

## การเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวน สำหรับเครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกขนาดเล็ก

พลอยไพลิน สอนดา, วุฒิพิงษ์ สุขภูศรี, พีรภาส ยิ่งกล้า, คมสันต์ ชางซ็อมูล\*, และ ณัฐพล หมายมั่น

วิทยาลัยการอาชีพบ้านโป่ง อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี ประเทศไทย

\*Corresponding author: khomsan.cc@gmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้า ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกของน้ำหล่อเย็นและอุณหภูมิขาออกของไอแก๊สไพโรไลซิส เปรียบเทียบอุณหภูมิขาออกไอแก๊สไพโรไลซิสและปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ควบแน่นได้ ระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิมกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้น โดยใช้แนวทางการออกแบบและวิเคราะห์ด้วยการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณก่อนนำไปทดสอบ 2 รูปแบบ คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไม่มีน้ำไหลวน และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนเพื่อเพิ่มความปั่นป่วนของของไหลและอัตราการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการควบแน่น วิเคราะห์การกระจายตัวของความเร็วของของไหล อุณหภูมิ และลักษณะการไหลของน้ำหล่อเย็นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ภายใต้เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นขาเข้า 0.025, 0.1, 1, 2 และ 4 L/min ใช้โปรไฟล์อุณหภูมิของไอจากกระบวนการผลิตน้ำมันที่ได้จากการทดลอง พบว่าอัตราการไหล 4 L/min มีอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของ pyro-gas และมีอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของ pyro-gas ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลอื่น โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดทางออกของ pyro-gas อยู่ที่ 254.16 °C อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดทางออกของน้ำหล่อเย็นอยู่ที่ 80.56 °C ที่อัตราการไหล 0.025 L/min มีอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของ pyro-gas และมีอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของน้ำหล่อเย็นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลอื่น โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดทางออกของ pyro-gas และน้ำหล่อเย็นที่มากกว่าอัตราการไหลอื่น อยู่ที่ 324.84 °C และ 316.89 °C ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการควบแน่นของระบบ ผลการทดลองพบว่าการใช้น้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดแผ่นกั้นของไหลช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของการไหล ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพ ของระบบควบแน่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบไหลตรง ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ควบแน่นได้เพิ่มขึ้น โดยมีปริมาตรน้ำมันที่ได้ 5,800 มิลลิลิตร ต่อน้ำหนักวัตถุดิบ 5,000 กรัม ระยะเวลาที่ใช้ 90 นาที

**คำสำคัญ:** อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน / กระบวนการไพโรไลซิส / แบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล / น้ำมันเชื้อเพลิง / ขยะพลาสติก

## Optimizing a circulating water-cooled heat exchanger for fuel production machine from small plastic waste

Ploypailin sonda, Wuttiphong Sukphusri, Peeraphas Yingkalaya, Khomsan Changsuemoon\*, and Natthaphon Maiman

*Ban Pong Industrial and Community Education College, Thailand*

*\*Corresponding author: khomsan.cc@gmail.com*

### Abstract

This research aims to study the effect of inlet cooling water flow rate and temperature on the changes in cooling water outlet temperature and pyrolysis gas outlet temperature. A comparison of pyrolysis gas outlet temperature and condensed fuel oil yield was made between a conventional heat exchanger and a developed circulating cooling water heat exchanger. The design and analysis were performed using computational fluid dynamics (CFD) simulation before testing two configurations: a non-circulating water heat exchanger and a circulating cooling water heat exchanger to increase fluid turbulence and heat transfer rate in the condensation process. The fluid velocity distribution, temperature, and cooling water flow characteristics within the heat exchanger were analyzed under inlet cooling water flow rates of 0.025, 0.1, 1, 2, and 4 L/min. Using the experimentally obtained oil processing vapor temperature profiles, it was found that a flow rate of 4 L/min resulted in the lowest average pyrolysis gas outlet temperature compared to other flow rates. The average maximum outlet temperature of the pyro-gas was 254.16 °C, and the average maximum outlet temperature of the cooling water was 80.56 °C. At a flow rate of 0.025 L/min, the average maximum outlet temperature of the pyro-gas and cooling water were the highest compared to other flow rates. The average maximum outlet temperatures of the pyro-gas and cooling water were higher than other flow rates, at 324.84 °C and 316.89 °C, respectively, demonstrating that increasing the cooling water flow rate directly affects the condensation efficiency of the system. Experimental results showed that using swirling cooling water through a platter tube heat exchanger increased flow turbulence, resulting in a significant increase in heat transfer rate and condensation efficiency compared to a direct flow system. The amount of condensed fuel oil also increased, with a volume of 5,800 ml per 5,000 g of raw material in 90 minutes.

**Keywords:** Heat exchanger / Pyrolysis process / Computational fluid dynamics / Fuel / Plastic waste

### 1. บทนำ

ปัญหาขยะพลาสติกเป็นประเด็นสิ่งแวดล้อมที่ทวีความรุนแรงจากการใช้พลาสติกในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน (PE) และโพลีโพรพิลีน (PP) ซึ่งพบได้ทั่วไปในครัวเรือน เช่น ถุงพลาสติกและบรรจุภัณฑ์อาหาร เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดการสะสมของขยะในปริมาณสูง เทคโนโลยีไพโรไลซิส (pyrolysis) จึงได้รับความสนใจในฐานะแนวทางจัดการขยะพลาสติกอย่างเหมาะสม โดยเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อเปลี่ยนเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ [1] การพัฒนาเครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกขนาดเล็กสำหรับครัวเรือนถือเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่ช่วยลดปัญหาขยะและเพิ่มการใช้พลังงานทดแทน โดยระบบดังกล่าวอาศัยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิประมาณ 300–500 °C ภายใต้การควบคุมปริมาณออกซิเจนอย่างเหมาะสม [2] อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมไม่ได้ขึ้นอยู่กับเตาปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียว แต่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหรือคอนเดนเซอร์มีบทบาทสำคัญต่อปริมาณและคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ควบแน่นได้จากไอรระเหย [3] งานวิจัยก่อนหน้านี้ชี้ให้เห็นว่าการออกแบบคอนเดนเซอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะไอไพโรไลซิสสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการควบแน่นได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการควบคุมรูปแบบการไหลและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิ [3,4] การทดลองคอนเดนเซอร์แบบท่อเกลียวพบว่าอัตราการไหลและทิศทางการไหลของน้ำหล่อเย็นสามารถเพิ่มปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส [4] ขณะเดียวกัน งานวิจัยของ Akinola et al. [5] พบว่า ผลการจำลอง CFD ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณเชิงทฤษฎี โดยมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 5% สะท้อนถึงศักยภาพของ CFD ในการใช้เป็นเครื่องมือพัฒนาและปรับปรุงการออกแบบ แม้จะมีการศึกษาเกี่ยวกับคอนเดนเซอร์ในระบบไพโรไลซิสอย่างต่อเนื่อง แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านการเพิ่มความปั่นป่วนของน้ำหล่อเย็นเพื่อยกระดับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในระบบขนาดเล็ก งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนสำหรับเครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกขนาดเล็ก โดยศึกษาผลของอัตราการไหลและอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่อการกระจายอุณหภูมิ อัตราการถ่ายเทความร้อน และปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ควบแน่นได้ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาและประยุกต์ใช้งานระบบไพโรไลซิสในระดับต้นแบบและระดับชุมชนอย่างยั่งยืน

### 2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้า ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกของน้ำหล่อเย็นและอุณหภูมิขาออกของไอแก๊สไพโรไลซิส ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวน
2. เพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิขาออกไอแก๊สไพโรไลซิสของของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิมกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้น
3. เพื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ควบแน่นได้ ระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิมกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้น

### 3. ขอบเขตของการศึกษา

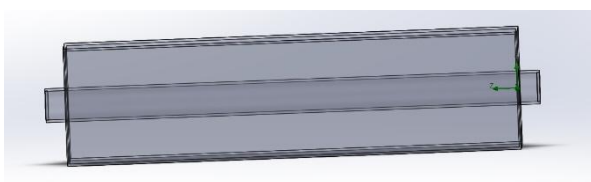
งานวิจัยนี้เป็นการจำลองการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลผ่านโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการออกแบบและสร้าง Model จำลองแบบ 3 มิติ เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิและอัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกับการทดลอง โดยมีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1. การวิจัยเป็นการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลโดยการ Simulation ผ่านโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการออกแบบและสร้าง Model จำลองแบบ 3 มิติ และการทดลอง
2. ศึกษาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวน ที่สามารถประยุกต์ใช้กับเครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกขนาดเล็กในสภาวะอากาศของประเทศไทย โดยแสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละแบบ
3. ศึกษาและเปรียบเทียบอุณหภูมิขาเข้าของน้ำหล่อเย็นที่ 20, 25, 30, และ 40 °C ที่มีผลต่ออุณหภูมิขาออกของไอแก๊สไพโรไลซิส อัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกของน้ำหล่อเย็น
4. วิเคราะห์ผลของอัตราการไหลน้ำหล่อเย็นขาเข้า 0.025, 0.1, 1, 2 และ 4 L/min ที่มีผลต่ออุณหภูมิขาออกของไอแก๊สไพโรไลซิส อัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกของน้ำหล่อเย็น
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ควบแน่นได้ระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิมและแบบน้ำหล่อเย็นหมุนวน

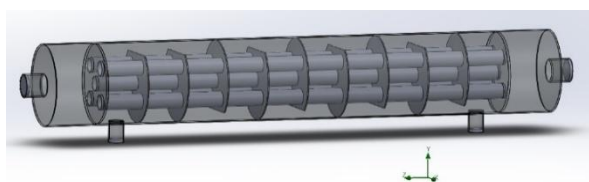
#### 4. วิธีการศึกษา

##### 4.1 การออกแบบและจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

ในงานวิจัยนี้ ขยะพลาสติกที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักเป็นพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน (PE) และโพลีโพรพิลีน (PP) มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวประมาณ 300–500 °C ทำให้เกิดไอไพโรไลซิสที่ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนหลากหลายชนิด ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของการควบแน่น ดังนั้นการออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนสำหรับเครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกขนาดเล็ก จึงมีความสำคัญ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อศึกษาพฤติกรรมกรไหล การถ่ายเทความร้อน และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุปกรณ์ควบแน่น ดังแสดงในรูปที่ 1



(ก) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิม

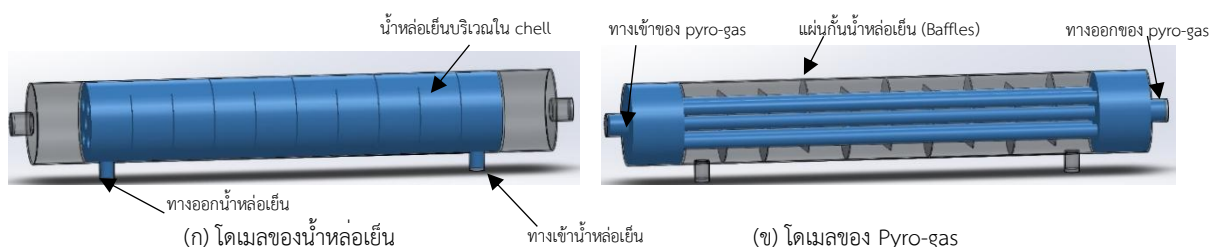


(ข) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้น

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิมและแบบใหม่ (ก) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิม (ข) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้น

ในการจำลอง CFD เพื่อตรวจสอบตรวจสอบความแม่นยำของเมช ได้กำหนดอุณหภูมิไอไพโรไลซิสขาเข้าเท่ากับ 500°C ซึ่งสอดคล้องกับช่วงอุณหภูมิการทำงานของพลาสติกประเภท PE และ PP และยังใช้ไพโรไลต์อุณหภูมิทางเข้าของ pyro-gas ที่ได้จากการทดลอง จำลอง CFD ผ่านการตรวจสอบความแม่นยำของเมชโดยใช้เมชจำนวน 7 ระดับ ผลการวิเคราะห์พบว่า แนวโน้มการกระจายตัวของอุณหภูมิในระดับเมช Level 5 -7 มีค่าใกล้เคียงกัน มีอุณหภูมิขาออกของแก๊สไพโรไลซิสและน้ำหล่อเย็นแตกต่างกันไม่เกิน 2 °C โดยเมชระดับที่ Level 5 ซึ่งมีความละเอียดและให้ความแม่นยำเพียงพอ ขณะเดียวกันยังใช้

ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ในระดับเหมาะสม จึงเลือกใช้เมซระดับดังกล่าวในการวิเคราะห์ผลการจำลองต่อไป ทั้งนี้ผลการเลือกเมซมีความสอดคล้องกับงานของ Akinola et al. [6] และ Saputro et al. [7] ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) สำหรับการจำลอง CFD งานวิจัยนี้ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกขนาดเล็ก โดยใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell and tube heat exchanger) ชนิด straight single-pass ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทำควมเย็น และเลือกใช้ท่อเป็นทองแดงเนื่องจากมีค่าการนำความร้อนสูงเหมาะสมต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่าง ไพโรไลแก๊สร้อนและน้ำหล่อเย็น [4,5] ซึ่งค่าการนำความร้อนของวัสดุมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ ในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) กำหนดรูปแบบการไหลของไพโรไลแก๊สและน้ำหล่อเย็นเป็นแบบไหลสวนทาง (counter flow) เนื่องจากสามารถรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลทั้งสองให้มีค่าสูงตลอดความยาวของคอนเดนเซอร์ ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ รวมถึงช่วยลดอุณหภูมิของของไหลหล่อเย็นขาออก [5,7]



รูปที่ 2 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลอง CFD (ก) โดเมของน้ำหล่อเย็น (ข) โดเมของ Pyro-gas

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุท่อและของเหลว [5]

Materials	Density, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat, $c_p$ (J/kg.K)	Cp (kJ/kg.K)	Molecular mass kg/kmol	Thermal Conductivity, k (W/m.K)	Dynamics viscosity, $\mu$ (N. s/m <sup>2</sup> )
Stainless steel	8055	480			15.1	
Copper	8960	385			401	-
Water	997.13	4182			0.61	$0.891 \times 10^{-3}$
Pyro-gas	106.7	2015.8	1.25 [7], [9]	29 [7], [9]	0.182 [3], [7]	$2.1856 \times 10^{-5}$ [7], [9]

#### 4.2 สมการที่เกี่ยวข้องในการคำนวณเชิงทฤษฎี

ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถประเมินได้จากอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการคำนวณจำเป็นต้องทราบค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (Log Mean Temperature Difference: LMTD) ซึ่งคำนวณจากอุณหภูมิขาเข้าและขาออกของของไหลทั้งสองด้าน เพื่อสะท้อนความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตลอดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [7] สมการเชิงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบและประเมินสมรรถนะของคอนเดนเซอร์ [4,5,11] ดังนี้

$$LMTD = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln\left(\frac{T_{h,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{c,in}}\right)} \quad (1)$$

โดยที่

$$T_{h,in} = \text{อุณหภูมิของ pyro-gas ขาเข้า } (^{\circ}\text{C})$$

$$T_{h,out} = \text{อุณหภูมิของ pyro-gas ขาออก } (^{\circ}\text{C})$$

$$T_{c,in} = \text{อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้า } (^{\circ}\text{C})$$

$$T_{c,out} = \text{อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาออก } (^{\circ}\text{C})$$

การคำนวณความร้อนที่ถ่ายเทได้จริง ( $Q_{act}$ ) ตามกฎการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนจากของไหลร้อนเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อนของไหลเย็น สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_h = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (2)$$

$$Q_c = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,in} - T_{c,out}) \quad (3)$$

ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน Heat Exchanger Effectiveness ( $\epsilon$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$\epsilon = \frac{Q_{act}}{Q_{max}} = \frac{\dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,out} - T_{c,in})}{C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})} \quad (4)$$

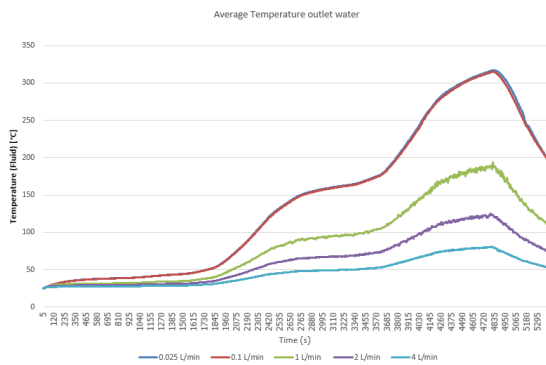
เมื่อ	$C_{min}$	=	อัตราความจุความร้อนตัวที่มีค่าน้อย (ระหว่าง $\dot{m}_c c_{p,c}$ กับ $\dot{m}_h c_{p,h}$ )
	$\dot{m}_c$	=	อัตราการไหลโดยมวลของหล่อเย็น (kg/s)
	$\dot{m}_h$	=	อัตราการไหลโดยมวล pyro-gas (kg/s)
	$c_{p,c}$	=	ความร้อนจำเพาะของหล่อเย็น (J/kg.K)
	$c_{p,h}$	=	ความร้อนจำเพาะ pyro-gas (J/kg.K)

## 5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

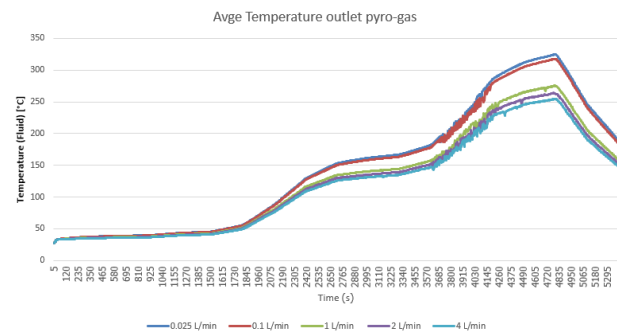
### 5.1 ผลของอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกของน้ำหล่อเย็นและอุณหภูมิขาออกของไอแก๊สไฟโรไลซิสของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวน

จากรูปที่ 3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของ Pyro-gas และน้ำหล่อเย็นที่อัตราการไหล 0.025, 0.1, 1, 2 และ 4 L/min [3,7,9] โดยมีอุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็นที่ 25 °C โดยใช้โปรไฟล์อุณหภูมิทางเข้าของ pyro-gas ที่ได้จากการทดลอง พบว่า ที่อัตราการไหล 4 L/min มีอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของ pyro-gas และมีอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของน้ำหล่อเย็นต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลอื่น โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดทางออกของ pyro-gas อยู่ที่ 254.16 °C อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดทางออกของน้ำหล่อเย็นอยู่ที่ 80.56 °C ที่อัตราการไหล 0.025 L/min มีอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของ pyro-gas และมีอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของน้ำหล่อเย็นต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลอื่น โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดทางออกของ pyro-gas และน้ำหล่อเย็นที่มากกว่าอัตราการไหลอื่น อยู่ที่ 324.84 °C และ 316.89 °C ตามลำดับ เนื่องจากการใช้อัตราการไหลที่มีค่าต่ำส่งผลให้ต่อระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนมาก จากการถ่ายเทความร้อนที่ควรจะเป็นจึงเปลี่ยนเป็นสะสมความร้อนแทนการใช้อัตราการไหลที่มีค่าสูงส่งผลให้ต่อระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนน้อย อาจทำให้การถ่ายเทความร้อนไม่ดีเท่าที่ควร การใช้อัตราการไหลที่ต่ำอาจส่งผลให้เป็นการสะสมความร้อนได้แทนที่จะเป็นการถ่ายเทความร้อนซึ่งสอดคล้องกับ Simanjuntak, J. et al. พบว่าการระบายความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นอยู่ที่ 1.95 ลิตรต่อนาที

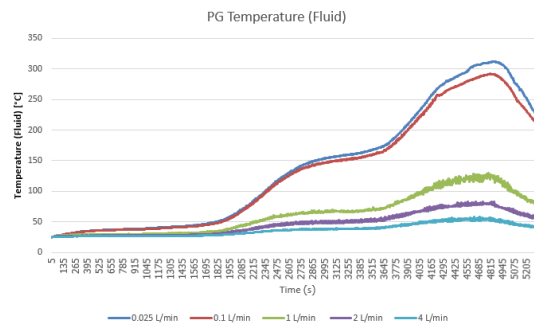
เมื่ออัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพิ่มขึ้นอีกประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะลดลงส่งผลให้การระบายความร้อนลดลง เนื่องจากอัตราการไหลมากขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนน้อยลง การถ่ายเทความร้อนจากของเหลวร้อนไปยังของเหลวหล่อเย็นไม่ดีพอ จึงเป็นหนึ่งในเหตุผลในการออกแบบเพื่อให้อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่เหมาะสม ในการออกแบบความยาวของท่อระบายความร้อนบางครั้งจะถูกจำกัดด้วยข้อจำกัดหลายอย่าง หากท่อระบายความร้อนมีความยาวเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะเพิ่มขึ้นด้วย [3] และสอดคล้องกับ B. L. Salvi et al. [12] การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่อไปอีกนั้นไม่ผลกระทบบต่อการผลิตไบโอดีเซลเพียงเล็กน้อย ดังนั้นการใช้อัตราการไหลของน้ำมากเกินไปจึงไม่เป็นประโยชน์ เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลเกินความจำเป็นไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ



(ก) อุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของน้ำหล่อเย็น

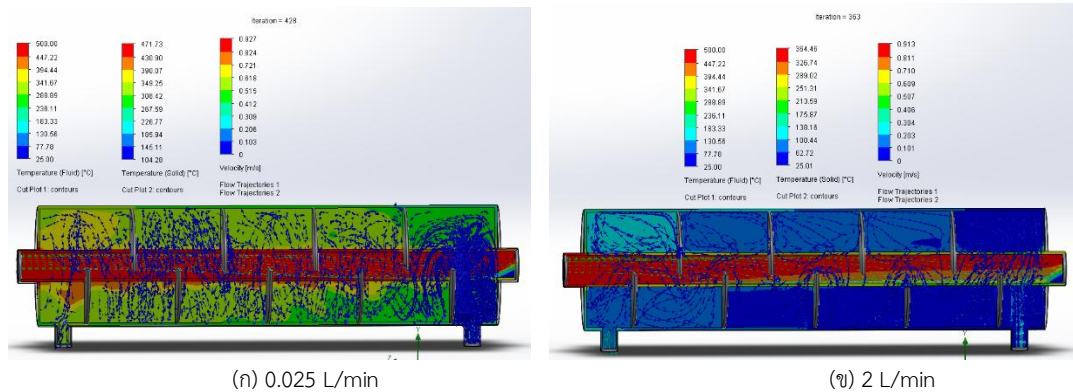


(ข) อุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของ Pyro-gas



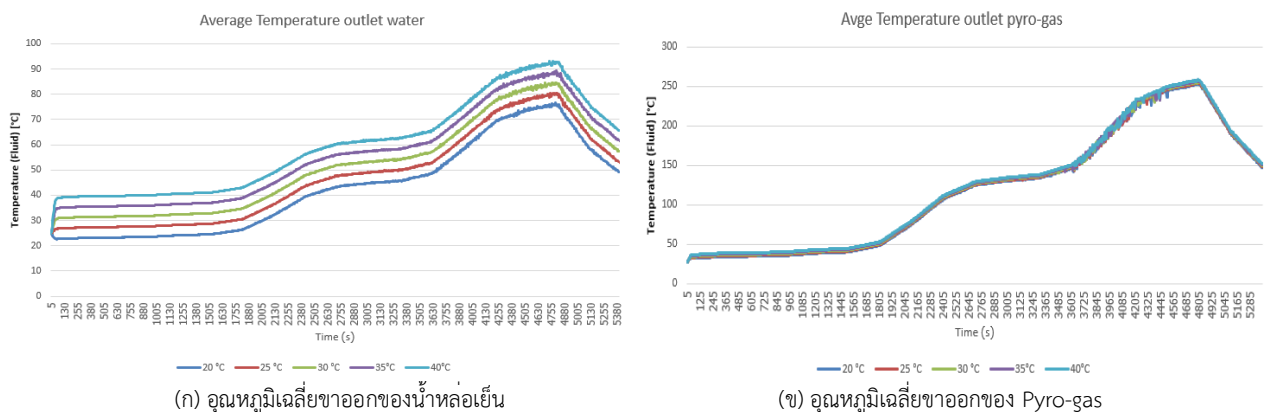
(ค) อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำหล่อเย็นบริเวณใน chell

รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของ Pyro-gas และน้ำหล่อเย็นที่อัตราการไหล 0.025, 0.1, 1, 2 และ 4 L/min (ก) อุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของน้ำหล่อเย็น (ข) อุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของ Pyro-gas และ (ค) อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำหล่อเย็นบริเวณใน chell



รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของ Pyro-gas และน้ำหล่อเย็นที่อัตราการไหล 0.025 และ 2 L/min (ก) 0.025 L/min (ข) 2 L/min

จากรูปที่ 4 การกระจายตัวอุณหภูมิของ Pyro-gas และน้ำหล่อเย็นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่อัตราการไหล 0.025 และ 2 L/min โดยมีอุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็นที่ 25 °C ที่มีอุณหภูมิทางเข้าของ pyro-gas ที่ 500 °C พบว่า การกระจายตัวอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่อัตราการไหล 0.025 L/min มีการกระจายตัวของอุณหภูมิมสม่ำเสมอ โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของของ pyro-gas อยู่ที่ 307.66°C อุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของน้ำหล่อเย็นทางออก 312.97 °C ที่อัตราการไหล 2 L/min มีอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของของ pyro-gas อยู่ที่ 285.33°C อุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของน้ำหล่อเย็นทางออก 105.83°C

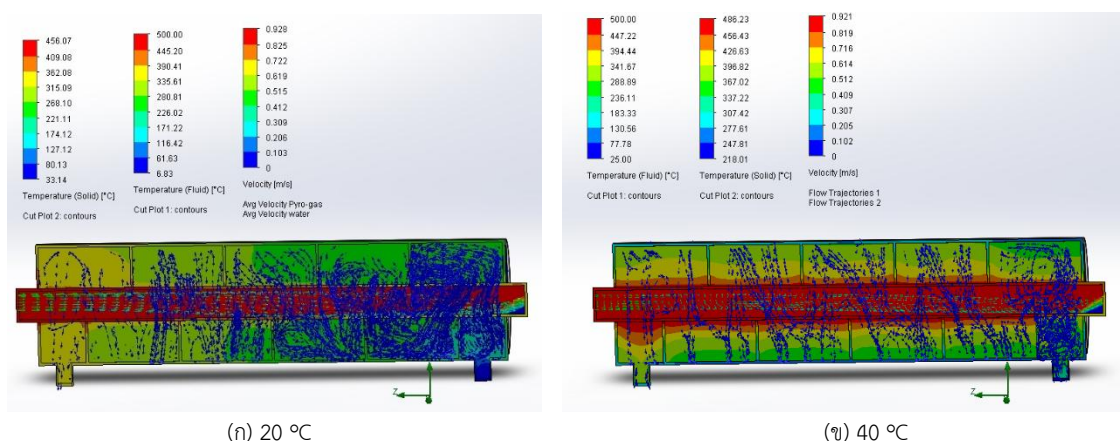


รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของ Pyro-gas และน้ำหล่อเย็น ที่อุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น 20, 25, 30 และ 40 °C (ก) อุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของน้ำหล่อเย็น และ (ข) อุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของ Pyro-gas

การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของ Pyro-gas และน้ำหล่อเย็นที่อัตราการไหล 4 L/min โดยมีอุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น 20, 25, 30, และ 40 °C โดยใช้โปรไฟล์อุณหภูมิทางเข้าของ pyro-gas ที่ได้จากการทดลอง จะพบว่า อุณหภูมิทางเข้าส่งผลต่ออุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของน้ำหล่อเย็น ที่อุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น 20 °C มีอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของน้ำหล่อเย็นต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็นค่าอื่น เมื่อเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิขาออกที่อุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น 20 °C กับ 40 °C พบว่ามีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 76.67 °C และ 93.07 °C ตามลำดับ มีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดที่ 16.40 °C อุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็นส่งผลต่ออุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของ Pyro-gas

เพียงเล็กน้อย ความแตกต่างของอุณหภูมิขาออกของของ Pyro-gas ที่อุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น 20 °C กับ 40 °C พบว่ามีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 253.36 °C และ 258.43 °C ตามลำดับ มีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดที่ 5.06 °C แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิขาเข้าของน้ำหล่อเย็นมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยตรง (รูปที่ 5) ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการใช้อุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็นที่ต่ำกว่าจะช่วยในการระบายความร้อนได้ดีกว่าแต่จำเป็นต้องใช้พลังงานและทรัพยากรที่มากกว่า [3] ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) แสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีความสม่ำเสมอมากขึ้น โดยแผนภาพการกระจายอุณหภูมิ (temperature contour) บ่งชี้ว่าอุณหภูมิของไอไพโรไลซิสลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของท่อ และไม่พบการสะสมของบริเวณอุณหภูมิสูงเฉพาะจุด ซึ่งแตกต่างจากลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบตั้งเดิมที่มักเกิดการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเฉพาะช่วงต้นของคอนเดนเซอร์ ตามงานวิจัยของ Simanjuntak et al. [3] นอกจากนี้ การไหลของความเร็ว (velocity vector) แสดงให้เห็นว่าการไหลของน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนก่อให้เกิดการไหลปั่นป่วนบริเวณใกล้ผิวท่ออย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ชั้นขอบเขตความร้อน (thermal boundary layer) มีความบางลง และช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งสอดคล้องกับข้อค้นพบของ Saputro et al. [7] ที่รายงานว่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและความเร็วมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพการควบแน่นของไอไพโรไลซิส เมื่อเปรียบเทียบกับแนวทางการออกแบบในงานวิจัย [3]

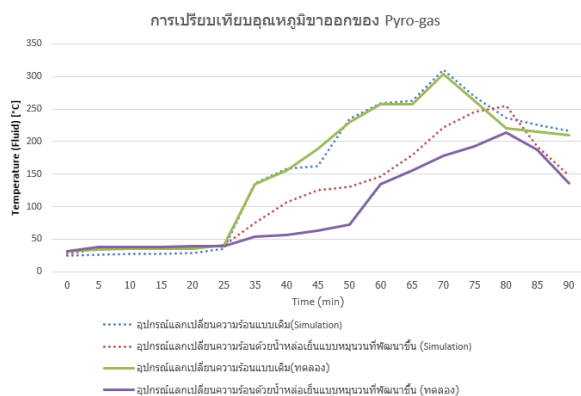
การกระจายตัวของอุณหภูมิของ Pyro-gas และน้ำหล่อเย็นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่อัตราการไหล 0.1 L/min โดยมีอุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น 20 °C และ 40 °C มีอุณหภูมิทางเข้าของ pyro-gas ที่ 500 °C จะพบว่า ที่อุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น 20 °C มีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอ โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของ pyro-gas และน้ำหล่อเย็นที่น้อยกว่าอุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็นอื่น อยู่ที่ 299.73°C และ 331.86°C ตามลำดับ เมื่อเทียบกับอุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น 40 °C มีการกระจายตัวของอุณหภูมิจากบริเวณผิวด้านนอกท่อทองแดงที่สูง เนื่องจากน้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิที่สูงแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีบริเวณนี้จึงเป็นบริเวณสะสมความร้อนแทน ดังรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยตรง โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของของ pyro-gas และน้ำหล่อเย็นที่มากกว่าอุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็นอื่น อยู่ที่ 312.30 °C และ 373.44°C ตามลำดับ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการใช้อุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็นที่ต่ำกว่าจะช่วยในการระบายความร้อนได้ดีกว่าแต่จำเป็นต้องใช้พลังงานและทรัพยากรที่มากกว่า



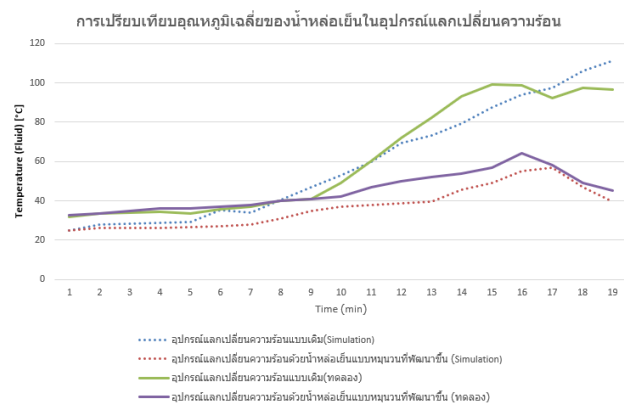
รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของ Pyro-gas และน้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น (ก) 20 °C และ (ข) 40°C

## 5.2 ผลเปรียบเทียบอุณหภูมิขาออกไอแก๊สไพโรไลซิสของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิมกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้น

การเปรียบเทียบเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของ Pyro-gas และอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำหล่อเย็น ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่อัตราการไหล 4 L/min พบว่า การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของ Pyro-gas ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิมกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้น มีอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของ pyro-gas สูงสุด อยู่ที่ 304.2°C และ 214°C ตามลำดับ (รูปที่ 7) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้นมีความแตกต่างจากระบบควบแน่นแบบสัมผัสโดยตรงระหว่างน้ำหล่อเย็นกับไอแก๊สไพโรไลซิส ซึ่งแม้ระบบสัมผัสโดยตรงจะมีโครงสร้างเรียบง่าย ต้นทุนต่ำ และให้ประสิทธิภาพการควบแน่นที่ดี แต่อยู่ภายใต้ข้อจำกัดด้านสัมผัสน้ำของไอระเหยและความจำเป็นในการแยกน้ำมันออกจากน้ำในภายหลัง [13] การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนท่อ ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และเลือกใช้แผ่นกั้นที่มีค่าการนำความร้อนสูง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว การปั่นป่วนของการไหล และอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยรวม รวมถึงการเสริมครีบบนการเพิ่มพื้นที่ถ่ายเทความร้อนมากขึ้น [3,5] นอกจากนี้ การเลือกใช้วัสดุเปลือกเป็นสแตนเลสยังช่วยลดการกัดกร่อนจากน้ำหล่อเย็นและเพิ่มอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยคอนเดนเซอร์ในระบบไพโรไลซิสขนาดเล็ก [4,8,12,14] ทั้งนี้แนวคิดการออกแบบในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อของ Simanjuntak et al. [3] ที่ชี้ให้เห็นถึงบทบาทของพื้นที่ผิวและรูปแบบการไหลต่อการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเพิ่มเติมโดยประยุกต์ใช้การไหลของน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวน ซึ่งช่วยเพิ่มความปั่นป่วน ลดชั้นขอบเขตความร้อน และรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิให้สม่ำเสมอตลอดความยาวอุปกรณ์ [7] ความสม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการควบแน่น ดังนั้น การไหลแบบหมุนวนจึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการยกระดับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะการควบแน่นของเครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกขนาดเล็ก



(ก) อุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของ Pyro-gas



(ข) อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำหล่อเย็นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของ Pyro-gas และอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำหล่อเย็น ระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิมกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้น (ก) อุณหภูมิเฉลี่ยขาออกของ Pyro-gas และ (ข) อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำหล่อเย็นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

### 5.3 เปรียบเทียบปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ควบนแน่นได้ ระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิมกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้น

การเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ควบนแน่นได้ ระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิม กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้นที่ได้จากการทดลองดังรูปที่ 8 โดยมีอัตราการไหลน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้นที่ 4 L/min มีอุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็นที่ 25°C ใช้ประเภทพลาสติก PE, PP, PS, HDPE น้ำหนักวัสดุคิด 5,000 กรัม ระยะเวลาที่ใช้ในการเผา 90 นาที พบว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิมและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้นได้ปริมาตรน้ำมัน 3.6 ลิตร และ 5.8 ลิตร ตามลำดับ



(ก) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิม



(ข) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้น

รูปที่ 8 แสดงต่ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิมและแบบใหม่เข้ากับเตาเผาและหอกลิ้น (ก) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิม

(ข) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนที่พัฒนาขึ้น

## 6. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนสำหรับระบบผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกขนาดเล็ก โดยใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ร่วมกับการทดลองจริง เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิ พฤติกรรมการไหล และอัตราการถ่ายเทความร้อนของไอไพโรไลซิส ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลและอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้ามีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยการเพิ่มอัตราการไหลช่วยเพิ่มความแตกต่างของอุณหภูมิและลดอุณหภูมิไอไพโรไลซิสได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอัตราการไหลเกินระดับเหมาะสมให้ผลเพิ่มประสิทธิภาพเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ต้องใช้และทรัพยากรที่มากกว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของของไหลและลดความหนาของชั้นขอบเขตความร้อน (thermal boundary layer) ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นและทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นระหว่างผิวของวัสดุกับของไหลอย่างต่อเนื่องตลอดอุปกรณ์ เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิม พบว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นแบบหมุนวนสามารถลดอุณหภูมิไอไพโรไลซิสขาออกได้มากกว่า และเพิ่มปริมาณน้ำมันที่ควบนแน่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบน้ำหล่อเย็นหมุนวนจึงมีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไพโรไลซิสขนาดเล็ก และเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในระดับชุมชน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Wondwosen Bekele, Wassihun Amedie, Zelalem Salehudres. (2020). Design of Pyrolysis Reactor for Waste Plastic Recycling. Engineering and Applied Sciences, 5(5), 92-97. doi: 10.11648/j.eas.20200505.12

- [2] อัครพงษ์ สดาวรินทร์ และ ไกรสร รวยป้อม. (2564). เครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกขนาดเล็กสำหรับครัวเรือน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, 35(1), 884-889.
- [3] Simanjuntak, J. P., Tambunan, B. H., Sihombing, J. L., & Riduwan, R. (2023). Thermal Design Approach of a Shell and Tube Heat Exchanger for Pyrolysis-Vapor Condensations. *Advances in Science and Technology*, 126(1), 51-66. <https://doi.org/10.4028/p-8r6j84>
- [4] Putrawan, I. M. A., Rajendra, M., Adi, I. K., Rahtika, I. P. G. S., & Suarta, I. M. (2024). Performance of Water-Cooled Spiral Type Condenser in A Plastic Waste Pyrolysis. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Green Tourism Applied Science*, 249(1), 259-265. 10.2991/978-94-6463-587-4\_30
- [5] Akinola, A. O., Yaru, S. S., Raheem, R. O., Fetuata, O., Eiche, J. F. & Akinsade, A.b. (2024). Design and Simulation of a Shell and Tube Heat Exchanger for a Pyrolysis Reactor. *Journal of Energy Research and Reviews*, 16(3), 11-22. DOI: 10.9734/JENRR/2024/v16i3339
- [6] Akinola A. O., Yaru, S. S., Raheem, R. O., Fetuata, O., Eiche, J. F. & Akinsade, A. b. (2024). Design and Simulation of a Shell and Tube Heat Exchanger for a Pyrolysis Reactor. *Journal of Energy Research and Reviews*, 16(3), 11-22. DOI: 10.9734/JENRR/2024/v16i3339
- [7] Saputro, H., Fitriana, L., Purwanto, A., Firdaus, A., Muslim, R., Munir, F. A., & Wang, W.-C. (2023). Modeling and experimental study condenser performance of fixed bed pyrolysis reactor: A case study of solid waste palm starch processing. *Cleaner Engineering and Technology*, 16(7), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100677>
- [8] Adzimaa, A. F., Pratama, D. Y., & Apriajumita, B. E. (2019). Design of Condensers on Miniplant Pyrolysis Machine for Converting Plastic Waste Into Oil Fuel. 2019 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA), 306-309. DOI: 10.1109/ICAMIMIA47173.2019.9223379
- [9] Novarini, Kurniawan, S., Rusdianasari, Bow, Y., & Rifa'i, A. I. (2020). Condenser Design on Plastic Oil Distillation Equipment. *International Summit on Science Technology and Humanity (ISETH) 2020*, 169 - 175. [https://www.researchgate.net/publication/362644045\\_Condenser\\_Design\\_on\\_Plastic\\_Oil\\_Distillation\\_Equipment](https://www.researchgate.net/publication/362644045_Condenser_Design_on_Plastic_Oil_Distillation_Equipment)
- [10] P. Chanthavee, Y. Laoonual, S. Hirai, P. Sriam, N. Chanurai, V. Lailuck, S. Rompho and M. Masomtob. (2018). A Simplified Approach for Heat Generation due to Entropy Change in Cylindrical LCO Battery. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 1-7. DOI:10.1109/ITEC-AP.2018.8433303
- [11] สุนันท์ ศรีณนิตย์. (2554). การถ่ายเทความร้อน (1). สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทยญี่ปุ่น).
- [12] B. L. Salvi, T. Soni, S. Jindal & N. L. Panwar. (2021). Design improvement and experimental study on shell and tube condenser for bio-oil recovery from fast pyrolysis of wheat straw biomass. *springer nature journal*, 173(3), 1-8. DOI:10.1007/s42452-021-04165-8
- [13] อัญบุรณ์ ถาวรธรรม. (2563). การศึกษาการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์*, 4(8), 15-32.
- [14] Kurniawan, A., Sugiarto, B., & Perdana, A. (2020). Design of A Simple Pyrolysis Reactor for Plastic Waste Conversion into Liquid Fuel Using Biomass as Heating Source. *Eksergi Chemical Engineering Journal*, 17(1), DOI:10.31315/e.v17i1.3080