

การกลั่นเอทานอลด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อความร้อน Ethanol Distillation with Heat Pipe Solar Collector

พรประสิทธิ์ คงบุญ ณัฐ วรยศ วีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล และทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถ.ห้วยแก้ว อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200
โทร 0-5394-4146 โทรสาร 0-5394-4145 E-mail: nat@dome.eng.cmu.ac.th

Pronprasit KONGBOON Nat VORAYOS Theerapong WONGRATANAPHISAN and Tanongkiat KIATSIRIROAT
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
239 Huay Kaew Rd. Muang District, Chiang Mai 50200
Tel: 0-5394-4146 Fax: 0-5394-4145 E-mail: nat@dome.eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงสมรรถนะในการกลั่นเอทานอลด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยอาศัยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อความร้อนขนาดพื้นที่รับรังสี 3.6 ตารางเมตรเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นความร้อนสำหรับการกลั่น ระบบกลั่นจะใช้เทคนิคการกลั่นแบบเดิมสารอย่างต่อเนื่องที่มีขนาดหม้อต้มซ้ำเท่ากับ 50 ลิตร ทำการทดสอบระบบกลั่น ณ ค่าตัวแปรต่างๆ อาทิ อัตราการป้อนสาร ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น และการใช้หอกลั่น เพื่อศึกษาถึงอัตราการกลั่นและความเข้มข้นที่กลั่นได้ นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อนนำไปใช้ทำนายผลการกลั่นระยะยาวภายหลัง ทั้งนี้จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าแตกต่างไม่เกินร้อยละ 15 เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำนายสมรรถนะการกลั่นระยะยาวโดยใช้ค่าแสงอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่ พบว่า สำหรับระบบกลั่นที่มีขนาดหม้อต้มซ้ำไม่เกิน 50 ลิตร จะได้ว่า ระบบกลั่นที่ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ขนาด 9 ตารางเมตรทำการกลั่นสารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 ด้วยอัตราการป้อนเท่ากับ 0.18 ลิตรต่อนาที จะให้ต้นทุนการกลั่นต่อหน่วยต่ำสุดเท่ากับ 3.9 บาทต่อลิตร โดยมีปริมาณสารละลายเอทานอลที่กลั่นได้เท่ากับ 5042 ลิตรต่อปี มีความเข้มข้นที่กลั่นได้เท่ากับร้อยละ 35.7

Abstract

The investigation of the solar distillation system using 3.6 m² heat-pipe solar collector is carried out. The collector is used to connect the solar energy to be the heat source to distillation. The distillation unit is concentrate such that the continuous distillation in 50 L reboiler can be advance at various parameter set-ups including varied ethanol charge rate, charge concentration and the distillation column. The system performance in terms of

distillation rate and product concentration is determined and compared with that predictor from the mathematical modeling the comparison shows less than 15% difference Mathematical simulation predict the system annual performance such that, for 50 L reboiler, the constant unit cost is obtained when 9 m² solar collector is used to distill 10% ethanol-water to be 35.7% ethanol-water with 0.18 L/min charge rate. The annual productivity of the system is 5042 L/year with the unit price of 3.9 bath/L

1. บทนำ

เอทานอลที่ได้จากการหมักผลผลิตทางการเกษตรจะมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 8-10 [1] ซึ่งถ้าจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง เอทานอลที่ใช้ต้องมีความเข้มข้นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 ดังนั้นเพื่อนำมาใช้จึงต้องผ่านกรรมวิธีที่จะทำให้เอทานอลที่ได้บริสุทธิ์ขึ้น กรรมวิธีหนึ่งที่ยอมรับในปัจจุบันได้แก่ การกลั่น โดยที่กระบวนการกลั่นจะต้องมีแหล่งความร้อนสำหรับการกลั่น ทั้งนี้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนอย่างหนึ่งที่สามารถใช้เป็นแหล่งความร้อนในกระบวนการกลั่นเอทานอลได้ โดยการนำตัวเก็บรังสีมาทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นความร้อนสำหรับการกลั่น

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาการกลั่นเอทานอลด้วยวิธีต่างๆ คือ จีรศักดิ์และวีระชัย [2] ทำการกลั่นแอลกอฮอล์จากความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 10 ด้วยตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบขนาดพื้นที่รับรังสี 1.44 ตารางเมตร พบว่า อัตราการกลั่นที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อตารางเมตร ที่ความเข้มข้นร้อยละ 48 วิชาญ [5] ได้ศึกษาการกลั่นเอทานอลด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบขนาด 1.4 ตารางเมตร ด้วยวิธีการกลั่นแบบบีบภายใต้ความดันต่ำ และพบว่า ปริมาณการกลั่นที่ได้จากระบบนี้มีค่าเท่ากับ 2.1 ลิตรต่อวัน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 56 จากความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 10 จะเห็นได้ว่า งานวิจัยดังกล่าวทำการศึกษาเพื่อหาปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่กลั่นได้เท่านั้น โดยมีได้กล่าวถึงสมรรถนะการ

กลั่นระยยาวและต้นทุนในการกลั่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงสมรรถนะในการกลั่นเอทานอลและหาต้นทุนการ กลั่น โดยจะทำการทดลองกลั่นเอทานอลที่มีความเข้มข้นตั้งต้นร้อยละ 10 เช่นเดียวกัน ด้วยเทคนิคการกลั่นแบบเติมสารอย่างต่อเนื่อง (Continuous distillation) ที่ทำงานภายใต้ความดันบรรยากาศ โดยมีการออกแบบและจัดสร้างระบบกลั่นดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย อุปกรณ์ควบแน่น (Condenser) หอกลั่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หม้อต้มข้าขนาดปริมาตร 50 ลิตร และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อความร้อนขนาด 3.6 ตารางเมตร การวิจัยจะทำการทดลอง ณ ค่าตัวแปรต่างๆ อาทิ อัตราการป้อนสาร ความเข้มข้นสารป้อน และการใช้หอกลั่น เพื่อหาปริมาณและความเข้มข้นที่กลั่นได้ นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับใช้ในการทำนายผลการกลั่นตลอดทั้งปีโดยใช้ค่าแสงอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่ พร้อมทั้งคำนวณหาต้นทุนการกลั่นของระบบกลั่น



รูปที่ 1 ระบบกลั่นเอทานอลด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 การคำนวณรังสีแสงอาทิตย์

การคำนวณรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับ ในกรณีตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ที่วางเอียงเพื่อรับรังสีอาทิตย์ จะต้องคำนวณค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกบนพื้นเรียบในแนวเอียงจากแนวระนาบที่มุมต่างๆ จะมีแนวทางในการคำนวณดังนี้ [8]

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \rho \quad (1)$$

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2)$$

2.2 การคำนวณความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ระบบกลั่นเอทานอลด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อความร้อน ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์จะรับความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์และส่งผ่านความร้อนไปยังสารละลายเอทานอลที่ไหลผ่านตัวเก็บรังสี ทำให้สารละลายเอทานอลเดือดกลายเป็นไอเคลื่อนเข้าสู่หอกลั่น เพื่อเพิ่มความเข้มข้นให้กับสารละลายเอทานอล ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดท่อความร้อนจะมีการสูญเสียความร้อนน้อยมาก [2] ค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Q_u = (\tau \alpha) I_T A_c - U_L A_c (T_c - T_a) \quad (3)$$

$$Q_u = \eta I_T A_c \quad (4)$$

2.3 การคำนวณเกี่ยวกับการกลั่น

ในงานวิจัยนี้ระบบกลั่นที่สร้างขึ้นจะทำงานด้วยเทคนิคการกลั่นแบบเติมสารอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ในการทดลองจะทำการอุ่นสารป้อนให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยอาศัยความร้อนที่ถูกระบายทิ้งที่คอนเดนเซอร์ อันเป็นการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจะทำให้สมรรถนะของระบบมีค่าสูงขึ้น โดยที่ทฤษฎีที่ใช้คำนวณเกี่ยวกับระบบกลั่นประกอบด้วย

การคำนวณหาอุณหภูมิในหม้อต้มข้า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีทางตัวเลขได้ดังนี้

$$T_f^{t+\Delta t} = T_f^t + \frac{(Q_u - (UA)_{rb} (T_{rb} - T_a)) \Delta t}{M_s C_{ps} + M_f C_{pf}} \quad (5)$$

การคำนวณหาปริมาณไอเอทานอลที่ออกจากหม้อต้มข้า ในช่วงกระบวนการกลั่นสามารถหาได้จากสมการ

$$m_e = \frac{Q_u - (UA)_{rb} (T_{rb} - T_a)}{L} \quad (6)$$

การคำนวณหาอุณหภูมิสารป้อนหลังได้รับความร้อนจากคอนเดนเซอร์ สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$T_F = T_{F,in} + \frac{Q_{cd}}{m_F C_{pF}} \quad (7)$$

การคำนวณหาปริมาณเอทานอลที่ออกจากหอกลั่น สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$m_{e,dc} = m_e + (1-q)F \quad (8)$$

โดยที่

$$q = 1 + \frac{C_{pF} (T_b - T_F)}{L} \quad (9)$$

จากการสมมูลมวลที่หม้อต้มข้า ปริมาณของสารละลายเอทานอลที่เหลือในหม้อต้มข้าสามารถคำนวณได้จากสมการสมมูลมวลรวมและสมมูลมวลเอทานอล ตามลำดับ

$$\frac{dM_f}{dt} = -m_e + m_{rt} \quad (10)$$

$$\frac{dx_f M_f}{dt} = y m_e + x_{rt} m_{rt} \quad (11)$$

กระบวนการกลั่นสารละลายเอทานอล-น้ำที่สภาวะสมดุลของระบบสารสององค์ประกอบ คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารสององค์ประกอบจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของระบบ สำหรับสารละลายสององค์ประกอบการคำนวณความดันในเฟสไอที่อยู่ในสภาวะสมดุลกับเฟสของเหลวที่อุณหภูมิต่างๆหาได้ดังนี้ [6]

$$P_t = \gamma_{e,I} x_{e,I} P_e + \gamma_{w,I} x_{w,I} P_w \quad (12)$$

สัดส่วนโมลของเอทานอลในเฟสไอ (y) เป็นดังนี้ [6]

$$y = \frac{\gamma_{e,I} x_{e,I} P_e}{P_t} \quad (13)$$

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะทำงานภายใต้ขอบเขตของระบบกลั่นที่ได้จากการออกแบบ โดยระบบกลั่นที่ได้จากการออกแบบเพื่อใช้กลั่นเอทานอลให้ได้เอทานอลความเข้มข้นไม่เกิน 80% จากเอทานอลความเข้มข้นเริ่มต้น 10% จะต้องใช้หอกลั่นที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีกราฟิกของ McCabe-Thiele [7] จากการคำนวณพบว่าหอกลั่นควรจะมี 3 ชั้น โดยลักษณะของเครื่องกลั่นเอทานอลที่ใช้ในการคำนวณเพื่อเทียบกับระบบจริงที่ทดสอบสามารถสรุปได้มีดังนี้

พื้นที่รับความร้อนรวม	3.6	m ²
ปริมาตรหม้อต้มข้า	50	ลิตร
ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น	10	%ปริมาตร
จำนวนชั้นหอกลิ้น	1,2 และ 3 ชั้น	
ความสูงชั้นหอกลิ้น	20	เซนติเมตร/ชั้น
เส้นผ่านศูนย์กลางหอกลิ้น	4	นิ้ว
ความดันทำงาน	1	บรรยากาศ

ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาสมรรถนะของเครื่องกลั่นเอทานอลข้างต้น เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจะอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ดังที่กล่าวมา ค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณแบบจำลองคือ อัตราการป้อนสารและความเข้มข้นตั้งต้นของสารป้อน อุณหภูมิของสารป้อน จำนวนชั้นหอกลิ้น พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ ค่ารังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของวันที่ทำการทดสอบ ซึ่งจะถูกใช้ไปในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลายในหม้อต้มข้า การเปลี่ยนแปลงปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายในหม้อต้มข้า ปริมาณและความเข้มข้นที่ออกจากหม้อต้มข้า และหอกลิ้นชั้นต่างๆ นำไปสู่ปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายที่กลั่นได้จากระบบกลั่นตลอดทั้งวัน โดยผลที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง ทั้งนี้ในการทดลองจะทำการบันทึกข้อมูลการทดลองอันได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณแสงอาทิตย์ ความเร็วลม ปริมาณการกลั่น และความเข้มข้น ทุก 15 นาที

4. ผลการทดลองกลั่นสารละลายเอทานอล

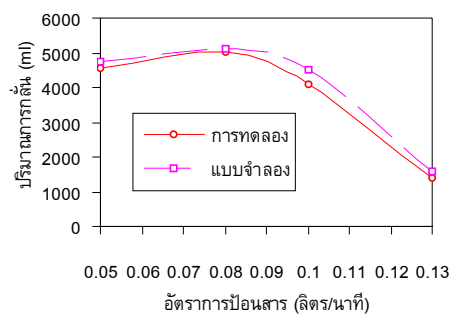
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบผลจากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองจริง เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองก่อนที่จะนำมาใช้ทำนายผลการกลั่นตลอดปีภายหลัง โดยจะได้รายงานตามตัวแปรต่างๆดังนี้

4.1 ผลของอัตราการป้อนสารที่มีต่อสมรรถนะการกลั่น

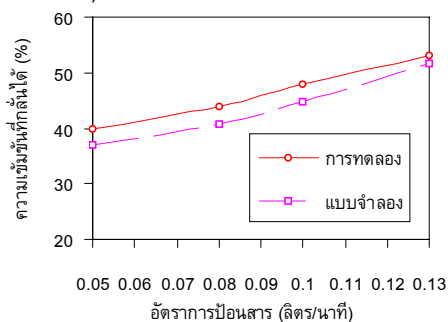
ผู้วิจัยได้ทำการทดลองกลั่นสารละลายเอทานอลโดยใช้แผงรับแสงอาทิตย์แบบท่อความร้อนขนาด 3.6 ตารางเมตร และระบบกลั่นแบบไม่ใช้หอกลิ้น โดยจะทำการทดลองที่ความเข้มข้นสารป้อนเท่ากับร้อยละ 10 ณ อัตราการป้อนสารค่าต่างๆ ทั้งนี้ระบบจะใช้ความร้อนที่ถูกระบายทิ้งที่คอนเดนเซอร์มาอุ่นสารป้อนให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น อันเป็นการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ทำให้ระบบมีสมรรถนะสูงขึ้น ซึ่งจากการทดลองจะได้ว่า อัตราการป้อนสารจะมีผลต่อสมรรถนะการกลั่นโดยตรง กล่าวคือ หากป้อนสารละลายเข้าสู่หอกลิ้นในอัตราที่มากเกินไปความร้อนที่ได้รับจากแผงรับแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอที่จะทำให้สารละลายเอทานอลเกิดการกลั่นตัวได้ ส่วนกรณีที่ป้อนสารละลายเข้าสู่หอกลิ้นในอัตราที่น้อยเกินไป สารละลายจะระเหยหมดอย่างรวดเร็วทำให้ผลผลิตที่ได้ในแต่ละวันน้อยและมีความเข้มข้นของเอทานอลต่ำ

หากพิจารณาปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่กลั่นได้โดยรวมตลอดทั้งวัน ณ อัตราการป้อนสาร 0.05, 0.08, 0.1 และ 0.13 ลิตรต่อหน้าที่ ดังปรากฏในรูปที่ 2 และ 3 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารละลายเข้าสู่หอกลิ้น ปริมาณของสารละลายที่กลั่นได้จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งปรากฏว่าปริมาณดังกล่าวจะตกลง ทำให้เกิดค่าอัตราการป้อนสารละลายสูงสุดที่ควรจะใช้ในระบบกลั่นลักษณะนี้ โดยอัตราการป้อนสารที่ให้ปริมาณการกลั่นสูงสุดในกรณีนี้จะอยู่ที่ประมาณ 0.08 ลิตร

ต่อหน้าที่ (สำหรับแผงรับแสงขนาด 3.6 ตารางเมตร) นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้นำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกลั่นที่ใช้แผงรับแสงอาทิตย์แบบท่อความร้อน มาคำนวณหาค่าปริมาณการกลั่นในกรณีข้างต้นโดยใช้ค่ารังสีอาทิตย์ในวันเดียวกัน ซึ่งจะได้ว่าผลของการคำนวณแตกต่างจากผลการทดลองไม่เกินร้อยละ 13.6 ดังแสดงในรูปที่ 2 นอกจากนี้จะได้ว่า เมื่ออัตราการป้อนสารเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่กลั่นได้มีค่าเพิ่มขึ้นตาม ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอัตราการป้อนสาร จะทำให้ปริมาณเอทานอลที่ถูกป้อนเข้าสู่หอกลิ้นมีค่ามากขึ้น ไอที่เกิดขึ้นจึงมีส่วนประกอบของเอทานอลมากขึ้นตามส่งผลให้ไอของสารละลายที่ถูกกลั่นออกไปมีความเข้มข้นสูง และเมื่อนำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำนายความเข้มข้นของสารละลายที่กลั่นได้จากระบบกลั่นนี้ ที่อัตราการป้อนสารละลายค่าต่างๆ โดยใช้ค่ารังสีอาทิตย์ในวันนั้นๆ พบว่า ผลการคำนวณที่ได้มีความใกล้เคียงกับการทดลอง โดยให้ความผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 8.1 ดังแสดงในรูปที่ 3 จากผลการเปรียบเทียบที่ได้เป็นที่ยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องแม่นยำเพียงพอที่จะสามารถนำไปใช้ในการทำนายผลการกลั่นระยะยาวได้



รูปที่ 2 ปริมาณการกลั่นโดยรวมตลอดทั้งวัน ณ อัตราการป้อนสารละลายค่าต่างๆ จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ความเข้มข้นสารป้อนร้อยละ 10 การกลั่นแบบไม่ใช้หอกลิ้น พื้นที่รับรังสี 3.6 ตารางเมตร)



รูปที่ 3 ความเข้มข้นที่กลั่นได้โดยรวมตลอดทั้งวัน ณ อัตราการป้อนสารละลายค่าต่างๆ จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ความเข้มข้นสารป้อนร้อยละ 10 การกลั่นแบบไม่ใช้หอกลิ้น พื้นที่รับรังสี 3.6 ตารางเมตร)

4.2 ผลของความเข้มข้นสารป้อนที่มีต่อสมรรถนะการกลั่น

เพื่อเป็นการทดสอบหาผลของความเข้มข้นสารของป้อนที่มีต่อสมรรถนะการกลั่น ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองการกลั่นสารละลายเอทานอลด้วยอัตราการป้อนสารเท่ากับ 0.08 ลิตรต่อหน้าที่ ที่ความเข้มข้นสารป้อนเท่ากับร้อยละ 10 และ 45 โดยทำการทดสอบกับระบบกลั่นแบบไม่

ใช้หอกลิ้น ทั้งนี้ระบบจะใช้ความร้อนที่ถูกระบายทิ้งที่คอนเดนเซอร์มาอุ่นสารป้อนเช่นเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยจะทำการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นสารป้อนที่มีต่อสมรรถนะการกลั่นในเชิงปริมาณการกลั่นรวมถึงผลที่มีต่อสมรรถนะการกลั่นในเชิงความเข้มข้นที่กลั่นได้ จากการทดลองพบว่า หากเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อนให้สูงขึ้น แผงรับแสงอาทิตย์สามารถเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายได้ถึงจุดเดือดได้เร็วขึ้น เนื่องจากจุดเดือดของสารละลายมีค่าต่ำลง เป็นผลให้การเริ่มต้นกลั่นตัวของสารละลาย เอทานอลเกิดเร็วขึ้น เมื่อพิจารณาถึงปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่กลั่นได้โดยรวมตลอดทั้งวัน ที่อัตราการป้อนสารเท่ากับ 0.08 ลิตรต่อนาที ณ ความเข้มข้นของสารป้อนเท่ากับร้อยละ 10 และ 45 พบว่า หากเพิ่มความเข้มข้นตั้งต้นของสารละลายให้มากขึ้น ปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่กลั่นได้จะมากขึ้นตาม ดังแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณเอทานอลที่มีอยู่ในสารละลายจะมีค่ามากขึ้น ดังนั้นการระเหยของเอทานอลจึงเกิดขึ้นง่ายและมีปริมาณมาก ปริมาณและความเข้มข้นของเอทานอลที่กลั่นได้จึงเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังสามารถทำนายปริมาณการกลั่นรวมตลอดทั้งวันได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 2.0 และทำนายความเข้มข้นของสารละลายที่กลั่นได้โดยให้ความผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 8.1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่ได้จากการกลั่น เมื่อทำการทดลองโดยใช้อัตราการป้อนสารเท่ากับ 0.08 ลิตรต่อนาที ณ ความเข้มข้นสารป้อนเท่ากับร้อยละ 10 และ 45 ระบบกลั่นแบบไม่ใช้หอกลิ้น

ความเข้มข้นสารป้อน (%)	ปริมาณที่กลั่นได้ (ลิตร)		ความเข้มข้นที่กลั่นได้ (%)	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
10	5.03	5.12	44	40.7
45	10.04	10.09	82	78.5

4.3 ผลของหอกลิ้นที่มีต่อสมรรถนะการกลั่น

เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลของหอกลิ้นที่มีต่อสมรรถนะการกลั่น การทดลองกลั่นสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 10 ณ อัตราการป้อนสาร 0.08 ลิตรต่อนาที ถูกนำมาทดสอบอีกครั้งโดยติดตั้งหอกลิ้นขนาดความสูง 60 เซนติเมตรเพิ่มเติมเข้าไปในระบบ ผลการทดลองปรากฏดังตารางที่ 2 พบว่า เมื่อระบบใช้หอกลิ้นจะทำให้ความเข้มข้นที่กลั่นได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 17.0 แต่จะมีผลให้ปริมาณการกลั่นลดลงร้อยละ 5.7 หากพิจารณาการกลั่นที่ความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 10 อาทิ ร้อยละ 45 ที่มีการระเหยกลายเป็นไอได้ง่ายกว่า พบว่าเมื่อระบบใช้หอกลิ้นมิได้ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายที่กลั่นได้มีค่าเพิ่มขึ้นมากนัก โดยความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นมีค่าไม่เกินร้อยละ 2.4 โดยที่ปริมาณสารละลายที่กลั่นได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังตารางที่ 3 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งหอกลิ้นนั้นมิได้ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายที่กลั่นได้เพิ่มขึ้นมากนัก

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่ได้จากการกลั่น เมื่อทำการทดลองโดยใช้สารละลายเอทานอลความเข้มข้นตั้งต้นร้อยละ 10

อัตราการป้อนสาร	ปริมาณการกลั่น (ลิตร)		ความเข้มข้นที่กลั่นได้ (%)	
	ไม่ใช้หอกลิ้น	ใช้หอกลิ้น	ไม่ใช้หอกลิ้น	ใช้หอกลิ้น
0.08 ลิตร/นาที	5.03	4.76	44	53

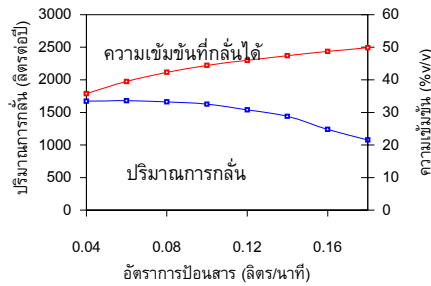
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่ได้จากการกลั่น เมื่อทำการทดลองโดยใช้สารละลายเอทานอลความเข้มข้นตั้งต้นร้อยละ 45

อัตราการป้อนสาร	ปริมาณการกลั่น (ลิตร)		ความเข้มข้นที่กลั่นได้ (%)	
	ไม่ใช้หอกลิ้น	ใช้หอกลิ้น	ไม่ใช้หอกลิ้น	ใช้หอกลิ้น
0.08 ลิตร/นาที	10.01	10.00	81	83

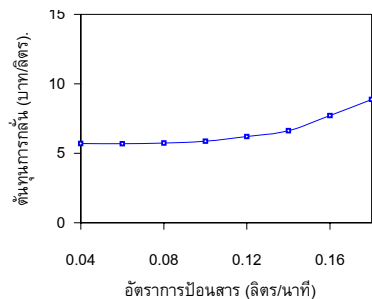
5. ต้นทุนการกลั่นเอทานอล

จากผลการทดลองที่กล่าวมาได้มีการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบกลั่นเอทานอลที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยตลอด พบว่า การเปรียบเทียบสมรรถนะการกลั่นโดยรวมตลอดทั้งวันมีค่าความผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 13.6 จากผลที่ได้ดังกล่าวจึงมีความมั่นใจระดับหนึ่งว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องและแม่นยำเพียงพอที่จะสามารถนำไปทำนายผลการกลั่นตลอดทั้งปีได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมาทำนายผลการกลั่นตลอดทั้งปีที่จะสามารถกลั่นได้จากระบบกลั่นที่สร้างขึ้น โดยทำนายผลการกลั่นภายใต้ค่ารังสีอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่ และทำการหาต้นทุนการกลั่นของเครื่องกลั่นเอทานอลที่ใช้ในงานวิจัย โดยจะทำการหาต้นทุนการกลั่นต่อหน่วยเอทานอลที่ผลิตได้ (เอทานอลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์) ซึ่งรายละเอียดที่ใช้ในการหาต้นทุนการกลั่นมีดังนี้ ต้นทุนระบบกลั่นเท่ากับ 17,000 บาท อายุการใช้งานของระบบกลั่นเท่ากับ 10 ปี ต้นทุนแผงรับแสงอาทิตย์แบบท่อความร้อนขนาด 3.6 ตารางเมตรเท่ากับ 91,490 บาท อายุการใช้งานของแผงรับแสงเท่ากับ 20 ปี ต้นทุนฉนวนและปั๊ม สารละลายเท่ากับ 3000 บาท อายุการใช้งาน 5 ปี ต้นทุนดำเนินการและบำรุงรักษาเท่ากับร้อยละ 5 ของต้นทุนระบบกลั่นและต้นทุนแผงรับแสงอาทิตย์

ผลการคำนวณพบว่า ต้นทุนของระบบกลั่นแบบเดิมสารอย่างต่อเนื่องที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เมื่อคิดเป็นเงินลงทุนที่มูลค่าปัจจุบันมีค่าเท่ากับ 191,008 บาท ต้นทุนดังกล่าวนี้จะถูกนำไปใช้คำนวณหาต้นทุนการกลั่นของระบบกลั่น โดยที่ต้นทุนการกลั่นต่ำสุดของระบบกลั่นแบบเดิมสารอย่างต่อเนื่องเมื่อระบบใช้แผงรับแสงอาทิตย์แบบท่อความร้อนขนาดพื้นที่รับรังสี 3.6 ตารางเมตร สามารถหาได้จากเงินทุนที่มูลค่าปัจจุบันหารด้วยปริมาณเอทานอลที่กลั่นได้ (ตลอด 20 ปี) ซึ่งมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 5.7 บาทต่อลิตรสารละลายที่ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 39.5 ณ อัตราการป้อนสารเท่ากับ 0.06 ลิตรต่อนาที ดังปรากฏในรูปที่ 4 และ 5

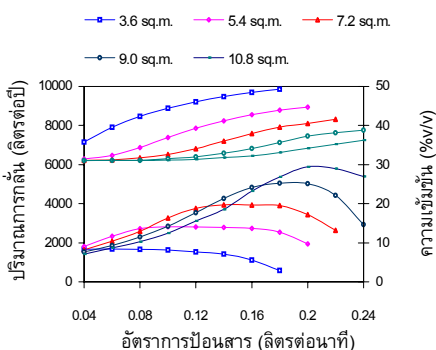


รูปที่ 4 แสดงปริมาณและความเข้มข้นที่กลั่นได้ของระบบกลั่นแบบเดิมอย่างต่อเนื่อง (พื้นที่รับรังสี 3.6 ตารางเมตร ความเข้มข้นสารป้อนร้อยละ 10)

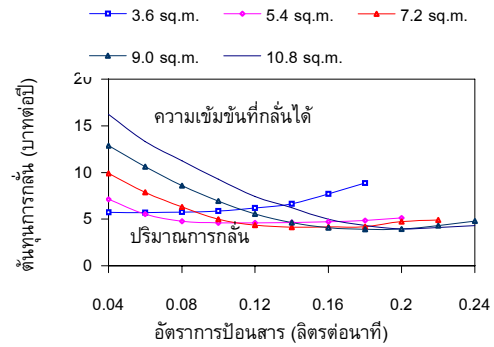


รูปที่ 5 แสดงต้นทุนการกลั่นของระบบกลั่นแบบเดิมอย่างต่อเนื่อง (พื้นที่รับรังสี 3.6 ตารางเมตร ความเข้มข้นสารป้อนร้อยละ 10)

หากนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำนายปริมาณการกลั่นและต้นทุนการกลั่นของระบบกลั่นที่ใช้ในงานวิจัยโดยใช้ค่ารังสีอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่ ณ แฉกรับแสงอาทิตย์ขนาดต่างๆ โดยจะแสดงผลการคำนวณในรูปของปริมาณและความเข้มข้นสารละลายที่กลั่นได้ดังแสดงในรูปที่ 6 และในรูปของต้นทุนการกลั่นดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบใช้แผงรับแสงอาทิตย์ที่มีขนาดพื้นที่รับรังสีเท่ากับ 9 ตารางเมตร จะให้ต้นทุนการกลั่นสารละลายเอทานอลต่ำสุดโดยมีต้นทุนการกลั่นเท่ากับ 3.9 บาทต่อลิตรสารละลาย ณ ความเข้มข้นสารป้อนเท่ากับร้อยละ 10 อัตราการป้อนสาร 0.18 ลิตรต่อนาที่ โดยมีปริมาณการกลั่นเท่ากับ 5042 ลิตรสารละลายต่อปี ความเข้มข้นที่กลั่นได้เท่ากับร้อยละ 35.7

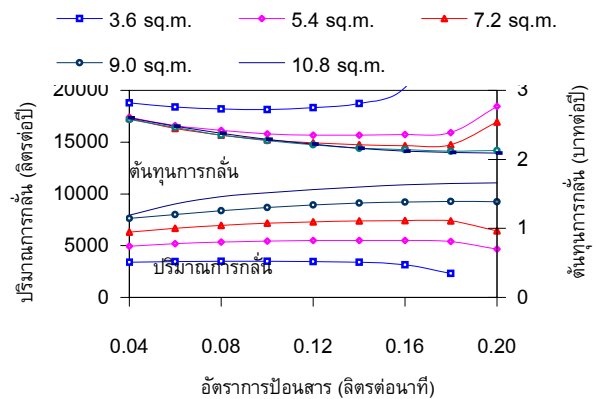


รูปที่ 6 ปริมาณการกลั่นและความเข้มข้นสารละลายเอทานอลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ณ อัตราการป้อนสารและพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ค่าต่างๆที่ความเข้มข้นสารป้อนร้อยละ 10 (ระบบกลั่นแบบไม่ใช้หอกลั่น ขนาดปริมาตรหม้อต้มซ้ำเท่ากับ 50 ลิตร ทำนายผลการกลั่นภายใต้ค่ารังสีอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่)



รูปที่ 7 แสดงต้นทุนการกลั่นที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ณ อัตราการป้อนสารและพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ค่าต่างๆ ที่ความเข้มข้นสารป้อนร้อยละ 10 (ระบบกลั่นแบบไม่ใช้หอกลั่น ขนาดปริมาตรหม้อต้มซ้ำเท่ากับ 50 ลิตร ทำนายภายใต้ค่ารังสีอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่)

นอกจากนี้หากนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำนายปริมาณการกลั่นและต้นทุนการกลั่น ณ แฉกรับแสงอาทิตย์ขนาดต่างๆ ในกรณีการกลั่นสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 10 อาทิ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 45 ดังรูปที่ 8 พบว่า เมื่อระบบใช้พื้นที่รับรังสีเท่ากับ 10.8 ตารางเมตร อัตราการป้อนสารเท่ากับ 0.20 ลิตรต่อนาที่ สามารถกลั่นเอทานอลได้สูงสุดโดยมีปริมาณการกลั่นเท่ากับ 11076 ลิตรสารละลายต่อปี ความเข้มข้นที่กลั่นได้เท่ากับร้อยละ 76.4 มีต้นทุนการกลั่นเท่ากับ 2.1 บาทต่อลิตร



รูปที่ 8 แสดงต้นทุนการกลั่นที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ณ อัตราการป้อนสารและพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ค่าต่างๆ ที่ความเข้มข้นสารป้อนเท่ากับร้อยละ 45

6. สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยครั้งนี้ ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองเปลี่ยนแปลงไปในแนวทางเดียวกัน โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 15 ดังนั้นแบบจำลองสามารถนำไปหาสมรรถนะการกลั่นเอทานอลได้ นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าสมรรถนะของระบบนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนสาร ความเข้มข้นของสารป้อนรวมถึงอุณหภูมิของสารป้อน โดยที่หากป้อนสารละลายให้แก่ระบบกลั่นในอัตราที่มากเกินไป อุณหภูมิของสารป้อนที่ออกจากคอนเดนเซอร์จะมีค่าต่ำ ความร้อนที่ได้รับจากแผงรับแสงอาทิตย์จึงไม่เพียงพอที่จะทำให้อุณหภูมิของสารป้อนสูงขึ้นได้

เกิดการกลั่นได้ หากป้อนสารละลายในอัตราที่น้อยเกินไปขณะเกิดการกลั่นสารละลายในหม้อต้มข้าจะมีความเข้มข้นน้อยลง ไอระเหยจากหม้อต้มข้าจึงมีค่าความเข้มข้นไม่มาก ปริมาณการกลั่นและความเข้มข้นของสารละลายที่กลั่นได้จึงมีค่าลดลง และเมื่อความเข้มข้นของสารป้อนเพิ่มขึ้น ปริมาณและความเข้มข้นของเอทานอลที่กลั่นได้จะเพิ่มขึ้นตาม และยังพบอีกว่า เมื่อระบบใช้หอกลั่น ความเข้มข้นที่กลั่นได้จะเพิ่มขึ้นแต่จะทำให้ปริมาณที่กลั่นได้ลดลงและราคาต้นทุนการผลิตจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อทำการหาต้นทุนการกลั่นและขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสมกับระบบกลั่นที่สร้างขึ้น พบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสมควรมีขนาดเท่ากับ 9 ตารางเมตร เมื่อทำการกลั่นสารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 ด้วยอัตราการป้อนเท่ากับ 0.18 ลิตรต่อนาที จะให้ต้นทุนการกลั่นต่อหน่วยต่ำสุดเท่ากับ 3.9 บาทต่อลิตร โดยมีปริมาณสารละลายเอทานอลที่กลั่นได้เท่ากับ 5042 ลิตรต่อปี มีความเข้มข้นที่กลั่นได้เท่ากับร้อยละ 35.7

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

8. สัญลักษณ์

A_c	= พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)
C_{ps}	= ค่าความจุความร้อนของวัสดุหอกลั่น
C_{pf}	= ค่าความจุความร้อนของสารป้อนที่คอนเดนเซอร์
C_{pF}	= ค่าความจุความร้อนของสารป้อน
F	= อัตราการไหลสารป้อน
I_b	= รังสีตรงบนระนาบในแนวระดับ
I_d	= รังสีกระจายบนระนาบในแนวระดับ
I_T	= รังสีอาทิตย์รวมบนระนาบเอียง
L	= ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ
M_f	= มวลสารละลายในหม้อต้มข้า
M_s	= มวลวัสดุหอกลั่น
m_e	= อัตราการไหลเอทานอลออกจากหม้อต้มข้า
$m_{e,dc}$	= อัตราการไหลเอทานอลออกจากหอกลั่น
m_F	= อัตราการไหลสารป้อนผ่านคอนเดนเซอร์
m_{rt}	= อัตราการไหลเอทานอลกลับสู่หม้อต้มข้า
P_t	= ความดันรวม (kPa)
P_e	= ความดันไอเอทานอล (kPa)
P_w	= ความดันไอของน้ำ (kPa)
Q_{cd}	= ความร้อนที่ระบายออกจากคอนเดนเซอร์
Q_u	= อัตราความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสี (W)
T_a	= อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
T_b	= อุณหภูมิจุดเดือด
T_c	= อุณหภูมิผิวตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์
T_F	= อุณหภูมิสารป้อนเข้าระบบกลั่น
$T_{F,in}$	= อุณหภูมิสารป้อนเข้าคอนเดนเซอร์
T_f	= อุณหภูมิสารละลายในหม้อต้มข้า
T_{rb}	= อุณหภูมิหม้อต้มข้า
U_L	= ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากผิวดูดรังสี

x_f	= ความเข้มข้นเอทานอลในหม้อต้มข้า
x_{rt}	= ความเข้มข้นเอทานอลที่กลับสู่หม้อต้มข้า
$x_{w,l}$	= สัดส่วนโมลของน้ำในของเหลว
y	= ความเข้มข้นเอทานอลในไอ
β	= มุมเอียงจากแนวระดับ
θ	= มุมตกกระทบรังสีตรงบนระนาบในแนวเอียง
θ_z	= มุมตกกระทบรังสีตรงบนระนาบในแนวระดับ
ρ	= แพลกเตอร์การสะท้อนรังสีจากพื้น
η	= ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์
$\tau\alpha$	= ประสิทธิภาพค่าส่งผ่านและดูดกลืนของตัวเก็บรังสี
$\gamma_{e,l}$	= สัมประสิทธิ์กิจกรรมในเฟสของเหลวของเอทานอล
$\gamma_{w,l}$	= สัมประสิทธิ์กิจกรรมในเฟสของเหลวของน้ำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] เกษตร ชัยมณีวงศ์, "การกลั่นแอลกอฮอล์ที่ได้จากการหมักมันสำปะหลังด้วยแสงอาทิตย์", มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ปี พ.ศ. 2525
- [2] จิรศักดิ์ จิระวารี และวีระชัย แก่นทรัพย์, "เครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ด้วยแสงอาทิตย์", ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปี พ.ศ. 2523
- [3] ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, "การออกแบบระบบพลังงานความร้อน", คณะพลังงานและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปี พ.ศ. 2537
- [4] ปิยะสาร ประเสริฐธรรม, "หลักการออกแบบเครื่องมือแยกสาร", สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปี พ.ศ. 2530
- [5] วิชาญ กองดาวงษ์. 2526. "การกลั่นเอทานอลด้วยพลังงานแสงอาทิตย์". วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาการสอน ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ปี พ.ศ. 2526
- [6] วีรพจน์ ลือประสิทธิ์กุล, "วิศวกรรมกลั่นจากห้องทดลองถึงโรงงาน", สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), ปี พ.ศ. 2536
- [7] McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P., Unit of Operations of Chemical Engineering. McGraw-Hill Book Co. 1993
- [8] Duffie, J. A. and Beckman, W. A., "Solar Engineering of Thermal Processes", John Wiley & Sons, New York, 1980