

พฤติกรรมกรรับน้ำหนักตามแนวแกนของเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง



นายอดิเทพ แสนทวีสุข

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BEHAVIOR OF AXIALLY LOADED STEEL COLUMNS UNDER HIGH  
TEMPERATURE CONDITION



Mr. Adithep Santhaweesuk

สถาบันวิทยบริการ  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University



อติเทพ แสนทวีสุข : พฤติกรรมการรับน้ำหนักตามแนวแกนของเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง.  
(BEHAVIOR OF AXIALLY LOADED STEEL COLUMNS UNDER HIGH TEMPERATURE CONDITION)  
อ. ที่ปรึกษา: รศ. ดร. ธัญวัฒน์ โพธิศิริ, 117 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเหล็กที่รับน้ำหนักตามแนวแกนภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง สำหรับเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาแนวทางการออกแบบเสาเหล็กที่ไม่มีวัสดุป้องกันไฟ ในการศึกษาที่กำหนดค่าอุณหภูมิขีดจำกัดของโครงสร้างเหล็กตามแนวทางของมาตรฐาน EN 1993-1-2 โดยทำการทดสอบชิ้นตัวอย่างเสาเหล็กหน้าตัด H100x100x6x8 มม. ความยาว 1.4 ม. ที่รับน้ำหนักตามแนวแกน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นตามความสัมพันธ์อุณหภูมิ-เวลาตามมาตรฐาน BS 476 ค่าอุณหภูมิขีดจำกัดที่ได้ถูกนำมาใช้กำหนดความสัมพันธ์อุณหภูมิ-เวลาในการศึกษาพฤติกรรมของเสาเหล็กที่รับน้ำหนักตามแนวแกนในการเกิดเพลิงไหม้ธรรมชาติ การจำลองการเกิดเพลิงไหม้ธรรมชาติอาศัยเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (Barnett Fire Design, BFD) โดยกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดเป็นร้อยละของค่าอุณหภูมิขีดจำกัด

ผลที่ได้จากการทดสอบถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองเสาเหล็กที่รับแรงตามแนวแกนภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับ อุณหภูมิขีดจำกัดและการโก่งของเสาเหล็กที่ได้จากการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับการทดสอบ ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาเหล็กภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก และลักษณะความร้อนที่เสาเหล็กได้รับ ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองเพิ่มเติมให้ครอบคลุมค่าอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 5 ค่า ได้แก่ 0.15, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นตามมาตรฐาน BS 476 (เพื่อกำหนดค่าอุณหภูมิขีดจำกัด) และตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ ซึ่งกำหนดค่าอัตราส่วนอุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดเพลิงไหม้ต่ออุณหภูมิขีดจำกัด 7 ค่า ได้แก่ 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 0.95 และ 1.00 ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์พบว่าเสาเหล็กภายใต้ค่าอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นแสดงค่าอุณหภูมิขีดจำกัดและระยะเวลาการวิบัติลดลง ในขณะที่แรงปฏิกิริยาระหว่างการให้ความร้อนมีค่าสูงขึ้น เมื่อกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดเท่ากัน เสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ แสดงค่าแรงปฏิกิริยาที่สูงกว่ามาตรฐาน BS 476 เนื่องจากช่วงเวลาลุกลามที่ยาวกว่าและการขยายตัวของเสาเหล็กที่มากกว่า นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองภายใต้อุณหภูมิคงที่ 500 °C มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณตามมาตรฐาน EN1993-1-2 เมื่อค่าอัตราส่วนความชะลุดสูงกว่า 50 และค่ากำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากผลการทดสอบของ Kuo-Chen และคณะ (2005) เมื่อค่าอัตราส่วนความชะลุดสูงกว่า 52

ในการทดลองออกแบบ กำหนดให้เสาเหล็กขนาดหน้าตัด H100x100x6x8 มม. ความยาว 1.4 ม. ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกในแนวแกน 7 ตัน มีอัตราการทนไฟ 60 นาที ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ซึ่งกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ 60% ของค่าอุณหภูมิขีดจำกัด จากการทดสอบเสาเหล็กภายใต้สภาวะดังกล่าว พบว่า เสาเหล็กเกิดการวิบัติที่ 56 นาที

ภาควิชา .....วิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชา .....วิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา ..... 2550.....

ลายมือชื่อผู้ผลิต .....  .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  .....



## 4870544421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : FIRE / STEEL COLUMN / TEMPERATURE

ADITHEP SANTHAWEESUK: BEHAVIOR OF AXIALLY LOADED STEEL COLUMNS UNDER HIGH TEMPERATURE CONDITION. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. THANYAWAT POTHISIRI, Ph.D., 117 pp.

This research is aimed to investigate the behavior of axially loaded steel columns under high temperature conditions in order to obtain preliminary data for the steel column design without fire protection. For the current study the limiting temperature is obtained, based upon EN 1993-1-2 standard, through testing steel column specimens of H 100x100x6x8 mm section and 1.4 m in length axially loaded under increasing temperatures in accordance with the BS 476 standard time-temperature relationship. The limiting temperatures are subsequently used to determine the time-temperature conditions in examining the behavior of axially loaded steel column under natural fire condition. The nature fire condition is simulated using the Barnett fire design (BFD) curve with varying maximum temperatures in terms of percentages of the limiting temperature values.

The test results are compared with the results obtained from the analytical model of axially loaded steel columns under increasing temperature by using the finite element method. It has been found from the comparison that the support reactions, the limiting temperatures and the deflection of the steel columns obtained from the analytical models are close to the test results. The behavior of axially loaded steel columns is further investigated with varying load ratios and high temperature conditions through supplementary analytical models, covering five load ratios, i.e. 0.15, 0.20, 0.30, 0.40 and 0.50, with increasing temperatures according to BS 476 standard (for determining the limiting temperatures) and the BFD curve using seven values of the maximum fire temperature/limiting temperature ratio of 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 0.95 and 1.00, respectively.

It has been found from the analyses that the steel columns subjected to higher load ratios show lower limiting temperatures and shorter time to failure, while the support reactions increase during the heated period. In addition, under a specified maximum temperature, the steel columns under the increasing temperature in accordance with the BFD curve show higher values of support reactions compared with the BS 476 standard due to the longer period of fire growth and thus a higher level of steel expansion. It has also been observed that the axial load capacity of the steel columns under a constant temperature of 500 °C obtained from the analytical models is similar to that computed based on EN 1993-1-2 when the slenderness ratio is higher than 50. Moreover, the axial load capacity of the steel columns obtained from the models is comparable to the test results of Kuo – Chen et al. (2005) when the slenderness ratio is higher than 52.

For a trial design, a steel column of H100x100x6x8 mm section and 1.4 m in length subjected to 7-ton axial load is designated to have a 60-minute fire resistance rating under the increasing temperature condition according to the BFD curve with the maximum temperature at 60% of the limiting temperature. It has been found from testing the steel column under the specified condition that the column fails at 56 minutes.

Department ..CIVIL ENGINEERING.. Student's signature .. ..

Field of study CIVIL ENGINEERING... Advisor's signature .. ..

Academic year .....2007.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีของ รองศาสตราจารย์ ดร. ธัญวัฒน์ โพธิศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิจัยในครั้งนี้มาโดยตลอด รวมถึงการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณของอาจารย์เป็นอย่างยิ่งจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บริษัท เหล็กสยามยามาโตะ จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้อตัวอย่างเหล็ก เพื่อใช้เป็นตัวอย่างทดสอบ ตลอดจน คำแนะนำและข้อมูลต่าง ๆ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ วิศวกร และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์วิจัยเพื่อความปลอดภัยทางอัคคีภัย (FSRC) และห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ของ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทดสอบวัสดุ และการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอนทั้งในอดีตและปัจจุบันและที่สำคัญผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจรวมทั้ง เพื่อนๆ รุ่นพี่และรุ่นน้องทุกท่านที่คอยให้กำลังใจและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ตลอดจนความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

|  |    |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | ง  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | จ  |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | ฉ  |
| สารบัญ.....  | ช  |
| สารบัญตาราง.....   | ฌ  |
| สารบัญภาพ.....   | ฎ  |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1  |
| 1.1 ความสำคัญของปัญหา.....   | 1  |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....   | 1  |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....   | 2  |
| บทที่ 2 การทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา.....   | 3  |
| 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเกิดเพลิงไหม้.....  | 3  |
| 2.2 ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเหล็กหน้าตัด H ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง....   | 13 |
| 2.3 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างเหล็กชนิด คาน-เสา ในการเกิดเพลิงไหม้<br>กับมาตรฐาน ENV 1993-1-2 และ EN 1993-1-2 ..... | 18 |
| บทที่ 3 การทดสอบเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น.....   | 25 |
| 3.1 ขึ้นตัวอย่างทดสอบและการเตรียมขึ้นตัวอย่างทดสอบ.....  | 25 |
| 3.2 การติดตั้งขึ้นตัวอย่างทดสอบ.....   | 27 |
| 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์วัด.....  | 30 |
| 3.4 ผลการทดสอบ .....   | 34 |
| บทที่ 4 การวิเคราะห์แบบจำลองเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยระเบียบวิธี<br>ไฟไนต์เอลิเมนต์.....                  | 60 |
| 4.1 การสร้างแบบจำลอง.....  | 60 |
| 4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....  | 67 |
| 4.3 กรณีวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์.....  | 72 |
| บทที่ 5 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบ .....  | 81 |
| 5.1 การเปรียบเทียบแรงปฏิกิริยา .....   | 81 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติจำกัด .....   | 83  |
| 5.3 การเปรียบเทียบลักษณะการโค้งตัวของเสาเหล็ก .....  | 85  |
| 5.4 การเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักในแนวแกนและมาตรฐานการ<br>ออกแบบ.....                | 87  |
| 5.5 การเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักในแนวแกนและผลการทดสอบของ<br>งานวิจัยที่ผ่านมา ..... | 89  |
| บทที่ 6 ข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบ.....   | 91  |
| 6.1 ขั้นตอนการออกแบบ .....   | 92  |
| บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....   | 97  |
| 7.1 สรุปผลการวิจัย.....  | 97  |
| 7.2 ขั้นตอนการออกแบบ .....   | 98  |
| รายการอ้างอิง.....   | 99  |
| ภาคผนวก.....   | 101 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....   | 117 |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ (Wang, 2002) .....            | 3    |
| 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาตามมาตรฐาน ASTM E119 (ASTM, 2005) ..... | 5    |
| 2.3 ค่าตัวแปรหลักในสมการของบาร์เน็ตต์จากการทดสอบจริง (Barnett, 2002) .....    | 12   |
| 2.4 ขนาดและอุณหภูมิทดสอบสำหรับการทดสอบส่วนที่ 1 (Kuo-Chen และคณะ, 2005).....  | 14   |
| 2.5 ขนาดและอุณหภูมิทดสอบสำหรับการทดสอบส่วนที่ 2 (Kuo-Chen และคณะ, 2005).....  | 14   |
| 2.6 ผลการทดสอบส่วนที่ 2 (Kuo-Chen และคณะ, 2005) .....                         | 18   |
| 3.1 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเกรด SM400 (Siam Yamato Steel, 2006) .....         | 26   |
| 3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กเกรด SM400 (Siam Yamato Steel, 2006).....        | 26   |
| 3.3 ลักษณะการทดสอบชิ้นตัวอย่าง .....  | 26   |
| 3.4 อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบสำหรับชิ้นตัวอย่าง S1 .....                       | 34   |
| 3.5 แรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง S1 .....                | 36   |
| 3.6 อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบสำหรับชิ้นตัวอย่าง S2 .....                       | 39   |
| 3.7 แรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง S2.....                 | 40   |
| 3.8 ค่าอุณหภูมิตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (Barnett,2002) .....      | 43   |
| 3.9 อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบสำหรับชิ้นตัวอย่าง N1.....                        | 44   |
| 3.10 แรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N1 .....               | 45   |
| 3.11 อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบสำหรับชิ้นตัวอย่าง N2.....                       | 48   |
| 3.12 แรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N2 .....               | 50   |
| 3.13 อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบสำหรับชิ้นตัวอย่าง N3.....                       | 52   |
| 3.14 แรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N3 .....               | 54   |
| 3.15 ค่าการโก่งตัวของชิ้นตัวอย่างทดสอบรอบแกนหลัก .....                        | 57   |
| 3.16 ค่าการโก่งตัวของชิ้นตัวอย่างทดสอบรอบแกนรอง .....                         | 58   |
| 4.1 การเปรียบเทียบความสามารถของโปรแกรมวิเคราะห์แบบจำลอง (Wang, 2002).....     | 60   |
| 4.2 ขนาดและจำนวนชิ้นส่วนย่อยในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง .....          | 67   |
| 4.3 อัตราส่วนหน่วยแรงเฉื่อยและอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉื่อย.....       | 69   |
| 4.4 อัตราส่วนหน่วยแรงที่ชิ้นส่วนย่อยที่ตำแหน่งที่ 2 .....                     | 71   |
| 4.5 สภาวะแวดล้อมของแบบจำลอง.....  | 73   |

4.6 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง.....75

5.1 การเปรียบเทียบการทดสอบและแบบจำลอง .....81

5.2 ค่าอุณหภูมิขีดจำกัดจากมาตรฐาน EN 1993 1-2 (2002) แบบจำลองและชิ้นตัวอย่าง S1 S2.84

5.3 การโก่งตัวสูงสุดของเสาเหล็ก .....85

5.4 ขนาดเสาเหล็กในแบบจำลอง .....87

5.5 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์แบบจำลองและมาตรฐานการออกแบบ EN 1993 1-2 (2002) .....88

5.6 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์แบบจำลองและผลการทดสอบโดย Kuo-Chen และคณะ (2005)..89



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลามาตรฐานต่าง ๆ .....   | 6    |
| 2.2 อัตราการปลดปล่อยความร้อนในการเกิดเพลิงไหม้ธรรมชาติ (Wang, 2002).....  | 6    |
| 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาโดย Peterson และคณะ (1976).....   | 8    |
| 2.4 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเกิดเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน<br>EN 1993-1-2 .....   | 10   |
| 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาจากการทดสอบขนาดจริง (Barnett, 2002).....  | 11   |
| 2.6 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ (Kuo-Chen และคณะ, 2005) .....   | 14   |
| 2.7 ลักษณะการติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบ (Kuo-Chen และคณะ, 2005) .....   | 15   |
| 2.8 ผลการทดสอบ (ก) เสาขนาด H300x300x10x15 มม. (ข) เสาขนาด H175x175x7.5x11 มม.<br>(ค) เสาขนาด H100x100x6x18 มม. (Kuo-Chen และคณะ, 2005)..... | 15   |
| 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความสามารถในการรับน้ำหนักและอุณหภูมิ<br>(Kuo-Chen และคณะ, 2005).....  | 16   |
| 2.10 ลักษณะการวิบัติ (ก) เสาขนาด H300x300x10x15 (ข) เสาขนาด H175x175x7.5x11<br>(ค) เสาขนาด H100x100x6x8 (Kuo-Chen และคณะ, 2005).....        | 17   |
| 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเหล็กและอัตราส่วน<br>ความชะลูด (Kuo-Chen และคณะ, 2005) .....                   | 17   |
| 2.12 ลักษณะโครงสร้างในแบบจำลอง (Vila Real และคณะ, 2003) .....   | 22   |
| 2.13 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ในกรณีโครงสร้างรับแรงตามแนวแกน (Vila Real และคณะ, 2003)...  | 22   |
| 2.14 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ในกรณีโครงสร้างรับโมเมนต์ดัด (Vila Real และคณะ, 2003).....  | 23   |
| 2.15 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างมาตรฐาน ENV 1993-1-2 (1995) และแบบจำลองทาง<br>คณิตศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 400 °C (Real และคณะ, 2003).....       | 23   |
| 2.16 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างมาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002) และแบบจำลองทาง<br>คณิตศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 400 °C (Real และคณะ, 2003).....        | 24   |
| 3.1 ตัวอย่างเสาเหล็กขนาด H100x100x6x8 มม. ยาว 1.40 เมตร .....   | 25   |
| 3.2 ลักษณะเตาเผาทดสอบและการติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบ .....   | 28   |
| 3.3 ตำแหน่งอุปกรณ์เผาไหม้ภายในเตาเผาทดสอบ .....   | 28   |
| 3.4 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ตำแหน่ง .....  | 29   |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.5  | ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบ .....  | 29 |
| 3.6  | สภาวะการวัดเมื่อพิจารณาจากแรงปฏิกิริยา .....  | 30 |
| 3.7  | ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ (ก) ทั้ง 4 หน้าตัด (ข) บริเวณหน้าตัด A และ C<br>(ค) บริเวณหน้าตัด B และ D .....   | 31 |
| 3.8  | ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิมบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง.....   | 32 |
| 3.9  | สายอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ร้อยด้วยแผ่นเส้นใยเซรามิก .....  | 33 |
| 3.10 | ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการกระจัดเชิงเส้น .....  | 33 |
| 3.11 | ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง S1 เปรียบเทียบกับ<br>มาตรฐาน BS 476.....                     | 35 |
| 3.12 | ค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง S1.....  | 36 |
| 3.13 | ค่าอุณหภูมิที่วัดได้บนพื้นผิวชิ้นตัวอย่าง S1 (ก) บริเวณปลายปีกของหน้าตัด A<br>(ข) ค่าเฉลี่ยของแต่ละหน้าตัด.....       | 37 |
| 3.14 | ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบชิ้นตัวอย่าง S1.....  | 38 |
| 3.15 | ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง S2 เปรียบเทียบกับ<br>มาตรฐาน BS 476.....                     | 38 |
| 3.16 | ค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง S2.....  | 40 |
| 3.17 | ค่าอุณหภูมิที่วัดได้บนพื้นผิวชิ้นตัวอย่าง S2 (ก) บริเวณปลายปีกของหน้าตัด D<br>(ข) ค่าเฉลี่ยของแต่ละหน้าตัด.....       | 41 |
| 3.18 | ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบชิ้นตัวอย่าง S2.....  | 42 |
| 3.19 | ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของความร้อนตามมาตรฐาน BS 476 และ<br>เส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ .....         | 42 |
| 3.20 | ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N1 เปรียบเทียบกับ<br>เส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ ..... | 44 |
| 3.21 | ค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N1 .....   | 46 |
| 3.22 | ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของแต่ละหน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง N1.....   | 46 |
| 3.23 | ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N1 .....   | 47 |
| 3.24 | ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N2 เปรียบเทียบกับ<br>เส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ ..... | 49 |
| 3.25 | ค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N2 .....   | 49 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.26 | ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่แต่ละหน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง N2.....  | 51 |
| 3.27 | ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N2 .....  | 51 |
| 3.28 | ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N3 เปรียบเทียบกับ<br>เส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์.....                   | 53 |
| 3.29 | ค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N3 .....  | 55 |
| 3.30 | ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่แต่ละหน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง N3.....  | 55 |
| 3.31 | ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N3 .....  | 56 |
| 3.32 | ค่าการโก่งตัวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ (ก) แกนหลัก (ข) แกนรอง .....   | 59 |
| 3.33 | ลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบ .....  | 59 |
| 4.1  | กระบวนการทำงานโปรแกรม ABAQUS (ABAQUS, 2003) .....  | 60 |
| 4.2  | หน้าตัดเหล็กขนาด H100x100x6x8 มม.....  | 61 |
| 4.3  | การแปรผันของค่าความเครียดจากการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของเหล็ก .....  | 62 |
| 4.4  | การแปรผันของค่าความร้อนจำเพาะของเหล็กตามค่าอุณหภูมิ .....  | 63 |
| 4.5  | การแปรผันของค่าการนำความร้อนของเหล็กตามค่าอุณหภูมิ.....  | 64 |
| 4.6  | การแปรผันของกำลังครากของเหล็กตามค่าอุณหภูมิ.....   | 64 |
| 4.7  | ลักษณะการกระจายตัวของหน่วยแรงคงค้างบนหน้าตัดเหล็ก .....  | 65 |
| 4.8  | ตำแหน่งเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่หน้าตัด.....   | 68 |
| 4.9  | ตำแหน่งเปรียบเทียบผลลัพธ์ตามความยาว .....  | 68 |
| 4.10 | อัตราส่วนหน่วยแรงเฉลี่ย.....   | 70 |
| 4.11 | อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉลี่ย .....   | 70 |
| 4.12 | อัตราส่วนหน่วยแรงที่ชิ้นส่วนย่อยที่ตำแหน่งที่ 2 .....  | 71 |
| 4.13 | ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของแบบจำลองเลขที่ S1-1 และ N1-1 ถึง N1-7 .....   | 74 |
| 4.14 | แรงปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อได้รับความร้อนตามมาตรฐาน BS 476 ของเสาเหล็กหน้าตัด<br>H100X100X6X8 มม.....                                      | 76 |
| 4.15 | แรงปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อได้รับความร้อนตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (BFD) ของเสา<br>เหล็กหน้าตัด H100X100X6X8 มม.....            | 77 |
| 4.16 | ระยะเวลาเกิดแรงปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อได้รับความร้อนตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์<br>(BFD) ของเสาเหล็กหน้าตัด H100X100X6X8 มม..... | 77 |



|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.17 | ระยะเวลาเกิดแรงปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อได้รับความร้อนตามมาตรฐาน BS 476 ของเสาเหล็ก<br>หน้าตัด H100X100X6X8 มม.....                | 78 |
| 4.18 | ระยะเวลาเกิดการวิบัติเมื่อได้รับความร้อนตามมาตรฐาน BS 476 ของเสาเหล็กหน้าตัด<br>H100X100X6X8 มม.....                          | 78 |
| 4.19 | ระยะเวลาเกิดการวิบัติเมื่อได้รับความร้อนตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (BFD)<br>ของเสาเหล็กหน้าตัด H100X100X6X8 มม..... | 79 |
| 4.20 | ตัวอย่างการวิบัติของเสาเหล็กจากโปรแกรม ABAQUS (ขยายระยะโค้ง 10 เท่า) .....  | 79 |
| 4.21 | ลักษณะการนำความร้อนในแบบจำลอง N1-1 ที่เวลา 25 นาที.....   | 80 |
| 5.1  | แรงปฏิกิริยาของการเปรียบเทียบ C1 และ C2.....  | 81 |
| 5.2  | แรงปฏิกิริยาของการเปรียบเทียบ C3.....   | 82 |
| 5.3  | แรงปฏิกิริยาของการเปรียบเทียบ C4.....   | 82 |
| 5.4  | แรงปฏิกิริยาของการเปรียบเทียบ C5.....   | 82 |
| 5.5  | แรงปฏิกิริยาของเสาเหล็กที่ได้รับความร้อนในลักษณะที่แตกต่างกัน.....  | 83 |
| 5.6  | ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขีดจำกัดและอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก.....   | 84 |
| 5.7  | ลักษณะการโค้งตัวของเปรียบเทียบ C1 .....   | 86 |
| 5.8  | ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนความชะลูดที่ 500 °C.....  | 87 |
| 5.9  | ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนความชะลูด.....  | 90 |
| 6.1  | ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างเหล็กในกรณีเกิดเพลิงไหม้ .....   | 94 |
| 6.2  | อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาทดสอบเทียบกับเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (BFD).....  | 95 |
| 6.3  | ค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่ออกแบบตามข้อแนะนำ .....  | 95 |
| 6.4  | ลักษณะการโค้งตัวของชิ้นตัวอย่างที่ออกแบบตามข้อแนะนำ .....   | 96 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างเหล็กมีข้อจำกัดด้าน การสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง (Wang, 2002) วิธีการหนึ่งในการเพิ่มความสามารถในการทนต่อสภาวะอุณหภูมิสูงได้แก่ การหุ้มหรือการเคลือบผิวโครงสร้างเหล็ก โดยวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนเพื่อป้องกันมิให้ความร้อนถ่ายเทเข้าสู่เนื้อเหล็กโดยตรง วิธีการดังกล่าวส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างมากขึ้น เพิ่มขึ้นตอนและความยุ่งยากในการก่อสร้าง ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการวิจัยและพัฒนาองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กเพื่อลดการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้วัสดุหุ้มหรือเคลือบผิวเหล็ก (Kuo-Chen Yang, Hung-Hsin Lee and Olen Chan, 2005) แต่เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาจำกัดความร้อนที่ใช้ในการศึกษา คือศึกษาแต่เฉพาะความร้อนมาตรฐานเท่านั้น จึงมีแนวคิดใช้ความร้อนธรรมชาติมาศึกษาเพิ่มเติม

การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักตามแนวแกนของเสาเหล็กที่ปราศจากวัสดุเคลือบผิวป้องกันความร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง จึงมีความจำเป็นสำหรับการกำหนดแนวทางการทดสอบและออกแบบเสาเหล็กให้สามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักตามแนวแกน และลักษณะการวิบัติของเสาเหล็กที่ปราศจากวัสดุเคลือบผิวป้องกันความร้อน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง

1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง ได้แก่ อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก อัตราส่วนความชะลูด และลักษณะการให้ความร้อนต่อเสาเหล็ก เป็นต้น

1.2.3 เพื่อเสนอแนวทางการทดสอบและแนวทางการออกแบบเสาเหล็กสำหรับการใช้งานภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตของการศึกษาดังต่อไปนี้

1.3.1 เนื่องจากข้อจำกัดด้านขนาดและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของอุปกรณ์เตาเผาทดสอบจึงทำการทดสอบเฉพาะเสาเหล็กรูปพรรณ มาตรฐาน มอก. 1227-2539 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [สมอ], 2539) ขนาด H100x100x6x8 มม. ยาว 1.4 เมตร

1.3.2 ในการศึกษากำหนดให้ใช้ฐานรองรับแบบยึดแน่นที่ปลายทั้ง 2 ด้านของเสาเหล็ก และให้มีระยะเยื้องศูนย์กลางของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อเสาเหล็กเท่ากับ 5 มม.

1.3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงอาศัย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS Ver. 6.2

1.3.4 การพิจารณาสภาวะอุณหภูมิของเสาเหล็กที่เพิ่มสูงขึ้นตามความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดโดยมาตรฐาน ASTM E119 (American Society for Testing And Materials [ASTM], 2005) และลักษณะเพลิงไหม้ธรรมชาติ แบบ Barnett (2002) โดยพิจารณาค่าตัวประกอบรูปร่างเท่ากับ 0.3

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญของปัญหา รวมทั้งวัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา บทที่ 2 แสดงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 กล่าวถึงลักษณะขึ้นตัวอย่างทดสอบ การเตรียมขึ้นตัวอย่างทดสอบ การติดตั้งอุปกรณ์วัด และผลการทดสอบ บทที่ 4 อธิบายรายละเอียดวิธีการสร้างแบบจำลอง การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และผลการวิเคราะห์แบบจำลอง บทที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบ บทที่ 6 นำเสนอข้อแนะนำสำหรับการออกแบบ และบทที่ 7 สรุปผลการวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### การบททวนงานวิจัยที่ผ่านมา

#### 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเกิดเพลิงไหม้

สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นในการเกิดเพลิงไหม้ เป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างเหล็กเกิดการวิบัติ เนื่องจากการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลในขณะที่อุณหภูมิเนื้อเหล็กสูงขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.1 อย่างไรก็ตามการเกิดเพลิงไหม้แต่ละครั้งนั้นสภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นอาจมีลักษณะแตกต่างกัน เนื่องจากตัวแปรต่าง ๆ เช่น ชนิดและปริมาณของเชื้อเพลิง ปริมาณออกซิเจนและการหมุนเวียนของอากาศ เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักตามแนวแกนของเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง จึงมีความจำเป็นต้องเข้าใจลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการเกิดเพลิงไหม้ก่อน

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ (Wang, 2002)

| อุณหภูมิเหล็ก<br>(°C) | ตัวประกอบลดค่า เมื่อเทียบกับค่าหน่วยแรงที่จุดคราก ( $f_y$ )<br>หรือโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_a$ ) ที่อุณหภูมิ 20 °C |                 |                         |
|-----------------------|--|-----------------|-------------------------|
|                       | หน่วยแรงประสิทธิผล<br>ที่จุดคราก   | ขีดจำกัดสัดส่วน | ความชันช่วง<br>ยืดหยุ่น |
| 20                    | 1.000  | 1.000           | 1.000                   |
| 100                   | 1.000  | 1.000           | 1.000                   |
| 200                   | 1.000  | 0.807           | 0.900                   |
| 300                   | 1.000  | 0.613           | 0.800                   |
| 400                   | 1.000  | 0.420           | 0.700                   |
| 500                   | 0.780  | 0.360           | 0.600                   |
| 600                   | 0.470  | 0.180           | 0.310                   |
| 700                   | 0.230  | 0.075           | 0.130                   |
| 800                   | 0.110  | 0.050           | 0.090                   |
| 900                   | 0.060  | 0.038           | 0.068                   |
| 1000                  | 0.040  | 0.025           | 0.045                   |
| 1100                  | 0.020  | 0.013           | 0.023                   |
| 1200                  | 0.000  | 0.000           | 0.000                   |

### 2.1.1 ลักษณะการเกิดเพลิงไหม้

การเกิดเพลิงไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีชนิดหนึ่งซึ่งเกิดขึ้นได้โดยอาศัยองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ เชื้อเพลิงซึ่งอาจอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ออกซิเจนซึ่งการลุกไหม้จะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยปริมาณออกซิเจนอย่างน้อยร้อยละ 16 โดยปริมาตร (ในอากาศปกติมีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 21 โดยปริมาตร) และองค์ประกอบสุดท้ายคือ ความร้อน ซึ่งเป็นพลังงานที่จำเป็นในการเพิ่มอุณหภูมิเชื้อเพลิงให้ถึงจุดลุกไหม้

เพลิงไหม้สามารถแบ่งได้ 4 ชนิดตามลักษณะของเชื้อเพลิง (Jackson และ Robins, 1994) ได้แก่

2.1.1.1 เพลิงไหม้ชนิด A เป็นเพลิงไหม้แบบทั่วไป เชื้อเพลิงคือ ไม้ เสื้อผ้า กระดาษ และยาง เป็นต้น

2.1.1.2 เพลิงไหม้ชนิด B เชื้อเพลิงอยู่ในสถานะของเหลว ได้แก่ แก๊สโซลีน เคโรซีน สี และทินเนอร์ เป็นต้น

2.1.1.3 เพลิงไหม้ชนิด C เชื้อเพลิงคืออุปกรณ์ไฟฟ้า

2.1.1.4 เพลิงไหม้ชนิด D เชื้อเพลิงคือโลหะชนิดต่าง ๆ เช่น แมกนีเซียม ไททาเนียม โพแทสเซียม และโซเดียม เป็นต้น

### 2.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลามาตรฐาน

การทดสอบความสามารถในการทนไฟขององค์อาคารในห้องปฏิบัติการ ได้มีการกำหนดมาตรฐาน การควบคุมสภาวะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในอุปกรณ์เตาเผาทดสอบภายใต้สมมติฐานให้ความร้อนภายในเตาเผาผสมผสานกันอย่างสมบูรณ์และควบคุมค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการบันทึกโดยอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ (thermocouple) ภายในเตาเผา ทดสอบตามความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลามาตรฐาน โดยมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับระดับสากลได้แก่

2.1.2.1 มาตรฐาน ASTM E119 (ASTM, 2005) กำหนดค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลามาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 2.2 (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ก)



ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาตามมาตรฐาน ASTM E119 (ASTM, 2005)

| เวลา (นาทื)    | อุณหภูมิมาตรฐาน (°F) | อุณหภูมิมาตรฐาน (°C) |
|----------------|----------------------|----------------------|
| 5              | 1000                 | 538                  |
| 10             | 1300                 | 704                  |
| 30             | 1550                 | 843                  |
| 60             | 1700                 | 927                  |
| 120            | 1850                 | 1010                 |
| 240            | 2000                 | 1093                 |
| 480 และมากกว่า | 2300                 | 1260                 |

2.1.2.2 มาตรฐาน BS 476 (British Standard Institute [BSI], 1987) มีวิธีการกำหนดค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลามาตรฐานในรูปสมการ

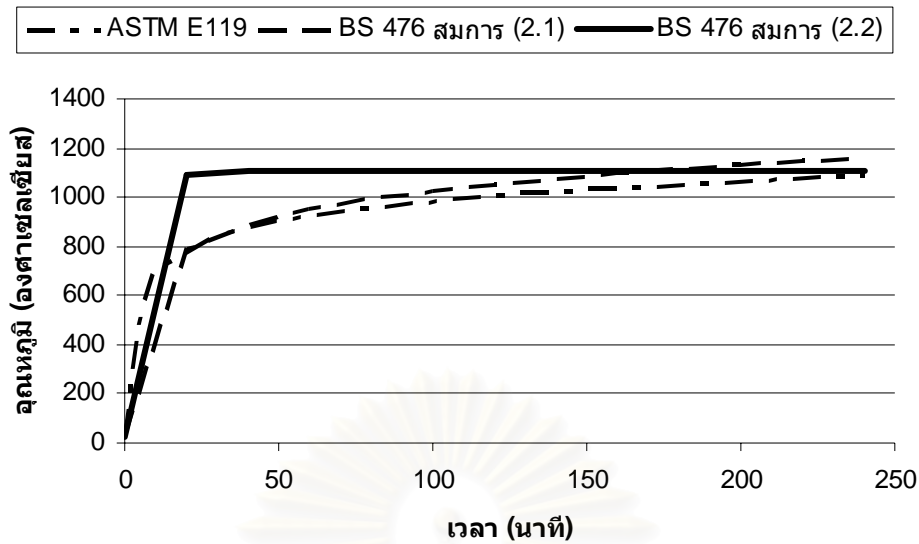
$$T_{fi} = T_a + 345 \log(8t + 1) \quad (2.1)$$

$$T_{fi} = T_a + 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (2.2)$$

โดยที่  $T_{fi}$  แทน อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผา หน่วยเป็นองศาเซลเซียส  
 $T_a$  แทน อุณหภูมิเริ่มต้นภายในเตาเผา หน่วยเป็นองศาเซลเซียส  
 $t$  แทน เวลา หน่วยเป็นนาที

สมการที่ (2.1) ใช้สำหรับการทดสอบทั่วไป และสมการที่ (2.2) ใช้สำหรับการทดสอบโครงสร้างแท่นขุดเจาะปิโตรเลียม รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของทั้ง 2 มาตรฐาน เมื่อกำหนดค่า  $T_a$  เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

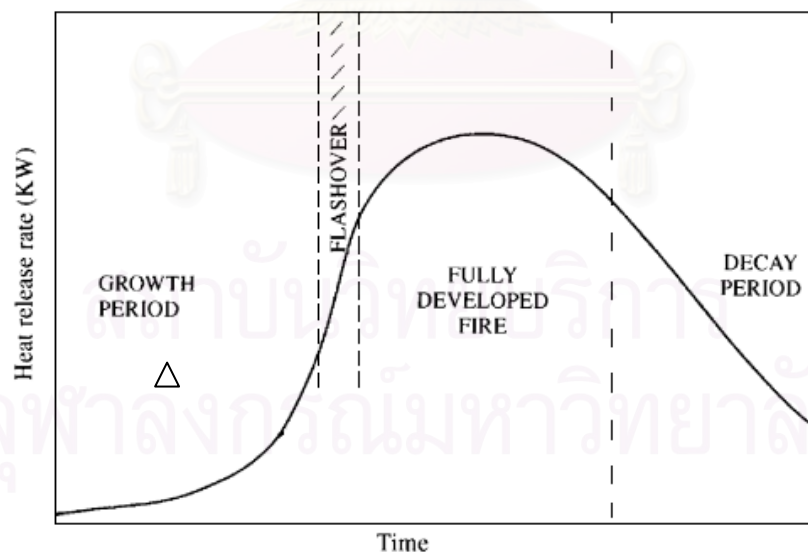
สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลามาตรฐานต่าง ๆ

### 2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเกิดเพลิงไหม้ธรรมชาติ

อัตราการปลดปล่อยความร้อนในการเกิดเพลิงไหม้ธรรมชาติ สามารถแบ่งออกเป็นช่วงเวลาต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 อัตราการปลดปล่อยความร้อนในการเกิดเพลิงไหม้ธรรมชาติ (Wang, 2002)

จุดลุกไหม้ (ignition  $\Delta$ ) เป็นจุดที่เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับความร้อนจนเกิดการลุกติดไฟ โดยภายหลังการลุกติดไฟเพลิงไหม้จะเข้าสู่ช่วงลุกลาม (growth) ซึ่งอัตราการลุกลามของเพลิงไหม้ขึ้นอยู่กับ ชนิดของเชื้อเพลิงและปริมาณออกซิเจน โดยเมื่ออัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงและออกซิเจนถึงจุดอิ่มตัวแล้ว เพลิงไหม้จะเข้าสู่ช่วงลุกลามโดยสมบูรณ์ (fully developed) ช่วงเวลาที่เพลิงไหม้เปลี่ยนแปลงจากช่วงลุกลามสู่ช่วงลุกลามโดยสมบูรณ์เรียกว่าจุดวายไฟ (flashover) สุดท้ายเมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาผลาญจนมีปริมาณลดลงเพลิงไหม้จะเข้าสู่ช่วงเพลิงมอด (decay)

จากพฤติกรรมการปลดปล่อยความร้อนในการเกิดเพลิงไหม้ธรรมชาติ ได้มีการพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเกิดเพลิงไหม้ธรรมชาติ ดังนี้

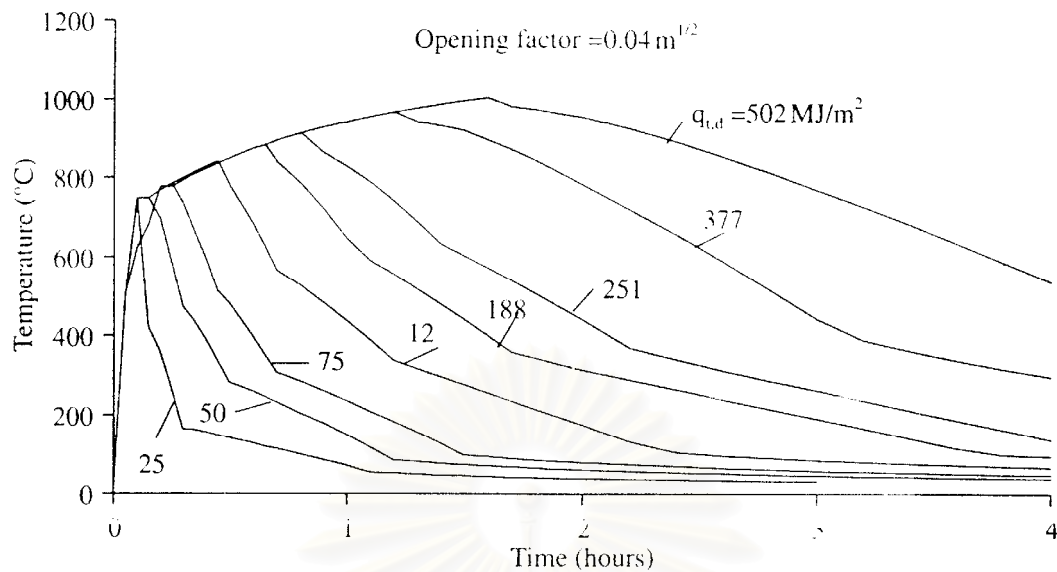
### 2.1.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาโดย Petterson, Magnusson และ Thor (1976)

Petterson และคณะ (1976) ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเกิดเพลิงไหม้ธรรมชาติ โดยกำหนดให้สภาวะการถ่ายเทอากาศเป็นตัวแปร และสามารถคำนวณอัตราการเผาไหม้จากสมการ

$$R = kA_v \sqrt{h} \quad (2.3)$$

|        |       |     |   |
|--------|-------|-----|---|
| โดยที่ | $R$   | แทน | อัตราการเผาไหม้ หน่วยเป็นกิโลกรัม/นาที  |
|        | $k$   | แทน | ค่าคงที่ระหว่าง 5 ถึง 6 โดยปกติใช้ค่าเท่ากับ 5.5 หน่วยเป็น<br>กิโลกรัม/นาที-เมตร <sup>5/2</sup> |
|        | $A_v$ | แทน | พื้นที่ช่องเปิดในแนวตั้ง หน่วยเป็นตารางเมตร   |
|        | $h$   | แทน | ความสูงของช่องเปิดในแนวตั้ง หน่วยเป็นเมตร   |

ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่คำนวณจากสมการที่ (2.3) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาโดย Petterson และคณะ (1976)

### 2.1.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาตามมาตรฐาน EN 1993-1-2

มาตรฐาน EN 1993-1-2 (European Committee for Standardization, 2000) ได้พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาโดย Petterson และคณะ (1976) ในรูปของสมการที่สะดวกในการใช้งาน ดังนี้

$$T_{fi} = 1325 \left( 1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*} \right) \quad (2.4)$$

$$T_{fi} = T_{fi,max} - 625(t^* - t_d^*) \quad \text{เมื่อ } t_d^* \leq 0.5 \quad (2.5)$$

$$T_{fi} = T_{fi,max} - 250(3 - t_d^*)(t^* - t_d^*) \quad \text{เมื่อ } 0.5 < t_d^* < 2.0 \quad (2.6)$$

$$T_{fi} = T_{fi,max} - 250(t^* - t_d^*) \quad \text{เมื่อ } t_d^* \geq 2.0 \quad (2.7)$$

$$t^* = t\Gamma \quad (2.8)$$

$$t_d^* = 0.00013 \frac{q_{i,d}\Gamma}{o} \quad (2.9)$$

$$q_{i,d} = \frac{q_{f,d}A_f}{A_t} \quad (2.10)$$

$$\Gamma = \left( \frac{o}{0.04} \right)^2 \left( \frac{1160}{b} \right)^2 \quad (2.11)$$

$$o = \frac{A_v \sqrt{h_v}}{A_t} \quad (2.12)$$

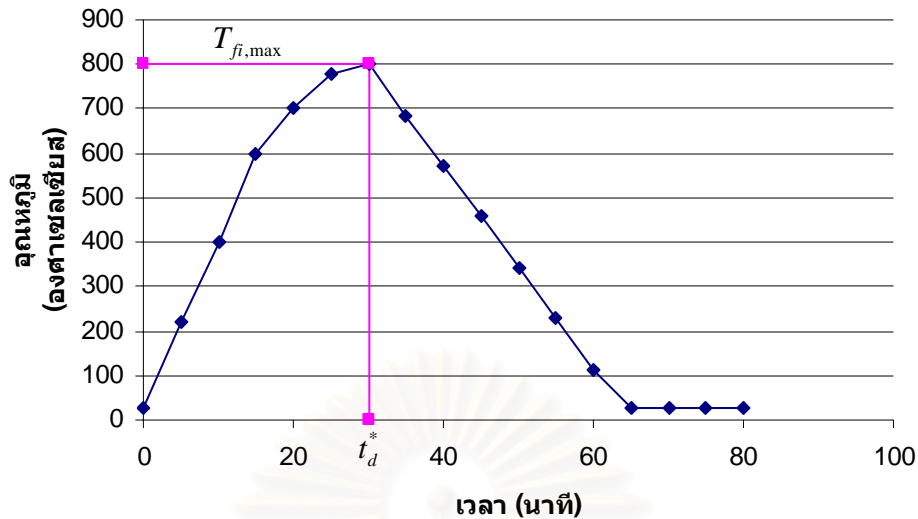
$$h_v = \frac{\sum A_{vi} h_{vi}}{\sum A_{vi}} \quad (2.13)$$

$$b = \sqrt{k\rho C} \quad (2.14)$$

|        |              |     |   |
|--------|--------------|-----|---|
| โดยที่ | $T_{fi}$     | แทน | อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผา หน่วยเป็นองศาเซลเซียส   |
|        | $T_{fi,max}$ | แทน | อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผา หน่วยเป็นองศาเซลเซียส   |
|        | $t$          | แทน | เวลา หน่วยเป็นชั่วโมง   |
|        | $t^*$        | แทน | เวลาปรับปรุงที่เกิดอุณหภูมิสูงสุด หน่วยเป็นชั่วโมง  |
|        | $t_d^*$      | แทน | เวลาปรับปรุง หน่วยเป็นชั่วโมง   |
|        | $q_{f,d}$    | แทน | ความหนาแน่นของความร้อนต่อพื้นที่พื้น หน่วยเป็น<br>เมกะจูลส์/ตารางเมตร                           |
|        | $q_{i,d}$    | แทน | ความหนาแน่นของความร้อนต่อพื้นที่ทั้งหมด หน่วยเป็น<br>เมกะจูลส์/ตารางเมตร                        |
|        | $o$          | แทน | ตัวประกอบการถ่ายเทอากาศ ปกติมีค่าเท่ากับ 0.04 หน่วยเป็นเมตร <sup>1/2</sup>                      |
|        | $b$          | แทน | คุณสมบัติด้านความร้อนรวมของวัสดุ<br>หน่วยจูลส์/เมตร <sup>2</sup> -วินาที <sup>1/2</sup> -เคลวิน |
|        | $A_v$        | แทน | พื้นที่ช่องเปิด หน่วยเป็นตารางเมตร  |
|        | $A_f$        | แทน | พื้นที่ผิวที่พื้น หน่วยเป็นตารางเมตร  |
|        | $A_r$        | แทน | พื้นที่ผิวทั้งหมด หน่วยเป็นตารางเมตร  |
|        | $h_v$        | แทน | ความสูงช่องเปิด หน่วยเป็นเมตร   |

สมการที่ (2.4) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในขณะเกิดเพลิงไหม้ในช่วงลุกลามและช่วงลุกลามโดยสมบูรณ์ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในช่วงเพลิงมอดออคัยสมการที่ (2.5) ถึง (2.7) รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเกิดเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน EN 1993-1-2



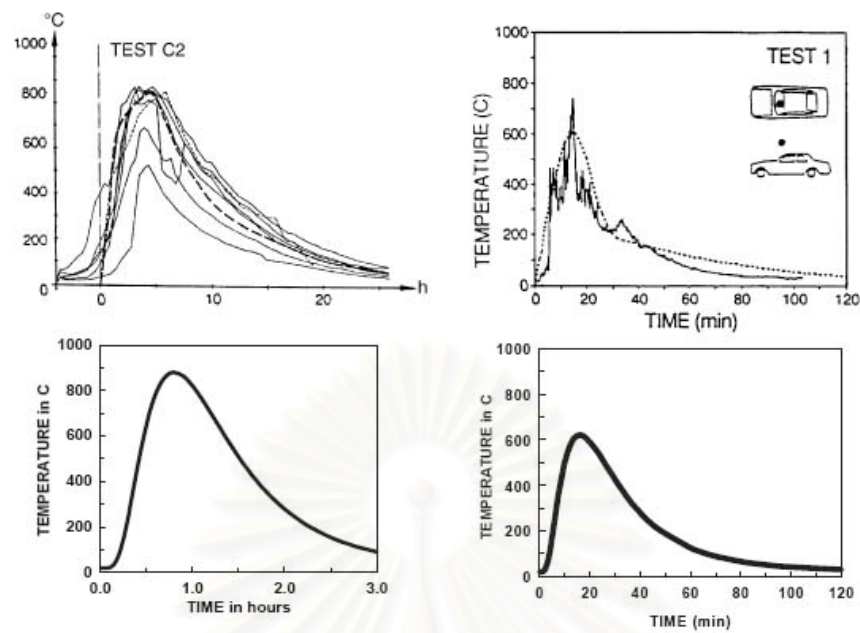


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเกิดเพลิงไหม้  
ตามมาตรฐาน EN 1993-1-2

### 2.1.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเกิดเพลิงไหม้โดย Barnett (2002)

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเกิดเพลิงไหม้โดย Barnett (2002) หรือ เส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เนตต์ (Barnett Fire Design Curve: BFD) มีลักษณะใกล้เคียงกับการเกิดเพลิงไหม้จริง โดยค่าความชันของเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ได้จากวิธีการของ Barnett (2002) มีความสัมพันธ์กับ ตัวประกอบช่องเปิดและตัวประกอบรูปร่าง

Barnett ได้ตั้งข้อสังเกตเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเกิดเพลิงไหม้ช่วงเพลิงมอดในรูปเชิงเส้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับข้อมูลการทดสอบของ Cardington (Kirby BR et al, 1994) Kawagoe (Kawagoe K, 1958) JFRO (Heselden AJM, 1967) EBS (Australian Participant as Laboratory, 1983) CIB (Thomas Ph และ Heselden AJM, 1972) และ CTICM (Arnault P, Ehm H และ Kruppa J, 1973) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาจากการทดสอบขนาดจริง 2 การทดสอบ รูปด้านบนแสดงข้อมูลจริงที่ได้จากการบันทึกค่าอุณหภูมิโดยอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งไว้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ส่วนรูปด้านล่างแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลจริงโดยกระบวนการทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ เส้นโค้งความสัมพันธ์ที่เป็นตัวแทนของข้อมูลจริงทั้งหมด



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาจากการทดสอบขนาดจริง (Barnett, 2002)

Barnett (2002) ได้ทำการเก็บข้อมูลจากการทดสอบขนาดจริงทั้งหมด 142 การทดสอบ แล้วใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาโดยเรียกว่า สมการของบาร์เน็ตต์ดังแสดงในสมการ

$$T = T_a + T_m e^{-z} \quad (2.15)$$

$$z = \frac{(\log t - \log t_m)^2}{s_c} \quad (2.16)$$

|        |       |     |  |
|--------|-------|-----|--|
| โดยที่ | $T$   | แทน | อุณหภูมิที่เวลาใด ๆ ( $t$ ) หน่วยเป็นองศาเซลเซียส                                      |
|        | $T_a$ | แทน | อุณหภูมิของอากาศขณะเริ่มต้น หน่วยเป็นองศาเซลเซียส                                      |
|        | $T_m$ | แทน | ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่สูงกว่าอุณหภูมิของอากาศขณะเริ่มต้น ( $T_a$ ) หน่วยเป็นองศาเซลเซียส |
|        | $t$   | แทน | เวลาจากจุดลุกไหม้ หน่วยเป็นนาที  |
|        | $t_m$ | แทน | เวลาที่เกิดค่าอุณหภูมิสูงสุด ( $T_m$ ) หน่วยเป็นนาที                                   |
|        | $s_c$ | แทน | ตัวประกอบรูปร่าง   |

Barnett (2002) ได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดสอบและสมการที่ (2.15) ซึ่งสามารถคำนวณค่าตัวแปรหลักดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าตัวแปรหลักในสมการของบาร์เน็ตต์จากการทดสอบจริง (Barnett, 2002)

| การทดลอง          | ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่สูงกว่าอุณหภูมิของอากาศขณะเริ่มต้น ( $T_m$ ) | เวลาที่เกิดค่าอุณหภูมิสูงสุด ( $t_m$ ) | ค่าเปลี่ยนตัวประกอบรูปร่าง ( $s_c$ ) |
|-------------------|--|--|--------------------------------------|
| Odeen test        | 860  | 48                                     | 0.7                                  |
| Car test          | 590  | 13                                     | 1.0                                  |
| Swedish test D2   | 850  | 21                                     | 1.6                                  |
| EBS test 22       | 930  | 18                                     | 1.8                                  |
| JFRO test R       | 800  | 10                                     | 1.8                                  |
| JFRO test Q       | 1070   | 13                                     | 1.7                                  |
| EBS test 9        | 1125   | 19                                     | 1.3                                  |
| EBS test 16       | 1030   | 11                                     | 1.2                                  |
| CIB/W14 test 2    | 960  | 15                                     | 0.3                                  |
| CIB/W14 test 3    | 980  | 20                                     | 1.2                                  |
| CTICM test 35     | 1120   | 14                                     | 1.7                                  |
| CTICM test 63     | 1242   | 9                                      | 1.6                                  |
| Cardington test 2 | 1100   | 29                                     | 0.8                                  |
| Cardington test 5 | 1160   | 39                                     | 1.6                                  |
| Cardington test 6 | 740  | 115                                    | 4.5                                  |
| Cardington test 7 | 1260   | 19                                     | 1.9                                  |

ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่สูงกว่าอุณหภูมิของอากาศขณะเริ่มต้น สามารถคำนวณได้จากสมการ (Law M และ O'brien, 1968)

$$T_m = \frac{6000(1 - e^{-0.1\eta})}{\eta^{0.5}(1 - e^{0.5\psi})} \quad (2.17)$$

$$\eta = \frac{1}{F_{O_2}} \quad (2.18)$$

โดยที่  $\eta$  แทน ส่วนกลับตัวประกอบช่องเปิด หน่วยเป็นเมตร<sup>1/2</sup>

$\psi$  แทน ความหนาแน่นของภาวะความร้อน เป็นหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเมตร

$F_{O_2}$  แทน ตัวประกอบช่องเปิด หน่วยเป็นเมตร<sup>3/2</sup>

ทั้งนี้ค่าที่คำนวณจากสมการที่ (2.17) ควรเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และค่าอุณหภูมิสูงสุดที่สูงกว่าอุณหภูมิของอากาศขณะเริ่มต้นไม่ควรเกิน 1200 องศาเซลเซียส (Barnett, 2002)

ค่าตัวประกอบรูปร่าง ( $s_c$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.19) และคำนวณค่าโดยประมาณได้จากสมการที่ (2.20) สำหรับห้องที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนและสมการที่ (2.21) สำหรับห้องที่มีฉนวนกันความร้อน

ค่าคงที่รูปร่าง ( $k_p$ ) สามารถคำนวณจากสมการที่ (2.22) และคำนวณค่าโดยประมาณได้จากสมการที่ (2.23)

$$s_c = ck_p \quad (2.19)$$

$$s_c = \frac{1}{(4F_{o_2} + 0.1)} \quad (2.20)$$

$$s_c = \frac{1}{(9.25F_{o_2} + 0.24)} \quad (2.21)$$

$$k_p = 0.18(1 - \exp(-0.036\eta)) \quad (2.22)$$

$$k_p = 148F_{o_2} + 3.8 \quad (2.23)$$

โดยที่  $c$  แทน ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 37 สำหรับห้องที่ไม่มีฉนวนกันความร้อน และ 16 สำหรับห้องที่มีฉนวนกันความร้อน

$k_p$  แทน ค่าคงที่รูปร่าง มีหน่วยเป็นกิโลกรัม/วินาที-เมตร<sup>5/2</sup>

## 2.2 ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเหล็กหน้าตัด H ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง

Kuo-Chen, Hung—Hsin และ Olan (2005) ได้ศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงที่ได้รับผลกระทบจากลักษณะทางกายภาพของเสา อันได้แก่ อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของปีกหรือเอว และอัตราส่วนความชะลูดของเสาเหล็ก ซึ่งมีผลต่อลักษณะการวิบัติโดยตรง

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการวิบัติของเสาเหล็กที่อุณหภูมิสูง ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ส่วนที่ 2 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเหล็กที่อุณหภูมิสูง อันเนื่องมาจากอัตราส่วนความชะลูดที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5

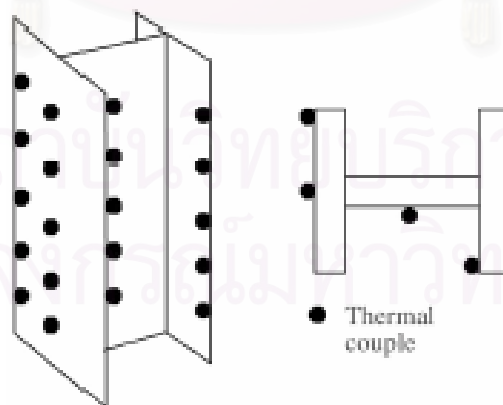
ตารางที่ 2.4 ขนาดและอุณหภูมิทดสอบสำหรับการทดสอบส่วนที่ 1 (Kuo-Chen และคณะ, 2005)

| ขนาดหน้าตัด (มม.) | ชนิดเหล็ก        | อุณหภูมิทดสอบ (°C)                   |
|-------------------|------------------|--------------------------------------|
| H300x300x10x15    | ASTM A572 Gr. 50 | อุณหภูมิปกติ 300 400 450 500 550 600 |
| H175x175x7.5x11   | ASTM A36         | อุณหภูมิปกติ 400 500 600             |
| H100x100x6x8      | ASTM A36         | อุณหภูมิปกติ 400 500 600             |

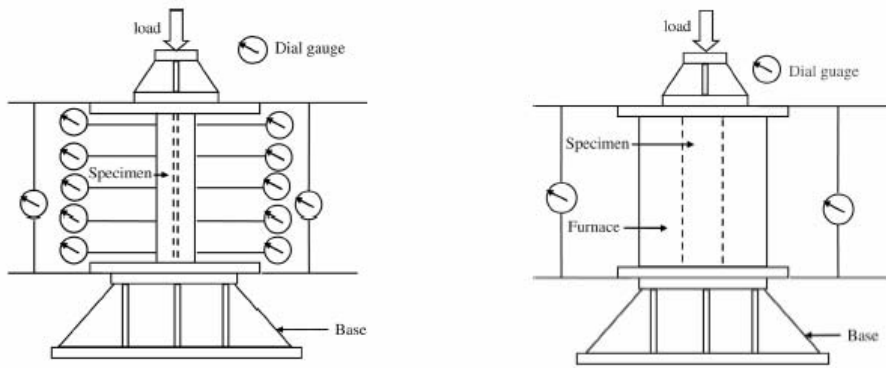
ตารางที่ 2.5 ขนาดและอุณหภูมิทดสอบสำหรับการทดสอบส่วนที่ 2 (Kuo-Chen และคณะ, 2005)

| ขนาดหน้าตัด (มม.) | ชนิดเหล็ก | อุณหภูมิทดสอบ (°C) |
|-------------------|-----------|--------------------|
| H100x50x6x8       | ASTM A36  | 500                |
| H100x60x6x8       | ASTM A36  | 500                |
| H100x70x6x8       | ASTM A36  | 500                |
| H100x80x6x8       | ASTM A36  | 500                |
| H100x100x6x8      | ASTM A36  | 500                |
| H125x125x6x8      | ASTM A36  | 500                |
| H175x175x7.5x10   | ASTM A36  | 500                |

ในระหว่างการทดสอบได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเสาเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.6 รวมทั้งทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการกระจัดในแนวแกนและการโก่งตัวด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยรูปซ้ายแสดงลักษณะการติดตั้งสำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิปกติ และรูปขวาแสดงลักษณะการติดตั้งสำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิสูง

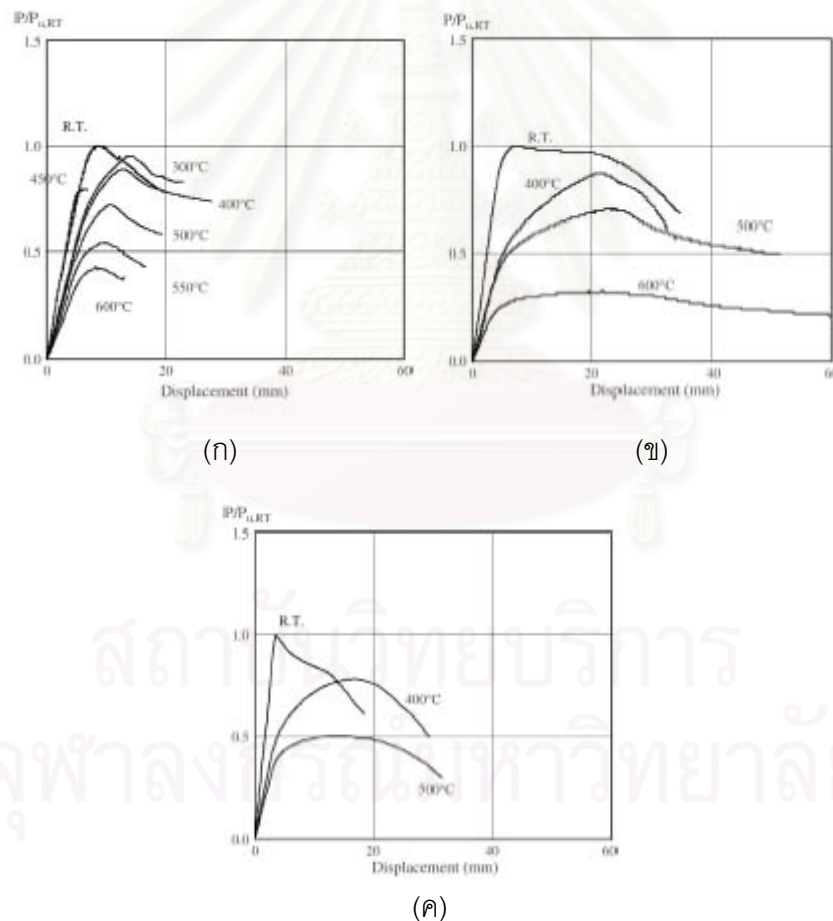


รูปที่ 2.6 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ (Kuo-Chen และคณะ, 2005)



รูปที่ 2.7 ลักษณะการติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบ (Kuo-Chen และคณะ, 2005)

ผลการทดสอบในรูปความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เสาเหล็กได้รับและระยะการโก่งตัวของเสาเหล็กในแนวแกนเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผลการทดสอบ (ก) เสาขนาด H300x300x10x15 มม.

(ข) เสาขนาด H175x175x7.5x11 มม.

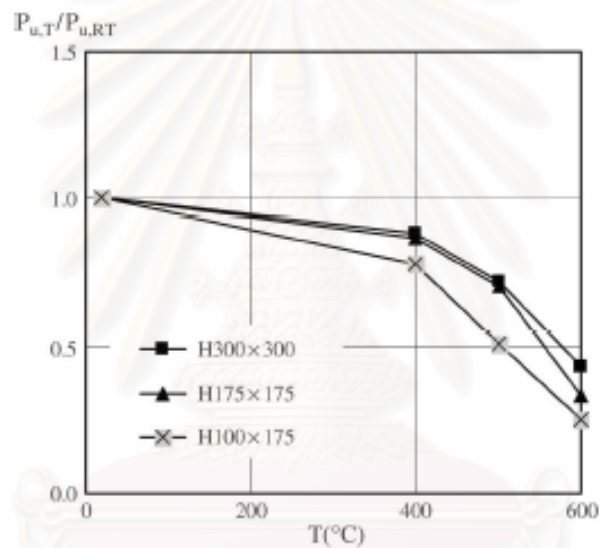
(ค) เสาขนาด H100x100x6x18 มม.

(Kuo-Chen และคณะ, 2005)



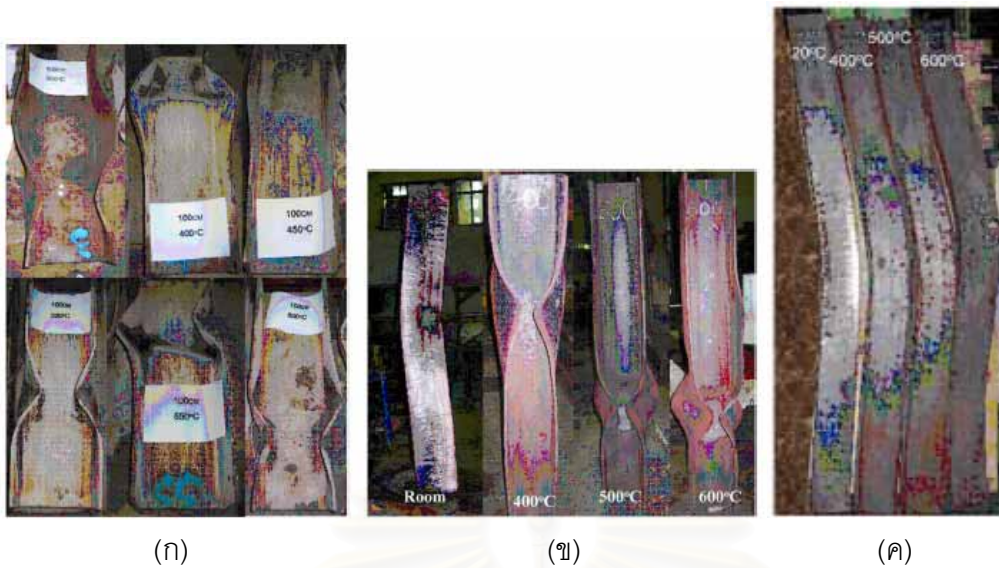
จากผลการทดสอบพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เสาเหล็กได้รับในแนวแกนลดลงเมื่อค่าอุณหภูมิสูงขึ้นและเมื่อพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักพบว่าเสาเหล็กที่มีค่าอัตราส่วนความชะลุดน้อยจะสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนักมากกว่าเสาเหล็กที่มีค่าอัตราส่วนความชะลุดมากภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.9

จากผลการทดสอบพบว่า มีเพียงเสาเหล็กหน้าตัด H175x175x7.5x11 มม. เท่านั้นที่ลักษณะการวิบัติที่อุณหภูมิสูงแตกต่างจากลักษณะการวิบัติที่อุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยที่อุณหภูมิต่ำเสาขนาด H175x175x7.5x11 มม. เกิดการวิบัติแบบโก่งเดาะทั้งชิ้นส่วน แต่ที่อุณหภูมิสูงเสาเหล็กกลับเกิดการวิบัติแบบโก่งเดาะเฉพาะที่ ซึ่ง Kuo-Chen และคณะ (2005) ได้อธิบายว่าเป็นผลมาจากหน่วยแรงค้ำในเสาเหล็ก



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความสามารถในการรับน้ำหนักและอุณหภูมิ (Kuo-Chen และคณะ, 2005)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



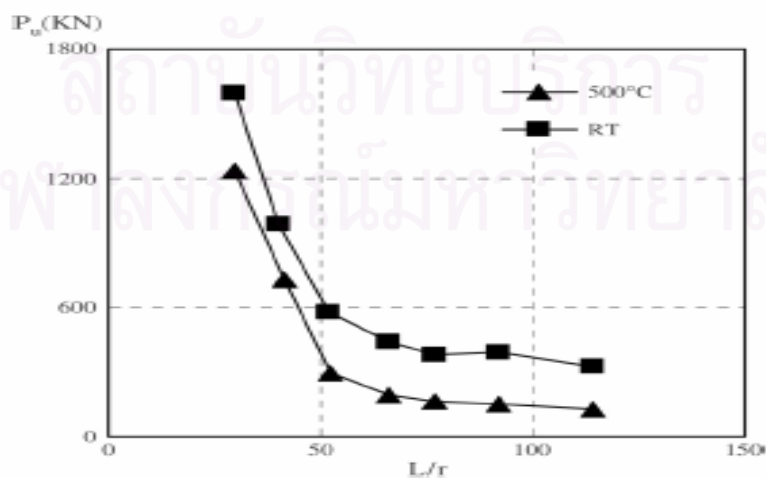
รูปที่ 2.10 ลักษณะการวิบัติ (ก) เสาขนาด H300x300x10x15 มม.

(ข) เสาขนาด H175x175x7.5x11 มม.

(ค) เสาขนาด H100x100x6x8 มม.

(Kuo-Chen และคณะ, 2005)

จากผลการทดสอบในส่วนที่ 2 พบว่าค่าอัตราส่วนความชะลุดมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และตารางที่ 2.6 ลักษณะการวิบัติของเสาเหล็กเปลี่ยนจากการวิบัติแบบโก่งเดาะทั้งชิ้นส่วนเป็นโก่งเดาะเฉพาะที่เมื่อค่าอัตราส่วนความชะลุดมีค่าน้อยกว่า 52 และเมื่อค่าอัตราส่วนความชะลุดมากกว่า 52 ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเหล็กจะไม่เปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชะลุดมากนัก



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเหล็ก และอัตราส่วนความชะลุด (Kuo-Chen และคณะ, 2005)

ตารางที่ 2.6 ผลการทดสอบส่วนที่ 2 (Kuo-Chen และคณะ, 2005)

| ขนาดเสาเหล็ก<br>(มม.) | อัตราส่วน<br>ความชะลูด | ลักษณะการวิบัติที่<br>500 °C | ลักษณะการวิบัติที่<br>อุณหภูมิปกติ |
|-----------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| H100x50x6x8           | 114                    | โก่งเดาะทั้งชิ้นส่วน         | โก่งเดาะทั้งชิ้นส่วน               |
| H100x60x6x8           | 92                     | โก่งเดาะทั้งชิ้นส่วน         | โก่งเดาะทั้งชิ้นส่วน               |
| H100x70x6x8           | 77                     | โก่งเดาะทั้งชิ้นส่วน         | โก่งเดาะทั้งชิ้นส่วน               |
| H100x80x6x8           | 66                     | โก่งเดาะทั้งชิ้นส่วน         | โก่งเดาะทั้งชิ้นส่วน               |
| H100x100x6x8          | 52                     | โก่งเดาะทั้งชิ้นส่วน         | โก่งเดาะทั้งชิ้นส่วน               |
| H125x125x6x8          | 40                     | โก่งเดาะเฉพาะที่             | โก่งเดาะทั้งชิ้นส่วน               |
| H175x175x7.5x11       | 30                     | โก่งเดาะเฉพาะที่             | โก่งเดาะทั้งชิ้นส่วน               |

### 2.3 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างเหล็กชนิด คาน-เสา ในการเกิดเพลิงไหม้กับมาตรฐาน ENV 1993-1-2 และ EN 1993-1-2

Real และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคานเหล็กที่รับแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัด ในการเกิดเพลิงไหม้ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และนำผลที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ENV 1993-1-2 (1995) และ EN 1993-1-2 (2002)

#### 2.3.1 มาตรฐาน ENV 1993-1-2 (1995)

มาตรฐาน ENV 1993-1-2 (1995) ได้กำหนดให้โครงสร้างที่รับแรงในแนวแกน ( $N_{fi,Ed}$ ) และโมเมนต์ดัด ( $M_{y,fi,Ed}$ ) ในการเกิดเพลิงไหม้ต้องออกแบบโครงสร้างตามสมการ

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\left(\frac{\chi_{min,fi}}{1.2}\right) Ak_{y,\theta} \left(\frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}\right)} + \frac{K_y M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} k_{y,\theta} \left(\frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}\right)} \leq 1 \quad (2.24)$$

$$K_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\left(\frac{\chi_{y,fi}}{1.2}\right) Ak_{y,\theta} f_y} \leq 1.5 \quad (2.25)$$

$$\mu_y = \bar{\lambda}_{y,\theta} (2\beta_{M,y} - 4) \left(\frac{W_{pl,y} - W_{el,y}}{W_{pl,y}}\right) \leq 0.9 \quad (2.26)$$

$$\bar{\lambda}_{y,\theta} = \bar{\lambda}_y \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (2.27)$$

$$\bar{\lambda}_{z,\theta} = \bar{\lambda}_z \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (2.28)$$

$$N_{fi,\theta,Rd} = \frac{Ak_{y,\theta}f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (2.29)$$

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = \frac{W_{pl,y}k_{y,\theta}f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (2.30)$$

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} \leq \frac{\left( 1 - \frac{N_{fi,Ed}}{\left( \frac{\chi_{min,fi}}{1.2} \right) N_{fi,\theta,Rd}} \right)}{\left( 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\left( \frac{\chi_{y,fi}}{1.2} \right) N_{fi,\theta,Rd} \gamma_{M,fi}} \right)} \quad (2.31)$$

|        |                   |     |  |
|--------|-------------------|-----|--|
| โดยที่ | $N_{fi,Ed}$       | แทน | แรงในแนวแกน  |
|        | $M_{y,fi,Ed}$     | แทน | โมเมนต์ดัด   |
|        | $\chi_{min,fi}$   | แทน | ตัวคูณลดค่าน้อยสุดของแกน yy หรือ zz  |
|        | $W_{pl,y}$        | แทน | โมดูลัสพลาสติกในแกน yy   |
|        | $k_{y,\theta}$    | แทน | ตัวคูณลดค่าของกำลังที่จุดครากที่อุณหภูมิ $\theta$                                |
|        | $\gamma_{M,fi}$   | แทน | สัมประสิทธิ์ที่ความปลอดภัยบางส่วนในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้<br>โดยปกติมีค่าเท่ากับ 1 |
|        | $\beta_{M,y}$     | แทน | โมเมนต์คงที่เทียบเท่าในแกน yy โดยปกติมีค่าเท่ากับ 1.1                            |
|        | $\bar{\lambda}_y$ | แทน | อัตราส่วนความชะลูดในแกน yy ที่อุณหภูมิปกติ                                       |
|        | $\bar{\lambda}_z$ | แทน | อัตราส่วนความชะลูดในแกน zz ที่อุณหภูมิปกติ                                       |
|        | $k_{E,\theta}$    | แทน | ตัวคูณลดค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นที่อุณหภูมิ $\theta$                                |
|        | $A$               | แทน | พื้นที่หน้าตัดเหล็ก  |
|        | $f_y$             | แทน | หน่วยแรงที่จุดคราก   |

ถ้าโครงสร้างเกิดการบิดตัวด้านข้าง มาตรฐาน ENV 1993-1-2 (1995)

กำหนดให้ออกแบบโครงสร้างตามสมการ

$$\frac{1.2N_{fi,Ed}\gamma_{M,fi}}{\chi_{z,fi}Ak_{y,\theta}f_y} + \frac{1.2K_{LT}M_{y,fi,Ed}\gamma_{M,fi}}{\chi_{LT}W_{pl,y}k_{y,\theta}f_y} \leq 1 \quad (2.32)$$

$$K_{LT} = 1 - \frac{1.2\mu_{LT}N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi}Ak_{y,\theta}f_y} \leq 1 \quad (2.33)$$

$$\mu_{LT} = 0.15\bar{\lambda}_{z,\theta}\beta_{M,LT} - 0.15 \leq 0.9 \quad (2.34)$$

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} \leq \frac{\chi_{LT} \left( 1 - \frac{N_{fi,Ed}}{\left( \frac{\chi_{z,fi}}{1.2} \right) N_{fi,\theta,Rd}} \right)}{1.2 \left( 1 - \frac{\mu_{LT}N_{fi,Ed}}{\left( \frac{\chi_{z,fi}}{1.2} \right) N_{fi,\theta,Rd}\gamma_{M,fi}} \right)} \quad (2.35)$$

โดยที่  $\beta_{M,LT}$  แทน โมเมนต์ดัดคดที่เทียบเท่าเนื่องจากการบิดตัวด้านข้าง โดยปกติมีค่าเท่ากับ 1.1

$\chi_{LT}$  แทน ตัวคูณลดค่าสำหรับการบิดตัวด้านข้าง

$\chi_{z,fi}$  แทน ตัวคูณลดค่าสำหรับการโก่งตัวในแกน z ในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้

### 2.3.2 มาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002)

มาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002) ได้กำหนดให้โครงสร้างที่รับแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัด ในการเกิดเพลิงไหม้ต้องออกแบบโครงสร้างตามสมการ

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min,fi}Ak_{y,\theta}\left(\frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}\right)} + \frac{K_y M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y}k_{y,\theta}\left(\frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}\right)} \leq 1 \quad (2.36)$$

$$K_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi}Ak_{y,\theta}\left(\frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}\right)} \leq 3 \quad (2.37)$$

$$\mu_y = (1.2\beta_{M,y} - 3)\bar{\lambda}_{y,\theta} + 0.44\beta_{M,y} - 0.29 \leq 0.8 \quad (2.38)$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_\theta + \sqrt{\phi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \quad (2.39)$$

$$\phi_\theta = \frac{1 + \alpha\bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2}{2} \quad (2.40)$$

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (2.41)$$

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} \leq \frac{\left(1 - \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min,fi} N_{fi,\theta,Rd}}\right)}{\left(1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} N_{fi,\theta,Rd}}\right)} \quad (2.42)$$

ถ้าโครงสร้างเกิดการบิดตัวด้านข้าง มาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002)

กำหนดให้ออกแบบโครงสร้างตามสมการ

$$\frac{N_{fi,Ed} \gamma_{M,fi}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} f_y} + \frac{K_{LT} M_{y,fi,Ed} \gamma_{M,fi}}{\chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{y,\theta} f_y} \leq 1 \quad (2.43)$$

$$K_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed} \gamma_{M,fi}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} f_y} \leq 1 \quad (2.44)$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{\phi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}} \quad (2.45)$$

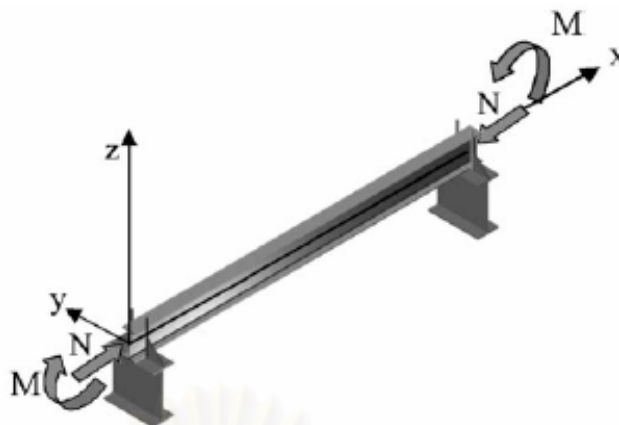
$$\phi_{LT,\theta} = \frac{1 + \alpha\bar{\lambda}_{LT,\theta} + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}{2} \quad (2.46)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (2.47)$$

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} \leq \frac{\chi_{LT} \left(1 - \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} N_{fi,\theta,Rd}}\right)}{\left(1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} N_{fi,\theta,Rd} \gamma_{M,fi}}\right)} \quad (2.48)$$

2.3.3 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มาตรฐาน ENV 1993-1-2 (1995) และมาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002)

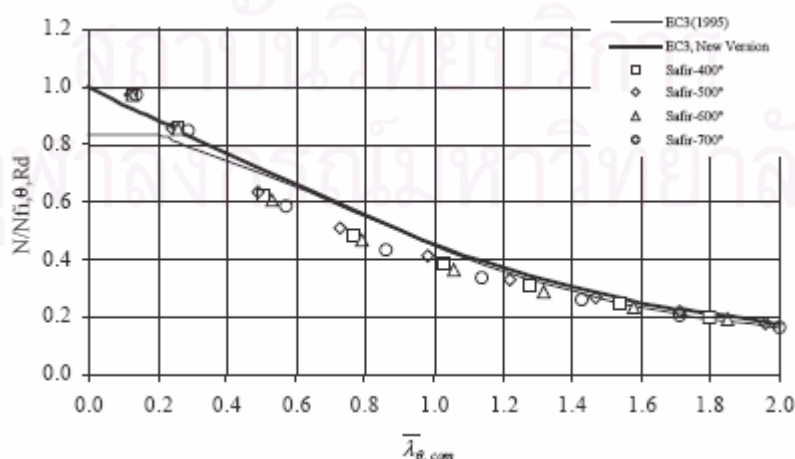




รูปที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างในแบบจำลอง (Real และคณะ, 2003)

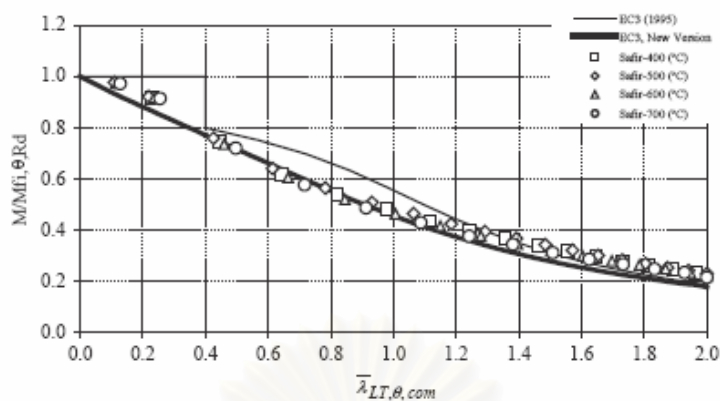
Real และคณะ (2003) ได้ใช้โปรแกรม SAFIR ซึ่งเป็นโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และถูกพัฒนาเพื่อใช้สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเพลิงไหม้โดยเฉพาะ ในการวิเคราะห์โครงสร้างเหล็กแบบ คาน-เสา โดยที่โครงสร้างรับโมเมนต์ดัดรอบแกนหลักและแรงอัดในแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 2.12

จากการศึกษาทั้งหมด 220 กรณี ซึ่งครอบคลุมความยาวตั้งแต่ 0.25 ถึง 4.5 เมตร พบว่ามาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002) มีลักษณะสอดคล้องกับผลลัพธ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มากกว่ามาตรฐาน ENV 1993-1-2 (1995) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 นอกจากนี้มาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002) ยังมีความปลอดภัยในการออกแบบมากกว่ามาตรฐาน ENV 1993-1-2 (1995) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และ 2.16 โดยที่บริเวณพื้นผิวคือผลลัพธ์ที่ได้จากมาตรฐาน ENV 1993-1-2 (1995) และมาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002) ตามลำดับและเครื่องหมาย “x” แทนผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง

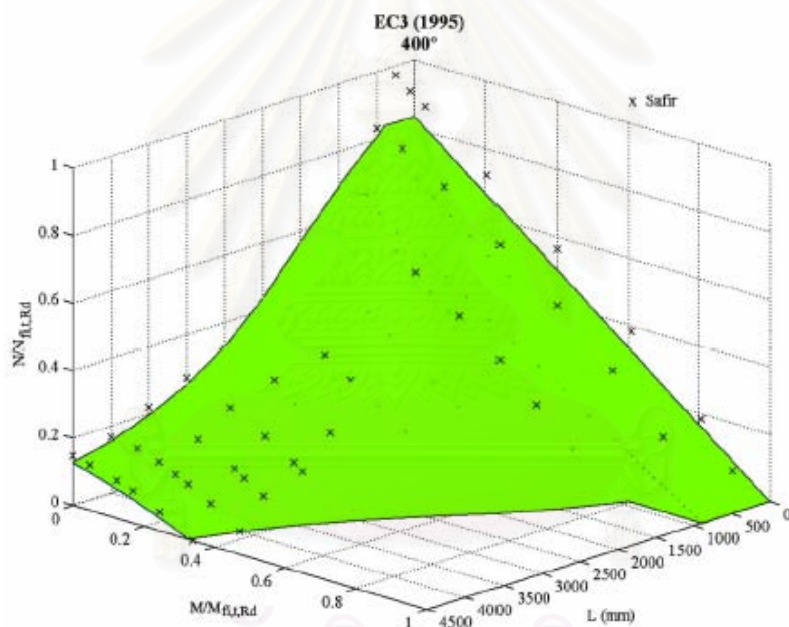


รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ในกรณีโครงสร้างรับแรงตามแนวแกน

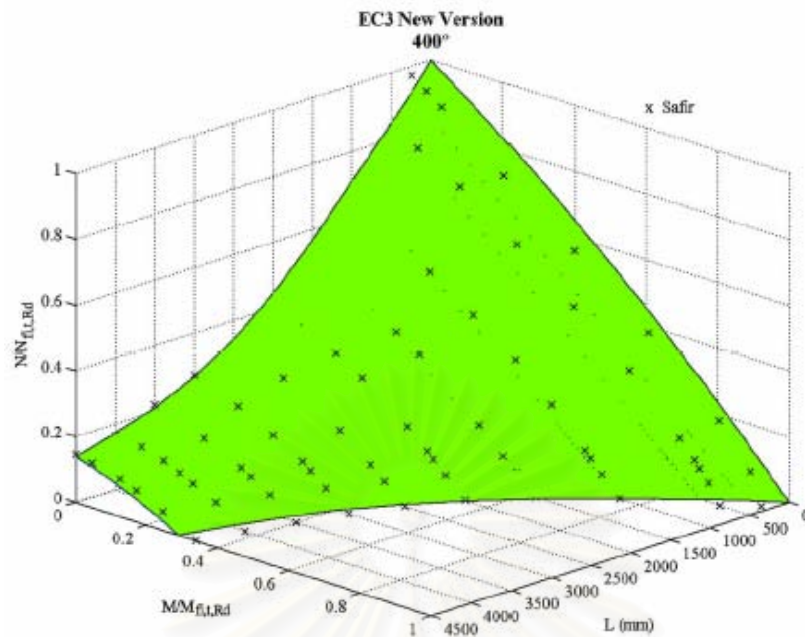
(Real และคณะ, 2003)



รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบผลลัพท์ในกรณีโครงสร้างรับโมเมนต์ดัด  
(Real และคณะ, 2003)



รูปที่ 2.15 การเปรียบเทียบผลลัพท์ระหว่างมาตรฐาน ENV 1993-1-2 (1995) และ  
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 400 °C (Real และคณะ, 2003)



รูปที่ 2.16 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างมาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 400 °C (Real และคณะ, 2003)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### การทดสอบเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

##### 3.1 ชิ้นตัวอย่างทดสอบและการเตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบ

ในการทดสอบเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกำหนดชิ้นตัวอย่างเป็นเสาเหล็กรีดร้อน ขนาดหน้าตัด H100x100x6x8 มม. เกรด SM400 ซึ่งมีคุณสมบัติเทียบเท่าเหล็กมาตรฐาน มอก. 1227-2538 ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตัวอย่างเสาเหล็กได้รับความอนุเคราะห์ จาก บริษัท เหล็กสยามยามาโตะ จำกัด โดยมีความยาวเริ่มต้น 3.2 เมตร แต่เนื่องจากข้อจำกัดด้าน ขนาดและความสามารถในการรับน้ำหนักของเตาเผาทดสอบ (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อ 3.2) จึงต้องตัดชิ้นตัวอย่างเสาเหล็กให้เหลือความยาว 1.4 เมตร นอกจากนี้เสาเหล็กที่ได้รับความ อนุเคราะห์ได้ถูกเคลือบสีกันสนิมที่ความหนาเฉลี่ยประมาณ 0.1 มิลลิเมตร จำนวนชิ้นตัวอย่างที่ ทำการทดสอบในการศึกษานี้ทั้งสิ้น 5 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างเสาเหล็กขนาด H100x100x6x8 มม. ยาว 1.40 เมตร

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเกรด SM400 (Siam Yamato Steel, 2006)

| เกรด  | คุณสมบัติเชิงกล  |               |   |                  |      |      |                                 |
|-------|--|---------------|---|------------------|------|------|---------------------------------|
|       | กำลังที่จุดคราก<br>นิวตัน/มม. <sup>2</sup><br>(กิโลกรัม/ซม. <sup>2</sup> ) |               | กำลังรับแรงดึง<br>นิวตัน/มม. <sup>2</sup><br>(กิโลกรัม/ซม. <sup>2</sup> ) | การยืดตัว<br>(%) |      |      | ค่าแรงกระแทก<br>ความหนา t (มม.) |
|       | ความหนา t (มม.)  |               |   | ความหนา t (มม.)  |      |      |                                 |
|       | t<16   | 16≤t≤40       | t<5   | 5≤t≤16           | t>16 | t>12 |                                 |
| SM400 | 245<br>(2,498)   | 235<br>(2396) | 400-510<br>(4,079-5200)   | 23               | 18   | 22   | 27                              |

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กเกรด SM400 (Siam Yamato Steel, 2006)

| เกรด  | ส่วนประกอบทางเคมี (%) |      |           |       |       |    |
|-------|-----------------------|------|-----------|-------|-------|----|
|       | C                     | Si   | Mn        | P     | S     | Cu |
| SM400 | 0.20                  | 0.35 | 0.60-1.40 | 0.035 | 0.035 | -  |

ตารางที่ 3.3 ลักษณะการทดสอบชิ้นตัวอย่าง

| ชิ้นตัวอย่าง | น้ำหนักบรรทุก<br>ในแนวแกน (T) | สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น  |
|--------------|-------------------------------|--|
| S1           | 7.0                           | มาตรฐาน BS 476 (BSI, 1987)   |
| S2           | 7.0                           | มาตรฐาน BS 476 (BSI, 1987)   |
| N1           | 7.0                           | เส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (Barnett, 2002) โดยกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับร้อยละ 100 ของค่าอุณหภูมิขีดจำกัด (limiting temperature) |
| N2           | 7.0                           | เส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (Barnett, 2002) โดยกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับร้อยละ 95 ของค่าอุณหภูมิขีดจำกัด (limiting temperature)  |
| N3           | 7.0                           | เส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (Barnett, 2002) โดยกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับร้อยละ 90 ของค่าอุณหภูมิขีดจำกัด (limiting temperature)  |

### 3.2 การติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบ

ในการศึกษานี้ อาศัยเตาเผาทดสอบ “Fire Tester II” ณ ศูนย์วิจัยเพื่อความปลอดภัยจากอัคคีภัย (Fire Safety Research Center, FSRC) ซึ่งมีความยาว 2.6 เมตร ความกว้าง 0.9 เมตร และความสูง 1.7 เมตร ผนังภายในเตาเผาประกอบด้วยชั้นอิฐทนไฟหนา 30 เซนติเมตรและบุผิวผนังด้วยเส้นใยเซรามิก ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การให้ความร้อนภายในเตาเผาอาศัยอุปกรณ์เผาไหม้ (burner) 6 ตำแหน่ง แบ่งเป็น 2 แถว แถวละ 3 ตำแหน่ง โดยแถวที่ 1 อยู่สูงจากระดับพื้นเตาเผา 0.20 เมตร และแถวที่ 2 อยู่สูงจากระดับพื้นเตาเผา 1.45 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 สำหรับฝาเตาเผาทดสอบ เป็นฝาเหล็กซึ่งประกอบด้วยแผ่นเส้นใยเซรามิกทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อน 2 ชั้น โดยมีช่องวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร สำหรับติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบ

ชิ้นตัวอย่างทดสอบถูกติดตั้งบนฐานรองรับแบบยึดแน่นทั้ง 2 ด้าน ที่บริเวณฐานรองรับ ด้านบนทำการติดตั้งอุปกรณ์ให้น้ำหนักบรรทุกไฮดรอลิก (hydraulic jack) ขนาด 50 ตันโดยให้มีระยะเยื้องศูนย์กลางในแนวแกนรอง 5 มม. และอุปกรณ์วัดค่าน้ำหนักบรรทุก (load cell) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 การกำหนดค่าน้ำหนักบรรทุกในแนวแกนที่กระทำต่อชิ้นตัวอย่างในรูปของค่าอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกพิจารณาจากความสามารถในการรับน้ำหนักของเตาเผาทดสอบ (สูงสุดไม่เกิน 50 ตัน) และค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของหน้าตัดเสาเหล็กซึ่งคำนวณจาก สมการ (3.1)

$$P_u = \phi_c F_{cr} A \quad (3.1)$$

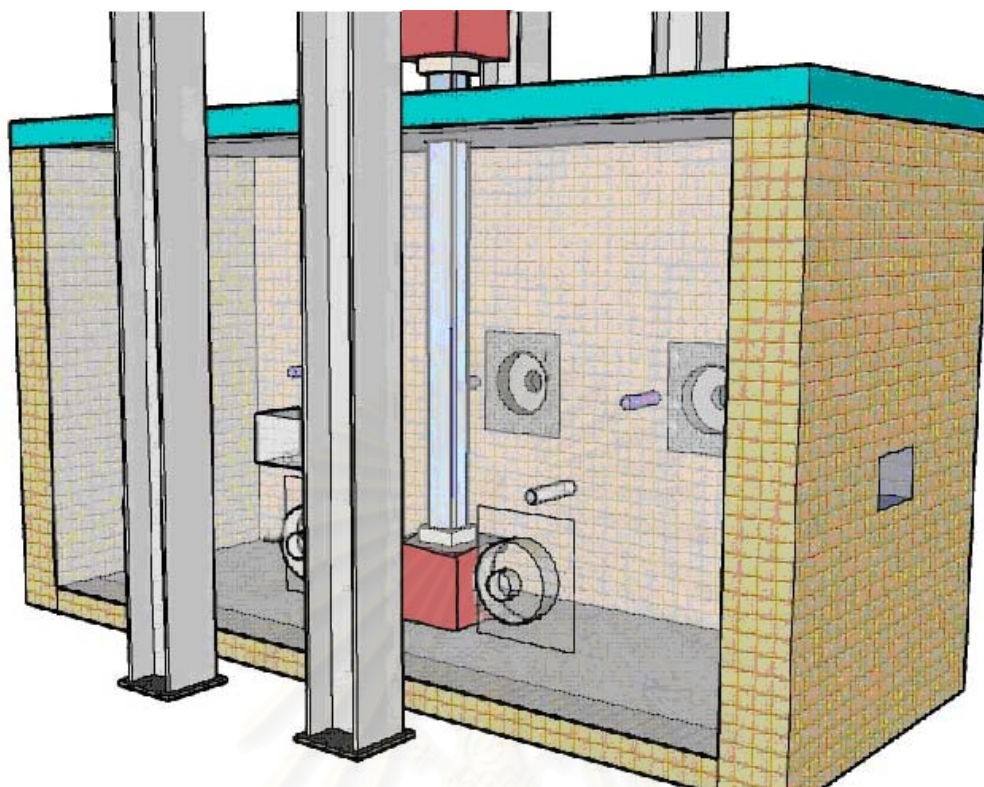
$$\lambda_c = \frac{kl}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (3.2)$$

$$F_{cr} = \left( \frac{0.877}{\lambda^2} \right) F_y \quad \text{เมื่อ} \quad \lambda_c \geq 1.5 \quad (3.3)$$

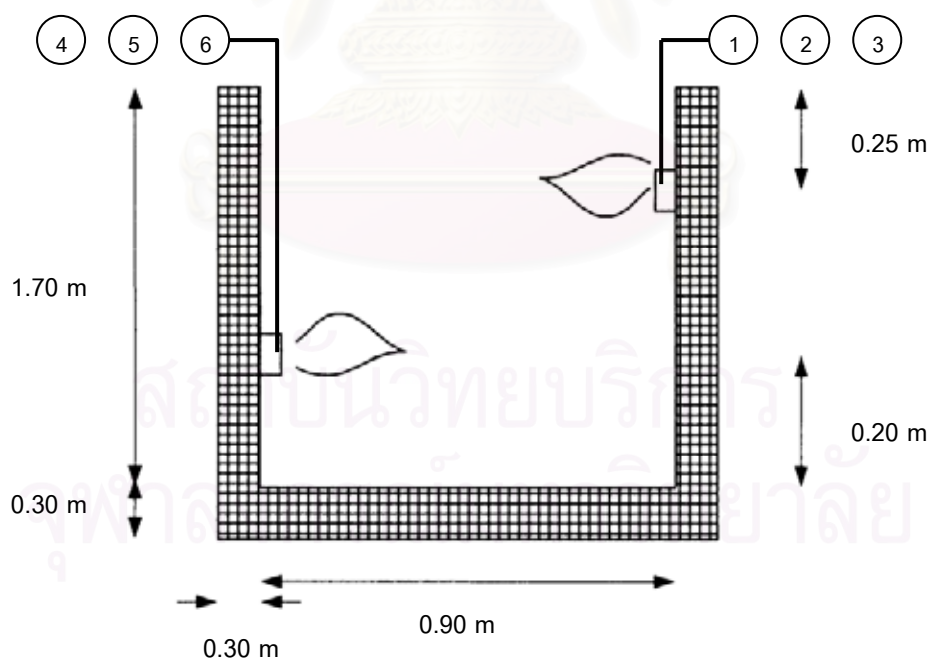
$$F_{cr} = (0.658)^{\lambda_c^2} F_y \quad \text{เมื่อ} \quad \lambda_c < 1.5 \quad (3.4)$$

|        |             |     |   |
|--------|-------------|-----|---|
| โดยที่ | $\lambda_c$ | แทน | พารามิเตอร์ความชะลูด                                  |
|        | $k$         | แทน | ตัวคูณความยาวประสิทธิผล                               |
|        | $l$         | แทน | ความยาวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ หน่วยเป็นเซนติเมตร        |
|        | $r$         | แทน | รัศมีไจเรชั่น หน่วยเป็นเซนติเมตร                      |
|        | $F_y$       | แทน | หน่วยแรงที่จุดคราก หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร |
|        | $E$         | แทน | โมดูลัสพลาสติก หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร     |
|        | $F_{cr}$    | แทน | หน่วยแรงวิกฤต หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร      |
|        | $P_u$       | แทน | น้ำหนักบรรทุกสูงสุด หน่วยเป็นกิโลกรัม                 |
|        | $\phi$      | แทน | ตัวประกอบความปลอดภัย มีค่าเท่ากับ 0.9                 |





รูปที่ 3.2 ลักษณะเตาเผาทดสอบและการติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งอุปกรณ์เผาไหม้ภายในเตาเผาทดสอบ



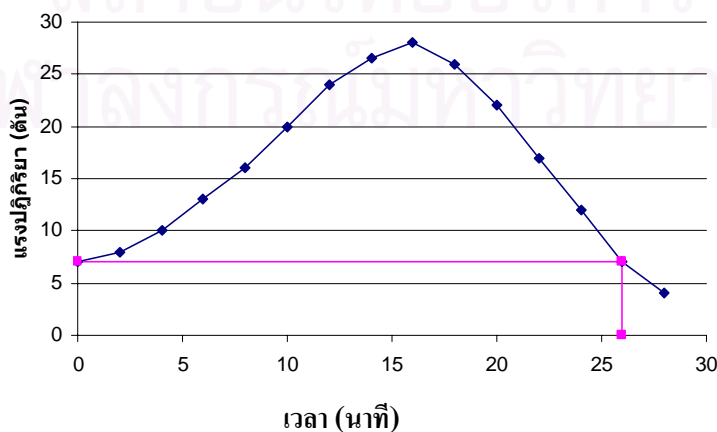
$$p = \left( \frac{A - B}{B} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

โดยที่  $p$  แทน ร้อยละความคลาดเคลื่อนสำหรับการควบคุมสภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น  
 $A$  แทน พื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาและเวลา  
 $B$  แทน พื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาตามมาตรฐาน BS 476 (BSI, 1987)

เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสำหรับการทดสอบที่ใช้เวลาไม่เกิน 10 นาที หรือภายในเวลา 10 นาที แรกของการทดสอบต้องไม่เกินร้อยละ 15 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสำหรับการทดสอบที่ใช้เวลาไม่เกิน 30 นาที หรือภายในเวลา 30 นาที แรกของการทดสอบต้องไม่เกินร้อยละ 10 และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสำหรับการทดสอบตั้งแต่นาทีที่ 30 จนถึงสิ้นสุดการทดสอบ ต้องไม่เกินร้อยละ 5

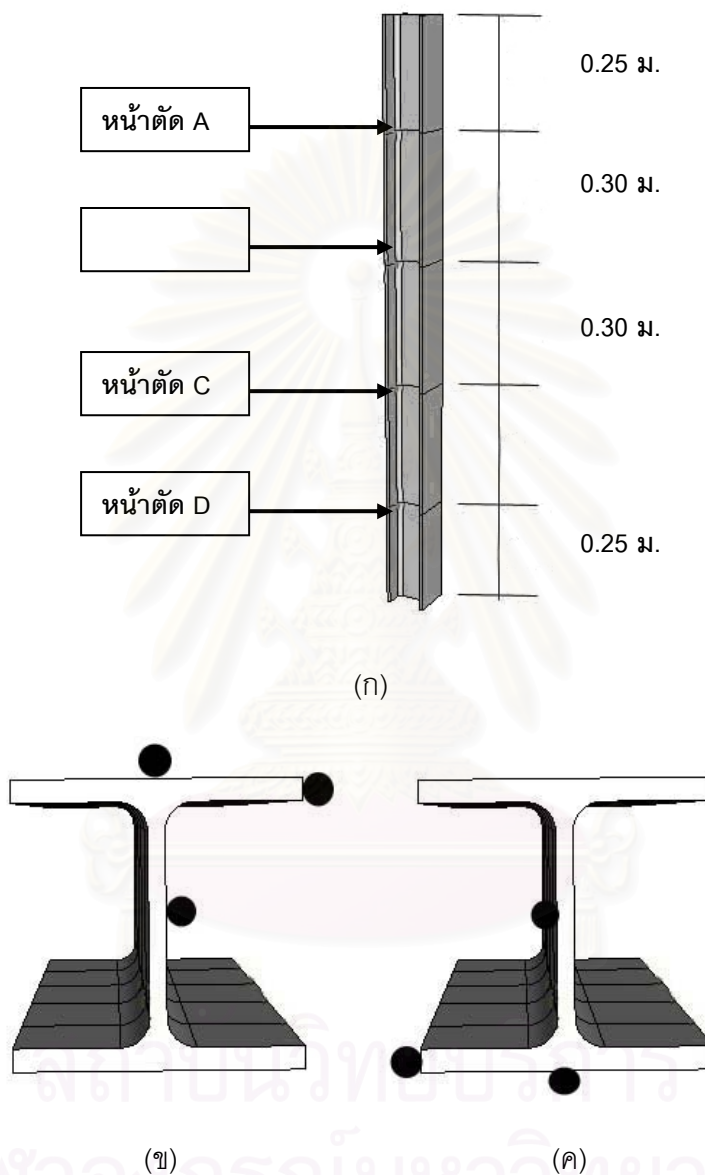
### 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์วัด

ในการพิจารณาการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบ เพื่อเป็นเกณฑ์สิ้นสุดการทดสอบนั้น อาศัยการพิจารณาค่าแรงปฏิกิริยา โดยจุดที่ค่าแรงปฏิกิริยาลดต่ำกว่าค่าแรงปฏิกิริยาเริ่มต้น คือเป็นจุดที่ชิ้นตัวอย่างเกิดการวิบัติ (Neves, 1995) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยการตรวจสอบการเพิ่มขึ้นของค่าแรงปฏิกิริยาจากการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างเสาเหล็ก อาศัยการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าน้ำหนักบรรทุก (load cell) ซึ่งมีระดับความละเอียดในการอ่านค่า 100 กิโลกรัม บริเวณฐานรองรับด้านบน และกำหนดความถี่ในการบันทึกค่าแรงปฏิกิริยาทุก 30 วินาที



รูปที่ 3.6 สภาวะการวิบัติเมื่อพิจารณาจากแรงปฏิกิริยา

สำหรับค่าอุณหภูมิขีดจำกัด (limiting temperature) ซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดบนชั้นตัวอย่างทดสอบขณะที่เกิดการวิบัติ (Wang, 2002) ทำการตรวจวัดโดยติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิตั้งขึ้นตัวอย่างทั้งสิ้น 4 หน้าตัด หน้าตัดละ 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ (ก) ทั้ง 4 หน้าตัด (ข) บริเวณหน้าตัด A และ C  
(ค) บริเวณหน้าตัด B และ D

ในการศึกษานี้ประยุกต์ใช้อุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิชนิด K ซึ่งมีช่วงการวัดอุณหภูมิระหว่าง  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1372\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 0.75 หรือ  $\pm 2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$

ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิจำเป็นต้องแยกสายบวกและสายลบออกจากกันและป้องกันไม่ให้สายทั้งสองสัมผัสกันในระหว่างการทดสอบ การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิทำโดยเชื่อมสายบวกและสายลบ ณ ตำแหน่งที่ต้องการวัดค่าอุณหภูมิโดยให้ปลายสายทั้งสองอยู่ห่างกันประมาณ 0.5 เซนติเมตร และทาอิพอกซีบริเวณตำแหน่งเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.8 สำหรับการป้องกันไม่ให้สายบวกและสายลบสัมผัสกันอาศัยการร้อยแผ่นเส้นใยเซรามิกตลอดช่วงความยาวของสายบวกและสายลบภายในเตาเผาทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.9

ในการตรวจสอบสภาพฐานรองรับด้านบนซึ่งกำหนดให้เป็นแบบยึดแน่นนั้น อาศัยการวัดค่าการกระจัดที่เกิดขึ้นบริเวณฐานรองรับโดยอุปกรณ์วัดค่าการกระจัดเชิงเส้น (linear variable differential transformer, LVDT) จำนวน 4 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เพื่อตรวจสอบค่าการกระจัดที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ

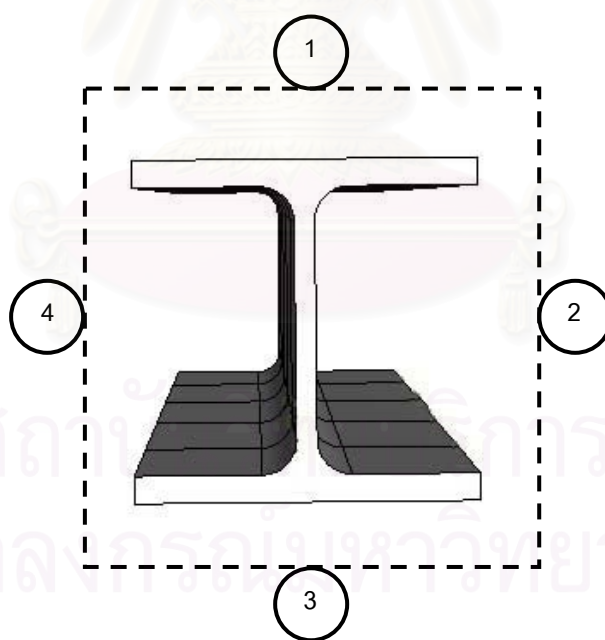


รูปที่ 3.8 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิมบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง





รูปที่ 3.9 สายอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ร้อยด้วยแผ่นเส้นใยเซรามิก



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการระจัดเชิงเส้น



### 3.4 ผลการทดสอบ

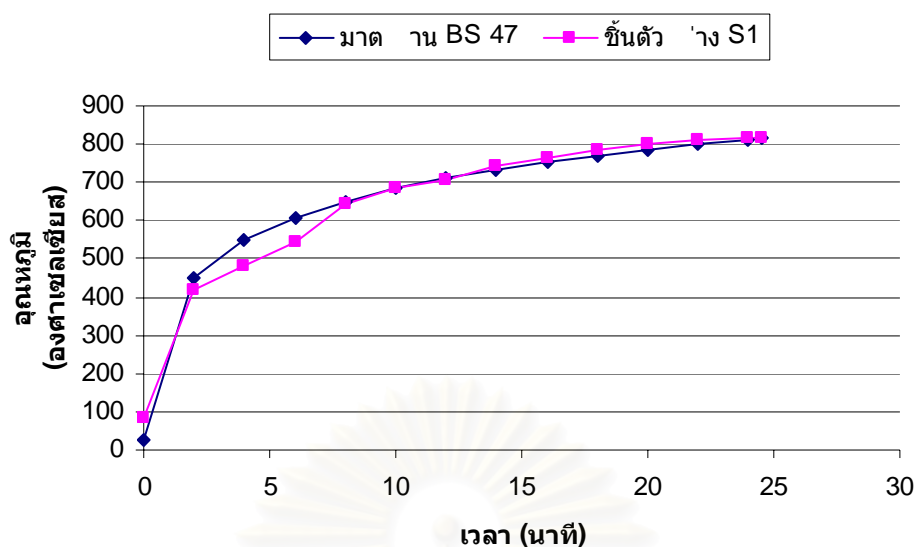
#### ชิ้นตัวอย่าง S1

ผลการทดสอบชิ้นตัวอย่าง S1 ซึ่งเป็นการทดสอบโดยควบคุมสภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ตามมาตรฐาน BS 476 (BSI, 1987) และให้นำหนักบรรทุกในแนวแกนเริ่มต้น 7,000 กิโลกรัม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาทดสอบที่แสดงในตารางที่ 3.4 ในช่วง 10 นาทีแรกมีค่าคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมิที่คำนวณตามสมการที่ (3.5) ร้อยละ 8.12 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน (ไม่เกินร้อยละ 15) และค่าคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 24 นาที 30 วินาทีแรกมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 1.93 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน (ไม่เกินร้อยละ 10) รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาทดสอบและเวลาในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง S1 เปรียบเทียบกับมาตรฐาน BS 476

ตารางที่ 3.4 อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบสำหรับชิ้นตัวอย่าง S1

| เวลา<br>(นาที) | อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบ (°C) |       |       |       |       |       |           |
|----------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|                | อุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ         |       |       |       |       |       | ค่าเฉลี่ย |
|                | 1                             | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |           |
| 0.0            | 88.0                          | 68.3  | 69.4  | 89.7  | 85.5  | 101.0 | 83.7      |
| 2.0            | 401.9                         | 417.1 | 288.2 | 474.4 | 415.0 | 510.3 | 417.8     |
| 4.0            | 461.7                         | 507.5 | 355.5 | 540.5 | 476.6 | 550.5 | 482.1     |
| 6.0            | 527.2                         | 572.7 | 415.3 | 601.4 | 539.2 | 602.8 | 543.1     |
| 8.0            | 647.2                         | 667.0 | 501.0 | 693.1 | 659.6 | 683.7 | 641.9     |
| 10.0           | 687.0                         | 708.4 | 553.4 | 730.5 | 712.6 | 722.5 | 685.7     |
| 12.0           | 752.0                         | 741.6 | 596.5 | 729.8 | 659.9 | 763.0 | 707.1     |
| 14.0           | 791.6                         | 771.9 | 646.0 | 759.5 | 694.9 | 797.9 | 743.6     |
| 16.0           | 813.6                         | 791.5 | 676.0 | 778.8 | 715.4 | 819.1 | 765.7     |
| 18.0           | 829.9                         | 805.1 | 700.4 | 792.0 | 733.3 | 839.5 | 783.4     |
| 20.0           | 846.3                         | 817.2 | 719.9 | 804.7 | 752.3 | 852.0 | 798.7     |
| 22.0           | 861.9                         | 827.9 | 739.7 | 815.6 | 765.2 | 864.5 | 812.5     |
| 24.0           | 860.9                         | 828.3 | 742.3 | 819.9 | 770.6 | 863.2 | 814.2     |
| 24.5           | 864.9                         | 829.1 | 739.2 | 820.0 | 769.6 | 865.9 | 814.8     |

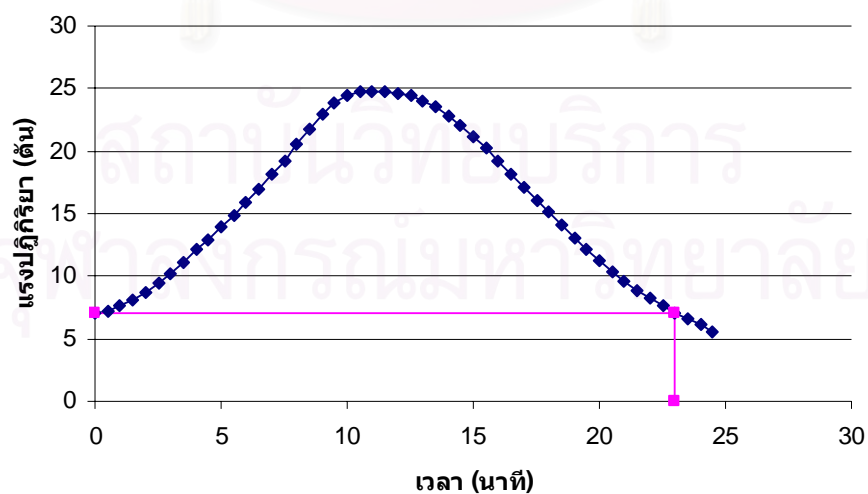


รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง S1  
เปรียบเทียบกับมาตรฐาน BS 476

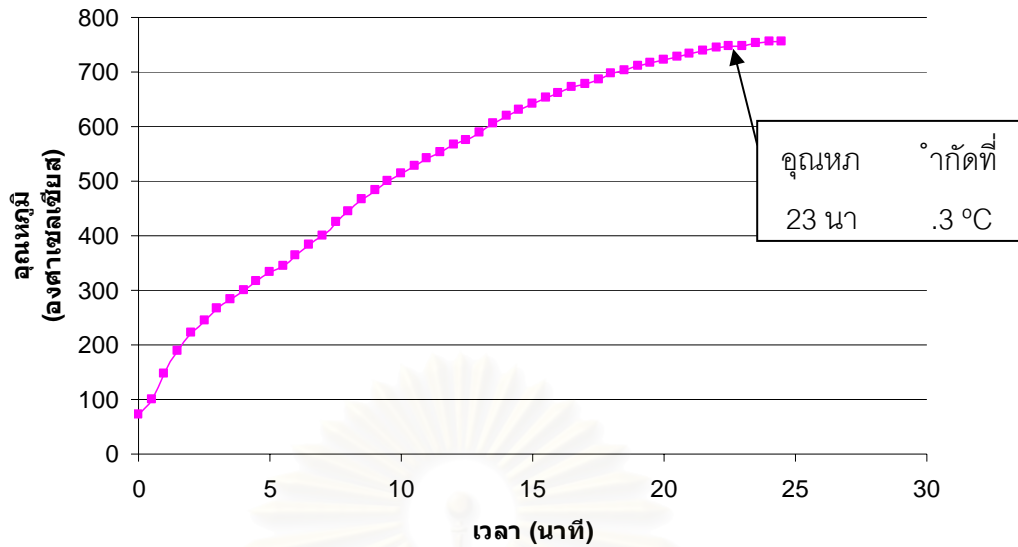
ในระหว่างการทดสอบอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างปีกและเอวของหน้าตัด C และอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิบริเวณเอวของหน้าตัด D เกิดชำรุด จึงไม่นำค่าอุณหภูมิที่บริเวณดังกล่าวมาพิจารณา และจากข้อมูลค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับที่แสดงในตารางที่ 3.5 พบว่าเกิดค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุด 24.8 ตัน ที่เวลา 11 นาที และชิ้นตัวอย่างเกิดการวิบัติที่เวลา 23 นาที (ดูรูปที่ 3.12 ประกอบ) ซึ่งที่เวลาดังกล่าวค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาเท่ากับ 811.1 °C และค่าอุณหภูมิขีดจำกัดเท่ากับ 748.3 °C บริเวณปลายปีกของหน้าตัด A ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ก) ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่วัดได้บนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง S1 ที่แต่ละหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ข)

ตารางที่ 3.5 แรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบขึ้นตัวอย่าง S1

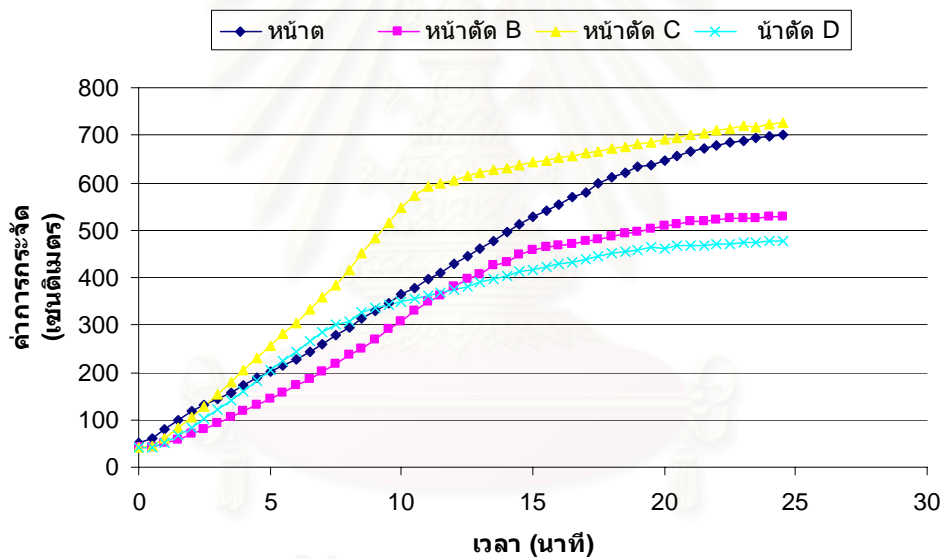
| เวลา (นาที) | แรงปฏิกิริยา (ตัน) | เวลา (นาที) | แรงปฏิกิริยา (ตัน) | เวลา (นาที) | แรงปฏิกิริยา (ตัน) |
|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|
| 0.0         | 7.0                | 8.5         | 21.8               | 17.0        | 17.1               |
| 0.5         | 7.2                | 9.0         | 22.9               | 17.5        | 16.1               |
| 1.0         | 7.6                | 9.5         | 23.9               | 18.0        | 15.1               |
| 1.5         | 8.1                | 10.0        | 24.4               | 18.5        | 14.1               |
| 2.0         | 8.7                | 10.5        | 24.8               | 19.0        | 13.0               |
| 2.5         | 9.4                | 11.0        | 24.8               | 19.5        | 12.2               |
| 3.0         | 10.2               | 11.5        | 24.7               | 20.0        | 11.2               |
| 3.5         | 11.1               | 12.0        | 24.6               | 20.5        | 10.4               |
| 4.0         | 12.1               | 12.5        | 24.4               | 21.0        | 9.6                |
| 4.5         | 12.9               | 13.0        | 24.0               | 21.5        | 8.9                |
| 5.0         | 13.9               | 13.5        | 23.5               | 22.0        | 8.3                |
| 5.5         | 14.9               | 14.0        | 22.8               | 22.5        | 7.7                |
| 6.0         | 15.9               | 14.5        | 22.0               | 23.0        | 7.1                |
| 6.5         | 17.0               | 15.0        | 21.2               | 23.5        | 6.6                |
| 7.0         | 18.1               | 15.5        | 20.3               | 24.0        | 6.2                |
| 7.5         | 19.2               | 16.0        | 19.2               | 24.5        | 5.6                |
| 8.0         | 20.6               | 16.5        | 18.2               |             |                    |



รูปที่ 3.12 ค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบขึ้นตัวอย่าง S1



(ก)

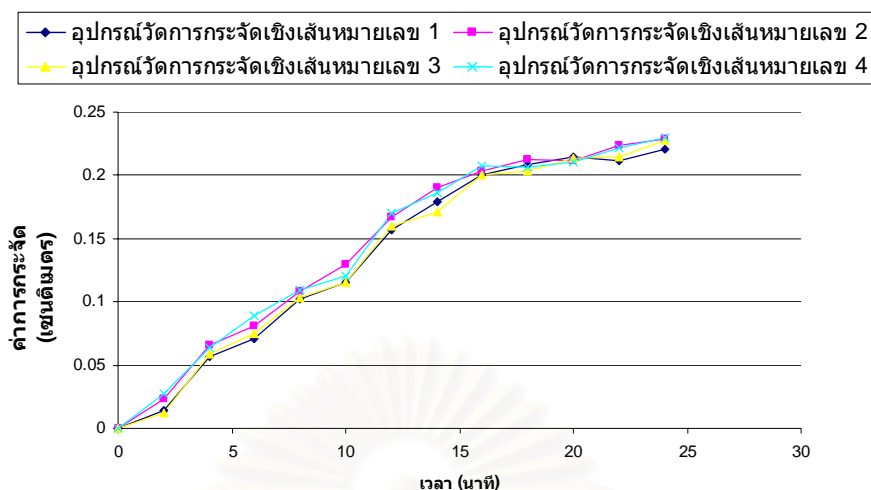


(ข)

รูปที่ 3.13 ค่าอุณหภูมิที่วัดได้บนพื้นผิวขึ้นตัวอย่าง S1 (ก) บริเวณปลายปีกของหน้าต A

(ข) ค่าเฉลี่ยที่แต่ละหน้าต

ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบขึ้นตัวอย่าง S1 เป็นดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการกระจัดที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบมีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.25 เซนติเมตร คิดเป็นความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 0.18 ของความยาวขึ้นตัวอย่าง

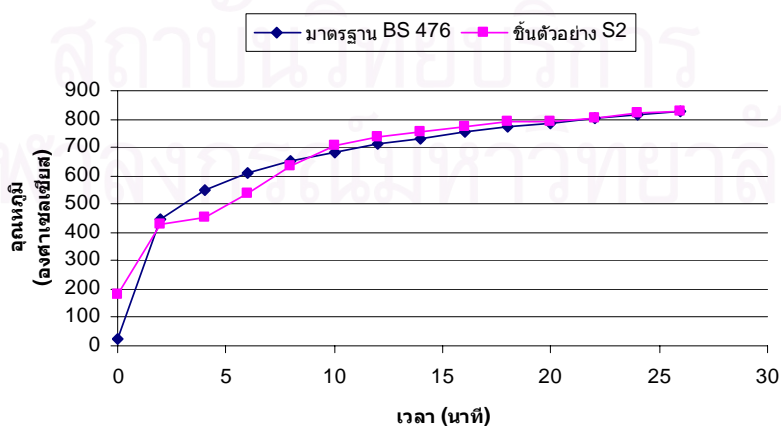


รูปที่ 3.14 ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบขึ้นตัวอย่าง S1

### ขึ้นตัวอย่าง S2

ผลการทดสอบขึ้นตัวอย่าง S2 ซึ่งเป็นการทดสอบโดยควบคุมสภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามมาตรฐาน BS 476 (BSI, 1987) และให้นำหนักบรรทุกในแนวแกนเริ่มต้น 7,000 กิโลกรัม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาทดสอบที่แสดงในตารางที่ 3.6 ในช่วง 10 นาทีแรกมีค่าคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมิที่คำนวณตามสมการที่ (3.5) ร้อยละ 5.91 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน (ไม่เกินร้อยละ 15) และค่าคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 26 นาทีแรกมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.5 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน (ไม่เกินร้อยละ 10) รูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาทดสอบและเวลาในการทดสอบขึ้นตัวอย่าง S2 เปรียบเทียบกับมาตรฐาน BS 476



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทดสอบขึ้นตัวอย่าง S2 เปรียบเทียบกับมาตรฐาน BS 476

ตารางที่ 3.6 อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบสำหรับชิ้นตัวอย่าง S2

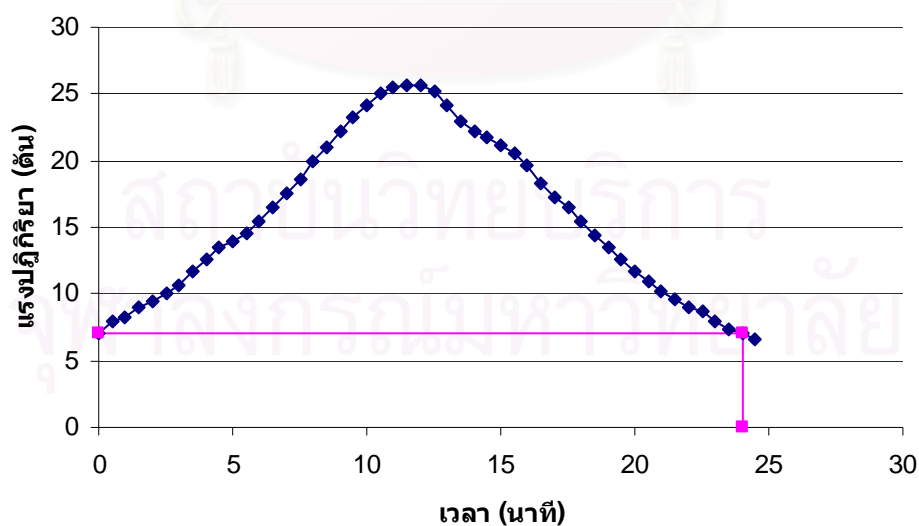
| เวลา<br>(นาที) | อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบ (°C) |       |       |       |       |       |           |
|----------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|                | อุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ         |       |       |       |       |       | ค่าเฉลี่ย |
|                | 1                             | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |           |
| 0.0            | 173.7                         | 161.2 | 140.6 | 213.5 | 184.3 | 216.9 | 181.7     |
| 2.0            | 433.4                         | 375.9 | 335.4 | 468.8 | 420.4 | 547.1 | 430.2     |
| 4.0            | 458.7                         | 424.6 | 348.6 | 492.1 | 446.0 | 561.6 | 455.3     |
| 6.0            | 564.4                         | 553.3 | 424.3 | 578.3 | 501.3 | 596.7 | 536.4     |
| 8.0            | 679.3                         | 671.0 | 516.8 | 671.5 | 587.1 | 686.2 | 635.3     |
| 10.0           | 752.3                         | 740.7 | 597.1 | 729.2 | 646.8 | 760.6 | 704.5     |
| 12.0           | 780.9                         | 767.2 | 644.1 | 755.8 | 685.0 | 785.9 | 736.5     |
| 14.0           | 793.1                         | 777.1 | 667.1 | 770.7 | 707.0 | 800.9 | 752.7     |
| 16.0           | 813.5                         | 796.2 | 691.4 | 786.0 | 721.2 | 818.8 | 771.2     |
| 18.0           | 825.9                         | 807.8 | 728.5 | 798.6 | 740.4 | 828.8 | 788.3     |
| 20.0           | 831.9                         | 808.5 | 721.6 | 802.8 | 748.0 | 835.8 | 791.4     |
| 22.0           | 842.0                         | 818.4 | 739.3 | 813.0 | 763.4 | 843.4 | 803.3     |
| 24.0           | 859.8                         | 833.8 | 761.5 | 828.6 | 777.9 | 863.4 | 820.8     |
| 26.0           | 872.7                         | 841.2 | 770.8 | 833.5 | 789.3 | 870.4 | 829.7     |

จากข้อมูลค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับที่แสดงในตารางที่ 3.7 พบว่าเกิดค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุด 25.7 ตัน ที่เวลา 11 นาที 30 วินาที และชิ้นตัวอย่างเกิดการวิบัติที่เวลา 24 นาที (ดูรูปที่ 3.16 ประกอบ) ซึ่งที่เวลาดังกล่าวค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาเท่ากับ 820.8 °C และค่าอุณหภูมิขีดจำกัดเท่ากับ 740.6 °C บริเวณปลายปีกของหน้าตัด D ดังแสดงในรูปที่ 3.17 (ก) ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่วัดได้บนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง S2 ที่แต่ละหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 3.17 (ข)

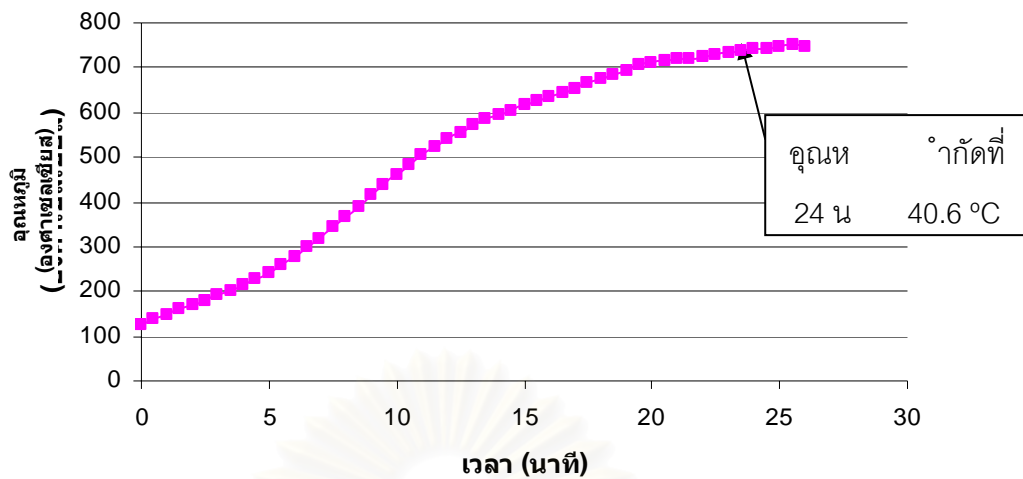


ตารางที่ 3.7 แรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง S2

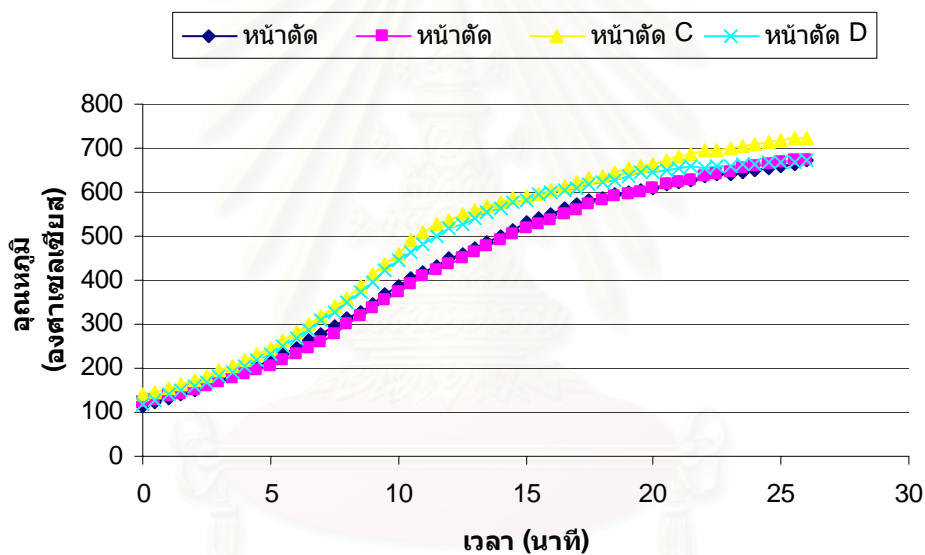
| เวลา<br>(นาที) | แรงปฏิกิริยา<br>(ตัน) | เวลา<br>(นาที) | แรงปฏิกิริยา<br>(ตัน) | เวลา<br>(นาที) | แรงปฏิกิริยา<br>(ตัน) |
|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| 0.0            | 7.0                   | 8.5            | 21.0                  | 17.0           | 17.3                  |
| 0.5            | 7.9                   | 9.0            | 22.2                  | 17.5           | 16.5                  |
| 1.0            | 8.3                   | 9.5            | 23.3                  | 18.0           | 15.5                  |
| 1.5            | 9.0                   | 10.0           | 24.2                  | 18.5           | 14.4                  |
| 2.0            | 9.5                   | 10.5           | 25.0                  | 19.0           | 13.5                  |
| 2.5            | 10.0                  | 11.0           | 25.5                  | 19.5           | 12.6                  |
| 3.0            | 10.7                  | 11.5           | 25.7                  | 20.0           | 11.7                  |
| 3.5            | 11.7                  | 12.0           | 25.6                  | 20.5           | 10.9                  |
| 4.0            | 12.6                  | 12.5           | 25.2                  | 21.0           | 10.2                  |
| 4.5            | 13.5                  | 13.0           | 24.2                  | 21.5           | 9.6                   |
| 5.0            | 14.0                  | 13.5           | 23.0                  | 22.0           | 9.0                   |
| 5.5            | 14.6                  | 14.0           | 22.2                  | 22.5           | 8.7                   |
| 6.0            | 15.4                  | 14.5           | 21.7                  | 23.0           | 7.9                   |
| 6.5            | 16.5                  | 15.0           | 21.2                  | 23.5           | 7.4                   |
| 7.0            | 17.5                  | 15.5           | 20.5                  | 24.0           | 7.0                   |
| 7.5            | 18.6                  | 16.0           | 19.7                  | 24.5           | 6.6                   |
| 8.0            | 19.9                  | 16.5           | 18.3                  | 25.0           | 6.2                   |



รูปที่ 3.16 ค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง S2



(ก)

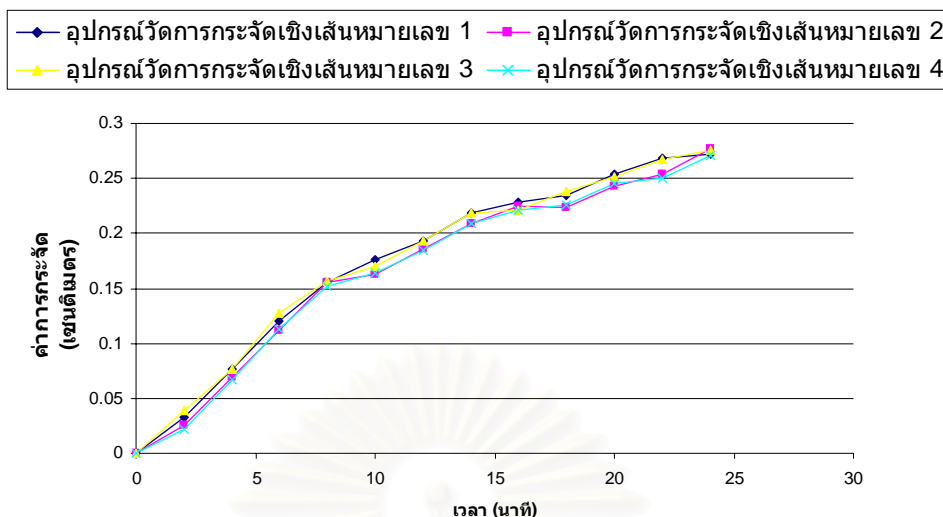


(ข)

รูปที่ 3.17 ค่าอุณหภูมิที่วัดได้บนพื้นผิวขึ้นตัวอย่าง S2 (ก) บริเวณปลายปีกของหน้าตัด D

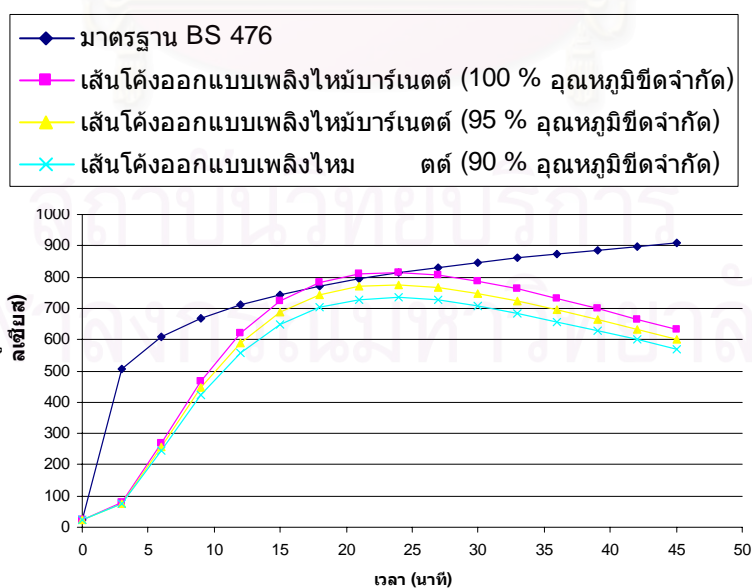
(ข) ค่าเฉลี่ยที่แต่ละหน้าตัด

ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบขึ้นตัวอย่าง S2 เป็นดังแสดงในรูปที่ 3.18 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการกระจัดที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบมีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.3 เซนติเมตร คิดเป็นความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 0.22 ของความยาวขึ้นตัวอย่าง



รูปที่ 3.18 ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบขึ้นตัวอย่าง S2

จากการทดสอบขึ้นตัวอย่าง S1 และ S2 สามารถคำนวณค่าอุณหภูมิขีดจำกัดเฉลี่ยเท่ากับ  $744.5^{\circ}\text{C}$  เวลาเฉลี่ย 23.5 นาที ในขณะที่ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผามีค่าเท่ากับ  $816^{\circ}\text{C}$  เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ ตามสมการที่ (2.15) โดยกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุด ( $T_m$ ) ที่ 90% 95% และ 100% ของค่าอุณหภูมิขีดจำกัด ( $744.5^{\circ}\text{C}$ ) และเวลาเกิดค่าอุณหภูมิสูงสุด ( $t_m$ ) 23.5 นาที จะได้ค่าอุณหภูมิตามตารางที่ 3.8 รูปที่ 3.19 แสดงระหว่างอุณหภูมิและเวลาของความร้อนตามมาตรฐาน BS 476 และเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของความร้อนตามมาตรฐาน BS 476 และเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์

ตารางที่ 3.8 ค่าอุณหภูมิตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (Barnett,2002)

| เวลา<br>(นาที) | อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบ (°C)      |                                   |                                   |
|----------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                | ร้อยละ 100 ของ<br>อุณหภูมิขีดจำกัด | ร้อยละ 95 ของ<br>อุณหภูมิขีดจำกัด | ร้อยละ 90 ของ<br>อุณหภูมิขีดจำกัด |
| 0.0            | 25.0                               | 25.0                              | 25.0                              |
| 3.0            | 80.0                               | 77.0                              | 74.0                              |
| 6.0            | 270.0                              | 257.0                             | 245.0                             |
| 9.0            | 468.0                              | 445.0                             | 422.0                             |
| 12.0           | 620.0                              | 590.0                             | 559.0                             |
| 15.0           | 722.0                              | 686.0                             | 650.0                             |
| 18.0           | 781.0                              | 742.0                             | 703.0                             |
| 21.0           | 810.0                              | 769.0                             | 729.0                             |
| 24.0           | 816.0                              | 775.0                             | 734.0                             |
| 27.0           | 806.0                              | 766.0                             | 726.0                             |
| 30.0           | 787.0                              | 748.0                             | 708.0                             |
| 33.0           | 761.0                              | 723.0                             | 685.0                             |
| 36.0           | 730.0                              | 694.0                             | 658.0                             |
| 39.0           | 698.0                              | 663.0                             | 629.0                             |
| 42.0           | 665.0                              | 632.0                             | 599.0                             |
| 45.0           | 632.0                              | 600.0                             | 569.0                             |

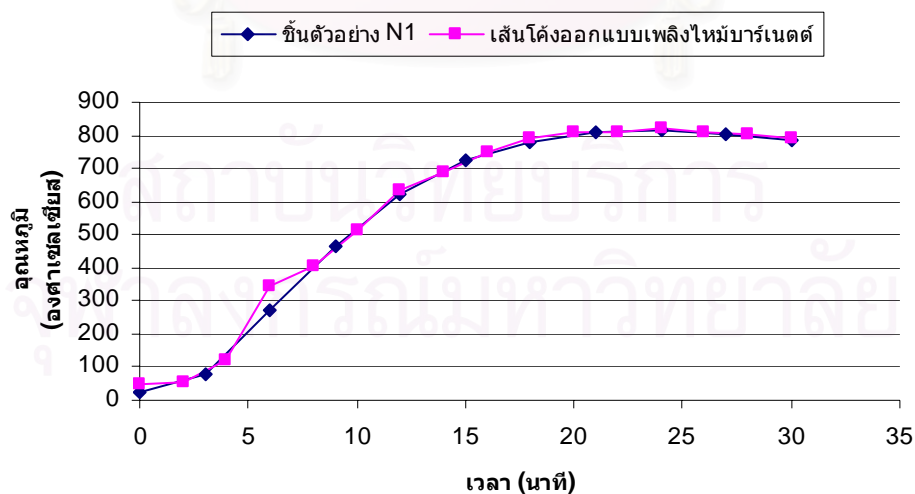
#### ขั้นตอนตัวอย่าง N1

ผลการทดสอบขั้นตัวอย่าง N1 ซึ่งเป็นการทดสอบโดยควบคุมสภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (Barnett, 2002) โดยให้อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับร้อยละ 100 ของอุณหภูมิขีดจำกัด และให้น้ำหนักบรรทุกในแนวแกนเริ่มต้น 7,000 กิโลกรัม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาทดสอบที่แสดงในตารางที่ 3.9 ในช่วง 10 นาทีแรกมีค่าคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมิที่คำนวณตามสมการที่ (3.5) ร้อยละ 12.49 ค่าคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 30 นาทีแรกมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 1.79 และค่าคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 31 นาทีแรกมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 1.71 รูปที่ 3.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทดสอบขั้นตัวอย่าง N1 เปรียบเทียบกับเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์

ตารางที่ 3.9 อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบสำหรับชิ้นตัวอย่าง N1

| เวลา<br>(นาที) | อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบ (°C) |       |       |       |       |       | ค่าเฉลี่ย |
|----------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|                | อุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ         |       |       |       |       |       |           |
|                | 1                             | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |           |
| 0.0            | 50.5                          | 49.6  | 49.7  | 50.2  | 49.9  | 50.3  | 50.0      |
| 2.0            | 55.5                          | 56.3  | 56.2  | 56.3  | 56.1  | 56.2  | 56.1      |
| 4.0            | 125.6                         | 97.5  | 99.9  | 135.1 | 126.2 | 128.7 | 118.8     |
| 6.0            | 349.1                         | 300.0 | 256.6 | 400.8 | 346.6 | 427.5 | 346.8     |
| 8.0            | 407.8                         | 371.6 | 284.6 | 464.6 | 399.2 | 506.2 | 405.7     |
| 10.0           | 531.5                         | 511.1 | 408.5 | 549.6 | 482.5 | 613.9 | 516.2     |
| 12.0           | 695.7                         | 669.2 | 515.5 | 661.2 | 577.7 | 692.0 | 635.2     |
| 14.0           | 746.1                         | 723.3 | 579.4 | 711.9 | 634.8 | 748.1 | 690.6     |
| 16.0           | 802.8                         | 778.1 | 649.8 | 762.6 | 689.6 | 801.2 | 747.4     |
| 18.0           | 844.5                         | 818.6 | 705.3 | 806.3 | 732.4 | 845.5 | 792.1     |
| 20.0           | 859.6                         | 829.9 | 735.6 | 818.5 | 755.7 | 858.4 | 809.6     |
| 22.0           | 860.1                         | 829.4 | 739.0 | 818.3 | 761.6 | 858.6 | 811.2     |
| 24.0           | 868.1                         | 832.0 | 740.2 | 824.7 | 776.6 | 870.4 | 818.7     |
| 26.0           | 860.1                         | 824.0 | 717.1 | 814.8 | 767.7 | 857.6 | 806.9     |
| 28.0           | 852.0                         | 813.9 | 702.1 | 812.7 | 773.5 | 852.8 | 801.2     |
| 30.0           | 838.5                         | 803.4 | 687.9 | 802.2 | 762.5 | 844.8 | 789.9     |



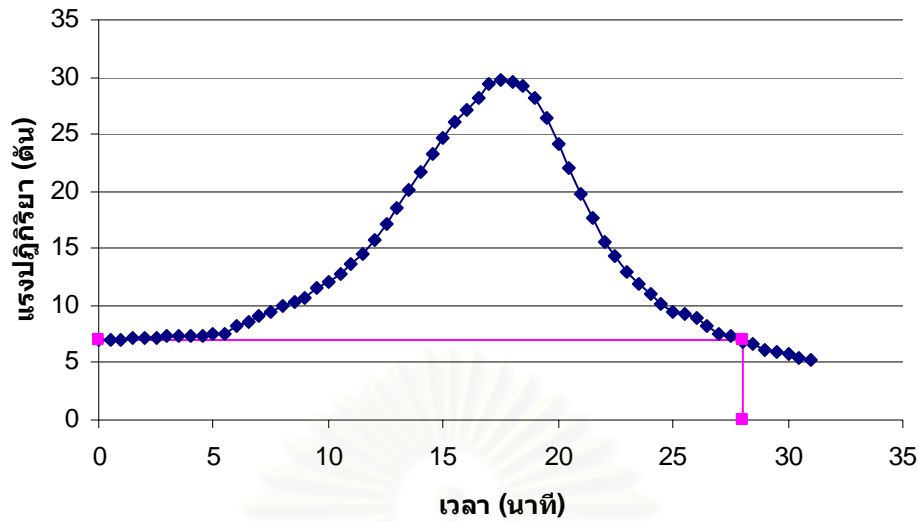
รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N1  
เปรียบเทียบกับเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์

ในระหว่างการทดสอบอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างปีกและเอวของหน้าตัด B และอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิบริเวณปลายปีกของหน้าตัด B เกิดชำรุด จึงไม่นำค่าอุณหภูมิที่บริเวณดังกล่าวมาพิจารณา และจากข้อมูลค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับที่แสดงในตารางที่ 3.10 พบว่าเกิดค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุด 29.7 ตัน ที่เวลา 17 นาที 30 วินาที และขึ้นตัวอย่างเกิดการวิบัติที่เวลา 28 นาที (ดูรูปที่ 3.21 ประกอบ) ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่วัดได้บนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง N1 ที่แต่ละหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 3.22

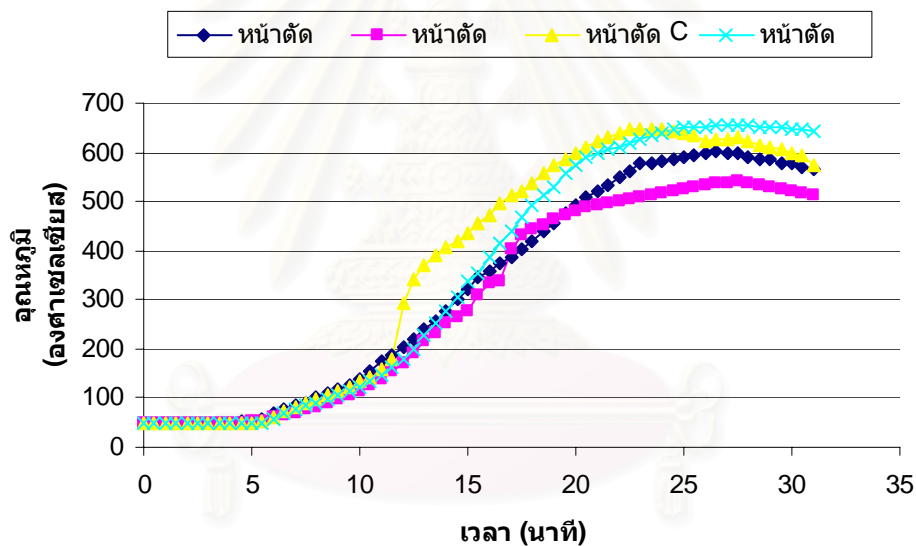
ตารางที่ 3.10 แรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N1

| เวลา<br>(นาที) | แรงปฏิกิริยา<br>(ตัน) | เวลา<br>(นาที) | แรงปฏิกิริยา<br>(ตัน) | เวลา<br>(นาที) | แรงปฏิกิริยา<br>(ตัน) |
|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| 0.0            | 7.0                   | 11.0           | 13.6                  | 22.0           | 15.6                  |
| 0.5            | 7.0                   | 11.5           | 14.6                  | 22.5           | 14.3                  |
| 1.0            | 7.0                   | 12.0           | 15.7                  | 23.0           | 13.0                  |
| 1.5            | 7.1                   | 12.5           | 17.1                  | 23.5           | 11.9                  |
| 2.0            | 7.2                   | 13.0           | 18.6                  | 24.0           | 11.0                  |
| 2.5            | 7.2                   | 13.5           | 20.2                  | 24.5           | 10.2                  |
| 3.0            | 7.3                   | 14.0           | 21.7                  | 25.0           | 9.5                   |
| 3.5            | 7.3                   | 14.5           | 23.2                  | 25.5           | 9.2                   |
| 4.0            | 7.4                   | 15.0           | 24.6                  | 26.0           | 8.9                   |
| 4.5            | 7.4                   | 15.5           | 26.0                  | 26.5           | 8.3                   |
| 5.0            | 7.5                   | 16.0           | 27.1                  | 27.0           | 7.6                   |
| 5.5            | 7.6                   | 16.5           | 28.1                  | 27.5           | 7.4                   |
| 6.0            | 8.3                   | 17.0           | 29.4                  | 28.0           | 6.9                   |
| 6.5            | 8.6                   | 17.5           | 29.7                  | 28.5           | 6.6                   |
| 7.0            | 9.1                   | 18.0           | 29.6                  | 29.0           | 6.2                   |
| 7.5            | 9.5                   | 18.5           | 29.2                  | 29.5           | 5.9                   |
| 8.0            | 9.9                   | 19.0           | 28.2                  | 30.0           | 5.7                   |
| 8.5            | 10.3                  | 19.5           | 26.5                  | 30.5           | 5.5                   |
| 9.0            | 10.6                  | 20.0           | 24.2                  | 31.0           | 5.3                   |
| 9.5            | 11.5                  | 20.5           | 22.0                  |                |                       |
| 10.0           | 12.0                  | 21.0           | 19.7                  |                |                       |
| 10.5           | 12.7                  | 21.5           | 17.7                  |                |                       |



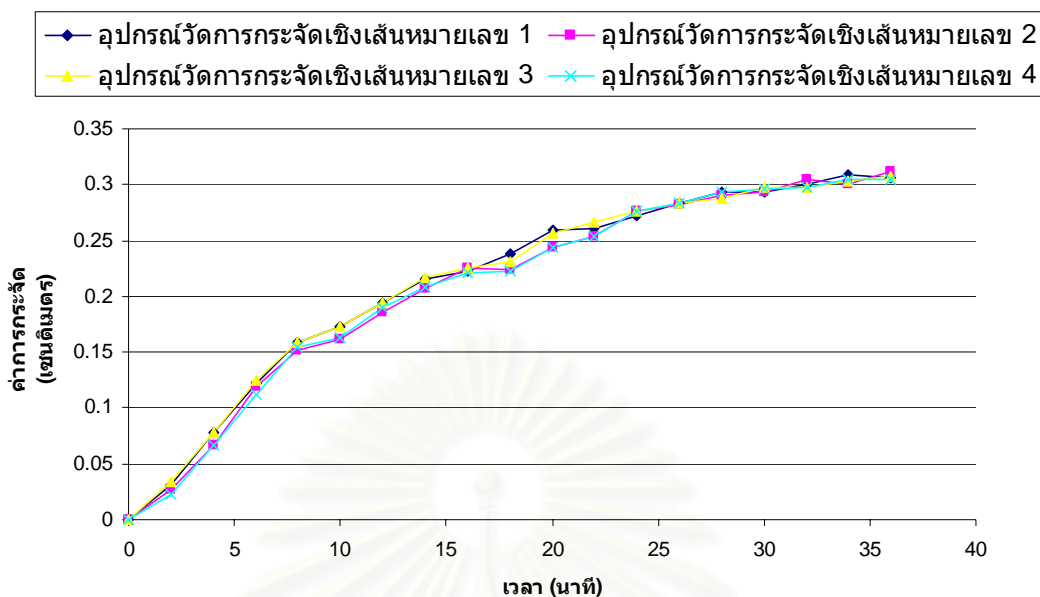


รูปที่ 3.21 ค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N1



รูปที่ 3.22 ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่แต่ละหน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง N1

ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N1 เป็นดังแสดงในรูปที่ 3.23 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการกระจัดที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบมีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.35 เซนติเมตร คิดเป็นความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 0.25 ของความยาวชิ้นตัวอย่าง



รูปที่ 3.23 ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบขึ้นตัวอย่าง N1

#### ขึ้นตัวอย่าง N2

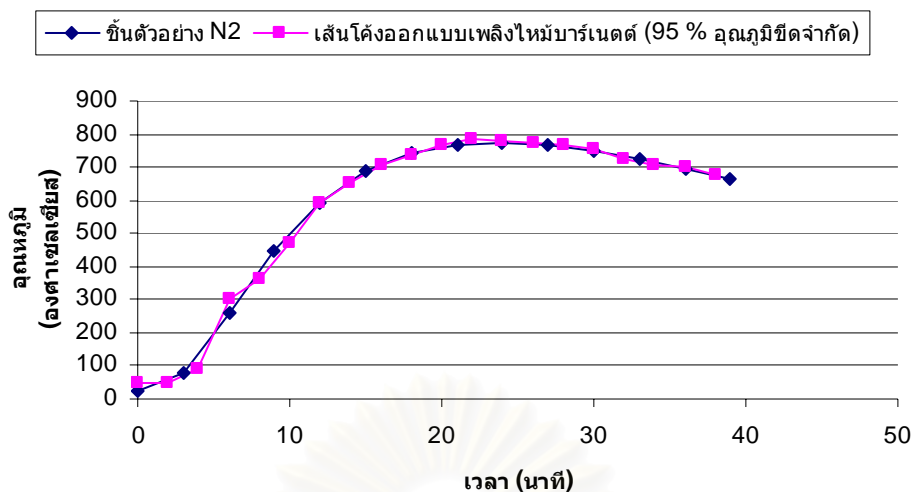
ผลการทดสอบขึ้นตัวอย่าง N2 ซึ่งเป็นการทดสอบโดยควบคุมสภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (Barnett, 2002) โดยให้อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับร้อยละ 95 ของอุณหภูมิขีดจำกัด และให้น้ำหนักบรรทุกทุกในแนวแกนเริ่มต้น 7,000 กิโลกรัม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาทดสอบที่แสดงในตารางที่ 3.11 ในช่วง 10 นาทีแรกมีค่าคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมิร้อยละ 4.66 ค่าคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 30 นาทีแรกมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.39 และค่าคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 38 นาทีแรกมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.28 รูปที่ 3.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทดสอบขึ้นตัวอย่าง N2 เปรียบเทียบกับเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์

ตารางที่ 3.11 อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบสำหรับชิ้นตัวอย่าง N2

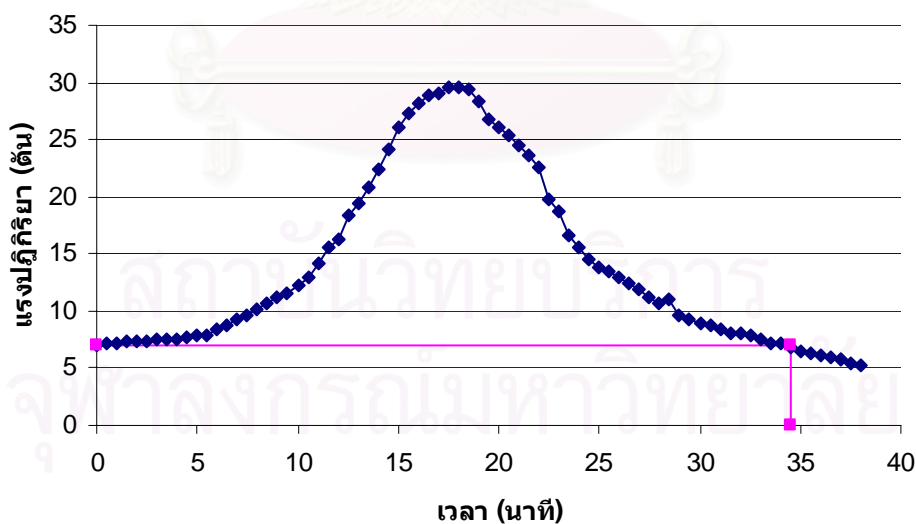
| เวลา<br>(นาที) | อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบ (°C) |       |       |       |       |       |           |
|----------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|                | อุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ         |       |       |       |       |       | ค่าเฉลี่ย |
|                | 1                             | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |           |
| 0.0            | 52.9                          | 56.5  | 51.4  | 51.8  | 54.7  | 53.0  | 49.8      |
| 2.0            | 56.2                          | 59.3  | 59.0  | 50.0  | 50.8  | 54.9  | 49.8      |
| 4.0            | 101.8                         | 91.5  | 71.7  | 106.5 | 97.8  | 93.3  | 87.9      |
| 6.0            | 284.5                         | 242.4 | 239.9 | 359.0 | 291.9 | 412.6 | 299.8     |
| 8.0            | 376.2                         | 324.0 | 257.2 | 413.3 | 373.3 | 443.0 | 360.1     |
| 10.0           | 480.6                         | 435.1 | 348.4 | 534.4 | 473.2 | 584.5 | 471.9     |
| 12.0           | 635.5                         | 605.6 | 470.0 | 629.9 | 551.6 | 671.2 | 594.0     |
| 14.0           | 697.6                         | 675.4 | 522.5 | 687.0 | 613.3 | 708.0 | 650.6     |
| 16.0           | 746.5                         | 735.1 | 577.5 | 738.6 | 663.8 | 763.7 | 704.2     |
| 18.0           | 782.9                         | 769.5 | 617.2 | 763.7 | 689.5 | 791.2 | 735.7     |
| 20.0           | 815.2                         | 799.1 | 654.2 | 789.9 | 720.1 | 819.8 | 766.4     |
| 22.0           | 833.7                         | 818.7 | 681.1 | 809.9 | 739.7 | 838.3 | 786.9     |
| 24.0           | 828.3                         | 808.1 | 670.5 | 803.0 | 744.8 | 829.5 | 780.7     |
| 26.0           | 822.3                         | 799.2 | 663.5 | 798.4 | 745.6 | 825.0 | 775.7     |
| 28.0           | 806.2                         | 787.6 | 654.4 | 786.7 | 742.2 | 813.8 | 765.2     |
| 30.0           | 796.6                         | 775.0 | 635.3 | 780.9 | 737.8 | 801.3 | 754.5     |
| 32.0           | 765.6                         | 743.7 | 593.9 | 755.9 | 713.7 | 772.5 | 724.2     |
| 34.0           | 727.6                         | 716.3 | 577.8 | 740.0 | 701.8 | 778.6 | 707.0     |
| 36.0           | 723.4                         | 704.3 | 568.9 | 730.7 | 699.4 | 773.4 | 700.0     |
| 38.0           | 699.1                         | 676.9 | 556.5 | 709.0 | 680.2 | 747.8 | 678.3     |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนและเวลาในการทดสอบขึ้นตัวอย่าง N2  
เปรียบเทียบกับเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์

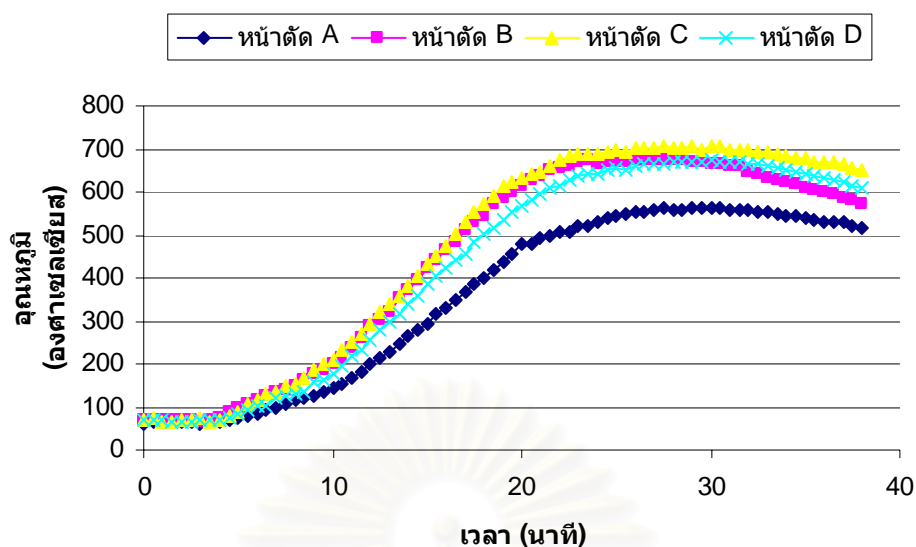
จากข้อมูลค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับที่แสดงในตารางที่ 3.12 พบว่าเกิดค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุด 29.5 ตัน ที่เวลา 18 นาที และขึ้นตัวอย่างเกิดการวิบัติที่เวลา 34 นาที (ดูรูปที่ 3.25 ประกอบ) ค่าเฉลี่ยของออกซิเจนที่วัดได้บนพื้นผิวของขึ้นตัวอย่าง N2 ที่แต่ละหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.25 ค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบขึ้นตัวอย่าง N2

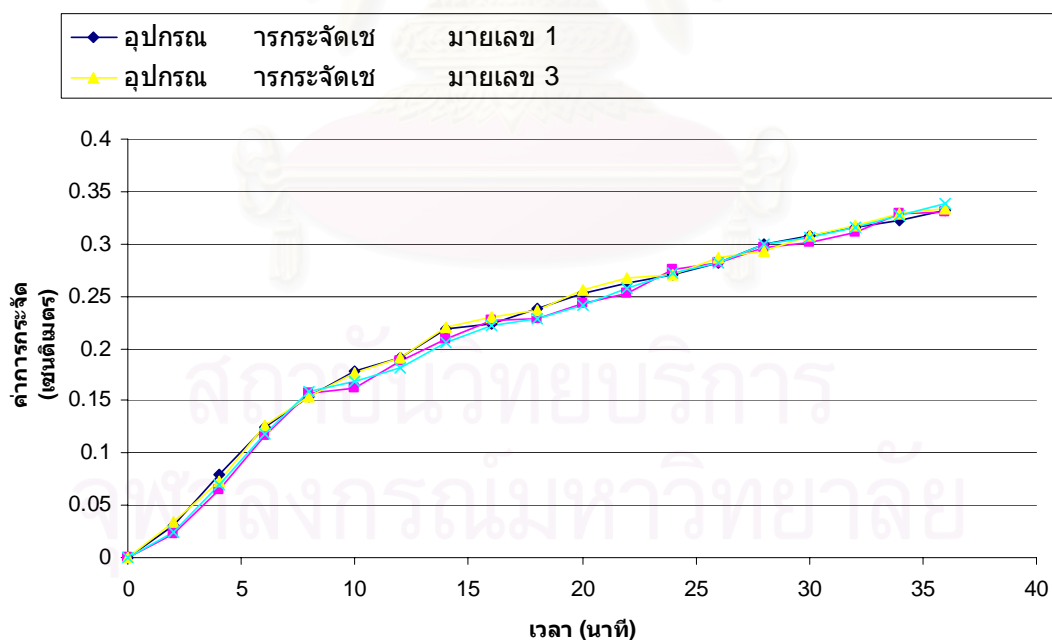
ตารางที่ 3.12 แรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N2

| เวลา<br>(นาที) | แรงปฏิกิริยา<br>(ตัน) | เวลา<br>(นาที) | แรงปฏิกิริยา<br>(ตัน) | เวลา<br>(นาที) | แรงปฏิกิริยา<br>(ตัน) |
|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| 0.0            | 7.0                   | 13.0           | 19.5                  | 26.0           | 12.9                  |
| 0.5            | 7.2                   | 13.5           | 20.8                  | 26.5           | 12.4                  |
| 1.0            | 7.2                   | 14.0           | 22.4                  | 27.0           | 11.9                  |
| 1.5            | 7.3                   | 14.5           | 24.2                  | 27.5           | 11.2                  |
| 2.0            | 7.4                   | 15.0           | 26.1                  | 28.0           | 10.6                  |
| 2.5            | 7.4                   | 15.5           | 27.3                  | 28.5           | 11.0                  |
| 3.0            | 7.5                   | 16.0           | 28.1                  | 29.0           | 9.6                   |
| 3.5            | 7.6                   | 16.5           | 28.8                  | 29.5           | 9.3                   |
| 4.0            | 7.6                   | 17.0           | 29.1                  | 30.0           | 8.9                   |
| 4.5            | 7.7                   | 17.5           | 29.5                  | 30.5           | 8.7                   |
| 5.0            | 7.8                   | 18.0           | 29.5                  | 31.0           | 8.4                   |
| 5.5            | 7.9                   | 18.5           | 29.4                  | 31.5           | 8.1                   |
| 6.0            | 8.4                   | 19.0           | 28.4                  | 32.0           | 8.0                   |
| 6.5            | 8.8                   | 19.5           | 26.7                  | 32.5           | 7.8                   |
| 7.0            | 9.2                   | 20.0           | 26.1                  | 33.0           | 7.5                   |
| 7.5            | 9.7                   | 20.5           | 25.4                  | 33.5           | 7.2                   |
| 8.0            | 10.1                  | 21.0           | 24.5                  | 34.0           | 7.1                   |
| 8.5            | 10.7                  | 21.5           | 23.7                  | 34.5           | 6.9                   |
| 9.0            | 11.2                  | 22.0           | 22.6                  | 35.0           | 6.5                   |
| 9.5            | 11.5                  | 22.5           | 19.7                  | 35.5           | 6.3                   |
| 10.0           | 12.2                  | 23.0           | 18.7                  | 36.0           | 6.2                   |
| 10.5           | 13.0                  | 23.5           | 16.7                  | 36.5           | 5.9                   |
| 11.0           | 14.2                  | 24.0           | 15.5                  | 37.0           | 5.7                   |
| 11.5           | 15.6                  | 24.5           | 14.5                  | 37.0           | 5.7                   |
| 12.0           | 16.2                  | 25.0           | 13.8                  | 37.5           | 5.4                   |
| 12.5           | 18.4                  | 25.5           | 13.5                  | 38.0           | 5.2                   |



รูปที่ 3.26 ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่แต่ละหน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง N2

ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N2 เป็นดังแสดงในรูปที่ 3.27 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการกระจัดที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบมีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.35 เซนติเมตร คิดเป็นความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 0.25 ของความยาวชิ้นตัวอย่าง



รูปที่ 3.27 ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N2



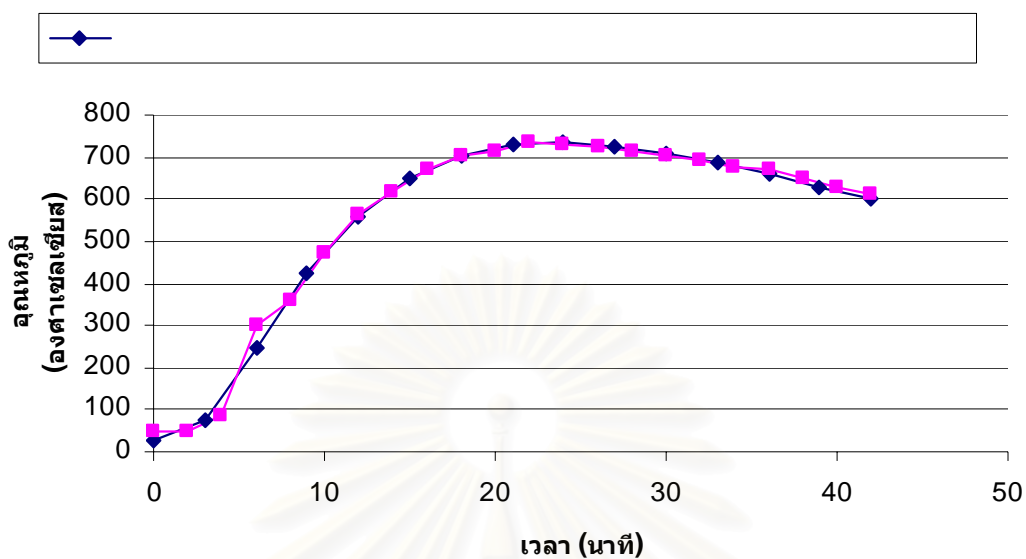
### ขึ้นตัวอย่าง N3

ผลการทดสอบขึ้นตัวอย่าง N3 ซึ่งเป็นการทดสอบโดยควบคุมสภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (Barnett, 2002) โดยให้อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับร้อยละ 90 ของอุณหภูมิขีดจำกัด และให้น้ำหนักบรรทุกทุกในแนวแกนเริ่มต้น 7,000 กิโลกรัม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาทดสอบที่แสดงในตารางที่ 3.13 ในช่วง 10 นาทีแรกมีค่าคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมิลดลง 0.16 ค่าคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 30 นาทีแรกมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.24 และค่าคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 42 นาทีแรกมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.13 รูปที่ 3.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทดสอบขึ้นตัวอย่าง N3 เปรียบเทียบกับเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์

ตารางที่ 3.13 อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบสำหรับขึ้นตัวอย่าง N3

| เวลา<br>(นาที) | อุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบ (°C) |       |       |       |       |       | ค่าเฉลี่ย |
|----------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|                | อุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ         |       |       |       |       |       |           |
|                | 1                             | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |           |
| 0.0            | 49.5                          | 49.8  | 49.7  | 49.8  | 50.3  | 49.7  | 49.8      |
| 2.0            | 50.1                          | 50.1  | 49.6  | 49.7  | 49.8  | 49.6  | 49.8      |
| 4.0            | 91.9                          | 84.3  | 71.4  | 101.2 | 91.2  | 87.6  | 87.9      |
| 6.0            | 278.6                         | 239.3 | 233.6 | 350.7 | 287.6 | 409.1 | 299.8     |
| 8.0            | 372.2                         | 322.5 | 252.0 | 412.8 | 365.7 | 435.1 | 360.1     |
| 10.0           | 474.6                         | 431.8 | 348.0 | 532.0 | 463.4 | 581.5 | 471.9     |
| 12.0           | 605.0                         | 575.1 | 439.1 | 599.4 | 520.9 | 640.7 | 563.4     |
| 14.0           | 666.8                         | 644.5 | 492.5 | 656.2 | 582.5 | 677.1 | 619.9     |
| 16.0           | 716.2                         | 704.5 | 547.1 | 707.6 | 632.9 | 733.2 | 673.6     |
| 18.0           | 752.2                         | 738.8 | 586.3 | 733.2 | 659.2 | 760.2 | 705.0     |
| 20.0           | 765.2                         | 748.2 | 603.3 | 739.5 | 670.1 | 769.3 | 715.9     |
| 22.0           | 783.4                         | 767.8 | 630.1 | 759.7 | 689.5 | 787.5 | 736.3     |
| 24.0           | 777.7                         | 757.4 | 620.4 | 753.0 | 693.8 | 779.1 | 730.2     |
| 26.0           | 771.6                         | 748.8 | 613.4 | 747.7 | 694.7 | 775.0 | 725.2     |
| 28.0           | 755.4                         | 737.0 | 604.1 | 736.7 | 691.7 | 763.1 | 714.7     |
| 30.0           | 745.7                         | 724.7 | 584.6 | 730.5 | 687.1 | 750.9 | 703.9     |
| 32.0           | 735.3                         | 712.8 | 563.4 | 725.2 | 683.2 | 741.7 | 693.6     |
| 34.0           | 696.7                         | 685.5 | 547.2 | 709.3 | 671.4 | 748.4 | 676.4     |
| 36.0           | 693.2                         | 674.1 | 538.8 | 700.4 | 668.9 | 743.3 | 669.8     |
| 38.0           | 668.7                         | 646.3 | 526.4 | 678.4 | 649.9 | 717.6 | 647.9     |
| 40.0           | 648.8                         | 621.9 | 514.5 | 660.4 | 629.3 | 684.7 | 626.6     |
| 42.0           | 644.3                         | 601.7 | 506.1 | 644.6 | 616.9 | 655.5 | 611.5     |



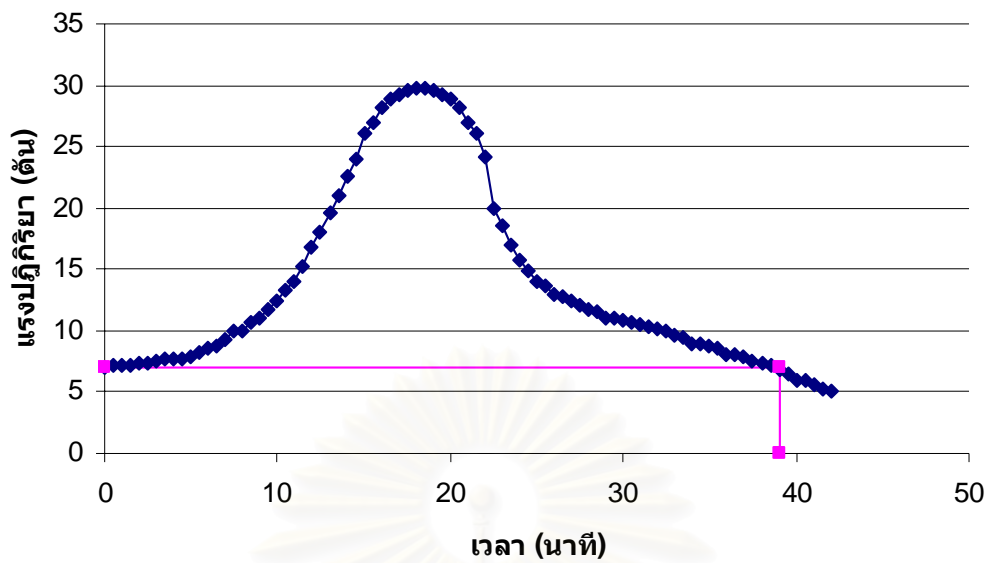
รูปที่ 3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดหนุมิและเวลาในการทดสอบขึ้นตัวอย่าง N3  
เปรียบเทียบกับเส้นโค้งออกแบบเพลงใหม่บาร์เบลล์

จากข้อมูลค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับที่แสดงในตารางที่ 3.14 พบว่าเกิดค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุด 29.8 ตัน ที่เวลา 19 นาที และขึ้นตัวอย่างเกิดการวิบัติที่เวลา 39 นาที (ดูรูปที่ 3.29 ประกอบ) ค่าเฉลี่ยของจุดหนุมิที่วัดได้บนพื้นผิวของขึ้นตัวอย่าง N3 ที่แต่ละหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 3.30

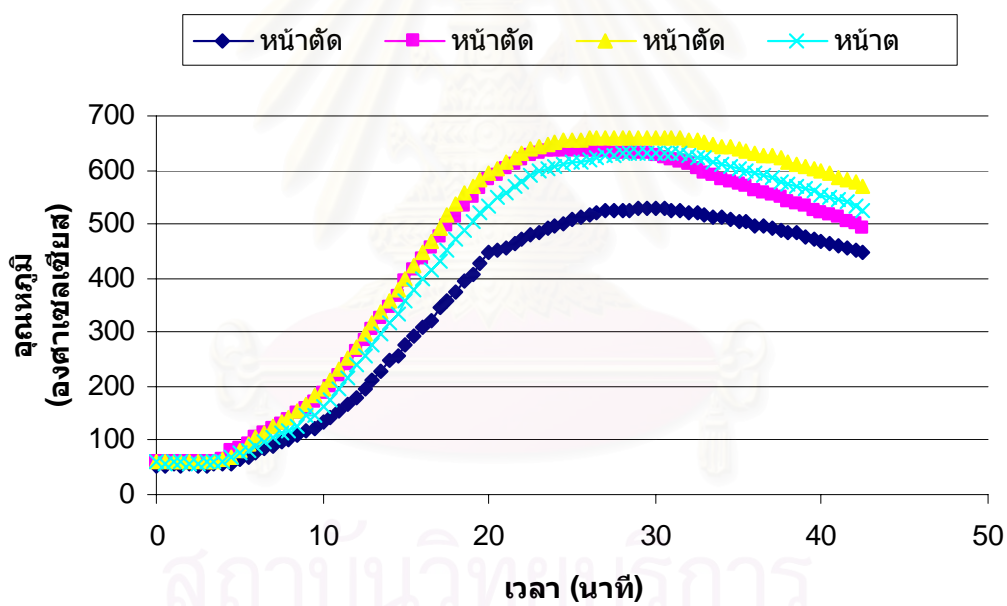
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.14 แรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N3

| เวลา<br>(นาทิจ) | แรงปฏิกิริยา<br>(ตัน) | เวลา<br>(นาทิจ) | แรงปฏิกิริยา<br>(ตัน) | เวลา<br>(นาทิจ) | แรงปฏิกิริยา<br>(ตัน) |
|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
| 0.0             | 7.0                   | 14.5            | 24.0                  | 29.0            | 11.0                  |
| 0.5             | 7.1                   | 15.0            | 26.0                  | 29.5            | 11.0                  |
| 1.0             | 7.2                   | 15.5            | 27.0                  | 30.0            | 10.9                  |
| 1.5             | 7.2                   | 16.0            | 28.1                  | 30.5            | 10.6                  |
| 2.0             | 7.3                   | 16.5            | 28.8                  | 31.0            | 10.5                  |
| 2.5             | 7.3                   | 17.0            | 29.3                  | 31.5            | 10.3                  |
| 3.0             | 7.6                   | 17.5            | 29.6                  | 32.0            | 10.1                  |
| 3.5             | 7.7                   | 18.0            | 29.8                  | 32.5            | 9.9                   |
| 4.0             | 7.7                   | 18.5            | 29.8                  | 33.0            | 9.7                   |
| 4.5             | 7.7                   | 19.0            | 29.6                  | 33.5            | 9.5                   |
| 5.0             | 7.9                   | 19.5            | 29.3                  | 34.0            | 9.0                   |
| 5.5             | 8.2                   | 20.0            | 28.8                  | 34.5            | 8.9                   |
| 6.0             | 8.5                   | 20.5            | 28.1                  | 35.0            | 8.7                   |
| 6.5             | 8.8                   | 21.0            | 27.0                  | 35.5            | 8.5                   |
| 7.0             | 9.3                   | 21.5            | 26.0                  | 36.0            | 8.0                   |
| 7.5             | 9.9                   | 22.0            | 24.1                  | 36.5            | 8.0                   |
| 8.0             | 10.0                  | 22.5            | 19.9                  | 37.0            | 7.9                   |
| 8.5             | 10.6                  | 23.0            | 18.6                  | 37.5            | 7.6                   |
| 9.0             | 11.0                  | 23.5            | 16.9                  | 38.0            | 7.3                   |
| 9.5             | 11.8                  | 24.0            | 15.7                  | 38.5            | 7.1                   |
| 10.0            | 12.5                  | 24.5            | 14.8                  | 39.0            | 6.8                   |
| 10.5            | 13.3                  | 25.0            | 14.0                  | 39.5            | 6.5                   |
| 11.0            | 14.0                  | 25.5            | 13.7                  | 40.0            | 6.0                   |
| 11.5            | 15.3                  | 26.0            | 13.0                  | 40.5            | 5.9                   |
| 12.0            | 16.8                  | 26.5            | 12.8                  | 41.0            | 5.6                   |
| 12.5            | 18.1                  | 27.0            | 12.4                  | 41.5            | 5.3                   |
| 13.0            | 19.6                  | 27.5            | 12.0                  | 42.0            | 5.1                   |
| 13.5            | 21.0                  | 28.0            | 11.7                  |                 |                       |
| 14.0            | 22.6                  | 28.5            | 11.5                  |                 |                       |

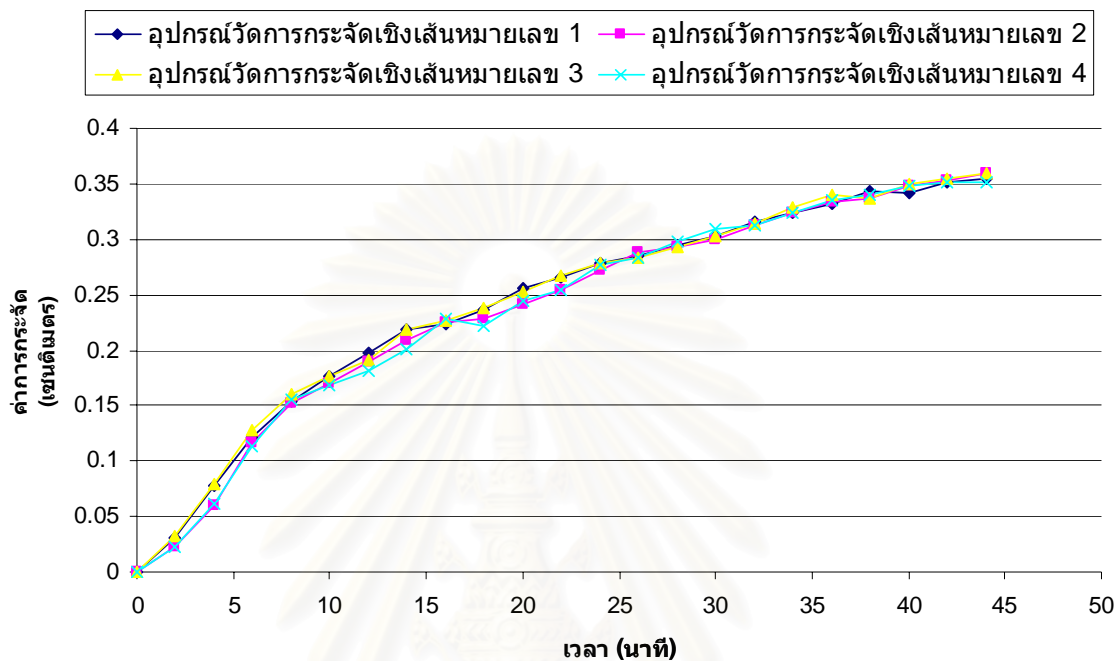


รูปที่ 3.29 ค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง N3



รูปที่ 3.30 ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่แต่ละหน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง N3

ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบขึ้นตัวอย่าง N3 เป็นดังแสดงในรูปที่ 3.31 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการกระจัดที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบมีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.35 เซนติเมตร คิดเป็นความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 0.25 ของความยาวขึ้นตัวอย่าง



รูปที่ 3.31 ค่าการกระจัดบริเวณฐานรองรับในระหว่างการทดสอบขึ้นตัวอย่าง N3

### ลักษณะการวิบัติของชั้นตัวอย่าง

จากผลการทดสอบชั้นตัวอย่างทั้ง 5 ชั้น พบว่าชั้นตัวอย่างทุกชั้นเกิดการวิบัติแบบโก่งเดาะแบบผสม กล่าวคือโก่งเดาะทั้งชั้นส่วนในแกนรองและโก่งเดาะเฉพาะที่บริเวณปีกที่ในตำแหน่งกึ่งกลางเสา ดังแสดงในตารางที่ 3.15-3.16 และในรูปที่ 3.32-3.33

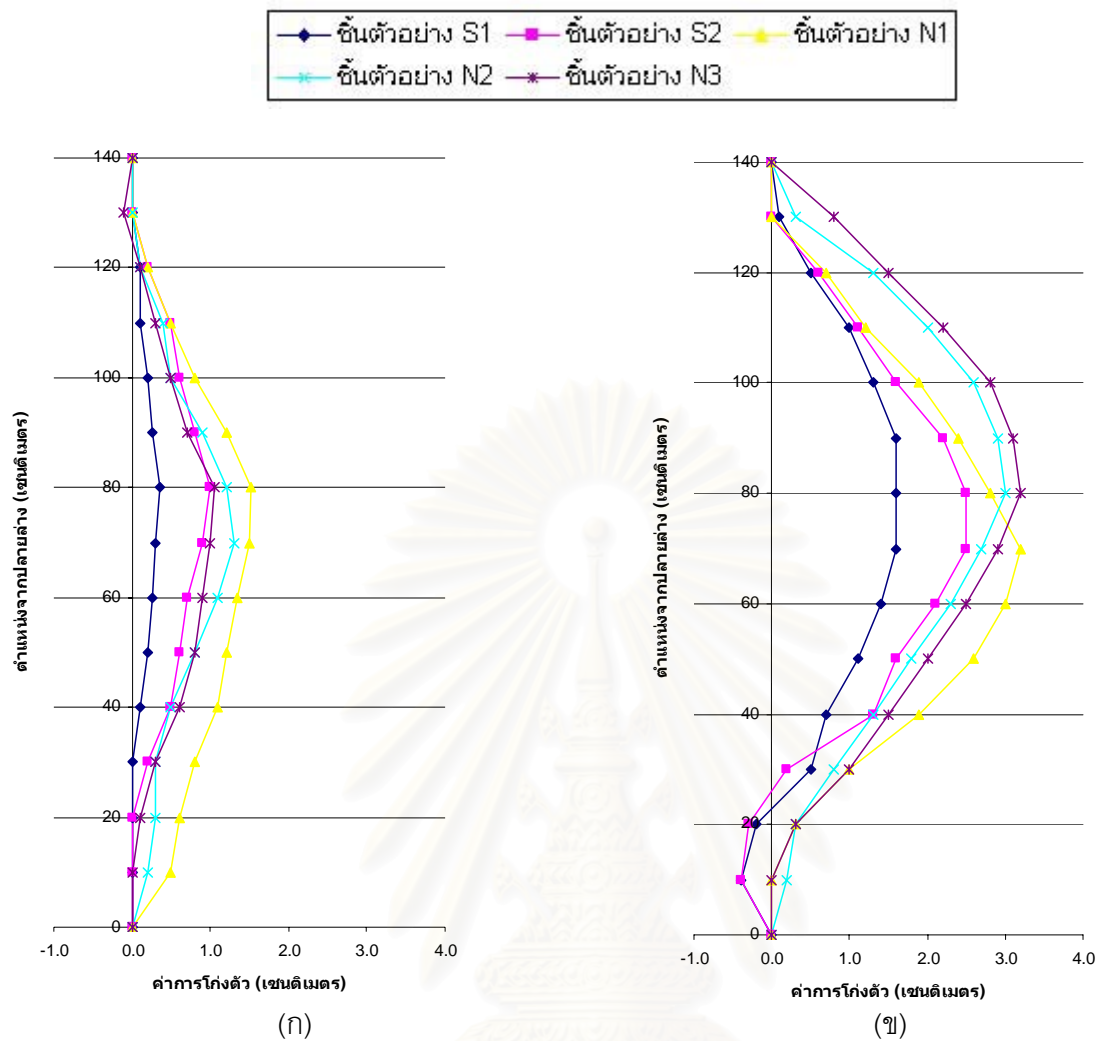
ตารางที่ 3.15 ค่าการโก่งตัวของชั้นตัวอย่างทดสอบรอบแกนหลัก

| ตำแหน่งที่วัดจากปลายด้านล่าง (ซม.) | ชั้นตัวอย่างทดสอบ |     |     |     |      |
|------------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|------|
|                                    | S1                | S2  | N1  | N2  | N3   |
| 140                                | 0.0               | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0  |
| 130                                | 0.0               | 0.0 | 0.0 | 0.0 | -0.1 |
| 120                                | 0.1               | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1  |
| 110                                | 0.1               | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.3  |
| 100                                | 0.2               | 0.6 | 0.8 | 0.5 | 0.5  |
| 90                                 | 0.3               | 0.8 | 1.2 | 0.9 | 0.7  |
| 80                                 | 0.4               | 1.0 | 1.5 | 1.2 | 1.1  |
| 70                                 | 0.3               | 0.9 | 1.5 | 1.3 | 1.0  |
| 60                                 | 0.3               | 0.7 | 1.4 | 1.1 | 0.9  |
| 50                                 | 0.2               | 0.6 | 1.2 | 0.8 | 0.8  |
| 40                                 | 0.1               | 0.5 | 1.1 | 0.5 | 0.6  |
| 30                                 | 0.0               | 0.2 | 0.8 | 0.3 | 0.3  |
| 20                                 | 0.0               | 0.0 | 0.6 | 0.3 | 0.1  |
| 10                                 | 0.0               | 0.0 | 0.5 | 0.2 | 0.0  |
| 0                                  | 0.0               | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0  |

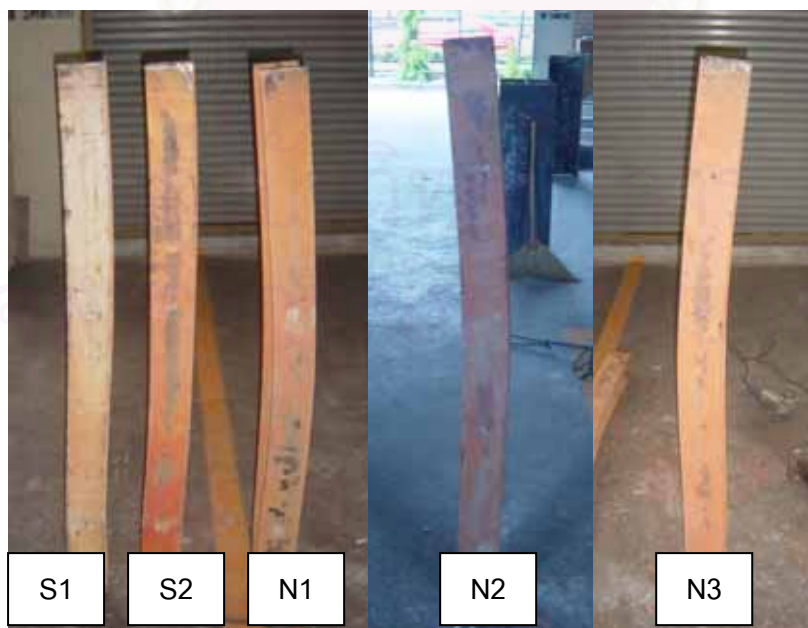


ตารางที่ 3.16 ค่าการโก่งตัวของชั้นตัวอย่างทดสอบรอบแกนรอง

| ตำแหน่งที่<br>วัดจากปลาย<br>ด้านล่าง<br>(ซม.) | ชั้นตัวอย่างทดสอบ |      |     |     |     |
|---|-------------------|------|-----|-----|-----|
|   | S1                | S2   | N1  | N2  | N3  |
| 140   | 0.0               | 0.0  | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 130   | 0.1               | 0.0  | 0.0 | 0.3 | 0.8 |
| 120   | 0.5               | 0.6  | 0.7 | 1.3 | 1.5 |
| 110   | 1.0               | 1.1  | 1.2 | 2.0 | 2.2 |
| 100   | 1.3               | 1.6  | 1.9 | 2.6 | 2.8 |
| 90  | 1.6               | 2.2  | 2.4 | 2.9 | 3.1 |
| 80  | 1.6               | 2.5  | 2.8 | 3.0 | 3.2 |
| 70  | 1.6               | 2.5  | 3.2 | 2.7 | 2.9 |
| 60  | 1.4               | 2.1  | 3.0 | 2.3 | 2.5 |
| 50  | 1.1               | 1.6  | 2.6 | 1.8 | 2.0 |
| 40  | 0.7               | 1.3  | 1.9 | 1.3 | 1.5 |
| 30  | 0.5               | 0.2  | 1.0 | 0.8 | 1.0 |
| 20  | -0.2              | -0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| 10  | -0.4              | -0.4 | 0.0 | 0.2 | 0.0 |
| 0   | 0.0               | 0.0  | 0.0 | 0.0 | 0.0 |



รูปที่ 3.32 ค่าการโก่งตัวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ (ก) แกนหลัก (ข) แกนรอง



รูปที่ 3.33 ลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบ

## บทที่ 4

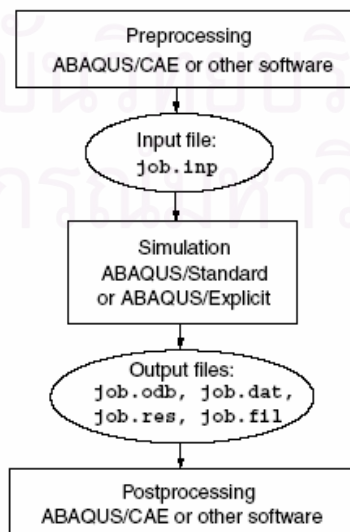
### การวิเคราะห์แบบจำลองเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 4.1 การสร้างแบบจำลอง

การวิเคราะห์แบบจำลองเสาเหล็กภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในการศึกษานี้อาศัยโปรแกรม ABAQUS (ABAQUS, 2003) โดยทำการพิจารณาแบ่งเสาเหล็กออกเป็นชิ้นส่วนย่อยบนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งโปรแกรมห่วงการดังกล่าวสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นดังแสดง ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบความสามารถของโปรแกรมวิเคราะห์แบบจำลอง (Wang, 2002)

| โปรแกรม | แรงดัด / แรงเฉือน |          | การโก่งเดาะเฉพาะที่ | การโก่งเดาะทั้งชิ้นส่วน | แบบจำลองการเชื่อมต่อ | การวิเคราะห์อุณหภูมิ |
|---------|-------------------|----------|---------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
|         | เหล็ก             | วัสดุผสม |                     |                         |                      |                      |
| ADAPTIC | /                 | X        | X                   | /                       | X                    | X                    |
| FEAST   | /                 | X        | /                   | /                       | /                    | X                    |
| SAFIR   | /                 | /        | /                   | /                       | X                    | /                    |
| VULCAN  | /                 | /        | X                   | /                       | X                    | X                    |
| ABAQUS  | /                 | /        | /                   | /                       | /                    | /                    |
| DIANA   | /                 | /        | /                   | /                       | /                    | /                    |



รูปที่ 4.1 กระบวนการทำงานโปรแกรม ABAQUS (ABAQUS, 2003)

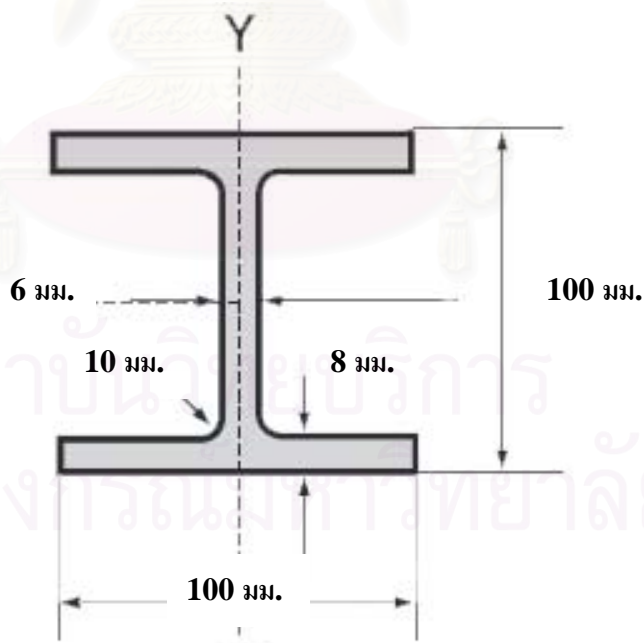
กระบวนการทำงานของโปรแกรม ABAQUS สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ได้แก่

- ขั้นตอนการเตรียม (Preprocessing) เป็นขั้นตอนการป้อนข้อมูลที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ปัญหา โดยสามารถใช้คำสั่งเชิงรูปภาพ หรือคำสั่งเชิงตัวอักษร

- ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Simulation) เป็นขั้นตอนการคำนวณแก้ปัญหาระบบสมการ โดยอาศัยกระบวนการทางคณิตศาสตร์

- ขั้นตอนการประมวลผล (Post processing) เป็นขั้นตอนการประมวลผลผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบ ตัวเลข ภาพนิ่ง ภาพเคลื่อนไหว และกราฟ

ในการศึกษาครั้งนี้พิจารณาเสาเหล็กขนาดหน้าตัด H100x100x6x8 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ระบุคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.1227-2538 ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 7850 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร คุณสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิปกติ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และมีคุณสมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปตาม อุณหภูมิ ตามรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 4.2 หน้าตัดเหล็กขนาด H100x100x6x8 มม.

ความเครียดจากการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของเหล็ก (thermal expansion) อาศัยมาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002) ดังแสดงในสมการที่ (4.1) ถึง (4.3)

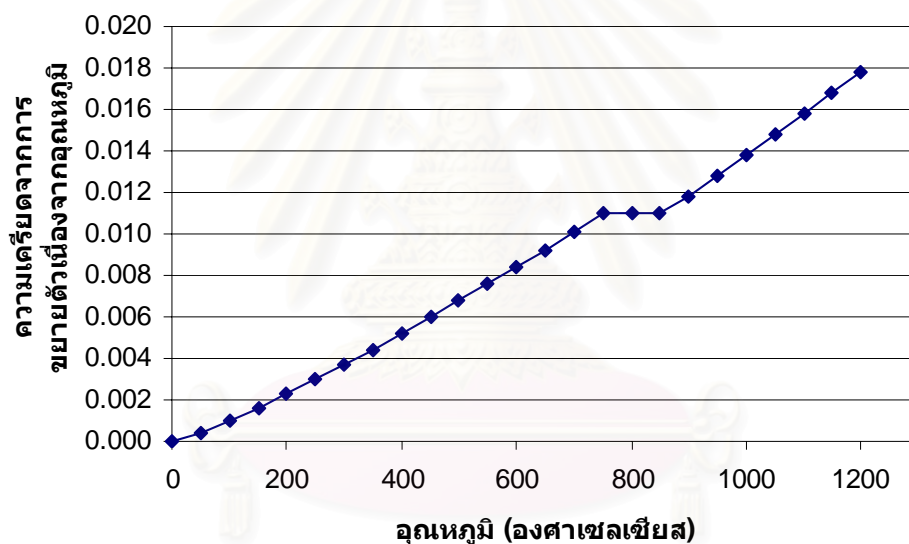
$$\varepsilon_{th} = (1.2 \times 10^{-5} \times T_s) + (1.4 \times 10^{-8} \times T_s^2) - (2.416 \times 10^{-4}) \quad \text{เมื่อ } T_s < 750^\circ\text{C} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_{th} = 1.1 \times 10^{-2} \quad \text{เมื่อ } 750^\circ\text{C} \leq T_s < 860^\circ\text{C} \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_{th} = (2.0 \times 10^{-5} \times T_s) - (6.2 \times 10^{-3}) \quad \text{เมื่อ } 860^\circ\text{C} \leq T_s < 1200^\circ\text{C} \quad (4.3)$$

โดยที่  $\varepsilon_{th}$  แทน ความเครียดจากการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิ 20 °C

$T_s$  แทน อุณหภูมิเหล็ก หน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 การแปรผันของค่าความเครียดจากการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของเหล็ก

ค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat) พิจารณาตามมาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002) ดังแสดงในสมการที่ (4.4) ถึง (4.7)

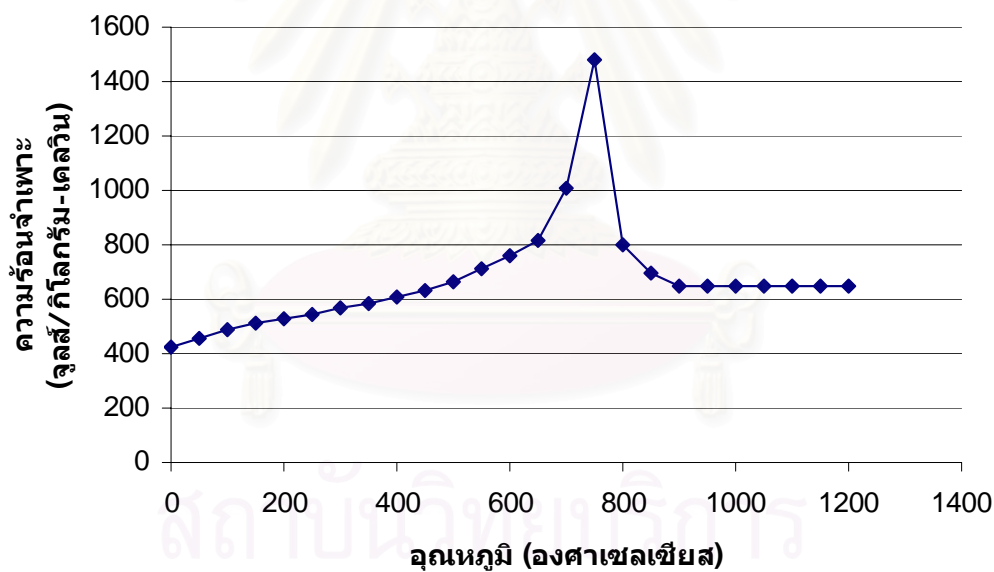
$$c_a = 425 + (7.73 \times 10^{-1} \times T_s) - (1.69 \times 10^{-3} \times T_s^2) + (2.22 \times 10^{-6} \times T_s^3) \quad \text{เมื่อ } T_s < 600^\circ\text{C} \quad (4.4)$$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - T_s} \quad \text{เมื่อ } 600^\circ\text{C} \leq T_s < 735^\circ\text{C} \quad (4.5)$$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{T_s - 731} \quad \text{เมื่อ } 735^\circ\text{C} \leq T_s < 900^\circ\text{C} \quad (4.6)$$

$$c_a = 650 \quad \text{เมื่อ } 900^\circ\text{C} \leq T_s < 1200^\circ\text{C} \quad (4.7)$$

โดยที่  $c_a$  แทน ค่าความร้อนจำเพาะ หน่วยเป็นจูลส์/กิโลกรัม-เคลวิน  
 $T_s$  แทน อุณหภูมิเหล็ก หน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 การแปรผันของค่าความร้อนจำเพาะของเหล็กตามค่าอุณหภูมิ



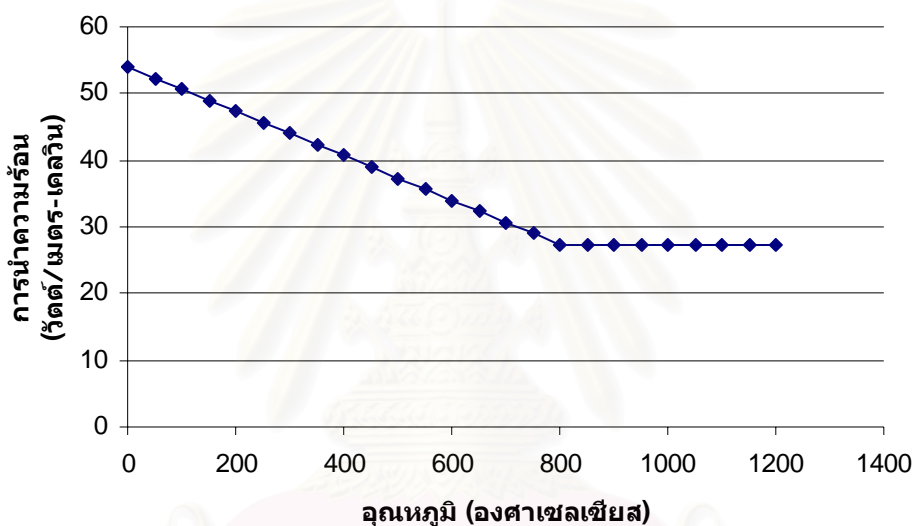
ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) พิจารณาตามมาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002) ดังแสดงในสมการที่ (4.8) ถึง (4.9)

$$k_s = 54 - (3.33 \times 10^{-2} \times T_s) \quad \text{เมื่อ } T_s < 800^\circ\text{C} \quad (4.8)$$

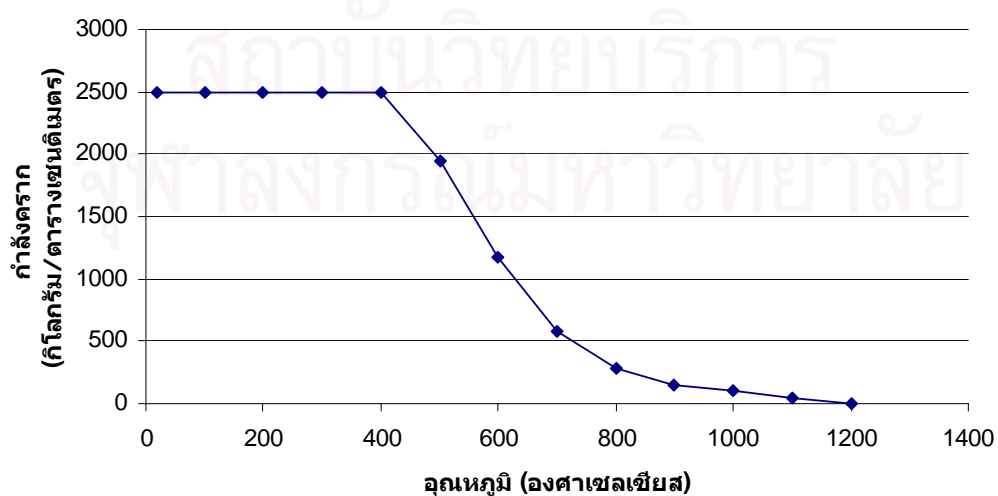
$$k_s = 27.3 \quad \text{เมื่อ } 800^\circ\text{C} \leq T_s < 1200^\circ\text{C} \quad (4.9)$$

โดยที่  $k_s$  แทน ค่าการนำความร้อน หน่วยเป็นวัตต์/เมตร-เคลวิน

$T_s$  แทน อุณหภูมิเหล็ก หน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5 การแปรผันของค่าการนำความร้อนของเหล็กตามค่าอุณหภูมิ

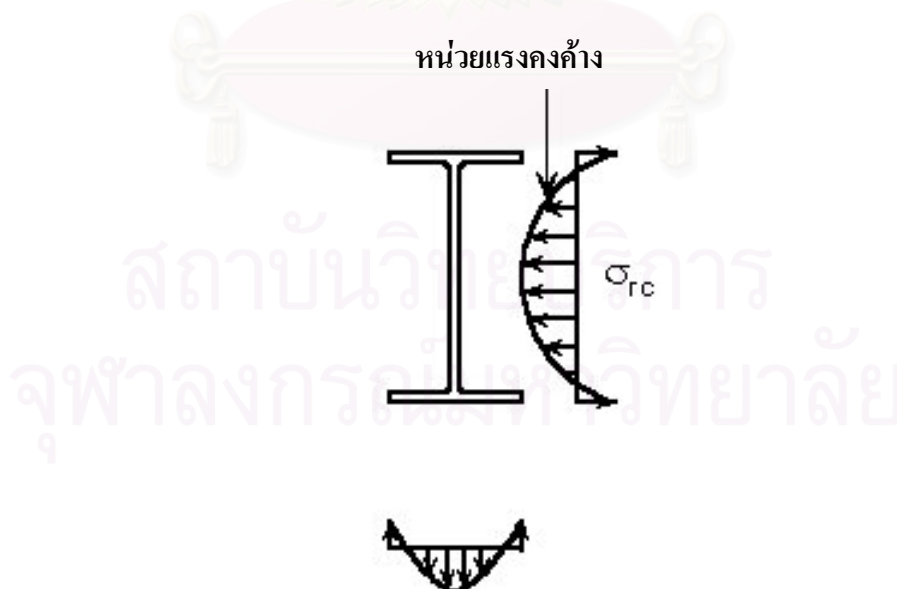


รูปที่ 4.6 การแปรผันของกำลังครากของเหล็กตามค่าอุณหภูมิ

สำหรับค่ากำลังครากของเหล็กอาศัยข้อมูลจากตารางที่ 2.1 และ 3.1 โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกำลังครากและอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4.6

ระยะเยื้องศูนย์กลางของน้ำหนักบรรทุกสำหรับเสาเหล็กตามมาตรฐาน EN 1993-1-1 (2002) กำหนดให้มีค่าไม่เกิน ร้อยละ 8 ของมิติด้านที่สั้นที่สุดของเสาเหล็ก เมื่อเสาเหล็กมีความยาวปีกไม่เกิน 200 มม. และความยาวเอวไม่เกิน 300 มม. ซึ่งระยะเยื้องศูนย์กลางดังกล่าวคือระยะเยื้องศูนย์กลางที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการก่อสร้าง สำหรับเสาเหล็กขนาด H100x100x6x8 มม. มีระยะเยื้องศูนย์กลางของน้ำหนักบรรทุก เท่ากับ 8 มิลลิเมตร

หน่วยแรงค้ำคือหน่วยแรงภายในหน้าตัดเหล็กที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในหน้าตัดเหล็กที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยปกติหน่วยแรงค้ำมีค่าประมาณ 0.3 เท่าของกำลังคราก โดยเป็นหน่วยแรงอัดที่บริเวณปลายปีกและเป็นหน่วยแรงดึงที่บริเวณกลางปีก ในขณะที่เป็นหน่วยแรงดึงที่บริเวณรอยต่อระหว่างปีกและเอวและเป็นหน่วยแรงอัดที่เอวตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.7 ทั้งนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Kuo-Chen และคณะ, 2005) พบว่าพฤติกรรมการรับน้ำหนักตามแนวแกนของเสาเหล็กขนาดหน้าตัด H100x100x6x8 มม. ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงไม่มีผลกระทบจากหน่วยแรงค้ำ ดังนั้นการศึกษานี้จึงไม่พิจารณาหน่วยแรงค้ำภายในหน้าตัดเสาเหล็ก



รูปที่ 4.7 ลักษณะการกระจายตัวของหน่วยแรงค้ำภายในหน้าตัดเหล็ก

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของโปรแกรม ABAQUS อาศัยหลักการของสมดุลพลังงาน ดังสมการที่ (4.10) และ (4.11)

$$\int_V \rho \dot{U} \delta \theta dV + \int_V \frac{\partial \delta \theta}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{x}} dV = \int_V \delta \theta r dV + \int_{s_q} \delta \theta q dS \quad (4.10)$$

$$\theta = N^N(\mathbf{x})\theta^N \quad \text{เมื่อ } N = 1, 2, \dots, \quad (4.11)$$

|        |              |     |   |
|--------|--------------|-----|---|
| โดยที่ | $\theta$     | แทน | อุณหภูมิที่ตำแหน่ง $\mathbf{x}$                                 |
|        | $\rho$       | แทน | ความหนาแน่นของวัสดุ   |
|        | $\dot{U}$    | แทน | อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในวัสดุเทียบกับเวลา                |
|        | $V$          | แทน | ปริมาตรของวัสดุ   |
|        | $\mathbf{x}$ | แทน | เวกเตอร์แสดงพิกัดตำแหน่ง  |
|        | $\mathbf{k}$ | แทน | เมทริกซ์ค่าคงที่การนำความร้อน                                   |
|        | $r$          | แทน | ปริมาณความร้อนจากภายนอกที่เข้าสู่เนื้อวัสดุต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร |
|        | $s_q$        | แทน | พื้นผิวของวัสดุที่ไม่ได้ระบุค่าอุณหภูมิ                         |
|        | $q$          | แทน | ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่วัสดุต่อพื้นที่                         |
|        | $S$          | แทน | พื้นที่ของผิววัสดุ  |

มาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002) ได้กำหนดเกณฑ์การพิจารณาการวิบัติของเสาเหล็กไว้ 3 กรณี คือ พิจารณาค่าการโก่งตัวสูงสุดของเสาเหล็ก ( $\Delta_{\max}$ ) ตามสมการที่ (4.12) โดยที่ค่าการโก่งตัวสูงสุดมีหน่วยเป็นเซนติเมตร ค่าอัตราการโก่งตัวสูงสุดของเสาเหล็ก ( $\dot{\Delta}_{\max}$ ) ตามสมการที่ (4.13) โดยที่อัตราการโก่งตัวสูงสุดมีหน่วยเป็น เซนติเมตรต่อนาที และเมื่อค่าแรงปฏิกิริยาของเสาเหล็กมีค่าลดต่ำกว่าค่าเริ่มต้น

$$\Delta_{\max} \leq \frac{l}{60} \quad (4.12)$$

$$\dot{\Delta}_{\max} \leq \frac{lB^2}{9000} \quad (4.13)$$

|        |                       |     |   |
|--------|-----------------------|-----|---|
| โดยที่ | $\Delta_{\max}$       | แทน | ค่าการโก่งตัวสูงสุดของเสาเหล็ก หน่วยเป็นเซนติเมตร             |
|        | $\dot{\Delta}_{\max}$ | แทน | ค่าอัตราการโก่งตัวสูงสุดของเสาเหล็ก หน่วยเป็นเซนติเมตรต่อนาที |
|        | $l$                   | แทน | ความยาวเสาเหล็ก มีหน่วยเป็นเซนติเมตร                          |
|        | $B$                   | แทน | มิติด้านที่มากที่สุดของหน้าตัดเสา หน่วยเป็นเซนติเมตร          |

## 4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอาศัยการพิจารณาการแบ่งชิ้นส่วนย่อย 4 รูปแบบ โดยกำหนดจำนวนชิ้นส่วนย่อยในการจำลองหน้าตัดเสาเหล็กคองที่ 46 ชิ้นส่วน และเปลี่ยนความยาวของชิ้นส่วนย่อยตามแนวแกนเสา 4 ค่า ได้แก่ 3.5 7.0 14.0 และ 28.0 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้จำนวนชิ้นส่วนย่อยทั้งหมดในแบบจำลองเป็นดังแสดงในตารางที่ 4.2

แบบจำลองทั้ง 4 ชุดมีลักษณะสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เหมือนกันทุกประการ คือ ความยาวของเสาเหล็กเท่ากับ 140 เซนติเมตร มีฐานรองที่ปลายทั้ง 2 ด้าน เป็นฐานรองรับชนิดยึดแน่น มีน้ำหนักบรรทุก 7 ตันกระทำในแนวแกนที่ปลายเสาด้านบน โดยมีระยะเยื้องศูนย์กลางในแนวแกนรอง 5 มิลลิเมตร ความร้อนที่ได้รับเป็นไปตามมาตรฐาน BS 476 (BSI, 1987) เป็นเวลา 10 นาทีซึ่งลักษณะสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ที่กล่าวมาเป็นไปตามกรณีวิเคราะห์แบบจำลองหมายเลข S1-1 (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในหัวข้อ 4.3)

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 4 ชุด ได้ทำการเปรียบเทียบค่า หน่วยแรงตั้งฉากเฉลี่ย ( $\bar{\sigma}_{33}^j$ ) ดังสมการที่ (4.14) และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นส่วนย่อยเฉลี่ย ( $\bar{u}_2^j$ ) ดังสมการที่ (4.15) โดยทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 6 ตำแหน่งใน 1 ชุดแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 นอกจากนี้แต่ละชุดข้อมูลยังทำการเปรียบเทียบที่ 4 ตำแหน่งเวลา คือที่ 0.5 นาที 3 นาที 5 นาที 8 นาที และ 10 นาที ตามลำดับ

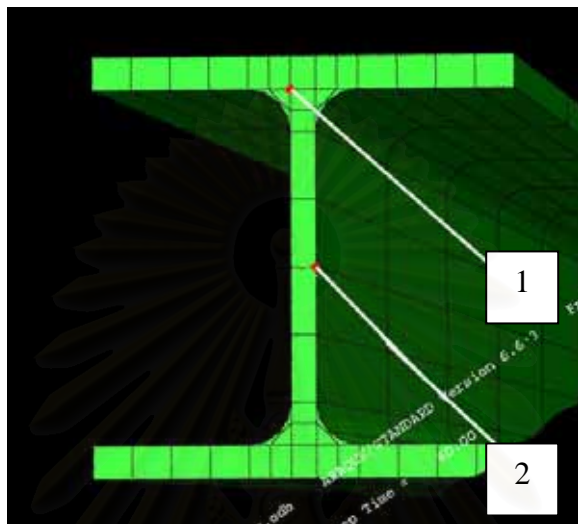
ตารางที่ 4.2 ขนาดและจำนวนชิ้นส่วนย่อยในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

| แบบจำลอง | จำนวนชิ้นส่วนย่อยต่อหน้าตัด | ความยาวของชิ้นส่วนย่อยตามแนวแกนเสา (เซนติเมตร) | จำนวนชิ้นส่วนย่อยทั้งหมดในแบบจำลอง |
|----------|-----------------------------|--|------------------------------------|
| T1       | 46                          | 28   | 230                                |
| T2       | 46                          | 14   | 460                                |
| T3       | 46                          | 7  | 920                                |
| T4       | 46                          | 3.5  | 1840                               |

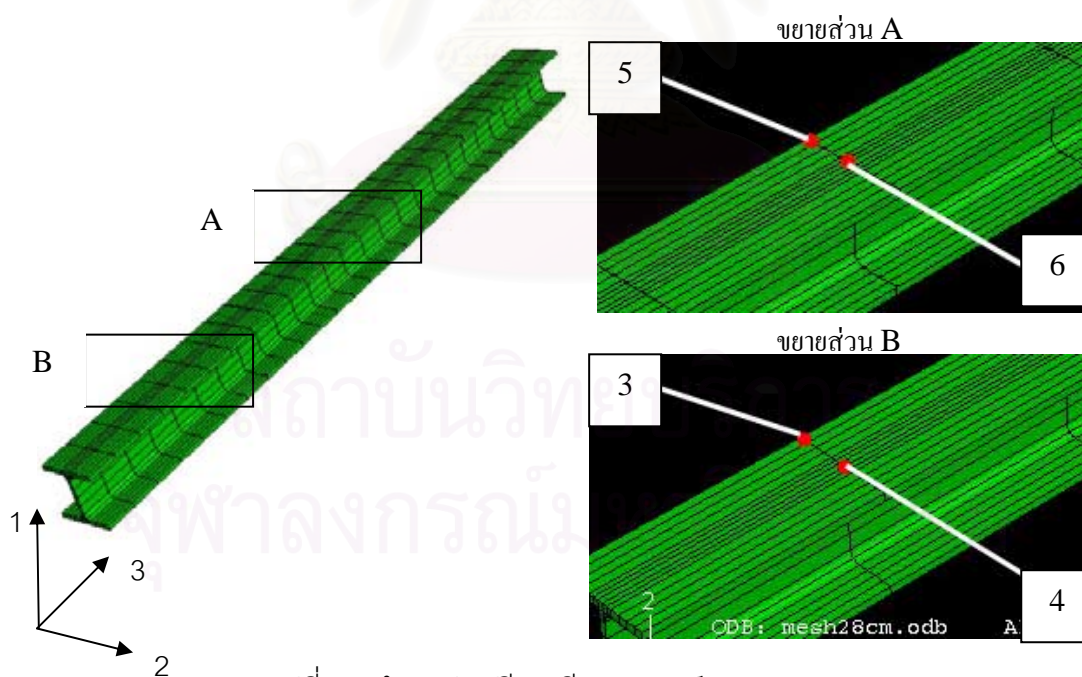
$$\bar{\sigma}_{33}^j \leq \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{33}^j)_i}{n} \quad \text{เมื่อ } j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4.14)$$

$$\bar{u}_2^j \leq \frac{\sum_{i=1}^n (u_2^j)_i}{n} \quad \text{เมื่อ } j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4.15)$$

|                        |     |   |
|------------------------|-----|---|
| โดยที่ $\sigma_{33}^j$ | แทน | หน่วยแรงตั้งฉากในทิศทางขนานกับแกน 3 ในตำแหน่งที่ $j$                        |
| $u_2^j$                | แทน | การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในทิศทางขนานกับแกน 2                                   |
| $n$                    | แทน | จำนวนจุดเวลาที่พิจารณา โดยการศึกษาพิจารณาในเวลาที่ 0.5 3 8 และ 10 ( $n=4$ ) |



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่หน้าตัด



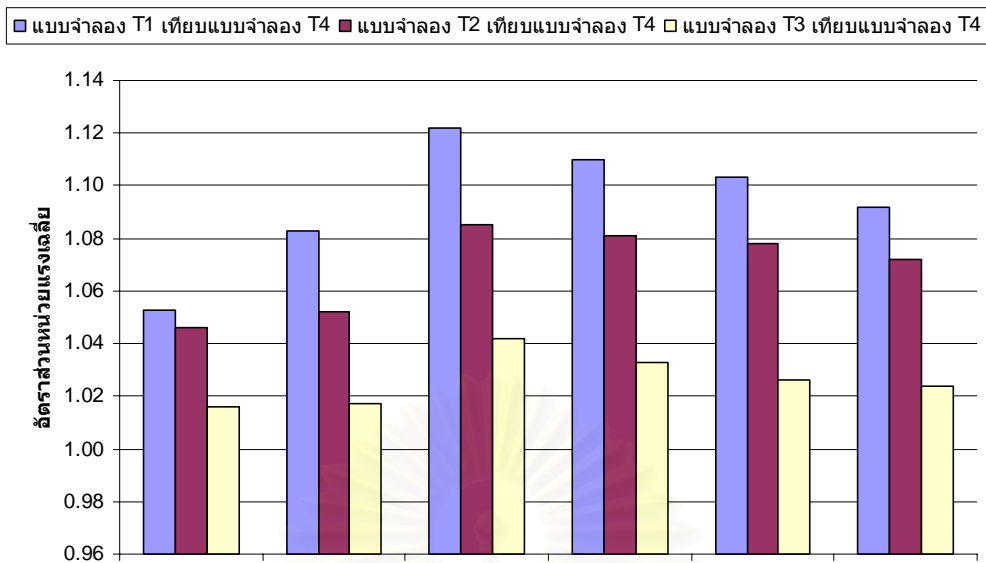
รูปที่ 4.9 ตำแหน่งเปรียบเทียบผลลัพธ์ตามความยาว

จากผลการเปรียบเทียบพบว่าอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเฉลี่ยของแบบจำลอง T3 เทียบ T4 มีค่าอยู่ในช่วง 1.016 ถึง 1.042 และอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉลี่ยของแบบจำลอง T3 เทียบ T4 มีค่าอยู่ในช่วง 1.040 ถึง 1.048 ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.10-4.11 ซึ่งเป็นมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนหน่วยแรงของแบบจำลองอื่น ๆ นอกจากนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง T3 ยังน้อยกว่าระยะเวลาในการวิเคราะห์แบบจำลอง T4 ถึงประมาณ 4 ชั่วโมง ในการศึกษานี้กำหนดค่าอัตราส่วนหน่วยแรงเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองและอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉลี่ยระหว่างแบบจำลอง ไม่ให้เกินร้อยละ 5 เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความถูกต้องของแบบจำลอง จึงได้เลือกใช้ขนาดและจำนวนชิ้นส่วนย่อยของแบบจำลอง T3 คือมีความยาวของชิ้นส่วนย่อยในแนวแกนเสาเท่ากับ 7 เซนติเมตร จำนวนชิ้นส่วนย่อยทั้งหมดเท่ากับ 920 ชิ้นส่วน ในการวิเคราะห์แบบจำลองอื่น ๆ ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.12 แสดงอัตราส่วนหน่วยแรงที่ชิ้นส่วนย่อยที่ตำแหน่งที่ 2

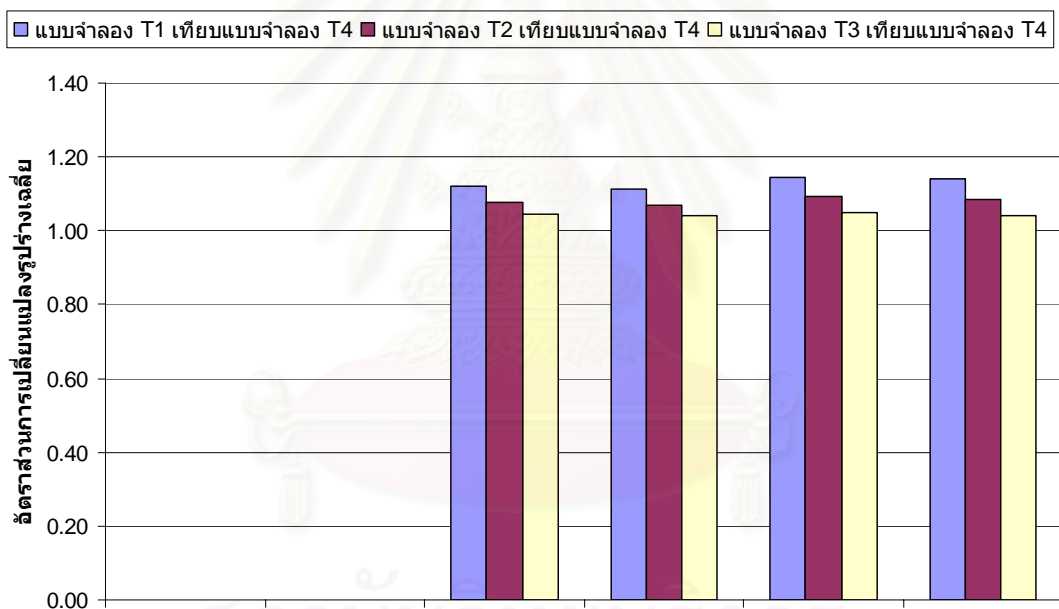
ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนหน่วยแรงเฉลี่ยและอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉลี่ย

| ตำแหน่ง | อัตราส่วนหน่วยแรงเฉลี่ย |          |          | อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉลี่ย |          |          |
|---------|-------------------------|----------|----------|--------------------------------------|----------|----------|
|         | แบบจำลอง                | แบบจำลอง | แบบจำลอง | แบบจำลอง                             | แบบจำลอง | แบบจำลอง |
|         | T2 เทียบ                | T3 เทียบ | T3 เทียบ | T2 เทียบ                             | T3 เทียบ | T3 เทียบ |
|         | แบบจำลอง                | แบบจำลอง | แบบจำลอง | แบบจำลอง                             | แบบจำลอง | แบบจำลอง |
|         | T4                      | T4       | T4       | T4                                   | T4       | T4       |
| 1       | 1.053                   | 1.046    | 1.016    | -                                    | -        | -        |
| 2       | 1.083                   | 1.052    | 1.017    | -                                    | -        | -        |
| 3       | 1.122                   | 1.085    | 1.042    | 1.122                                | 1.075    | 1.044    |
| 4       | 1.110                   | 1.081    | 1.033    | 1.114                                | 1.068    | 1.040    |
| 5       | 1.103                   | 1.078    | 1.026    | 1.144                                | 1.092    | 1.048    |
| 6       | 1.092                   | 1.072    | 1.024    | 1.139                                | 1.083    | 1.042    |





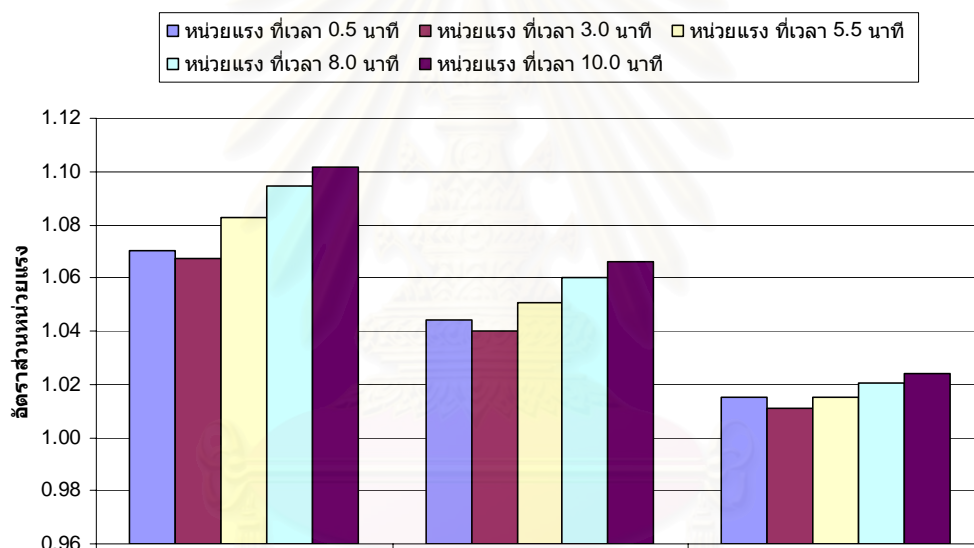
รูปที่ 4.10 อัตราส่วนหน่วยแรงเฉลี่ย



รูปที่ 4.11 อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉลี่ย

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนหน่วยแรงที่ขึ้นส่วนน้อยที่ตำแหน่งที่ 2

| เวลา<br>(นาที) | อัตราส่วนหน่วยแรง                |                                  |                                  |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                | แบบจำลอง T2 เทียบ<br>แบบจำลอง T4 | แบบจำลอง T3 เทียบ<br>แบบจำลอง T4 | แบบจำลอง T3 เทียบ<br>แบบจำลอง T4 |
| 0.5            | 1.070                            | 1.044                            | 1.015                            |
| 3.0            | 1.067                            | 1.040                            | 1.011                            |
| 5.5            | 1.082                            | 1.051                            | 1.015                            |
| 8.0            | 1.094                            | 1.060                            | 1.021                            |
| 10.0           | 1.102                            | 1.066                            | 1.024                            |
| เฉลี่ย         | 1.083                            | 1.052                            | 1.017                            |



รูปที่ 4.12 อัตราส่วนหน่วยแรงที่ขึ้นส่วนน้อยที่ตำแหน่งที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 4.3 กรณีวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์

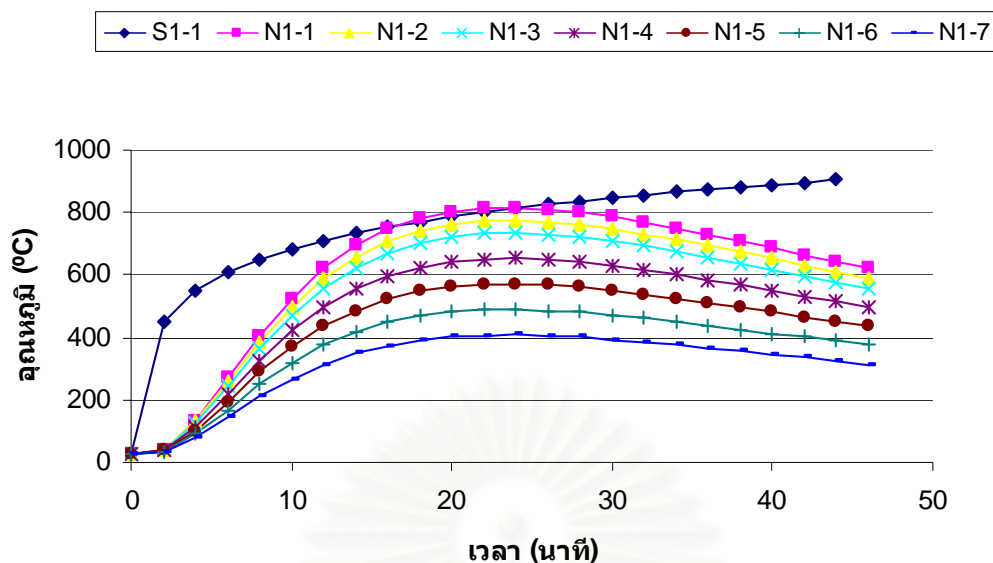
ในการศึกษานี้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองทั้งสิ้น 40 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 แบบจำลอง S1-1 ถึง S5-1 เป็นกรณีวิเคราะห์เสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมาตรฐาน BS 476 (BSI, 1987) เพื่อกำหนดค่าอุณหภูมิขีดจำกัด (critical temperature,  $T_c$ ) กลุ่มที่ 2 แบบจำลอง N1-1 ถึง N5-7 เป็นกรณีวิเคราะห์เสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (BFD) โดยอาศัยค่าอุณหภูมิขีดจำกัดที่ได้จากการวิเคราะห์กลุ่มที่ 1 ในการกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุด โดยกำหนดให้เท่ากับร้อยละ 100 95 90 80 70 60 และ 50 ของค่าอุณหภูมิขีดจำกัด และการกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกตามสมการที่ (4.16) ให้เท่ากับ 0.15 0.20 0.30 0.40 และ 0.50 นอกจากนี้ยังกำหนดให้ระยะเยื้องศูนย์กลางของน้ำหนักบรรทุกในแนวแกนรองมีค่าเท่ากับ 5 มม.

$$R = \frac{P}{P_u} \quad (4.16)$$

|        |       |     |  |
|--------|-------|-----|--|
| โดยที่ | $R$   | แทน | อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก                                       |
|        | $P$   | แทน | น้ำหนักบรรทุก หน่วยเป็นกิโลกรัม                              |
|        | $P_u$ | แทน | น้ำหนักบรรทุกสูงสุด คำนวณจากสมการที่ (3.1) หน่วยเป็นกิโลกรัม |

ตารางที่ 4.5 สภาวะแวดล้อมของแบบจำลอง

| แบบจำลอง | อัตราส่วนน้ำหนักรวม | สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น | อุณหภูมิสูงสุด     | แบบจำลอง | อัตราส่วนน้ำหนักรวม | สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น | อุณหภูมิสูงสุด     |
|----------|---------------------|---------------------------|--------------------|----------|---------------------|---------------------------|--------------------|
| S1-1     | 0.15                | BS476                     | -                  | N3-2     | 0.30                | BFD                       | 0.95 $T_{cr,S3-1}$ |
| S2-1     | 0.20                | BS476                     | -                  | N3-3     | 0.30                | BFD                       | 0.90 $T_{cr,S3-1}$ |
| S3-1     | 0.30                | BS476                     | -                  | N3-4     | 0.30                | BFD                       | 0.80 $T_{cr,S3-1}$ |
| S4-1     | 0.40                | BS476                     | -                  | N3-5     | 0.30                | BFD                       | 0.70 $T_{cr,S3-1}$ |
| S5-1     | 0.50                | BS476                     | -                  | N3-6     | 0.30                | BFD                       | 0.60 $T_{cr,S3-1}$ |
| N1-1     | 0.15                | BFD                       | 1.00 $T_{cr,S1-1}$ | N3-7     | 0.30                | BFD                       | 0.50 $T_{cr,S3-1}$ |
| N1-2     | 0.15                | BFD                       | 0.95 $T_{cr,S1-1}$ | N4-1     | 0.40                | BFD                       | 1.00 $T_{cr,S4-1}$ |
| N1-3     | 0.15                | BFD                       | 0.90 $T_{cr,S1-1}$ | N4-2     | 0.40                | BFD                       | 0.95 $T_{cr,S4-1}$ |
| N1-4     | 0.15                | BFD                       | 0.80 $T_{cr,S1-1}$ | N4-3     | 0.40                | BFD                       | 0.90 $T_{cr,S4-1}$ |
| N1-5     | 0.15                | BFD                       | 0.70 $T_{cr,S1-1}$ | N4-4     | 0.40                | BFD                       | 0.80 $T_{cr,S4-1}$ |
| N1-6     | 0.15                | BFD                       | 0.60 $T_{cr,S1-1}$ | N4-5     | 0.40                | BFD                       | 0.70 $T_{cr,S4-1}$ |
| N1-7     | 0.15                | BFD                       | 0.50 $T_{cr,S1-1}$ | N4-6     | 0.40                | BFD                       | 0.60 $T_{cr,S4-1}$ |
| N2-1     | 0.20                | BFD                       | 1.00 $T_{cr,S2-1}$ | N4-7     | 0.40                | BFD                       | 0.50 $T_{cr,S4-1}$ |
| N2-2     | 0.20                | BFD                       | 0.95 $T_{cr,S2-1}$ | N5-1     | 0.50                | BFD                       | 1.00 $T_{cr,S5-1}$ |
| N2-3     | 0.20                | BFD                       | 0.90 $T_{cr,S2-1}$ | N5-2     | 0.50                | BFD                       | 0.95 $T_{cr,S5-1}$ |
| N2-4     | 0.20                | BFD                       | 0.80 $T_{cr,S2-1}$ | N5-3     | 0.50                | BFD                       | 0.90 $T_{cr,S5-1}$ |
| N2-5     | 0.20                | BFD                       | 0.70 $T_{cr,S2-1}$ | N5-4     | 0.50                | BFD                       | 0.80 $T_{cr,S5-1}$ |
| N2-6     | 0.20                | BFD                       | 0.60 $T_{cr,S2-1}$ | N5-5     | 0.50                | BFD                       | 0.70 $T_{cr,S5-1}$ |
| N2-7     | 0.20                | BFD                       | 0.50 $T_{cr,S2-1}$ | N5-6     | 0.50                | BFD                       | 0.60 $T_{cr,S5-1}$ |
| N3-1     | 0.30                | BFD                       | 1.00 $T_{cr,S3-1}$ | N5-7     | 0.50                | BFD                       | 0.50 $T_{cr,S5-1}$ |



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของแบบจำลองเลขที่ S1-1 และ N1-1 ถึง N1-7

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองที่พิจารณาในการศึกษานี้ ได้แก่ ค่าอุณหภูมิขีดจำกัด เวลาที่เกิดการวิบัติ ลักษณะการวิบัติ ค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุดและเวลาที่เกิดค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.14 – 4.21 นอกจากนี้ยังพิจารณาค่าอัตราส่วนอุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดเพลิงไหม้ต่ออุณหภูมิขีดจำกัดตามสมการที่ (4.17)

$$F = \frac{T_{\max}}{T_{cr}} \quad (4.17)$$

โดยที่  $F$  แทน อัตราส่วนอุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดเพลิงไหม้ต่ออุณหภูมิขีดจำกัด  
 $T_{cr}$  แทน อุณหภูมิขีดจำกัด มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส  
 $T_{\max}$  แทน อุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดเพลิงไหม้ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

ลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นในทุกกรณีคือการวิบัติแบบผสม กล่าวคือเกิดการวิบัติแบบโค้งเดาะทั้งขึ้นส่วนในแกนรองและเกิดการวิบัติแบบโค้งเดาะเฉพาะที่บริเวณปีกที่ตำแหน่งกลางเสาเหล็ก

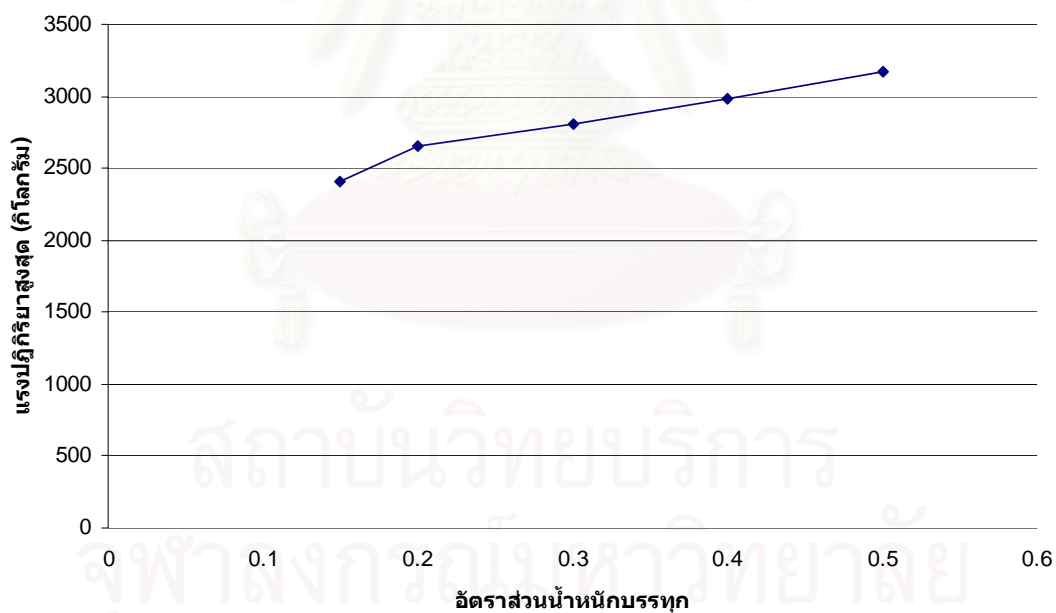
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

| แบบจำลอง | อุณหภูมิ<br>ขีดจำกัด (°C) | แรงปฏิกิริยา         |             | การวิบัติ      |             |
|----------|---------------------------|----------------------|-------------|----------------|-------------|
|          |                           | ค่าสูงสุด (กิโลกรัม) | เวลา (นาที) | ลักษณะ         | เวลา (นาที) |
| S1-1     | 791.3                     | 2411                 | 12          | โก่งเดาะแบบผสม | 23          |
| S2-1     | 752.0                     | 2653                 | 9           | โก่งเดาะแบบผสม | 21          |
| S3-1     | 692.3                     | 2810                 | 7           | โก่งเดาะแบบผสม | 17          |
| S4-1     | 648.7                     | 2985                 | 6           | โก่งเดาะแบบผสม | 13          |
| S5-1     | 611.8                     | 3167                 | 5           | โก่งเดาะแบบผสม | 10          |
| N1-1     | -                         | 2902                 | 17          | โก่งเดาะแบบผสม | 27          |
| N1-2     | -                         | 2880                 | 18          | โก่งเดาะแบบผสม | 34          |
| N1-3     | -                         | 2825                 | 18          | โก่งเดาะแบบผสม | 38          |
| N1-4     | -                         | 2794                 | 19          | โก่งเดาะแบบผสม | 38          |
| N1-5     | -                         | 2766                 | 22          | โก่งเดาะแบบผสม | 45          |
| N1-6     | -                         | 2692                 | 26          | โก่งเดาะแบบผสม | 59          |
| N1-7     | -                         | 2645                 | 40          | โก่งเดาะแบบผสม | 92          |
| N2-1     | -                         | 3188                 | 10          | โก่งเดาะแบบผสม | 23          |
| N2-2     | -                         | 3122                 | 12          | โก่งเดาะแบบผสม | 25          |
| N2-3     | -                         | 3069                 | 13          | โก่งเดาะแบบผสม | 28          |
| N2-4     | -                         | 3004                 | 15          | โก่งเดาะแบบผสม | 33          |
| N2-5     | -                         | 2938                 | 18          | โก่งเดาะแบบผสม | 40          |
| N2-6     | -                         | 2884                 | 23          | โก่งเดาะแบบผสม | 52          |
| N2-7     | -                         | 2815                 | 32          | โก่งเดาะแบบผสม | 72          |
| N3-1     | -                         | 3461                 | 6           | โก่งเดาะแบบผสม | 19          |
| N3-2     | -                         | 3393                 | 8           | โก่งเดาะแบบผสม | 21          |
| N3-3     | -                         | 3329                 | 10          | โก่งเดาะแบบผสม | 24          |
| N3-4     | -                         | 3254                 | 13          | โก่งเดาะแบบผสม | 29          |
| N3-5     | -                         | 3180                 | 15          | โก่งเดาะแบบผสม | 32          |
| N3-6     | -                         | 3121                 | 17          | โก่งเดาะแบบผสม | 40          |
| N3-7     | -                         | 3052                 | 23          | โก่งเดาะแบบผสม | 50          |
| N4-1     | -                         | 3556                 | 6           | โก่งเดาะแบบผสม | 16          |
| N4-2     | -                         | 3487                 | 8           | โก่งเดาะแบบผสม | 17          |



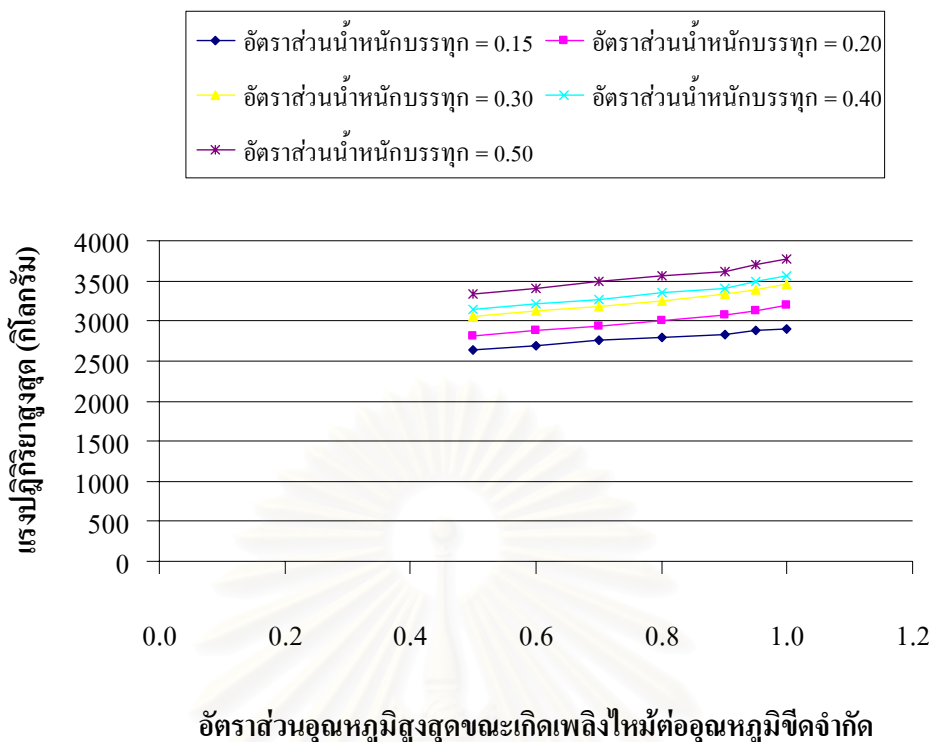
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง (ต่อ)

| แบบจำลอง | อุณหภูมิ<br>ขีดจำกัด (°C) | แรงปฏิกิริยา         |             | การวิบัติ      |             |
|----------|---------------------------|----------------------|-------------|----------------|-------------|
|          |                           | ค่าสูงสุด (กิโลกรัม) | เวลา (นาที) | ลักษณะ         | เวลา (นาที) |
| N4-3     | -                         | 3412                 | 9           | โก่งเดาะแบบผสม | 18          |
| N4-4     | -                         | 3349                 | 10          | โก่งเดาะแบบผสม | 20          |
| N4-5     | -                         | 3274                 | 12          | โก่งเดาะแบบผสม | 24          |
| N4-6     | -                         | 3208                 | 13          | โก่งเดาะแบบผสม | 27          |
| N4-7     | -                         | 3145                 | 16          | โก่งเดาะแบบผสม | 35          |
| N5-1     | -                         | 3777                 | 4           | โก่งเดาะแบบผสม | 14          |
| N5-2     | -                         | 3706                 | 6           | โก่งเดาะแบบผสม | 14          |
| N5-3     | -                         | 3623                 | 7           | โก่งเดาะแบบผสม | 15          |
| N5-4     | -                         | 3567                 | 8           | โก่งเดาะแบบผสม | 16          |
| N5-5     | -                         | 3499                 | 8           | โก่งเดาะแบบผสม | 17          |
| N5-6     | -                         | 3412                 | 9           | โก่งเดาะแบบผสม | 18          |
| N5-7     | -                         | 3335                 | 10          | โก่งเดาะแบบผสม | 22          |

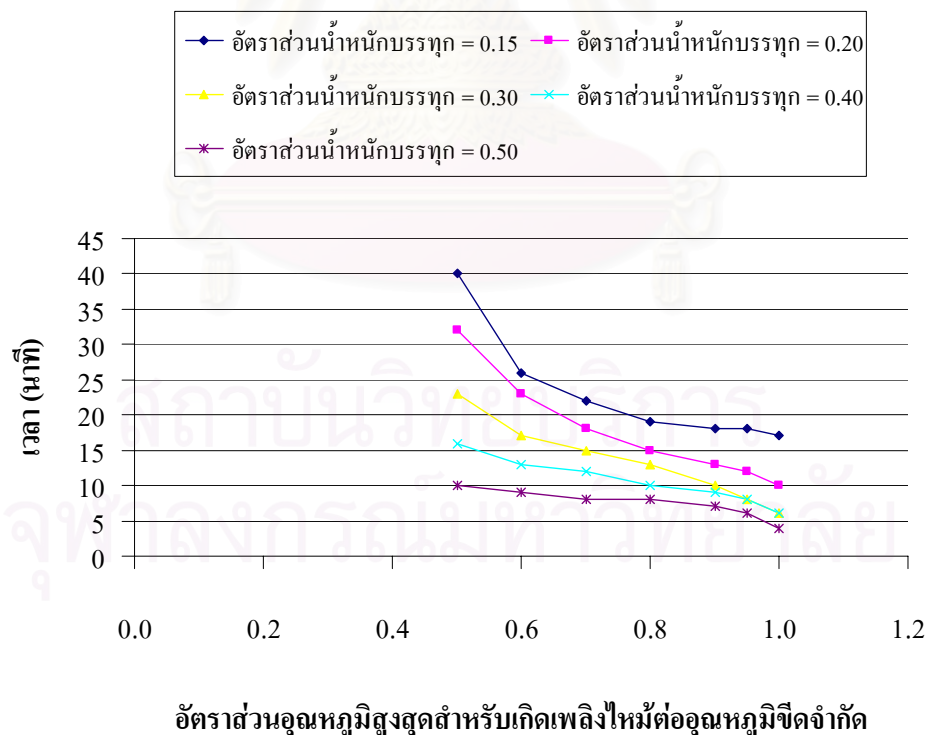


รูปที่ 4.14 แรงปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อได้รับความร้อนตามมาตรฐาน BS 476

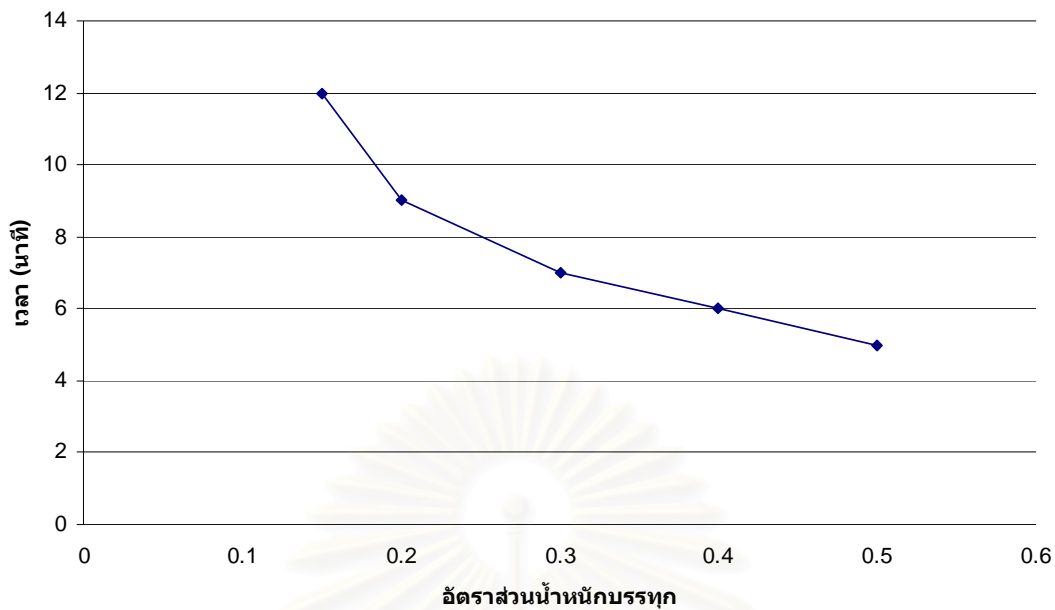
ของเสาเหล็กหน้าตัด H100X100X6X8 มม.



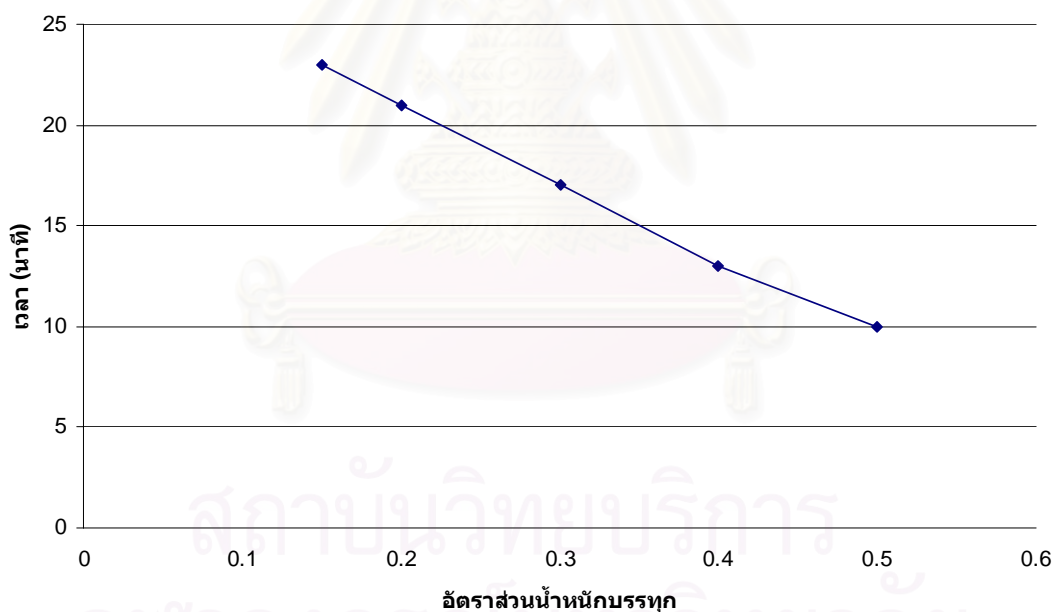
รูปที่ 4.15 แรงปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อได้รับความร้อนตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (BFD) ของเสาเหล็กหน้าตัด H100X100X6X8 มม.



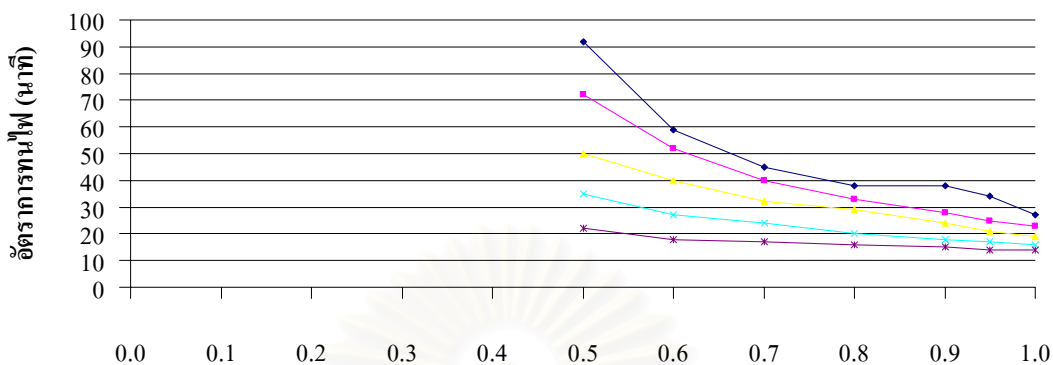
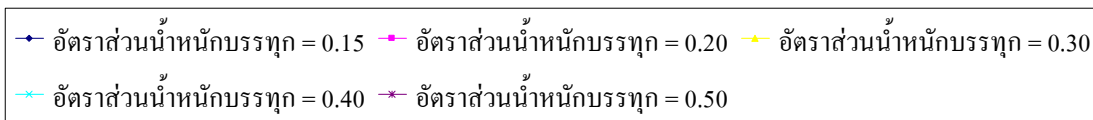
รูปที่ 4.16 ระยะเวลาเกิดแรงปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อได้รับความร้อนตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (BFD) ของเสาเหล็กหน้าตัด H100X100X6X8 มม.



รูปที่ 4.17 ระยะเวลาเกิดแรงปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อได้รับความร้อนตามมาตรฐาน BS 476 ของเสาเหล็กหน้าตัด H100X100X6X8 มม.

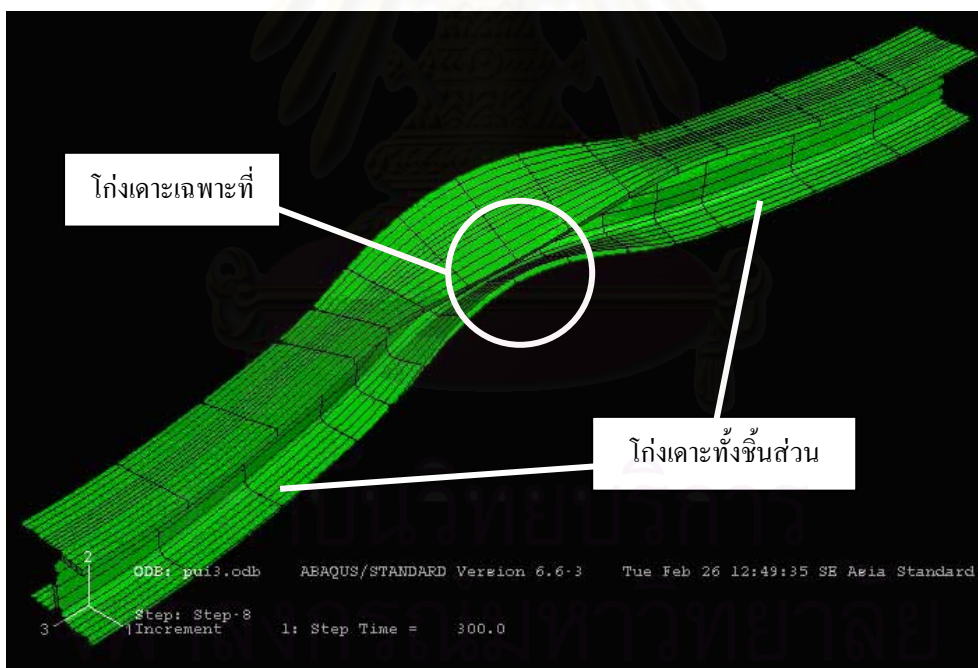


รูปที่ 4.18 ระยะเวลาเกิดการวิบัติเมื่อได้รับความร้อนตามมาตรฐาน BS 476 ของเสาเหล็กหน้าตัด H100X100X6X8 มม.



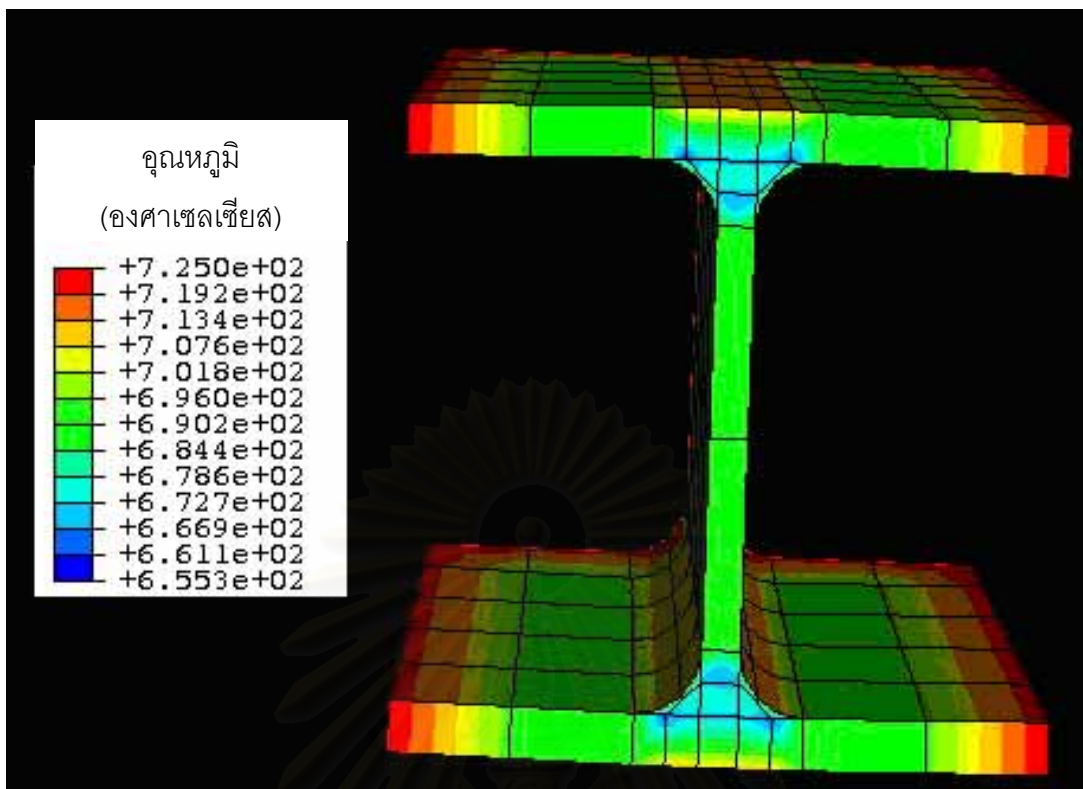
อัตราส่วนอุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดเพลิงไหม้ของอุณหภูมิจัดจำกัด

รูปที่ 4.19 ระยะเวลาเกิดการวิบัติเมื่อได้รับความร้อนตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (BFD) ของเสาเหล็กหน้าตัด H100X100X6X8 มม.



รูปที่ 4.20 ตัวอย่างการวิบัติของเสาเหล็กจากโปรแกรม ABAQUS (ขยายระยะโก่ง 10 เท่า)

จากรูปที่ 4.20 พบว่าการวิบัติของเสาเหล็กประกอบด้วยการวิบัติ 2 ชนิด คือการวิบัติเฉพาะที่ของปีกบริเวณกลางเสาเหล็ก และการวิบัติทั้งชิ้นส่วนในแกนรองของเสาเหล็ก



รูปที่ 4.21 ลักษณะการนำความร้อนในแบบจำลอง N1-1 ที่เวลา 25 นาที

รูปที่ 4.21 แสดงตัวอย่างลักษณะการนำความร้อนในแบบจำลองอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ โดยที่อุณหภูมิบริเวณปลายปีกมีค่าสูงสุด และค่าอุณหภูมิต่ำที่สุดเกิดที่บริเวณรอยต่อระหว่างปีกและเอว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

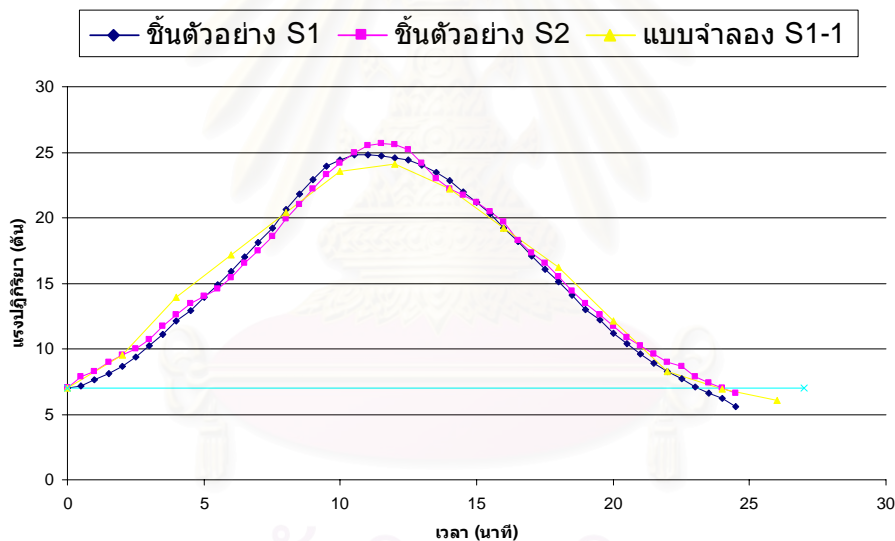
## บทที่ 5

### การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบชิ้นตัวอย่างเสาเหล็กในบทที่ 3 สามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากบทที่ 4 ดังแสดงในตารางที่ 5.1

#### 5.1 การเปรียบเทียบแรงปฏิกิริยา

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบชิ้นตัวอย่างทั้ง 5 ชิ้นในหัวข้อที่ 3.4 และผลการวิเคราะห์แบบจำลองในหัวข้อที่ 4.3 พบว่าค่าแรงปฏิกิริยาที่วัดได้จากการทดสอบและค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ถึง 5.4

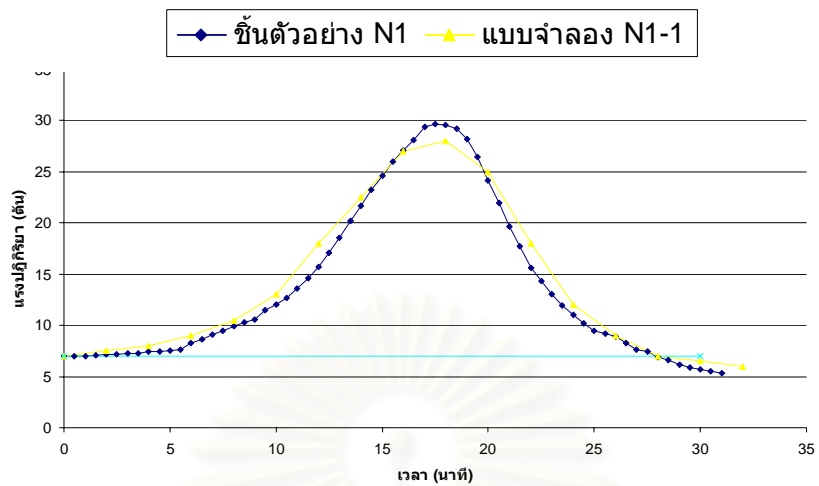


รูปที่ 5.1 แรงปฏิกิริยาของการเปรียบเทียบ C1 และ C2

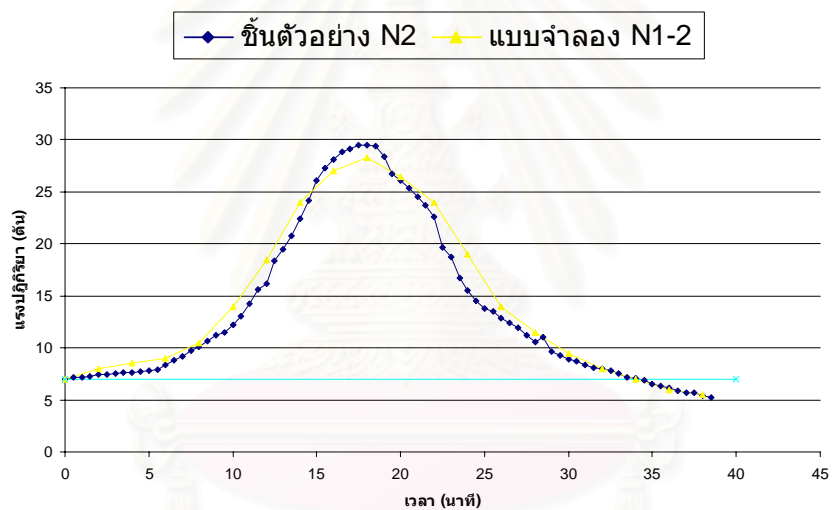
ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบการทดสอบและแบบจำลอง

| การเปรียบเทียบ | การทดสอบ | การวิเคราะห์แบบจำลอง |
|----------------|----------|----------------------|
| C1             | S1       | S1-1                 |
| C2             | S2       | S1-1                 |
| C3             | N1       | N1-1                 |
| C4             | N2       | N1-2                 |
| C5             | N3       | N1-3                 |

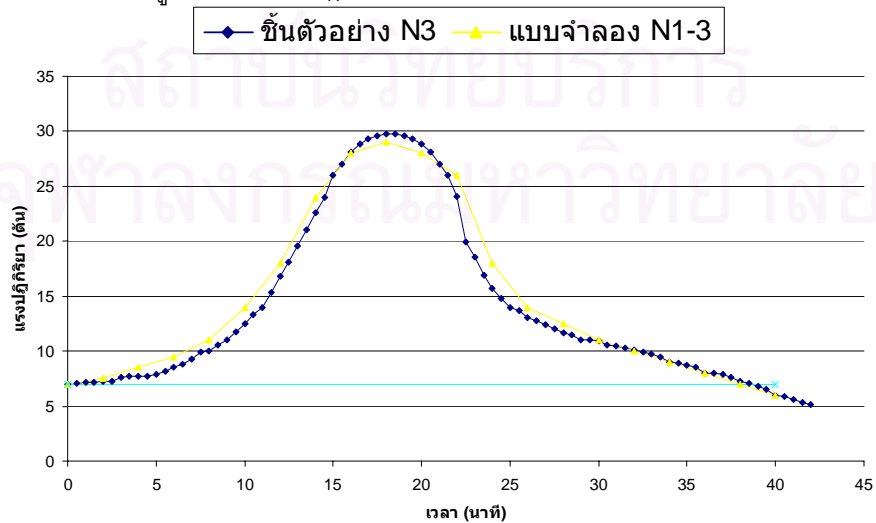




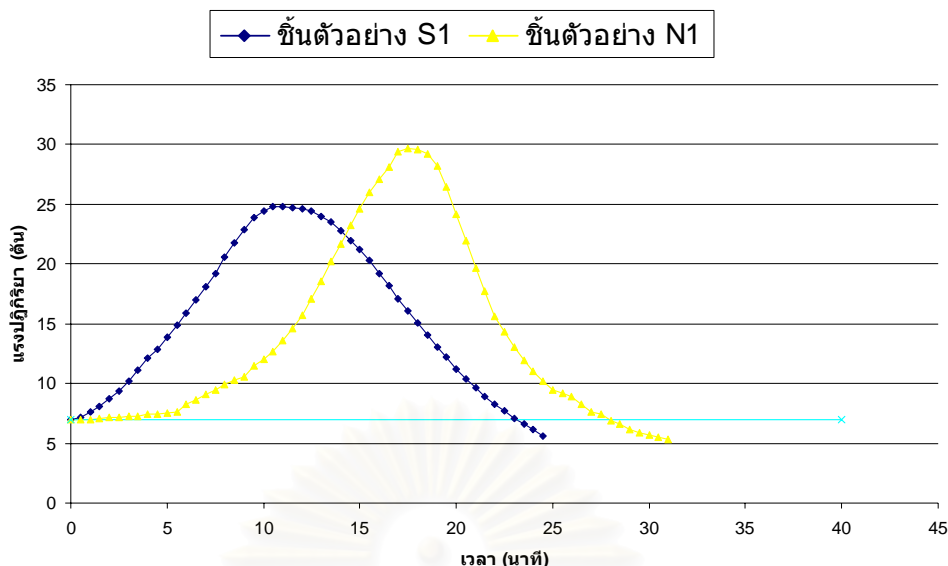
รูปที่ 5.2 แรงปฏิกิริยาของของการเปรียบเทียบ C3



รูปที่ 5.3 แรงปฏิกิริยาของของการเปรียบเทียบ C4



รูปที่ 5.4 แรงปฏิกิริยาของของการเปรียบเทียบ C5



รูปที่ 5.5 แรงปฏิกิริยาของเสาเหล็กที่ได้รับความร้อนในลักษณะที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าแรงปฏิกิริยาของเสาเหล็กที่ได้รับลักษณะความร้อนแตกต่างกันแต่มีค่าอุณหภูมิสูงสุดเท่ากันพบว่า เสาเหล็กที่ได้รับความร้อนตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์(BFD) มีค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุดมากกว่า ในขณะที่ระยะเวลาเกิดแรงปฏิกิริยาสูงสุดและเวลาที่เกิดการวิบัติจะมีค่ามากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 5.5

## 5.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิขีดจำกัด

มาตรฐาน EN 1993 1-2 (2002) ได้กำหนดสมการสำหรับประมาณค่าอุณหภูมิขีดจำกัด ดังนี้

$$T_{cr} = 39.19 \ln \left( \frac{1}{0.9674 \mu^{3.833}} - 1 \right) + 482 \quad (5.1)$$

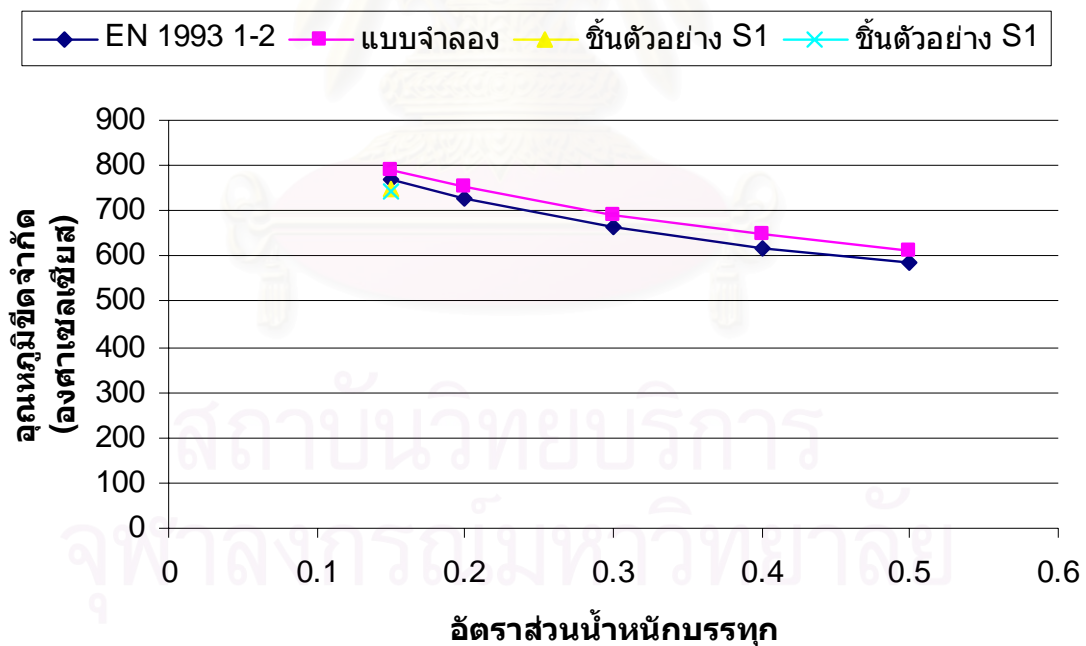
โดยที่  $T_{cr}$  แทน อุณหภูมิขีดจำกัด หน่วยเป็นองศาเซลเซียส  
 $\mu$  แทน อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก มีค่าไม่น้อยกว่า 0.013

จากสมการที่ (5.1) พบว่าค่าอุณหภูมิขีดจำกัดขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก จึงพิจารณาวิเคราะห์แบบจำลองที่มีค่าอัตราส่วนน้ำหนัก 5 ค่า คือ 0.15 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 (แบบจำลองหมายเลข S1-1 ถึง S5-1) โดยเลือกใช้แบบจำลองเสาเหล็กขนาดหน้าตัด H100x100x8x6 มม. มาตรฐาน มอก.1227-2539 ให้ความร้อนแก่แบบจำลองตามมาตรฐาน BS

467 (BSI, 1987) นอกจากนี้ยังพิจารณาเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิขีดจำกัดที่ได้จากการทดสอบขึ้นตัวอย่าง S1 และ S2 ด้วย จากการพิจารณาพบว่าค่าอุณหภูมิขีดจำกัดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิขีดจำกัดที่ได้จากมาตรฐาน EN 1993 1-2 (2002) และขึ้นตัวอย่าง S1 และ S2 ดังแสดงในตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.2 ค่าอุณหภูมิขีดจำกัดจากมาตรฐาน EN 1993 1-2 (2002) แบบจำลองและขึ้นตัวอย่าง S1 S2

| อัตราส่วน<br>น้ำหนักบรรทุก | อุณหภูมิขีดจำกัด (°C) |          |                 |                 |
|----------------------------|-----------------------|----------|-----------------|-----------------|
|                            | EN 1993 1-2           | แบบจำลอง | ขึ้นตัวอย่าง S1 | ขึ้นตัวอย่าง S2 |
| 0.15                       | 768.2                 | 791.3    | 748.3           | 740.6           |
| 0.20                       | 725.0                 | 752.0    | -               | -               |
| 0.30                       | 663.8                 | 692.3    | -               | -               |
| 0.40                       | 619.8                 | 648.7    | -               | -               |
| 0.50                       | 584.7                 | 611.8    | -               | -               |



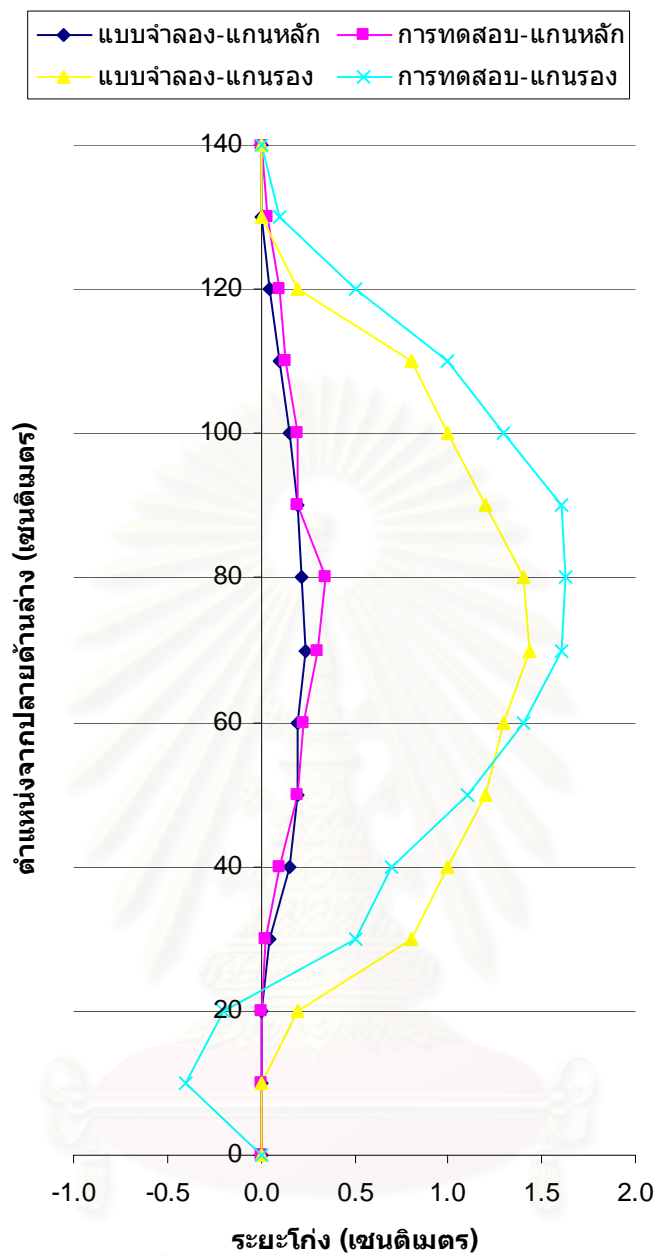
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขีดจำกัดและอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก

### 5.3 การเปรียบเทียบลักษณะการโค้งตัวของเสาเหล็ก

การโค้งตัวของเสาเหล็กที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์แบบจำลองเกิดขึ้นทั้งในด้านแกนหลักและแกนรอง แต่เกิดการโค้งตัวในแกนรองมากกว่าแกนหลักในทุกกรณี นอกจากนี้ การโค้งตัวจากการทดสอบมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 5.3 เนื่องจากบริเวณฐานรองรับด้านปลายบนของเสาเหล็กมีการติดตั้งอุปกรณ์ให้น้ำหนักบรรทุกไฮโดรลิก ฐานรองรับดังกล่าวจึงไม่สามารถแสดงความเป็นฐานรองรับแบบยึดแน่นได้เต็มที่ รูปที่ 5.7 แสดงการโค้งตัวในแกนหลักและแกนรองของการเปรียบเทียบ C1

ตารางที่ 5.3 การโค้งตัวสูงสุดของเสาเหล็ก

| การเปรียบเทียบ | ค่าการโค้งตัวสูงสุด (เซนติเมตร) |        |          |        | ตำแหน่งโค้งตัวสูงสุดจากฐานรองรับด้านล่าง (เซนติเมตร) |        |          |        |
|----------------|---------------------------------|--------|----------|--------|--|--------|----------|--------|
|                | การทดสอบ                        |        | แบบจำลอง |        | การทดสอบ   |        | แบบจำลอง |        |
|                | แกนหลัก                         | แกนรอง | แกนหลัก  | แกนรอง | แกนหลัก  | แกนรอง | แกนหลัก  | แกนรอง |
| C1             | 0.3                             | 1.6    | 0.2      | 1.4    | 80   | 80     | 70       | 70     |
| C2             | 0.4                             | 2.0    | 0.3      | 1.6    | 80   | 80     | 70       | 70     |
| C3             | 0.5                             | 2.2    | 0.4      | 1.8    | 80   | 80     | 70       | 70     |
| C4             | 0.4                             | 1.8    | 0.3      | 1.5    | 70   | 80     | 70       | 70     |
| C5             | 0.4                             | 1.5    | 0.2      | 1.2    | 80   | 80     | 70       | 70     |



รูปที่ 5.7 ลักษณะการโก่งตัวของ การเปรียบเทียบ C1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 5.4 การเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักในแนวแกนและมาตรฐานการออกแบบ

การเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักในแนวแกนและมาตรฐานการออกแบบมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและข้อจำกัดของแบบจำลอง

มาตรฐานการออกแบบเสาเหล็กภายใต้สภาวะการเกิดเพลิงไหม้ที่นำมาวิเคราะห์คือมาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002) ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 2.3.2 โดยได้พิจารณาให้เสาเหล็กรับแรงในแนวแกนเท่านั้น ขนาดเสาเหล็กที่พิจารณาคือเสาเหล็กหน้าตัด H100x100x6x8 มม. มาตรฐาน มอก.1227-2539 คุณสมบัติของวัสดุดังที่แสดงในหัวข้อที่ 4.1 โดยที่เสาเหล็กมีฐานรองรับเป็นแบบยึดแน่น ความร้อนที่ให้แก่เสาเหล็กมีค่าคงที่ตลอดการวิเคราะห์ คือมีค่าเท่ากับ 500 °C และให้น้ำหนักกระทำในแนวแกนมีอัตราการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1000 กิโลกรัม/นาที

ตารางที่ 5.4 ขนาดเสาเหล็กในแบบจำลอง

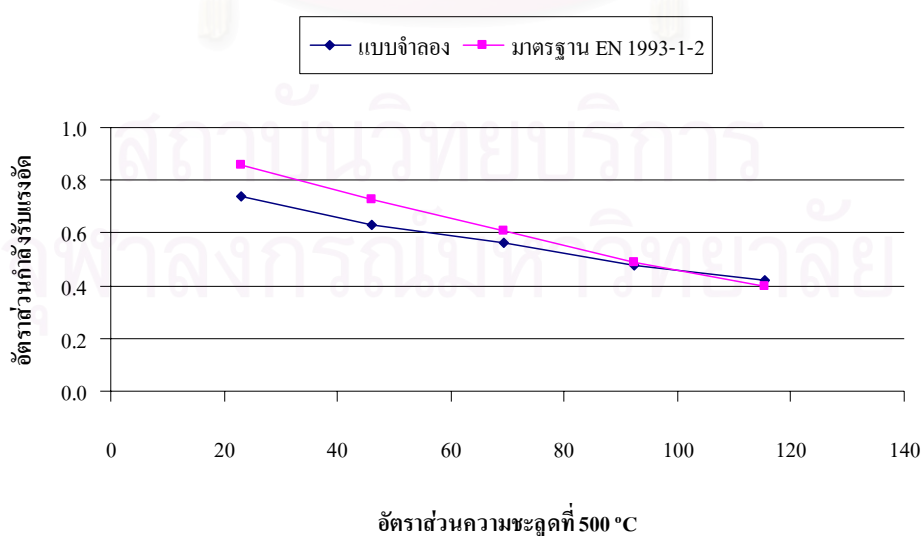
| ขนาดเสาเหล็ก<br>(มิลลิเมตร) | ความยาวเสา<br>เหล็ก<br>(เซนติเมตร) | รัศมีไจเรชั่น<br>(เซนติเมตร) | อัตราส่วนความ<br>ชะลุดที่<br>อุณหภูมิปกติ | อัตราส่วนความ<br>ชะลุดที่อุณหภูมิ<br>500 °C |
|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------|---|---|
| H100x100x6x8                | 50                                 | 2.47                         | 20.24                                     | 23.08                                       |
|                             | 100                                | 2.47                         | 40.49                                     | 46.16                                       |
|                             | 150                                | 2.47                         | 60.73                                     | 69.24                                       |
|                             | 200                                | 2.47                         | 80.97                                     | 92.32                                       |
|                             | 250                                | 2.47                         | 101.21                                    | 115.40                                      |



จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 5 กรณีพบว่า เสาเหล็กสามารถรับแรงอัดในแนวแกนได้เท่ากับ 3600 3000 2500 2000 และ 1600 กิโลกรัมสำหรับเสาเหล็กยาว 50 100 150 200 250 เซนติเมตร ตามลำดับ และเสาเหล็กทั้ง 5 กรณีเกิดการวิบัติแบบโก่งเดาะทั้งชิ้นส่วนในแกนรองและโก่งเดาะเฉพาะที่บริเวณปีก เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองและมาตรฐานการออกแบบ EN 1993-1-2 (2002) มาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.8 ที่ค่าอัตราส่วนความชะลุดน้อยกว่า 50 ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองแตกต่างจากค่าที่คำนวณตามมาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002) มากกว่าร้อยละ 10 และมีความแตกต่างมากขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนความชะลุดลดลง

ตารางที่ 5.5 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์แบบจำลองและมาตรฐานการออกแบบ EN 1993 1-2 (2002)

| อัตราส่วนความชะลุดที่อุณหภูมิ 500 °C | กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม) |          | อัตราส่วนกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิสูงต่อกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิกปกติ |          | ร้อยละความแตกต่าง |
|--------------------------------------|---------------------------|----------|--|----------|-------------------|
|                                      | EN 1993-1-2               | แบบจำลอง | EN 1993-1-2  | แบบจำลอง |                   |
| 23.08                                | 4195                      | 3600     | 0.86   | 0.74     | 14.3              |
| 46.16                                | 3454                      | 3000     | 0.73   | 0.63     | 13.0              |
| 69.24                                | 2743                      | 2500     | 0.61   | 0.56     | 8.8               |
| 92.32                                | 2052                      | 2000     | 0.49   | 0.48     | 3.5               |
| 115.40                               | 1529                      | 1600     | 0.40   | 0.42     | 5.0               |



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนความชะลุดที่ 500 °C

## 5.5 การเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักในแนวแกนและผลการทดสอบในงานวิจัยที่ผ่านมา

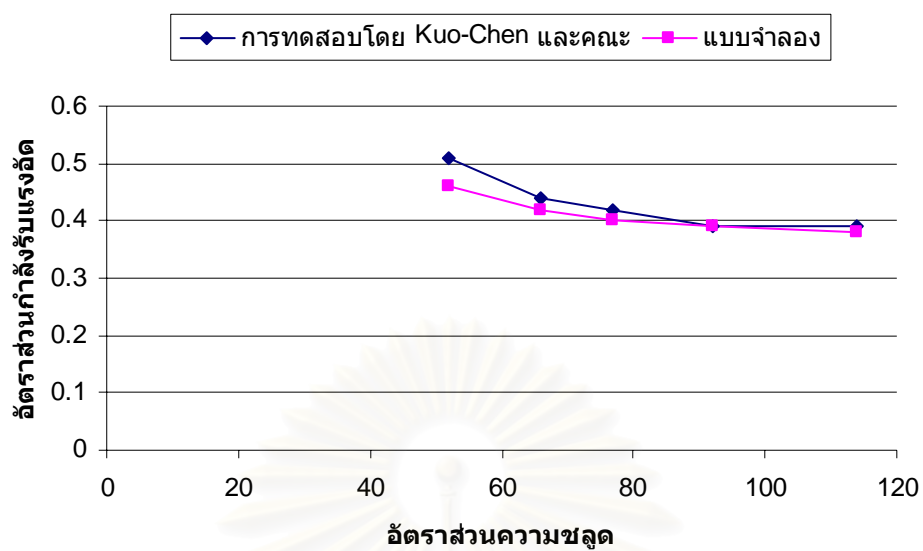
การเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักในแนวแกนและผลการทดสอบในงานวิจัยที่ผ่านมา มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและข้อจำกัดของแบบจำลอง

จากผลการทดสอบในงานวิจัยที่ผ่านมา (Kuo-Chen และคณะ, 2005) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2 และแสดงในตารางที่ 2.6 ทำการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีค่าอัตราส่วนความชะลุดแตกต่างกัน 5 ชุด คือ 114 92 77 66 และ 52 โดยใช้เสาเหล็กขนาดหน้าตัด H100x100x6x8 มม. มาตรฐาน มอก.1227-2539 โดยที่เสาเหล็กมีฐานรองรับเป็นแบบยึดแน่นที่ปลายทั้ง 2 ด้าน ความร้อนที่ให้แก่เสาเหล็กมีค่าคงที่ตลอดการวิเคราะห์ คือมีค่าเท่ากับ 500 °C และให้น้ำหนักกระทำในแนวแกนมีอัตราการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1000 กิโลกรัม/นาที

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 5 กรณีพบว่า เสาเหล็กสามารถรับแรงอัดในแนวแกนได้เท่ากับ 2300 2800 3100 3700 และ 3900 กิโลกรัมสำหรับเสาเหล็กที่มีค่าอัตราส่วนความชะลุดเท่ากับ 114 92 77 66 และ 52 ตามลำดับ และเสาเหล็กทั้ง 5 แบบเกิดการวิบัติในลักษณะโก่งเดาะแบบผสมทั้งสิ้น เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองและการทดสอบมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.9 พบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนความชะลุดน้อยกว่า 52 ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองมีแนวโน้มแตกต่างจากผลการทดสอบในงานที่ผ่านมามากขึ้น

ตารางที่ 5.6 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์แบบจำลองและผลการทดสอบโดย Kuo-Chen และคณะ (2005)

| อัตราส่วนความชะลุด | อัตราส่วนกำลังรับแรงอัดที่<br>อุณหภูมิสูงต่อกำลังรับ<br>แรงอัดที่อุณหภูมิปกติ |          | ร้อยละความแตกต่าง |
|--------------------|---|----------|-------------------|
|                    | การทดสอบ  | แบบจำลอง |                   |
| 114                | 0.39  | 0.38     | 2.56              |
| 92                 | 0.39  | 0.39     | 0.00              |
| 77                 | 0.42  | 0.40     | 4.76              |
| 66                 | 0.44  | 0.42     | 4.55              |
| 52                 | 0.51  | 0.46     | 9.8               |



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนความขลุ่ด

## บทที่ 6

### ข้อแนะนำสำหรับการออกแบบ

การออกแบบโครงสร้างเหล็กเพื่อความปลอดภัยจากอัคคีภัยสำหรับประเทศไทย เป็นไปตามกฎกระทรวงฉบับที่ 60 (พ.ศ. 2549) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ซึ่งกำหนดให้ อาคารที่ใช้เป็นคลังสินค้า โรงมหรสพ โรงแรม อาคารชุด สถานพยาบาล หรืออาคารเพื่อกิจการพาณิชยกรรม การอุตสาหกรรม การศึกษา การสาธารณสุข สำนักงาน ที่ทำการที่มีความสูงตั้งแต่สามชั้นขึ้นไป และมีพื้นที่รวมกันทุกชั้นหรือชั้นหนึ่งชั้นใดในหลังเดียวกันเกิน 1000 ตารางเมตร หรืออาคารสูง อาคารขนาดใหญ่พิเศษ อาคารขนาดใหญ่ อาคารหรือส่วนหนึ่งส่วนใดของอาคารที่ใช้เป็นหอประชุม ในกรณีโครงสร้างหลักที่เป็นเสาหรือคานที่ก่อสร้างด้วยเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่ไม่ได้ใช้คอนกรีตหุ้ม ต้องป้องกันโดยวิธีอื่นเพื่อให้อัตราการการทนไฟได้ไม่น้อยกว่าสามชั่วโมง โดยจะต้องมีเอกสารรับรองอัตราการทนไฟจากสถาบันที่เชื่อถือได้ประกอบการขอ อนุญาต หากอาคารดังกล่าวเป็น อาคารชั้นเดียว โครงหลังคาต้องมีอัตราการทนไฟไม่น้อยกว่า หนึ่งชั่วโมง และหากเป็นอาคารตั้งแต่สองชั้นขึ้นไป โครงหลังคาต้องมีอัตราการทนไฟไม่น้อยกว่า สองชั่วโมง โดยจะต้องมีเอกสารรับรองอัตราการทนไฟจากสถาบันที่เชื่อถือได้ประกอบการขอ อนุญาต ยกเว้นแต่อาคารดังกล่าว มีพื้นที่อาคารรวมกันทุกชั้นในหลังเดียวกันไม่เกิน 1000 ตาราง เมตร เว้นแต่โรงมหรสพ สถานพยาบาล หอประชุม หรือมีโครงหลังคาที่อยู่สูงจากพื้นอาคารเกิน 8 เมตร และอาคารนั้นมีระบบดับเพลิงอัตโนมัติ หรือมีการป้องกันความร้อนหรือระบบระบายความร้อน มิให้เกิดอันตรายต่อโครงหลังคา ไม่ต้องมีการทนไฟตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ในการออกแบบตามข้อกำหนดในกฎกระทรวงดังกล่าวยังมีข้อจำกัดสำหรับโครงสร้าง เหล็กที่ไม่มีวัสดุหุ้มป้องกันความร้อน ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ พบความเป็นไปได้ในการ ใช้ค่าอุณหภูมิขีดจำกัดของโครงสร้างเหล็ก ระยะเวลาก่อนการวิบัติและการประเมินค่าอุณหภูมิ ขณะเกิดเพลิงไหม้จากลักษณะทางกายภาพและการใช้งานของอาคาร ในการออกแบบโครงสร้าง เหล็กเพื่อความปลอดภัยจากอัคคีภัย

## 6.1 ขั้นตอนการออกแบบ

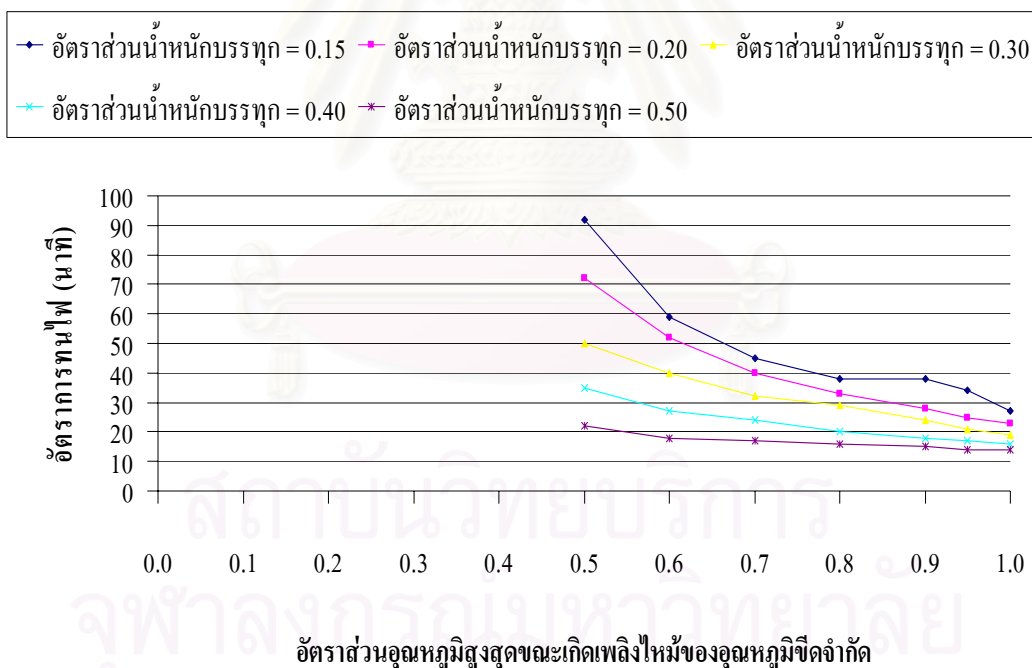
ขั้นตอนการออกแบบที่นำเสนอประกอบไปด้วย 6 ขั้นตอน ดังนี้

6.1.1 ประเมินค่าอุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดเพลิงไหม้ จากข้อมูลทางกายภาพของอาคาร และลักษณะการใช้งานเช่น ขนาดห้อง ขนาดและจำนวนช่องเปิด ชนิดและปริมาณวัสดุเชื้อเพลิง ในกรณีเกิดเพลิงไหม้ โดยอาจใช้เส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (BFD) ที่ได้กล่าวมาแล้วใน หัวข้อที่ 2.1.3.3

6.1.2 ออกแบบโครงสร้างเหล็กในสภาวะอุณหภูมิปกติและเลือกขนาดเหล็ก เพื่อได้ค่า อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกที่ต้องการ โดยอาจใช้สมการที่ (3.1) – (3.4) ในการออกแบบ

6.1.3 คำนวณค่าอุณหภูมิขีดจำกัด จากอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากข้อ 6.1.2 โดย อาจใช้สมการที่ (5.1)

6.1.4 คำนวณค่าอัตราส่วนอุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดเพลิงไหม้ต่ออุณหภูมิขีดจำกัด โดยใช้ สมการที่ (4.17)



รูปที่ 4.19 ระยะเวลาเกิดการวิบัติเมื่อได้รับความร้อนตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (BFD) ของเสาเหล็กหน้าตัด H100X100X6X8 มม.

6.1.5 คำนวณค่าระยะเวลาก่อนการวิบัติ (อัตราการทนไฟ) จากค่าอัตราส่วนอุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดเพลิงไหม้ต่ออุณหภูมิขีดจำกัดที่ได้จากข้อ 6.1.4 และค่าอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกจากข้อ 6.1.2 ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.19 สำหรับเสาเหล็กหน้าตัด H100x100x6x8 มม. ซึ่งมีอัตราส่วนความชะลูด 32 ตามรายละเอียดในบทที่ 4

6.1.6 เปรียบเทียบค่าอัตราการทนไฟที่ได้จากข้อ 6.1.5 กับค่าอัตราการทนไฟที่ต้องการ ถ้าอัตราการทนไฟที่ต้องการมีค่าสูงกว่า แสดงว่าต้องออกแบบเสาเหล็กตามข้อ 6.1.2 ใหม่ โดยมีแนวทางดังต่อไปนี้

6.1.6.1 เลือกหน้าตัดให้มีขนาดใหญ่กว่าเดิมเพื่อลดค่าอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก

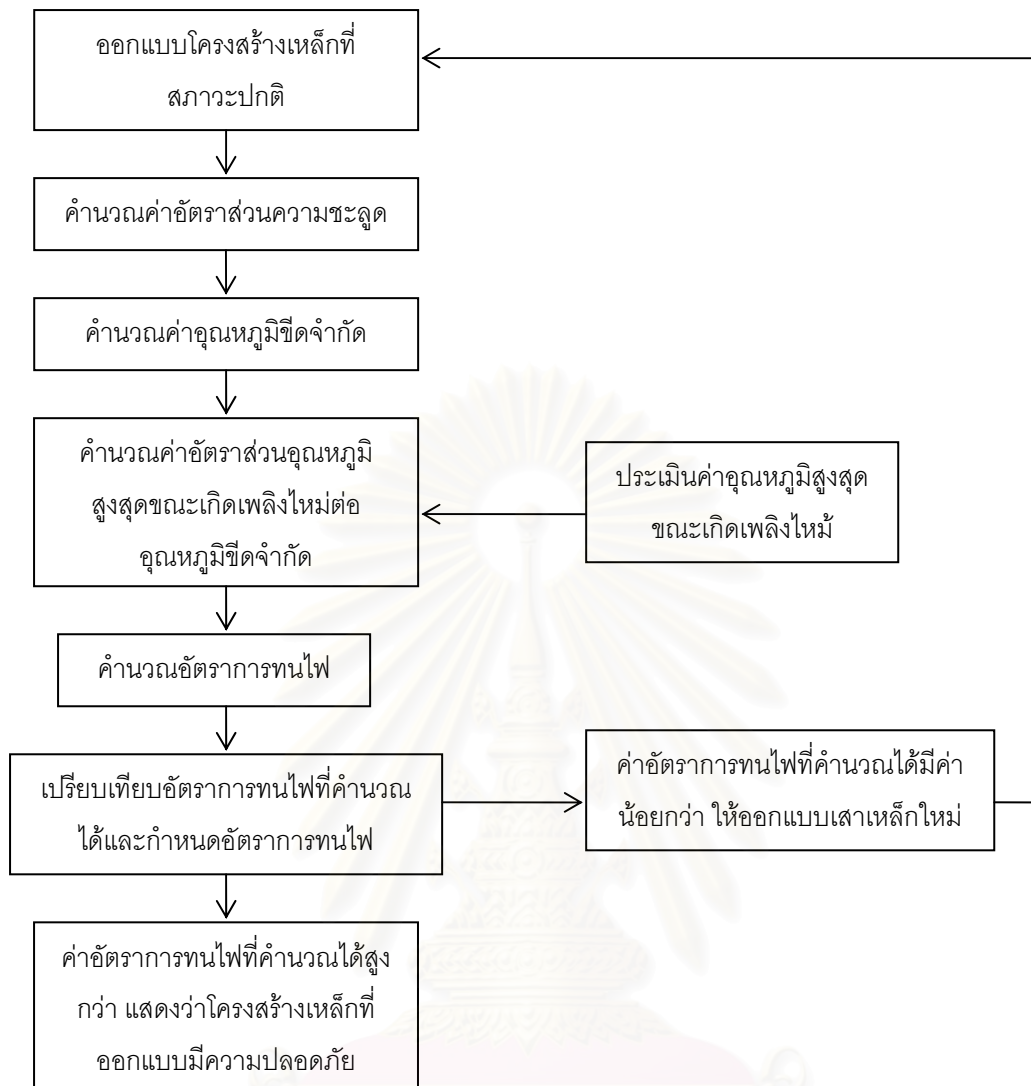
6.1.6.2 เลือกชนิดของเหล็กที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเพื่อลดค่าอัตราส่วนน้ำหนัก

บรรทุก

6.1.6.3 เลือกชนิดของเหล็กที่มีการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลไม่มากนักภายใต้อุณหภูมิสูง (เหล็กทนไฟ) เพื่อเพิ่มค่าอุณหภูมิขีดจำกัด

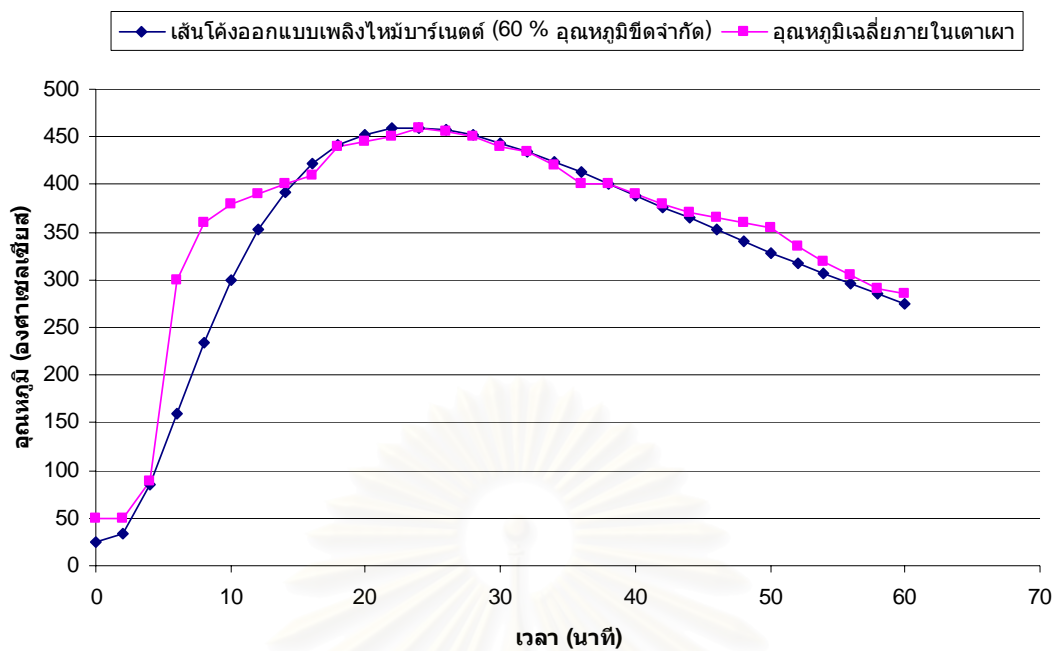
6.1.6.4 เพิ่มวัสดุหุ้มหรือเคลือบผิวโครงสร้างเหล็ก เพื่อป้องกันความร้อน



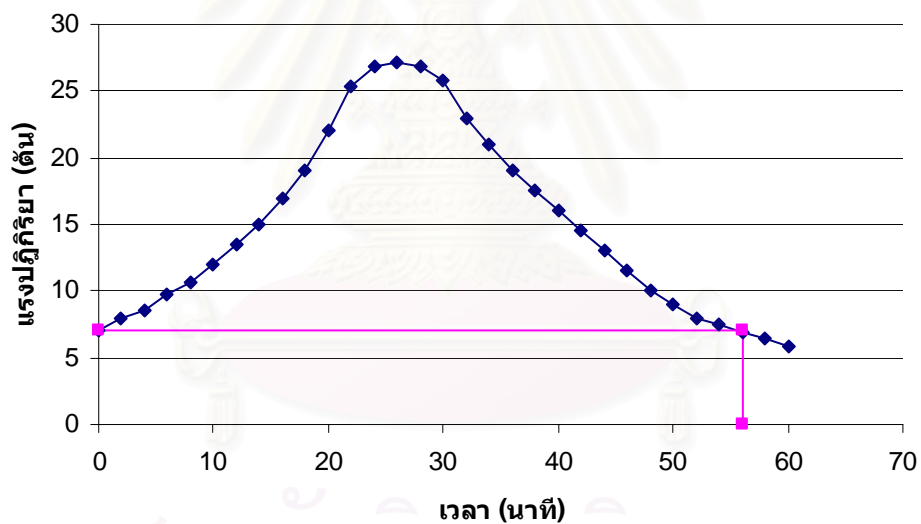


รูปที่ 6.1 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างเหล็กในกรณีเกิดเพลิงไหม้

จากการทดลองออกแบบเสาเหล็กขนาดหน้าตัด H100x100x6x8 มม. โดยมีฐานรองรับแบบยึดแน่นที่ปลายทั้ง 2 ด้าน อัตราส่วนความชะลูด 32 และรับน้ำหนักในแนวแกน 7 ตัน (อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกทุก 0.15) ให้มีอัตราการทนไฟ 60 นาที ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ โดยใช้วิธีการที่แนะนำ พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่เสาเหล็กรับได้ต้องไม่เกิน ร้อยละ 60 ของอุณหภูมิขีดจำกัด เมื่อทำการทดสอบเสาเหล็กภายใต้สภาวะดังกล่าว โดยควบคุมสภาวะอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ ดังแสดงในรูปที่ 6.2 พบว่าชิ้นตัวอย่างเสาเหล็กมีอัตราการทนไฟประมาณ 56 นาที ใกล้เคียงกับอัตราการทนไฟที่กำหนด สำหรับการวิบัติของชิ้นตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.2 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาทดสอบเทียบกับเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (BFD)



รูปที่ 6.3 ค่าแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานรองรับในการทดสอบขึ้นตัวอย่างที่ออกแบบตามข้อแนะนำ



รูปที่ 6.4 ลักษณะการโก่งตัวของชิ้นตัวอย่างที่ออกแบบตามข้อแนะนำ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถสรุปผลที่ได้จากการวิจัยดังต่อไปนี้

7.1.1 ค่าอุณหภูมิขีดจำกัดที่ได้จากการทดสอบ การวิเคราะห์แบบจำลอง และมาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002) มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยค่าความแตกต่างของอุณหภูมิขีดจำกัดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองคิดเป็น ร้อยละ 5.75 และ 6.85 เมื่อเทียบกับค่าอุณหภูมิขีดจำกัดที่ได้จากการทดสอบชิ้นตัวอย่าง S1 และ S2 ตามลำดับ นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าค่าอุณหภูมิขีดจำกัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนความชะลูดสูงขึ้น โดยที่ค่าอุณหภูมิขีดจำกัดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิขีดจำกัดที่คำนวณตามมาตรฐาน EN 1993-1-2 (2002) ประมาณ 30 °C

7.1.2 ค่าการโก่งตัวของเสาเหล็กทั้งในการทดสอบและการวิเคราะห์แบบจำลองในแกนรองสูงกว่าในแกนหลักทุกกรณี โดยค่าการโก่งตัวของเสาเหล็กสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 70 เซนติเมตรจากปลายด้านล่างของเสาเหล็ก ในขณะที่ค่าการโก่งตัวของเสาเหล็กสูงสุดที่ได้จากการทดสอบจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 80 เซนติเมตรจากปลายด้านล่างของเสาเหล็ก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการควบคุมสภาพฐานรองรับของเสาเหล็กในระหว่างการทดสอบนั้น ไม่สามารถจำลองสภาพฐานรองรับแบบยึดแน่นที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองได้โดยสมบูรณ์

7.1.3 จากการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น ค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุดจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่เวลาที่เกิดแรงปฏิกิริยาสูงสุดและเวลาที่เกิดการวิบัติลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณความร้อนที่เสาเหล็กได้รับมีค่าลดลงแรงปฏิกิริยาสูงสุดจะมีค่าลดลง ในขณะที่เวลาที่เกิดแรงปฏิกิริยาสูงสุดและเวลาที่เกิดการวิบัติจะมีค่าสูงขึ้น

7.1.4 จากการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าเมื่อพิจารณาเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นแตกต่างตามมาตรฐาน BS 476 (BSI, 1987) และเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (BFD) โดยกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดเท่ากัน พบว่าเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ (BFD) มีค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุดสูงกว่าเสาเหล็กภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามมาตรฐาน BS 476 (BSI, 1987) เนื่องจากเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์

เน็ตต์ (BFD) มีช่วงเวลาของการเพิ่มค่าอุณหภูมิมากกว่ามาตรฐาน BS 476 (BSI, 1987) ส่งผลให้เสาเหล็กเกิดการขยายตัวก่อนเกิดการวิบัติมากกว่าซึ่งส่งผลให้เกิดแรงปฏิกิริยาสูงขึ้นตามไปด้วย

7.1.5 ค่ากำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองภายใต้อุณหภูมิคงที่ 500 °C มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณตามมาตรฐาน EN 1993-1-2 เมื่อค่าอัตราส่วนความชะลูดสูงกว่า 50 และค่ากำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากผลการทดสอบของ Kuo-Chen และคณะ (2005) เมื่อค่าอัตราส่วนความชะลูดสูงกว่า 52

7.1.6 ในการทดลองออกแบบกำหนดให้เสาเหล็กขนาดหน้าตัด H100x100x6x8 มม. ความยาว 1.4 ม. ภายใต้น้ำหนักบรรทุกในแนวแกน 7 ตัน มีอัตราการร่อนไฟ 60 นาที ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นตามเส้นโค้งออกแบบเพลิงไหม้บาร์เน็ตต์ซึ่งกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ 60% ของค่าอุณหภูมิขีดจำกัด จากการทดสอบเสาเหล็กภายใต้สภาวะดังกล่าว พบว่า เสาเหล็กเกิดการวิบัติที่ 56 นาที

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1 เนื่องจากงานวิจัยในครั้งนี้มีข้อจำกัดในด้านจำนวน ขนาดและชนิดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ จึงควรเพิ่มจำนวน ขนาดและชนิดของชิ้นตัวอย่าง ตลอดจนพิจารณาทดสอบค่าตัวประกอบรูปร่างของความร้อนอื่น ๆ เพิ่ม เพื่อให้ได้พฤติกรรมของเสาเหล็กที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

7.2.2 ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในกรณีที่เสาเหล็กมีวัสดุหุ้มหรือเคลือบผิวป้องกันความร้อน

7.2.3 ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเรื่องความเหมาะสมของแบบจำลองที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเหล็กภายใต้อุณหภูมิสูง

## รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กระทรวงมหาดไทย. กฎกระทรวงฉบับที่ 60. ราชกิจจานุเบกษา. กระทรวงมหาดไทย: 2549.

ภาษาอังกฤษ

ABAQUS. Getting Started with Abaqus. Netherland: 2003.

ABAQUS. Theory Manual. Netherland: 2003.

American Society for Testing and Materials. ASTM E119-05 Standard Methods of Fire Tests of Buildings Construction and Materials. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2005.

Arnault P, Ehm H and Kruppa J. Report Experimental sur les Essais Avec Des Naturels Executes Dans La Petite Installation. France: Maiziers-La-Metz, Centre Technique Industrial De La Construction Metallique, 1973.

Barnett, C. R. BFD Curve a New Empirical Model for Fire Compartment Temperature. Fire Safety Journal 37 (2002): 437-463.

British Standard Institute. British Standard BS 476 Fire Test on Building Materials and Structures. London: British Standard Institute, 1987.

Cabrita Neves, I. The Critical Temperature of Steel Columns with Restrained Thermal Elongation. Fire Safety Journal (1995): 211-227.

European Committee for Standardisation. Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures. Part 1-2: Actions on Structures – Actions on Structures Exposed to Fire. London: British Standards Institution, 2000.

European Committee for Standardisation. Eurocode 3: Design of Steel Structures , Part 1-1: General Rules and Rues for Building. Belgium: British Standards Institution, 2002.

European Committee for Standardisation. Eurocode 3: Design of Steel Structures , Part 1-2: General Rules – Structure Fire Design. Belgium: British Standards Institution, 1995.



- European Committee for Standardisation. Eurocode 3: Design of Steel Structures , Part 1-2: General Rules – Structure Fire Design. Belgium: British Standards Institution, 2002
- Heselden AJM. Parameters Determining the Severity of Fire. in Proceedings of the Symposium Held at the Fire Research Station, 19-28. Borehamwood: 1967.
- Jackson, M.A., and Robins, I. Gas Sensing for Fire Detection: Measurements of CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, and Smoke Density in European Standard Fire Tests. Fire Safety Journal (1994): 181-205.
- Kawagoe K. Fire Behavior in Rooms. Report No. 27 of the Building Research Institute. Japan: Ministry of Construction, 1958.
- Kirby BR, et al. Natural Fires in Large Scale Compartments. Fire Research Station Collaborative Report (1994:)
- Kuo-Chen Yang, Hung-Hsin Lee, and Olen Chan. Experimental Study of Fire-Resistant Steel H-Columns at Elevated Temperature. Constructional Steel Research 6 (1995): 544-553.
- Kuo-Chen Yang, Hung-Hsin Lee, and Olen Chan. Performance of Steel H Columns Loaded Under Uniform Temperature. Constructional Steel Research 3 (2005): 262-270.
- Law M, and O'Brien, T. Fire Safety of Bare External Structure Steel. Constrado: 1968.
- Petterson, O., Magnusson, S. E., and Thor, J. Fire Engineering Design of Steel Structure. Sweden: Swedish Institute of Steel Construction, 1976.
- Siam Yamato Steel. Premium Structural Steel. Bangkok: 2006.
- Thomas Ph, Heselden AJM. Fully Developed Fires in Single Compartments. in Fire Research Note No.923. England: Fire Research Station, 1972.
- Vilareal, P.M.M., Lopes, N., Simoes da Silva, L., Piloto, P., and Franssen, J.M. Numerical Modelling of Steel Beam-Columns in Case of Fire – Comparisons With Eurocode 3. Fire Safety Journal (2004): 23-39.
- Wang, Y. C. Steel and Composite Structures: Behavior and Design for Fire Safety. London: Taylor & Francis Group, 2002.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาตามมาตรฐาน ASTM E119 (ASTM, 2005: 12-13)

| เวลา | อุณหภูมิ<br>(°F) | พื้นที่เหนือ 68 °F<br>(°F-h) | อุณหภูมิ<br>(°C) | พื้นที่เหนือ 20 °C<br>(°C-h) |
|------|------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|
| 0:00 | 68               | 0                            | 20               | 0                            |
| 0:05 | 1000             | 39                           | 538              | 22                           |
| 0:10 | 1300             | 129                          | 704              | 72                           |
| 0:15 | 1399             | 236                          | 760              | 131                          |
| 0:20 | 1462             | 350                          | 795              | 194                          |
| 0:25 | 1510             | 468                          | 821              | 260                          |
| 0:30 | 1550             | 589                          | 843              | 328                          |
| 0:35 | 1584             | 714                          | 862              | 397                          |
| 0:40 | 1613             | 842                          | 878              | 468                          |
| 0:45 | 1638             | 971                          | 892              | 540                          |
| 0:50 | 1661             | 1103                         | 905              | 613                          |
| 0:55 | 1681             | 1237                         | 916              | 687                          |
| 1:00 | 1700             | 1372                         | 927              | 762                          |
| 1:05 | 1718             | 1509                         | 937              | 838                          |
| 1:10 | 1735             | 1647                         | 946              | 915                          |
| 1:15 | 1750             | 1787                         | 955              | 993                          |
| 1:20 | 1765             | 1928                         | 963              | 1071                         |
| 1:25 | 1779             | 2070                         | 971              | 1150                         |
| 1:30 | 1792             | 2213                         | 978              | 1229                         |
| 1:35 | 1804             | 2357                         | 985              | 1309                         |
| 1:40 | 1815             | 2502                         | 991              | 1390                         |
| 1:45 | 1826             | 2648                         | 996              | 1471                         |
| 1:50 | 1835             | 2795                         | 1001             | 1553                         |
| 1:55 | 1843             | 2942                         | 1006             | 1635                         |
| 2:00 | 1850             | 3091                         | 1010             | 1717                         |

ตารางที่ ก1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาตามมาตรฐาน ASTM E119 (ต่อ) (ASTM, 2005: 12-13)

| เวลา | อุณหภูมิ<br>(°F) | พื้นที่เหนือ 68 °F<br>(°F-h) | อุณหภูมิ<br>(°C) | พื้นที่เหนือ 20 °C<br>(°C-h) |
|------|------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|
| 2:10 | 1862             | 3389                         | 1017             | 1882                         |
| 2:20 | 1875             | 3689                         | 1024             | 2049                         |
| 2:30 | 1888             | 3991                         | 1031             | 2217                         |
| 2:40 | 1900             | 4295                         | 1038             | 2386                         |
| 2:50 | 1912             | 4602                         | 1045             | 2556                         |
| 3:00 | 1925             | 4910                         | 1052             | 2728                         |
| 3:10 | 1938             | 5221                         | 1059             | 2900                         |
| 3:20 | 1950             | 5533                         | 1066             | 3074                         |
| 3:30 | 1962             | 5848                         | 1072             | 3249                         |
| 3:40 | 1975             | 6165                         | 1079             | 3425                         |
| 3:50 | 1988             | 6484                         | 1086             | 3602                         |
| 4:00 | 2000             | 6805                         | 1093             | 3780                         |
| 4:10 | 2012             | 7128                         | 1100             | 3960                         |
| 4:20 | 2025             | 7453                         | 1107             | 4140                         |
| 4:30 | 2038             | 7780                         | 1114             | 4322                         |
| 4:40 | 2050             | 8110                         | 1121             | 4505                         |
| 4:50 | 2062             | 8441                         | 1128             | 4689                         |
| 5:00 | 2075             | 8774                         | 1135             | 4874                         |
| 5:10 | 2088             | 9110                         | 1142             | 5061                         |
| 5:20 | 2100             | 9447                         | 1149             | 5248                         |
| 5:30 | 2112             | 9787                         | 1156             | 5437                         |
| 5:40 | 2125             | 10129                        | 1163             | 5627                         |
| 5:50 | 2138             | 10473                        | 1170             | 5818                         |
| 6:00 | 2150             | 10819                        | 1177             | 6010                         |

ตารางที่ ก1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาตามมาตรฐาน ASTM E119 (ต่อ) (ASTM, 2005: 12-13)

| เวลา | อุณหภูมิ<br>(°F) | พื้นที่เหนือ 68 °F<br>(°F-h) | อุณหภูมิ<br>(°C) | พื้นที่เหนือ 20 °C<br>(°C-h) |
|------|------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|
| 6:10 | 2162             | 11167                        | 1184             | 6204                         |
| 6:20 | 2175             | 11517                        | 1191             | 6398                         |
| 6:30 | 2188             | 11869                        | 1198             | 6594                         |
| 6:40 | 2200             | 12223                        | 1204             | 6791                         |
| 6:50 | 2212             | 12580                        | 1211             | 6989                         |
| 7:00 | 2225             | 12938                        | 1218             | 7188                         |
| 7:10 | 2238             | 13299                        | 1225             | 7388                         |
| 7:20 | 2250             | 13661                        | 1232             | 7590                         |
| 7:30 | 2262             | 14026                        | 1239             | 7792                         |
| 7:40 | 2275             | 14393                        | 1246             | 7996                         |
| 7:50 | 2288             | 14762                        | 1253             | 8201                         |
| 8:00 | 2300             | 15133                        | 1260             | 8407                         |

ตารางที่ ก1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาสำหรับแบบจำลอง N1-1 ถึง N1-7

| เวลา<br>(นาทีก) | อุณหภูมิแบบจำลอง (°C) |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
|                 | N1-1                  | N1-2 | N1-3 | N1-4 | N1-5 | N1-6 | N1-7 |
| 0               | 25                    | 25   | 25   | 25   | 25   | 25   | 25   |
| 2.00            | 42                    | 41   | 40   | 38   | 36   | 35   | 33   |
| 4.00            | 135                   | 129  | 117  | 107  | 96   | 85   | 75   |
| 6.00            | 270                   | 257  | 231  | 207  | 183  | 160  | 136  |
| 8.00            | 406                   | 386  | 345  | 308  | 271  | 234  | 198  |
| 10.00           | 525                   | 499  | 445  | 396  | 348  | 300  | 251  |
| 12.00           | 621                   | 590  | 525  | 468  | 410  | 352  | 295  |
| 14.00           | 693                   | 659  | 586  | 522  | 457  | 392  | 328  |
| 16.00           | 746                   | 709  | 631  | 561  | 491  | 421  | 351  |
| 18.00           | 782                   | 743  | 661  | 587  | 514  | 441  | 367  |
| 20.00           | 803                   | 763  | 679  | 603  | 528  | 453  | 377  |
| 22.00           | 814                   | 773  | 688  | 611  | 535  | 459  | 382  |
| 24.00           | 816                   | 775  | 689  | 613  | 536  | 460  | 383  |
| 26.00           | 811                   | 771  | 685  | 609  | 533  | 457  | 381  |
| 28.00           | 801                   | 761  | 677  | 602  | 527  | 451  | 376  |
| 30.00           | 787                   | 748  | 665  | 591  | 518  | 444  | 370  |
| 32.00           | 770                   | 732  | 651  | 579  | 507  | 434  | 362  |
| 34.00           | 751                   | 714  | 635  | 565  | 494  | 424  | 354  |
| 36.00           | 731                   | 694  | 618  | 549  | 481  | 413  | 344  |
| 38.00           | 709                   | 674  | 600  | 534  | 467  | 401  | 335  |
| 40.00           | 687                   | 653  | 581  | 517  | 453  | 389  | 325  |
| 42.00           | 665                   | 632  | 563  | 501  | 439  | 377  | 315  |
| 44.00           | 643                   | 611  | 544  | 484  | 424  | 364  | 305  |
| 46.00           | 621                   | 590  | 525  | 468  | 410  | 352  | 295  |
| 48.00           | 599                   | 569  | 507  | 452  | 396  | 340  | 285  |
| 50.00           | 578                   | 549  | 489  | 436  | 382  | 329  | 275  |
| 52.00           | 557                   | 530  | 472  | 420  | 369  | 317  | 266  |
| 54.00           | 537                   | 511  | 455  | 405  | 356  | 306  | 257  |
| 56.00           | 517                   | 492  | 439  | 391  | 343  | 296  | 248  |
| 58.00           | 499                   | 474  | 423  | 377  | 331  | 285  | 239  |
| 60.00           | 480                   | 457  | 407  | 363  | 319  | 275  | 231  |



ตารางที่ ก1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาสำหรับแบบจำลอง N2-1 ถึง N2-7

| เวลา<br>(นาทีก) | อุณหภูมิแบบจำลอง (°C) |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
|                 | N2-1                  | N2-2 | N2-3 | N2-4 | N2-5 | N2-6 | N2-7 |
| 0               | 25                    | 25   | 25   | 25   | 25   | 25   | 25   |
| 2.00            | 42                    | 41   | 39   | 37   | 36   | 34   | 32   |
| 4.00            | 130                   | 124  | 113  | 102  | 92   | 82   | 72   |
| 6.00            | 258                   | 246  | 220  | 197  | 175  | 152  | 130  |
| 8.00            | 387                   | 369  | 328  | 293  | 258  | 223  | 188  |
| 10.00           | 500                   | 476  | 423  | 377  | 331  | 285  | 239  |
| 12.00           | 591                   | 562  | 499  | 444  | 389  | 334  | 280  |
| 14.00           | 660                   | 627  | 557  | 495  | 434  | 372  | 311  |
| 16.00           | 710                   | 675  | 598  | 532  | 466  | 400  | 333  |
| 18.00           | 744                   | 707  | 627  | 557  | 488  | 418  | 349  |
| 20.00           | 765                   | 727  | 644  | 573  | 501  | 430  | 358  |
| 22.00           | 775                   | 736  | 653  | 580  | 508  | 435  | 363  |
| 24.00           | 777                   | 738  | 654  | 581  | 509  | 436  | 363  |
| 26.00           | 772                   | 734  | 650  | 578  | 506  | 434  | 361  |
| 28.00           | 763                   | 725  | 642  | 571  | 500  | 428  | 357  |
| 30.00           | 749                   | 712  | 631  | 561  | 491  | 421  | 351  |
| 32.00           | 733                   | 697  | 618  | 549  | 481  | 412  | 344  |
| 34.00           | 715                   | 679  | 603  | 536  | 469  | 402  | 336  |
| 36.00           | 696                   | 661  | 586  | 521  | 457  | 392  | 327  |
| 38.00           | 675                   | 642  | 569  | 506  | 443  | 381  | 318  |
| 40.00           | 654                   | 622  | 552  | 491  | 430  | 369  | 308  |
| 42.00           | 633                   | 602  | 534  | 475  | 416  | 358  | 299  |
| 44.00           | 612                   | 582  | 516  | 460  | 403  | 346  | 289  |
| 46.00           | 591                   | 562  | 499  | 444  | 389  | 335  | 280  |
| 48.00           | 571                   | 542  | 482  | 429  | 376  | 323  | 271  |
| 50.00           | 550                   | 523  | 465  | 414  | 363  | 312  | 261  |
| 52.00           | 531                   | 505  | 448  | 399  | 350  | 302  | 253  |
| 54.00           | 512                   | 486  | 432  | 385  | 338  | 291  | 244  |
| 56.00           | 493                   | 469  | 417  | 371  | 326  | 281  | 236  |
| 58.00           | 475                   | 452  | 402  | 358  | 315  | 271  | 228  |
| 60.00           | 458                   | 435  | 387  | 345  | 303  | 262  | 220  |

ตารางที่ ก1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาสำหรับแบบจำลอง N3-1 ถึง N3-7

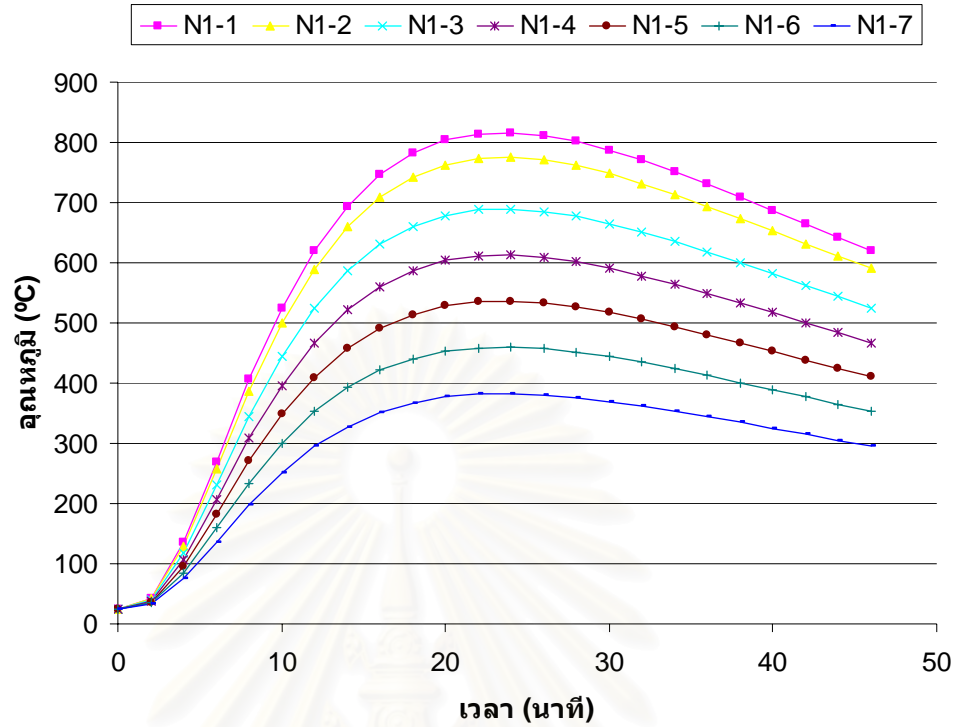
| เวลา<br>(นาทีก) | อุณหภูมิแบบจำลอง (°C) |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
|                 | N3-1                  | N3-2 | N3-3 | N3-4 | N3-5 | N3-6 | N3-7 |
| 0               | 25                    | 25   | 25   | 25   | 25   | 25   | 25   |
| 2.00            | 39                    | 38   | 37   | 35   | 34   | 33   | 31   |
| 4.00            | 115                   | 111  | 100  | 91   | 82   | 74   | 65   |
| 6.00            | 226                   | 215  | 191  | 172  | 152  | 133  | 114  |
| 8.00            | 337                   | 321  | 283  | 253  | 223  | 193  | 163  |
| 10.00           | 435                   | 414  | 364  | 324  | 285  | 246  | 206  |
| 12.00           | 513                   | 488  | 429  | 382  | 335  | 288  | 241  |
| 14.00           | 573                   | 545  | 478  | 425  | 373  | 320  | 267  |
| 16.00           | 616                   | 585  | 514  | 457  | 400  | 343  | 286  |
| 18.00           | 645                   | 613  | 538  | 478  | 419  | 359  | 299  |
| 20.00           | 663                   | 630  | 553  | 491  | 430  | 369  | 307  |
| 22.00           | 672                   | 638  | 560  | 498  | 435  | 373  | 311  |
| 24.00           | 674                   | 640  | 561  | 499  | 436  | 374  | 312  |
| 26.00           | 670                   | 636  | 558  | 496  | 434  | 372  | 310  |
| 28.00           | 661                   | 628  | 551  | 490  | 429  | 368  | 306  |
| 30.00           | 650                   | 617  | 542  | 482  | 421  | 361  | 301  |
| 32.00           | 636                   | 604  | 530  | 471  | 413  | 354  | 295  |
| 34.00           | 620                   | 589  | 517  | 460  | 403  | 345  | 288  |
| 36.00           | 604                   | 574  | 503  | 448  | 392  | 336  | 281  |
| 38.00           | 586                   | 557  | 489  | 435  | 381  | 327  | 273  |
| 40.00           | 568                   | 540  | 474  | 422  | 369  | 317  | 265  |
| 42.00           | 550                   | 522  | 459  | 408  | 358  | 307  | 257  |
| 44.00           | 531                   | 505  | 444  | 395  | 346  | 298  | 249  |
| 46.00           | 513                   | 488  | 429  | 382  | 335  | 288  | 241  |
| 48.00           | 496                   | 471  | 414  | 369  | 324  | 278  | 233  |
| 50.00           | 478                   | 455  | 400  | 356  | 313  | 269  | 225  |
| 52.00           | 461                   | 439  | 386  | 344  | 302  | 260  | 218  |
| 54.00           | 445                   | 423  | 372  | 332  | 291  | 251  | 211  |
| 56.00           | 429                   | 408  | 359  | 320  | 281  | 242  | 204  |
| 58.00           | 413                   | 393  | 346  | 309  | 271  | 234  | 197  |
| 60.00           | 398                   | 379  | 334  | 298  | 262  | 226  | 190  |

ตารางที่ ก1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาสำหรับแบบจำลอง N4-1 ถึง N4-7

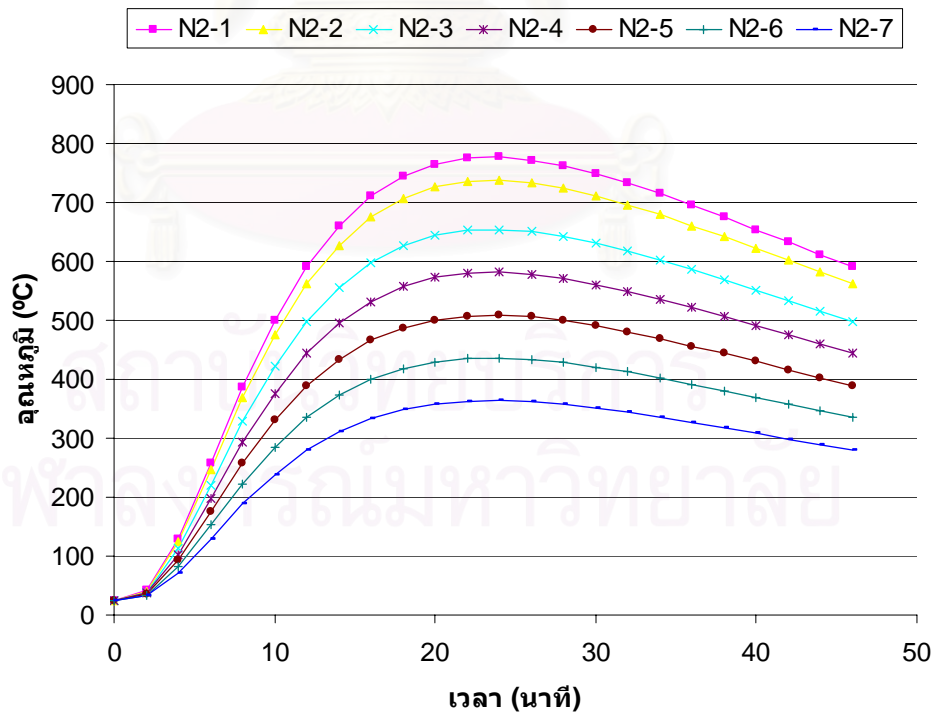
| เวลา<br>(นาทีก) | อุณหภูมิแบบจำลอง (°C) |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
|                 | N4-1                  | N4-2 | N4-3 | N4-4 | N4-5 | N4-6 | N4-7 |
| 0               | 25                    | 25   | 25   | 25   | 25   | 25   | 25   |
| 2.00            | 40                    | 39   | 38   | 36   | 35   | 33   | 32   |
| 4.00            | 121                   | 116  | 105  | 96   | 87   | 77   | 68   |
| 6.00            | 239                   | 228  | 203  | 183  | 162  | 141  | 121  |
| 8.00            | 358                   | 341  | 302  | 270  | 238  | 206  | 174  |
| 10.00           | 462                   | 440  | 389  | 346  | 304  | 262  | 220  |
| 12.00           | 546                   | 519  | 458  | 408  | 358  | 308  | 257  |
| 14.00           | 610                   | 579  | 511  | 455  | 398  | 342  | 286  |
| 16.00           | 656                   | 623  | 549  | 489  | 428  | 367  | 306  |
| 18.00           | 687                   | 653  | 575  | 512  | 448  | 384  | 320  |
| 20.00           | 706                   | 671  | 591  | 526  | 460  | 394  | 329  |
| 22.00           | 715                   | 680  | 599  | 532  | 466  | 399  | 333  |
| 24.00           | 717                   | 681  | 600  | 534  | 467  | 400  | 334  |
| 26.00           | 713                   | 677  | 597  | 531  | 464  | 398  | 332  |
| 28.00           | 704                   | 669  | 590  | 524  | 459  | 393  | 328  |
| 30.00           | 692                   | 657  | 579  | 515  | 451  | 387  | 322  |
| 32.00           | 677                   | 643  | 567  | 504  | 441  | 379  | 316  |
| 34.00           | 660                   | 627  | 553  | 492  | 431  | 370  | 308  |
| 36.00           | 642                   | 610  | 538  | 479  | 419  | 360  | 300  |
| 38.00           | 624                   | 593  | 523  | 465  | 407  | 350  | 292  |
| 40.00           | 604                   | 574  | 507  | 451  | 395  | 339  | 283  |
| 42.00           | 585                   | 556  | 491  | 437  | 383  | 329  | 275  |
| 44.00           | 566                   | 538  | 474  | 422  | 370  | 318  | 266  |
| 46.00           | 546                   | 519  | 458  | 408  | 358  | 308  | 257  |
| 48.00           | 527                   | 501  | 443  | 394  | 346  | 297  | 249  |
| 50.00           | 509                   | 484  | 427  | 380  | 334  | 287  | 241  |
| 52.00           | 491                   | 466  | 412  | 367  | 322  | 277  | 233  |
| 54.00           | 473                   | 450  | 397  | 354  | 311  | 268  | 225  |
| 56.00           | 456                   | 433  | 383  | 342  | 300  | 259  | 217  |
| 58.00           | 439                   | 418  | 369  | 329  | 290  | 250  | 210  |
| 60.00           | 423                   | 403  | 356  | 318  | 279  | 241  | 203  |

ตารางที่ ก1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาสำหรับแบบจำลอง N5-1 ถึง N5-7

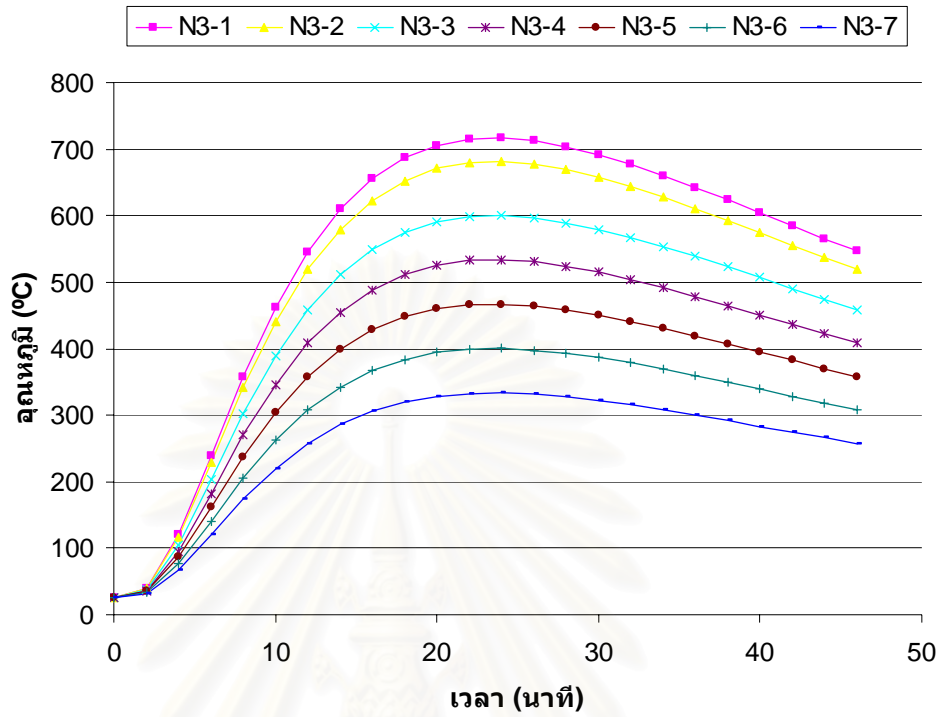
| เวลา<br>(นาทีก) | อุณหภูมิแบบจำลอง (°C) |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
|                 | N5-1                  | N5-2 | N5-3 | N5-4 | N5-5 | N5-6 | N5-7 |
| 0               | 25                    | 25   | 25   | 25   | 25   | 25   | 25   |
| 2.00            | 38                    | 38   | 36   | 35   | 33   | 32   | 31   |
| 4.00            | 110                   | 106  | 95   | 87   | 79   | 71   | 62   |
| 6.00            | 214                   | 205  | 181  | 163  | 144  | 126  | 108  |
| 8.00            | 320                   | 304  | 267  | 239  | 211  | 183  | 154  |
| 10.00           | 412                   | 391  | 343  | 306  | 269  | 232  | 195  |
| 12.00           | 485                   | 461  | 404  | 360  | 315  | 271  | 227  |
| 14.00           | 542                   | 515  | 450  | 400  | 351  | 301  | 252  |
| 16.00           | 582                   | 553  | 483  | 430  | 377  | 323  | 270  |
| 18.00           | 610                   | 580  | 506  | 450  | 394  | 338  | 282  |
| 20.00           | 627                   | 596  | 520  | 462  | 404  | 347  | 289  |
| 22.00           | 635                   | 603  | 527  | 468  | 410  | 351  | 293  |
| 24.00           | 637                   | 605  | 528  | 469  | 411  | 352  | 293  |
| 26.00           | 633                   | 601  | 525  | 467  | 408  | 350  | 292  |
| 28.00           | 625                   | 594  | 518  | 461  | 403  | 346  | 288  |
| 30.00           | 614                   | 584  | 510  | 453  | 397  | 340  | 284  |
| 32.00           | 601                   | 571  | 499  | 444  | 388  | 333  | 278  |
| 34.00           | 586                   | 557  | 487  | 433  | 379  | 325  | 271  |
| 36.00           | 571                   | 542  | 474  | 421  | 369  | 317  | 264  |
| 38.00           | 554                   | 527  | 460  | 409  | 359  | 308  | 257  |
| 40.00           | 537                   | 510  | 446  | 397  | 348  | 299  | 250  |
| 42.00           | 520                   | 494  | 432  | 384  | 337  | 290  | 242  |
| 44.00           | 503                   | 478  | 418  | 372  | 326  | 280  | 235  |
| 46.00           | 486                   | 462  | 404  | 360  | 315  | 271  | 227  |
| 48.00           | 469                   | 446  | 390  | 347  | 305  | 262  | 220  |
| 50.00           | 452                   | 430  | 376  | 336  | 295  | 254  | 213  |
| 52.00           | 436                   | 415  | 363  | 324  | 284  | 245  | 205  |
| 54.00           | 421                   | 400  | 351  | 313  | 275  | 237  | 199  |
| 56.00           | 406                   | 386  | 338  | 302  | 265  | 229  | 192  |
| 58.00           | 391                   | 372  | 326  | 291  | 256  | 221  | 186  |
| 60.00           | 377                   | 359  | 314  | 281  | 247  | 213  | 179  |



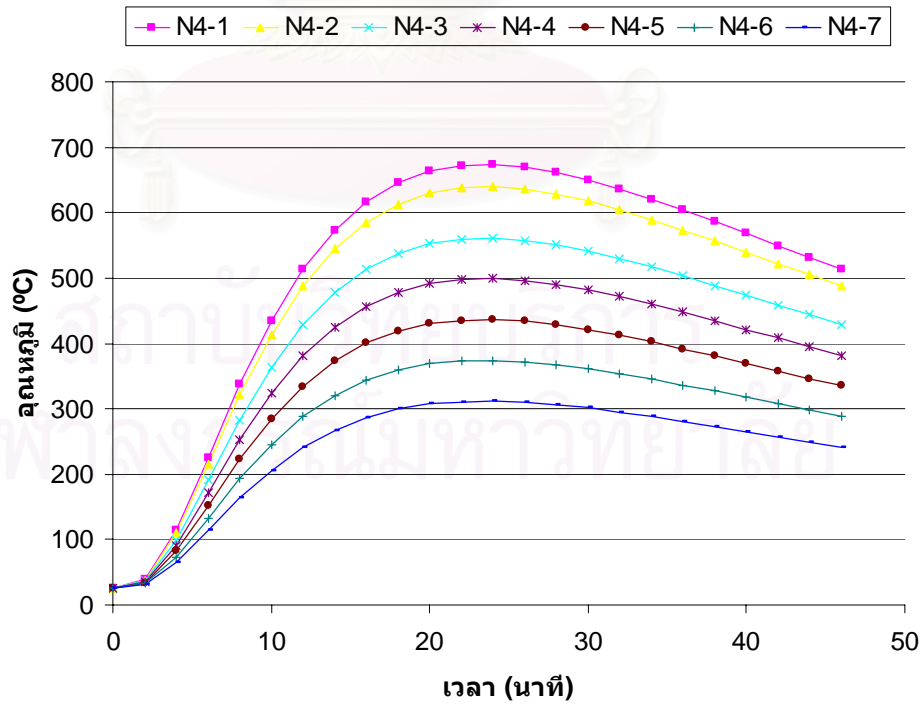
รูปที่ ก1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาสำหรับแบบจำลอง N1-1 ถึง N1-7



รูปที่ ก1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาสำหรับแบบจำลอง N2-1 ถึง N2-7

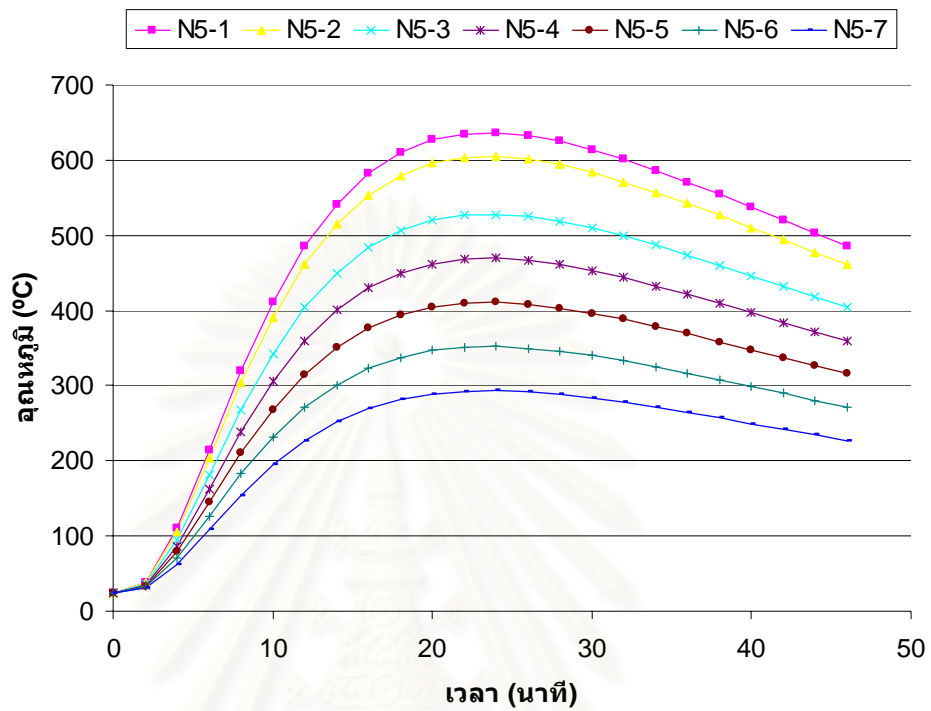


รูปที่ ก1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาสำหรับแบบจำลอง N3-1 ถึง N3-7



รูปที่ ก1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาสำหรับแบบจำลอง N4-1 ถึง N4-7





รูปที่ ก1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาสำหรับแบบจำลอง N5-1 ถึง N5-7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

### ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม ABAQUS

การขึ้นรูปแบบจำลอง เริ่มจากการเลือกชนิดของพื้นที่แบบจำลอง ชนิดแบบจำลอง รูปร่างแบบจำลองและขนาดโดยประมาณ ดังแสดงในรูปที่ ค.1.1 หลังจากนั้นจึงทำการขึ้นรูปแบบจำลอง 2 มิติ แล้วจึงกำหนดค่าความลึกในกรณีต้องการขึ้นรูปแบบจำลอง 3 มิติ หน่วยที่ใช้ในแบบจำลองสามารถเลือกใช้ได้ตามต้องการ แต่จะต้องเป็นหน่วยชุดเดียวกัน เช่น หน่วยระหว่างประเทศ หน่วยอเมริกา เป็นต้น



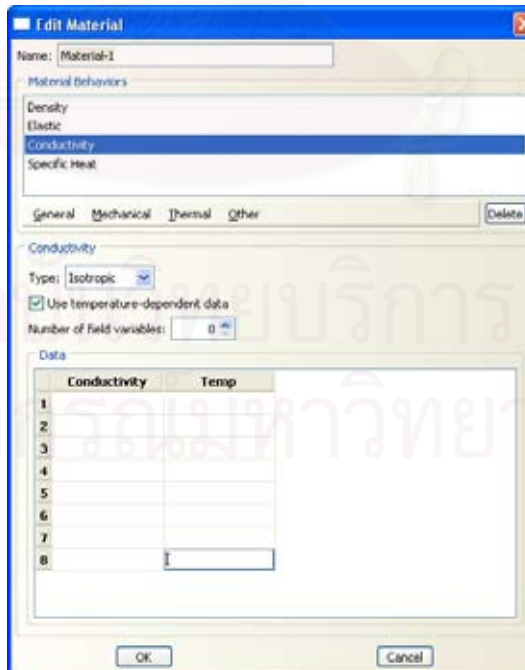
รูปที่ ค.1.1 การกำหนดข้อมูลเบื้องต้นของการขึ้นรูปแบบจำลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค1.1 หน่วยที่ใช้ในโปรแกรม ABAQUS (ABAQUS, 2003)

| ตัวแปร      | หน่วยระหว่างประเทศ    | หน่วยอเมริกา     |
|-------------|-----------------------|------------------|
| ความยาว     | เมตร                  | ฟุต              |
| แรง         | นิวตัน                | ปอนด์            |
| มวล         | กิโลกรัม              | สลัก             |
| เวลา        | วินาที                | วินาที           |
| หน่วยแรง    | ปาสคาล                | ปอนด์/ตารางฟุต   |
| พลังงาน     | จูล                   | ปอนด์-ฟุต        |
| ความหนาแน่น | กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร | สลัก/ลูกบาศก์ฟุต |

การกำหนดวัสดุและคุณสมบัติของแบบจำลอง เริ่มต้นจากการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุชนิดต่าง ๆ โดยสามารถเลือกชนิดของคุณสมบัติได้ตามความเหมาะสมเช่น ความหนาแน่น ความยืดหยุ่น การนำความร้อน เป็นต้น โดยค่าคุณสมบัติของวัสดุนั้นสามารถกำหนดให้เปลี่ยนแปลงไปตามค่าอุณหภูมิได้ ดังแสดงในรูปที่ ค1.2 เมื่อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุตามที่ต้องการแล้ว จึงทำการกำหนดชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแบบจำลองว่าเป็นวัสดุชนิดใด



รูปที่ ค1.2 การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ

การกำหนดแกนอ้างอิง ในกรณีที่เป็นแบบจำลองเป็นแบบจำลอง 3 มิติ โปรแกรม ABAQUS จะใช้แกน X Y และ Z โดยผู้ใช้งานสามารถกำหนดมุมที่แกนทั้ง 3 กระทำกับแบบจำลองได้

การกำหนดขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลอง สามารถกำหนดขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลอง ออกเป็นช่วงต่างได้ในกรณีที่สภาวะแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง เช่น น้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้าง อุณหภูมิ สภาพของฐานรองรับ เป็นต้น

การกำหนดชนิดของผลลัพธ์ ผู้ใช้งานสามารถเลือกชนิดของผลลัพธ์ที่ต้องการให้โปรแกรม ABAQUS วิเคราะห์ ได้เพื่อลดระยะเวลาที่โปรแกรมต้องทำการวิเคราะห์ให้สั้นลง ดังแสดงในรูปที่ ค1.3

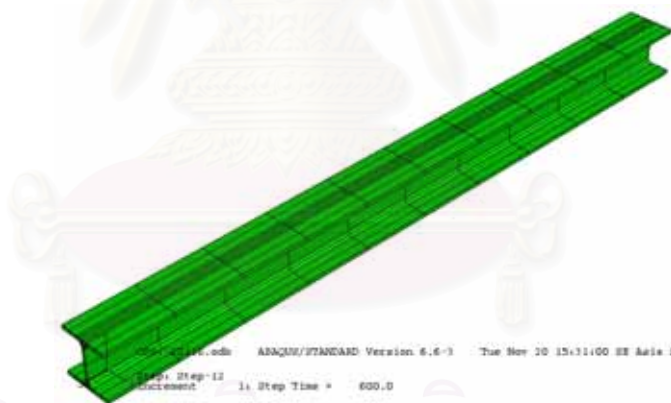


รูปที่ ค1.3 การกำหนดชนิดของผลลัพธ์

การกำหนดสภาวะแวดล้อม สภาวะแวดล้อมที่สามารถกำหนดได้เช่น สภาพฐานรองรับ ชนิดและขนาดของภาระที่กระทำกับโครงสร้าง และคุณสมบัติของวัสดุ เป็นต้น โดยที่ลักษณะสภาวะแวดล้อมต่างที่กำหนดสามารถกำหนดให้สอดคล้องกับขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลอง

การกำหนดขนาด จำนวนและชนิดของชิ้นส่วนย่อย ก่อนการกำหนดขนาดและจำนวนชิ้นส่วนย่อย ผู้ใช้งานสามารถแบ่ง แบบจำลองออกเป็นส่วนตัวต่าง ๆ เพื่อความสะดวกในการกำหนดขนาดและจำนวน ชิ้นส่วนย่อย

การวิเคราะห์แบบจำลอง โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์แบบจำลองตามข้อมูลที่ได้กำหนดในข้างต้น ซึ่งการวิเคราะห์แบบจำลองอาจใช้เวลาตั้งแต่ไม่กี่นาทีถึงเป็นหลายวัน ขึ้นอยู่กับความละเอียดของข้อมูลที่กำหนด เช่น ขนาดและความซับซ้อนของโครงสร้าง จำนวนและชนิดของเอลิเมนต์ ขั้นตอนการวิเคราะห์ จำนวนและชนิดของผลลัพธ์ที่ต้องการ เป็นต้น



รูปที่ ค1.4 ตัวอย่างการแบ่งชิ้นส่วนย่อยของแบบจำลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อติเทพ แสนทวีสุข เกิดเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม พ.ศ.2526 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) เกียรตินิยมอันดับสอง จาก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา พ.ศ.2547 ได้เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย