บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

การประมาณค่าความหนาที่เหมาะสมของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟในงานวิจัยนี้ อาศัยการวิเคราะห์แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในสองมิติแบบสภาวะไม่คงที่เพื่อคำนวณค่าอุณหภูมิที่ผิวเหล็กภายในระยะเวลาการให้ความร้อนที่กำหนด โดยทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นศาสตร์ที่ว่าด้วยการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างระบบสองระบบ หรือระหว่างระบบหนึ่งกับสิ่งแวดล้อมเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ ใช้ประโยชน์ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของระบบว่าเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงใดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด กระบวนการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีด้วยกันคือ 1) การนำความร้อน 2) การพาความร้อน และ 3) การแผ่รังสีความร้อน การถ่ายเทความร้อนแต่ละวิธีจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิในทิศทางการไหลของความร้อน ซึ่งกลไกของการเคลื่อนที่ของความร้อนในแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกัน

ในขณะที่เกิดเพลิงไหม้ โครงสร้างจะได้รับพลังงานความร้อนผ่านกระบวนการถ่ายเทความร้อนทั้งสามวิธีพร้อมกันคือ ความร้อนจากเพลิงไหม้จะถ่ายเทเข้าสู่ผิวขององค์อาคารด้วยกระบวนการพาความร้อน ในขณะเดียวกันความร้อนที่ผิวนอกขององค์อาคารจะเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณภายในขององค์อาคารโดยกระบวนการนำความร้อน ดังนั้นในการศึกษาจึงอาศัยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนสองแบบกล่าวคือ การนำความร้อนและการพาความความร้อน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เป็นกลไกการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งหรือจากส่วนหนึ่งไปยังส่วนอื่นๆของวัตถุเดียวกัน การแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนโดยกลไกนี้เกิดจากการสั่นของโมเลกุลที่อยู่ติดกันหรือเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนอิสระจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำโดยที่วัตถุนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ โดยทั่วไปการนำ

ความร้อนจะเกิดได้ดีในวัตถุที่เป็นของแข็งมากกว่าของเหลวและแก๊ส ตามลำดับ สมการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนจะเป็นไปตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier 's Law) ซึ่งกล่าวว่าอัตราการไหลของความร้อนโดยการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับระยะทาง และพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน ดังสมการที่ 2.1

$$Q_{cond.} = -kA_n \frac{dT}{dn} \tag{2.1}$$

เมื่อ $Q_{cond.}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (W)

A_n = พื้นที่ผิวสัมผัสความร้อน (m^2)

$\frac{dT}{dn}$ = เกรเดียนท์ของอุณหภูมิในทิศทางการไหล (°C/m)

k = ค่าคงที่การนำความร้อน หรือ ค่าการนำความร้อน (W/m°C)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน เป็นกลไกการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างผิวของแข็งกับของเหลวหรือแก๊ส อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนไม่ได้ขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุเพียงอย่างเดียว แต่มีองค์ประกอบอื่นๆอีกที่เกี่ยวข้อง เช่น ลักษณะการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือแก๊ส เป็นต้น การคาดคะเนอัตราการถ่ายความร้อนโดยการพาความร้อนจากของไหลเข้าสู่ผิวของวัตถุแข็งต้องอาศัยหลักการของการนำความร้อน พลศาสตร์ของไหลและทฤษฎีของชั้นบาง ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสมการ

$$Q_{conv.} = h_c A_t (T_\infty - T_{sf}) \tag{2.2}$$

เมื่อ $Q_{conv.}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (W)

A_t = พื้นที่ผิวสัมผัสความร้อน (m^2)

T_∞ = อุณหภูมิของของไหล (°C)

T_{sf} = อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุของแข็ง (°C)

h_c = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2°C$)

สมการที่ 2.2 เรียกว่า กฎการเย็นตัวของนิวตัน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับระบบใดๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการด้วยกัน ได้แก่ รูปแบบของการไหลของของไหล รูปทรงทาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เรขาคณิตของวัตถุ คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล ความแตกต่างของอุณหภูมิ ตำแหน่งตามผิวของวัตถุ และกลไกของการพาความร้อน

สมการควบคุมการนำความร้อน

โดยอาศัยกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิค พิจารณาปริมาตรควบคุมของแท่งวัตถุรูปทรงลูกบาศก์ขนาดเล็กจะได้สมการควบคุมการนำความร้อนในสามมิติดังสมการที่ 2.3

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{g}=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (2.3)$$

เมื่อ T = อุณหภูมิของวัตถุ (°C)

ρ = ความหนาแน่นของวัตถุ (kg/m^3)

c = ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุ (J/ kg°C)

$\dot{g}$ = อัตราพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในระบบ (W/ m^3)

x, y, z = ระยะทางในแนวแกน x,y และ z ตามลำดับ (m)

t = ระยะเวลา (s)

จากสมการที่ 2.3 อุณหภูมิของวัตถุ ณ ตำแหน่งใดๆจะเป็นฟังก์ชันของทั้งระยะทางและระยะเวลา $T(x,y,z,t)$ ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุที่ปรากฏในสมการที่ 2.3 จะแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ภายในวัตถุ วัตถุที่มีค่าความร้อนจำเพาะมากกว่าจะสามารถสะสมพลังงานความร้อนไว้ภายในได้มากกว่า

สำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อนจากไฟไปยังองค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟซึ่งเป็นปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสภาวะไม่คงที่จะมีสมการควบคุมการถ่ายเทความร้อนซึ่งลดรูปจากสมการที่ 2.3 ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (2.4)$$

2.2 คุณสมบัติทางความร้อนของเหล็ก

คุณสมบัติทางความร้อนของเหล็กสามารถเปลี่ยนแปลงไปได้ตามค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปดังรายละเอียดต่อไปนี้

ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของเหล็ก ρ_s ที่อุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากจากค่าที่อุณหภูมิปกติ และมีค่าเท่ากับ 7.85 T/m^3

ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)

ค่าความร้อนจำเพาะ หมายถึงอัตราความร้อนที่วัตถุสะสมไว้ได้ Malhotra (1982) ได้เสนอว่าค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก c_s จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิต่างๆ ดังนี้

$$c_s = 475 + 6.01\times10^{-4}T_s^2 + 9.46\times10^{-2}T_s \qquad (2.5)$$

เมื่อ c_s = ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก (J/ kg°C) และ T_s = อุณหภูมิเหล็ก (°C)

Malhotra (1982) ใช้สมการที่ 2.5 และข้อมูลที่ได้จากการทดสอบของ Pettersson et al. (1976) เขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.1 จากกราฟจะพบว่ามีความไม่ต่อเนื่องของค่าความร้อนจำเพาะของเหล็กที่อุณหภูมิประมาณ 750 °C ดังนั้นสมการที่ 2.5 จึงใช้ได้จนถึงที่อุณหภูมินี้เท่านั้น

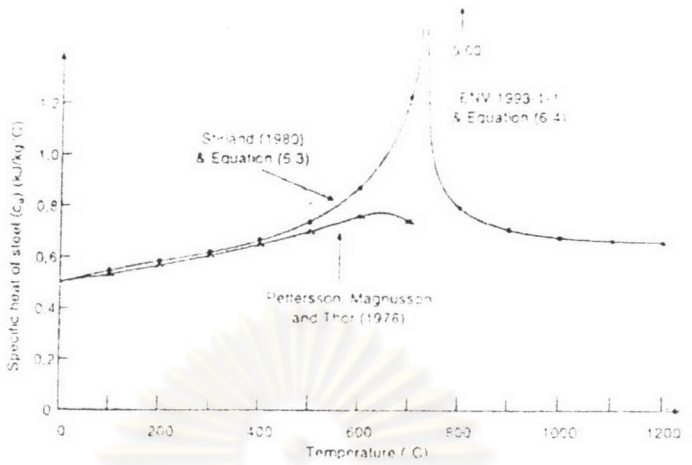
ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, *k*)

ค่าการนำความร้อนเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการส่งผ่านความร้อนจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งภายในวัตถุ จากการทดลองของ Pettersson et al. (1976) และ Malhotra (1982) พบว่าค่าการนำความร้อนของเหล็กจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามรูปที่ 2.2

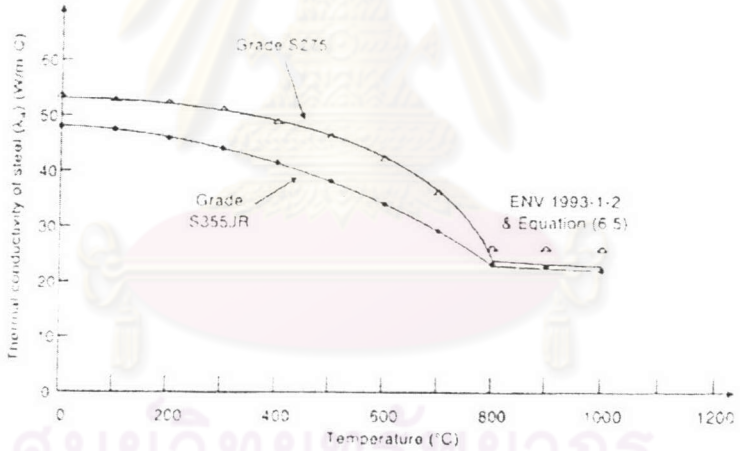
ENV 1993-1-2 ได้ให้สมการที่ใช้ในการหาค่าการนำความร้อนของเหล็ก , k_s (W/m°C) ไว้ดังนี้

เมื่อ $T_s \le 800$ °C, $\quad k_s = 54 - 3.33\times10^{-2}T_s$

$T_s \ge 800$ °C, $\quad k_s = 27.3$ } (2.6)



รูปที่ 2.2 ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 2.3 ค่าการนำความร้อนของเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ

2.3 คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟ

อรรถวุฒิ อุบลจินดา (2545) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟและมีค่าองค์ประกอบหน้าตัดสูง โดยเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการพ่นด้วยวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟประเภทซีเมนติชียสที่มีแร่เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสมด้วยความหนาต่างๆ กัน สำหรับงานวิจัยนี้ อาศัยการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนในสองมิติแบบสภาวะไม่คงที่ ซึ่ง

ใช้วัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟประเภทซีเมนติเชียสที่มีแร่เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสมซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆ เป็นไปตามการทดสอบของอรรถวุฒิ วัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟประเภทนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วนด้วยกันกล่าวคือ

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน

2) มวลรวม ซึ่งในที่นี้ได้แก่ แร่เพอร์ไลท์ มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีกว่ามวลรวมที่ใช้ในงานก่อสร้างชนิดทั่วๆไป เช่น ทรายหรือหิน เป็นต้น อีกทั้งยังมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำมากจึงไม่เป็นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่มากเกินไปให้แก่โครงสร้าง

3) สารผสมเพิ่ม ซึ่งทำหน้าที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้านอื่นๆให้แก่วัสดุผสมที่ได้จากสองส่วนแรก ซึ่งได้แก่ คุณสมบัติการยึดเกาะกับผิวเหล็ก คุณสมบัติด้านการไหล และการลดการแตกร้าวของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟ เป็นต้น

วัสดุกันไฟประเภทซีเมนติเชียสที่มีแร่เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยของอรรถวุฒิเป็นผลิตภัณฑ์ของห้างหุ้นส่วนจำกัด ดี.พี.ดี โอไรท์ โค้ท ซึ่งมีแร่เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสมโดยประมาณ 100 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และน้ำ โดยประมาณ 65 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักส่วนผสมแห้ง คุณสมบัติต่างๆของวัสดุกันไฟดังกล่าวมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.89 ตัน/ม^3

ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)

ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟมีค่าเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากการทดสอบหาค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟสำหรับการศึกษานี้ พบว่ามีค่า 970.1 J/kg°C

ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

อรรถวุฒิได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟ โดยอาศัยการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในสองมิติแบบสภาวะไม่คงที่เพื่อนำผลการวิเคราะห์มา

เปรียบเทียบกับผลการทดสอบการทนไฟ พบว่าค่าการนำความร้อนที่ทำให้ได้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบมากที่สุดคือ

$$k_p = 1.065\times10^{-4}T_p + 9.35\times10^{-2} \text{ W/m°C} \quad (2.7)$$

2.4 ระยะเวลาการทนไฟตามมาตรฐาน ASTM E119

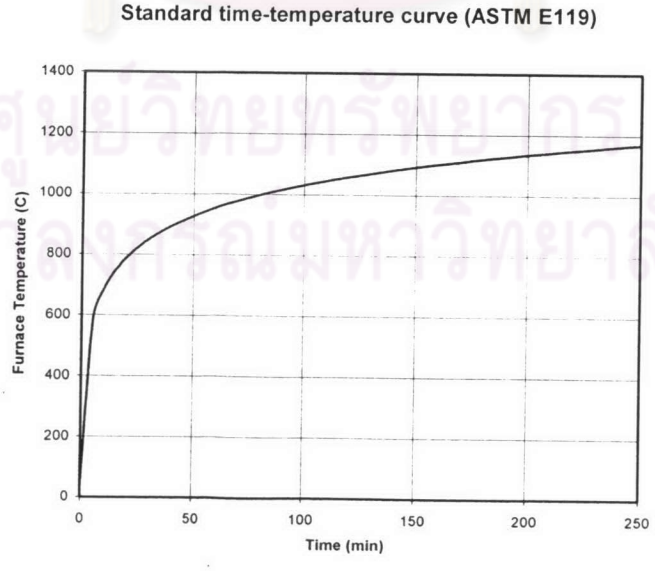
มาตรฐานการทดสอบการทนไฟของวัสดุและองค์อาคารที่เป็นสากลโดยทั่วไปจะกำหนดให้การทดสอบการทนไฟใดๆ จะต้องควบคุมความรุนแรงของไฟในรูปของอุณหภูมิของไฟที่ให้แก่ตัวอย่างทดสอบให้เป็นไปตามที่กำหนด ความรุนแรงของไฟนี้เปรียบได้กับน้ำหนักบรรทุกอย่างหนึ่งที่ให้แก่โครงสร้าง กราฟไฟมาตรฐานถูกกำหนดให้ใช้กับการทดสอบการทนไฟขององค์อาคารในทุกสภาวะโดยไม่คำนึงถึงว่าองค์อาคารนั้นๆอยู่ในสภาพใด ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของกราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119 ดังรูปที่ 2.3 เป็นไปตามสมการ 2.8

$$T = T_0 + 345Log(8t+1) \quad (2.8)$$

เมื่อ T = อุณหภูมิภายในเตาเผาที่เวลา t, °C

T_o = อุณหภูมิ ณ เวลาเริ่มต้น, °C

t = เวลานับตั้งแต่เริ่มการทดสอบ, min



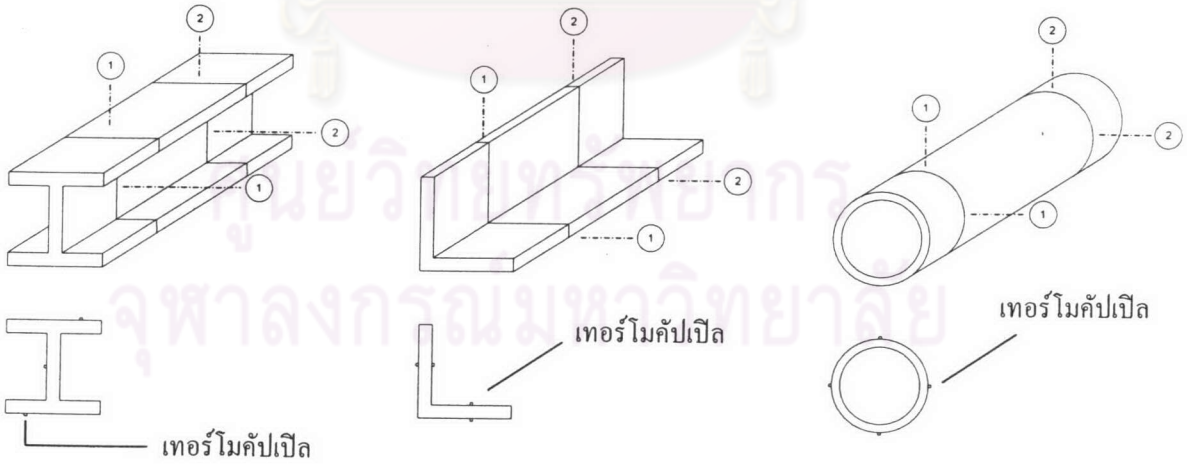
รูปที่ 2.3 กราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119

ในงานวิจัยนี้จะใช้กราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119 ในการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนในสองมิติแบบสภาวะไม่คงที่ เพื่อประมาณหาค่าความหนาที่เหมาะสมของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟสำหรับเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ เช่นเดียวกับการทดสอบการทนไฟของอรรถวุฒิ อุบลจินดา (2545) เพื่อนำผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่ ค่าความหนาของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองมีค่าแตกต่างกันอย่างไร แบบจำลองมีความไหวตัวต่อความคลาดเคลื่อนของค่าการนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟมากน้อยเพียงใด

มาตรฐาน ASTM E119 กำหนดเกณฑ์สิ้นสุดความสามารถทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณไว้ดังนี้คือ

1. เมื่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ระดับหรือหน้าตัดใดๆ ถึง 538 °C (1,000 °F)
2. เมื่อค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใดๆ ถึง 649 °C (1,200 °F)

โดยทั่วไปในการทดสอบการทนไฟขององค์อาคาร สามารถวัดค่าอุณหภูมิผิวเหล็กที่ระดับหรือหน้าตัดใดๆโดยการใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิที่แต่ละหน้าตัดขององค์อาคารดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 การวัดอุณหภูมิผิวเหล็กที่หน้าตัดใดๆ