

การกำจัดน้ำมันดินชีวมวลจากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้เตาปฏิกรณ์พลาสมาความร้อนต่ำ

An Investigation of Biomass Tar Removal from Gasification by Non-thermal Plasma Reactor

กิตติกร สาสุจิตต์* เสริมสุข บัวเจริญ และ นิกราน หอมดวง

Kittikorn Sasujit*, Sermsuk Buochareon and Nigran Homdoung

Received: 26 November 2020, Revised: 21 January 2021, Accepted: 5 February 2021

บทคัดย่อ

การผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเชื้อเพลิงชีวมวลพบข้อจำกัดการนำไปใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในเนื่องจากปัญหาน้ำมันดินที่ปนกับโปรคิวเซอร์แก๊ส งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเตาปฏิกรณ์พลาสมาความร้อนต่ำแบบโกลดิงอาร์คหมุนวนย้อนกลับสำหรับกำจัดน้ำมันดินโดยใช้สารประกอบแนฟทาลินเป็นตัวแทนน้ำมันดินจากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยทำการศึกษาที่ระดับความเข้มข้นน้ำมันดินในช่วง 823-9,750 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กำหนดให้อัตราการไหลแก๊สรวมป้อนเข้ารวมคงที่ 30 ลิตรต่อนาที และความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 และ 12 กิโลโวลต์ ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันดินเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาปฏิกรณ์พลาสมาส่งผลให้มีพลังงานมากพอทำลายโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบในน้ำมันดิน โดยจะให้ประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินในช่วงร้อยละ 70-87 และประสิทธิภาพพลังงานในช่วง 3.63-20.07 กรัมต่อหน่วยไฟฟ้าที่ใช้งานเตาปฏิกรณ์พลาสมา งานวิจัยนี้พบว่าสามารถรองรับอัตราการไหลของแก๊สที่สูงกว่าเตาปฏิกรณ์โกลดิงอาร์คแบบทั่วไป และสามารถพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบแก๊สซิฟิเคชันต่อไป

คำสำคัญ: พลาสมาความร้อนต่ำ, โกลดิงอาร์คแบบหมุนวนย้อนกลับ, แนฟทาลิน, การกำจัดน้ำมันดิน, แก๊สซิฟิเคชัน

ABSTRACT

The producer gas produced from biomass gasification was found to be limited in its use as an internal combustion engine due to the problem of tar. The purpose of this research is to develop a low temperature gliding arc plasma reactor that can be utilized to remove tar from gasification by using naphthalene compounds as model tar. The naphthalene concentration inlet is between 823-9,750 mg/m³ with a constant total gas feed rate of 30 LPM and a high voltage of 10-12 kV. The plasma assisted tar removal was found to increase with applied electrical energy as it can decompose the chemical structure of the compounds in the model tar. It was found that the removal efficiency was in the range of 70-87% and the energy efficiency was in the range of 3.63-20.07 g/kWh. This study shows the reverse vortex flow gliding arc reactor could be achieved with a higher flow rate of producer gas than a conventional gliding arc, which is suitable for further development in gasification systems.

Key words: non-thermal plasma, reverse vortex flow gliding arc, naphthalene, tar removal, gasification

บทนำ

จากสถานการณ์ด้านการใช้พลังงานปัจจุบัน มีการใช้พลังงานสูงขึ้นสอดคล้องการขยายตัวภาคอุตสาหกรรม กลุ่มวิสาหกิจชุมชนขนาดเล็กที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้หน่วยงานระดับกระทรวงพลังงาน จึงทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579 (AEDP2015) มีเป้าหมายเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน สนับสนุนอุตสาหกรรมการผลิตเทคโนโลยีพลังงานทดแทนในประเทศ และเพื่อวิจัยพัฒนาส่งเสริมเทคโนโลยีพลังงานทดแทนสัญชาติไทยให้สามารถแข่งขันในตลาดสากล โดยกำหนดเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนร้อยละ 30 ในปี พ.ศ. 2579 (Energy Policy and Planning Office, 2015) พื้นที่ส่วนใหญ่ประเทศไทยพบว่าพื้นที่เพาะปลูกจำนวนมากเนื่องจากประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลัก และมีการปลูกพืชหมุนเวียนทั้งพืชอาหาร และไม่ใช่อาหาร อย่างไรก็ตามยังคงพบปัญหาในการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ยังไม่ก่อให้เกิดการนำไปใช้ประโยชน์ ขณะเดียวกันมักจะถูกทำลาย

อย่างผิดวิธีโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาทิ้งในที่โล่ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศ ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้สามารถผ่านกระบวนการแปลงสภาพเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงพลังงานได้ เช่น ผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็ง ผลิตเป็นถ่านชีวภาพ และในรูปแบบอื่นๆ เป็นต้น

แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ถือว่าเป็นกระบวนการแปลงสภาพชีวมวลด้วยวิธีทางเคมี ความร้อน โดยแปลงสภาพชีวมวลจากเชื้อเพลิงแข็งเป็นแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานความร้อน หรือเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน เพื่อการผลิตไฟฟ้า ปัญหาหลักที่พบจากกระบวนการได้แก่อิ่มปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง เมื่อควบแน่นแล้วเป็นของเหลวสีดำ ความหนืดสูง ซึ่งมักจะเรียกว่า น้ำมันดินชีวมวล หรือทาร์ ซึ่งเกิดจากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล เมื่อมีจำนวนมากจะไปอุดตันในระบบท่อส่งแก๊สเชื้อเพลิง เกิดการกัดกร่อน หรือชุดทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง และระบบกลไกอื่นๆ เป็นต้น (Sasujit *et al.*, 2017) วิธีการกำจัดน้ำมันดินนั้นมีวิธีการหลัก 2 วิธีคือ

การจัดการระหว่างกระบวนการ (In-situ process) ได้แก่การออกแบบเตาเหมาะสม การใช้เบรควม ตัวเร่งปฏิกิริยา และการปรับเงื่อนไขกระบวนการให้เหมาะสม เป็นต้น ส่วนอีกวิธีคือการจัดการหลังเกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Post gasification) ซึ่งเป็นการลดปริมาณสิ่งปนเปื้อนโดยวิธีการทางกายภาพ ได้แก่ ไฮโดรคลอริก ฟลูออรีน สคาร์บอร์ ระบบกรอง โพรคิวเซอร์แก๊ส ระบบกำจัดฝุ่นโดยใช้ไฟฟ้าสถิตย์ เป็นต้น ในวิธีการนี้จะมีการกำจัดน้ำมันดินโดยการ ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาแบบรวดเร็ว (Nunnally *et al.*, 2014) ต่อมาคือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีการนี้ช่วยเร่งปฏิกิริยาในการแปลงสภาพองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันดินจากสารประกอบโมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลเล็ก และเปลี่ยนเป็นแก๊สเชื้อเพลิง ทั้งนี้วิธีการนี้ให้ประสิทธิภาพมากที่สุด แต่พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยายังคงมีราคาสูง เกิดการปนเปื้อนของคาร์บอนและฝุ่นละอองเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ประสิทธิภาพลดลง อีกวิธีการที่น่าสนใจคือการใช้เทคนิคพลาสมา ความร้อนต่ำ ข้อดีคือให้ประสิทธิภาพการสลายตัวของสารประกอบน้ำมันดินสูง ระยะเวลาการทำปฏิกิริยารวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการใช้วิธีการข้างต้น และยังสามารถใช้เชื้อเพลิงที่ใช้ประโยชน์ในรูปของเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน แต่ทั้งนี้ต้องมีปริมาณน้ำมันดินต่ำหรืออยู่ในช่วง 10-100 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Basu, 2010; Reed and Das, 1988; Rios *et al.*, 2018) การนำระบบนี้ไปใช้งานจะติดตั้งภายหลังจากกระบวนการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้วิธีการทางกายภาพ และลดอุณหภูมิให้เหมาะสมก่อนเข้าสู่ชุดกำจัดน้ำมันดินด้วยเทคนิคพลาสมาความร้อนต่ำ (Sasujit *et al.*, 2019)

พลาสมาเป็นสถานะที่สี่ของสสารเกิดขึ้นโดยที่แก๊สตัวกลางถูกทำให้เป็นไอออนซึ่งคือการที่

อิเล็กตรอนอย่างน้อยหนึ่งตัวหลุดออกจากอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลาง ทำให้อะตอมหรือโมเลกุลกลายเป็นไอออนบวกของโปรตรอน และอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นไอออนลบผสมกระจายกันอยู่อย่างเท่าๆ กันในตัวกลางของแก๊ส และยังมีนิวตรอน อนุภาคมูลฐานอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นอยู่ในสภาวะกึ่งเสถียรชนิดผสมประกอบอยู่รวมกันในสภาพที่มีพลวัตอย่างไร้คุณภาพก่อให้เกิดกระบวนการทำปฏิกิริยาเคมีและการเคลื่อนที่ของอนุภาคชนิดต่างๆ ในพลาสมา (Fridman, 2008) เทคโนโลยีพลาสมาในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ พลาสมาความร้อนสูง (Thermal Plasma) พบได้ในภาคอุตสาหกรรม ใช้พลังงานค่อนข้างสูงให้ความร้อนระหว่างกระบวนการสูง และพลาสมาความร้อนต่ำ (Non-thermal Plasma) ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ เช่น การประยุกต์ใช้ในด้านการเคลือบผิวเซลล์แสงอาทิตย์ การเปลี่ยนรูปแก๊สไฮโดรคาร์บอน (Lamacz *et al.*, 2009) รวมไปถึงการประยุกต์ใช้ในการกำจัดน้ำมันดินจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยจำลองน้ำมันดินโดยใช้สารประกอบทางเคมี เช่น สารประกอบเนฟทาไลน์ (Tippayawong and Inthasan, 2010; Yang and Chun, 2011; Yu *et al.*, 2010; Kunnikar and Tippayawong, 2014) สารประกอบโทลูอีน (Zhu *et al.*, 2016) สารประกอบแอนทราซีน (Chun *et al.*, 2012a) สารประกอบเบนซีน (Chun *et al.*, 2012b) รวมไปถึงการจำลององค์ประกอบของโพรคิวเซอร์แก๊ส (Nunnally *et al.*, 2014) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารประกอบเนฟทาไลน์เป็นตัวแทนน้ำมันดินจำลองจากชีวมวลเนื่องจากมีองค์ประกอบหลักในน้ำมันดินร้อยละ 15 (Rios *et al.*, 2018) และเตาปฏิกรณ์พลาสมาในการกำจัดน้ำมันดิน โดยพบว่าประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินจำลองมากกว่าร้อยละ 80 (Yang and Chun, 2011; Yu *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2016) โดยใช้เตาปฏิกรณ์พลาสมาแบบ

โกลดิงอาร์คแบบใบมีด 2 ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ (Tippayawong and Inthasan, 2010; Kunnikar and Tippayawong, 2014) ในเตาปฏิกรณ์แบบกล่อง ต่อมา มีการพัฒนาขั้วอิเล็กทรอนิกส์เป็นแบบใบมีดจำนวน 3-6 อิเล็กทรอนิกส์ในเตาปฏิกรณ์แบบทรงกระบอก (Yang and Chun, 2011; Yu *et al.*, 2010; Chun *et al.*, 2012a; Cimerman *et al.*, 2018) ซึ่งพบว่าการใช้ขั้วอิเล็กทรอนิกส์แบบ 2 ใบมีดนั้น มีพื้นที่การกระจายจทางไฟฟ้าแบบไม่เสถียรส่งผลทำให้การเกิดพลาสมาไม่ต่อเนื่อง และรองรับอัตราการไหลของแก๊สต่ำ ซึ่งจะไม่สอดคล้องกับกรณีไปใช้งานจริงที่มีอัตราการไหลแก๊สที่สูง ซึ่งจะส่งผลต่อระยะเวลาทำปฏิกิริยาพลาสมาต่ำเนื่องจากเมื่ออัตราการไหลตามแนวแกนสูงขึ้นทำให้แก๊สมีปล่องออกจากเตาปฏิกรณ์ทำให้ประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินต่ำและลดการเปลี่ยนรูปกระบวนการ (Kalra *et al.*, 2005) ต่อมา มีการพัฒนาเตาปฏิกรณ์แบบการไหลหมุนวนแบบทรงกระบอก โดยฉีดแก๊สตามแนวสัมผัสผนังเตาปฏิกรณ์ เพื่อสร้างกระแสหมุนวนในเตาปฏิกรณ์ ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาทำปฏิกิริยาเพียงพอต่อการแตกตัวน้ำมันดินเพิ่มขึ้น โดยเตาปฏิกรณ์ดังกล่าวนี้มีหลายแบบเช่น เตาปฏิกรณ์แบบหมุนวนตามแนวแกน (Rotating Gliding arc) (Zhu *et al.*, 2016) เตาปฏิกรณ์แบบเวอร์เท็กซ์โฟลว์ (Forward vortex flow gliding arc) (Nunnally *et al.*, 2014) ซึ่งให้ประสิทธิภาพแตกตัวน้ำมันดินสูงถึงร้อยละ 90 เนื่องจากความเสถียรเปลวพลาสมา รวมถึงพฤติกรรมการณ์การหมุนวนทำให้เพิ่มระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเพียงพอ แต่อย่างไรก็ตามการหมุนวนตามแนวแกนข้างต้นซึ่งฉีดแก๊สตามแนวสัมผัสผนังเตาจากด้านล่างและหมุนวนออกตามแนวแกนด้านบนของเตาปฏิกรณ์ ซึ่งพบว่าพฤติกรรมการณ์การไหลดังกล่าวจะหมุนวนตามแนวผนังเตาเป็นส่วนใหญ่ทำให้มีพื้นที่การทำปฏิกิริยากับเปลวพลาสมาน้อยเกินไป (Kalra *et al.*, 2005; Guofeng and Xinwei, 2012)

ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนาเตาปฏิกรณ์พลาสมาแบบหมุนวนย้อนกลับ (Reverse vortex flow gliding arc, RVF-GA) ซึ่งให้ประสิทธิภาพการแตกตัวและการเปลี่ยนรูปแก๊สสูงเช่นเดียวกันให้ระยะเวลาทำปฏิกิริยาดีเยี่ยมเนื่องจากเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้มีการฉีดแก๊สตามแนวสัมผัสจากด้านบนเพื่อสร้างการหมุนวนจากบนลงสู่ด้านล่าง และมีการฉีดแก๊สตามแนวแกนของเตาปฏิกรณ์ร่วมด้วย ทำให้แก๊สเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาตามแนวแกนสัมผัสกับเปลวพลาสมาโดยตรง นอกจากนั้นสามารถรองรับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสูงกว่าแบบอื่นๆ (Kalra *et al.*, 2005) ซึ่งสอดคล้องกับการขยายขนาดเพื่อใช้ในกระบวนการกำจัดน้ำมันดินจริงจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเตาปฏิกรณ์พลาสมาความร้อนต่ำแบบโกลดิงอาร์ค หมุนวนย้อนกลับสำหรับการกำจัดน้ำมันดินโดยใช้สารประกอบเนฟทาลินเป็นตัวแทนน้ำมันดินจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า ความเข้มข้นของน้ำมันดินจำลอง อัตราการไหลแก๊สรวมที่ป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดิน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบ

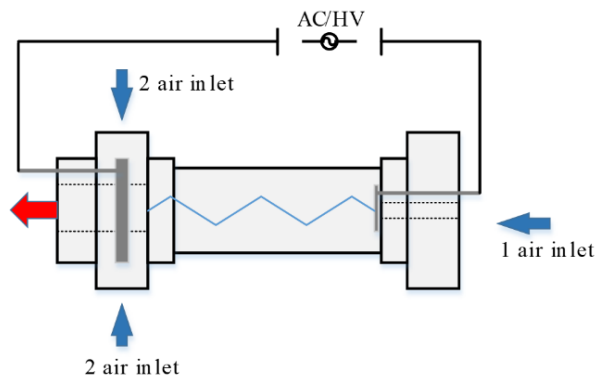
วิธีดำเนินการวิจัย

1. เตาปฏิกรณ์โกลดิงอาร์คพลาสมาแบบหมุนวนย้อนกลับ

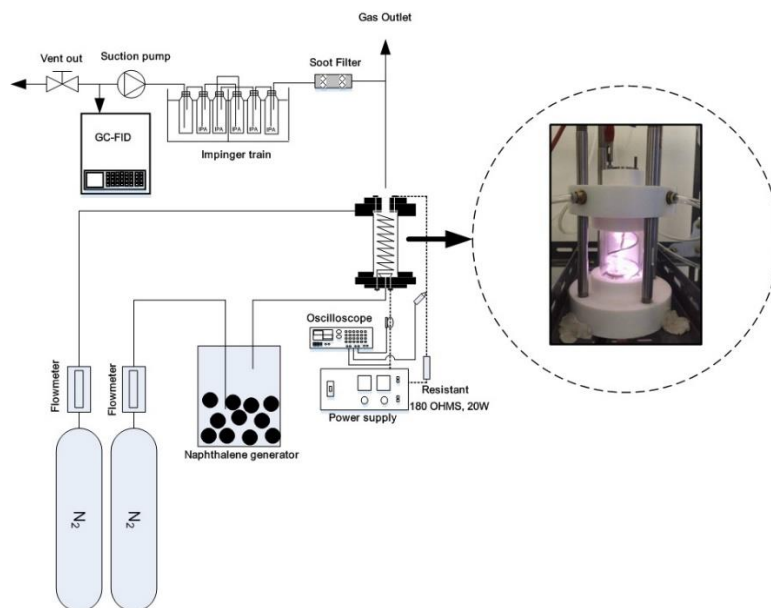
เตาปฏิกรณ์พลาสมาในงานวิจัยนี้ใช้ห้องทำปฏิกิริยาเป็นท่อควอซ์ทนความร้อนเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 40 มิลลิเมตร ความยาว 60 มิลลิเมตร อิเล็กทรอนิกส์ประกอบไปด้วยวงแหวนอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ พร้อมเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าโดยเป็นขั้วแคโทด ในส่วนด้านบนเตาปฏิกรณ์เป็นวงแหวนอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมต่อ

กับขั้วไฟฟ้าแอโนด ซึ่งจะมียางแหวนอิเล็กทรอนิกส์แบบเกลียวหมุนวน โดยระยะช่องว่างระหว่างขั้วห่างประมาณ 3 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 1 สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบนิออน (LECIPI EX230A) ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 15 กิโลโวลต์ ที่กระแสไฟฟ้าสูงสุด 30 มิลลิแอมแปร์ เชื่อมต่อกับชุดปรับความต่าง

ศักย์ไฟฟ้า ซึ่งการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยใช้โพรบชนิดวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (Fluke 80K-40, Germany) ร่วมกับเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้า (Oscilloscope GW Instek : GDS-1102-U) ซึ่งแผนผังการทดลองแสงได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 1 เตาปฏิกรณ์โกลดิงอาร์คพลาสมาแบบหมุนวนย้อนกลับ



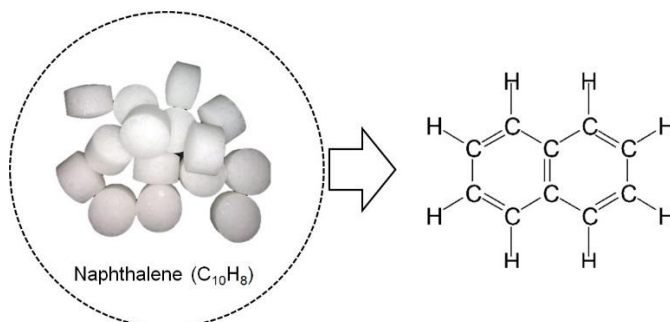
ภาพที่ 2 แผนผังการทดลองการกำจัดน้ำมันดินจำลองโดยใช้เทคนิคพลาสมา

งานวิจัยนี้ได้เลือกสารประกอบแนฟทาลีน ($C_{10}H_8$) เป็นตัวแทนน้ำมันดินจำลองเนื่องจากมีองค์ประกอบในน้ำมันดินชีวมวลร้อยละ 15 (Rios *et al.*, 2018) สถานะเป็นของแข็งโดยโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนเบนซีนจำนวน 2 วงแหวน เชื่อมต่ออยู่

ด้วยกันพันธะคู่ ซึ่งเป็นกลุ่มสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) เป็นกลุ่มน้ำมันดินเบา (Light tar) สามารถควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำ (Hernández *et al.*, 2013; Kunnikar and Tippayawong, 2014) ซึ่งหลักการแตกตัวสารประกอบเคมีในน้ำมัน

ดินชีวมวลโดยใช้เทคนิคทางพลาสติกานี้จะใช้พลังงานจากกระบวนการที่มากพอสลายพันธะคู่ของคาร์บอนในโครงสร้างของสารประกอบแนฟทาลิน เพื่อให้เกิด

การแตกตัวหรือเปลี่ยนรูปแก๊สที่มีโมเลกุลต่ำลง (Sasujit *et al.*, 2019) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีสารประกอบแนฟทาลิน

2. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

วิธีการทดลองเริ่มจากหาความเข้มข้นสารประกอบแนฟทาลิน โดยควบคุมอุณหภูมิอ่างน้ำในช่วง 30 50 และ 70 องศาเซลเซียส ควบคุมอุณหภูมิไม่เกินจุดหลอมเหลวประมาณ 80.6 องศาเซลเซียส งานวิจัยนี้ใช้หลักการระเหิดกลายเป็นไอของสารประกอบแนฟทาลิน และใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพาเข้าสู่เตาปฏิกรณ์พลาสติกาน โดยควบคุมอัตราการไหลโดยโรตاميเตอร์ (Dwyer, Germany) ในช่วง 5 10 และ 15 ลิตรต่ออนาที ภายหลังทำปฏิกิริยาเก็บตัวอย่างน้ำมันดินจำลองละลายในสารละลายไอโซโพรพานอลที่ชุดเก็บตัวอย่างน้ำมันดินซึ่งใช้วิธีการเก็บตัวอย่างตามข้อแนะนำในงานด้านการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล (Tar protocol) ส่วนการวิเคราะห์ความเข้มข้นน้ำมันดินหลังจาก

กระบวนการจะวิเคราะห์โดยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-FID: Agilent 6890 Gas Chromatograph, USA) และวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่ใช้จากเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าแบบดิจิตอล ร่วมกับมิเตอร์วัดการใช้พลังงานไฟฟ้า ทั้งนี้ทุกเงื่อนไขการทดลองทำการเก็บข้อมูล 3 ซ้ำ การทดลองที่ระยะเวลาการเก็บข้อมูลอย่างน้อย 1 ชั่วโมงต่อเงื่อนไข

3. การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง

3.1) ประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดิน

ประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดิน (Removal efficiency) หาได้จากมวลน้ำมันดินที่กำจัดต่อมวลน้ำมันดินเริ่มต้น ตามสมการที่ (1) (Nunnally *et al.*, 2014; Yang and Chun, 2011; Zhu *et al.*, 2016; Chun *et al.*, 2012a; Cimerman *et al.*, 2018)

$$\eta_d = \frac{[C]_{in} - [C]_{out}}{[C]_{in}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ η_d คือประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดิน (ร้อยละ) $[C]_{in}$ คือค่าความเข้มข้นน้ำมันดินเริ่มต้น (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) $[C]_{out}$ คือค่า

ความเข้มข้นน้ำมันดินหลังถูกกำจัด (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

3.2) พลังงานจำเพาะป้อนเข้า

พลังงานจำเพาะที่ป้อนเข้า (Specific Energy Input) คือหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ต่ออัตราการไหล

$$SEI = \frac{P}{Q} \quad (2)$$

โดยที่ P คือกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าระบบ (กิโลวัตต์) Q คืออัตราการไหลของแก๊สที่เข้าสู่เตาปฏิกรณ์พลาสมา (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)

3.3) ประสิทธิภาพพลังงาน

$$\eta_e = \frac{[C]_{in} - [C]_{out}}{SEI} \quad (3)$$

โดยที่ η_e คือประสิทธิภาพพลังงาน (กรัมต่อหน่วยไฟฟ้า) SEI คือพลังงานจำเพาะป้อนเข้าสู่ระบบ (หน่วยไฟฟ้าต่อลูกบาศก์เมตร)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

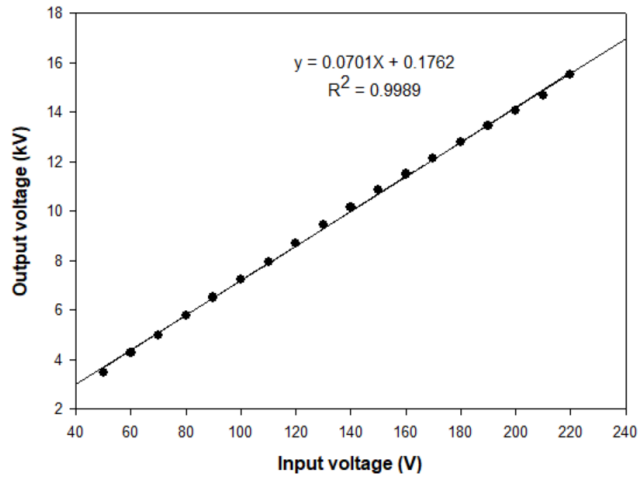
1. ผลการทดลองแหล่งจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง

การหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับแหล่งจ่ายทางไฟฟ้างานวิจัยนี้ทำโดยการปรับความต่างศักย์

รวมแก๊ส จำนวนตามสมการที่ (2) (Nunnally *et al.*, 2014; Yang and Chun, 2011; Zhu *et al.*, 2016)

ประสิทธิภาพพลังงานระบบวิเคราะห์ได้โดยมวลน้ำมันดินที่ถูกกำจัดต่อพลังงานที่ป้อนเข้าจำเพาะ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3) (Nunnally *et al.*, 2014; Cimerman *et al.*, 2018)

ไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าในช่วง (x) ในช่วง 50 - 220 โวลต์ เพื่อแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกจากหม้อแปลงไฟฟ้า (y) ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออกมีค่าสูงขึ้นในช่วง 3 - 15 กิโลโวลต์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นตามสมการ $y = 0.0701x + 0.1762$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ $R^2 = 0.9989$ ดังแสดงในภาพที่ 4

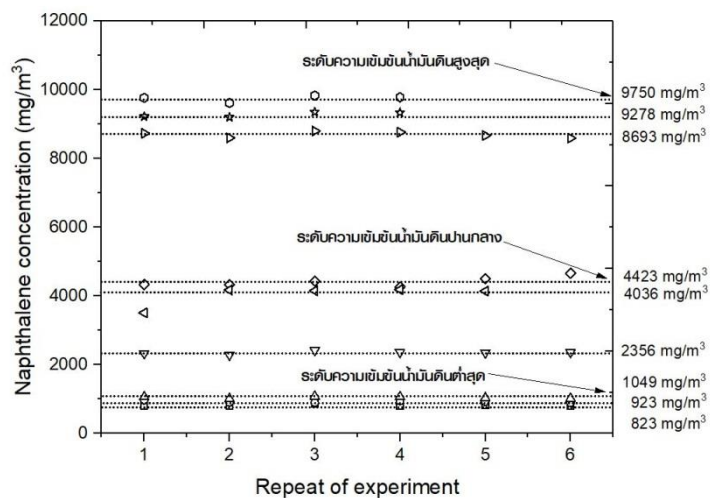


ภาพที่ 4 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้าและขาออกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง

2. ผลการทดสอบระบบจำลองความเข้มข้นน้ำมันดิน

ผลการศึกษาชุดจำลองน้ำมันดินงานวิจัยนี้พบว่าสามารถแบ่งระดับความเข้มข้นน้ำมันดินจำลองเป็นระดับความเข้มข้นต่ำมีค่าเฉลี่ย 823 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระดับความเข้มข้นปานกลางมีค่าเฉลี่ย 4,423 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และระดับความเข้มข้นสูงสุดมีค่าเฉลี่ย 9,750 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งแปรผันตามอัตราการไหลของก๊าซพาที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน และอุณหภูมิห้องอย่างควบคุมการระเหิด ซึ่งการเพิ่มอัตราการไหลก๊าซพาจะส่งผลต่อการถ่ายเทมวลน้ำมันดินถูกพาออกมา

ขึ้น เช่นเดียวกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการระเหิดของสารประกอบเนฟทาไลน์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน (Tippayawong and Inthasan, 2010) ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกศึกษาผลของระดับความเข้มข้นสารประกอบเนฟทาไลน์ในช่วงดังกล่าวตามขีดจำกัดของชุดจำลองน้ำมันดินที่พัฒนาขึ้น นอกจากนั้นระดับความเข้มข้นเฉลี่ยที่เลือกก็มีค่าสูงกว่าข้อกำหนดการใช้งานของแก๊สเชื้อเพลิงในการเป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยผลการทดสอบระดับความเข้มข้นน้ำมันดินจำลองเชิงการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 5

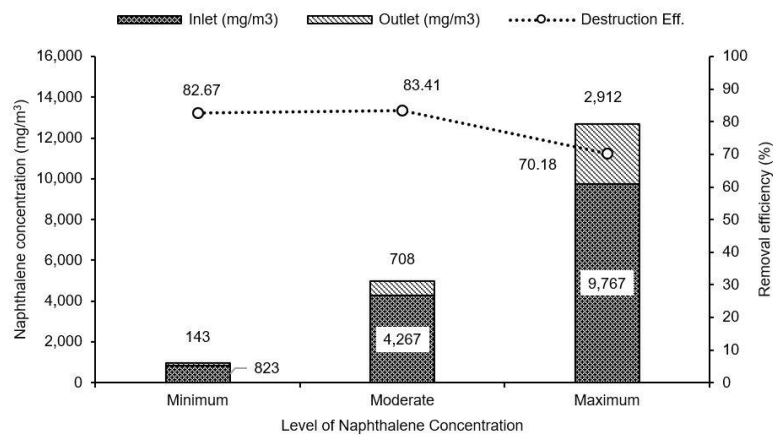


ภาพที่ 5 ระดับความเข้มข้นของน้ำมันดินจำลองก่อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์พลาสมา

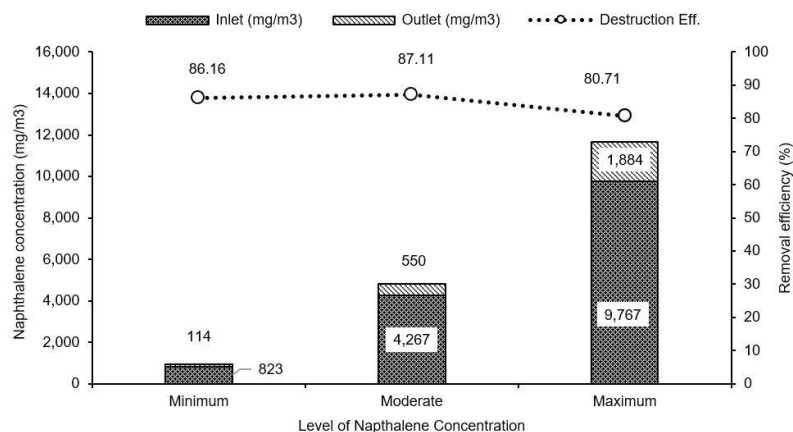
3. ผลความเข้มข้นน้ำมันดินจำลองที่มีผลต่อประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินจำลอง

ผลของความเข้มข้นน้ำมันดินที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด ซึ่งทำการทดสอบที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาปฏิกรณ์พลาสมาเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ และ 12 กิโลโวลต์ โดยศึกษาที่ระดับความเข้มข้นน้ำดันที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ปานกลาง และสูงสุด จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพกำจัดที่ระดับความเข้มข้นปานกลางมีค่าใกล้เคียงกับระดับความเข้มข้นต่ำ โดยมีแนวโน้มสูงกว่าเล็กน้อย ขณะเดียวกันระดับความเข้มข้นสูงพบว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันดินสูงขึ้น เนื่องจากการพาวลไอที่ระเหิดจากสารประกอบเนฟทาลิน ป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ที่ค่าความเข้มข้นระดับปานกลาง และสูงสุด มีอัตราการไหลของก๊าซพา 10 ลิตร ต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส

ตามลำดับ ทำให้การพาวลตามแนวแกนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ระยะเวลาการแตกตัวน้อยเกินไป ขณะเดียวกันที่ระดับความเข้มข้นต่ำที่มีค่าอัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูง เนื่องจากอัตราการไหลก๊าซพาตามแนวแกนมีผลต่อประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดิน ขณะเดียวกันผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วอิเล็กโทรดเพื่อแตกตัวแก๊สตัวกลาง พบว่าให้ประสิทธิภาพกำจัดสูงสุดร้อยละ 83.41 ที่ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ และเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 12 กิโลโวลต์ พบว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 87.11 ที่ระดับความเข้มข้นน้ำมันดินระดับปานกลางเท่ากับ 4,423 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังภาพที่ 6 และภาพที่ 7



ภาพที่ 6 ระดับความเข้มข้นน้ำมันดินที่มีผลต่อประสิทธิภาพกำจัดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์

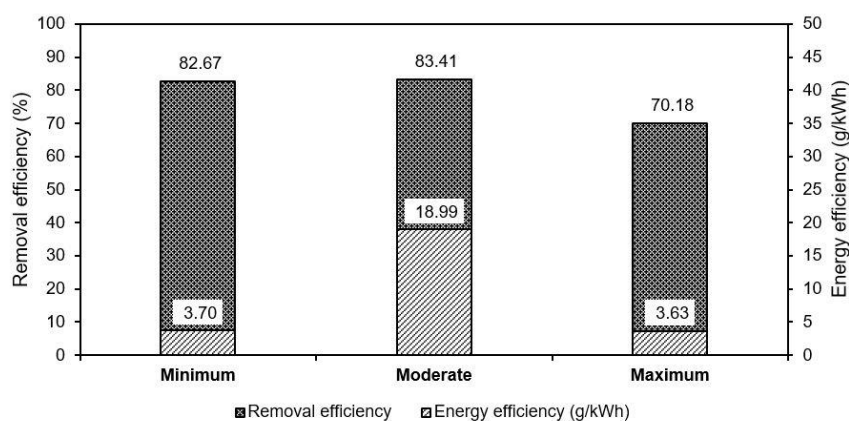


ภาพที่ 7 ระดับความเข้มข้นน้ำมันดินที่มีผลต่อประสิทธิภาพกำจัดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์

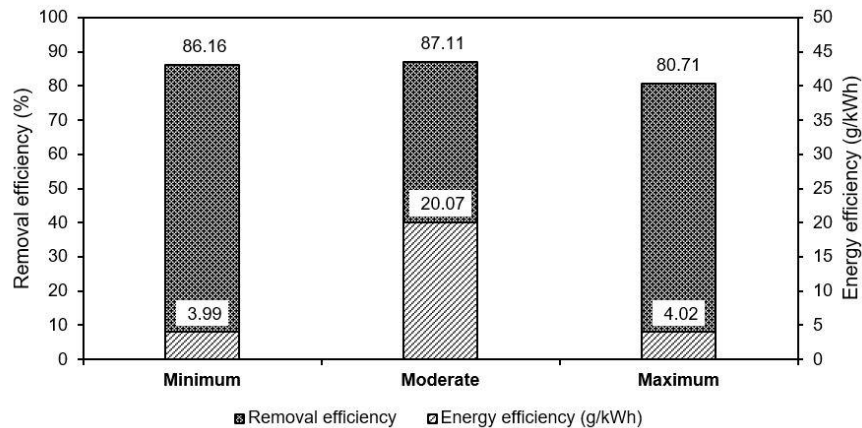
4. ผลความเข้มข้นน้ำมันดินจำลองที่มีผลต่อประสิทธิภาพกำจัด และประสิทธิภาพพลังงาน

ภาพที่ 8 และ 9 แสดงผลของระดับความเข้มข้นของน้ำมันดินที่มีต่อประสิทธิภาพกำจัด และประสิทธิภาพเชิงพลังงาน พบว่าประสิทธิภาพกำจัดสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำมันดินที่ถูกกำจัดต่อหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพ

กำจัดน้ำมันดินจำลองสูงสุดร้อยละ 83.41 จะให้ประสิทธิภาพพลังงานเฉลี่ย 18.99 กรัมต่อหน่วยไฟฟ้า ที่เงื่อนไขการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับเตาปฏิกรณ์พลาสมาเป็น 12 กิโลโวลต์ จะให้ประสิทธิภาพกำจัดสูงสุดร้อยละ 87.11 ประสิทธิภาพพลังงานเพิ่มขึ้นเฉลี่ยเท่ากับ 20.07 กรัมต่อหน่วยไฟฟ้า



ภาพที่ 8 ความเข้มข้นน้ำมันดินที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดและการใช้พลังงานที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์

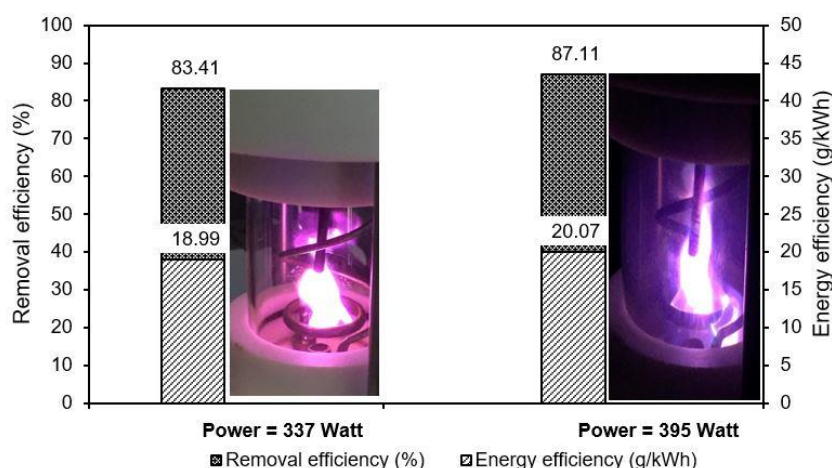


ภาพที่ 9 ความเข้มข้นน้ำมันดินที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดและการใช้พลังงานที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์

5. ผลของกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพกำจัดและประสิทธิภาพพลังงาน

ภาพที่ 10 แสดงผลของกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินจำลอง และลักษณะเปลวพลาสมา โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ (กำลังไฟฟ้า 337 วัตต์) ให้ประสิทธิภาพกำจัดสูงสุดร้อยละ 83.41 ประสิทธิภาพพลังงานเท่ากับ 18.99 กรัมต่อหน่วยไฟฟ้า ลักษณะเปลวพลาสมาเป็นแสงสีส้มแดง เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 12 กิโลโวลต์ (กำลังไฟฟ้า 395 วัตต์) พบว่าประสิทธิภาพกำจัดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยมีค่าเท่ากับร้อยละ 87.11 ประสิทธิภาพพลังงาน 20.07 กรัมต่อหน่วยไฟฟ้า ให้เปลวพลาสมาเป็นสีม่วง ซึ่งกลไกการแตกตัวของน้ำมันดินนั้นเกิดขึ้นจากที่แก๊สผสมถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์พลาสมาและไหลผ่านช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

ที่มีระยะห่าง 3 มิลลิเมตร ซึ่งแก๊สที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดดังกล่าวทำให้อิเล็กตรอนแก๊สตัวกลางหลุดและปล่อยพลังงานสูงออกมาในรูปของพลังงานไอออไนเซชันของแก๊ส (Yang and Chun, 2011; Yu *et al.*, 2010) จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกนี้จะไปชนกับอนุภาคแก๊สตัวกลางทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ และเกิดการทำลายโครงสร้างโมเลกุลสารประกอบแนฟทาลิน หรือกลุ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันดิน ทำให้พันธะที่จับตัวกันของสารประกอบจึงแยกออกจากกัน ทำให้โครงสร้างโมเลกุลเล็กลง (Nunnally *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2016; Chun *et al.*, 2012b) ดังนั้นการเพิ่มกำลังไฟฟ้าจะส่งผลต่อการลดลงของปริมาณน้ำมันดิน และประสิทธิภาพกำจัดเพิ่มมากขึ้น (Sasujit *et al.*, 2019)



ภาพที่ 10 ผลของกำลังไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการแตกตัวและประสิทธิภาพพลังงานระดับความเข้มข้นปานกลาง

6. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกำจัดและประสิทธิภาพพลังงานกับงานวิจัยอื่น

ผลการศึกษาประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินจำลองงานวิจัยนี้ พบว่าให้ประสิทธิภาพกำจัดสูงสุดในช่วงร้อยละ 70 - 87 เปรียบเทียบกับเตาปฏิกรณ์ไกลดิงอาร์คทั่วไป พบว่าให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับงานวิจัย (Kunnikar and Tippayawong, 2014) ทั้งนี้งานวิจัยนี้รองรับอัตราการไหลของแก๊สรวมสูงกว่า และระดับความเข้มข้นน้ำมันดินสูง นอกจากนั้นยังให้ประสิทธิภาพพลังงานดีกว่าด้วยเช่นกัน สอดคล้องงานวิจัย Tippayawong and

Inthasan (2010) ใช้เตาปฏิกรณ์ไกลดิงอาร์คแบบทั่วไปและแหล่งจ่ายไฟฟ้าเช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ พบว่าให้ประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินสูงร้อยละ 90 ซึ่งข้อดีเตาปฏิกรณ์พลาสมา งานวิจัยนี้ให้ประสิทธิภาพกำจัดสูงเนื่องจากพฤติกรรมการไหลของแก๊สในเตาปฏิกรณ์แบบหมุนวนซึ่งส่งผลให้มีระยะเวลาการหมุนวนนานเพียงพอ และสามารถทำปฏิกิริยาแตกตัวสลายพันธะทางเคมีของสารประกอบน้ำมันดินได้ดีกว่า (Yu *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2016; Guofeng and Xinwei, 2012; Chun *et al.*, 2012b)

ตารางที่ 1 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพเตาปฏิกรณ์พลาสมากับงานวิจัยอื่น

Type of Reactor	Gliding arc reactor (GA)			RVF-GA
	Kunnikar and Tippayawong, 2014	Yang and Chun, 2011	Tippayawong and Inthasan, 2010	This research
Model tar compound		Naphthalene compound		
Reactor chamber	Rectangle	Cylindrical	Rectangle	Cylindrical
Tar Concentration (g/m ³)	0.21	0.79	0.13-0.69	0.82-9.77
Total gas feed rate (LPM)	5	18.4	5-15	30
Destruction efficiency (%)	87.12	79	90-100	70-87
Energy efficiency (g/kWh)	0.184	68	-	3.63-20.07

สรุป

การกำจัดน้ำมันดินชีวมวลจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยเทคนิคการใช้พลาสมาความร้อนต่ำ โดยการใช้สารประกอบแนฟทาลีนเป็นตัวแทนน้ำมันดินชีวมวล ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินช่วงร้อยละ 70-87 ทั้งนี้ ค่าความเข้มข้นน้ำมันดินที่เหลือยังคงปนไปกับแก๊สเชื้อเพลิงที่หลุดออกจากเตาปฏิกรณ์ หรืออีกนัยหนึ่งกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาการกำจัดน้ำมันดินมีระยะเวลาไม่เพียงพอต่อการสลายพันธะและการเปลี่ยนรูปเป็นแก๊สเชื้อเพลิง ในส่วนของประสิทธิภาพเชิงพลังงาน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 3.63-20.07 กรัมต่อหน่วยไฟฟ้า ที่ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าป้อนให้กับเตาปฏิกรณ์ พลาสมา 10-12 กิโลโวลต์ หรือคิดเป็นกำลังไฟฟ้า 337-395 วัตต์ ขณะเดียวกันเตาปฏิกรณ์งานวิจัยนี้สามารถรองรับอัตราการไหลแก๊สที่สูงกว่าเตาปฏิกรณ์พลาสมาแบบโกลดิงอาร์คทั่วไป และสามารถขยายขนาดเพื่อพัฒนาในระดับอุตสาหกรรม สำหรับการกำจัดน้ำมันดินจริงจากระบบแก๊สซิฟิเคชันเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สสำหรับเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าชีวมวล

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณประจำปี 2560 จากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ รหัสโครงการวิจัยเลขที่ มจ.1-60-086 และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

เอกสารอ้างอิง

Basu, P. 2010. **Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory.** Academic press, Burlington USA.

- Chun, Y.N., Kim, S.C. and Yoshikawa, K. 2012a. Destruction of biomass tar using a gliding arc plasma reformer. **International Journal of Environmental Protection** 2(12): 1-8.
- Chun, Y.N., Kim, S.C. and Yoshikawa, K. 2012b. Removal characteristics of tar benzene using the externally oscillated plasma reformer. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification** 57: 65-74.
- Cimerman, R., Rackova, D. and Hensel, K. 2018. Tars removal by non-thermal plasma and plasma catalysis. **Journal of Physics D: Applied Physics** 51(27): 1-13.
- Energy Policy and Planning Office. 2015. **Alternative Energy Development Plan: AEDP2015.** Policy and Plan. Available Source: <http://www.eppo.go.th/images/POLICY/ENG/AEDP2015ENG.pdf>, November 22, 2020.
- Fridman, A. 2008. **Plasma chemistry.** Cambridge University Press, USA.
- Guofeng, X. and Xinwei, D. 2012. Electrical characterization of a reverse vortex gliding arc reactor in atmosphere. **IEEE Transactions on Plasma Science** 40(12): 3458-3464.
- Hernández, J., Ballesteros, R. and Aranda, G. 2013. Characterization of tars from biomass gasification: effect of the operating conditions. **Energy** 50(1): 333-342.
- Kalra, C.S., Cho, Y.I., Gutsol, A., Fridman, A. and Rufael, T.S. 2005. Gliding arc in tornado using a reverse vortex flow. **Review of Scientific Instruments** 76(2): 1-7.
- Kunnikar, A. and Tippayawong, N. 2014. Destruction of model light tar using pulsed gliding arc

- discharge, pp. 40-44. *In The 5th Joint Symposium between CMU and KU.* Chiang Mai, Thailand.
- Lamacz, A., Krzton, A., Musi, A. and Costa, P.D. 2009. Reforming of model gasification tar compounds. **Catalysis Letters** 128(1): 40-48.
- Nunnally, T., Tsangaris, A., Rabinovich, A., Nirenberg, G., Chernets, I. and Fridman, A. 2014. Gliding arc plasma oxidative steam reforming of a simulated syngas containing naphthalene and toluene. **International Journal of Hydrogen Energy** 39(23): 11976-11989.
- Reed, T.B. and Das, A. 1988. **Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems.** Biomass Energy Foundation, USA.
- Rios, M.L.V., González, A.M., Lora, E.E.S. and del Olmo, O.A.A. 2018. Reduction of tar generated during biomass gasification: A review. **Biomass and Bioenergy** 108: 345-370.
- Sasujit, K., Dussadee, N., Homdoug, N., Ramaraj, R. and Kiatsiriroat, T. 2017. Waste-to-Energy: Producer Gas Production from Fuel Briquette of Energy Crop in Thailand. **International Energy Journal** 17(1): 37-46.
- Sasujit, K., Dussadee, N. and Tippayawong, N. 2019. Development of a non-thermal gliding-arc discharge reactor for biomass tar treatment. **Engineering and Applied Science Research** 46(2): 170-175.
- Tippayawong, N. and Inthasan, P. 2010. Investigation of light tar cracking in a gliding arc plasma system. **International Journal of Chemical Reactor Engineering** 8(1): 1-16.
- Yang, Y.C. and Chun, Y.N. 2011. Naphthalene destruction performance from tar model compound using a gliding arc plasma reformer. **Korean Journal of Chemical Engineering** 28(2): 539-543.
- Yu, L., Li, X., Tu, X., Wang, Y., Lu, S. and Yan, J. 2010. Decomposition of naphthalene by dc gliding arc gas discharge. **The Journal of Physical Chemistry A** 114(1): 360-368.
- Zhu, F., Li, X., Zhang, H., Wu, A., Yan, J., Ni, M., Zhang, H. and Buckens, A. 2016. Destruction of toluene by rotating gliding arc discharge. **Fuel** 176: 78-85.