การศึกษาและจำลองแบบเครื่องอบข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์

นายโกวิท พัววิไล

005602

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2525

ISBN 974-560-824-6

A Study and Simulation of Solar Rice Dryer

Mr. Kovit Puavilai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Mechanical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1982

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและจำลองแบบเครื่องอบข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์
โดย	นายโกวิท พัววิไล
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวี เลิศปัญญาวิทย์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ชินเทพ เพ็ญชาติ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาและจำลองแบบเครื่องอบข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์
ชื่อนิสิต นายโกวิท พัววิไล
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2524

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ กล่าวถึงการศึกษาการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในกระบวนการอบข้าวเปลือก การศึกษากระทำทั้งทางภาคทฤษฎีและภาคการทดลองโดยการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์และสร้างเครื่องอบข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้น เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและผลจากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์

การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ ได้จัดสร้างเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ ที่ได้จากการอบข้าวเปลือก เช่น ความชื้นของข้าว อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์ ฯลฯ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จัดสร้างขึ้นประกอบด้วยโปรแกรมหลัก 1 โปรแกรม และโปรแกรมย่อย 3 โปรแกรมซึ่งจำลองแบบของ Solar Radiation Processor, แผงรับแสงอาทิตย์ และขบวนการอบข้าวเปลือกตามลำดับ

เครื่องอบข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นประกอบด้วยส่วนประกอบใหญ่ๆ 3 ส่วนคือ พัดลมดูดอากาศ แผงรับแสงอาทิตย์ และตู้อบข้าวเปลือก โดยมีท่อ พี.วี.ซี. เป็นท่อส่งผ่านอากาศ แผงรับแสงอาทิตย์มีขนาด 1 ตารางเมตร และตู้อบข้าวเปลือกมีขนาด 1 x 1 x 0.60 เมตร

ผลการทดลอง ได้ทดลองอบข้าวเปลือกจำนวน 50 กิโลกรัม โดยมีอัตราการไหลของอากาศที่เข้าอบข้าวเปลือก 273.15 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง(329.29 กิโลกรัมต่อชั่วโมง) และอุณหภูมิของอากาศที่เข้าอบข้าวเปลือกประมาณ 31.0-40.9 °ซ อบข้าว

เปลือกจากความชื้นเริ่มแรก 21–23 % มาตรฐานแห้ง(dry basis) ใช้เวลาในการอบประมาณ 2.75–4.25 ชั่วโมง ทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นลดลงเหลือประมาณ 16.3 % มาตรฐานแห้ง และมีอัตราการลดความชื้นของข้าวเปลือกเฉลี่ยเท่ากับ 1.64 % มาตรฐานแห้งต่อชั่วโมง

ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์พบว่า ค่าการเปรียบเทียบความชื้นของข้าวเปลือก และอัตราการลดความชื้นของข้าวเปลือกที่เวลาใดๆ มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ในขณะที่ค่าการเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์ อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากตู้อบข้าวเปลือก และประสิทธิภาพเฉลี่ยของแผงรับแสงอาทิตย์มีค่าใกล้เคียงกัน

ผลการเปรียบเทียบในเชิงเศรษฐกิจของเครื่องอบข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์กับเครื่องอบข้าวเปลือกโดยใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของกองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์พบว่า ค่าใช้จ่ายในการอบข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์มีราคากิโลกรัมละ 0.1611 บาท ซึ่งสูงกว่าค่าใช้จ่ายในการอบข้าวเปลือกโดยใช้น้ำมันเชื้อเพลิงกิโลกรัมละ 0.0135 บาท

Thesis Title A Study and Simulation of Solar Rice Dryer

Name Mr. Kovit Puavilai

Thesis Advisor Associate Prafessor Manit Thongprasert, Ph.D.

Department Mechanical Engineering

Academic Year 1981

ABSTRACT

This Thesis describes the study of a solar energy application in the rice drying process. This included the theoretical and experimental study. Then the mathematical model and the solar rice dryer were set up in order to compare the modelled and experimental results.

The mathematical model was formulated and then set up in the form of computer programme. This computer programme was used to predict the behavier of the rice drying. The programme was composed of one main programme and three subroutines which represented the solar radiation processor, the flat plate solar collector and the drying process respectively.

The solar rice dryer prototype consisted of the centrifugal fan, the flat plate solar collector and the drying bin. The collector was one square meter in area and the bin dimensions were 1 x 1 x 0.60 meter.

The drying air flow rate was fixed at 273.15 cubic meter per hour. And the drying temperature was about 31.0-40.9 °C. Experimental results indicated that the fifty kilograms of rice drying reduced the moisture content from 21-23 % dry basis to 16.3 % dry basis in approximate of 2.75-4.25 hours. The average rate of moisture content reduction was

1.64 % dry basis per hour.

Comparing results of the experiments and the mathematical model showed that the moisture content and the rate of moisture content reduction were slightly different. While the drying temperature, the bin temperature and the average collector efficiency were about the same.

An economic evaluation indicated that the drying cost of the solar rice dryer was 0.1611 Baht per kilogram of rice. The cost was 0.0135 Baht per kilogram of rice higher than that of the rice dryer using Diesel fuel which developed by Ministry of Agriculture and Co-operative.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา, รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ ที่ท่านได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำคำปรึกษา และให้ข้อคิดเกี่ยวการดำเนินงานและในการแก้ปัญหา ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย จนงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้เขียนขอระลึกถึงความกรุณาของ อาจารย์ชินเทพ เพ็ญชาติ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรูญ มหิทธาฟองกุล, รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ และรองศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ ในการที่ท่านได้กรุณาช่วยแก้ปัญหาและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้เขียนหลายต่อหลายครั้ง

ผู้เขียนขอขอบพระคุณคณะกรรมการตรวจวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำแก้ไขที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจ ผู้เขียนได้รับข้อคิดเห็นและคำแนะนำจากเพื่อนๆ ในภาควิชาเครื่องกล อันมีส่วนผลักดันให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จด้วยดี ซึ่งผู้เขียนขอระลึกถึงความขอบคุณ ณ โอกาสนี้

สารบาญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

กิตติกรรมประกาศ ..... ช

รายการตารางประกอบ ..... ญ

รายการรูปประกอบ ..... ฐ

รายการสัญญลักษณ์ ..... ณ

บทที่

1. บทนำ 1
2. ทฤษฎี 12
3. การดำเนินการวิจัย 25
4. ผลการทดลอง 36
5. การประเมินค่าทางเศรษฐกิจ 49
6. สรุป วิจารณ์ และข้อเสนอแนะ 55

เอกสารอ้างอิง 59

ภาคผนวก 62

ประวัติการศึกษา 108

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการตารางประกอบ

ตารางที่		หน้า
1.1	เนื้อที่เพาะปลูกผลผลิตของข้าวในภาคต่างๆ ของประเทศ	2
1.2	ปัญหาต่างๆ จากการเก็บข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงในภาคกลาง	3
1.3	ค่าเฉลี่ยของพลังงานแสงอาทิตย์ต่อวันในแต่ละช่วงเดือนของกรุงเทพมหานครและจังหวัดเชียงใหม่	11
2.1	วิธีการลดความชื้นของข้าวเปลือกนาปีในภาคต่างๆ ของประเทศ	13
ข.1	ข้อมูลการทดลองอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์ (23 ธันวาคม 2523)	79
ข.2	ข้อมูลการทดลองอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์ (24 ธันวาคม 2523)	81
ข.3	ข้อมูลการทดลองอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์ (25 ธันวาคม 2523)	83
ข.4	ข้อมูลการทดลองอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์ (26 ธันวาคม 2523)	84
ข.5	ข้อมูลการทดลองอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์ (30 ธันวาคม 2523)	85
ข.6	ข้อมูลการทดลองอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์ (5 มกราคม 2524)	87
ข.7	ข้อมูลการทดลองอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์ (6 มกราคม 2524)	89

ตารางที่ หน้า

ข.8 ข้อมูลการทดลองอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์
(7 มกราคม 2524) 90
ข.9 ข้อมูลการทดลองอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์
(8 มกราคม 2524) 91
ข.10 ข้อมูลการทดลองอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์
(9 มกราคม 2524) 92
ค.1 ผลการคำนวณการอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์
(23 ธันวาคม 2523) 93
ค.2 ผลการคำนวณการอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์
(24 ธันวาคม 2523) 94
ค.3 ผลการคำนวณการอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์
(25 ธันวาคม 2523) 95
ค.4 ผลการคำนวณการอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์
(26 ธันวาคม 2523) 96
ค.5 ผลการคำนวณการอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์
(30 ธันวาคม 2523) 97
ค.6 ผลการคำนวณการอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์
(5 มกราคม 2524) 98
ค.7 ผลการคำนวณการอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์
(6 มกราคม 2524) 99
ค.8 ผลการคำนวณการอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์
(7 มกราคม 2524) 100
ค.9 ผลการคำนวณการอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์
(8 มกราคม 2524) 101

ตารางที่ หน้า

ค.10 ผลการคำนวณการอบข้าวเปลือกโดยใช้แสงอาทิตย์
(9 มกราคม 2524) 102

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	แผนภูมิห้องอบเมล็ดกาแฟโดยใช้แสงอาทิตย์ที่ประเทศเปอร์โตริโก	5
1.2	แผนภูมิของเครื่องอบข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งพัฒนาโดยสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย	8
1.3	แผนภูมิของเครื่องอบข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์	10
2.1	ขบวนการอบข้าวเปลือกบนแผนภูมิไซโครเมตริก	14
2.2	แสดงการสมดุลย์สมการพลังงานของอากาศที่ผ่านตู้อบข้าวเปลือก	17
2.3	แสดงภาพตัดขวางของแผงรับแสงอาทิตย์และแผนภูมิการถ่ายเทความร้อน	21
2.4	ความเข้มของแสงอาทิตย์บนพื้นราบและพื้นเอียง	23
3.1	เครื่องอบข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.2	แผงรับแสงอาทิตย์ของเครื่องอบข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์	28
3.3	ขนาดและส่วนประกอบของแผงรับแสงอาทิตย์	29
3.4	ขนาดและส่วนประกอบของตู้อบข้าวเปลือก	30
3.5	ตำแหน่งที่วัดความชื้นของข้าวเปลือกในตู้อบข้าวเปลือก	32
3.6	การจัดวงจรเพื่อวัดอุณหภูมิของแผ่นรับของแผงรับแสงอาทิตย์	34
4.1	ความชื้นและอัตราการลดความชื้นของข้าวเปลือกที่เวลาใดๆ (25 ธันวาคม 2523)	40

รูปที่ หน้า

4.2 ความชื้นและอัตราการลดความชื้นของข้าวเปลือกที่เวลาใดๆ (26 ธันวาคม 2523) 41
4.3 ความชื้นและอัตราการลดความชื้นของข้าวเปลือกที่เวลาใดๆ (6 มกราคม 2524) 42
4.4 อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์และอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่ออกจากตู้อบข้าวเปลือก(25 ธันวาคม 2523) 43
4.5 อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์และอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่ออกจากตู้อบข้าวเปลือก(26 ธันวาคม 2523) 44
4.6 อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์และอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่ออกจากตู้อบข้าวเปลือก(6 มกราคม 2523) 45
4.7 อุณหภูมิที่แผ่นดูดแสงอาทิตย์และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ออกจากตู้อบข้าวเปลือก (25 ธันวาคม 2523) 46
4.8 อุณหภูมิที่แผ่นดูดแสงอาทิตย์และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ออกจากตู้อบข้าวเปลือก (26 ธันวาคม 2523) 47
4.9 อุณหภูมิที่แผ่นดูดแสงอาทิตย์และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ออกจากตู้อบข้าวเปลือก (6 มกราคม 2524) 48
ก.1 แผนภูมิของโปรแกรมหลักของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 63
ก.2 แผนภูมิของโปรแกรมย่อย RADIA ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 64

รูปที่ หน้า

ก.3 แผนภูมิของโปรแกรมย่อย COLLEC ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 65

ก.4 แผนภูมิของโปรแกรมย่อย DRYING ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 66

รายการสัญญลักษณ์

A	พื้นที่ของแผงรับแสงอาทิตย์, ตร.เมตร
A_b	พื้นที่ของตู้อบข้าวเปลือก, ตร.เมตร
BD	ความหนาแน่นของข้าวเปลือก, กิโลกรัมต่อลบ.เมตร
Cp	ความร้อนจำเพาะของอากาศ, กิโลจูลต่อกิโลกรัม-°ซ
D	แฟคเตอร์ความหนาของชั้นข้าวเปลือก
F'	Collector efficiency factor
H_B	ความเข้มของแสงอาทิตย์แบบรังสีตรงบนพื้นราบ, กิโลจูลต่อตร.เมตร-ชม.
H_D	ความเข้มของแสงอาทิตย์แบบรังสีกระจายบนพื้นราบ, กิโลจูลต่อตร.เมตร-ชม.
H_o	ความเข้มของแสงอาทิตย์นอกบรรยากาศ, กิโลจูลต่อตร.เมตร-ชม.
H_R	ความเข้มของแสงอาทิตย์แบบทั้งหมดบนพื้นราบ, กิโลจูลต่อตร.เมตร-ชม.
H_T	ความเข้มของแสงอาทิตย์แบบทั้งหมดบนพื้นเอียง, กิโลจูลต่อตร.เมตร-ชม.
H_{fg}	ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ, กิโลจูลต่อกิโลกรัม
h_1	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศจากกระจก, กิโลจูลต่อตร.เมตร-ชม.-°ซ
h_2	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศจากแผ่นดูดแสงอาทิตย์, กิโลจูลต่อตร.เมตร-ชม.-°ซ
h_r	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแผ่นดูดแสงอาทิตย์, กิโลจูลต่อตร.เมตร-ชม.-°ซ
m	อัตราการไหลของอากาศผ่านแผงรับแสงอาทิตย์, กิโลกรัมต่อชั่วโมง
mr	อัตราส่วนของความชื้นของอากาศ
m_w	มวลของน้ำที่ถูกดึงออกจากข้าวเปลือก, กิโลกรัม
M	ความชื้นของข้าวเปลือกที่เวลาใดๆ, % มาตรฐานแห้ง
Me	ความชื้นสมดุลย์ของข้าวเปลือก, % มาตรฐานแห้ง
Mo	ความชื้นเริ่มแรกของข้าวเปลือก, % มาตรฐานแห้ง
n	วันที่ของปี

P	เวลาที่ใช้ในการอบข้าวเปลือกที่ทำให้อัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือกลดลงครึ่งหนึ่ง, ชั่วโมง
Q_u	อัตราการสะสมพลังงานของแผงรับแสงอาทิตย์, กิโลจูลต่อชั่วโมง
R_B	อัตราส่วนของความเข้มของแสงอาทิตย์บนพื้นเอียงต่อความเข้มของแสงอาทิตย์บนพื้นราบ
RHE	ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลย์ของอากาศที่ผ่านออกจากตู้อบข้าวเปลือก
RHH	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าตู้อบข้าวเปลือก
S	มุมเอียงของแผงรับแสงอาทิตย์, องศา
S_c	ค่าคงที่สุริยะ, กิโลจูลต่อตร.เมตร-ชม.
T_a	อุณหภูมิแวดล้อมของอากาศ, °ซ
T_b	อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากตู้อบข้าวเปลือก, °ซ
T_c	อุณหภูมิของกระจก, °ซ
T_d	อุณหภูมิของอากาศที่เข้าแผงรับแสงอาทิตย์, °ซ
T_e	อุณหภูมิสมดุลย์ของอากาศที่ออกจากตู้อบข้าวเปลือก, °ซ
T_h	อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์, °ซ
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในแผงรับแสงอาทิตย์, °ซ
T_p	อุณหภูมิที่แผ่นดูดแสงอาทิตย์, °ซ
T_s	อุณหภูมิของท้องฟ้า, °ซ
t	เวลาที่ใช้ในการอบข้าวเปลือก, ชั่วโมง
U_L	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมดของแผงรับแสงอาทิตย์, กิโลจูลต่อตร.เมตร-ชม.-°ซ
U_t	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านบนของแผงรับแสงอาทิตย์, กิโลจูลต่อตร.เมตร-ชม.-°ซ
W	น้ำหนักของข้าวเปลือกที่ทำการอบ, กิโลกรัม
X	ความหนาของชั้นข้าวเปลือก, เมตร
Y	หน่วยเวลา

θ_T มุมตกกระทบของแสงอาทิตย์บนพื้นเอียง, องศา

θ_z มุมตกกระทบของแสงอาทิตย์บนพื้นราบ, องศา

η ประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์, %

τ ค่าการผ่านทะลุกระจกของแสงอาทิตย์

α ค่าการดูดพลังงานของแผ่นดูดแสงอาทิตย์

σ ค่าคงที่สตีเฟน–โบลท์แมนน์, วัตต์ต่อตร.เมตร–$^{\circ}$ช

ε_g ค่าการปล่อยพลังงานของกระจก

ε_p ค่าการปล่อยพลังงานของแผ่นดูดแสงอาทิตย์

δ มุมเดคลิเนชั่น, องศา

ϕ มุมของเส้นรุ้ง, องศา

γ มุมของแผงรับแสงอาทิตย์ที่เบนออกจากแนวเหนือ–ใต้, องศา

ω มุมของเวลา, องศา