



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยหลังปริญญาเอก สัญญาเลขที่ PDF/40/2541
การประเมินสมรรถนะระยะยาวของเครื่องกลั่น
แอลกอฮอล์

โดย นายพิชัย นามประกาย และคณะ

มิถุนายน 2543



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยหลังปริญญาเอก สัญญาเลขที่ PDF/40/2541
การประเมินสมรรถนะระยะยาวของเครื่องกลั่น
แอลกอฮอล์

โดย นายพิชัย นามประกาย และคณะ

มิถุนายน 2543

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยหลังปริญญาเอก สัญญาเลขที่ PDF/40/2541
การประเมินสมรรถนะระยะยาวของเครื่องกลั่น
แอลกอฮอล์

คณะผู้วิจัย

นายพิชัย นามประกาย
นางสาวจงจิตร หิรัญลาม

สังกัด

คณะพลังงานและวัสดุ
คณะพลังงานและวัสดุ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย และขอขอบคุณ นายอำพล พิชัยเชิด นักศึกษาลัทธิสุตฺรประกาศนียบัตรบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีอุณหภูมิ และคุณเครือวัลย์ มณีวัต หัวหน้างานคลังฯ คณะพลังงานและวัสดุ ที่ให้การช่วยเหลือในการวิจัยครั้งนี้

ผศ.ดร.พิชัย นามประกาย

หัวหน้าโครงการ

บทคัดย่อ

สัญญาเลขที่ PDF/40/2541

โครงการ การประเมินสมรรถนะระยะยาวของเครื่องกลั่นแอลกอฮอล์

หน่วยงานที่ทำวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail: ipicakai@cc.kmutt.ac.th

ระยะเวลาวิจัย 1 กรกฎาคม 2541 - 30 มิถุนายน 2543

วัตถุประสงค์:

1. เพื่อประเมินสมรรถนะระยะยาวของเครื่องกลั่นแอลกอฮอล์แสงอาทิตย์โดยใช้ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์
2. เพื่อศึกษาแนวทางการออกแบบเครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ขนาดอุตสาหกรรมโดยใช้ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์

ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาและทำรายงานเกี่ยวกับงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับเครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ในประเทศและต่างประเทศ รวบรวมข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์ของกรุงเทพฯ
2. ศึกษา utilizability function (ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่แสดงค่าสัดส่วนของรังสีอาทิตย์ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในเครื่องกลั่น หาแนวทางนำมาใช้ประยุกต์กับการกลั่นแอลกอฮอล์
3. ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อเครื่องกลั่นโดยคอมพิวเตอร์ คัดตัวแปรที่สำคัญออกไป
4. สร้างเครื่องกลั่นแบบผิวรับรังสีในแนวนอน และทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่มีความสำคัญต่อการกลั่น
5. ประเมินสมรรถนะระยะยาวของเครื่องกลั่น โดยใช้ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์
6. เสนอแนวทางการออกแบบระบบกลั่นขนาดอุตสาหกรรมโดยใช้ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์ และทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและมวล

ผลการวิจัย

1. ผลของตัวแปรต่อสมรรถนะของเครื่องกลั่นเอทานอลพลังงานแสงอาทิตย์

จากการทดลองพบว่า อัตราการกลั่นไม่แปรผันโดยตรงกับค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมง แต่มีค่าสูงสุดในช่วงเวลาย่ำหลังค่าสูงสุดของรังสีอาทิตย์ เนื่องมาจากผลของความจุความร้อนของสารละลายในอ่าง จากการคำนวณอัตรากลั่นรายวันเฉลี่ยรายเดือนมีค่าแปรผันตรงกับค่ารังสีอาทิตย์รายวัน ผลของความเร็วลมและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อสมรรถนะของเครื่องกลั่นขึ้นกับปริมาณค่ารังสีที่ตกกระทบเครื่องกลั่น การเปลี่ยนแปลงความสูงของเครื่องกลั่นมีผลน้อยต่อ

อัตราการกลั่น การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเอทานอลพบว่าทำให้อัตราการกลั่นเพิ่มขึ้น และการลดปริมาณสารละลายในอ่างสามารถทำให้อัตราการกลั่นเพิ่มขึ้นได้

2. การใช้ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์ในการประเมินสมรรถนะเครื่องกลั่นเอทานอล

จากการทดลอง อัตราการกลั่นแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นของสารเริ่มต้น 10% และ 30% มีค่าแปรตามค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายวันแบบเส้นตรง ดังนั้นเราจึงสามารถนำฟังก์ชันการใช้ประโยชน์แบบรายวัน มาคำนวณหาสมรรถนะหรืออัตราการกลั่นเฉลี่ยแบบรายเดือนได้ ผลที่ได้สามารถนำมาออกแบบกำหนดขนาดของเครื่องกลั่นระดับอุตสาหกรรม สำหรับแอลกอฮอล์ที่ผลิตได้ในระดับชาวบ้าน 10% โดยปริมาตร

วิจารณ์และสรุป

จากการศึกษาทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและมวล พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะเครื่องกลั่นเอทานอลมากที่สุดคือค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายวัน ดังนั้นเราจึงสามารถนำฟังก์ชันการใช้ประโยชน์แบบรายวัน มาคำนวณหาสมรรถนะหรืออัตราการกลั่นเฉลี่ยแบบรายเดือนได้ ผลที่ได้สามารถนำมาออกแบบกำหนดขนาดของเครื่องกลั่นระดับอุตสาหกรรม

ข้อเสนอแนะ การนำไปใช้ประโยชน์

นำมาออกแบบกำหนดขนาดของเครื่องกลั่นระดับอุตสาหกรรม สำหรับแอลกอฮอล์ที่ผลิตได้ในระดับชาวบ้าน 10% โดยปริมาตร

คำสำคัญ : เอทานอล, เครื่องกลั่นแบบอ่าง, ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์, สมรรถนะ.

Abstract

Project Code: PDF/40/2541

Project Title: Long term performance of solar ethanol distillation

Investigators: King Monkut's University of Technology Thonburi

E-mail: ipicakai@cc.kmutt.ac.th

Project Period: 1 July 1998 - 30 June 2000

Objectives:

1. To calculate longterm performance based on utilizability
2. To make a guide line for a design of ethanol solar still industrial system.

Methodology:

1. Literature review.
2. To study utilizability for Bangkok.
3. To study effects of various parameters on a still.
4. To construct and test two solar stills.
5. To estimate still performance.
6. To make a guide line for a design of ethanol solar still industrial system.

Results:

1. Parametric study on ethanol basin solar still

Effect of various parameters on the performance of ethanol basin solar still was studied. Measured hourly productivity increases non-linearly with hourly solar radiation. The highest productivity is found after the time of maximum solar radiation due to heat capacity of basin solution. Monthly mean calculated productivity and measured solar radiation are linearly correlated. Effects of wind speed and ambient temperature on the still performance strongly depend on daily solar radiation. Still height has a little effect on the performance. Increase of initial solution concentration in the basin can improve the still yield. Lowering solution depth can also raise still product.

2. Ethanol still performance estimation based on utilizability

Measured productivity of the still using 10% and 30% solution has a linear relation with average daily solar radiation. Hence estimation of solar still performance

using daily utilizability can be done. The result is applicable for a design of a solar industrial still for 10% solution.

Discussion Conclusion:

Based on heat and mass transfer it was found that average daily solar radiation is the most important parameter in the solar still. Hence estimation of solar still performance using daily utilizability can be done. The result is applicable for a design of a solar industrial still.

Suggestions/ Further Implication/ Implementation:

The result is applicable for a design of a solar industrial still for a 10% solution produced by villagers.

Keywords: Ethanol, Basin solar still, Utilizability, Performance

Executive Summary

Two stills of $52 \times 162\text{-cm}^2$ area each and 17-cm height having glass covers of 14° inclination have been outdoor- tested and south-facing. A commercial-grade ethanol of 10, 20, 30 and 40 % by volume was distilled in the still-basin in this study. Still performance of 10% solution was selected in combination with daily utilizability since most villagers in Thailand usually produce this dilute solution. Various parameters affecting still output were investigated based on heat-transfer model developed by Pichai et al. Then the most important parameter of the still was sought. Appropriate utilizability for performance estimation was also made using daily solar radiation on a horizontal plane. The advantage of utilizability concept is that it uses only solar energy, which can produce corresponding yield.

1. Parametric study on ethanol basin solar still

It was found that measured hourly productivity increased non-linearly with hourly solar radiation. The highest productivity is found after the time of maximum solar radiation due to heat capacity of basin solution. Monthly mean calculated productivity and measured solar radiation are linearly correlated. Effects of wind speed and ambient temperature on the still performance strongly depend on daily solar radiation. Still height has a little effect on the performance. Increase of initial solution concentration in the basin can improve the still yield. Lowering solution depth can also raise still product

3. Ethanol still performance estimation based on utilizability

Measured productivity of the still using 10% and 30% solution has a linear relation with average daily solar radiation. Hence estimation of solar still performance using daily utilizability can be done. The result is applicable for a design of a solar industrial still for 10% solution.

In conclusion, the performances based on heat-transfer model (Pichai et al.) and utilizability is slightly different. Around 969 liters per square meter of solar still can be obtained annually. The efficiency is approximately 38 %. Twenty percents alcohol can be produced in 10%-solution still.

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Executive Summary	ฅ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ญ
บทนำ	1
1. การศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่ออัตราการกลั่น	1
1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการกลั่น	1
1.2 วิธีทดลอง	6
1.3 ผลการทดลองและวิจารณ์	7
2.การใช้ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์เพื่อประเมินสมรรถนะระยะยาวของเครื่องกลั่น	9
2.1 ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์รายวัน	9
2.2 วิธีทดลอง	11
2.3 ผลการทดลองและวิจารณ์	11
แนวทางการออกแบบเครื่องกลั่นเอทานอลพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดอุตสาหกรรม	13
หนังสืออ้างอิง	13
Research Output ที่ได้จากงานวิจัยในโครงการ	14
ภาคผนวก	15

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ a, b, c และ d ในสมการ (2.3)	23
ตารางที่ 2.2 อัตราการกลั่นรายวันเฉลี่ยรายเดือน ($l\ m^{-2}\ day^{-1}$) และค่ารังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยรายเดือน ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$) ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและโดยอาศัยฟังก์ชันการใช้ประโยชน์	26

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 การถ่ายเทความร้อนในเครื่องกลั่น	14
รูปที่ 1.2 เครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ พลังงานแสงอาทิตย์	19
รูปที่ 1.3 แสดงการคำนวณอัตราการกลั่นแปรตามค่ารังสีรายวันเฉลี่ยรายเดือนแบบเส้นตรง	20
รูปที่ 1.4 อัตราการกลั่นรายชั่วโมงเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมง	20
รูปที่ 1.5 แสดงการคำนวณอัตราการกลั่นโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	
และความเร็วลมรายชั่วโมงและค่ารายวันเฉลี่ย	21
รูปที่ 1.6 แสดงอัตราการกลั่นขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายในอ่างของเครื่องกลั่น	21
รูปที่ 2.1 ความถี่สะสมของค่ารังสีอาทิตย์รายวันสำหรับเดือนมกราคม 2522-2531 ที่กรุงเทพ	23
รูปที่ 2.2 อัตราการกลั่นแปรตามค่ารังสีอาทิตย์รายวันแบบเส้นตรงสำหรับการทดลอง	
เดือนพฤษภาคม 2542 เมื่อใช้สารละลายเริ่มต้นความเข้มข้น 10%	24

รายการสัญลักษณ์

A	พื้นที่ผิวกระจกหรือพื้นที่รับแสง, m^2
A_s	พื้นที่ผิวด้านล่างรวมด้านข้างของเครื่องกลั่น, m^2
a,b,c,d	ค่าคงที่
B	driving force
c_p	ความร้อนจำเพาะของไอลผสม, $J/kg.K$
F	สัดส่วนเวลาใน 1 เดือน
F_c	สัดส่วนเวลาใน 1 เดือนที่ X_c
Gr	Grashof number
g	Reynolds flux หรือ mass transfer conductance, $kg/m^2.s$
$\bar{g}$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, $9.81 m^2/s$
H_c	ค่ารังสีวิกฤติบนแนวราบ, $MJ m^{-2} day^{-1}$
H_s	ค่ารังสีอาทิตย์ในแนวราบ, W/m^2
$\bar{H}_s$	รังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยรายเดือนบนแนวราบ, $MJ m^{-2} day^{-1}$,
H_{si}	รังสีอาทิตย์รายวันบนแนวราบ, $MJ m^{-2} day^{-1}$
h_c	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยอากาศภายในเครื่องกลั่น, $W/m^2.K$
h_{ca}	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากกระจกไปสู่สิ่งแวดล้อม, $W/m^2.K$
h_e	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยการระเหยจากผิวระเหยไปยังผิวกลิ้งตัว, $W/m^2.K$
h_{fg}	ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ, J/kg
h_{ra}	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนจากกระจกไปสู่ท้องฟ้า, $W/m^2.K$
h_{rs}	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนทางด้านนอกของเครื่องกลั่น, $W/m^2.K$
k	สภาพนำความร้อนของไอลผสม, $W/m.K$
k_s	สภาพนำความร้อนของฉนวน, $W/m.K$
L	ความสูงเฉลี่ยของเครื่องกลั่น, m
L_s	ความหนาของฉนวน, m
m	น้ำหนัก, kg
m''	อัตราการถ่ายเทมวลรวมของไอลผสม, $kg/m^2.s$
m_i''	อัตราการถ่ายเทมวลของสาร i, $kg/m^2.s$

m_i	mass fraction ของสาร i
N	จำนวนใน 1 เดือน, days
$\bar{P}$	อัตราการกลั่นรายวันเฉลี่ยรายเดือน, $l\ m^{-2}\ day^{-1}$
P_i	อัตราการกลั่นรายวัน, $l\ m^{-2}\ day^{-1}$
Pr	Prandtl number
q_c	อัตราการพาความร้อนโดยอากาศภายในเครื่องกลั่น, W
q_{ca}	อัตราการพาความร้อนจากกระจกไปสู่สิ่งแวดล้อม, W
q_e	อัตราการพาความร้อนโดยการระเหยภายในเครื่องกลั่น, W
q_r	อัตราการแผ่รังสีความร้อนภายในเครื่องกลั่น, W
q_{ra}	อัตราการแผ่รังสีความร้อนจากกระจกไปสู่ท้องฟ้า, W
q_s	อัตราการสูญเสียความร้อนทางด้านนอกของเครื่องกลั่น, W
T_g	อุณหภูมิผิวกระจกภายในเครื่องกลั่น, $^{\circ}C$
TM	อุณหภูมิผิวสารละลายแอลกอฮอล์ในเครื่องกลั่น, $^{\circ}C$
T_o	อุณหภูมิผิวเครื่องกลั่นทางด้านข้างและด้านล่าง, $^{\circ}C$
T_{sky}	อุณหภูมิท้องฟ้า, $^{\circ}C$
T_w	อุณหภูมิผิวน้ำในเครื่องกลั่น, $^{\circ}C$
t	เวลา, s
U	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทางด้านนอกของเครื่องกลั่น, $W/m^2\ K$
V	ความเร็วลม, m/s
X	สัดส่วนค่ารังสีอาทิตย์รายวันต่อค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือน
X_c	สัดส่วนวิกฤติค่ารังสีอาทิตย์รายวันต่อค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือน
X_{MAX}	สัดส่วนสูงสุดค่ารังสีอาทิตย์รายวันต่อค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือน
α	absorptivity
ρ	ความหนาแน่น, kg/m^3
ϵ	emissivity
ϕ	ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์
τ	transmissivity
σ	Stafan-Boltzmann constant, $5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2\ K^4$
% v/v	เปอร์เซ็นต์แอลกอฮอล์โดยปริมาตรในสารละลาย
μ	absolute viscosity ของไอผสม, $N.s/m^2$
ν	kinematic viscosity ของไอผสม, m^2/s

ตัวกำกับล่าง

A	วัสดุอลูมิเนียมทาสีดำ
a	อากาศ หรือสิ่งแวดล้อม
al	แอลกอฮอล์
alu	อลูมิเนียม
G	ผิว G และผิวกลับตัว
g	กระจก
i	สาร i
M	สารละลายแอลกอฮอล์คือน้ำ + เอทานอล
S	ผิว S และผิวระเหย
T	สภาพถ่ายเท (transfer state)
w	น้ำ

บทนำ

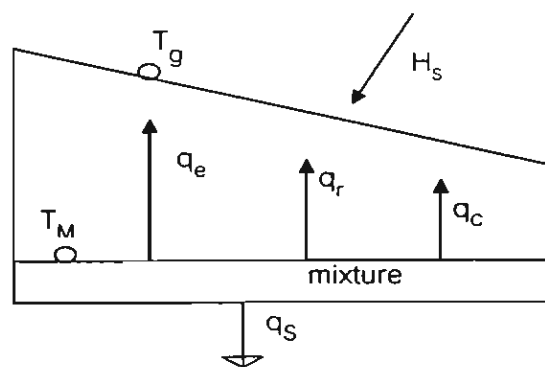
การประเมินสมรรถนะระยะยาวเครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการหาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะหรืออัตราการกลั่นโดยใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาโดย พิชัย และคณะ [1] จากนั้นเลือกตัวแปรที่มีผลต่อการกลั่นมากที่สุด เพื่อนำมาพิจารณาหาวิธีใช้ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์มาคำนวณสมรรถนะระยะยาวของเครื่องกลั่นเอทานอลพลังงานแสงอาทิตย์ ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์สามารถพัฒนาจากสถิติของค่ารังสีดวงอาทิตย์รายชั่วโมงและค่ารายวันซึ่งมีนักวิจัยท่านอื่นพัฒนาไว้แล้ว การใช้ฟังก์ชันนี้มาประเมินสมรรถนะของเครื่องกลั่นมีข้อได้เปรียบเช่น ผลการประเมินมีความถูกต้องกว่าเพราะเป็นการใช้เฉพาะค่ารังสีอาทิตย์ที่สามารถให้ผลผลิตได้เท่านั้น

1. การศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่ออัตราการกลั่น

1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการกลั่น

สมดุลพลังงานทั่วไป[2]

สมดุลพลังงานในเครื่องกลั่น ในที่นี้จะพิจารณาที่ 2 ตำแหน่งคือ ที่สารละลายที่ใช้กลั่น และที่กระจกฝาปิด ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การถ่ายเทความร้อนในเครื่องกลั่น

สารละลายในเครื่องกลั่น

สมดุลพลังงานในเครื่องกลั่น สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{รังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืน} &= \text{อัตราความร้อนที่ใช้ในการระเหย} + \text{การพาความร้อน} + \text{การแผ่รังสี} \\ &+ \text{ความร้อนสูญเสียทางด้านนอกของเครื่องกลั่น} \\ &+ \text{ความร้อนสะสมในสารละลาย} \end{aligned}$$

โดยใช้สมการการจำลองสมดุลพลังงานที่สารละลาย

$$\alpha_A \tau_g A H_s = (q_e + q_c + q_r) + q_s + (mc_p)_M \frac{dT_M}{dt} \quad (1.1)$$

เมื่อ $q_e = \sum m_i h_{ig} A$, $q_c = h_c A (T_M - T_g)$

$q_r = h_r A (T_M - T_g)$; $q_s = UA (T_M - T_a)$

q_e , q_c และ q_r เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการระเหย การพาความร้อน และการแผ่รังสี ภายในเครื่องกลั่น q_s เป็นความร้อนสูญเสียทางด้านนอกของเครื่องกลั่น h_c , h_r คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน และการแผ่รังสี จากผิวระเหยไปยังผิวกลั่นตัว m_i คืออัตราการระเหยของสาร i , h_{ig} คือความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสาร i U เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมทางด้านนอกเครื่องกลั่น T_M , T_g และ T_a เป็นอุณหภูมิผิวระเหย ผิวกลั่นตัว และสิ่งแวดล้อม H_s เป็นค่ารังสีอาทิตย์ $(mc_p)_M$ คือความจุความร้อนของสารละลาย t คือเวลา M แทนสารละลาย A คือพื้นที่ผิวสารละลาย α คือ absorptivity ของวัสดุดูดรังสี τ คือ transmissivity ของกระจก

กระจกฝาปิด

สมดุลพลังงานที่กระจกสามารถอธิบายได้ดังนี้ ความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่กระจกดูดกลืนไว้ และความร้อนที่ได้จากการระเหย การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อนของสารละลายมายังกระจก มีค่าเท่ากับความร้อนสูญเสียจากกระจกไปยังสิ่งแวดล้อมโดยการพาและการแผ่รังสี และมีส่วนหนึ่งถูกเก็บสะสมไว้ที่กระจก โดยเขียนอยู่ในรูปสมการดังต่อไปนี้

$$\alpha_g A H_s + q_e + q_c + q_r = (mc_p)_g \frac{dT_g}{dt} + q_{ca} + q_{ra} \quad (1.2)$$

เมื่อ $q_{ca} = h_{ca} (T_g - T_a)$ และ $q_{ra} = h_{ra} (T_g - T_{sky})$, H_s เป็นค่ารังสีอาทิตย์ α_g คือ absorptivity ของกระจก A คือพื้นที่ของกระจก q_{ca} และ q_{ra} เป็นความร้อนสูญเสียโดยการพาความร้อน และการแผ่รังสีจากกระจกไปยังสิ่งแวดล้อม $(mc_p)_g$ คือความจุความร้อนของกระจก

h_{ca} และ h_{ra} เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และการแผ่รังสีไปสู่สิ่งแวดล้อม g หมายถึงกระจก
a หมายถึงสิ่งแวดล้อม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายสมรรถนะเครื่องกลั่นในสภาวะที่ขึ้นกับเวลา
(transient state)

ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ สมการ 1.1 สามารถประมาณได้เป็น

$$\alpha_A \tau_g A H_S = (q_c + q_r + q_e) + q_s + (\sum mc_p)_M \frac{(T_M^{n+1} - T_M^n)}{\Delta t} \quad (1.3)$$

เมื่อ T_M^{n+1} , T_M^n คืออุณหภูมิสารละลายในเครื่องกลั่นที่เวลา $t+\Delta t$ และ t ตามลำดับ α_A คือ
absorptance ของวัสดุดูดรังสี τ_g คือ transmittance ของกระจก

ความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกระจกกับเวลา จะสามารถประมาณจากสมการ 1.2

$$\alpha_g A H_S + q_e + q_c + q_r = q_{ca} + q_{ra} + (mc_p)_g \frac{(T_g^{n+1} - T_g^n)}{\Delta t} \quad (1.4)$$

เมื่อ T_g^{n+1} , T_g^n คืออุณหภูมิกระจกที่เวลา $t+\Delta t$ และ t ตามลำดับ ตัวแปรทุกตัวที่เหลือสามารถ
หาค่าได้ที่อุณหภูมิ ณ เวลา t

การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีของผิวระเหยไปยังผิวกลั่นตัวทำ
โดย ประมาณว่าผิวระเหยกับผิวกลั่นตัวเป็นแผ่นวัสดุที่ขนานกันและมีพื้นที่เท่ากัน ดังนั้น [3]

$$q_r = \epsilon_M \sigma A [(T_M + 273)^4 - (T_g + 273)^4] \quad (1.5)$$

เมื่อ ϵ_M = emissivity ของสารละลาย และ σ คือ Stefan-Boltzmann's constant (5.67×10^{-8}
W/m² K⁴)

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของอากาศคำนวณจากสมการ

$$q_c = h_c A (T_M - T_g) \quad (1.6)$$

เมื่อ h_c คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยอากาศในกล่องมิดชิด โดยถือว่าไอน้ำ-แอลกอฮอล์ในเครื่องกลั่นไม่มีผลต่อการพาความร้อนโดยอากาศ ซึ่งคำนวณได้จาก [4]

$$\frac{h_c \cdot L}{k} = 0.075 (Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad (1.7)$$

เมื่อ $Gr = \frac{L^3 \Delta \rho g}{\rho \nu^2}$ และ $Pr = \frac{\mu}{(k / C_p)}$, L คือความสูงของเครื่องกลั่น ρ คือความหนาแน่นของไอ ν คือ kinematic viscosity ของไอ μ คือ absolute viscosity ของไอ k คือสภาพนำความร้อนของไอ C_p คือความร้อนจำเพาะของไอ

อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระเหยต่อหน่วยพื้นที่ คำนวณได้จาก

$$q_e = \sum m''_i \cdot h_{fgi} \cdot A \quad (1.8)$$

เมื่อ h_{fgi} คือความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำและแอลกอฮอล์ และ m''_i คืออัตราการถ่ายเทมวลของน้ำและแอลกอฮอล์ตามลำดับ คำนวณได้จาก

$$m''_i = m'' \cdot m_{iT} \quad (1.9)$$

เมื่อเราสามารถคำนวณอัตราการถ่ายเทมวลรวม (m'') ได้จากสมการ $m'' = g \ln(1 + B)$

g ประเมินจาก [5] และคำนวณ transfer mass fraction ของสารแต่ละตัวได้โดยใช้สมการการคำนวณค่า driving force เมื่อทราบค่า B จาก [5] ดังนี้

$$m_{iT} = m_{iS} = \frac{(m_{iG} - m_{iS})}{B} \quad (1.10)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาจากกระบอกไปสู่บรรยากาศภายนอก คำนวณโดย

$$q_{ca} = h_{ca} A (T_g - T_a) \quad (1.11)$$

$$h_{ca} = 2.8 + 3 V \quad (1.12)$$

เมื่อ h_{ca} คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน[3] และ V เป็นความเร็วของอากาศ (m/s)

อัตราการสูญเสียความร้อนโดยการแผ่รังสีจากกระจกไปยังบรรยากาศ เทียบได้กับการแผ่รังสีของวัตถุที่ขนาดจำกัดไปยังวัตถุที่ขนาดอนันต์ ซึ่งคำนวณจาก

$$q_{ra} = \epsilon_g \sigma A [(T_g + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4] \quad (1.13)$$

T_{sky} คืออุณหภูมิท้องฟ้า [3]

$$T_{sky} = 0.0552 (T_a + 273)^{1.5} - 273 \quad (1.14)$$

ความร้อนสูญเสียด้านใต้เครื่องกลั่นและด้านข้างคำนวณจาก

$$q_s = UA_s (T_M - T_a) \quad (1.15)$$

เมื่อ
$$U = [L_s/k_s + 1/(h_{rs} + h_{ca})]^{-1} \quad (1.16)$$

และ
$$h_{rs} = \epsilon_{alu} \sigma [(T_o + 273)^2 + (T_a + 273)^2] [(T_o + 273) + (T_a + 273)] \quad (1.17)$$

และ U เป็นสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทางด้านใต้เครื่องกลั่นรวมด้านข้าง, L_s คือความหนาของฉนวน k_s คือสภาพนำความร้อนของฉนวน A_s คือพื้นที่ผิวด้านล่างรวมด้านข้างของเครื่องกลั่น

h_{ca} คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากสมการ 1.12 และ h_{rs} การแผ่รังสีทางด้านใต้เครื่องกลั่น

รวมด้านข้าง คำนวณได้จาก[6] T_o คืออุณหภูมิผิวเครื่องกลั่นทางด้านข้างและด้านล่าง

สมบัติต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ[6]

$\alpha(\text{absorber}) = 0.9$, $\alpha(\text{glass}) = 0.1$, $\epsilon(\text{solution}) = 0.96$, $\epsilon(\text{glass}) = 0.85$,

$\epsilon(\text{aluminium}) = 0.33$, $\tau(\text{solution}) = 0.9$, $\tau(\text{glass}) = 0.74$,

$C_p(\text{ethanol}) = 2508 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $(mC_p)\text{-glass} = 4314 \text{ J K}^{-1}$, m คือน้ำหนักของกระจก

$C_p(\text{water}) = 4186 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $C_p(\text{glass}) = 670 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$\rho(\text{water}) = 0.9953 \text{ kg/lit.}$, $\rho(\text{ethanol}) = 0.7779 \text{ kg/lit.}$

จากการทดลอง: bottom loss coefficient, $U = 1 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$,

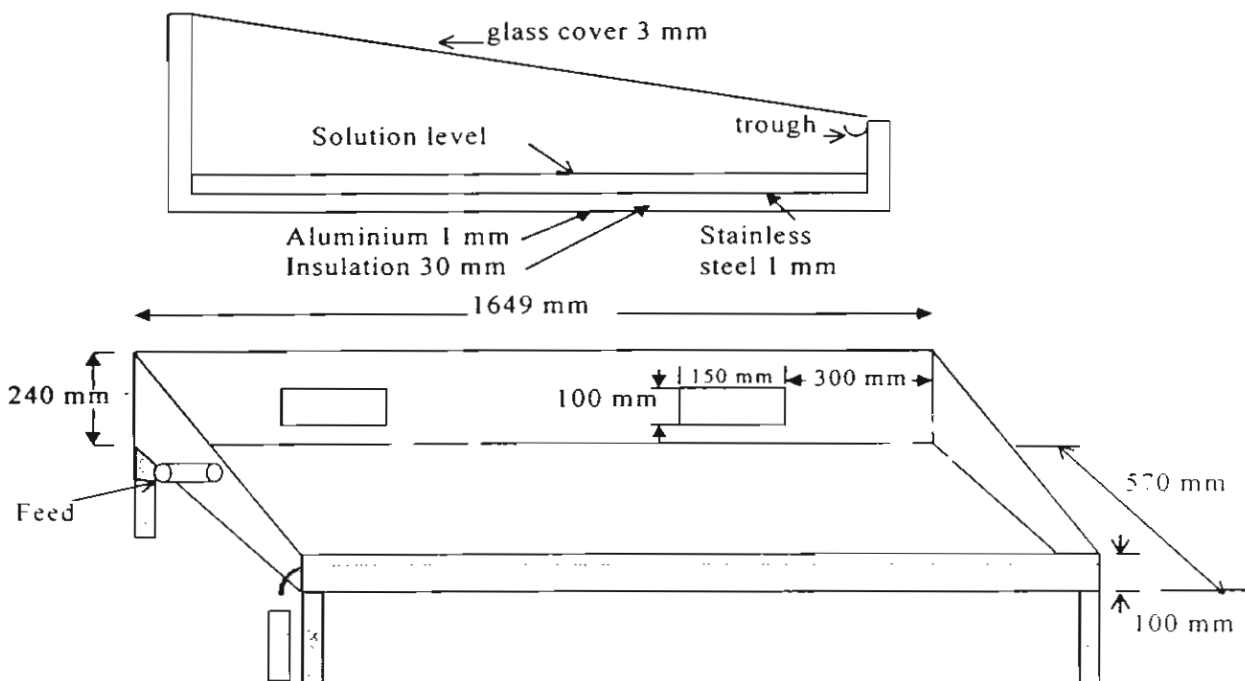
convective heat transfer coefficient, h_{ca} (ผิวด้านนอกเครื่องกลั่น) = $6.6 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$

radiative heat transfer coefficient, h_{rs} (ผิวด้านนอกเครื่องกลั่น) = $2.3 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$

1.2 วิธีทดลอง

ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเครื่องกลั่น(อัตราการกลั่น ลิตรต่อตารางเมตรของเครื่องกลั่นต่อวัน) เช่นผลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ความเร็วลม(เมตรต่อวินาที) ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบสารละลายในเครื่องกลั่น(เมกกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน) ทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย 10 , 20, 30, 40 % โดยปริมาตร เพื่อดูผลกระทบต่อสมรรถนะ และใช้ข้อมูลอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ความเร็วลม และค่ารังสีอาทิตย์ของปี 2528 [7,8] มาหาความสัมพันธ์กัน และใช้บทสรุปจากงานวิจัยต่างๆ ในต่างประเทศ[9,10]

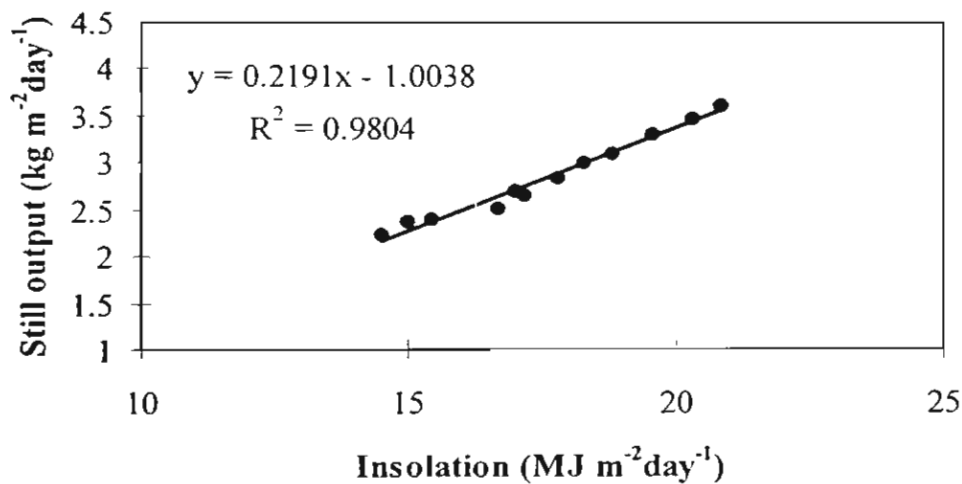
เมื่อพบตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดคือค่ารังสีอาทิตย์ จะทำการทดสอบการกลั่นจริงในสนามที่มีแสงแดดตกกระทบเครื่องกลั่นนอกอาคารระหว่างเดือนเมษายนและพฤษภาคม 2542-2543 ซึ่งเป็นเดือนที่แสงแดดค่อนข้างสูง โดยใช้เครื่องกลั่นขนาด 1.62x 0.54 เมตร (รูปที่1.2) ขณะทดลองทำการวัดค่ารังสีอาทิตย์ อัตราการกลั่น ความเร็วลมที่พัดผ่านผิวเครื่องกลั่น อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม รายชั่วโมง และทดลองคำนวณสมรรถนะตามทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาโดยพิชัยและคณะ[1] โดยใช้ข้อมูลแสงแดดและความเร็วลม อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมแบบรายชั่วโมงและแบบรายวันแล้วทำการเปรียบเทียบกัน ทำการคำนวณสมรรถนะของเครื่องกลั่นตลอด 12 เดือน นำมาพล็อตหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีอาทิตย์และอัตราการกลั่นรายวัน เมื่อได้ความสัมพันธ์นี้แล้ว จึงมาพิจารณาว่าจะใช้ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์แบบใดที่เหมาะสมในการประเมินสมรรถนะระยะยาวของเครื่องกลั่น



รูปที่ 1.2 เครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ พลังงานแสงอาทิตย์[6]

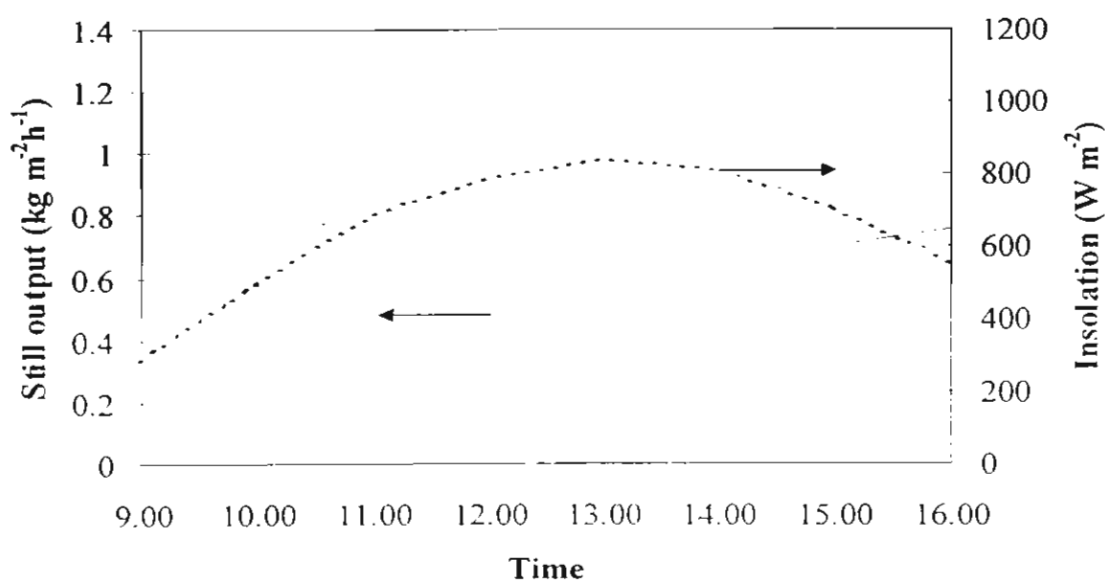
1.3 ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการคำนวณตามทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนภายในและนอกเครื่องกลั่นโดยใช้ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรายชั่วโมง และความเร็วลมเฉลี่ยตลอดวัน พบว่าความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง แสดงว่าค่ารังสีอาทิตย์รายวันมีผลกระทบต่ออัตราการกลั่นมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 1.3 ผลของความเร็วลมและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจะแฝงอยู่ในค่ารังสีอาทิตย์ เพราะตัวแปรทั้งสองต่างกำเนิดมาจากพลังงานแสงอาทิตย์



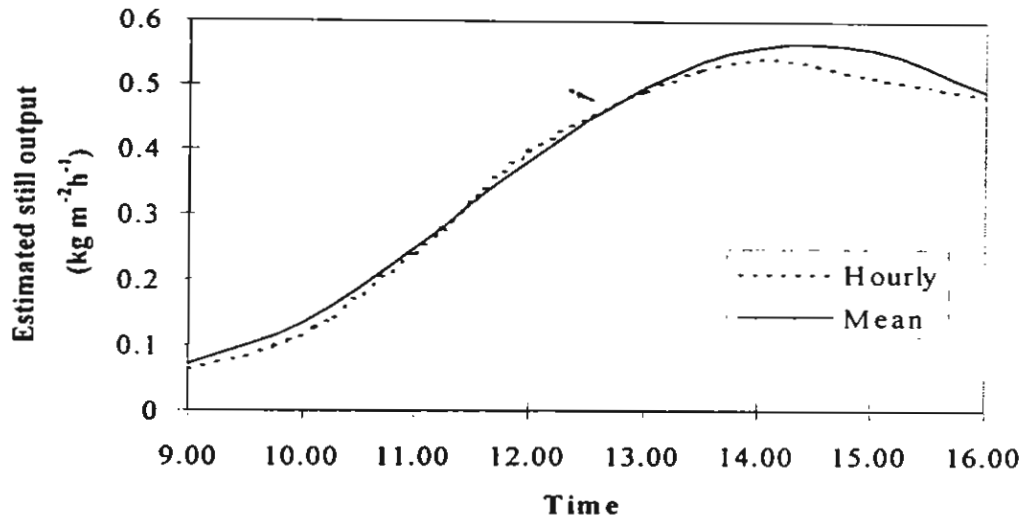
รูปที่ 1.3 แสดงการคำนวณอัตราการกลั่นแปรตามค่ารังสีรายวันเฉลี่ยรายเดือนแบบเส้นตรง [1]

จากการทดลองหาความสัมพันธ์รายชั่วโมงของค่ารังสีอาทิตย์ และอัตราการกลั่นพบว่าไม่เป็นแบบเส้นตรง เนื่องจากผลของความจุความร้อนในสารละลายทำให้อัตราการกลั่นมีค่ามากขึ้นถึงแม้ว่าค่ารังสีอาทิตย์เริ่มลดลงในเวลาหลังเที่ยงวันดังรูปที่ 1.4



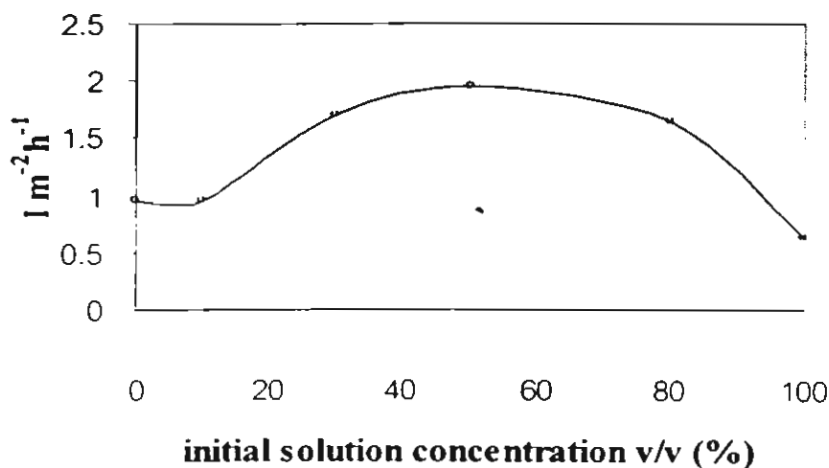
รูปที่ 1.4 อัตราการกลั่นรายชั่วโมงเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมง[1]

เมื่อทดลองคำนวณอัตราการกลั่นรายชั่วโมงพบว่าการใช้ข้อมูลอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและความเร็วลมแบบค่ารายชั่วโมงและค่าเฉลี่ยต่อวัน ให้ผลต่างกัน 3% (รูป 1.5) แสดงว่าอัตราการกลั่นขึ้นต่อค่าเฉลี่ยรายวันของข้อมูลจากสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 1.5 แสดงการคำนวณอัตราการกลั่นโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและความเร็วลมรายชั่วโมงและค่ารายวันเฉลี่ย [1]

การทดลองหาผลของความเข้มข้นสารละลายที่ถูกกลั่นต่ออัตราการกลั่น พบว่ามีอัตราการกลั่นสูงสุดที่ค่าความเข้มข้นสารละลายที่ใช้กลั่น 45% โดยปริมาตร (รูป 1.6) เลยจุดนี้ อัตราการกลั่นลดลงเนื่องจากกระแสการพาความร้อนและมวลต่ำลง เพราะน้ำหนักโมเลกุลรวมของไอภายในเครื่องกลั่นมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 1.6 แสดงอัตราการกลั่นขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายในอ่างของเครื่องกลั่น[1]

2. การใช้ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์เพื่อประเมินสมรรถนะระยะยาวของเครื่องกลั่น

2.1 ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์รายวัน (daily utilizability function)[3,8,11]

ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์เป็นอัตราส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ประโยชน์ได้ต่อพลังงานทั้งหมดที่ตกกระทบเครื่องสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ (solar collector) ในช่วงเวลาที่กำหนดให้ สามารถนำฟังก์ชันนี้มาคำนวณสมรรถนะระยะยาวของเครื่องสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าวได้ ฟังก์ชันนี้สามารถคำนวณได้จาก

$$\phi = \int_{F_c}^1 (X - X_c) dF \quad (2.1)$$

หรือ

$$\begin{aligned} \phi &= \int_{X_c}^{X_{\max}} (1 - F) dX \\ &= 1 - \int_0^{X_c} (1 - F) dX \end{aligned} \quad (2.2)$$

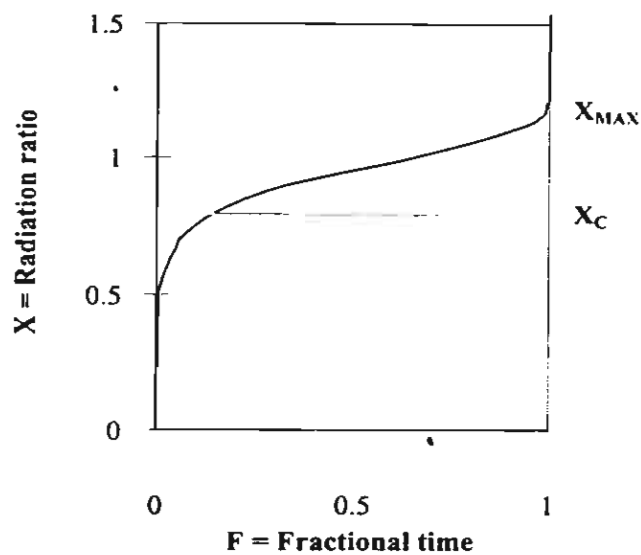
เมื่อ X คืออัตราส่วนของค่ารังสีอาทิตย์รายวันต่อค่ารังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยในเวลา 1 เดือน X_c ค่าอัตราส่วนรังสีอาทิตย์วิกฤติเมื่ออัตราการกลั่นเท่ากับศูนย์ $X_{\max}$ คือค่าสูงสุดของอัตราส่วนของค่ารังสีอาทิตย์ F คือสัดส่วนของเวลาที่มีอัตราส่วนของรังสีอาทิตย์น้อยกว่า X F_c คือสัดส่วนของเวลาที่มีอัตราส่วนของรังสีอาทิตย์น้อยกว่า X_c รูป 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง F กับ X พื้นที่แรเงาคือฟังก์ชันการใช้ประโยชน์ได้ (ϕ) สามารถคำนวณได้จากค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นที่ราบ(horizontal total solar radiation) และแสดงเป็นสมการดังนี้

$$\phi = 1 - (a X_c + b X_c^2 + c X_c^3 + d X_c^4) \quad (2.3)$$

และ

$$F = -2b X - 3c X^2 - 4d X^3 \quad (2.4)$$

เมื่อ ค่าคงที่ a, b, c และ d ในสมการ (2.3) ดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1

ความถี่สะสมของค่ารังสีอาทิตย์รายวันสำหรับเดือนมกราคม 2522-2531 ที่กรุงเทพ

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ a , b , c และ d ในสมการ (2.3)[12]

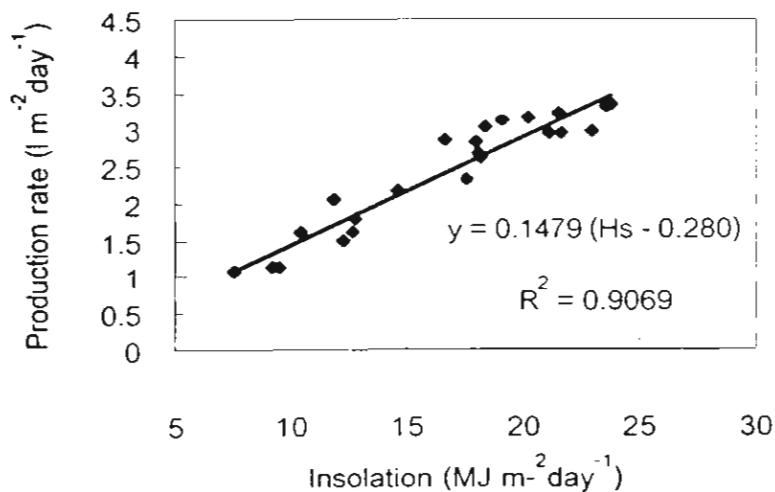
เดือน	a	b	c	d
ม.ค.	1.030	-0.028	0.298	-0.338
ก.พ.	1.076	-0.359	0.814	-0.567
มี.ค.	1.086	-0.467	0.968	-0.629
เม.ย.	1.052	-0.275	0.611	-0.444
พ.ค.	1.010	-0.127	0.318	-0.280
มิ.ย.	0.924	0.363	-0.431	0.046
ก.ค.	0.952	0.215	-0.208	-0.050
ส.ค.	0.943	0.174	-0.221	-0.014
ก.ย.	0.906	0.267	-0.365	0.055
ต.ค.	0.900	0.490	-0.623	0.129
พ.ย.	0.957	0.245	-0.248	-0.038
ธ.ค.	1.106	-0.497	1.047	-0.691

2.2 วิธีทดลอง

ทดลองกลั่นแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้น 10, 30 (เม.ย-พ.ค.2542), 20, 40 % (เม.ย-พ.ค.2543) โดยปริมาตรโดยใช้แสงอาทิตย์ แต่แสดงกราฟเฉพาะความเข้มข้น 10% (รูป 2.2) ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะระยะยาวของเครื่องกลั่นเอทานอล สำหรับสารละลายที่ชาวบ้านผลิตได้เท่านั้น เพราะจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ต้องค้นพบวิธีประเมินสมรรถนะระยะยาวเท่านั้น และใช้ค่ารังสีอาทิตย์ 2522-2531 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี(คณะพลังงานและวัสดุ) มาพัฒนาฟังก์ชันการใช้ประโยชน์ [12]

2.3 ผลการทดลองและวิจารณ์

จากผลการทดลองหาอัตราการกลั่นเมื่อเครื่องกลั่นได้รับแสงอาทิตย์พบว่ามีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบรายวันดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้กลั่น(10,20,30,40%) พบว่าอัตราการกลั่นเพิ่มขึ้นแต่ไม่ได้แสดงในที่นี้



รูปที่ 2.2 อัตราการกลั่นแปรตามค่ารังสีอาทิตย์รายวันแบบเส้นตรงสำหรับการทดลองเดือน พฤษภาคม 2542 เมื่อใช้สารละลายเริ่มต้นความเข้มข้น 10%[13]

การคำนวณสมรรถนะระยะยาวของเครื่องกลั่นโดยใช้ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์

อัตราการกลั่นรายวันจากรูปที่ 2.2 สามารถประมาณได้ด้วยสมการเส้นตรง

$$P_t = a(H_{S_i} - H_C), \text{ เมื่อ } H_{S_i} > H_C \quad (2.5)$$

$$a = 0.1479, \quad H_c = 0.2800,$$

เมื่อ P_i คืออัตราการกลั่นแอลกอฮอล์รายวัน, a คือค่าคงที่, H_{si} คือค่ารังสีอาทิตย์รายวันในแนวราบ และ H_c คือค่ารังสีอาทิตย์วิกฤติที่เครื่องกลั่นเริ่มสามารถผลิตสารละลายเข้มข้นได้ อัตราการกลั่นแอลกอฮอล์เฉลี่ยรายวันสามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\sum_N P_i}{N} = \frac{a \sum_N (H_{si} - H_c)}{N} = \bar{P} \quad (2.6)$$

และ
$$P = a H_s \int_{F_c}^I (X - X_c) dF \quad (2.7)$$

หรือ
$$\bar{P} = a \bar{H}_s \phi \quad (2.8)$$

เมื่อ N คือจำนวนวันในเวลา 1 เดือน ตัวแปรที่มีขีดคือค่าเฉลี่ยของตัวแปรนั้น

ตัวอย่าง

ตัวอย่างของเดือนมกราคมมีค่ารังสีอาทิตย์ $15.9 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$. ค่ารังสีอาทิตย์วิกฤติ (H_c) คือ $0.2800 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$. ดังนั้นอัตราส่วนของค่ารังสีอาทิตย์วิกฤติคือ (X_c) คือ $0.2800/15.9 = 0.0176$. ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์(ϕ)คำนวณจากสมการ 2.3 คือ 0.9819. ดังนั้นจากสมการ 2.8 เราจะได้อัตราการกลั่นรายวันเฉลี่ยสำหรับเดือนมกราคมคือ

$$\bar{P} = 0.1479 \times 15.9 \times 0.9819 = 2.31 \text{ l m}^{-2}\text{day}^{-1}.$$

ตารางที่ 2.2 แสดงอัตราการกลั่นรายวันเฉลี่ยสำหรับทุกเดือน เปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณตามทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน [1] และโดยใช้ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์รายวัน พบว่ามีความแตกต่างกันอยู่ 11% แต่ผลจากการใช้ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์มีความถูกต้องกว่าเพราะคำนึงเฉพาะปริมาณรังสีอาทิตย์ที่นำมาใช้กลั่นแอลกอฮอล์ได้เท่านั้น

ตารางที่ 2.2 อัตราการกลั่นรายวันเฉลี่ยรายเดือน ($\text{l m}^{-2}\text{day}^{-1}$) และค่ารังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยรายเดือน ($\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$) ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและโดยอาศัยฟังก์ชันการใช้ประโยชน์[13]

เดือน	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
H_s	15.9	19.5	21.7	21.3	20.2	18.2	19	18	16.3	15.6	15.8	17.4
X_c	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
P utilizability	2.31	2.84	3.16	3.11	2.95	2.65	2.77	2.62	2.37	2.27	2.30	2.53
P model	2.48	3.27	3.75	3.66	3.42	2.98	3.16	2.94	2.57	2.41	2.46	2.81

แนวทางการออกแบบเครื่องกลั่นเอทานอลพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดอุตสาหกรรม

ควรใช้ค่า P utilizability (อัตราการกลั่น) ในการออกแบบ เพื่อคำนวณหาพื้นที่ใช้งานของระบบกลั่น เมื่อทราบปริมาณแอลกอฮอล์ที่ต้องการผลิตเพื่อเพิ่มความเข้มข้น ถ้าใช้สารละลาย 10 % จะได้ผลผลิตความเข้มข้นประมาณ 18-20 % ปริมาตร และเพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตอย่างเพียงพอทุกๆเดือน ควรใช้ค่า P เพียงทศนิยม 1 ตำแหน่งและใช้ค่าอัตราการกลั่นของเดือนตุลาคม (ค่าน้อยที่สุด, ตารางที่ 2.2) ในการออกแบบ.

หนังสืออ้างอิง

1. P. Namprakai, T. Kiatsiriroat, J. Hirunlabh, Parametric study on ethanol basin solar still, submitted to Renewable Energy.
2. A.A.M. Sayigh, Solar Energy Engineering, Academic Press, 1978.
3. J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, New York, 1980.
4. W.H. McAdams, Heat Transmission, McGraw-Hill, 1954.
5. P. Namprakai, J. Hirunlabh, T. Kiatsiriroat, Ethyl alcohol distillation in a basin solar still, Renewable Energy 11(2): 169-175, 1997.
6. P. Namprakai, Study of heat and mass transfer in ethanol basin solar still, *D Sc thesis*, Energy Technology Program, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Thailand, 1996(in Thai).
7. Meteorological Department, Meteorological observation, *Ministry of Communications*, Bangkok Thailand, 1985.
8. พิชัย นามประกาย, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, การพัฒนาฟังก์ชันการใช้ประโยชน์ในการหาสมรรถนะระยะยาวของตัวรับรังสีแผ่นราบที่วางตัวในแนวราบที่กรุงเทพฯ, วิศวกรรมสาร

ฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 หน้า 84-105, 2535.

9. S.M. ElSherbiny, H.E.S. Fath, Solar distillation under climatic conditions of Egypt, *Renewable Energy* 3(1): 61-65, 1993.
10. M. Farid and F. Hamad, Performance of a single-basin solar still, *Renewable Energy* 3, 75-83, 1993.
11. T. Kaitsiriraot, P. Namprakai and J. Hiranlabh, Performance estimation of a PV water- pumping system with utilizability function, *Energy Research* 17, 305-310, 1993.
12. P. Namprakai, Long-term performance estimation of solar water still based on utilizabilty function, *KMUTT Research and Development Journal* 1999; 22(1):19-29. (www.lib.kmutt.ac.th/www/main10.html or www.kmutt.ac.th)
13. P. Namprakai, J. Hirunlabh, Ethanol still performance estimation based on utilizability, submitted to *Ambient Energy*.

Research Output ที่ได้จากงานวิจัยในโครงการ

1. P. Namprakai, T. Kiatsiriroat, J. Hirunlabh, Parametric study on ethanol basin solar Still, submitted to *Renewable Energy*.
2. P. Namprakai, J. Hirunlabh, Ethanol still performance Estimation Based on Utilizability, submitted to *Ambient Energy*.

ภาคผนวก

Parametric study on ethanol basin solar still

P. Namprakai*, T. Kiatsiriroat, J. Hirunlabh***

***School of Energy and Materials, KMUTT Bangkok 10140**

****Faculty of Engineering, ChiangMai U., ChaingMai 50200, Thailand.**

Abstract

Effect of various parameters on the performance of ethanol basin solar still was studied. Measured hourly productivity increases non-linearly with hourly solar radiation. The highest productivity is found after the time of maximum solar radiation due to heat capacity of basin solution. Monthly mean calculated productivity and measured solar radiation are linearly correlated. Effects of wind speed and ambient temperature on the still performance strongly depend on daily solar radiation. Still height has a little effect on the performance. Increase of initial solution concentration in the basin can improve the still yield. Lowering solution depth can also raise still product.

Keywords: Ethanol; Basin solar still; Parameters

1.Introduction

As environmental problem such as toxic emission gases from many oil-base vehicle increases, ethanol becomes the more promising fuel. In Brazil and U.S.A ethanol has been used as a substitute of oil in transportation and military base extensively. Although it has a higher cost comparing with fuel oils. Such application of ethanol in Thailand needs an effective and economical tool such as solar still to raise alcohol primary concentration. However, calculating of performance of such still [1] are few and do not give a very satisfactory result. Study of effect of major parameters on still performance is essential. In this study, relation between the still output and solar radiation was investigated theoretically and experimentally, focusing on the effect of wind speed, ambient temperature. The other parameters affecting still performance were also studied. Established mathematical model for

our ethanol distillation bases mainly on Dunkle's and Spalding's [2] with the modification of Morse and Read; Howe and Tleimat [3]. Knowledge of heat and mass transfer within the still would be applied. More details and verification can be found in doctoral thesis of the author [4].

2. Equipment and experiment

The experimental unit (Fig. 1) has 17 cm. height and 1.62×0.54 m absorbing area. It is well insulated with 3-cm foam. The outside and inside surfaces are made of 1 mm thick stainless steel sheet. The glass cover was 3 mm. thick and inclined 14 degrees to horizontal. Two rectangular holes at the still back are for cleaning purpose. The unit was placed on a stand and oriented south-facing. Black aluminium sheet as a solar energy absorber was placed inside the still. Solution depth in the still basin was 2 cm and kept constant by the supply tank during experiment. At the end of each hour, ambient temperature, wind velocity, solar radiation and productivity were measured. Hybrid recorder (Yokogawa, Japan), hot-wire anemometer (Kanomax, Japan), solarimeter (Kipp & Zonen, Holland), one-liter cylinder and alcoholometer for measuring solution concentration were employed as

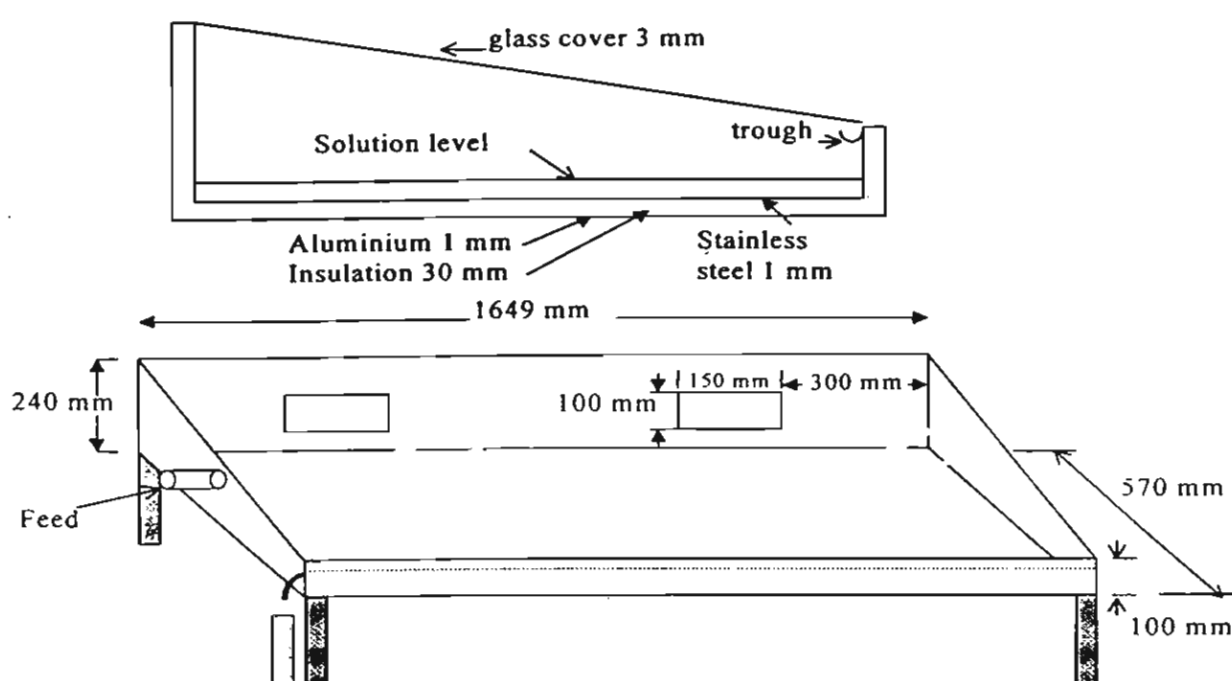


Fig.1 A horizontal basin solar still [4]

equipments and materials in this out-door test. Experimentation was done from 8.00 a.m. up to 5.00 p.m. Parameters used in calculation for this solar still are listed below [4]:

$$\alpha(\text{absorber}) = 0.9, \quad \alpha(\text{glass}) = 0.1, \quad \varepsilon(\text{solution}) = 0.96, \quad \varepsilon(\text{glass}) = 0.85,$$

$$\varepsilon(\text{aluminium}) = 0.33, \quad \tau(\text{solution}) = 0.9, \quad \tau(\text{glass}) = 0.74,$$

$$C_p(\text{ethanol}) = 2508 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}, \quad (mC_p)\text{-glass} = 4314 \text{ J K}^{-1}, \quad m \text{ is weight of glass},$$

$$C_p(\text{water}) = 4186 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}, \quad C_p(\text{glass}) = 670 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$\rho(\text{water}) = 0.9953 \text{ kg/lit.}, \quad \rho(\text{ethanol}) = 0.7779 \text{ kg/lit.}$$

$$\text{From experiment: bottom loss coefficient, } U = 1 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1},$$

$$\text{convective heat transfer coefficient, } h_{ca}(\text{outer side of the still}) = 6.6 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\text{radiative heat transfer coefficient, } h_{rs}(\text{outer side of the still}) = 2.3 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$$

3. Theoretical analysis

Alcohol in the basin

The absorbed solar energy by alcohol solution in the basin is equal to losses by convection, evaporation and radiation to the cover plus energy stored by basin alcohol and all heat losses through still wall and then surrounding. The mathematical expression based on Dunkle; Morse and Read [3] is shown as:

$$\alpha_{an} \tau_g A H_s = (q_e + q_c + q_r) + q_s + (\sum mc_p)_m \frac{dT_m}{dt} \quad (1)$$

The glass cover

Energy transfer by convection, evaporation and radiation from solution in the basin to the cover plus the absorbed solar energy by the cover are equal to energy stored by cover mass and energy convection by wind and thermal radiation to surrounding. Based on Dunkle; Howe and Tleimat [3], this energy balance can be mathematically expressed as:

$$\alpha_g A H_s + q_e + q_c + q_r = (mc_p)_g \frac{dT_g}{dt} + q_{ca} + q_{ra} \quad (2)$$

Heat convection by evaporation of alcohol may be calculated by using Spalding theory [2]. It is expressed as:

$$q_e = \sum m''_i h_{fgi} A \quad (3)$$

The alcohol and water mass transfer rates in the still can be calculated from:

$$m''_i = m'' \cdot m_{iT} \quad (4)$$

Where m_{iT} is transfer mass fraction of component i , and m'' is total mass transfer rate, which may be evaluated from [2,5]:

$$m'' = g \ln(1 + B) \quad (5)$$

g is mass transfer conductance and B is a driving force obtained from air mass fraction, which is [6]:

$$B = \left(\frac{m_G - m_S}{m_S - m_T} \right)_{air} \quad (6)$$

Where transfer mass fraction of air is normally zero. m represents mass fraction, G , S represent condensing and evaporating surfaces. The transfer mass fraction of component i , m_{iT} can be obtained from Namprakai et al.[6]:

$$m_{iT} = m_{iS} - \frac{(m_{iG} - m_{iS})}{B} \quad (7)$$

Mass transfer conductance (g) in the solar still is experimentally obtained [6]

$$\frac{g \cdot x}{\rho D} = 0.064(Gr \cdot Sc)^{1/3} (\%v / v)^{0.1776} \quad (8)$$

turbulent, $10^5 \leq Gr < 10^7$

Where ρ is vapor density. Heat convection in the still is calculated from

$$q_c = h_c A (T_M - T_g) \quad (9)$$

Where h_c is convective heat transfer coefficient. It is obtained from a correlation for air in an enclosed space. By the assumption that the effect of vapors in the still is neglected. It is expressed as [7]:

$$\frac{h_c x}{k} = 0.075(Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad (10)$$

Energy losses by radiation in the still are assumed similar to those between parallel planes of equal area. It is calculated from [8]:

$$q_r = \epsilon_M \sigma A [(T_M + 273)^4 - (T_g + 273)^4] \quad (11)$$

Energy lost from the cover is convection by wind and thermal radiation to surrounding. The heat convection is estimated from [8]:

$$q_{ca} = h_{ca} A (T_g - T_a) \quad (12)$$

Where $h_{ca} = 2.8 + 3 V$. V is wind velocity in m/s.

The second loss by thermal radiation is expressed as :

$$q_{ra} = \epsilon_g \sigma A [(T_g + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4] \quad (13)$$

Where sky temperature is got from [8]:

$$T_{sky} = 0.0552 (T_a + 273)^{1.5} - 273 \quad (14)$$

The last term for loss from outside of the still is:

$$q_s = UA (T_M - T_a) \quad (15)$$

Where $U = [L_g/k_s + 1/(h_n + h_{ca})]^{-1}$, overall loss coefficient obtained from experiment.

4. Effect of solar radiation on still productivity

Computed productivity of 10 % ethanol solar still is shown linearly as a function of daily solar radiation, Fig.2. Temperature cycle of basin solution is complete within one day ensuring that absorbed solar energy is used up. Wibulswas and Amarage [9] experimentally found a linear equation of daily still yield and solar radiation with a little non-linear trend at high solar radiation. Measured hourly still output responds non-linearly to solar radiation, Fig.3. This is due to heat capacity of the basin solution.

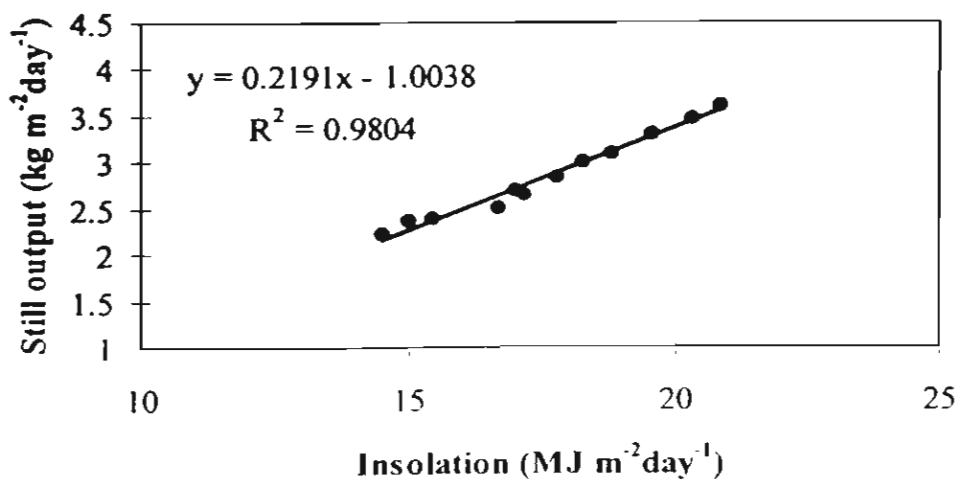


Fig.2 Calculated still output as a function of monthly mean daily total solar radiation

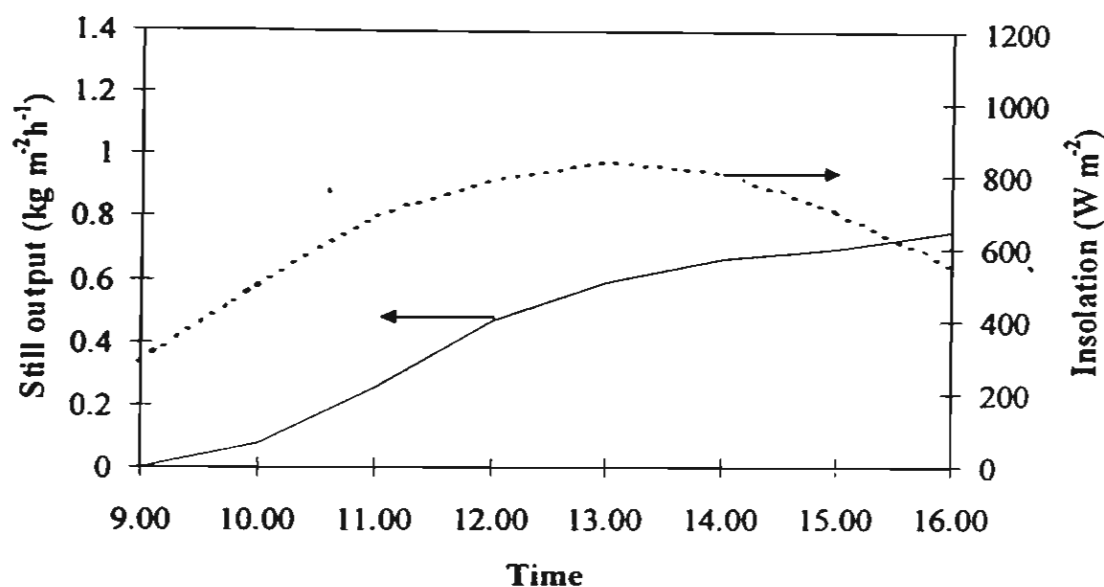


Fig.3 Measured hourly still output and total solar radiation as a function of time.

5. Effect of various parameters on still performance

From Namprakai's work [10] monthly mean wind speed and ambient temperature in Bangkok relate linearly to monthly mean daily solar radiation. That is high solar radiation resulting in high ambient temperature and wind speed. Estimations using hourly and daily mean wind speed and ambient temperature as a program input are nearly similar with only 3% total errors showing a natural dependence of still performance on daily averages of these parameters, Fig.4. Wind speed variation has a little effect on the still production [11]. Increasing wind speed slightly decreases the production rate [11]. However, increasing ambient temperature increases water temperature and thus production rate in a basin. Effect of these two parameters on still performance depends strongly on daily solar radiation.

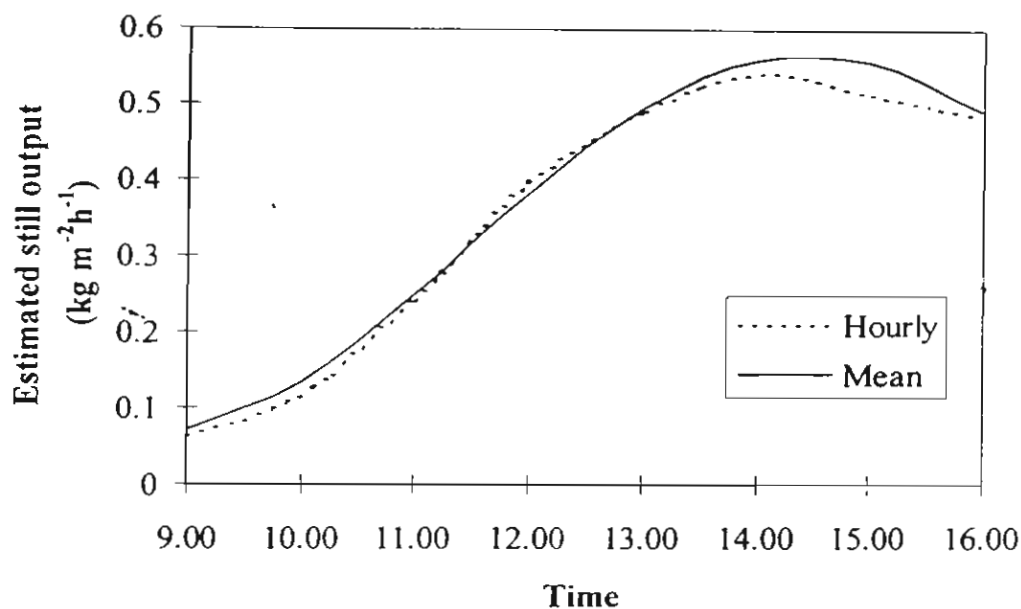


Fig.4 Comparison of hourly still output between those estimated using mean and hourly ambient temperature and wind speed.

Solution temperature in the testing 0.7 x 0.7 m still was controlled between 45-70 °C while initial solution concentration can be varied. Influence of initial solution concentration on mean still output from this indoor-test is presented in Fig.5 The optimal initial solution concentration for maximum productivity was found at 50 % v/v.

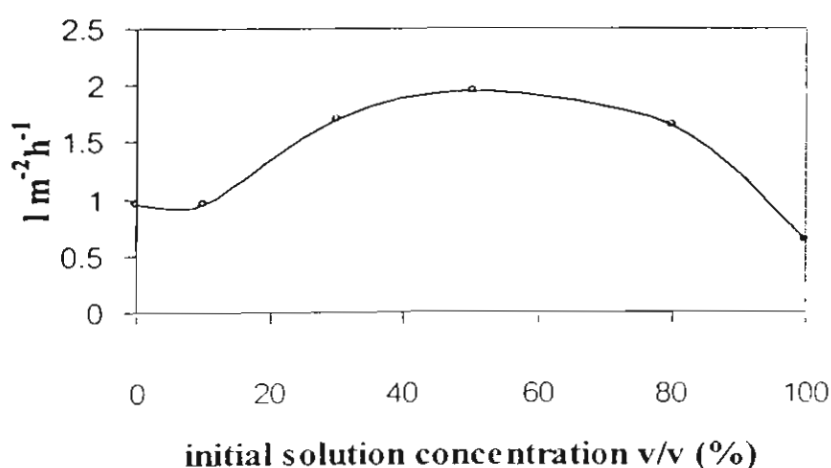


Fig.5 Mean still yield as a function of initial alcohol concentration.

Beyond this point, still performance gradually drops due to a massive molecule of alcohol, which can reduce the aid of convection current for more evaporation rate. Lowering solution

NOMENCLATURE

a,b,c,d	constants in eqns (3) and (5)
F	fractional time
F_C	fractional time at X_C
H_C	critical daily total solar radiation on a horizontal surface, $\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$
$\bar{H}_s$	monthly mean daily total solar radiation on a horizontal surface, $\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$
H_{Si}	daily total solar radiation on a horizontal surface, $\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$
N	number of days in a month, days
$\bar{P}$	monthly mean daily production rate, $\text{l m}^{-2}\text{day}^{-1}$
P_i	daily production rate, $\text{l m}^{-2}\text{day}^{-1}$
X	ratio of daily total solar radiation to monthly mean daily total solar radiation
X_C	critical radiation ration
X_{MAX}	maximum radiation ration
ϕ	utilizability function based on daily total solar radiation

REFERENCES

1. J.A. Duffie and W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, New York (1980).
- 2.. T. Kaitsiriraot, P. Namprakai and J. Hiranlabh, Performance estimation of a PV

U	overall loss coefficient from the bottom and side of the still, $\text{W/m}^2\text{K}$
V	wind velocity, m/s
x	gap size, m

Greek Symbols

α	absorptivity
ϵ	emissivity
ρ	density, kg/m^3
τ	transmissivity
σ	Stefan-Boltzmann constant, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
% v/v	percent by volume of alcohol solution

Subscripts

a _n	black absorber
G	condensing surface
g	glass cover
i	component i
M	alcohol solution
S	evaporating surface
T	transfer state

References

1. Shawaqfeh AT, Farid MM, Distillation of ethanol in a solar still: studies on heat and mass transfer, J. Solar Energy Engineering 1995; 117:236-241.
2. Spalding DB, Convective Mass Transfer, Edward Arnold, 1963.
3. Sayigh AAM, Solar Energy Engineering, Academic Press, 1978.
4. Namprakai P, Study of Heat and Mass Transfer in Ethanol Basin Solar Still, DSc thesis, Energy Technology Program, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 1996.
5. Kiatsiriroat T, Bhattacharaya SC, Wibulswas P, Prediction of mass transfer in solar still, Energy 1986; 11(9):881-886.
6. Namprakai P, Hirunlabh J, Kiatsiriroat T, Ethyl alcohol distillation in a basin solar still, Renewable Energy 1997; 11(2):169-175.
7. McAdams WH., Heat Transmission, McGraw-Hill, 1954.
8. Duffie JA, Beckman WA, Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley & Sons, 1980.

9. Arambage CP, Wibulswas P, Solar Distillation of Ethanol, Clean and Safe Energy, Pergamon Press, Oxford, pp-1500-1504, 1988.
10. Namprakai P, Long-term performance estimation of solar water still based on utilizabilty function, KMUTT Research and Development Journal 1999; 22(1):19-29.
11. ElSherbiny SM, Fath HES, Solar distillation under climatic conditions of Egypt, Renewable Energy 1993; 3(1):61-65.

ETHANOL STILL PERFORMANCE ESTIMATION BASED ON UTILIZABILITY

P. Namprakai, J. Hirunlabh

School of Energy and Materials

King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT)

Bangkok Thailand 10140

ABSTRACT- Measured daily still productivity strongly depends linearly on daily total solar radiation. Hourly productivity's calculation based on heat-transfer model confirms this relation. Utilizability was used to find the long-term performance of the ethanol still. This performance was compared to that of heat-transfer model. Utilizability function developed in this study is based on daily total solar radiation.

1. INTRODUCTION

Ethanol as a substitute of fuel oil is now very interesting. It can improve air quality in transportation system. Villagers usually produce 10% alcohol from rice, cassava, corn, and palm. To raise concentration of this alcohol needs a solar still. Solar energy can heat the solution temperature up to 70 °C in basin solar still. Calculation of long-term performance of this still based on hourly calculation is more expensive. The objective of this study was to develop an effective and economical technique to predict long-

term performance of solar ethanol still based on utilizability [1]. Utilizability is a function based on one available data, daily solar radiation.

2. EQUIPMENT AND EXPERIMENT

The experimental unit (Fig. 1) has 17-cm height and 1.62 x 0.54 m absorbing area. It is well insulated with 3-cm foam. The outside and inside surfaces are made of stainless steel sheet of 1-mm thickness. The glass cover is 3-mm thick and inclined 14 degrees to horizon. The unit is placed on a stand and oriented south-facing. Black aluminium sheet as a solar energy absorber is placed inside the still. Solution depth in the still is 2 cm and kept constant by the supply tank during experiment. Solutions of 10, 20, 30, 40 percents by volume were distilled. At the end of each hour, ambient temperature, wind velocity, solar radiation and productivity are measured. Hybrid recorder (Yokogawa, Japan), hot-wire anemometer (Kanomax, Japan), solarimeter (Kipp & Zonen, Holland) and one-liter cylinder are

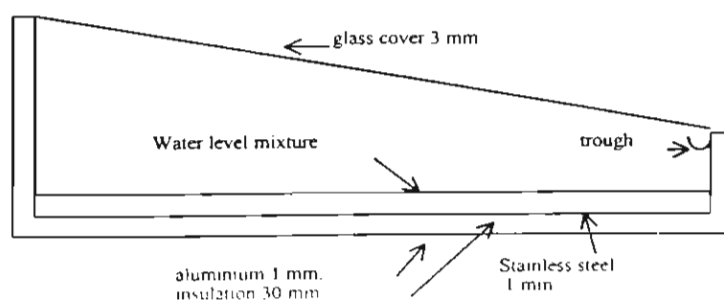


Fig.1 A horizontal basin solar still

used as equipment and materials in this out-door test. Experimentation is done from 8.00 a.m. up to 5.00 p.m.

3. UTILIZABILITY

Utilizability is a ratio of total useful solar energy to total solar energy collectable in particular period. It can be used for calculation of performance of solar collectors as in [1,2,3]. It can be calculated from:

$$\phi = \int_{F_c}^1 (X - X_c) dF \quad (1)$$

or

$$\begin{aligned} \phi &= \int_{X_c}^{X_{\max}} (1 - F) dX \\ &= 1 - \int_0^{X_c} (1 - F) dX \end{aligned} \quad (2)$$

Where X is a ratio of daily solar radiation to its mean in a month. X_c is a critical value that the corresponding production rate is zero. $X_{\max}$ is maximum radiation ratio. F is fractional time that has radiation ratio less than X . F_c is fractional time that has radiation ratio less than X_c . The fractional time relating to radiation ratio is shown in Fig. 2. The shaded area represents utilizability (ϕ). Utilizability functions based on daily total solar radiation on a horizontal plane (KMUTT, Bangkok, 1979-1988) can be expressed in fitted equation as follows:

$$\phi = 1 - (a X_c + b X_c^2 + c X_c^3 + d X_c^4) \quad (3)$$

and
$$F = -2b X - 3c X^2 - 4d X^3 \quad (4)$$

Where calculated values of constants a , b , c and d in eqn (3) are shown in Table 1.

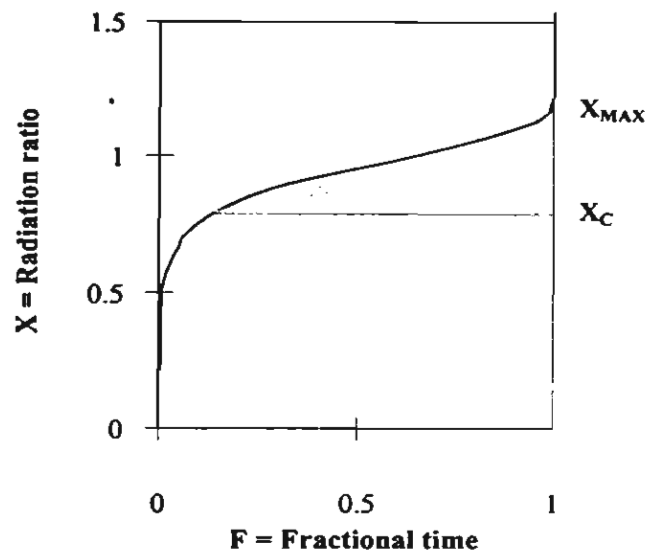


Fig. 2 Cumulative radiation frequency curve in January 1979-1988 (KMUTT, Bangkok)[4].

Table 1. Values of constants a, b, c and d in eqn (3)[4]

Month	a	b	c	d
Jan	1.030	-0.028	0.298	-0.338
Feb	1.076	-0.359	0.814	-0.567
Mar	1.086	-0.467	0.968	-0.629
Apr	1.052	-0.275	0.611	-0.444
May	1.010	-0.127	0.318	-0.280
Jun	0.924	0.363	-0.431	0.046
Jul	0.952	0.215	-0.208	-0.050
Aug	0.943	0.174	-0.221	-0.014
Sep	0.906	0.267	-0.365	0.055
Oct	0.900	0.490	-0.623	0.129
Nov	0.957	0.245	-0.248	-0.038
Dec	1.106	-0.497	1.047	-0.691

4. EFFECT OF VARIOUS PARAMETERS ON PERFORMANCE

It was concluded that ambient temperature and wind speed varied linearly to solar radiation[4]. Calculated productivity strongly depends on daily solar radiation [5]. In this study, measured daily production rate has very important effect of daily solar radiation as shown in Fig. 3. Therefore, it can be concluded that daily solar radiation is the most important climatic parameter affecting production rate.

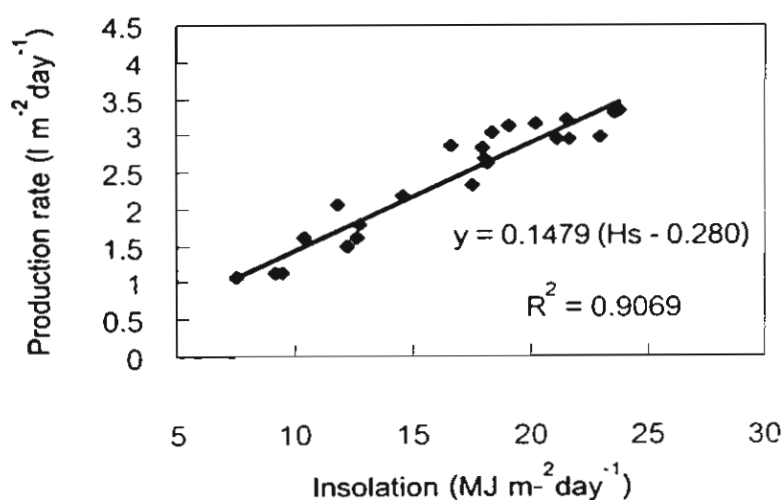


Fig. 3 Production rate as a function of daily total solar radiation obtained from this study for the month of May 1999 for 10% solution.

5. PERFORMANCE ESTIMATION BASED ON UTILIZABILITY

The daily production rate in Fig.3 can be approximately calculated from the fitted equation:

$$P_i = a(H_{Si} - H_C), \text{ for } H_{Si} > H_C \quad (5)$$

$$a = 0.1479, \quad H_C = 0.2800,$$

Where P_i is daily production rate, a is a constant, H_{si} is daily total solar radiation and H_c is a threshold insolation at which a still starts to produce yield. Daily mean production rate then can be calculated from:

$$\frac{\sum_N P_i}{N} = \frac{a \sum_N (H_{si} - H_c)}{N} = \bar{P} \quad (6)$$

and
$$\bar{P} = a H_s \int_{F_c}^I (X - X_c) dF \quad (7)$$

or
$$\bar{P} = a \bar{H}_s \phi \quad (8)$$

Where N are a number of days in a month. Variables with over-bar represent their corresponding means.

Examples

In January monthly mean daily total solar radiation is about $15.9 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$. Critical solar radiation (H_c) is $0.2800 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$. Therefore critical radiation ration (X_c) is $0.2800/15.9 = 0.0176$. Utilizability (ϕ) calculated from eqn (3) is 0.9819. Then from eqn (8) we obtain monthly mean daily production rate:

$$\bar{P} = 0.1479 \times 15.9 \times 0.9819 = 2.311 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}.$$

The monthly mean daily production rates all the year are compared between hourly calculation based on heat-transfer model [5] and that of utilizability concept from eqn (8) as shown in Table 2. The two annual production rates are slightly different showing that the first one is higher than the second one within 11 %.

Table 2. The monthly mean daily production rates ($l\ m^{-2}day^{-1}$) and total solar radiation ($MJ\ m^{-2}day^{-1}$) obtained from hourly [5] and utilizability base calculation.

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
H_s	15.9	19.5	21.7	21.3	20.2	18.2	19	18	16.3	15.6	15.8	17.4
X_c	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
P utilizability	2.31	2.84	3.16	3.11	2.95	2.65	2.77	2.62	2.37	2.27	2.30	2.53
P model	2.48	3.27	3.75	3.66	3.42	2.98	3.16	2.94	2.57	2.41	2.46	2.81

6. CONCLUSIONS

The performances based on heat-transfer model [5] and utilizability is slightly different. The advantage of utilizability concept is that it uses only solar energy, which can produce corresponding yield. Around 969 liters of product per square meter of solar still can be obtained annually. The efficiency is approximately 38 % (Fig. 3). Twenty percents alcohol output can be produced in 10%-solution still. It is recommended that P (utilizability) for October should be used in finding still area on an industrial scale.

Acknowledgements

The authors wish to express their appreciation to the Thailand Research Fund (TRF) for their financial support and to School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) for solar radiation database.

NOMENCLATURE

a,b,c,d	constants in eqns (3) and (5)
F	fractional time
F _C	fractional time at X _C
H _C	critical daily total solar radiation on a horizontal surface, MJ m ⁻² day ⁻¹
H _S	monthly mean daily total solar radiation on a horizontal surface, MJ m ⁻² day ⁻¹
H _{Si}	daily total solar radiation on a horizontal surface, MJ m ⁻² day ⁻¹
N	number of days in a month, days
$\bar{P}$	monthly mean daily production rate, l m ⁻² day ⁻¹
P _i	daily production rate, l m ⁻² day ⁻¹
X	ratio of daily total solar radiation to monthly mean daily total solar radiation
X _C	critical radiation ration
X _{MAX}	maximum radiation ration
φ	utilizability function based on daily total solar radiation

REFERENCES

1. J.A. Duffie and W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, New York (1980).
- 2.. T. Kaitsiriraot, P. Namprakai and J. Hiranlabh, Performance estimation of a PV

- water- pumping system with utilizability function, *Energy Research* 17, 305-310 (1993).
3. P. Namprakai, T. Kiatsiriroat, Utilizability functions for flat plate solar collector on a horizontal plane at Bangkok, Research & Development Journal of the Engineering Institute of Thailand 3(1), 1992. (in Thai)
 4. P. Namprakai, Long-term performance estimation of solar water still based on utilizabilty function, KMUTT Research and Development Journal 1999; 22(1):19-29.
 5. P. Namprakai, T. Kiatsiriroat, J. Hirunlabh, Parametric study on ethanol basin solar Still, submitted to Renewable Energy.