การจำลองแบบเตาเผาอิฐประหยัดพลังงาน

สุธีระ ประเสริฐสรรพ์, กำพล ประทีปชัยกูร,
ไพโรจน์ คีรีรัตน์ และ ฐานันดร์ศักดิ์ เทพญา
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมการผลิตอิฐดินเผาในประเทศที่กำลังพัฒนาเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงจำนวนมาก ปัจจุบันไม้มีปริมาณลดลงทำให้การพัฒนาเตาเผาอิฐที่ใช้พลังงานอย่างประหยัดมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เตาเผาอิฐแบบความร้อนไหลลงมีการเผาเป็นชุด 4 เตา และมีการนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ถูกศึกษาโดยการจำลองแบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งการทำงานของเตาประกอบด้วยกระบวนการทำอิฐที่เผาสุกแล้วให้เย็น, กระบวนการเผา, กระบวนการอุ่นอิฐที่ผ่านการไล่น้ำ และกระบวนการไล่น้ำหรือกระบวนการอบอิฐ โดยทั้ง 4 กระบวนการอาศัยการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทมวลสารและการสันดาปของไม้ฟืนเข้ามาเกี่ยวข้อง ผลการจำลองแบบพบว่าเตาเผาอิฐแบบดังกล่าวมีการใช้พลังงานประมาณ 1.2 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมอิฐ ซึ่งน้อยกว่าเตาสี่เหลี่ยมความร้อนไหลขึ้นที่มีใช้โดยทั่วไป ในขณะที่ผลผลิตที่ได้เพิ่มขึ้นประมาณ 2.5 เท่า

SIMULATION OF ENERGY EFFICIENT BRICK KILN

S. Prasertsan, G. Prateepchaikul, T. Theppaya and P. Kirirat

Department of Mechanical Engineering

Prince of Songkla University

Hat Yai, Thailand 90110

ABSTRACT

Brick making in developing countries is a major firewood consumer. In the light of firewood shortage, there is a pressing need to develop an energy-efficient brick kiln suitable for rural production. A four-chamber batch-type downdraft kiln possessing heat recovery feature is proposed to substitute the conventional updraft kiln. In order to warrant the success of the proposed kiln, the whole system is studied by computer simulation. The system consists of cooling, firing, preheating and drying processes which simultaneously occur in the four chambers. The simulation covers the four processes in series and involves heat transfer, mass transfer and combustion of firewood. It was found that brick produced by this system consumes about 1200 kJ/kg brick which is substantially lower than that produced by the conventional updraft kiln while the production rate is increased 2.5 times

บทนำ

พลังงานที่ใช้ในการเผาอิฐจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเผาและเวลาที่ใช้ การออกแบบเตาเผาอิฐจึงต้องทำให้มีการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอิฐอย่างสม่ำเสมอ และสามารถนำความร้อนจากกระบวนการเผาไปใช้ประโยชน์ได้ ลักษณะเช่นนี้พบได้ในเตาเผาอิฐแบบอุโมงค์รถซึ่งมีกระบวนการทำงานของเตาอย่างต่อเนื่อง 4 กระบวนการ คือ drying, preheating, firing และ cooling อย่างไรก็ดีเตาเผาอิฐแบบอุโมงค์ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในชนบทของประเทศกำลังพัฒนา เนื่องจากเป็นเตาที่มีต้นทุนและกำลังการผลิตสูงเกินความต้องการของท้องถิ่น อีกทั้งอิฐมีราคาถูกและค่าขนส่งสูงเนื่องจากมีน้ำหนักมาก การผลิตอิฐและความต้องการของตลาดขึ้นอยู่กับฤดูกาล ซึ่งในหน้าแล้งจะผลักดันให้แรงงานภาคเกษตรกรรมหันเข้ามาสู่ภาคอุตสาหกรรมก่อสร้าง ทำให้ปริมาณความต้องการอิฐสูงขึ้น ดังนั้นเตาเผาอิฐจึงต้องมีการออกแบบให้สามารถรองรับปริมาณความต้องการของตลาดที่มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างเหมาะสม เตาเผาอิฐแบบแบทซ์โดยทั่วไปยังไม่มีการการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เช่นเตาเผาอิฐแบบสี่เหลี่ยม ส่วนเตาเผาอิฐแบบมังกรมีการเผาแบบย้ายตำแหน่งจุดเผาโดยมากใช้เผาผลิตภัณฑ์ประเภทถ้วยชามและกระถาง แม้จะมีการนำความร้อนไปใช้ประโยชน์เป็นบางส่วน แต่ยังคงมีปัญหาในการนำอิฐเข้าออกจากเตาซึ่งจะทำให้รอบการทำงานยาวขึ้น

จากหลักการออกแบบเตาเผาอิฐที่คำนึงถึงการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีกระบวนการทำงานต่อเนื่องและนำความร้อนไปใช้ประโยชน์คล้ายกับเตาเผาอิฐแบบอุโมงค์ สามารถออกแบบเตาได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยเตา 4 เตาแบบ downdraft เชื่อมต่อแต่ละเตาด้วยท่อทางเดินอากาศโดยนำอากาศเข้าสู่เตาที่มีกระบวนการ cooling เป็นเตาแรกได้อากาศร้อนผ่านมายังเตา firng เป็นอากาศสันดาป อากาศร้อนที่ผ่านเตา firing จะถูกนำไปใช้ต่อในเตา preheating ที่มีอิฐผ่านกระบวนการ drying มาแล้ว อากาศร้อนที่ออกจากเตา preheating จะถูกนำไปใช้ในการ drying อิฐดิบซึ่งอาจจำเป็นต้องมีการผสมกับอากาศภายนอกเป็นบางส่วนหากอากาศร้อนที่ออกยังมีอุณหภูมิที่สูงเกินไป และสุดท้ายอากาศที่ผ่านเตา drying จะถูกปล่อยทิ้ง จากลักษณะการทำงานดังกล่าวของเตาจำเป็นต้องมีการศึกษาทดลองเพื่อเป็นข้อมูลยืนยันว่าเตาดังกล่าวสามารถทำงานได้ ดังนั้นในรายงานนี้จะกล่าวถึงการจำลองแบบคอมพิวเตอร์ของกระบวนการทำงานของเตาดังกล่าว

สมการแบบจำลอง

การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในแต่ละเตาจะใช้ fixed bed model ในการวิเคราะห์ โดยการแบ่งกองอิฐในเตาออกเป็นชั้น ๆ Δx ดังในรูปที่ 2 ในแต่ละชั้นจะใช้สมการ 4 สมการที่เกี่ยวข้องกับการสมดุลย์ความร้อนและพลังงานในการคำนวณหาค่าอุณหภูมิของอากาศ (T), อุณหภูมของอิฐ (θ), ความชื้นของอากาศ (ω) และสัดส่วนความชื้นเฉลี่ยในอิฐ ($\overline{M}$)

อุณหภูมิของอากาศ อุณหภูมิอากาศคำนวณจากเอนทาลปีของอากาศที่เปลี่ยนไปเมื่อไหลผ่านอิฐและที่ว่างในชั้นปริมาตร Sdx

(ค่าเอนทาลปีของอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลา dt อ้างอิงที่อุณหภูมิ 0 °C)

ค่าเอนทาลปีของอากาศที่เปลี่ยนไปเมื่อผ่านชั้นปริมาตร (Sdx) ในช่วงเวลา dt เท่ากับ

$$\left(\rho_a V_a C_a + \rho_a V_a \omega C_v\right)\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) dxSdt \qquad (1)$$

โดยที่ ρ_a คือความหนาแน่นของอากาศ, V_a ความเร็วของอากาศ, C_a และ C_v คือค่าความร้อนจำเพาะของอากาศและไอน้ำตามลำดับ

ความร้อนสัมผัสของอากาศในช่องว่างเท่ากับ

$$\left(\rho_a C_a + \rho_a \omega C_v\right)\frac{\partial T}{\partial t} S\varepsilon dxdt \qquad (2)$$

โดยที่ ε คือ สัดส่วนช่องว่างในชั้นปริมาตร

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาสู่อิฐหาได้จาก

$$q = ha(T - \theta)Sdxdt \qquad (3)$$

โดยที่ h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา และ a คือสัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอิฐ

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนหาได้จาก

$$h = \frac{k_a}{D_p} Nu$$

โดยที่ k_a คือ ค่าการนำความร้อนของอากาศ, D_p คือ ความกว้างอิฐในทิศทางตั้งฉากการไหลของอากาศ และ Nu คือ เลขนุสเซิล

$$Nu = c(Re)^n$$

2,500<Re<8,000 ; c=0.160, n=0.699

8,000<Re<100,000 ; c=0.092, n=0.675

โดยที่ Re เลขเรย์โนลด์

จากสมการที่ (1), (2) และ (3) จะได้

$$V_a \frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{-ha}{\rho_a C_a + \rho_a \omega C_v}(T - \theta) \qquad (4)$$

อุณหภูมิของอิฐ การถ่ายเทความร้อนจากการพาของอากาศสู่ชั้นอิฐ เท่ากับผลรวมของเอนทาลปีในการระเหยน้ำออกจากอิฐ และค่าความร้อนสัมผัส

ที่ช่วงเวลา dt ค่าเอนทาลปีของอิฐในชั้นปริมาตร (Sdx) มีค่าเท่ากับ

$$\left(\rho_p C_p + \rho_p C_w \overline{M}\right)\frac{\partial \theta}{\partial t} Sdxdt \qquad (5)$$

โดยที่ C_w คือ ค่าความร้อนจะเพาะของน้ำ

ปริมาณความชื้นที่ออกจากอิฐเท่ากับ

$$G_a \frac{\partial \omega}{\partial x} Sdxdt \qquad (6)$$

สำหรับอากาศจะใช้สัญลักษณ์ G_a แทน เทอม $V_a\rho_a$

เอนทาลปีสำหรับการทำให้ไอน้ำที่ระเหยออกจากอิฐ

$$h_{fg}G_a \frac{\partial \omega}{\partial x} Sdxdt + C_vG_a(T - \theta)\frac{\partial \omega}{\partial x} Sdxdt \qquad (7)$$

โดยที่ h_{fg} คือความร้อนแฝงของน้ำ

จากสมการที่ (3), (5) และ (7) สมดุลเอนทาลปีของอิฐจะได้

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{ha}{\rho_p C_p + \rho_p C_w \overline{M}}(T - \theta) - \frac{h_{fg} + C_v(T - \theta)}{\rho_p C_p + \rho_p C_w \overline{M}} G_a \frac{\partial \omega}{\partial x} \qquad (8)$$

ความชื้นของอากาศ ความชื้นของอากาศที่ผ่านชั้นปริมาตรหาได้จากมวลของความชื้นที่ออกจากอิฐ

ความชื้นของอากาศที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา dt เท่ากับ

$$G_a \frac{\partial \omega}{\partial x} Sdxdt + \varepsilon \rho_a \frac{\partial \omega}{\partial t} Sdxdt \qquad (9)$$

ความชื้นของอิฐในปริมาตรควบคุมที่เปลี่ยนไปในเวลา dt เท่ากับ

$$\rho_p Sdx \frac{\partial \overline{M}}{\partial t} dt \qquad (10)$$

จากสมการที่ (9) และ (10) สมดุลมวลสำหรับความชื้นของอากาศ คือ

$$\frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\rho_p}{G_a} \frac{\partial \overline{M}}{\partial t} \qquad (11)$$

ตัดเทอม $\frac{\partial \omega}{\partial t}$ ทิ้ง เนื่องจากมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ $\frac{\partial \omega}{\partial x}$

ความชื้นของอิฐ ความชื้นของอิฐที่เปลี่ยนไปหาจากสมการชั้นบางสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ดินเหนียว [1]

กรณีค่า V_a มีค่าต่ำกว่า 100 cm/sec.

$$\frac{\partial \overline{M}}{\partial t} = \frac{4.3 \times 10^{-10}}{m_b} L^{0.73} B^{0.8} (P_s - P_v)(1 + 0.121 V_a^{0.85}) \qquad (12)$$

กรณีค่า V_a มีค่าระหว่าง 100 ถึง 300 cm/sec

$$\frac{\partial \overline{M}}{\partial t} = \frac{2.12 \times 10^{-10}}{m_b} L^{0.77} B (P_s - P_v)(1 + 0.121 V_a^{0.85}) \qquad (13)$$

L คือ ความยาวตามระนาบแนวนอนของอิฐที่ขนานกับทิศทางการไหลของอากาศ (cm.)

B คือ ความกว้างของก้อนอิฐแนวตั้งฉากทิศทางการไหลของอากาศ (cm.)

P_s คือ ความดันอิ่มตัวของอากาศที่อุณหภูมิ T (mm.Hg)

P_v คือ ความดันไอของอากาศที่อุณหภูมิ T (mm.Hg)

m_b คือ น้ำหนักของอิฐ (g)

สมการที่ (4), (8), (11) และ (12) หรือ (13) จะใช้ในแบบจำลองเพื่อคำนวณหาอุณหภูมิของอิฐและอากาศรวมทั้งความชื้นในอิฐที่เปลี่ยนแปลงไป ในการจำลองแบบกองอิฐมีขนาด 2.1 x2.1x1.6 ม.^{3} และแบ่งออกเป็น 24 ชั้น ในการจำลองแบบต้องคำนวณเงื่อนไขการสันดาปของไม้ฟืนเพื่อให้ได้อุณหภูมิเผาตามต้องการ

การสันดาปไม้ฟืน

ในที่นี้ใช้ไม้ยางพาราเป็นไม้ฟืนสำหรับการสันดาป ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไม้ฟืน [2] มีสูตรเคมีเป็น $C_{3.841}N_{0.0136}H_{5.65}O_{2.805}$ และมีเถ้า 4%

$$C_{3.841}N_{0.0136}H_{5.62}O_{2.805} + 3.8435(Y)\left(O_2 + 3.76N_2\right) + (n_{H_2O})H_2O \rightarrow 3.841CO_2 + (2.81 + n_{H_2O})H_2O + 3.8435(Y-1)O_2 + (14.452Y + 0.0068)N_2 \quad (14)$$

โดยที่ Y คือสัดส่วนอากาศทางทฤษฎี

จำนวนโมลของน้ำในอากาศสันดาป, n_{H_2O}, หาได้จาก

$$n_{H_2O} = \left(\frac{\omega_a(3.8435Y(1+3.76))M_a}{M_{H_2O}}\right) \quad (15)$$

โดยที่ M_a และ M_{H_2O} คือมวลโมเลกุลของอากาศและน้ำตามลำดับ

อัตราการใช้ไม้ฟืนคำนวณได้จากสมการที่ (14)

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_a}{\left(3.8435Y(1+3.76)\dfrac{M_a}{M_f}\right)} \quad (16)$$

โดยที่ M_f คือมวลโมเลกุลของไม้ฟืน $\dot{m}_f$ และ $\dot{m}_a$ คือ อัตราการใช้ไม้ฟืนและอากาศตามลำดับ

$$h_c = \left(\frac{\dot{m}_f\omega_f h_w + \dot{m}_f HV + \dot{m}_a h_a + \dot{m}_a\omega_a h_{ga}}{\dot{m}_c}\right) \quad (17)$$

HV คือ ค่าความร้อนของไม้ฟืน และ h_c สามารถเขียนอยู่ในรูป

$$h_c = C_c T_c \quad (18)$$

โดยที่ C_c เป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิและสัดส่วนโดยโมลของอากาศหลังการสันดาปและ $\dot{m}_c = (1+\omega_a)\dot{m}_a + 0.96\dot{m}_f$. ค่าเอนทาลปีในสมการที่ (17) และ (18) อ้างอิงที่ 0°C.

อุณหภูมิที่ได้จากการสันดาปไม้ฟืนซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราการใช้อากาศสันดาปที่มีอัตราการใช้ไม้ฟืนคำนวณได้จากสมการที่ (14)-(18).

ในการทำงานของเตา อากาศสันดาปจะเป็นอากาศที่ผ่านการอุ่นจากเตา cooling ซึ่งอิฐในเตา cooling จะค่อยๆมีอุณหภูมิลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นค่า h_a ในสมการที่ (17) จะมีค่าลดลงเมื่อมีกระบวนการ firing ดำเนินไป ดังนั้นหากต้องการให้อุณหภูมิเผามีค่าคงที่ ปริมาณอากาศสันดาปและอัตรากาใช้ไม้ฟืนต้องเปลี่ยนไป หรือถ้าให้อากาศสันดาปไหลในปริมาณที่คงที่ การใช้

ไม้ฟืนก็ต้องเปลี่ยนแปลงไป หรือถ้าอัตราการใช้ไม้ฟืนไม่เปลี่ยนแปลง ปริมาณอากาศสันดาปที่ใช้ก็ต้องน้อยลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ไม้ฟืนอย่างประหยัดสามารถทำได้ อย่างไรก็ตามการลดอัตราการใช้อากาศสันดาปจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการต่างๆ (preheating และ drying)

การจำลองแบบกระบวนการเผาอิฐ

ในกระบวนการ cooling, firing และ preheating จะมีเฉพาะการถ่ายเทความร้อนระหว่างอิฐและอากาศเกิดขึ้นซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4) และ (8) โดยสมมุติว่าความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในเตา preheating ต่ำมากจึงไม่นำมาคิด สำหรับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในเตา drying จะคำนวณจากสมการที่ (4), (8), (11) และ (12) หรือ (13) ขั้นตอนการจำลองแบบแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยให้อากาศเข้าเตา cooling ด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ 600 kg/hr, 800 kg/hr, 1000 kg/hr, 1200 kg/hr, 1400 kg/hr และ 1600 kg/hr ซึ่งจะไหลเข้าเตา firing เป็นอากาศสันดาป สำหรับเตา drying จะควบคุมอุณหภูมิอากาศที่ใช้ไว้ที่อุณหภูมิ 150 °C การจำลองแบบที่ปริมาณอิฐ 4,700 ก้อนต่อเตา อิฐแต่ละก้อนมีขนาด 19.0x8.0x6.5 ซม.^{3} เป็นอิฐ 4 รูขนาด 1.5x1.5 ซม.^{2} น้ำหนักอิฐเท่ากับ 1.5 กก.ต่อก้อน ความชื้นเริ่มต้นของอิฐในเตา drying เท่ากับ 12 % ฐานแห้ง เงื่อนไขการสิ้นสุดกระบวนการจะถือเอาอิฐชั้นล่างสุดมีอุณหภูมิ 650 °C เป็นเกณฑ์ การจำลองแบบเริ่มต้นจากเงื่อนไขอุณหภูมิอิฐชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดของเตา เช่นในเตา cooling สมมุติให้อิฐชั้นบนสุดมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิเผาและอิฐชั้นล่างสุดมีอุณหภูมิ 650 °C ทำนองเดียวกันกับในเตา firing และเตา preheating สำหรับในเตา drying อุณหภูมิเริ่มต้นของอิฐในเตาเท่ากับ 30 °C การคำนวณหาค่าอุณหภูมิของอิฐและอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปจะทำการคำนวณซ้ำเพื่อให้ได้ค่าที่ลู่เข้าโดยมีความแตกต่างของอุณหภูมิไม่เกิน 5 °C

ผลและอภิปรายผลจำลองแบบ

รูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิของอากาศสันดาปที่ผ่านการอุ่นโดยไหลผ่านอิฐในเตา cooling ที่เผาเสร็จและอัตราการใช้ไม้ฟืนในกระบวนการ firing โดยอัตราการไหลของอากาศสันดาปเท่ากับ 1000 kg/hr อุณหภูมิเผา 800 °C อิฐในเตา cooling จะค่อยๆมีอุณหภูมิลดลงตามเวลาทำให้อุณหภูมิอากาศสันดาปมีค่าลดลงจาก 165 °C ถึง 133°C ในช่วงเวลา 522 นาที เมื่ออุณหภูมิอากาศสันดาปลดลงจะทำให้อัตราการใช้ไม้ฟืนเพิ่มขึ้นจาก 52.5 ถึง 57.1 เพื่อเป็นการรักษาอุณหภูมิเผาให้คงที่ที่ 800 °C ถ้าต้องการรักษาอุณหภูมิเผาและอัตราการใช้ไม้ฟืนให้คงที่ตลอดกระบวนการเผาอัตราการใช้อากาศสันดาปต้องลดลง ในทางปฏิบัติผู้ควบคุมเตาเผามักรักษาอุณหภูมิเผาโดยการควบคุมการป้อนไม้ฟืนมากกว่าการควบคุมอัตราการใช้อากาศสันดาป จากผลการจำลองแบบที่ได้พบว่าอัตราการใช้ไม้ฟืนเพิ่มขึ้นเพียง 4.6 kg/hr ตลอดกระบวนการเผาเป็นเวลา 8.5 ชั่วโมง ซึ่งถือได้ว่าใช้ไม้ฟืนในอัตราคงที่ 55 kg/hr รวมทั้งสิ้น 480 kg ทำนองเดียวกันกับเตา firing ในเตา drying ที่คงอุณหภูมิในการ drying ไว้ที่ 150 °C จำเป็นต้องมีอากาศจากภายนอกเข้ามาผสมกับอากาศที่ออกจากเตา preheating เนื่องจากอากาศที่ออกจากเตา preheating จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อ

เวลาผ่านไป ในรูปที่ 5 อัตราการไหลของอากาศ 3200 kg/hr ในตอนเริ่มต้นจะเพิ่มขึ้นเป็น 3850 kg/hr ในตอนขาออก

อุณหภูมิของอิฐชั้นล่างสุดของเตาทั้ง 4 และอุณหภูมิอากาศที่ออกจากเตาแสดงได้ดังรูปที่ 6 อุณหภูมิของอิฐชั้นล่างสุดในเตา cooling 650°C ในตอนเริ่มต้นกระบวนการจะลดลงเหลือ 420 °C ในขณะที่อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเตา cooling มีอุณหภูมิลดลงจาก 180 °C ถึง 105 °C อุณหภูมิของอากาศค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอิฐทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลค่อนข้างสูง (1000 kg/hr) อุณหภูมิสุดท้ายของอิฐในเตา cooling ยังคงสูงอยู่ (420°C) หากต้องการให้อุณหภูมิลดต่ำลงอีกจะส่งผลให้เวลาที่ใช้ในกระบวนการนานขึ้น แต่การสิ้นสุดกระบวนการถูกจำกัดโดยเตา firing การยืดเวลาในกระบวนการ firng ออกไปจะทำให้พลังงานที่ใช้เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการสิ้นสุดกระบวนการจะถูกกำหนดโดยเตา cooling ซึ่งเมื่ออุณหภูมิอิฐชั้นล่างสุดในเตา firing ถึง 650 °C ให้หยุดการป้อนไม้ฟืนแต่ในเตา cooling ก็ยังคงให้มีอากาศไหลผ่านจนกระทั่งอุณหภูมิอิฐลดลงและสามารถนำออกจากเตาได้ (เช่น 80°C) ในกรณีนี้จะทำให้รอบการทำงานของเตายาวขึ้นแต่เมื่อเริ่มการเผาในรอบถัดไป เวลาที่ใช้ในรอบถัดไปจะสั้นลงสลับกันไป

อุณหภูมิอิฐในเตา firing เพิ่มขึ้นจาก 475°C เป็น 650 °C ซึ่งเพิ่มขึ้น 175 °C โดยที่อุณหภูมิเผาคงที่ 800°C และอุณหภูมิอากาศร้อนที่ออกจากเตา firing เท่ากับ 725°C ในตอนเริ่มต้นและ 775 °C ในตอนสิ้นสุดของกระบวนการ ในเตา preheating อิฐมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 100°C ถึง 475°C โดยที่มีอากาศร้อนเข้าสู่เตาที่อุณหภูมิ 580 °C และ 700°C อุณหภูมิอากาศที่เข้าสู่เตา drying คงที่เท่ากับ 150 °C ทำให้อิฐมีอุณหภูมิ 100°C

การกระจายอุณหภูมิในกองอิฐจากบนลงล่างที่เวลาสิ้นสุดกระบวนการแสดงได้ดังรูปที่ 7 ความแตกต่างของอุณหภูมิชั้นบนและชั้นล่างสุดของทุกเตามีค่าน้อยกว่า 100°C การเปลี่ยนแปลงความชื้นของอิฐในเตา drying แต่ละชั้นลดลงอย่างเชิงเส้นตามเวลา แสดงได้ดังรูปที่ 8 โดยอิฐชั้นบนสุดมีความชื้น 7.6% ชั้นล่างสุด 8.7%

เงื่อนไขที่นำมาอภิปรายเป็นเงื่อนไขที่อุณหภูมิเผา 800°C อัตราการใช้อากาศสันดาป 1000 kg/hr เพียงเงื่อนไขเดียว สำหรับเงื่อนไขอื่นๆก็มีแนวโน้มในทำนองเดียวกันแต่จะให้ผลแตกต่างกัน เช่น ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเผา 700°C และ 900°C ความชื้นสุดท้ายที่เหลือในอิฐชั้นบนในเตา drying มีค่าเท่ากับ 5.2% และ 8.5% ตามลำดับโดยมีความแตกต่างจากอิฐชั้นล่าง 1 % ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิเผา 700°C ใช้เวลาในการเผานานกว่า (852 นาที) ทำให้เวลาที่ใช้ในเตา drying นานกว่าเช่นกัน ในขณะที่ที่อุณหภูมิ drying เท่ากัน 150°C อุณหภูมิเผา 900°C จะใช้เวลาในการเผาสั้นกว่า (467 นาที)

อัตราการใช้ไม้ฟืนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเผาและอัตราการใช้อากาศสันดาปดังแสดงในรูปที่ 9 เพื่อเป็นการรักษาอุณหภูมิเผาให้คงที่ การใช้อัตราการไหลอากาศสันดาปที่สูงกว่าจะทำให้ใช้ปริมาณไม้ฟืนสูงกว่าแม้ว่าจะใช้เวลาในการเผาสั้นกว่า การใช้อัตราการไหลอากาศที่ต่ำกว่าจะ

ใช้ไม้ฟืนในอัตราที่น้อยกว่าแต่จะใช้เวลาในการเผานาน ผลของอุณหภูมิเผาและอัตราการใช้อากาศสันดาปแสดงได้ดังตารางที่ 1 พบว่าแต่ละอุณหภูมิเผาเดียวกันเงื่อนไขที่ทำให้ใช้พลังงานต่ำจะใช้เวลาในการเผานาน (ทำให้ได้ผลผลิตต่ำ) ที่ทุกอุณหภูมิเผาที่อัตราการใช้อากาศสันดาป 1600 kg/hr ใช้ไม้ฟืนมากกว่า 35% เมื่อเทียบกับอัตราการใช้อากาศสันดาป 600 kg/hr ในขณะที่เวลาที่ใช้ลดลงครึ่งหนึ่ง ยิ่งกว่านั้นการเผาที่อุณหภูมิเผาต่ำกว่าจะใช้ไม้ฟืนมากกว่าและใช้เวลานานกว่า ดังนั้นจึงควรเผาอิฐที่อุณหภูมิสูงกว่า

อัตราการใช้ไม้ฟืนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศสันดาปและสัดส่วนอากาศทางทฤษฎี ซึ่งจะเป็นตัวแปรกำหนดอุณหภูมิที่ใช้เผา ถ้าอุณหภูมิเผาถูกกำหนดให้คงที่ อัตราการใช้ไม้ฟืนจะถูกควบคุมโดยอัตราการใช้อากาศสันดาป ในการการจำลองแบบกระบวนการเผาจะสิ้นสุดเมื่ออุณหภูมิอิฐในเตาทั้งหมดถึง 650°C ถ้าอัตราการใช้อากาศสันดาปต่ำมากๆเพื่อที่จะป้อนไม้ฟืนในอัตราที่ต่ำ จะทำให้กระบวนการ cooling และ drying สิ้นสุดช้าซึ่งไม่พึงประสงค์ในทางปฏิบัติ แต่ถ้าใช้อัตราการไหลของอากาศสันดาปสูงจะทำให้พลังงานจำเพาะที่ใช้สูงเช่นกัน ดังนั้นเงื่อนไขที่เหมาะสมจะต้องใช้พลังงานต่ำและเวลาที่ใช้ในแต่ละกระบวนการต้องพอดีที่ทำได้ผลิตผลิตที่คุ้มกับการลงทุน

สรุป

จากการศึกษาผลของอัตราการใช้อากาศสันดาปและอุณหภูมิเผาในกระบวนการเผาอิฐโดยแบ่งกระบวนการออกเป็น 4 กระบวนการ คือ cooling, firing, preheating และ drying โดยใช้การจำลองแบบคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่าการเผาอิฐควรเผาที่อุณหภูมิสูง ใช้พลังงานและเวลาในกระบวนการต่ำเพื่อให้ได้ผลผลิตสูง สามารถเผาได้อย่างต่อเนื่องหรือเผาเป็นชุดและเหมาะกับอุตสาหกรรมอิฐในประเทศกำลังพัฒนา

เอกสารอ้างอิง

1. Singer F., Singer, S.S. (1963) *Industrial Ceramics*, Chapman & London
2. Prasertsan, S. (1993) *Energy Value of Rubber Plantation Residues*, R&D J. Eng. Inst. Thailand, Vol.4, No.2, pp.13-22

สัญลักษณ์

a = สัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอิฐ (m^{-1})

B = ความกว้างของอิฐ (cm)

C = ความร้อนจำเพาะ (kJ/kg °C)

D = ความยาว characteristic (m)

G = ความเร็วเชิงมวล (kg/m^2 s)

h = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m °C), ค่าเอนทาลปี (kJ/kg)

k = ค่าการนำความร้อน (W/m °C)

L = ความยาวของอิฐในทิศทางขนานกับการไหล (cm)

m = มวล (g)

M = มวลโมเลกุล

Nu = เลข นุสเซิล

P = ความดัน (mm. Hg)

q = พลังงานความร้อน (kJ)

Re = ตัวเลขเรย์โนลด์

S = พื้นที่หน้าตัดของชั้นปริมาตร (m^2)

t = เวลา (s)

T = อุณหภูมิอากาศ (°C or K)

V = ความเร็ว (m/s)

x = ความหนาชั้นปริมาตร (m)

Y = สัดส่วนอากาศทางทฤษฎี

ρ = ความหนาแน่น (kg/m^3)

ω = สัดส่วนความชื้นของอากาศ (decimal)

θ = อุณหภูมิอิฐเฉลี่ย (°C)

ε = สัดส่วนช่องว่าง

$\overline{M}$ = สัดส่วนความชื้นในอิฐ

สัญลักษณ์กำกับล่าง

a = อากาศ

b, p = อิฐ

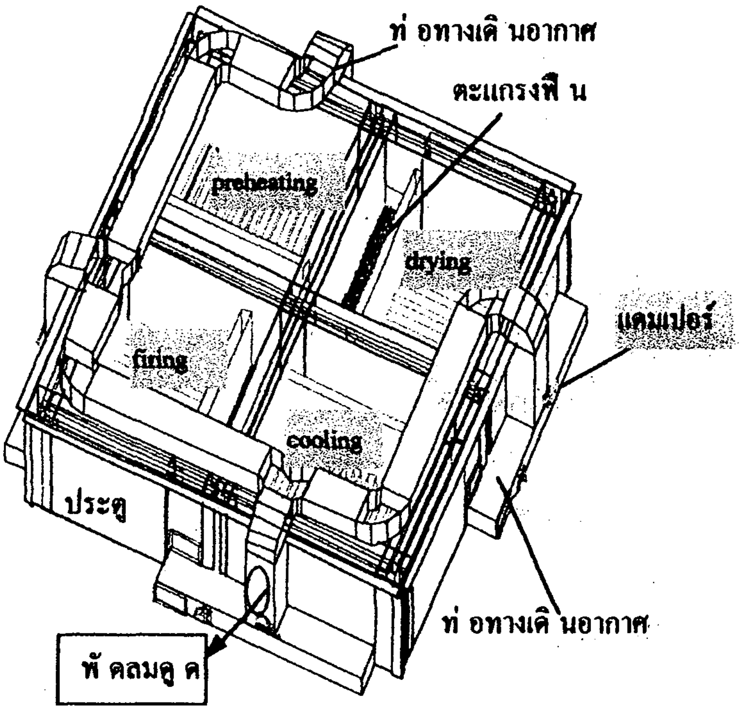
c = ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสันดาป

f = เชื้อเพลิง (ไม้ฟืน)

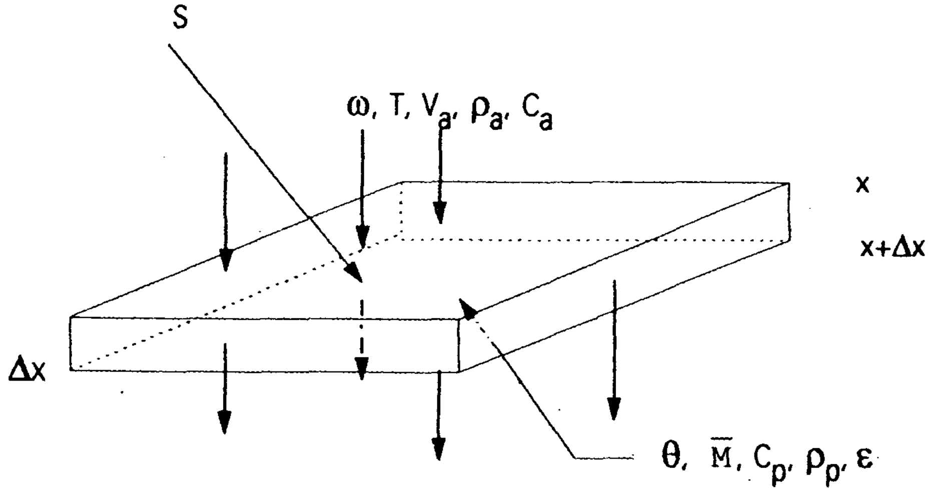
s = สภาวะอิ่มตัว

v = ไอน้ำ

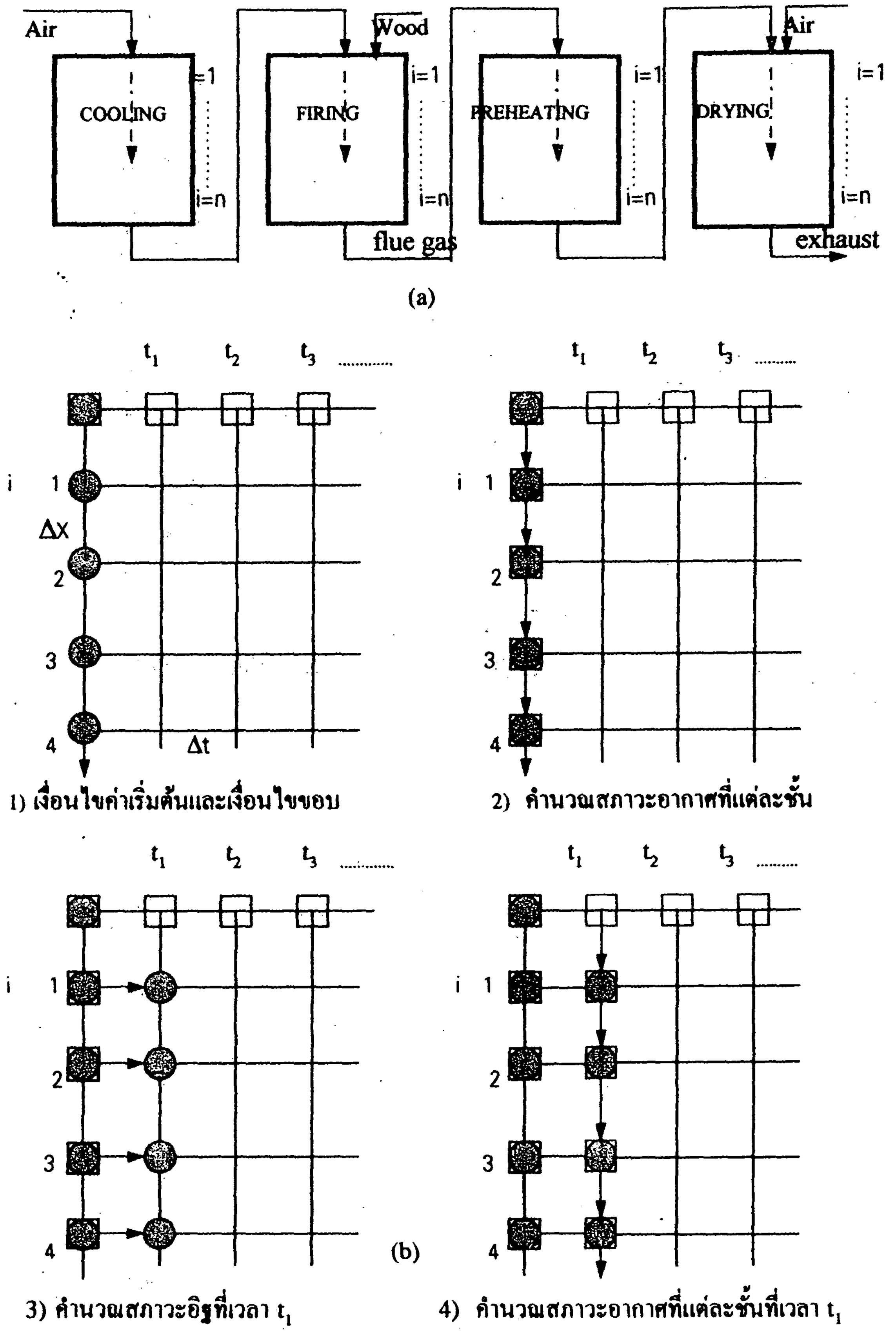
w = น้ำ



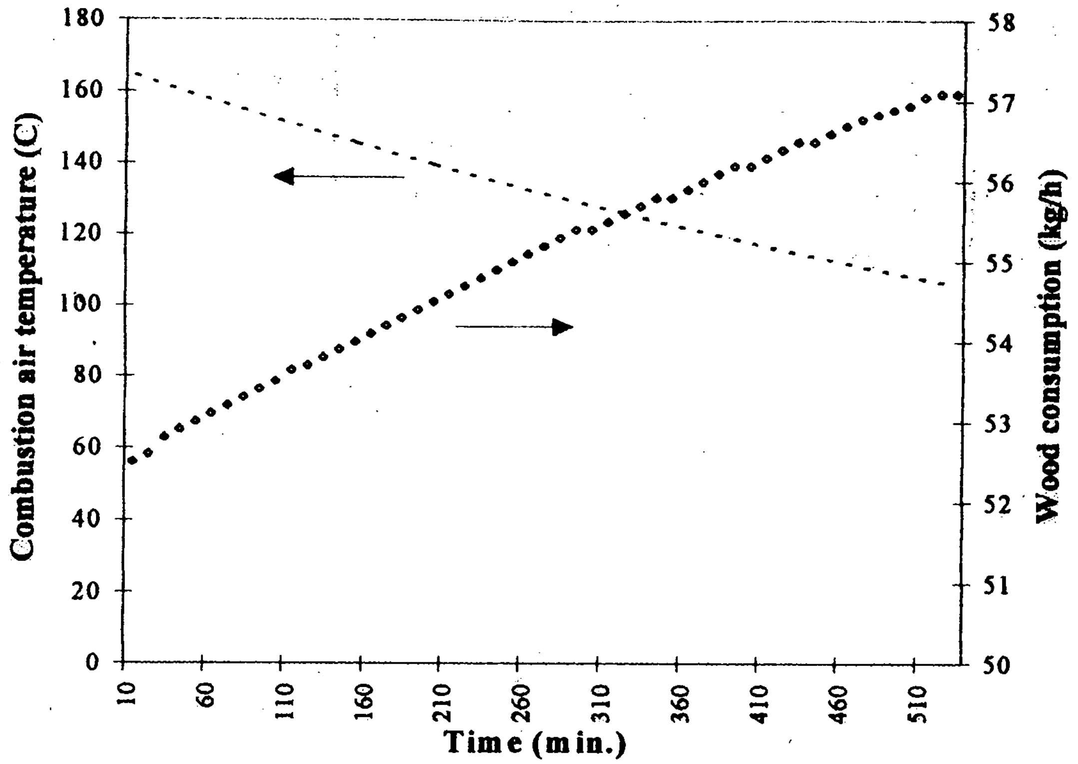
รูปที่ 1 แบบจำลองเตาเผาอิฐ



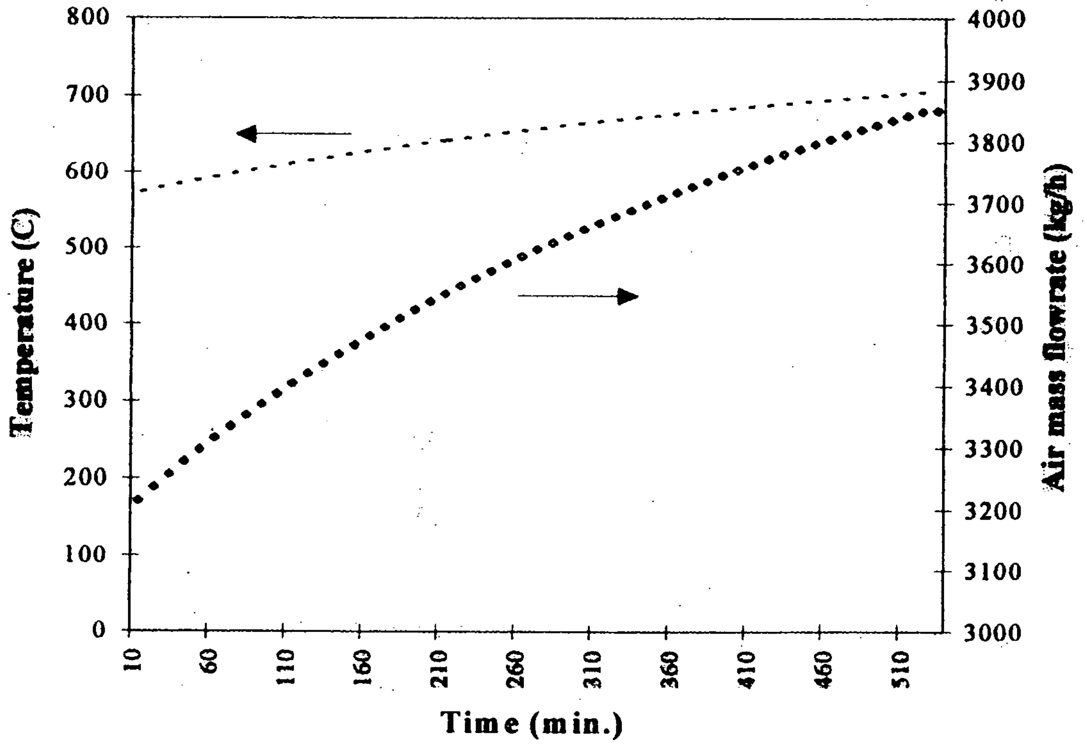
รูปที่ 2. รูปชั้นปริมาตรควบคุม



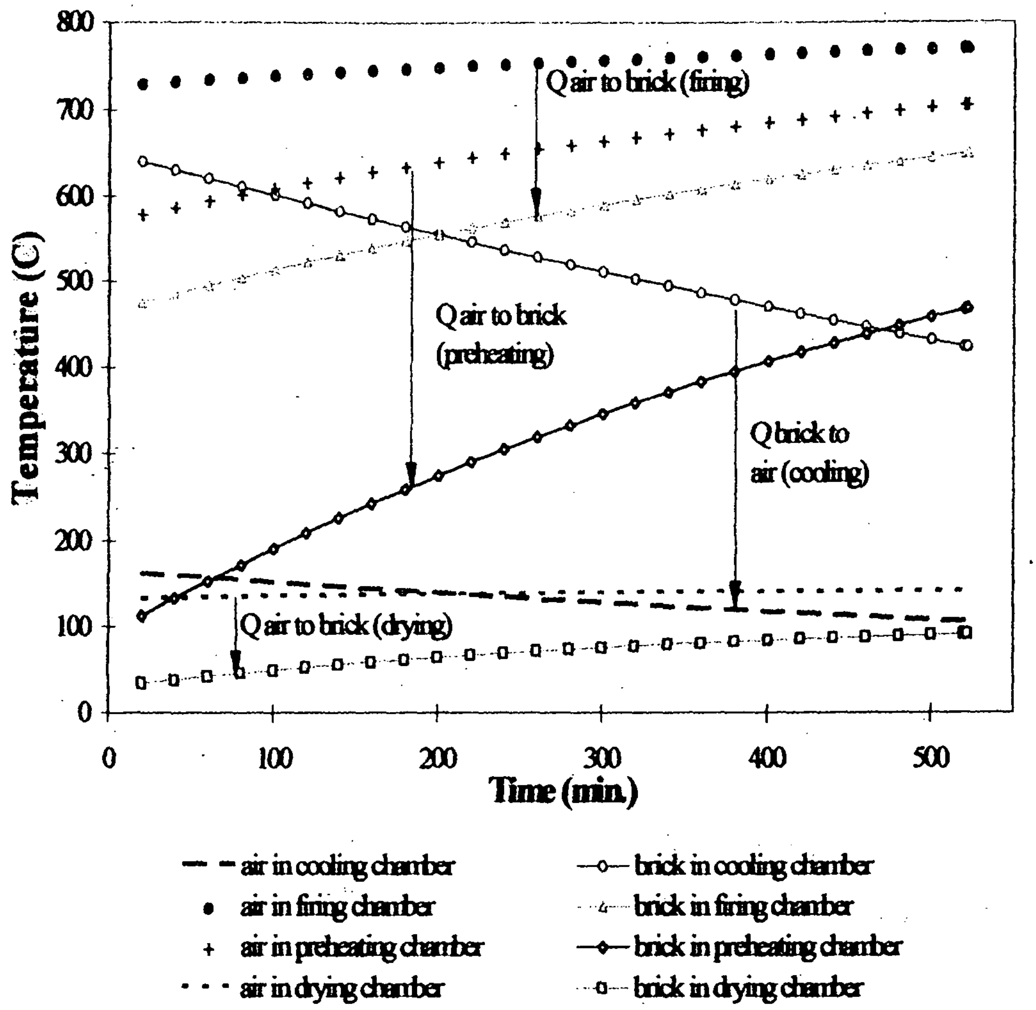
รูปที่ 3. แผนภูมิการจำลองแบบ (a) กระบวนการที่แต่ละเตา (b) การจำลองแบบที่แต่ละเตา, θ และ $\overline{M}$ แทนด้วย □ ; T และ ω แทนด้วย ●



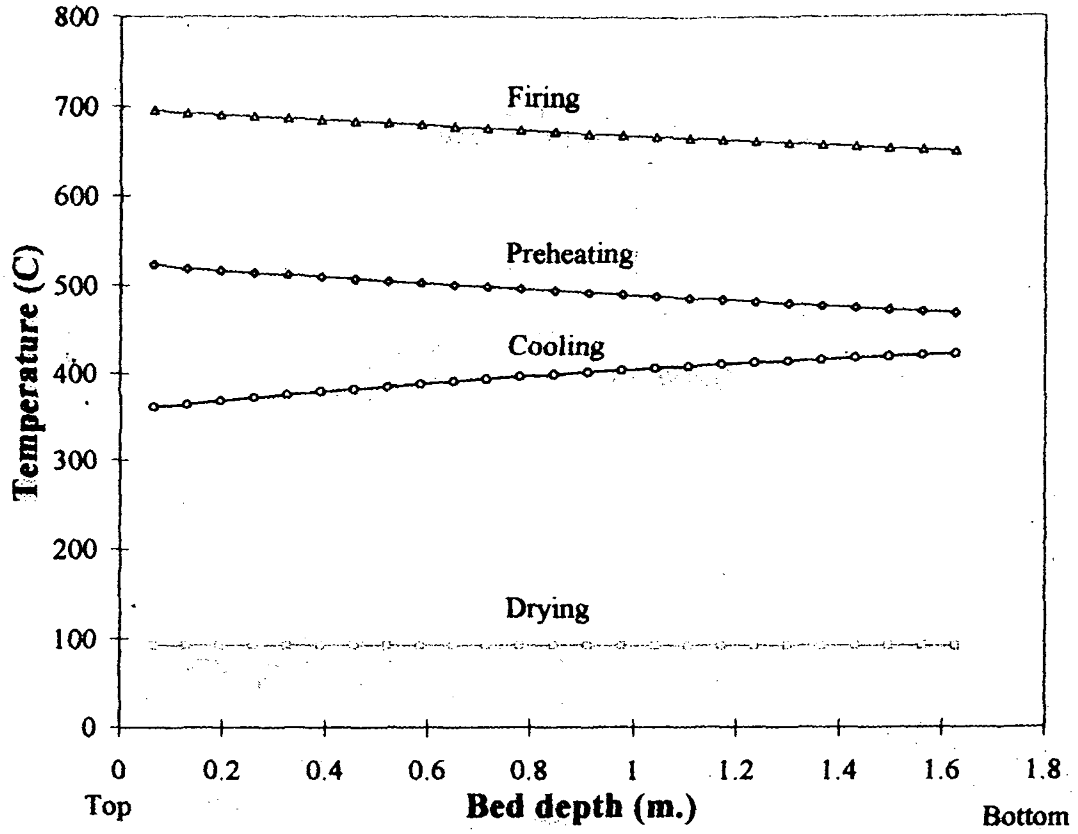
รูปที่ 4. อุณหภูมิอากาศสันดาปและ อัตราการใช้ไม้ฟืนที่อุณหภูมิเผา 800 °C, อัตราการไหลของอากาศสันดาป 1000 kg/h



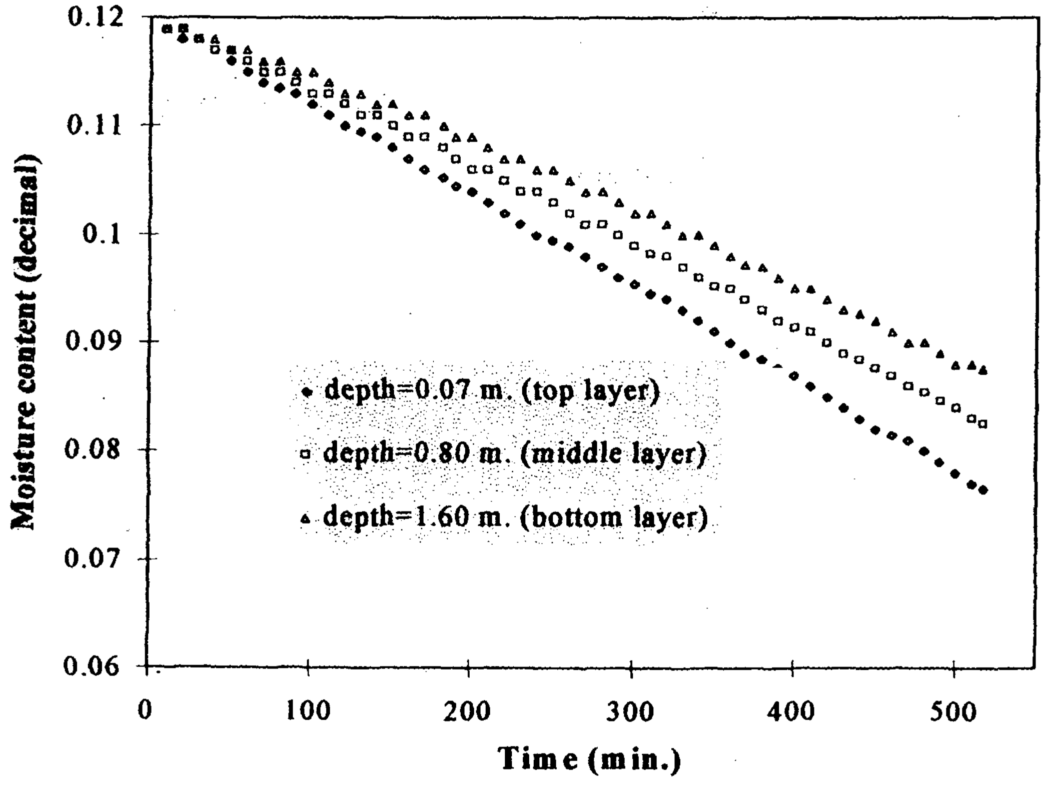
รูปที่ 5. อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเตา preheating และ อัตราการไหลของอากาศผสมที่ใช้ในเตา drying ที่อุณหภูมิเผา 800 °C, อัตราการไหลของอากาศสันดาป 1000 kg/h



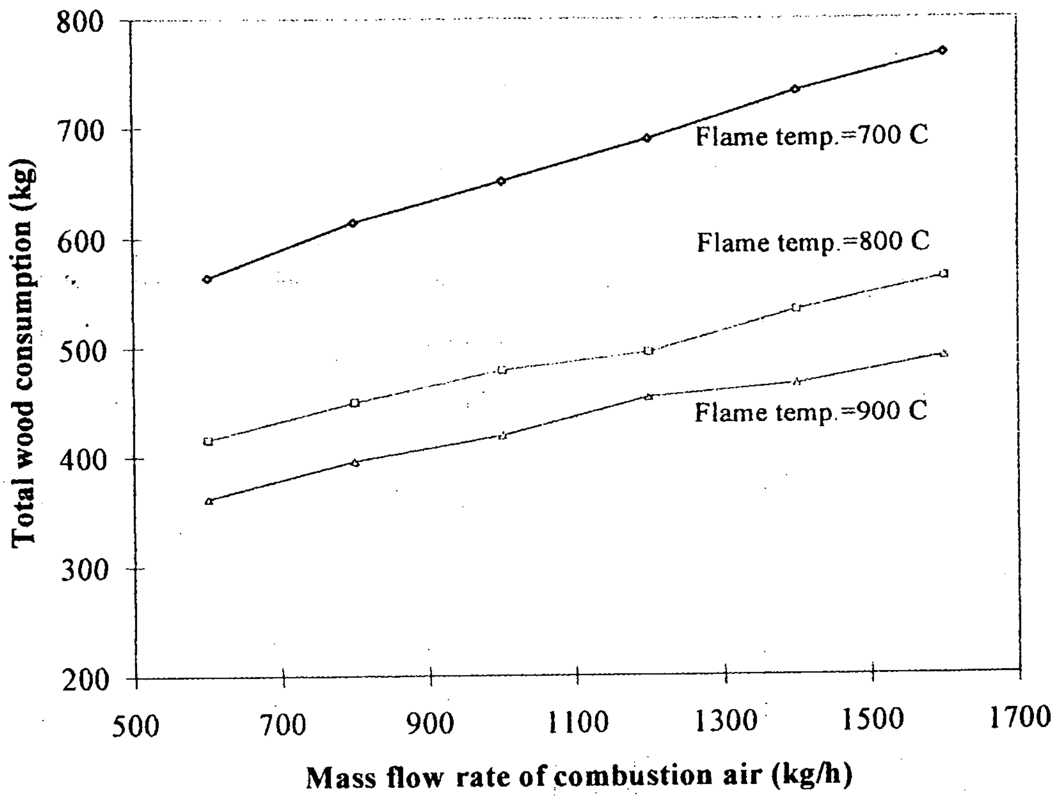
รูปที่. 6. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอิฐชั้นล่างสุดและอากาศที่ออกจากเตาแต่ละเตาที่อุณหภูมิเผา 800 °C, อัตราการไหลของอากาศสันดาป 1000 kg/h



รูปที่ 7. การกระจายอุณหภูมิของอิฐตามความสูงของกองอิฐในแต่ละเตาที่เวลาสิ้นสุดการเผา ที่อุณหภูมิเผา 800 °C, อัตราการไหลของอากาศสันดาป 1000 kg/h



รูปที่ 8. สัดส่วนความชื้นในอิฐ ที่เตา drying ที่อุณหภูมิเผา 800 °C, อัตราการไหลของอากาศสันดาป 1000 kg/h



รูปที่ 9. ปริมาณาการใช้ไม้ฟืนที่เงื่อนไขการเผาต่างๆกัน

ตารางที่ 1. ผลการจำลองแบบ

อุณหภูมิเผา (°C)	อัตราการใช้อากาศสันดาป (kg/h)	ปริมาณไม้ฟืนที่ใช้ทั้งหมด (kg)	อัตราการใช้ไม้ฟืนเฉลี่ย (kg/h)	พลังงานจำเพาะ (kJ/kg อิฐ)	เวลาที่ใช้เผา (min.)	กำลังงานที่ใช้ (kW)
700	600	564.4	26.9	1379.8	1260	129
	800	614.5	36.3	1502.3	1015	174
	1000	651.2	45.9	1592.0	852	220
	1200	689.6	55.4	1685.8	747	265
	1400	734.0	66.0	1794.4	667	316
	1600	768.4	74.7	1878.4	617	358
800	600	415.8	32.2	1016.5	774	154
	800	450.2	43.6	1100.6	620	209
	1000	478.9	55.0	1170.8	522	264
	1200	495.7	66.5	1211.7	447	319
	1400	533.6	78.1	1304.3	410	374
	1600	563.3	89.6	1377.1	377	429
900	600	361.8	38.4	884.4	566	184
	800	395.9	51.9	967.8	458	248
	1000	419.6	65.4	1025.7	385	313
	1200	454.7	79.1	1111.5	345	379
	1400	466.3	92.6	1139.0	302	443
	1600	491.2	106.4	1200.7	277	509