถาวร มีค่า ความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อคอนกรีตทนไฟมากกว่าพฤติกรรมทางกลแบบไม่เชิงเส้นพันธะแบบลื่นไถล ประมาณ 5 เท่า และการกระจายความเค้นเป็นไปในลักษณะที่แตกต่างกันมาก

ส่วนความเค้น วอนมิสเสสของเหล็กยึดทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกันเฉพาะบริเวณ โคนเหล็กยึด ถัดจากบริเวณนั้นการ กระจายความเค้นเริ่มแตกต่างกันทั้งตลอดช่วง โดยทั่วไป การกระจายความเค้น ของคอนกรีตทนไฟควรจะอยู่ภายใต้ความเค้นดิ่งเมื่ออยู่ใกล้เหล็กยึดและลดน้อยลงเมื่ออยู่ห่างออกไป เพราะว่าเหล็กยึดขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้มากกว่าคอนกรีตทนไฟจึงไป ดึงให้คอนกรีตทนไฟยึดตัวตามและผลักดันให้คอนกรีตทนไฟเหนือเหล็กยึดขึ้นไปอยู่ภายใต้ความเค้นอัด

ดังนั้น พฤติกรรมทาง กลแบบไม่เชิงเส้นและการสัมผัสของวัสดุแบบลื่นไถลจึงให้ผล ที่แม่นยำและเสมือนจริงมากกว่า

4) สรุปผลของการศึกษาเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลง ชนิดของเหล็กยึดทั้งสามชนิด โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และใช้วิธีจำลองรูปแบบความพันธะ ระหว่าง คอนกรีตทนไฟกับเหล็กยึด เป็นแบบพฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นของพันธะยึดเหนี่ยว ลื่นไถล

ผลของการจำลองโครงสร้างปูนซีเมนต์แบบลื่นไถล (Bond-slip) ถูกนำเสนอในเชิง เปรียบเทียบกันตามปัจจัยของชนิดเหล็กยึด ซึ่งประกอบด้วยการกระจายอุณหภูมิทั้งคอนกรีตทนไฟ และเหล็กยึด ค่าการลื่นไถลของเหล็กยึดแต่ละชนิด การกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อคอนกรีต ทนไฟ และความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึด โดยสามารถแบ่งเป็นแต่ละหัวข้อได้ดังนี้

4.1) การกระจายอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด

การถ่ายเทความร้อนจากผิวด้านร้อนของคอนกรีตทนไฟถึงเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์

มี ทั้งหมด 3 กรณี มีลักษณะการกระจายอุณหภูมิใกล้เคียงกัน โดยตั้งแต่ผิวด้านร้อน ผิวด้านเย็น และเปลือกหุ้มเอาปูนซีเมนต์ และเกิดอุณหภูมิสูงสุดตรงบริเวณ ด้านบนของผิวด้านร้อน ส่งผลให้เหล็กยึดตรงบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงด้วย

เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นกับเหล็กยึดทั้ง 3 ชนิด พบว่ามีค่าที่แตกต่างกัน เพราะค่าปลายของเหล็กยึดอยู่ห่างจากผิวด้านร้อน ของคอนกรีตทนไฟไม่เท่ากัน

4.2) ค่าการลื่นไถลของเหล็กยึดแต่ละชนิด

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของการลื่นไถลในทิศทางตรงข้ามกับการลื่นไถลของวัสดุ(CSLIP2) ของเหล็กยึดแต่ละแบบที่ระยะต่างๆ เมื่อนำค่าเฉลี่ยของการลื่นไถลมาเปรียบเทียบกับระหว่างเหล็กยึดทั้งสามแบบ ผลปรากฏว่าค่าการลื่นไถลชนิด L ANCHOR มีค่าเฉลี่ยการลื่นไถลสูงสุด เพราะมีค่าอุณหภูมิสูงสุดและระยะห่างระหว่างจุดยึดมากที่สุด

4.3) การกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด

ค่าความเค้นวอนมิสเชสสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณเหล็กยึด แบบแผ่นรูปตัว L และตัว Y ปรากฏว่าความเค้นเกิดสูงสุดที่บริเวณฐานของเหล็กยึด อันเนื่องมาจากด้านบนของเหล็กได้รับความร้อนจึงเกิดการขยายตัวและเกิดความเค้นสะสมไปจนถึงปลายสุดของเหล็กยึด(ฐานเหล็กยึด) ในส่วนของเหล็กยึดชนิด Y-ROD ค่าความเค้นสูงสุดนั้นเกิดขึ้นบริเวณข้องอ เนื่องจากเหล็กยึดบริเวณด้านปลายสุดที่ได้รับความร้อนสูงสุด จึงเกิดการขยายตัวและเกิดความเค้นสะสมไปในทิศทางเดียวกัน จนกระทั่งเปลี่ยนทิศทางที่ข้องอ ดังนั้นเหล็กยึดจึงขยายตัวเนื่องจากความร้อนและเกิดความเค้นสะสมไปที่บริเวณข้องอของวัสดุ และค่าความเค้นวอนมิสเชสสูงสุดที่เกิดขึ้นในการจำลองเหล็กยึดทั้งสามชนิด มีค่าความเค้นสูงเกินกว่าความเค้นทนต่อแรงดึง ซึ่งทำให้เหล็กยึดมีคุณสมบัติเป็นพลาสติกและเกิดความเสียหายแล้วที่บริเวณดังกล่าว

4.4) การกระจายความเค้นหลักในคอนกรีตเสริมเหล็ก

ค่าความเค้นหลักแบบดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น ในคอนกรีตเสริมเหล็กแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ ความเค้นหลักแบบดึง และความเค้นหลักแบบกด

เมื่อพิจารณาค่าความเค้นดึง พบว่าเหล็กแผ่นตัว Y มีค่าความเค้นดึงมากที่สุด เพราะการขยายตัวของเหล็กยึดของเหล็กแผ่นตัว Y มีมากกว่าเหล็กยึดชนิดอื่น ในส่วนของการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ นั้น ค่าความทนต่อแรงดึงของคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นดึงที่เกิดขึ้นจากการจำลองของวัสดุ ทำให้วัสดุเข้าสู่คุณสมบัติเห็นชั้นสที่ฟเฟินนิ่ง และเกิดความเสียหายเรียบร้อยแล้วนั่นเอง

ในส่วนของความเค้นกดเหล็กยึดชนิดแผ่นรูปตัว L มีค่าความเค้นกดที่สูงที่สุด เพราะด้านปลายสุดมีพื้นที่การขยายตัวของเหล็กยึดมากที่สุด จึงทำให้คอนกรีตบริเวณนั้นถูกกดมากที่สุดนั่นเอง และเมื่อเทียบกับค่าสูงสุดของความเค้นหลักแบบกดที่เกิดขึ้นของแบบจำลองโมเดลทั้งสามแบบนั้น แสดงให้เห็นว่าวัสดุคอนกรีตทนไฟยังไม่เกิดความเสียหายในกรณีนี้

5) สรุปผลการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยการคำนวณ

ผลที่ได้จากการคำนวณหาระยะห่างของเหล็กยึดแต่ละชนิดนั้นสามารถ สรุปได้ ดังตามตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 รายละเอียด ผลที่ได้จากการคำนวณหาระยะห่างของเหล็กยึดแต่ละชนิด

ชนิดเหล็กยึด	ระยะห่าง (cm)	จำนวนที่ใช้ทั้งหมดต่อ พื้นที่โนสริง (ชิ้น)
เหล็กแผ่น	31	10
เหล็กกลม	16.5	15

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยในอนาคตควรให้ความสำคัญ ดังต่อไปนี้

- 1) การจำลองรูปแบบโมเดลของระบบหม้อเผาปูนซีเมนต์ ในงานวิจัยนี้เลือกนำชิ้นส่วนตัดมาทำการจำลองรูปแบบเพื่อการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุ อย่างไรก็ตามงานวิจัยในอนาคตมุ่งหวังให้การจำลองโครงสร้างชิ้นส่วนแบบเต็มรูปแบบชิ้นงาน เพื่อให้ได้เห็นพฤติกรรมของระบบหม้อเผาปูนซีเมนต์ที่ชัดเจน และครอบคลุมมากยิ่งขึ้น
- 2) ผลที่ได้จากการจำลองพันธะยึดเหนี่ยวแบบเส้นโกลของเหล็กยึดแบบแผ่นรูปตัว L และเหล็กยึดแบบ Y-ROD ยังไม่ได้ทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับผลการทดลอง ดังนั้นควรที่จะนำค่าที่ได้จากการทดลองจริงมาเปรียบเทียบกันเพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chawengkul Ch., Prasertphol T., Huantanom P. “New Silicon Carbide Containing Refractory Castable for Resolving Problems in Cement Kiln” **Innovation-future driven**, I-06
- [2] SCG “**Cement and Applications (ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน)**” [Online]
http://cement.scg.co.th/pdf/th/07_knowledge_base/01_article/lesson_02.pdf
- [3] Gasser A., Boisse P., Dutheillet P. “Thermomechanical behavior analysis and simulation of steel/refractory composite lining” **Composites Science and Technology.**, vol.61, 2001. Pp. 2095-2100
- [4] Gasser A., Boisse P., Dutheillet Y., Poirier J. “Experimental and numerical analyses of thermomechanical refractory lining behavior” **IMechE.**, Vol.215, 2001. Pp. 41-54
- [3] Saxena J.P. **Refractory Engineering and Kiln Maintenance in Cement Plants.** New Delhi, India: Tech Books International, Inc. 2003
- [5] Fisher P. “Benefits from The Use of Precast Shape Technology in Refractory Linings Refractories” **RAN.**, Vol.13, No.1, 2008. Pp. 16-17
- [6] Krietz R. **Refractories Handbook: Refractory Castables.** Marcel Dekker, Inc. 2004
- [7] Clavaud B. “Hot Mechanical Properties of Refractories Compressive Strength” **British Ceramic Society Transactions and Journal**, No.5, 1976
- [8] Folk H. F., Bohling W. C., “High Temperature Strength of High Alumina Refractories” **Bulletin of American Ceramic Society**, Vol.47, No.6, 1968.
- [9] Chen E. S. “**Behavior of Refractory Lining for Slagging Gasifiers**” PhD. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1984.
- [10] Rao S. S. **The Finite Element Method in Engineering 4th ED.** Miami: Elsevier Science & Technology Books, Inc. 2004

- [11] Gandy D. **Carbon Steel Handbook**. Electric Power Research Institute, Inc. 2007
- [12] Allegheny Ludlum company “Technical Data Blue Sheet” **Trademark of ATI Properties**, Inc. 2002
- [13] Palmer G., Tan K. C. “Designing and Failure of Monolithic Refractory Structures- Part 1” **RAN.**, Vol. 14 No.3, 2009. Pp. 19-26
- [14] Chen E. S., Dicks L. W., Buyukozoturk O. “Anchor Lining Interaction in a Hot Shell Refractory Lining” **Am. Ceram. Soc. Bull.**, Vol. 69 No.11, 1990 Pp. 1813-1820
- [15] Palmer G., Tan K. C. “Designing and Failure of Monolithic Refractory Structures- Part 2” **RAN.**, Vol. 14 No.4, 2009. Pp. 5-16
- [16] Andrieux C., Gabis V., Gasser A., Boisse P., Rezakhanlou R. “Castable anchoring optimization to improve service life of refractory linings” In: **UNITECR’97** Proceeding, New Orleans (USA), 1997. Pp. 317-326
- [17] Triessnig A., Studnicka H., Prietl T. “Determination of Thermo-Mechanical Properties at the RHI Refractories” **The Journal of Refractory Innovations**, 1/2006. Pp. 33-37
- [18] Deutsche G. F., Schornsteinbau E.V., **Refractory Engineering 2nd ED.** Vulkan-Verlag Essen, Inc. 1996
- [19] Alaka G., “**Modelling the bond stress at steel-concrete interface for both uncorroded and corroded reinforcing steel**” M.A.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Ryerson University, Toronto, Ont., 2004
- [20] Hibbitt, H.D., Karlsson, B.I., Sorensen, E.P. **ABAQUS Analysis User’s manual, version 6.8.** Vols. 3 and 5, Inc. 2008 USA
- [21] Hibbitt, Karlsson & Sorensen **ABAQUS/CAE User’s Manual Version 6.8.** Inc. 2008 USA
- [22] Cervenka J, Jendele L. “Finite element modeling of reinforcement with bond” **Computers & Structures**, Vol. 84, 2006. Pp. 1780–1791.
- [23] Petukhov, B.S., **Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties** Adv. Heat Transfer 6, 503-565 (1970)

- [24] Charles A. Schacht **Refractories Handbook: Thermomechanical Considerations for Refractory Linings** Marcel Dekker, Inc. 2004
- [25] Selby R.G., Vecchio F.J., "A constitutive model for analysis of reinforced concrete solids" **Can. J. Civ. Eng.** Vol 24: Pp. 460-470 NRC Canada 1997
- [26] Lamy A., Alaka G., "Modeling the effect of corrosion on bond strength at the steel-concrete interface with finite-element analysis" **Can. J. Civ. Eng.** Vol33 : Pp. 673-682 NRC Canada 2006
- [27] Laura N. Lowes, Jack P. Moehle, and SanJay Govindjee."Concrete-Steel Bond Model for Use in Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures" **ACI STRUCTURAL JOURNAL** , Title no.101-S50



Numerical Study of the Bonding Model Effect on Stress Distribution in Anchored Refractory

Savithree Wongasa, Apidech Janthaphan and Monsak Pimsarn

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
*E-mail: Saviwong@gmail.com, kpmonsak@kmitl.ac.th Tel: 66993642998.

Abstract

A refractory material is commonly used for the lining of cement rotary kilns. This is done by using cast refractory concrete reinforced with anchors which are welded to ring sector plates. While the rotary kiln is in operation these materials are subjected to significant thermal loads. This yields thermal stress which is one of the main failure causes of the concrete liner or refractory. This research proposes the development of a proper finite element model as a tool to analyse refractory strength. The analytical process is divided into two parts. In the first part, the objective is to develop an experimental setup to measure refractory-anchor stress under thermal loading. In the second part, the finite element model of a simple refractory-anchor system is used under the assumption that its mechanical behaviour is linear under varying temperatures and that the contact behaviours between the anchor and refractory material is a perfect bond and a slip bond compared to the experimental results. Under these assumptions the finite element stress results show similar results when the bond-slip model is employed. The perfect bonding model tends to over predict the stress results.

Keywords: Thermal stress distribution, Anchored refractory, Bond-slip model.

1. Introduction

Refractory concretes with steel anchors are used widely in the cement industry. They are mainly applied in rotary kilns for refractory linings to maintain high temperatures and to protect the steel shells of the kilns from high temperatures and corrosive materials. It has been found that fire resistant concrete is damaged by thermal stresses resulting in cracking. Therefore, it is imperative that engineers design tools, such as computer aided design systems to create durable refractory linings. Past research has presented models of finite element non-linear problem stress bond looking into the interaction between concrete and steel reinforcements. Alaka [1] and Lanya used a finite element nonlinear model software (ABAQUS) to determine the value of both the radial and circumferential stresses created by an increase in the volume of steel reinforced concrete, which is a cause of cracking in concrete. The model takes into account pressure loss and a decrease in the coefficient of friction interface surface. The researchers conducted pull-out tests to compare the results with the model, confirming the results. Research by Wygant and Crowley [2] has proposed a relationship between stress and strain resulting in linear elasticity, linear shrinkage, uniform thermal conductivity and modulus of elasticity for the calculation of the maximum stress lining requiring a steady-state temperature of the system lining Fluid-Bed Catalytic Unit (FCU).

The purpose of this research is to propose a method to study the interaction between refractory concrete and reinforcement by using a finite elements method to model refractory concrete and reinforcement.

The proposed method is composed of

1. A model for the bonding between refractory concrete and steel based on the fixed (perfect) bond.
2. A model bond between refractory concrete with steel anchor slip (bond-slip model) by the appropriate model is used to analyse the stresses in the lining of kilns in the future.

2. Composition of cement kiln and mechanical properties of flexible/plastic refractory concrete

Refractory concrete consists of chemical substances which are Alumina, Silicon Carbide (SiC), Oxide iron and Calcium Oxide in the ratio of 48%, 30%, 0.6% and 1.3% in sequence. The quantity of Calcium Oxide determines the classification of refractory material (1.0-2.5% is classified as a low cement refractory concrete, 0.2-1.0% as ultra-low, and up to 0.2% as no cement concrete). Refractory materials can tolerate

temperatures up to 1,500 degree Celsius. Their density after a drying process at 110 degree Celsius is $2,730 \text{ kg/m}^3$. Young's modulus of bending after heating at 100 and 1,000 degree Celsius are 130-140 kg/m^3 respectively.

2.1 Appearance and structural components of the cement kiln

The study is using a cylindrical shaped test cement kiln with 5 meters diameter, placed at a 1-4 degree angle out of the horizontal position. It rotates around its centre at 30 – 250 rounds/hour. The shell of the kiln is fabricated from 0.05 meter thick carbon steel and lined with refractory material and steel anchors. The method of operation is to firstly feed raw cement material through the “feed-in channel” at one side of the kiln as shown in Figure 1: Appearance of cement kiln. When the kiln is rotating, cement material falls into the downside end. Hot air is moved along the cement kiln in counter-rotation direction creating very high temperature or possibly flames inside the cement kiln through the burner. Afterwards, the cement material is processed under highest temperatures and passed through the “Nose ring” as shown in Figure 1 before falling into a cooler.

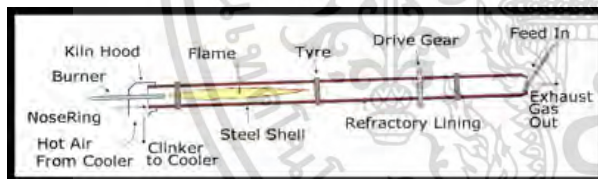


Figure 1: Appearance of cement kiln

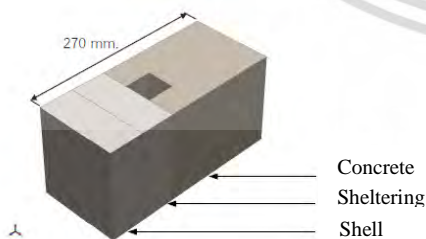


Figure 2: Cross-section of cement kiln component

a. Thermo-mechanical properties of refractory material

The kiln is composed of refractory material (And-LCC) with stainless steel (310S) anchors, steel sheets. The kiln shell is made from carbon steel. The thermo-mechanical properties are shown in Tables 1 and 2.

Table 1: Thermo-mechanical properties of refractory material, stainless steel and carbon steel

Material	T (°C)	E (GPa)	T (°C)	α ($\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	T (°C)	ν
Refractory	110	68	450	7.6	110	0.15
	250	50	900	7.6	1100	0.23
	500	44				
	700	39				
	900	21				
	1100	13				
Stainless Steel	100	200	100	15.9	20	0.30
	200	185	500	17.1		
	400	170	1000	18.9		
	800	135				
Carbon Steel	100	200.6	100	11.70	25	0.29
	200	197.2	200	12.06		
	300	193.7	300	12.42		
	400	191.0	400	12.78		
	500	186.8	500	13.14		
	600	182.0	600	13.32		
	700	174.4	700	13.68		

* Symbol T, E, α and ν represent temperature, the Modulus of Elasticity, the Coefficient of Thermal Expansion and the Poisson Ratio in sequence

The Coefficient of Thermal Expansion, Modulus of Elasticity and Poisson Ratio are varying with Temperature changes as shown in Tables 1 and 2

Table 2: Thermal conductivity of refractory material and carbon steel

Material	T (°C)	Thermal Conductivity ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
Refractory	100	1.30
	600	1.33
	1400	1.65
Stainless Steel	100	13.80
	200	13.95
	400	16.28
	500	18.70
	600	19.77
Carbon Steel	100	47.77
	200	48.11
	300	47.25
	400	45.86
	500	44.48
	600	43.10
	700	41.71

b. Properties of flexible refractory material

The properties of a flexible refractory material compression stress and modulus of elasticity from compression test are shown in Table 3

Table 3: Properties of refractory material

Temp (°C)	Max.Stress (MPa)	Modulus of Elasticity (MPa)
27	60.2	2912
200	33.4	1385
400	77.4	3040
600	104.1	3438
800	85.6	2190

c. Properties of plastic refractory material

The compressive stress f_c of concrete is calculated by using the formula in Equation (2.4.1). The results of the calculation shown in Figure 3 are the relation between compressive stress and strain for temperature range 30, 200, 400, 600 and 800 degree Celsius.

$$\varepsilon_c' = \frac{f_c'}{E_c} \left(\frac{n}{n-1} \right) \quad (2.4.1)$$

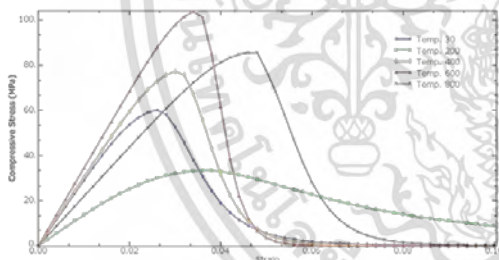


Figure 3: Relationship between compressive stress and strain of refractory material at 30, 200, 400, 600 and 800 degree Celsius

The plastic material strain is calculated by using Equation (2.4.2) and Equation (2.4.3) in order. The graph is plotted between compressive stress and plastic strain of concrete as shown in Figure 4

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_t - \varepsilon_{el} \quad (2.4.2)$$

$$\varepsilon_{el} = \frac{f_c}{E_c} \quad (2.4.3)$$

When;

ε_t : total strain

ε_{el} : flexible strain

ε_{pl} : plastic strain

f_c : Compressive stress at ε_t

E_c : modulus of elasticity

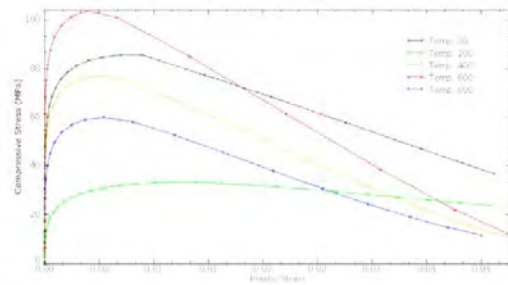


Figure 4: Relationship between compressive stress and plastic strain of refractory material at 30, 200, 400, 600 and 800 degree Celsius

3. Finite Element Modelling

Chemical bond is calculated by modelling contact pressure and friction force between refractory anchor and concrete. Both, flexible and plastic properties are defined in non-linear characteristics. The following analysis method was used:

1. Specify the model
2. Determine the property of refractory anchor and concrete
3. Determine the contact surface and attributes of refractory anchor and concrete connection
4. Define constraint and load
5. Create mesh

3.1 Simulation of refractory properties

The non-linear behaviour of refractory concrete is represented by two properties which are elastic properties and plastic properties

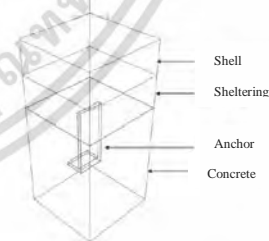


Figure 5: Components of the model

3.2 Contact surface modelling between refractory anchor and concrete

Normally, in an engineering problem that has contact surfaces between two elements or more, a friction force occurs on the object and creates resistance of motion (slip motion).

The method of defining contact modelling contains three steps:

1. Determine object's surface which has potential in contacting
2. Determine surface properties that effect to other surface

- Determine thermo-mechanical reaction of model under contacting behaviour

3.2.1 Modelling contact pressure and friction condition

As method of determining the mechanical reaction on the surface model we follow the ABAQUS Analysis User Manual [3]

- Friction force (reaction force between contacting surface)
- Surface relative velocity
- Softened contacting (reaction in perpendicular between surfaces)

3.2.2 Modelling the contact pressure

The contact pressure for concrete and steel bonding at p^0 is inversely proportional to the concrete cover thickness. The difference of p^0 is determined by using a regression equation analysis. The equation represents the relation between the contact pressures at zero gap and the concrete cover thickness. These can be used for calculating contact pressure for the concrete. Equation 3.3.1 determines the relationship between contact pressure and the concrete cover thickness with the results shown in Figure 6.

$$p^0 = 0.128C + 1.5 \quad (3.3.1)$$

When

p^0 = contact pressure

C = concrete cover thickness

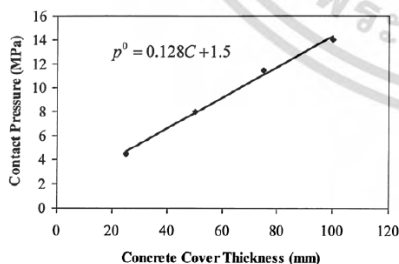


Figure 6: Differentiation of contact pressure and concrete cover thickness

3.2.3 Modelling friction on steel and concrete bond

Lundgren and Gylltoft (2000) developed the relationship between friction coefficient and slip coefficient using the test of Tepfers and Olsson (1992). Lundgren and Gylltoft found that the value of

the static friction coefficient $\mu_s = 1$ and the kinetic friction coefficient $\mu_k = 0.4$ with both values varying exponentially from the static to the kinetic condition. Later, Alaka adjusted the value of that friction coefficient to be more suitable. The different values of the decaying function should be less than 1, as shown in. With a variation of friction coefficient and slip coefficient for different values of d_c it is clear that the curve of matches well with the Lundgren and Gylltoft curve. Therefore, the model in this section is using Alaka's data for the inputs in the ABAQUS software. With a Static Friction Coefficient of $\mu_s = 1$, for example, the Kinetic Friction Coefficient is $\mu_k = 0.4$, and the Decay Coefficient is $d_c = 0.45$. These results are used in equation 2.4.1 to calculate the slip with varying Friction Coefficient. Figure 8 shows the correlation of Friction Coefficient and slip between anchor steel and refractory interface.

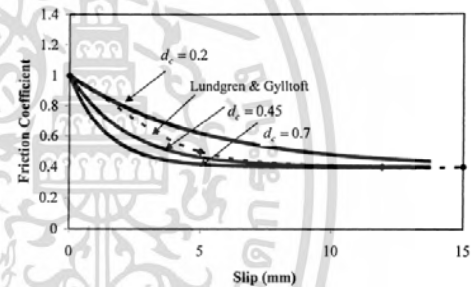


Figure 8: Friction model for different decay coefficients [1]

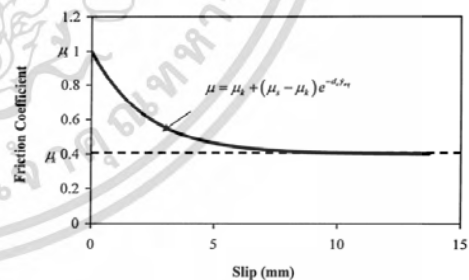


Figure 7: Exponential decay friction model used at the anchor steel and concrete interface [1]

3.3 Boundary condition of the model

Normally the stress from expansion due to heating is greater than the stress of gravity force. Thus, the stress from heating is of higher concern [5]. The model shows that under a heating condition at 700°C, the refractory weight is neglectable. The boundary condition of displacement and temperature at this point equals zero and the heat transfer to the surrounding environment is at 35°C by convection with a Convection Coefficient of 190 W/m²·°C⁻¹ [4] as shown in Figure 10

3.4 Creating a mesh

The elements of the model are determined by a hexahedral shape (8 nodes) for both anchor steel model and refractory model as shown in figure 9.

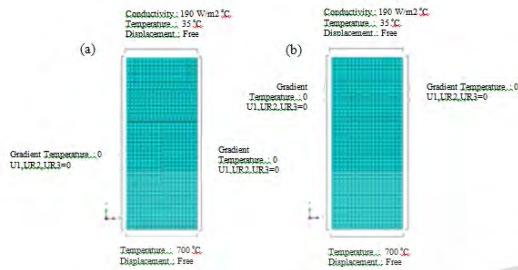


Figure 9: Boundary condition of temperature and displacement a) X-Y plane b) Y-Z plane

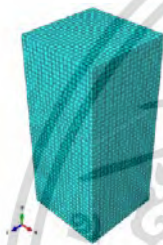


Figure 10: Assigning the element in Finite Element Model Perfect bond model

The perfect bond model is created similar to the bond-slip model but the mechanical behaviours of all refractories are linear varying by temperature. The bonding between anchor steel and refractory interface are permanently no-slip bonds. Figure 10 shows the model after applying the mesh.

4. Validation of the Finite Element Model

Validation of the stress from the Finite Element Model method and comparing it with the average results from the two experiments were in under heating conditions. The kiln was creating heat source for heating the sample in the area which have thermocouple and strain gauge installed at the sample for measuring actual temperature and stress as shown in Figure 11 and Figure 12.

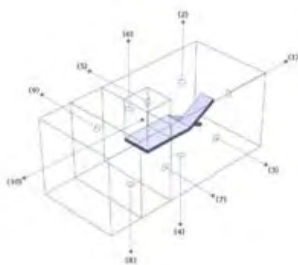


Figure 13: A testing sample connected with thermocouple at points 1 to 10

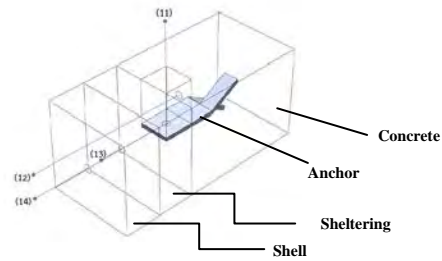


Figure 11: A testing sample connected with thermocouple at points 11 to 14

The testing started with heating the sample under controlled heating conditions by using a voltage regulator. The heating rate is at 2.5°C /min until reaching 100°C and maintaining the temperature for 30 minutes, after which the heating is increased at previous rate until reaching 200°C and maintain stable for another 30 minutes. These temperature increases are resumed until reaching 700°C at which point the temperature is maintained until the end of the experiment. The total time of the experiment was 17.5 hours.

The heating plan of the sample is shown in Figure 13.



Figure 12: The experimental setup of simple anchored refractory system

5. Simulation of Bond Model Effect

The experiment was repeated two times. The experimental results were recorded by computer, comprising of temperature data at refractory surface (point 1) shown in Figure 14 after heating and maintaining the sample under a stable temperature of 700 °C. At the same time environmental temperatures (point 2 – 10) were taken as shown in Figure 15 and also the temperatures of the refractory steel anchor and shell of cement kiln (point 11 – 14) as shown in Figure 16 of the results of the anchors' strain will be compared between the model and experimental results.

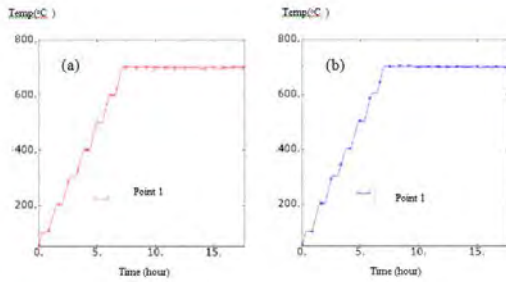


Figure 14: Temperatures refractory surface At point 1 a)1st experiment b)2nd experiment

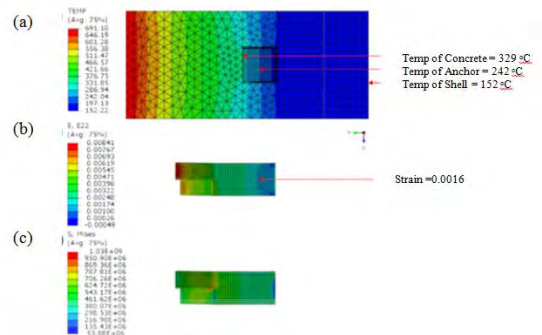


Figure 17: The result of model (a) distribution temperature (b) Anchor strain according to Y axis (c) Von Mises Stress

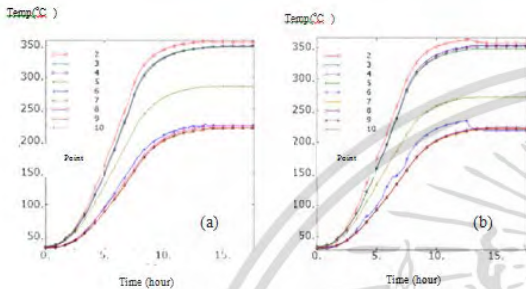


Figure 15: Temperatures in surrounding environment at point 2 – 10 a) 1st experiment b) 2nd experiment

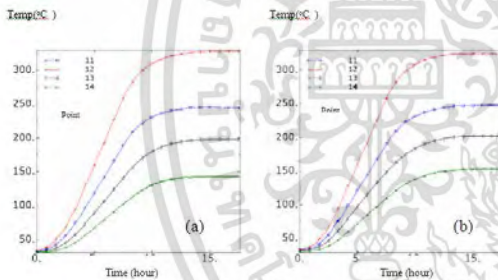


Figure 16: Temperature at refractory surface anchor and shell surface at points 11 - 14 a) 1st experiment b) 2nd experiment

5.1 Comparison of the study and experimental results

The results are presented in the form of temperature distribution, strain and steel anchor according to the Y axis is a) the distribution of temperature and b) strain on the steel anchor c) Von Mises Stress consistent as well. The different values are a) 1.85% and b) 2.5%. This demonstrates that the model can be used to analyse the stress distribution as actually occurred, as shown in Figure 17

5.2 Comparison of the model analysis and experimental results

The experiment provided both data on the temperature and the strain on the steel anchor as a function of time until those parameters reached a steady state in accordance with the model which is also set in steady state. Therefore, the comparison of the results under steady state of steel anchor temperature, kiln shell temperature and steel anchor strain are selected from the average of two experiments.

The differences between simulation results and experimental results are displayed in Figure 18. They show that the temperature and the strain from both results are acceptable and consistency

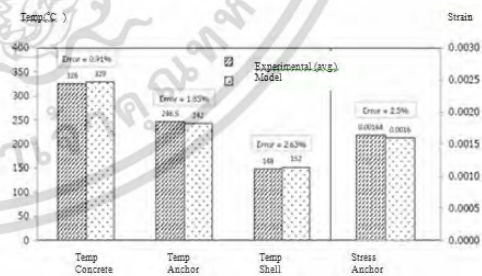


Figure18. Comparison of the simulation results with the experimental results at steady state.

5.3 Comparison of “Bond-slip” and “Perfect Bond” under heating condition

The mechanical behaviour of refractory is defined in the model in two characteristics, which are firstly the linear mechanical behaviour varying according to temperature and perfect bond between refractory and anchor, and secondly the non-linear mechanical behaviour varying according to temperature and bond-slip between refractory and

anchor. The analysis of the model has shown that the first characteristic has a five times greater maximum principal stress in refractory than the second characteristic.

The stress distribution in the steel anchors are in difference forms [Figure 19]. The Von Mises Stress at the base of the anchors are similar between both models, unlike the adjacent area the stress distributed differently throughout the whole piece as shown in Figure 20. Stress distribution of refractory concrete value should be below tension stress at anchor position and faded at the further point because as a result of thermal influence steel can expand more than a refractory concrete. Regarding to this, a refractory concrete will expand under compression stress. In conclusion non-linear mechanical behaviour and slip bond model is more precise and realistic than the perfect bond model.

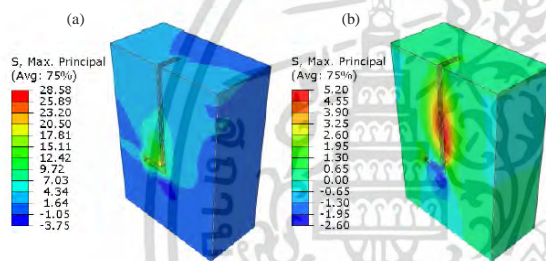


Figure 189: Comparison of the result of maximum principal stress of refractory a) linear mechanical for perfect bond and b) non-linear mechanical behaviour for bond-slip.

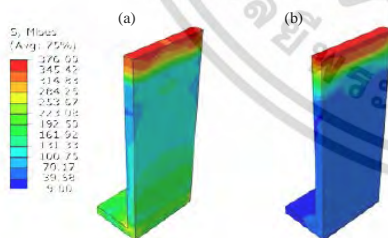


Figure 2019: Comparison of Von Mises Stress result of ductile iron a) Linear mechanical behaviour perfect bond b) Non-Linear mechanical behaviour; bond-slip

REFERENCE

- [1] Alaka G., “Modelling the bond stress at steel-concrete interface for both uncorroded and corroded reinforcing steel” M.A.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Ryerson University, Toronto, Ont., 2004
- [2] J.F.Wygant, M.S.Crowley, 1964 “Designing Monolithic Refractory Vessel Linings”, A.Cera.Soc.Bull, 43
- [3] Hibbitt, H.D., Karlsson, B.I., Sorensen, E.P. ABAQUS Analysis User’s manual, version 6.8. Vols. 3 and 5, Inc. 2008 USA [1] Alaka G., “Modelling the bond stress at steel-concrete interface for both uncorroded and corroded reinforcing steel” M.A.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Ryerson University, Toronto, Ont., 2004
- [4] Petukhov, B.S., Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties Adv. Heat Transfer 6, 503-565 (1970)
- [5] Charles A. Schacht Refractories Handbook: Thermomechanical Considerations for Refractory Linings Marcel Dekker, Inc. 2004

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	น.ส. สาวิตรี วงศ์อาษา
วัน เดือน ปีเกิด	6 ธันวาคม 2528
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 8 หมู่ 12 ต.บ้านโฮ้ง อ.บ้านโฮ้ง จ.ลำพูน 51130 โทร .099-3642998
ประวัติการศึกษา	2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) ออกแบบท่อ 2) วิเคราะห์ความเสียหายในระบบท่อเนื่องจากความร้อน 3) วิเคราะห์ความเสียหายของท่อเนื่องจากการสั่นสะเทือน (FEA)
ประสบการณ์ทำงาน	
พ .ศ.2552-2555	ตำแหน่ง วิศวกรควบคุมคุณภาพ บริษัท อีเทลไท วิศวกรรม
พ .ศ.2555-2557	ตำแหน่ง วิศวกรระบบท่อ บริษัท แซมซุงไทยเอ็นจิเนียริง -คำนวณความเสียหายที่เกิดขึ้นในท่อเนื่องจากความร้อน
พ.ศ.2557-2559	ตำแหน่ง วิศวกรระบบท่อ บริษัท แบบคอคพาวเวอร์ -คำนวณความเสียหายที่เกิดขึ้นในท่อเนื่องจากความร้อน
พ .ศ.2561-ปัจจุบัน	ตำแหน่งวิศวกรระบบท่อ บริษัท พร้อมโซลูชั่น -คำนวณความเสียหายที่เกิดขึ้นในท่อเนื่องจากความร้อน -วิเคราะห์ความเสียหายของท่อเนื่องจากการสั่นสะเทือน(FEA)