



การวิเคราะห์และการทดสอบระบบกลั่นน้ำส้มควันไม้แบบแยกส่วน

Analysis and Testing of Split Type Wood Vinegar Distilling System

ณัฐวัฒน์ อภิวัฒนานุกุล, กิรติ สุลักษณ์*

Nattawat Apiwattananukun, Keerati Suluksna*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

*Corresponding author: Keerati Suluksna Tel: +66-8-9765-6526, Fax: +66-44-224-235, E-mail: keerati@sut.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ออกแบบและพัฒนาเครื่องกลั่นน้ำส้มควันไม้แบบแยกส่วนโดยได้ทำการออกแบบแยกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1.ถังเผา ทำจากถังเหล็ก 200 L และ 2.ถังกลั่น ออกแบบถึงเผาต่อเชื่อมเข้ากับถังกลั่นไอน้ำโดยท่อส่งก๊าซร้อน ส่วนกลั่นไอน้ำถูกออกแบบให้มีถังพักก๊าซร้อนด้านล่าง และต่อเชื่อมเข้ากับส่วนกลั่นไอน้ำที่ใช้ท่อทองแดงเป็นท่อระบาย น้ำหล่อเย็นถูกใช้ในการระบายความร้อนของก๊าซร้อนที่ไหลผ่านท่อระบายจนมีอุณหภูมิเข้าสู่จุดควบแน่นได้น้ำส้มควันไม้ออกมา การทดลองใช้ไม้กระถินเป็นวัตถุดิบ โดยเก็บค่าปริมาณน้ำส้มควันไม้ที่กลั่นได้ทุกๆ ชั่วโมง รวม 8 h พร้อมทั้งบันทึกค่าอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ทางเข้าและทางออกของท่อกลั่นไอน้ำ ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนมาอธิบายพฤติกรรม ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในแต่ละส่วน (ถังพักก๊าซร้อนและท่อกลั่นไอน้ำ) ถูกวิเคราะห์เพื่อประเมินหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น จากการทดสอบพบว่าระบบที่ออกแบบสามารถกลั่นน้ำส้มควันไม้ได้ทั้งสิ้น 5,685 mL ใน 8 h ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของท่อกลั่นไอน้ำในช่วงอุณหภูมิทางเข้าก๊าซร้อนระหว่าง 100-400 °C มีค่า 8-14 W m⁻² °C⁻¹ และค่าประสิทธิภาพในช่วง 81-86% โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 8%

คำสำคัญ: น้ำส้มควันไม้, การกลั่นตัว, การทดสอบ

Abstract

This research design and develop a split type wood vinegar distilling system. The kiln and the distillation part of the system are designed to be separately part. The kiln made from 200 L steel tank connected to distillation tank via a hot gas connected tube. The distillation part composed with a hot gas storage tank at the bottom of the tank and connected to the distilling tube, which made from copper tubes, to relieve the hot gas. To obtain the wood vinegar, the cooling water is used to flow around the distilling tubes in order to reduce the hot gas temperature inside the tube to below the vapor condensing temperature. The Earleaf acacia wood is used as the raw material in the experiment. The distilled wood vinegar has been collected and reported every hour of 8 h. The hot gas temperature at inlet and outlet positions of the distilling tubes are also collected. The system behavior has been analyzed based on the concept of heat transfer. The heat transfer coefficient of two parts, hot gas storage tank and distilling tube, from the analyzing are used to estimate the heat transfer rate. A result from testing found that the developed system can produce the distilled wood vinegar about 5,685 mL within 8 h. Analysis of hot gas based on the inlet temperature of 100-400 °C gave the heat transfer coefficient between 8-14 W m⁻² °C⁻¹ and the effectiveness of 81-86 % with about 8 % error.

Keywords: Wood Vinegar, Distillation, Testing

1 บทนำ

น้ำส้มควันไม้เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Payamara, 2011; Wu et al., 2015) เกิดขึ้นระหว่าง

Received: February 18, 2019

Revised: June 20, 2019

Accepted: June 20, 2019

Available online: November 7, 2019

การเผาถ่านหรือเศษซากพืช น้ำส้มควันไม้มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่ากรดไพโรลิกเนียส (Mungkunkamchao et al., 2013) มีกรดอะซิติกเมทิลแอลกอฮอล์และโพแพนเป็นสารประกอบหลัก (Wang et al., 2010) นิยมนำไปใช้ทางการเกษตร ปศุสัตว์ และ

อื่นๆ เช่น การไล่แมลง รักษาอาการท้องเสียของสัตว์ เป็นต้น งานวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการศึกษาสมบัติของน้ำส้มควันไม้ และการนำไปใช้ประโยชน์ อาทิ การนำน้ำส้มควันไม้ผสมกับน้ำหมักชีวภาพใช้ปลูกมะเขือเทศ ซึ่งพบว่าช่วยในการเจริญเติบโตและเพิ่มผลผลิต (Mungkumchao et al., 2013) น้ำส้มควันไม้เข้มข้น 3 % ผสมกับขี้เลื่อยใช้ในการเพาะเห็ดนางรม ช่วยเพิ่มอัตราของการสร้างสปอร์ของเห็ด ลดระยะเวลาในการเก็บเกี่ยว และเพิ่มผลผลิตได้อย่างมาก (Yoshimura et al., 1995) น้ำส้มควันไม้ใช้ร่วมกับถ่านไบโอชาร์ช่วยลดสารละลาย Glyphosate ในดิน โดยช่วยกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ (Hagner et al., 2013) น้ำส้มควันไม้ใช้แทนกรดฟอสฟอริก กรดพิวริก และกรดอะซิติก ช่วยเพิ่มการจับตัวของแผ่นยางพาราและยับยั้งการเกิดเชื้อราในแผ่นยางพารา (Baimark and Niamsa, 2009; Prasertsit et al., 2011; Onthong et al., 2015) ด้านปศุสัตว์ใช้กำจัดเห็บที่อยู่บนขนแพะ (Noolaaong and Pohetae, 2010) น้ำส้มควันไม้ผสมกับอาหารไก่พบว่า ส่งผลดีต่อสุขภาพไก่เนื้อ (Nitima C., 2018) งานวิจัยส่วนหนึ่ง ทำการศึกษาปริมาณน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาไม้แต่ละประเภท โดยใช้เตาเผาขนาด 200 L ตัวเตามีรูเจาะให้ควันออกและใช้ไม้ไผ่เป็นท่อควบแน่นน้ำส้มควันไม้ มีการผลิตน้ำส้มควันไม้โดยใช้วัตถุดิบหลายแบบ อาทิ ไม้ส้มโอ ไม้ฝรั่ง ไม้มะม่วง ไม้กระถินณรงค์ ไม้ยูคาลิปตัสและแกลบพบว่าสามารถเก็บน้ำส้มควันไม้ได้ 0.35-2.30 L (Jankaew, 2010; Jaiboon, 2014; Kwanpan and Pongsasanongkul, 2016)

จากการสืบค้นพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาสมบัติและการนำน้ำส้มควันไม้ไปใช้ รวมถึงศึกษาปริมาณน้ำส้มควันไม้ที่กลั่นได้จากไม้แต่ละประเภท ระบบแบบดั้งเดิมนิยมใช้ท่อไม้ไผ่หรือท่อเหล็กต่อจากถังเผาโดยตรง (Jankaew, 2010) อีกทั้งยังพบว่าน้ำส้มควันไม้ที่กลั่นได้แต่ละครั้งของการเผามีปริมาณที่น้อยเนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำ (Karashi, 2008) งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการกลั่นตัวของน้ำส้มควันไม้โดยอาศัยการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน การสร้างอุปกรณ์และทดสอบ ตามลำดับ ผลที่ได้จะทำให้ทราบปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกลั่นน้ำส้มควันไม้ นำไปสู่การพัฒนากระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ระบบและการออกแบบ

ระบบกลั่นน้ำส้มควันไม้ที่ศึกษาถูกออกแบบให้ถึงเผากับถังกลั่นแยกส่วนจากกัน เรียกระบบกลั่นน้ำส้มควันไม้แบบแยกส่วน เพื่อลดผลของการถ่ายเทความร้อนจากถังเผาสู่ถังกลั่น แตกต่างจากแบบที่พบเห็นทั่วไปที่มักนำส่วนกลั่นติดเข้าโดยตรงกับถังเผา ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกลั่นไม่ดีเท่าที่ควร นอกจากนี้ ระบบแบบแยกส่วนยังสะดวกต่อการใช้งานและขนย้าย ส่วนประกอบหลักของระบบที่ออกแบบแสดงใน Figure 1

ถังเผา (A) ทำจากถังเหล็กขนาด 200 L ใช้บรรจุไม้ฟืนเพื่อเผาให้กลายเป็นถ่าน เชื้อเพลิงถูกใส่ไว้ที่ฐานเตาวางเชื้อเพลิง (B) ใต้ปากเตาเพื่อใช้จุดเตาในช่วงต้นของการเผา ปากเตามีฝาเปิด-ปิด (C) เพื่อใช้ควบคุมปริมาณอากาศเข้าสู่ถังเผา ด้านบนถังมีจุกฝาเปิด-ปิด (E) เพื่อระบายความชื้นและให้อากาศหมุนเวียนในขณะที่เผาไหม้ช่วงต้น ด้านข้างถังเผาต่อเข้ากับท่อส่งควัน (F) ขนาด 3.5 inch สำหรับส่งควันเข้าสู่ถังพักก๊าซร้อน (G) ซึ่งทำจากแผ่นสแตนเลส 2 mm (ยกเว้นด้านบนมีความหนา 4 mm) แสดงดัง Figure 2 แผ่นด้านบนเจาะรูขนาดเท่ากับขนาดท่อกลิ้นไอลู รูเจาะถูกออกแบบให้เรียงตัวแบบสลับ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าการวางเรียงแบบแถวตรง (Khan et al., 2006) ควันขึ้น (ก๊าซร้อน) จากถังพักจะลอยตัวเข้าสู่ถังกลั่นไอลู (H) ซึ่งประกอบด้วยท่อกลิ้นไอลู (I) ใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 inch ยาว 45 cm จำนวน 25 ท่อ ล้อมรอบด้วยน้ำหล่อเย็นที่ไหลเวียนอยู่รอบ เพื่อระบายความร้อนออกจากผิวท่อจนความชื้นในควันเกิดการกลั่นตัวเป็นน้ำส้มควันไม้ไหลลงมาด้านล่างสู่ถังพักก๊าซร้อนและระบายออกทางท่อระบาย (J) น้ำหล่อเย็นที่อยู่รอบท่อกลิ้นไอลูเมื่อรับความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อจะนำกลับมาใช้ใหม่จึงนำไปลดอุณหภูมิ โดยหมุนเวียนผ่านท่อทางออก (K) โดยใช้การลั่นเข้าสู่ถังระบายความร้อน (L) เป็นถังพลาสติกขนาด 200 L ฝาปิดถึงด้านบน (M) ถูกเจาะรูขนาด 3 mm จำนวน 331 รู น้ำที่ไหลผ่านรูเจาะจะตกลงสู่ด้านล่าง เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศ จากนั้นจะถูกส่งกลับผ่านท่อส่งน้ำหล่อเย็น (N) โดยใช้ปั้มน้ำ (O) สูบและมีวาล์วควบคุมอัตราการไหล (P) เข้าสู่ถังกลั่นไอลู (H) อีกครั้ง

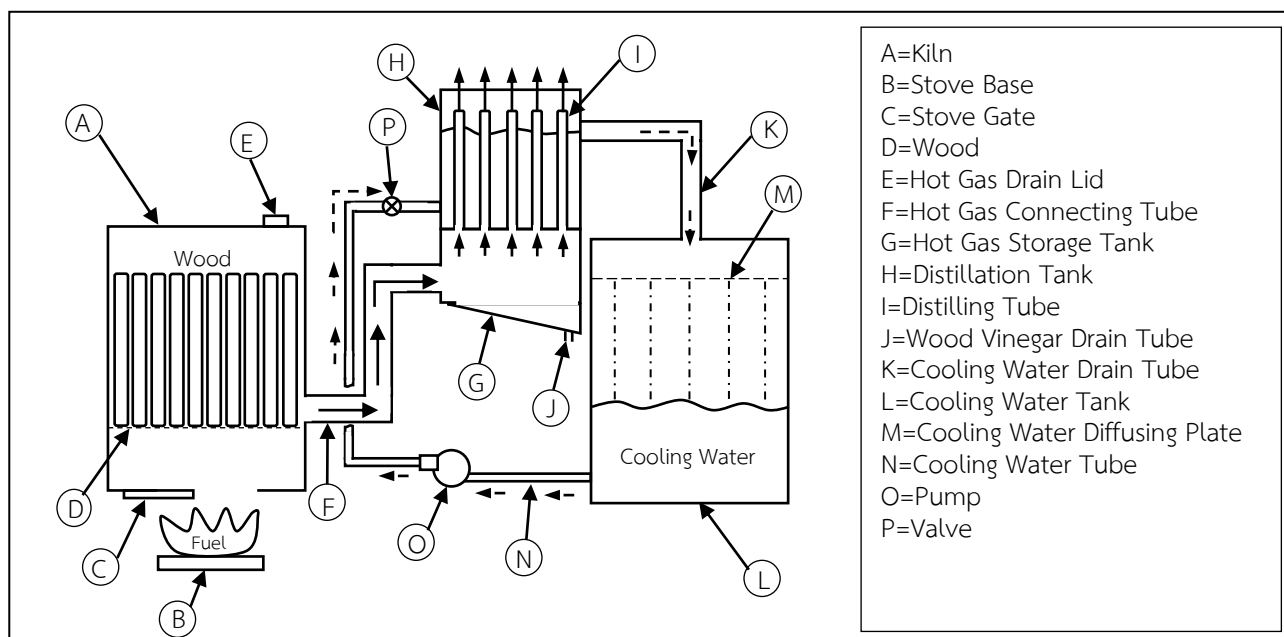


Figure 1 Schematic of designed system.

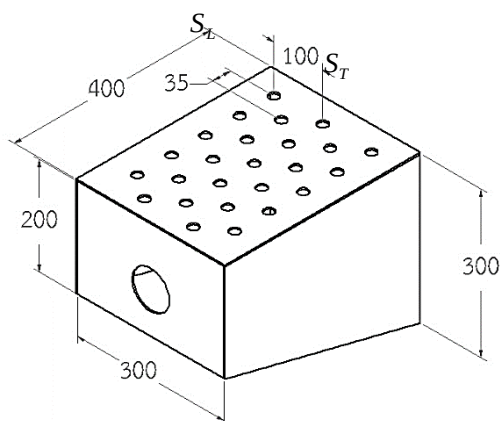


Figure 2 Detail of hot gas storage tank.

2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

Figure 1 ส่วนหลักที่น้ำส้มควันไม้สามารถควบแน่นได้คือถังพักก๊าซร้อน (G) และท่อกลั่นไอ (I) ที่ติดตั้งอยู่ในถังกลั่นไอ (H) โดยถังพักแก๊สร้อนเป็นถังหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมูมีผนัง 5 ด้าน ที่เปลี่ยน (ไม่หุ้มฉนวน) ติดกับอากาศแวดล้อม การถ่ายเทความร้อนส่วนนี้จึงเกิดระหว่างก๊าซร้อนในถังพักกับอากาศแวดล้อมภายนอก ส่วนท่อกลั่นไอที่ล้อมรอบด้วยน้ำหล่อเย็น การถ่ายเทความร้อนเกิดระหว่างก๊าซร้อนในท่อกับน้ำหล่อเย็นรอบผนังท่อ

องค์ประกอบของก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไม้ตระกูลกระถินที่อุณหภูมิ 170°C พบว่ามีส่วนผสมของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ไฮโดรเจน (H₂) และไอระเหยของสารอื่น ในปริมาณ 28.5, 21.1, 6.52 และ 43.88 % ตามลำดับ (Loaiza et al., 2017) ดังนั้นการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาก๊าซร้อนในรูปส่วนผสมของก๊าซ 4 ชนิด คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และไอน้ำส้มควันไม้ แต่เนื่องจากน้ำส้มควันไม้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำ

มาก เพราะมีน้ำเป็นองค์ประกอบถึง 80.97% (Wang et al., 2010) โดยมีความหนาแน่น 1.032 g cm⁻³ ความถ่วงจำเพาะ 1.009-1.027 และจุดเดือด 96-108 °C (Ratanapisit et al., 2009; Pimenta et al., 2018) ดังนั้น สมบัติบางอย่างที่ไม่มีค่าอ้างอิงจึงเทียบเคียงใช้สมบัติของน้ำแทน สำหรับก๊าซอีก 3 ชนิดที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ที่กล่าวมา การวิเคราะห์ใช้สมมติฐานก๊าซอุดมคติและไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

2.2.1 ถังพักก๊าซร้อน

Figure 3 แสดงการถ่ายเทความร้อนของก๊าซในถังพักผ่านผนังถังหนา x ออกสู่อากาศรอบนอก การถ่ายเทความร้อนเป็นการพาความร้อนจากก๊าซร้อนสู่ผนังด้านใน จากนั้นเกิดการนำความร้อนผ่านผนังและพาความร้อนจากผนังด้านนอกสู่อากาศแวดล้อม ผนังด้านบนถูกเคลือบด้วยปะเก็นทนความร้อนป้องกันการซึมของน้ำหล่อเย็น จึงไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น ($Q_{top}=0$)

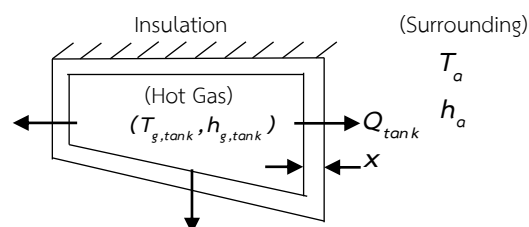


Figure 3 Heat transfer analysis of storage tank.

การถ่ายเทความร้อนในระบบถังพักก๊าซร้อน วิเคราะห์ได้ดังนี้

$$Q_{tank} = U_{tank} A_{s,tank} (T_{g,tank} - T_a) \quad (1)$$

โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม U_{tank} คำนวณได้จาก

$$\frac{1}{U_{tank}} = \frac{1}{h_{g,tank}} + \frac{x}{k_{wall}} + \frac{1}{h_a} \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) $x=2$ mm เป็นความหนาของผนังถังกลั่น ซึ่งทำจากแผ่น สแตนเลสมีค่าสภาพการนำความร้อน $k_{wall}=16.30 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ พบว่าพจน์ x/k_{wall} $1.22 \times 10^{-4} \text{ °C W}^{-1}$ ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์ที่ 1 และ พจน์ที่ 3 จึงตัดพจน์นี้ออกการวิเคราะห์ สมการที่ (2) จัดรูปได้เป็นดังนี้

$$U_{tank} = \frac{h_a h_{g,tank}}{h_a + h_{g,tank}} \quad (3)$$

อย่างไรก็ตาม หากผนังถังทำจากวัสดุที่มีค่าสภาพการนำความร้อนต่ำ ก็ไม่จำเป็นต้องนำพจน์ที่ 2 มาพิจารณาด้วย

- 1) สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในถังพักก๊าซร้อน ($h_{g,tank}$) สัมประสิทธิ์การพาความร้อน $h_{g,tank}$ หาได้ดังนี้

$$h_{g,tank} = \frac{k_g Nu_{g,tank}}{D_{h,tank}} \quad (4)$$

โดย $Nu_{g,tank} = 3.66$ เป็นค่าเลขนัสเซลล์ตามสหสัมพันธ์ของ (Nusselt W., 1910) ที่สอดคล้องกับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของการไหลภายในถัง พบว่ามีค่าในช่วง 277-298 เป็นการไหลแบบราบเรียบ

- 2) สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศแวดล้อม (h_a) อากาศแวดล้อมด้านนอกที่เป็นอากาศนิ่ง การถ่ายเทความร้อนจึงเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_a คำนวณได้ตามสมการที่ (5) ดังนี้

$$h_a = \frac{k_a Nu_a}{L} \quad (5)$$

เมื่อ L เป็นความยาวแต่ละด้านของถัง เมื่อพิจารณาผนังอยู่ในแนวตั้ง ค่าเลขเรย์ลีพบว่าอยู่ในช่วง $5.18 \times 10^7 - 1.03 \times 10^8$ ซึ่งสอดคล้องกับช่วงของค่าเลขนัสเซลล์ของสหสัมพันธ์ Churchill and Chu (1975) ดังนี้

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr_a)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (6)$$

โดยที่

$$Ra_L = \frac{g \beta (T_{g,tank} - T_a) L^3}{\nu^2} Pr_a \quad (7)$$

เมื่อ $\beta = 1/[(T_{g,tank} + T_a)/2]$ โดย T เป็นค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน) ค่า $h_{g,tank}$ และค่า h_a ที่คำนวณได้จากสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมตามสมการที่ (3) ต่อไป

2.2.2 ส่วนท่อกลั่นไอ

ท่อกลั่นไอทำจากท่อทองแดงติดตั้งอยู่บนผนังด้านบนของถังพักก๊าซร้อน วางเรียงแบบสลับ (รูปที่ 2) ทำหน้าที่รับก๊าซร้อนที่ไหลจากถังพักก๊าซร้อนขึ้นด้านบน ความร้อนถ่ายเทจากก๊าซร้อนด้วยการพาความร้อนไปยังผนังด้านในของท่อกลั่น ซึ่งจะมีฟิล์มน้ำส้มคว้นไม้ที่กลั่นตัวเคลือบอยู่ ความร้อนถ่ายเทผ่านผนังท่อด้วยการนำความร้อน และถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นในรูปการพาความร้อนตามลำดับ (Figure 4)

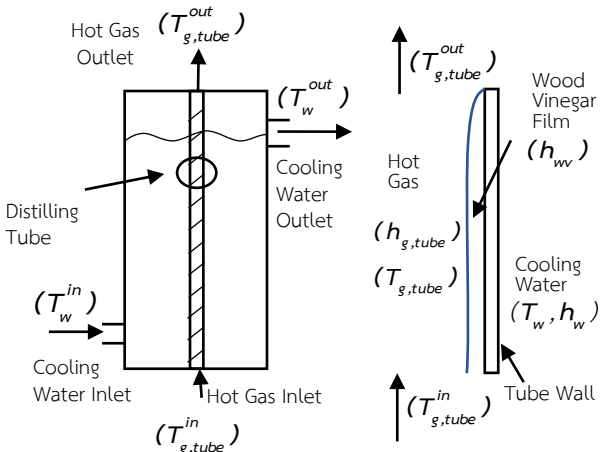


Figure 4 Heat Transfer Analysis of Distilling Tube.

เพื่อออกแบบให้น้ำหล่อเย็นไหลแบบผสมกันภายในถังในทิศทางตั้งฉากกับกลุ่มท่อก๊าซร้อน โดยก๊าซร้อนไหลอยู่ภายในท่อแบบไม่ผสมกัน ก๊าซร้อนมีอุณหภูมิ 100–400 °C อัตราการไหลของก๊าซร้อน 1.24-1.93 g s⁻¹ และน้ำหล่อเย็น 19 g s⁻¹ ค่าความจุความร้อนของแก๊สร้อน (C_g) และของน้ำหล่อเย็น (C_w) เท่ากับ 1.24–17.08 W °C⁻¹ และ 779.7 W °C⁻¹ ตามลำดับ ด้วยเงื่อนไขดังกล่าวสามารถหาค่าประสิทธิภาพ ϵ ได้จากสหสัมพันธ์ของ (Kays and London, 1984) ดังนี้

$$Q_{tube} = \epsilon Q_{max} \quad (8)$$

ระบบที่ออกแบบน้ำหล่อเย็นไหลแบบผสมกันภายในถังในทิศทางตั้งฉากกับกลุ่มท่อก๊าซร้อน โดยก๊าซร้อนไหลอยู่ภายในท่อแบบไม่ผสมกัน ก๊าซร้อนมีอุณหภูมิ 100–400 °C อัตราการไหลของก๊าซร้อน 1.24-1.93 g s⁻¹ และน้ำหล่อเย็น 19 g s⁻¹ ค่าความจุความร้อนของแก๊สร้อน (C_g) และของน้ำหล่อเย็น (C_w) เท่ากับ 1.24–17.08 W °C⁻¹ และ 779.7 W °C⁻¹ ตามลำดับ ด้วยเงื่อนไขดังกล่าวสามารถหาค่าประสิทธิภาพ ϵ ได้จากสหสัมพันธ์ของ (Kays and London, 1984) ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{1}{c} \left(1 - \exp \left\{ -c \left[1 - \exp(-NTU) \right] \right\} \right) \quad (9)$$

โดยที่

$$Q_{max} = C_{min}(T_{g,tube}^{in} - T_w^{in}) \quad (10)$$

$$C_{min} = \min(C_w, C_g), C_{max} = \max(C_w, C_g) \quad (11)$$

$$NTU = \frac{U_{tube} A_{s,tube}}{C_{min}} \quad (12)$$

เมื่อ $C = C_{min}/C_{max}$ และ $A_{s,tube} = N_{tube} \pi D_{tube} L_{tube}$ เป็นพื้นที่ผิวของท่อกลั่นไอ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของท่อ (U_{tube}) วิเคราะห์ได้ดังนี้

$$\frac{1}{U_{tube}} = \frac{1}{h_{g,tube}} + \frac{1}{h_{wv}} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k_{tube} L_{tube}} A_{s,tube} + \frac{1}{h_w} \quad (13)$$

ในที่นี้ท่อกลั่นไอน้ำ 1 mm ซึ่งบางมากและทำจากทองแดงที่มีค่าสภาพการนำความร้อน $k_{tube} = 385 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ พจน์ที่ 3 ด้านขวาสมการที่ (13) คำนวณค่าได้ $4.90 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C W}^{-1}$ ซึ่งน้อยมากจึงตัดการพิจารณาพจน์นี้ออกไป จึงได้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของทั้งสามพจน์ ด้านขวามือของสมการที่ (14) ดังนี้

$$\frac{1}{U_{tube}} = \frac{1}{h_{g,tube}} + \frac{1}{h_{wv}} + \frac{1}{h_w} \quad (14)$$

1) สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อกลั่นไอ ($h_{g,tube}$)

การพาความร้อนในท่อกลั่นไอระหว่างก๊าซร้อนกับผิวท่อด้านในเกี่ยวข้องกับค่าเลขกราสโฮฟ (Gr_D) เลขเรย์โนลด์ส (Re_D) และค่า Entry Length (L_{Entry}) Kays and Whitelaw (1967) ดังนี้

$$Gr_D = \frac{g \beta (T_{g,tube}^{in} - T_w^{in})}{\nu_g^2} D_{tube}^3 \quad (15)$$

$$Re_D = \frac{\rho_g \nu_{g,tube} D_{tube}}{\mu_g} \quad (16)$$

$$L_{Entry} = 0.05 Re_D Pr_g D_{tube} \quad (17)$$

จากการคำนวณพบว่า Gr_D มีค่า $6.02 \times 10^3 - 1.45 \times 10^4$ และ Re_D มีค่า 189-224 เป็นการไหลแบบราบเรียบ ส่งผลให้ได้สัดส่วน $Gr_D/(Re_D)^2$ มีค่า 0.15-0.35 ซึ่งน้อยกว่า 1 จึงเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ ส่วน L_{Entry} มีค่าในช่วง 0.14-0.17 m สั้นกว่าความยาวท่อกลั่นไอซึ่งยาว 0.45 m ดังนั้นการไหลภายในท่อเป็นแบบ Thermally Fully Develop สอดคล้องกับค่าเลขนัสเซลต์เท่ากับ 3.66 (Nusselt W., 1910) สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อกลั่นไอจึงคำนวณได้ดังนี้

$$h_{g,tube} = \frac{Nu_{g,tube} k_g}{D_{tube}} = \frac{3.66 k_g}{D_{tube}} \quad (18)$$

2) สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของฟิล์มน้ำส้มควันไม้ (h_{wv})

น้ำส้มควันไม้เมื่อควบแน่นเป็นฟิล์มตามผนังท่อด้านใน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มดังกล่าว หาได้จากสหสัมพันธ์ของ Serth and Lestina (2014) ดังนี้

$$h_{wv} = 1.47 \left[\frac{k_{wv}^3 \rho_{wv} (\rho_{wv} - \rho_{wv}^v) g}{\mu_{wv}^2 Re_C} \right]^{1/3} \quad (19)$$

โดยที่

$$Re_C = \frac{4 \rho_{wv} \dot{m}_{wv}}{N_{tube} \pi D_{tube} \mu_{wv}} \quad (20)$$

3) สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำหล่อเย็น (h_w)

น้ำหล่อเย็นไหลผ่านกลุ่มท่อที่วางตัวแบบสลับกัน (Figure 1 และรูปที่ 2) พิจารณาค่าเลขพรีนดท์เทิลในช่วง $0.7 < Pr < 500$ จำนวนแถวของกลุ่มท่อไม่เกิน 16 แถว อัตราการไหล 12 Lmin^{-1} อุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น 34.1°C กลุ่มท่อวางเรียงแบบสลับ มีระยะห่างตามแนวยาว $S_L = 0.035 \text{ m}$ และระยะห่างตามแนวขวาง $S_T = 0.1 \text{ m}$ ความเร็วสูงสุดของการไหลของน้ำหล่อเย็นผ่านกลุ่มท่อคำนวณได้ตามสมการที่ (21) และค่าเลขเรย์โนลด์สของการไหลคำนวณได้ตามสมการที่ (22)

$$v_{w,max} = \frac{S_T}{(S_T - D_{tube})} \quad (21)$$

$$Re_w = \frac{\rho_w v_{w,max} D_{tube}}{\mu_w} \quad (22)$$

ผลคำนวณพบว่า $v_{w,max} = 0.04 \text{ m s}^{-1}$ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดของไอน้ำส้มควันไม้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนั้นช่วงทดสอบที่อุณหภูมิเปลี่ยนระหว่าง $100-400^\circ\text{C}$ จึงได้ค่าเลขเรย์โนลด์สในช่วง 1500-4300 และค่าเลขนัสเซลต์ของ Žkauskas (1987) ดังนี้

$$Nu_w = 0.35(S_T / S_L)^{0.2} Re_w^{0.6} Pr_w^{0.36} (Pr_w / Pr_s)^{0.25} \quad (23)$$

ค่าเลขนัสเซิลต์ที่คำนวณได้ถูกนำไปใช้หาค่า h_w ดังนี้

$$h_w = \frac{k_w Nu_w}{D_{tube}} \quad (24)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน $h_{g,tube}$, h_{ww} และ h_w ที่ได้จากสมการที่ (18), (19) และ (24) ตามลำดับ นำไปแทนในสมการที่ (14) ก็สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม U_{tube} ได้ จากนั้นแทนค่า U_{tube} ดังกล่าวในสมการที่ (12) เพื่อหาค่า NTU สำหรับนำไปแทนในสมการที่ (9) เพื่อหาค่าประสิทธิภาพ ϵ นำไปสู่การได้ค่าการถ่ายเทความร้อน Q_{tube} ตามสมการที่ (8) และสามารถคำนวณหาอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางออก $T_{g,tube}^{out}$ ได้ดังนี้

$$T_{g,tube}^{out} = T_{g,tube}^{in} - \frac{Q_{tube}}{C_g} \quad (25)$$

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เพื่อผลิตน้ำส้มควันไม้มีส่วนประกอบเป็น CO , CO_2 , H_2 และน้ำส้มควันไม้ในสัดส่วน 28.50, 21.10, 6.52 และ 43.88 % ตามลำดับ (Loaiza et al., 2017) สมบัติต่าง ๆ ของก๊าซร้อนที่ใช้คำนวณ อาทิ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ค่าความหนาแน่น จึงพิจารณาโดยเฉลี่ยตามสัดส่วนขององค์ประกอบดังกล่าว ดังนี้

$$\theta_g = 0.285\theta_{CO} + 0.211\theta_{CO_2} + 0.0652\theta_{H_2} + 0.4388\theta_{ww}^v \quad (26)$$

เมื่อ θ เป็นสมบัติที่พิจารณา อาทิ ความหนาแน่น คำนวณได้จาก $\rho_{Avg} = 0.285\rho_{CO} + 0.211\rho_{CO_2} + 0.0652\rho_{H_2} + 0.4388\rho_{ww}^v$ เป็นต้น จึงสามารถหาการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบได้ดังนี้

$$Q_{total} = Q_{tank} + Q_{tube} \quad (27)$$

เมื่อ Q_{tank} เป็นการถ่ายเทความร้อนของถังพักก๊าซร้อน หาค่าได้จากสมการที่ (1) และ Q_{tube} เป็นการถ่ายเทความร้อนของท่อกลั่นไอหาค่าได้จากสมการที่ (8)

สำหรับค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณประกอบด้วยอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ทางเข้าท่อกลั่นไอ $T_{g,tube}^{in}$ ที่เปลี่ยนในช่วง 100-400°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น $T_w = 32^\circ C$ ท่อกลั่นไอขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D_{tube}=18.29$ mm ยาว $L=0.45$ m จำนวน $N=25$ ท่อ พื้นที่ผิวท่อรวม $A_{s,tube}=0.26$ m² และใช้สมบัติของอากาศแวดล้อมที่ 25°C

2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

1) เตรียมไม้กระถิน เส้นผ่านศูนย์กลาง 5-8 cm ยาว 45 cm โดยตัดและผึ่งแดดทิ้งไว้ 45 ถึง 60 วัน เพื่อลดความชื้นจนได้ความหนาแน่นของไม้ 0.555 g mL⁻¹ น้ำหนักไม้โดยรวมที่บรรจุประมาณ 46 kg

2) บรรจุไม้เข้าถังเผา โดยจัดวางเรียงไม้ในแนวตั้งจนเต็มถัง จากนั้นต่อถังเผา ถึงกลั่น และถังน้ำหล่อเย็นเข้าด้วยกันดัง Figure 5



Figure 5 Constructed system.

3) จุดเชื้อเพลิงให้ความร้อนใต้ถังเผา โดยเปิดฝาด้านบนของถังเผาและเปิดท่อส่งก๊าซร้อนเพื่อระบายควันในช่วงแรก อบไม้เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง หรือจนเกิดควันสีขาวพุ่งออกมาจากถังเผาเป็นปริมาณมาก เรียกว่าควันบ้า มีลักษณะดังแสดงใน Figure 6



Figure 6 Heavy smoke of wood vinegar.

4) หลังจากเกิดควันบ้าประมาณ 10-20 นาที ให้ปิดฝาด้านบนถังเผาและปิดปากเตาให้เหลือประมาณ 10-20 % (เทียบกับเปิดจนสุด) จากนั้นต่อท่อส่งควันเพื่อให้ควันไหลเข้าสู่ถังพักก๊าซร้อน

5) เปิดปั๊มน้ำให้น้ำหล่อเย็นไหลเวียนเข้าไปในถังกลั่นไอเพื่อถ่ายเทความร้อนกับท่อกลั่นไอ จดบันทึกอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของก๊าซร้อน และปริมาณน้ำส้มควันไม้ที่ควบแน่นในแต่ละ

ละชั่วโมง รวมประมาณ 8 ชั่วโมง หรือพบว่าวันที่ออกมามีลักษณะเป็นสีฟ้าใสและน้ำมันที่ออกมาทำให้หยุดการเก็บน้ำส้มควันไม้

7) ถอดท่อส่งควันออก เปิดปากเตาให้กว้างสุดทิ้งไว้ 10 นาที ก่อนทำการปิดปากเตาและปิดท่อส่งควันจากถังเผา สิ้นสุดการทดสอบ น้ำส้มควันไม้และถ่านที่ได้มีลักษณะดัง Figure 7



Figure 7 Products (Left) Wood Vinegar and (Right) Charcoal.

3 ผลและวิจารณ์

ผลการทดลองได้เก็บข้อมูลปริมาณน้ำส้มควันไม้ที่กลั่นตัวในแต่ละชั่วโมงที่ทดสอบ โดยทำการทดสอบ 8 ชั่วโมง โดยใช้ไม้กระถินเป็นวัตถุดิบ การทดสอบได้ตรวจวัดค่าอุณหภูมิทางเข้าถังพักก๊าซร้อนและที่ทางออกที่ถ่อกลั่นไอ เพื่อจะนำไปใช้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ในช่วงถัดไป ผลการทดสอบแสดงใน Figure 8

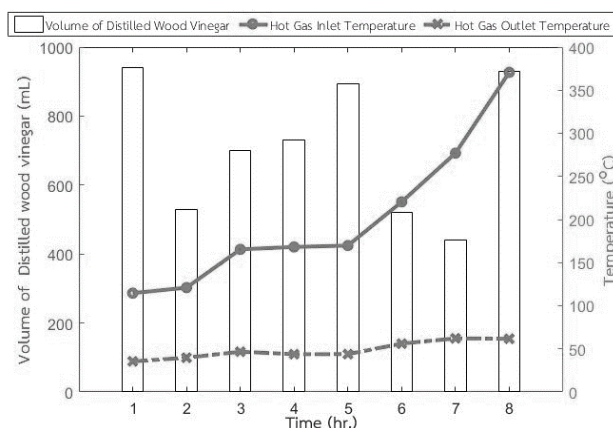


Figure 8 Testing Result.

จาก Figure 8 กราฟแท่งแสดงปริมาณน้ำส้มควันไม้ พบว่าได้น้ำส้มควันไม้ทั้งสิ้น 5,685 mL มีปริมาณแตกต่างกันตามชั่วโมงที่ทดสอบ เนื่องจากการระเหยของความร้อนและสารในเนื้อไม้ (การสูญเสียมวลของไม้) ขณะเกิดกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน กราฟเส้นแสดงค่าอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางเข้าที่ถ่อกลั่นไอและอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ทางออกที่ถ่อกลั่นไอ พบว่าอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางเข้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นส่วนอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางออกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำส้มควันไม้

ที่กลั่นได้กับอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางออก พบว่าเมื่อน้ำส้มควันไม้กลั่นตัวได้เพิ่มขึ้นค่าอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางออกมีแนวโน้มคงตัว ดังเช่นชั่วโมงที่ 3-4-5 และ 7-8 ที่เป็นเช่นนี้เพราะในขณะที่เกิดการกลั่นตัวจะมีการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ทางออกค่อนข้างคงตัว แต่ในช่วงที่การกลั่นตัวลดลงความร้อนถ่ายเทได้ไม่มากอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางออกจึงสูงขึ้น ปริมาณน้ำส้มควันไม้ที่ได้ในชั่วโมงที่ 1, 5 และ 8 มีปริมาณมากกว่าชั่วโมงอื่น เนื่องจากชั่วโมงที่ 1 ความชื้นเนื้อไม้มีค่าสูงจึงระเหยตัวออกมาได้มาก ส่วนชั่วโมงที่ 5 มีลมธรรมชาติไหลผ่านเข้าปากได้เร็วกว่าชั่วโมงอื่น จึงส่งผลให้ควันและสารระเหยต่างๆ ไหลเข้าสู่ถังกลั่นได้มากขึ้นจึงเกิดการควบแน่นได้มากและมากกว่าชั่วโมงที่ 3-4 ชั่วโมงที่ 8 มีอุณหภูมิเตาเผา 370°C ซึ่งเป็นช่วงมวลสูญเสียของไม้กลายเป็นก๊าซและสารระเหยต่างๆ (350-400°C) สารในเนื้อไม้จึงสามารถระเหยออกมาได้มากขึ้น (Byrne, 1997; Loaiza, 2017) ส่วนชั่วโมงที่ 7 ปริมาณน้ำส้มควันไม้มีน้อยกว่าชั่วโมงที่ 8 ประมาณ 2 เท่า เนื่องจากช่วงที่ 7 อุณหภูมิเตาเผาต่ำกว่าอุณหภูมิช่วงมวลสูญเสียของไม้ ก๊าซและสารระเหยต่างๆ จึงระเหยออกมาได้น้อยกว่า

จากการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนสำหรับระบบกลั่นน้ำส้มควันไม้ที่ออกแบบพบว่า เมื่ออุณหภูมิทางเข้าเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมทั้งในถังพักก๊าซร้อน (U_{tank}) และในท่อกลั่นไอ (U_{tube}) มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง โดยค่า U_{tube} มีค่าสูงกว่าค่า U_{tank} มาก เหตุผลเพราะถังพักก๊าซร้อนมีตัวกลางรับความร้อนเป็นอากาศ ซึ่งสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำ ส่วนท่อกลั่นไอมีตัวกลางรับความร้อนเป็นน้ำ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงกว่ามาก ดังแสดงใน Figure 9

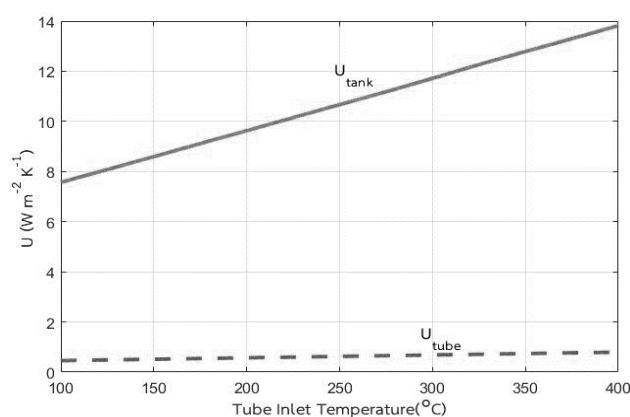


Figure 9 Overall heat transfer coefficient.

พิจารณาค่าประสิทธิภาพ ϵ ของระบบกลั่นน้ำส้มควันไม้แบบแยกส่วน ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (9) เทียบกับอุณหภูมิทางเข้าที่ถ่อกลั่นไอ พบว่าเมื่ออุณหภูมิทางเข้าเพิ่มขึ้น ค่าประสิทธิภาพแปรตามอุณหภูมิทางเข้าในช่วงอุณหภูมิ 100-300°C และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิ 300-400°C เนื่องจากค่าสัดส่วน $U_{\text{tube}}/C_{\text{min}}$ ในสมการที่ (12) มีค่าลดลง จึงส่งผลให้ค่า NTU ลดลงและค่า ϵ ซึ่งแปรตาม NTU มีค่าลดลงด้วย จากการคำนวณ

พบว่าประสิทธิภาพมีค่าอยู่ในช่วง 81-86 % โดยค่าสูงสุด 86.4 % ณ ที่อุณหภูมิทางเข้าเท่ากับ 300°C ดังแสดงในรูปที่ 10

เมื่อทราบค่าประสิทธิภาพของระบบที่ทอกลั่นไอน้ำก็สามารถคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของถึงพักก๊าซร้อนและของทอกลั่นไอน้ำได้ตามสมการที่ (1) และสมการที่ (8) ตามลำดับ ได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของทอกลั่นไอน้ำมีค่าสูงกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของถึงพักก๊าซร้อนมาก ($Q_{tube} > Q_{tank}$) ประมาณ 17.2-18.8 เท่า ดังนั้นค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเกือบทั้งหมด จึงเป็นผลมาจากส่วนของทอกลั่นไอน้ำ ($Q_{total} \approx Q_{tube}$) การวิเคราะห์จึงสามารถพิจารณาให้อุณหภูมิที่ทางเข้าทอกลั่นไอน้ำมีค่าประมาณอุณหภูมิภายในถึงพักก๊าซร้อน ($T_{g,tube}^{in} \approx T_{g,tank}$)

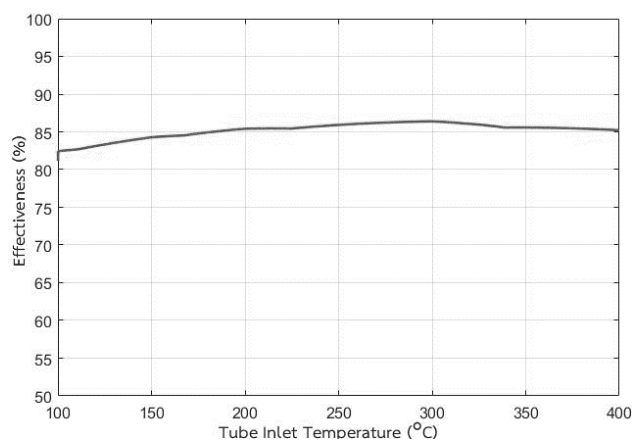


Figure 10 Effectiveness of distilling tube.

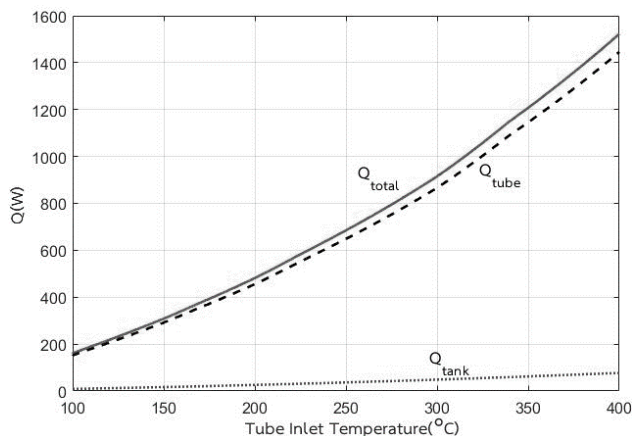


Figure 11 Heat transfer rate.

จากอัตราการถ่ายเทความร้อนของทอกลั่นไอน้ำ (Q_{tube}) ที่คำนวณได้ (Figure 11) สามารถนำไปคำนวณหาอุณหภูมิทางออกที่ปลายทอกลั่นไอน้ำได้ตามสมการที่ (25) และ เมื่อนำไปเทียบกับการทดลองได้ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่าอุณหภูมิทางออกปลายทอกลั่นไอน้ำซึ่งวิเคราะห์บนพื้นฐานสมบัติก๊าซร้อนดังสมการที่ (26) มีแนวโน้มโดยรวมสอดคล้องกับอุณหภูมิทางออกปลายทอกลั่นไอน้ำที่ได้จากการทดลองดังรูปที่ 12 กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิทางเข้าทอกลั่นไอน้ำเพิ่มขึ้น อุณหภูมิทางออกทอกลั่นไอน้ำ

ค่าแปรตามกัน ลักษณะโดยรวมของอุณหภูมิทางออกทอกลั่นไอน้ำเป็นแบบเส้นตรง ณ ที่อุณหภูมิทางเข้าทอกลั่นไอน้ำ 277°C ค่าอุณหภูมิทางออกปลายทอกลั่นไอน้ำใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน 8 % นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ช่วงอุณหภูมิทางเข้าก๊าซร้อน 100-400°C ให้ค่าอุณหภูมิทางออกปลายทอกลั่นไอน้ำมีค่าต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำส้มควันไม้ (99°C) ส่งผลให้น้ำส้มควันไม้ที่ผสมในก๊าซร้อนเกิดการควบแน่นภายในทอกลั่น ดังนั้นระบบกลั่นน้ำส้มควันไม้แบบแยกส่วนที่ออกแบบสามารถลดอุณหภูมิก๊าซร้อนภายในทอกลั่นให้ต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำส้มควันไม้และทำให้เกิดการควบแน่นของน้ำส้มควันไม้ได้ จากการทดสอบได้ปริมาณน้ำส้มควันไม้รวม 5,685 mL ใน 8 ชั่วโมง ในขณะที่เครื่องกลั่นแบบดั้งเดิมที่ใช้ไม้ไผ่หรือท่อเหล็กเป็นทอกลั่นสามารถกลั่นได้โดยเฉลี่ยประมาณ 350-2,300 mL (Jankaew, 2010; Jaiboon, 2014; Kwanpan and Pongsasanongkul, 2016) หากเทียบเป็นค่าประสิทธิภาพของปริมาณน้ำส้มควันไม้ที่กลั่นได้ ระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบแบบดั้งเดิมประมาณ 2.5-16.2 เท่า

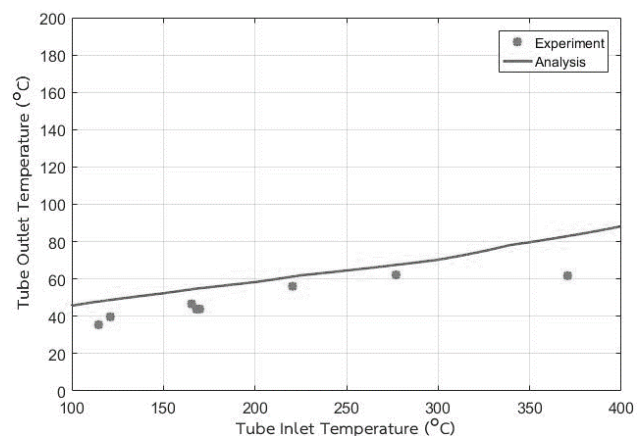


Figure 12 Hot gas outlet temperature.

4 สรุป

จากการวิจัยครั้งนี้ทำการวิเคราะห์และทดสอบระบบกลั่นน้ำส้มควันไม้แบบแยกส่วน การวิเคราะห์ที่ก๊าซร้อนที่มีส่วนประกอบพื้นฐานของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและไอน้ำส้มควันไม้ เพื่อศึกษาการกลั่นตัวของน้ำส้มควันไม้จากควันขึ้นที่เกิดจากการเผาไม้ปิ้งจี้ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบที่อุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางเข้าแปรค่าในช่วงอุณหภูมิ 100-400°C สรุปได้ดังนี้

- 1) อุณหภูมิทางออกที่ปลายทอกลั่นไอน้ำแปรตามอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางเข้า
- 2) การวิเคราะห์โดยใช้สมบัติเฉลี่ยของก๊าซที่อุณหภูมิทางเข้า 277°C ให้อุณหภูมิทางออกปลายทอกลั่นไอน้ำที่ได้จากการคำนวณสอดคล้องกับผลจากการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อน 8 %
- 3) อัตราการถ่ายเทความร้อนของทอกลั่นไอน้ำมากกว่าส่วนถึงพักก๊าซร้อน 17.2-18.8 เท่า

4) ค่าประสิทธิภาพของระบบกลั่นน้ำส้มควันไม้ที่ออกแบบ
แนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางเข้าเพิ่มขึ้น โดยมี
ค่าสูงสุดเท่ากับ 86.4 % ที่อุณหภูมิแก๊สร้อนทางเข้า 300°C

5) การออกแบบระบบกลั่นน้ำส้มควันไม้แบบแยกส่วน ใช้ท่อ
ทองแดงเป็นวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อนโดยมีน้ำไหลเวียนบริเวณ
รอบท่อสามารถลดอุณหภูมิได้ต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำส้มควันไม้

5 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุน
ทุนการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้

Nomenclature		Greek letters	
A	Area (m ²)	β	Coefficient of Volume Expansion (K ⁻¹)
C	Heat Capacity Rate (W K ⁻¹)	ρ	Density (kg m ⁻³)
c _p	Specific Heat of Fluid (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	ν	Kinematic Viscosity (m ² s ⁻¹)
D	Diameter (m)	μ	Dynamic Viscosity (kg m ⁻¹ s ⁻¹)
D _h	Hydraulic Diameter (m)	ε	Effectiveness (%)
g	Gravitational Acceleration (m s ⁻²)		
h	Heat Transfer Coefficient (W m ⁻² K ⁻¹)		
k	Thermal Conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)		
L _c	Characteristic Length (m)		
L	Length of Tube (m)		
$\dot{m}$	Mass Flow Rate (kg s ⁻¹)		
N	Number of Tubes		
Nu	Nusselt Number		
NTU	Number of Transfer Units		
Q	Heat Rate (W)		
Pr	Prandtl Number		
Re	Reynolds Number		
Ra	Rayleigh Number		
T	Temperature (K)		
U	Overall Heat Transfer Coefficient (W m ⁻² s ⁻¹)		
$\dot{V}$	Volume Flow Rate (m ³ s ⁻¹)		
v	Velocity (m s ⁻¹)		
		Subscripts	
		a	Air
		w	Water
		s	Surface
		g	Hot Gas
		c	Cross-Section
		wv	Wood Vinegar (Liquid)
		D	Diameter Based
		L	Length Based
		Superscripts	
		in	Inlet
		out	Outlet
		v	Vapor Phase

6 เอกสารอ้างอิง

Baimark, Y., Niamsa, N. 2009. Study on wood vinegars for use as coagulating and antifungal agents on the production of natural rubber sheets. *Biomass and Bioenergy* 33(6), 994-998.

Byrne, C.E., Nagle, D.C. 1997. Carbonization of wood for advanced materials applications. *Johns Hopkins University* 32(2), 259-266

Chalermisan, N., Navanukraha, B., Tansawai, A., Nuntachan, N., Jaree, T., Boonda, P. 2018. Effects of dietary raw wood vinegar and distilled wood vinegar supplementation in broiler chickens. *Journal of Community Development and Life Quality* 1(2), 111-121.

Churchill, S.W., Chu, H.H.S. 1975. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18(11), 1323-1329.

Hagner, M., Penttinen, O.P., Tiilikkala, K., Setälä, H. 2013. The effects of biochar, wood vinegar and plants on glyphosate leaching and degradation. *European Journal of Soil Biology* 58(Supplement C), 1-7.

Jaiboon, P. 2014. The producing wood vinegar from three charcoals with 200 litre tank. *Proceeding of the 1st Thailand Renewable Energy for Community Conference*, 280-285. Nakhon Pathom, Thailand:

- Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand.
- Jankaew, P. 2010. Technology transfer on construction and charcoal bruning technique from 200 liters charcoal kiln. RMUTP Research Journal 4(1).
- Karashi, W. 2008. A wood vinegar machine for sawdust and wood dust. SDU Research Journal: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon 1(1), 45-55.
- Kays, W.M., London, A.L. 1984. Compact heat exchangers. New York: McGraw-Hill Company.
- Kays, W.M., Whitelaw, J.H. 1967. Convective heat and mass transfer. Journal of Applied Mechanics 34(1), 254-254.
- Khan, W.A., Culham, J.R., Yovanovich, M.M. 2006. Convection heat transfer from tube banks in crossflow analytical approach. International Journal of Heat and Mass Transfer 49(25), 4831-4838.
- Kwanpan, A., Pongsasanongkul, C. 2016. The production of high-quality wood vinegar. The Journal of Industrial Technology, Suan Sunandha Rajabhat University 4(2), 22-35.
- Loaiza, J.M., López, F., García, M.T., García, J.C., Díaz, M.J. 2017. Biomass valorization by using a sequence of acid hydrolysis and pyrolysis processes (Application to leucaena leucocephala.). Fuel 203, 393-402.
- Mungkunkamchao, T., Kesmala, T., Pimratch, S., Toomsan, B., Jothityangkoon, D. 2013. Wood vinegar and fermented bioextracts natural products to enhance growth and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). Scientia Horticulturae 154 (Supplement C), 66-72.
- Noolaaong, J., Pohetae, A. 2010. Reradication of ectoparasite in the goat using wood vinegar. Master's Thesis. Yala, Thailand: Master of Science Program in Agricultural Technology, Yala Rajabhat University.
- Nusselt, W. 1910. Die abhängigkeit der wärmeübergangszahl von der rohrlänge (The dependence of the heat-transfer coefficient on the tube length). VDI Zeitschrift 54, 1154 - 1158.
- Onthong, U., Thongnueakhaeng W., Mekjinda N. 2015. The efficiency of wood vinegar from the mangosteen peel for the rubber sheets production. Thaksin University Journal 18(3), 154-160.
- Payamara, J. 2011. Usage of wood vinegar as new organic substance. International Journal of Chemtech Research 3(3), 1658-1662.
- Pimenta, A., Fasciotti, M., Monteiro, T.V., Lima, K. 2018. Chemical composition of pyroligneous acid obtained from eucalyptus GG100 clone. Molecule 23(2), 426.
- Prasertsit, K., Rattanawan, N., Ratanapisit, J. 2011. Effects of wood vinegar as an additive for natural rubber products. Songklanakarin Journal of Science and Technology 33(4), 425-430.
- Ratanapisit, J., Apiraksakul, S., Rerngnarong, A., Chungsiriporn, J., Bunyakarn, C. 2009. Preliminary evaluation of production and characterization of wood vinegar from rubberwood. Songklanakarin Journal of Science & Technology 31(3).
- Serth, R.W., Lestina, T.G. 2014. Condensers process heat transfer (2nd ed.). (pp. 431-508). Boston: Academic Press.
- Wang, Z., Lin, W., Song, W., Yao, J. 2010. Preliminary investigation on concentrating of acetol from wood vinegar. Energy Conversion and Management 51(2), 346-349.
- Wu, Q., Zhang, S., Hou, B., Zheng, H., Deng, W., Liu, D., Tang, W. 2015. Study on the preparation of wood vinegar from biomass residues by carbonization process. Bioresource Technology 179 (Supplement C), 98-103.
- Yoshimura, H., Washio, H., Yoshida, S., Seino, T., Otaka M., Matsubara, K., Matsubara, M. 1995. Promoting effect of wood vinegar compounds on fruit-body formation of *pleurotus ostreatus*. Mycoscience 36(2), 173-177.
- Žkauskas, A., Hartnett, J.P., Irvine, T.F. 1987. Heat transfer from tubes in crossflow. Advances in Heat Transfer 18(1), 87-159.