

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 ในขณะที่หม้อเผาปูนซีเมนต์ถูกใช้งานวัสดุดังกล่าวอยู่ภายใต้ภาระทางความร้อนเป็นสำคัญ ทำให้เกิดความเค้นจากความร้อน บทความนี้นำเสนอการศึกษาการกระจายความเค้นจากความร้อนของโครงสร้างโนสริงหม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุนและศึกษาผลของจำนวนของเหล็กยึดต่อความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อวัสดุทนไฟ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลจากการศึกษาพบว่าค่าความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อวัสดุทนไฟจะมีค่าเป็นแรงดึงและมีค่าสูงมากในบริเวณที่สัมผัสกับเหล็กยึดชนิด A และเมื่อเพิ่มจำนวนเหล็กยึดมากขึ้น จะทำให้ความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อวัสดุทนไฟมีแนวโน้มสูงขึ้นและปริมาตรที่เกิดความเค้นสูงจะขยายวงกว้างมากขึ้น ทั้งนี้เพราะเหล็กมีการขยายตัวที่ดีกว่าวัสดุทนไฟ 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

1. บทนำ

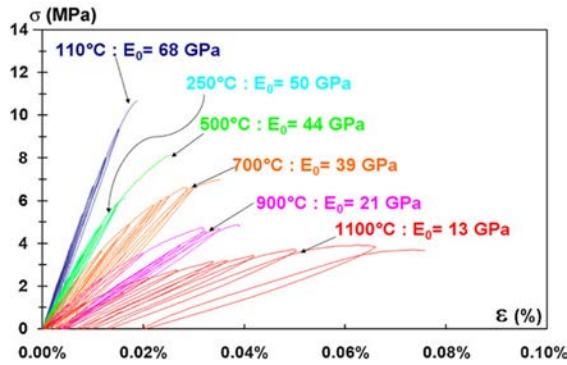
อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญอุตสาหกรรมหนึ่งของประเทศ สามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมการก่อสร้างและอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ หม้อเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน (Rotary Cement Kiln) เป็นอุปกรณ์สำคัญในการผลิตปูนซีเมนต์ หม้อเผาปูนซีเมนต์ใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงเพื่อสร้างความร้อนให้แก่วัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal) ให้ได้อุณหภูมิประมาณ 1,200 - 1,400°C ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีตามลำดับ จนในที่สุดวัตถุดิบสำเร็จกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker) ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการทำให้ปูนเม็ดเย็นลง ในการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบสำเร็จนั้นจะเป็นการให้ความร้อนโดยตรงจากเปลวไฟของหัวเผาเพื่อป้องกันความร้อนจากกระบวนการผลิตจึงนำระบบไลน์หนึ่งมาใช้ภายในหม้อเผาปูนซีเมนต์ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วย วัสดุทนไฟที่มีเหล็กยึด (Anchor) ฝังอยู่ข้างในและเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กที่ยึดกับเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ ในขณะที่หม้อเผาปูนซีเมนต์ถูกใช้งานวัสดุดังกล่าวจะอยู่ภายใต้ภาระทางความร้อนเป็นสำคัญ ก่อให้เกิดการขยายตัวจากความร้อนไม่เท่ากันของวัสดุในระบบไลน์หนึ่ง งานวิจัยก่อนหน้านี้มักจะให้ความสนใจไปที่ผิวด้านร้อน (Hot Face) โดยมีหลอดการอัดภายใต้ภาระทางความร้อนและภายใต้เงื่อนไขการยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น 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. มีแนวโน้มผลักดันให้วัสดุไลน์หนึ่งออกจากผิวด้านร้อนเนื่องจากการขยายตัวจากความร้อนไม่เท่ากันระหว่างวัสดุไลน์หนึ่งและวัสดุเหล็กยึด การทดลองแสดงให้เห็นว่าเปลือกหม้อด้านร้อน (Hot Shell) มีแนวโน้มที่จะดึงออกจากไลน์หนึ่งทำให้เหลือช่องว่างในเปลือกหม้อด้านร้อนกับเหล็กยึด การขยายตัวของเปลือกหม้อด้านร้อนสามารถสร้างความเค้นดึงในแนวเส้นรอบวงได้สูงในไลน์หนึ่ง ผลทำให้เกิดการแตกในแนวรัศมีได้มาก ผู้วิจัยสรุปว่าเหล็กยึดที่ยืดหยุ่น เช่นการเคลือบดูเหมือนจะดีกว่าแบบแข็งเกร็งของการติดตั้งไลน์หนึ่ง อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยกล่าวว่าเหล็กยึดแบบเรขาคณิตและเหล็กยึดแบบเคลือบดูเหมือนจะไม่ส่งผลกระทบต่อภาระการกระจายความเค้นในแนวเส้นรอบวงเป็นสำคัญ งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาทั้งการถ่ายเทความร้อนและความเค้นจากความร้อนร่วมกันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วัตถุประสงค์การศึกษาคือการมีปฏิกิริยาต่อกันระหว่างการกระจายความร้อนและส่งผลกระทบต่อภาระการกระจายความเค้นที่เหล็กยึดและวัสดุทนไฟในสภาวะแบบคงตัวที่อุณหภูมิทำงานสูงสุดนอกจากนั้นจะทำการศึกษาปริมาณเหล็กยึดในแต่ละแถวจะมีผลอย่างไรต่อความเค้นจากความร้อนในวัสดุทนไฟและเหล็กยึด

2. ส่วนประกอบของโครงสร้างโนสริงและ

คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

วัสดุทนไฟที่นำมาพิจารณามีชื่อทางการค้าคือ Low Cement Andalusite Castable, (And-LCC) [3] ทำมาจากแร่แอนดาลูไซต์ฟลูมซิลิกา อลูมินา และแคลเซียมอลูมินาเตซีเมนต์ โดยมีองค์ประกอบทางเคมีคือ $\text{Al}_2\text{O}_3, 58\%$; $\text{SiO}_2, 37.5\%$; $\text{CaO}, 2.3\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3, 0.9\%$ ความหนาแน่น 2,600 kg/m^3 พฤติกรรมทางกลของการทดสอบแรงดึงหลังจากผ่านการให้ความร้อน โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้องในแต่ละกลุ่มขึ้นทดสอบที่ได้รับการให้ความร้อนมาก่อน อุณหภูมิแตกต่างกันที่ 100, 250, 500, 700, 900 และ 1,100°C ดังแสดงในรูปที่ 1 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1 พฤติกรรมทางกลของวัสดุทไฟ จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิแตกต่างกันข้อมูลโดย

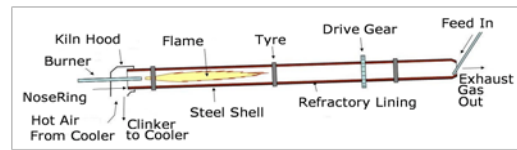
GhassemiKakroudi [3]

2.1 ลักษณะของหม้อเผาปูนซีเมนต์และส่วนประกอบของโครงสร้างโนสริง

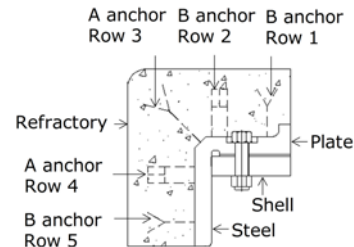
หม้อเผาปูนซีเมนต์ที่นำมาเป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เมตรวางเอียงตามแนวนอน 1-4 องศาและหมุนรอบตัวเองอย่างช้าๆ ในช่วงระหว่าง 30 กับ 250 รอบต่อชั่วโมงเพื่อเลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนความหนา 0.05 เมตร ภายในบุด้วยวัสดุทนไฟมีเหล็กยึดฝังอยู่ข้างใน การทำงานวัตถุติบสำเร็จจะถูกป้อนเข้าไปตรงที่ส่วนปลายด้านบนของรูปทรงกระบอกดังที่แสดงในรูปที่ 2 ขณะที่หม้อเผาปูนซีเมนต์หมุนวัตถุติบสำเร็จจะค่อยๆ เคลื่อนตัวไปทางส่วนปลายด้านล่าง ก๊าซร้อนจะผ่านไปตามหม้อเผาปูนซีเมนต์ในทิศทางตรงกันข้าม (Counter-Current) ก๊าซร้อนอาจจะก่อให้เกิดบริเวณที่มีความร้อนภายในมาก หรืออาจจะก่อให้เกิดเปลวไฟภายในหม้อเผาปูนซีเมนต์เปลวไฟดังกล่าวถูกพ่นจากท่อหัวเผา ขณะที่วัตถุติบสำเร็จเคลื่อนตัวภายใต้เปลวไฟอุณหภูมิของวัตถุติบสำเร็จขึ้นสูงสุดแล้วเคลื่อนตัวผ่านบริเวณโนสริงดังแสดงในรูปที่ 3 ก่อนที่ตกลงจากหม้อเผาปูนซีเมนต์ไปยังหม้อเย็น (Cooler) ต่อไป

2.2 คุณสมบัติของวัสดุทางกลและทางความร้อน

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



รูปที่ 2 ลักษณะของหม้อเผาปูนซีเมนต์



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของโครงสร้างโนสริง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุทนไฟสแตนเลสและเหล็กกล้าคาร์บอนข้อมูลจาก [3-6]

วัสดุ	T (°C)	E (GPa)	T (°C)	α ($\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	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 อุณหภูมิโมดูลัสความยืดหยุ่นสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนและอัตราส่วนปัวซองตามลำดับ

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนโมดูลัสความยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซองซึ่งเป็นคุณสมบัติที่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 และ 2

3. การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

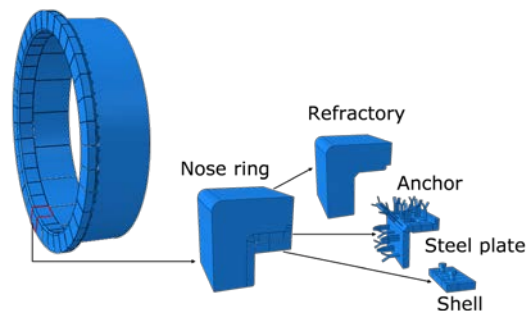
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างโนสริงดัง
แสดงในรูปที่ 3 ที่อยู่ภายใต้ภาระทางความร้อน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ
ไฟสแตนเลส และเหล็กกล้าคาร์บอนข้อมูลจาก [3-6]

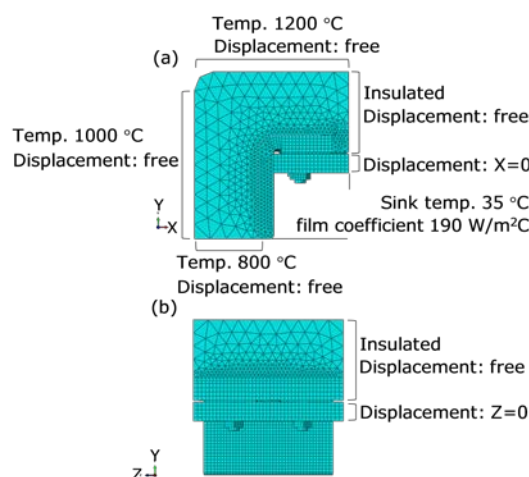
วัสดุ	T (°C)	การนำความร้อน (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)
วัสดุทนไฟ	100	1.30
	600	1.33
	1400	1.65
สแตนเลส	100	13.80
	200	13.95
	400	16.28
	500	18.70
	600	19.77
เหล็กกล้าคาร์บอน	100	47.77
	200	48.11
	300	47.25
	400	45.86
	500	44.48
	600	43.10
	700	41.71

โดยสมมุติฐานของการวิเคราะห์มีดังนี้ 1.ระบบอยู่ใน
สภาวะคงตัว 2.วัสดุทุกชนิดมีสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน
และเป็นไอโซทรอปิก (Isotropic) 3.การสัมผัสของวัสดุ
เป็นแบบยึดแน่นถาวร (Perfect Bonding) 4.
ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดเป็นไป
ตามกฎของฮุก (Hooke's Law) การวิเคราะห์การ
ถ่ายเทความร้อนและความเค้นถูกดำเนินการด้วย
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโครงสร้างโนสริงถูก
แบ่งออกเป็น 36 ส่วน อย่างไรก็ตาม จากหลักการ
สมมาตรแบบไซคลิก (Cyclic Symmetry) แบบจำลอง
1 ส่วนจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งแบบจำลอง
ประกอบด้วยวัสดุทนไฟ เหล็กยึด แผ่นเหล็ก และ
เปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ดังแสดงไว้รูปที่ 4 วัสดุ
ไฟมีผิว 2 ส่วนที่สัมผัสกับวัตถุติดสำเร็จโดยตรงได้แก่
ผิวในระนาบ X และในระนาบ Y ถูกกำหนดให้มี
อุณหภูมิ 1,200°C และ 1,000°C ตามลำดับ
นอกจากนี้ยังมีกระแสความร้อนจากหม้อเย็นอุณหภูมิ
800°C สัมผัสกับผิววัสดุทนไฟบริเวณด้านล่าง การ

ถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างและเปลือกหม้อเผา
ปูนซีเมนต์จากนั้นออกสู่สภาวะแวดล้อมรอบ ๆ ที่มี
อุณหภูมิ 35°C โดยการพาความร้อนแบบบังคับซึ่งมี
สัมประสิทธิ์การพาความร้อน 190 W/m²·°C⁻¹
ผิวสัมผัสด้านข้างของไลน์นิ่งถูกกันไว้ด้วยกระดาษ
แข็งมีความหนา 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4 แบ่งโครงสร้างโนสริงออกเป็น 1 ส่วนและ
จำแนกชิ้นส่วนประกอบของโนสริง



รูปที่ 5 เงื่อนไขขอบเขตของอุณหภูมิและการ
กระจัด (a) ระนาบแกน X-Y (b) ระนาบแกน Y-Z

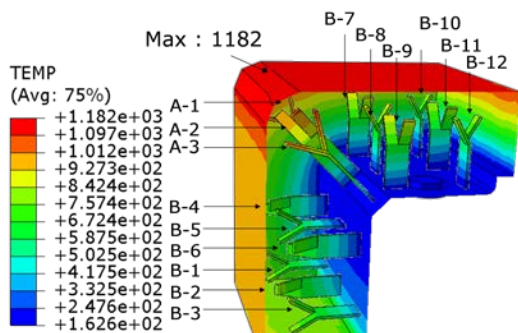
เพื่อยอมให้มีการขยายตัวได้ การวิเคราะห์ความเค้นถูก
สมมุติให้ด้านข้างของโครงสร้างไม่อยู่ภายใต้แรงจาก
ภายนอกและการกระจัดเป็นอิสระทุกทิศทางเงื่อนไข
ขอบเขตของอุณหภูมิและการกระจัดแสดงดังในรูปที่ 5
ชนิดเอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองมี 2 แบบคือ เอลิ
เมนต์แบบจัตุรมุขหรือปิรามิด (Tetrahedron) 4 โหนด
ใช้กับโครงสร้างวัสดุทนไฟ และเอลิเมนต์แบบรูปสาม
เหลี่ยม (Wedge) 6 โหนด ใช้กับโครงสร้างเหล็กยึด แผ่นเหล็ก
และเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ การวิเคราะห์แบ่งตาม
จำนวนเหล็กยึดเป็น 3 กรณีดังนี้ 1.จำนวนเหล็กยึด

10 อัน (5 แถวๆละ 2 อัน) 2.จำนวนเหล็กยึดเป็น 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. ผลการวิเคราะห์และการอภิปรายผล

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 การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างโนสริงไปยังเปลือกหุ้มฉนวนซีเมนต์มีอุณหภูมิ 140°C ผลการกระจายอุณหภูมิแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 9 จากตำแหน่ง a ถึง b

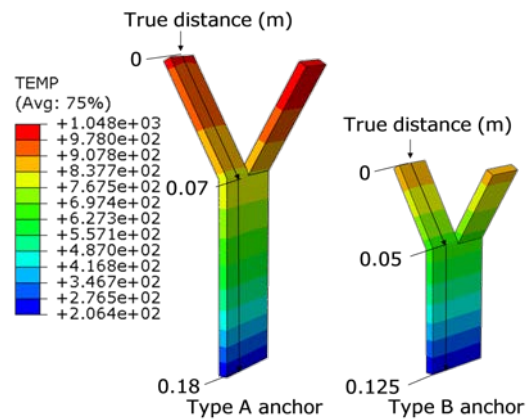


รูปที่ 6 การกระจายอุณหภูมิของวัสดุทนไฟและเหล็กยึด

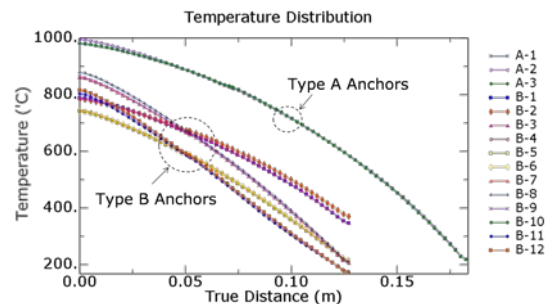
4.2 ผลการกระจายความเค้น

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 กรณี พบว่ามีการกระจายความเค้นที่แตกต่างกัน กล่าวคือ การเพิ่มจำนวนเหล็กยึดส่งผลให้เกิดความเค้นดึงในเนื้อวัสดุทนไฟมากขึ้นซึ่งความเค้นดึงจะเกิดขึ้นรอบๆเนื้อวัสดุทนไฟที่สัมผัสกับเหล็กยึดมีลักษณะแผ่รอบเหล็ก

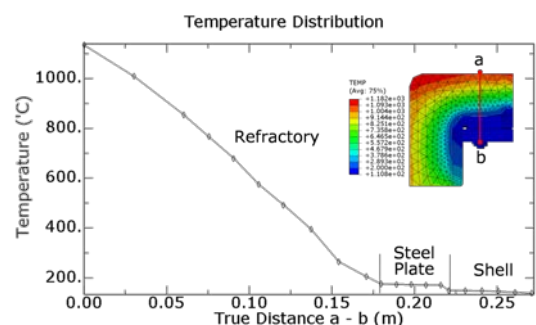
ยึดเมื่อระยะห่างของเหล็กยึดน้อยลง (เพิ่มจำนวนเหล็กยึด) การกระจายความเค้นจะขยายกว้างและต่อเนื่องกันดังแสดงในรูปที่ 10 เพื่อให้ทราบปรากฏการณ์ของความเค้นในเนื้อวัสดุทนไฟตรงบริเวณกลางแถวเหล็กยึดที่ระดับความลึกต่างๆ โดยแบ่งระนาบส่วนตัด ออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ a-a, b-b และ c-c ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึดทั้ง 2 ชนิด



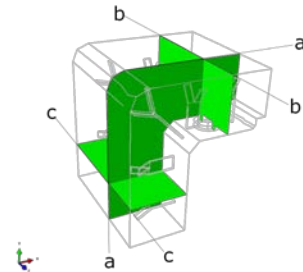
รูปที่ 8 การกระจายอุณหภูมิของเหล็กยึดทั้งหมดตามแนวเส้นในรูปที่ 7



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

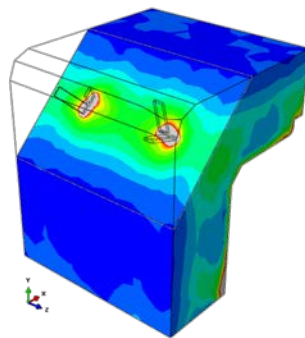
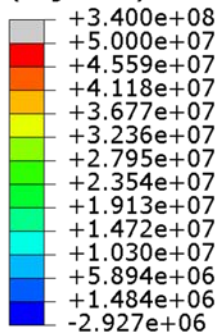
สูงสุดของส่วนตัด a-a ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่าการกระจายความเค้นมีมากในแบบจำลองกรณีที่ 3 และมีแนวโน้มที่เกิดความเค้นอัดใกล้กับผิวด้านร้อนสูงกว่าทั้งกรณีที่ 1 และ 2 ยกเว้นบริเวณมุมโนสริงที่เกิดความเค้นดึง ดังกราฟในรูปที่ 13 จากนั้นวัสดุทนไฟทั้ง 3 กรณีจะอยู่ภายใต้ความเค้นดึงที่ระดับความลึก 30 มิลลิเมตรดังกราฟในรูปที่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

ดังแสดงในรูปที่ 18 พบว่าขนาดความเค้นหลักสูงสุดทั้ง 3 กรณีแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกับผลการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของระนาบส่วนตัด c-c ดังแสดงในรูปที่ 19

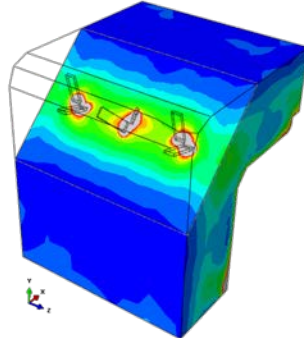


รูปที่ 11 แสดงลักษณะส่วนตัด a-a, b-b และ c-c ระหว่างกลางของเหล็กยึด

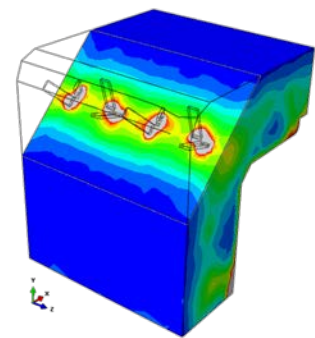
S, Max. Principal
(Avg: 75%)



Case 1



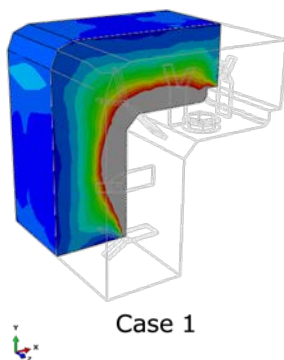
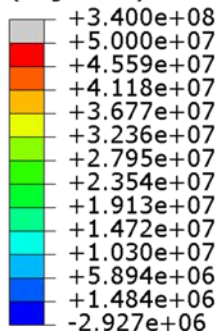
Case 2



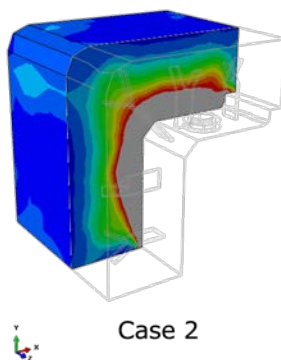
Case 3

รูปที่ 10 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อวัสดุทนไฟ ภาพตัดบริเวณมุมโนสริง

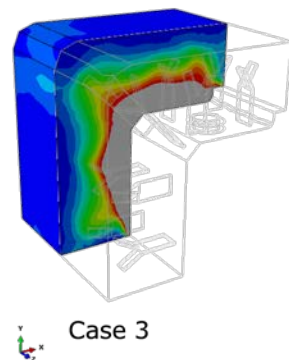
S, Max. Principal
(Avg: 75%)



Case 1



Case 2

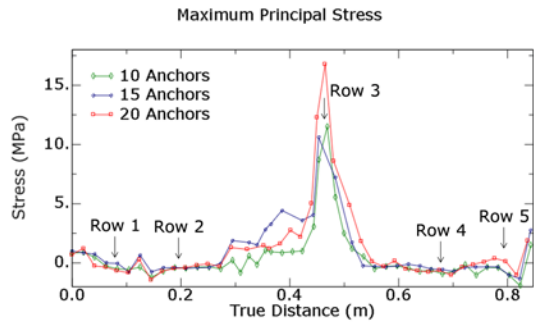


Case 3

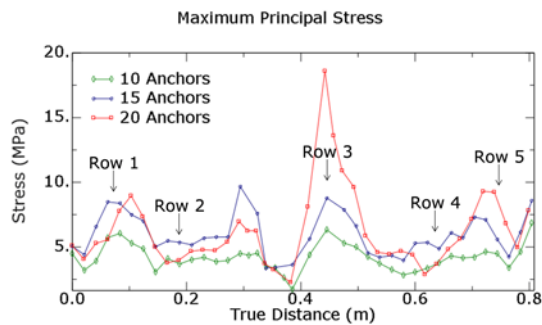
รูปที่ 12 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อวัสดุทนไฟ บนระนาบส่วนตัด a-a

ดังกราฟในรูปที่ 16 จากอิทธิพลการขยายตัวของแผ่นเหล็กและเปลือกหม้อเผาปูนซีเมนต์ที่มีความลึก 120 มิลลิเมตรดังกราฟในรูปที่ 17 ในส่วนของผลการกระจายความเค้นหลักสูงสุดของระนาบส่วนตัด b-b

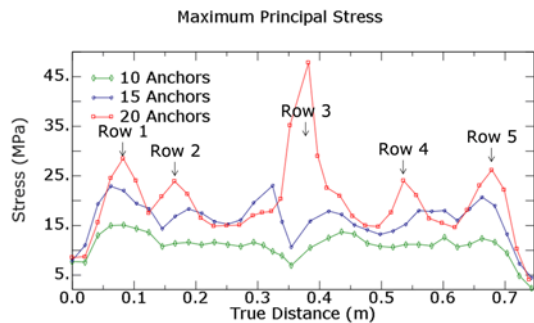
อย่างไรก็ตาม การกระจายความเค้นหลักสูงสุดมีแนวโน้มกระจายตัวกว้างขึ้นตามการเพิ่มของจำนวนเหล็กยึดการกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเหล็กยึดสังเกตได้จากรูปที่ 20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งเหล็กยึดชนิด



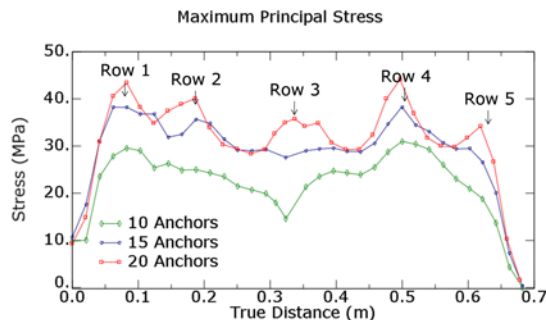
รูปที่ 13 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดของวัสดุ
ทนไฟที่ผิวร้อน (hot face)



รูปที่ 14 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดของวัสดุ
ทนไฟที่ระดับ 30 มิลลิเมตร



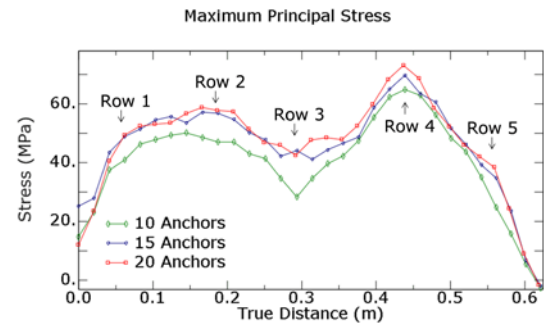
รูปที่ 15 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดของวัสดุ
ทนไฟที่ระดับ 60 มิลลิเมตร



รูปที่ 16 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดของวัสดุ
ทนไฟที่ระดับ 90 มิลลิเมตร

A และ B มีขนาดความเค้นหลักสูงสุดใกล้เคียงกันและ
อยู่ภายใต้ความเค้นอัดเป็นส่วนใหญ่มากเว้นบริเวณ
ส่วนโคนซึ่งสังเกตได้จากกราฟในรูปที่ 21 และพบว่า

การกระจายความเค้นเกิดขึ้นมากตรงบริเวณส่วนแยก
ของเหล็กยึดเพราะเกิดความหนาแน่นจากการ
เปลี่ยนแปลงรูปร่างของเหล็กยึด แต่อย่างไรก็ตาม
แบบจำลองทั้ง 3 กรณีมีขนาดความเค้นหลักสูงสุด
ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 17 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดของวัสดุ
ทนไฟที่ระดับ 120 มิลลิเมตร

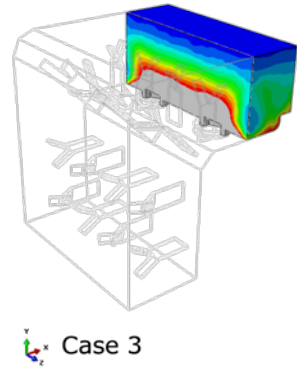
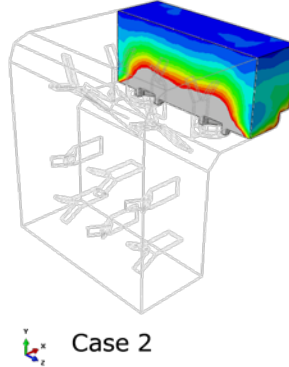
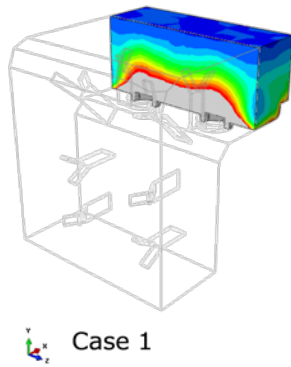
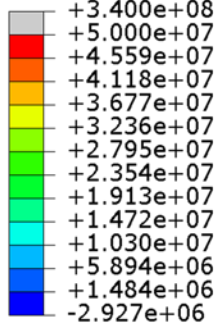
5.สรุป

การหาค่าที่เหมาะสมของการออกแบบจำนวน
เหล็กยึดสำหรับโครงสร้างโนสริงในหม้อเผาปูนซีเมนต์
แบบหมุนเป็นปัญหาที่ท้าทายแก่ผู้ออกแบบ ใน
งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพื่อที่จะประเมินผลกระทบ
ของจำนวนเหล็กยึดในวัสดุทนไฟต่อการกระจายความ
ร้อนและความเค้นภายในส่วนประกอบโนสริงหม้อเผา
ปูนซีเมนต์แบบหมุน จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า
การกระจายความเค้นหลักสูงสุดในวัสดุทนไฟจะถูก
ควบคุมด้วยเกรเดียนอุณหภูมิที่ผ่านวัสดุทนไฟและ
ลักษณะการขยายตัวจากความร้อนของวัสดุทนไฟวัสดุ
เหล็กยึด และวัสดุแผ่นเหล็ก เนื่องจากวัสดุทนไฟมี
สัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนน้อยกว่าเหล็ก
ยึด และแผ่นเหล็กทำให้เกิดความเค้นหลักสูงสุด ซึ่ง
เป็นความเค้นดึงกับวัสดุทนไฟที่บริเวณโดยรอบเหล็ก
ยึด และเกิดความเค้นอัดกับเหล็กยึด เมื่อเพิ่มจำนวน
เหล็กยึดมากขึ้นจะทำให้ความเค้นมีแนวโน้มสูงขึ้นและ
การเกิดความเค้นดังกล่าว มีการขยายวงกว้างมากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

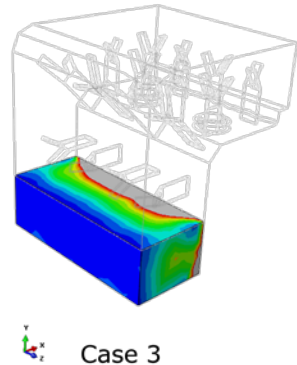
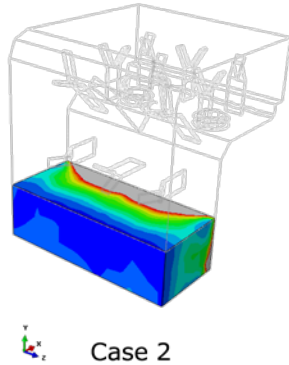
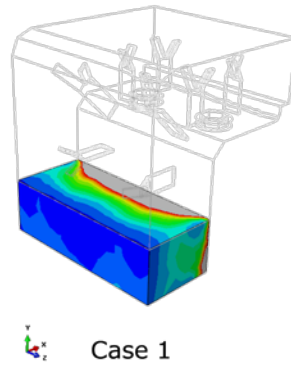
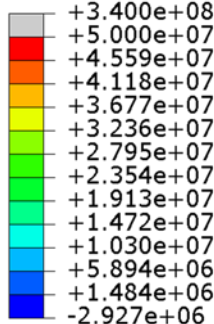
งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท สยาม
วัสดุทนไฟจำกัดที่เอื้อเฟื้อข้อมูลของขนาดโนสริงที่ใช้
ในการทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบ
สมบัติเชิงกลบางส่วน of วัสดุ

S, Max. Principal
(Avg: 75%)

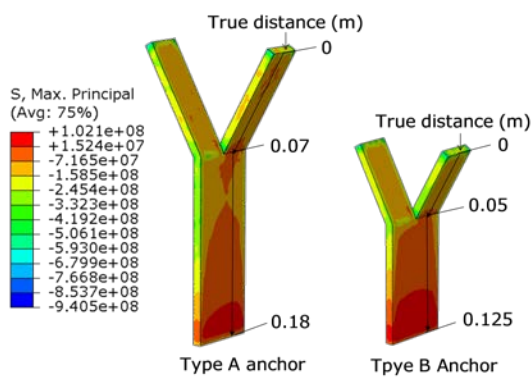


รูปที่ 18 ภาพตัด b-b การกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อวัสดุทนไฟระหว่างกลางแถวที่ 1 กับ 2

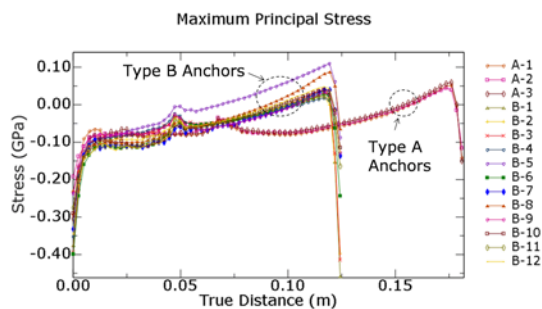
S, Max. Principal
(Avg: 75%)



รูปที่ 19 ภาพส่วนตัด c-c ของการกระจายความเค้นหลักสูงสุดในเนื้อวัสดุทนไฟระหว่างกลางแถวที่ 4 กับ 5



รูปที่ 20 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดของ
เหล็กยึดทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 21 การกระจายความเค้นหลักสูงสุดของ
เหล็กยึดทั้งหมด 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>.