

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเตาเผาเซรามิค

ปัจจุบันการทำอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา (Ceramics) กำลังเป็นที่สนใจและนิยมกันแพร่หลายนับวันมีแต่จะเจริญก้าวหน้าเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง โดยเฉพาะอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่จำเป็นและสำคัญ ซึ่งช่วยให้การผลิตเครื่องปั้นดินเผาที่มีคุณภาพดีขึ้น ได้แก่ เตาเผา (Kiln) เป็นเครื่องมือหลักที่สำคัญ

เตาเผา เป็นเครื่องมือที่ให้ความร้อน ควบคุมความร้อน การกระจายความร้อนซึ่งจะต้องมีการศึกษาและออกแบบให้ถูกหลักวิชาการ สามารถเผาให้อุณหภูมิสูงรวมทั้งประหยัดและปลอดภัย ตลอดจนถึงวัสดุที่ใช้ในการสร้างเตาต้องมีคุณภาพดี เหมาะสมจะเป็นเตาก๊าซ (Gas Kiln) เตาน้ำมัน (Oil Kiln) เตาฟืน (Wood Kiln) หรือเตาไฟฟ้า (Electric Kiln) ก็ตาม

หลักทั่วไปที่ควรคำนึงเกี่ยวกับเตาเผาไม่ว่าจะเป็นประเภทไหนก็ตามที่จะนำมาใช้ในการปฏิบัติเพื่อความเหมาะสม ควรพิจารณาในหลักการต่างๆ คือ

1. เป็นเตาที่สามารถเร่งหรือ และสามารถเผาได้ในอุณหภูมิสูงตามความต้องการ
2. เป็นเตาที่สามารถกระจายความร้อนได้สม่ำเสมอทั่วทั้งเตา ไม่ว่าจะเป็นส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของเตา
3. เป็นเตาที่มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงต่างๆภายในเตาได้อย่างดี
4. เป็นเตาที่สามารถควบคุมความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5. เป็นเตาที่ประหยัดเชื้อเพลิง มีความปลอดภัยสูง
6. เป็นเตาที่ดูแล และบำรุงรักษาง่าย
7. เป็นเตาที่มีการใช้อุปกรณ์เครื่องมืออย่างมีประสิทธิภาพ

8. เป็นเตาที่บรรจุผลิตภัณฑ์ (Loading) และการนำออก (Un-Loading) ได้สะดวกคล่องตัว
9. เป็นเตาที่มีความแข็งแรงทนทานต่อการใช้งาน
10. เป็นเตาที่ใช้ได้สะดวก คล่องตัว เหมาะกับงานทุกประเภท

### 3.1.1 การแบ่งประเภทของเตา

เตาที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ได้มีผู้ออกแบบตลอดจนรูปร่าง ขนาด ให้เหมาะสมกับความต้องการ และมีประสิทธิภาพสูง ประหยัดเชื้อเพลิง ปลอดภัย ควบคุมสะดวก ได้แบ่งประเภทเตาตามลักษณะต่างๆ กล่าวคือ

#### 1) แบ่งตามประเภทการใช้งานของเตา

ซึ่งหมายความถึงเตาชนิดต่างๆ จะเป็นเตาน้ำมัน เตาก๊าซ เตาไฟฟ้า เตาพื้น โดยเผาเป็นครั้งคราว เผาแบบกึ่งต่อเนื่อง หรือเผาตลอดเวลา แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ผลิตที่ จะต้องการจะสนองความต้องการของอุตสาหกรรม ซึ่งแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ คือ

##### ก) เตาเผาที่ไม่ต่อเนื่อง

เตาเผาที่เผาเป็นครั้งคราว โดยเผาไม่ติดต่อกัน ต้องใช้เวลานานพอสมควรในการรอให้เตาเย็น จึงจะมีการบรรจุผลิตภัณฑ์เข้าเตาใหม่ เป็นเตาที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมภายในครอบครัว งานค้นคว้าวิจัย งานทดลองต่างๆ

##### ข) เตาเผาชนิดกึ่งการต่อเนื่อง

เป็นเตาที่สามารถเผาเกือบจะติดต่อกันไปทำให้เป็นการประหยัดเชื้อเพลิง โดยอาศัยความร้อนส่วนหนึ่งจากเตาเผา และควรเป็นเตาชนิดที่ใช้รถบรรจุผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอีกคันหนึ่ง หมุนเวียนสลับกันไป ซึ่งกำลังเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป

##### ค) เตาเผาชนิดที่เผาต่อเนื่อง

เป็นเตาแบบอุโมงค์ หรือเตาแบบวงแหวน เป็นเตาที่ออกแบบให้เผาติดต่อกันได้ตลอดเวลา เป็นเตาที่มีระบบการควบคุมอย่างดี ลงทุนสูงใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

#### 2) แบ่งตามประเภทของทางเดินลมร้อน

เป็นการออกแบบเตาเผาที่ให้ความร้อนเดินไปในทิศทางที่ต้องการ และได้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี มีประสิทธิภาพสูงในการใช้งาน กล่าวคือ

### ก) เตาเผาชนิดทางเดินลมร้อนในแนวนอน

เป็นเตาชนิดที่มีรูปร่างยาวขนานกับพื้นดิน หลังคาโค้ง ตลอดจนถึงแนวปล่อง เป็นเตาที่ใช้พื้นเป็นเชื้อเพลิง และสามารถเผาได้อุณหภูมิสูง ซึ่งได้แก่ เตาจีน เตาทุบ เตาเผาเคลือบเซรามอนที่ เชียงใหม่ เตาเผาสังคโลกที่มีชื่อเสียงในสมัยสุโขทัย ปัจจุบันเตาแบบนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยม เนื่องจากต้นทุนในการผลิตสูงและเชื้อเพลิงที่ใช้ก็หายากขึ้น และอีกประการหนึ่งต้องคอยควบคุมตลอดเวลา

### ข) เตาเผาชนิดทางลมร้อนขึ้น

เป็นเตาที่ลงทุนสร้างไม่สู้แพงนัก เป็นเตาที่สร้างง่ายแต่อุณหภูมิเผาได้ไม่สูงมากนัก เป็นเตาเผาเคลือบไฟต่ำได้ดี เตาชนิดนี้ผู้สร้างจะต้องเรียงตะกั่วรับ หลายๆ ชั้น จะช่วยให้ความร้อนภายในเตาสม่ำเสมอเท่ากันทั้งเตา

### ค) เตาเผาชนิดทางลมร้อนลง

เป็นเตาที่มีบทบาทสำคัญมาก เป็นเตาเผาที่สามารถเผาอุณหภูมิสูง เป็นเตาเผาที่ใช้เทคนิคสูงและการลงทุนค่อนข้างแพง โดยเฉพาะวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเตา ต้องเป็นวัสดุที่มีคุณภาพดีสามารถทนต่อสภาวะต่างๆ ปัจจุบันเตาประเภทนี้นิยมสร้างเป็นเตาน้ำมัน เตาก๊าซ สำหรับเตาก๊าซใช้อิฐประเภทเบ้า (Insulating Brick) ช่วยประหยัดเชื้อเพลิงได้ดี

## 3) แบ่งตามลักษณะของเปลวไฟ

เตาเผาผลิตภัณฑ์ในปัจจุบันนี้ เตาบางประเภทมักออกแบบเป็นเตาให้เปลวไฟสัมผัสผลิตภัณฑ์โดยตรงก็มี แต่เตาบางชนิดโดยเฉพาะเตาเผาเคลือบจะต้องออกแบบไม่ให้เปลวไฟสัมผัสได้เลย ซึ่งการออกแบบเตาเผาต้องมีลักษณะแตกต่างกัน คือ

### ก) เตาเผาชนิดเปลวไฟสัมผัส

เป็นเตาขนาดใหญ่ใช้เผาผลิตภัณฑ์ประเภทสิ่งก่อสร้าง (Terra-cotta) อิฐ กระเบื้อง ท่อ อิฐทนไฟ เป็นเตาเผาที่ให้อุณหภูมิสูง ส่วนมากใช้เผาผลิตภัณฑ์ที่ไม่เคลือบ

### ข) เตาเผาชนิดกึ่งป้องกันเปลวไฟ

เป็นเตาชนิดที่ออกแบบกำแพงไฟ ให้มีเปลวไฟสัมผัสกำแพงไฟโดยตรง โดยสร้างกำแพงไฟอยู่เหนือช่องเผา (Firing chamber)

### ค) เตาเผาชนิดเตาปิด

เป็นเตาที่ออกแบบให้มีระบบป้องกันเปลวไฟสัมผัส โดยใช้วัสดุทนไฟสร้างเป็นหีบป้องกันไฟโดยตรง ใช้เผาเคลือบได้ดี หรือจะใช้เผาผลิตภัณฑ์ชนิดบนเคลือบก็ได้

## 4) แบ่งตามชนิดของเชื้อเพลิง

เตาที่ใช้เผาผลิตภัณฑ์จะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับเชื้อเพลิง ตลอดจนรูปร่าง และขนาดของเตาจะต้องดัดแปลงแก้ไขให้เหมาะสมกับงาน รวมทั้งการประหยัดและให้ผลคุ้มค่า กล่าวคือ

ก) เตาชนิดที่ใช้พื้นเป็นเชื้อเพลิง

ผู้สร้างจะต้องออกแบบให้การลุกไหม้ของเชื้อเพลิงได้ดี และสามารถเผาได้ อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะซีเมนต์จะต้องถ่ายเทได้สะดวก เตาที่ใช้พื้นเป็นเชื้อเพลิงสร้างเป็นเตาชนิด ต่างๆ ได้ตามต้องการ

ข) เตาที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง

เป็นเตาที่เผาได้อุณหภูมิสูงแต่การลุกไหม้ของเชื้อเพลิง จะต้องออกแบบให้ เหมาะสมช่องที่จะใส่เชื้อเพลิงและการระบายซีเมนต์ในเตาต้องให้สมดุลกัน

ค) เตาชนิดใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิง

เป็นเตาที่ให้อุณหภูมิสูง สามารถเผาได้ทั้งแบบออกซิเดชัน (Oxidation) หรือรีดักชัน (Reduction)

ง) เตาเผาชนิดใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง

อาจออกแบบให้ใช้น้ำมันประเภทโซล่า (Light oil) หรือน้ำมันเตา (Heavy oil)

จ) เตาเผาชนิดไฟฟ้า

เป็นเตาเผาที่สามารถให้อุณหภูมิสูง และสามารถเร่งความเร็วได้ตามต้องการ เป็นเตาที่เผาแบบออกซิเดชันเท่านั้น

### 3.1.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของเตา

เตาเผา มีส่วนประกอบที่สำคัญหลายประการ ทำให้เตามีประสิทธิภาพในการทำงานโดยหลักการทั่วไป

- 1) ห้องเผา (Firing chamber) โดยปกติแบ่งออกเป็น 3 คือ
  - ก) ส่วนบน (Top part)
  - ข) ส่วนกลาง (Middle part)
  - ค) ส่วนล่าง (Bottom part)

เตาเผาที่มีประสิทธิภาพในการทำงานดี จะต้องให้ความร้อนทุกส่วนมีความร้อนสม่ำเสมอทุกๆครั้งที่ปฏิบัติการเผา

- 2) ผนังเตา (Fire Wall)

โดยปกติผนังเตาก่อด้วยอิฐ 2 ชั้น ทำหน้าที่ควบคุมความร้อน อิฐผนังภายในเตา(Lining) จะใช้อิฐทนไฟที่มีคุณภาพที่ดี ถ้าเป็นเตาไฟฟ้าหรือเตาก๊าซ จะใช้อิฐทนไฟชนิดเบา(Insulating brick) ส่วนภายนอกจะหุ้มด้วยอิฐทนไฟธรรมดาหรืออิฐก่อสร้างก็ได้ ถ้าเป็นเตาชนิดที่ต้องการเผา ในอุณหภูมิสูงอาจจะหุ้มด้วยฉนวนทนความร้อนอีกชั้นหนึ่ง

### 3) พื้นเตา (Floor)

ทำหน้าที่รับน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่เข้าเตาเผาในสมัยโบราณ เตาที่สร้างบนพื้นดิน เช่นเตาสมัยสุโขทัย เตาจีน นิยมใช้ทรายรองพื้นเตา ใช้ป้องกันกับน้ำเคลือบไหลติดพื้นเตา ปัจจุบันเตาเปลี่ยนแปลงไปโดยเฉพาะเตาทางลมร้อนลง ต้องออกแบบพื้นเตาให้มีช่องระบายลมร้อนลงเป็นตาหมากรุกทั่วๆ ไปบนพื้นเตา ส่วนเตาชนิดทางลมร้อนขึ้น จะต้องเจาะพื้นเตาให้ความร้อนขึ้นได้สะดวก เตาชนิดทางลมร้อนขึ้นควรสร้างตะกรับ (Checker work) หลายชั้นเพราะช่วยให้ความร้อนสม่ำเสมอดีทั่วทั้งเตา

### 4) ปล่องไฟ (Chimneys)

เตาที่ใช้ฟืน ก๊าซ น้ำมัน ถ่าน ต้องออกแบบเตาให้มีปล่องไฟ เพื่อช่วยให้การลุกไหม้ของเชื้อเพลิงได้ดี โดยเฉพาะเตาฟืนปล่องต้องมีขนาดโต ส่วนเตาก๊าซและน้ำมันมีขนาดเล็กกว่า ส่วนเตาไฟฟ้าจะไม่มีปล่องเตาเหมือนเตาชนิดอื่น

### 5) กำแพงไฟ (Baffle wall)

อยู่ภายในเตา โดยเฉพาะเตาน้ำมัน เตาก๊าซ เป็นตัวการป้องกันไม่ให้เปลวไฟที่ออกจากหัวฟืนไฟสัมผัสกับผลิตภัณฑ์โดยตรง โดยที่จะสัมผัสกำแพงไฟก่อน อิฐทนไฟที่ใช้ก่อกำแพงไฟต้องเป็นอิฐทนไฟที่มีคุณภาพดี

### 6) หัวฟืนไฟ (Burner)

ปัจจุบันหัวฟืนไฟ มีทั้งชนิดที่ใช้น้ำมันและก๊าซ หัวฟืนไฟที่ใช้กับน้ำมันชนิดที่ใช้พัดลม (Blower) ในตัวก็มี ชนิดที่แยกต่างหากก็มี แต่เป็นที่นิยมในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถใช้งานเผาได้ติดต่อกันตลอดเวลา ส่วนหัวฟืนไฟสำหรับก๊าซนิยมใช้หัวฟืนไฟแบบเป็น High Pressure Nozzle ใช้อากาศปรับได้ในตัว

### 7) หลังคาเตา (Roof)

เตาที่ใช้เผาขนาดใหญ่ หลังคาเตาต้องออกแบบให้โค้ง หรือเรียบก็ได้ เนื่องจากการเผามีความร้อนสูงและเป็นจุดอ่อน โอกาสที่พังทลายมีอยู่มาก จึงนิยมออกแบบในเตาขนาดใหญ่ มีหลังคาโค้งทุกเตา การเรียงอิฐหลังคาเตาก็ต้องมีเทคนิคสูง เกี่ยวกับการหดตัว และขยายตัวของอิฐ ซึ่งสำคัญมาก และอาจทำให้หลังคาเตายุบพังได้ง่าย แต่ถ้าเป็นในปัจจุบันที่ใช้เซรามิคไฟเบอร์เป็นฉนวนจะออกแบบให้เป็นหลังคาทรงเรียบ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและประหยัดพลังงานได้มากกว่า

### 8) ประตูเตา (Door)

ใช้ทำหน้าที่ปิด-เปิดในการบรรจุของเข้าเตา การเอาของออกจากเตา เตาชนิดที่ใช้รถบรรจุของเข้าเตา (Kiln car) มักจะออกแบบประตูติดกับตัวรถ บางแบบออกแบบติดกับเตา ประตูเตามักจะเจาะช่อง (Peep hole) ไว้สองระดับ ไว้สังเกตสีของไฟ ส่วนเตาไฟฟ้าประตูเตานั้นก็คือ ฝาเตา

นั่นเอง โดยเฉพาะฝาเตาที่ดีต้องป้องกันความร้อนไม่ให้รั่วได้ ต้องปาดเป็นลื่นให้เข้ากันได้สนิท สำหรับเตาพื้น เตาจีน ประตุนเตาจะใช้อิฐเรียงบังไม่ให้ความร้อนออกในการเผาผลิตภัณฑ์ทุกครั้ง

#### 9) รถบรรทุกผลิตภัณฑ์ (Kiln car)

เตาเผาชนิดที่ใช้รถบรรทุกผลิตภัณฑ์ ส่วนมากเป็นเตาที่ใช้เชื้อเพลิงน้ำมัน ก๊าซ ไฟฟ้า โดยการออกแบบเตาชนิดที่ใช้รถบรรทุกผลิตภัณฑ์เข้าเตาเผา ส่วนมากได้แก่ เตาอุโมงค์ (Tunnel Kiln) โดยเฉพาะรถบรรทุกผลิตภัณฑ์ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ส่วนบน (Car top) ล้อ และที่ป้องกันความร้อน (Sand seal) การบรรจุของในรถก็เช่นเดียวกับการบรรจุของเข้าเตาแบบที่ไม่มีรถ ต้องมี ขารองและชั้นรองเช่นเดียวกัน แต่ว่าคล่องตัวกว่าและกำลังเป็นที่นิยมในโรงงานอุตสาหกรรม

#### 10) แผ่นบังคับความร้อน

ส่วนมากเป็นเตาก๊าซ เตา น้ำมัน จะมีแผ่นบังคับความร้อนขึ้นสู่ปล่อง ทำหน้าที่คอยบังคับไม่ให้ก๊าซเสียไหลเร็วจนเกินไป

#### 11) เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermometer)

เป็นเครื่องมือบอกความร้อนภายในเตา ซึ่งสามารถบอกเป็นองศาเซลเซียส หรือองศาฟาเรนไฮต์ได้ เครื่องวัดอุณหภูมิสามารถบอกเป็นตัวเลขหรือตารางกราฟก็ได้ หรือจะใช้ตั้งแบบอัตโนมัติก็มี

#### 12) ช่องดูไฟ (Fire hole)

เตาที่ใช้เผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา ผู้ที่ออกแบบสร้างเตาทุกชนิดทุกแบบจะต้องมีช่องดูไฟ ซึ่งมักจะเจาะไว้ 3 ระดับ เพื่อเปรียบเทียบสีของไฟ ใช้ดู cone ในการเผา ในเตาไฟฟ้าอาจใช้ทำหน้าที่ระบายก๊าซไปในตัวด้วย

#### 13) อุปกรณ์เตา (Kiln Furniture)

เตาทุกชนิดต้องมีอุปกรณ์โดยเฉพาะชั้นรองไว้สำหรับวางผลิตภัณฑ์เข้าเตาเผาเคลือบ ที่นิยมกันมากได้แก่ ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide)

### 3.1.3 เตาเผาเซรามิกที่ใช้ในการทดลอง

เตาเผาเซรามิกที่ใช้ในการทดลองเป็นเตาก๊าซชนิดทางลมร้อนลง ซึ่งมี ส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้(รูปที่ 2 และ 3)

หมายเลข 1 คือ ผนังเตา

หมายเลข 2 คือ เทอร์โมคัปเปิล

หมายเลข 3 คือ ปล่องเตา

หมายเลข 4 คือ หลังคาเตา

หมายเลข 5 คือ ประตูเตา

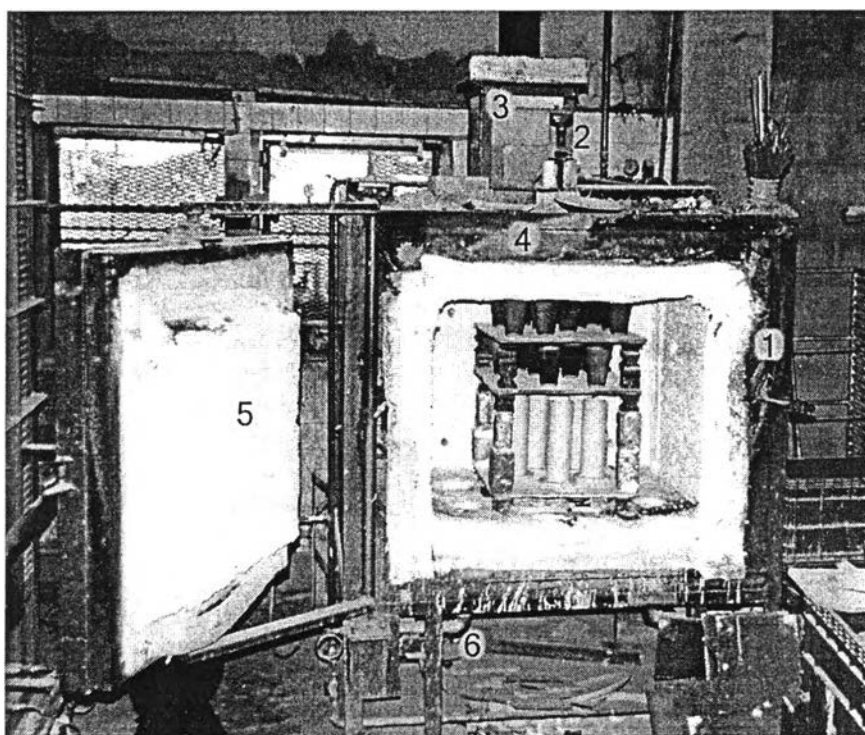
หมายเลข 6 คือ หัวพันไฟ

หมายเลข 7 คือ ช่องดูไฟ

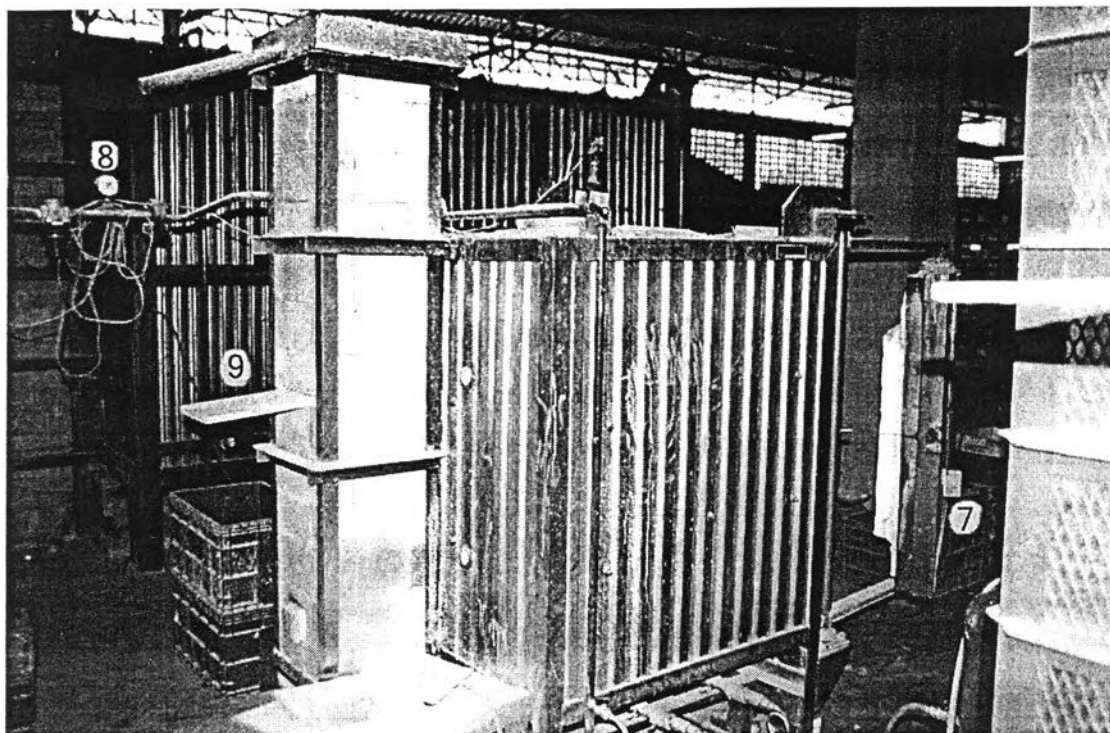
หมายเลข 8 คือ เกจวัดความดัน (Pressure gage) สำหรับก๊าซหุงต้ม

หมายเลข 9 คือ แผ่นบังคับความร้อน

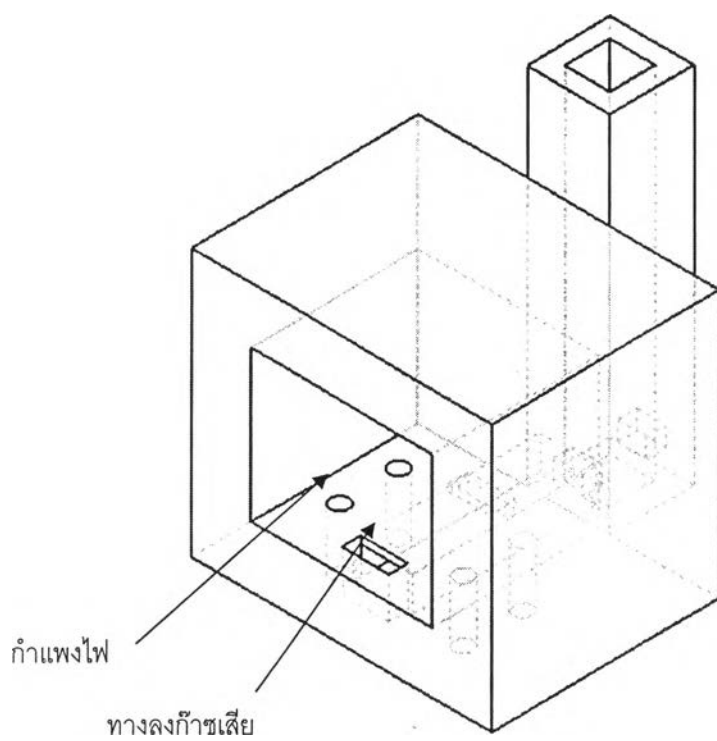
หมายเลข 10 คือ กำแพงไฟ



รูปที่ 2 รูปด้านหน้าของเตาเผาเซรามิคประสิทธิภาพสูงที่ใช้ทดลอง



รูปที่ 3 รูปด้านข้างของเตาเผาเซรามิคประสิทธิภาพสูงที่ใช้ทดลอง



รูปที่ 4 แบบเตาเผาเซรามิคประสิทธิภาพสูงที่ใช้ทดลอง



## 3.2 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิค

การทำอุตสาหกรรมเซรามิคคือว่ากระบวนการความร้อนมีอิทธิพลและบทบาทสำคัญอย่างยิ่ง เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแปรสภาพส่วนประกอบต่างๆ ในระหว่างทำการเผา การควบคุมไฟหรืออุณหภูมิในการเผาเซรามิค นับว่าเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญมากประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นการปรับอุณหภูมิในการเผาผลิตภัณฑ์ต้องการกระทำอย่างสม่ำเสมอและถูกขั้นตอน เพื่อจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและคุณสมบัติตามที่ต้องการ

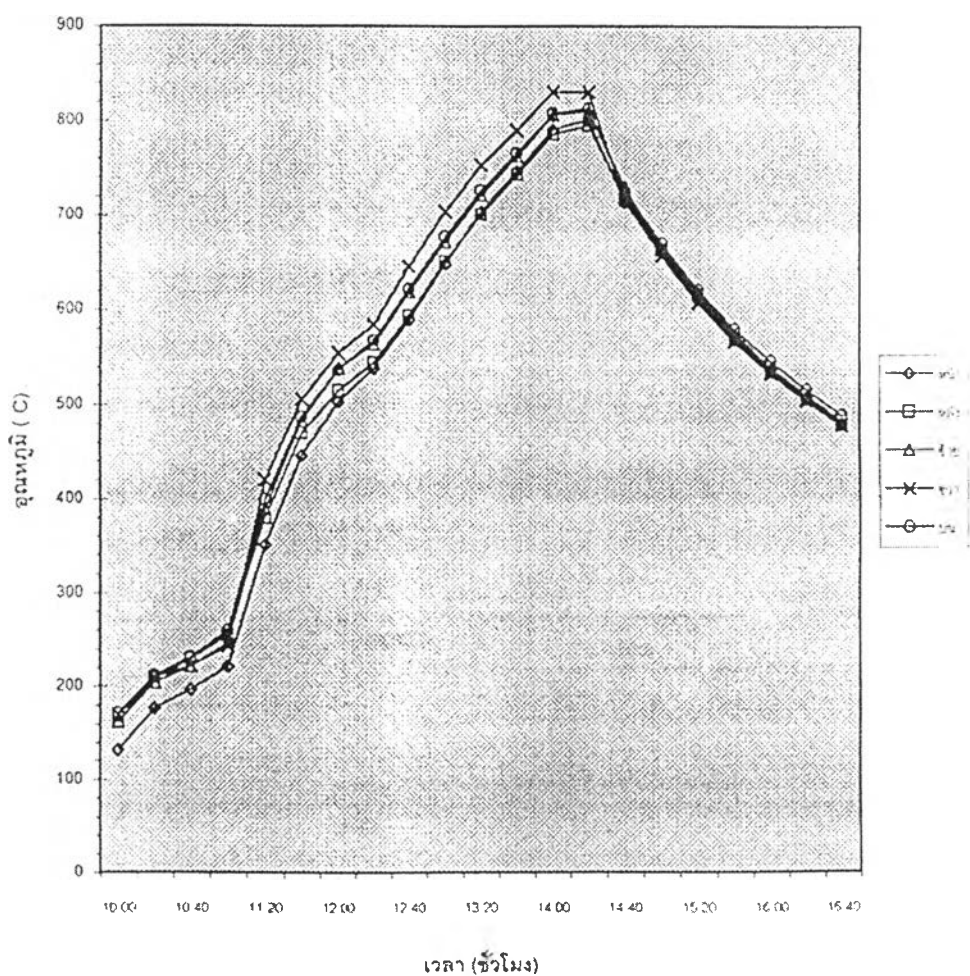
### 3.2.1 การควบคุมไฟในการเผาเซรามิคไฟต่ำ (เผาดิบ)

การเผาดิบ คือ การเผาครั้งแรกหลังจากการปั้นและตกแต่งผลิตภัณฑ์เรียบร้อยแล้ว จึงให้แห้ง จากนั้นทำการเผาโดยการให้หรือใช้ความร้อนซึ่งเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนไปที่ละน้อย ไม่ว่าจะเป็นเตาฟืน เตาน้ำมัน ก๊าซ หรือเตาไฟฟ้า ซึ่งต้องให้ระยะเวลาการเผาเป็นไปอย่างช้าๆสม่ำเสมอ แต่ในการเผาผลิตภัณฑ์มีข้อควรระวังในการเผาดิบคือ ไม่ควรปรับอุณหภูมิเร็วเกินไป อันจะทำให้ผลิตภัณฑ์แตกร้าวหรือเสียหายได้ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ ควรใช้เวลาในการเผาดิบมากขึ้น(การเผาแบบแช่ไฟ) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลิตภัณฑ์แตกร้าวในกระบวนการนี้จะใช้การเผาแบบออกซิเดชั่น มีอุณหภูมิในการเผาประมาณ 550-800 °C ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและลักษณะการใช้งานเซรามิคเป็นหลัก หลังจากการเผาดิบเสร็จจึงลดลง หลังจากนั้นควรปิดเตาทิ้งไว้ นานไม่ต่ำกว่า 6-10 ชั่วโมง จึงทำการเปิดเตานำเอาผลิตภัณฑ์ที่เผาดิบแล้วออกจากเตาเผา

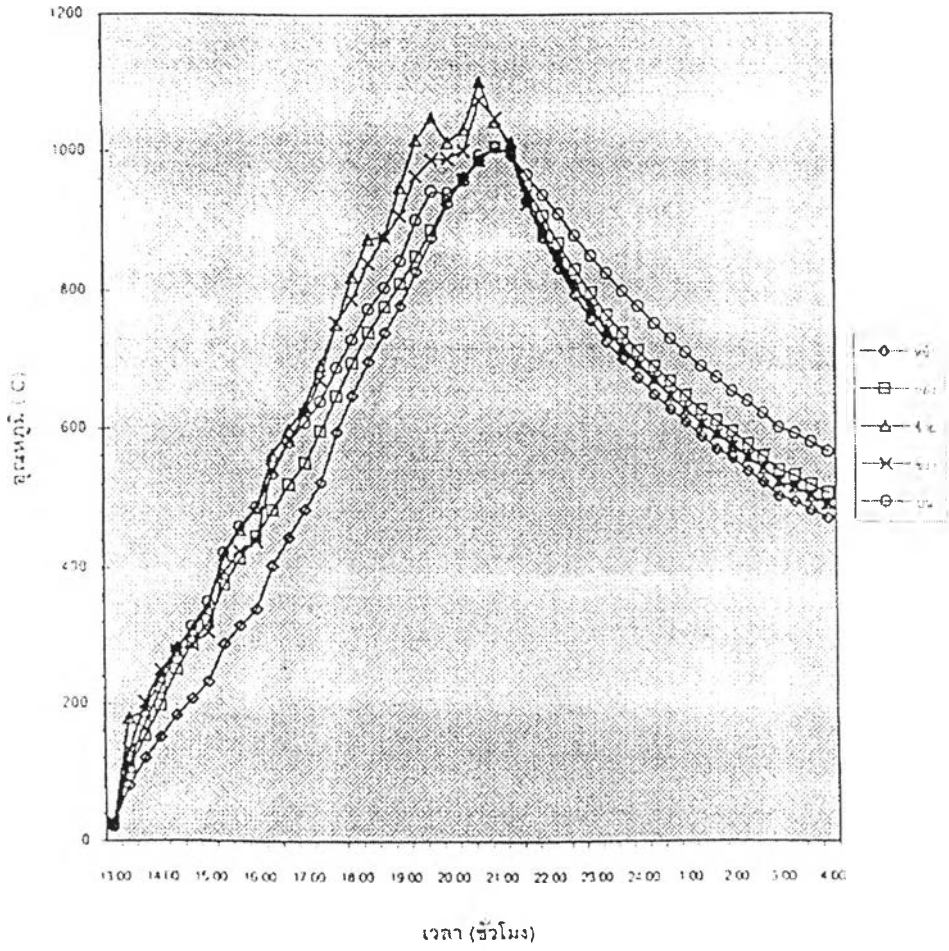
### 3.2.2 การควบคุมไฟในการเผาเซรามิคไฟสูง (เผาเคลือบ)

การเผาเคลือบ คือ การเผาครั้งที่ 2 หลังจากการเผาดิบแล้วนำไปชุบน้ำเคลือบ เพื่อให้สารเคลือบติดผิวผลิตภัณฑ์ให้มีความหนาสม่ำเสมอแล้วนำไปเผา เพื่อให้ น้ำเคลือบละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เคลือบติดผิวผลิตภัณฑ์ให้มีความมันวาว บางชนิดเคลือบด้านผิวเรียบมีความแข็ง สามารถต้านทานความเป็นกรด เป็นด่างได้ ดังนั้นการเผาเคลือบนับว่ามีความสำคัญมาก การเรียงผลิตภัณฑ์ห่างพอสมควร จะวางติดกันหรือซ้อนกันเหมือนเตาเผาดิบไม่ได้ เพราะขณะทำการเผาน้ำเคลือบละลายไหลเยิ้มลงยังก้นผลิตภัณฑ์ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เผาเคลือบติดกัน (ข้อควรระวัง ก่อนนำผลิตภัณฑ์เข้าเตาต้องทำความสะอาดในเตาก่อนทุกครั้ง เพื่อป้องกันเศษผงต่างๆ หล่นมาติดผลิตภัณฑ์ขณะเผาเคลือบซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหาย) ในกระบวนการนี้จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 1,100-1,300 °C ซึ่งใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น

ประมาณ 6 ชั่วโมงหรือนานกว่านั้น ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ชนิดนั้นต้องการความแข็งแรงแค่ไหน โดยที่อุณหภูมิสุดท้ายของกระบวนการเผาเคลือบและบรรยากาศในการเผาจะขึ้นอยู่กับสภาวะที่ต้องการ

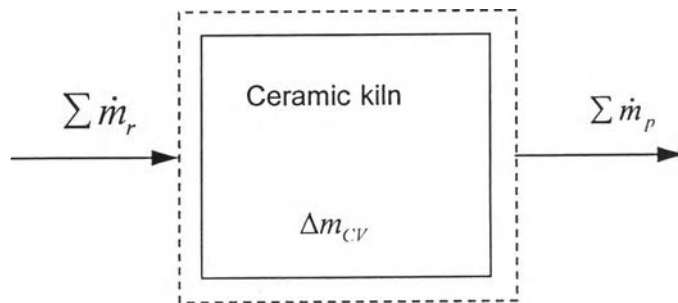


รูปที่ 5 กราฟอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิคในระหว่างการเผาและ การเย็นตัว  
ในกระบวนการเผาดิบ



รูปที่ 6 กราฟอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกในระหว่างการเผาและการเย็นตัว  
ในกระบวนการเผาเคลือบ

3.3 สมการสมดุลมวล



รูปที่ 7 สมดุลมวลในเตาเผาเซรามิก

$$\sum \dot{m}_p - \sum \dot{m}_r = \Delta m_{CV} \quad (3-1)$$

เมื่อ  $\sum \dot{m}_r$  คือ อัตราการไหลมวลทั้งหมดเข้าสู่ปริมาตรควบคุม  
 $\sum \dot{m}_p$  คือ อัตราการไหลมวลทั้งหมดที่ออกจากปริมาตรควบคุม  
 $\Delta m_{CV}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลในปริมาตรควบคุม

จากการวิเคราะห์กระบวนการทำงานต่างๆในเตาเผาเซรามิคด้วยสมการสมดุลมวลจะทำให้ได้ส่วนประกอบต่างๆของมวลที่ผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุมและปริมาณมวลที่เปลี่ยนแปลงดังรายละเอียดต่อไปนี้

$\sum \dot{m}_r$  จะประกอบไปด้วย

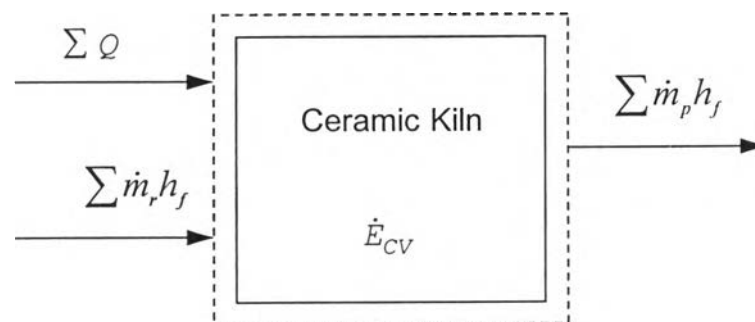
- อัตราการไหลของมวลก๊าซหุงต้มที่เข้าสู่เตาเผาเซรามิค
- อัตราการไหลของมวลอากาศที่เข้าสู่เตาเผาเซรามิค

$\sum \dot{m}_p$  จะประกอบไปด้วย

- อัตราการไหลของมวลก๊าซเสียที่ออกจากเตาเผาเซรามิค

$\Delta m_{CV}$  คือ ความแตกต่างของมวลผลิตภัณฑ์ที่ก่อนการเผาและหลังจากการเผา

### 3.4 สมการสมดุลพลังงาน



รูปที่ 8 สมดุลพลังงานในเตาเผาเซรามิค

### 3.5 รูปแบบของพลังงาน

ดังที่แสดงให้เห็นในหัวข้อ 3.4 รูปแบบของพลังงานมีหลายลักษณะซึ่งในแต่ละรูปแบบสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

#### 3.5.1 อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของพื้นและผนังเตาโดยการพาความร้อน

$$Q_{conv} = A_s \times h_c \times (T_s - T_a) \quad (3-3)$$

เมื่อ  $Q_{conv}$  คือ อัตราถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน ( $W$ )

$A_s$  คือ พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )

$h$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน

$$\left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

$T_s$  คือ อุณหภูมิที่พื้นผิว ( $^{\circ}C$ )

$T_a$  คือ อุณหภูมิบรรยากาศ ( $^{\circ}C$ )

#### 3.5.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของพื้นและผนังเตาโดยการแผ่รังสีความร้อน

$$Q_{rad} = A_s \times h_r \times (T_s - T_a) \quad (3-4)$$

เมื่อ  $Q_{rad}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน ( $W$ )

$A_s$  คือ พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )

$h_r$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน

$$\left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

$T_s$  คือ อุณหภูมิที่พื้นผิว ( $^{\circ}C$ )

$T_a$  คือ อุณหภูมิบรรยากาศ ( $^{\circ}C$ )

### 3.5.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านก๊าซเสียและไอน้ำทางปล่องไฟ

ในก๊าซเสียที่ปล่อยออกทางปล่องจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 4 อย่าง คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์( $\text{CO}_2$ ) ก๊าซไนโตรเจน( $\text{N}_2$ ) ไอน้ำ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ก๊าซออกซิเจน( $\text{O}_2$ )และ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์( $\text{CO}$ ) ซึ่งสามารถเขียนสมการพลังงานได้ดังนี้

$$Q_{fg,i} = \dot{m}_{fg,i} \times \left( h_f(T_j)_{fg,i} - h_f(T_{ref})_{fg,i} \right) \times \Delta t \quad (3-5)$$

- เมื่อ  $Q_{fg,i}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ก๊าซเสียชนิดที่  $i$  ภา  
ออกไปทางปล่องไฟ( $W$ )
- $\dot{m}_{fg,i}$  คือ อัตราการไหลของมวลก๊าซเสียชนิดที่  $i$  ผ่านทาง  
ปล่องไฟ( $\frac{kg}{min}$ )
- $h_f(T_j)_{fg,i}$  คือ เอนทาลปีของก๊าซเสียชนิดที่  $i$  ที่อุณหภูมิก๊าซเสีย ณ  
เวลา  $j$  ใดๆ( $\frac{kJ}{kg}$ )
- $h_f(T_{ref})_{fg,i}$  คือ เอนทาลปีของก๊าซเสียชนิดที่  $i$  ที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$

### 3.5.4 อัตราการเพิ่มพลังงานสะสมที่อยู่ในเปลือกเตา พื้นเตา เฟอร์นิเจอร์ และผลิตภัณฑ์

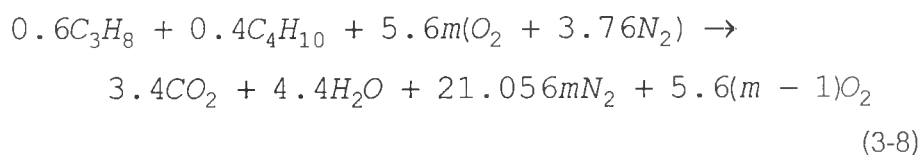
$$\dot{E}_{st,i} = m_i \times C_{p,i} \times (T_{i,j} - T_{i,j-1}) \quad (3-7)$$

- เมื่อ  $\dot{E}_{st,i}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานสะสมในวัสดุชนิดที่  $i$  ใน  
ปริมาตรควบคุม( $W$ )
- $m_i$  คือ ปริมาณมวลของวัสดุชนิดที่  $i$  ( $kg$ )
- $C_{p,i}$  คือ ค่าความจุความร้อนของวัสดุชนิดที่  $i$  ( $\frac{kJ}{kg \cdot K}$ )
- $T_{i,j}$  คือ อุณหภูมิของวัสดุ  $i$  ณ.เวลา  $j$  ใดๆ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_{i,j-1}$  คือ อุณหภูมิของวัสดุ  $i$  ณ.เวลา  $j-1$  ใดๆ( $^\circ\text{C}$ )

### 3.6 กระบวนการเผาไหม้ในเตาเผาเซรามิค

กระบวนการให้ความร้อนกับเซรามิคในปัจจุบันนั้น ส่วนมากนิยมใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง ในก๊าซหุงต้ม ประกอบไปด้วยก๊าซบิวเทน ( $C_3H_8$ ) และ โพรเพน ( $C_4H_{10}$ ) ซึ่งอัตราส่วนผสมจะเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพราคาของก๊าซชนิดต่างๆในตลาดโลก แต่ที่นิยมใช้กันทั่วไปและนำมาใช้ในการคำนวณคือ ในก๊าซหุงต้ม 1 ปริมาตรจะมีก๊าซบิวเทน ( $C_3H_8$ ) 40 % โดยปริมาตร และก๊าซโพรเพน ( $C_4H_{10}$ ) 60%โดยปริมาตร

#### 3.6.1 สมดุลเคมี



เมื่อ  $m$  เป็นอัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศที่ใช้ตามทฤษฎี

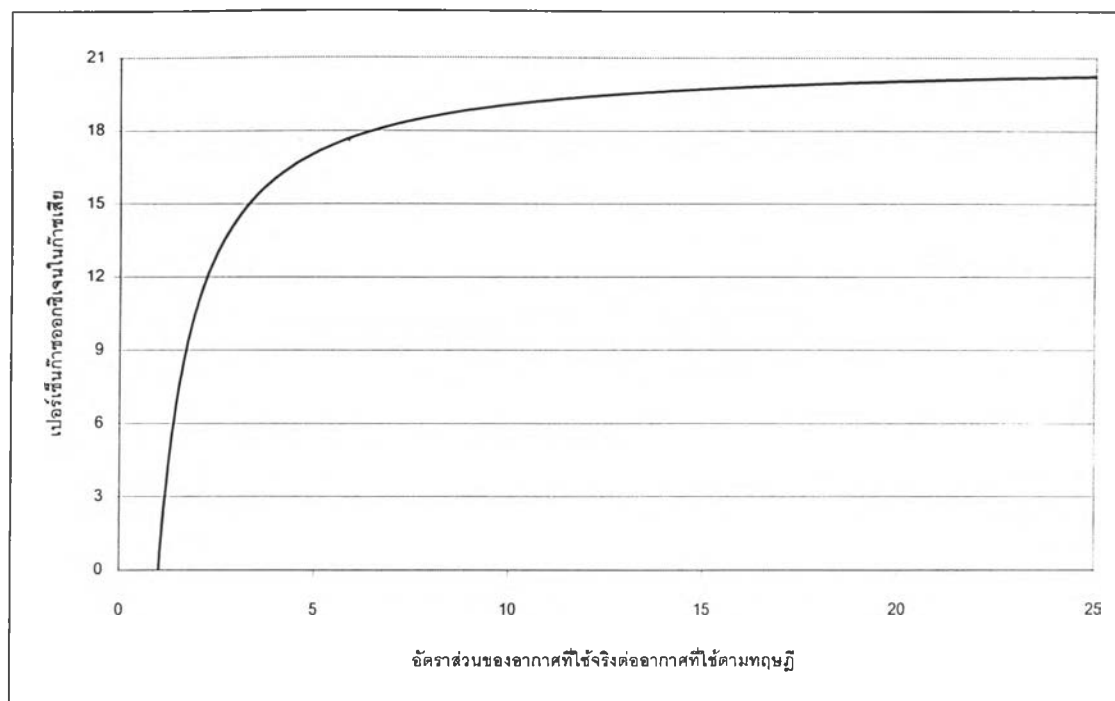
#### 3.6.2 อัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศที่ใช้ตามทฤษฎี

เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้กับปริมาณอากาศที่ใช้ตามทฤษฎีในการเผาไหม้

คำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้

$$m = \frac{\left(5.6 - 2.2 \times \frac{\%O_2}{100}\right)}{\left(5.6 - 26.656 \times \frac{\%O_2}{100}\right)} \quad (3-9)$$

โดยที่ค่า  $\%O_2$  มาจากการตรวจวัด



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศที่ใช้ตามทฤษฎี กับเปอร์เซ็นต์ก๊าซออกซิเจนในก๊าซเสีย

### 3.7 การถดถอยแบบกำลังสองน้อยที่สุด

ข้อมูลต่างๆทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์เป็นจำนวนมากล้วนได้มาจากการทดลอง เนื่องจากการทดลองแต่ละครั้งจะเกิดความไม่แน่นอน ดังนั้นข้อมูลที่ได้ต้องนำมาหาค่าเฉลี่ยและกลั่นกรองก่อนนำผลลัพธ์ไปใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อไป กระบวนการในการกลั่นกรองข้อมูลต่างๆดังกล่าวอย่างเป็นขั้นเป็นตอนที่ก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่สามารถใช้เป็นมาตรฐานสำหรับข้อมูลชุดนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกระเบียบวิธีการถดถอยแบบน้อยที่สุด เพื่อใช้ในการสร้างเส้นตรงหรือเส้นโค้งที่เป็นมาตรฐานสำหรับข้อมูลที่ทำกรทดลองมาได้



### 3.7.1 การถดถอยแบบเชิงเส้น (linear regression)

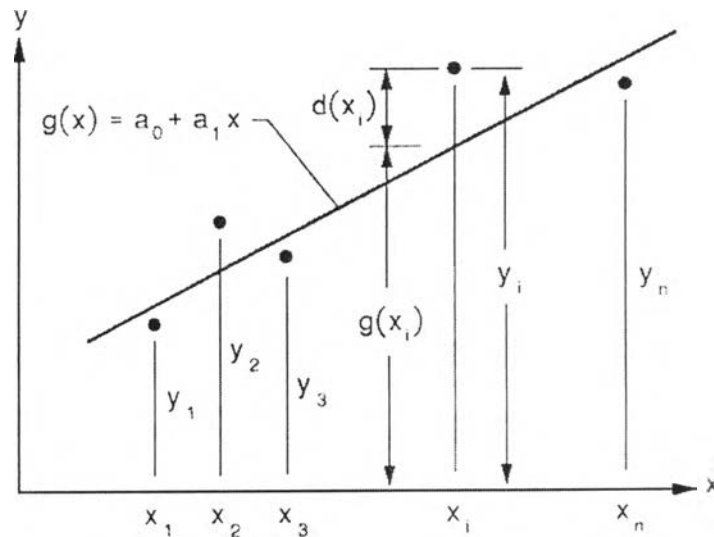
เป็นระเบียบวิธีที่ง่ายที่สุดที่ใช้ในการสร้างฟังก์ชันเส้นตรงสำหรับชุดข้อมูลที่กำหนดให้มาดังในรูปที่ 10 ซึ่งแสดงชุดข้อมูลที่ประกอบด้วย  $x_i, y_i, i=1,2,3,\dots,n$  นั่นคือมีข้อมูล  $n$  ข้อมูล ในที่นี้เราจะสร้างสมการเส้นตรงในรูปแบบของฟังก์ชัน

$$g(x) = a_0 + a_1x \quad (3-9)$$

โดยที่  $a_0$  และ  $a_1$  เป็นค่าคงที่และจำเป็นต้องสร้างจากเงื่อนไขที่ว่า สมการเส้นตรงที่สร้างขึ้น จะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยน้อยที่สุดจากทุกข้อมูลที่กำหนดให้มา

จากรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่า ตำแหน่ง  $x_i$  ของข้อมูลชุดที่  $i$  ใดๆ ค่าของ  $g(x)$  ที่เราสร้างขึ้นจะมีค่าแตกต่างออกไปเมื่อเทียบกับค่าของข้อมูล  $y_i$  เท่ากับ  $d(x_i)$  ที่ตำแหน่งนั้น ดังนั้น ค่าความผิดพลาด  $E$  ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากข้อมูลทั้งหมด  $n$  จำนวนจะเขียนได้ในรูปแบบดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^n [d(x_i)]^2 \quad (3-10)$$



รูปที่ 10 การถดถอยแบบเชิงเส้นโดยการสร้างฟังก์ชันเส้นตรงจากชุดข้อมูลที่กำหนดให้มา

ในสมการ(3-10) จะสังเกตเราทำการยกกำลังสองของ  $d(x_i)$  เพื่อที่จะกำจัดค่าที่อาจจะมีเครื่องหมายเป็นลบออกไป ดังนั้นสมการที่ (3-10) ให้ความหมายของค่าผิดพลาดทั้งหมด จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - g(x_i)]^2 \quad (3-11)$$

แทนสมการที่ (3-9) ที่  $x=x_i$  ลงในสมการ (3-11) จะได้

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i)]^2 \quad (3-12)$$

จากสมการ (3-12) นี้เราสามารถคำนวณหาตัวไม่รู้ค่า  $a_0$  และ  $a_1$  ที่ต้องการได้โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-squares) ซึ่งทำจากการหาค่าต่ำที่สุด (minimization) ของค่าความผิดพลาดโดยเกี่ยวข้องกับตัวไม่รู้ค่า นั่นคือ

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = 0 \quad (3-13 ก)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = 0 \quad (3-13 ข)$$

และจากเงื่อนไขในสมการ (3-13 ก) และ (3-13 ข) จะได้ผลดังนี้

$$n \cdot a_0 + \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot a_1 = \sum_{i=1}^n y_i \quad (3-14 ก)$$

$$\left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot a_0 + \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) \cdot a_1 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (3-14 ข)$$

ทั้งสองสมการสามารถเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{Bmatrix} \quad (3-15)$$

ดังนี้

ซึ่งสมการ (3-15) เราสามารถใช้กฎของคราเมอร์แก้สมการหาค่า  $a_0$  และ  $a_1$  ได้

$$a_0 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)}{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \quad (3-16 \text{ ก})$$

$$a_1 = \frac{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \quad (3-16 \text{ ข})$$

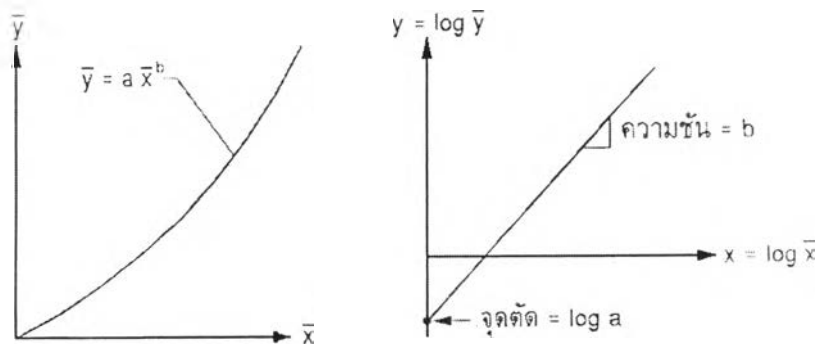
ค่าคงตัว  $a_0$  และ  $a_1$  ที่คำนวณได้นี้ เมื่อแทนกลับลงในสมการ (3-9) ก็จะได้สมการเส้นตรงที่แสดงการถดถอยแบบเชิงเส้นที่ต้องการ

### 3.7.2 การประยุกต์การถดถอยแบบเชิงเส้นกับข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้น

สำหรับปัญหาในทางปฏิบัติส่วนใหญ่จะพบว่า ลักษณะการกระจายข้อมูลมักจะไม่อยู่ในรูปแบบของเชิงเส้นดังที่แสดงในรูปที่ 10 การกระจายอาจจะเบี่ยงเบนไปมาในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ซึ่งควรจะใช้สมการในรูปแบบของฟังก์ชันพหุนาม (polynomial function) จะให้ผลลัพธ์ที่เที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น ซึ่งเราจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป แต่ในหัวข้อนี้เราจะศึกษาการประยุกต์ใช้การถดถอยแบบเชิงเส้นกับข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้นก่อน

#### 1) รูปแบบของสมการกำลัง (power equation)

$$\bar{y} = a\bar{x}^b \quad (3-17)$$



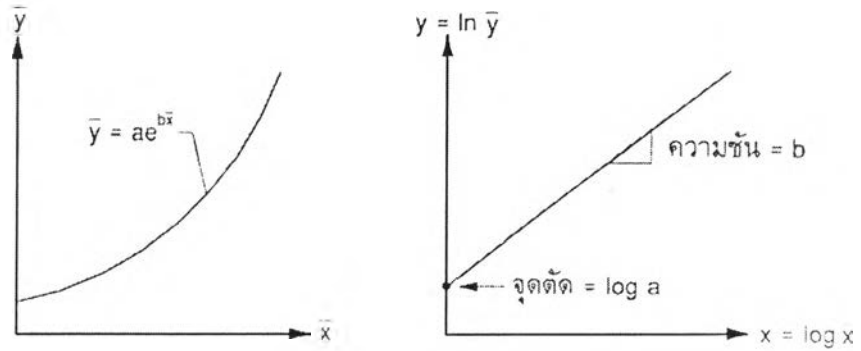
(ก) สมการกำลัง

(ข) สมการเชิงเส้น

รูปที่ 11 การแปลงสมการกำลังไปสู่สมการเชิงเส้นโดยลอการิทึม เพื่อใช้วิธีถดถอยแบบเชิงเส้น

2) รูปแบบของสมการเอกซ์โปเนนเชียล (exponential model)

$$\bar{y} = a \cdot e^{b\bar{x}} \tag{3-18}$$



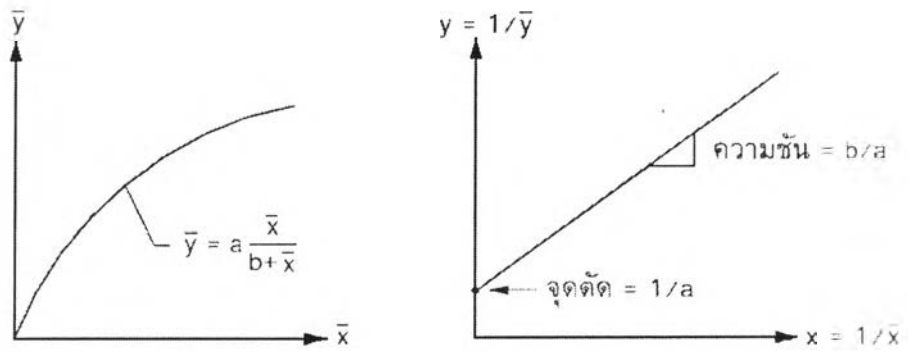
(ก) สมการเอกซ์โปเนนเชียล

(ข) สมการเชิงเส้น

รูปที่ 12 การแปลงสมการเอกซ์โปเนนเชียลไปสู่สมการเชิงเส้นโดยใช้ลอการิทึม  
เพื่อใช้วิธีถดถอยแบบเชิงเส้น

3) รูปแบบของสมการอัตราเพิ่มสูงสุดสูงสุด (saturation-growth-rate equation)

$$\bar{y} = a \cdot \frac{\bar{x}}{b + \bar{x}} \tag{3-19}$$



(ก) สมการอัตราการเพิ่มสูงสุดอิมิตัว

(ข) สมการเชิงเส้น

รูปที่ 13 การแปลงสมการอัตราการเพิ่มสูงสุดอิมิตัวไปสู่สมการเชิงเส้น  
เพื่อใช้วิธีถดถอยแบบเชิงเส้น

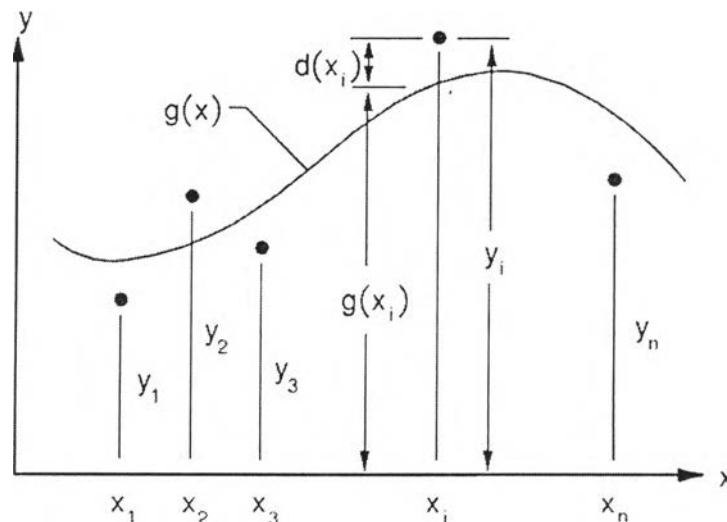
### 3.7.3 การถดถอยแบบพหุนาม (polynomial regression)

เป็นระเบียบวิธีที่ใช้ประติษฐานฟังก์ชันพหุนามสำหรับข้อมูลที่มีการกระจายโดยทั่วไปไม่อยู่ในรูปแบบของเชิงเส้นหรือสมการกำลัง กระบวนการในการสร้างฟังก์ชันพหุนามโดยระเบียบวิธีการถดถอยแบบพหุนามมีขั้นตอนเช่นเดียวกันกับที่ใช้ในระเบียบวิธีการถดถอยแบบเชิงเส้น ดังที่เห็นในรูปที่ 14 ซึ่งแสดงการใช้ฟังก์ชันพหุนามในรูปแบบทั่วไปกับชุดข้อมูลที่ไม่อยู่ในรูปแบบของเชิงเส้นชุดหนึ่งที่กำหนดมาให้

ชุดข้อมูลที่ประกอบด้วย  $x_i, y_i, i=1,2,3,\dots,n$  นั่นคือมีข้อมูล  $n$  ข้อมูล ในที่นี้เราจะสร้างสมการพหุนามอันดับ  $m$  สำหรับข้อมูลชุดนี้

$$g(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_m \cdot x^m \quad (3-20)$$

โดยที่  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$  เป็นค่าคงตัวที่ไม่รู้ค่าซึ่งคำนวณจากเงื่อนไขที่ สมการพหุนามที่สร้างขึ้นจะก่อให้เกิดค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยน้อยที่สุดจากข้อมูลที่กำหนดมาให้ ขั้นตอนในการสร้างสมการพหุนามจะเกือบจะคล้ายคลึงกับการสร้างเชิงเส้น เพียงแต่การสร้างสมการพหุนามจะเกี่ยวข้องที่ตัวแปรไม่รู้จำนวนมากกว่า ดังนั้นเมื่อทำตามขั้นตอนในสมการที่ (3-11)-(3-13) ก็จะได้รูปแบบของระบบสมการที่ประกอบด้วย  $m+1$  สมการย่อยได้ดังที่เห็นในสมการที่ (3-21) ซึ่งสามารถหาค่าตัวไม่รู้ค่า  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$  ทั้งหมดได้โดยใช้ระเบียบวิธีการแก้สมการแบบใดแบบหนึ่ง



รูปที่ 14 สมการการถดถอยพหุนามโดยการประติษฐานฟังก์ชันพหุนามจากชุดข้อมูลที่กำหนดมาให้

$$\begin{bmatrix}
 n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^m \\
 \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} \\
 \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \sum_{i=1}^n x_i^m & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{2m}
 \end{bmatrix}
 \begin{Bmatrix}
 a_0 \\
 a_1 \\
 a_2 \\
 \vdots \\
 a_m
 \end{Bmatrix}
 =
 \begin{Bmatrix}
 \sum_{i=1}^n Y_i \\
 \sum_{i=1}^n x_i Y_i \\
 \sum_{i=1}^n x_i^2 Y_i \\
 \vdots \\
 \sum_{i=1}^n x_i^m Y_i
 \end{Bmatrix}
 \quad (3-21)$$

### 3.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการหาการใช้พลังงานและการกระจายของพลังงานในส่วนต่างๆของเตาเผาเซรามิคที่ใช้เซรามิคไฟเบอร์เป็นฉนวนกันความร้อน

#### 3.8.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมวลและพลังงาน

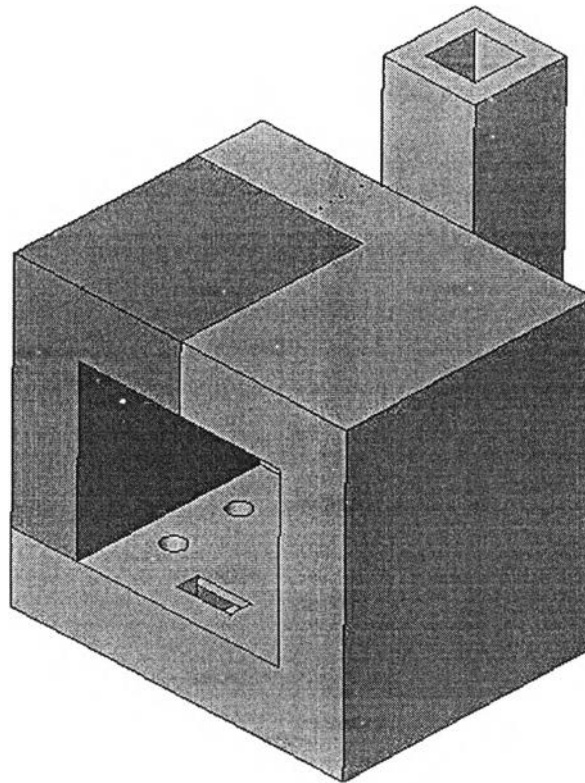
เป็นแบบจำลองที่กำหนดขึ้นมาเพื่อใช้ในการหาการมวลและพลังงานที่กระจายอยู่ในส่วนต่างๆในกระบวนการเผาในเตาเผาเซรามิค โดยมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

- 1) อุณหภูมิก๊าซเสียขึ้นอยู่กัเวลา .
- 2) ส่วนประกอบของก๊าซเสียขึ้นอยู่กัอัตราการไหลของก๊าซหุงต้มเท่านั้น
- 3) คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิคของก๊าซเสียขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ
- 4) ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กัความดันก๊าซหุงต้มและเวลา
- 5) ค่าอุณหภูมิกะเปาะเปียกและกะเปาะแห้งคงที่ตลอดกระบวนการเผา
- 6) ไม่คำนึงถึงพลังงานที่สะสมในโครงสร้างรองรับเตาเผา
- 7) พลังงานที่สะสมในผลิตภัณฑ์คิดจากมวลผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเตาเผาเซรามิค
- 8) ไม่คำนึงถึงพลังงานที่สูญเสียไปพร้อมกัมวลผลิตภัณฑ์ที่สูญหายระหว่างกระบวนการเผาในเตาเผาเซรามิค
- 9) อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิคสม่ำเสมอทุกจุด

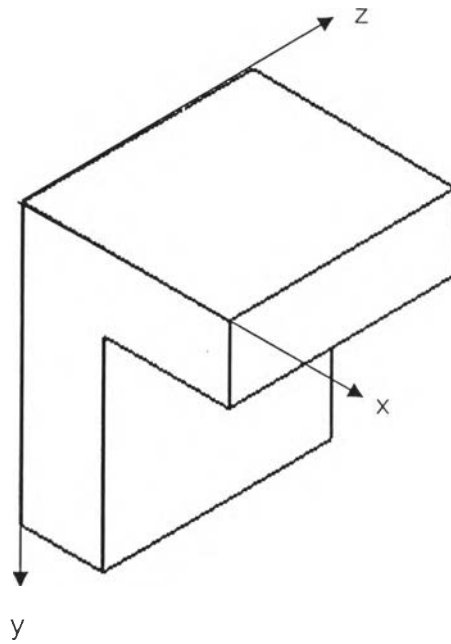
### 3.8.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในผนังด้านข้างและด้านบน

เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กำหนดขึ้นเพื่อหาพลังงานที่สะสมอยู่ในผนังด้านข้างและด้านบน โดยมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

- 1) ไม่มีการถ่ายเทความร้อนในแนวลึก(แกน z)
- 2) อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิคสม่ำเสมอทุกจุด ในช่วงเวลา t ใดๆ
- 3) ให้เตาเผามีลักษณะสมมาตรในแนวตั้ง
- 4) ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นเตากับผนังด้านข้าง

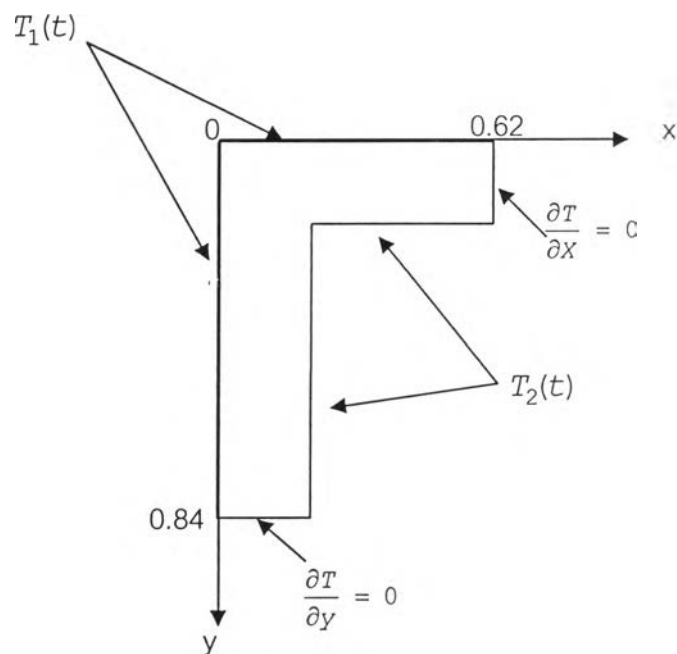


รูปที่ 15 ลักษณะปริมาตรควบคุมของอุณหภูมิในผนังด้านบนและด้านข้าง



รูปที่ 16 ปริมาตรควบคุมของอุณหภูมิในผนังด้านบนและด้านข้างแบบ 3 มิติ

จากสมมติฐานดังกล่าวสามารถนำมาเขียนปริมาตรควบคุมได้ดังนี้



รูปที่ 17 ปริมาตรควบคุมของอุณหภูมิในผนังด้านข้างและด้านบน



สมการเชิงอนุพันธ์ของอุณหภูมิในผนังด้านข้างและด้านบนเขียนได้เป็น

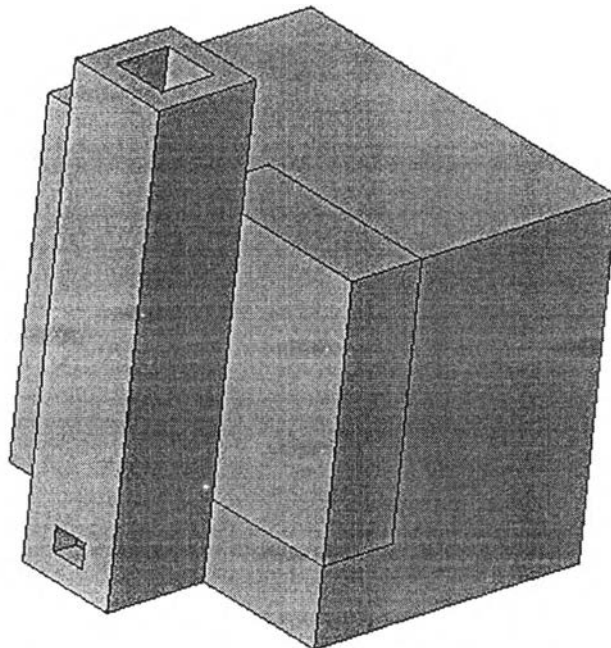
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3-22)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

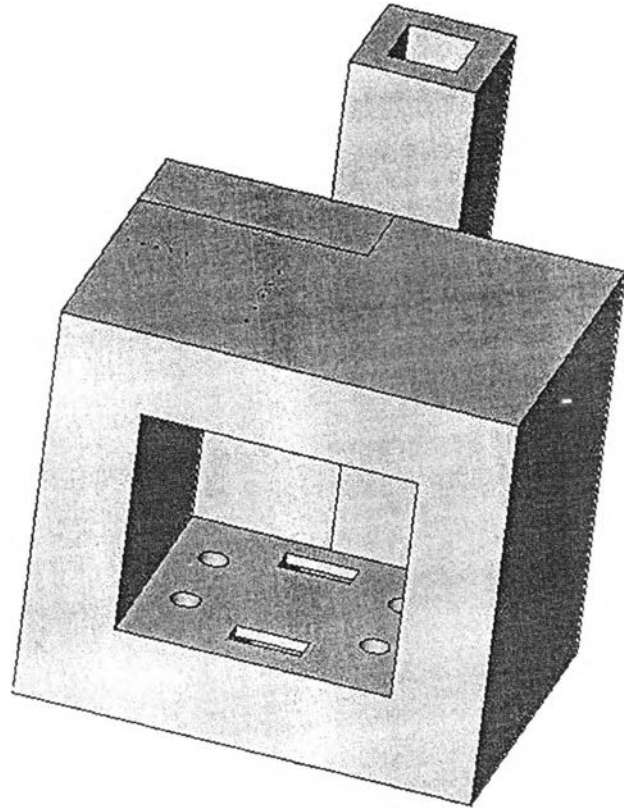
- 1)  $(T(0, y, t) = T_1(t), 0 \leq y \leq 0.84)$
- 2)  $(T(0.23, y, t) = T_2(t), 0.23 \leq y \leq 0.84)$
- 3)  $(\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \Big|_{x=0.62} = 0, 0 \leq y < 0.23)$
- 4)  $(T(x, 0, t) = T_1(t), 0 < x \leq 0.62)$
- 5)  $T(x, 0.23, t) = T_2(t), 0.23 \leq x \leq 0.62$
- 6)  $(\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \Big|_{y=0.84} = 0, 0 < x < 0.23)$

### 3.8.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในผนังด้านหลัง

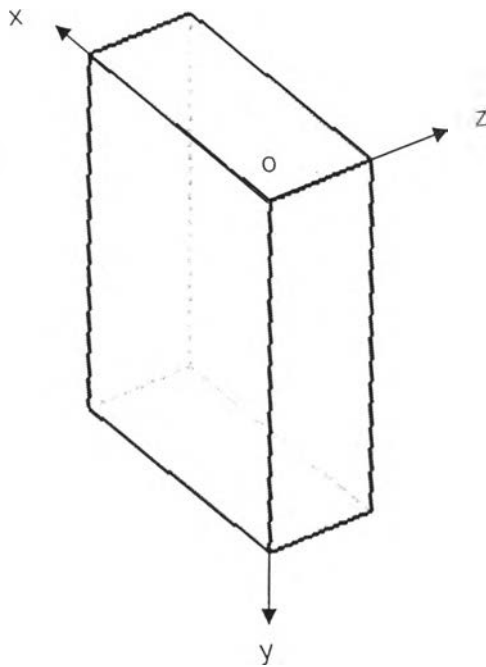
เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กำหนดขึ้นเพื่อพลังงานที่สะสมอยู่ในผนังด้านหลัง เมื่อมองจากลักษณะของปริมาตรควบคุมด้านหลัง สามารถตั้งสมมติฐานได้ 2 แบบ



รูปที่ 18 ลักษณะของปริมาตรควบคุมของอุณหภูมิในผนังด้านหลัง (มุมมองด้านหลัง-บน)



รูปที่ 19 ลักษณะของปริมาตรควบคุมของอุณหภูมิในผนังด้านหลัง(มุมมองด้านหน้า-บน)

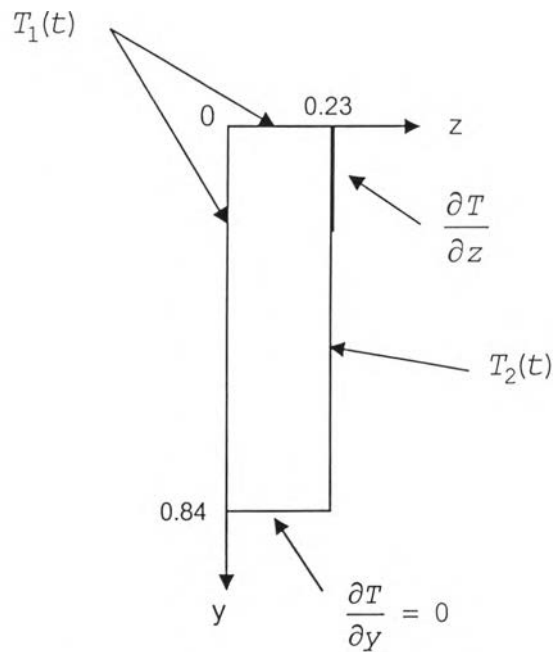


รูปที่ 20 ปริมาตรควบคุมของอุณหภูมิในผนังด้านหลังแบบ 3 มิติ

ปริมาณควบคุมแบบแรกมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

- 1) ไม่มีการถ่ายเทความร้อนในแนวกว้าง(แกน x)
- 2) อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิคสม่ำเสมอทุกจุด ในช่วงเวลา t ใดๆ
- 3) ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นเตากับผนังด้านหลัง

จากสมมติฐานดังกล่าวสามารถนำมาเขียนปริมาณควบคุมได้ดังนี้



รูปที่ 21 ปริมาณควบคุมของอุณหภูมิในผนังด้านหลังแบบแรก

สมการเชิงอนุพันธ์ของอุณหภูมิในผนังด้านหลังเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.-23)$$

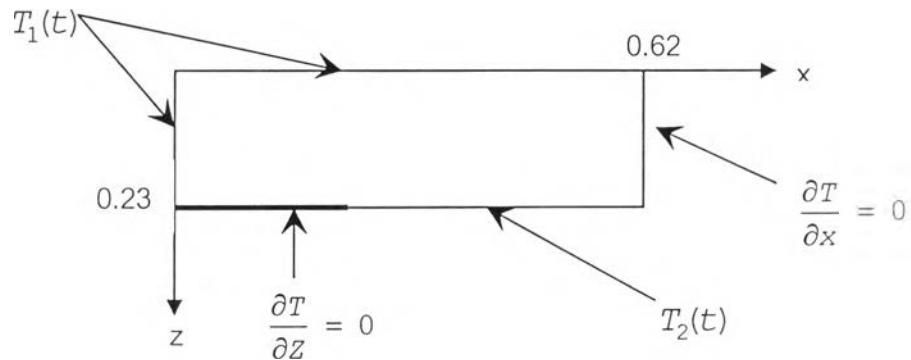
โดยมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

- 1)  $(T(0, z, t) = T_1(t), 0 \leq z \leq 0.23)$
- 2)  $\left( \frac{\partial T(y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=0.62} = 0, 0 < z < 0.23 \right)$
- 3)  $(T(y, 0, t) = T_1(t), 0 < y \leq 0.62)$
- 4)  $\left( \frac{\partial T(y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0.23} = 0, 0 < y < 0.23 \right)$
- 5)  $(T(y, 0.23, t) = T_2(t), 0.23 \leq y \leq 0.62)$

ปริมาณควบคุมแบบที่สองมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

- 1) ไม่มีการถ่ายเทความร้อนในแนวตั้ง (แกน  $y$ )
- 2) อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิคสม่ำเสมอทุกจุด ในช่วงเวลา  $t$  ใดๆ
- 3) ให้เตาเผาที่มีลักษณะสมมาตรในแนวตั้ง

จากสมมติฐานดังกล่าวสามารถนำมาเขียนปริมาณควบคุมได้ดังนี้



รูปที่ 22 ปริมาณควบคุมของอุณหภูมิในผนังด้านหลังแบบที่สอง

สมการเชิงอนุพันธ์ของอุณหภูมิที่สะสมในผนังด้านหลังเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3-24)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

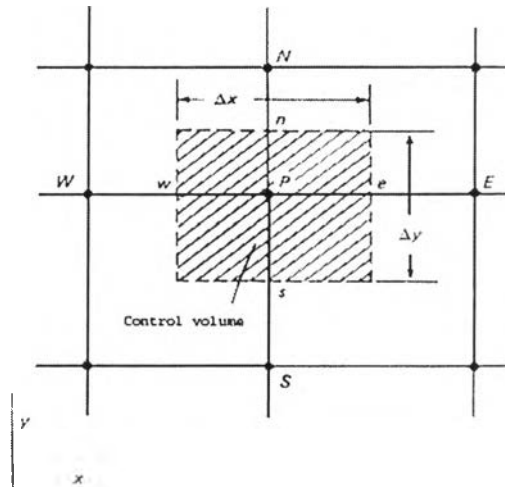
- 1)  $(T(x, 0, t) = T_1(t), 0 \leq x \leq 0.62)$
- 2)  $(\frac{\partial T(x, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0.23} = 0, 0 < x < 0.23)$
- 3)  $(T(x, 0.23, t) = T_2(t), 0.23 \leq x \leq 0.62)$
- 4)  $(T(0, z, t) = T_1(t), 0.00 < z \leq 0.23)$
- 5)  $(\frac{\partial T(x, z, t)}{\partial x} \Big|_{x=0.23} = 0, 0 < z < 0.23)$

### 3.9 ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์(Finite Difference Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ที่จะใช้ในการหาการกระจายของอุณหภูมิของผนังคือระเบียบวิธีที่มีการนำสมการ control-volume discretization ช่วยในการแก้ไขปัญหา

#### 3.9.1 สมการ Discretization ทั่วไป สำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบ 2 มิติในสถานะไม่คงที่

ในรูปที่ 23 อนุกรมของจุดในลักษณะ 2 มิติ สำหรับอนุกรมของจุด P จุด E และ W คือจุดข้างเคียงในแนวนอน (x-direction) เมื่อจุด N และ S คือจุดข้างเคียงในแนวตั้ง (y-direction) เส้นประรอบจุด P แสดงให้เห็นถึงขอบเขตของปริมาตรควบคุม ความหนาของปริมาตรควบคุมให้สมมติเป็น 1



รูปที่ 23 ปริมาตรควบคุมสำหรับการนำความร้อน 2 มิติสำหรับสถานะไม่คงที่

สมการการนำความร้อนใน 2 มิติบนระนาบ x-y เขียนได้เป็น

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3-24)$$

เมื่อเวลาเป็น one-way coordinate เราสามารถหาของค่าอุณหภูมิที่เวลาถัดไปได้จากค่าของอุณหภูมิที่เวลาเริ่มต้น(initial temperature) กล่าวคือเมื่อให้ค่าของอุณหภูมิที่เวลา  $t$  และต้องการค่าของอุณหภูมิที่เวลา  $t + \Delta t$  ค่าอุณหภูมิเก่า(ค่าที่ให้มา) ของอนุกรมจุด จะถูกแทนด้วยสัญลักษณ์  $T_P^0, T_E^0, T_W^0, T_N^0, T_S^0$  และค่าอุณหภูมิใหม่(ไม่ทราบค่า)ของอนุกรมจุดที่เวลา  $t + \Delta t$  จะถูกแทนด้วยสัญลักษณ์  $T_P^1, T_E^1, T_W^1, T_N^1, T_S^1$

ทำการอินทิเกรตเทียบกับปริมาตรควบคุมที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 23 และอินทิเกรตเทียบกับเวลาในช่วง  $t$  ถึง  $t + \Delta t$  จะได้เป็น

$$\int_n^s \int_e^w \int_t^{t+\Delta t} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dt dx dy = \int_t^{t+\Delta t} \int_n^s \int_e^w \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_e^w \int_n^s \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy dx dt \quad (3-25)$$

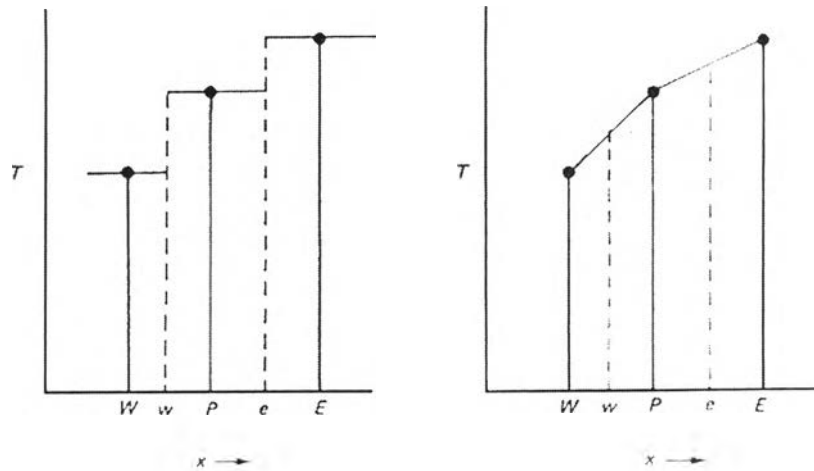
ในส่วนของเทอม  $\frac{\partial T}{\partial t}$  เราสมมติว่าให้ค่าอุณหภูมิ( $T$ ) มีผลต่อปริมาตรควบคุมทั้งหมดในจุดนั้น จะได้เป็น

$$\int_n^s \int_e^w \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dt = \rho c \Delta x \Delta y (T_p^1 - T_p^0) \quad (3-26)$$

เทอม  $\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$  บนปริมาตรควบคุมเขียนได้เป็น

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_n^s \int_e^w \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt = \int_t^{t+\Delta t} \Delta y \cdot \left[ \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] dt \quad (3-27)$$

ก่อนที่จะดำเนินการต่อไป เราต้องทำการตั้งสมมติฐานเพื่อใช้ในการหาค่า  $\frac{\partial T}{\partial x}$  สมมติฐานอย่างง่าย 2 แบบ ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 24 สมมติฐานอย่างง่ายที่สุดคือให้ค่าของอุณหภูมิของแต่ละจุดในอนุกรมจุดสม่ำเสมอในปริมาตรควบคุม ซึ่งเป็นสมมติฐานแบบ stepwise ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 24(ก) สมมติฐานนี้จะใช้ไม่ได้เมื่อต้องการหาค่า  $\frac{\partial T}{\partial x}$  ที่หน้าสัมผัสของปริมาตรควบคุม สมมติฐานที่สามารถใช้ได้ดีในที่นี้คือ piecewise-linear ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 24(ข) โดยที่มีการใช้การประมาณค่าแบบเส้นตรงระหว่างจุดสองจุดในอนุกรมจุดเพื่อใช้ในการหาค่า  $\frac{\partial T}{\partial x}$  ที่หน้าสัมผัสของปริมาตรควบคุม



(ก) Stepwise profile

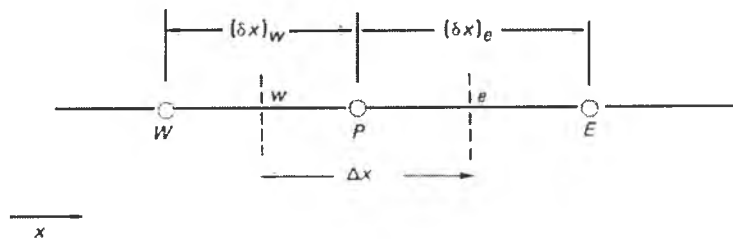
(ข) Piecewise-linear profile

รูปที่ 24 สมมติฐานอย่างง่าย 2 รูปแบบ

เมื่อเราทราบประมาณค่า  $\frac{\partial T}{\partial x}$  ในสมการที่ (3-28) จาก piecewise-linear จะเขียนได้เป็น

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_n^s \int_e^w \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt = \int_t^{t+\Delta t} \Delta y \left( \frac{k_e(T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w(T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right) dt \tag{3-28}$$

เมื่อ  $(\delta x)_e$  เป็นระยะระหว่างจุด E กับ จุด P และ  $(\delta x)_w$  เป็นระยะทางระหว่างจุด W และ จุด P ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 25



รูปที่ 25 อนุกรมของจุดในแนวนอน(แกน x)

เทอม  $\frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right)$  บนปริมาตรควบคุมเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} & \int_t^{t+\Delta t} \int_e^w \int_n^s \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy dx dt \\ &= \int_t^{t+\Delta t} \Delta x \cdot \left[ \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_s - \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_n \right] dt \\ &= \int_t^{t+\Delta t} \Delta x \left( \frac{k_s(T_s - T_P)}{(\delta y)_s} - \frac{k_n(T_P - T_N)}{(\delta y)_n} \right) dt \end{aligned} \quad (3-29)$$

แทนสมการ (3-26) สมการ (3-27) และสมการ (3-29) ในสมการ (3-25) จะได้

$$\begin{aligned} \rho c \Delta x \Delta y (T_P^1 - T_P^0) &= \int_t^{t+\Delta t} \left[ \Delta y \left( \frac{k_e(T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w(T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right) + \right. \\ & \quad \left. \Delta x \left( \frac{k_s(T_s - T_P)}{(\delta y)_s} - \frac{k_n(T_P - T_N)}{(\delta y)_n} \right) \right] dt \end{aligned} \quad (3-30)$$

ในตอนนี้อาจต้องการประมาณค่า  $T_P$ ,  $T_E$ ,  $T_W$ ,  $T_N$ , และ  $T_S$  ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาตั้งแต่  $t$  ถึง  $t + \Delta t$  ซึ่งมีหลายสมมติฐานและบางส่วนในนั้นเขียนได้เป็น

$$\int_t^{t+\Delta t} T_P dt = [f T_P^1 + (1 - f) T_P^0] \Delta t \quad (3-31)$$

เมื่อ  $f$  เป็นน้ำหนักส่วนประกอบ มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งคล้ายกับการอินทิเกรต  $T_P$ ,  $T_E$ ,  $T_W$ ,  $T_N$ , และ  $T_S$  และเราทำการประยุกต์กับสมการ (3-30) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\rho c \Delta x \Delta y}{\Delta t} (T_P^1 - T_P^0) &= f \left[ \Delta y \left( \frac{k_e(T_E^1 - T_P^1)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w(T_P^1 - T_W^1)}{(\delta x)_w} \right) + \right. \\ & \quad \left. \Delta x \left( \frac{k_s(T_s^1 - T_P^1)}{(\delta y)_s} - \frac{k_n(T_P^1 - T_N^1)}{(\delta y)_n} \right) \right] + \\ & (1 - f) \left[ \Delta y \left( \frac{k_e(T_E^0 - T_P^0)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w(T_P^0 - T_W^0)}{(\delta x)_w} \right) + \right. \end{aligned}$$



$$\Delta x \left( \frac{k_s(T_S^0 - T_P^0)}{(\delta y)_s} - \frac{k_n(T_P^0 - T_N^0)}{(\delta y)_n} \right) \quad (3-32)$$

ทำการจัดเรียงสมการ(3-32) ใหม่โดยไม่ต้องเขียนตัวยก 1 แต่  $T_P, T_E, T_W, T_N,$  และ  $T_S$  จะหมายถึงค่าของอุณหภูมิที่เวลา  $t + \Delta t$  ดังนั้นสมการที่จัดเรียงใหม่จะเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} a_P T_P &= a_E [f T_E + (1-f) T_E^0] + a_W [f T_W + (1-f) T_W^0] + \\ & a_S [f T_S + (1-f) T_S^0] + a_n [f T_N + (1-f) T_N^0] + \\ & [a_P^0 - (1-f)a_E - (1-f)a_W - (1-f)a_S - \\ & (1-f)a_n] T_P^0 \end{aligned} \quad (3-33)$$

เมื่อ

$$a_E = \frac{k_e \cdot \Delta y}{(\delta x)_e} \quad (3-34 ก)$$

$$a_W = \frac{k_w \cdot \Delta y}{(\delta x)_w} \quad (3-34 ข)$$

$$a_S = \frac{k_s \cdot \Delta x}{(\delta y)_s} \quad (3-34 ค)$$

$$a_N = \frac{k_n \cdot \Delta x}{(\delta y)_n} \quad (3-34 ง)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho c \Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (3-34 จ)$$

$$a_P = a_P^0 + f \cdot a_w + f \cdot a_E + f \cdot a_N + f \cdot a_S \quad (3-34 ฉ)$$

ค่าจำเพาะสำหรับตัวถ่วงน้ำหนัก  $f$  ของสมการ discretization สามารถลดรูปให้อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์แบบพาราโบลาที่เป็นที่รู้จักกันดีได้ โดยเฉพาะเมื่อ  $f=0$  จะหมายถึงระเบียบวิธีแบบชัดแจ้ง(explicit scheme)  $f=0.5$  จะหมายถึงระเบียบวิธีแบบแครงค์-นิโคลสัน(Crank-Nicolson scheme) และสุดท้าย  $f=1$  จะหมายถึงระเบียบวิธีแบบปริยาย (implicit scheme)

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ระเบียบวิธีแบบชัดแจ้งในหาผลเฉลยของสมการ discretization ของปัญหาการนำความร้อนแบบ 2 มิติในสภาวะไม่คงที่ (Two-dimension unsteady state problem) ดังนั้นเมื่อแทน  $f = 1$  ลงในสมการ (3-33) ถึง สมการ (3-34จ) และทำการจัดเรียงใหม่จะได้เป็น

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (3-35)$$

เมื่อ

$$a_E = \frac{k_e \cdot \Delta y}{(\delta x)_e} \quad (3-36 ก)$$

$$a_W = \frac{k_w \cdot \Delta y}{(\delta x)_w} \quad (3-36 ข)$$

$$a_S = \frac{k_s \cdot \Delta x}{(\delta y)_s} \quad (3-36 ค)$$

$$a_N = \frac{k_n \cdot \Delta x}{(\delta y)_n} \quad (3-36 ง)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho c \Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (3-36 จ)$$

$$b = a_P^0 T_P^0 \quad (3-36 ฉ)$$

$$a_P = a_P^0 + a_W + a_E + a_N + a_S \quad (3-36 ช)$$

### 3.9.2 สมการ Discretization สำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบ 2 มิติในสภาวะไม่คงที่ และ สภาพนำความร้อนไม่คงที่

ก่อนที่ศึกษาการถ่ายเทความร้อนแบบ 2 มิติในสภาวะไม่คงที่ และสภาพนำความร้อน(k)ไม่คงที่ ต้องมาทำความเข้าใจการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 มิติในสภาวะคงที่และสภาพนำความร้อนไม่คงที่สมการการถ่ายเทความร้อนที่ใช้คือ

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad (3-37)$$

ทำเป็นสมการ discretization ได้เป็น

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + b \quad (3-38)$$

เมื่อ

$$a_E = \frac{k_e \cdot \Delta y}{(\delta x)_e} \quad (3-39ก)$$

$$a_W = \frac{k_w \cdot \Delta y}{(\delta x)_w} \quad (3-39ข)$$

$$a_P = a_P^0 + a_w + a_E + a_N + a_S \quad (3-39ค)$$

$$b = S_C \Delta X \quad (3-39ง)$$

จากสมการ (3-40) สภาพนำความร้อน  $k_e$  ใช้แสดงถึงสภาพนำความร้อนที่หน้าสัมผัส e และ  $k_w$  ใช้แสดงถึงสภาพนำความร้อนที่หน้าสัมผัส w สำหรับปัญหาที่สภาพนำความร้อนขึ้นอยู่กับระยะทางในแนวแกน x เราจะทราบสภาพนำความร้อนที่จุด W,P,E และต้องทำการหาค่า  $k_e, k_w$  ออกมา หรือในปัญหาที่สภาพนำความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิก็เช่นเดียวกัน

วิธีหาสภาพนำความร้อนที่หน้าสัมผัส ( $k_e$ ) ที่ได้รับความนิยมมากก็คือ การสมมติให้สภาพนำความร้อน(k)ระหว่างจุด P และ E เป็นสมการเชิงเส้น

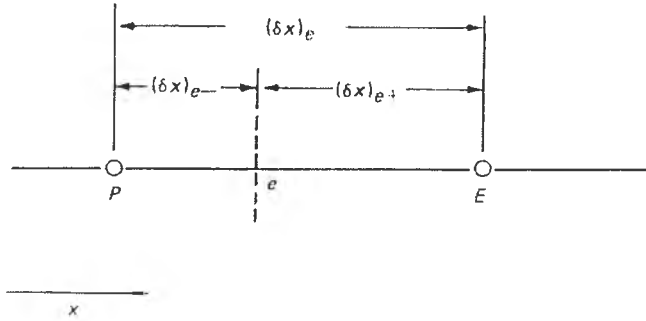
$$k_e = f_e K_P + (1 - f_e) K_E \quad (3-40)$$

เมื่อโดยประมาณของตัวแปร  $f_e$  เป็นอัตราส่วนของระยะทางที่แสดงในรูปที่ 18

$$f_e \equiv \frac{(\delta x)_{e+}}{(\delta x)_e} \quad (3-41)$$

ถ้าให้หน้าสัมผัส e เป็นจุดกึ่งกลางระหว่างจุด 2 จุด ค่าของ  $f_e$  จะเป็น 0.5 และ  $k_e$  จะเป็นค่าเฉลี่ยของ  $k_P$ , และ  $k_E$  แต่การสมมติแบบนี้ไม่สามารถแก้ปัญหบางอย่างได้ เราทำการหาค่าที่ถูกต้องโดยการใช้การไหลของความร้อนผ่านหน้าสัมผัส e ( $q_e$ )

$$q_e = \frac{k_e (T_P - T_E)}{(\delta x)_e} \quad (3-42)$$



รูปที่ 26 การใช้ระยะทางเข้าช่วยการหาหน้าสัมผัส e

เมื่อสมการ(3-43) สอดคล้องกับสมการ(3-39) ทำให้ค่า  $k_e$  ที่จะทำได้การไหลของความร้อนผ่านหน้าสัมผัส e ( $q_e$ ) ที่ถูกต้อง

ให้ปริมาตรควบคุมของอนุกรมจตุรอบ P ประกอบด้วยวัสดุชนิดเดียวกันมีสภาพนำความร้อนคงที่ ( $k_P$ ) และปริมาตรควบคุมของอนุกรมจตุรอบ E ประกอบด้วยวัสดุชนิดเดียวกันและมีสภาพนำความร้อนคงที่ ( $k_E$ ) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หากการไหลของความร้อนผ่านหน้าสัมผัส e ( $q_e$ ) ได้เป็น

$$q_e = \frac{T_P - T_E}{\frac{(\delta x)_{e-}}{K_P} + \frac{(\delta x)_{e+}}{K_E}} \quad (3-43)$$

จากสมการ(3-41)ถึง(3-44) จะได้

$$k_e = \left( \frac{1 - f_e}{K_P} + \frac{f_e}{K_E} \right)^{-1} \quad (3-44)$$

เมื่อ หน้าสัมผัส e อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างจุด P และ E เราจะได้  $f_e = 0.5$  จะได้

$$k_e = \frac{2K_P K_E}{K_P + K_E} \quad (3-45)$$

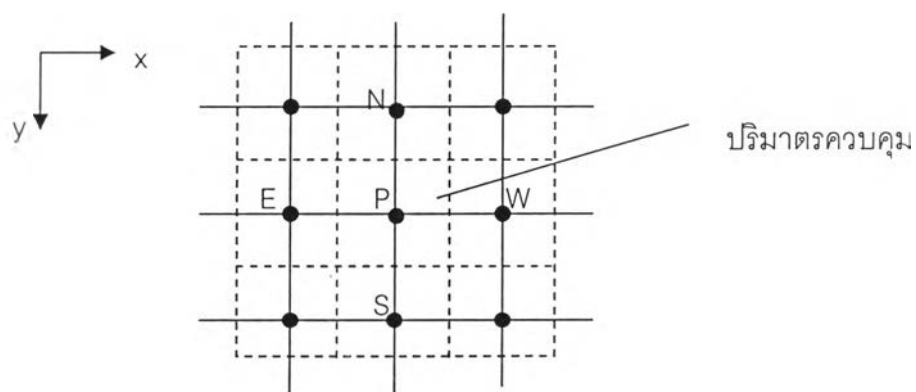
จากสมการ (3-43) จะเห็นได้ว่า สภาพนำความร้อนที่หน้าสัมผัสต่างๆเกิดหาได้จากค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิกของค่าการนำความร้อนระหว่างของจุด 2 จุดที่อยู่ตรงข้ามกันของหน้าสัมผัส นั้น ดังนั้นค่า  $k_e$ ,  $k_w$ ,  $k_n$  และ  $k_s$  ในรูปที่ 27 จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$k_e = \frac{2 \cdot K_P K_E}{K_P + K_E} \quad (3-46\text{ก})$$

$$k_w = \frac{2 \cdot K_P K_W}{K_P + K_W} \quad (3-46\text{ข})$$

$$k_n = \frac{2 \cdot K_P K_N}{K_P + K_N} \quad (3-46\text{ค})$$

$$k_s = \frac{2 \cdot K_P K_S}{K_P + K_S} \quad (3-46\text{ง})$$



รูปที่ 27 ปริมาตรควบคุมของปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบ 2 มิติ

ในสภาวะไม่คงที่ เมื่อสภาพนำความร้อนไม่คงที่

### 3.9.3 สมการ Discretization ทัวไป สำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบ 2 มิติในสภาวะไม่คงที่ เมื่อสภาพนำความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิในผนัง โดยที่สภาพนำความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การหาค่า  $k_e$ ,  $k_w$ ,  $k_n$  และ  $k_s$  จะใช้ค่าของสภาพนำความร้อนที่ตำแหน่งนั้นโดยตรงดังนั้น เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$k_e = K_E \quad (3-47\text{ก})$$

$$k_w = K_W \quad (3-47\text{ข})$$

$$k_n = K_N \quad (3-47\text{ค})$$

$$k_s = K_S \quad (3-47\text{ง})$$

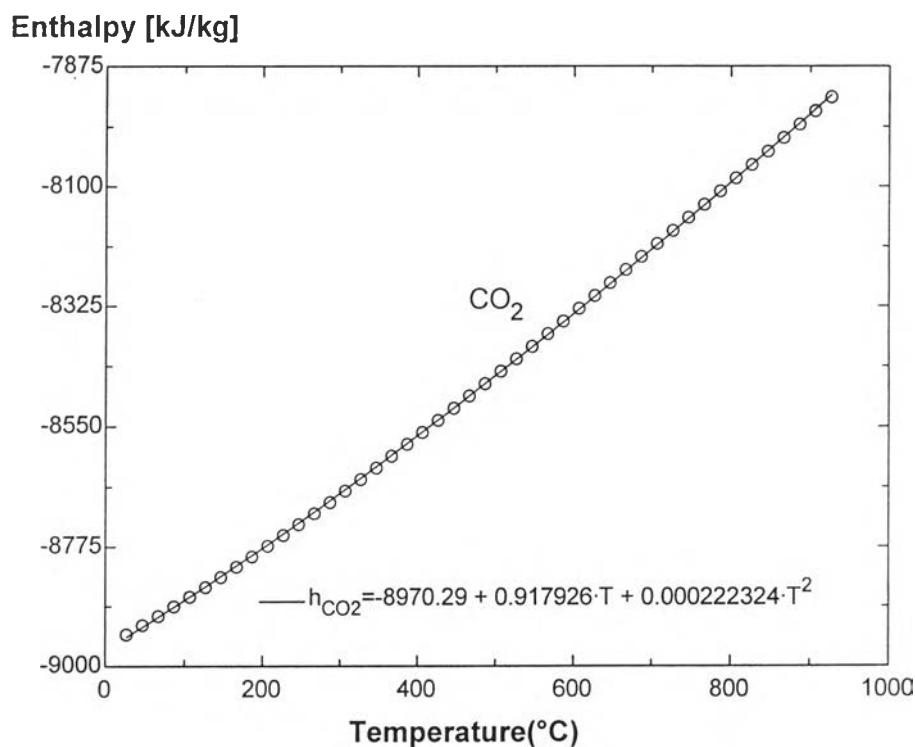
โดยที่ค่า  $K_E$ ,  $K_W$ ,  $K_N$ , และ  $K_S$  หาได้จากการแทนค่าอุณหภูมิลงในสมการ

$$K_i = 0.0616938432 \times e^{(0.00148978098 \cdot T_i)} \quad (3-48)$$

เมื่อ  $i$  เป็นปริมาตรควบคุมใดๆรอบปริมาตรควบคุม  $P$

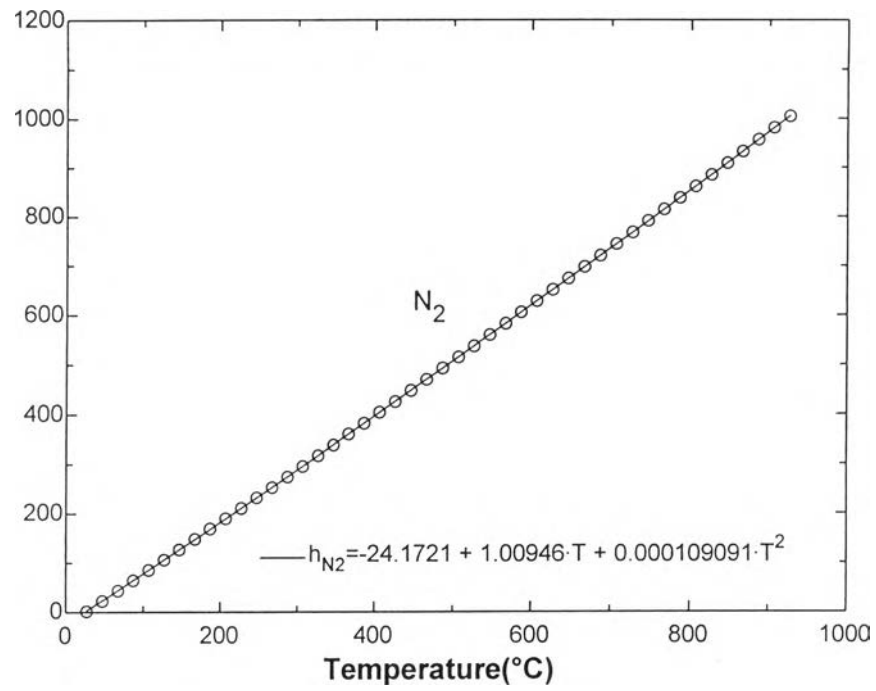
### 3.10 เอนทาลปี(Enthalpy) ก๊าซชนิดต่างๆ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการใช้ค่าเอนทาลปีเพื่อหาค่าพลังงานที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้และสูญเสียไปกับก๊าซเสียซึ่งประกอบไปด้วย ก๊าซโปรเพน ก๊าซบิวเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซออกซิเจน และไอน้ำ โดยทั่วไปแล้วค่าเอนทาลปีนั้นสามารถเปิดหาจากในหนังสือเทอร์โมไดนามิคทั่วไป แต่ไม่สะดวกในการใช้จึงนำค่าเอนทาลปี มาเขียนเป็นกราฟ และใช้การถดถอยแบบกำลังน้อยที่สุดหาสมการมาตรฐาน ด้วยวิธีที่อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมา



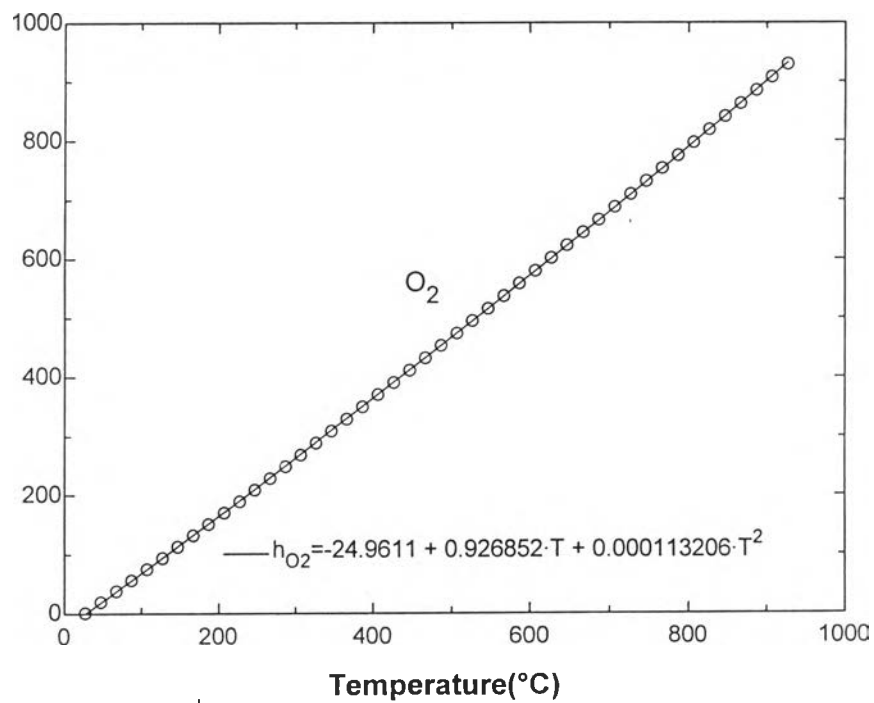
รูปที่ 28 กราฟอุณหภูมิกับเอนทาลปีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Enthalpy [kJ/kg]

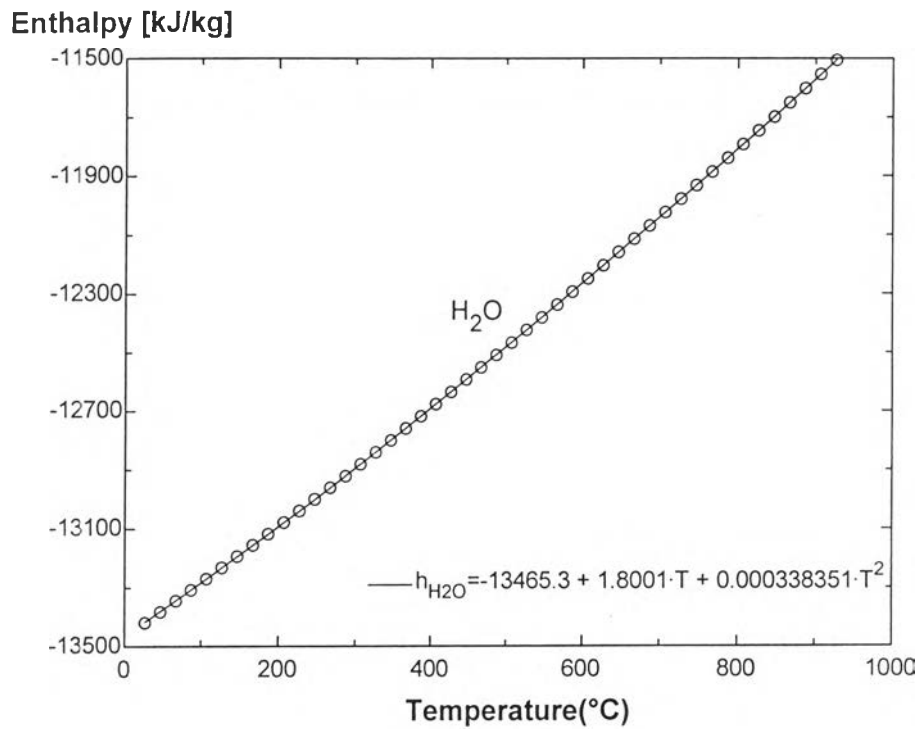


รูปที่ 29 กราฟอุณหภูมิกับเอนทาลปีของก๊าซไนโตรเจน

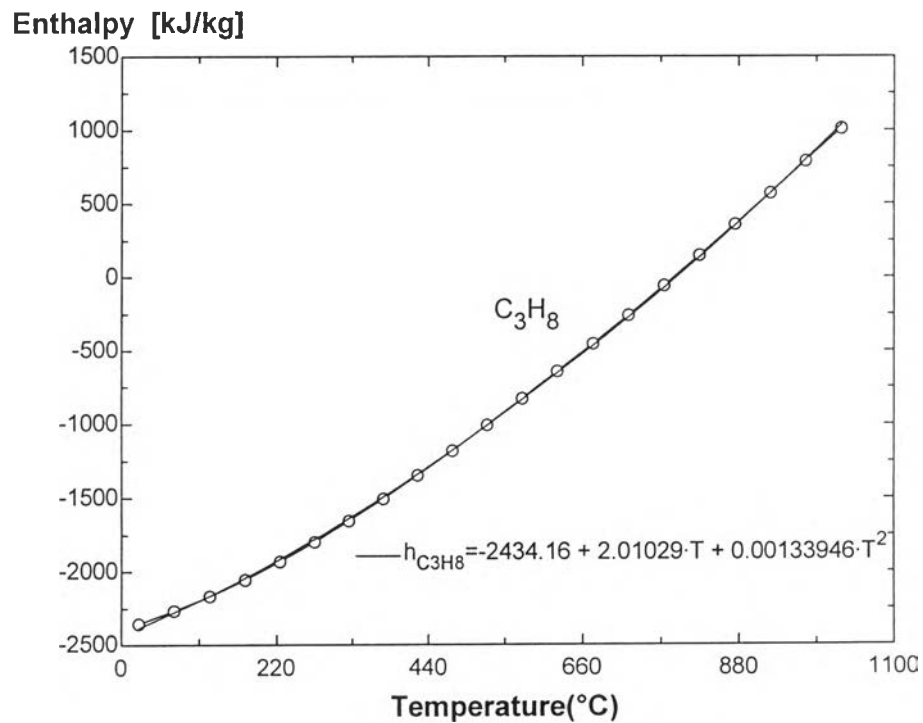
Enthalpy [kJ/kg]



รูปที่ 30 กราฟค่าอุณหภูมิกับเอนทาลปีของก๊าซออกซิเจน

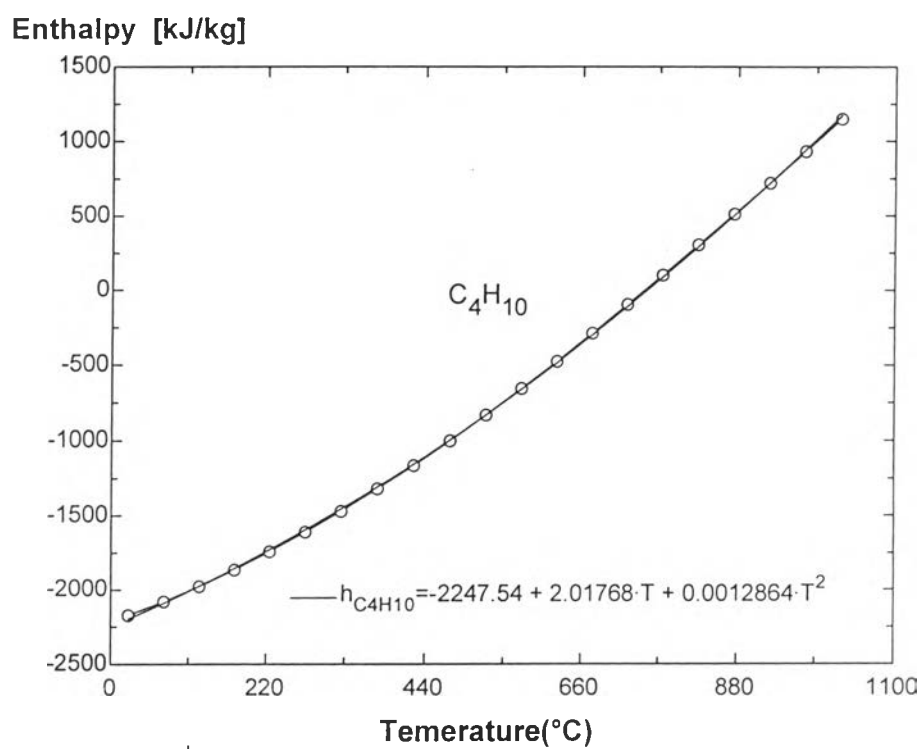


รูปที่ 31 กราฟอุณหภูมิกับเอนทาลปีของไอน้ำ



รูปที่ 32 กราฟอุณหภูมิกับเอนทาลปีของก๊าซโพรเพน





รูปที่ 33 กราฟค่าอุณหภูมิกับเอนทาลปีของก๊าซบิวเทน