4. ระบบกักเก็บความร้อน

4.1 กล่าวนำ

โดยทั่วไปการมควันยางแผ่นสหกรณ์ ใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ไม้ยางพารา ซึ่งเป็นกิ่งไม้ที่เหลือจากการขายให้แก่โรงเลื่อย ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 6 นิ้ว แม้ว่าการใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ไม้ฟืนจะถูกกว่าการใช้ความร้อนจากเชื้อเพลิงอื่น แต่ก็ต้องดูแลการเผาไหม้อย่างใกล้ชิด ต้องคอยใส่ฟืนทุก ๆ 4 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ความร้อนสม่ำเสมอ และต้องระวังไม่ให้อุณหภูมิในห้องรมควันสูงเกินไป เพราะจะทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อยาง การต้องเติมไม้ฟืนบ่อย เป็นภาระต่อการควบคุม บางครั้งอาจไม่มีการใส่ไม้ฟืนหลังเที่ยงคืน ทำให้อุณหภูมิในห้องรมลดลงและต้องใช้เวลาการรมควันมากกว่าสามวัน

การวิจัยครั้งนี้จึงสนใจศึกษาระบบกักเก็บความร้อน สำหรับช่วยรักษาอุณหภูมิในห้องรมควันเมื่อไม่มีการเผาไหม้ฟืนในช่วงวิกฤติ เช่น ช่วงหลังเที่ยงคืน และเพื่อลดจำนวนครั้งในการใส่ไม้ฟืน ทำให้ในการเผาไหม้ไม้ฟืนแต่ละครั้งสามารถจ่ายความร้อนให้ห้องรมควันได้นานกว่าระบบเผาไหม้แบบทั่วไป คาดว่าจะช่วยสะดวกต่อการรักษาอุณหภูมิในห้องรมควันยางแผ่น

ระบบกักเก็บความร้อน (Heat storage system) อาศัยวัสดุตัวกลางในการเก็บกักความร้อน ซึ่งจะเก็บความร้อนในช่วงที่มีอุณหภูมิสูงในขณะมีการเผาไหม้ หรือจากการได้รับพลังงานความร้อนจากแหล่งอื่น และวัสดุจะคายความร้อนออกในช่วงที่ไม่มีการเผาไหม้ หรือช่วงที่อุณหภูมิข้างเคียงต่ำกว่าวัสดุเก็บกักความร้อน โดยทั่วไปการเก็บกักความร้อนมีสองวิธี คือ เก็บกักในรูปของความร้อนสัมผัส (sensible heat storage system) และเก็บกักในรูปของความร้อนแฝง (latent heat storage system)

โครงการวิจัยนี้เลือกใช้วิธีกักเก็บความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส เนื่องจากเป็นวิธีที่ติดตั้งได้ง่าย และมีราคาถูกกว่า เมื่อเทียบกับการเก็บกักในรูปของความร้อนแฝง วิธีนี้ใช้มากในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ความสามารถในการเก็บกักความร้อนมีค่าขึ้นกับค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุที่เลือกใช้ ดังในตารางที่ 4.1 การเลือกใช้วัสดุสำหรับกักเก็บความร้อนนั้น จะพิจารณาจากราคา หาซื้อได้ง่าย และค่าการกักเก็บความร้อนต่อหน่วยปริมาตร (ความหนาแน่น × ความจุความร้อนจำเพาะของสาร) ที่มีค่าสูง

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้เลือกใช้อิฐเป็นวัสดุเก็บกักความร้อน แม้ว่าจะมีค่าการเก็บกักความร้อนต่อหน่วยปริมาตรต่ำกว่าหินเกือบเท่าตัว โดยอิฐมีค่าการเก็บกักความร้อน 1281 kJ/m^3-K เนื่องจากอิฐเป็นวัสดุก่อสร้าง ที่หาซื้อและติดตั้งได้ง่ายกว่าหิน และอิฐมีรูปร่างสม่ำเสมอ ทำให้ง่ายต่อการจัดเรียงเป็นกองในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งยอมให้อากาศไหลผ่านได้สะดวก

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบกักเก็บความร้อน

ชนิดของวัสดุ	ρ (kg/m^3)	C_p (kJ/kg-K)	ρC_p kJ/m^3-K
คอนกรีต	2250	0.65	1462
อิฐ	1525	0.84	1281
หิน	3000	0.88	2640
น้ำ	1000	4.19	4190
เหล็ก	7800	0.50	3900
น้ำ : เอทเธอลีนไกลคอล (50:50)	1050	3.47	3644

ในการเก็บกักความร้อนด้วยอิฐ จะคำนวณหาปริมาณความร้อนได้ดังนี้

$$Q = mc_p\Delta T \tag{4.1}$$

เมื่อ Q = ปริมาณพลังงานความร้อนในวัสดุกักเก็บ, J

m = มวลของวัสดุกักเก็บความร้อน, kg

c_p = ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ, J/kg-K

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิของวัสดุกักเก็บความร้อน

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบกักเก็บความร้อน คำนวณได้จากสมการ

$$\eta = \frac{m_w c_p \Delta T}{m_{wood}(HV)_{wood}} \times 100\% \tag{4.2}$$

เมื่อ m_w = มวลของน้ำที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, kg

c_p = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, kJ/kg

ΔT = ผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน,°C

m_{wood} = มวลของไม้ฟืนที่ใช้ทั้งหมด, kg

$(HV)_{wood}$ = ค่าความร้อนของไม้ฟืน, kJ/kg ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความชื้น ดังในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความร้อนของไม้ฟืนตามสัดส่วนความชื้น (From : Proceeding of European-Asean Conference on Combustion of Solids and Treatment of Products, 1995. pp. E-30)

ความชื้น (% dry basis)	ค่าความร้อน (kJ/kg)
11.1	16,240
17.6	15,200
25.0	14,100
33.3	13,100
42.8	12,050
53.8	11,000
66.6	9,960
81.8	8,910
100.0	7,870
122.2	6,450
150.0	5,360
185.7	4,270
233.3	3,180
300.0	2,090

การคำนวณค่าความชื้นฐานแห้ง (MC_{db}) ของไม้ฟืน ในการทดสอบสมรรถนะของระบบกักเก็บความร้อน จำเป็นต้องคำนวณค่าความชื้นฐานแห้งของไม้ฟืน เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ การหาค่าความชื้นฐานแห้งของไม้ฟืน จะสุ่มตัวอย่างไม้ฟืน นำมาอบแห้งด้วยเครื่องอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิประมาณ 110-120°C ในระหว่างการอบแห้งจะนำชิ้นไม้ฟืนตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักเป็นระยะ จนกระทั่งน้ำหนักของไม้ฟืนไม่เปลี่ยนแปลง จึงคำนวณหาค่าความชื้นฐานแห้งได้ดังนี้

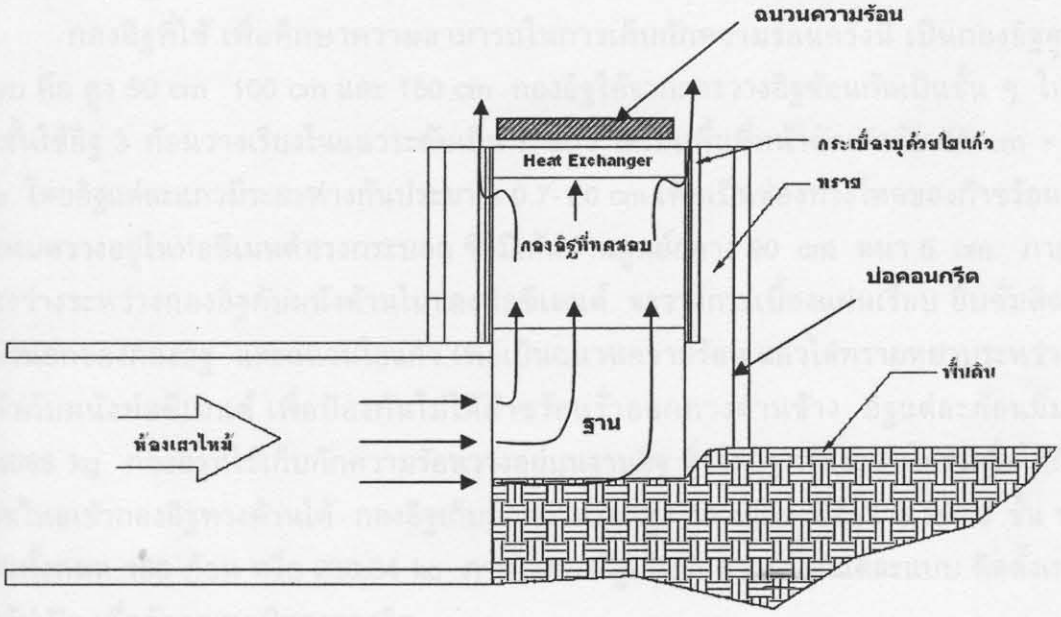
$$MC_{db} = \frac{M_W - M_D}{M_D} \times 100\% \qquad (4.3)$$

เมื่อ M_W = มวลเปียกของไม้

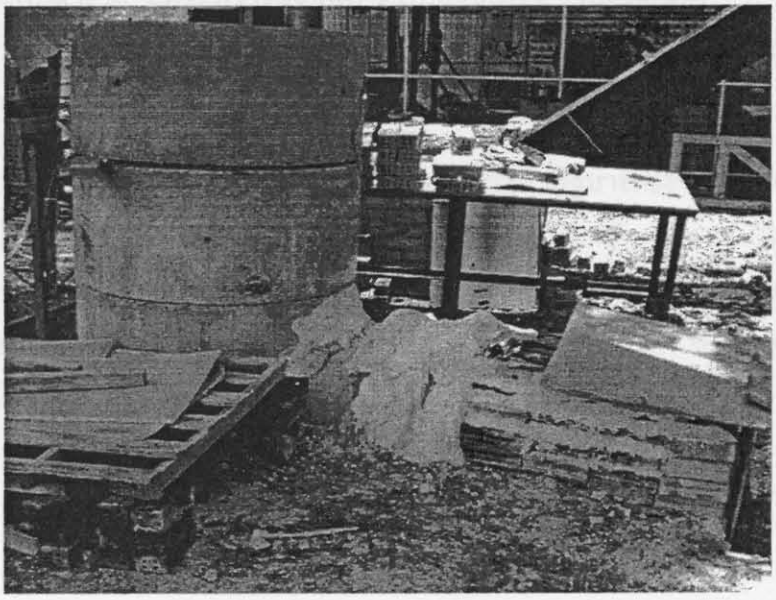
M_D = มวลแห้งของไม้

4.2 ชุดทดลองระบบเก็บกักความร้อน

ชุดทดลองระบบกักเก็บความร้อนประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ เตาเผา กองอิฐกักเก็บความร้อน และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ดังในรูปที่ 4.1 เป็นชุดทดลองที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมการเก็บกักความร้อนและอัตราการนำความร้อนมาใช้



รูปที่ 4.1 ชุดทดลองระบบกักเก็บความร้อน



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายแสดงลักษณะภายนอกของระบบกักเก็บความร้อน

(ก) เตาเผา

เตาเผาทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ไม้ฟืนให้ความร้อนแก่กองอิฐ ทำจากท่อคอนกรีตกลวง มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 70 ซม. หนา 10 ซม. ยาว 150 ซม. มีประตูทำจากแผ่นโลหะกลม การติดตั้งเตาเผา

(ช) กองอิฐกักเก็บความร้อน

กองอิฐที่ใช้ เพื่อศึกษาความสามารถในการเก็บกักความร้อนครั้งนี้ เป็นกองอิฐสูง 3 แบบ คือ สูง 50 cm 100 cm และ 150 cm กองอิฐได้จากการวางอิฐซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ในแต่ละชั้นใช้อิฐ 3 ก้อนวางเรียงในแนวระดับเป็น 7 แถว ได้เป็นพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 60 cm × 60 cm โดยอิฐแต่ละแถวมีระยะห่างกันประมาณ 0.7-1.0 cm เพื่อเป็นช่องทางไหลของก๊าซร้อน อิฐทั้งหมดวางอยู่ในท่อซีเมนต์ทรงกระบอก ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 cm หนา 5 cm ภายในช่องว่างระหว่างกองอิฐกับผนังด้านในของท่อซีเมนต์ จะวางกระเบื้องแผ่นเรียบ ยิบซั่มติดกับผนังนอกของกองอิฐ และฉนวนใยแก้ว เพื่อเป็นฉนวนความร้อน แล้วใส่ทรายหยาบระหว่างใยแก้วกับผนังท่อซีเมนต์ เพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซร้อนรั่วออกทางด้านข้าง อิฐแต่ละก้อนมีมวล 1.4068 kg กองอิฐที่ใช้เก็บกักความร้อนวางอยู่บนฐานอิฐ ซึ่งจัดวางเรียงแบบโปร่งเพื่อให้ก๊าซร้อนไหลเข้ากองอิฐทางด้านใต้ กองอิฐเก็บกักความร้อนสูง 50 cm จะมีอิฐวางเรียง 8 ชั้น รวมเป็นทั้งหมด 168 ก้อน หรือ 236.34 kg ภายในกองอิฐเก็บกักความร้อนแต่ละแบบ ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล เพื่อวัดอุณหภูมิของกองอิฐ

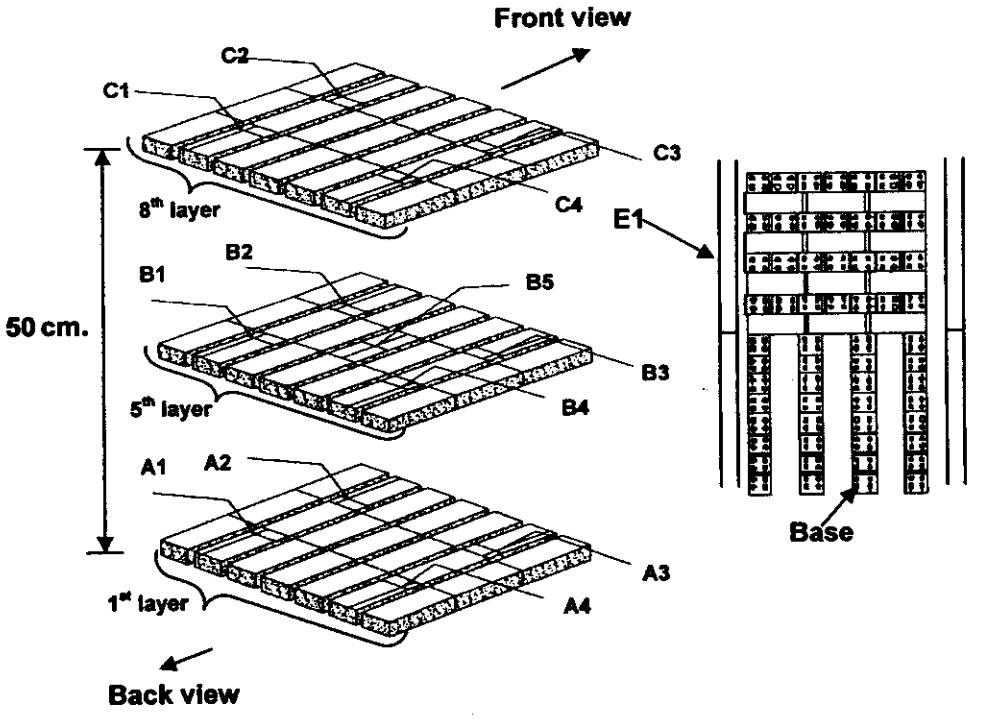
สำหรับกองอิฐสูง 50 cm ดังในรูปที่ 4.3 ได้ติดตั้งตัววัดอุณหภูมิ 3 ระดับ โดยมีตำแหน่งวัดอุณหภูมิ ดังนี้

(1) ที่ระดับล่าง A อยู่ระหว่างอิฐชั้นที่ 1 กับอิฐชั้นที่ 2 วัดอุณหภูมิ 4 ตำแหน่ง (A1-A4)

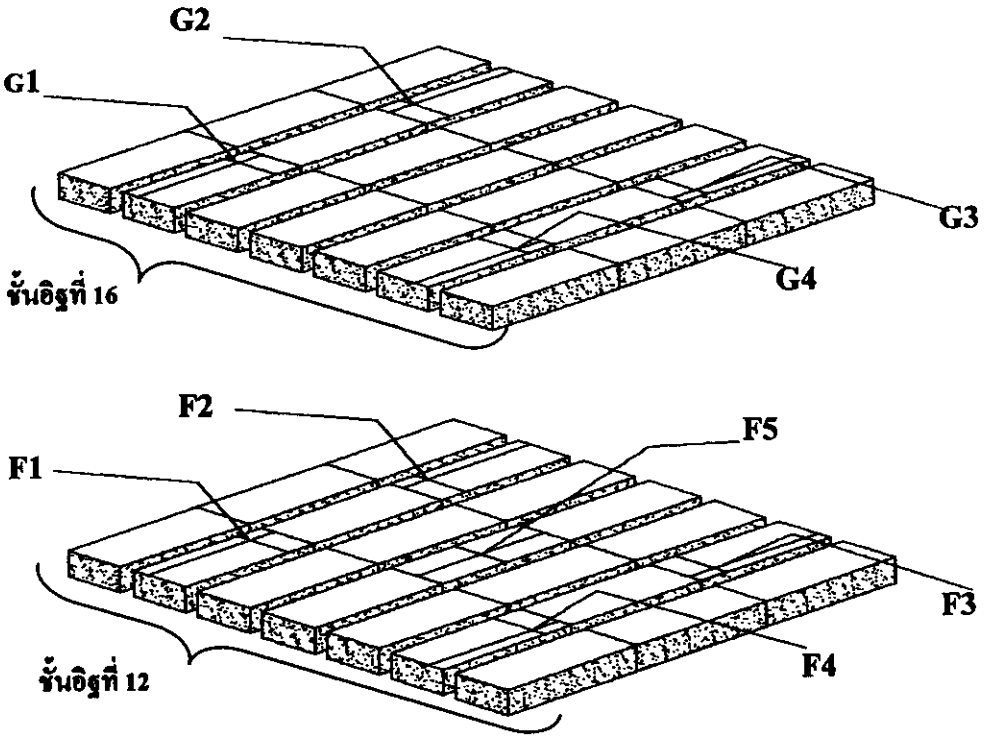
(2) ที่ระดับกลาง B อยู่ระหว่างอิฐชั้นที่ 5 กับชั้นที่ 6 วัดอุณหภูมิ 5 ตำแหน่ง (B1-B5)

(3) ที่ระดับบน C อยู่บนอิฐชั้นที่ 8 วัดอุณหภูมิ 4 ตำแหน่ง (C1-C4)

สำหรับกองอิฐสูง 100 cm ซึ่งเป็นกองอิฐจากการนำอิฐมาเรียงซ้อน บนกองอิฐ 50 cm เดิม เพิ่มอีกแปดชั้นหรือ 168 ก้อน รวมแล้วมีอิฐทั้งหมด 16 ชั้น จำนวน 336 ก้อน มีมวลเท่ากับ 472.68 kg เพิ่มตำแหน่งวัดอุณหภูมิในกองอิฐอีก 9 ตำแหน่ง ที่สองระดับ คือ ที่ระหว่างอิฐชั้นที่ 12 กับชั้นที่ 13 จำนวน 5 ตำแหน่ง (F1-F5) และที่บนอิฐชั้นที่ 16 จำนวน 4 ตำแหน่ง (G1-G4) ดังในรูปที่ 4.4

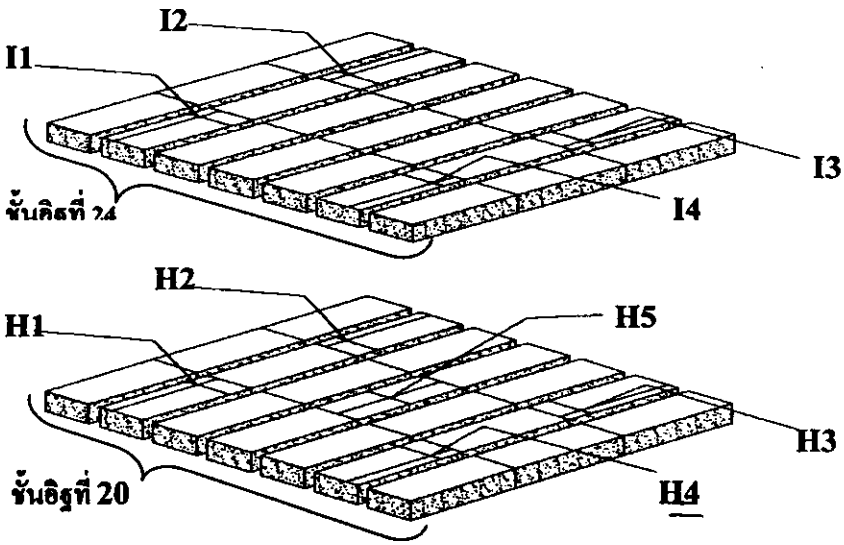


รูปที่ 4.3 ลักษณะกองอิฐและตำแหน่งวัดอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิบนอิฐชั้นที่ 12 และ 16

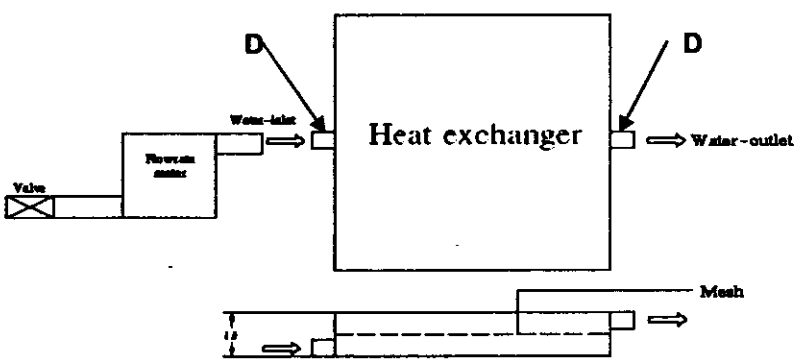
สำหรับกองอิฐสูง 150 cm ซึ่งนำอิฐมาเรียงซ้อนบนกองอิฐสูง 100 cm เพิ่มอีก 168 ก้อน รวมเป็นอิฐทั้งหมด 24 ชั้น จำนวน 504 ก้อน มีมวลเท่ากับ 709.03 kg มีตำแหน่งวัดอุณหภูมิเพิ่มอีก 9 ตำแหน่ง ที่สองระดับ คือ ที่ระหว่างอิฐชั้นที่ 20 กับชั้นที่ 21 จำนวน 5 ตำแหน่ง (H1-H5) และที่บนอิฐชั้นที่ 24 ติดกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จำนวน 4 ตำแหน่ง (I1-I4) ดังในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิในกองอิฐ บนอิฐชั้นที่ 20 และ 24

(ค) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ได้ออกแบบเป็นกล่องโลหะ ซึ่งมีขนาด 60 cm × 60 cm x 10 cm ดังในรูปที่ 4.6 มีท่อน้ำไหลเข้าและท่อน้ำไหลออก ซึ่งต่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm โดยน้ำเย็นไหลเข้าด้านล่างและไหลออกด้านบน ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความหนาของกล่องจะติดตั้งแผ่นตะแกรงโลหะ เพื่อกระจายการไหลของน้ำ



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาความสามารถในการดึงความร้อนจากกองอิฐมาใช้ มีเทอร์โมคัปเปิลชนิด K สำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำเข้าและน้ำออก และมีเครื่องวัดอัตราการไหล นอกจากนี้ได้ติดตั้งวาล์วควบคุมการไหลของน้ำ ในการทดลองจะวางอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนบนกองอิฐ ด้านบนปิดด้วยฉนวนความร้อนใยแก้ว ดังนั้นความร้อนจากกองอิฐจะถูกถ่ายโอนให้แก่น้ำในอุปกรณ์ ทั้งหมดผ่านทางผนัง

กำลังการถ่ายโอนความร้อนจากกองอิฐ คำนวณได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{useful} = \dot{m}_w c_p \Delta T \qquad (4.4)$$
$$= \rho \dot{V} c_p \Delta T$$

โดยที่ $\dot{Q}_{useful}$ = กำลังในการถ่ายโอนความร้อนจากกองอิฐให้แก่น้ำ (W)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

c_p = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg-K)

$\dot{V}$ = อัตราการไหลของน้ำ (m^3/sec)

ΔT = ผลต่างอุณหภูมิของน้ำเข้าและออก จากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^\circ$C)

$\dot{m}_w$ = อัตราการไหลของน้ำ (kg/s)

เนื่องจาก $\rho \dot{V} c_p$ มีค่าคงที่ จึงคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จากผลต่างของอุณหภูมิ ของน้ำขณะไหลเข้า และอุณหภูมิของน้ำขณะไหลออก จากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

4.3 วิธีการทดลอง

การทดลองนี้เพื่อหาสมรรถนะของการเก็บกักความร้อนด้วยอิฐ โดยใช้กองอิฐ 3 แบบ คือ กองอิฐสูง 50 cm 100 cm และ 150 cm แต่ละกองมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน คือ 60 cm x 60 cm มีเดาเผาไม้ฟืนวางอยู่ด้านข้าง และมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนวางอยู่ด้านบนกองอิฐ ก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ไหลเข้าด้านใต้ของกองอิฐ ไหลผ่านรูเล็ก ๆ ในกองอิฐ แล้วไหลออกตามร่องในชั้นอิฐบนสุด โดยไหลออกทางด้านข้างของอิฐชั้นบนสุด

ขั้นตอนการทดลอง สำหรับกองอิฐทั้ง 3 แบบ เป็นดังนี้

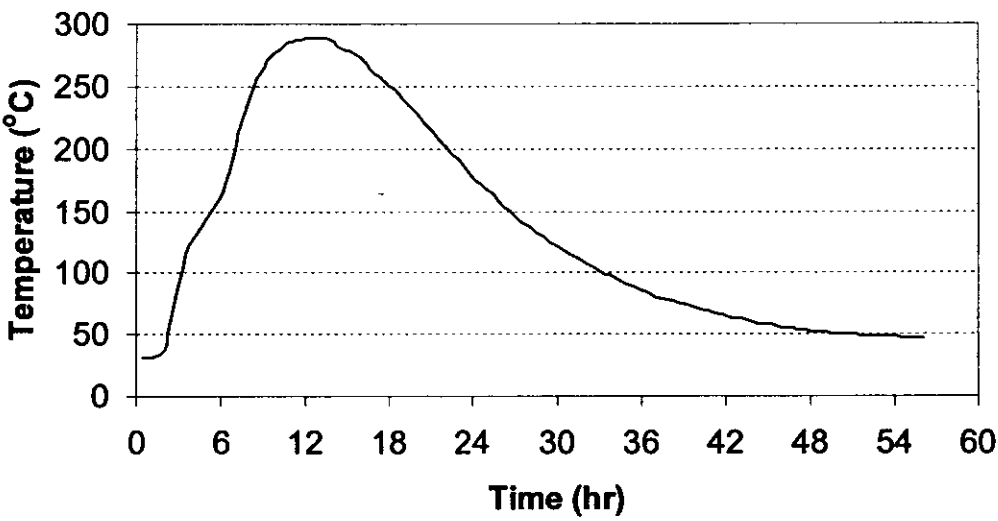
1. สุ่มตัวอย่างไม้ฟืนจากกอง นำมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิประมาณ 110-120 $^\circ$C เพื่อคำนวณหาค่าความชื้นไม้ฟืน (MC_{db})
2. ติดตั้งเครื่องบันทึกอุณหภูมิ DataTaker DT605 โดยต่อสายเทอร์โมคัปเปิลจากตำแหน่งวัดอุณหภูมิต่าง ๆ เข้าเครื่องบันทึก

3. เปิดวาล์วควบคุม ให้น้ำไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่อัตราการไหล 0.012618 kg/s
4. เริ่มการเผาไม้ฟืน หลังจากเผาไม้ฟืนได้ประมาณ 15-30 นาที จึงปิดบานประตูหน้าเตา
5. วัดความเร็วอากาศ ที่ไหลเข้าทางช่องเปิดด้านหน้าเตา
6. บันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 30 นาที หลังจากเริ่มเผาไม้ฟืน
7. การทดลองจะสิ้นสุดเมื่อผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออกจากระบบแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

4.4 ผลการทดลองการเก็บกักความร้อนของกองอิฐสูง 50 cm

ผลการทดลองครั้งที่ 1

ในการทดลองครั้งนี้ เผาไม้ฟืนครั้งเดียว 70 kg โดยไม้ฟืนมีความชื้นเท่ากับ 70.91% จากข้อมูลอุณหภูมิในกองอิฐทั้งหมด 13 จุด คือ ชั้นล่างสุด A 4 ตำแหน่ง ชั้นกลาง B 5 ตำแหน่ง และที่ชั้นบนสุด C 4 ตำแหน่ง พบว่า อิฐชั้นล่างสุดมีอุณหภูมิสูงกว่าอิฐชั้นอื่น โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 401°C และมีค่าสูงกว่าอิฐชั้นบนสุด 265°C ในรูปที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของกองอิฐทั้งกอง จะเห็นว่า กองอิฐมีอุณหภูมิเริ่มต้น 30°C สามารถเก็บกักความร้อนได้อุณหภูมิสูงถึง 289 °C โดยกองอิฐมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่า 100°C เป็นเวลานานถึง 30 ชั่วโมง คือ ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 3.5 ถึงชั่วโมงที่ 33.5 หลังจากมีการเผาไม้ฟืน และอุณหภูมิจะลดลงจากอุณหภูมิสูงสุดจนเหลืออุณหภูมิ 100°C ในระยะเวลา 20.5 ชั่วโมง หรือลดลงในอัตรา 9.26 °C/hr

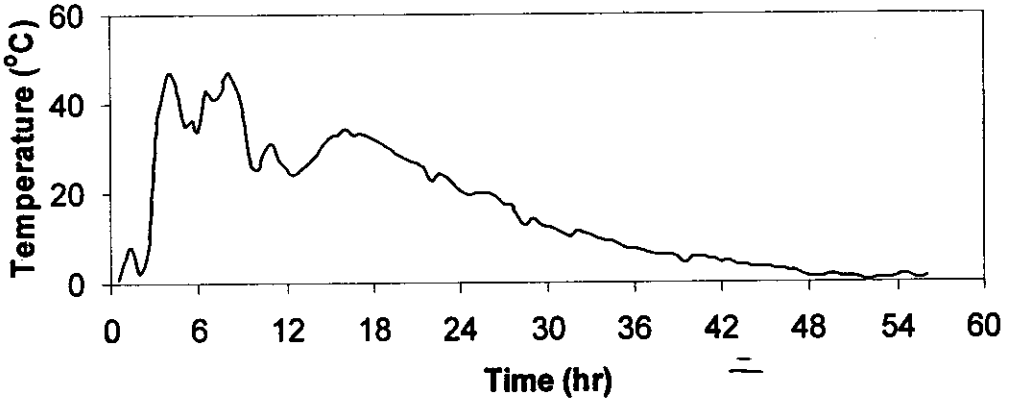


รูปที่ 4.7 อุณหภูมิเฉลี่ยของกองอิฐที่เวลาต่าง ๆ

ในการทดลองนี้ ไม้ฟืนที่ความชื้น 70.91% มีค่าความร้อนเท่ากับ 9,661.98 kJ/kg ดังนั้นเผาไม้ฟืน 70 kg ได้ปริมาณความร้อนเท่ากับ 676.34 MJ เนื่องจากกองอิฐมีอุณหภูมิเฉลี่ย

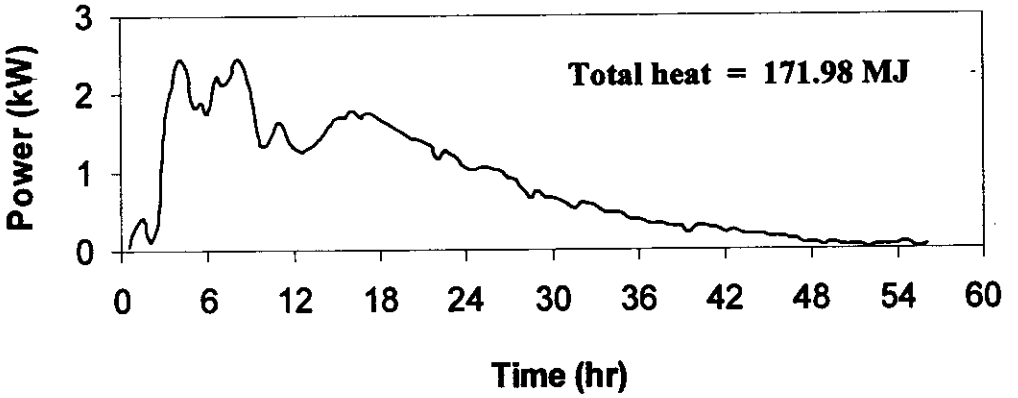
เริ่มต้น 30°C และมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 289°C สำหรับกองอิฐสูง 50 cm ซึ่งมีมวลเท่ากับ 236.34 kg ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่กักเก็บในกองอิฐ จะมีค่าเท่ากับ 236.34 x 0.84 x (289-30) = 51.42 MJ

อัตราการถ่ายโอนความร้อน หรือกำลังถ่ายโอนความร้อนจากกองอิฐ คือ อัตราการไหลของความร้อนให้แก่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่สภาวะผลต่างอุณหภูมิของน้ำเข้าและออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ดังในรูปที่ 4.8 ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดมีค่าประมาณ 47 °C ซึ่งคำนวณกำลังการถ่ายโอนสูงสุดได้เท่ากับ 2.48 kW



รูปที่ 4.8 ผลต่างอุณหภูมิของน้ำเข้าและน้ำออก จากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

กองอิฐสูง 50 cm หรือ 236.34 kg มีกำลังการถ่ายโอนความร้อนประมาณ 1-2 kW ในช่วงเวลาประมาณ 3-27 ชม. ซึ่งอยู่ในช่วงที่อุณหภูมิเฉลี่ยของกองอิฐเกิน 100°C ดังกราฟในรูปที่ 4.9

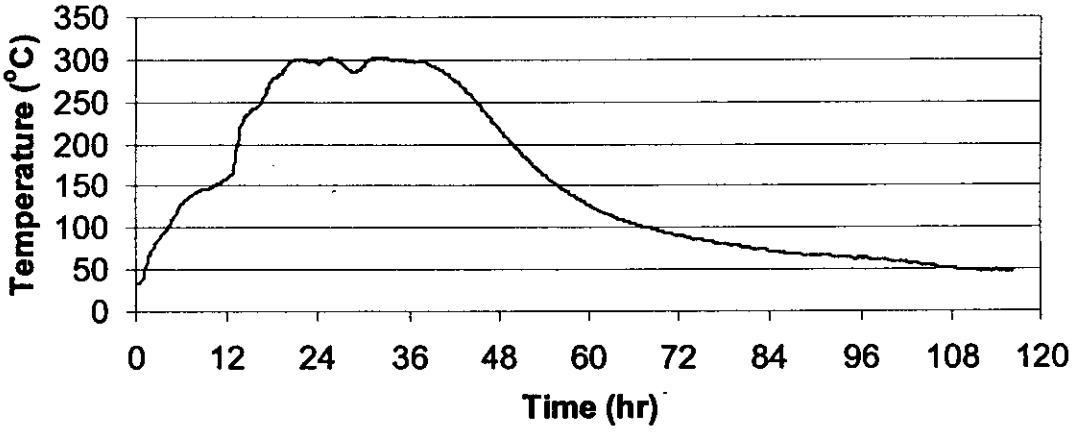


รูปที่ 4.9 กำลังการถ่ายโอนความร้อนจากกองอิฐ

จากกราฟกำลังในการถ่ายเทความร้อน ดังรูปที่ 4.9 สามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทจากกองอิฐให้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ได้เท่ากับ 171.98 MJ ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบกักเก็บมีค่าเท่ากับ 25.43%

ผลการทดลองครั้งที่ 2

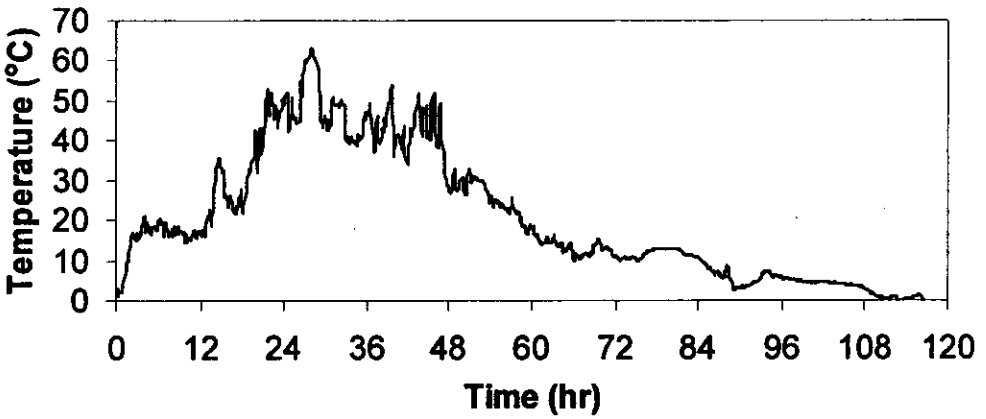
การทดลองครั้งนี้ ใส่ไม้ฟืนทุก ๆ 12 ชั่วโมง จำนวน 3 ครั้ง ๆ ละ 70 kg คือ ใส่ไม้ฟืนชั่วโมงที่ 0 12 และ 24 เนื่องจากต้องการศึกษาผลของการใส่ไม้ฟืนต่อเนื่อง ผลการทดลองพบว่า กองอิฐมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่า 100°C ได้เป็นระยะเวลา 66 ชั่วโมง คือ ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 4 ถึงชั่วโมงที่ 70 จากเริ่มทดลอง ซึ่งกองอิฐมีอุณหภูมิเริ่มต้น 33°C ใช้เวลา 4 ชั่วโมงในการเพิ่มอุณหภูมิจาก 33°C เป็น 100°C โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 16.7°C/hr ช่วง 12 ชั่วโมงแรกอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดในกองอิฐเท่ากับ 160°C อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดระหว่างชั่วโมงที่ 12-24 เท่ากับ 301°C และผลจากการเติมไม้ฟืนครั้งสุดท้ายอุณหภูมิสูงขึ้นอีก โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 302°C จะเห็นว่า มีแนวโน้มว่าอุณหภูมิของกองอิฐเพิ่มขึ้นทุกครั้งเมื่อมีการเติมไม้ฟืน หลังจากหยุดเติมฟืน อุณหภูมิในกองอิฐจะเริ่มลดลงในอัตรา 5.3°C/hr จนเหลืออุณหภูมิ 100°C ภายในเวลา 38 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 อุณหภูมิเฉลี่ยของกองอิฐ ที่เวลาต่าง ๆ เมื่อเผาฟืน 3 ครั้ง ๆ ละ 70 kg (อุณหภูมิสูงสุด 302 °C และอุณหภูมิเริ่มต้น 33°C)

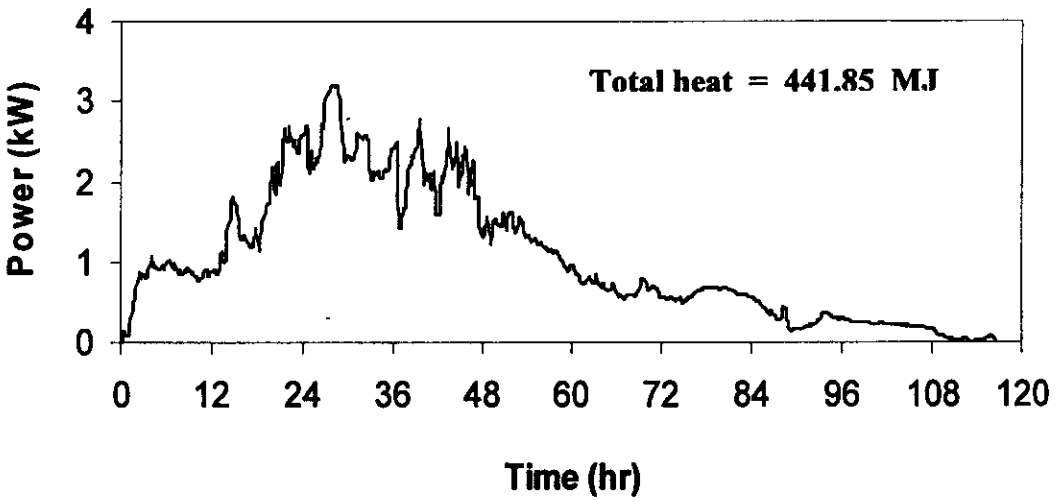
ในการทดลองนี้ ไม้ฟืนที่ใช้มีความชื้นเท่ากับ 115.92%ฐานแห้ง ซึ่งมีค่าความร้อนของไม้ฟืนเท่ากับ 6,851.76 kJ/kg การเผาไหม้ไม้ฟืนทั้งหมด 210 kg จะได้ปริมาณความร้อนทั้งหมดเท่ากับ 1,438.87 MJ อุณหภูมิเฉลี่ยของกองอิฐก่อนการเผาไม้ฟืนเท่ากับ 33°C อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดของกองอิฐเท่ากับ 302°C เพราะฉะนั้นปริมาณความร้อนทั้งหมดที่กักเก็บในกองอิฐเท่ากับ 236.34 x 0.84 x (302-33) = 53.40 MJ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีน้ำไหลผ่านในอัตรา 0.012618 kg/s มีผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกสูงสุดเท่ากับ 63.34 °C ดังในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลต่างอุณหภูมิของน้ำเข้าและออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

กำลังการถ่ายโอนความร้อนของกองอิฐ มีค่าเปลี่ยนแปลงดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.12 ซึ่งปริมาณความร้อนทั้งหมดที่กองอิฐถ่ายโอนให้น้ำซึ่งไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 441.85 MJ ดังนั้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบกักเก็บเท่ากับ 30.71%



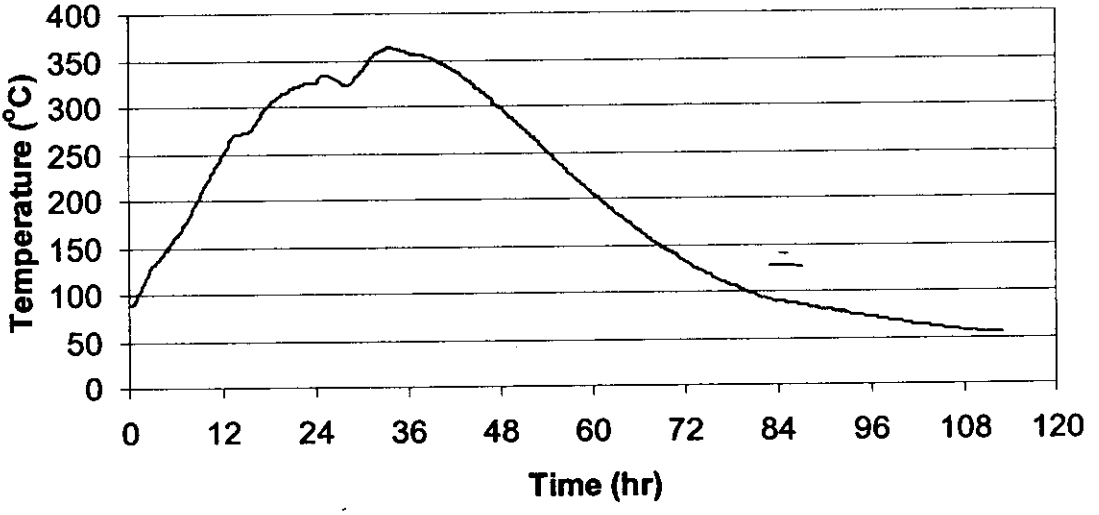
รูปที่ 4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังการถ่ายเทความร้อนจากกองอิฐเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

4.5 ผลการทดลองการเก็บกักความร้อนของกองอิฐสูง 100 cm

ในการทดลองนี้ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการกักเก็บความร้อนของกองอิฐที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่าเดิมคือ 60 cm x 60 cm มีความสูง 100 cm มีอิฐทั้งหมด 16 ชั้น จำนวน 336 ก้อน และมีมวลเท่ากับ 472.68 kg ในการทดลองนี้วัดอุณหภูมิในกองอิฐทั้งหมด 22 ตำแหน่ง

ผลการทดลองครั้งที่ 1

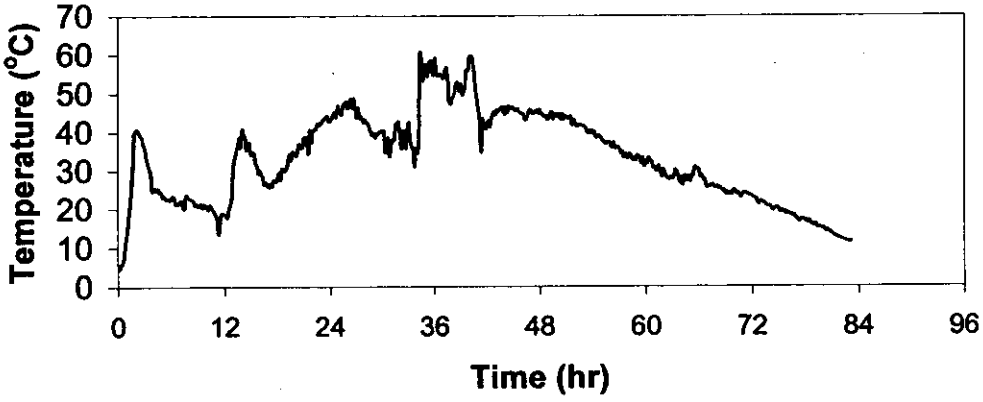
การทดลองครั้งที่ 1 ในระหว่างวันที่ 18 – 24 พฤษภาคม 2548 ซึ่งใช้เวลาในการทดลองทั้งหมด 141 ชั่วโมง ใช้ไม้ฟืนทั้งหมดประมาณ 180 กิโลกรัม โดยแบ่งใส่ไม้ฟืนทุก 12 ชั่วโมง 3 ครั้ง ๆ ละ 80 60 และ 40 กิโลกรัม ได้อุณหภูมิเฉลี่ยของกองอิฐดังในรูปที่ 4.13



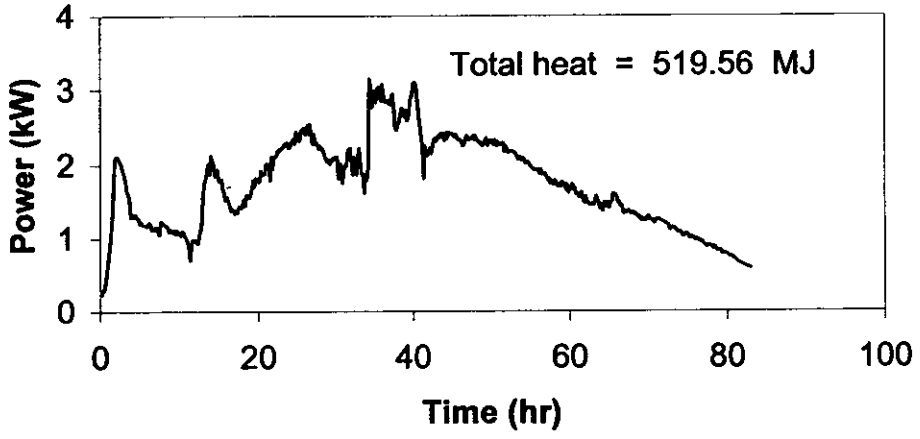
รูปที่ 4.13 อุณหภูมิเฉลี่ยของกองอิฐสูง 1.0 m ที่เวลาต่าง ๆ ของการทดลองครั้งที่ 1 ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุด 364°C และอุณหภูมิเริ่มต้น 90°C

ผลการทดลองพบว่า การใส่ฟืนต่อเนื่องสามครั้ง กองอิฐมีอุณหภูมิเฉลี่ยเกิน 100°C เป็นระยะเวลา 79 ชั่วโมง คือ ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 1 ถึงชั่วโมงที่ 80 ใช้เวลา 1.12 ชั่วโมงในการเพิ่มอุณหภูมิจาก 90°C เป็น 100°C โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 8.94 °C/hr การใส่ฟืนครั้งแรก 80 kg กองอิฐมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 248°C การเติมฟืนครั้งที่สอง 60 kg ในชั่วโมงที่ 12 ทำให้กองอิฐมีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 325°C และการเติมไม้ฟืนครั้งสุดท้าย 40 kg ทำให้กองอิฐมีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับเท่ากับ 364°C จะเห็นได้ว่า กองอิฐมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกครั้งที่มีการเติมไม้ฟืน แม้ว่าการเติมไม้ฟืนครั้งที่ 2 และ 3 จะน้อยกว่าครั้งแรกก็ตาม หลังจากหยุดเติมฟืน กองอิฐเริ่มมีอุณหภูมิลดลงในอัตรา 5.73 °C/hr และลดอุณหภูมิถึง 100°C ภายในระยะเวลา 46.17 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.13

ในการทดลองนี้ไม้ฟืนมีความชื้นเท่ากับ 51.54% ซึ่งมีค่าความร้อนเท่ากับ 11,216 kJ/kg ไม้ฟืนทั้งหมดที่ใช้เท่ากับ 180 kg เผาไหม้ได้ปริมาณความร้อนเท่ากับ 2,018.83 MJ อุณหภูมิเริ่มต้นเฉลี่ยของกองอิฐเท่ากับ 90°C อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดของกองอิฐเท่ากับ 364°C เพราะฉะนั้นปริมาณความร้อนทั้งหมดที่กักเก็บในกองอิฐ เท่ากับ 472.68 x 0.84 x (364-90) = 108.79 MJ



รูปที่ 4.14 กราฟผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออก จากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



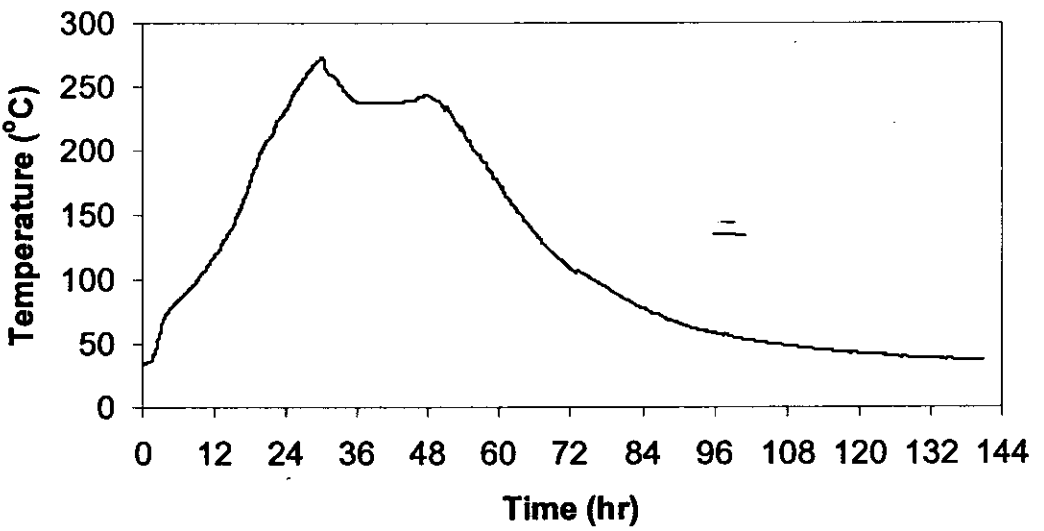
รูปที่ 4.15 กราฟการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของระบบเก็บกักความร้อนและพลังงานทั้งหมด ที่ระบบเก็บกักถ่ายเทให้กับระบบแลกเปลี่ยนความร้อน

นอกจากจะพิจารณาถึงปริมาณความร้อนที่กองอิฐกักเก็บแล้ว ยังได้พิจารณาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบด้วย โดยพิจารณาจากปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ได้จากการเผาไม้ฟืนและปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้รับ ซึ่งผลการทดลองพบว่า ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้รับเท่ากับ 728.83 MJ ดังนั้นค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบมีค่าประมาณ 36.1%

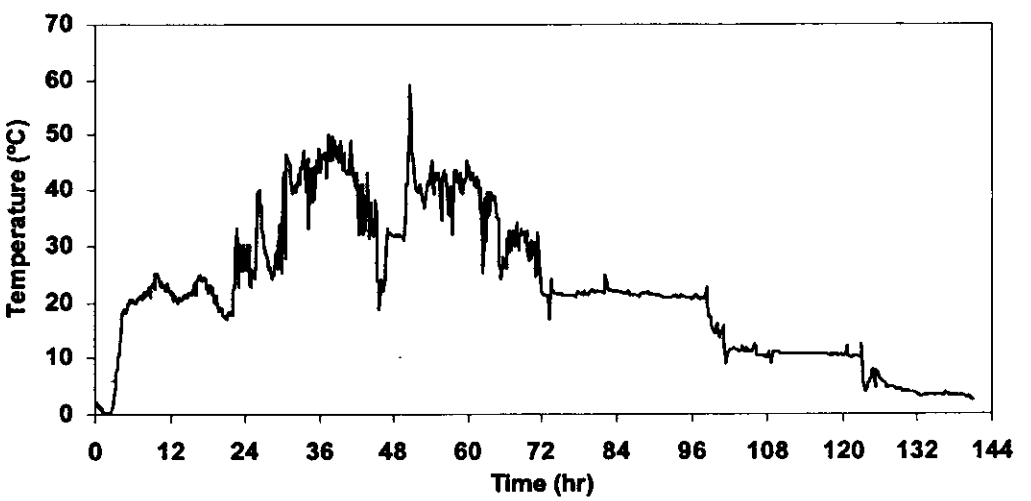
ผลการทดลองครั้งที่ 2

ในการทดลองนี้ ไม้ฟืนที่ใช้มีค่าความชื้นฐานแห้งเท่ากับ 73.22% ซึ่งจากตารางค่าความร้อนของไม้ฟืน และปริมาณไม้ฟืนที่ใช้ทั้งหมด 180 กิโลกรัมโดยแบ่งใส่ไม้ฟืนทุก 12 ชั่วโมง 3 ครั้ง ๆ ละ 80 60 และ 40 กิโลกรัม จะสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ให้กับระบบ ได้เท่ากับ 1,686.06 MJ และจากกราฟในรูปที่ 4.20 สามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ระบบเก็บกักปลดปล่อยให้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยการคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟเช่นเดียวกับการทดลองระดับที่ 1 ได้เท่ากับ 597.44 MJ ดังนั้น ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ โดยประมาณคือ 35.43%

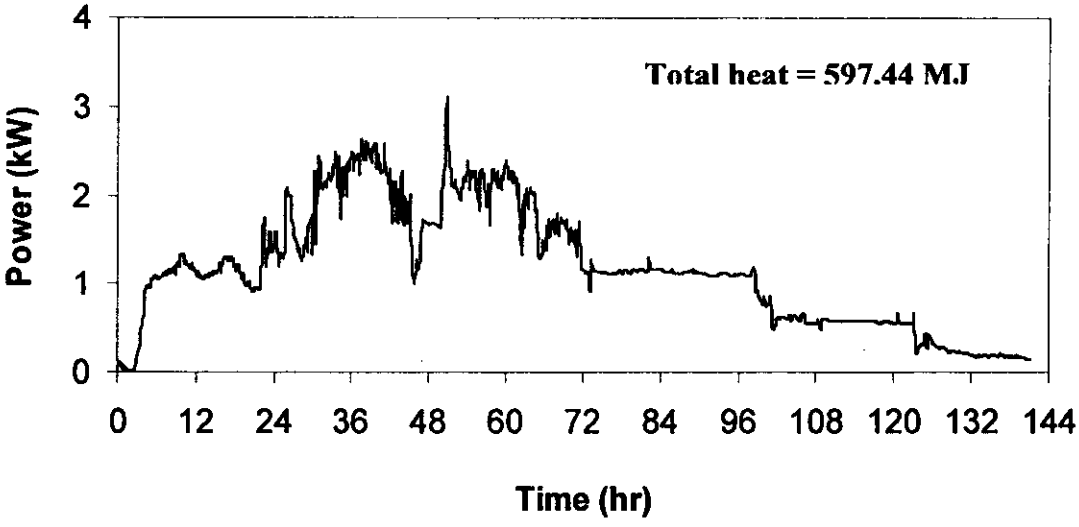
และจากกราฟอุณหภูมิเฉลี่ยดังรูปที่ 4.16 อุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 34 °C อุณหภูมิสูงสุด 273 °C ผลต่างอุณหภูมิของก๊าซร้อนเข้าและออกจากกองอิฐ จะมีค่าเท่ากับ 239 °C คำนวณปริมาณความร้อนที่ระบบเก็บกักไว้ได้เท่ากับ 472.68×0.84×239 = 94.90 MJ



รูปที่ 4.16 อุณหภูมิเฉลี่ยของกองอิฐสูง 100 cm ในการทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 4.19 ผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออก จากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



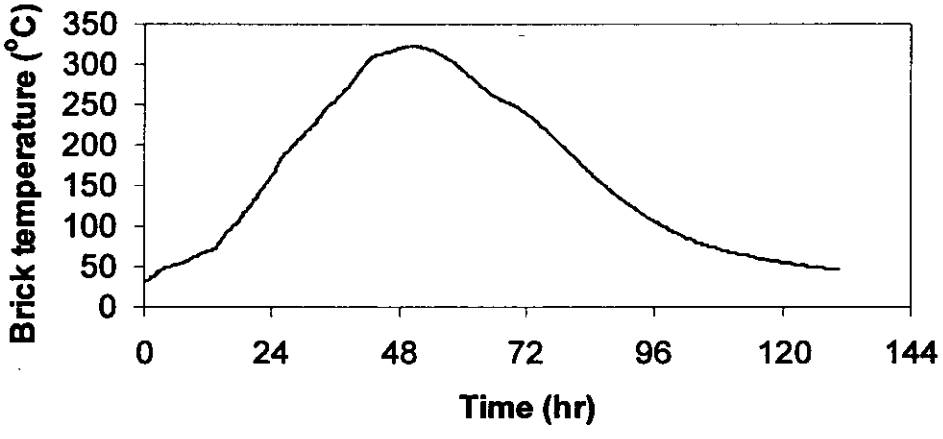
รูปที่ 4.20 กำลังของอิฐเก็บกักความร้อน ของกองอิฐสูง 100 cm

ผลการทดลองครั้งที่ 3

ในการทดลองครั้งที่ 3 นี้ ใช้ไม้ฟืนทั้งหมด 180 kg โดยแบ่งใส่ไม้ฟืนทุก 12 ชั่วโมง 3 ครั้ง ๆ ละ 80 60 และ 40 กิโลกรัม ไม้ฟืนมีความชื้นเท่ากับ 84.07%ฐานแห้ง ซึ่งมีค่าความร้อนเท่ากับ 8,780 kJ/kg ฉะนั้นปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ระบบได้รับจากการเผาไม้ฟืนมีค่าเท่ากับ 1,580.45 MJ อุณหภูมิเฉลี่ยในกองอิฐมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.23

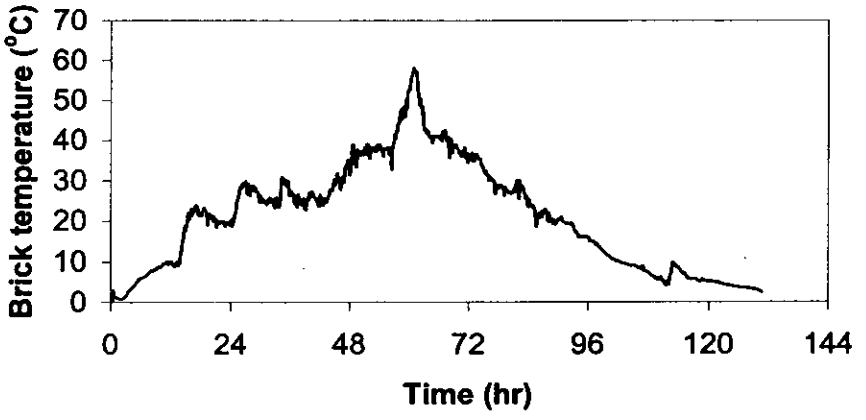
อุณหภูมิเฉลี่ยในกองอิฐเริ่มต้น เท่ากับ 31 °C อุณหภูมิสูงสุด 323 °C ผลต่างอุณหภูมิในกองอิฐเท่ากับ 292 °C เพราะฉะนั้น ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่กองอิฐกักเก็บเท่ากับ

$472.68 \times 0.84 \times 292 = 115.94$ MJ

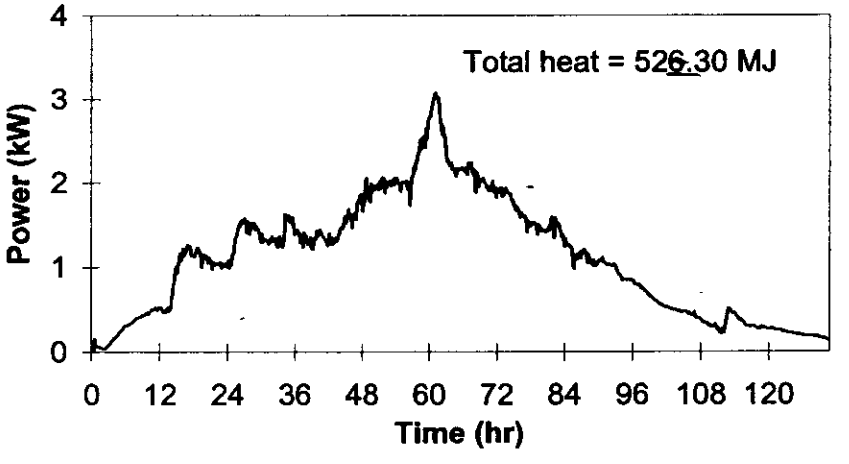


รูปที่ 4.23 อุณหภูมิเฉลี่ยในกองอิฐสูง 100 cm

จากกราฟกำลังความร้อนของอิฐ ดังรูปที่ 4.25 คำนวณปริมาณความร้อนที่ระบบถ่ายเทให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้เท่ากับ 526.30 MJ



รูปที่ 4.24 ผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและออก จากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับกองอิฐสูง 100 cm

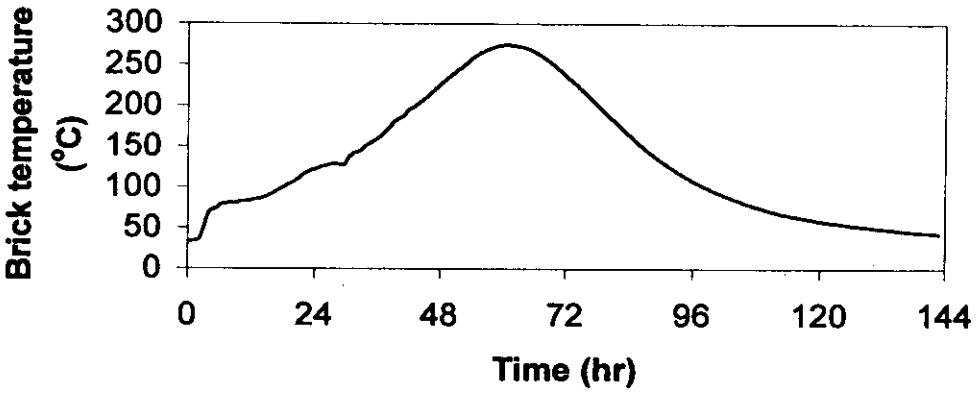


รูปที่ 4.25 กำลังความร้อนของอิฐเก็บกักความร้อนสำหรับกองอิฐสูง 100 cm

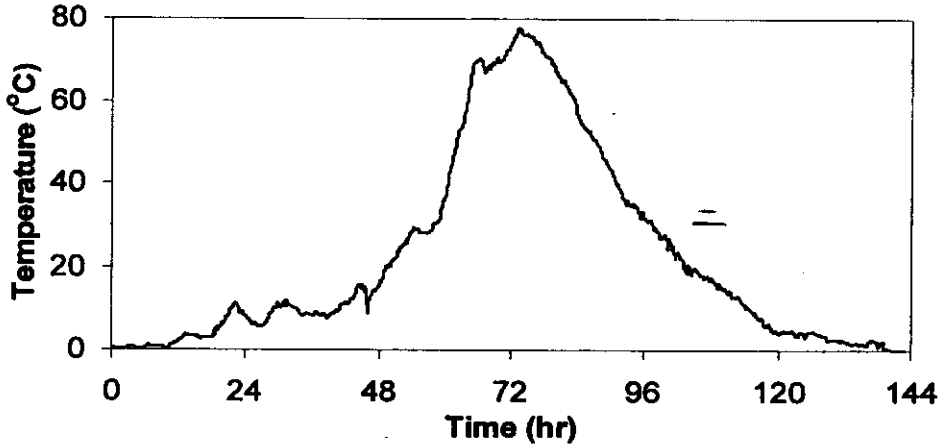
4.6 ผลการทดลองการเก็บกักความร้อนของกองอิฐสูง 150 cm

ในการทดลองนี้ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการกักเก็บความร้อนของกองอิฐที่มีพื้นที่หน้าตัด 60 cm x 60 cm มีความสูง 150 cm อิฐทั้งหมด 24 ชั้น จำนวน 504 ก้อน ซึ่งมีมวลเท่ากับ 709.03 kg โดยวัดอุณหภูมิในกองอิฐทั้งหมด 31 ตำแหน่ง ไม้ฟืนที่ใช้มีค่าความชื้นฐานแห้ง 43.79% ซึ่งมีค่าความร้อนเท่ากับ 11,955.5 kJ/kg ใช้ไม้ฟืนทั้งหมด 180 kg โดยแบ่งใส่ 3 ครั้ง ทุก ๆ 12 ชั่วโมง คือ 80 60 และ 40 kg ปริมาณความร้อนจากการเผาไม้ฟืนเท่ากับ 2,151.99 MJ น้ำที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ได้รับความร้อนเท่ากับ 608.88 MJ ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบเก็บกักมีค่าประมาณ 28.29%

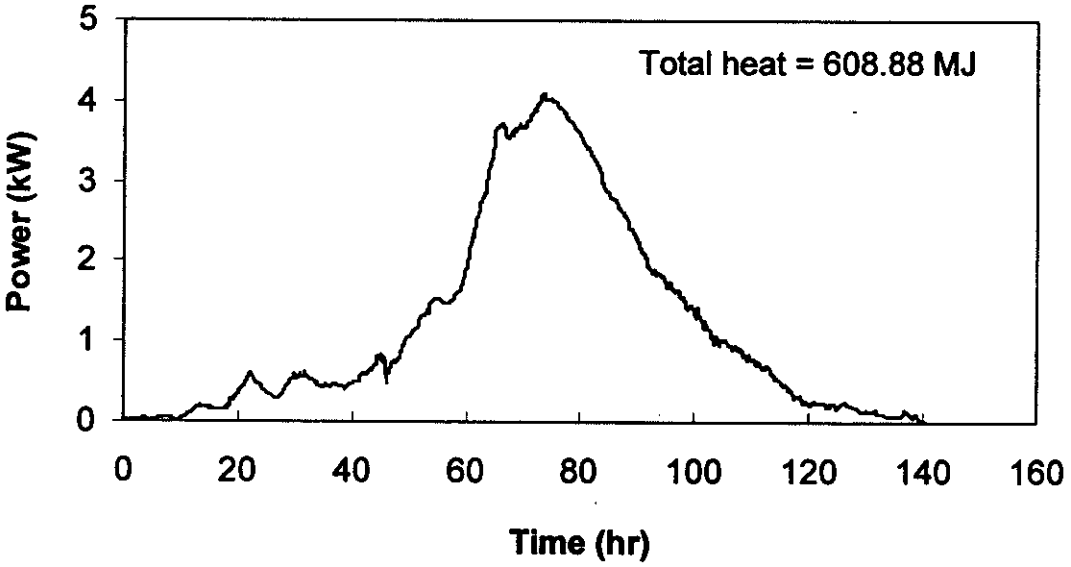
จากกราฟอุณหภูมิเฉลี่ยดังรูปที่ 4.26 อุณหภูมิเริ่มต้น 33 °C อุณหภูมิสูงสุด 275 °C
ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่กองอิฐกักเก็บเท่ากับ 709.03×0.84×(275-33) = 144.13 MJ



รูปที่ 4.26 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ย สำหรับกองอิฐสูง 150 cm



รูปที่ 4.27 ผลต่างอุณหภูมิของน้ำเข้าและออก สำหรับกองอิฐสูง 150 cm



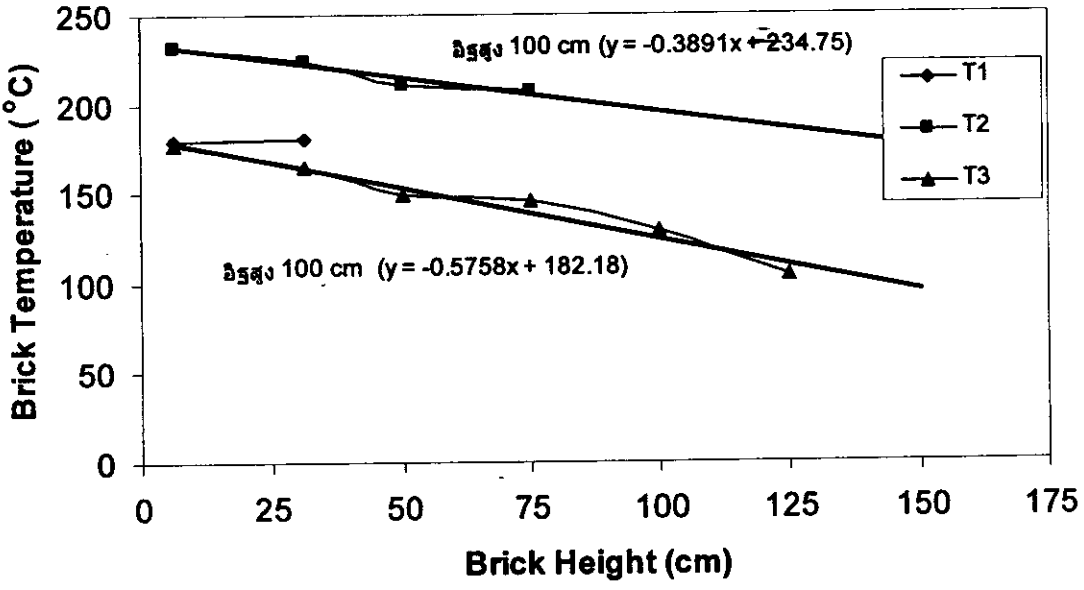
รูปที่ 4.28 กำลังความร้อนของอิฐเก็บกักความร้อน สำหรับกองอิฐสูง 150 cm

4.7 เปรียบเทียบการกักเก็บความร้อนของกองอิฐสามขนาด

จากการทดลองเก็บกักความร้อนด้วยกองอิฐ 3 ขนาด คือ กองอิฐสูง 50 cm 100 cm และ 150 cm โดยกองอิฐแต่ละแบบมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่ผิวบนเท่ากัน 0.36 m^2 ในการทดลองได้เผาไหม้ไม้ฟืน โดยใส่ไม้ฟืนสามครั้งในเวลาชั่วโมงที่ 0 12 และ 24 ใช้ไม้ฟืน 210 kg สำหรับกองอิฐ 50 cm และที่เหลือใช้ไม้ฟืน 180 kg โดยแบ่งใส่ในปริมาณใกล้เคียงกัน

ในการเปรียบเทียบจะเลือกพิจารณา 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิสูงสุดของกองอิฐ ระยะเวลาในการคายความร้อน ซึ่งเป็นช่วงที่จะนำความร้อนไปใช้ในการรมควันยางแผ่น และปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลของอิฐ

กองอิฐทั้งสามขนาดมีอุณหภูมิสูงสุดใกล้เคียงกัน 275-323 ^{o}C ในการเก็บกักความร้อน และมีอุณหภูมิเฉลี่ยในกองอิฐเปลี่ยนแปลงตามความสูงของอิฐ ดังในรูปที่ 4.29 จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกองอิฐ 100 cm (T = -0.39 H) กับ 150 cm (T = -0.58 H) พอจะประเมินสมการการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในกองอิฐได้ คือ T = -0.48 H เมื่อ T = อุณหภูมิเฉลี่ยในอิฐ (^{o}C) และ H = ความสูงของกองอิฐ (cm)



รูปที่ 4.29 อุณหภูมิเฉลี่ยกับความสูงของกองอิฐ

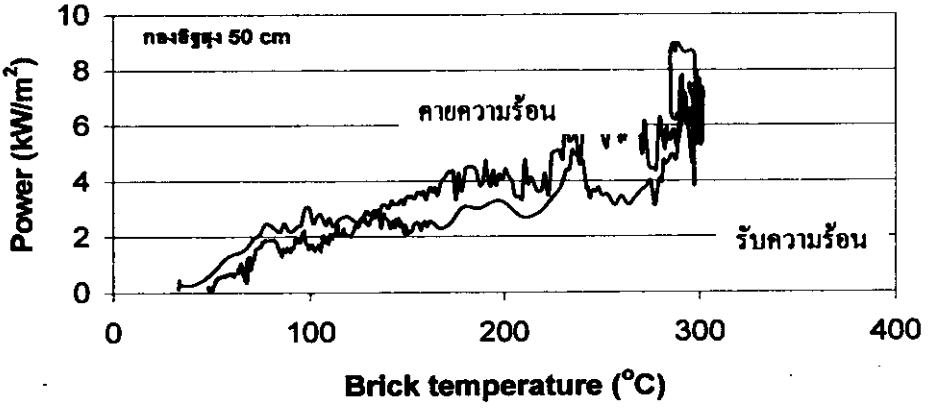
สำหรับระยะเวลาในการคายความร้อนและปริมาณความร้อนที่คายออก จะพิจารณาการคายความร้อนจากที่อุณหภูมิกองอิฐ 275 °C เท่ากันทั้งสามแบบ จนถึงอุณหภูมิ 60°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เท่ากับอุณหภูมิในห้องรมควัน และกองอิฐหมดศักยภาพในการถ่ายโอนความร้อนให้แก่การรมควันยางแผ่น พบว่า กองอิฐทั้งสามขนาดถ่ายโอนความร้อนในระยะเวลาใกล้เคียงกัน 53-59 ชั่วโมง ดังในตารางที่ 4.3 และถ่ายโอนความร้อนผ่านพื้นผิว 0.36 m^2 ด้านบนในปริมาณ 0.46-0.74 MJ/kg brick ด้วยกำลังการถ่ายโอนความร้อน 2-8 kW/m^2 ดังในรูปที่ 4.30

ซึ่งจะเห็นว่า กำลังในการถ่ายโอนความร้อนในช่วงรับความร้อนมีค่าน้อยกว่าช่วงคายความร้อน เนื่องจากอุณหภูมิด้านบนของกองอิฐในช่วงคายความร้อนสูงกว่าในช่วงรับความร้อน แต่ที่อุณหภูมิเดียวกัน กำลังในการถ่ายโอนความร้อนจะแตกต่างกันไม่มากสำหรับกองอิฐที่สูงไม่เกิน 100 cm กองอิฐทั้งสามแบบ คายความร้อนในระยะเวลาที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นการเลือกใช้ขนาดกองอิฐให้เหมาะสมกับการใช้รมควันยางแผ่น จึงขึ้นกับปริมาณการคายความร้อน ถ้าต้องการปริมาณความร้อนมากก็เลือกกองอิฐสูง

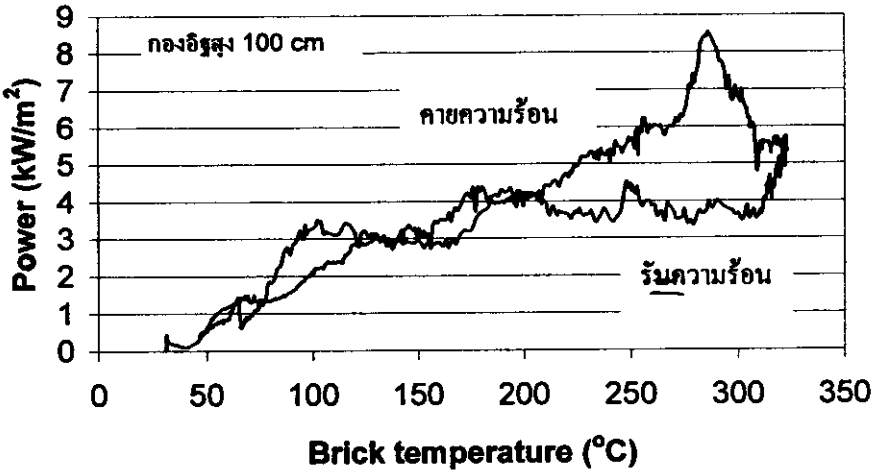
ตารางที่ 4.3 การคายความร้อนของอิฐจากอุณหภูมิ 275^{0}C

แบบกองอิฐ	มวลของอิฐ	อุณหภูมิสูงสุด	ระยะเวลาคายความร้อน (hr)		Q_{useful} (MJ/kg)	
	kg	°C	275-100°C	275-60°C	275-100°C	275-60°C
แบบสูง 50 cm	236.3	302	26	59	0.52	0.74
แบบสูง 100 cm	472.7	323	34	53	0.40	0.46
แบบสูง 150 cm	709.0	275	38	59	0.58	0.67

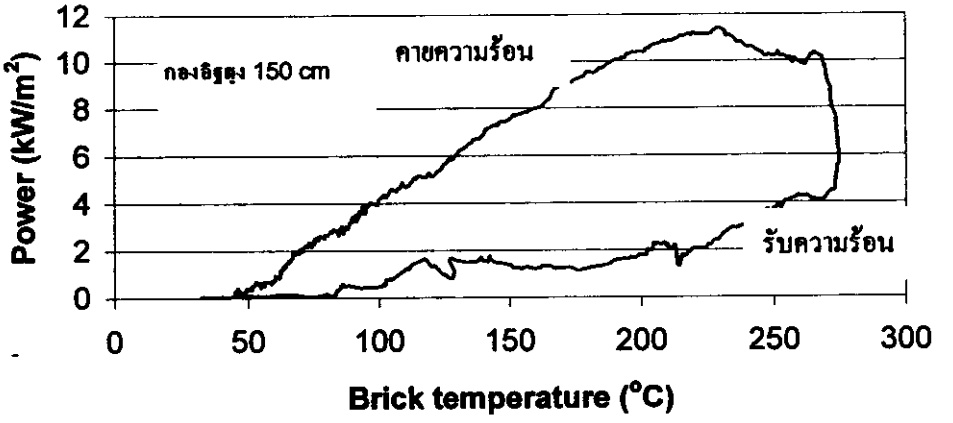
หมายเหตุ Q_{useful} = ปริมาณความร้อนที่สามารถนำไปใช้งานที่ผิวบนของกองอิฐ ซึ่งคำนวณจากปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ถ่ายโอนความร้อนได้รับ



(ก) กองอิฐสูง 50 cm



(ข) กองอิฐสูง 100 cm



(ค) กองอิฐสูง 150 cm

รูปที่ 4.30 กำลังการถ่ายโอนความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่อุณหภูมิอิฐต่าง ๆ