2. ทฤษฎีการอบแห้ง

2.1 กล่าวนำ

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยน้ำ ความร้อนที่ใช้เป็นความร้อนแฝงสำหรับการระเหยน้ำ ทั้งนี้ผลิตผลทางการเกษตรส่วนใหญ่จะมีความชื้นค่อนข้างสูงหลังการเก็บเกี่ยว ทำให้เก็บรักษาได้ไม่นาน การอบแห้งเป็นวิธีหนึ่งช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลิตผลได้เป็นระยะเวลายาวนานขึ้น ผลิตผลทางการเกษตรที่สำคัญๆ และต้องทำการอบแห้งได้แก่ ธัญพืชชนิดต่างๆ เช่น ข้าว ข้าวโพด เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่อิ่มต่างๆ เช่น สับปะรดแช่อิ่ม มะละกอแช่อิ่ม มะม่วงแช่อิ่ม เป็นต้น

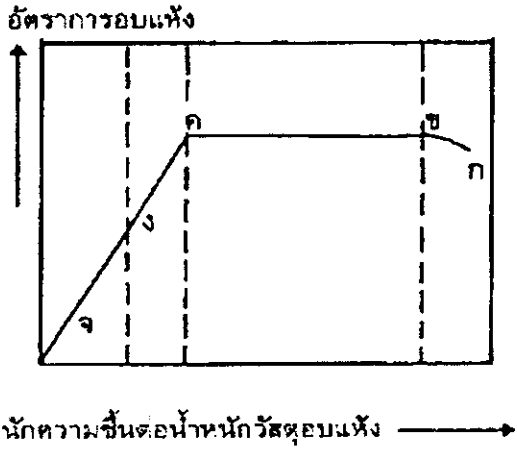
แสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากดวงอาทิตย์ ที่แผ่มาในรูปรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในแต่ละปีพลังงานแสงอาทิตย์ที่แผ่มาถึงนอกบรรยากาศโลกมีประมาณ 1.36 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ณ ความสูง 160 กิโลเมตรจากพื้นโลก ส่วนหนึ่งของพลังงานเหล่านี้จะสูญเสียก่อนเข้าสู่บรรยากาศโลกเนื่องจากการดูดซับของชั้นบรรยากาศและการสะท้อนกลับ ความเข้มสูงสุดที่สามารถผ่านเข้าสู่บรรยากาศได้ มีค่าประมาณ 1.2 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ณ. บริเวณเส้นศูนย์สูตร เวลาเที่ยง ซึ่งเทียบเท่ากับ 6-8 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน พลังงานแสงอาทิตย์มีให้ใช้มากมายไม่หมดสิ้น แสงอาทิตย์สามารถแปลงเป็นพลังงานความร้อนโดยแผงรับแสงอาทิตย์ หรือแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์ ในยุควิกฤติพลังงาน แสงอาทิตย์จึงมีบทบาทสำคัญมากขึ้น โดยเฉพาะใช้ในการอบแห้ง

สิ่งสำคัญสำหรับการอบแห้งหรือตากแห้งก็คือ การลดปริมาณความชื้น (moisture content) ของผลิตภัณฑ์ เพื่อป้องกันการเน่าเสียในช่วงเวลาหนึ่ง กระบวนการอบแห้งประกอบด้วย 2 กระบวนการที่สำคัญ คือ การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนสู่ผลิตภัณฑ์ และถ่ายเทมวลความชื้นออกจากภายในผลิตภัณฑ์มาที่ผิว และระเหยออกสู่อากาศภายนอก การเปลี่ยนแปลงความชื้น การแห้งของผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ที่เวลาต่างๆ ออกเป็น 3 ช่วงดังนี้

ช่วงที่ 1 ช่วงเริ่มต้น (Setting Down Period) เป็นช่วง ก-ข ในรูปที่ 2.1 ในช่วงนี้ผลิตภัณฑ์จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก น้ำที่ระเหยออกไปในช่วงนี้ คือ น้ำอิสระ ซึ่งไม่จับตัวกับโมเลกุลของวัสดุ การแห้งช่วงนี้เป็นอัตราการแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น

ช่วงที่ 2 ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (Constant Rate Period) เป็นช่วง ข-ค ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงเป็นเส้นตรงในแนวนอนเทียบกับเวลา เป็นช่วงที่อัตราการแห้งคงที่ น้ำที่ระเหยไปยังคงเป็นน้ำอิสระ เช่นเดียวกับในการแห้งช่วงแรก น้ำจะเคลื่อนตัวจากภายในตัวผลิตภัณฑ์มาที่ผิว เพื่อทดแทนน้ำที่ระเหยจากผิวสู่อากาศภายนอกอย่างพอดีตลอดเวลา ผิวของผลิตภัณฑ์จึงชุ่มด้วยน้ำอย่างสม่ำเสมอ ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการแห้งคงที่และมีค่าสูงที่สุด

ช่วงที่ 3 ช่วงอัตราการแห้งลดลง (Falling Rate Period) เป็นช่วง ค-ง เกิดขึ้นเมื่อค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ถึงจุดหนึ่งคือ ค่าความชื้นวิกฤต (Critical Moisture Content) หรือจุด ค การเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในออกมาได้ยาก จึงไม่สามารถทดแทนน้ำที่ระเหยออกจากผิวได้ เมื่อความชื้นลดลงถึงจุด จ ซึ่งเป็นจุดของความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) ซึ่งเป็นค่าจำกัดของความชื้นของวัสดุที่ยังคงมีอยู่ภายในเนื้อวัสดุค่าหนึ่ง ภายหลังจากได้ผ่านกระบวนการอบแห้งภายใต้อุณหภูมิและความชื้นของอากาศมีค่าหนึ่งค่า ดั้งนั้นในช่วงนี้อัตราการแห้งตัวของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง โดยมีตัวแปรที่ควบคุมอัตราเร็วในการทำแห้งผลิตภัณฑ์คือโครงสร้างภายในของตัวผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.1 อัตราการแห้งช่วงต่าง ๆ

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และอาจมีอิทธิพลของความเร็วลมด้วย โดยเฉพาะในช่วงที่มีอัตราการอบแห้งคงที่ หรือช่วงต่อกับช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ในช่วงอัตราการแห้งคงที่นี้ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุ จะทำให้ฟิล์มอากาศนิ่งมีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานของการไหลของความร้อนลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิวของวัสดุและของกระแสอากาศที่ไหลอย่างมีอิสระมากขึ้นด้วย เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น และเมื่อลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิ่มตัวที่ผิววัสดุและอัตราส่วนความชื้นของกระแสอากาศที่ไหลอย่างมีอิสระมีมากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลทำได้ดียิ่งขึ้น

ในช่วงอัตราการแห้งลดลง การถ่ายเทความร้อนและมวลจะไม่จำกัดอยู่เฉพาะที่ผิวเท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นภายในผิวและเนื้อของวัสดุด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลให้กับสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย เมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้เกิดความแตกต่าง

ระหว่างอัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้นและมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้นด้วย

ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความชื้นของอากาศแล้ว จะเป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลทำได้ดีขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมมีผลทำให้ความหนาของฟิล์มอากาศนิ่งมีค่าลดลง เป็นผลให้ความต้านทานลดลง เนื่องจากความต้านทานที่ฟิล์มอากาศมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับความต้านทานตัวอื่น ดังนั้นจึงไม่มีผลต่อการถ่ายเทศวามร้อนและมวลมากนัก

2.2 ลักษณะและประเภทของเครื่องอบแห้ง

ลักษณะการอบแห้งผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ (1) การอบแห้ง (Drying) ซึ่งผลิตผลถูกแสงแดดโดยตรง ทั้งตัวผลิตผลและพื้นตู้อบจะเป็นตัวดูดความร้อนจากแสงอาทิตย์ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะลอยตัวสูงขึ้นพาเอาไอน้ำออกไปจากผลิตผลนั้นและ (2) การขจัดน้ำ (Dehydration) ซึ่งเป็นการอบแห้งที่ผลิตผลไม่จำเป็นต้องถูกแสงแดดโดยตรง เพียงแต่ใช้แสงอาทิตย์ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น แล้วผ่านอากาศร้อนดังกล่าวไปยังผลิตผล วิธีการนี้จะช่วยป้องกันไม่ให้คุณภาพทางอาหารของผลิตผลเสื่อมคุณภาพลง เนื่องจากความร้อนจากแสงอาทิตย์

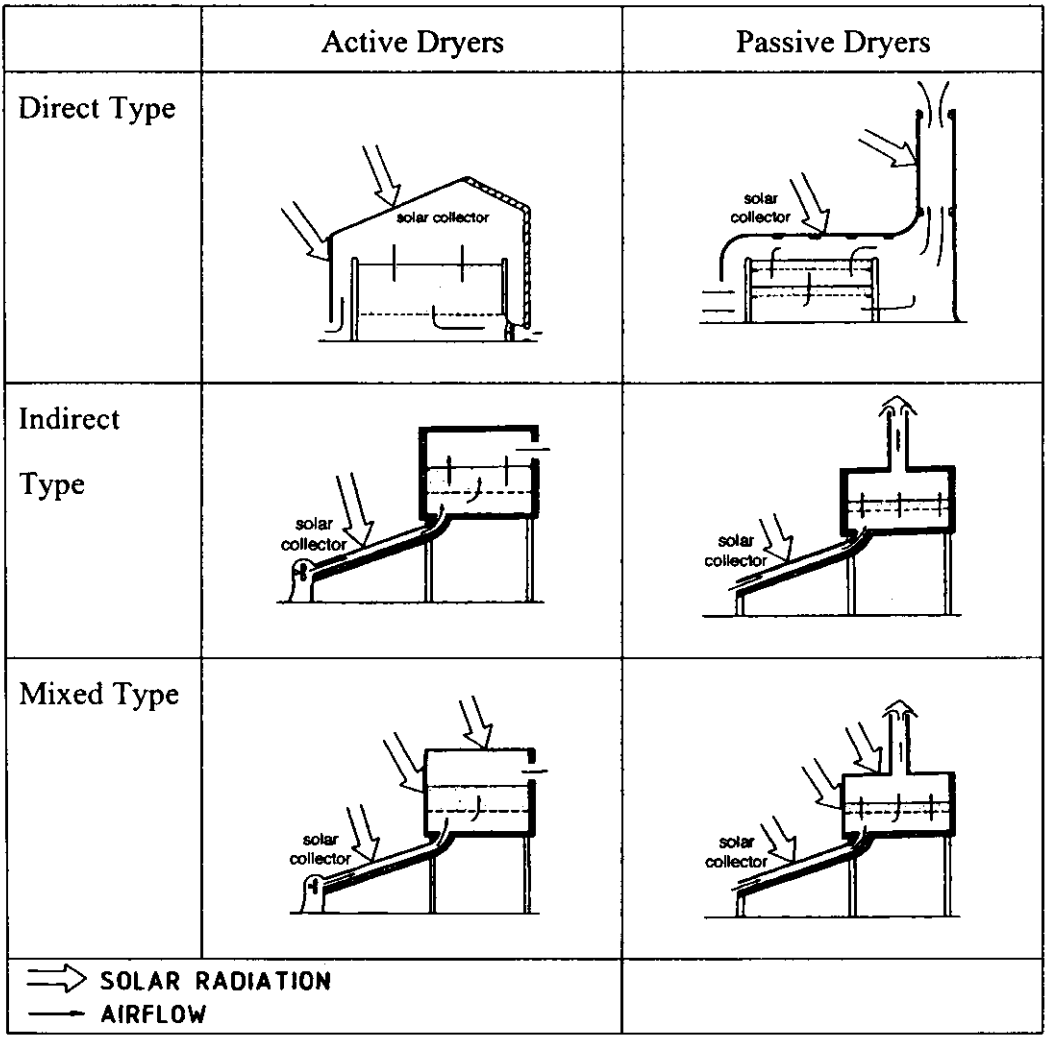
ระบบอบแห้งพลังงานอาทิตย์ จัดแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการให้ความร้อนและวิธีการนำความร้อนไปใช้ คือ (1) ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแอคทีฟ (Active solar-energy drying systems) ซึ่งใช้ลักษณะการพาความร้อนแบบบังคับ โดยมีพัดลมดูดหรือผลักอากาศเข้าสู่เครื่องอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 อากาศที่ไหลเข้าเครื่องอบจะได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ผ่านชุดรับความร้อน ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นกระจกหรือพลาสติกใส ซึ่งอยู่ด้านบนและแผ่นซึ่งทาสีดำวางด้านล่าง และมีอากาศไหลผ่านแผ่นทั้ง 2 นี้ อากาศได้รับความร้อนจะถูกบังคับให้ไหลผ่านผลิตภัณฑ์ ซึ่งวางอยู่ในเครื่องอบ อากาศที่ไหลผ่านผลิตภัณฑ์แล้วจะถูกระบายออกจากห้องอบ ข้อดีของระบบนี้ คืออากาศจะมีอุณหภูมิสูงช่วยให้การถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทความชื้นมีค่าสูงแต่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มสำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนพัดลม และ (2) ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาสซีฟ (Passive solar-energy drying systems) ในกรณีนี้จะคล้ายกับแบบแรกเพียงแต่การพาความร้อนจะเป็นแบบอิสระโดยไม่มีพัดลมช่วย แต่จะมีปล่องระบายช่วยให้การพาความร้อนดียิ่งขึ้น (ดูรูปที่ 2.1) ข้อดีของระบบนี้ คือไม่สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้า แต่การถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทความชื้นจะต่ำกว่าชนิดแอคทีฟ

จะเห็นได้ว่าระบบอบแห้งแต่ละชนิดยังสามารถแยกย่อยได้อีก 3 แบบตามลักษณะการออกแบบของระบบ ดังนี้

- แบบรับความร้อนโดยตรง (Direct type) ความร้อนจากแสงอาทิตย์จะตกกระทบโดยตรงบนผลิตภัณฑ์ ซึ่งวางอยู่ในเครื่องอบ

- แบบรับความร้อนโดยอ้อม (Indirect type) ความร้อนจะไม่ตกกระทบลงบนผลิตภัณฑ์ แต่จะตกกระทบลงบนชุดรับความร้อนจากนั้นอากาศร้อนจะไหลผ่านผลิตภัณฑ์ในตู้อบ
- แบบผสม (Mixed type) เป็นการผสมกันของแบบความร้อนโดยตรงและโดยอ้อม

ข้อดีและข้อเสียของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่าง ๆ พอจะสรุปได้ดังนี้ แบบรับแสงอาทิตย์โดยตรง ซึ่งเป็นแบบที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้มากที่สุด แต่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น สี วิตามิน เมื่อได้สัมผัสกับแสงอาทิตย์โดยตรง แบบรับความร้อนโดยอ้อม ซึ่งเป็นแบบที่ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ได้น้อยกว่าแบบแรก แต่ผลิตภัณฑ์ไม่เสียคุณภาพ และแบบผสม ซึ่งเป็นแบบที่อยู่ระหว่างกลางของทั้งสองแบบแรก แต่ต้นทุนเครื่องจะสูงกว่า



รูปที่ 2.2 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทต่าง ๆ

ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องอบแห้งใช้พลังงานจากการเผาไม้ฟืน โดยไม้ที่นำมาใช้เป็นไม้ฟืนก็คือ ไม้ยางพารา ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น และมีต้นทุนในการจัดซื้อไม่สูงมากนัก ไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนแปรผันโดยตรงกับค่าความชื้นฐานแห้งดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความร้อนไม้ฟืนยางพารา

ความชื้น (%ฐานแห้ง)	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

2.3 ระบบอบแห้งชนิดที่มีระบบกักเก็บความร้อน

โดยทั่วไป สามารถใช้งานเครื่องอบแสงอาทิตย์ได้ในเวลาที่มีแสงแดดเท่านั้น ทำให้ต้องใช้เวลานานหากเลือกใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว ดังนั้นเพื่อร่นระยะเวลาการอบแห้งให้สั้นลงและใช้ได้ในวันที่ไม่มีแสงแดด จึงได้มีการพัฒนาระบบการให้ความร้อนโดยการเผาไหม้ชีวมวล และเพิ่มระบบกักเก็บความร้อนไว้ใต้เครื่องอบแห้ง ระบบกักเก็บความร้อนจึงมีหน้าที่ในการเก็บสะสมความร้อนก่อนที่จะถ่ายเทให้กับเครื่องอบแห้งเพื่อไว้ใช้ในอบแห้งผลิตภัณฑ์ในเวลาที่ไม่มีการเผาไหม้ ทำให้มีพลังงานความร้อนจ่ายให้ตู้อบเป็นระยะเวลานาน

ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้ในการกักเก็บความร้อนและปริมาณ ในตารางที่ 2.2 ได้แสดงสมบัติค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติที่ใช้เป็นสารตัวกลางในการเก็บความร้อนโดยอาศัยความร้อนสัมผัส

วัสดุ	ความหนาแน่น kg/m^3	C_p $(kJ/kg\ K)$
น้ำ	1000	4.19
ก้อนหิน	2500-3500	0.88
เหล็ก	7800	0.5
คอนกรีต	2250	0.65
น้ำ : เอ็ทเธอลีนไกลคอล (50:50)	1050	3.47
อิฐ		0.84

การเก็บกักความร้อน (Heat Energy Storage) เป็นการเก็บรักษาพลังงานความร้อนไว้ในสารตัวกลาง ในการรับและถ่ายโอนความร้อนในคนละช่วงเวลา ซึ่งอาจเก็บกักพลังงานความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส (sensible heat) และในรูปของความร้อนแฝง (latent heat)

การเก็บกักความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส เป็นวิธีที่ใช้กันมากในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้หินเป็นวัสดุเก็บกักความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 150^{o}C และน้ำ โดยสร้างเป็นแพคเบด (packed bed) ซึ่งยอมให้อากาศไหลผ่านได้สะดวก

ในกรณีใช้ก้อนหินหรืออิฐเป็นตัวเก็บกักความร้อน เมื่อมีการถ่ายโอนความร้อน และทำให้อุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนแปลง คำนวณหาปริมาณความร้อนได้

$$Q = mCp\Delta T \tag{2.1}$$

เมื่อ Q = ปริมาณพลังงานความร้อนในวัสดุเก็บกัก ,J

m = มวลของวัสดุเก็บความร้อน , kg

Cp = ความร้อนจำเพาะของวัสดุ , J/kg K

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิของวัสดุเก็บกักความร้อน

วัสดุที่เลือกใช้เก็บกักความร้อน ควรมีราคาถูก หาได้ง่าย มีความสามารถในการเก็บความร้อนต่อหน่วยปริมาตรสูง หรือค่า (ความหนาแน่น)(ความร้อนจำเพาะ) น้ำเป็นสารที่มีค่าเก็บกักความร้อนต่อหน่วยปริมาตรสูงสุด หาได้ง่ายและราคาถูก แต่มีสถานะเป็นของเหลวในช่วงอุณหภูมิ

0 – 100 ° C ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นขีดจำกัดหนึ่งในการเลือกใช้ วัสดุจำพวก คอนกรีต ก้อนหิน และก้อนอิฐ แม้เป็นวัสดุที่มีค่าเก็บกักความร้อนต่อหน่วยปริมาตรต่ำ แต่มีราคาถูก หาได้ง่าย

2.4 การคำนวณประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยใช้แสงอาทิตย์และไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง คำนวณได้จากสมการ

$$\eta = \frac{M_w L_w}{WA_s + m_{wood}(HV)_{wood}}(100\%) \tag{2.2}$$

เมื่อ M_w = มวลของน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ , kg

L_w = ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของน้ำ , kJ/kg

W = พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ, kJ/m^2

A_s = พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์, m^2

m_{wood} = มวลไม้ฟืนที่ใช้ทั้งหมด, kg

$(HV)_{wood}$ = ค่าความร้อนของไม้ฟืน, $kJ/kg\ K$

ประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ คำนวณจากพลังงานความร้อนที่อากาศได้รับ และพลังงานรังสีความร้อนที่ตกบนแผงรับรังสี

$$\eta_{collector} = \frac{\dot{m}c_p(T_o - T_i)}{\dot{W}A_s}(100\%) \tag{2.3}$$

เมื่อ $\dot{m}$ = อัตราไหลเชิงมวลของอากาศ, kg

c_p = ความร้อนจำเพาะของอากาศ, $J/kg\ K$

T_i และ T_o = อุณหภูมิของอากาศไหลเข้าและออกจากแผงรับแสงอาทิตย์, ^oC

$\dot{W}$ = อัตราพลังงานจากแสงอาทิตย์ต่อหน่วยพื้นที่, W/m^2

A_s = พื้นที่รับรังสี

ประสิทธิภาพของการเก็บกักความร้อน คำนวณจากพลังงานความร้อนที่เก็บกักในกองอิฐ และพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ไม้ฟืน

$$\eta_{heat\ storage} = \frac{m_b C_P (T_{\max} - T_{\min})}{m_{wood} (HV)_{wood}} \qquad (2.4)$$

เมื่อ m_b = มวลของอิฐที่ใช้เก็บกักความร้อน , kg

C_P = ความร้อนจำเพาะของอิฐ , $kJ/kg\ K$

$T_{\max}$ และ $T_{\min}$ = อุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำของอิฐเก็บกักความร้อน, ^{o}C

m_{wood} = มวลของไม้ฟืน, kg

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