

การศึกษาผลของเหล็กยึดวัสดุทนไฟต่อการกระจายความเค้น
ภายในโครงสร้างโนสริงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

STUDY OF REFRACTORY ANCHOR EFFECT ON STRESS DISTRIBUTION
IN NOSE RING STRUCTURE USING FINITE ELEMENT METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-M-030-187

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF REFRACTORY ANCHOR EFFECT ON STRESS DISTRIBUTION
IN NOSE RING STRUCTURE USING FINITE ELEMENT METHOD



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
2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาผลของเหล็กยึดวัสดุทนไฟต่อการกระจายความเค้นภายในโครงสร้างโนสริงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Thesis Title Study of Refractory Anchor Effect on Stress Distribution in Nose Ring Structure Using Finite Element Method

นักศึกษา นายอภิเดช จันทพันธ์

รหัสประจำตัว 52610502

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร

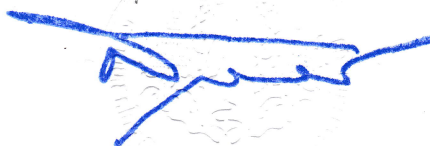
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-M-030-187

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จำลอง	ปราบแก้ว	
ดร.เอกพจน์	ตันตราภินันท์	
ดร.ฐิตะพล	หุยนันท์	
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ	เดไปวา	
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2556 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น (E12) ห้อง E12-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(ศาสตราจารย์ ดร.สุชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ ขอสงวนสิทธิ์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงวันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2556 นำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลของเหล็กยึดวัสดุทนไฟต่อการกระจายความเค้นภายในโครงสร้างโนสริงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
นักศึกษา	นายอภิเดช จันทพันธ์
รหัสประจำตัว	52610502
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร

บทคัดย่อ

คอนกรีตทนไฟถูกใช้เป็นฉนวนกันความร้อนในหม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน โดยคอนกรีตทนไฟถูกเทหล่อพร้อมกับเสริมความแข็งแรงด้วยเหล็กยึดที่เชื่อมติดกับแผ่นเซ็คเตอร์ริง โดยเรียกส่วนนี้ว่า โนสริง และยึดโนสริงไว้กับเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ ในขณะที่หม้อเผาปูนซีเมนต์ทำงานวัสดุดังกล่าวอยู่ภายใต้ภาระทางความร้อนเป็นสำคัญ ทำให้เกิดความเค้นจากความร้อนอันเป็นสาเหตุหนึ่งของการเสียหายต่อโนสริง งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นเครื่องมือช่วยวิเคราะห์ความแข็งแรงของโนสริง โดยการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรก จุดประสงค์ของการศึกษาคือการกระจายความเค้นเนื่องจากความร้อนที่มีปฏิริยาต่อกันระหว่างคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดจากปัจจัยจำนวนและชนิดเหล็กยึด โดยเหล็กยึดที่ศึกษาประกอบด้วย เหล็กยึดชนิดแผ่นตัว Y เหล็กยึดชนิดแผ่นตัว L และเหล็กยึดชนิดกลมตัว Y โดยพฤติกรรมทางกลคอนกรีตทนไฟเป็นแบบเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและการสัมผัสของวัสดุเป็นแบบยึดแน่นถาวร (Perfect bond) ในส่วนที่สอง จุดประสงค์ของการศึกษาคือการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดที่เหมาะสมกับการใช้งานจากปัจจัยปริมาตรคอนกรีตทนไฟ โดยพฤติกรรมทางกลคอนกรีตทนไฟเป็นแบบไม่เชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและการสัมผัสระหว่างผิวคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดเป็นแบบลื่นไถล (Bond slip)

ผลการวิเคราะห์พบว่าการกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อคอนกรีตทนไฟเพิ่มขึ้นตามจำนวนเหล็กยึดเพราะการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กยึดดีกว่าคอนกรีตทนไฟ ทำให้เหล็กยึดดึงให้คอนกรีตทนไฟให้ยึดตัวตามและอยู่ภายใต้ความเค้นดึง ในขณะที่เดียวกันเซ็คเตอร์ริงมีแนวโน้มดึงออกจากคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึดที่มากขึ้น นำไปสู่การเกิดช่องว่างระหว่างเซ็คเตอร์ริงและคอนกรีตทนไฟ การขยายตัวของเซ็คเตอร์ริงสามารถสร้างความเค้นดึงในแนวเส้นรอบวงในเนื้อคอนกรีตทนไฟ ก่อให้เกิดการแตกในแนวรัศมีได้ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์จากชนิดเหล็กยึดแบบต่างๆ พบว่าเหล็กยึดชนิดแผ่นตัว L จะส่งผลให้ความเค้นดึงในเนื้อคอนกรีตทนไฟต่ำสุด ส่วนผลของจำนวนเหล็กยึดที่น้อยลงหรือระยะห่างของเหล็กยึดมากขึ้นจะส่งผลให้ความเค้นดึงในเนื้อคอนกรีตทนไฟมีค่าน้อยลง แต่จะเพิ่มความเค้นดึงในเหล็กยึด ซึ่งถ้าจำนวนเหล็กยึดน้อยไปก็จะทำให้ความเค้นวอนมิสเสสที่โคนของเหล็กยึดสูงกว่าค่าความเค้นแรงดึงของเหล็กยึด

Thesis	Study of Refractory Anchor Effect on Stress Distribution in Nose Ring Structure Using Finite Element Method
Student	Mr. Apidech Janthaphan
Student ID.	52610502
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Asst.Prof. Dr.Monsak Pimsarn

ABSTRACT

Refractory material is applied for the lining in the cement rotary kiln. This is done by casting the refractory concrete and it is reinforced with anchors which are welded to sector ring plate, so called nose ring. This nose ring is fixed to the rotary kiln shell, made of steel. While the rotary kiln is in operation these materials are subjected to significant thermal load. This yields thermal stress which is one of failure causes of the nose ring. This research proposed the development of proper finite element model which is used as a tool to analyze nose ring strength. The analysis can be divided into 2 parts. In the first part, the objective is to study thermal stress distribution induced by interaction between the refractory and the anchor by considering the number of anchors and anchor type. The anchor types used are Y-shaped plate, L-shaped plate and Y-shaped rod. The mechanical behavior of refractory is considered as linear and varying with temperature and the contact behavior between the anchor and refractory is perfect bonding. In the second part, the objective is to determine the proper anchoring distance. The mechanical behavior of refractory is considered as non-linear and varying with temperature and the bond slip model is employed for contact behavior between the anchor and refractory.

From the analyzed results, it was found that the maximum principal stress inside the refractory material increases if the number of anchors is increased. This is due to better thermal expansion of steel, compared with refractory thermal expansion. Therefore, the anchor pulled the refractory to extend and to be under tensile stress. At the same time, as the increase of number of anchors, the sector ring tends to separate from the refractory. This results in the gap between the sector ring and refractory. Moreover, the expansion of sector ring can induce tensile stress in circumferential direction of the refractory, leading to cracking of refractory in circumferential direction. Moreover, the analyzed results show that, in term of

anchor type, L-shaped anchor yields lowest tensile stress inside the refractory. If the number of anchors is reduced or increasing of anchor distance, the tensile stress inside the refractory is reduced but this increases the tensile stress of the anchor. If the number of anchors is too low, it will cause the Von-Mises stress, especially at the anchor base, to be higher than the anchor tensile strength.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่ให้ความช่วยเหลือให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว และ ดร.เอกพจน์ ตันตราภิวัดน์ รวมถึงอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อชี้แนะจนในที่สุดทำให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ คุณณัฐพล โดมทอง ผู้จัดการฝ่ายขายต่างประเทศ บริษัท สยามอุตสาหกรรม วัสดุทนไฟ จำกัด รวมถึงเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่เอื้อเฟื้อและสนับสนุนข้อมูลหม้อเผาปูนซีเมนต์ เพื่อใช้สำหรับทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตทนไฟ

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็น กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และ ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

อภิเดช จันทพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ทบทวนกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม	
2.1 สรุปสาระสำคัญจากวรรณกรรม.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
3.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	7
3.2 หลักการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึด.....	17
3.3 พฤติกรรมทางกลของวัสดุ.....	20
3.4 พันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีต.....	23
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย	
4.1 บทนำ.....	26
4.2 สภาวะแวดล้อมในหม้อเผาปูนซีเมนต์.....	26
4.3 ระบบไลน์นิ่งทไฟ.....	27
4.4 ปัจจัยที่ทำให้ลายระบบไลน์นิ่งทไฟ.....	27
4.5 แนวคิดการออกแบบระบบไลน์นิ่งทไฟ.....	32
4.6 วัสดุคอนกรีตทนไฟ.....	32
4.7 พฤติกรรมคอนกรีตทนไฟ.....	34
4.8 สมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ.....	34
4.9 สมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ.....	37
4.10 การศึกษาการกระจายความเค้นเนื่องจากความร้อนในโครงสร้างโนสริง.....	39
4.11 การทดลอง.....	43
4.12 การศึกษาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาเดิมเกี่ยวกับพันธะแรงยึดเหนี่ยว.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญต่อ

	หน้า
4.13 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง.....	51
4.14 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล (Bond-slip) และแบบยึดแน่นถาวร (Perfect bond) ภายใต้ภาระทางความร้อน.....	52
4.15 การศึกษาการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยการคำนวณ.....	60
4.16 การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์...	61
บทที่ 5 ผลการวิจัย	
5.1 บทนำ.....	62
5.2 ผลของการศึกษาการกระจายความเค้นเนื่องจากความร้อนในโครงสร้างโนสริง..	62
5.3 ผลของการทดลอง.....	112
5.4 ผลของการศึกษาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาเดิมเกี่ยวกับพันธะแรงยึดเหนี่ยว	113
5.5 ผลของการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบกับผลของการทดลอง.....	114
5.6 ผลของการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล (Bond-slip) และแบบยึดแน่นถาวร (Perfect bond) ภายใต้ภาระทางความร้อน.....	116
5.7 ผลของการศึกษาการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยการคำนวณ.....	117
5.8 ผลของการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	118
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	121
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	123
เอกสารอ้างอิง.....	124
ภาคผนวก ก บทความที่เข้าร่วมการประชุมสัมมนาวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25) 19-21 ตุลาคม 2554.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	139

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 คุณสมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ สแตนเลส และเหล็กกล้าคาร์บอน [11,12].....	39
4.2 คุณสมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ สแตนเลส และเหล็กกล้าคาร์บอน [11,12].....	40
4.3 รายละเอียดของประเภทเหล็กยึดและจำนวนเหล็กยึดในแบบจำลอง.....	40
4.4 จำนวนเอลิเมนต์แต่ละแบบจำลอง.....	42
4.5 ผลของการสอบเทียบสัญญาณสเตรนเกจ.....	47
4.6 คุณสมบัติของคอนกรีตทนไฟจากการทดสอบแรงอัด.....	53
4.7 ข้อมูลสำหรับเห็นชั้นสตีฟเฟ้นิง (Tension stiffening) [19].....	55
4.8 ข้อมูลของอัตราส่วนความเค้นและความเครียด.....	56
4.9 รายละเอียดของปริมาตรคอนกรีตทนไฟของแบบจำลอง.....	61
5.1 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 1.....	65
5.2 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 2.....	65
5.3 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 3.....	66
5.4 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 4.....	67
5.5 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 5.....	67
5.6 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 6.....	68
5.7 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 7.....	68
5.8 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 8.....	69
5.9 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองจากปัจจัยของจำนวนและชนิดเหล็กยึด.....	70
5.10 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 1.....	107
5.11 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 2.....	107
5.12 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 3.....	108
5.13 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 4.....	109
5.14 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 5.....	109
5.15 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 6.....	110
5.16 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 7.....	110
5.17 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 8.....	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 การแบ่งรูปร่างลักษณะของโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ [10].....	7
3.2 เอลิเมนต์ในพิกัดคาร์ทีเซียน [10].....	8
3.3 ระบบแรงสมดุรวมกันของวัตถุ [10].....	11
3.4 ปริมาตรของเอลิเมนต์ที่พิจารณาสำหรับสถานะสมดุภายใน [10].....	12
3.5 การเปลี่ยนรูปร่างของเอลิเมนต์ [10].....	14
3.6 แผ่นราบภายใต้ภาระในระนาบ [10].....	15
3.7 แรงกระทำที่ผิววัตถุ [10].....	16
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของไลน์นิ่งทไฟและระยะห่างเหล็กยึด [18].....	18
3.9 คอนกรีตทไฟเสริมเหล็กยึดตามแนวนอน.....	19
3.10 แบบจำลองคอนกรีตเชิงโครงสร้างของ Popovics และ Thorenfeldt [25].....	21
3.11 การตอบสนองแรงดึงของคอนกรีตเสริมแรงภายใต้การเสียหาย [25].....	22
3.12 การตอบสนองความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมแรง [25].....	23
3.13 แบบจำลองแรงเสียดทานต่อแท่งเหล็กในคอนกรีต [26].....	23
3.14 ฟังก์ชันเลขชี้กำลังในแบบจำลองแรงเสียดทานที่เสื่อมลง [20].....	24
3.15 ซอฟท์เทน (Softtend) ความสัมพันธ์แรงดันกับช่องว่าง [20].....	25
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและกระบวนการภายในหม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน [3]	27
4.2 ส่วนประกอบและโครงสร้างของหม้อเผาปูนซีเมนต์ (ตัดด้านข้างภาพตัด) [บริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทไฟ จำกัด].....	28
4.3 ส่วนประกอบและโครงสร้างของหม้อเผาปูนซีเมนต์ (ภาพด้านบน) [บริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทไฟ จำกัด].....	29
4.4 ส่วนประกอบและโครงสร้างของหม้อเผาปูนซีเมนต์ (ภาพด้านหน้า) [บริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทไฟ จำกัด].....	30
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงและอุณหภูมิของวัสดุทไฟ [7,8].....	31
4.6 ลักษณะการแตกและการหลุดร่อนของไลน์นิ่งทไฟในหม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน [1].	31
4.7 แสดงบริเวณที่ใช้คอนกรีตทไฟหล่อสำเร็จ (แนวความคิด) [บริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทไฟ จำกัด].....	33
4.8 ส่วนประกอบของโนสริง (ภาพตัดด้านข้าง).....	34
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนและอุณหภูมิของคอนกรีตทไฟ.....	35
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะและอุณหภูมิของคอนกรีตทไฟ.....	36
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนและอุณหภูมิของ คอนกรีตทไฟ.....	36
4.12 ผลการทดสอบการอัดตามแนวแกนของวัสดุทไฟแม็กเซียมโครเมียม [17].....	37
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตทไฟที่อุณหภูมิ 200 400, 600 และ 800 °C.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นและอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟ.....	38
4.15 ส่วนประกอบโครงสร้างโนสริง 36 ชั้น และชั้นส่วนประกอบที่เกี่ยวข้อง.....	41
4.16 เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับอุณหภูมิและการกระจัด (ก) ระนาบ X-Y (ข) ระนาบ Y-Z.....	42
4.17 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากการแบ่งเอลิเมนต์.....	43
4.18 ลักษณะเตาเผาแบบขดลวดไฟฟ้าสำหรับการทดลอง.....	43
4.19 ส่วนประกอบภายนอกชิ้นตัวอย่างทดลอง.....	44
4.20 ส่วนประกอบภายในชิ้นตัวอย่างทดลอง.....	45
4.21 ชิ้นตัวอย่างทดลองพร้อมติดตั้งสเตรนเกจ.....	45
4.22 ชิ้นตัวอย่างทดลองที่ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลตั้งแต่จุดที่ 1 ถึง 10.....	46
4.23 ชิ้นตัวอย่างทดลองที่ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลตั้งแต่จุดที่ 11 ถึง 14.....	46
4.24 ชิ้นตัวอย่างทดลองพร้อมติดตั้งสเตรนเกจ.....	47
4.25 เปรียบเทียบผลความเครียดระหว่างเครื่องทดสอบแรงดึงและสเตรนเกจ.....	48
4.26 เครื่องมือสอบเทียบสายเทอร์โมคัปเปิล.....	48
4.27 แผนผังวงจรเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	49
4.28 ชุดเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	50
4.29 แผนการให้ความร้อนที่ผิวด้านร้อน (Hot face) ของคอนกรีตทนไฟ.....	50
4.30 เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับภาระและการกระจัด.....	50
4.31 เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับอุณหภูมิและการกระจัด (ก) ระนาบ X-Y (ข) ระนาบ Y-Z.....	51
4.32 ส่วนประกอบของแบบจำลอง.....	52
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดของคอนกรีตทนไฟ ที่อุณหภูมิ 30, 200, 400, 600 และ 800 °C.....	53
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดพลาสติกของคอนกรีตทนไฟ ที่อุณหภูมิ 30, 200, 400, 600 และ 800 °C.....	54
4.35 แบบจำลองเห็นชั้นสตีฟเฟ้นิง (Tension stiffening) แสดงลักษณะความเค้นกับ ความเครียดภายหลังการเสียหาย ตามคู่มือ ABAQUS [20].....	55
4.36 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเค้นดึงต่อความเค้นดึงสูงสุดกับความแตกต่าง ระหว่างความเครียดโดยตรงและความเครียดที่ความเค้นดึงสูงสุด [19].....	55
4.37 ฟังก์ชันการเสียหายภายใต้ระนาบความเค้น ตามคู่มือ ABAQUS [20].....	56
4.38 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสัมผัสกับความหนาคอนกรีตที่ห่อหุ้ม [19].....	57
4.39 แบบจำลองแรงเสียดทานของสัมประสิทธิ์การเสื่อมลง [19].....	58
4.40 ฟังก์ชันเลขชี้กำลังในแบบจำลองแรงเสียดทานที่เสื่อมลงมีปฏิริยาต่อกันระหว่าง เหล็กยึดและคอนกรีต [19].....	58
4.41 เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับอุณหภูมิและการกระจัด (ก) ระนาบ X-Y(ข) ระนาบ Y-Z.....	59
4.42 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากการแบ่งเอลิเมนต์.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.43 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากการแบ่งเอลิเมนต์.....	60
4.44 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากการแบ่งเอลิเมนต์.....	61
5.1 ผลของการถ่ายเทความร้อนตั้งแต่ผิวด้านร้อนถึงเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์.....	63
5.2 ผลของการกระจายอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟ ทั้ง 8 กรณี.....	63
5.3 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด ทั้ง 8 กรณี.....	64
5.4 ส่วนตัด X-X, Y-Y และ Z-Z ระหว่างกลางเหล็กยึด.....	70
5.5 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว Y) บนส่วนตัด Z-Z.....	71
5.6 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวน เหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว Y) บนส่วนตัด Z-Z.....	72
5.7 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว Y) บนส่วนตัด Y-Y.....	73
5.8 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวน เหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว Y) บนส่วนตัด Y-Y.....	74
5.9 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว Y) บนส่วนตัด X-X.....	75
5.10 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวน เหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว Y) บนส่วนตัด X-X.....	76
5.11 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กกลมตัว Y) บนส่วนตัด Z-Z.....	77
5.12 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวน เหล็กยึด (เหล็กกลมตัว Y) บนส่วนตัด Z-Z.....	78
5.13 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กกลมตัว Y) ส่วนตัด Y-Y.....	79
5.14 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวน เหล็กยึด (เหล็กกลมตัว Y) บนส่วนตัด Y-Y.....	80
5.15 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กกลมตัว Y) บนส่วนตัด X-X.....	81
5.16 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวน เหล็กยึด (เหล็กกลมตัว Y) บนส่วนตัด X-X.....	82
5.17 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว L) บนส่วนตัด Z-Z.....	83
5.18 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวน เหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว L) บนส่วนตัด Z-Z.....	84

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของหน่วยงานนี้ ไม่อนุญาตให้แก้ไขได้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.19 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว L) บนส่วนตัด Y-Y.....	85
5.20 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว L) บนส่วนตัด Y-Y.....	86
5.21 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว L) บนส่วนตัด X-X.....	87
5.22 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว L) บนส่วนตัด X-X.....	88
5.23 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 10 อัน) บนส่วนตัด Z-Z.....	89
5.24 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 10 อัน) บนส่วนตัด Z-Z.....	90
5.25 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 10 อัน) บนส่วนตัด Y-Y.....	91
5.26 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 10 อัน) บนส่วนตัด Y-Y.....	92
5.27 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 10 อัน) บนส่วนตัด X-X.....	93
5.28 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 10 อัน) บนส่วนตัด X-X.....	94
5.29 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 15 อัน) บนส่วนตัด Z-Z.....	95
5.30 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 15 อัน) บนส่วนตัด Z-Z.....	96
5.31 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 15 อัน) บนส่วนตัด Y-Y.....	97
5.32 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 15 อัน) บนส่วนตัด Y-Y.....	98
5.33 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 15 อัน) บนส่วนตัด X-X.....	99
5.34 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 15 อัน) บนส่วนตัด X-X.....	100
5.35 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 20 อัน) บนส่วนตัด Z-Z.....	101

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.36 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 20 อัน) บนส่วนตัด Z-Z.....	102
5.37 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 20 อัน) บนส่วนตัด Y-Y.....	103
5.38 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 20 อัน) บนส่วนตัด Y-Y.....	104
5.39 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 20 อัน) บนส่วนตัด X-X.....	105
5.40 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 20 อัน) บนส่วนตัด X-X.....	106
5.41 ผลของอุณหภูมิผิวของคอนกรีตทนไฟ จุดที่ 1 (ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2.....	112
5.42 ผลของอุณหภูมิสภาวะแวดล้อมใกล้คอนกรีตทนไฟ จุดที่ 2 ถึง 10 (ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2.....	112
5.43 ผลของอุณหภูมิผิวคอนกรีตทนไฟ เหล็กยึด และเปลือกหุ้มอเนกประสงค์ จุดที่ 11 ถึง 14 (ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2.....	113
5.44 ผลของความเครียดบนเหล็กยึด (ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2.....	113
5.45 ผลของการจำลอง (ก) ความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีต (ข) ความเค้นวอนมิสเชสของเหล็ก.....	114
5.46 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวและการลื่นไถล (ก) ผลของการศึกษา (ข) ผลของ Alaka.....	114
5.47 ผลของการจำลอง (ก) การกระจายอุณหภูมิ (ข) ความเครียดเหล็กยึดตามแนวแกน Y (ค) ความเค้นวอนมิสเชส (Pa).....	114
5.48 เปรียบเทียบผลของการจำลองกับผลของการทดลองที่สภาวะคงตัว.....	115
5.49 การลู่เข้าของพลังงานความเครียดกับความละเอียดของเอลิเมนต์.....	115
5.50 เปรียบเทียบผลของความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ (ก) พฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นพันธ์แบบยึดแน่นถาวร (ข) พฤติกรรมทางกลแบบไม่เชิงเส้นพันธ์แบบลื่นไถล	116
5.51 เปรียบเทียบผลของความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึด (ก) พฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นพันธ์แบบยึดแน่นถาวร (ข) พฤติกรรมทางกลแบบไม่เชิงเส้นพันธ์แบบลื่นไถล....	116
5.52 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของคอนกรีตทนไฟและระยะห่างของเหล็กยึดชนิดแผ่น.....	117
5.53 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของคอนกรีตทนไฟและระยะห่างของเหล็กยึดชนิดกลม.....	117
5.54 ผลของการกระจายอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟทั้ง 4.....	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.55 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟทั้ง 4 กรณี.....	118
5.56 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึดทั้ง 4 กรณี.....	119
5.57 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึดทั้ง 4 กรณี.....	119
5.58 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นวอนมิสเสสและระยะห่างเหล็กยึด.....	120



บทที่ 1

บทนำ

อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศ และทวีความสำคัญต่อเศรษฐกิจเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพราะปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างแทบทุกประเภท เช่น การก่อสร้างถนน บ้านเรือน เขื่อน สะพาน อาคารพาณิชย์ สนามบิน เป็นต้น การผลิตและการจำหน่ายปูนซีเมนต์ในประเทศคาดว่าจะขยายตัวได้อย่างต่อเนื่อง ปัจจัยสำคัญที่สนับสนุนการขยายตัวยังคงเป็นการลงทุนในโครงการสาธารณูปโภคของรัฐบาลและส่วนหนึ่งมาจากการซ่อมแซมที่อยู่อาศัยที่เสียหายหลังจากปัญหาน้ำท่วม ซึ่งจะส่งผลทำให้การใช้ปูนซีเมนต์ในประเทศปรับตัวเพิ่มขึ้น ตามความต้องการที่เพิ่มขึ้นและต่อเนื่อง จึงทำให้เกิดการแข่งขันกันทางการตลาดของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ผู้ผลิตปูนซีเมนต์ต้องทำการลดต้นทุน และยืดระยะเวลาการใช้งานของเครื่องจักรกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งหม้อเผาปูนซีเมนต์ เพื่อให้กำลังการผลิตมีมากขึ้น ปัจจัยการเดินเครื่องทำงานอย่างต่อเนื่องของหม้อเผาปูนซีเมนต์ได้ถูกกำหนดเป็นเป้าหมายและส่วนสำคัญของผู้ผลิตปูนซีเมนต์แทบทั้งสิ้น โดยทั่วไปแล้วปัญหาด้านเครื่องจักรกลและไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักของการหยุดเดินเครื่องจักรกล อีกหนึ่งปัจจัยคือการหยุดซ่อมแซมไลน์นิ่งทวนไฟ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้สูญเสียผลผลิตปูนซีเมนต์ โดยปกติแล้วการซ่อมแซมไลน์นิ่งทวนไฟควรจะทำปีละครั้ง แต่มีหลายๆ ครั้งที่ต้องหยุดซ่อมแซมไลน์นิ่งทวนไฟบางบริเวณก่อนเวลากำหนด (ประมาณ 4 ถึง 6 เดือน) [1] โดยใช้ระยะเวลาซ่อมอย่างน้อย 5 วัน ดังนั้นการซ่อมแซมดังกล่าวจึงส่งผลกระทบต่อปัจจัยการเดินเครื่องทำงานของหม้อเผาปูนซีเมนต์ เพราะฉะนั้นปัญหานี้จึงควรได้รับการแก้ไขต่อไป

1.1 ทบทวนกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ จำแนกได้เป็น 2 วิธีด้วยกัน ได้แก่ กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก และกรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง โดยที่กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง เป็นวิธีที่ทันสมัยกว่า เพราะเป็นวิธีที่ใช้พลังงานความร้อนต่ำกว่า จึงช่วยประหยัดเชื้อเพลิงในการเผาได้ดีกว่า และยังสามารถควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ได้ง่ายกว่า จึงทำให้ได้ปูนซีเมนต์มีคุณภาพสม่ำเสมอว่า กรรมวิธีการผลิตแบบแห้งวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิต คือ หินปูน (Limestone) ซึ่งได้จากการระเบิดหินจากภูเขาหินปูน แต่หินปูนที่ได้ยังมีขนาดใหญ่ จึงต้องนำมาลดขนาดโดยเครื่องย่อย (Crusher) เพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตขั้นต่อไป วัตถุดิบอื่นๆ คือ ดินดาน (Shale) และวัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ (Corrective materials) ซึ่งใช้เฉพาะบางตัว เพื่อให้ได้ส่วนประกอบทางเคมีตามค่ามาตรฐานที่กำหนด วัตถุดิบอื่นเหล่านี้ก็ต้องผ่านเครื่องย่อยเพื่อลดขนาดให้เหมาะสมเช่นกัน วัตถุดิบที่ผ่านการย่อยแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ที่กองเก็บวัตถุดิบ (Storage yard) จากนั้นก็จะลำเลียงไปยังหม้อบดวัตถุดิบ (Raw mill) ต่อไป หม้อบดวัตถุดิบมีหน้าที่บดหินปูน ดินดาน และวัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติให้เป็นผงละเอียดซึ่งเรียกว่า วัตถุดิบสำเร็จ (Raw meal) การควบคุมอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่หม้อบดวัตถุดิบมีความสำคัญ เนื่องจากอัตราส่วนของวัตถุดิบที่เหมาะสมจะทำให้วัตถุดิบสำเร็จมีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมกับการเผา หลังจากผ่านกระบวนการบดแล้ว จึงส่งวัตถุดิบสำเร็จไปยังถังผสมวัตถุดิบสำเร็จ (Raw meal homogenizing silo) เพื่อเก็บและผสมวัตถุดิบสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนส่งไปเผา กระบวนการเผาช่วงแรกเป็นชุดเพิ่มความร้อน (Preheater) จะค่อยๆ เพิ่มความร้อนให้แก่วัตถุดิบสำเร็จ แล้วส่งวัตถุดิบสำเร็จไปเผาในหม้อเผาปูน ซึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงประมาณ 1,200 ถึง 1,400 °C จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีตามลำดับ จนในที่สุดกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker) จากนั้นทำให้ปูนเม็ดเย็นลงแล้วจึงลำเลียงปูนเม็ดไปเก็บไว้ที่ยุ้งเก็บเพื่อรอการบดปูนเม็ดต่อไป [2]

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากการทำงานภายในหม้อเผาปูนซีเมนต์มีอุณหภูมิสูงมาก ดังนั้น เพื่อรักษาการทำงานให้มีอุณหภูมิสูงและป้องกันเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์จากอุณหภูมิสูง วัสดุทนไฟ (Refractory) จึงถูกนำมาสร้างเป็นระบบไลน์นิ่งทนไฟ (Refractory lining) ประเภทวัสดุทนไฟที่ใช้แตกต่างกันไปตามสภาวะภายในหม้อเผาปูนซีเมนต์ เช่น บริเวณทางออกและทางเข้า จะใช้วัสดุทนไฟประเภทคอนกรีตทนไฟ (Refractory castable) นอกจากนี้ จะเป็นวัสดุทนไฟประเภทอิฐทนไฟ (Refractory brick) เป็นหลัก โครงสร้างไลน์นิ่งบริเวณทางออกมีลักษณะเป็นคอนกรีตทนไฟเสริมเหล็กยึด (Anchor) ซึ่งเหล็กยึดเป็นชนิดเหล็กแผ่นรูป Y ถูกเชื่อมไว้กับเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ เมื่อหม้อเผาปูนซีเมนต์เดินเครื่องทำงานอย่างต่อเนื่อง วัสดุไลน์นิ่งจะอยู่ภายใต้ภาระทางความร้อน ปัญหาสำคัญและบ่อยครั้งพบที่บริเวณทางออก ลักษณะที่เกิดกับบริเวณดังกล่าว สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ [1] 1) การแตกและการหลุดร่อน เนื่องจากโดนความร้อนและอิทธิพลลมที่หมุนวนจากหม้อเย็น 2) การเสื่อมของวัสดุและการสูญเสียมวลของคอนกรีตทนไฟ เนื่องจากโดนกัดกร่อนของเม็ดปูน การเสียดสีของเม็ดปูน และปฏิกิริยาทางเคมีของละอองเม็ดปูน นอกจากนี้ วัสดุไลน์นิ่งที่อยู่ภายใต้ภาระทางความร้อนที่แตกต่างกันจะนำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์ 3 แบบ คือ 1) เกรเดียนท์ความร้อน เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวด้านที่สัมผัสกับวัตถุดิบและผิวด้านที่สัมผัสกับเปลือกหม้อเผาซีเมนต์ 2) ความแตกต่างของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนระหว่างเหล็ก (เปลือกหม้อเผาและเหล็กยึด) และคอนกรีตทนไฟ [3,4,14,16] และ 3) วัฏจักรทางความร้อนระหว่างสัมผัสวัตถุดิบและไม่สัมผัสวัตถุดิบ ปรากฏการณ์เหล่านี้ อาจก่อให้เกิดความเค้นที่ผสมผสานไปด้วย ความเค้นดึง ความเค้นอัด และความเค้นเฉือน ความเค้นเหล่านี้อาจมีค่าสูงในไลน์นิ่งทนไฟ ดังนั้น สภาวะความเค้นจึงอาจเป็นสาเหตุของการแตก และปัญหาการหลุดร่อนในคอนกรีตทนไฟ ยิ่งไปกว่านั้น การขยายตัวจากความร้อนระหว่างคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดเป็นผลให้เกิดการก่อดำของการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตทนไฟ ทำให้ความแข็งแรงเสื่อมลง จนนำไปสู่การเสียหายของไลน์นิ่งทนไฟในที่สุด ด้วยปัญหาดังกล่าว ความต้องการอย่างมากสำหรับประสิทธิภาพการทำงานของไลน์นิ่งที่สูงขึ้น และลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาวัสดุทนไฟ ผู้ใช้งานกำลังมองหาวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพเพื่อการบรรลุเป้าหมายนี้ คือ การใช้งานคอนกรีตทนไฟหล่อสำเร็จ (Precast) [5] เข้าไปในระบบไลน์นิ่งทนไฟ ทั้งนี้ การออกแบบคอนกรีตทนไฟแบบหล่อสำเร็จต้องการความเข้าใจเกี่ยวกับ พฤติกรรมวัสดุคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด รวมทั้งปัจจัยจากจำนวนและชนิดเหล็กยึดในคอนกรีตทนไฟ ปัจจัยดังกล่าวยังขาดความเข้าใจดีพอ การศึกษานี้จะนำไปสู่การเข้าใจที่มากขึ้นของกระบวนการออกแบบไลน์นิ่งทนไฟเฉพาะส่วนโนสริง

การออกแบบที่เหมาะสมจะช่วยลดปัญหาการแตกร้าวและการหลุดร่อนของคอนกรีตทนไฟบริเวณโนสริงได้ เพื่อที่จะบรรลุวัตถุประสงค์การออกแบบโนสริงในสภาวะอุณหภูมิทำงาน คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ และการกระจายอุณหภูมิที่มีปฏิกิริยาต่อความเค้นในเนื้อคอนกรีตทนไฟเสริมเหล็กยึดถูกนำมาศึกษา โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อจะ

สร้างเครื่องมือช่วยในการออกแบบก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตโนสริงแบบคอนกรีตทนไฟหล่อสำเร็จ หวังว่าการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์ของการศึกษาโดยภาพรวม คือ เพื่อนำเสนอวิธีการวิเคราะห์การออกแบบส่วนโนสริงของระบบไลน์นิ่งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวัตถุประสงค์ย่อยของการศึกษา มีดังนี้

- 1) เพื่อศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมของการวิเคราะห์การกระจายความเค้นของโครงสร้างโนสริงในหม้อเผาปูนซีเมนต์
- 2) เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด
- 3) เพื่อศึกษาการกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อคอนกรีตทนไฟจากปัจจัยจำนวนเหล็กยึด
- 4) เพื่อศึกษาการกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อคอนกรีตทนไฟจากปัจจัยชนิดเหล็กยึด
- 5) เพื่อศึกษาการกระจายความเค้นวอนมิสเสส (Von-Mises stress) ของเหล็กยึด
- 6) เพื่อศึกษาการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยการคำนวณ
- 7) เพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อคุณสมบัติของวัสดุมีพฤติกรรมทางกลแบบไม่เชิงเส้นและพันธะการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีตทนไฟเป็นแบบลื่นไถลได้

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

- 1) ศึกษาการกระจายความเค้นในโครงสร้างโนสริงของหม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้ภาระทางความร้อนแบบคงตัว พฤติกรรมทางกลของวัสดุแบบเชิงเส้น และพันธะแรงยึดเหนี่ยวเป็นแบบยึดแน่นถาวร ด้วยปัจจัยจากจำนวนและชนิดของเหล็กยึด รวมทั้ง 8 กรณี
- 2) ศึกษาการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยการคำนวณ รวมทั้ง 2 กรณี และการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้ภาระทางความร้อนแบบคงตัว พฤติกรรมทางกลของวัสดุแบบไม่เชิงเส้น และพันธะแรงยึดเหนี่ยวเป็นแบบลื่นไถล ด้วยปัจจัยจากปริมาตรของคอนกรีตทนไฟ รวมทั้ง 4 กรณี
- 3) ทำการทดลองด้วยเตาเผาไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมาเฉพาะงานวิจัยนี้ สำหรับให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่างทดลอง โดยจำลองจากส่วนตัดรอบเหล็กยึดของโครงสร้างโนสริง เพื่อตรวจวัดค่าความเครียดและอุณหภูมิ และเปรียบเทียบผลดังกล่าวระหว่างการจำลองและการทดลอง

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ประกอบด้วย 6 บท บทที่ 1) ทบทวนกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์โดยย่อ เพื่อให้เข้าใจถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา และขอบเขตของการศึกษา บทที่ 2) ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หลักการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึด พฤติกรรมทางกลของวัสดุทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริมแรง และพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็ก บทที่ 4) วิธีดำเนินการวิจัย ในบทนี้ เป็นการค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับ การทำงานของหม้อเผาปูนซีเมนต์ ระบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไลน์นิ่งทไฟ ปัจจัยที่ทำลายระบบไลน์นิ่งทไฟ แนวความคิดการออกแบบระบบไลน์นิ่งทไฟส่วน
โนสริง พดติกรรมวัสดุคอนกรีตทนไฟภายใต้ภาระทางความร้อนและนำเข้าสู่การศึกษาการกระจาย
ความเค้นเนื่องจากความร้อนในโครงสร้างโนสริงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ต่อจากนั้น เป็นการ
ออกแบบการทดลอง การปฏิบัติการทดลอง การศึกษาพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีต
การศึกษาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยวิธีการคำนวณ การศึกษาผลของระยะห่างด้วยระเบียบวิธีไฟ
ไนต์เอลิเมนต์ บทที่ 5 ผลลัพธ์การวิจัย ในบทนี้ นำเสนอผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผล
ของการทดลอง ตลอดจนเปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองและการทดลอง และในบทที่ 6 บทสรุป
ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 สรุปสาระสำคัญจากวรรณกรรม

Chen และคณะ [14] ศึกษาโครงสร้างวัสดุทนไฟโดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและควบคุมการทดลอง เพื่อศึกษาเหล็กยึดที่มีปฏิกิริยาต่อระบบโลนนิ่งของวัสดุทนไฟแบบชั้นเดียวในท่อทรงกระบอก (เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ft) ที่อุณหภูมิ 760 °C พบว่าเหล็กยึดส่งผลกระทบต่อโลนนิ่ง 2 ทางด้วยกัน คือ 1) การลดลงของอุณหภูมิในโลนนิ่งใกล้ผิวด้านร้อน (Hot face) ก่อให้เกิดความเค้นดึงในแนวเส้นรอบวงในบริเวณนั้น และ 2) มีแนวโน้มผลักดันให้วัสดุโลนนิ่งออกจากผิวด้านร้อน เนื่องจากการขยายตัวจากความร้อนไม่เท่ากันระหว่างวัสดุโลนนิ่งและวัสดุเหล็กยึด การทดลองแสดงให้เห็นว่าเปลือกหม้อด้านร้อน (Hot shell) มีแนวโน้มที่จะดึงออกจากโลนนิ่งทำให้เหลือช่องว่างในเปลือกหม้อด้านร้อนกับเหล็กยึด การขยายตัวของเปลือกหม้อด้านร้อนสามารถสร้างความเค้นดึงในแนวเส้นรอบวงได้สูงในโลนนิ่ง ผลทำให้เกิดการแตกในแนวรัศมีได้มาก ผู้วิจัยสรุปว่าเหล็กยึดที่ยึดหย่อน (เช่น การเคลือบ) ดูเหมือนจะดีกว่าแบบแข็งเกร็งสำหรับการติดตั้งในโลนนิ่ง อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยกล่าวว่าเหล็กยึดแบบเรขาคณิตและเหล็กยึดแบบเคลือบดูเหมือนจะไม่ส่งผลกระทบต่อการกระจายความเค้นตามแนวเส้นรอบวงเป็นสำคัญ

การวิเคราะห์การเสียหายโครงสร้างวัสดุทนไฟ และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เพื่อทำนายความเค้นของเหล็กยึด โดย Palmer และ Tan [15] ได้แสดงเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบไม่เชิงเส้น ที่สามารถใช้ทำนายและออกแบบโครงสร้างวัสดุทนไฟของถึงความดันบริเวณหลังคา เหล็กยึดวัสดุทนไฟถูกจำลองเอลิเมนต์แบบแท่ง (Truss elements) และกำหนดจุดเชื่อมต่อแบบสลิ้นเกล็ด (Bond slip) ระหว่างเหล็กและคอนกรีต คุณสมบัติของวัสดุแบบไม่เชิงเส้น การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าข้อบกพร่อง (Defect) ในคอนกรีตทนไฟสามารถทำให้เกิดความเค้นของเหล็กยึดเพิ่มขึ้น และข้อบกพร่องในช่องว่างรอบเหล็กยึด สามารถทำให้เกิดรอยแตกที่ตำแหน่งเหล่านั้น การวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นว่ารอยแตกที่แพร่ผ่านเหล็กยึดสามารถเพิ่มความเค้นเหล็กยึดที่จุดนั้น และการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนจุดเหล็กยึด ระยะห่างจาก 200 ถึง 250 mm ภายใต้ภาระแรงโน้มถ่วงจะเพิ่ม/ลดความเค้นเหล็กยึด โดยประมาณ 22% ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม ที่สำคัญยังได้พบว่าข้อบกพร่องในผิวด้านร้อนของคอนกรีตทนไฟ จะเข้าสู่จุดอ่อนแอต่อโครงสร้างและเพิ่มโอกาสของการแตก การแตกของผิวด้านร้อนสามารถนำไปสู่ช่องทางสำหรับกระบวนการก๊าซในการเจาะและโจมตีเหล็กยึด ซึ่งจะช่วยเร่งการกัดกร่อนและความล้าเหลวของเหล็กยึด นอกจากนี้รอยแตกในผิวด้านร้อนข้ามผ่านเหล็กยึด สามารถเพิ่มความเค้นดัดบนเหล็กยึด เนื่องจากทั้งแรงโน้มถ่วงและภาระทางความร้อน ผู้วิจัยได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจำเป็นสำหรับการออกแบบวัสดุทนไฟ และได้แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสามารถช่วยให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพและรวดเร็วสำหรับโครงสร้างวัสดุทนไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อพิจารณาประเภทและระยะห่างของเหล็กยึด ดังนั้น สรุปได้ว่าการติดตั้งของคอนกรีตทนไฟต้องใช้ความระมัดระวังสูง และข้อบกพร่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผิวด้านร้อนจำเป็นต้องหลีกเลี่ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยเชิงทดลองเกี่ยวกับปัญหาเหล็กยึดคอนกรีตทนไฟ โดย Andrieux และคณะ [16] เพื่อศึกษาเกี่ยวกับความสำคัญของสนามความเค้นรอบๆเหล็กยึด ภายใต้วัฏจักรทางความร้อน (Heating/Cooling) เป็นการทดลองในสภาวะการทำงานของหม้อไอน้ำของโรงงานอุตสาหกรรม โดยการใช้เตาเผาแบบพิเศษสร้างความร้อนให้แก่ชิ้นงานทดลอง ซึ่งมีเหล็กยึดอยู่ข้างในจำนวน 1 อัน เพื่อที่จะจำลองสภาวะทางกลเนื่องจากความร้อน การติดตามผลความเสียหายรอบๆเหล็กยึดในคอนกรีตทนไฟโดยวิธีการอะคูติกอิมิชชัน (Acoustic emission) และทำการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองสเมียร์แครกกิง (Smearred crack model) ถูกใช้เพื่อจำลองการแตกร้าวประกอบเหตุการณ์นั้น ผลการศึกษาสรุปว่า การให้ความร้อนในตอนแรกทำให้เกิดการเสียหายมาก เพราะความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวระหว่างคอนกรีตทนไฟและเหล็ก และอิทธิพลของวัฏจักรทางความร้อน (Heating/Cooling) ต่อการเสียหายส่งผลกระทบต่อระยะเวลาเมื่อเปรียบเทียบกับ การให้ความร้อนในตอนแรก ผู้วิจัยกล่าวว่าเพื่อป้องกันความเสียหายของวัสดุทนไฟในระหว่างการให้ความร้อนตอนแรก เหล็กยึดต้องเคลือบด้วยวัสดุที่เผาไหม้ในขณะที่ให้ความร้อนและทำให้เหล็กยึดมีอิสระที่จะขยายตัว

งานวิจัยวิเคราะห์โครงสร้างไลน์ขนาดใหญ่ ที่ถูกยึดไว้กับโครงเหล็กที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขภาระทางความร้อน แต่การคำนวณโครงสร้างไลน์นี้จะมีขนาดใหญ่และจำนวนเหล็กยึดมาก การจำลองแบบ 3 มิติ นั้นเป็นไปได้ ดังนั้น ผู้วิจัยโดย Gasser และคณะ [3] จึงนำเสนอวิธีการวิจัย 2 วิธีการ วิธีการแรกสำหรับวิเคราะห์ปัญหาเฉพาะที่ (Local scale) ของพฤติกรรมเหล็กยึดฝังตัวในวัสดุทนไฟ พฤติกรรมวัสดุทนไฟถูกสมมติเป็นแบบจำลองสเมียร์แครกกิง (Smearred crack model) ซึ่งเป็นที่ยอมรับในการคำนวณของการเสียหาย แบบจำลองดังกล่าวถูกตรวจสอบพฤติกรรมแรงดึงด้วยการทดสอบการตัดแบบสี่จุด และติดตามผลการแตกร้าวรอบๆเหล็กยึดในคอนกรีตทนไฟโดยวิธีการอะคูติกอิมิชชัน (Acoustic emission) และการทดลองการดึงออก (Pull out) ในเตาเผาแบบเฉพาะเพื่อสร้างความร้อนให้แก่ชิ้นงานทดลอง ผลลัพธ์จากทั้งสองมีความสอดคล้องกัน และอีกหนึ่งวิธีสำหรับวิเคราะห์แผ่นเปลือกสองชั้นที่เปรียบเสมือน เหล็กยึด ไลน์นิ่ง และโครงเหล็ก แบบจำลองถูกบังคับด้วยวิธีการผกผัน (Inverse method) และใช้ผลลัพธ์จากวิธีการแรกมาประกอบร่วมกัน

งานวิจัยนำเสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับปัญหาของความเค้นยึดเหนี่ยว (Bond stress) ที่มีปฏิกิริยาต่อกันระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมแรง โดย Alaka [19] โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อหาค่าความเค้นทั้งแนวรัศมีและแนวเส้นรอบวง ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาตรคอนกรีตที่จัดเกาะเหล็กเสริมแรง ซึ่งเป็นสาเหตุของการแตกในคอนกรีตแบบจำลองคำนึงถึงการสูญเสียแรงดันสัมผัสและการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สัมผัสผิว ผู้วิจัยได้ทำการทดลองการดึงออก (Pull out test) เพื่อเปรียบเทียบผลกับแบบจำลอง ผลลัพธ์จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน

บทที่ 3

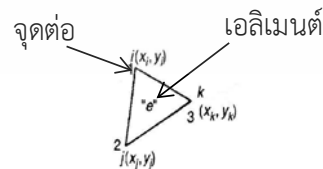
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการนำเอาโดเมนของปัญหาที่สนใจมาแบ่งเป็นโดเมนย่อยหรือเอลิเมนต์ (Element) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จากนั้น พิจารณาเอลิเมนต์ที่ละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำลังศึกษาอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำเอาทุกเอลิเมนต์มาประกอบเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้น จึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่นี้ แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น จากคำอธิบายจะเห็นได้ว่า ความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น และยังขึ้นอยู่กับการสมมุติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation functions) ที่ใช้กับแต่ละเอลิเมนต์นั้น กล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมุติขึ้นมานั้นมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์อาจสมมุติให้อยู่ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น รูปแบบการกระจายเชิงเส้น (Linear stress distribution) เป็นต้น



- S_1 = ขอบที่กำหนดอุณหภูมิ
- S_2 = ขอบฟลักซ์ความร้อนที่กำหนด
- S_3 = ขอบการพาที่เกิดขึ้น



(ก) บริเวณที่สนใจ

(ข) แบบอุดมคติ

รูปที่ 3.1 การแบ่งรูปร่างลักษณะของโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 สมการพื้นฐานสำหรับการถ่ายเทความร้อน

3.1.1.1 สมการควบคุมสำหรับวัตถุแบบ 3 มิติ (Governing Equation)

พิจารณาเอลิเมนต์ของวัสดุในวัตถุของแข็ง ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2 เอลิเมนต์ที่อยู่ในรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีขนาด dx, dy และ dz สมการสมดุลพลังงานอาจกล่าวได้ ดังนี้

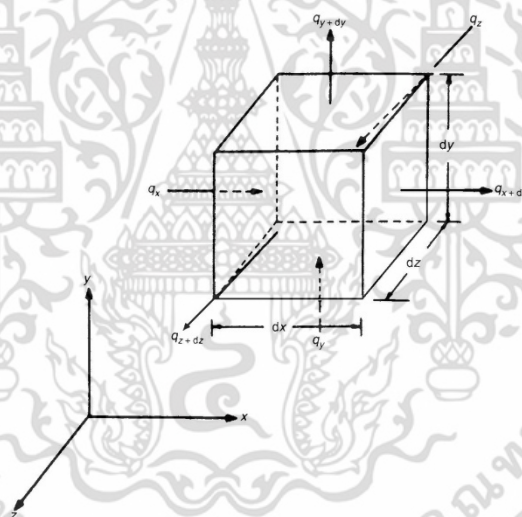
$$\text{ความร้อนไหลเข้าในช่วงเวลา } dt + \text{ความร้อนที่เกิดจากแหล่งภายในระหว่าง } dt = \text{ความร้อนไหลออกระหว่าง } dt + \text{การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในช่วง } dt$$

(3.1)

จากสมการ (3.1) สามารถจะแสดงได้เป็น ดังนี้

$$(q_x + q_y + q_z)dt + \dot{q}dx dy dz dt = (q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz}) + \rho c dT dx dy dz \quad (3.2)$$

โดยที่ q_x = ความร้อนไหลเข้าสู่ผิวหน้าตำแหน่ง x



รูปที่ 3.2 เอลิเมนต์ในพิกัดคาร์ทีเซียน [10]

$$= -k_x A_x \frac{\partial T}{\partial x} = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} dy dz \quad (3.3)$$

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

$$\begin{aligned} &= q|_{x+dx} \approx q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \\ &= -k_x A_x \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x A_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \\ &= -k_x \frac{\partial T}{\partial x} dy dz - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dz \end{aligned} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

k_x คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุในทิศทาง x , A_x คือ พื้นที่ตั้งฉากในทิศทาง x โดยที่ ความร้อนไหล $= dydz$, T คือ อุณหภูมิ, \dot{q} คือ อัตราการเกิดความร้อนต่อหน่วยปริมาตร (ต่อหน่วยเวลา), ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ และ c คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ โดยแทนค่าสมการที่ (3.3) และ (3.4) และแสดงความหมายที่คล้ายกันสำหรับ q_y, q_{y+dy}, q_z และ q_{z+dz} ในสมการที่ (3.2) และทำการแบ่งแต่ละพจน์ด้วย $dx dy dz dt$ ได้ ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.5)$$

สมการที่ (3.5) เป็นสมการควบคุมเชิงอนุพันธ์ การนำความร้อนในวัตถุของแข็งแบบออร์โธโทรปิก (Orthotropic) ถ้าสมมุติให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนในทิศทาง x, y และ z เหมือนกัน $k_x = k_y = k_z = k$ ค่าคงที่ ของแข็งที่มีคุณสมบัติเป็นแบบเดียวกัน (Isotropic body) วัตถุอยู่ในสถานะคงที่และไม่มีแหล่งความร้อนใดๆ สมการที่ (3.5) สามารถจะเขียนได้ ดังนี้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (3.6)$$

3.1.1.2 เงื่อนไขที่ขอบและเงื่อนไขเริ่มต้น

เนื่องจากสมการอนุพันธ์ที่ (3.6) เป็นอนุพันธ์อันดับสอง ประกอบด้วย 2 เงื่อนไขขอบเขตที่ต้องกำหนด เงื่อนไขขอบเขตที่เป็นไปได้ คือ

$$T(x, y, z, t) = T_0 \text{ สำหรับ } t > 0 \text{ บน } S_1 \quad (3.7)$$

$$k_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot l_x + k_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \cdot l_y + k_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \cdot l_z + h(T - T_\infty) = 0 \text{ สำหรับ } t > 0 \text{ บน } S_3 \quad (3.8)$$

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

$$T(x, y, z, t=0) = \bar{T}_0(x, y, z) \text{ ใน } V \quad (3.9)$$

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

3.1.1.3 การกำหนดปัญหาในรูปแบบแปรผัน (Variational Form)

ปัญหาการนำความร้อนในแบบ 3 มิติสามารถที่ระบุในแบบแปรผัน (Variational) ที่สมมูลกันได้ทั้งหมดเป็น ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \frac{1}{2} \iiint_V \left[k_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + k_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - 2 \left(\dot{q} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) T \right] dV \quad (3.10)$$

และสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตของสมการที่ (3.7) และ (3.8) และเงื่อนไขเริ่มต้นของสมการที่ (3.9) สมการที่ (3.8) จะถูกเพิ่มให้แก่ฟังก์ชันของสมการที่ (3.10) เพื่อที่ว่าเมื่อฟังก์ชันรวมกันจะถูกลดเงื่อนไขขอบเขตของสมการที่ (3.8) จะสอดคล้องโดยอัตโนมัติ สิ่งสำคัญที่เกี่ยวข้องกับสมการที่ (3.8) ถูกกำหนดให้มา ดังนี้

$$\iint_{S_3} \frac{1}{2} h (T - T_\infty)^2 dS_3 \quad (3.11)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันรวมที่สภาวะคงที่และไม่มีแหล่งความร้อนใดๆจะลดลงมาเป็น ดังนี้

$$I = \frac{1}{2} \iiint_V \left[k_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + k_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dV + \frac{1}{2} \iint_{S_3} h (T - T_\infty)^2 dS_3 \quad (3.12)$$

สมการไฟต์ในเอลิเมนต์สำหรับปัญหาการนำความร้อนสามารถได้มาโดยวิธีการแปรผัน (Variational approach) ในวิธีการนี้ พิจารณาค่าต่ำที่สุดของฟังก์ชัน I กำหนดให้โดยสมการที่ (3.13) ภายใต้ความสอดคล้องของเงื่อนไขขอบเขตของสมการที่ (3.7) และเงื่อนไขเริ่มต้นของสมการที่ (3.9) ขั้นตอนที่เกี่ยวข้องในการหาอนุพันธ์ของสมการไฟต์เอลิเมนต์สามารถศึกษาได้จากตำรา [10]

$$T^{(e)}(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \bar{T}^{(e)} \quad (3.13)$$

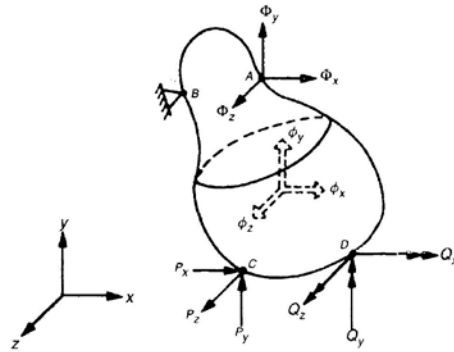
3.1.2 สมการพื้นฐานสำหรับของแข็ง

3.1.2.1 สมการสมดุลภายนอก

หากวัตถุอยู่ในสภาวะสมดุลภายใต้ภาระไม่เปลี่ยนแปลงตามที่กำหนด แรงปฏิกิริยาและโมเมนต์พัฒนาขึ้นที่จุดรองรับ แรงและโมเมนต์ภายนอกต้องสมดุล อีกนัยหนึ่ง สมการสมดุลของแรงและโมเมนต์สำหรับวัตถุรวม (สมการสมดุลจากภายนอก) ต้องสอดคล้องกัน ถ้า ϕ_x, ϕ_y และ ϕ_z คือ แรงวัตถุ (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 3.3) และ Q_x, Q_y และ Q_z คือ โมเมนต์ภายนอก (ประกอบด้วยปฏิกิริยาที่จุดรองรับ เช่น B, C , และ D ในรูปที่ 3.3) สมการสมดุลภายนอกอาจกล่าวได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \int_S \bar{\Phi}_x ds + \int_V \phi_x dv + \sum P_x &= 0 \\ \int_S \bar{\Phi}_y ds + \int_V \phi_y dv + \sum P_y &= 0 \\ \int_S \bar{\Phi}_z ds + \int_V \phi_z dv + \sum P_z &= 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ระบบแรงสมดุลร่วมกันของวัตถุ [10]

สำหรับสมดุลโมเมนต์

$$\begin{aligned} \int_S (\phi_z y - \phi_y z) ds + \int_V (\phi_z y - \phi_y z) dv + \sum Q_x &= 0 \\ \int_S (\phi_x z - \phi_z x) ds + \int_V (\phi_x z - \phi_z x) dv + \sum Q_y &= 0 \\ \int_S (\phi_y x - \phi_x y) ds + \int_V (\phi_y x - \phi_x y) dv + \sum Q_z &= 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

3.1.2.2 สมการสมดุลภายใน

เนื่องจากการประยุกต์ใช้ภาวะความเค้นจะพัฒนาขึ้นภายในวัตถุ หากเราพิจารณาเอลิเมนต์ของวัสดุภายในวัตถุ ต้องอยู่ในสภาวะสมดุลเนื่องจากความเค้นภายในพัฒนาขึ้น จึงนำไปสู่สมการที่เรียกว่า สมการสมดุลภายใน ตามทฤษฎีภาวะความเค้นที่จุดใดๆ ตรงแรงวัตถุถูกนิยามด้วย 9 องค์ประกอบในพจน์ของความเค้น $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yx}, \sigma_{yz}, \sigma_{zy}, \sigma_{zx}$, และ σ_{xz} ซึ่ง 3 ตัวแรกเป็นองค์ประกอบของความเค้นตั้งฉาก และอีก 6 ตัวสุดท้ายเป็นองค์ประกอบของความเค้นเฉือน สมการสมดุลภายในสัมพันธ์กันกับ 9 องค์ประกอบของความเค้น สามารถได้มาโดยการพิจารณาสมดุลโมเมนต์และสมดุลแรงที่กระทำต่อปริมาตร แสดงในรูปที่ 3.4 สมดุลโมเมนต์รอบแกน x, y และ z สมมติให้ไม่มีโมเมนต์ของวัตถุจึงนำไปสู่ความสัมพันธ์

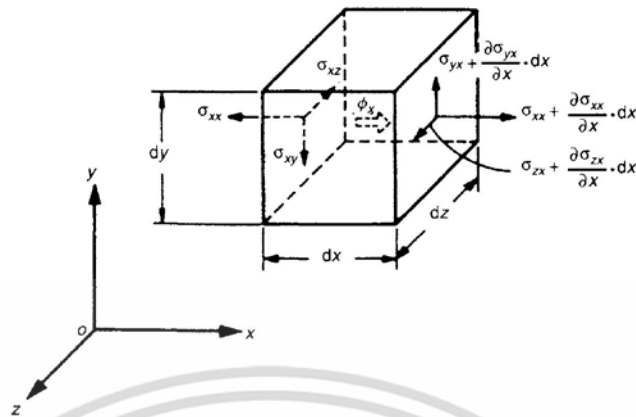
$$\sigma_{yx} = \sigma_{xy}, \quad \sigma_{zy} = \sigma_{yz}, \quad \sigma_{xz} = \sigma_{zx} \quad (3.16)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + \phi_x &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + \phi_y &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \phi_z &= 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 3.4 ปริมาตรของเอลิเมนต์ที่พิจารณาสำหรับสถานะสมดุลภายใน [10]

3.1.2.3 ความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด (Constitutive Relations)

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

$$\bar{\epsilon} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{Bmatrix} = [C]\bar{\sigma} + \bar{\epsilon}_0 \equiv [C] \left\{ \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx_0} \\ \epsilon_{yy_0} \\ \epsilon_{zz_0} \\ \epsilon_{xy_0} \\ \epsilon_{yz_0} \\ \epsilon_{zx_0} \end{Bmatrix} \right\} \quad (3.18)$$

ที่ $[C]$ คือ เมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่นกำหนดให้เป็น ดังนี้

$$[C] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$\bar{\epsilon}_0$ คือ เวกเตอร์ความเครียดเริ่มต้น E คือ โมดูลัสของความยืดหยุ่น และ ν คือ อัตราส่วนปัวซองของวัสดุ ในกรณีของการให้ความร้อนวัสดุแบบไอโซโทรปิก เวกเตอร์ความเครียดเริ่มต้นกำหนดให้เป็น ดังนี้

$$\vec{\varepsilon}_0 = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx_0} \\ \varepsilon_{yy_0} \\ \varepsilon_{zz_0} \\ \varepsilon_{xy_0} \\ \varepsilon_{yz_0} \\ \varepsilon_{zx_0} \end{Bmatrix} = \alpha T \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.20)$$

ที่ α คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน และ T คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง บางครั้งแสดงความหมายความเค้นในพจน์ของความเครียด โดยประกอบด้วยความเครียดเนื่องจากความร้อนจากสมการที่ (3.18) สามารถแทนกลับเพื่อให้ได้สมการ

$$\vec{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix} = [D](\vec{\varepsilon} - \vec{\varepsilon}_0) \equiv [D] \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{Bmatrix} - \frac{E\alpha T}{1-2\nu} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.21)$$

ที่เมทริกซ์ $[D]$ ถูกกำหนดให้เป็น

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

3.1.2.4 ความสัมพันธ์ความเครียดกับการกระจัด

การเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุที่ยืดหยุ่นได้ (Elastic body) ภายใต้กำหนดให้ระบบใดๆ ด้วยเงื่อนไขการกระจายอุณหภูมิและภาระ สามารถที่จะอธิบายได้อย่างสมบูรณ์ด้วย 3 องค์ประกอบของการกระจัด u, v และ w ขนานกับทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ โดยทั่วไปแต่ละขององค์ประกอบเหล่านี้ u, v และ w คือ ฟังก์ชันของพิกัด x, y และ z ก่อให้เกิดความเครียดในวัตถุที่สามารถที่จะแสดงได้ในพจน์ของการกระจัด u, v และ w ในส่วนนี้ สมมุติการเปลี่ยนรูปร่างมีขนาดเล็ก เพื่อให้ความสัมพันธ์ความเครียดกับการกระจัดยังคงเป็นเชิงเส้น

เพื่อจะแสดงความหมายขององค์ประกอบความเครียดตั้งฉาก ε_{xx} และ ε_{yy} และองค์ประกอบความเครียดเฉือน ε_{xy} พิจารณาเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมขนาดเล็ก OACB ซึ่งด้าน (ของความยาว dx และ dy) ตั้งอยู่ขนานกับแกนพิกัดก่อนการเปลี่ยนรูปร่าง เมื่อวัตถุประสบกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่างภายใต้การกระทำจากการกระจายตัวจากภาระภายนอกและอุณหภูมิ เอลิเมนต์ OACB เปลี่ยนรูปร่างไปเป็นรูปร่าง O'A'C'B' ดังที่แสดงในรูปที่ 3.5 เราสังเกตได้ว่าเอลิเมนต์ OACB มี 2 ประเภทในการเปลี่ยนรูปร่าง คือ การเปลี่ยนแปลงในขนาดและอีกอย่างหนึ่ง คือ การเสียรูปเชิงมุม

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

$$\epsilon_{xx} = \frac{\left[dx + \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot dx \right) - u \right] - dx}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.23)$$

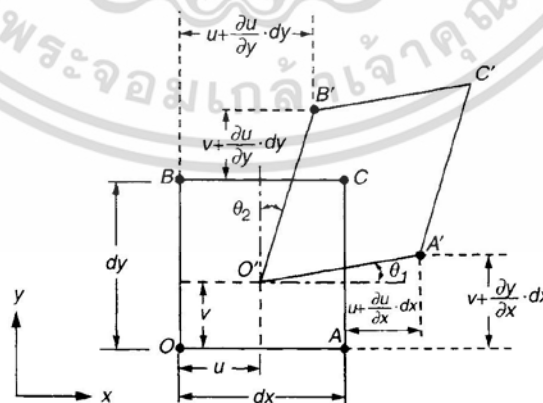
$$\epsilon_{yy} = \frac{\left[dy + \left(v + \frac{\partial v}{\partial y} \cdot dy \right) - v \right] - dy}{dy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.24)$$

ความเครียดเฉือนถูกนิยามตามการลดลงในมุมด้านขวาระหว่างเส้น OA และ OB ซึ่งที่มุมด้านขวาแต่ละมุมก่อนการเปลี่ยนรูปร่าง ด้วยเหตุนี้การแสดงความหมายของความเครียดเฉือน ϵ_{xy} สามารถที่จะได้มาเป็นดังนี้

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

ถ้าการกระจัดถูกสมมุติให้มีขนาดเล็ก ϵ_{xy} สามารถที่จะแสดงได้เป็น ดังนี้

$$\epsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (3.25)$$



รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนรูปร่างของเอลิเมนต์ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.26)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3.27)$$

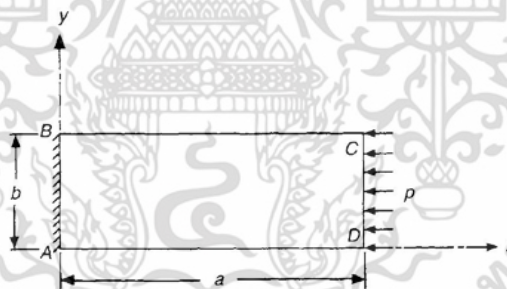
และ

$$\varepsilon_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3.28)$$

3.1.2.5 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

เงื่อนไขขอบเขตสามารถเป็นไปได้ทั้งตามการกระจัดหรือตามความเค้น เงื่อนไขขอบเขตที่ต้องการตามการกระจัด บางการกระจัดเพื่อให้ได้ผลบางจุดบนขอบของวัตถุ ขณะที่เงื่อนไขขอบเขตที่ต้องการตามความเค้น ซึ่งก่อให้เกิดความเค้นจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุลกับแรงภายนอกที่ใช้กับบางจุดบนขอบของวัตถุ ตัวอย่างเช่น พิจารณาแผ่นแบนภายใต้ภาระในระนาบ แสดงในรูปที่ 3.6 ในกรณีนี้เงื่อนไขขอบเขตสามารถแสดงได้เป็น ดังนี้

เงื่อนไขขอบเขตการกระจัด $u = v = 0$ ตามขอบ AB และเงื่อนไขขอบเขตความเค้น $\sigma_{yy} = \sigma_{xy} = 0$ ตามขอบ BC และ AD $\sigma_{xx} = -p$, $\sigma_{yy} = \sigma_{xy} = 0$ ตามขอบ CD



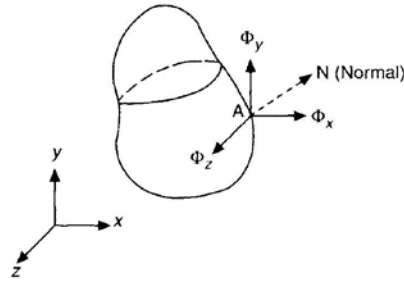
รูปที่ 3.6 แผ่นราบภายใต้ภาระในระนาบ [10]

สำหรับสภาวะสมดุลก่อให้เกิดความเค้น และใช้แรงผิวที่จุด A ของรูปที่ 3.7 สมการดังต่อไปนี้ต้องสอดคล้องกัน

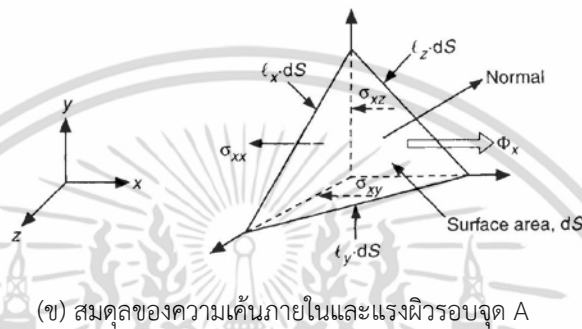
$$\begin{aligned} l_x \sigma_{xx} + l_y \sigma_{xy} + l_z \sigma_{xz} &= \Phi_x \\ l_x \sigma_{xy} + l_y \sigma_{yy} + l_z \sigma_{yz} &= \Phi_y \\ l_x \sigma_{xz} + l_y \sigma_{yz} + l_z \sigma_{zz} &= \Phi_z \end{aligned} \quad (3.29)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) องค์ประกอบของแรงที่ผิว



(ข) สมดุลของความเค้นภายในและแรงผิวรอบจุด A

รูปที่ 3.7 แรงกระทำที่ผิววัตถุ [10]

3.1.2.6 วิธีการแปรผัน (Variational Method)

หลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด พลังงานศักย์ของวัตถุที่ยึดหยุ่นได้ π_p ถูกนิยาม ดังนี้

$$\pi_p = \pi - W_p \quad (3.30)$$

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

$$\delta\pi_p(u, v, w) = \delta\pi(u, v, w) - \delta W_p(u, v, w) = 0 \quad (3.31)$$

สิ่งสำคัญที่จะต้องทราบการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวกับการกระจัดในสมการที่ (3.31) ส่วนของแรงและความเค้นถูกสมมุติให้คงที่ พลังงานจากความเครียดของวัตถุที่ยึดหยุ่นแบบเชิงเส้นถูกกำหนดให้ดังนี้

$$\pi = \frac{1}{2} \iiint_V \bar{\epsilon}^T \bar{\sigma} dV \quad (3.32)$$

ที่ V คือ ปริมาตรของวัตถุโดยการใช้ความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดของสมการที่ (3.21)

พลังงานความเครียด ในความเครียดเริ่มต้น $\bar{\epsilon}_0$ สามารถแสดงได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\pi = \frac{1}{2} \iiint_V \vec{\varepsilon}^T [D] \vec{\varepsilon} dV - \iiint_V \vec{\varepsilon}^T [D] \vec{\varepsilon}_0 dV \quad (3.33)$$

งานจากแรงภายนอกสามารถที่จะแสดงได้ ดังนี้

$$W_p = \iiint_V \vec{\phi}^T \vec{U} \cdot dV + \iint_{S_1} \vec{\Phi}^T \vec{U} \cdot dS_1 \quad (3.34)$$

ที่ $\vec{\phi} = \begin{Bmatrix} \bar{\phi}_x \\ \bar{\phi}_y \\ \bar{\phi}_z \end{Bmatrix}$ = เวกเตอร์ของแรงวัตถุที่รู้ค่า $\vec{\Phi} = \begin{Bmatrix} \bar{\Phi}_x \\ \bar{\Phi}_y \\ \bar{\Phi}_z \end{Bmatrix}$ = เวกเตอร์ของแรงผิวที่กำหนด

$\vec{U} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}$ = เวกเตอร์การกระจัด และ S_1 คือ ผิวของวัตถุ ซึ่งแรงที่ผิวถูกกำหนดโดยการใช้สมการที่

(3.18) และ (3.19) พลังงานศักย์ของวัตถุสามารถที่จะแสดงได้เป็น ดังนี้

$$\pi_p(u, v, w) = \frac{1}{2} \iiint_V \vec{\varepsilon}^T [D] (\vec{\varepsilon} - 2\vec{\varepsilon}_0) dV - \iiint_V \vec{\phi}^T \vec{U} \cdot dV - \iint_{S_1} \vec{\Phi}^T \vec{U} \cdot dS_1 \quad (3.35)$$

สมการไฟไนต์สำหรับปัญหาของแข็งสามารถได้มาโดยใช้หลักการของพลังงานศักย์เพื่อการได้มาของสมการสมดุลสำหรับปัญหา 3 มิติ ในส่วนนี้ เมื่อระดับความอิสระ (Degree of freedom) ของจุดต่อนั้นไม่รู้ค่าการกระจัด พลังงานศักย์ π_p ต้องแสดงไว้ในพจน์แรกของระดับความอิสระของจุดต่อ จากนั้น สมการสมดุลที่จำเป็นได้มาจากอนุพันธ์ย่อยอันดับหนึ่งของ π_p ที่เกี่ยวข้องแต่ละระดับความอิสระของจุดต่อเท่ากับศูนย์ ขั้นตอนที่เกี่ยวข้องในการหาอนุพันธ์ของสมการสมดุลสามารถศึกษาได้จากตำรา [10]

3.2 หลักการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึด

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

3.2.1 เงื่อนไขการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึด

ปัจจัยที่กำหนดระยะห่างเหล็กยึดสำหรับรองรับคอนกรีตทนไฟ มีดังนี้

- 1) วัสดุของเหล็กยึด
- 2) คอนกรีตทนไฟที่ใช้สำหรับชั้นผิวด้านร้อน
- 3) ความหนาของชั้นผิวด้านร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

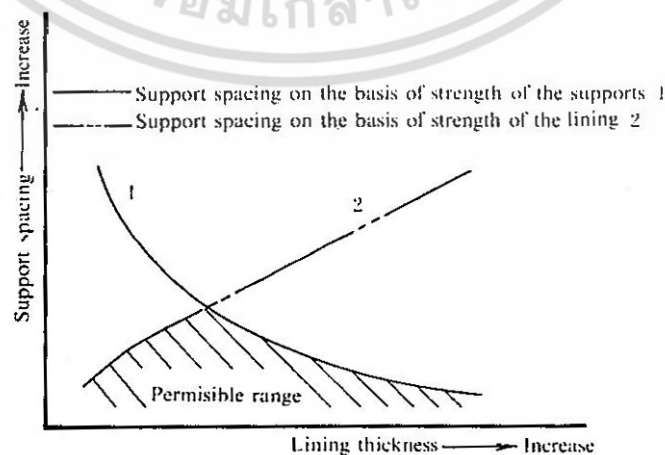
- 4) อุณหภูมิทำงานหม้อเผาปูนซีเมนต์
- 5) ตำแหน่งของคอนกรีตทนไฟ (เช่น แนวตั้ง, แนวนอน หรือเอียง)
- 6) รูปทรงของคอนกรีตทนไฟ
- 7) ขนาดของคอนกรีตทนไฟ
- 8) การมีอยู่ของความดันที่มีผลต่อคอนกรีตทนไฟ
- 9) วิธีการติดตั้ง
- 10) การเคลื่อนที่ทางกลของหม้อเผาปูนซีเมนต์หรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องและการมีอยู่ของแรงจากภายนอกที่อาจส่งผลกระทบต่อหม้อเผาปูนซีเมนต์

ความแข็งแรงของคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดอาจจะคำนวณได้บนพื้นฐานของเงื่อนไขจากข้อ 1 ถึง 6 ระยะห่างระหว่างเหล็กยึดเชิงทฤษฎีอาจจะได้มา แต่อย่างไรก็ตาม วิศวกรออกแบบต้องไม่ละเลยเงื่อนไขดังกล่าว ที่ไม่สามารถนำมาพิจารณาในการคำนวณ และต้องอาศัยประสบการณ์ที่ผ่าน มา บนพื้นฐานของปัจจัยเหล่านี้เป็นหลักทั้งหมด นั่นคือ ระยะห่างของเหล็กยึดที่ปลอดภัยสามารถหา ค่าได้ ตัวอย่างเช่น ในโรงงานปิโตรเคมี ระยะห่างระหว่างเหล็กยึดไลน์นึ่งของเครื่องปฏิกรณ์ตามทฤษฎี 300 mm ในทางปฏิบัติ ระยะห่างที่ยอมรับได้คือ 150 ถึง 200 mm ความแตกต่างระหว่างระยะเชิง ทฤษฎีและระยะที่แท้จริงถูกค้ำไว้จากหลายๆ ปัจจัย

3.2.2 ปัจจัยที่พิจารณาเมื่อคำนวณหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึด

ระยะห่างเหล็กยึดอาจมีการคำนวณบนพื้นฐานของ 2 อย่างด้วยกัน คือ 1) ความสัมพันธ์ ระหว่างความแข็งแรงของเหล็กยึดที่อุณหภูมิทำงานและน้ำหนักของคอนกรีตทนไฟที่รองรับ และ 2) ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงที่อุณหภูมิทำงานและน้ำหนักของคอนกรีตทนไฟเอง

ระยะห่างเหล็กยึดถูกคำนวณแยกจากกัน บนพื้นฐานของแต่ละวิธีการข้างต้น และน้อยมาก ที่สองค่าได้ถูกนำมาใช้เป็นระยะห่างที่แท้จริง ระยะห่างคำนวณบนพื้นฐานดังกล่าวข้างต้นมี ความสัมพันธ์ ดังแสดงรูปที่ 3.8 กราฟช่วงที่อนุญาตของระยะห่างเหล็กยึดแสดงไว้ในพื้นที่แรงเงา ล้อมรอบด้วยเส้นโค้ง สำหรับค่าของระยะห่างเหล็กยึดกำหนดด้วยวิธีการดังที่แสดงในกราฟ ได้แก่ วิธี ที่ 1 กำหนดให้ระยะห่างน้อยกับการเพิ่มขึ้นในความหนาของคอนกรีตทนไฟ นั่นคือ การเพิ่มขึ้นใน น้ำหนักของคอนกรีตทนไฟ วิธีที่ 2 ความหนาของคอนกรีตทนไฟมาก ความแข็งแรงมาก และ ระยะห่างเหล็กยึดมาก

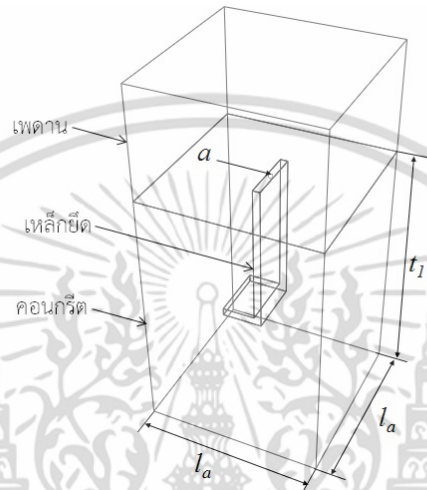


รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของไลน์นึ่งทนไฟและระยะห่างเหล็กยึด [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้เป็นการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การคำนวณหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดตามแนวนอน (เพดาน)

การหาค่าที่ถูกต้องเชิงทฤษฎีของระยะห่างเหล็กยึดจากความแข็งแรงเป็นสิ่งที่ยับยั้งมาก วิธีการดังต่อไปนี้อาจถูกนำมาใช้เพื่อหาระยะห่างโดยประมาณ เมื่อไลน์นิ่งทไฟอยู่ในตำแหน่งแนวนอน (เพดาน) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 การคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของเหล็กยึดที่อุณหภูมิทำงานและน้ำหนักของคอนกรีตทนไฟที่รองรับ และความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงที่อุณหภูมิทำงานและน้ำหนักของคอนกรีตทนไฟเอง ดังนี้



รูปที่ 3.9 คอนกรีตทนไฟเสริมเหล็กยึดตามแนวนอน (เพดาน)

3.2.3.1 การหาค่าระยะห่างอนุญาตจากความแข็งแรงการดึงของเหล็กยึด

เมื่อ t_1 คือ ความหนาของคอนกรีตทนไฟ (cm), l_a คือ ระยะห่างเหล็กยึด (cm) สมมติว่า ช่วงเท่ากันในทิศทางตั้งคู่, 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 (3.36)

$$w = l_a^2 \cdot t_1 \cdot \rho_1 \quad (3.36)$$

สมมติว่า ความเค้นดึงอนุญาตต่อเหล็กยึดถูกกำหนดให้โดย ดังสมการที่ (3.37)

$$a \cdot \sigma_m \geq l_a^2 \cdot t_1 \cdot \rho_1 \quad (3.37)$$

โดยที่ ระยะห่างเหล็กยึด ดังสมการที่ (3.38)

$$l_a \leq \sqrt{\frac{a \cdot \sigma_m}{t_1 \cdot \rho_1}} \quad (3.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 สมมติว่าภาระเนื่องจากน้ำหนักของคอนกรีตมีการกระจายตัวอย่างเท่าเทียมกันบนคานยื่น l_r ในความยาว และ $l_r \times t_1$

ในส่วนตัด กำหนดให้ w คือ ภาระเนื่องจากน้ำหนักของคอนกรีตทนไฟ (kg/cm) Z คือ ความยืดหยุ่นของส่วนตัด $l_r \times t_1$, M คือ โมเมนต์ดัดของคอนกรีตทนไฟ ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$), σ_r คือ ความเค้นดัดตอนุญาตของคอนกรีตทนไฟที่อุณหภูมิทำงาน (kgf/cm^2) โดยที่ โมเมนต์ดัดของคอนกรีตทนไฟ ดังสมการที่ (3.39)

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{2} \cdot w \cdot l_r^2 \\ w &= l_r \cdot t_1 \cdot \rho_1 \\ \therefore M &= \frac{1}{2} \cdot t_1 \cdot \rho_1 \cdot l_r^3 \end{aligned} \quad (3.39)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับโมเมนต์ ดังสมการที่ (3.40)

$$M = \sigma_r \cdot Z = \sigma_r \cdot \frac{1}{6} \cdot l_r \cdot l_r^2 \quad (3.40)$$

จากสมการที่ (3.39) และ (3.40) จะได้ความเค้นดัดตอนุญาต ดังสมการที่ (3.41)

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot t_1 \cdot \rho_1 \cdot l_r^3 &= \sigma_r \cdot \frac{1}{6} \cdot l_r \cdot t_1^2 \\ \therefore \sigma_r &\geq \frac{3 \cdot \rho_1 \cdot l_r^2}{t_1} \end{aligned} \quad (3.41)$$

จากนั้นระยะห่างที่ยอมรับ ดังแสดงในสมการที่ (3.42)

$$l_r \leq \sqrt{\frac{\sigma_r \cdot t_1}{3 \cdot \rho_1}} \quad (3.42)$$

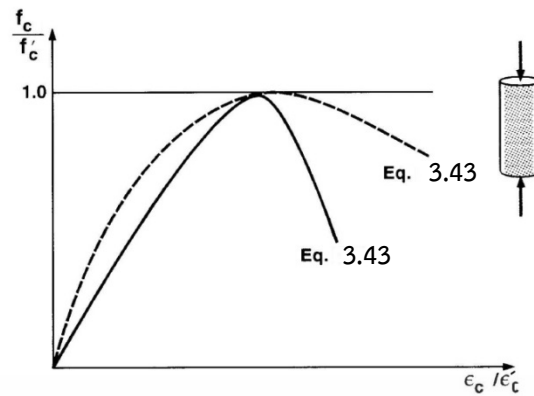
3.3 พฤติกรรมทางกลของวัสดุ

3.3.1 พฤติกรรมทางกลสำหรับคอนกรีต

3.3.1.1 แบบจำลองพฤติกรรมการอัด

Popovics (1970) และ Thorenfeldt (1987) ได้พัฒนาแสดงวิธีการเพื่อให้ได้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดจากการอัดของคอนกรีต ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคอนกรีต f_c และสอดคล้องกับความเครียด ε_c ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เป็นดังสมการที่ (3.41)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แบบจำลองคอนกรีตเชิงโครงสร้างของ Popovics และ Thorenfeldt [25]

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{n(\epsilon_c/\epsilon'_c)}{n-1+(\epsilon_c/\epsilon'_c)^{nk}} \quad (3.43)$$

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 คือ ϵ'_c, n, k สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่กำหนดโดย Collins และ Mitchell (1990) ซึ่งถูกแสดงในสมการที่ (3.44), (3.45), (3.46) และ (3.45) สำหรับคอนกรีตมีค่าความหนาแน่นปกติ n และ k สามารถหาได้ ดังนี้

$$\text{สำหรับ } \epsilon_c/\epsilon'_c \leq 1.0 \quad k = 1.0 \quad (3.44)$$

$$\text{สำหรับ } \epsilon_c/\epsilon'_c > 1.0 \quad k = 0.67 + \frac{f_c}{62} \geq 1.0 \quad (3.45)$$

$$n = 0.8 + \frac{f'_c}{17} \quad (3.46)$$

ถ้า n, f'_c และ E_c ทราบค่า ความเครียดที่ความเค้นสูงสุดสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\epsilon'_c = \frac{f'_c}{E_c} \left(\frac{n}{n-1} \right) \quad (3.47)$$

โดยทำการคำนวณ k, n และ ϵ'_c จากสมการที่ (3.44) ถึง (3.46) ความเค้นอัดของคอนกรีต f_c สำหรับความเครียดต่างๆ สามารถคำนวณจากสมการที่ (3.48)

$$f_c = \frac{n(\epsilon_c/\epsilon'_c) \times f'_c}{n-1+(\epsilon_c/\epsilon'_c)^{nk}} \quad (3.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความเครียดทุกค่า ความเครียดพลาสติกถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.49) และ (3.50)

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_t - \varepsilon_{el} \quad (3.49)$$

$$\varepsilon_{el} = \frac{f_c}{E_c} \quad (3.50)$$

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

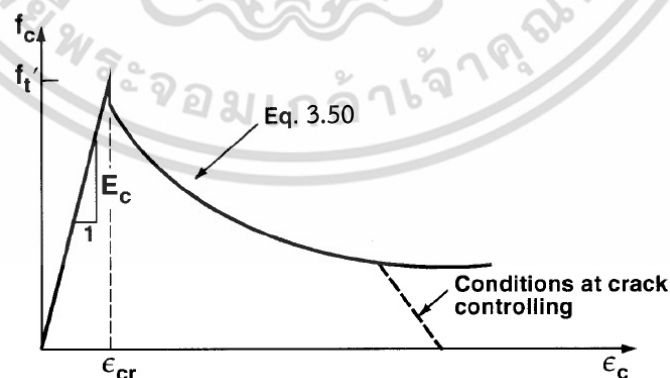
ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงและความเครียดดึงแบบเชิงเส้นถูกใช้กระทั่งความเค้นดึงหลักของคอนกรีตเข้าใกล้ความเค้นดึงสูงสุด f_t' โดยถูกประมาณค่า ดังสมการที่ (3.51)

$$f_t' = 0.6\sqrt{f_c'} \quad (3.51)$$

เนื่องจากอิทธิพลของพันธะแรงยึดเหนี่ยว ความเค้นดึงสามารถพัฒนาในคอนกรีตระหว่างการแตกร้าว การเพิ่มขึ้นของรอยแตกร้าวในช่วงพื้นที่หลังการเสียหาย นั่นคือ การอธิบายผลของเห็นชั้นสที่ฟเฟนนิ่ง (Tension stiffening) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 การตอบสนองของคอนกรีตเสริมแรงในแรงดึง ดังสมการที่ (3.52)

$$f_c = \begin{cases} E_c \varepsilon, & 0 < \varepsilon < \varepsilon_{cr} \\ \frac{f_t'}{1 + \sqrt{200\varepsilon}}, & \varepsilon > \varepsilon_{cr} \end{cases} \quad (3.52)$$

โดยที่ ε_{cr} คือ ความเครียดที่แตกร้าว



รูปที่ 3.11 การตอบสนองแรงดึงของคอนกรีตเสริมแรงหลังจากการเสียหาย [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

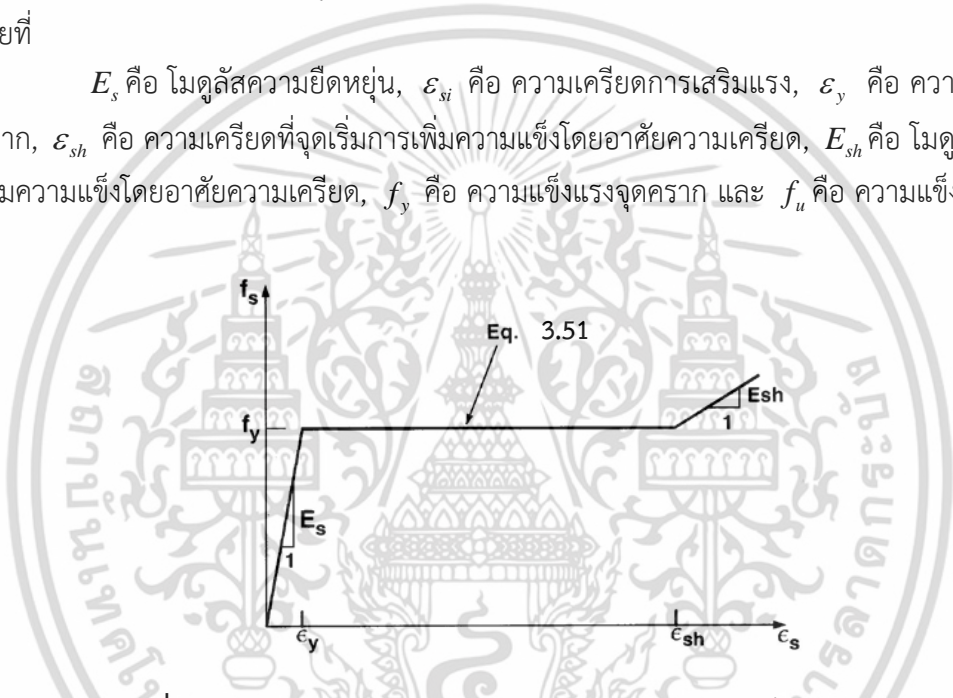
3.3.2 พฤติกรรมทางกลสำหรับเหล็กเสริมแรง

การเสริมแรงตอบสนองความเค้นและความเครียดแบบเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ประกอบด้วย การตอบสนองเริ่มต้นแบบยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น จุดคราก และการเพิ่มความแข็งโดยอาศัยความเครียดแบบเชิงเส้น จนกระทั่งแตกหัก ความเค้นเหล็กเสริมแรง f_{si} ในแรงดึงถูกกำหนดให้ดังสมการที่ (3.53) ดังนี้

$$f_{si} = \begin{cases} E_s \epsilon_{si}, & 0 < \epsilon_{si} \leq \epsilon_y \\ f_y, & \epsilon_y < \epsilon_{si} \leq \epsilon_{sh} \\ f_y + E_{sh}(\epsilon_{si} - \epsilon_{sh}) \leq f_u, & \epsilon_{si} > \epsilon_{sh} \end{cases} \quad (3.53)$$

โดยที่

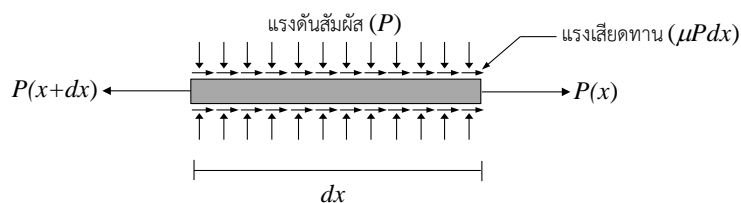
E_s คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น, ϵ_{si} คือ ความเครียดการเสริมแรง, ϵ_y คือ ความเครียดจุดคราก, ϵ_{sh} คือ ความเครียดที่จุดเริ่มการเพิ่มความแข็งโดยอาศัยความเครียด, E_{sh} คือ โมดูลัสของการเพิ่มความแข็งโดยอาศัยความเครียด, f_y คือ ความแข็งแรงจุดคราก และ f_u คือ ความแข็งแรงสูงสุด



รูปที่ 3.12 การตอบสนองความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมแรง [25]

3.4 พันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีต

ความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างพันธะแรงยึดเหนี่ยว (Bond Stress) u , แรงดันสัมผัส P และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ที่มีพันธะต่อกันระหว่างเหล็กและคอนกรีต กำหนดให้เป็นดังสมการที่ (3.54)



รูปที่ 3.13 แบบจำลองแรงเสียดทานต่อแท่งเหล็กในคอนกรีต [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u = \mu P \quad (3.54)$$

3.4.1 แบบจำลองสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

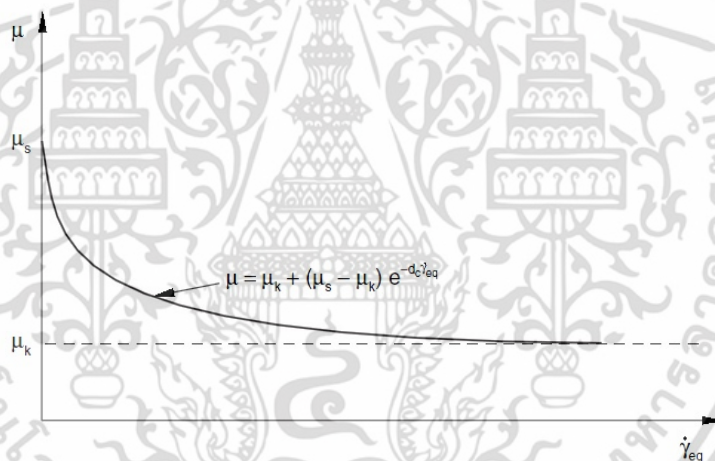
แบบจำลองถูกสมมุติว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเสื่อมลงแบบฟังก์ชันเลขชี้กำลัง จากค่าแบบสถิต (Static) กับค่าแบบจลน์ (Kinetic) ดัง สมการที่ (3.55)

$$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k) e^{-d_c \dot{\gamma}_{eq}} \quad (3.55)$$

โดยที่

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

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่อการเลื่อนไหลถูกคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับการเลื่อนไหลที่มีพันธะต่อกันระหว่างเหล็กและคอนกรีต

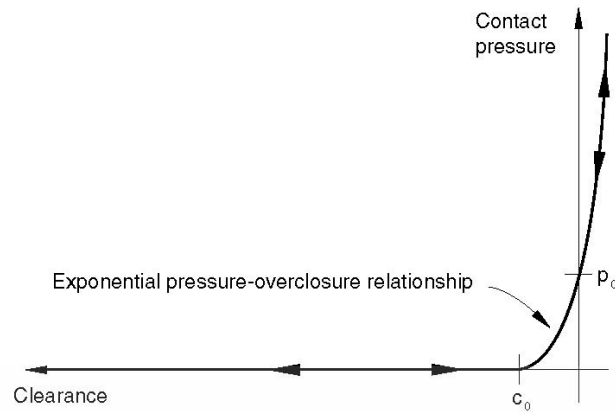


รูปที่ 3.14 ฟังก์ชันเลขชี้กำลังในแบบจำลองแรงเสียดทานที่เสื่อมลง [20]

3.4.2 การจำลองแรงดันสัมผัส (Contact Pressure)

แบบจำลองการสัมผัสเป็นแบบซอฟเท็น (Softened) ซึ่งแรงดันที่สัมผัสในช่องว่างระหว่างผิวเป็นความสัมพันธ์แรงดันกับช่องว่าง สามารถกำหนดโดยใช้หลักการฟังก์ชันเลขชี้กำลัง รูปที่ 3.15 แสดงการสัมผัสแบบซอฟเท็นที่การเชื่อมต่อสัมผัสกัน ที่แกน x กำหนดเป็นช่องว่างระหว่างผิวสัมผัส และแกน y กำหนดเป็นแรงดัน ซึ่งกระทำตั้งฉากกับผิวสัมผัส ในการสัมผัสแบบซอฟเท็น พื้นผิวจะเริ่มต้นส่งถ่ายแรงดันสัมผัสในหนึ่งช่องว่างระหว่างพื้นผิว วัดในแนวสัมผัสที่ตั้งฉาก (ลดลงไปทาง c) แรงดันสัมผัสถูกส่งผ่านระหว่างพื้นผิว จากนั้นเพิ่มขึ้นแบบฟังก์ชันเลขชี้กำลัง ตามช่องว่างอย่างต่อเนื่องจนลดน้อยลงไป p^0 คือ แรงสัมผัสที่ช่องว่าง และ c คือ ช่องว่างระหว่างพื้นผิว ซึ่งแรงดันสัมผัสลดลงจนเป็นศูนย์ สมการที่ (3.56), (3.57), (3.58) และ (3.59) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสัมผัสและช่องว่างเป็น ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. ให้อำนาจสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ซอฟท์เท็น (Softened) ความสัมพันธ์แรงดันกับช่องว่าง [20]

$$p = 0 \quad \text{สำหรับ} \quad h \leq -c \quad (3.56)$$

$$p = \frac{p^0}{(\exp(1)-1)} \left[\left(\frac{h}{c} + 1 \right) \left(\exp\left(\frac{h}{c} + 1 \right) - 1 \right) \right] \quad \text{สำหรับ} \quad h > -c \quad (3.57)$$

$$\frac{dp}{dh} = 0 \quad \text{สำหรับ} \quad h \leq -c \quad (3.58)$$

$$\frac{dp}{dh} = \frac{p^0}{(\exp(1)-1)} \left[\frac{1}{c} \left(\frac{h}{c} + 2 \right) \exp\left(\frac{h}{c} + 1 \right) - \frac{1}{c} \right] \quad \text{สำหรับ} \quad h > -c \quad (3.59)$$

โดยที่

h คือ ช่องว่างระหว่างพื้นผิวหลัก (Master) และผิวรอง (Slave) และ c คือ ช่องว่างระหว่างพื้นผิวหลัก (Master) และผิวรอง (Slave) ที่แรงดันสัมผัสลดลงจนเป็นศูนย์

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 บทนำ

การวิเคราะห์ปัญหาความเค้นเนื่องจากความร้อนภายในหม้อเผาปูนซีเมนต์ เริ่มต้นจากการพิจารณาสถานะแวดล้อมในหม้อเผาปูนซีเมนต์ โครงสร้างหม้อเผาปูนซีเมนต์ และปัจจัยที่กระทบต่อระบบไลน์นิ่งทไฟ โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานข้อมูลที่แท้จริง ข้อมูลเหล่านี้ถูกนำมาประกอบการพิจารณาเพื่อกำหนดแนวคิดในการออกแบบไลน์นิ่งทไฟเฉพาะส่วนโนสริง แต่ทั้งนี้ ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อนและคุณสมบัติทางกลเนื่องจากความร้อน การกระจายความเค้น การกระจายอุณหภูมิ และจำนวนและชนิดเหล็กยึดที่เหมาะสมกับใช้งาน ยังขาดความเข้าใจที่ตีพอ ในบทนี้จะนำไปสู่การเข้าใจที่มากขึ้นโดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

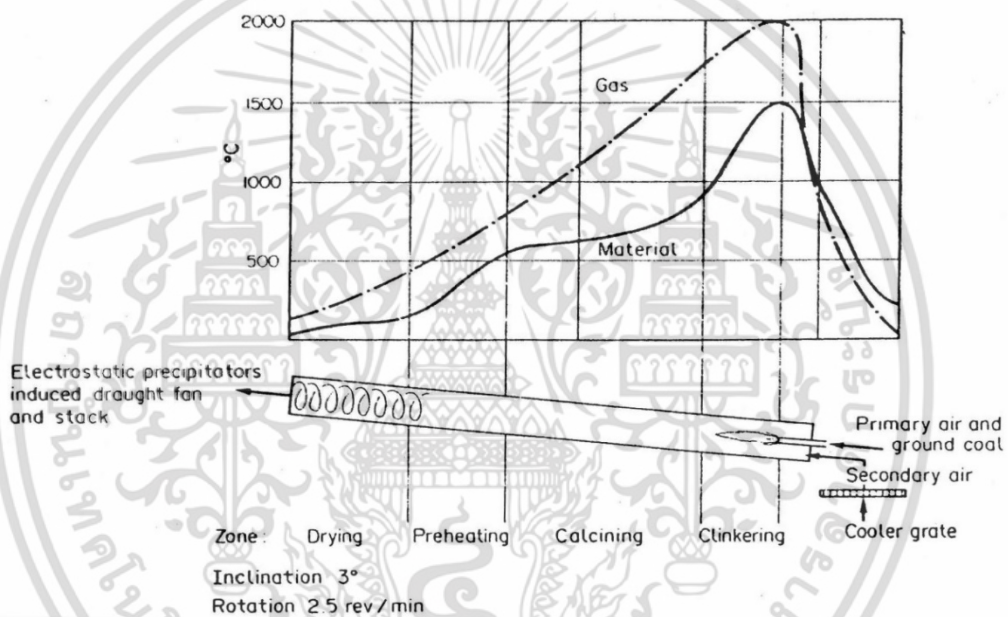
4.2 สถานะแวดล้อมในหม้อเผาปูนซีเมนต์

ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ หม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน (Rotary cement kiln) เป็นอุปกรณ์สำคัญในการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง เพื่อสร้างความร้อนให้แก่วัตถุดิบสำเร็จ (Raw meal) ให้มีอุณหภูมิประมาณ 1,200 ถึง 1,400 °C กระบวนการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบสำเร็จ โดยที่วัตถุดิบสำเร็จถูกป้อนเข้าไปในขณะหม้อเผาปูนซีเมนต์หมุนวัตถุดิบสำเร็จจะค่อยๆ เคลื่อนตัวไปทางอีกด้านหนึ่ง ก๊าซร้อนจะผ่านไปตามหม้อเผาปูนซีเมนต์ในทิศทางตรงกันข้าม ก๊าซร้อนอาจจะก่อให้เกิดบริเวณที่มีความร้อนภายในมาก และเกิดเปลวไฟภายในหม้อเผาปูนซีเมนต์ เปลวไฟดังกล่าวถูกพ่นจากหัวเผา ในขณะที่วัตถุดิบสำเร็จเคลื่อนตัวภายใต้เปลวไฟ อุณหภูมิของวัตถุดิบสำเร็จขึ้นสูงสุดแล้วเคลื่อนตัวผ่านบริเวณทางออกและตกไปยังหม้อเย็น (Cooler) ตามลำดับ สถานะการทำงานภายในหม้อเผาปูนซีเมนต์สามารถแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 [3] ได้แก่

- 1) Drying คือ ช่วงที่ทำให้วัตถุดิบสำเร็จแห้ง อุณหภูมิประมาณ 200 °C
- 2) Preheating คือ ช่วงที่ไล่ความชื้นไอน้ำที่อยู่ในเนื้อวัตถุดิบสำเร็จไปให้หมด อุณหภูมิประมาณ 200 ถึง 400 °C
- 3) Calcining คือ ช่วงที่ค่อยๆ ไล่เอาก๊าซต่างๆ ออกไป เช่น ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ หรือ คาร์บอนมอนอกไซด์ อุณหภูมิประมาณ 600 ถึง 800 °C
- 4) Clinkering คือ ช่วงที่เกิดการหลอมของวัตถุดิบสำเร็จ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสมากในช่วงนี้ตามระดับอุณหภูมิ ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 1,300 ถึง 1,500 °C ความดันก๊าซโดยทั่วไปอยู่ในช่วงจากหนึ่งบรรยากาศถึง 600 psi และสามารถสูงได้ถึง 1,000 psi แต่อุณหภูมิสูงไม่สามารถผ่านไปยิงเปลือกหม้อเผาปูนได้ เนื่องจากถูกป้องกันด้วยระบบไลน์นิ่งทไฟ

4.3 ระบบไลน์นิ่งทไฟ

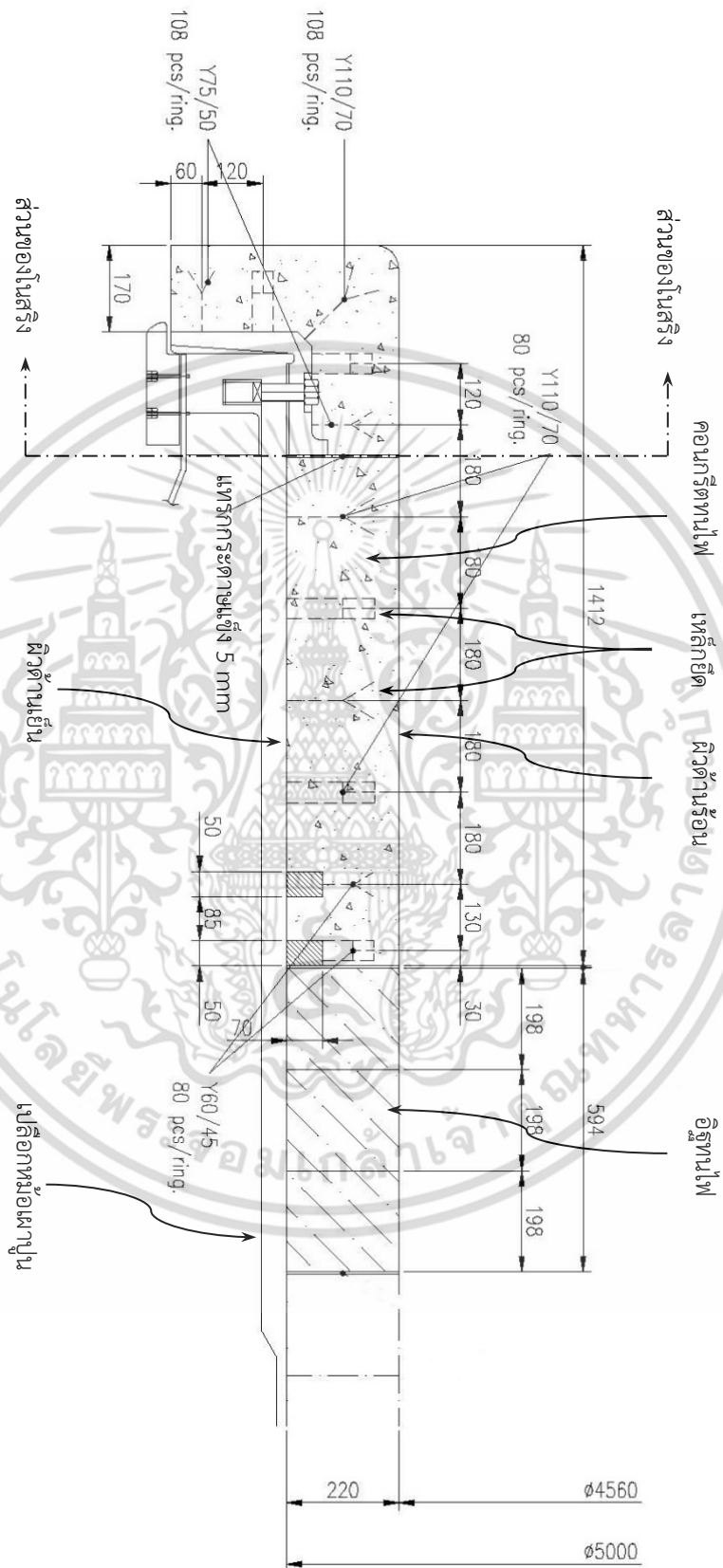
วัตถุประสงค์หลักของไลน์นิ่งทไฟเพื่อรักษาและปรับปรุงประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบ และเพื่อป้องกันเปลือกหุ้มเผาปูนซีเมนต์จากอุณหภูมิสูงและสภาวะแวดล้อมต่างๆ หุ้มเผาปูนซีเมนต์ประกอบด้วยชั้นของเปลือก ทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนชนิดแผ่นม้วน มีความหนา 50 mm เชื่อมประกอบเป็นรูปทรงกระบอก มีความยาว 230 m เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 m ติดตั้งตามแนวอนเอียง 1° ถึง 4° หมุนรอบตัวเองระหว่าง 30 และ 250 rpm ถัดจากนั้นเป็นชั้นของวัสดุทนไฟทำด้วยคอนกรีตทนไฟ หรือไม้ก็ทำด้วยอิฐทนไฟ ประเภทวัสดุทนไฟที่ใช้แตกต่างกันไปตามสภาวะภายใน หุ้มเผาปูนซีเมนต์ บริเวณที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนจำเป็นต้องใช้คอนกรีตทนไฟ ซึ่งเป็นคอนกรีตแบบผสมเสร็จ สามารถเทหล่อเป็นรูปร่างตามต้องการ โดยมีเหล็กยึดอยู่ภายในเพื่อเสริมความแข็งแรง รายละเอียดแบบรูป (Drawing) ดังแสดงในรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและกระบวนการภายในหุ้มเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน [3]

4.4 ปัจจัยที่ทำลายระบบไลน์นิ่งทไฟ

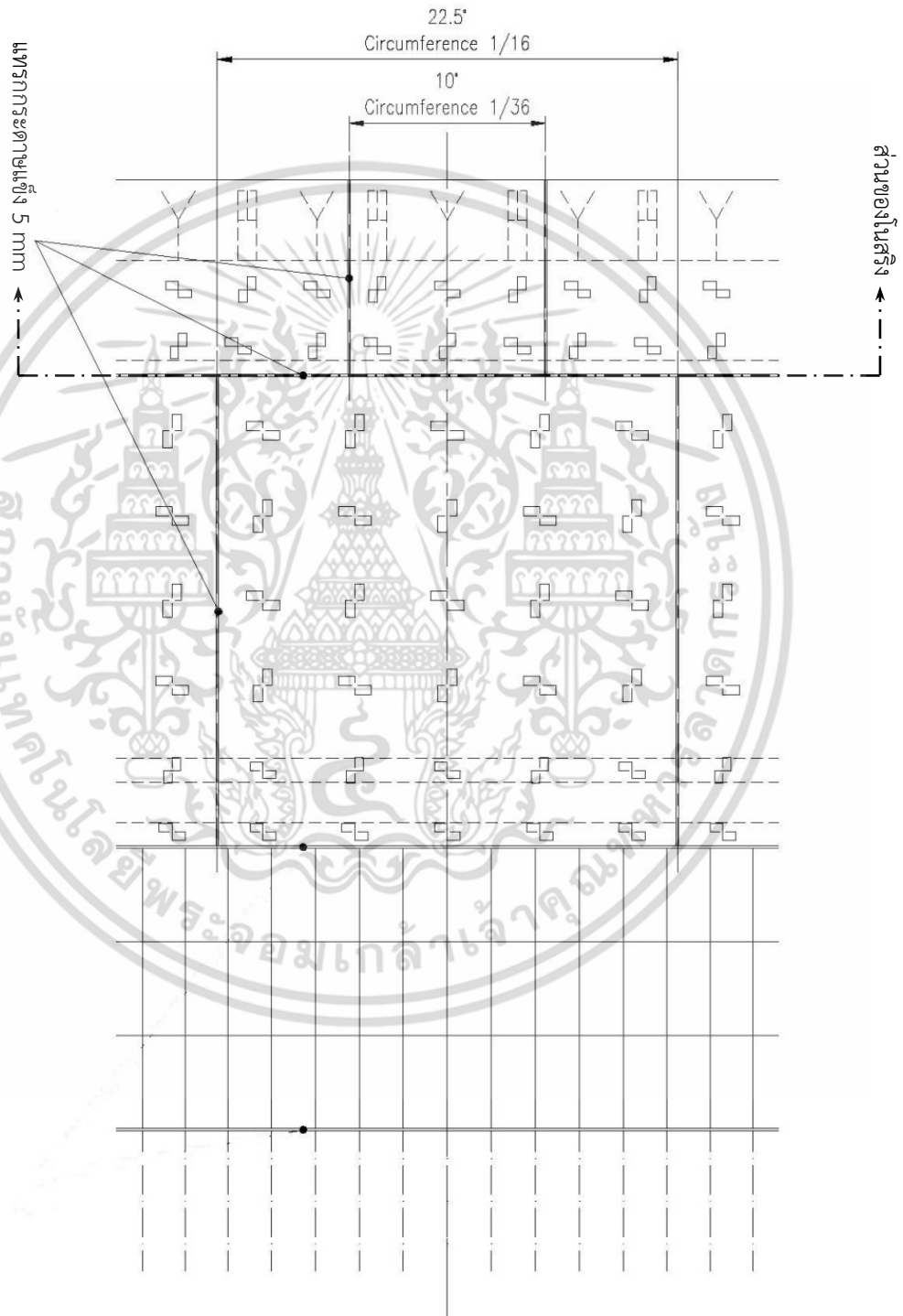
สภาวะแวดล้อมที่รุนแรงภายในหุ้มเผาปูนซีเมนต์ ระบบไลน์นิ่งทไฟสามารถเสื่อมลงได้หลายๆ ทาง และตามด้วยการสูญเสียสมรรถนะที่ต้องการไป ปัจจัยหลักที่พิจารณาถึงระบบไลน์นิ่งทไฟทำลาย คือ การเสื่อมความแข็งแรงของคอนกรีตทนไฟที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตทนไฟ นั่นคือ ความทนต่อแรงอัด ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและภาระ แนวโน้มของความแข็งแรงที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 [7,8] คอนกรีตทนไฟสูญเสียความแข็งแรง เมื่อเข้าใกล้อุณหภูมิวิกฤต อุณหภูมิวิกฤตนั้นขึ้นอยู่กับจุดหลอมเหลวและความทนต่อไฟของวัสดุคอนกรีตทนไฟ ผลการสูญเสียความแข็งแรงทำให้เสียรูปทรง และสูญเสียความสามารถในการรับภาระ ซึ่งเป็นการสูญเสียที่ตามมาต่อความมั่นคงแข็งแรงของระบบไลน์นิ่ง โดยพบว่าลักษณะที่เกิดขึ้น สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ [1] คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบและโครงสร้างของหม้อไฟฟ้าชนิดแห้ง (ภาพตัดด้านข้าง) [บริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทงไฟ จำกัด]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบและโครงสร้างของหม้อเผาปูนซีเมนต์ (ภาพด้านบน) [บริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด]



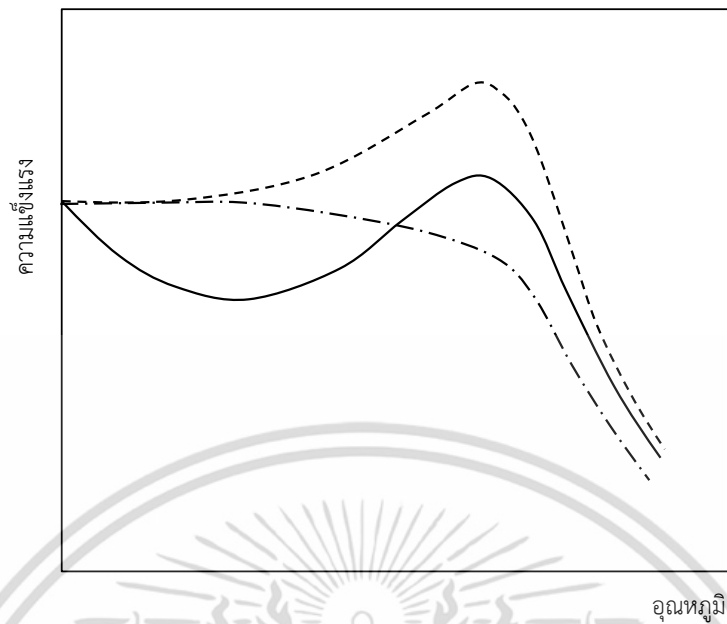
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 ส่วนประกอบและโครงสร้างของหม้อเผาเป็นซีเมนต์ (ภาพด้านหน้า) [บริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด]

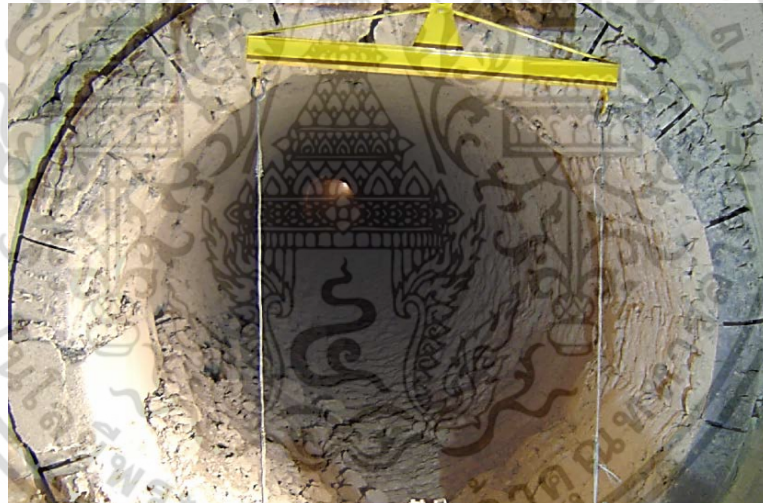


มาตราการกระดาษแข็ง 5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงและอุณหภูมิของวัสดุทนไฟ [7,8]



รูปที่ 4.6 ลักษณะการแตกและการหลุดร่อนของไลน์นิ่งทนไฟในหม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน [1]

1) การแตก และการหลุดร่อน เนื่องจากโดนความร้อนและอิทธิพลลมที่หมุนวนจากหม้อเย็น 2) การเสื่อมลงของวัสดุและการสูญเสียมวลของคอนกรีตทนไฟ เนื่องจากโดนกัดกร่อนและการเสียดสีของเม็ดปูน และปฏิกิริยาทางเคมีของละอองเม็ดปูน

อีกทั้ง คอนกรีตทนไฟที่อยู่ภายใต้ภาระทางความร้อนที่แตกต่างกัน อาจนำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์ ได้แก่ 1) เกรเดียนท์ทางความร้อน เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวด้านร้อน (อุณหภูมิประมาณ 1,000 ถึง 1,400 °C) และผิวด้านเย็น (อุณหภูมิประมาณ 250 ถึง 350°C) 2) ความแตกต่างของการขยายตัวจากความร้อนระหว่างเหล็ก (เปลือกหม้อเผาและเหล็กยึด) และคอนกรีตทนไฟ 3) วัฏจักรความร้อนในระหว่างสัมผัสวัสดุดิบและไม่สัมผัสวัสดุดิบสลับกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ดังกล่าว อาจก่อให้เกิดความเค้นที่ผสมผสานไปด้วย ความเค้นดึง ความเค้นอัด และความเค้นเฉือน ความเค้นเหล่านี้อาจมีค่าสูงต่อคอนกรีตทนไฟ ดังนั้น สภาวะความเค้นจึงอาจเป็นสาเหตุของการแตก และปัญหาการหลุดร่อนในคอนกรีตทนไฟ การขยายตัวจากความร้อนระหว่างคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด เป็นผลกระทบทำให้เกิดการก่อตัวของรอยร้าวภายในเนื้อคอนกรีตทนไฟ จึงทำให้ความแข็งแรงเสื่อมลง จนนำไปสู่การเสียหายของไลน์นึ่งในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.6

การเสียหายของคอนกรีตทนไฟแต่ละบริเวณมีความรุนแรงและความถี่ไม่เท่ากัน โดยเฉพาะบริเวณโนสริง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เปลี่ยนรูปทรงจากแนวอนเป็นแนวตั้ง (มุม 90°) เพื่อให้วัตถุดิบไหลลงไปยังหม้อเย็น คอนกรีตทนไฟในแนวตั้งมีอายุการใช้งานสั้น เพราะคอนกรีตทนไฟถูกรองรับด้วยเหล็กยึดเท่านั้น ภาวะที่เกิดขึ้นต่อเหล็กยึดมาจากน้ำหนักและภาระจากการขยายตัวของคอนกรีตทนไฟเป็นสำคัญ การออกแบบไลน์นึ่งทนไฟบริเวณนี้ต้องคำนึงถึง รูปทรงและจำนวนของเหล็กยึดด้วย ถ้าปริมาณเหล็กยึดมากเกินไปอาจเป็นผลให้เกิดความเค้นสูงภายในเนื้อคอนกรีตทนไฟ และถ้าไม่เพียงพออาจมีความเสี่ยงในการรับน้ำหนักของคอนกรีตทนไฟไม่ได้ [13]

4.5 แนวคิดการออกแบบระบบไลน์นึ่งทนไฟ

ด้วยความต้องการอย่างมากสำหรับประสิทธิภาพการทำงานของไลน์นึ่งทนไฟ และลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาไลน์นึ่งทนไฟ ดังนั้น เพื่อให้บรรลุเป้าหมายดังกล่าวจึงเกิดแนวความคิดการนำวัสดุทนไฟชนิดคอนกรีตทนไฟหล่อสำเร็จ (Precast) เข้าไปใช้ในระบบไลน์นึ่งทนไฟตรงส่วนของโนสริงแทนการใช้คอนกรีตทนไฟแบบผสมเสร็จ ดังแสดงรูปที่ 4.7 การออกแบบและการผลิตโนสริงแบบคอนกรีตทนไฟหล่อสำเร็จ ต้องการความเข้าใจเป็นพิเศษเกี่ยวกับ พฤติกรรมของวัสดุของคอนกรีตทนไฟ จำนวนและชนิดเหล็กยึดเหมาะสม เพื่อนำไปใช้กับโนสริงแบบใหม่ต่อไป

งานวิจัยนี้ได้รับการเอื้อเฟื้อรายละเอียดแบบรูปหม้อเผาปูนซีเมนต์จาก บริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด ซึ่งเป็นหม้อเผาปูนซีเมนต์ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยมีส่วนประกอบหลักๆ คือ

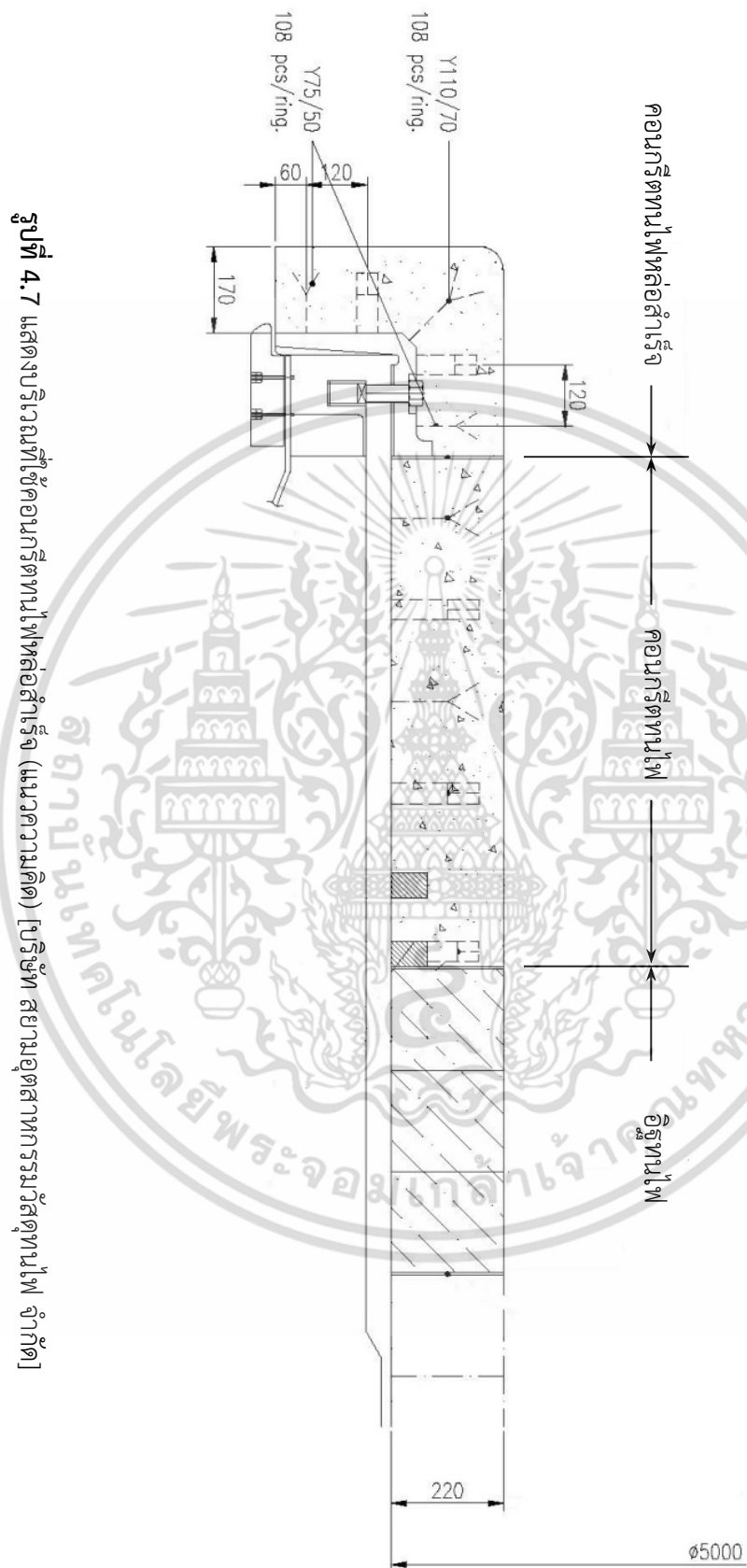
- 1) คอนกรีตทนไฟ ซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า Tufdura-S300
- 2) เหล็กยึดแบบตัวอักษร Y เหล็กแบน ทำมาจากสแตนเลส เกรด SUS310S มีจำนวน 15

อัน ส่วนประกอบดังกล่าว เมื่อประกอบกับโครงสร้างของหม้อเผาปูนแล้วจะเรียกว่า “โนสริง” ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นต้นแบบสำหรับการศึกษาของงานวิจัยนี้

4.6 วัสดุคอนกรีตทนไฟ

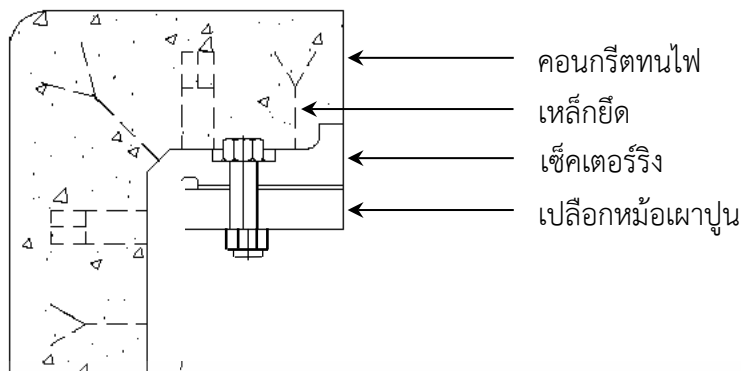
คอนกรีตทนไฟ มีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ อลูมินา (Al_2O_3), ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC), เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีอัตราส่วนผสม 48%, 30%, 0.6% และ 1.3% ตามลำดับ ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวบ่งชี้ชนิดของคอนกรีตทนไฟ (แคลเซียมออกไซด์ 1 - 2.5% คือ คอนกรีตทนไฟชนิด Low cement) [6] การพัฒนาคอนกรีตทนไฟและการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงบริเวณที่ใช้คอนกรีตทนไฟหล่อสำเร็จ (แนวความคิด) [บริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ส่วนประกอบของโนสริง (ภาพตัดด้านข้าง)

สมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อนและสมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟและการจำลองคุณสมบัติของวัสดุที่สอดคล้องกันได้ถูกพัฒนาโดยยึดข้อมูลจากการทดสอบที่มีอยู่เป็นหลักจะถูกนำเสนอในส่วนถัดไป

4.7 พฤติกรรมคอนกรีตทนไฟ

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

พฤติกรรมทางกายภาพเนื่องจากความร้อนและพฤติกรรมทางกลเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟถูกศึกษาพบว่าพฤติกรรมดังกล่าวมีความซับซ้อน อาจจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ภาระ และเวลา คุณสมบัติวัสดุเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับใช้กับแบบจำลอง เพื่อการทำนายที่ถูกต้องของพฤติกรรมไลน์นิ่งทนไฟ แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลบางอย่างมีอยู่ไม่เพียงพอ โดยเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตทนไฟที่ระดับอุณหภูมิสูง การพัฒนาข้อมูลโดยการประมาณค่าแบบนอกช่วงได้ถูกนำมาใช้ คุณสมบัติของคอนกรีตทนไฟที่ได้มาจากการทดสอบถูกนำเสนอด้วยผลลัพธ์สมการถดถอย (Regression result) เพื่อแสดงพฤติกรรมของคอนกรีตทนไฟ

4.8 สมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ

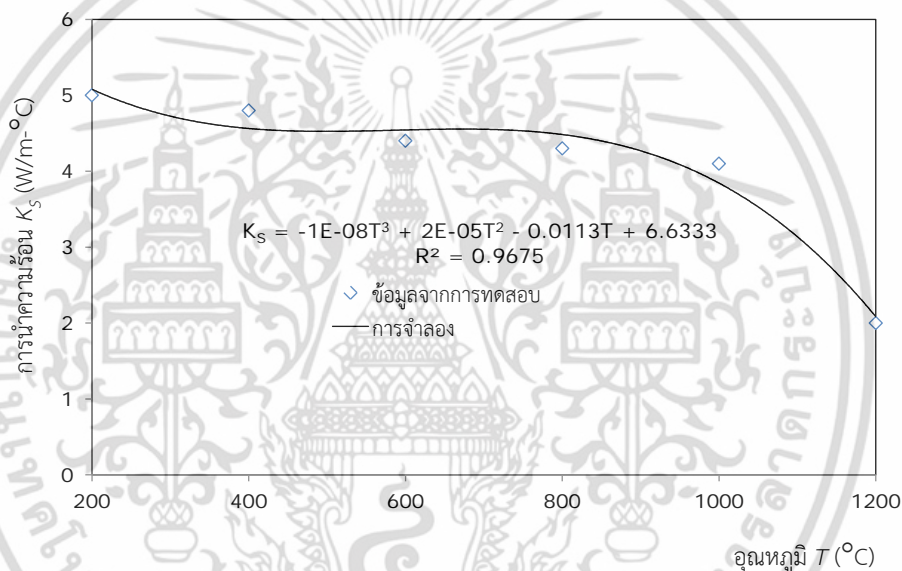
คุณสมบัติทางความร้อนเป็นการตอบสนองของวัสดุต่อปฏิบัติการทางความร้อน เช่น การดูดซับพลังงานของของแข็งในรูปของความร้อนด้วยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและขนาด พลังงานจะถ่ายเทไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ถ้าวัสดุมีสองบริเวณที่มีอุณหภูมิต่างกัน การนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ และการขยายตัวเนื่องจากความร้อนเป็นคุณสมบัติทางความร้อนที่สำคัญของคอนกรีตทนไฟในการนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.1 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 ค่าข้อมูลของ K_s ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 1,200 °C ผลลัพธ์สมการถดถอยถูกแสดงในรูปที่ 4.9 ฟังก์ชันพหุนามที่มีความสอดคล้องกับข้อมูลมากที่สุด คือ

$$K_s \text{ (W/m}^\circ\text{C)} = 1\text{E} - 08T^3 + 2\text{E} - 05T^2 - 0.0113T + 6.6333 \quad (4.1)$$



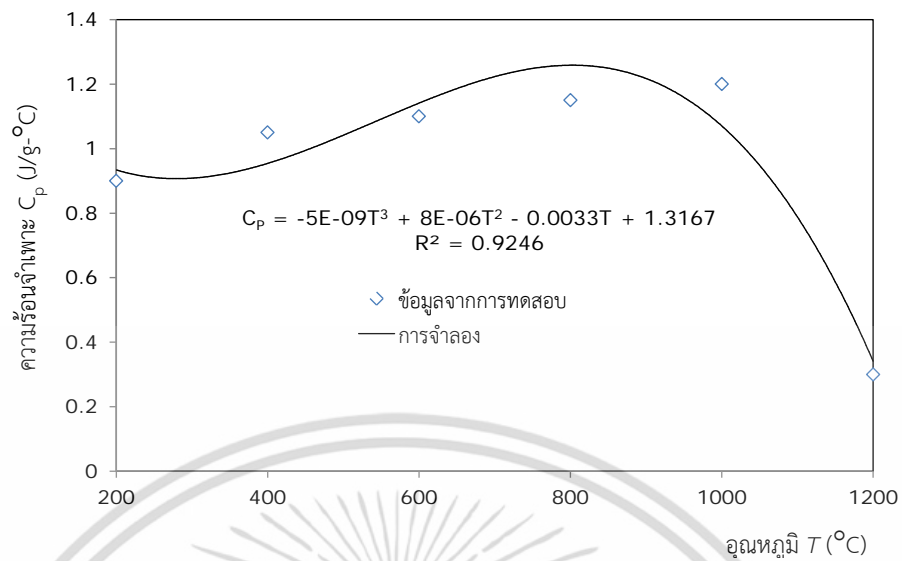
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนและอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟ

4.8.2 ความร้อนจำเพาะ

วัสดุของแข็งเมื่อได้รับความร้อนอุณหภูมิจะสูงขึ้นด้วยการดูดซับพลังงานบางส่วน สมบัติที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับความร้อนจากบริเวณรอบนอก เรียกว่า ความร้อนจำเพาะ ถูกแทนด้วย C_p ฟังก์ชันตามอุณหภูมิ (T) ถูกแสดงในรูปนิพจน์พหุนาม โดยปรับข้อมูลโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ฟังก์ชันพหุนามอันดับสามถูกนำมาใช้สำหรับ $C_p(T)$ ข้อมูลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการของบริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด ค่าข้อมูลของ C_p ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 1,200 °C ผลลัพธ์สมการถดถอย ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ฟังก์ชันพหุนามที่มีความสอดคล้องกับข้อมูลมากที่สุด คือ

$$C_p \text{ (J/g}^\circ\text{C)} = 5\text{E} - 09T^3 + 8\text{E} - 06T^2 - 0.0033T + 1.3167 \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

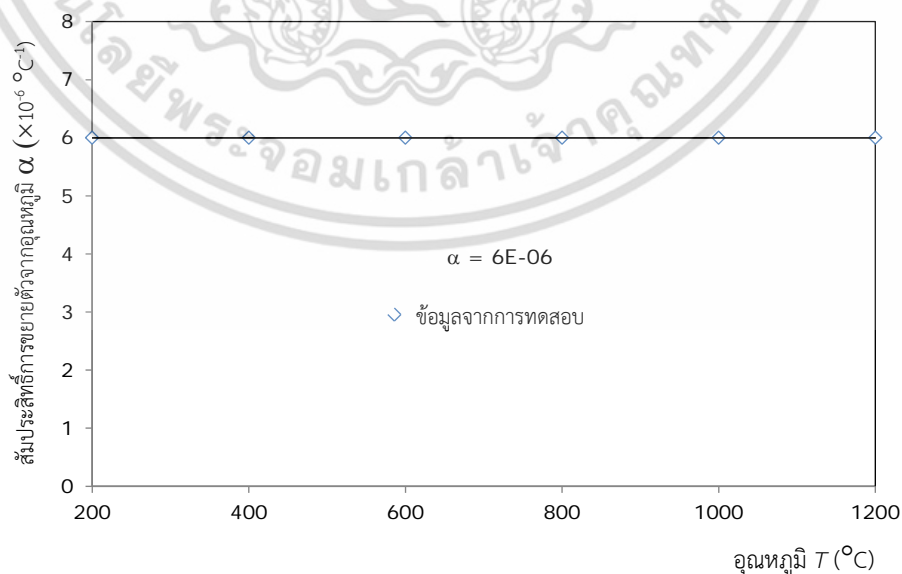


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความจำเพาะและความร้อนจำเพาะและอุณหภูมิของคอนกรีตทไฟ

4.8.3 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

วัสดุทไฟจะเกิดการขยายตัวเมื่อให้ความร้อนและหดตัวเมื่อลดอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงในความยาวต่ออุณหภูมิของคอนกรีตทไฟ สมบัติที่แสดงถึงปริมาณการขยายตัวของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนนี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์การขยายเนื่องจากความร้อน ถูกแทนด้วย (α) ข้อมูลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการของบริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทไฟ จำกัด ข้อมูลอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 1,200 °C ผลลัพธ์สมการถดถอย ดังแสดงใน รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงในความยาวต่ออุณหภูมิของวัสดุทไฟมีค่าคงที่ คือ

$$\alpha (^{\circ}\text{C}^{-1}) = 6\text{E}-06 \quad (4.3)$$



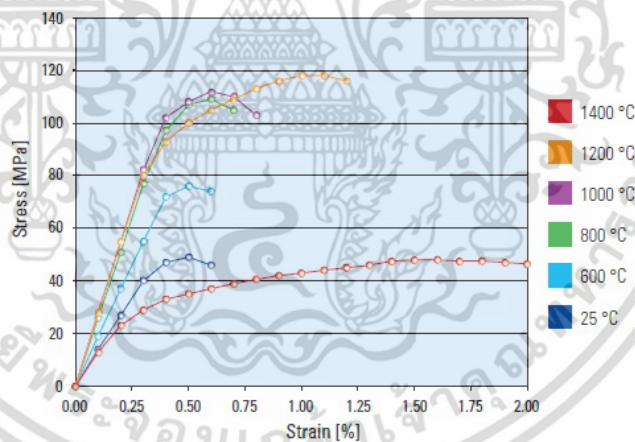
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนและอุณหภูมิของคอนกรีตทไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้บริการวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 สมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ

พฤติกรรมคอนกรีตทนไฟที่อุณหภูมิสูงมีความคล้ายกันกับพฤติกรรมเซรามิกที่อุณหภูมิสูง จากการพิจารณาโดย McCullough และ Rigby [9] การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงต่ออุณหภูมิของอุณหภูมิกอนกรีตทนไฟ ผู้วิจัยได้เสนอไว้ 2 แบบด้วยกันคือ 1) การลดลงในความแข็งแรงที่ระดับอุณหภูมิในช่วง 400 ถึง 1,000 °C จากนั้นตามด้วยการเพิ่มขึ้นในความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,200 °C และ 2) การเพิ่มขึ้นในความแข็งแรงที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C จากนั้นตามด้วยการลดลงในความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,300 °C การเพิ่มขึ้นในความแข็งแรงของคอนกรีตทนไฟที่อุณหภูมิสูงมีความคล้ายกันกับเซรามิก ในกรณีของคอนกรีตทนไฟเพิ่มขึ้นในความแข็งแรง ผู้วิจัยให้เหตุผลว่า ลักษณะการผูกมัดของเซรามิก ซึ่งเริ่มต้นจากอุณหภูมิประมาณ 1,125 °C แต่อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ออุณหภูมิไม่มีความคล้ายกันกับเซรามิก รายงานโดย McCullough และ Rigby (1972)

Triessnig และ คณะ (2006) [17] ได้นำเสนอผลการทดสอบการอัดตามแนวแกน ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุทนไฟชนิดแมกนีเซียมโครเมียม ตลอดช่วงของอุณหภูมิ (25 ถึง 1,400 °C) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ความเค้นสูงสุดแสดงถึงความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบตามอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ที่สำคัญโมดูลัสของความยืดหยุ่น และความแข็งแรงเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัดเจน พารามิเตอร์เหล่านี้เพิ่มขึ้นจนถึง 1,250 °C เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,250 °C บริเวณที่เป็นเชิงเส้นของกราฟความเค้นและความเครียดลดลง



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบการอัดตามแนวแกนของวัสดุทนไฟแมกนีเซียมโครเมียม [17]

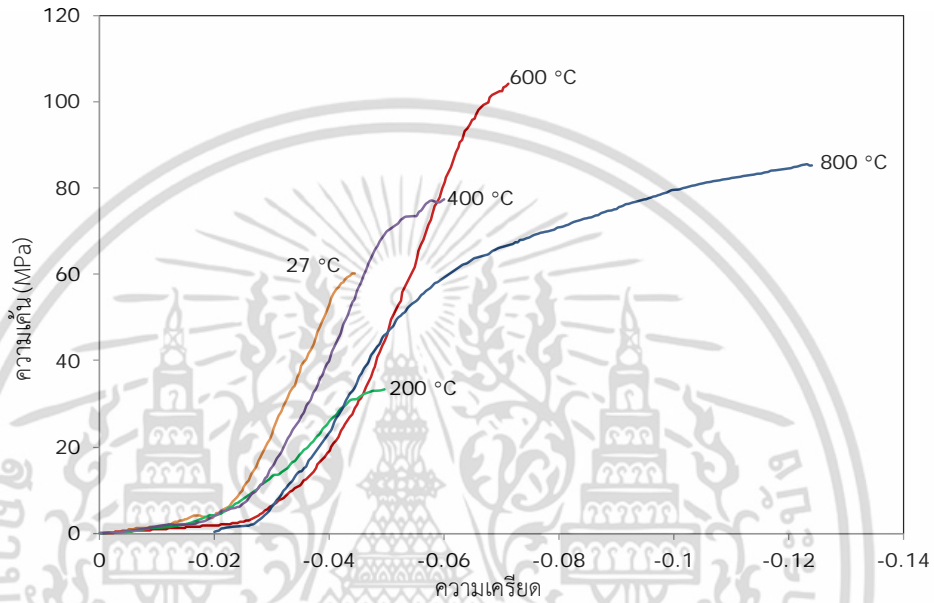
สำหรับงานวิจัยนี้ วัสดุคอนกรีตทนไฟถูกส่งไปทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ระดับอุณหภูมิสูง ณ บริษัท Spectro Analytical Labs จำกัด แห่งประเทศอินเดีย ผลของการทดสอบดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 4.13

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 4.14 ฟังก์ชันพหุนามที่มีความสอดคล้องกับข้อมูลมากที่สุด คือ

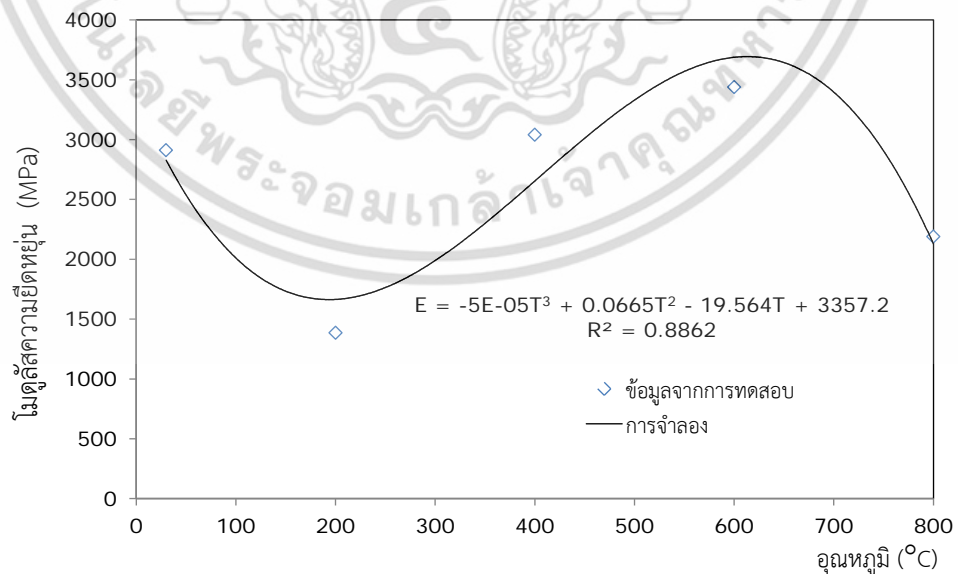
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E(\text{MPa}) = -5E - 05T^3 + 0.0665T^2 - 19.564T + 3357.2 \quad (4.4)$$

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



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตทนไฟที่อุณหภูมิ 200, 400, 600 และ 800 °C



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นและอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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		
เหล็กกล้าคาร์บอน	100	200.6	25	0.29
	200	197.2		
	300	193.7		
	400	191.0		
	500	186.8		
	600	182.0		
	700	174.4		

4.10 การศึกษาการกระจายความเค้นเนื่องจากความร้อนในโครงสร้างโนสริง

การมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างการกระจายความร้อนและการกระจายความเค้นในเนื้อคอนกรีตทนไฟ อันเกิดจากปัจจัยของจำนวนและชนิดเหล็กยึด ที่จัดวางไว้ในโครงสร้างโนสริงภายใต้ภาระและเงื่อนไขแบบเดียวกัน การวิเคราะห์ดังกล่าวถูกดำเนินการด้วยโปรแกรม ABAQUS เพื่อให้บรรลุผลสำเร็จโดยดำเนินการ ดังนี้

- 1) สร้างแบบจำลองตามขนาดจริง แบบ 3 มิติ
- 2) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้อง
- 3) กำหนดพื้นผิวสัมผัสและคุณสมบัติการเชื่อมต่อระหว่างผิว
- 4) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตและภาระ
- 5) สร้างตาข่าย (Mesh)

4.10.1 แบบจำลอง

โครงสร้างหม้อเผาปูนซีเมนต์มีโนสริงจำนวน 36 ชั้น ด้วยหลักการสมมาตรแบบไซคลิก (Cyclic symmetry) โนสริงเพียง 1 ชั้นถูกนำมาวิเคราะห์โดยการจำลองแบบ 3 มิติ ซึ่งประกอบด้วยคอนกรีตทนไฟ เหล็กยึด เซ็คเตอร์ริง และเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟ สแตนเลส และเหล็กกล้าคาร์บอน [11,12]

วัสดุ	อุณหภูมิ (°C)	การนำความร้อน (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์การ 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

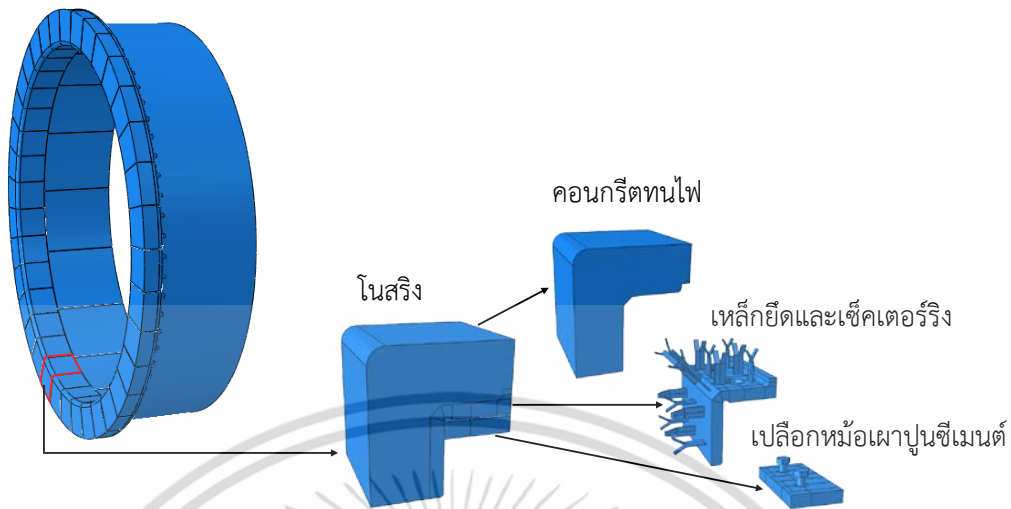
ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของประเภทเหล็กยึดและจำนวนเหล็กยึดในแบบจำลอง

ชนิดเหล็กยึด		แบบจำลอง กรณีที่	จำนวนเหล็กยึด (อัน)	ระยะห่างระหว่างเหล็กยึด (cm)
เหล็กแผ่น ตัว Y		1	10	20
		2	15	12
		3	20	10
เหล็กเส้นกลม ตัว Y		4	10	20
		5	15	12
เหล็กแผ่น ตัว L		6	10	20
		7	15	12
		8	20	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีศึกษาเพื่อใช้ในการวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ในโครงการอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อเผาปูนซีเมนต์ส่วนบริเวณทางออก



รูปที่ 4.15 ส่วนประกอบโครงสร้างโนสริง 36 ชั้น และชิ้นส่วนประกอบที่เกี่ยวข้อง

การจำลองเพื่อวิเคราะห์การมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างการกระจายความร้อนและการกระจายความเค้นในเนื้อคอนกรีตทนไฟ ด้วยปัจจัยจากจำนวนและชนิดเหล็กยึดโดยแบ่งออกเป็น 8 กรณี รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.3

4.10.2 คุณสมบัติของวัสดุทนไฟและคุณสมบัติการสัมผัสกันระหว่างผิว

คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนถูกสมมุติให้คุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันและเป็นไอโซทรอปิก (Isotropic) ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's law) ข้อมูลสำหรับแบบจำลองจากตารางที่ 4.1 และ 4.2 การสัมผัสระหว่างผิวคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดเป็นแบบยึดแน่นถาวร (Perfect bond) รวมถึงชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ ทั้งหมด

4.10.3 เงื่อนไขขอบเขตและภาระทางความร้อน

คอนกรีตทนไฟสัมผัสกับวัตถุโดยตรง 2 ส่วน ได้แก่ ผิวในระนาบ X และในระนาบ Y ถูกกำหนดให้มีอุณหภูมิ 1,200 และ 1,000 °C ตามลำดับ และนอกจากนี้ ยังมีอิทธิพลกระแสความร้อนจากหม้อเย็นสัมผัสกับคอนกรีตทนไฟบริเวณด้านล่างที่อุณหภูมิ 800 °C การถ่ายเทความร้อนผ่านคอนกรีตทนไฟและเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ จากนั้น ออกสู่สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ ที่อุณหภูมิ 35 °C โดยการพาความร้อนแบบบังคับ มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อน $190 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}^{-1}$ [23] ผิวสัมผัสด้านข้างของโนสริงถูกกันไว้ด้วยกระดาษแข็งที่มีความหนา 5 mm เพื่อยอมให้มีการขยายตัวได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ความเค้นจึงสมมุติให้ด้านข้างของโนสริงไม่อยู่ภายใต้แรงจากภายนอกและการกระจัดเป็นอิสระทุกทิศทาง เงื่อนไขขอบเขตของอุณหภูมิและการกระจัด ดังที่แสดงในรูปที่ 4.16 โดยปกติความเค้นจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อนมีขนาดใหญ่กว่าความเค้นจากแรงโน้มถ่วงมาก ดังนั้นความเค้นจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน จึงได้รับความสนใจมากกว่า [24] โดยไม่คำนึงถึงน้ำหนักของวัสดุทนไฟ

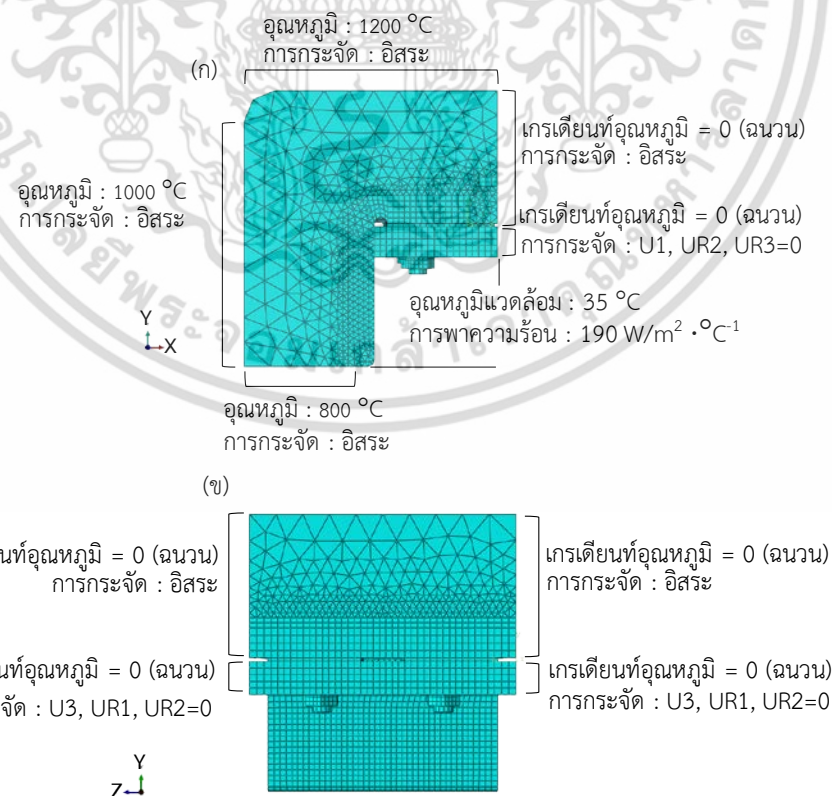
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10.4 การสร้างตาข่าย (Mesh)

เอลิเมนต์ถูกใช้กับแบบจำลอง 2 แบบด้วยกัน คือ เอลิเมนต์แบบจัตุรมุขหรือปิรามิด (Tetrahedra) 4 โหนด ถูกใช้กับแบบจำลองคอนกรีตทนไฟ และ เอลิเมนต์แบบลิ้ม (Triangular prisms) 6 โหนด ถูกใช้กับแบบจำลอง เหล็กยึด เช็คเตอร์ริง และเปลือกหม้อเผา ซึ่งมีจำนวนเอลิเมนต์แต่ละแบบจำลอง ดังแสดงใน ตารางที่ 4.4 แบบจำลองหลังจากประยุกต์ใช้เอลิเมนต์สามารถสร้างตาข่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.17

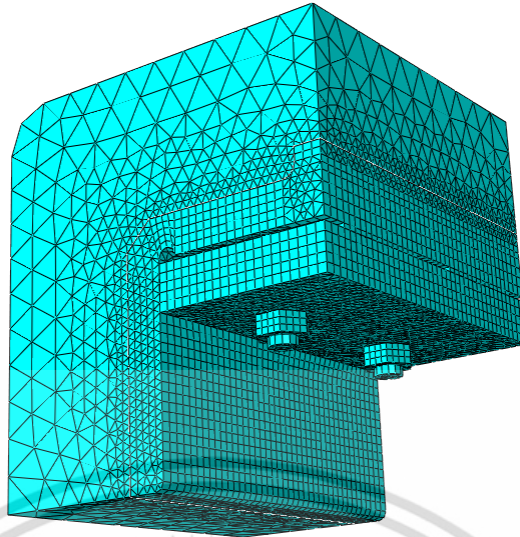
ตารางที่ 4.4 จำนวนเอลิเมนต์แต่ละแบบจำลอง

แบบจำลอง กรณี	จำนวนเอลิเมนต์			
	คอนกรีตทนไฟ	เหล็กยึด	เช็คเตอร์ริง	เปลือกหม้อเผา
1	886,969	36,800	21,250	8,410
2	1,533,456	55,200	21,248	8,410
3	2,122,682	73,600	21,250	8,410
4	1,017,452	140,662	21,290	8,430
5	1,757,488	210,993	21,290	8,390
6	766,652	33,408	21,492	8,520
7	1,400,873	50,112	21,208	8,520
8	1,927,742	66,816	21,314	8,490



รูปที่ 4.16 เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับอุณหภูมิและการกระจัด (ก) ระนาบ X-Y (ข) ระนาบ Y-Z

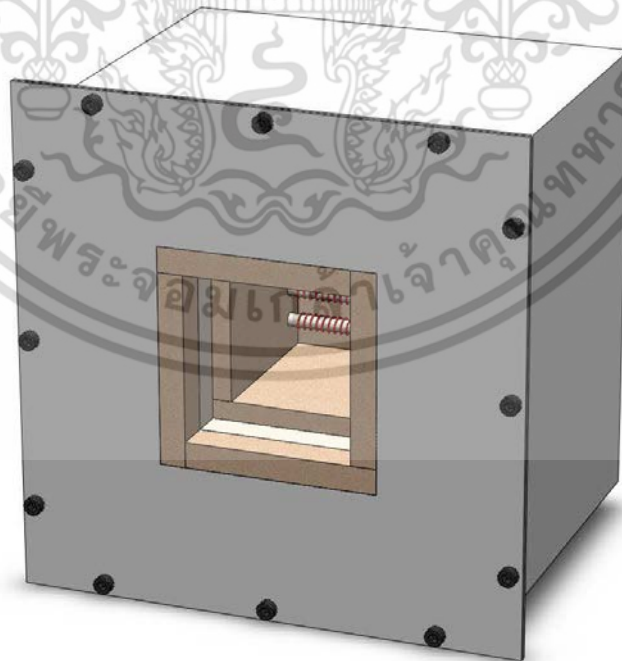
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากการแบ่งเอลิเมนต์

4.11 การทดลอง

การทดลองถูกดำเนินการภายใต้ภาระทางความร้อน โดยมีแหล่งความร้อนจากเตาเผาที่ถูกสร้างขึ้นมาเฉพาะ เพื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่างทดลองเฉพาะบริเวณนั้น เทอร์โมคัปเปิลและสเตรนเกจถูกติดตั้งที่ชิ้นตัวอย่างทดลองเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิและความเครียด ผลของอุณหภูมิถูกนำมาประยุกต์ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้น นำผลทั้งการทดลองและการจำลองมาเปรียบเทียบ



รูปที่ 4.18 ลักษณะเตาเผาแบบขดลวดไฟฟ้าสำหรับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11.1 เตาเผาให้ความร้อน

เตาเผาให้ความร้อนถูกสร้างขึ้นเฉพาะสำหรับงานวิจัย เป็นเตาเผาที่ใช้พลังงานไฟฟ้าและถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนโดยขดลวดความร้อน ซึ่งติดตั้งไว้ในห้องเผาไหม้ขนาด $1,360 \text{ cm}^3$ ภายในห้องเผาไหม้ถูกบุด้วยอิฐทนไฟและไฟเบอร์บอร์ด ดังแสดงในรูปที่ 4.18

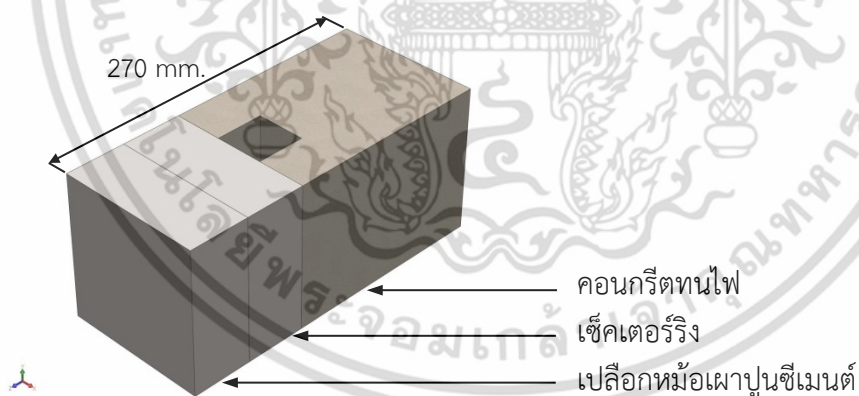
4.11.2 ชิ้นงานตัวอย่างทดลอง

ด้วยความประสงค์ที่จะหาค่าความเครียดที่เหล็กยึด และให้การทดลองใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากที่สุด ดังนั้น ชิ้นงานตัวอย่างทดลองจึงถูกสร้างให้มีขนาดความหนาเท่ากับหม้อเผาปูนซีเมนต์ ซึ่งประกอบด้วย คอนกรีตทนไฟ เซ็คเตอร์ริง เปลือกหม้อเผา มีขนาดความหนา 170, 50 และ 50 mm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และภายในคอนกรีตมีเหล็กยึด 1 อันถูกเชื่อมกับเซ็คเตอร์ริง และติดสเตรนเกจที่บริเวณโคนเหล็กยึดด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ชิ้นตัวอย่างทดลองหลังจากติดตั้งสเตรนเกจแล้วเสร็จ ดังแสดงในรูปที่ 4.21

4.11.3 เครื่องมือตรวจวัด

4.11.3.1 สเตรนเกจ (Strain Gage)

สเตรนเกจ ยี่ห้อ KYOWA รุ่น KFU เป็นสเตรนเกจที่มีคุณสมบัติเฉพาะ โดยสามารถทำงานภายใต้อุณหภูมิ -196 ถึง 350 °C และสามารถชดเชยอุณหภูมิด้วยตัวเอง (Self-temperature compensation) ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 10 ถึง 300 °C



รูปที่ 4.19 ส่วนประกอบภายนอกชิ้นตัวอย่างทดลอง

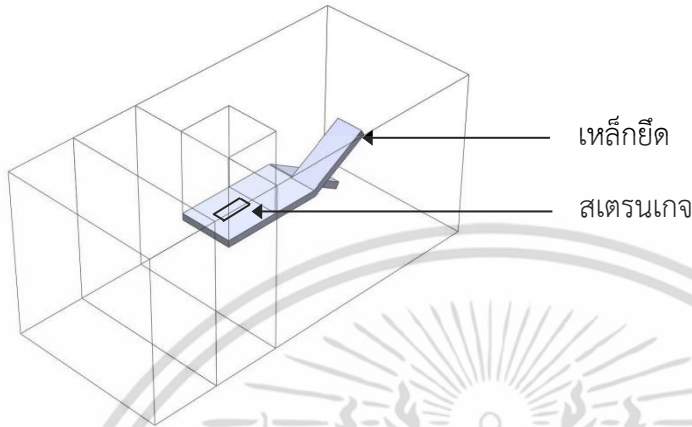
4.11.3.2 กล่องวงจรบริดจ์ (Bridge Box)

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

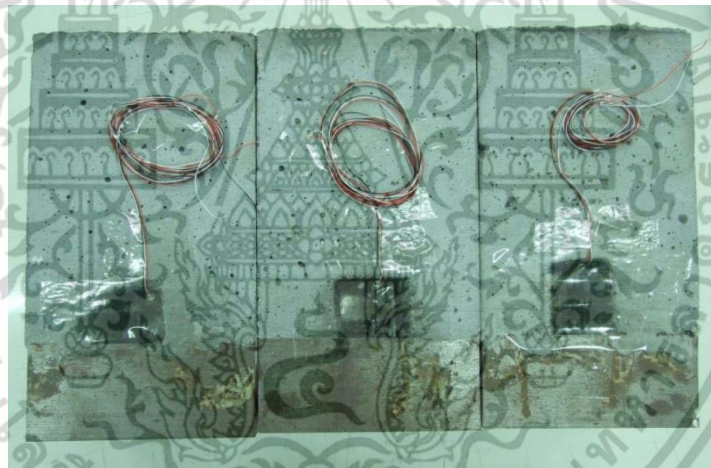
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11.3.3 สเตรนแอมพลิไฟเออร์ (Strain Amplifier)

สเตรนแอมพลิไฟเออร์ ยี่ห้อ KYOWA ถูกเชื่อมต่อระหว่างกล่องวงจรบริดจ์และเครื่องเก็บข้อมูล โดยขยายสัญญาณการเปลี่ยนแปลงระดับไมโครจากสเตรนเกจ และตรวจจรับความรู้สึกตัวแปรทางกายภาพ แล้วเปลี่ยนค่าทางด้านเอาต์พุต



รูปที่ 4.20 ส่วนประกอบภายในชั้นตัวอย่างทดลอง

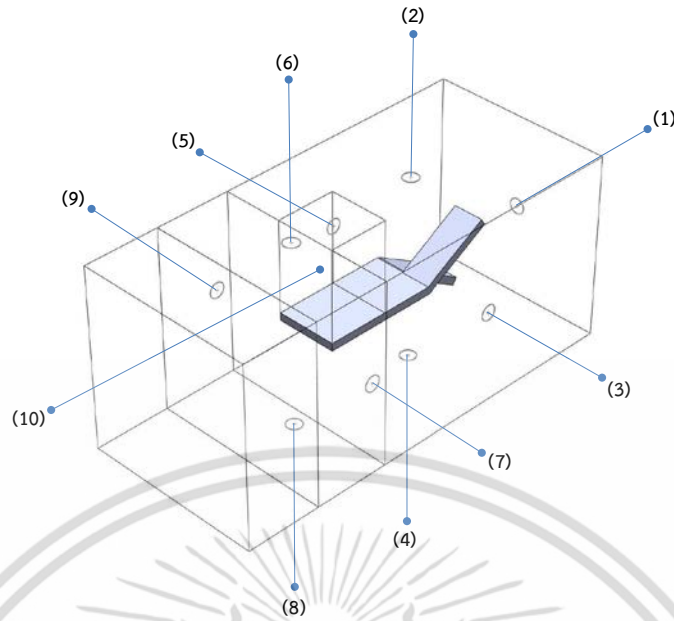


รูปที่ 4.21 ชั้นตัวอย่างทดลองพร้อมติดตั้งสเตรนเกจ

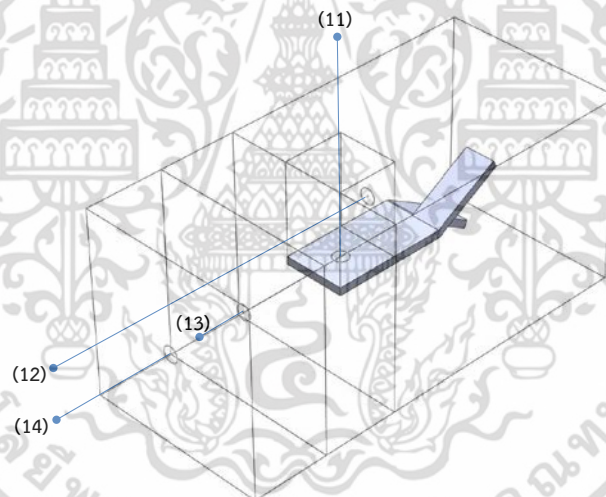
4.11.3.4 เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (Thermocouple type K)

เทอร์โมคัปเปิล คือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า สายเทอร์โมคัปเปิลถูกติดตั้งที่ชั้นตัวอย่างทดลองทั้งหมด 14 จุด โดยจุดที่ (1) ถูกติดตั้งที่ผิวคอนกรีตทนไฟ เพื่อวัดอุณหภูมิที่ได้รับจากขดลวดไฟฟ้า จุดที่ (2) ถึง (10) ถูกติดตั้งใกล้ผิวคอนกรีตทนไฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 เพื่อวัดอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม ผลของอุณหภูมิดังกล่าวถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูลและนำข้อมูลเหล่านี้ไปกำหนดการและเงื่อนไขขอบเขตในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ในรูปที่ 4.23 แสดงจุดที่ 11 ถึง 14 เพื่อวัดอุณหภูมิ ผิวเหล็กยึด คอนกรีตทนไฟ ผิวระหว่างเปลือกหุ้มเฝ้าปูนซีเมนต์และเซ็นเซอร์ริง และผิวเปลือกหุ้มเฝ้าปูนซีเมนต์ ตามลำดับ ผลของอุณหภูมิดังกล่าวถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูลและนำข้อมูลเหล่านี้มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟ

ไนต์เอลิเมนต์ต่อไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ชั้นตัวอย่างทดลองที่ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลตั้งแต่จุดที่ 1 ถึง 10



รูปที่ 4.23 ชั้นตัวอย่างทดลองที่ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลตั้งแต่จุดที่ 11 ถึง 14

4.11.3.5 เครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger)

เครื่องเก็บข้อมูล ยี่ห้อ ADAM ประกอบด้วย 3 รุ่น ADAM-4520, ADAM-4018 และ ADAM-4017+ จำนวน 3, 2 และ 1 ตามลำดับ

4.11.3.6 คอมพิวเตอร์

คอมพิวเตอร์ถูกใช้รับข้อมูลที่ส่งมาจากเครื่องเก็บข้อมูล ได้แก่ อุณหภูมิและสเตรน ข้อมูลเหล่านี้ถูกบันทึกโดยซอฟต์แวร์ Advantech Adam/Apax.NET Utility เวอร์ชัน 2.02.16 แบบทันทีทันใด (Real time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 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

4.11.4 การสอบเทียบเครื่องมือวัด

การทดลองยังดำเนินการไม่ได้ หากไม่ทำการสอบเทียบเครื่องมือวัด โดยเฉพาะสเตรนเกจ ถูกสอบเทียบสัญญาณ (Calibration signal) ตามคู่มือ Dynamic Strain Amplifier DPM-600 series ผลของการสอบเทียบสัญญาณ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

อีกทั้งยังดำเนินการสอบเทียบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง พร้อมติดสเตรนเกจที่ชิ้นตัวอย่าง ทดลอง (Specimen) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ค่าของทั้งเครื่องทดสอบแรงดึงและสเตรนเกจถูกนำมา เปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ปรากฏว่ามีความผิดพลาด (Error) เท่ากับ 9.55 เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดนี้อาจเกิดจากสเตรนเกจ รุ่น KFU มีลักษณะหนาและแข็งกว่าสเตรนเกจรุ่นทั่วไปทำให้ ยึดหยุ่นได้น้อย นอกจากนี้ สายเทอร์โมคัปเปิล จำนวน 14 เส้น ถูกสอบเทียบด้วยเครื่องสอบเทียบ อุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ปรากฏว่าไม่มีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น

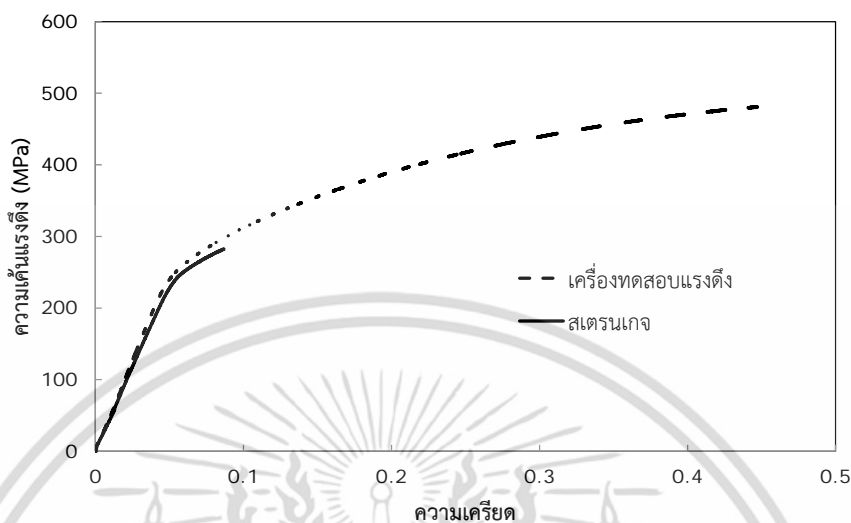


รูปที่ 4.24 ชิ้นตัวอย่างทดลองพร้อมติดสเตรนเกจ

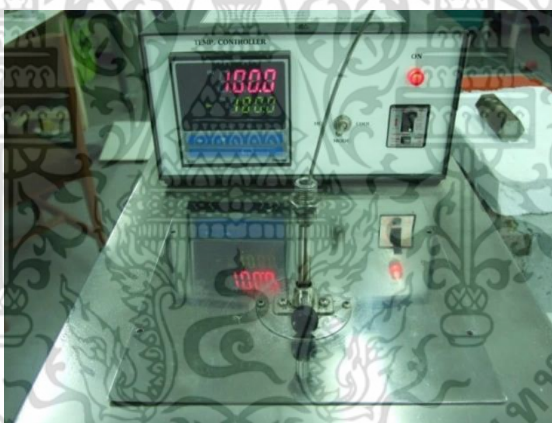
4.11.5 ขั้นตอนการทดลอง

หลังจากจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองแล้วเสร็จ จากนั้น นำชิ้นตัวอย่าง ทดลองติดตั้งเข้ากับเตาเผาไฟฟ้า ต่อสายเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล ต่อสายสเตรนเกจเข้ากับกล่องวงจรบริดจ์ สเตรนแอมพลิไฟเออร์ และเครื่องเก็บข้อมูล ตามลำดับ ข้อมูลทั้งหมดจากเครื่อง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เก็บข้อมูลถูกอ่านและบันทึกด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปในคอมพิวเตอร์ แผนผังวงจรเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และชุดเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองประกอบแล้วเสร็จพร้อมทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบความเครียดระหว่างเครื่องทดสอบแรงดึงและสเตรนเกจ

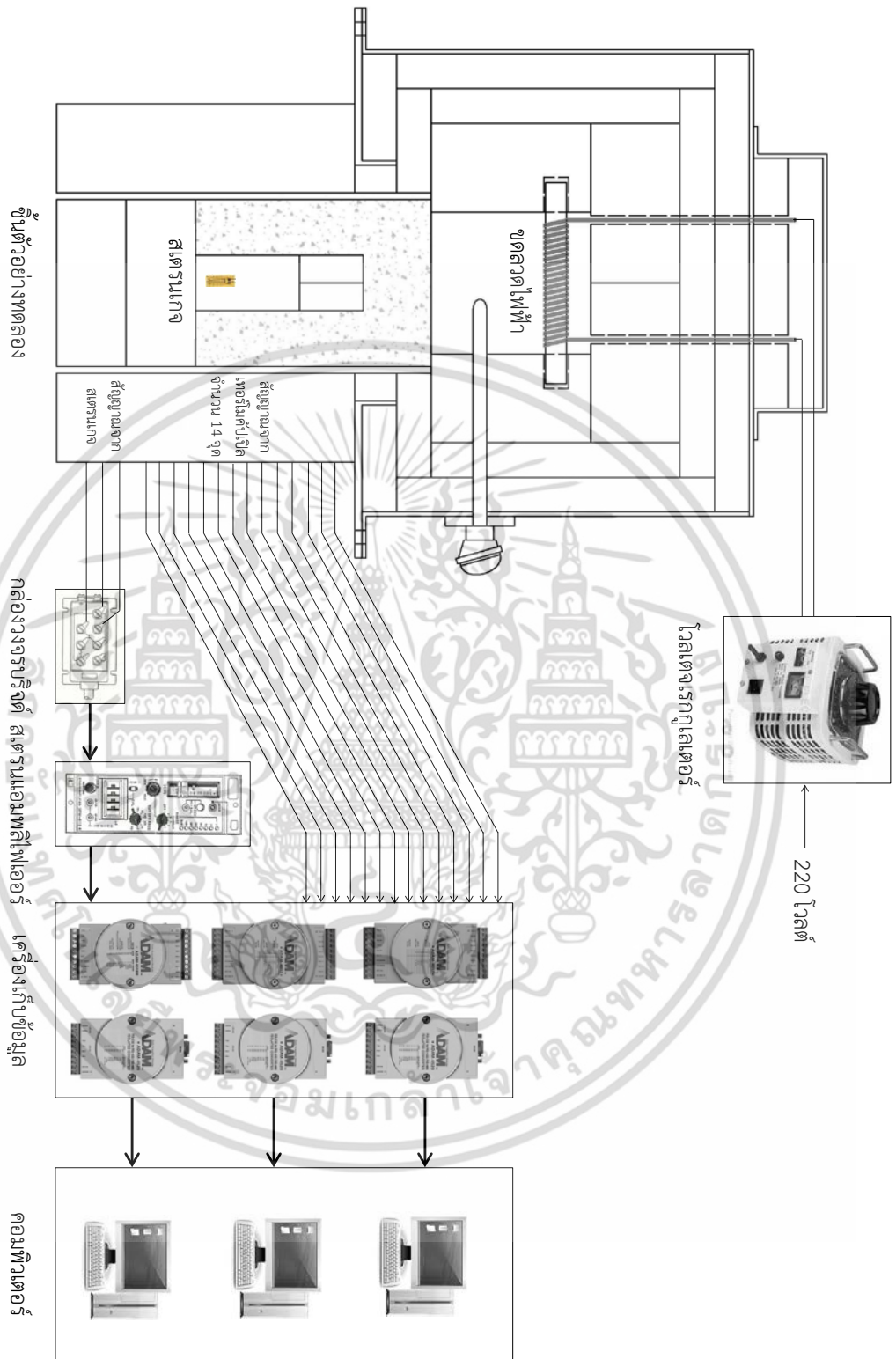


รูปที่ 4.26 เครื่องมือสอบเทียบสายเทอร์โมคัปเปิล

อย่างไรก็ตาม เครื่องมือวัด อย่างเช่น สเตรนเกจ มีข้อจำกัดการใช้งานที่สภาวะอุณหภูมิสูงจึงทำให้การทดลองไม่สามารถดำเนินการที่สภาวะอุณหภูมิทำงานจริงในเตาเผาปูนซีเมนต์ได้ ทำให้การทดลองต้องลดอุณหภูมิสูงสุดที่ผิวด้านร้อน (Hot face) เป็นอุณหภูมิ 700 °C

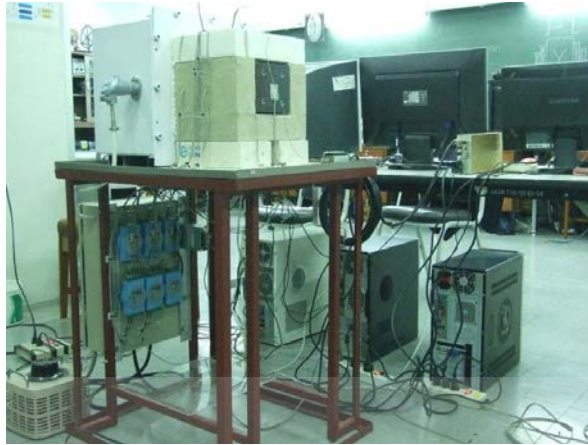
การทดลองเริ่มต้นจากการให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่างทดลองภายใต้การควบคุมปริมาณความร้อนด้วยโวลเตจเรกกูเลเตอร์ (Voltage regulator) กำหนดให้อัตราความร้อนเพิ่มขึ้น (Heating rate) ประมาณ 2.5 °C/min จนถึงอุณหภูมิ 100 °C และคงรักษาอุณหภูมินี้ไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้น ดำเนินการให้ความร้อนในอัตราความร้อนดังกล่าว จนถึง อุณหภูมิ 200 °C และคงรักษาอุณหภูมินี้ไว้ประมาณ 30 นาที แผนการให้ความร้อนที่ผิวด้านร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.29 จนถึงอุณหภูมิ 700 °C และคงรักษาอุณหภูมินี้ตลอดการทดลองแล้วเสร็จ รวมเวลาทั้งสิ้นประมาณ 17 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

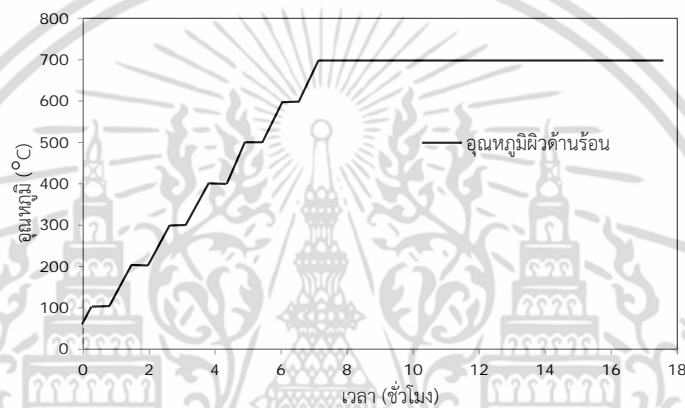


รูปที่ 4.27 แผนผังวงจรเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



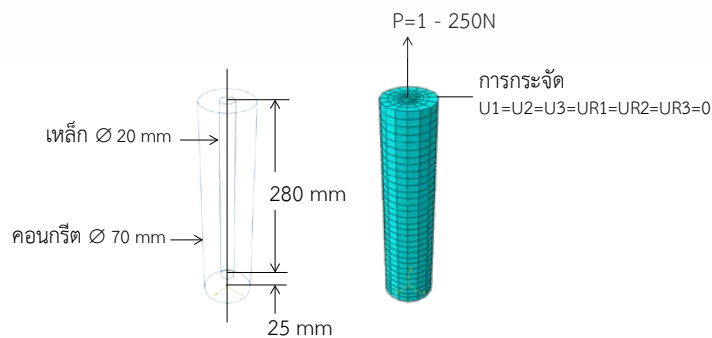
รูปที่ 4.28 ชุดเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 4.29 แผนการให้ความร้อนที่ผิวด้านร้อน (Hot face) ของคอนกรีตทนไฟ

4.12 การศึกษาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาเดิมเกี่ยวกับพันธะแรงยึดเหนี่ยว

เพื่อเป็นการแสดงว่าผลการจำลองพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ จึงได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ABAQUS เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดย Alaka [19] ซึ่งได้จำลองการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริมแรง (Pull out test) โดยแบบจำลองถูกกำหนดให้ พฤติกรรมทางกลของวัสดุเป็นแบบไม่เชิงเส้น พันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตเป็นแบบลื่นไถลได้ (Bond slip) ขนาดและเงื่อนไขขอบเขตดังแสดงในรูปที่ 4.30

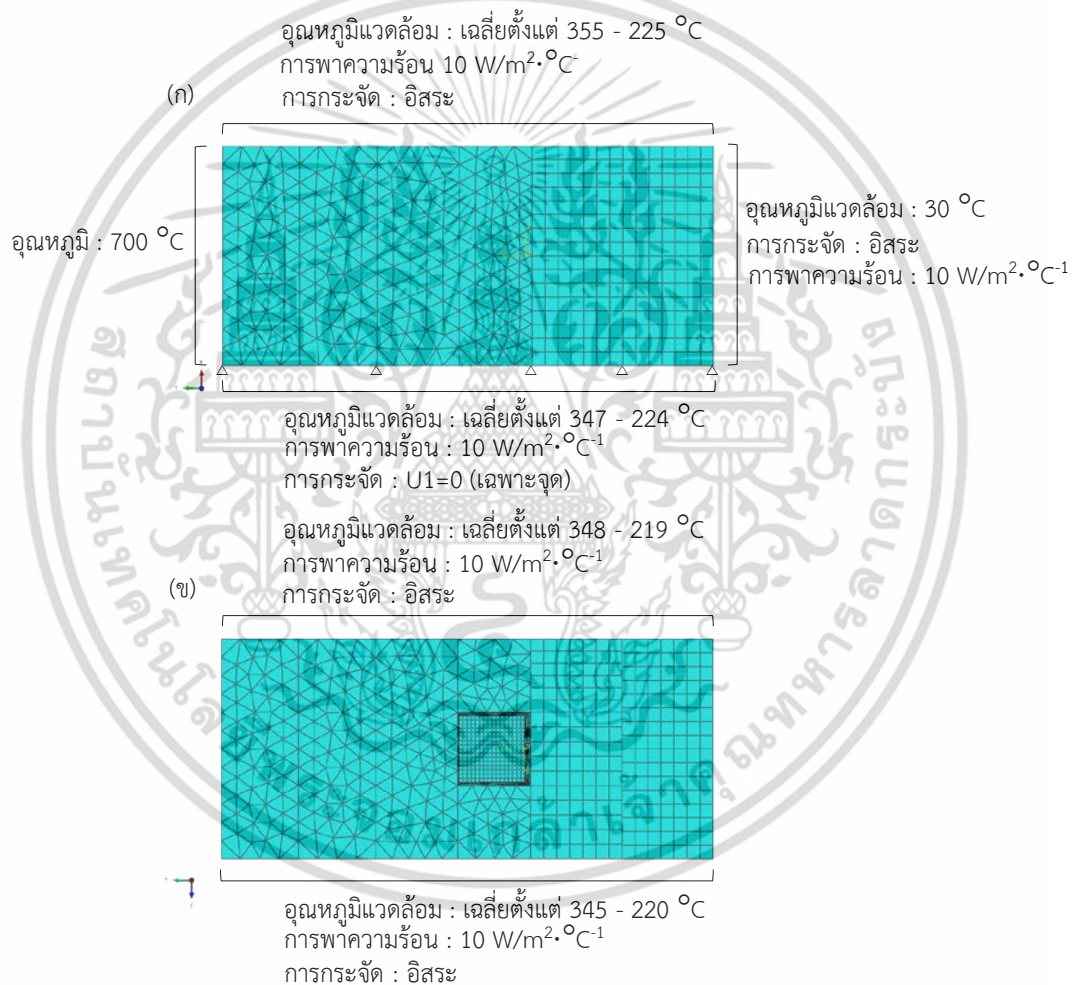


รูปที่ 4.30 เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับภาระและการกระจัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.13 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

เพื่อนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยที่แบบจำลองถูกสร้างให้มีลักษณะเหมือนกับชิ้นตัวอย่างทดลอง เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการศึกษาการกระจายความเค้นเนื่องจากความร้อนในโครงสร้างโนสริง ยกเว้นเงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับอุณหภูมิและการกระจัดถูกกำหนดตามการทดลองเป็นหลัก โดยกำหนดให้ภาวะอุณหภูมิสูงสุดที่ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ และถ่ายเทความร้อนออกสู่สภาวะแวดล้อม โดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อน $10\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ เนื่องจากชิ้นตัวอย่างทดลองถูกรองรับด้วยแท่งเซรามิกขนาดเล็ก 5 จุดจึงกำหนดให้การกระจัดจุดนั้น เป็น $U1=0$ และแบบจำลองอยู่ภายใต้แรงโน้มถ่วง 9.81 m/s^2 รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับอุณหภูมิและการกระจัด (ก) ระนาบ X-Y (ข) ระนาบ Y-Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบสลิ้นไถล (Bond-slip) และแบบยึดแน่นถาวร (Perfect bond) ภายใต้ภาระทางความร้อน

เพื่อศึกษาผลของความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อคอนกรีตทนไฟและความเค้นวอนมิสเสซของเหล็กยึด อันเกิดจากพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบสลิ้นไถลและแบบยึดแน่นถาวรระหว่างคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด ภายใต้ภาระทางความร้อน

4.14.1 แบบจำลองพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบสลิ้นไถล (Bond slip)

แรงยึดเหนี่ยวถูกคำนวณโดยการจำลองความดันสัมผัสและแรงเสียดทานที่มีพันธะต่อกันระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีตทนไฟ พฤติกรรมทางกลของวัสดุทนไฟแบบไม่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิทั้งของเหล็กยึดและคอนกรีตทนไฟ การวิเคราะห์ถูกดำเนินการ ดังนี้

4.14.1.1 แบบจำลอง

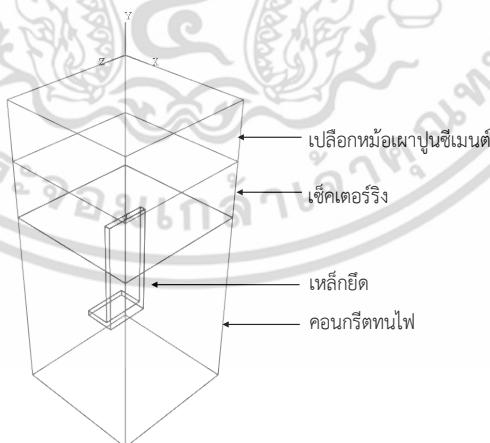
แบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งประกอบด้วย คอนกรีตทนไฟ เหล็กยึด เช็คเตอร์ริง และ เปลือกหุ้มเฝ้าปูนซีเมนต์ ขนาดเท่ากับชิ้นตัวอย่างทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.32

4.14.1.2 คุณสมบัติของเหล็กยึด

พฤติกรรมทางกลของเหล็กเป็นคุณสมบัติแบบยืดหยุ่น และคุณสมบัติแบบพลาสติก ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยจากการทดสอบของ [12]

4.14.1.3 คุณสมบัติของคอนกรีตทนไฟ

พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตทนไฟเป็นคุณสมบัติแบบยืดหยุ่น และคุณสมบัติแบบพลาสติก ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยจากการทดสอบและการจำลองพฤติกรรม



รูปที่ 4.32 ส่วนประกอบของแบบจำลอง

4.14.1.3.1 คุณสมบัติคอนกรีตทนไฟแบบยืดหยุ่น

คุณสมบัติของคอนกรีตทนไฟหาได้จากการทดสอบและการคำนวณประกอบด้วย ค่าความเค้นอัดสูงสุดและโมดูลัสความยืดหยุ่น ดังแสดงในตารางที่ 4.6 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

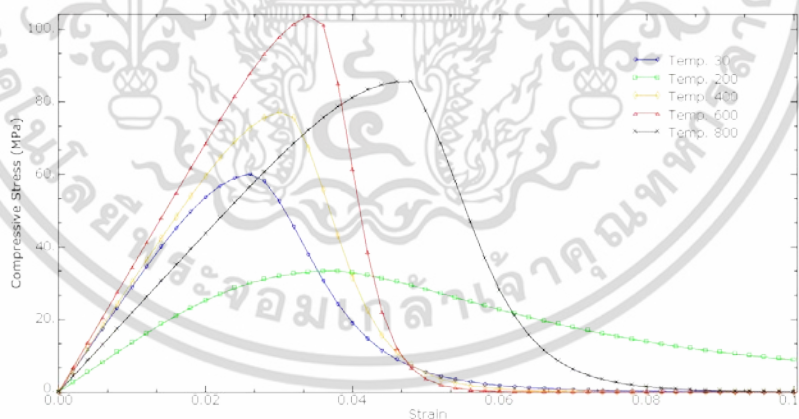
4.14.1.3.2 คุณสมบัติคอนกรีตทนไฟแบบพลาสติก

คุณสมบัติของคอนกรีตทนไฟแบบพลาสติก ประกอบด้วย พฤติกรรมแรงอัด และแบบจำลองคอนกรีตสเมียร์แครกกิง (Concrete Smeared- Cracking) มีรายละเอียดดังนี้

4.14.1.3.2.1 พฤติกรรมแรงอัด

ความเค้นอัดของคอนกรีต f_c สำหรับความเครียดต่างๆ ถูกคำนวณจากสมการที่ (3.48) ผลของการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 4.33 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดสำหรับอุณหภูมิ 30, 200, 400, 600 และ 800 °C

ความเครียดพลาสติกถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.49) และ (3.50) ตามลำดับ และสร้างกราฟความเค้นอัดกับความเครียดพลาสติกของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4.34

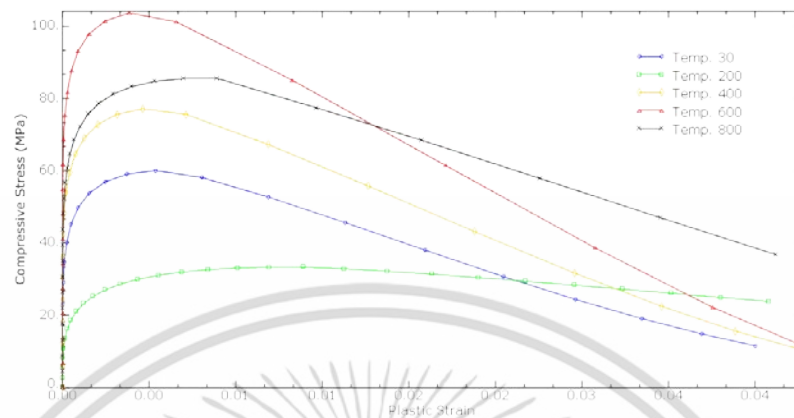


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดของคอนกรีตทนไฟที่อุณหภูมิ 30, 200, 400, 600 และ 800 °C

4.14.1.3.2.2 แบบจำลองคอนกรีตสเมียร์แครกกิง (Concrete-Smeared Cracking)

แบบจำลองคอนกรีตสเมียร์แครกกิง (Concrete smeared cracking) ถูกนำมาใช้เพื่อแสดงพฤติกรรมของคอนกรีตหลังจากแตกร้าว ในแบบจำลองสเมียร์แครกกิง (Smeared crack) แต่ละรอยแตกร้าวเล็กๆ ไม่ได้ถูกพิจารณา การคำนวณลักษณะความสัมพันธ์ถูกดำเนินการอย่างเป็นอิสระ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แต่ละจุดทั้งหมดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และการปรากฏขึ้นของรอยแตกนำไปสู่การคำนวณซึ่งรอยแตกที่มีอิทธิพลต่อความเค้นและความแข็งแรงของวัสดุถูกนำมาเกี่ยวข้องกับทุกจุดทั้งหมดแบบจำลองประกอบด้วยพารามิเตอร์ ดังนี้



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดพลาสติกของคอนกรีตทนไฟ ที่อุณหภูมิ 30, 200, 400, 600 และ 800 °C

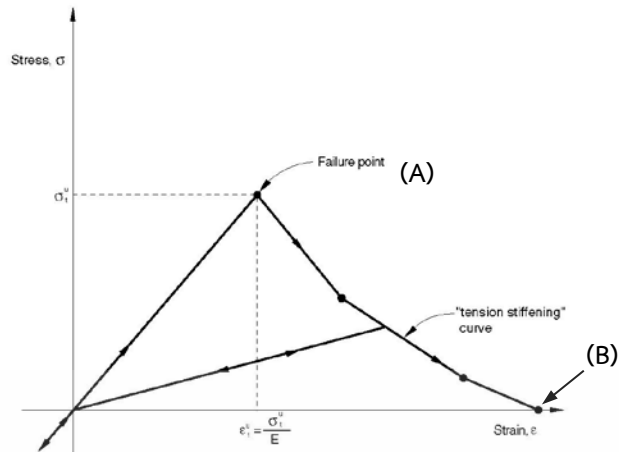
4.14.1.3.2.2.1 เ็นชั้นสตีฟเฟ้นิง (Tension-Stiffening)

หลังจากการเสียหาย (Postfailure) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดถูกใช้เพื่อแสดง เ็นชั้นสตีฟเฟ้นิงในความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดหลังจากการเสียหาย ความเค้นหลังจากการเสียหายถูกใช้เป็นฟังก์ชันของความเครียดผ่านรอยแตกกว้าง ในรูปที่ 4.35 แสดงแบบจำลองเ็นชั้นสตีฟเฟ้นิงที่ความเค้นดึงของคอนกรีตเป็นฟังก์ชันของความเครียดดึง คอนกรีตเริ่มแตกเมื่อคอนกรีตเข้าใกล้ค่าความเค้นดึงสูงสุด σ_1' และหลังจากนั้น จุดที่ความเค้นดึงที่รอยแตกถูกสมมติให้ลดลงเป็นค่าศูนย์แบบเชิงเส้น ซึ่งอธิบายพฤติกรรมสเตรนซอฟเท็นิงของคอนกรีต

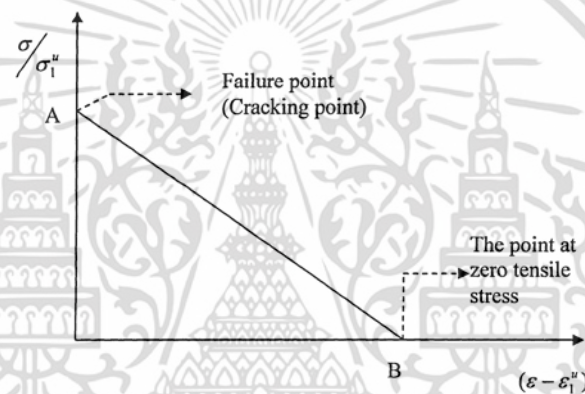
รูปที่ 4.36 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของความเค้นดึงต่อความเค้นดึงสูงสุด (σ/σ_1') ความแตกต่างระหว่างความเครียดโดยตรงและความเครียดที่ความเค้นดึงสูงสุด ($\epsilon - \epsilon_1''$) ความเครียดที่ความเค้นดึงสูงสุดถูกสมมติว่า สเตรนซอฟเท็นิงหลังจากการเสียหายลดลง ความเค้นเชิงเส้นเป็นศูนย์ที่ความเครียดทั้งหมดประมาณ 10 เท่า ของความเครียดที่ความเค้นดึงสูงสุด ความเครียดที่การเสียหายในคอนกรีตมาตรฐาน คือ 10^{-4} ตามคำแนะนำ เ็นชั้นสตีฟเฟ้นิงนั้นลดลงความเค้นที่ค่าศูนย์ที่ความเครียดทั้งหมดประมาณ 10^{-3} เป็นสิ่งมีเหตุผลตามคู่มือ [20] ความแตกต่างระหว่างความเครียดที่ความเค้นดึงสูงสุดและความเครียดที่ค่าศูนย์ คือ 0.0009 แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาในปัจจุบัน พารามิเตอร์นี้ถูกปรับ 0.001 ดังแสดงในรูปที่ 4.36 ที่จุด A คือ จุดความเค้นดึงสูงสุด และจุด B คือ จุดเมื่อความเค้นดึงลดลงเป็นศูนย์ พิกัดของจุด A และ จุด B ถูกกำหนดในการวิเคราะห์และถูกแสดงในตารางที่ 4.7

4.14.1.3.2.2.2 อัตราส่วนความเค้นและอัตราส่วนความเครียดเพื่อกำหนดพื้นผิวเสียหาย

โปรแกรม ABAQUS ใช้ อัตราส่วนการเสียหายเพื่อกำหนดรูปร่างของการเสียหายสำหรับแบบจำลองคอนกรีตทนไฟ สามารถป้อนข้อมูลทั้ง 4 ได้ดังนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 แบบจำลองเห็นชั้นสทิฟเฟนนิ่ง (Tension stiffening) แสดงลักษณะความเค้นกับความเครียดภายหลังการเสียหาย ตามคู่มือ ABAQUS [20]



รูปที่ 4.36 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเค้นดิ่งต่อความเค้นดิ่งสูงสุดกับความแตกต่างระหว่างความเครียดโดยตรงและความเครียดที่ความเค้นดิ่งสูงสุด [19]

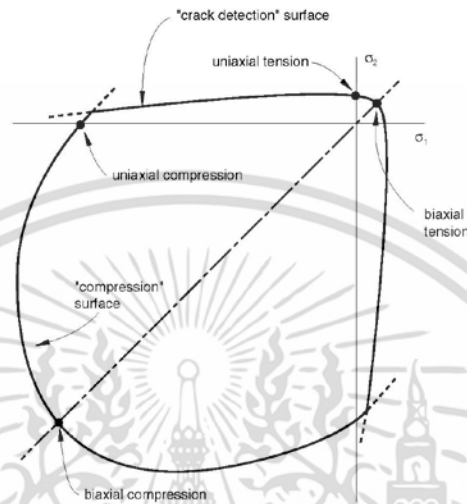
ตารางที่ 4.7 ข้อมูลสำหรับเห็นชั้นสทิฟเฟนนิ่ง (Tension stiffening) [19]

σ/σ_1''	$\varepsilon - \varepsilon_1''$
1	0
0	0.001

- 1) อัตราส่วนของความเค้นอัดสูงสุดในสองแกนต่อความเค้นอัดสูงสุดในหนึ่งแกน ค่าเริ่มต้นของโปรแกรม คือ 1.16
- 2) ค่าสมบูรณ์ของอัตราส่วนของความเค้นดิ่งในหนึ่งแกนที่เสียหายต่อความเค้นอัดสูงสุดในหนึ่งแกน
- 3) อัตราส่วนของความเครียดพลาสติกที่ความเค้นอัดสูงสุดในสองแกนต่อความเครียดพลาสติกที่ความเค้นอัดสูงสุดในสองแกน ค่าเริ่มต้นของโปรแกรม คือ 1.28
- 4) อัตราส่วนของความเค้นดิ่งหลักที่แตกเร็วในระนาบความเค้น เมื่อความเค้นหลักอื่นๆ ที่ค่าแรงอัดสูงสุดต่อความเค้นดิ่งภายใต้แรงดิ่งในหนึ่งแกน ค่าเริ่มต้นของโปรแกรม คือ 1/3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปที่ 4.37 แสดงพื้นระนาบความเค้นของคอนกรีต ที่ σ_1 และ σ_2 แสดงความเค้นหลักในทิศทาง 1 และ 2 ตามลำดับ ที่จุด “Biaxial tension stress” จำนวนความเค้นดึง ทั้งในทิศทาง 1 และ 2 เช่นเดียวกัน “Biaxial compression stress” จำนวนความเค้นอัดทั้งในทิศทาง 1 และ 2 “Compressive yield surface” แสดงอาการความไม่ยืดหยุ่นของคอนกรีต เมื่อความเค้นหลักเป็นแรงอัด “The crack detection surface” ความเค้นที่รอยแตกเริ่มเกิดขึ้น



รูปที่ 4.37 ฟังก์ชันการเสียหายภายใต้ระนาบความเค้น ตามคู่มือ ABAQUS [20]

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

$$= \frac{f'_t}{f'_c} \quad (4.4)$$

โดยที่ ความเค้นดึงสูงสุดของคอนกรีตถูกประมาณค่า โดยใช้สมการที่ (3.51) 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14.1.4 การจำลองพันธะแรงยึดเหนี่ยวที่มีต่อกันระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีต

ปัญหาทางวิศวกรรมเกี่ยวกับพื้นผิวสัมผัสระหว่างสององค์ประกอบหรือมากกว่า ในปัญหาเหล่านี้แรงที่ผิวสัมผัสกระทำบนวัตถุเมื่อวัตถุสัมผัสกัน ถ้ามีแรงเสียดทานระหว่างผิวก็สามารถสร้างความต้านทานการเคลื่อนที่ขณะสัมผัสสำหรับวัตถุ

ขั้นตอนกำหนดการสัมผัสในการจำลอง มี 3 ขั้นตอน

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

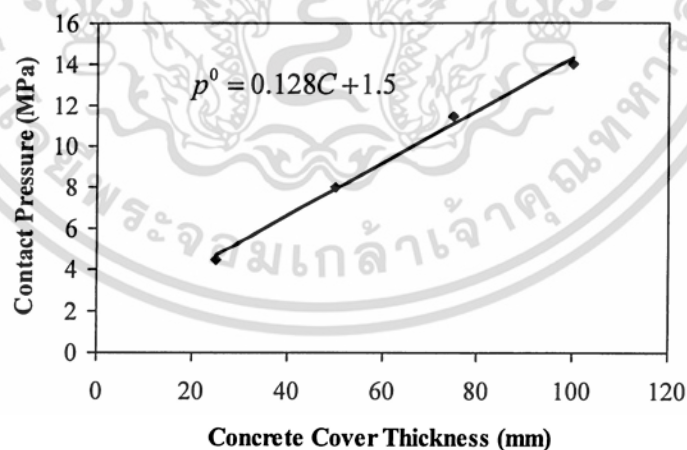
พฤติกรรมของผิวเมื่อสัมผัสกัน

4.14.1.4.1 การจำลองแรงดันสัมผัส (Contact Pressure)

แบบจำลองแรงดันสัมผัสสำหรับพันธะระหว่างคอนกรีตและเหล็ก ในแบบจำลองแรงยึดเหนี่ยว ที่ p^0 แปรผันกับความหนาของคอนกรีตที่หุ้ม ความแตกต่างของ p^0 ถูกป้อนโดยการใช้การวิเคราะห์แบบสมการถดถอย สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสัมผัสที่ช่องว่างเป็นศูนย์และความหนาของคอนกรีตที่หุ้ม ซึ่งสามารถใช้เพื่อคำนวณแรงดันสัมผัสสำหรับคอนกรีตดังกล่าว รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสัมผัสและความหนาของคอนกรีตที่หุ้ม สมการที่ (4.5) กำหนดความสัมพันธ์ของแรงดันสัมผัสและความหนาของคอนกรีตที่หุ้ม

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

โดยที่ p^0 คือ แรงดันสัมผัส และ C คือ ความหนาของคอนกรีตที่หุ้ม

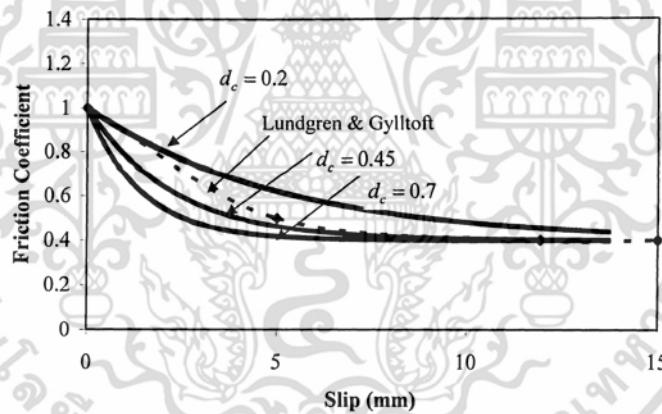


รูปที่ 4.38 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสัมผัสกับความหนาของคอนกรีตที่หุ้ม [19]

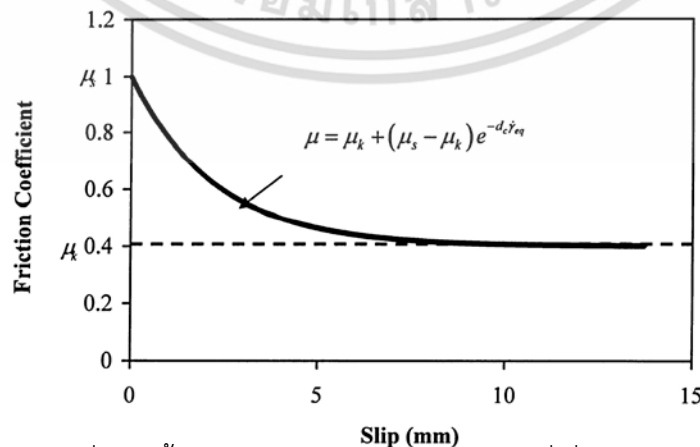
4.14.1.4.2 การจำลองแรงเสียดทานที่มีพันธะต่อกันระหว่างเหล็กและ

คอนกรีต

Lundgren และ Gylltoft (2000) ได้พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการลื่นไถลโดยการใช้ผลทดลองของ Tepfers และ Olsson (1992) จากการพัฒนาโดย Lundgren และ Gylltoft ได้ค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบสถิต $\mu_s = 1$ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ คือ $\mu_k = 0.4$ และค่าเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันเลขชี้กำลังจากเงื่อนไขแบบสถิตเป็นแบบจลน์ ต่อมา Alaka นำค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเหล่านี้มาปรับให้เหมาะสม ค่าความแตกต่างของฟังก์ชันการเสื่อมลง ซึ่งควรจะใช้น้อยกว่า 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.39 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับการลื่นไถลสำหรับค่าความแตกต่างของค่า d_c เห็นได้ชัดเจนว่ากราฟของ $d_c = 0.45$ จะเข้ากันได้ดีกับกราฟ Lundgren และ Gylltoft ดังนั้น แบบจำลองในส่วนนี้จึงอาศัยข้อมูลดังต่อไปนี้ของ Alaka มาใช้สำหรับป้อนค่าในโปรแกรม ABAQUS ได้แก่ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบสถิต คือ $\mu_s = 1$ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ คือ $\mu_k = 0.4$ สัมประสิทธิ์การเสื่อมลง $d_c = 0.45$ ค่าดังกล่าวถูกใช้ในสมการที่ (3.53) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่อการลื่นไถลถูกคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 4.40 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับการลื่นไถลที่มีพันธะต่อกันระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีตทนไฟ



รูปที่ 4.39 แบบจำลองแรงเสียดทานของสัมประสิทธิ์การเสื่อมลง [19]



รูปที่ 4.40 ฟังก์ชันเลขชี้กำลังในแบบจำลองแรงเสียดทานที่เสื่อมลงมีปฏิริยาต่อกันระหว่าง

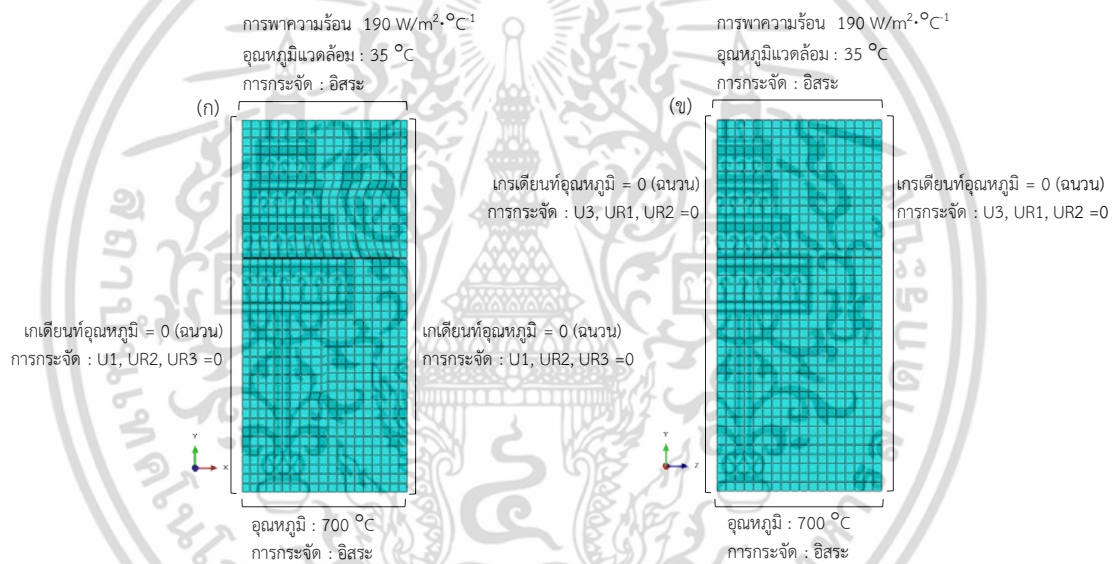
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และคอนกรีต [19] การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14.1.5 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

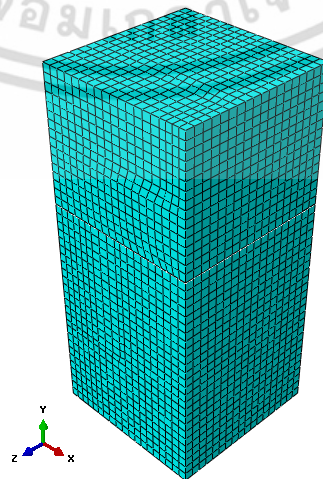
โดยปกติแล้ว ความเค้นจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อนมีขนาดใหญ่กว่าความเค้นจากแรงโน้มถ่วงมาก ดังนั้น ความเค้นจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อนจึงได้รับความสนใจมากกว่า [24] แบบจำลองถูกกำหนดให้อยู่ภายใต้ภาระทางความร้อนที่อุณหภูมิ 700 °C (ไม่คำนึงถึงน้ำหนักของวัสดุทนไฟ) เงื่อนไขขอบเขตการกระจัดและอุณหภูมิด้านข้างมีค่าเป็นศูนย์ และการถ่ายเทความร้อนออกสู่สภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิ 35 °C โดยการพาความร้อนแบบบังคับ มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อน $190 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}^{-1}$ [23] ดังแสดงในรูปที่ 4.41

4.14.1.6 การสร้างตาข่าย (Mesh)

เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองถูกกำหนดเป็นแบบลูกบาศก์ (Hexahedral) 8 โหนด ทั้งแบบจำลองเหล็กยึดและคอนกรีตทนไฟ แบบจำลองหลังจากประยุกต์ใช้เอลิเมนต์สามารถสร้างตาข่ายดังแสดงในรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.41 เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับอุณหภูมิและการกระจัด (ก) ระนาบ X-Y (ข) ระนาบ Y-Z

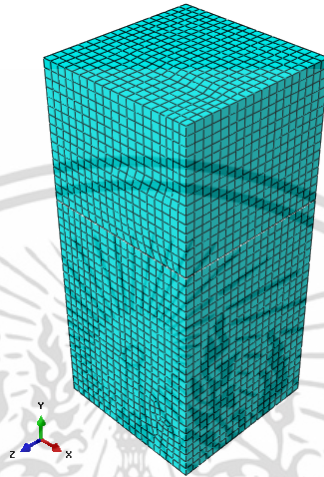


รูปที่ 4.42 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากการแบ่งเอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14.2 แบบจำลองพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบยึดแน่นถาวร (Perfect bond)

แบบจำลองถูกสร้างเหมือนกันกับแบบจำลองพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถลได้ แต่พฤติกรรมทางกลของวัสดุทนไฟทั้งหมดเป็นแบบเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและพันธะระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีตทนไฟเป็นแบบยึดแน่นถาวรไม่สามารถลื่นไถลได้ แบบจำลองหลังจากประยุกต์ใช้เอลิเมนต์สามารถสร้างตาข่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากการแบ่งเอลิเมนต์

4.15 การศึกษาการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยการคำนวณ

การคำนวณระยะห่างระหว่างเหล็กยึดมีความซับซ้อน เนื่องจากมีจำนวนของปัจจัยที่เกี่ยวข้องมาก เช่น ความหนาของเหล็กยึด ชนิดของวัสดุทนไฟที่ใช้ และอื่นๆ ดังนั้น การหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดจึงเป็นค่าโดยประมาณ ด้วยการสมมติเงื่อนไขอย่างเข้มงวดที่สุด

สมมติฐานการคำนวณเบื้องต้น ดังนี้

- 1) คอนกรีตทนไฟแบบชั้นเดียว
- 2) ความเค้นดึงอนุญาตของเหล็กยึด เหล็กยึดถูกทำมาจากเหล็กสแตนเลสเกรด SUS310S ความเค้นดึงสูงสุด 448 kgf/cm^2 ที่อุณหภูมิ $1,093 \text{ }^\circ\text{C}$ [12] กำหนดให้ค่าความปลอดภัย 20 [18] นั่นคือ $\sigma_m = 448/20 = 22.4 \text{ kgf/cm}^2$
- 3) ความหนาแน่นของคอนกรีตทนไฟ ข้อมูลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการของบริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด คือ $\rho_1 = 0.00273 \text{ kg/cm}^3$
- 4) ความเค้นดัดอนุญาตของคอนกรีตทนไฟ การคำนวณความเค้นดัดนั้น โมดูลัสของการแตกของคอนกรีตทนไฟที่อุณหภูมิ $1,000 \text{ }^\circ\text{C}$ คือ 140 kg/cm^2 ข้อมูลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการของบริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด และกำหนดให้ปัจจัยความปลอดภัยเป็น 20 [18] นั่นคือ $\sigma_r = 140/20 = 7 \text{ kgf/cm}^2$
- 5) ชนิดของเหล็กยึด การคำนวณอยู่บนพื้นฐานชนิดของเหล็กยึดแบบง่าย คือ เหล็กยึดแบบแผ่นแบนและแบบเส้นกลม พื้นที่หน้าตัด 2 cm^2 และ 0.56 cm^2 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ภายใต้ภาระแรงดึง
- 6) ระยะห่างระหว่างเหล็กยึดจะถือว่าเป็นเหมือนกันในทั้งสองทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้น นำคุณสมบัติเหล่านี้แทนค่าในสมการที่ 3.38 และ สมการที่ 3.42 ผลการคำนวณ ถูกนำเสนอในลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างเหล็กยึดและความหนาคอนกรีตทนไฟ ในบทถัดไป

4.16 การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยการคำนวณนั้น เป็นเรื่องที่ทำได้ยากมากสำหรับ กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา งานวิจัยนี้ นำเสนอผลของระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าความเค้นวอนมิสเชสในเหล็กยึดต่อปริมาตรของคอนกรีตทนไฟ คือ ปัจจัยสำหรับ วิเคราะห์แนวโน้มของความเค้นในเหล็กยึดภายใต้ภาระทางความร้อนเป็นสำคัญ และนำค่าดังกล่าวมา เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์ระยะห่างของเหล็กยึด

4.16.1 แบบจำลอง

แบบจำลองพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล (Bond slip) ในหัวข้อ 4.14.1 ถูกนำมา ประยุกต์ใช้ โดยการขยายพื้นที่ของคอนกรีตทนไฟ เซ็คเตอร์ริง และเปลือกหุ้มเฉาปูน เพิ่มในทิศทาง แกน X และแกน Z รายละเอียดของแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.9 แบบจำลองหลังจาก ประยุกต์ใช้เอลิเมนต์สามารถสร้างตาข่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.44

ตารางที่ 4.9 รายละเอียดของปริมาตรคอนกรีตทนไฟของแบบจำลอง

แบบจำลอง	ขนาดคอนกรีตทนไฟ (cm)			ปริมาตร (cm ³)
	แกน X	แกน Y	แกน Z	
1	8	17	8	1,088
2	12	17	12	2,448
3	16	17	16	4,352
4	20	17	20	6,800



รูปที่ 4.44 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากการแบ่งเอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการวิจัย

5.1 บทนำ

ในบทนี้ นำเสนอผลการวิจัย 7 ส่วน ได้แก่ 1) ผลของการจำลองโครงสร้างโนสริงถูกนำเสนอในเชิงเปรียบเทียบกันตามปัจจัยของจำนวนและชนิดเหล็กยึด ซึ่งประกอบด้วย การกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อคอนกรีตทนไฟ การกระจายอุณหภูมิทั้งคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด และความเค้นวอนมิสเซสของเหล็กยึด 2) ผลของการทดลองถูกนำเสนอทั้งอุณหภูมิและความเครียดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา 3) ผลของการจำลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบกับการศึกษาเดิมเกี่ยวกับพันธะแรงยึดเหนี่ยว 4) ผลของการจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลของการทดลอง และตรวจสอบการรูดตัวของแบบจำลอง 5) ผลของการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบลื่นไถล (Bond-slip) และแบบยึดแน่นถาวร (Perfect bond) 6) ผลของการคำนวณหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดถูกนำเสนอในลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเหล็กยึดและความหนาของคอนกรีตทนไฟ 7) ผลของการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำเสนอในเชิงเปรียบเทียบตามปัจจัยของปริมาณคอนกรีตทนไฟและนำเสนอในลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเหล็กยึดและความเค้นวอนมิสเซสสูงสุดของเหล็กยึด

5.2 ผลของการศึกษาการกระจายความเค้นเนื่องจากความร้อนในโครงสร้างโนสริง

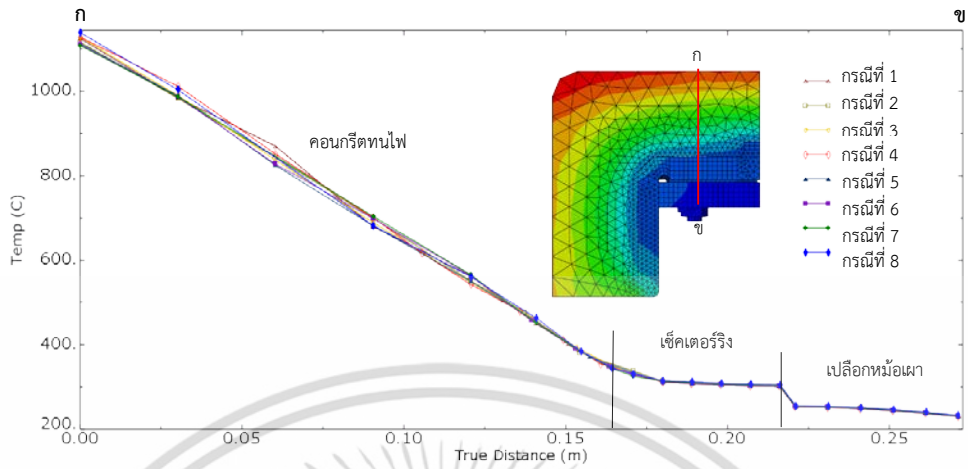
การมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างการกระจายความร้อนและการกระจายความเค้นในโครงสร้างโนสริง ด้วยปัจจัยจากจำนวนและชนิดเหล็กยึด ผลจากการจำลองถูกนำเสนอทั้งการกระจายอุณหภูมิและการกระจายความเค้นของคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด ดังนี้

5.2.1 การกระจายอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด

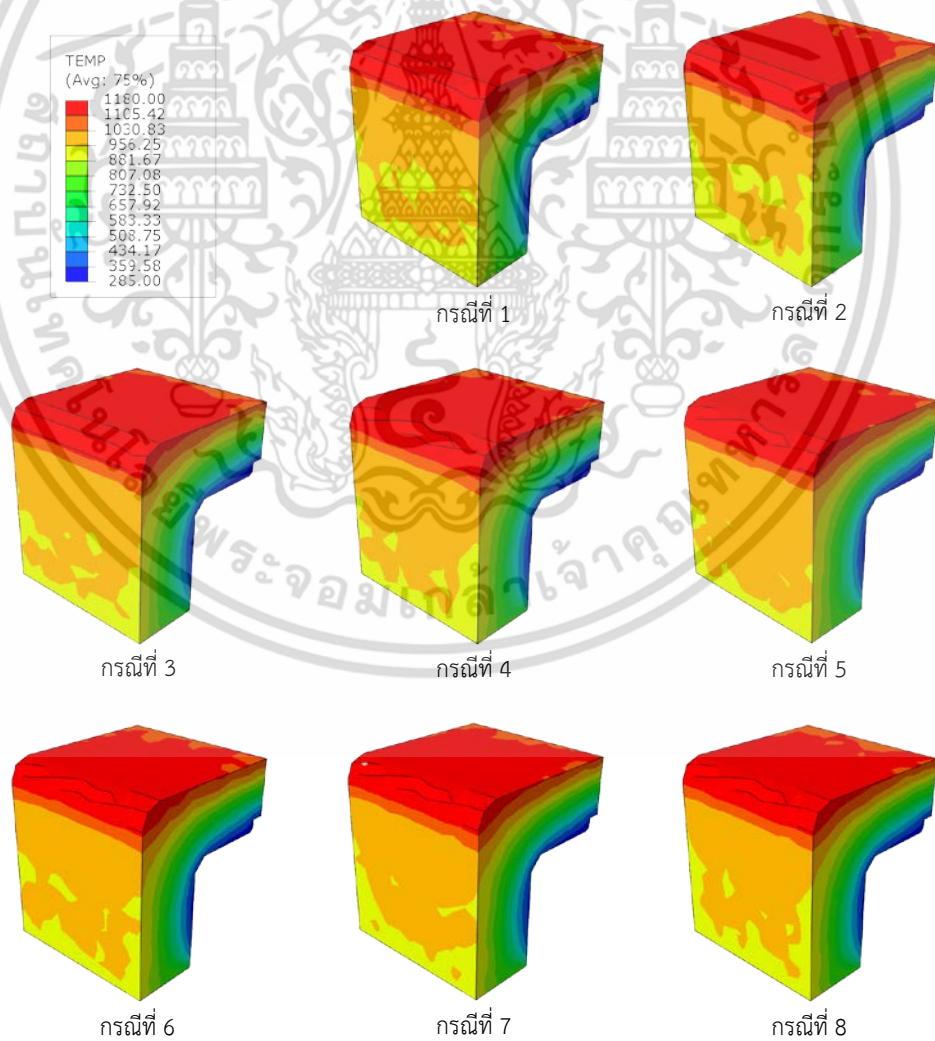
การถ่ายเทความร้อนจากผิวด้านร้อนของคอนกรีตทนไฟถึงเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์ทั้งหมด 8 กรณี มีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยตั้งแต่ผิวด้านร้อน ผิวด้านเย็น และเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์ มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 1,121, 316 และ 232 °C ตามลำดับ การกระจายอุณหภูมิทั้งคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดถูกนำเสนอทั้งหมด 8 กรณี โดยปรากฏว่าคอนกรีตทนไฟแต่ละกรณีเกิดกระจายอุณหภูมิเป็นไปในลักษณะเดียวกันและใกล้เคียงกัน เกิดอุณหภูมิสูงสุดตรงบริเวณมุมของโนสริง ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และส่งผลให้เหล็กยึดตรงบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งเป็นเหล็กยึดที่ถูกติดตั้งบริเวณมุมโนสริงทั้งสิ้น ได้แก่ อันที่ 5 และ 6 ดังแสดงในตารางที่ 5.1 อันที่ 7, 8 และ 9 ดังแสดงในตารางที่ 5.2 อันที่ 9, 10, 11 และ 12 ดังแสดงในตารางที่ 5.3 อันที่ 5 และ 6 ดังแสดงในตารางที่ 5.4 อันที่ 7, 8 และ 9 ดังแสดงในตารางที่ 5.5 อันที่ 5 และ 6 ดังแสดงในตารางที่ 5.6 อันที่ 7, 8 และ 9 ดังแสดงในตารางที่ 5.7 อันที่ 9, 10, 11 และ 12 ดังแสดงในตารางที่ 5.8 เมื่อพิจารณาเหล็กยึดทั้ง 3 ชนิดเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างกัน เพราะว่าปลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเหล็กยึดอยู่ห่างจากผิวด้านร้อนของคอนกรีตทนไฟไม่เท่ากัน ทำให้เหล็กยึดชนิด เหล็กแผ่นตัว Y เหล็กกลมตัว Y และ เหล็กแผ่นตัว L เกิดอุณหภูมิสูงสุด 1,041, 970 และ 955 °C ตามลำดับ

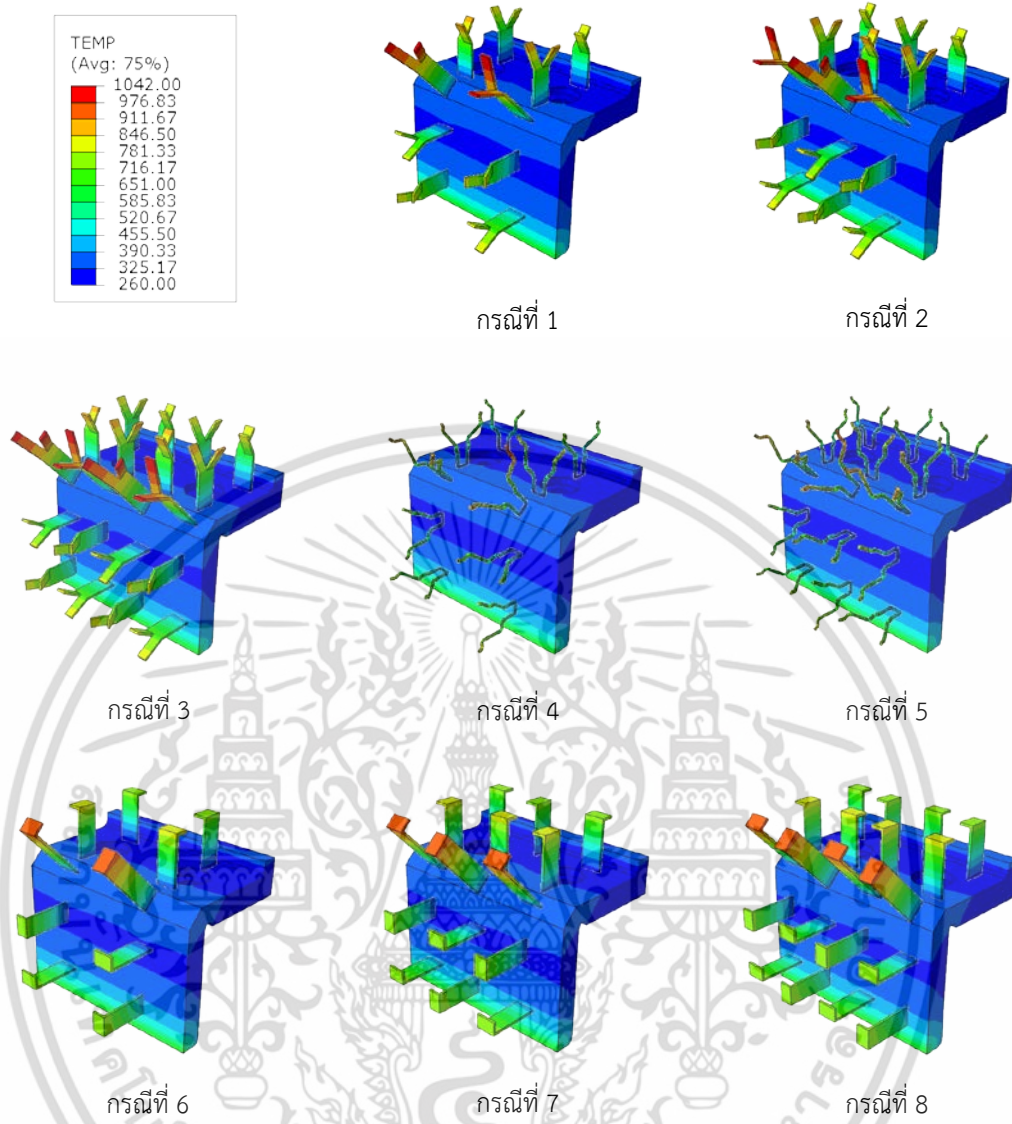


รูปที่ 5.1 ผลของการถ่ายเทความร้อนตั้งแต่ผิวด้านร้อนถึงเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์



รูปที่ 5.2 ผลของการกระจายอุณหภูมิของคอนกรีตทนไฟ ทั้ง 8 กรณี

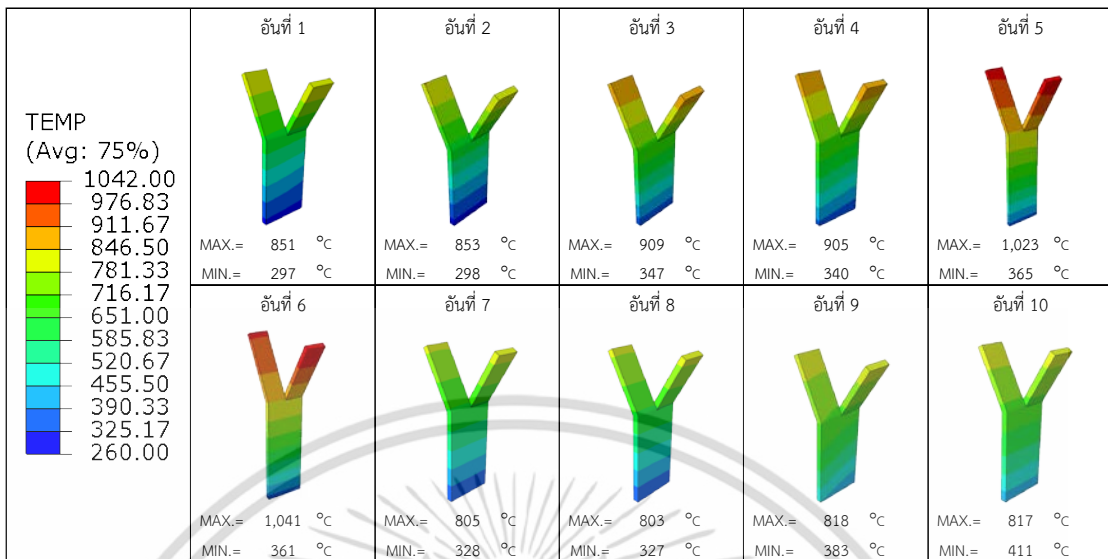
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



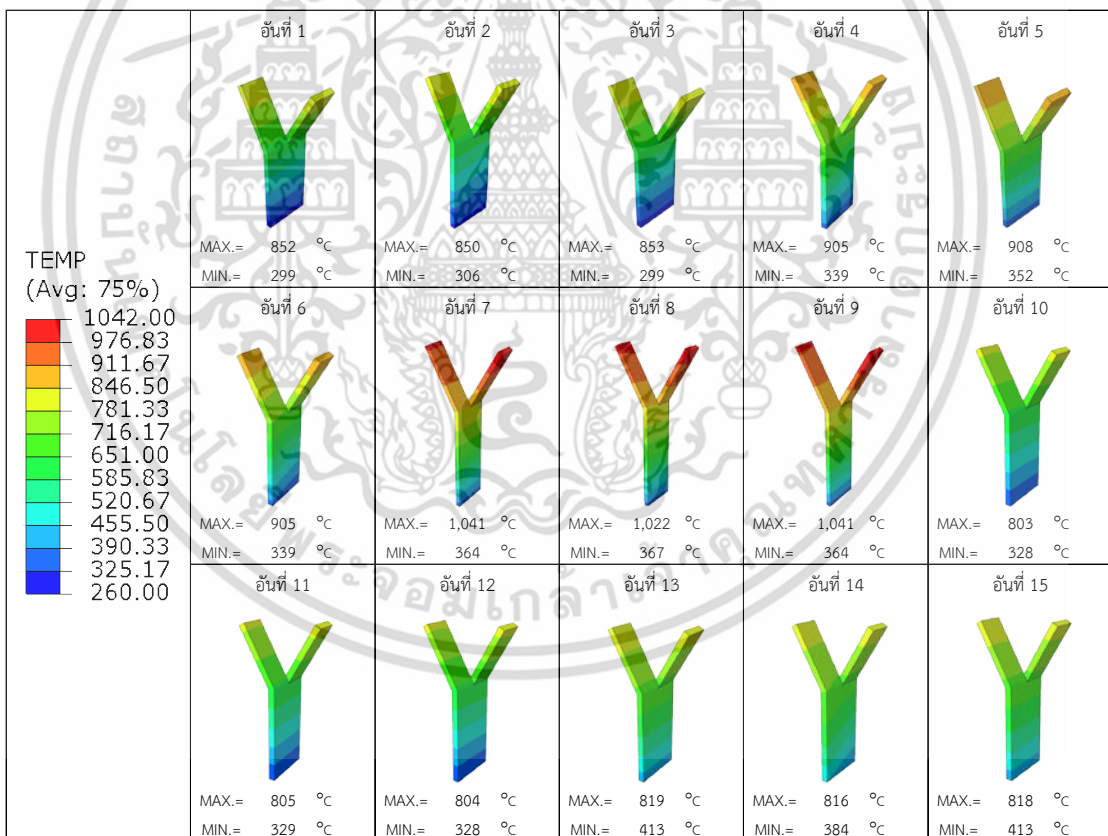
รูปที่ 5.3 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด ทั้ง 8 กรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยัด แบบจำลองกรณีที่ 1

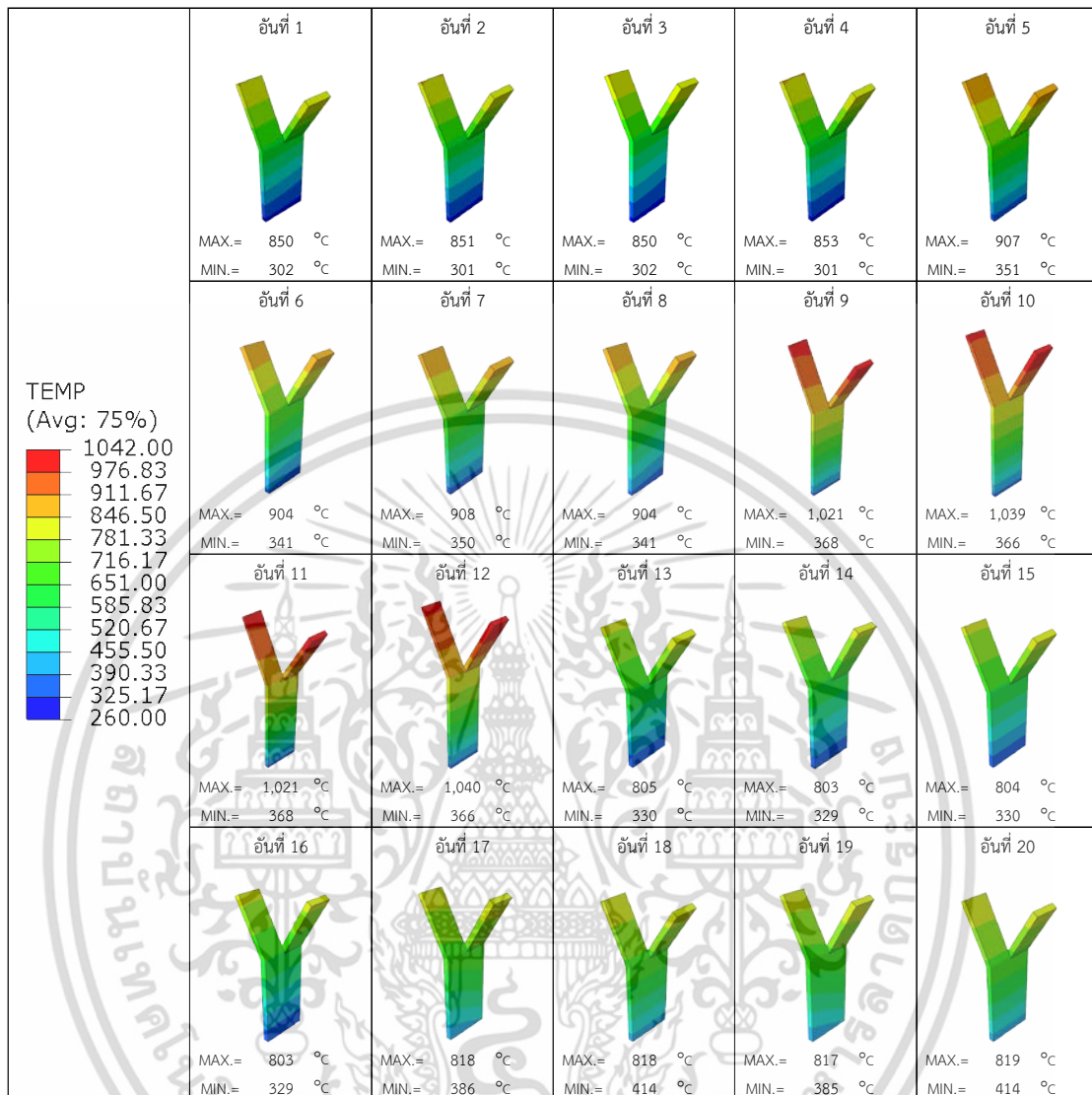


ตารางที่ 5.2 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยัด แบบจำลองกรณีที่ 2



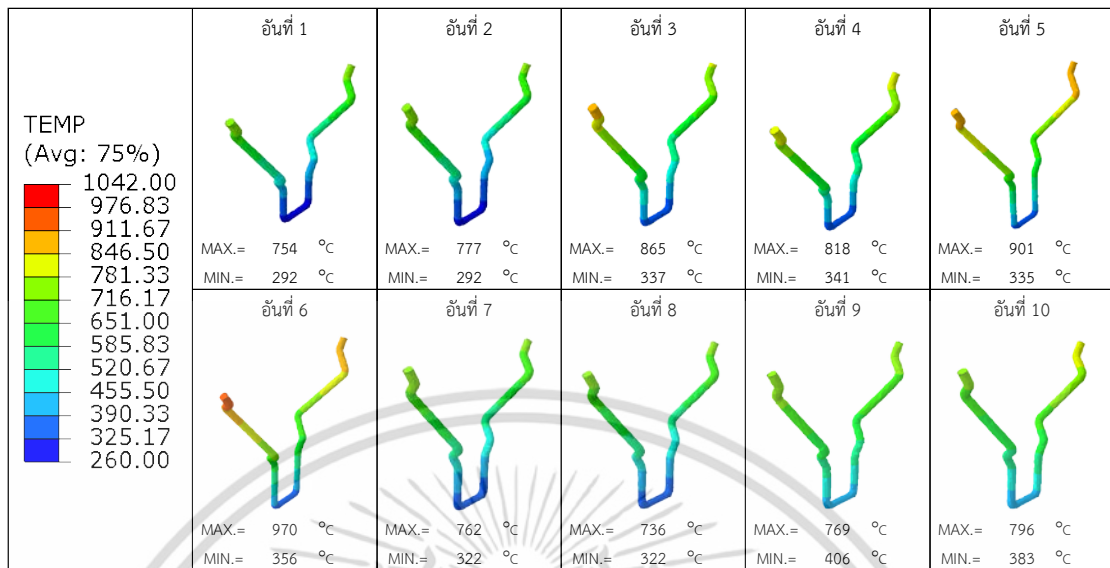
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 3

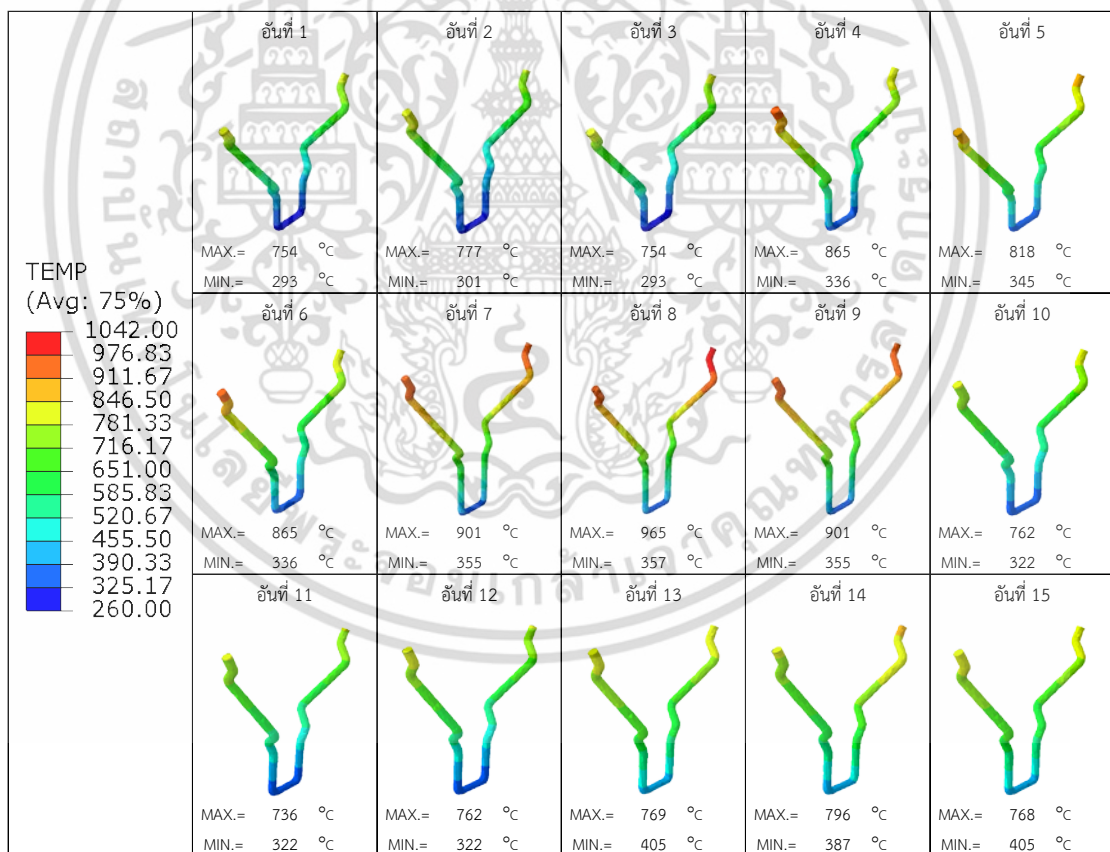


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 4

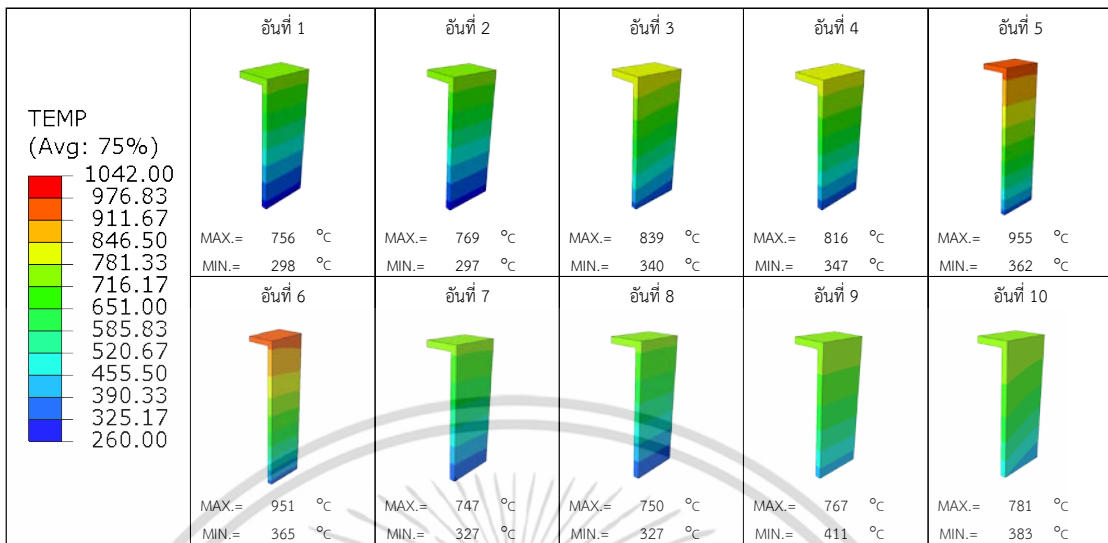


ตารางที่ 5.5 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 5

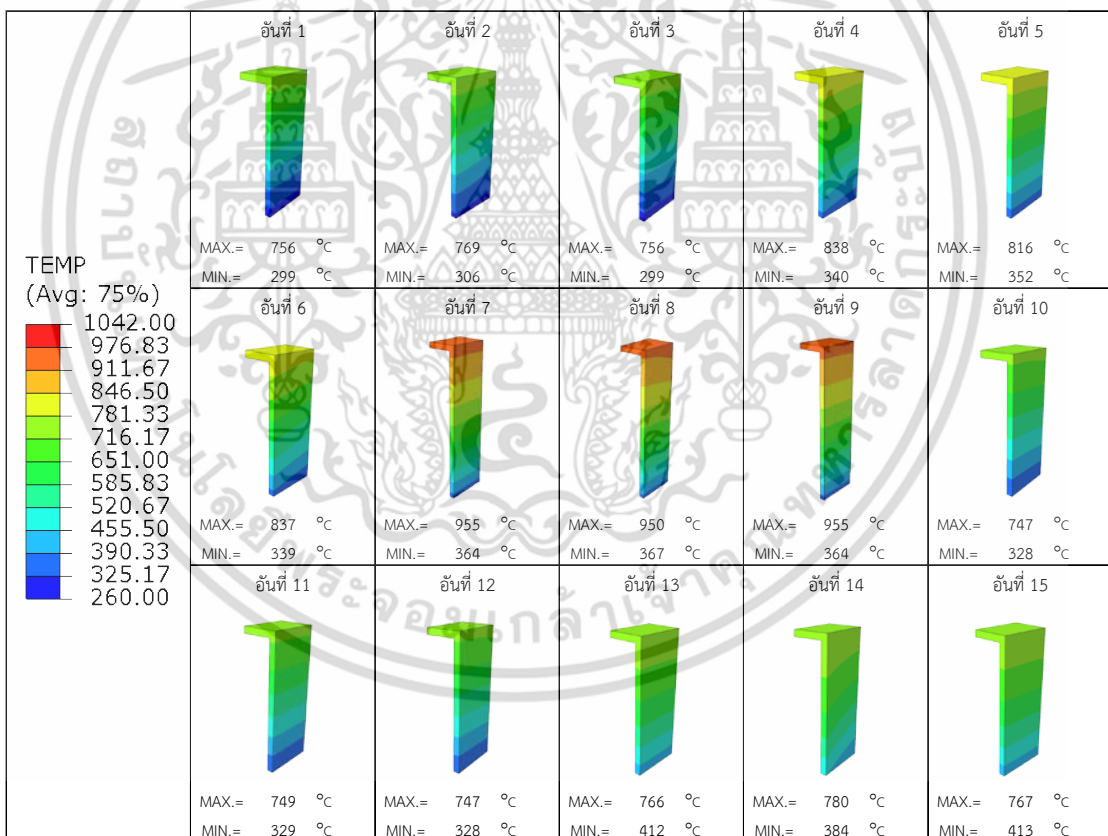


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 6

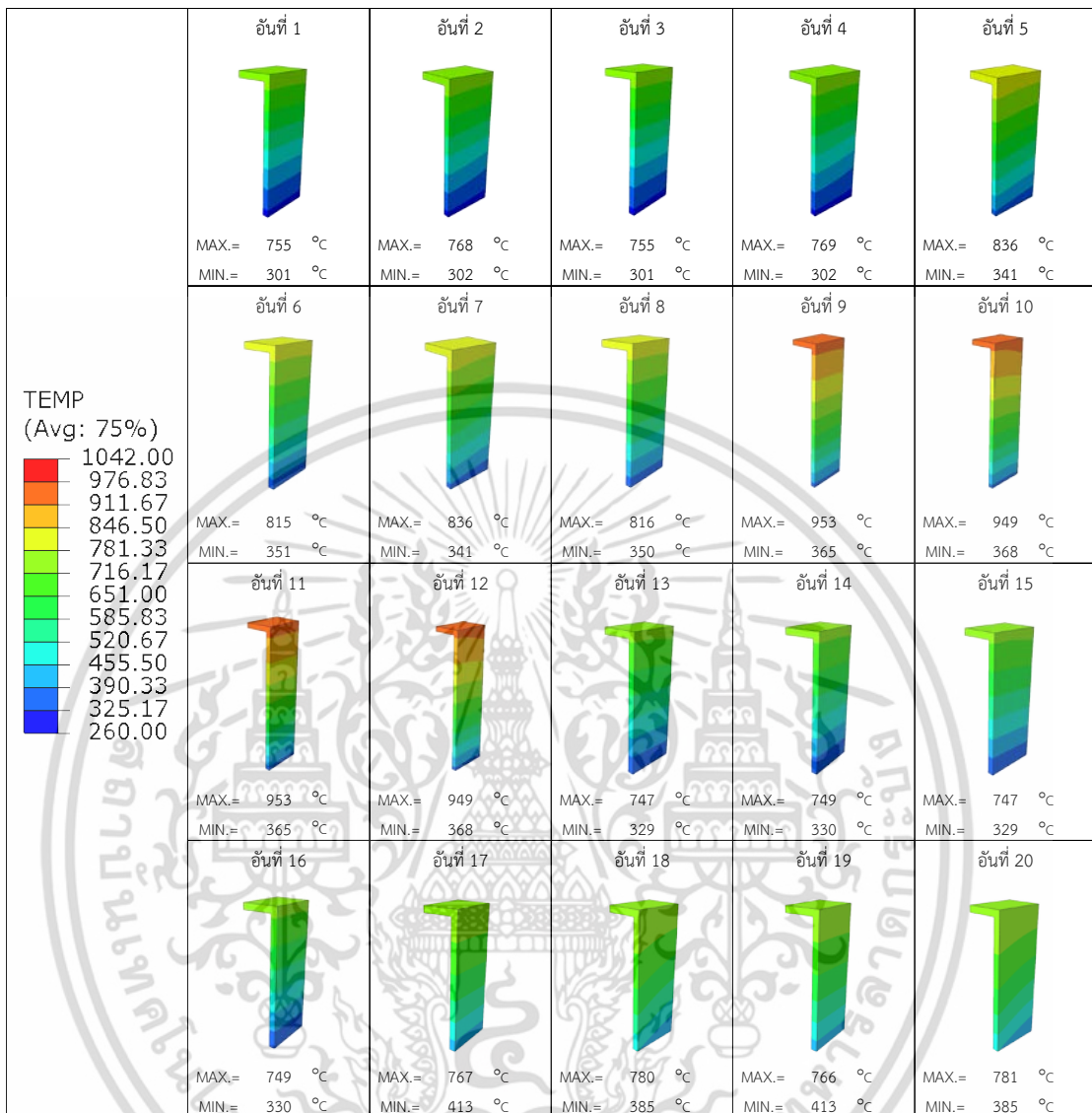


ตารางที่ 5.7 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

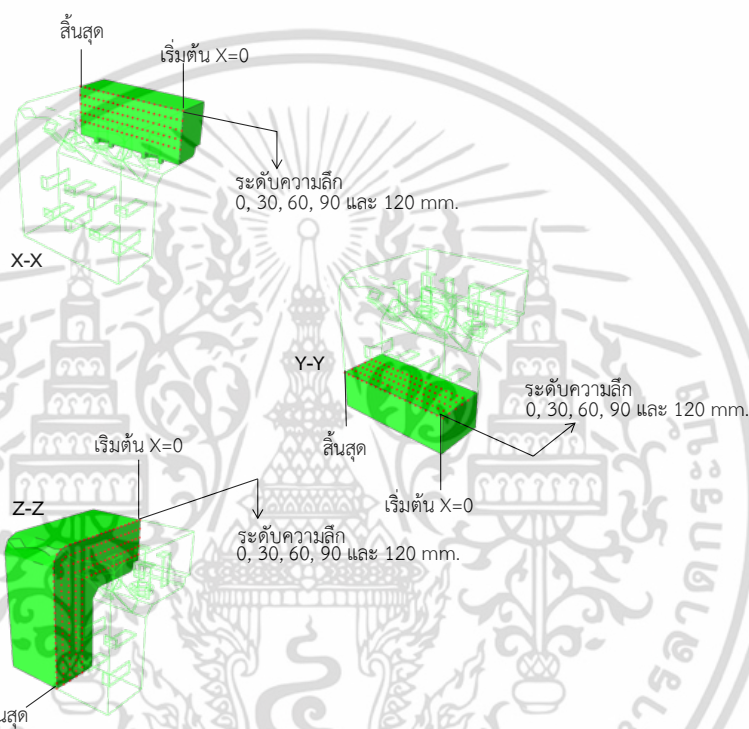
ตารางที่ 5.8 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 การกระจายความเค้นของคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึด

การกระจายความเค้นหลักสูงสุดในคอนกรีตทนไฟถูกนำเสนอผลจากปัจจัยของจำนวนและชนิดเหล็กยึด ผลจากแบบจำลองโครงสร้างโนสริงปรากฏว่า การกระจายความเค้นในเนื้อคอนกรีตทนไฟมีความซับซ้อนมาก โดยมีทั้งการเพิ่มขึ้นและลดลงของความเค้นในระนาบเดียวกัน และเมื่ออยู่ใกล้เหล็กยึดการกระจายความเค้นมีค่าสูงมาก ดังนั้น การวิเคราะห์ผลความเค้นจึงเลือกแนวตรงกลางระหว่างเหล็กยึดมาเป็นเกณฑ์ ตั้งแต่ระดับผิวคอนกรีตทนไฟ (0 mm) จนถึงความลึก 30, 60, 90 และ 120 mm ในส่วนตัด 3 ระนาบ ได้แก่ X-X, Y-Y และ Z-Z ดังแสดงในรูปที่ 5.4 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองกรณีที่ 1 ถึง 8 ที่ส่วนตัดและระดับความลึก ดังแสดงในตารางที่ 5.9



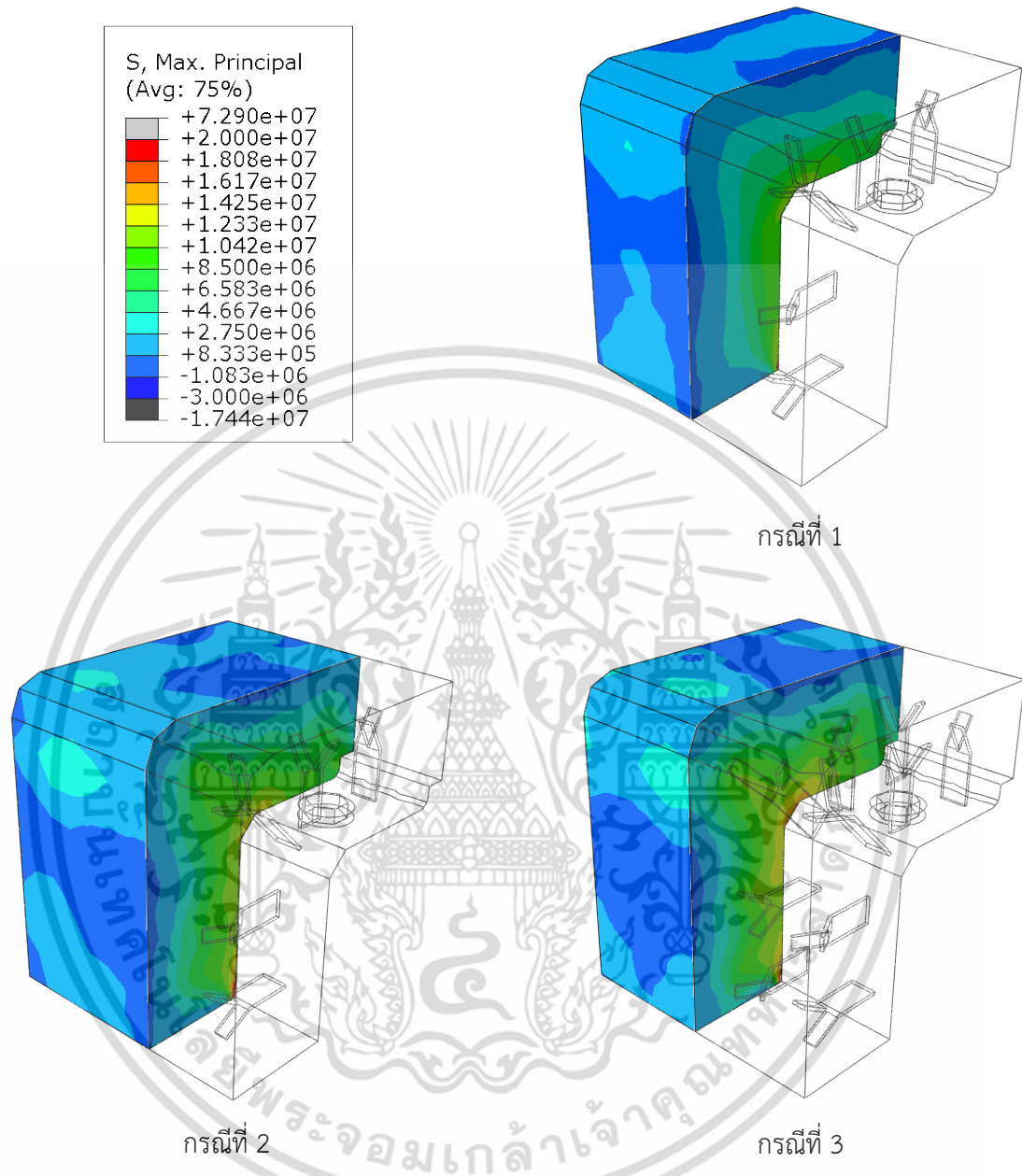
รูปที่ 5.4 ส่วนตัด X-X, Y-Y และ Z-Z ระหว่างกลางเหล็กยึด

ตารางที่ 5.9 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองจากปัจจัยของจำนวนและชนิดเหล็กยึด

วิเคราะห์ผลความเค้นหลักสูงสุด	แบบจำลองกรณีที่	ส่วนตัด	ระดับความลึก (mm)
ปัจจัยจำนวนเหล็กยึด	1, 2, 3	Z-Z	0
	4, 5		30
	6, 7, 8		60
ปัจจัยชนิดเหล็กยึด	1, 4, 6	X-X	90
	2, 5, 7		120
	3, 8		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

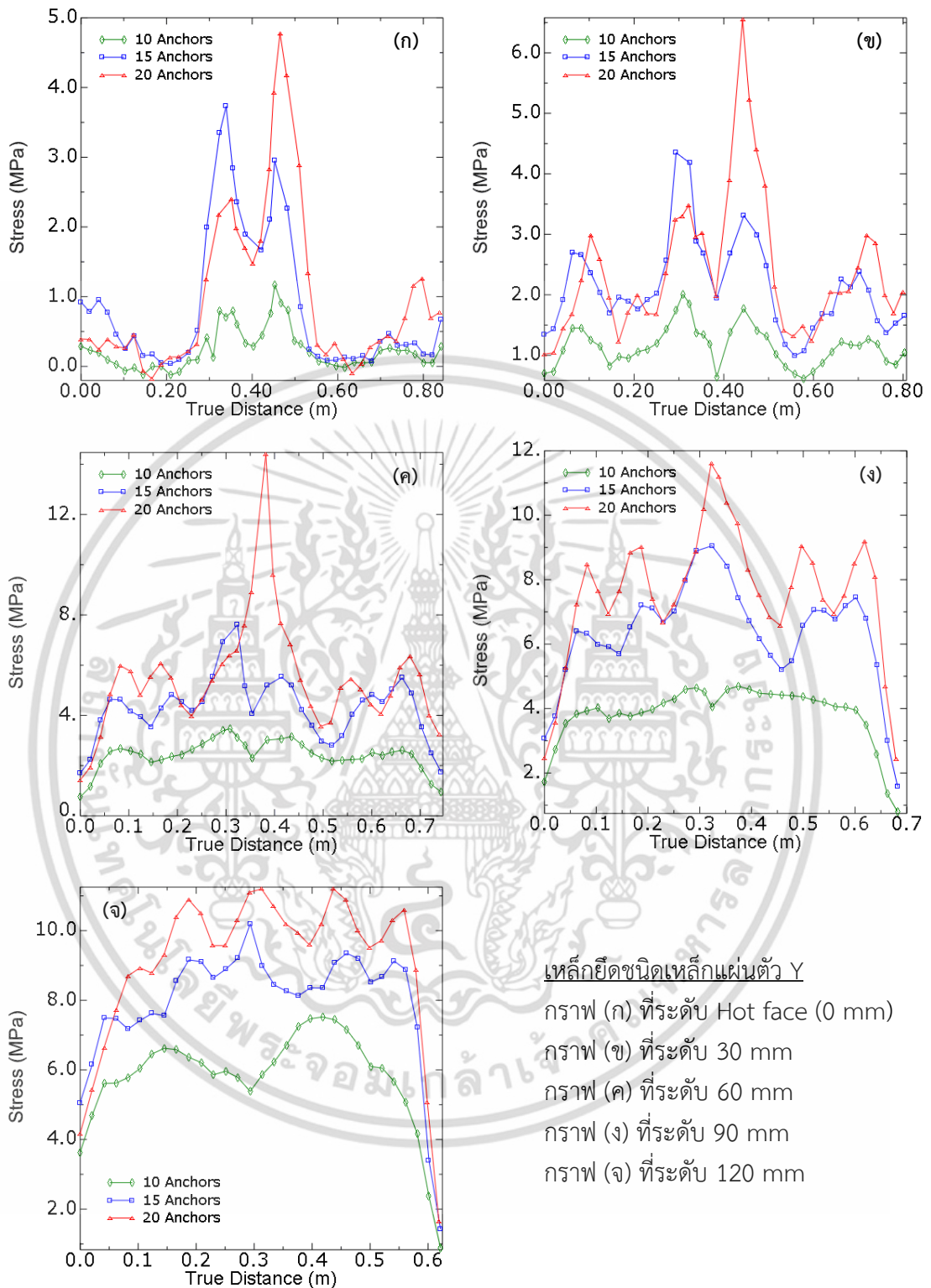
5.2.2.1 การกระจายความเค้นของคอนกรีตทนไฟจากปัจจัยของจำนวนเหล็กยึด



รูปที่ 5.5 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว Y) บนส่วนตัด Z-Z

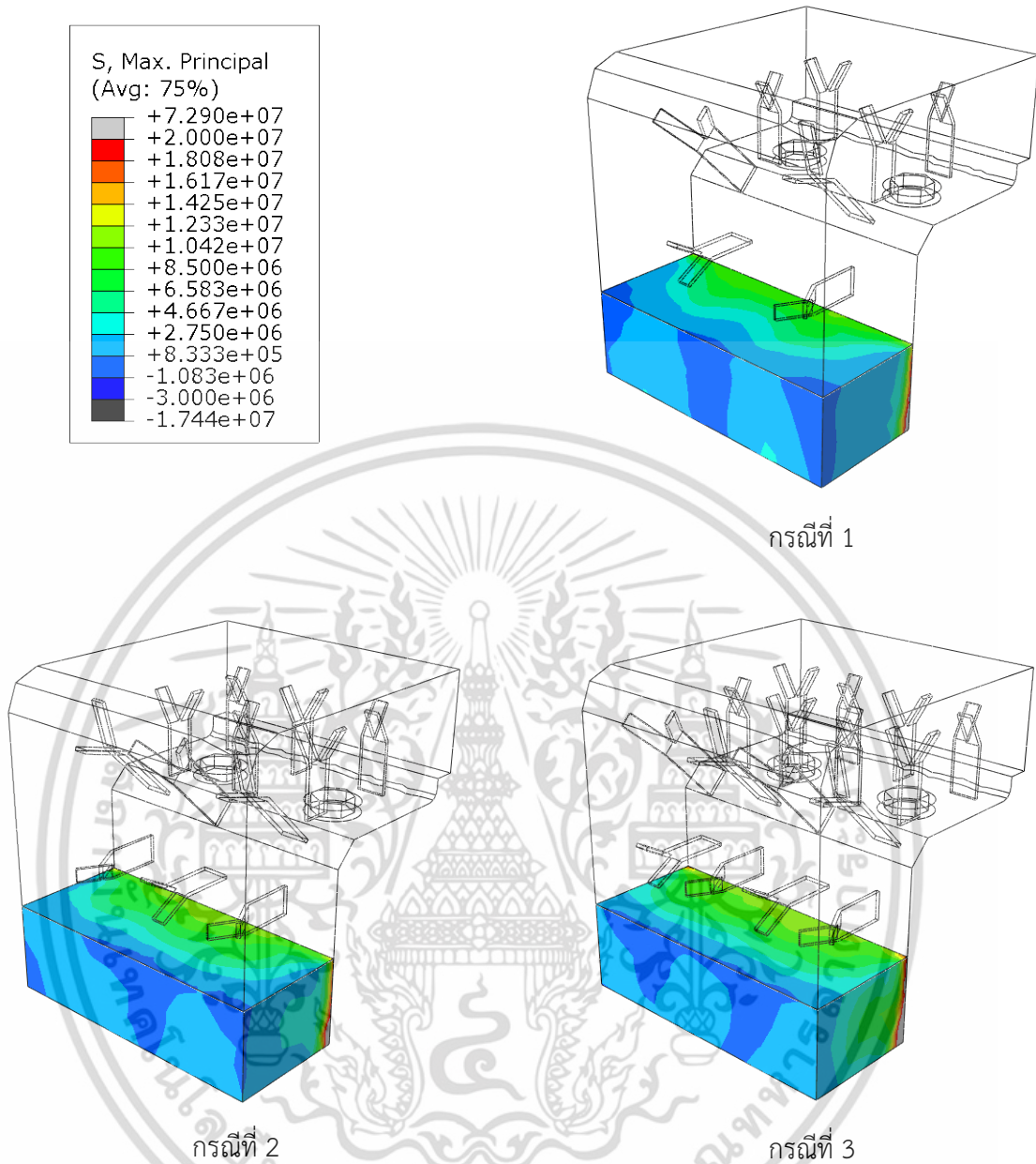
การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 1, 2 และ 3 บนส่วนตัด Z-Z ปรากฏว่าความเค้นมีความแตกต่างกัน เนื่องจากจำนวนเหล็กยึดมีมาก ส่งผลให้เกิดความเค้นดึงมากในเนื้อคอนกรีตทนไฟและขยายพื้นที่กว้างขึ้น อีกทั้งส่งผลให้ผิวด้านร้อนคอนกรีตทนไฟมีแนวโน้มอยู่ภายใต้ความเค้นดึงมากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.5 เมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.6 กราฟมีระดับความเค้นสูงตรงบริเวณมุมของโนสริง โดยปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนในแบบจำลองกรณีที่ 3 ตั้งแต่ผิวด้านร้อนจนถึงระดับความลึก 90 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว Y) บนส่วนตัด Z-Z

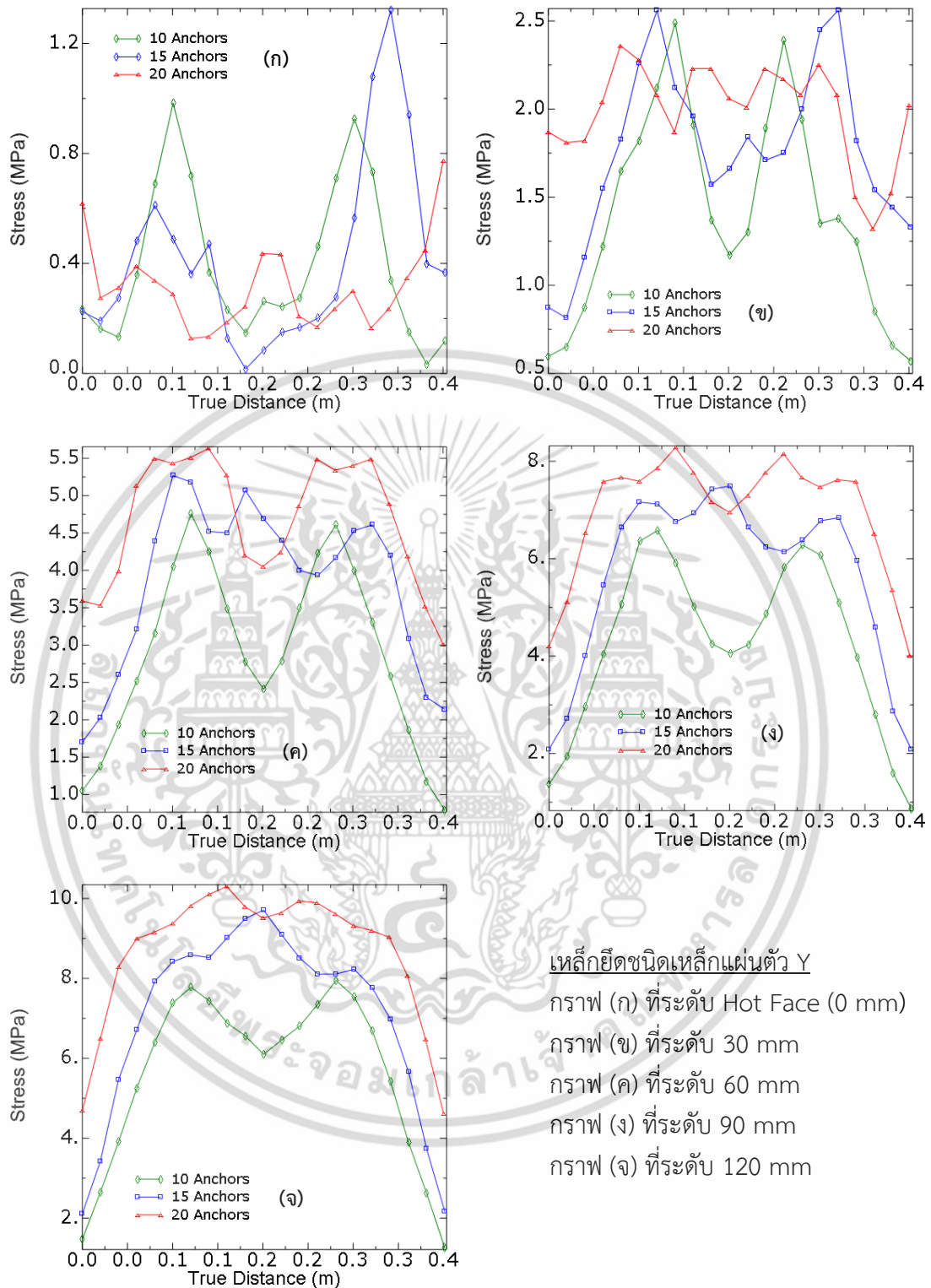
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว Y) บนส่วนตัด Y-Y

การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 1, 2 และ 3 บนส่วนตัด Y-Y ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.7 และเมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.8 กราฟมีระดับความเค้นแตกต่างกันในช่วงตรงกลาง เนื่องจากเหล็กยึดมีระยะห่าง ทำให้เปลี่ยนแปลงระดับความเค้นในเนื้อคอนกรีตทนไฟ และส่งผลให้คอนกรีตทนไฟโก่งตัวได้ง่าย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวตั้งแต่ความลึก 30 ถึง 120 mm โดยปรากฏชัดเจนในแบบจำลองที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เหล็กยึดชนิดเหล็กแผ่นตัว Y

กราฟ (ก) ที่ระดับ Hot Face (0 mm)

กราฟ (ข) ที่ระดับ 30 mm

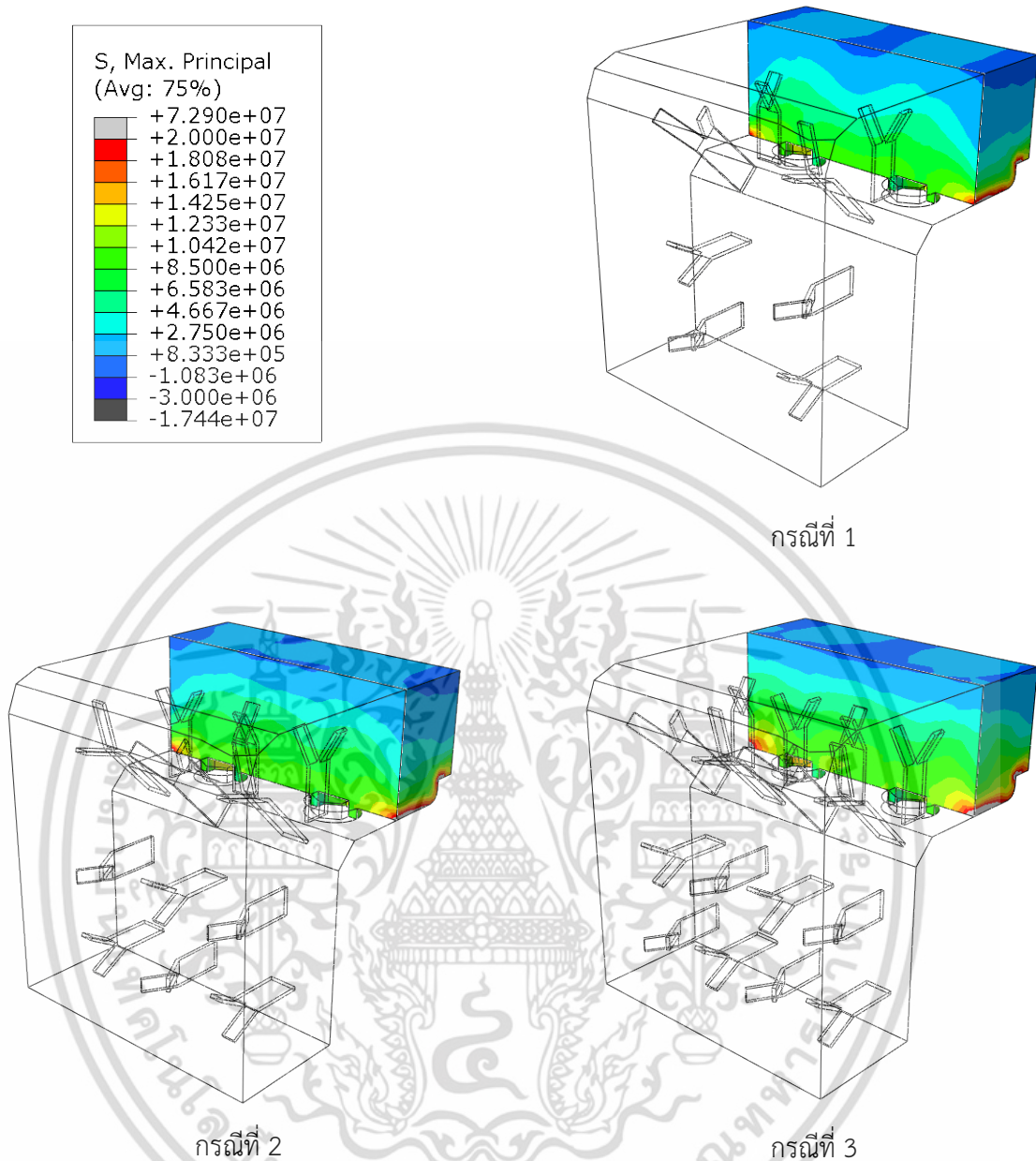
กราฟ (ค) ที่ระดับ 60 mm

กราฟ (ง) ที่ระดับ 90 mm

กราฟ (จ) ที่ระดับ 120 mm

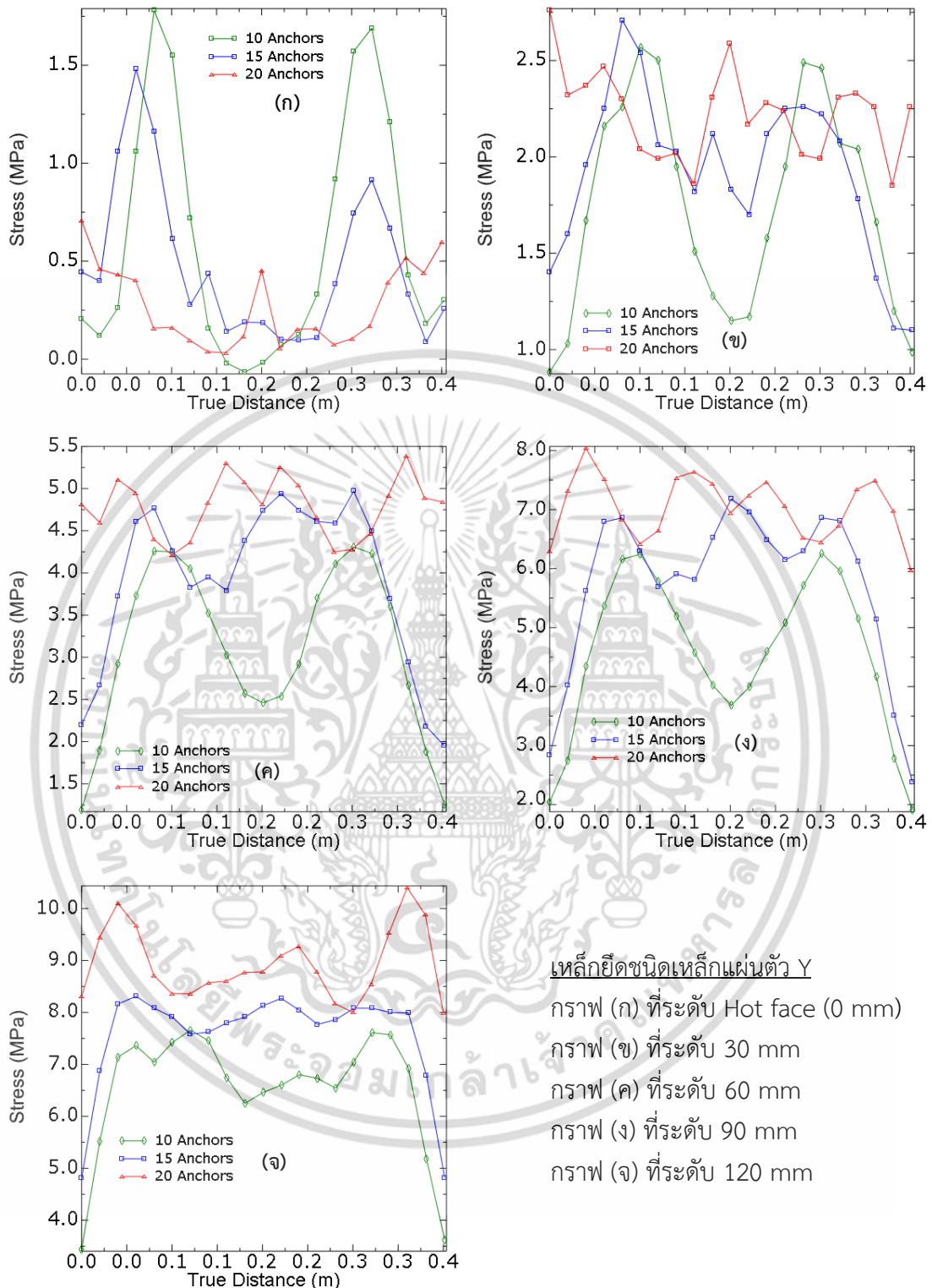
รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว Y) บนส่วนตัด Y-Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว Y) บนส่วนตัด X-X

การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 1, 2 และ 3 บนส่วนตัด X-X ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.9 และเมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.10 กราฟมีระดับความเค้นเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับส่วนตัด Y-Y แต่มีค่าสูงกว่า เนื่องจากได้รับภาระทางความร้อนสูงกว่าส่วนตัด Y-Y ตั้งแต่ผิวด้านร้อนจนถึงความลึก 90 mm โดยปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนในแบบจำลองกรณีที่ 1



เหล็กยึดชนิดเหล็กแผ่นตัว Y

กราฟ (ก) ที่ระดับ Hot face (0 mm)

กราฟ (ข) ที่ระดับ 30 mm

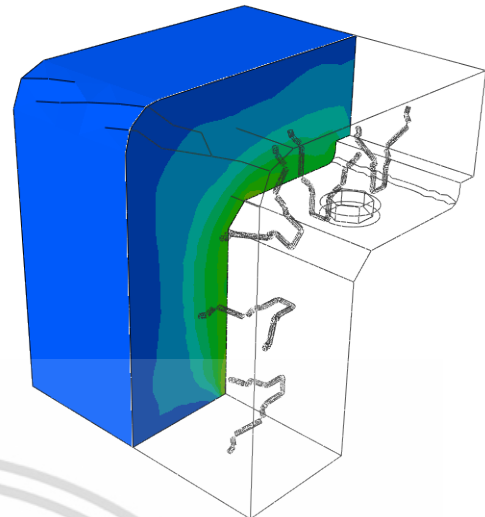
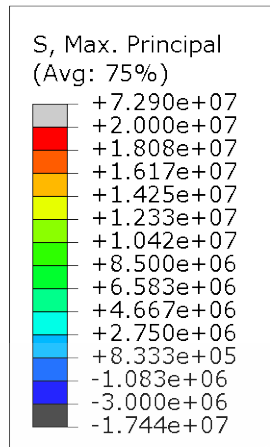
กราฟ (ค) ที่ระดับ 60 mm

กราฟ (ง) ที่ระดับ 90 mm

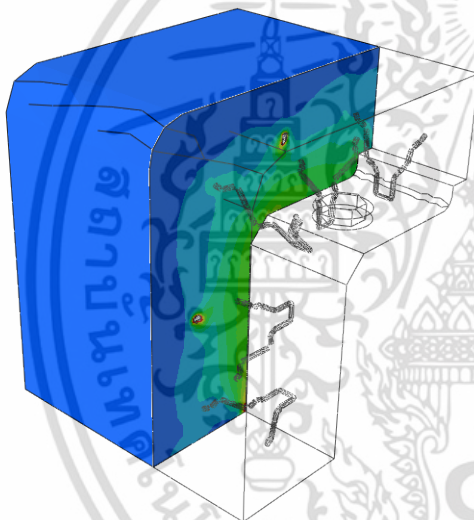
กราฟ (จ) ที่ระดับ 120 mm

รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว Y) บนส่วนตัด X-X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กรณีที่ 4

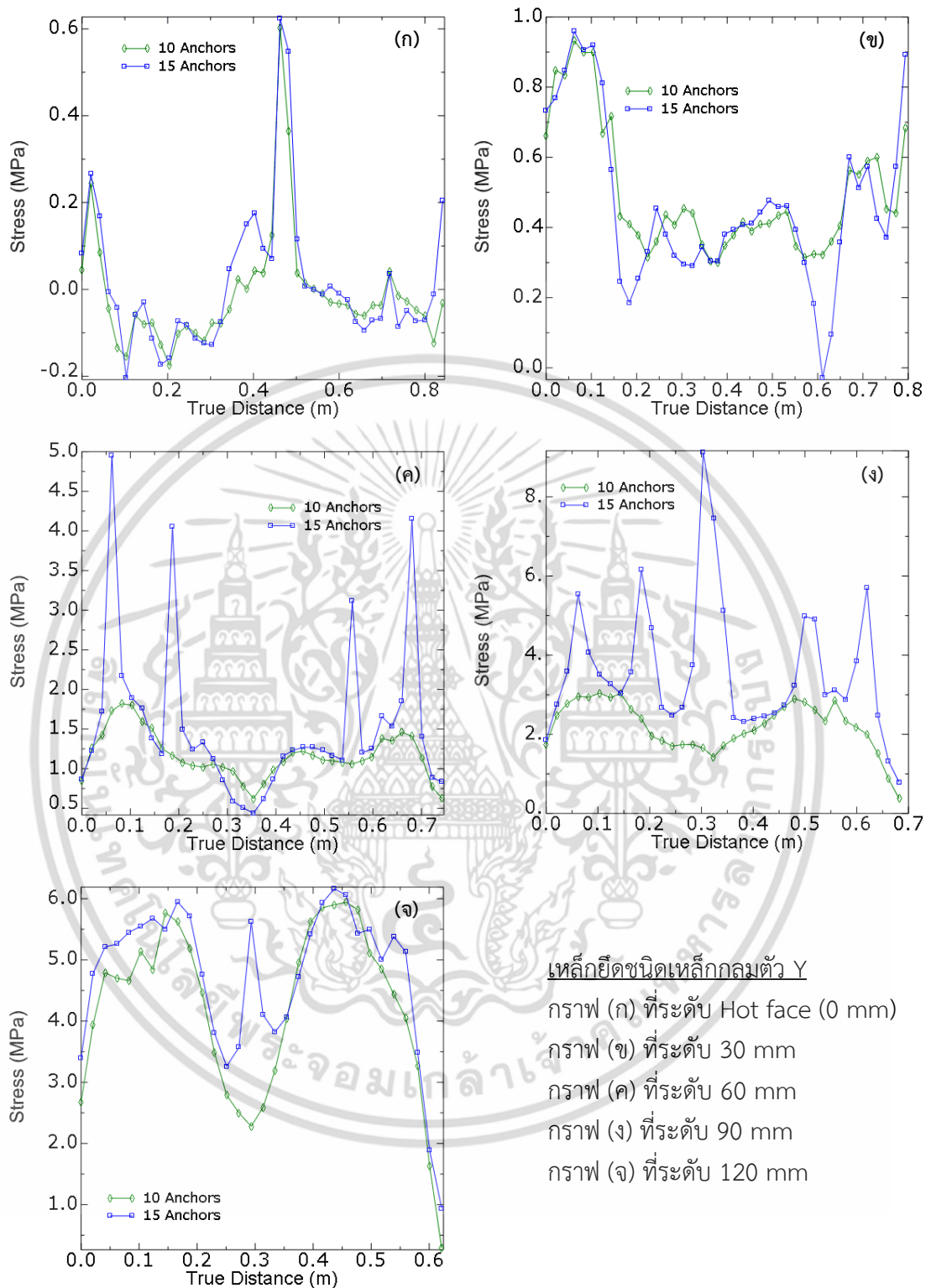


กรณีที่ 5

รูปที่ 5.11 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กกลมตัว Y) บนส่วนตัด Z-Z

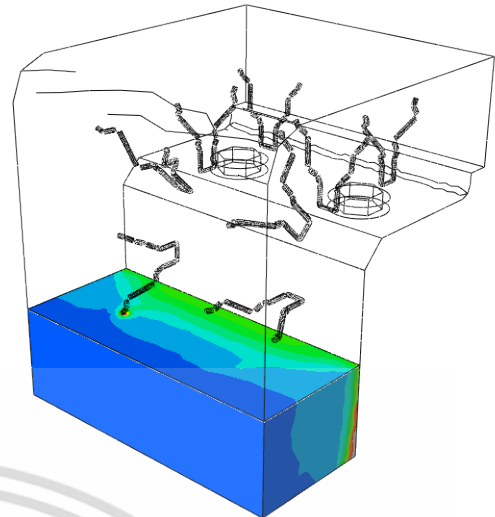
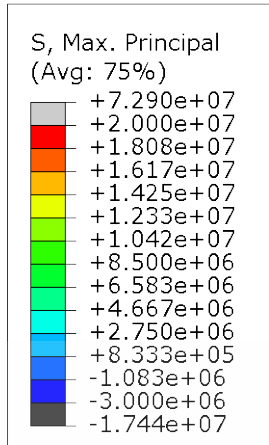
การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 4 และ 5 บนส่วนตัด Z-Z ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.11 เนื่องจากจำนวนเหล็กยึดมีมาก ส่งผลให้เกิดความเค้นดึงมากในเนื้อคอนกรีตทนไฟ ตั้งแต่ความลึก 30 ถึง 120 mm แต่จำนวนเหล็กยึดไม่ส่งผลให้ความเค้นที่ผิวด้านร้อนเปลี่ยนแปลง และยังคงอยู่ภายใต้ความเค้นอัดเป็นหลัก เมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.12 กราฟมีระดับความเค้นเป็นไปในลักษณะเดียวกัน แต่มีเฉพาะบางจุดที่ระดับความเค้นสูง เนื่องจากจุดวิเคราะห์อยู่ใกล้กับปลายเหล็กยึด ซึ่งเหล็กยึดชนิดนี้ (เหล็กกลมตัว Y) เมื่อถูกติดตั้งจะครอบคลุมพื้นที่คอนกรีตทนไฟเป็นบริเวณกว้างและปลายเหล็กยึดจะเหลื่อมกัน โดยปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนในแบบจำลองกรณีที่ 5 ตั้งแต่ความลึก 60 ถึง 90 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

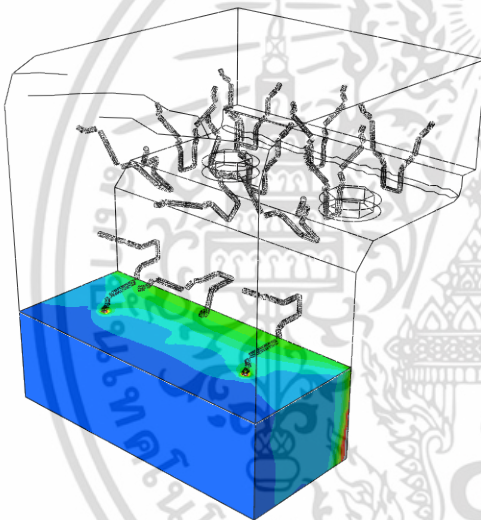


รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กกลมตัว Y) บนส่วนตัด Z-Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กรณีที่ 4

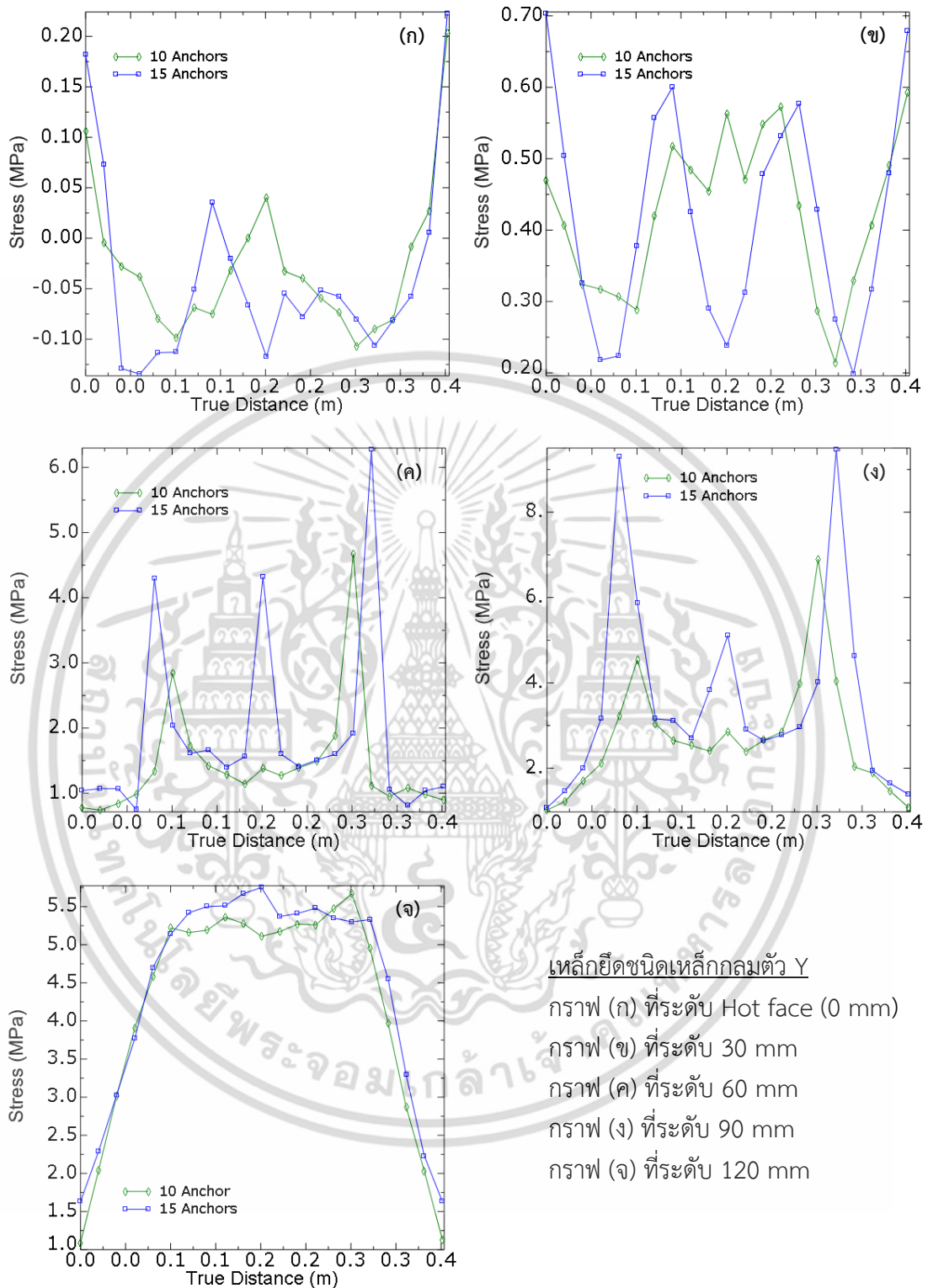


กรณีที่ 5

รูปที่ 5.13 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กกลมตัว Y) ส่วนตัด Y-Y

การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 4 และ 5 บนส่วนตัด Y-Y ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5.13 เมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.14 กราฟมีระดับความเค้นเป็นไปในลักษณะเดียวกัน แต่มีเฉพาะบางจุดที่ระดับความเค้นสูงเช่นเดียวกับส่วนตัด Z-Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เหล็กยึดชนิดเหล็กกลมตัว Y

กราฟ (ก) ที่ระดับ Hot face (0 mm)

กราฟ (ข) ที่ระดับ 30 mm

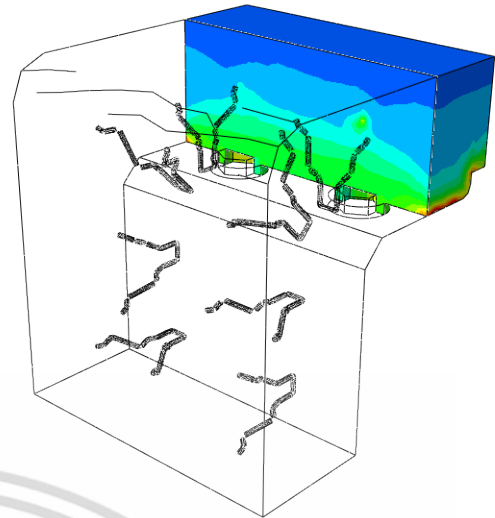
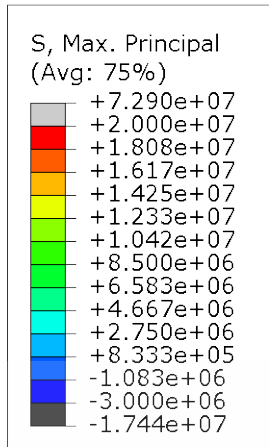
กราฟ (ค) ที่ระดับ 60 mm

กราฟ (ง) ที่ระดับ 90 mm

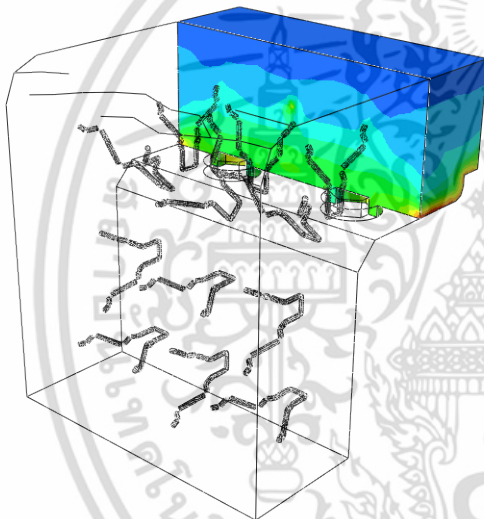
กราฟ (จ) ที่ระดับ 120 mm

รูปที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กกลมตัว Y) บนส่วนตัด Y-Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กรณีที่ 4

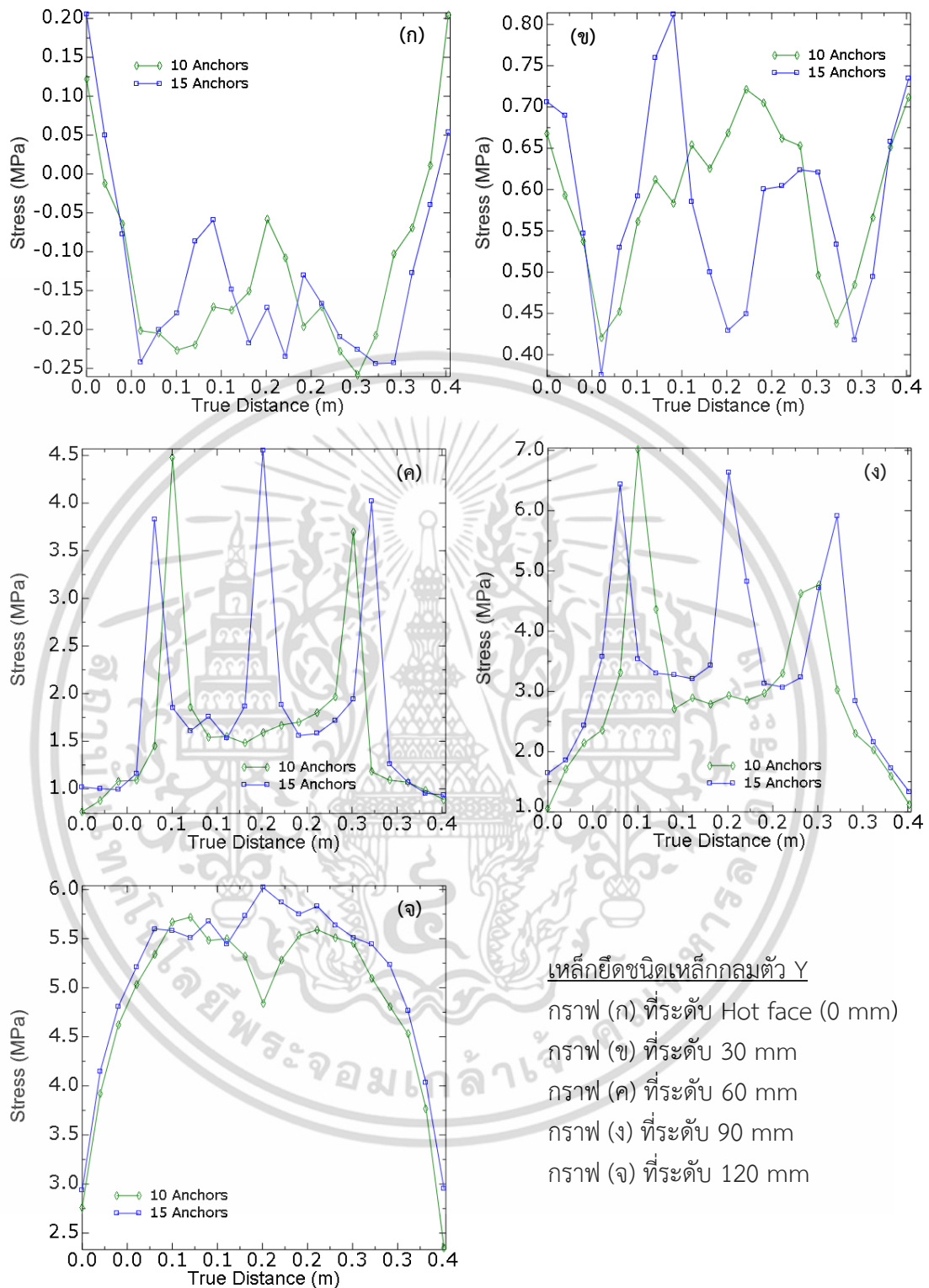


กรณีที่ 5

รูปที่ 5.15 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กกลมตัว Y) บนส่วนตัด X-X

การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 4 และ 5 บนส่วนตัด X-X ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5.15 เมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.16 กราฟมีระดับความเค้นเป็นไปในลักษณะเดียวกัน แต่มีเฉพาะบางจุดที่ระดับความเค้นสูงเช่นเดียวกับส่วนตัด Z-Z และส่วนตัด Y-Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เหล็กยึดชนิดเหล็กกลมตัว Y

กราฟ (ก) ที่ระดับ Hot face (0 mm)

กราฟ (ข) ที่ระดับ 30 mm

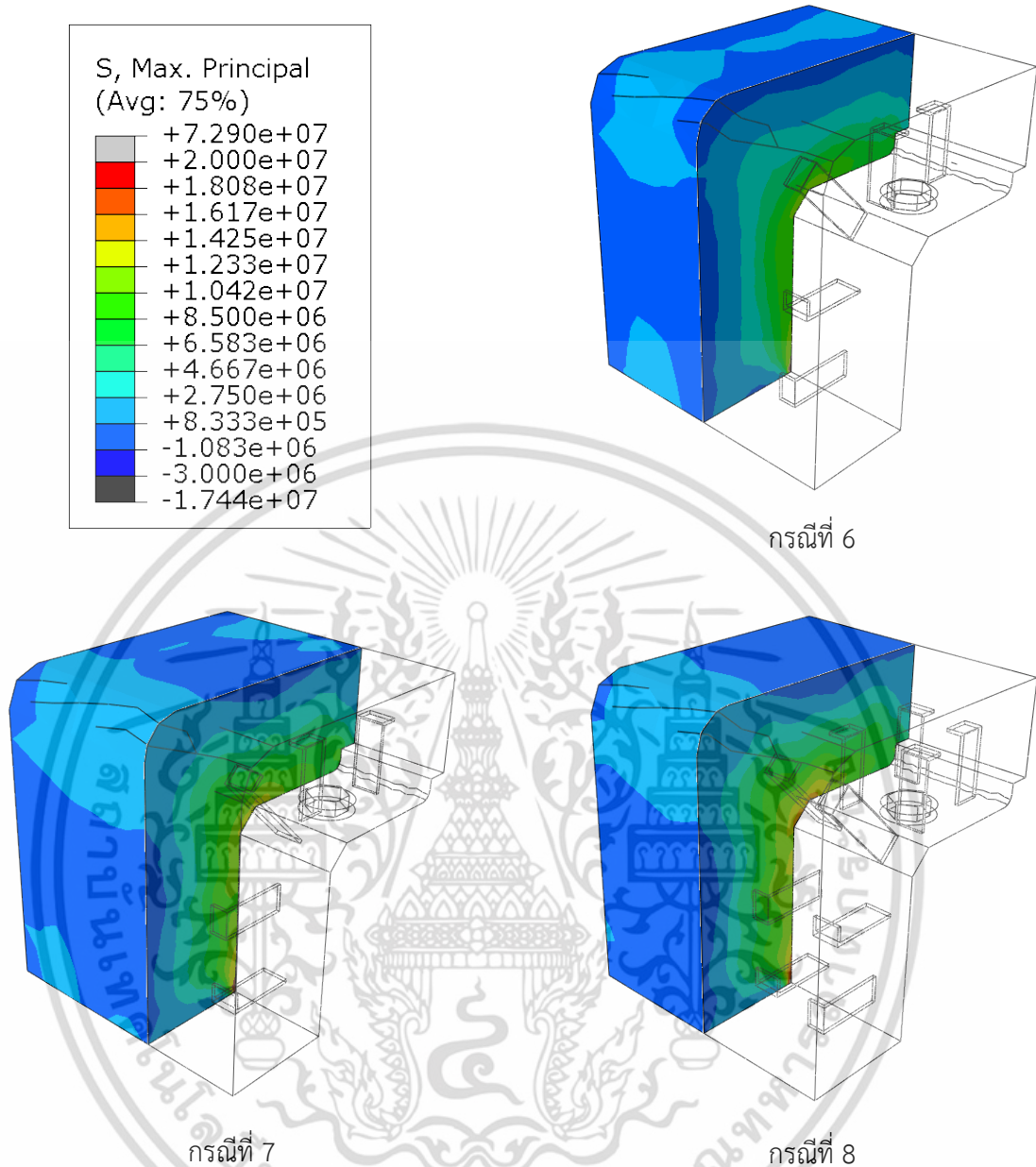
กราฟ (ค) ที่ระดับ 60 mm

กราฟ (ง) ที่ระดับ 90 mm

กราฟ (จ) ที่ระดับ 120 mm

รูปที่ 5.16 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กกลมตัว Y) บนส่วนตัด X-X

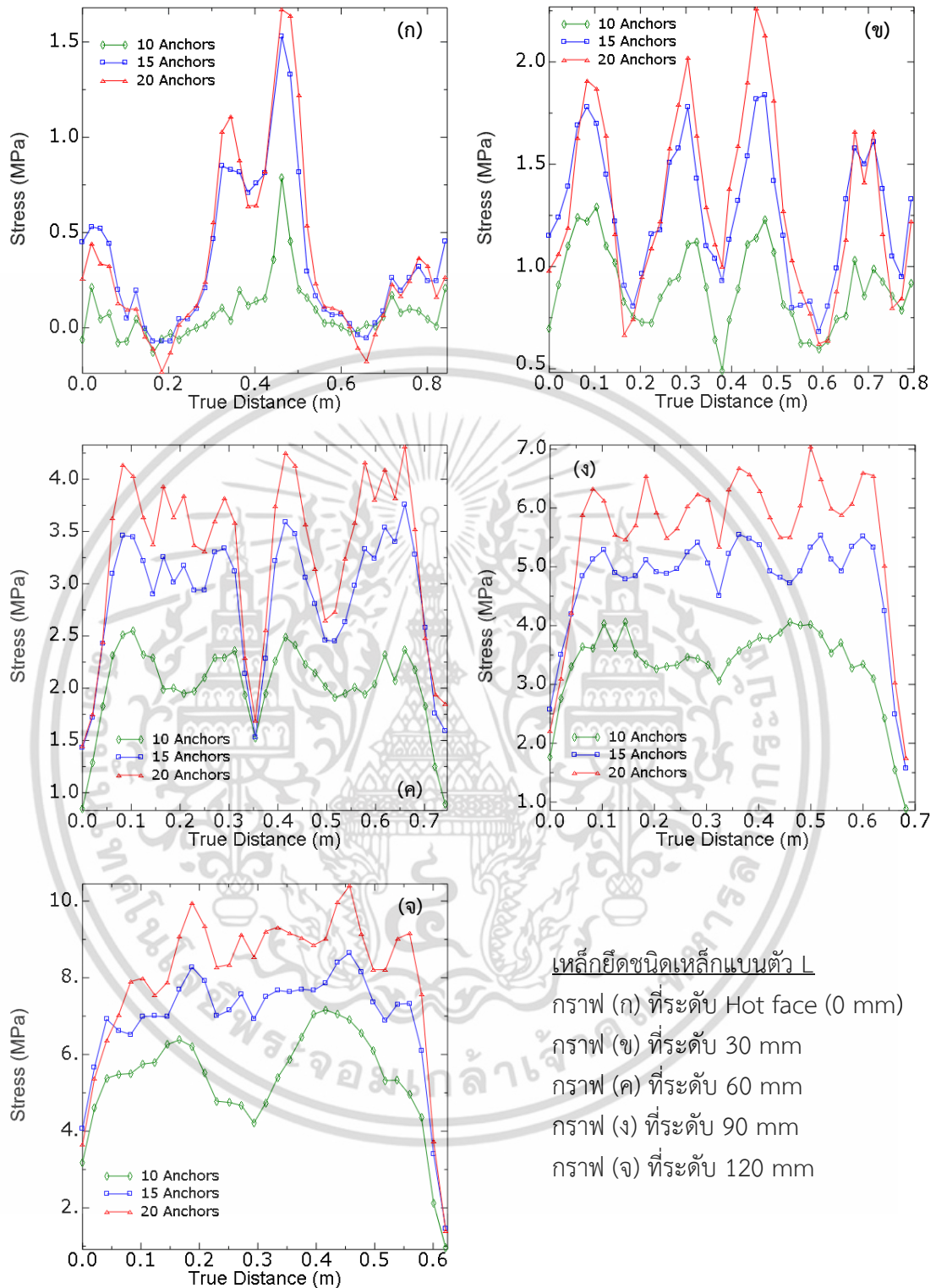
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว L) บนส่วนตัด Z-Z

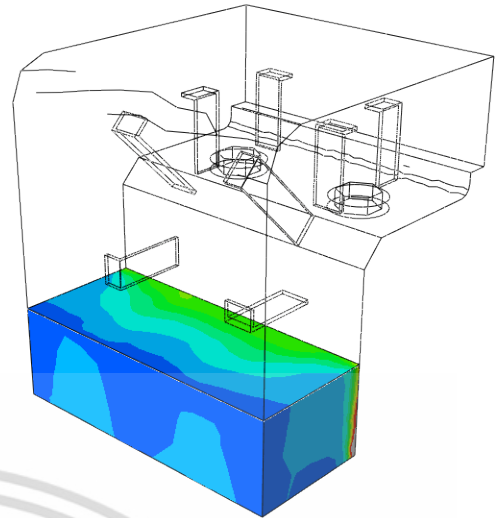
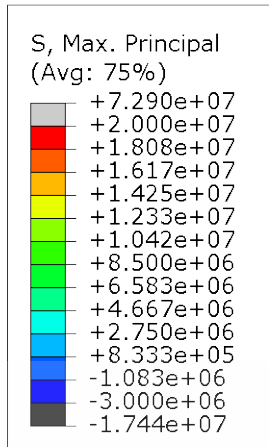
การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 6, 7 และ 8 บนส่วนตัด Z-Z ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกัน เนื่องจากจำนวนเหล็กยึดมีมาก ส่งผลให้เกิดความเค้นดึงมากในเนื้อคอนกรีตทนไฟ และขยายพื้นที่กว้างขึ้น อีกทั้งส่งผลให้ผิวด้านร้อนคอนกรีตทนไฟมีแนวโน้มอยู่ภายใต้ความเค้นอัด ดังแสดงในรูปที่ 5.17 เมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.18 กราฟมีระดับความเค้นสูงบริเวณมุมโครงสร้างที่ผิวด้านร้อน แต่ระดับความเค้นจะใกล้เคียงกันตั้งแต่ความลึก 30 ถึง 120 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

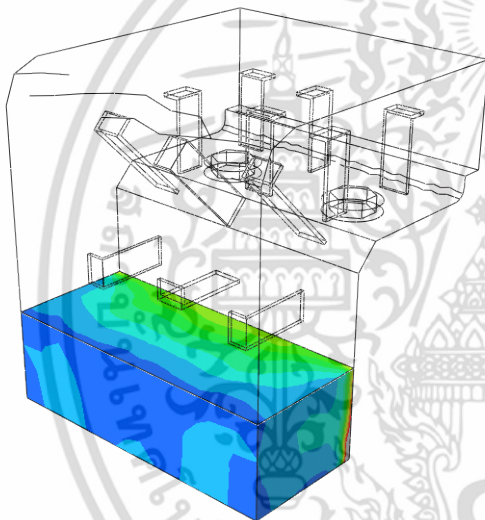


รูปที่ 5.18 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว L) บนส่วนตัด Z-Z

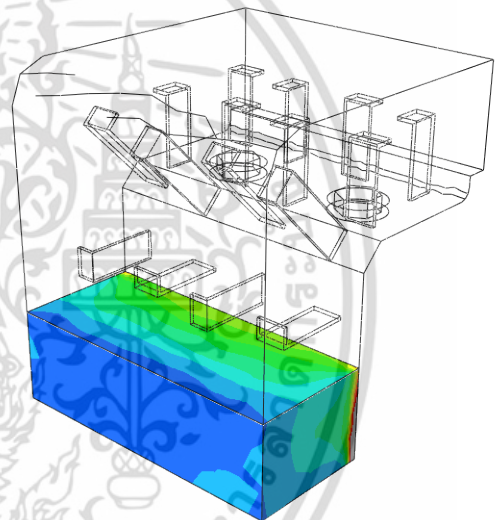
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กรณีที่ 6



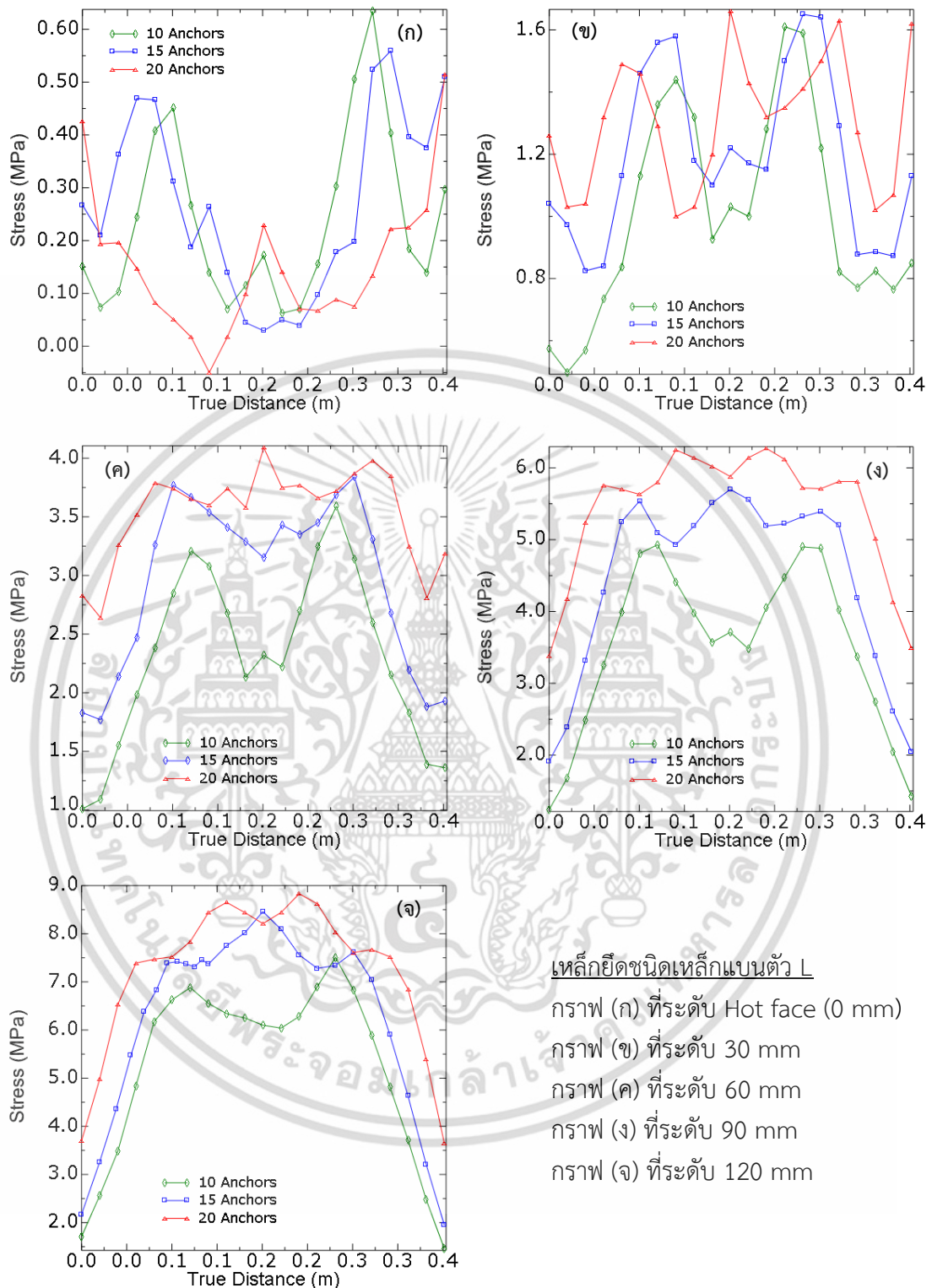
กรณีที่ 7



กรณีที่ 8

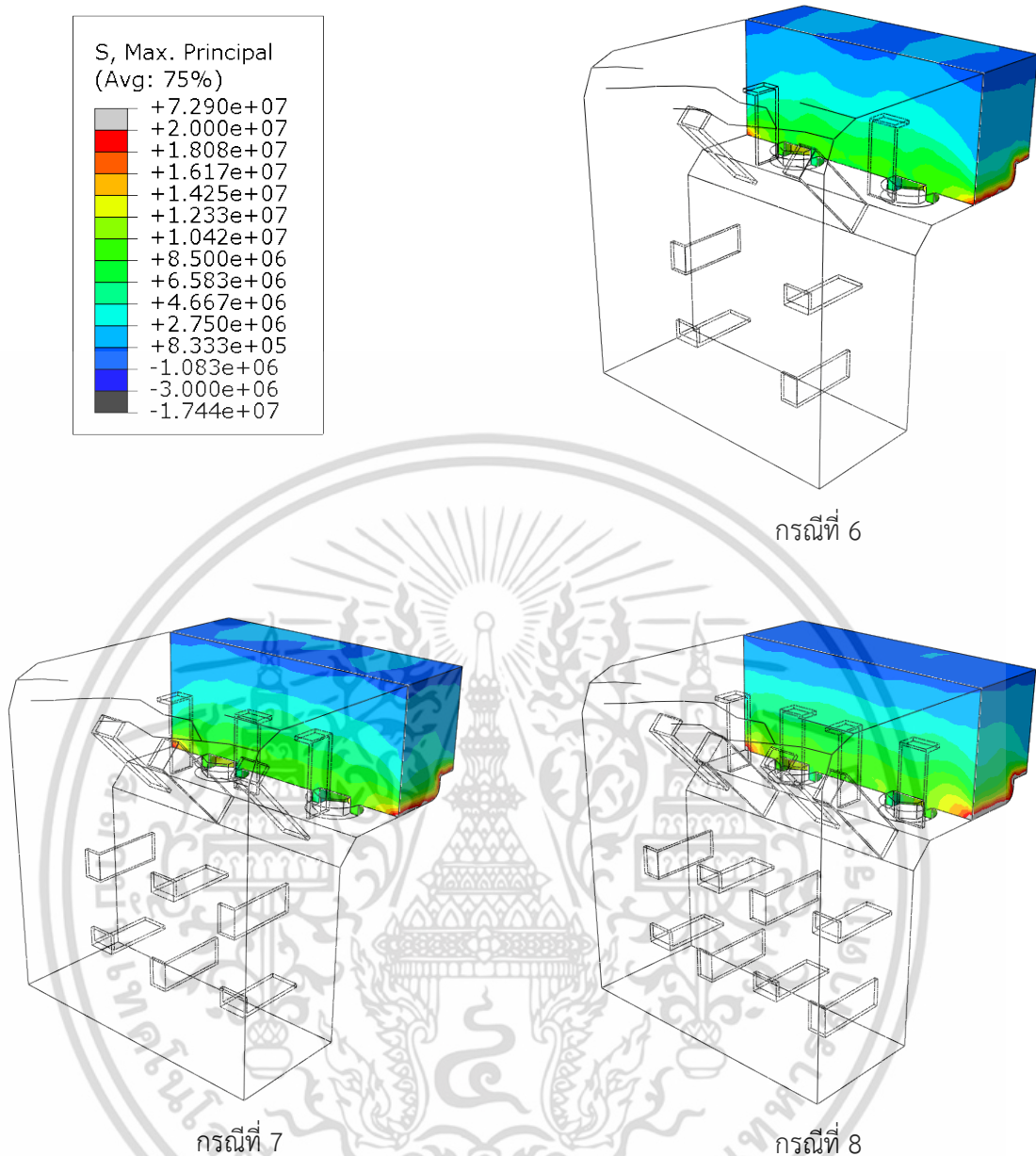
รูปที่ 5.19 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว L) บนส่วนตัด Y-Y

การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 6, 7 และ 8 บนส่วนตัด Y-Y ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.19 และเมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.20 กราฟมีระดับความเค้นแตกต่างกันในช่วงตรงกลาง เนื่องจากเหล็กยึดมีระยะห่าง ทำให้เปลี่ยนแปลงระดับความเค้นในเนื้อคอนกรีตทนไฟ และส่งผลให้คอนกรีตทนไฟโก่งตัวได้ง่าย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวตั้งแต่ระดับความลึก 30 ถึง 90 mm โดยปรากฏชัดเจนในแบบจำลองที่ 6



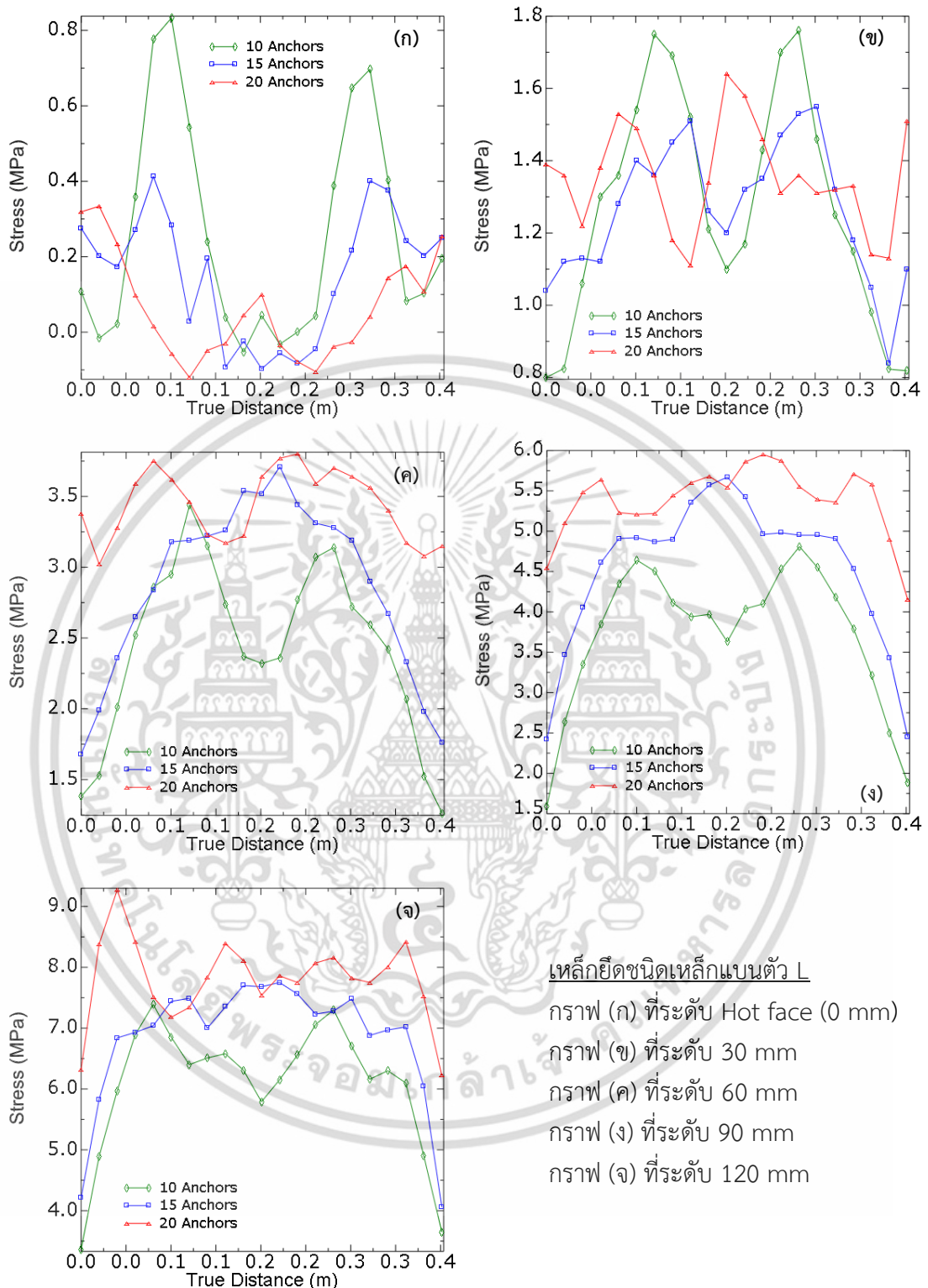
รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว L) บนส่วนตัด Y-Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว L) บนส่วนตัด X-X

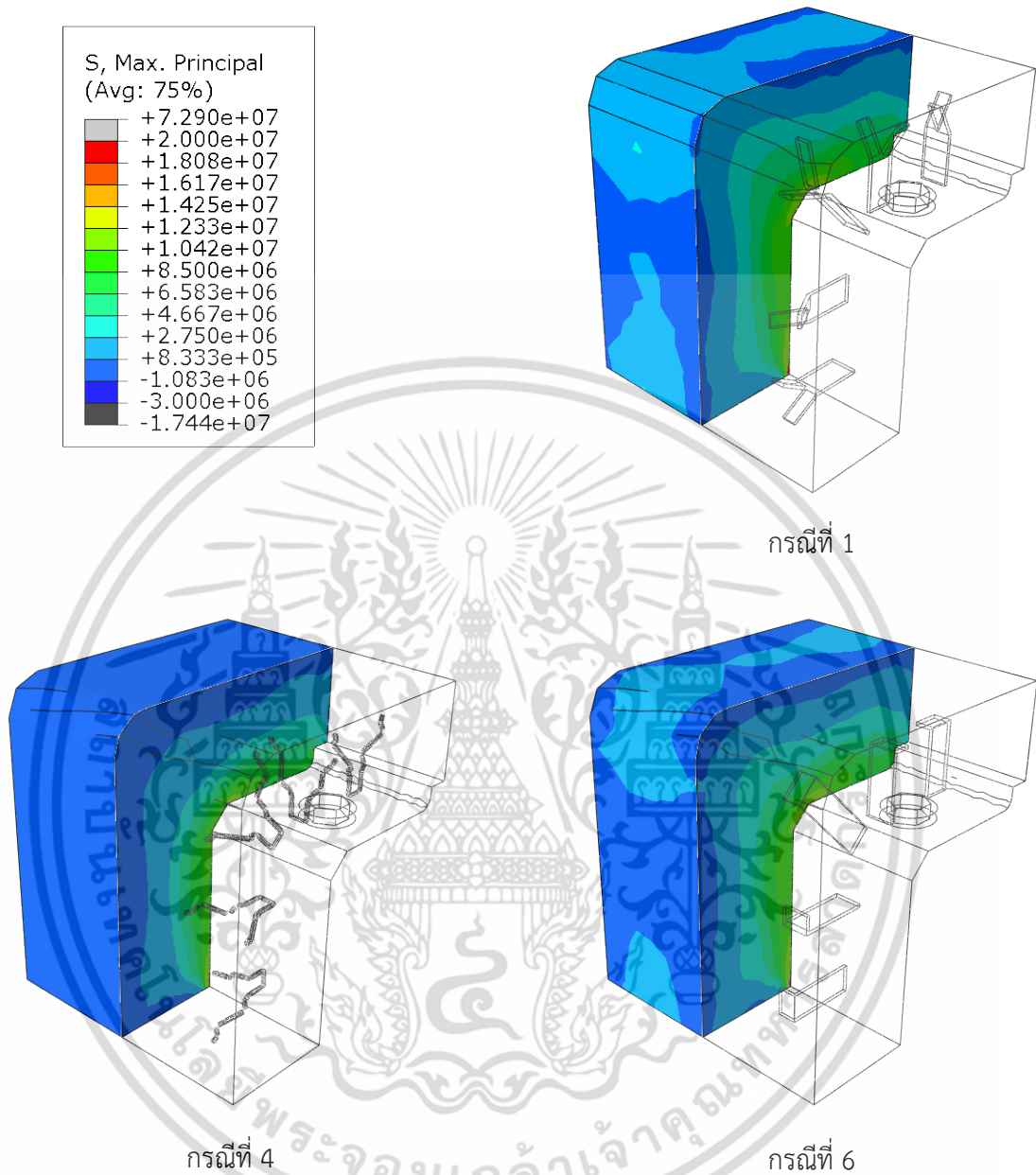
การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 6, 7 และ 8 บนส่วนตัด X-X ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.21 และเมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.22 กราฟมีระดับความเค้นเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับส่วนตัด Y-Y แต่มีค่าสูงกว่า เนื่องจากได้รับภาระทางความร้อนสูงกว่าส่วนตัด Y-Y โดยปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนในแบบจำลองที่ 6 ตั้งแต่ผิวด้านร้อนจนถึงความลึก 90 mm



รูปที่ 5.22 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึด (เหล็กแผ่นตัว L) บนส่วนตัด X-X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

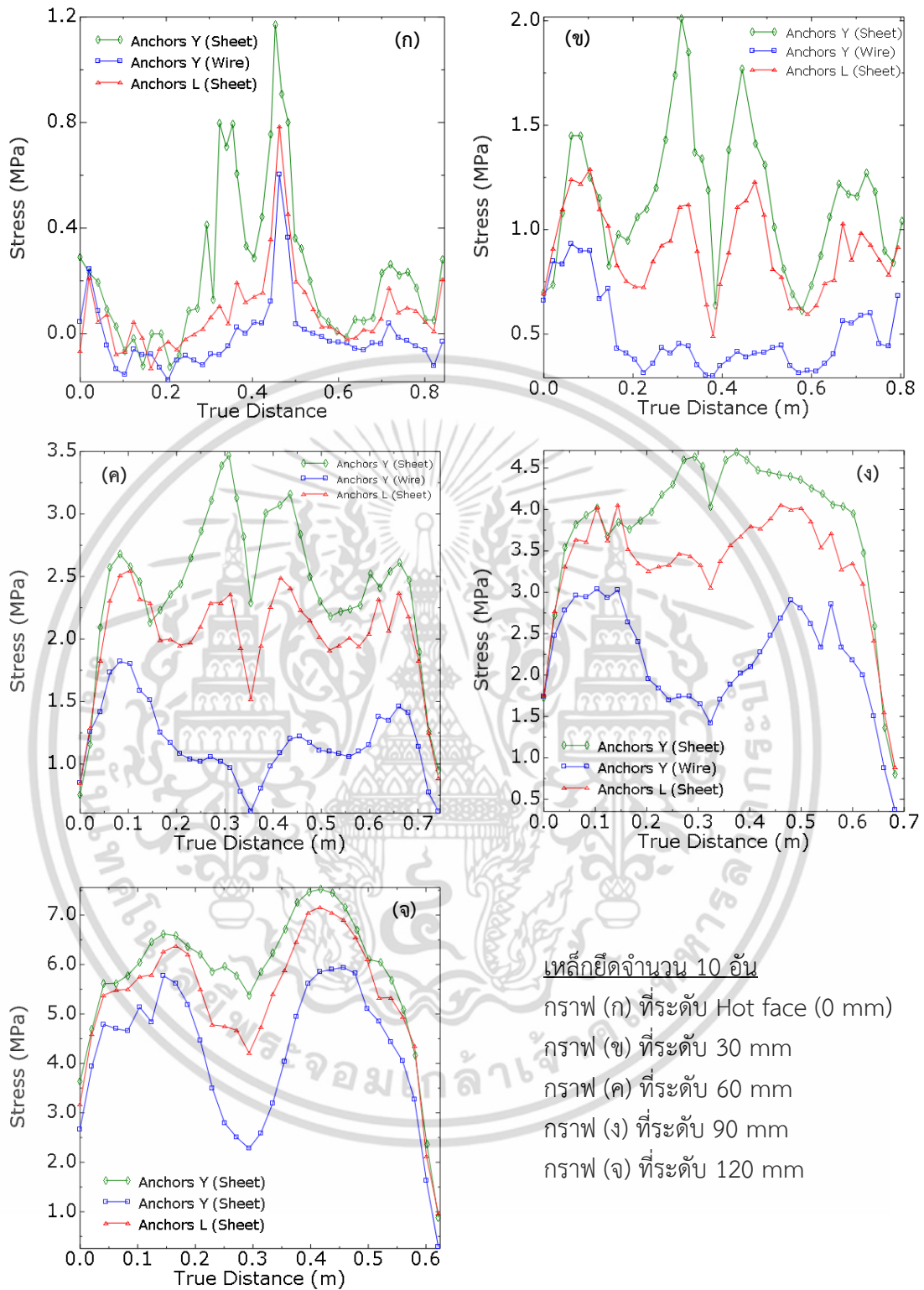
5.2.2.2 การกระจายความเค้นของคอนกรีตทนไฟจากปัจจัยของชนิดเหล็กยึด



รูปที่ 5.23 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 10 อัน) บนส่วนตัด Z-Z

การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 1, 4 และ 6 บนส่วนตัด Z-Z มีเหล็กยึดจำนวน 10 อัน ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกันตามชนิดเหล็กยึด โดยที่เหล็กยึดชนิด เหล็กแผ่นตัว Y เหล็กแผ่นตัว L และ เหล็กกลมตัว Y มีความเค้นสูงเรียงกันตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.23 และเมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.24 กราฟมีระดับความเค้นสูงตรงบริเวณมุมโนสริงที่ระดับผิวด้านบนจนถึงความลึก 90 mm โดยปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนในแบบจำลองที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เหล็กยึดจำนวน 10 อัน

กราฟ (ก) ที่ระดับ Hot face (0 mm)

กราฟ (ข) ที่ระดับ 30 mm

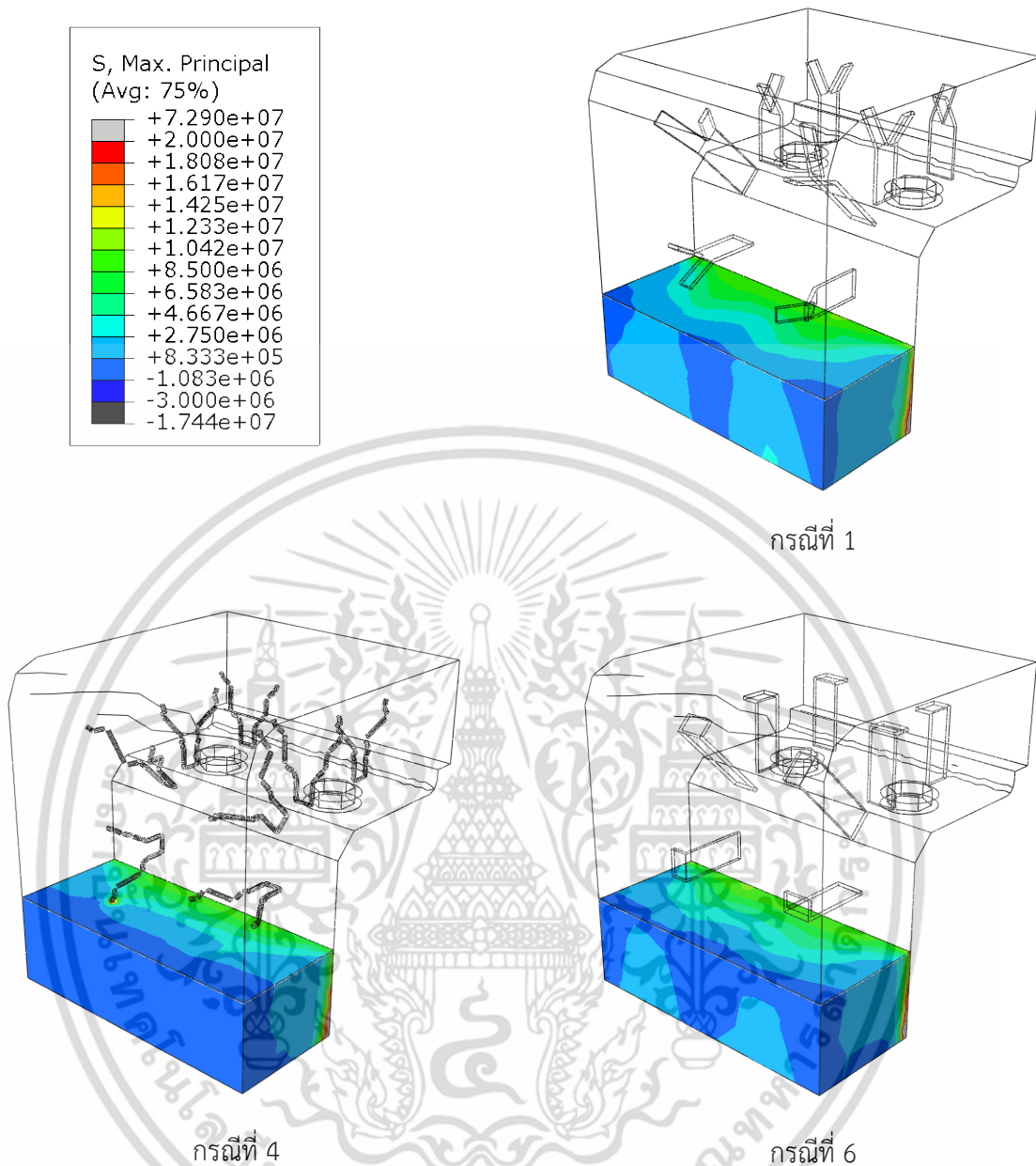
กราฟ (ค) ที่ระดับ 60 mm

กราฟ (ง) ที่ระดับ 90 mm

กราฟ (จ) ที่ระดับ 120 mm

รูปที่ 5.24 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 10 อัน) บนส่วนตัด Z-Z

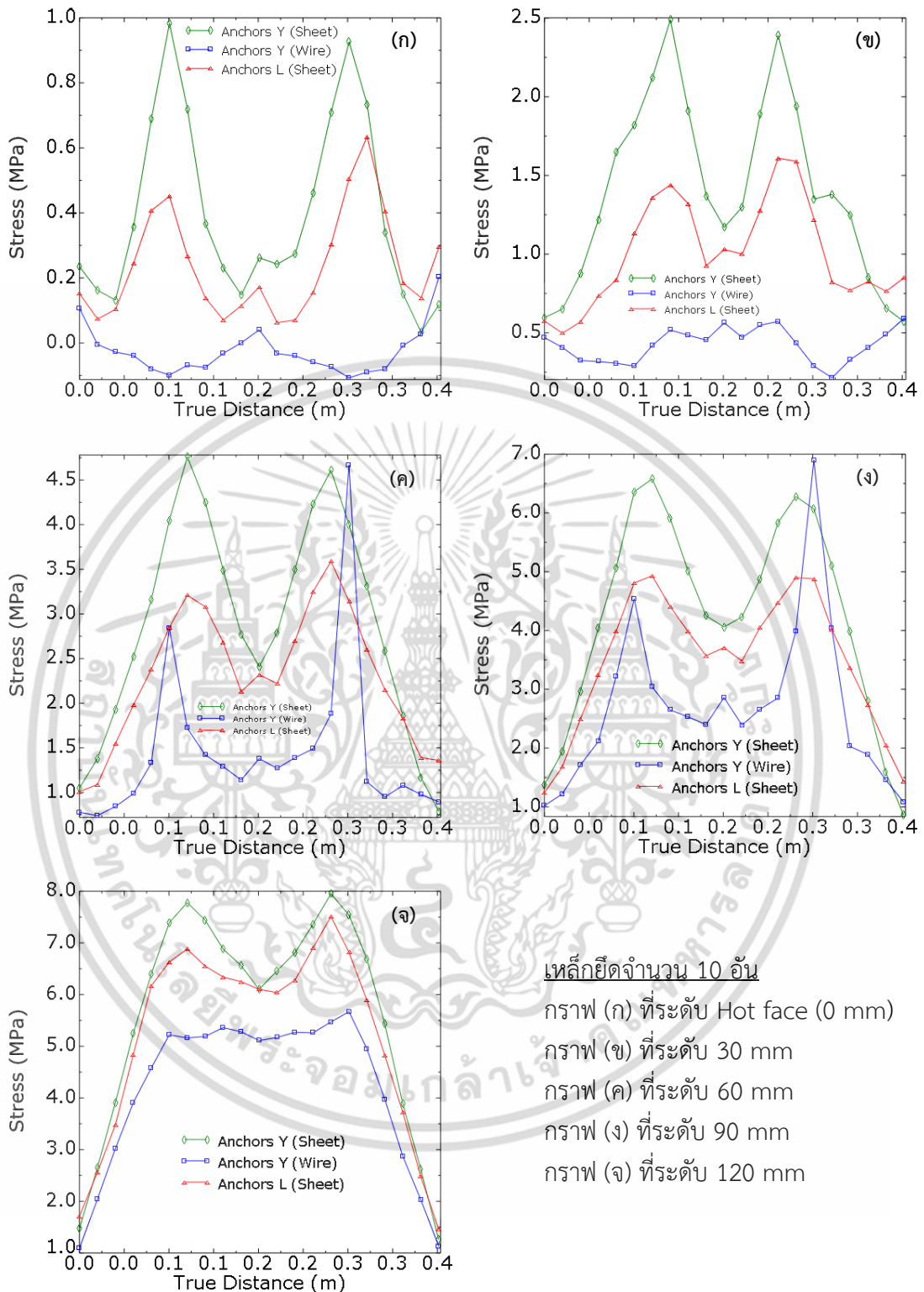
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 10 อัน) บนส่วนตัด Y-Y

การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 1, 4 และ 6 บนส่วนตัด Y-Y มีเหล็กยึดจำนวน 10 อัน ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกันตามชนิดเหล็กยึด โดยที่เหล็กยึดชนิด เหล็กแผ่นตัว Y เหล็กแผ่นตัว L และ เหล็กกลมตัว Y มีความเค้นสูงเรียงกันตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.25 และเมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.26 กราฟมีระดับความเค้นแตกต่างกันในช่วงตรงกลาง เนื่องจากเหล็กยึดมีระยะห่าง ทำให้เปลี่ยนแปลงระดับความเค้นในเนื้อคอนกรีตทนไฟ และส่งผลให้คอนกรีตทนไฟโค้งตัวได้ง่าย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวตั้งแต่ผิวด้านร้อนจนถึง 90 mm โดยปรากฏขึ้นชัดเจนในแบบจำลองที่ 1

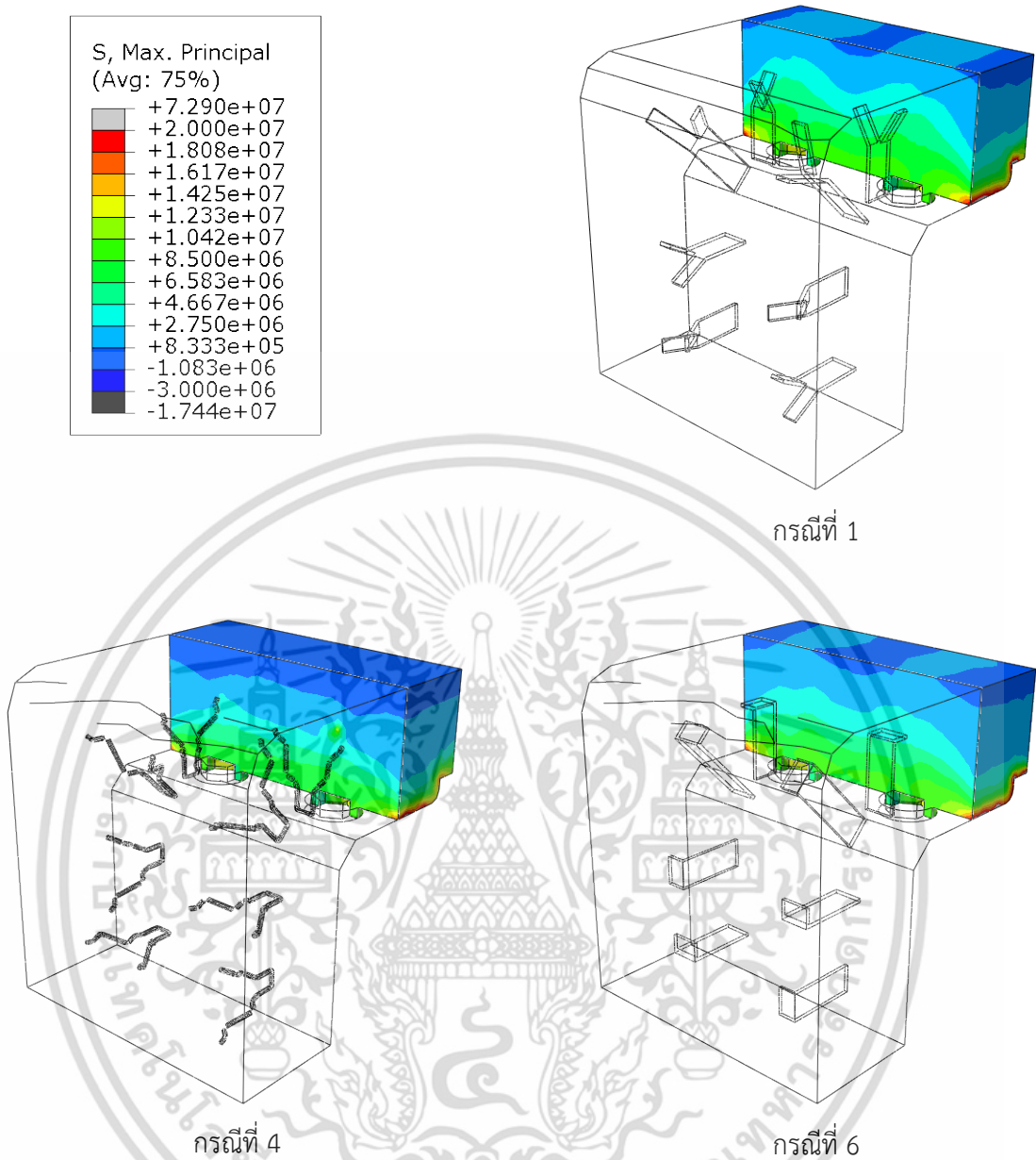
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เหล็กยึดจำนวน 10 อัน
 กราฟ (ก) ที่ระดับ Hot face (0 mm)
 กราฟ (ข) ที่ระดับ 30 mm
 กราฟ (ค) ที่ระดับ 60 mm
 กราฟ (ง) ที่ระดับ 90 mm
 กราฟ (จ) ที่ระดับ 120 mm

รูปที่ 5.26 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 10 อัน) บนส่วนตัด Y-Y

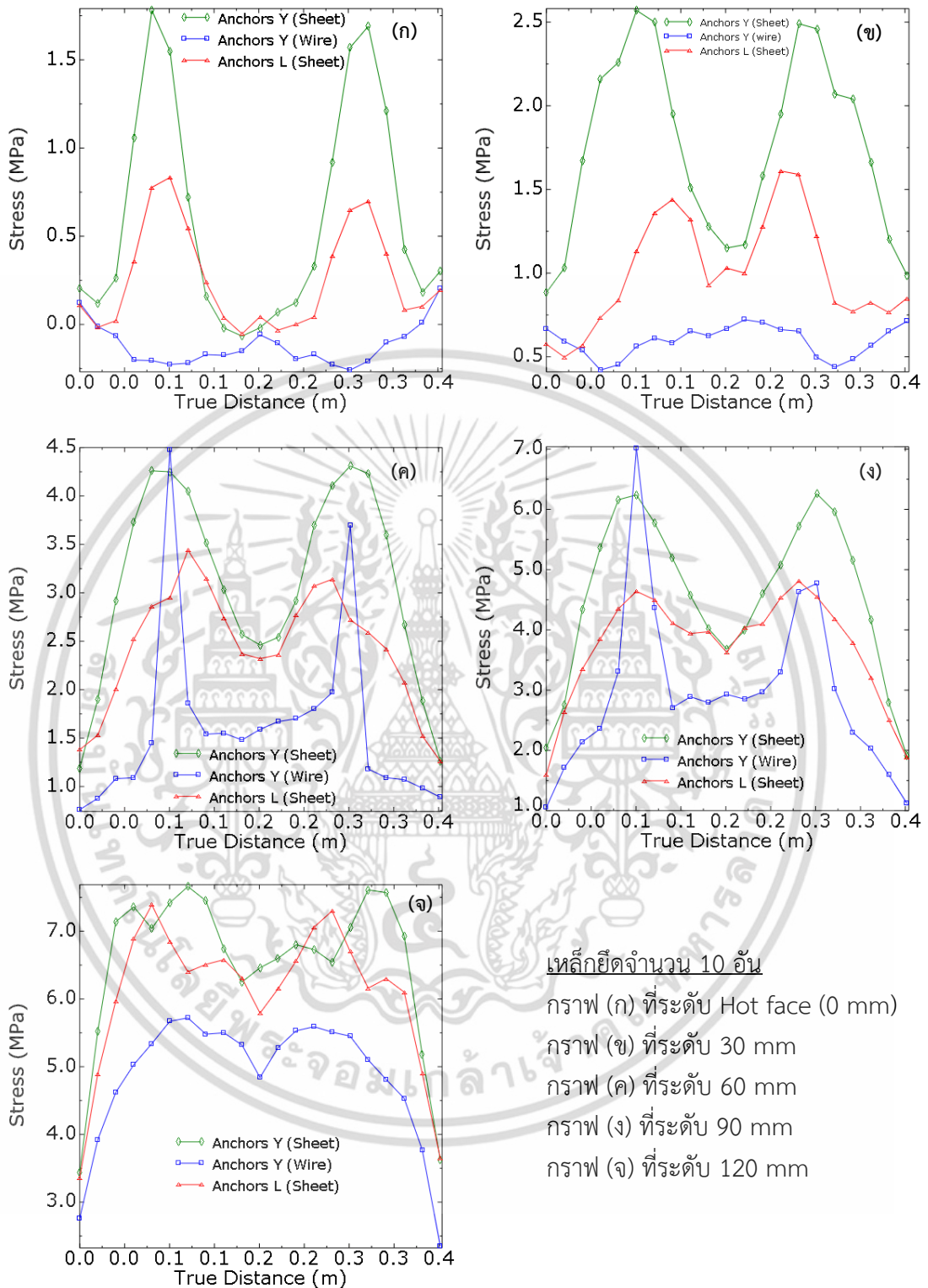
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 10 อัน) บนส่วนตัด X-X

การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 1, 4 และ 6 บนส่วนตัด X-X มีเหล็กยึดจำนวน 10 อัน ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกันตามชนิดเหล็กยึด โดยที่เหล็กยึดชนิด เหล็กแผ่นตัว Y เหล็กแผ่นตัว L และ เหล็กกลมตัว Y มีความเค้นสูงเรียงกันตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.27 และเมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.28 กราฟมีระดับความเค้นเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับส่วนตัด Y-Y แต่มีค่าสูงกว่า เนื่องจากได้รับภาระทางความร้อนสูงกว่าส่วนตัด Y-Y โดยปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนในแบบจำลองที่ 1 ตั้งแต่ผิวด้านร้อนจนถึงความลึก 90 mm

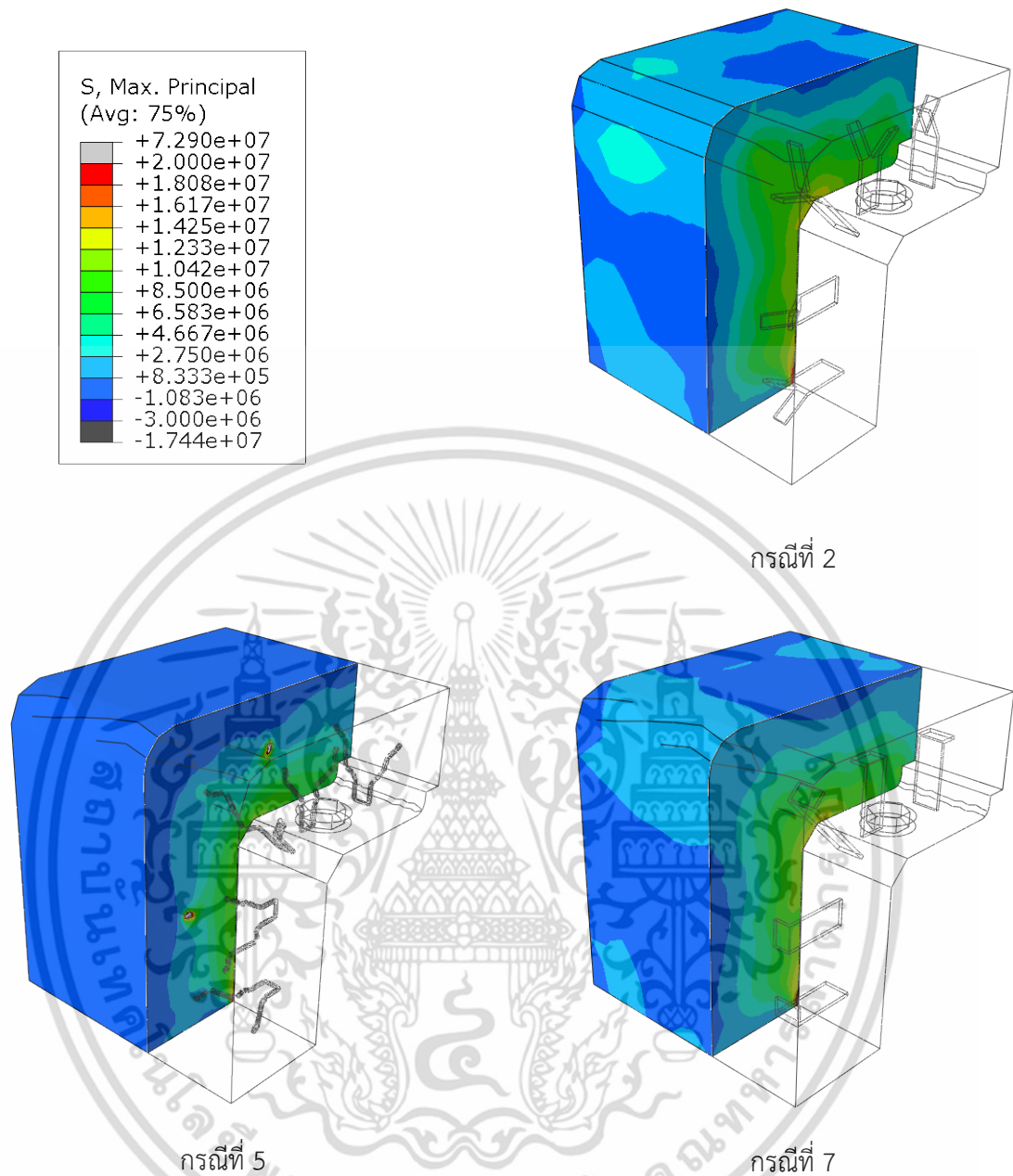
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เหล็กยึดจำนวน 10 อัน
 กราฟ (ก) ที่ระดับ Hot face (0 mm)
 กราฟ (ข) ที่ระดับ 30 mm
 กราฟ (ค) ที่ระดับ 60 mm
 กราฟ (ง) ที่ระดับ 90 mm
 กราฟ (จ) ที่ระดับ 120 mm

รูปที่ 5.28 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 10 อัน) บนส่วนตัด X-X

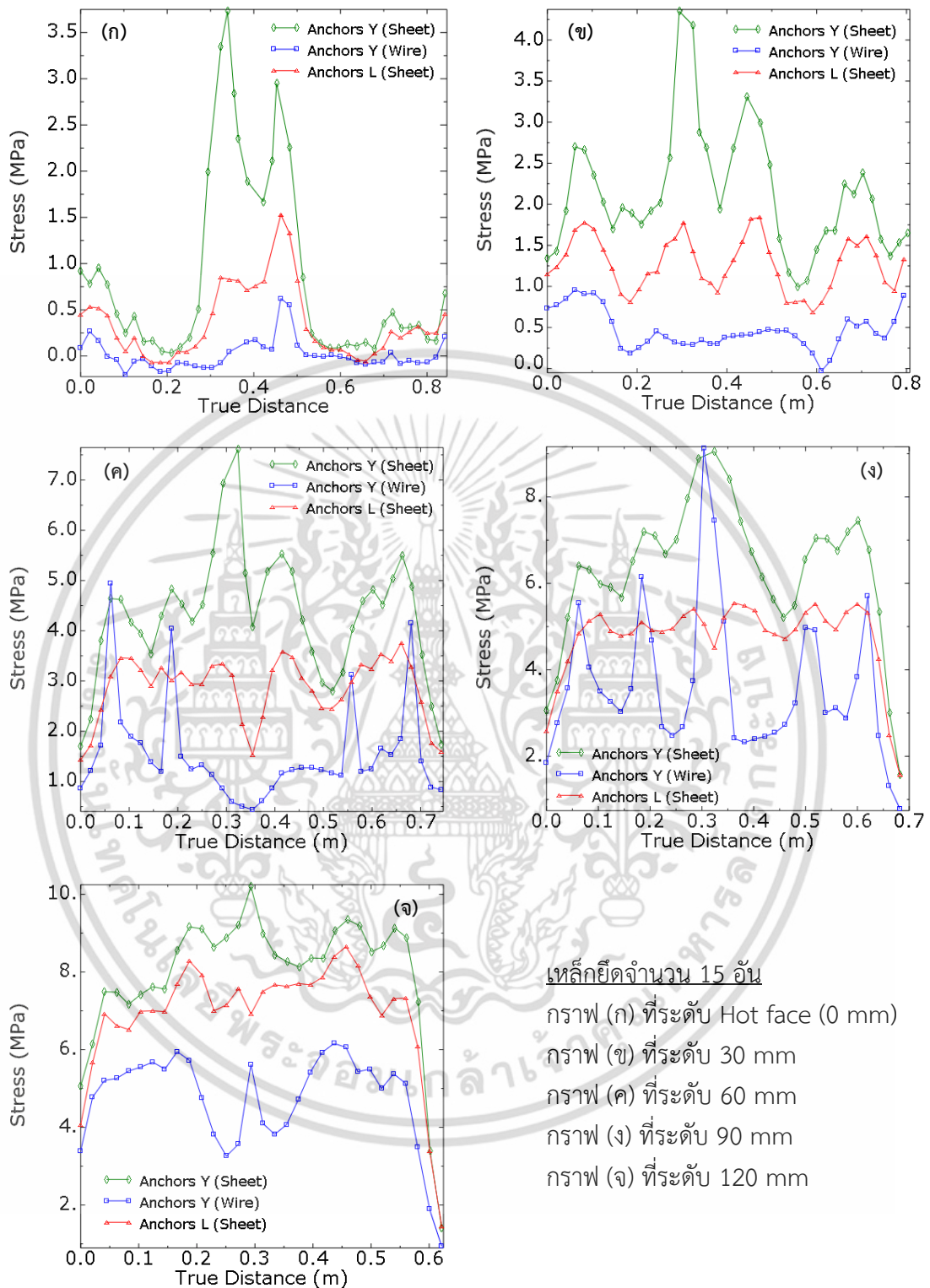
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.29 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตบนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 15 อัน) บนส่วนตัด Z-Z

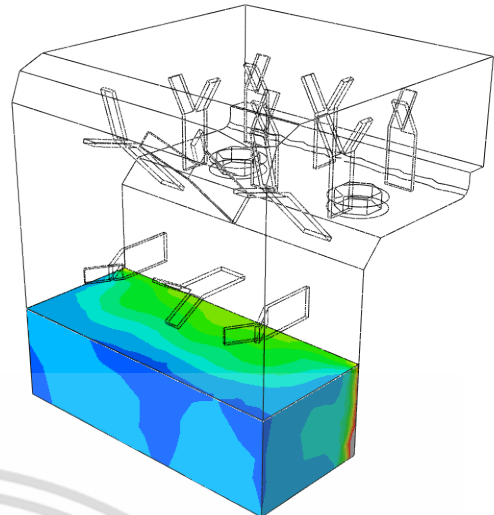
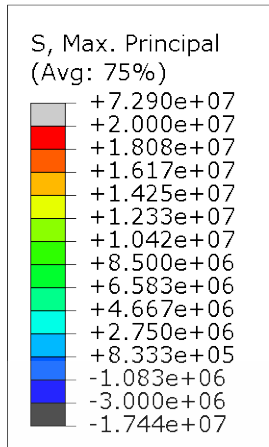
การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 2, 5 และ 7 บนส่วนตัด Z-Z มีเหล็กยึดจำนวน 15 อัน ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกันตามชนิดเหล็กยึด โดยที่เหล็กยึดชนิด เหล็กแผ่นตัว Y เหล็กแผ่นตัว L และ เหล็กกลมตัว Y มีความเค้นสูงเรียงกันตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.29 และเมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.30 กราฟมีระดับความเค้นสูงตรงบริเวณมุมโนสริงตั้งแต่ผิวด้านร้อนจนถึงความลึก 120 mm โดยปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนในแบบจำลองที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

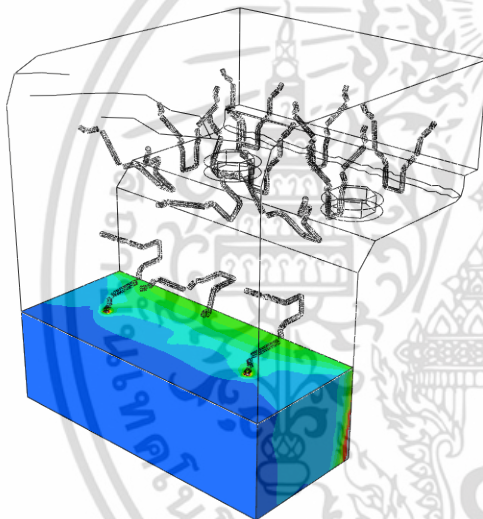


รูปที่ 5.30 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตชนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 15 อัน) บนส่วนตัด Z-Z

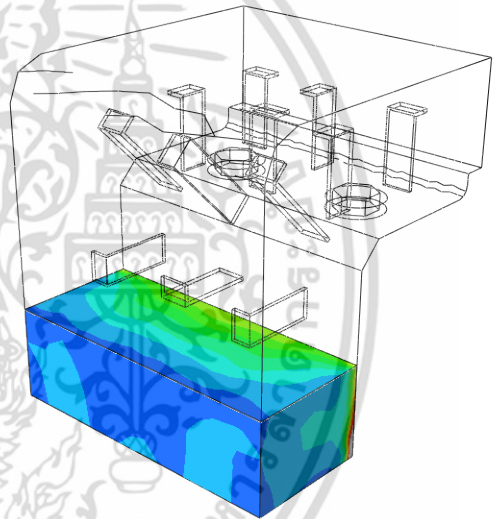
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กรณีที่ 2



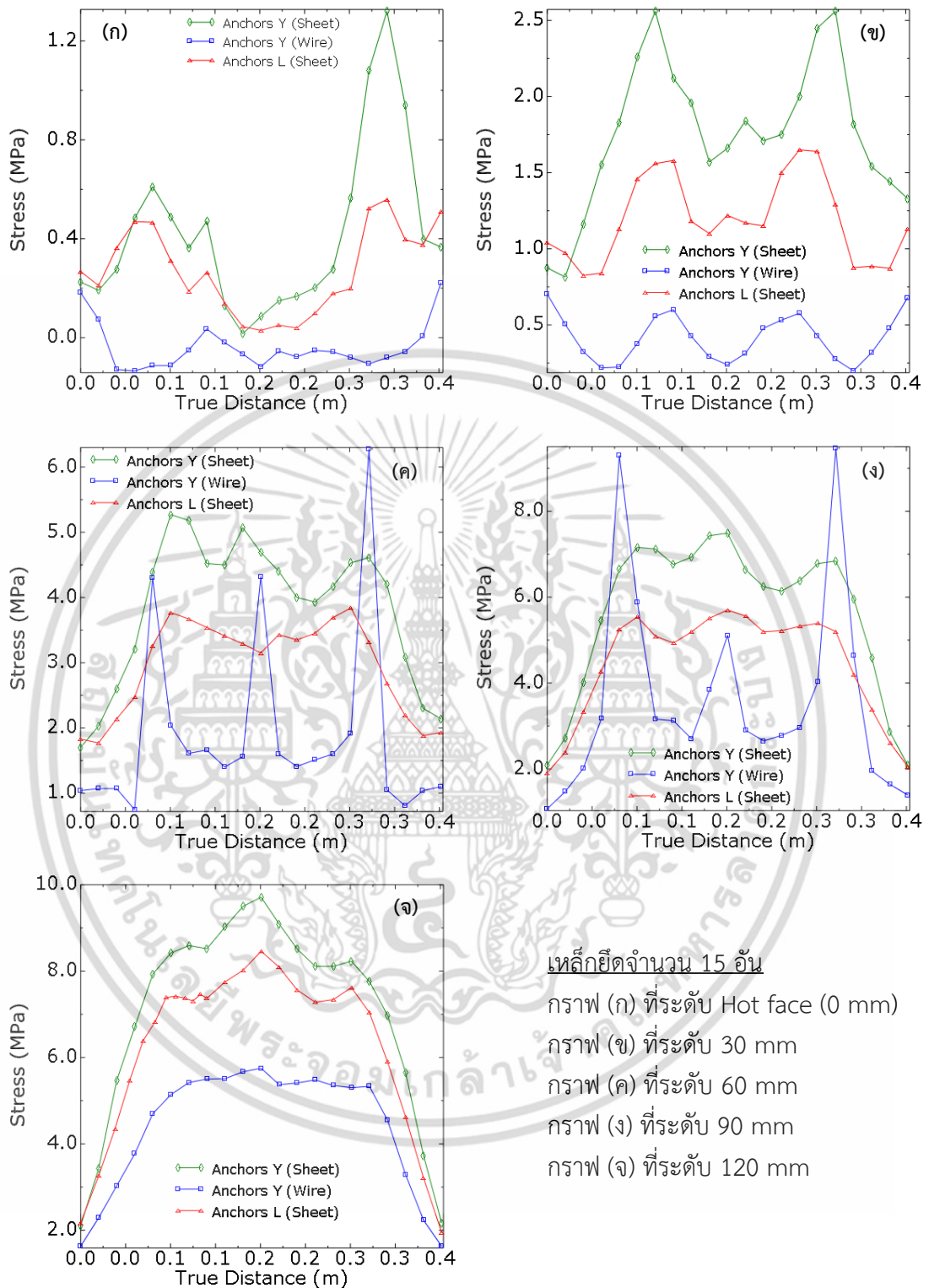
กรณีที่ 5



กรณีที่ 7

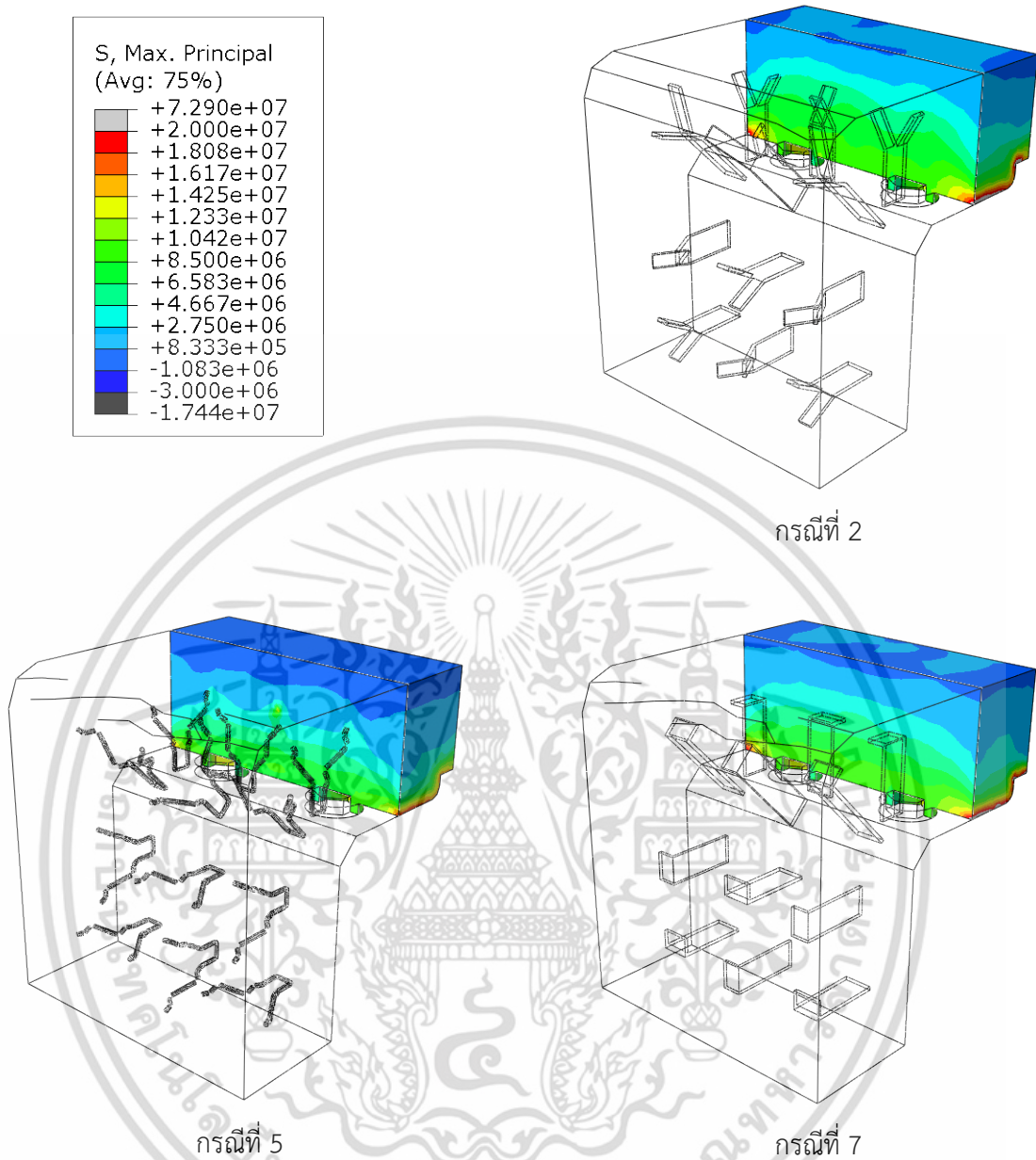
รูปที่ 5.31 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด
(จำนวน 15 อัน) บนส่วนตัด Y-Y

การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 2, 5 และ 7 บนส่วนตัด Y-Y มีเหล็กยึดจำนวน 15 อัน ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกันตามชนิดเหล็กยึด โดยที่เหล็กยึดชนิด เหล็กแผ่นตัว Y เหล็กแผ่นตัว L และ เหล็กกลมตัว Y มีความเค้นสูงเรียงกันตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.31 และเมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.32 กราฟมีระดับความเค้นแตกต่างกันน้อย เนื่องจากเหล็กยึดมีระยะห่างน้อยลง ทำให้เปลี่ยนแปลงระดับความเค้นในเนื้อคอนกรีตทนไฟน้อยลง



รูปที่ 5.32 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทOWER ตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 15 อัน) บนส่วนตัด Y-Y

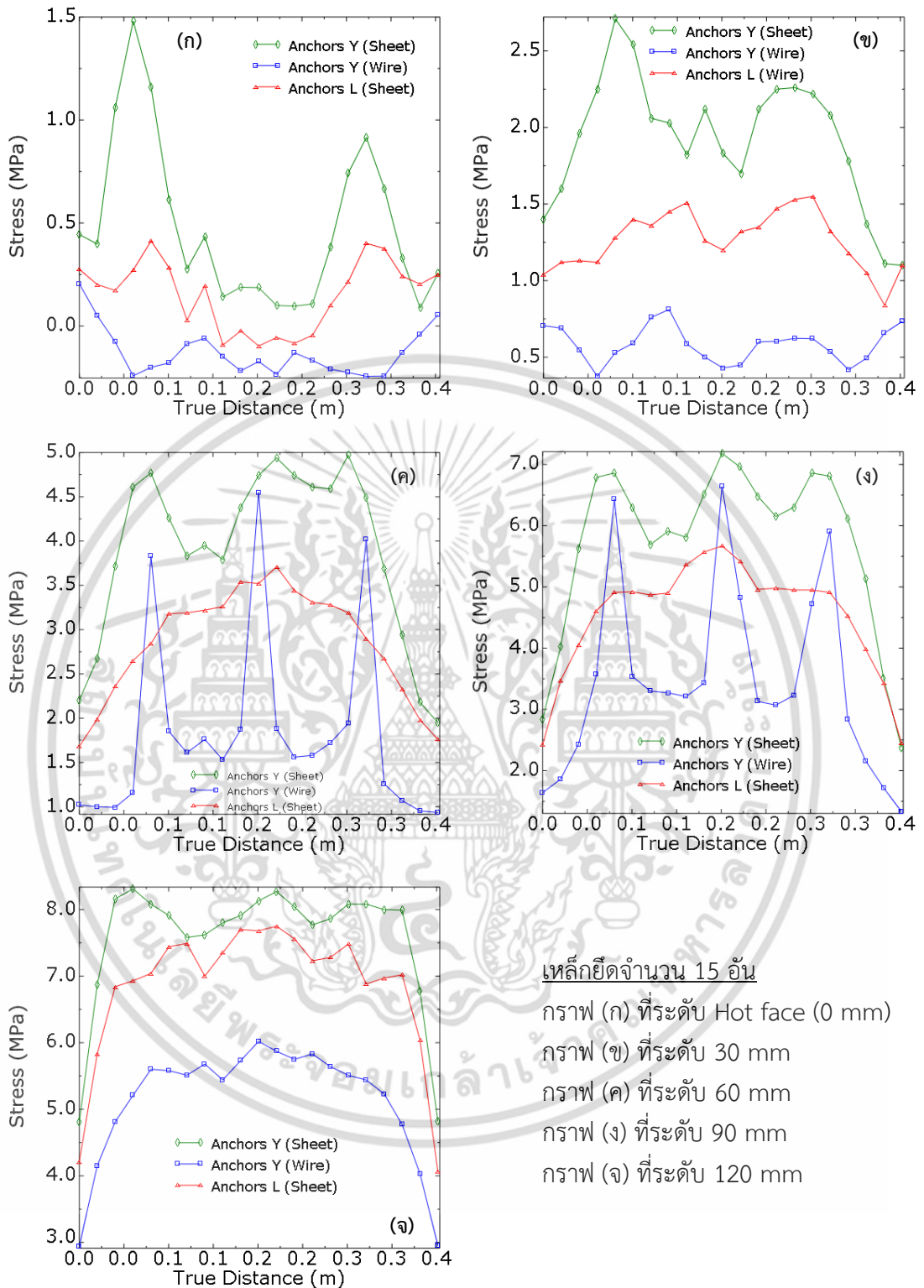
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.33 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตบนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 15 อัน) บนส่วนตัด X-X

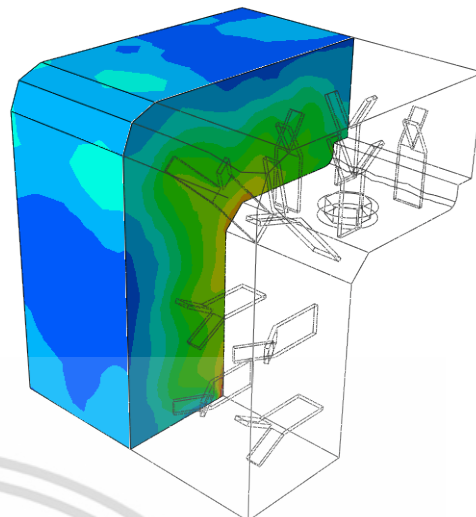
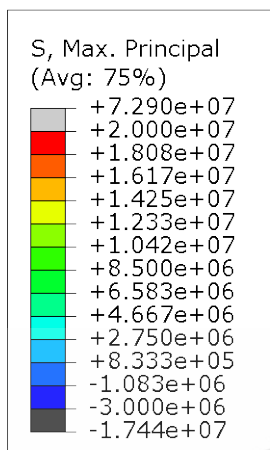
การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 2, 5 และ 7 บนส่วนตัด X-X มีเหล็กยึดจำนวน 15 อัน ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกันตามชนิดเหล็กยึด โดยที่เหล็กยึดชนิด เหล็กแผ่นตัว Y เหล็กแผ่นตัว L และ เหล็กกลมตัว Y มีความเค้นสูงเรียงกันตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.33 และเมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.34 กราฟมีระดับความเค้นเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับส่วนตัด Y-Y แต่มีค่าสูงกว่า เนื่องจากได้รับภาระทางความร้อนสูงกว่าส่วนตัด Y-Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

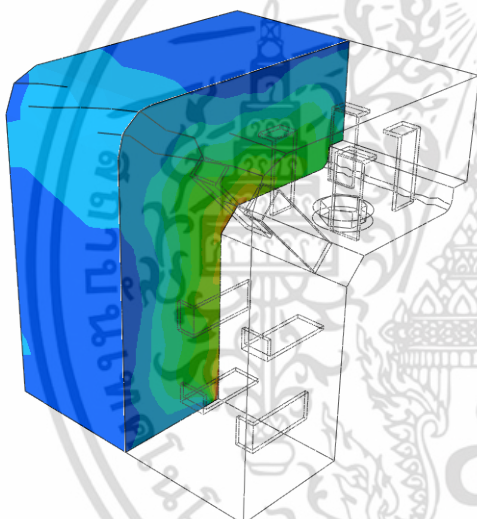


รูปที่ 5.34 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 15 อัน) บนส่วนตัด X-X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กรณีที่ 3

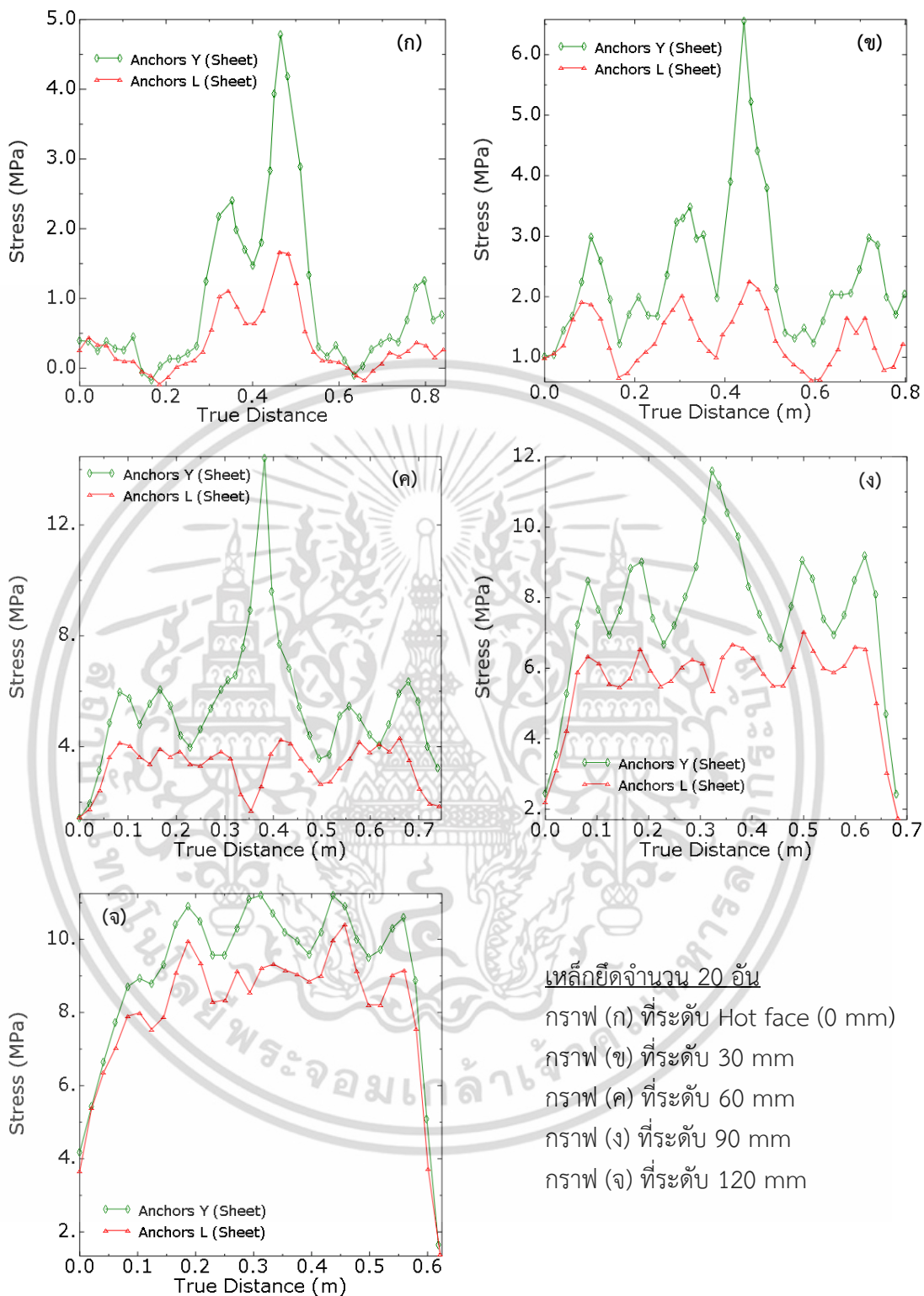


กรณีที่ 8

รูปที่ 5.35 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 20 อัน) บนส่วนตัด Z-Z

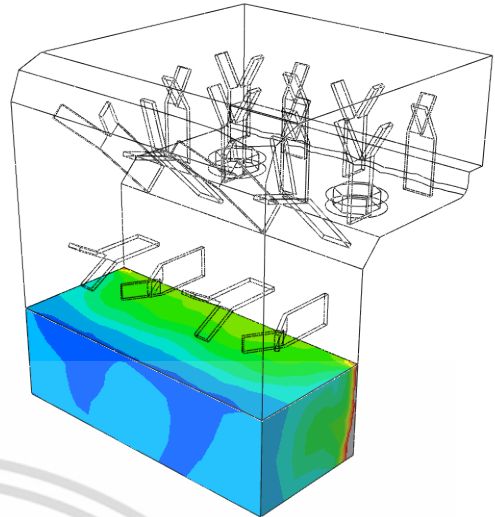
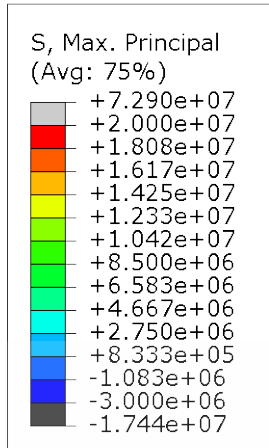
การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 3 และ 8 บนส่วนตัด Z-Z มีเหล็กยึดจำนวน 20 อัน ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกันตามชนิดเหล็กยึด โดยที่เหล็กยึดชนิด เหล็กแผ่นตัว Y มีความเค้นสูงกว่า เหล็กแผ่นตัว L ดังแสดงในรูปที่ 5.35 และเมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.36 กราฟมีระดับความเค้นสูงตรงบริเวณมุมโนสริงตั้งแต่ผิวด้านร้อนจนถึงความลึก 90 mm โดยปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนในแบบจำลองที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

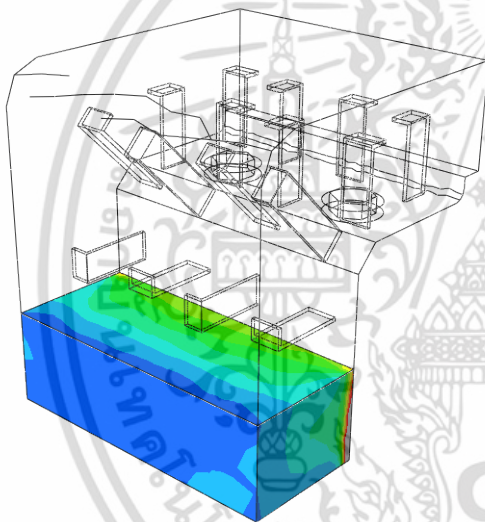


รูปที่ 5.36 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตบนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 20 อัน) บนส่วนตัด Z-Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กรณีที่ 3

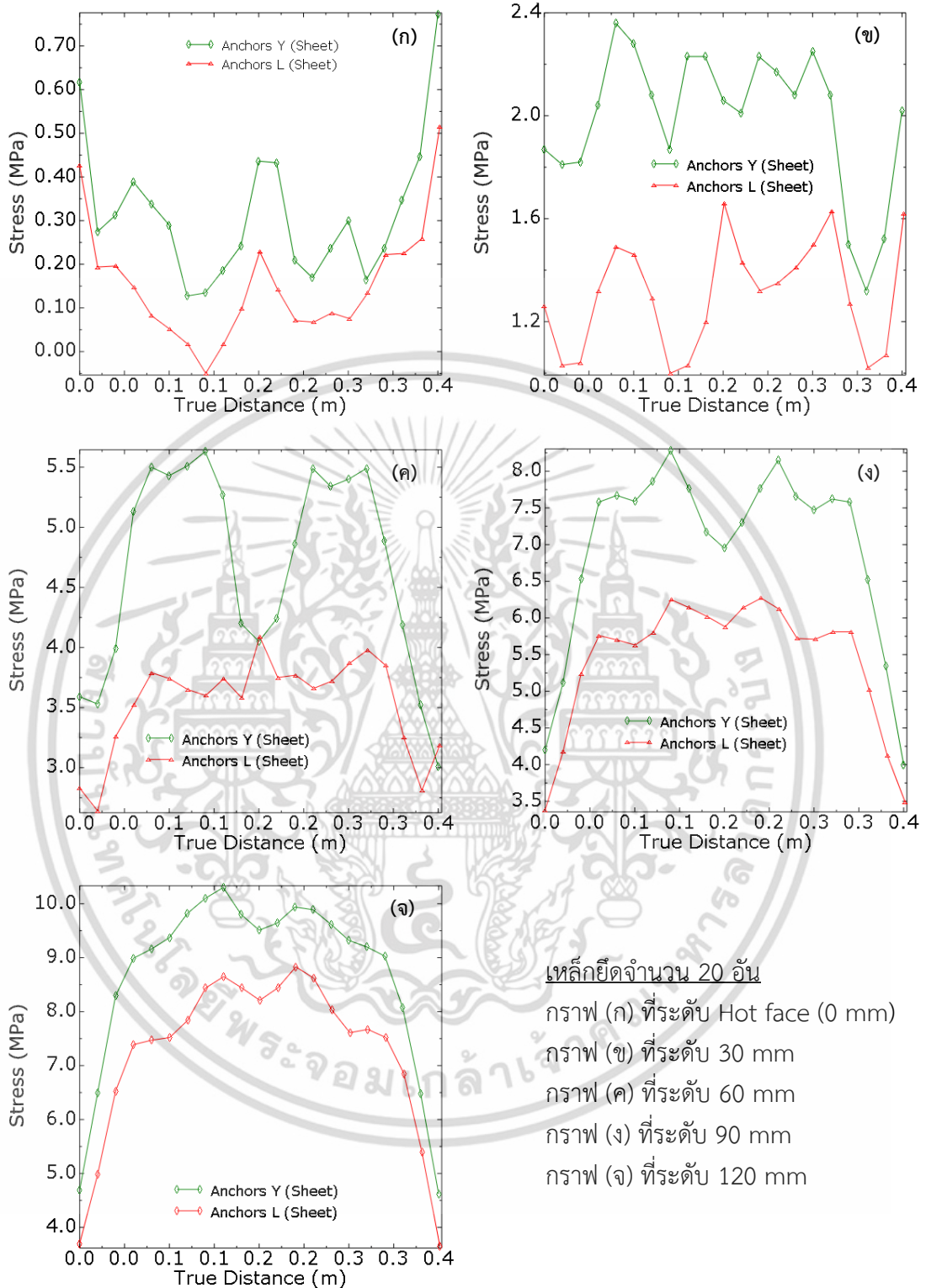


กรณีที่ 8

รูปที่ 5.37 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตบนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 20 อัน) บนส่วนตัด Y-Y

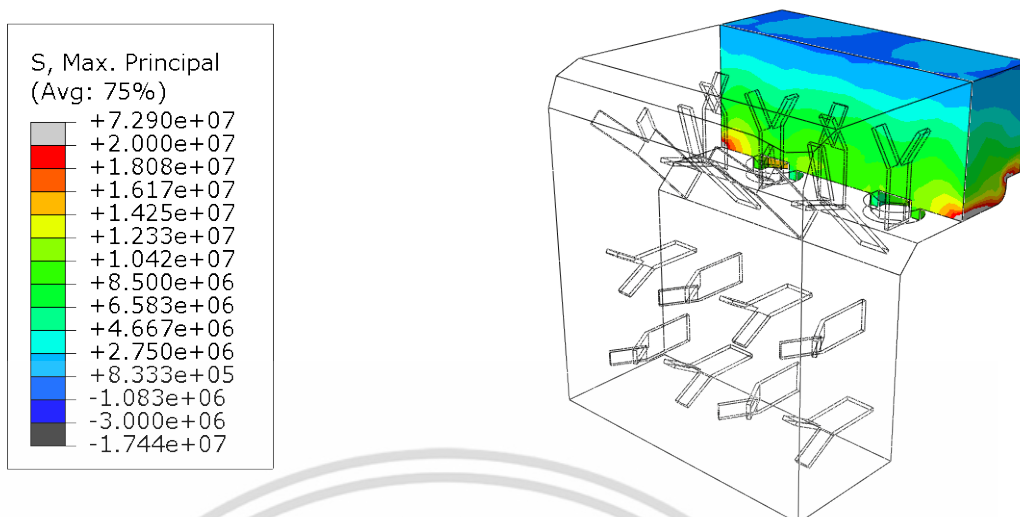
การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 3 และ 8 บนส่วนตัด Y-Y มีเหล็กยึดจำนวน 20 อัน ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกันตามชนิดเหล็กยึด โดยที่เหล็กยึดชนิด เหล็กแผ่นตัว Y มีระดับความเค้นสูงกว่า เหล็กแผ่นตัว L ดังแสดงในรูปที่ 5.37 และเมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.38 กราฟมีระดับความเค้นแตกต่างกันมาก ตั้งแต่ความลึก 30 ถึง 90 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

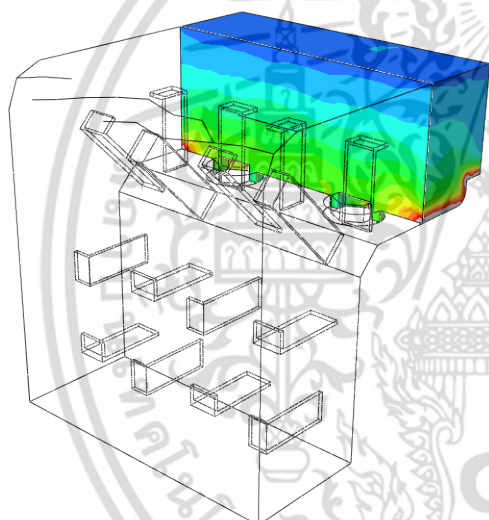


รูปที่ 5.38 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 20 อัน) บนส่วนตัด Y-Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กรณีที่ 3

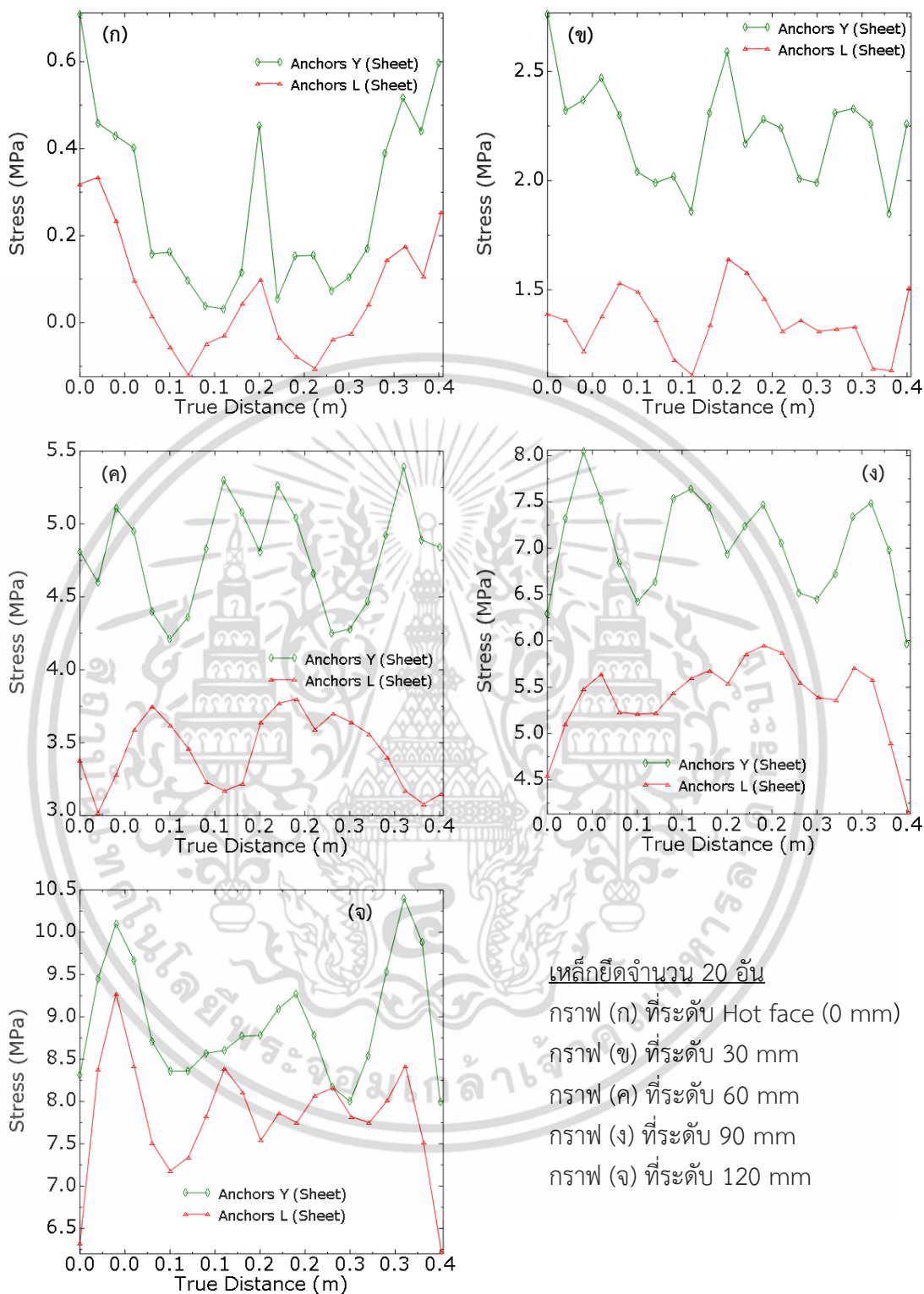


กรณีที่ 8

รูปที่ 5.39 ผลของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 20 อัน) บนส่วนตัด X-X

การกระจายความเค้นในแบบจำลองกรณีที่ 3 และ 8 บนส่วนตัด X-X มีเหล็กยึดจำนวน 20 อัน ปรากฏว่าความเค้นแตกต่างกันตามชนิดเหล็กยึด โดยที่เหล็กยึดชนิด เหล็กแผ่นตัว Y มีระดับความเค้นสูงกว่า เหล็กแผ่นตัว L ดังแสดงในรูปที่ 5.39 และเมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5.40 กราฟมีระดับความเค้นแตกต่างกัน ตั้งแต่ความลึก 30 ถึง 90 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

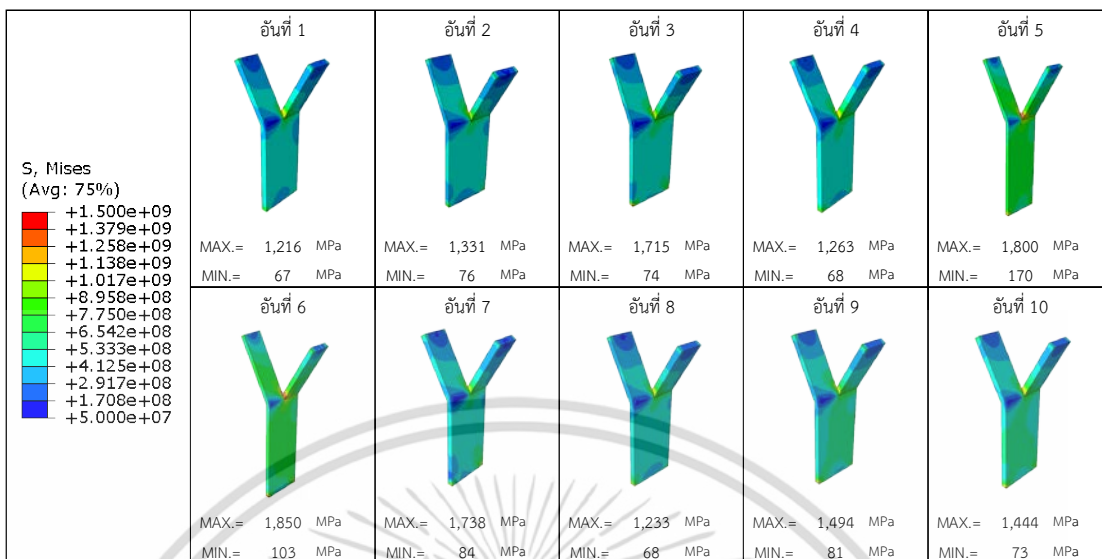


เหล็กยึดจำนวน 20 อัน
 กราฟ (ก) ที่ระดับ Hot face (0 mm)
 กราฟ (ข) ที่ระดับ 30 mm
 กราฟ (ค) ที่ระดับ 60 mm
 กราฟ (ง) ที่ระดับ 90 mm
 กราฟ (จ) ที่ระดับ 120 mm

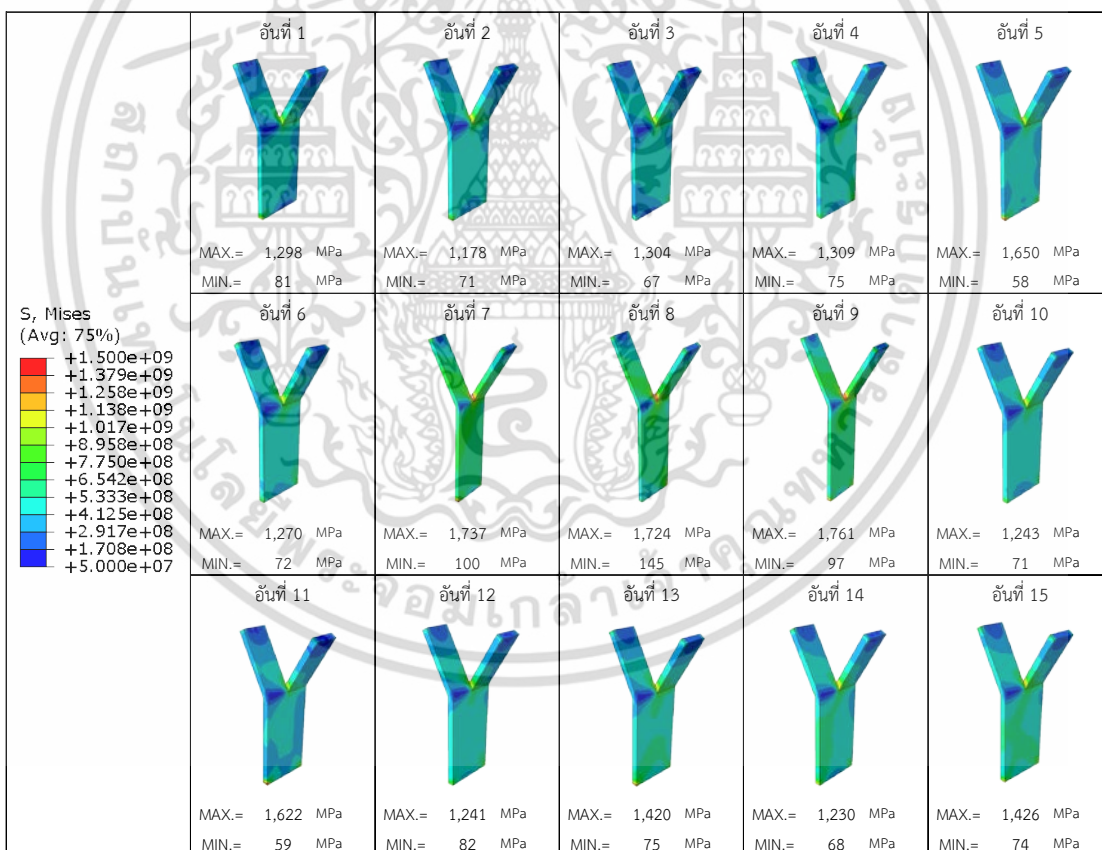
รูปที่ 5.40 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตบนไฟตามชนิดเหล็กยึด (จำนวน 20 อัน) บนส่วนตัด X-X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 1



ตารางที่ 5.11 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

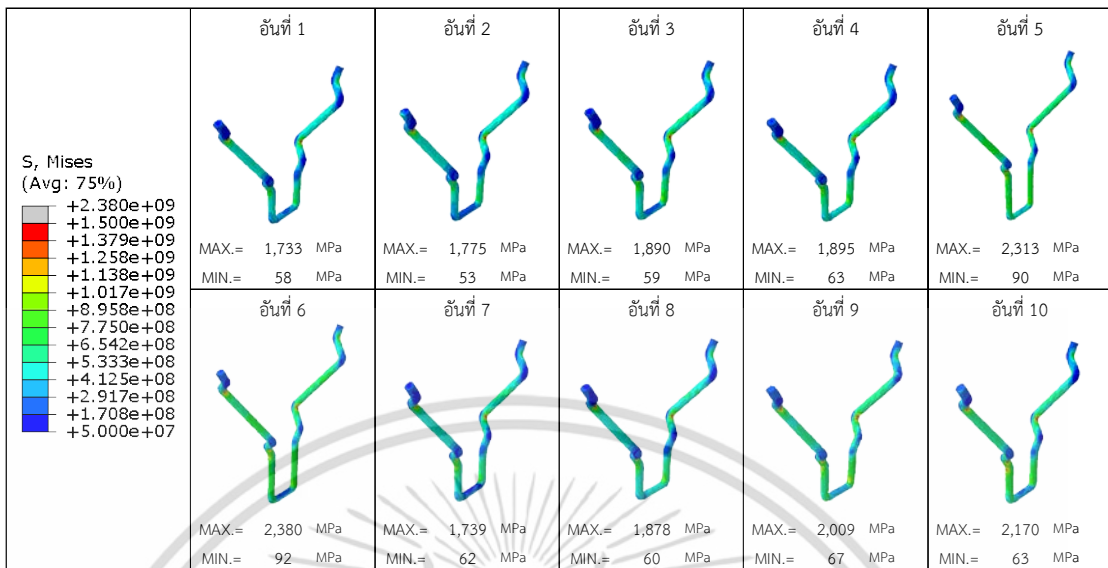
ตารางที่ 5.12 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณี 3

<p>S, Mises (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.500e+09 +1.379e+09 +1.258e+09 +1.138e+09 +1.017e+09 +8.958e+08 +7.750e+08 +6.542e+08 +5.333e+08 +4.125e+08 +2.917e+08 +1.708e+08 +5.000e+07 	<p>อันที่ 1</p> <p>MAX.= 1,300 MPa MIN.= 67.3 MPa</p>	<p>อันที่ 2</p> <p>MAX.= 1,370 MPa MIN.= 79.8 MPa</p>	<p>อันที่ 3</p> <p>MAX.= 1,110 MPa MIN.= 74.3 MPa</p>	<p>อันที่ 4</p> <p>MAX.= 1,290 MPa MIN.= 57.8 MPa</p>	<p>อันที่ 5</p> <p>MAX.= 1,330 MPa MIN.= 68.7 MPa</p>
	<p>อันที่ 6</p> <p>MAX.= 1,220 MPa MIN.= 61.7 MPa</p>	<p>อันที่ 7</p> <p>MAX.= 1,600 MPa MIN.= 51.8 MPa</p>	<p>อันที่ 8</p> <p>MAX.= 1,450 MPa MIN.= 78 MPa</p>	<p>อันที่ 9</p> <p>MAX.= 1,730 MPa MIN.= 149 MPa</p>	<p>อันที่ 10</p> <p>MAX.= 1,850 MPa MIN.= 87.9 MPa</p>
	<p>อันที่ 11</p> <p>MAX.= 1,690 MPa MIN.= 143 MPa</p>	<p>อันที่ 12</p> <p>MAX.= 1,790 MPa MIN.= 92.9 MPa</p>	<p>อันที่ 13</p> <p>MAX.= 1,130 MPa MIN.= 65.2 MPa</p>	<p>อันที่ 14</p> <p>MAX.= 1,240 MPa MIN.= 72 MPa</p>	<p>อันที่ 15</p> <p>MAX.= 1,700 MPa MIN.= 62.9 MPa</p>
	<p>อันที่ 16</p> <p>MAX.= 1,300 MPa MIN.= 78.7 MPa</p>	<p>อันที่ 17</p> <p>MAX.= 1,350 MPa MIN.= 80.7 MPa</p>	<p>อันที่ 18</p> <p>MAX.= 1,500 MPa MIN.= 71.1 MPa</p>	<p>อันที่ 19</p> <p>MAX.= 1,230 MPa MIN.= 72.6 MPa</p>	<p>อันที่ 20</p> <p>MAX.= 1,460 MPa MIN.= 79 MPa</p>

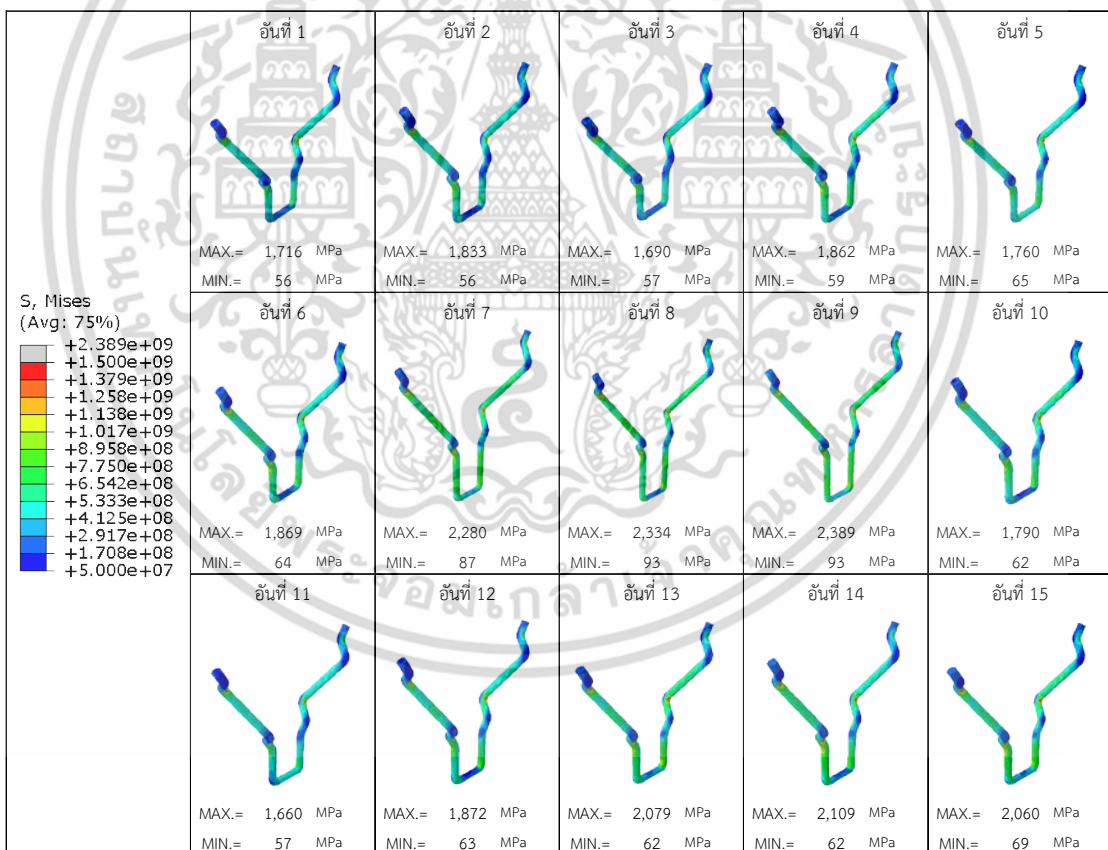
การกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึดถูกนำเสนอทั้งหมด 8 กรณี โดยแบบจำลองกรณี 1, 2 และ 3 เป็นเหล็กยึดชนิดเหล็กแผ่นตัว Y ปรากฏว่าความเค้นเกิดสูงสุดต่อเหล็กยึดที่ถูกติดตั้งบริเวณมุมโนสริงทั้งสิ้น ได้แก่ อันที่ 5 และ 6 ดังแสดงในตารางที่ 5.10 อันที่ 7, 8 และ 9 ดังแสดงในตารางที่ 5.11 อันที่ 9, 10, 11 และ 12 ดังแสดงในตารางที่ 5.12 เนื่องจากเหล็กยึดบริเวณดังกล่าวได้รับความร้อนสูงสุด ดังนั้น เหล็กยึดจึงขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้มากกว่าเหล็กยึดบริเวณอื่น โดยมีค่าความเค้นสูงสุดบริเวณทางแยกตัว Y เพราะว่บริเวณดังกล่าวถูกตัดขาดจากกัน แต่ยังคงสัมผัสกันอยู่ เมื่อได้รับความร้อนทำให้ขยายตัวอัดกัน และความหนาแน่นของความเค้นจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรง มีค่าความเค้นเฉลี่ย 1,770 MPa ที่อุณหภูมิ 860 °C โดยที่ผลทดสอบแรงดึงของสแตนเลส เกรด SUS310S ที่อุณหภูมิดังกล่าว มีความเค้นจุดคราก (Yield point) และ ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) เป็น 114.56 และ 165.40 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้ แบบจำลองมีความเค้นสูงเกินกว่าความทนต่อแรงดึง ซึ่งทำให้เหล็กยึดเสียหายได้ที่บริเวณดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.13 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีนี้ที่ 4



ตารางที่ 5.14 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีนี้ที่ 5



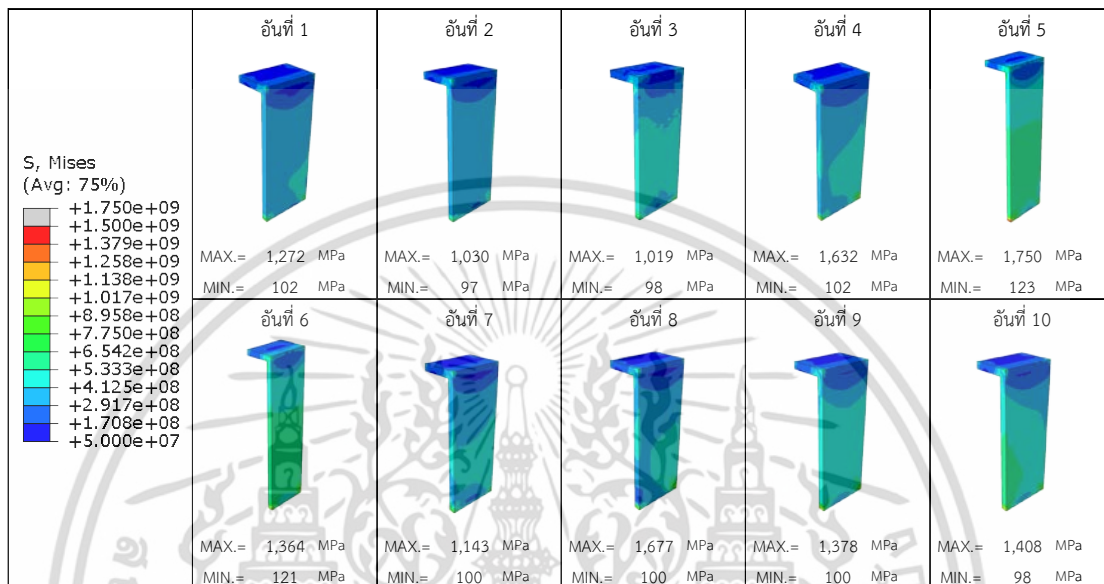
การกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึดแบบจำลองกรณีนี้ที่ 4 และ 5 เป็นเหล็กยึดชนิดเหล็กกลมตัว Y ปรากฏว่าความเค้นเกิดสูงสุดต่อเหล็กยึดที่ถูกติดตั้งบริเวณมุมโนสริงทั้งสิ้น ได้แก่ อันที่ 5 และ 6 ดังแสดงในตารางที่ 5.13 อันที่ 7, 8 และ 9 ดังแสดงในตารางที่ 5.14 เนื่องจากเหล็กยึดบริเวณดังกล่าวได้รับความร้อนสูงสุด ดังนั้น เหล็กยึดจึงขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้มากกว่าเหล็กยึดบริเวณอื่น โดยมีค่าความเค้นสูงสุดบริเวณที่เหล็กยึดถูกตัดเปลี่ยนรูปทรง เพราะเกิดความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งสงวนลิขสิทธิ์ไว้โดยไม่มีการอนุญาตให้คัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

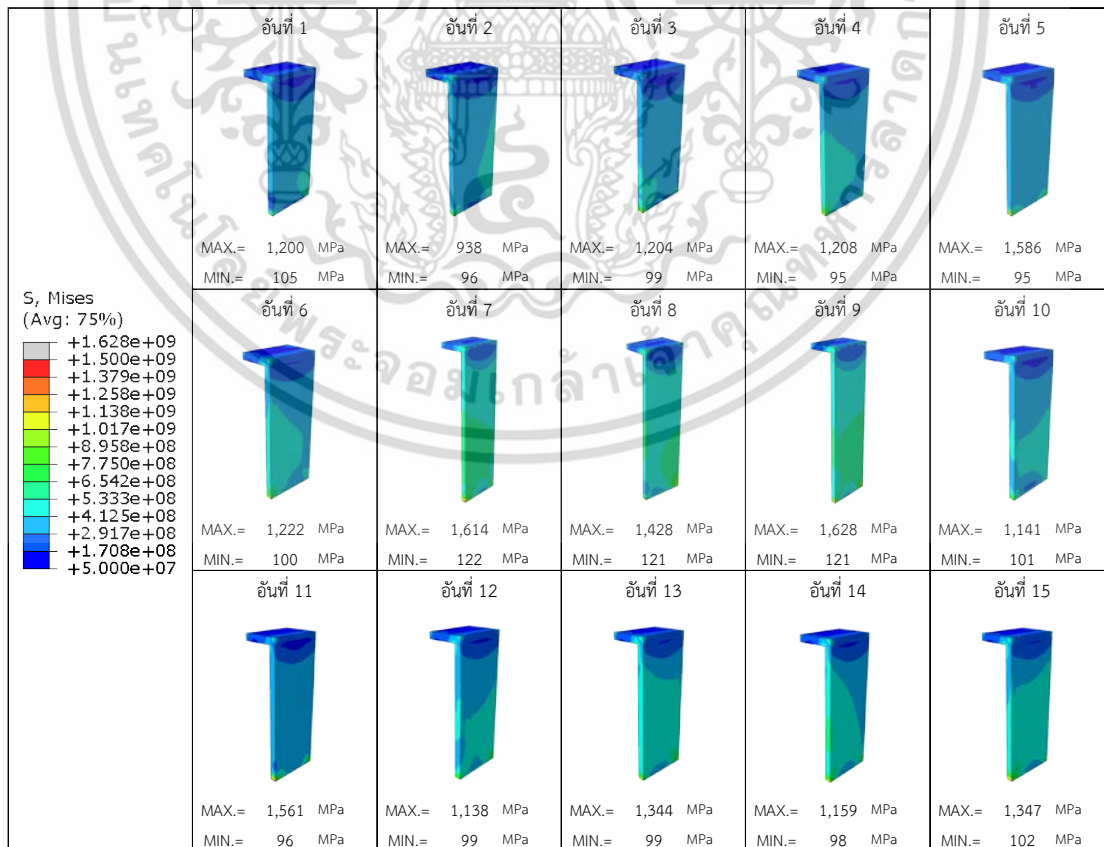
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นของความเค้นจากการเปลี่ยนรูปร่างของเหล็กยึด มีค่าความเค้นเฉลี่ย 2,340 MPa ที่อุณหภูมิ 696 °C โดยที่ผลทดสอบแรงดึงของสแตนเลส เกรด SUS310S ที่อุณหภูมิดังกล่าว มีความเค้นจุดคราก และความทนต่อแรงดึง มีค่า 164.87 และ 336.68 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้ แบบจำลองมีความเค้นสูงเกินกว่าความทนต่อแรงดึง ซึ่งทำให้เหล็กยึดเสียหายได้ที่บริเวณดังกล่าว

ตารางที่ 5.15 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 6

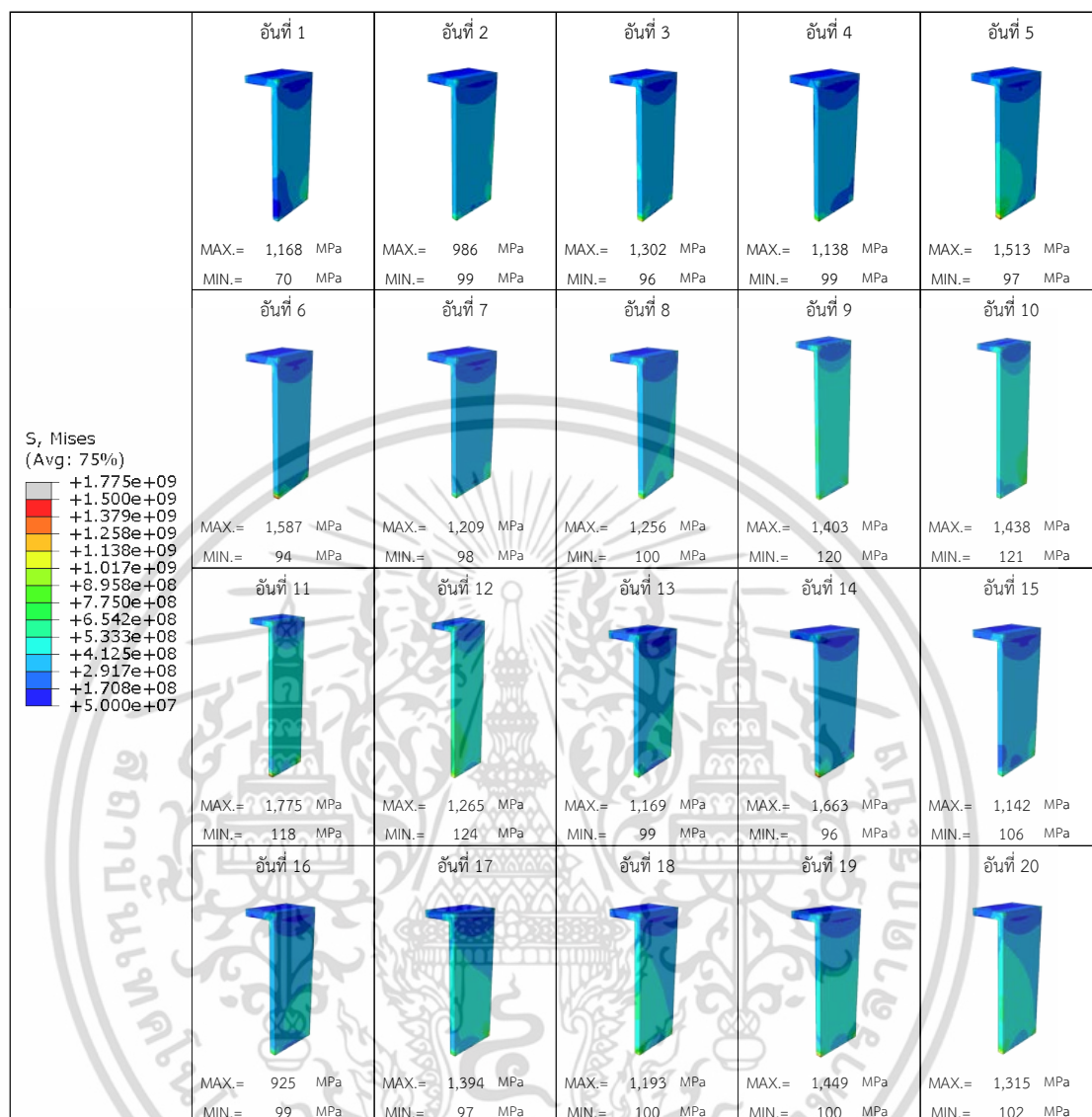


ตารางที่ 5.16 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.17 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึด แบบจำลองกรณีที่ 8

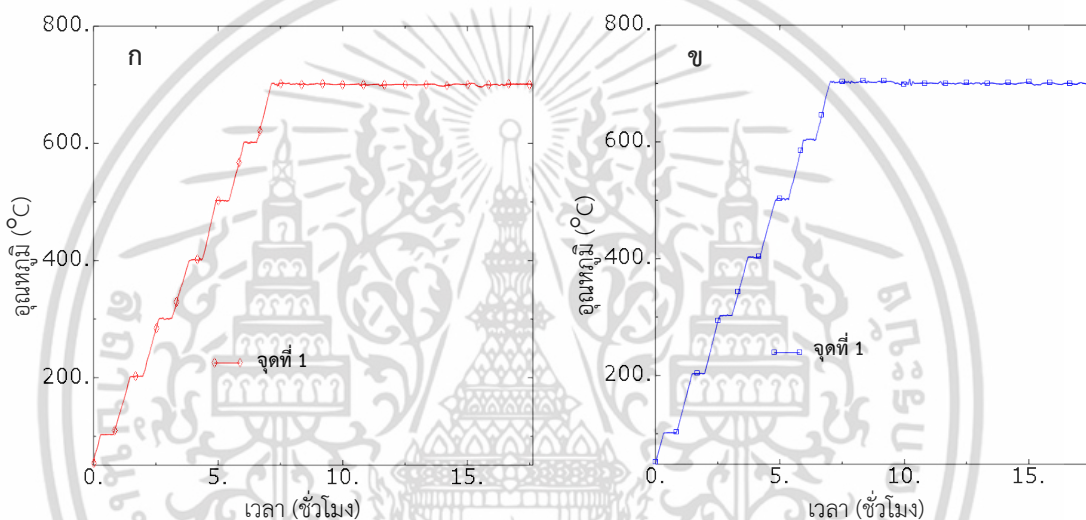


การกระจายความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึดแบบจำลองกรณีที่ 6, 7 และ 8 เป็นเหล็กยึดชนิดเหล็กแผ่นตัว L ปรากฏว่าความเค้นเกิดสูงสุดต่อเหล็กยึดที่ถูกติดตั้งบริเวณมุมโนสริงทั้งสิ้น ได้แก่ อันที่ 5 และ 6 ดังแสดงในตารางที่ 5.15 อันที่ 7, 8 และ 9 ดังแสดงในตารางที่ 5.16 อันที่ 9, 10, 11 และ 12 ดังแสดงในตารางที่ 5.17 เนื่องจากเหล็กยึดบริเวณดังกล่าวได้รับความร้อนสูงสุด ดังนั้นเหล็กยึดจึงขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้มากกว่าเหล็กยึดบริเวณอื่น โดยมีค่าความเค้นสูงสุดบริเวณโคนของเหล็กยึด เพราะว่าเหล็กยึดขยายตัวเนื่องจากความร้อน แต่เหล็กยึดถูกจำกัดการขยายตัวโดยคอนกรีตทนไฟทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดแรงกระทำต่อพื้นซีคเตอร์ริงจึงมีค่าความเค้นเฉลี่ย 1,518 MPa ที่อุณหภูมิ 364 °C โดยที่ผลทดสอบแรงดึงของสแตนเลส เกรด SUS310S ที่อุณหภูมิดังกล่าวมีความเค้นจุดคราก และความทนต่อแรงดึง มีค่า 226.02 และ 514.24 MPa ตามลำดับ แม้ว่าแบบจำลองมีความเค้นสูงเกินกว่าความทนต่อแรงดึง แต่ในการปฏิบัติงานติดตั้งจริงโคนเหล็กยึดถูกเชื่อมติดไว้กับซีคเตอร์ริง ซึ่งพื้นที่รอยเชื่อมสามารถช่วยให้ความเค้นบริเวณดังกล่าวลดลงได้

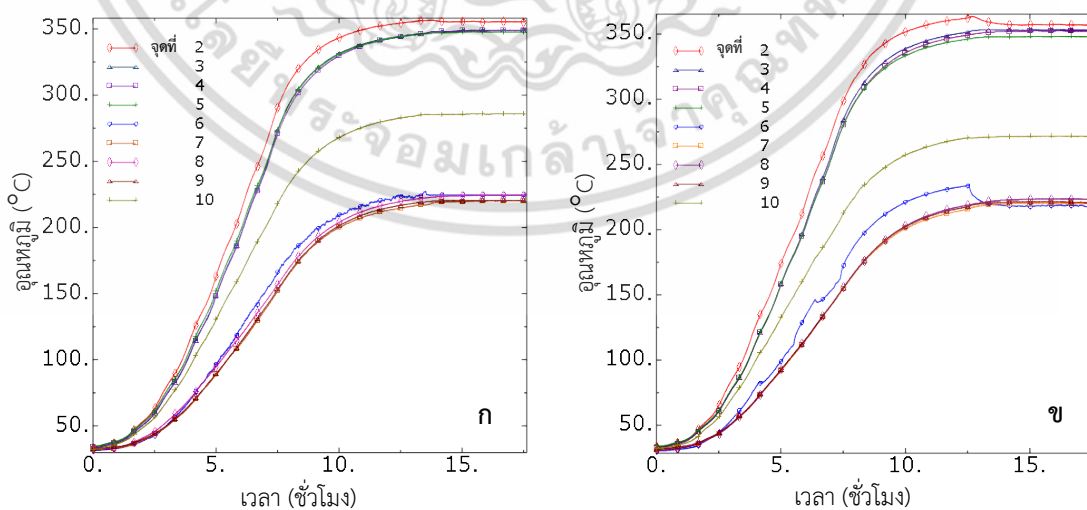
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลของการทดลอง

การปฏิบัติการทดลองถูกดำเนินการจำนวน 2 ครั้ง ใช้ระยะเวลาประมาณ 17.5 ชั่วโมงต่อครั้ง ผลจากการทดลองถูกบันทึกด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย ผลอุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตทนไฟ (จุดที่ 1) ดังแสดงในรูปที่ 5.41 โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่างทดลองจนมีอุณหภูมิ 700 °C และคงรักษาอุณหภูมินั้นไว้ตลอดจนกระบวนการเสร็จสิ้น ในเวลาเดียวกัน ทั้งผลอุณหภูมิสถานะแวดล้อมใกล้คอนกรีตทนไฟถูกบันทึกไว้ (จุดที่ 2 ถึง 10) ดังแสดงในรูปที่ 5.42 ซึ่งผลอุณหภูมิจากการทดลองดังกล่าวจะถูกนำไปประยุกต์ใช้กับแบบจำลองในส่วนถัดไป และผลอุณหภูมิผิวคอนกรีตทนไฟ อุณหภูมิผิวเหล็กยึด และ อุณหภูมิผิวเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ (จุดที่ 11 ถึง 14) ดังแสดงในรูปที่ 5.43 รวมถึงผลความเครียดเหล็กยึด ดังแสดงในรูปที่ 5.44 จะถูกนำมาเปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองและการทดลอง

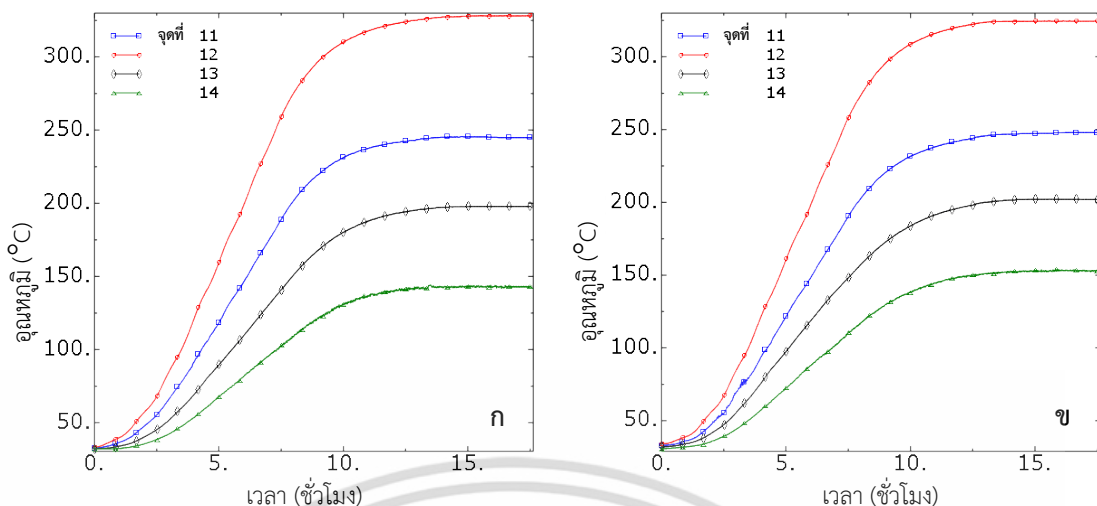


รูปที่ 5.41 ผลของอุณหภูมิที่ผิวของคอนกรีตทนไฟ จุดที่ 1 (ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2

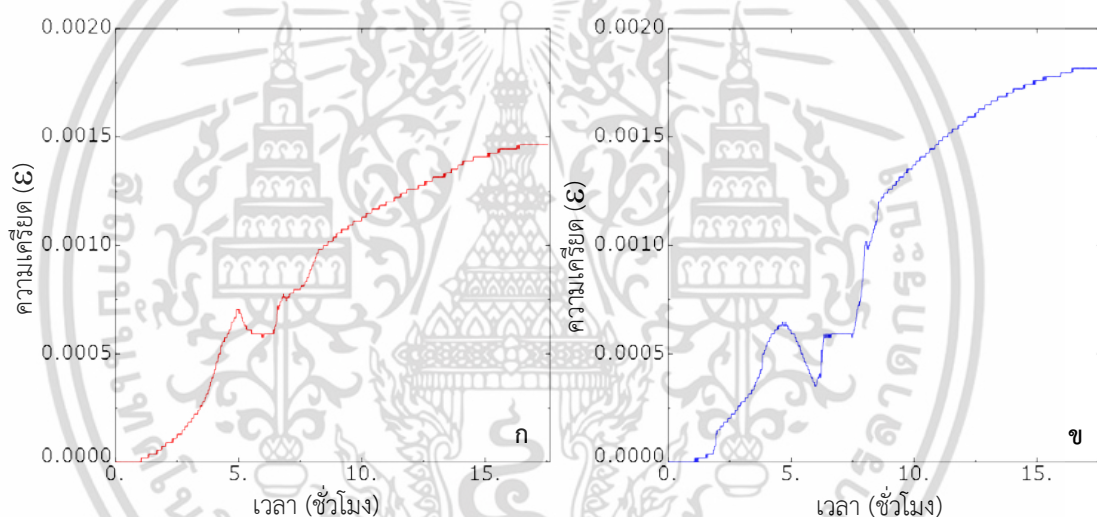


รูปที่ 5.42 ผลของอุณหภูมิสถานะแวดล้อมใกล้คอนกรีตทนไฟ จุดที่ 2 ถึง 10 (ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.43 ผลของอุณหภูมิผิวคอนกรีตทนไฟ เหล็กยึด และเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์ จุดที่ 11 ถึง 14 (ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2

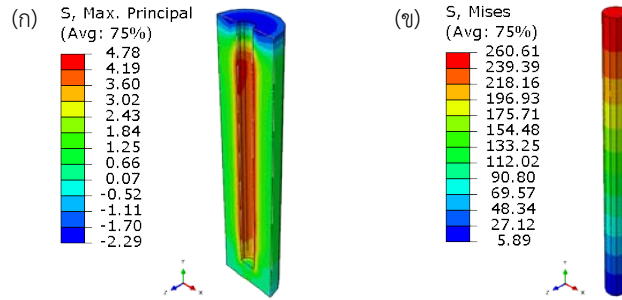


รูปที่ 5.44 ผลของความเครียดบนเหล็กยึด (ก) การทดลองครั้งที่ 1 (ข) การทดลองครั้งที่ 2

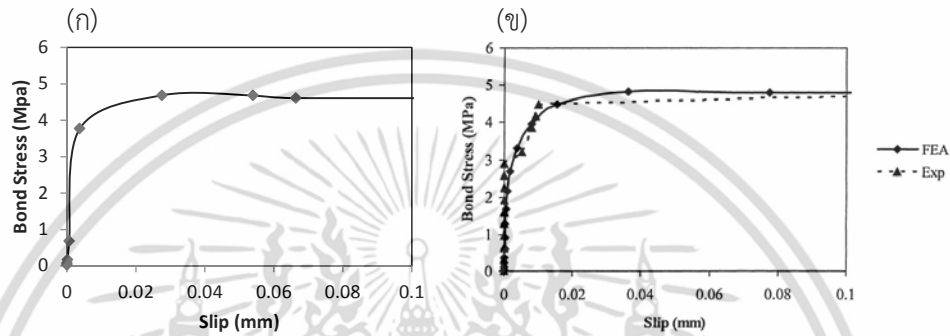
5.4 ผลของการศึกษาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาดำเนินการเกี่ยวกับพันธะแรงยึดเหนี่ยว

ผลของการจำลองพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตถูกเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดย Alaka [19] ซึ่งได้จำลองการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริมแรง (Pull out test) ผลของความเค้นหลักสูงสุดในคอนกรีตและความเค้นอนมิสเซนส์ของเหล็กที่แรงดึง 250 N ดังแสดงในรูปที่ 5.45 การกระจายความเค้นในเนื้อคอนกรีตมีค่าสูงสุด 4.78 MPa ตรงบริเวณที่สัมผัสกับเหล็กและจะลดต่ำลงเมื่ออยู่ห่างออกไป ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวและการลื่นไถลถูกเปรียบเทียบกับกันกับของ Alaka ดังแสดงในรูปที่ 5.46 ปรากฏว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกันและสอดคล้องกันอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.45 ผลของการจำลอง (ก) ความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีต (ข) ความเค้นวอนมิสเสสของเหล็ก

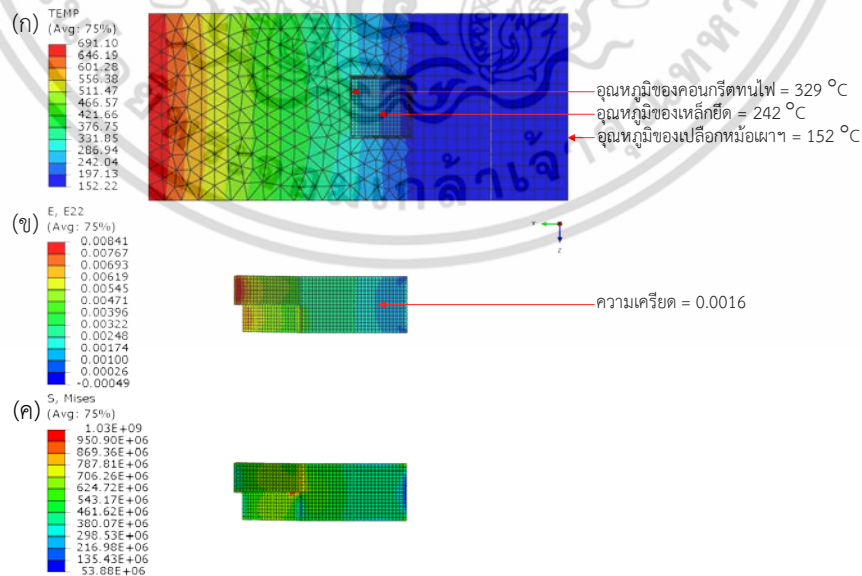


รูปที่ 5.46 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวและการลื่นไถล (ก) ผลของการศึกษา (ข) ผลของ Alaka

5.5 ผลของการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบกับผลของการทดลอง

5.5.1 ผลของการจำลอง

ผลของการจำลองถูกนำเสนอ การกระจายอุณหภูมิ ความเครียดเหล็กยึดตามแนวแกน Y และความเค้นวอนมิสเสส ดังแสดงในรูปที่ 5.47



รูปที่ 5.47 ผลของการจำลอง (ก) การกระจายอุณหภูมิ (ข) ความเครียดเหล็กยึดตามแนวแกน Y

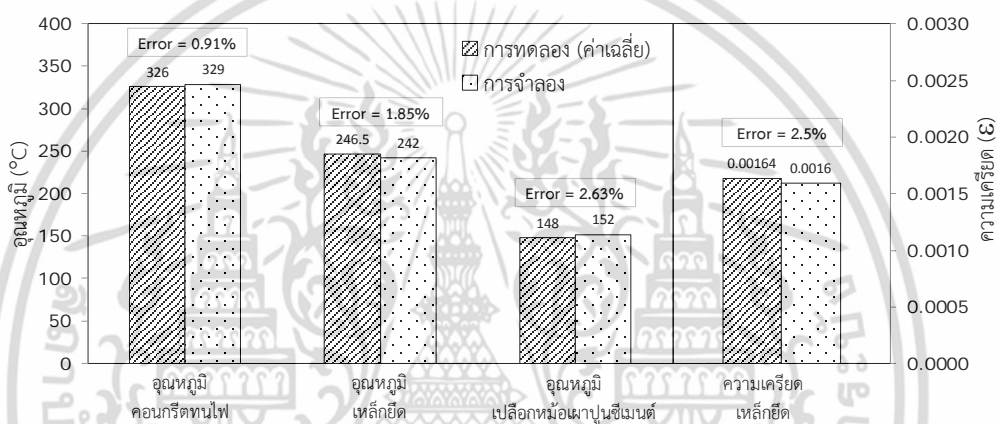
(ค) ความเค้นวอนมิสเสส (Pa)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 เปรียบเทียบผลของการจำลองกับผลของการทดลอง

การทดลองให้ผลทั้งอุณหภูมิและความเครียดเหล็กยึดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การทดลองถูกดำเนินการอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งผลอุณหภูมิและความเครียดเหล็กยึดไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาหรืออยู่ในสภาวะคงตัว สอดคล้องกับแบบจำลองที่ถูกดำเนินการในสภาวะคงตัวเช่นกัน ดังนั้น การเปรียบเทียบจึงนำผลการทดลองที่สภาวะคงตัว ได้แก่ อุณหภูมิคอนกรีตทนไฟ อุณหภูมิเหล็กยึด อุณหภูมิเปลือกหุ้มเสาปูนซีเมนต์ และ ความเครียดเหล็กยึด ซึ่งทั้งหมดเป็นผลเฉลี่ยจากการทดลองจำนวน 2 ครั้ง

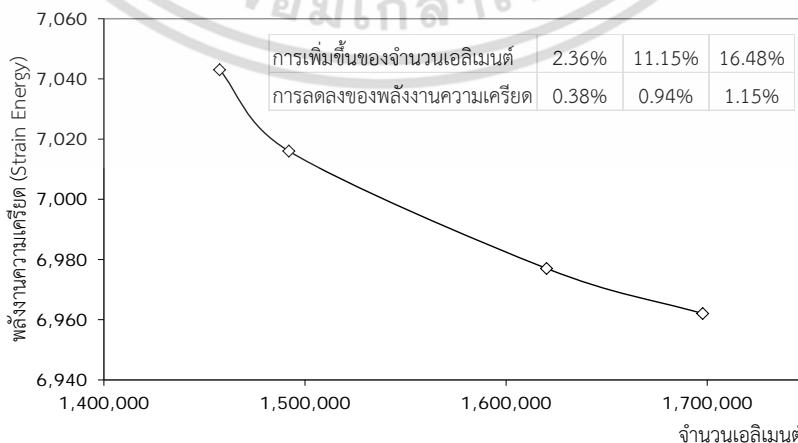
การเปรียบเทียบผลของการจำลองกับการทดลองพร้อมค่าความผิดพลาด (Error) ดังแสดงในรูปที่ 5.48 โดยปรากฏว่าทั้งอุณหภูมิและความเครียดเหล็กยึดของการจำลองและการทดลองให้ผลที่ใกล้เคียงกันและสอดคล้องกันเป็นอย่างดี



รูปที่ 5.48 เปรียบเทียบผลของการจำลองกับผลของการทดลองที่สภาวะคงตัว

5.5.3 การตรวจสอบการลู่เข้าของแบบจำลอง

พลังงานความเครียดทั้งหมดถูกเขียนกราฟเปรียบเทียบกับความละเอียดของเอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.49 กราฟแสดงให้เห็นว่าพลังงานความเครียดลู่เข้าตามความละเอียดของเอลิเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการตรวจสอบเพื่อแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองเป็นตัวแทนที่ถูกต้องโดยแท้จริง

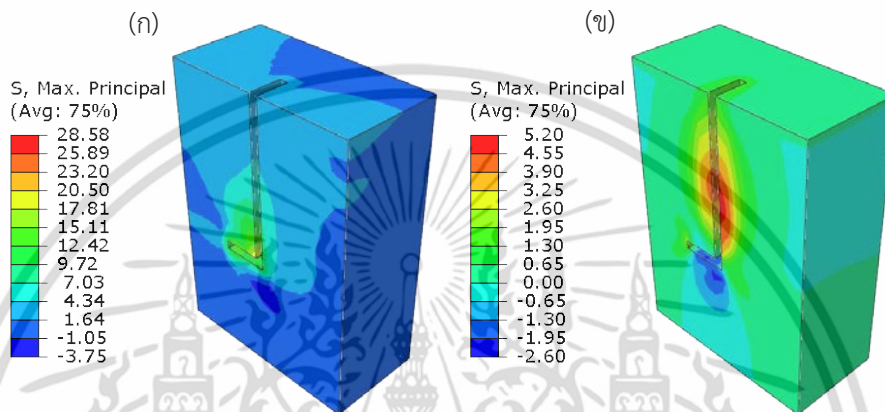


รูปที่ 5.49 การลู่เข้าของพลังงานความเครียดกับความละเอียดของเอลิเมนต์

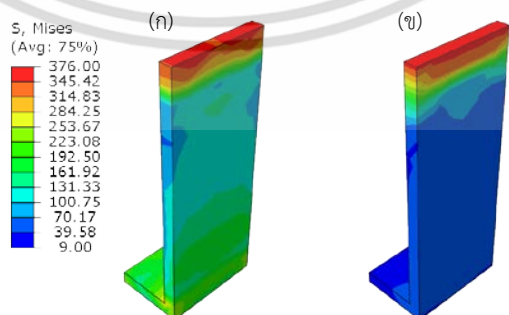
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 ผลของการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธะแรงยึดเหนี่ยวแบบสลิ้นไถล (Bond-slip) และแบบยึดแน่นถาวร (Perfect bond) ภายใต้ภาระทางความร้อน

พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตทนไฟถูกกำหนดในแบบจำลอง 2 แบบ คือ 1) พฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและพันธะระหว่างคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดเป็นแบบยึดแน่นถาวร และ 2) พฤติกรรมทางกลแบบไม่เชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและพันธะระหว่างผิวคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดเป็นแบบสลิ้นไถล ผลที่ได้รับจากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่า แบบที่ 1) มีความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อคอนกรีตทนไฟมากกว่า แบบที่ 2) ประมาณ 5 เท่า



รูปที่ 5.50 เปรียบเทียบผลของความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตทนไฟ (ก) พฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นพันธะแบบยึดแน่นถาวร (ข) พฤติกรรมทางกลแบบไม่เชิงเส้นพันธะแบบสลิ้นไถล และการกระจายความเค้นเป็นไปในลักษณะที่แตกต่างกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 5.50 ส่วนความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึดทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกันเฉพาะบริเวณโคนเหล็กยึด ถัดจากบริเวณนั้นการกระจายความเค้นเริ่มแตกต่างกันทั้งตลอดช่วง ดังแสดงในรูปที่ 5.51 โดยทั่วไป การกระจายความเค้นของคอนกรีตทนไฟควรจะได้ความเค้นตั้งเมื่ออยู่ใกล้เหล็กยึดและลดน้อยลงเมื่ออยู่ห่างออกไป เพราะว่าเหล็กยึดขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้มากกว่าคอนกรีตทนไฟจึงไปดึงให้คอนกรีตทนไฟยึดตัวตามและผลักดันให้คอนกรีตทนไฟเนื้อเหล็กยึดขึ้นไปอยู่ภายใต้ความเค้นอัด ดังนั้น พฤติกรรมทางกลแบบไม่เชิงเส้นและการสัมผัสของวัสดุแบบสลิ้นไถลจึงให้ผลที่แม่นยำและเสมือนจริงมากกว่า [22]



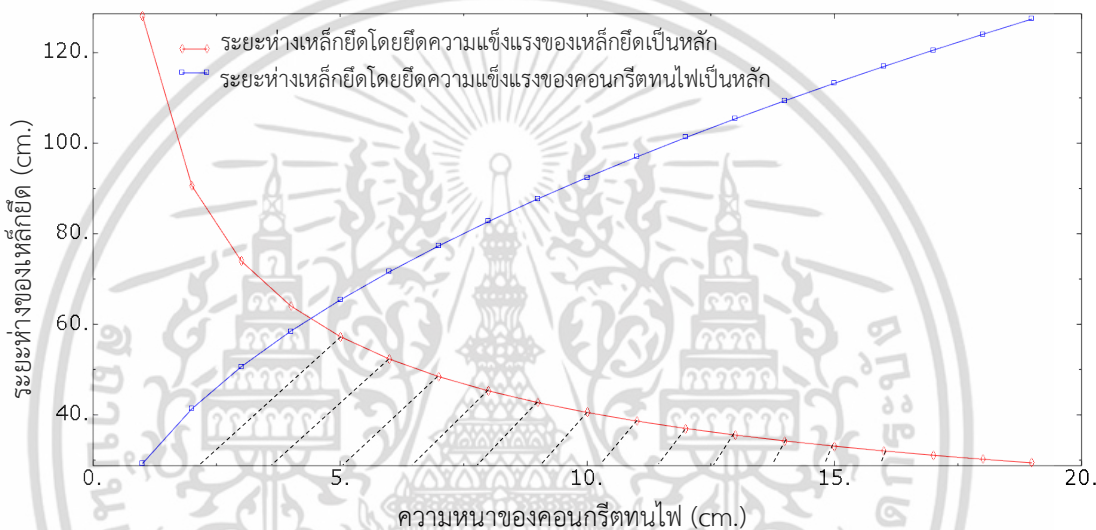
รูปที่ 5.51 เปรียบเทียบผลของความเค้นวอนมิสเสสของเหล็กยึด (ก) พฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นพันธะแบบยึดแน่นถาวร (ข) พฤติกรรมทางกลแบบไม่เชิงเส้นพันธะแบบสลิ้นไถล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

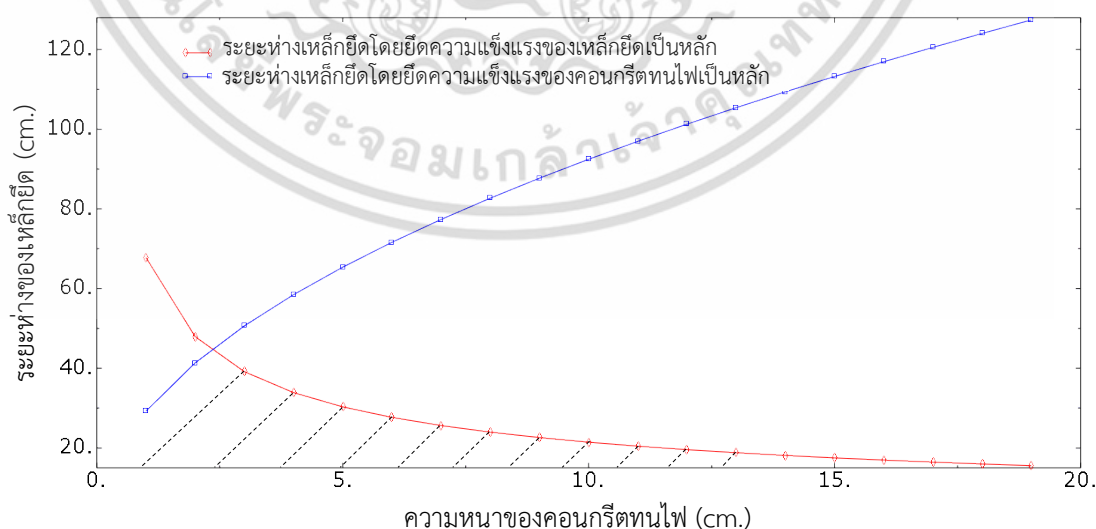
5.7 ผลของการศึกษาการหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยการคำนวณ

การหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดมีความซับซ้อนมากเพราะมีจำนวนของปัจจัยที่เกี่ยวข้องมาก เช่น อุณหภูมิทำงานของวัสดุทนไฟ คุณสมบัติของวัสดุทนไฟ เงื่อนไขขอบเขต เป็นต้น ดังนั้นการหาระยะห่างเหล็กยึดจึงเป็นค่าโดยประมาณ โดยที่สมมุติเงื่อนไขอย่างเข้มงวด ผลลัพธ์การคำนวณถูกนำเสนอในลักษณะกราฟทั้งเหล็กยึดชนิดแผ่นและกลม

ผลลัพธ์การคำนวณของเหล็กยึดชนิดแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 5.52 กราฟช่วงที่อนุญาตของระยะเหล็กยึดแสดงไว้ในพื้นที่แรงเงาล้อมรอบด้วยเส้นโค้ง หากนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองที่มีความหนาของคอนกรีตทนไฟ 17 cm มีค่าระยะห่างระหว่างเหล็กยึด 31 cm ทั้งนี้ ระยะห่างเหล็กยึดที่ติดตั้งใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีระยะห่าง 12 cm



รูปที่ 5.52 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของคอนกรีตทนไฟและระยะห่างของเหล็กยึดชนิดแผ่น



รูปที่ 5.53 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของคอนกรีตทนไฟและระยะห่างของเหล็กยึดชนิดกลม

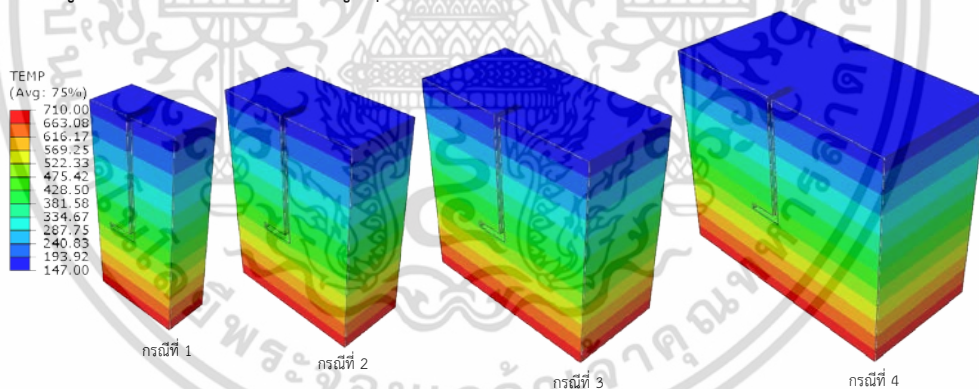
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์การคำนวณของเหล็กยึดชนิดกลม ดังแสดงในรูปที่ 5.53 กราฟช่วงที่อนุญาตของระยะเหล็กยึดแสดงไว้ในพื้นที่แรงเงาล้อมรอบด้วยเส้นโค้ง หากนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองที่ความหนาของคอนกรีตหนาไฟ 17 cm มีค่าระยะห่างระหว่างเหล็กยึด 16.5 cm

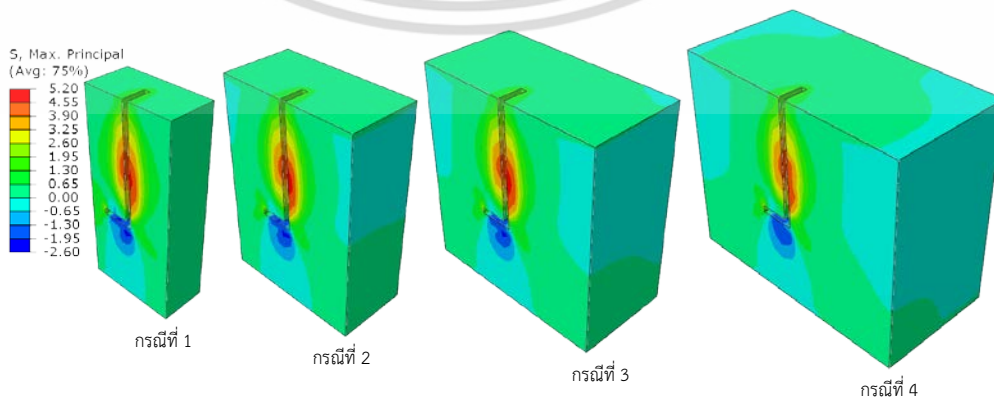
ระยะห่างระหว่างเหล็กยึดเชิงทฤษฎีได้มาจากกำหนดเงื่อนไขพื้นฐาน แต่บางเงื่อนไขที่ไม่สามารถนำมาพิจารณาในการคำนวณได้ และต้องอาศัยประสบการณ์ที่ผ่านมามาบนพื้นฐานของปัจจัยดังกล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้น ความแตกต่างระหว่างระยะเชิงทฤษฎีและระยะที่แท้จริงจึงต้องคำนึงจากหลายๆ ปัจจัยด้วยกัน

5.8 ผลของการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ความเค้นในเหล็กยึดต่อปริมาตรของคอนกรีตหนาไฟ คือ ปัจจัยสำหรับวิเคราะห์หาแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความเค้นในเหล็กยึดภายใต้ภาระทางความร้อนเป็นสำคัญ เพื่อเป็นเกณฑ์กำหนดระยะห่างเหล็กยึด ในกรณีนี้ ทั้งผลการกระจายอุณหภูมิของคอนกรีตหนาไฟ มีค่าในช่วง 147 ถึง 710 °C ดังแสดงในรูปที่ 5.54 และผลความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตหนาไฟมีค่าใกล้เคียงกัน ณ จุดสัมผัสกันระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีตหนาไฟ ความเค้นกระจายตัวเป็นไปในลักษณะเดียวกัน แต่ความเข้มข้นของความเค้นเบาบางลงตามปริมาตรที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.55 คอนกรีตหนาไฟอยู่ภายใต้ภาวะความเค้นดึงเกือบทั้งหมดมีค่าสูงสุดประมาณ 5.20 MPa เนื่องจากเหล็กยึดขยายตัวได้มากกว่าคอนกรีตหนาไฟจึงไปดึงให้คอนกรีตหนาไฟยึดตัวตาม และผลักดันให้คอนกรีตหนาไฟเหนือเหล็กยึดขึ้นไปอยู่ภายใต้ความเค้นอัดมีค่าสูงสุดประมาณ 2.60 MPa



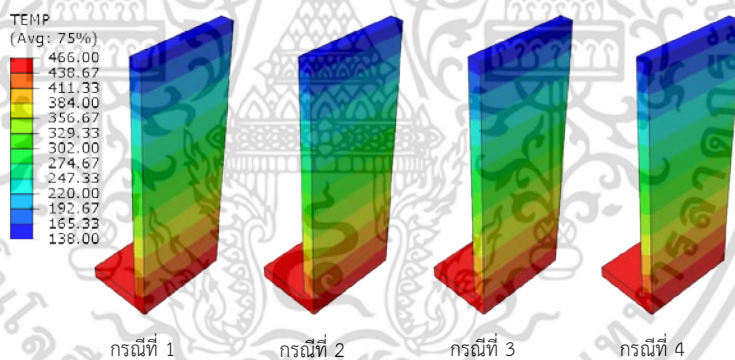
รูปที่ 5.54 ผลของการกระจายอุณหภูมิของคอนกรีตหนาไฟทั้ง 4 กรณี



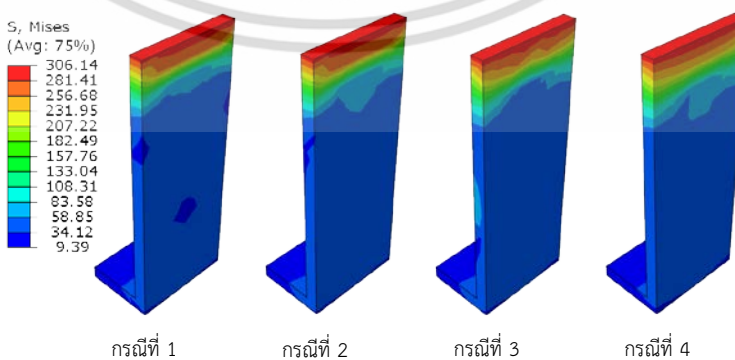
รูปที่ 5.55 ผลการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของคอนกรีตหนาไฟทั้ง 4 กรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนเหล็กยึด ทั้งการกระจายอุณหภูมิมีค่าอยู่ในช่วง 138 ถึง 466 °C ซึ่งทั้งหมดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.56 และการกระจายความเค้นวอนมิสเชส ดังแสดงในรูปที่ 5.57 ปรากฏว่าเกิดความเค้นสูงสุดที่บริเวณโคนเหล็กยึด เพราะว่าพฤติกรรมการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของซีคเตอร์ริงมีแนวโน้มที่จะดึงออกจากคอนกรีตทนไฟ ทำให้เกิดภาระต่อเหล็กยึด เมื่อเพิ่มระยะห่างเหล็กยึด โดยการขยายปริมาตรเฉพาะด้านกว้างและด้านยาว ตามกรณีที่ 1, 2, 3 และ 4 ส่งผลให้ภาระที่เหล็กยึดเพิ่มตามด้วย ซึ่งบริเวณดังกล่าวมีค่าความเค้น 294.92, 294.95, 295.34 และ 303.57 MPa ตามลำดับ ที่อุณหภูมิประมาณ 146 °C โดยที่ผลทดสอบแรงดึงสแตนเลส เกรด SUS310S ที่อุณหภูมิดังกล่าว มีความเค้นจุดคราก และความเค้นดึงสูงสุด มีค่า 270.72 และ 554.94 MPa ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มเกิดความเค้นสูงขึ้นตามการขยายปริมาตรและเกินค่าความเค้นจุดครากทั้งหมด แต่ไม่เกินค่าความเค้นดึงสูงสุด หากพิจารณาว่าบริเวณดังกล่าวถูกเชื่อมติดกับซีคเตอร์ริงจำเป็นต้องเลื่อนจุดพิจารณาขึ้นมา 10 mm จากโคนเหล็กยึดเพื่อหลีกเลี่ยงรอยเชื่อม กรณีที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าความเค้น 135.45, 150.13, 163.78 และ 190.62 MPa ตามลำดับ ที่อุณหภูมิประมาณ 198 °C โดยที่ผลทดสอบแรงดึงสแตนเลส เกรด SUS310S ที่อุณหภูมิดังกล่าว มีความเค้นจุดคราก และความเค้นดึงสูงสุด มีค่า 255.72 และ 535.27 MPa ตามลำดับ โดยแนวโน้มเกิดความเค้นยังคงเดิม แต่ทั้งหมดไม่เกินความเค้นจุดคราก ค่าเหล่านี้ถูกนำเสนอแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นวอนมิสเชสและระยะห่างเหล็กยึด ดังแสดงในรูปที่ 5.58 ปรากฏว่าความเค้นเพิ่มขึ้นตามระยะห่างเหล็กยึดอย่างต่อเนื่อง

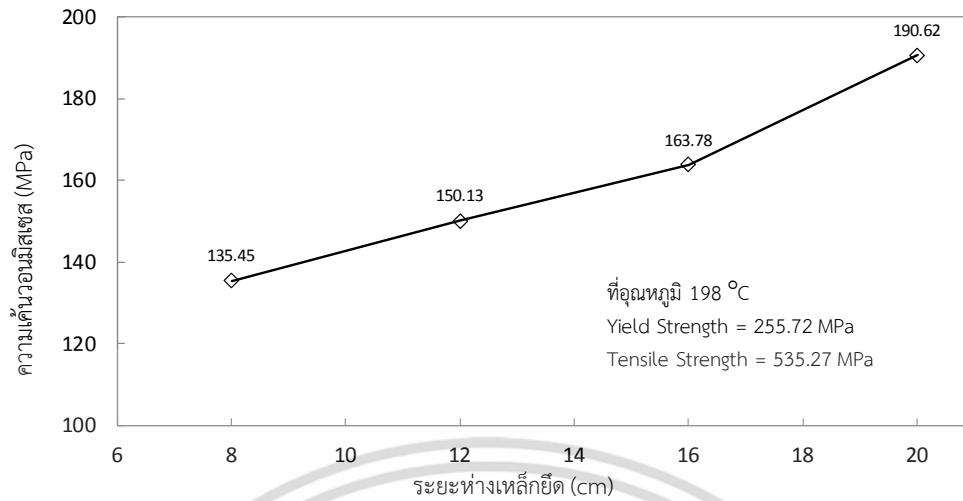


รูปที่ 5.56 ผลของการกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึดทั้ง 4 กรณี



รูปที่ 5.57 ผลของการกระจายความเค้นวอนมิสเชสของเหล็กยึดทั้ง 4 กรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.58 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นวอนนิสเซสและระยะห่างเหล็กยึด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ที่ให้อำนาจถึงแนวทางการออกแบบส่วนโครงสร้างโดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สร้างแบบจำลองสร้างโครงสร้าง เพื่อเป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลเนื่องจากความร้อน ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตโครงสร้างแบบคอนกรีตทนไฟหล่อสำเร็จ รายละเอียดการวิเคราะห์ประกอบด้วย

การวิเคราะห์การกระจายความเค้นหลักสูงสุดเนื่องจากความร้อนในโครงสร้างโครงสร้าง โดยคำนึงถึงปัจจัยจากจำนวนและชนิดเหล็กยึด กำหนดให้คุณสมบัติของวัสดุทั้งหมดเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ พฤติกรรมทางกลคอนกรีตทนไฟแบบเชิงเส้น และพันธะระหว่างคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดเป็นแบบยึดแน่นถาวร ผลของการจำลองสามารถวิเคราะห์ความเค้นหลักสูงสุดที่มีผลกระทบต่อคอนกรีตทนไฟและวิเคราะห์ความเค้นวอนมีเสกซ์ที่มีผลกระทบต่อเหล็กยึด ส่วนการวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างเหล็กยึด โดยคำนึงถึงปัจจัยจากการขยายปริมาตรคอนกรีตทนไฟ (ระยะห่างมากขึ้น) กำหนดให้คุณสมบัติของวัสดุทั้งหมดเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ พฤติกรรมทางกลคอนกรีตทนไฟแบบไม่เชิงเส้น พันธะระหว่างผิวคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดเป็นแบบลื่นไถล ผลของการจำลองสามารถนำมาวิเคราะห์ความเค้นวอนมีเสกซ์ของเหล็กยึดต่อการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างเหล็กยึด

6.1 สรุปผลการวิจัย

บนพื้นฐานการวิเคราะห์ผลลัพธ์จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกดำเนินการสำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัย ดังต่อไปนี้

1) หม้อเผาปูนซีเมนต์มีจำนวนโครงสร้างทั้งหมด 36 ชั้น การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยแบบจำลองตามจำนวนดังกล่าวนี้เป็นไปได้ยาก แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยหลักการสมมาตรแบบไซคลิก สามารถวิเคราะห์โครงสร้างเพียงชั้นเดียวได้ โดยอาศัยโปรแกรม ABAQUS สร้างแบบจำลอง 3 มิติ เท่ากับขนาดจริง ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วน คอนกรีตทนไฟ เหล็กยึด และเซ็คเตอร์ริงกับเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ กำหนดให้ชิ้นส่วนเป็นวัสดุ คอนกรีตทนไฟ สแตนเลส และเหล็กกล้าคาร์บอน ตามลำดับ ซึ่งคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางกลของวัสดุเหล่านี้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ การสัมผัสกันระหว่างวัสดุเป็นแบบยึดแน่นถาวร เงื่อนไขขอบเขตการกระจัดกำหนดที่เปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ตามแนวเส้นรอบวง การหมุนตามแกนและแนวรัศมีมีค่าเท่ากับศูนย์ ภาวะทางความร้อนกำหนดที่ผิวคอนกรีตทนไฟ และถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศที่เปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ รูปทรงเอลิเมนต์ถูกประยุกต์ใช้กับแบบจำลอง 2 ชนิด คือ เอลิเมนต์ชนิดจตุรมุขหรือปิรามิด 4 โหนด ถูกใช้กับแบบจำลองคอนกรีตทนไฟ เพราะว่ามีรูปร่างที่ซับซ้อน และเอลิเมนต์ชนิดลิ้ม 6 โหนด ถูกใช้กับแบบจำลอง เหล็กยึด เซ็คเตอร์ริง และเปลือกหม้อเผา การวิเคราะห์ให้ผลลัพธ์เข้าสู่ตามความละเอียดของเอลิเมนต์

2) การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านคอนกรีตทนไฟมีอัตราที่ต่ำ เนื่องจากคุณสมบัติการนำความร้อนมีค่าต่ำ และความลาดชันของอุณหภูมิมาก ดังนั้น อุณหภูมิคอนกรีตทนไฟระหว่างผิวด้านร้อนและผิวด้านเย็นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงมาก โดยเฉพาะตรงบริเวณมุมของโครงสร้าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังส่งผลให้เหล็กยึดในคอนกรีตทนไฟอยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวด้วย อย่างไรก็ตาม คอนกรีตทนไฟสามารถรักษาอุณหภูมิทำงานให้มีอุณหภูมิสูงและป้องกันเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์จากอุณหภูมิสูงได้ ตลอดจนเหล็กยึดในคอนกรีตทนไฟสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นได้

3) การกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อคอนกรีตทนไฟเพิ่มขึ้นตามจำนวนเหล็กยึด จำนวนเหล็กยึดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดความเค้นมากขึ้นตาม เนื่องจากพฤติกรรมการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กยึดมีมากกว่าคอนกรีตทนไฟจึงทำให้เหล็กยึดดึงให้คอนกรีตทนไฟยึดตัวตามจนในที่สุดทำให้คอนกรีตทนไฟอยู่ภายใต้ความเค้นดึง ความเค้นดังกล่าวมีค่าสูงมากที่ผิวสัมผัสกันระหว่างเหล็กยึดและคอนกรีตทนไฟ จำนวนเหล็กยึดเพิ่มขึ้นย่อมทำให้พื้นที่สัมผัสมากขึ้นตาม ซึ่งจะทำให้ความเค้นในเนื้อคอนกรีตทนไฟสูงขึ้นและปริมาตรที่เกิดความเค้นจะขยายวงกว้างมากขึ้น พร้อมกับเซ็คเตอร์ริงมีแนวโน้มดึงออกจากผิวด้านยื่นคอนกรีตทนไฟตามจำนวนเหล็กยึดที่เพิ่มขึ้น อาจทำให้เหลือช่องว่างระหว่างเซ็คเตอร์ริงและคอนกรีตทนไฟ การขยายตัวของเซ็คเตอร์ริงสามารถสร้างความเค้นดึงในแนวเส้นรอบวงในเนื้อคอนกรีตทนไฟ ซึ่งอาจทำให้กรีตทนไฟเกิดการแตกในแนวรัศมีได้ แม้ว่าความเค้นในเนื้อคอนกรีตทนไฟเพิ่มขึ้นตามจำนวนเหล็กยึด แต่หากมีจำนวนเหล็กยึดน้อยจะส่งผลให้คอนกรีตทนไฟโก่งตัวได้ง่าย เนื่องจากระดับความเค้นในแนวเส้นรอบวงมีการเปลี่ยนแปลงมาก

4) การกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อคอนกรีตทนไฟเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดเหล็กยึด ในบรรดาเหล็กยึดทั้ง 3 ชนิด เหล็กแผ่นตัว Y ส่งผลในเนื้อคอนกรีตทนไฟมีระดับความเค้นดึงมากที่สุด เนื่องจากรูปทรงเหล็กยึดในช่วงจากทางแยกตัว Y จนถึงปลายเหล็กยึดเกิดการขยายตัวตามความยาวได้มากและดึงให้คอนกรีตทนไฟยึดตัวมากตาม ในขณะที่ปลายเหล็กยึดทั้งสองขยายตัวแยกออกจากกันและดึงให้คอนกรีตทนไฟเหนือเหล็กยึดขึ้นไปยึดตัวตามอีกหนึ่งทาง พฤติกรรมการขยายตัวของปลายเหล็กยึดทั้งสองทำให้ผิวด้านร้อนคอนกรีตทนไฟอยู่ภายใต้ความเค้นดึง โดยเฉพาะมุมโนสริงมีค่าสูงสุด ถัดไป เหล็กแผ่นตัว L ส่งผลให้ในเนื้อคอนกรีตทนไฟมีระดับความเค้นดึงปานกลาง เนื่องจากรูปทรงเหล็กยึดในช่วงจากหักมุม 90 องศา จนถึงปลายเหล็กยึดเกิดการขยายตัวตามความยาวได้น้อยและดึงให้คอนกรีตทนไฟยึดตัวตามได้น้อย พฤติกรรมการขยายตัวปลายเหล็กยึดผลักให้ผิวด้านร้อนคอนกรีตทนไฟอยู่ภายใต้ความเค้นอัด และสุดท้าย เหล็กกลม Y ส่งผลให้ในเนื้อคอนกรีตทนไฟมีระดับความเค้นดึงน้อยที่สุด เนื่องจากเหล็กยึดมีขนาดเล็กและพื้นที่ผิวสัมผัสกับคอนกรีตทนไฟน้อยที่สุดจึงดึงให้คอนกรีตทนไฟยึดตัวได้น้อย ทั้งนี้ เหล็กยึดทั้งหมดอยู่ภายใต้ความเค้นอัดเป็นส่วนใหญ่

5) การกระจายความเค้นวอนมีสเซอร์ของเหล็กยึด ในบรรดาเหล็กยึดทั้ง 3 ชนิด เหล็กกลมตัว Y มีค่าความเค้นมากที่สุด โดยมีค่าความเค้นสูงสุดบริเวณที่เหล็กยึดถูกตัดเปลี่ยนรูปร่าง เพราะเกิดความหนาแน่นของความเค้นจากการเปลี่ยนรูปทรงของเหล็กยึด ประกอบกับเหล็กยึดขยายตัวเนื่องจากความร้อน แต่เหล็กยึดถูกจำกัดการขยายตัวโดยคอนกรีตทนไฟทำให้บริเวณดังกล่าวมีค่าความเค้นสูง ถัดไป เหล็กแผ่นตัว Y มีค่าความเค้นปานกลาง โดยมีค่าความเค้นสูงสุดบริเวณทางแยกตัว Y เพราะว่าบริเวณดังกล่าวถูกตัดขาดจากกันแต่ยังคงสัมผัสกันอยู่ เมื่อเหล็กยึดขยายตัวเนื่องจากความร้อนทำให้บริเวณดังกล่าวขยายตัวอัดกันจนมีค่าความเค้นสูง และสุดท้าย เหล็กยึดแผ่นตัว L มีค่าความเค้นน้อยที่สุด โดยมีค่าความเค้นสูงสุดบริเวณโคนเหล็กยึด เพราะว่าเหล็กยึดขยายตัวเนื่องจากความร้อน แต่เหล็กยึดถูกจำกัดการขยายตัวโดยคอนกรีตทนไฟ ทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดแรงกระทำต่อพื้นเซ็คเตอร์ริงจึงมีค่าความเค้นสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) การหาระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยการคำนวณ ทั้งเหล็กยึดชนิดแผ่นและชนิดกลม โดยยึดผลระยะห่างจากความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของเหล็กยึดและน้ำหนักของคอนกรีตทนไฟที่รองรับเป็นหลัก โดยเหล็กยึดชนิดแผ่นให้ผลคำนวณระยะห่าง 31 เซนติเมตร หากนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้กับส่วนของโนสริง เหล็กยึดจะต้องมีจำนวนอย่างน้อย 10 อัน ตามแบบจำลองกรณีที่ 1 และ 6 ส่วนเหล็กยึดชนิดกลมให้ผลคำนวณระยะห่าง 16.5 เซนติเมตร หากนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้กับส่วนของโนสริง เหล็กยึดจะต้องมีจำนวนอย่างน้อย 15 อัน ตามแบบจำลองกรณีที่ 5 อย่างไรก็ตาม ระยะห่างระหว่างเหล็กยึดเชิงทฤษฎีได้มาจากกำหนดเงื่อนไขพื้นฐาน แต่บางเงื่อนไขที่ไม่สามารถนำมาพิจารณาในการคำนวณได้

7) ผลของระยะห่างระหว่างเหล็กยึดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยยึดความแข็งแรงของเหล็กยึดเป็นหลัก ระยะห่างเหล็กยึดถูกกำหนดด้วยการขยายปริมาตรคอนกรีตทนไฟเฉพาะด้านกว้างและด้านยาวอย่างละเท่ากัน ผลค่าความเค้นวอนมิสเชสเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณโคนเหล็กยึดเนื่องจากพฤติกรรมการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเซ็คเตอร์ริงมีแนวโน้มที่จะดึงออกจากคอนกรีตทนไฟทำให้เกิดภาระต่อเหล็กยึด ความเค้นเพิ่มขึ้นตามระยะห่างเหล็กยึดและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยในอนาคตควรให้ความสำคัญ ดังต่อไปนี้

1) คุณสมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตทนไฟที่ระดับอุณหภูมิสูง โดยเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ข้อมูลที่มีอยู่ยังไม่เพียงพอสำหรับสภาวะอุณหภูมิทำงาน ต้องอาศัยวิธีการประมาณค่าแบบนอกช่วง แต่ไม่สามารถใช้กับพฤติกรรมวัสดุแบบไม่เชิงเส้นได้ ดังนั้น เพื่อการทำนายที่แม่นยำของพฤติกรรมโลนนิ่งทนไฟ คุณสมบัติทางกลเนื่องจากความร้อนโดยการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิสูงมีความสำคัญ

2) การกระจายความเค้นในเนื้อคอนกรีตทนไฟมีค่าสูงมาก เนื่องจากพฤติกรรมทางกลของการสัมผัสระหว่างผิวคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดเป็นแบบยึดแน่นถาวร ซึ่งมีค่าความเค้นเฉือนระหว่างผิวมาก ดังนั้น เพื่อการทำนายที่แม่นยำของพฤติกรรมโลนนิ่งทนไฟ จึงควรกำหนดพฤติกรรมทางกลของการสัมผัสระหว่างผิวคอนกรีตทนไฟและเหล็กยึดเป็นแบบสลิ้นไถลจะมีความเหมาะสมกว่า

3) การปฏิบัติการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิสูงเท่ากับอุณหภูมิทำงานจริงไม่สามารถดำเนินการได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านคุณสมบัติของเครื่องมือวัด โดยเฉพาะสเตรนเกจ อย่างไรก็ตาม การทดลองถูกดำเนินการที่ระดับอุณหภูมิต่ำลงมาและให้ผลการทดลองสอดคล้องกับการจำลองอย่างดี ทว่าการจำลองถูกดำเนินการแบบสภาวะคงตัว ไม่สามารถนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองตลอดช่วงกระบวนการได้ ดังนั้น การจำลองแบบสภาวะไม่คงตัวจึงมีความสำคัญ และสร้างความน่าเชื่อถือได้มากกว่า

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
- [5] 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [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.* Vol 33 : Pp. 673-682 NRC Canada 2006



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANNOUNCEMENT AND CALL FOR PAPERS



ME-NETT

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 25

19-21 ตุลาคม 2553

ประเทศไทยครั้งที่ 25

ณ อ่าวนาง วิลล่า รีสอร์ท จ.กระบี่

25

Think GReeN

AME	Aerospace and Marine Engineering
AMM	Applied Mechanics, Materials and Manufacturing
CST	Computation and Simulation Technique
DRC	Dynamic System, Robotics and Control
ETM	Energy Technology and Management
TSF	Thermal System and Fluid Mechanics
AEC	Alternative Energy and Combustion
BME	Biomechanics and Fields Related to Mechanical Engineering

www.menett25.eng.ku.ac.th

E-mail : menett25@ku.ac.th

ส่งบทความออนไลน์
1-30 เมษายน 2554

ประกาศรายชื่อบทความที่ผ่านการพิจารณา	: 16 พฤษภาคม 2554
วันสุดท้ายของการส่งบทความฉบับเต็ม	: 30 มิถุนายน 2554
แจ้งผลการพิจารณาบทความฉบับเต็ม	: 31 สิงหาคม 2554
ลงทะเบียนล่วงหน้า	: 16 กรกฎาคม - 16 กันยายน 2554
วันสุดท้ายของการส่งบทความฉบับสมบูรณ์	: 16 กันยายน 2554
วันนำเสนอบทความ	: 19 - 21 ตุลาคม 2554

สอบถามรายละเอียดได้ที่ : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
50 ถ. พหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กทม. 10900
Tel 02-942-8555 Ext. 1803,1804 Fax. 02-579-4576



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ME-NETT 25

The 25th Conference of the Mechanical
Engineering Network of Thailand

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25

19 – 21 ตุลาคม 2554

[ENTER]

โดย



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ร่วมกับ



สมาคมวิศวกรรมเครื่องกลไทย

ณ โรงแรมอ่าวนาง วิลลา รีสอร์ท
จังหวัดกระบี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน้าหลัก

สาขาทดความ

คำย่อ	ชื่อสาขา
AEC	Alternative Energy and Combustion
AME	Aerospace and Marine Engineering
AMM	Applied Mechanics, Materials and Manufacturing
BME	Biomechanics
CST	Computation and Simulation Techniques
DRC	Dynamic Systems, Robotics and Control
ETM	Energy Technology and Management
TSE	Thermal Systems and Fluid Mechanics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการกระจายความเค้นในโครงสร้างโนสริงของหม้อเผาปูนซีเมนต์ แบบหมุนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Study of Stress Distribution in Rotary Cement Kiln Nose Ring Structures by Finite Element Method

อภิเดช จันทพันธ์^{1*} และ มนต์ศักดิ์ พิมสาร²

^{1,2}สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

E-mail: janthaphan@live.com โทรศัพท์: 66814419402

บทคัดย่อ

วัสดุทนไฟถูกนำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อนของหม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน โดยที่วัสดุทนไฟจะถูกหล่อติดกับเหล็กยึดที่เชื่อมติดกับแผ่นเหล็กที่ยึดไว้กับเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ ในขณะที่หม้อเผาปูนซีเมนต์ถูกใช้งานวัสดุตั้งกล่าวอยู่ภายใต้ภาระทางความร้อนเป็นสำคัญ ทำให้เกิดความเค้นจากความร้อน บทความนี้นำเสนอการศึกษาการกระจายความเค้นจากความร้อนของโครงสร้างโนสริงหม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน และศึกษาผลของจำนวนของเหล็กยึดต่อความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อวัสดุทนไฟ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลจากการศึกษาพบว่าค่าความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อวัสดุทนไฟจะมีค่าเป็นแรงดึง และมีค่าสูงมากในบริเวณที่สัมผัสกับเหล็กยึดชนิด A และเมื่อเพิ่มจำนวนเหล็กยึดมากขึ้น จะทำให้ความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อวัสดุทนไฟมีแนวโน้มสูงขึ้น และปริมาตรที่เกิดความเค้นสูงจะขยายวงกว้างมากขึ้น ทั้งนี้ เพราะเหล็กมีการขยายตัวที่ดีกว่าวัสดุทนไฟ จึงทำให้เหล็กไปดึงให้วัสดุทนไฟยึดตัวตาม ส่วนความเค้นหลักสูงสุดในเหล็กยึดเป็นความเค้นอัด

คำหลัก: วัสดุทนไฟ, เหล็กยึด, หม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Refractory materials are employed as an insulation material in a rotary cement kiln. In order to line the refractory materials to the kiln shell, the anchors, welded to the kiln shell, are employed to hold the refractory materials. While the rotary cement kiln is in operation, these materials are subjected to significant thermal load, leading to thermal stress. This paper presents the study of the thermal stress distribution in the rotary cement kiln nose ring structures and effect of the number of anchors on the maximum principal stress in the refractory materials by finite element method (FEM). The results show that the maximum principal stress in the refractory materials is tensile and its value is very high at the area in contact with the type A anchor. When employing more anchors, the maximum principal stress in the refractory material was increased and the high stress region was also expanded. This is due to the thermal expansion mismatch between the steel and the refractory materials. Moreover, the maximum principal stress in the steel was compressive.

Keywords: Refractory, Anchor, Rotary cement kiln, Finite element method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

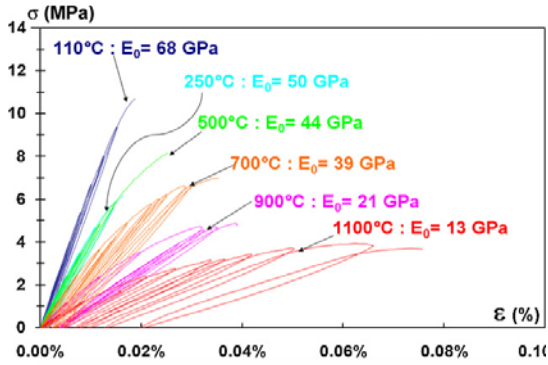
1. บทนำ

อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญอุตสาหกรรมหนึ่งของประเทศ สามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมการก่อสร้างและอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ หม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน (Rotary Cement Kiln) เป็นอุปกรณ์สำคัญในการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงเพื่อสร้างความร้อนให้แก่วัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal) ให้ได้อุณหภูมิประมาณ 1,200 - 1,400°C จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีตามลำดับ จนในที่สุดวัตถุดิบสำเร็จกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker) ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการทำให้ปูนเม็ดเย็นลงต่อไป ในการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบสำเร็จนั้นจะเป็นการให้ความร้อนโดยตรงจากเปลวไฟของหัวเผา เพื่อป้องกันความร้อนจากกระบวนการผลิตจึงนำระบบไลน์หนึ่งมาใช้ภายในหม้อเผาปูนซีเมนต์ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยวัสดุทนไฟที่มีเหล็กยึด (Anchor) ฝังอยู่ข้างในและเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กที่ยึดกับเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ ในขณะที่หม้อเผาปูนซีเมนต์ถูกใช้งานวัสดุตั้งกล่าวจะอยู่ภายใต้ภาวะทางความร้อนเป็นสิ่งสำคัญ ก่อให้เกิดการขยายตัวจากความร้อนไม่เท่ากันของวัสดุในระบบไลน์หนึ่ง งานวิจัยก่อนหน้านี้มักจะทำให้ความสนใจไปที่ผิวด้านร้อน (Hot Face) โดยมีหลอดการอัดภายใต้ภาวะทางความร้อนและภายใต้เงื่อนไขการยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น จากงานวิจัยโดย Wygant และ Crowley [1] ได้เสนอความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น การหดตัวแบบเชิงเส้น การนำความร้อนที่สม่ำเสมอและโมดูลัสความยืดหยุ่นสำหรับการคำนวณความเค้นสูงสุดของไลน์หนึ่งที่สภาวะแบบคงตัวที่อุณหภูมิทำงานของไลน์หนึ่งของระบบ Fluid Bed Catalytic Unit, (FCU) งานวิจัยต่อมาโดย Chen et al [2] บนพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและในห้องปฏิบัติการเป็นหลักและใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและควบคุมการทดลองเพื่อศึกษาเหล็กยึดมีปฏิกิริยาต่อระบบไลน์หนึ่งที่มีวัสดุทนไฟชั้นเดียวในท่อทรงกระบอก (เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ฟุต) ที่อุณหภูมิ 760°C พบว่าเหล็กยึดส่งผลกระทบต่อไลน์หนึ่ง 2 ทางด้วยกันคือ 1.การลดลงของอุณหภูมิในไลน์

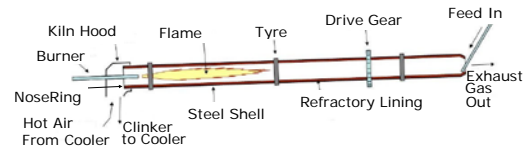
หนึ่งใกล้ผิวด้านร้อนก่อให้เกิดความเค้นดึงในแนวเส้นรอบวงในบริเวณนั้น 2. มีแนวโน้มผลกดันให้วัสดุไลน์หนึ่งออกจากผิวด้านร้อน เนื่องจากการขยายตัวจากความร้อนไม่เท่ากันระหว่างวัสดุไลน์หนึ่งและวัสดุเหล็กยึด การทดลองแสดงให้เห็นว่าเปลือกหม้อด้านร้อน (Hot Shell) มีแนวโน้มที่จะดึงออกจากไลน์หนึ่งทำให้เหลือช่องว่างในเปลือกหม้อด้านร้อนกับเหล็กยึด การขยายตัวของเปลือกหม้อด้านร้อนสามารถสร้างความเค้นดึงในแนวเส้นรอบวงได้สูงในไลน์หนึ่ง ผลทำให้เกิดการแตกในแนวรัศมีได้มาก ผู้วิจัยสรุปว่าเหล็กยึดที่ยืดหยุ่น เช่นการเคลือบดูเหมือนจะดีกว่าแบบแข็งเกร็งของการติดตั้งไลน์หนึ่ง อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยกล่าวว่าเหล็กยึดแบบเรขาคณิตและเหล็กยึดแบบเคลือบดูเหมือนจะไม่ส่งผลกระทบต่อการกระจายความเค้นในแนวเส้นรอบวงเป็นสิ่งสำคัญ งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาทั้งการถ่ายเทความร้อนและความเค้นจากความร้อนร่วมกันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วัตถุประสงค์การศึกษาคือการศึกษาปฏิกิริยาต่อกันระหว่างการกระจายความร้อนและส่งผลกระทบต่อการกระจายความเค้นที่เหล็กยึดและวัสดุทนไฟในสภาวะแบบคงตัวที่อุณหภูมิทำงานสูงสุดนอกจากนั้นจะทำการศึกษาปริมาณเหล็กยึดในแต่ละแถวจะมีผลอย่างไรต่อความเค้นจากความร้อนในวัสดุทนไฟและเหล็กยึด

2. ส่วนประกอบของโครงสร้างโสรังและคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

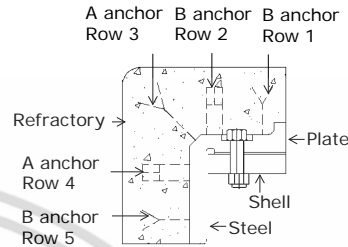
วัสดุทนไฟที่นำมาพิจารณามีชื่อทางการค้าคือ Low Cement Andalusite Castable, (And-LCC) [3] ทำมาจากแร่แอนดาลูไซต์ฟลูมซิลิกา อลูมินา และแคลเซียมอลูมิเนตซีเมนต์ โดยมีองค์ประกอบทางเคมีคือ $Al_2O_3, 58\%$; $SiO_2, 37.5\%$; $CaO, 2.3\%$; $Fe_2O_3, 0.9\%$ ความหนาแน่น 2,600 kg/m³ พฤติกรรมทางกลของการทดสอบแรงดึงหลังจากผ่านการให้ความร้อน โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้องในแต่ละกลุ่มขึ้นทดสอบที่ได้รับการให้ความร้อนมาก่อน อุณหภูมิแตกต่างกันที่ 100, 250, 500, 700, 900 และ 1,100°C ดังแสดงในรูปที่ 1 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1 พฤติกรรมทางกลของวัสดุทนไฟ จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ข้อมูลโดย GhassemiKakroudi [3]



รูปที่ 2 ลักษณะของหม้อเผาปูนซีเมนต์



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของโครงสร้างโนสริง

2.1 ลักษณะของหม้อเผาปูนซีเมนต์ และส่วนประกอบของโครงสร้างโนสริง

หม้อเผาปูนซีเมนต์ที่นำมาเป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เมตรวางเอียงตามแนวนอน 1-4 องศาและหมุนรอบตัวเองอย่างช้าๆในช่วงระหว่าง 30 กับ 250 รอบต่อชั่วโมงเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนความหนา 0.05 เมตร ภายในบุด้วยวัสดุทนไฟมีเหล็กยึดฝังอยู่ข้างใน การทำงานวัตถุประสงค์สำเร็จจะถูกบ้อนเข้าไปตรงที่ส่วนปลายด้านบนของรูปทรงกระบอกดังที่แสดงในรูปที่ 2 ขณะที่หม้อเผาปูนซีเมนต์หมุนวัตถุประสงค์สำเร็จจะค่อยๆเคลื่อนตัวไปทางส่วนปลายด้านล่าง ก๊าซร้อนจะผ่านไปตามหม้อเผาปูนซีเมนต์ในทิศทางตรงกันข้าม (Counter-Current) ก๊าซร้อนอาจจะก่อให้เกิดบริเวณที่มีความร้อนภายในมาก หรืออาจจะก่อให้เกิดเปลวไฟภายในหม้อเผาปูนซีเมนต์ เปลวไฟดังกล่าวถูกพ่นจากท่อหัวเผา ขณะที่วัตถุประสงค์สำเร็จเคลื่อนตัวภายใต้เปลวไฟอุณหภูมิของวัตถุประสงค์สำเร็จขึ้นสูงสุดแล้วเคลื่อนตัวผ่านบริเวณโนสริงดังแสดงในรูปที่ 3 ก่อนที่ตกลงจากหม้อเผาปูนซีเมนต์ไปยังหม้อเย็น (Cooler) ต่อไป

2.2 คุณสมบัติของวัสดุทางกล และทางความร้อน

โครงสร้างโนสริงที่นำมาศึกษานี้ทำมาจาก วัสดุทนไฟ (And-LCC) เหล็กยึดสแตนเลส (310S) และแผ่นเหล็กกับเปลือกหม้อเผาทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน มีคุณสมบัติทางกลและทางความร้อนที่เกี่ยวข้องคือ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุทนไฟสแตนเลส และเหล็กกล้าคาร์บอนข้อมูลจาก [3-6]

วัสดุ	T (°C)	E (GPa)	T (°C)	α (×10 ⁻⁶ .°C ⁻¹)	T (°C)	V
วัสดุทนไฟ	110	68	450	7.6	110	0.15
	250	50	900	7.6	1100	0.23
	500	44				
	700	39				
	900	21				
	1100	13				
สแตนเลส	100	200	100	15.9	20	0.30
	200	185	500	17.1		
	400	170	1000	18.9		
	800	135				
เหล็กกล้าคาร์บอน	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		

*สัญลักษณ์ T, E, α, และ V แทนค่าของ อุณหภูมิ โมดูลัสความยืดหยุ่น สัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนและอัตราส่วนปัวซองตามลำดับ

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน สัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน โมดูลัสความยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซอง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 และ 2

3. การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

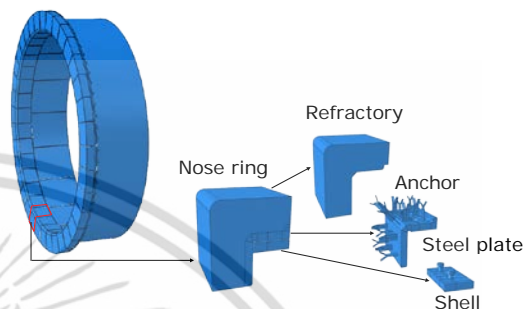
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างโนสริงดังแสดงในรูปที่ 3 ที่อยู่ภายใต้ภาระทางความร้อน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุทนไฟสแตนเลส และเหล็กกล้าคาร์บอนข้อมูลจาก [3-6]

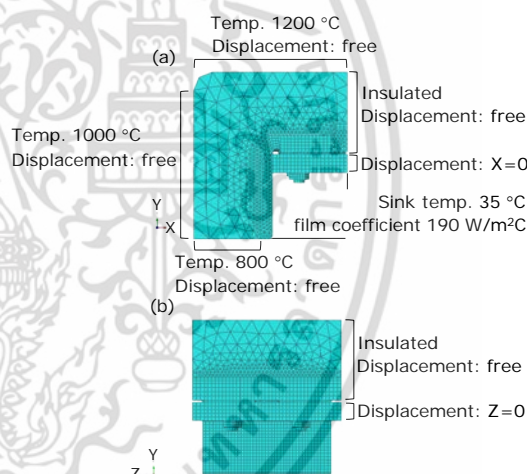
วัสดุ	T (°C)	การนำความร้อน (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)
วัสดุทนไฟ	100	1.30
	600	1.33
	1400	1.65
สแตนเลส	100	13.80
	200	13.95
	400	16.28
	500	18.70
	600	19.77
เหล็กกล้าคาร์บอน	100	47.77
	200	48.11
	300	47.25
	400	45.86
	500	44.48
	600	43.10
	700	41.71

โดยสมมุติฐานของการวิเคราะห์ที่มีดังนี้ 1.ระบบอยู่ในสภาวะคงตัว 2.วัสดุทุกชนิดมีสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันและเป็นไอโซทรอปิก (Isotropic) 3.การสัมผัสของวัสดุเป็นแบบยึดแน่นถาวร (Perfect Bonding) 4. ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's Law) การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและความเค้นถูกดำเนินการด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโครงสร้างโนสริงถูกแบ่งออกเป็น 36 ส่วน แต่อย่างไรก็ตาม จากหลักการสมมาตรแบบไซคลิก (Cyclic Symmetry) แบบจำลอง 1 ส่วนจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งแบบจำลองประกอบด้วยวัสดุทนไฟ เหล็กยึด แผ่นเหล็ก และเปลือกหุ้มเผาปูนซีเมนต์ดังแสดงไว้รูปที่ 4 วัสดุทนไฟมีผิว 2 ส่วนที่สัมผัสกับวัตถุติดสำเร็จโดยตรงได้แก่ผิวในระนาบ X และในระนาบ Y ถูกกำหนดให้มีอุณหภูมิ 1,200°C และ 1,000°C ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีกระแสความร้อนจากหม้อเย็นอุณหภูมิ 800°C สัมผัสกับผิววัสดุทนไฟบริเวณด้านล่าง การ

ถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างและเปลือกหุ้มเผาปูนซีเมนต์จากนั้นออกสู่สภาวะแวดล้อมรอบๆ ที่มีอุณหภูมิ 35°C โดยการพาความร้อนแบบบังคับซึ่งมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อน 190 W/m²·°C⁻¹ ผิวสัมผัสด้านข้างของไลน์หนึ่งถูกกันไว้ด้วยกระดาษแข็งที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4 แบ่งโครงสร้างโนสริงออกเป็น 1 ส่วนและจำแนกชิ้นส่วนประกอบของโนสริง



รูปที่ 5 เงื่อนไขขอบเขตของอุณหภูมิและการกระจัด (a) ระนาบแกน X-Y (b) ระนาบแกน Y-Z

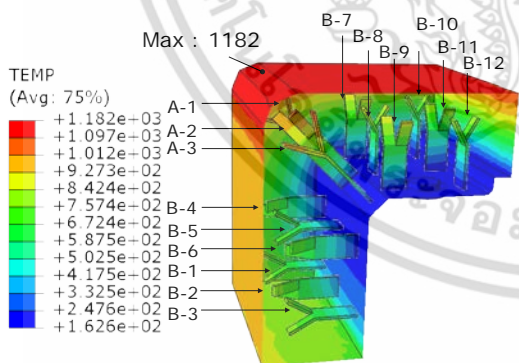
เพื่อยอมให้มีการขยายตัวได้การวิเคราะห์ความเค้นถูกสมมุติให้ด้านข้างของโครงสร้างไม่อยู่ภายใต้แรงจากภายนอกและการกระจัดเป็นอิสระทุกทิศทางเงื่อนไขขอบเขตของอุณหภูมิ และการกระจัดแสดงดังในรูปที่ 5 ชนิดเอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองมี 2 แบบคือ เอลิเมนต์แบบจัตุรมุขหรือปิรามิด (Tetrahedron) 4 โหนด ใช้กับโครงสร้างวัสดุทนไฟ และเอลิเมนต์แบบรูปสามเหลี่ยม (Wedge) 6 โหนด ใช้กับโครงสร้างเหล็กยึด แผ่นเหล็ก และเปลือกหุ้มเผาปูนซีเมนต์ การวิเคราะห์แบ่งตามจำนวนเหล็กยึดเป็น 3 กรณีดังนี้ 1.จำนวนเหล็กยึด

10 อัน (5 แถวๆละ 2 อัน) 2.จำนวนเหล็กยึด 15 อัน (5 แถวๆละ 3 อัน) ซึ่งใช้งานอยู่ในปัจจุบัน 3.จำนวนเหล็กยึด 20 อัน (5 แถวๆละ 4 อัน) โดยแต่ละแบบจำลองมีจำนวนเอลิเมนต์รวม 1,066,527, 1,457,600 และ 2,399,392 ตามลำดับ

4. ผลการวิเคราะห์ และการอภิปรายผล

4.1 ผลการกระจายอุณหภูมิ

ผลการกระจายอุณหภูมิในแบบจำลองทั้ง 3 กรณี ปรากฏว่ามีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยพบว่าวัสดุทนไฟจะเกิดอุณหภูมิสูงสุดตรงบริเวณมุมโนสริง และส่งผลให้เกิดอุณหภูมิสูงสุดที่ปลายเหล็กยึดชนิด A ตรงบริเวณดังกล่าวด้วย ซึ่งมีอุณหภูมิ 1,182°C และ 1,026°C ตามลำดับ การกระจายตัวของอุณหภูมิสังเกตได้จากรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากลุ่มเหล็กยึดชนิด A มีอุณหภูมิสูงกว่ากลุ่มเหล็กยึดชนิด B สังเกตความแตกต่างได้จากรูปที่ 7 และการกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กยึดทั้งหมดจากกราฟในรูปที่ 8 การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างโนสริงไปยังเปลือกหุ้มอเผาปูนซีเมนต์มีอุณหภูมิ 140°C ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดจริง ผลการกระจายอุณหภูมิแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 9 จากตำแหน่ง a ถึง b

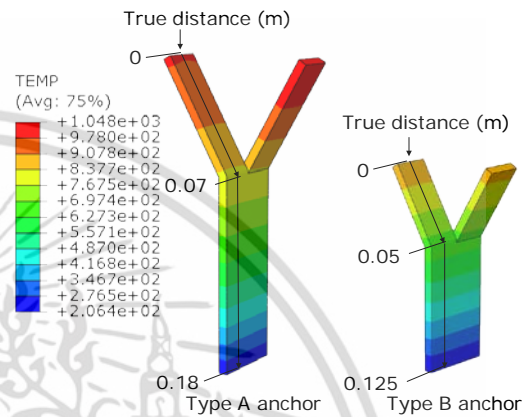


รูปที่ 6 การกระจายอุณหภูมิของวัสดุทนไฟและเหล็กยึด

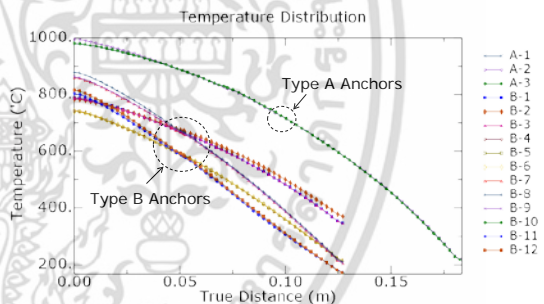
4.2 ผลการกระจายความเค้น

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 กรณี พบว่ามีการกระจายความเค้นที่แตกต่างกัน กล่าวคือ การเพิ่มจำนวนเหล็กยึดส่งผลให้เกิดความเค้นดึงในเนื้อวัสดุทนไฟมากขึ้นซึ่งความเค้นดึงจะเกิดขึ้นรอบๆเนื้อวัสดุทนไฟที่สัมผัสกับเหล็กยึดมีลักษณะแผ่รอบเหล็ก

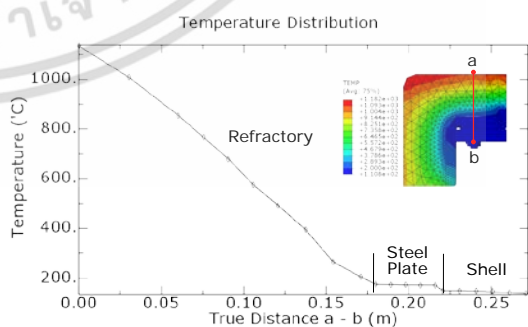
ยึดเมื่อระยะห่างของเหล็กยึดน้อยลง (เพิ่มจำนวนเหล็กยึด) การกระจายความเค้นจะขยายกว้างและต่อเนื่องกันดังแสดงในรูปที่ 10 เพื่อให้ทราบปรากฏการณ์ของความเค้นในเนื้อวัสดุทนไฟตรงบริเวณกลางแถวเหล็กยึดที่ระดับความลึกต่างๆ โดยแบ่งระนาบส่วนตัด ออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ a-a, b-b และ c-c ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึดทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 8 การกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึดทั้งหมดตามแนวเส้นในรูปที่ 7

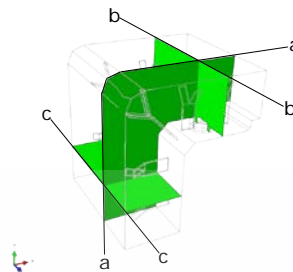


รูปที่ 9 การกระจายอุณหภูมิผ่านโครงสร้างโนสริงจากผิววัสดุทนไฟถึงเปลือกหุ้มเผา ตามเส้น a-b แบบจำลองทั้ง 3 กรณีถูกนำมาเปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุด ที่ระดับผิวด้านร้อน (Hot Face), 30, 60, 90 และ 120 มิลลิเมตร ผลการกระจายความเค้นหลัก

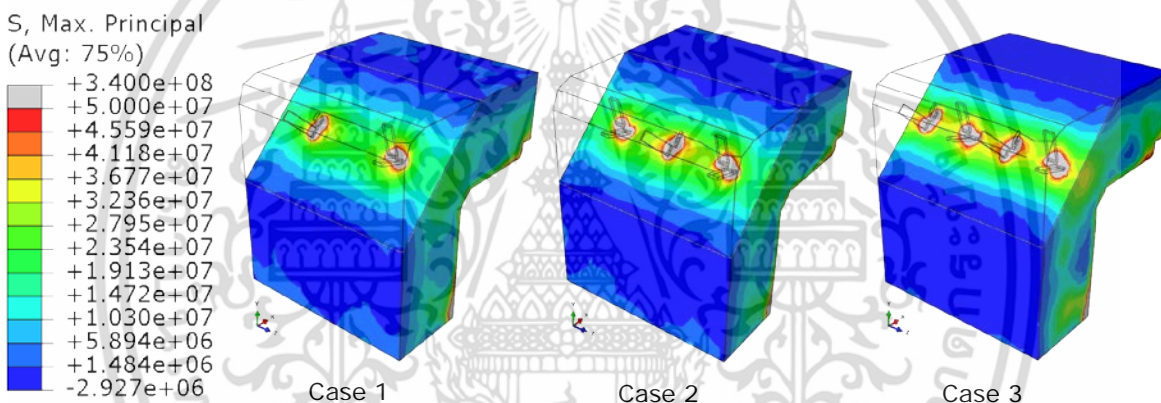
ไม่วารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลงาน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงสุดของส่วนตัด a-a ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่าการกระจายความเค้นมีมากในแบบจำลองกรณีที่ 3 และมีแนวโน้มที่เกิดความเค้นอัดใกล้กับผิวด้านร้อนสูงกว่าทั้งกรณีที่ 1 และ 2 ยกเว้นบริเวณมุมโนสริงที่เกิดความเค้นดึง ดังกราฟในรูปที่ 13 จากนั้นวัสดุทนไฟทั้ง 3 กรณีจะอยู่ภายใต้ความเค้นดึงที่ระดับความลึก 30 มิลลิเมตรดังกราฟในรูปที่ 14 อิทธิพลจากเหล็กยึดปรากฏได้ชัดเจนมากที่ระดับความลึก 60 มิลลิเมตรซึ่งเป็นบริเวณปลายของเหล็กยึดแถวที่ 3 ดังกราฟในรูปที่ 15 ต่อจากนั้นความเค้นจะมีค่าใกล้เคียงกันที่ระดับความลึก 90 มิลลิเมตรดังกราฟในรูปที่ 16 และเกิดความเค้นสูงมากจากอิทธิพลการขยายตัวของแผ่นเหล็กและเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์

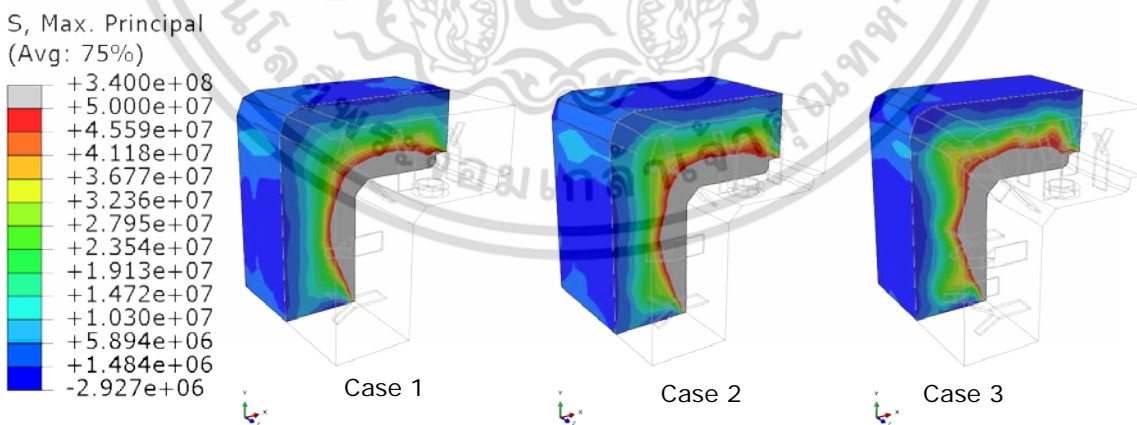
ดังแสดงในรูปที่ 18 พบว่าขนาดความเค้นหลักสูงสุดทั้ง 3 กรณีแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกับผลการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของระนาบส่วนตัด c-c ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 11 แสดงลักษณะส่วนตัด a-a, b-b และ c-c ระหว่างกลางของเหล็กยึด



รูปที่ 10 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อวัสดุทนไฟ ภาพตัดบริเวณมุมโนสริง

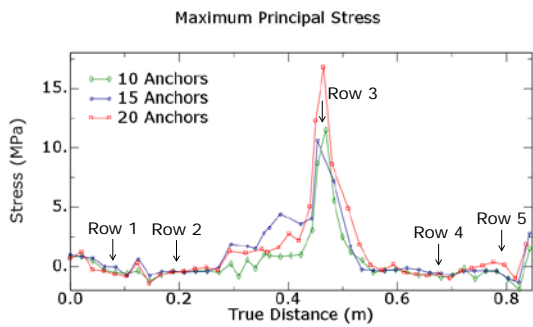


รูปที่ 12 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อวัสดุทนไฟ บนระนาบส่วนตัด a-a

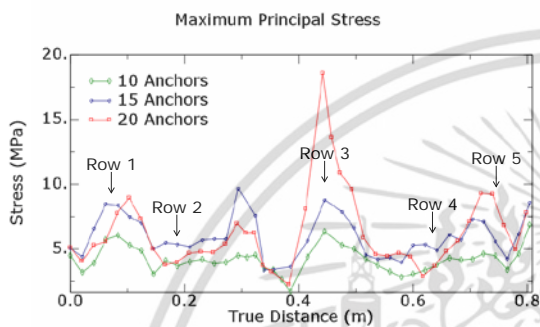
ดังกราฟในรูปที่ 16 จากอิทธิพลการขยายตัวของแผ่นเหล็กและเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ที่ความลึก 120 มิลลิเมตรดังกราฟในรูปที่ 17 ในส่วนของผลการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของระนาบส่วนตัด b-b

อย่างไรก็ตาม การกระจายความเค้นหลักสูงสุดมีแนวโน้มกระจายตัวกว้างขึ้นตามการเพิ่มของจำนวนเหล็กยึดการกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเหล็กยึดสังเกตได้จากรูปที่ 20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งเหล็กยึดชนิด

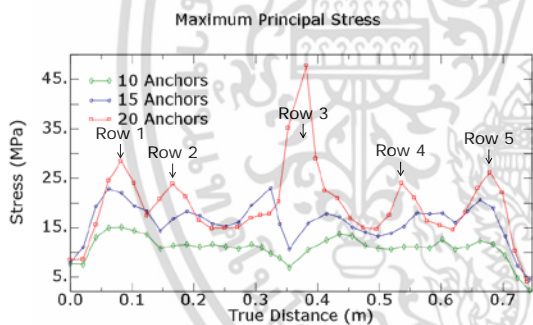
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



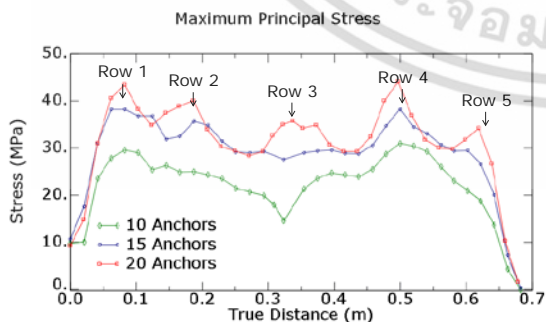
รูปที่ 13 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดของวัสดุ
ทนไฟที่ผิวร้อน (hot face)



รูปที่ 14 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดของวัสดุ
ทนไฟที่ระดับ 30 มิลลิเมตร



รูปที่ 15 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดของวัสดุ
ทนไฟที่ระดับ 60 มิลลิเมตร

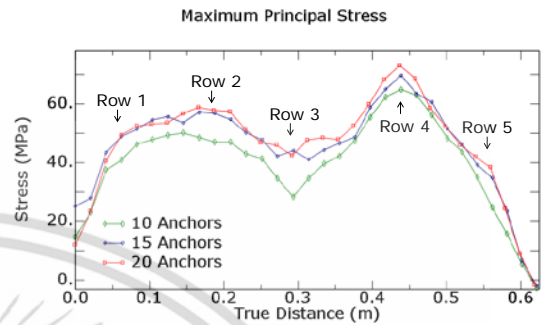


รูปที่ 16 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดของวัสดุ
ทนไฟที่ระดับ 90 มิลลิเมตร

A และ B มีขนาดความเค้นหลักสูงสุดใกล้เคียงกันและ
อยู่ภายใต้ความเค้นอัดเป็นส่วนใหญ่ยกเว้นบริเวณ
ส่วนโคนซึ่งสังเกตได้จากกราฟในรูปที่ 21 และพบว่า

ไม่ว่าการฉนวนใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายความเค้นเกิดขึ้นมากตรงบริเวณส่วนแยก
ของเหล็กยึดเพราะเกิดความหนาแน่นจากการ
เปลี่ยนแปลงรูปร่างของเหล็กยึด แต่อย่างไรก็ตาม
แบบจำลองทั้ง 3 กรณีมีขนาดความเค้นหลักสูงสุด
ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 17 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดของวัสดุ
ทนไฟที่ระดับ 120 มิลลิเมตร

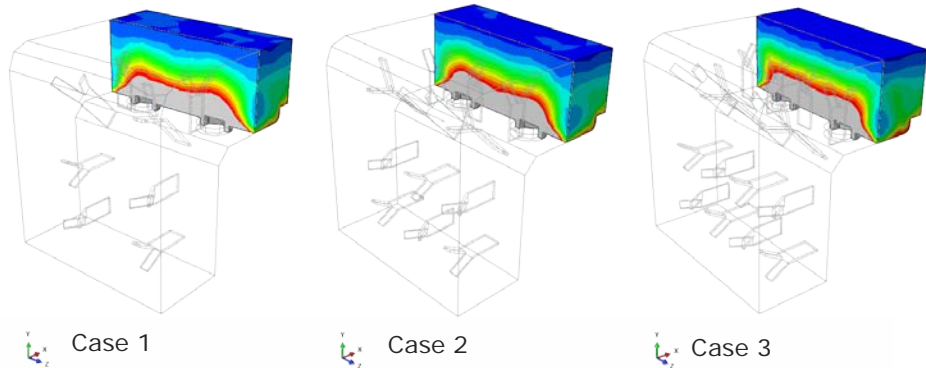
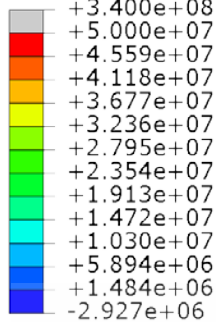
5.สรุป

การหาค่าที่เหมาะสมของการออกแบบจำนวน
เหล็กยึดสำหรับโครงสร้างโนสริงในหม้อเผาปูนซีเมนต์
แบบหมุนเป็นปัญหาที่ทำนายแก่ผู้ออกแบบ ใน
งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพื่อที่จะประเมินผลกระทบ
ของจำนวนเหล็กยึดในวัสดุทนไฟต่อการกระจายความ
ร้อนและความเค้นภายในส่วนประกอบโนสริงหม้อเผา
ปูนซีเมนต์แบบหมุน จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า
การกระจายความเค้นหลักสูงสุดในวัสดุทนไฟจะถูก
ควบคุมด้วยเกรเดียนอุณหภูมิที่ผ่านวัสดุทนไฟ และ
ลักษณะการขยายตัวจากความร้อนของวัสดุทนไฟวัสดุ
เหล็กยึด และวัสดุแผ่นเหล็ก เนื่องจากวัสดุทนไฟมี
สัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนน้อยกว่าเหล็ก
ยึด และแผ่นเหล็ก ทำให้เกิดความเค้นหลักสูงสุด ซึ่ง
เป็นความเค้นดึงกับวัสดุทนไฟที่บริเวณโดยรอบเหล็ก
ยึด และเกิดความเค้นอัดกับเหล็กยึด เมื่อเพิ่มจำนวน
เหล็กยึดมากขึ้นจะทำให้ความเค้นมีแนวโน้มสูงขึ้นและ
การเกิดความเค้นดังกล่าว มีการขยายวงกว้างมากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

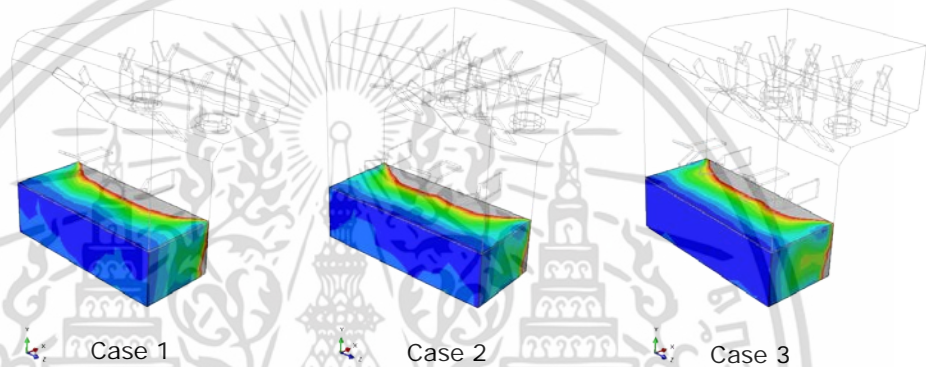
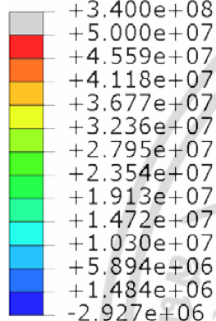
งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท สยาม
วัสดุทนไฟจำกัด ที่เอื้อเพื่อข้อมูลของขนาดโนสริงที่ใช้
ในการทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบ
สมบัติเชิงกลบางส่วนของวัสดุ

S, Max. Principal
(Avg: 75%)

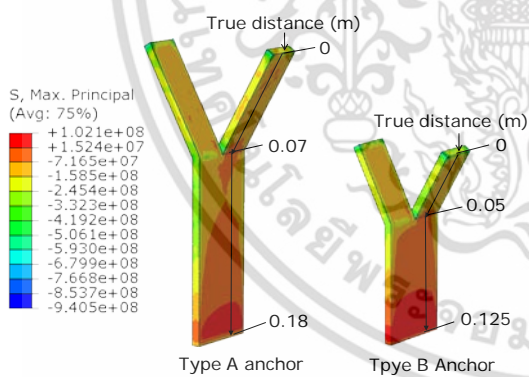


รูปที่ 18 ภาพตัด b-b การกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อวัสดุทนไฟระหว่างกลางแถวที่ 1 กับ 2

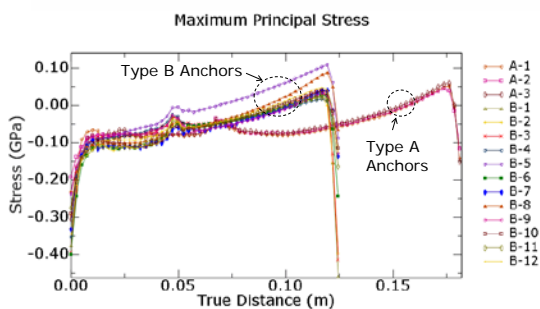
S, Max. Principal
(Avg: 75%)



รูปที่ 19 ภาพส่วนตัด c-c ของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อวัสดุทนไฟระหว่างกลางแถวที่ 4 กับ 5



รูปที่ 20 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดของเหล็กยึดทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 21 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดของเหล็กยึดทั้งหมด ตามแนวเส้นดังในรูปที่ 20

7.เอกสารอ้างอิง

7.1 บทความจากวารสาร(Journal)

[1] J.F.Wygant, M.S.Crowley, 1964 "Design of Monolithic Refractory Lining", A.Cera.Soc.Bull.,43
 [2] E.S.Chen, L.W.Dicks, O.Buyukozturk,1990 "Anchor Lining Interaction in a Hot Shell Refractory Lining", Am.Ceram.Soc.Bull., 69
 [3] Ghassemi-Kakroudi, M.,Huger, M., Gault, C.Chotard, T., 2009"Damage evaluation of two alumina refractory castables ", J.Eur.Cera.Soc.,29

7.2หนังสือ

[4] D.Gandy, 2007"Carbon Steel Handbook"
 [5] Allegheny Ludlum company, 2002 "Technical Data Blue Sheet stainless steel Type 309 310"

7.3 เว็บไซต์

[6] MatWeb.com Database, a Division of Automation Creations,Inc.<http://www.matweb.com>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในเท่านั้น เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นายอภิเดช จันทพันธ์
- ที่อยู่ 25 หมู่ที่ 6 ตำบลป่าระกำ อำเภอปากพนัง นครศรีธรรมราช 80141
โทรศัพท์ 081 441 9402 อีเมล janthaphan@yahoo.com
- ประวัติการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศิลปศาสตรบัณฑิต สาขาวิชารัฐศาสตร์
มหาวิทยาลัยรามคำแหง
- ประสบการณ์การทำงาน 2547 - 2552
บริษัท บริดสโตน ไทร์ แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด (ประเทศไทย)
ตำแหน่ง เจ้าหน้าที่ด้านเทคนิค
2554 - ปัจจุบัน
สำนักพัฒนาและบำรุงรักษาทางน้ำ กรมเจ้าท่า กระทรวงคมนาคม
ตำแหน่ง วิศวกรเครื่องกล ระดับปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้