

การกำจัดน้ำมันดินจากกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวลโดยความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา Tar removal from biomass gasification via thermal and catalytic cracking

อัฟนี ลาเต๊ะ, จันทกานต์ ทวีกุล และ กิตตินันท์ มลิวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
ตูปณ.2 คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112
*ติดต่อ: abuhaf_me@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 08-0713-4582, เบอร์โทรสาร 0-7455-8830

บทคัดย่อ

สถานการณ์ในปัจจุบันนับได้ว่าทั่วโลกใช้พลังงานในปริมาณที่สิ้นเปลืองกันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานฟอสซิล ซึ่งก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจกและปัญหาภาวะโลกร้อนตามมา ดังนั้นการหาพลังงานทางเลือกแทนพลังงานหลัก จึงมีความน่าสนใจ และหนึ่งในนั้นคือ พลังงานจากชีววมวล การนำชีววมวลมาผลิตพลังงานทดแทน ซึ่งผลิตแก๊สเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน แม้ว่าชีววมวลเป็นที่ยอมรับในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง แต่สิ่งปนเปื้อนที่ออกมาพร้อมแก๊สเชื้อเพลิงนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันดิน นับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากน้ำมันดินนั้นเป็นของผสมสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ซับซ้อน มีน้ำหนักของโมเลกุลที่มากกว่าสารพวกเบนซีน เป็นผลผลิตที่เกิดทั้งจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส สามารถควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำได้ มีลักษณะข้นเหนียว สีดำ ติดไฟได้ ก่อให้เกิดการอุดตัน กีดขวางเส้นทางไหลของระบบเกาเซติดตัวกรองและเครื่องยนต์ได้ และส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์ให้ต่ำลงอีกด้วย จากการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า วิธีการโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและวิธีการใช้ความร้อนเป็นวิธีที่น่าสนใจ และมีประสิทธิภาพมากในการกำจัดน้ำมันดิน แต่การกำจัดน้ำมันดินโดยใช้ความร้อนอย่างเดียว ยังไม่ได้ประสิทธิภาพที่สมบูรณ์มากนัก กอปรกับน้ำมันดินที่ได้จากชีววมวลจะสลายยากกว่าที่ได้จากถ่านหิน นอกจากนี้มีรายงานว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายน้ำมันดินนั้น แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพมากก็ตาม แต่ยังพบปัญหาเรื่องการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจากการเกาะติดของคาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ไม่สามารถลดน้ำมันดินได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นประเด็นการศึกษาการกำจัดน้ำมันดินที่ได้จากกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวลโดยใช้พลังงานความร้อนกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว จึงมีความน่าสนใจยิ่ง ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์และสมรรถนะของอุปกรณ์ที่ใช้แก๊สที่ใช้แก๊สผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิงต่อไป

คำหลัก: น้ำมันดิน, กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน, การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

Abstract

The current situation indicates that the global overuse of non-renewable energy such as fossil energy contributes to greenhouse gases and global warming consequences. Thus, finding the alternative resources particularly biomass energy is highly essential. Biomass is one of the alternative resources and is widely known to have a very potent interest. Biomass gasification is the converted process of fossil or non-fossil fuels (i.e., solid, liquid, or gaseous) into useful gases. Although, biomass gasification is largely accepted but contaminants released with the flue gas, especially biomass tar is the major problem for biomass gasification. This is attributed to the higher molecular weight of the hydrocarbon complex obtained from gasification and pyrolysis processes. Such contaminants can condense at low temperature and turn to be black, highly viscous and flammable liquid. As a result, it has brought to clogging the gas passage and leading to system disruptions. Many researchers found that the catalytic and thermal processes are the most effective attempts in reducing the tar. Biomass-

derived tar is hardly decomposed by solely thermal treatment while the catalytic counterpart has reportedly more prone for the tar reduction process. It was found that the catalytic deactivation and carbon deposition are the major concerns. Based on the above description, it is clear that the tar removal of gasification process is very important. Therefore, searching the alternative routes in reducing the biomass derived tar is of interest. In this paper, simultaneous effects of catalytic which is quality improvement and thermal processes were described. With such attempts, it is believed to provide an effective tar removal during the gasification process.

Keywords: Tar, Gasification process, Catalyst deactivation.

1. บทนำ

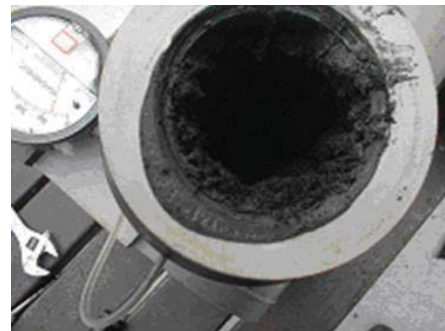
ชีวมวลเกิดจากสิ่งมีชีวิตทั้งจากพืชและสัตว์ สามารถแปรสภาพในรูปของพลังงานได้ มีการปลดปล่อยปริมาณแก๊สเรือนกระจกในจำนวนที่น้อยมาก จึงมักเรียกว่าพลังงานสะอาด แม้ว่าชีวมวลอาจมีข้อด้อย เช่น กระจายตัวอยู่ในบริเวณที่มีการขนส่งลำบาก ใช้เงินลงทุนสูงสำหรับการแปรสภาพให้ได้พลังงานงานออกมา แต่หากมองในแง่ความวิกฤติทั้งทางด้านพลังงานขาดแคลนและปัญหาโลกร้อนแล้ว พลังงานจากชีวมวลนั้นมีความน่าสนใจอยู่มาก [1] การนำชีวมวลแปรสภาพเป็นพลังงานวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจคือ การผลิตด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สสังเคราะห์ โดยการนำชีวมวลมาเผาไหม้ในอุปกรณ์หรือเตาปฏิกรณ์ที่มีการควบคุมอากาศแบบจำกัด แก๊สสังเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันสำหรับการผลิตไฟฟ้า โดยเครื่องจักรไอน้ำ หรือใช้สำหรับเครื่องสันดาปภายในสำหรับผลิตไฟฟ้า และสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรม เป็นต้น [2]

ทั้งนี้ แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน นอกจากจะมีประโยชน์จากการแปลงสภาพเศษของที่มีมูลค่าต่ำกลายเป็นแก๊สที่มีมูลค่าสูง เช่น H_2 , CO , CH_4 , CO_2 และ N_2 แล้ว [3] แต่ยังมีสิ่งปนเปื้อนที่ไม่ต้องการอีกด้วย อาทิเช่น ผุ่น สิ่งปนเปื้อนชนิดอนินทรีย์สารทั้งจากสารประกอบไนโตรเจน (NH_3 และ HCN) และสารประกอบซัลเฟอร์ (H_2S) ซี้เถ้า และน้ำมันดิน [4] โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันดิน ถือว่าเป็นสิ่งปนเปื้อนที่

ก่อให้เกิดปัญหาและส่งผลกระทบต่อระบบการผลิตแก๊สในระยะยาวได้ อีกทั้งยังทำให้เกิดกัดกร่อนตามผิวโลหะได้อีกด้วย [5]

2. น้ำมันดิน (Tar)

น้ำมันดิน (Tar) เป็นของผสมสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ซับซ้อน ควบแน่นได้ มีลักษณะขุ่นเหนียว สีดำ จุดติดไฟได้ [6] ทั้งนี้ทาง The Directorate General for Energy of the European Commission (DG XVII) and US DoE ได้ให้คำจำกัดความของน้ำมันดินว่า “เป็นเป็นของผสมสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักของโมเลกุลที่มากกว่าสารพวกเบนซีน” องค์ประกอบภายในน้ำมันดินขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นที่นำมาเผาไหม้ โดยปกติ น้ำมันดินเป็นผลผลิตจากกระบวนการ สามารถควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำ นำไปสู่การอุดตัน กีดขวางเส้นทางไหลของระบบ และเกาะติดตัวกรองและเครื่องยนต์ได้ [7] ดังรูปที่ 1 และ 2 นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์ให้ต่ำลงอีกด้วย [6]



รูปที่ 1 การอุดตันของน้ำมันดินในอุปกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิง [31]



รูปที่ 2 การเกาะติดของน้ำมันดินในตัวกรองและเครื่องยนต์ [31]

3. องค์ประกอบของน้ำมันดิน (Tar composition)

จากตารางที่ 1 จะพบว่า น้ำมันดินนั้นจะเป็นส่วนผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่หลากหลายด้วยกัน ความเข้มข้นของน้ำมันดินจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ดังนี้ เช่น อุณหภูมิในช่วงปฏิกิริยา ชนิดของเตาเผาผลิตแก๊สชีวมวล และชนิดของวัสดุดิบ โดยที่ โทลูอิน และ แนฟทาลีน จะเป็นองค์หลักที่พบโดยทั่วไปจากน้ำมันดินที่ได้จากการผลิตแก๊สชีวมวลจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Milne et al., 1998) [4]

ตารางที่ 1 แสดงถึงองค์ประกอบของน้ำมันดิน

องค์ประกอบ	น้ำหนัก (%)
โทลูอิน	24
อะโรมาติกที่เป็นไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ที่มีโครงสร้างเป็น 1 วง	22
แนฟทาลีน	15
อะโรมาติกที่เป็นไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ที่มีโครงสร้างเป็น 2	13
สารประกอบเฮเทโรไซคลิก	10
สารประกอบฟีนอล	7
อะโรมาติกที่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็น 3 วง	6
อื่นๆ	2
อะโรมาติกที่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็น	1

4. การกำจัดน้ำมันดิน (Tar removal)

โดยทั่วไปกระบวนการกำจัดน้ำมันดิน สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ ดังนี้ 1) การกำจัดน้ำมันดินในช่วงระหว่างการเกิดปฏิกิริยา (Primary method) และ 2) การกำจัดน้ำมันดินในช่วงหลังการเกิดปฏิกิริยา

(Secondary method) [6] แม้กระบวนการกำจัดน้ำมันดินในช่วงระหว่างการเกิดปฏิกิริยา (Primary method) นั้นสามารถที่จะทำให้ปริมาณการปนเปื้อนของน้ำมันดินในแก๊สเชื้อเพลิงลดลงได้ แต่ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพมากนัก หากปราศจากวิธีการกำจัดน้ำมันดินในช่วงหลังการเกิดปฏิกิริยาร่วมด้วย [8] ทั้งนี้ วิธีการกำจัดน้ำมันดินในช่วงหลังการเกิดปฏิกิริยานั้น มี 3 วิธี ได้แก่ 1) วิธีทางกายภาพ 2) วิธีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และ 3) วิธีที่ใช้ความร้อน ดังนั้นในส่วนนี้จะอธิบายเฉพาะการกำจัดน้ำมันดินในช่วงหลังการเกิดปฏิกิริยา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 การกำจัดน้ำมันดินด้วยวิธีทางกายภาพ

การกำจัดน้ำมันดินด้วยวิธีทางกายภาพหรือการดักจับเชิงกล เป็นการดักจับน้ำมันดินเชิงกล ซึ่งแบ่งประเภทดังนี้ 1) แก๊สแห้ง (Dry gas) สามารถดักจับได้โดยเครื่องมือ อาทิเช่น ไชโคลน เครื่องดักไฟฟ้าสถิต (ESB) ถูกรองผ้า แผ่นกั้นกรอง (Baffle filters) เครื่องแยกอนุภาคแบบหมุน (RPS) เครื่องกรองเซรามิกซ์ เครื่องกรองด้วยชั้นทราย เป็นต้น และ 2) แก๊สเปียก (Wet gas) สามารถดักจับได้โดยเครื่องมือ อาทิเช่น หอพ่นน้ำ สกรับเบอร์แบบคอคอด เครื่องดักไฟฟ้าสถิตแบบเปียก เป็นต้น

ทั้งนี้ Hasler and Nussbaumer [3] ได้สรุปประสิทธิภาพของเครื่องมือแยกต่างๆ ดังตารางนี้ ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของเครื่องมือแยกน้ำมันดินต่างๆ

วิธีการกำจัด	ร้อยละของการกำจัดฝุ่นละออง	ร้อยละของการกำจัดน้ำมันดิน
เครื่องกรองด้วยชั้นทราย	70-99	50-97
ถูกรองผ้า	70-95	0-50
เครื่องแยกอนุภาคแบบหมุน	85-90	30-70
ตัวดูดซับน้ำมันดิน	-	50
หอพ่นน้ำ	60-98	10-25
สกรับเบอร์แบบคอคอด	-	50-90
เครื่องดักไฟฟ้าสถิตแบบเปียก	>99	0-60

แม้ว่า เครื่องมือเหล่านี้จะมีประสิทธิภาพค่อนข้างที่ดี สามารถกำจัดสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ต่างๆ เช่น น้ำมันดินและฝุ่นได้เป็นที่น่าพอใจ และมีการนำไปใช้อย่าง

แพร่หลายแล้วนั้น แต่เครื่องมือต่างๆ เหล่านี้เป็นเพียงการกำจัดน้ำมันดินโดยการดักจับและแยกออกไปเท่านั้น ไม่ได้ทำลายโครงสร้างภายในแต่อย่างใด มีราคาลงทุนที่สูง บางเครื่องมือต้องใช้ทรัพยากรน้ำที่สิ้นเปลือง และอาจก่อให้เกิดปัญหาแก่ของอุปกรณ์กำจัดเหล่านั้นตามมาอีกด้วย

4.2 การกำจัดน้ำมันดินด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้น้ำมันดินแตกตัวเป็นที่น่าสนใจตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 [9] นอกจากนี้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่สลายน้ำมันดินให้กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และทำให้แก๊สเชื้อเพลิงมีคุณภาพมากขึ้น [10] ตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำมันดินที่ดีควรมีลักษณะดังนี้ 1) มีประสิทธิผลในการกำจัดน้ำมันดิน 2) สามารถเปลี่ยนมีเทนได้ หากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเป็นแก๊สเชื้อเพลิง 3) สามารถปรับสัดส่วนของแก๊สที่เหมาะสมจากกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้ตามต้องการ 4) มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากการเกาะตัวและการเกิดการอุดตันจากเขม่าของถ่านได้ 5) สามารถสร้างขึ้นมาใหม่และนำมาใช้ใหม่ได้อีกหลังจากผ่านกระบวนการที่ใช้แล้ว 6) มีความแข็งแรง คงทน และราคาไม่แพง

Anis and Zainal [5] ได้แบ่งกลุ่มของตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้เป็น 6 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

(1) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฐานจากนิกเกิล (Ni-based catalyst) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฐานจากนิกเกิลจะสามารถสลายน้ำมันดินมวลหนักได้ที่ประสิทธิภาพการทำลายสูงกว่า 90% และมีการเกิดไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากเดิม หากมีการเพิ่มอุณหภูมิจะเกิดไฮโดรเจนมากยิ่งขึ้น และการเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเบา เช่น CH_4 และ C_2H_4 ได้ [11] ทางด้าน Caballero et al. [12] ได้ทำการทดสอบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่มีขายทั่วไปสามตัว ได้แก่ ICI 46-1, BASF G1-50, and Topsoc R-67 สำหรับใช้ในการลดน้ำมันดินด้วยปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ โดยพบว่า น้ำมันดินถูกแตกตัวมากที่สุดถึง 99.8% ที่อุณหภูมิ 840 °C และที่เวลาน้อยที่สุดที่แก๊สอยู่ในเตาปฏิกรณ์ (Gas residence time) ที่ 0.2–0.3 วินาที โดยทั่วไปแล้ว ส่วนประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฐานจากนิกเกิลจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักได้แก่ 1) ส่วนที่เป็นวัฏภาคของสารว่องไวในการทำปฏิกิริยา (Active catalytic phase) 2) ส่วนที่เป็นสารเสริม (Promoter) มีไว้สำหรับการเพิ่มความเสถียรหรือ

ความว่องไว และ 3) ส่วนที่เป็นตัวรองรับ (Support) ซึ่งในส่วนนี้มักจะเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง ด้านทานการเกิดเขม่าถ่าน (Coke) และโครงสร้างภายในจะมีรูพรุนมาก [13,14] ทั้งนี้ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพของตัวเร่ง ปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา โดยเติมออกไซด์ของโลหะแมกนีเซียม และแคลเซียม เพื่อใช้ในการผลิต แก๊สสังเคราะห์จากมีเทนในสภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ถูกเตรียมด้วยวิธีแบบเคลือบฝัง (Impregnation) วิเคราะห์ลักษณะต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังใช้งานด้วยเทคนิค XRD XPS TPR และ TPO จากการศึกษาพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับปรุงด้วย CaO กับ MgO จะเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการเร่งปฏิกิริยา CPO เนื่องจากเกิดการกระจายตัวสูงของอนุภาคนิกเกิล และยังพบอีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล ซึ่งปรับปรุงด้วยโลหะแมกนีเซียมที่ใช้งานแล้วมีเสถียรทางโครงสร้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงด้วยโลหะแคลเซียมและตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ [15] นอกจากนี้มีนักวิจัยที่ศึกษาการสลายตัวของน้ำมันดินในแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วย Mg พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ และเตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังตามลำดับ (Sequential impregnation) ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 °C จะช่วยเร่งปฏิกิริยาฟอर्मิงด้วยไอน้ำของมีเทนและปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันดินจากชีวมวลได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีเสถียรภาพสูงสำหรับการแตกตัวน้ำมันดิน จากการศึกษาสามารถป้องกันการเกาะติดของคาร์บอนในรูปของแกรไฟต์ได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เกิดการเสื่อมสภาพ [16]

ทั้งนี้ แม้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกตัวน้ำมันดินจะมีประสิทธิผลที่ค่อนข้างสูง แต่จะมีข้อด้อยอยู่บ้าง เช่น มีการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้เร็วจากสารประเภทซัลเฟอร์ มีปริมาณของการปนเปื้อนของน้ำมันดินที่สูงในบริเวณช่องทางป้อน ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของตัวเร่งเพื่อลดการเสื่อมสภาพในการใช้งานนั้น จึงมีความน่าสนใจยิ่ง

(2) ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ใช่จากโลหะนิกเกิล (Non-Nickel metal catalysts) ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ใช่จากโลหะนิกเกิล หรือตัวเร่งปฏิกิริยาจากโลหะทรานซิชัน (Transition metals) เช่น โรเดียม (Rh) รูทีเนียม (Ru)

แพลเลเดียม (Pd) แพลทินัม (Pt) เป็นต้น ได้ถูกพัฒนาในการใช้สำหรับการกำจัดน้ำมันดินจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวมวล สามารถทำให้น้ำมันดินนั้นแตกตัวได้ในกระบวนการปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันอย่างมีประสิทธิภาพและมีความเสถียรในการทำงานดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มอื่นๆ โดยโรเดียมจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการสลายน้ำมันดิน [17] สอดคล้องกับการศึกษาของ Rönkkönen et al. [18] ที่ศึกษาการทำความสะอาดแก๊สจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ใช้แนวพลาตินและโกลด์ เป็นตัวแทนน้ำมันดิน สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย Rh, Pd, Ir, Ru, Pt และ Ni บนตัวรองรับซิงโครเนีย ทดลองในเตาปฏิกรณ์ที่ทำจากท่อแก้วควอทซ์ที่อุณหภูมิ 600-900 °C พบว่าตัวเร่งมีประสิทธิภาพ ดังนี้ $Rh \approx Ni > Pd > Ir > Ru > Pt$ ทั้งนี้ Rh และ Ni เป็นตัวเร่งที่สามารถกำจัดน้ำมันได้สูงสุดทางด้าน Asadullah et al. [19] ได้ศึกษาการกำจัดน้ำมันดิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Rh/CeO₂/SiO₂ ภายใต้อุณหภูมิ 550-700 °C พบว่าสามารถกำจัดน้ำมันดินได้ ~100% โดยที่การเปลี่ยนแปลงของตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปของถ่าน (Char) และเขม่าถ่าน (Coke) น้อยมากและการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยเช่นกัน แต่ราคาของตัวเร่งชนิดนี้มีราคาที่สูงมาก นอกจากนี้ Miyazawa et al [20] ได้ศึกษาการกำจัดน้ำมันดิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Rh/CeO₂/SiO₂ ภายใต้อุณหภูมิ 550-700 °C พบว่าสามารถกำจัดน้ำมันดินได้ ~100% เช่นเดียวกัน โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันดินจะเสถียรกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni โดยเฉพาะในด้านของการเกิดเขม่าถ่าน

กล่าวโดยสรุป แม้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะสลายปริมาณน้ำมันดินได้ดี แต่ข้อด้อยที่สำคัญคือ ราคาของตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ค่อนข้างที่สูงมาก ทำให้ต้องใช้งบประมาณที่สูงตามไปด้วย

(3) ตัวเร่งปฏิกิริยามีฐานจากโลหะอัลคาไล (Alkali) นอกจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฐานจากนิกเกิล ได้มีการนำโลหะอัลคาไลมาประยุกต์ใช้ในการสลายน้ำมันดิน [21] จากงานวิจัยหลายๆ ชิ้นสะท้อนให้เห็นว่าโลหะกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพในการสลายน้ำมันดินและปรับปรุงคุณภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์มากขึ้น ตัวอย่าง กลุ่มคาร์บอนเตต กลุ่มออกไซด์ และกลุ่มไฮดรอกไซด์ของโลหะอัลคาไล สามารถทำให้น้ำมันดินนั้นแตกตัวระหว่างปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ Sutton et al. [10] ได้อธิบายว่า

โดยปกติการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้มักจะผสมเข้าไปในเชื้อเพลิงชีวมวลเลย ทำให้ไม่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่และนำมาใช้ใหม่ได้อีก ส่งผลให้สิ้นเปลืองงบประมาณและเพิ่มการเกิดเขม่าถ่าน อาจทำให้ก่อปัญหาตามมาจากการกำจัดของเสียจากรกระบวนการผลิตแก๊สอีกด้วย

(4) ตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมดาทั่วไป (Basic catalysts) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นอกเหนือจากสามกลุ่มข้างบน หรือมาจากแร่ในธรรมชาติ (โดโลไมต์ และโอลีวิน) สำหรับโดโลไมต์นั้น ได้จากสายแร่กลุ่มแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งมีสูตรเคมีทั่วไปเป็น Ca(CO₃)₂ Mg(CO₃)₂ ปกติโดโลไมต์จะใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตแมกนีเซียม ทั้งนี้จากหลายงานวิจัย พบว่า ทั้งโดโลไมต์และโอลีวินมีประสิทธิภาพสูงในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการเปลี่ยนรูป หรือสลายตัวของน้ำมันดินจากกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชีวมวลได้ไม่แตกต่างจากกลุ่มตัวเร่งอื่นๆ มากนัก การศึกษาการใช้โดโลไมต์สำหรับการลดน้ำมันดินโดยการเผาแคลไซน์โดโลไมต์จะช่วยให้การแตกตัวของน้ำมันดินดีกว่าโดโลไมต์ที่ไม่ผ่านการเผาแคลไซน์ และให้ผลเช่นเดียวกันกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโอลีวินที่ผ่านการเผาแคลไซน์ [22] อย่างไรก็ตาม ตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มธรรมดาทั่วไปจะสามารถสลายน้ำมันดินได้และราคาถูกแล้ว แต่หากเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มอื่นๆ มักจะมีประสิทธิภาพด้อยกว่า

(5) ตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มกรด (Acid catalysts) อาทิเช่น ซีโอไลต์ (Zeolite) ซิลิกา-อลูมินา (Silica-alumina) เป็นต้น สำหรับซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอมและออกซิเจนสี่อะตอม (SiO₄ หรือ AlO₄) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิคอนอยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น และเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ โดยมีคุณสมบัติดังนี้ 1) มีพื้นที่ผิวในการเร่งปฏิกิริยาที่สูง 2) มีขนาดรูพรุนที่เล็กมากๆ 3) มีความจุในการดูดซับสูง 4) มีความสามารถในการแยกสารหรือผลิตภัณฑ์ได้ 5) มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง เป็นต้น การศึกษาของ Chin et al. [24] ที่ศึกษาการลดน้ำมันดินจากแก๊สชีวมวลที่ใช้กะลาปาล์มเป็นเชื้อเพลิง การทดลอง

ครั้งนี้ใช้พลังงานความร้อนและ HZSM-5 zeolite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ชุดทดลองเป็นแบบ Fixed bed reactor จากการทดสอบ พบว่า ขนาดของกะลาปาล์มมีผลต่อการเกิดน้ำมันดิน และยังพบอีกว่า ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการลดลงของฟินอล (สารประกอบไฮโดรคาร์บอน) โดยที่ฟินอลจะมีปริมาณต่ำสุดเมื่อใช้ Zeolite HZSM-5 ที่ 5 wt% ทางด้าน Anis et al. [25] ได้ศึกษาการลดน้ำมันดินโดยใช้ความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกตัวน้ำมันดิน ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ตัวแทนน้ำมันดินแทนน้ำมันดินจริง คือ โทลูอินและแนฟทาลิน ใช้ Dolomite และ Y-Zeolite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ได้ใช้คลื่นของคลื่นวิทยุความถี่สูงจากไมโครเวฟด้วย จากการทดลองพบว่า โทลูอินและแนฟทาลินจะถูกสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 850 °C ถึง 1200 °C และ 450 °C ถึง 900 °C และใช้ Residence time ที่ 0–0.7 วินาที และในการทดลองนี้ยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Y-Zeolite มีประสิทธิภาพดีกว่า Dolomite ทั้งนี้ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการแตกตัวน้ำมันดินที่ได้จากแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 ชนิด ดังนี้ Y-zeolite, Silica, Alumina, Lime, และ NiMo การทดสอบพบว่า Y-zeolite และ NiMo มีประสิทธิภาพสูงในการสลายน้ำมันดิน [26]

กล่าวโดยสรุป การใช้ซีโอไลต์ในการสลายน้ำมันดินนั้นค่อนข้างที่จะมีประสิทธิภาพที่ดี กอปรกับราคาที่ไม่สูงมากนัก และง่ายต่อการทำให้กลับมาใช้ใหม่ จึงมีความน่าสนใจ ทั้งนี้ HZSM-5 และ Y-Zeolite มีประสิทธิภาพมากที่สุด อย่างไรก็ตามหากมีเขม่าถ่านเกิดขึ้นจะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้เสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น

(6) ตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มถ่านกัมมันต์ (Activated carbon catalysts) ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ชนิดหนึ่งแต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษโดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation) ทำให้พื้นที่ผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้นจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูง เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนที่ผิวมากมีความจุในการดูดซับสูง มีความว่องไวในการดูดซับสูง มีความสามารถในการแตกตัวสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันดินได้ [9] นอกจากนี้ราคาต่ำอีกด้วย อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มถ่านกัมมันต์นี้อยู่ในรูปของถ่าน ซึ่งทำให้เขม่าไปอุด

ตามรูพรุนเล็กๆ ทำให้พื้นที่ผิวในการสลายตัวและดูดซับลดลงตามไปด้วย

4.3 การกำจัดน้ำมันดินด้วยความร้อน

การกำจัดน้ำมันดินด้วยความร้อน ประกอบด้วย 2 วิธีดังนี้

(1) การแตกตัวด้วยความร้อน ในวิธีการทำให้น้ำมันดินแตกตัว หรือสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูง ทำให้โมเลกุลของน้ำมันดินแตกตัวออกเป็นแก๊สโมเลกุลขนาดเล็กและเบา การทำให้แตกตัวจะสามารถเกิดได้ดีขึ้นหากเพิ่มเวลาของปฏิกิริยา หรือให้สัมผัสกับพื้นผิวร้อนโดยตรง หรือทำให้เกิดการออกซิเดชันบางส่วนโดยการเติมอากาศหรือออกซิเจนเข้าไปผสม ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันดินจะสูงขึ้นหากทำที่อุณหภูมิสูงถึง 1,200 °C ขึ้นไป ทำให้ต้องใช้พลังงานความร้อนที่สูง จำเป็นต้องเพิ่มงบประมาณที่สูงตาม และยังส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ได้มีค่าลดลงอีกด้วย สอดคล้องกับการศึกษาของ Zhang et al. [27] ที่ได้ทำการทดสอบการสลายตัวของน้ำมันดินและถ่านถ่านในช่วงไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชัน โดยพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้การสลายตัวของน้ำมันดินมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ยังพบอีกว่า โทลูอินจะมีการสลายตัวยากที่สุด ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,200 °C นอกจากนี้ถ่านถ่านจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 900 °C นอกจากนี้ Bridgwater [28] กล่าวว่า การกำจัดน้ำมันดินโดยใช้ความร้อนอย่างเดียวนั้นยังไม่ได้มีประสิทธิภาพที่สมบูรณ์มากนัก El-Rub [29] ที่ได้ทำการทดสอบการกำจัดน้ำมันดินจากชีวมวล โดยใช้ตัวแทนน้ำมันดินในการทดสอบคือ ฟีนอล โดยพบว่า ฟีนอล ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนนั้น จะถูกสลายเมื่อการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิช่วง 700-900 °C โดยที่อุณหภูมิ 700 °C พบการสลายตัวเพียง 6.3 wt% , อุณหภูมิ 800 °C พบการสลายตัวถึง 97 wt% และ 98% ที่อุณหภูมิ 900 °C และเช่นเดียวกันกับ Phuphuakrat et al. [30] ได้ทำการศึกษาการกำจัดน้ำมันดินจากกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล พบว่า สามารถลดน้ำมันดินถึง 78% ที่อุณหภูมิ 800 °C

(2) การแตกตัวด้วยพลาสมา โดยส่วนใหญ่แล้ววิธีการนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการประเมินมลภาวะทางอากาศ และจากงานวิจัยหลายชิ้นได้พบว่า มีความสามารถในการกำจัด CH₄ SO₂ และ NO_x จากแก๊สเสียได้ และวิธีการนี้ยังสามารถเข้าทำปฏิกิริยาในการแตก

ตัวน้ำมันดินจากแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวลได้ แต่วิธีการนี้ค่อนข้างที่ใช้พลังงานในระบบและเงินงบประมาณที่สูงมาก [31]

5. สรุป

น้ำมันดินที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจำเป็นต้องได้รับการกำจัดทิ้ง เพื่อหลีกเลี่ยงอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ ท่อ ทั้งจากการไปอุดตันและทำให้เกิดการรั่วตามอุปกรณ์ต่างๆ และจำทำให้การผลิตแก๊สมีประสิทธิภาพลดลงตามไปด้วย การกำจัดน้ำมันดินจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น จากการทบทวนเอกสารทั้งหลาย พบว่าวิธีการโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและวิธีการโดยใช้ความร้อนเป็นวิธีที่น่าสนใจและมีประสิทธิภาพมากในการกำจัดน้ำมันดิน โดยการกำจัดน้ำมันดินโดยใช้ความร้อนอย่างเดียวนั้นยังไม่ได้ประสิทธิภาพที่สมบูรณ์มากนัก อาจเนื่องมาจากน้ำมันดินที่ได้จากชีววมวลจะสลายยากกว่าที่ได้จากถ่านหิน และต้องใช้ในการสลายน้ำมันดินที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้ใช้พลังงานในการให้ความร้อนที่สูงตามไปด้วย ทำให้งบประมาณเพิ่มขึ้นอีกด้วย สำหรับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายน้ำมันดินนั้น แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพมากก็ตาม แต่ยังพบปัญหาเรื่องการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา จากการเกาะติดของคาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ไม่สามารถลดน้ำมันดินได้อย่างสมบูรณ์ แต่ราคาไม่สูงมากนัก ดังนั้นการใช้วิธีการกำจัดน้ำมันดินทั้งการใช้ความร้อนและการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าด้วยกัน โดยที่มีการปรับปรุงคุณภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพด้วยแล้วนั้น วิธีการดังกล่าวนี้จะส่งผลให้การสลายน้ำมันดินยังมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพมากขึ้น และจะทำให้ได้คุณภาพของแก๊สสังเคราะห์ที่ต้องการดีขึ้นอีกด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bracmort, K. (2015). Biomass: Comparison of Definitions in Legislation, Congressional Research Service, URL: https://www.fas.org/sgp/crs/misc/R4052_2.pdf, access on 10/12/2015.
- [2] Hasler, P. and Nussbaumer, T. (1999). Gas cleaning for IC engine applications from fixed

bed biomass gasification. Biomass Bioenergy, vol. 16 (16), June 1999, pp. 385–395.

[3] Fakeeha, A., Khan, W., Al-Fatesh, A., and Abasaed, A. (2013). Stabilities of zeolite-supported Ni catalysts for dry reforming of methane. Chinese Journal of Catalysis. April 2013, pp. 764–768.

[4] Milne, T.A., Evans, R.J., Abatzoglou, N. (1998). Biomass gasifier “tars”: their nature, formation, and conversion, November 1998, NREL/TP-570-25357.

[5] Anis, S. and Zainal, Z.A. (2011). Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. February 2011, pp. 2355–2377.

[6] Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*. Elsevier, UK.

[7] Knoef, H.A.M. (2005). *Handbook Biomass Gasification*. BTG Publisher, Enschede. The Netherlands, pp. 239-241.

[8] Bergman, P.C.A., Paasen, S.V.B. and Boerrigte, H. (2002). The novel “OLGA” technology for complete tar removal from biomass producer gas, Paper presented in *Pyrolysis and gasification of biomass and waste, Expert Meeting 2002*, Strasbourg, France.

[9] Han, J., and Kim, H. (2008). The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: an overview. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol.12 (2), pp. 397-416.

[10] Sutton, D., Kelleher, B. and Ross, JRH. (2001). Review of literature on catalysts for biomass gasification. *Fuel Process Technol.*, vol 73 (3), November 2001, pp. 155–173.

[11] Zhang, R., Brown, R. C., Suby, A. and Cummer, K. 2004. Catalytic destruction of tar in biomass derived producer gas. *Energy Conversion and Management*. vol 45 (7–8), May 2004, pp. 995–1014

- [12] Caballero, M.A, Corella, J., Aznar, M.P. and Gil J. (2000). Biomass gasification with air in fluidized bed, Hot gas cleanup with selected commercial and full-size nickel based catalysts. *Ind Eng Chem Res*, vol 39 (5), April 2000, pp. 1143–1154
- [13] สุกฤติธา รัตนวิไล (2555). ตัวเร่งปฏิกิริยาและการใช้งานในอุตสาหกรรม. สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [14] Lv, P., Yuan, Z., Wu, C., Ma, L., Chen, Y. and Tsubaki, N. (2007). Bio-syngas production from biomass catalytic gasification. *Energy Convers Manage*, vol. 48 (4), April 2007, pp 1132–1139.
- [15] Requies, J., Cabrero, M.A., Barrio, V.L., Cambra, J.F., Guemez, M.B, Arias, P.L., Parola V.L., Pen, M.A. and Fierro, J.L.G. (2006). Nickel/alumina catalysts modified by basic oxides for the production of synthesis gas by methane partial oxidation. *Catalysis Today*, vol 116 (3), 5 August 2006, pp. 304–312.
- [16] สมฤทัย ขุนโสภา, 2550. การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่มีเสถียรภาพสำหรับการแตกตัวของน้ำมันทาร์ในแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] Ammendola, P., Chironea, R., Lisi, L., Pirioua, B. and Russo, G. (2010). Investigation of the catalytic activity of Rh–LaCoO₃ catalyst in the conversion of tar from biomass devolatilization products. *Applied Catalysis A: General*, vol. 385 (1–2), September 2010, pp. 123–129.
- [18] Rönkkönen, H., Simell, P., Reinikainen, M., Krause, O. and Niemelä, M.V. (2010). Catalytic clean-up of gasification gas with precious metal catalysts – A novel catalytic reformer development *Fuel*, vol 89 (11), November 2010, pp. 3272–3277.
- [19] Asadullah, M., Miyazawa, T., Ito, S.I., Kunimori, K., Koyama, S., and Tomishige, K. (2004). A comparison of Rh/CeO₂/SiO₂ catalysts with steam reforming catalysts, dolomite and inert materials as bed materials in low throughput fluidized bed gasification systems. *Biomass Bioenergy*, vol. 26 (3), March 2004, pp. 269–279.
- [20] Miyazawa T, Kimura T, Nishikawa J, Kunimori K and Tomishige K. (2005). Catalytic properties of Rh/CeO₂/SiO₂ for synthesis gas production from biomass by catalytic partial oxidation of tar. *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 6 (6), September 2005, pp. 604–614.
- [21] นคร ทิพยาวงค์. 2553. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล: กรุงเทพฯ สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
- [22] Hu, G., Xu, S., Li, S., Xiao, C. and Liu, S. (2006) Steam gasification of apricot stones with olivine and dolomite as downstream catalysts. *Fuel Process Technol*, vol. 87 (5), May 2006, pp. 375–382.
- [23] Chin, B.L.F., Gorin, A., Chua, H.B., and Twaiq, F. (2015). Experimental investigation on tar produced from palm shells derived syngas using zeolite HZSM-5 catalyst. *Journal of the Energy Institute*, May 2015, pp.1-12.
- [24] Anis, S., Zainal, Z.A. and Bakar, M.Z.A. (2013). Thermocatalytic treatment of biomass tar model compounds via radio frequency *Bioresource Technology*, vol.136, May 2013, pp. 117–125.
- [25] Dou, B., Gao, J., Sha, X. and Baek S.W. (2003). Catalytic cracking of tar component from high-temperature fuel gas. *Applied Thermal Engineering*, vol. 23 (17), December 2003, pp. 2229–2239.
- [26] วีรชัย อัจหาญ, นิวัฒน์ คงกะพี้, กฤษกร รับสมบัติ, ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, ปกัศ ชนะโรศ, ณัฐพงษ์ ประภากร, สาวิตรี คำหอม, สุภัทร หนูแย้ม, พจนาลัย ชาวห้วยหมาก, ชัยชนะ เลิศศรีสกุล, ศรัลย์ ปานศรีพงษ์, ชิงชัย วิริยะบัญชา, สมิต บุญเสริมสุข และจิราวัฒน์ วงษ์มาศ จันท์. (2551). โรงไฟฟ้าต้นแบบชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชนแบบครบวงจร. รายงานการวิจัยภารกิจโครงการ

และประสานงานวิจัย, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

[27] Zhang, Y., Kajitani, S., Ashizawa, M. and Oki, Y. (2010). Tar destruction and coke formation during rapid pyrolysis and gasification of biomass in a drop-tube furnace. Fuel, vol. 89 (12), February 2010, pp. 302–309.

[28] Bridgwater, A.V. (1995). The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. Fuel, vol. 74 (5), May 1995, pp. 631–653.

[29] El-Rub, Z.A., (2008). Biomass Char as An In situ Catalyst for Tar Removal in Gasification Systems. Twente University, Enschede, The Netherlands.

[30] Phuphuakrat, T., Namioka, T. and Yoshikawa, K. (2009). Tar removal from biomass pyrolysis gas in two-step function of decomposition and adsorption. Applied Energy, vol. 87 (7), July 2010, pp. 2203–2211.

[31] Chang JS.b. (2003) Next generation integrated electrostatic gas cleaning systems. Journal of Electrostat, vol. 57 (3-4), March 2003, pp. 273–291.

[32] ทิพย์สุภินทร์ หินชูย. 2550. การศึกษาการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน : กรณีศึกษาจากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.