

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

ประเทศไทยกำลังเผชิญกับปัญหาราคาปิโตรเลียมสูง เนื่องจากปริมาณสำรองปิโตรเลียมของโลกลดลงและภาวะโลกร้อน เนื่องจากการปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงปิโตรเลียม ดังนั้นรัฐบาลไทยได้ประกาศนโยบายเรื่องแผนการพัฒนาลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ร้อยละ 25 ในอีก 10 ปี ข้างหน้า (2555-2564) เพื่อสนับสนุนการพัฒนาลังงานทดแทนหมุนเวียนที่ยั่งยืน (Renewable energy) สำหรับทดแทนเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม การผลิตแก๊สชีวภาพจากของเสียอินทรีย์และ/หรือชีวมวล เป็นเป้าหมายหนึ่งที่สำคัญในแผนการพัฒนาดังกล่าว แก๊สชีวภาพซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือมีเทนประมาณร้อยละ 60-70 และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 30-40 เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้กลุ่มจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจนไปเป็นสารรีดิวซ์และออกซิไดซ์ที่เสถียร ซึ่งได้แกแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ ในขณะเดียวกันกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้สูงกว่าร้อยละ 90-95 (Chan *et al.*, 2010; Zinatizadeh *et al.*, 2007) ดังนั้นการประยุกต์ใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเพื่อการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งเป็นของเสียอินทรีย์จึงถือเป็นการผลิตพลังงานทดแทนควบคู่ไปกับการจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรมากกว่า 200 โรงงานได้ติดตั้งระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียของโรงงาน จากจำนวนกลุ่มโรงงานทั้งหมดที่ได้ติดตั้งระบบผลิตแก๊สชีวภาพดังกล่าวนี้มีกลุ่มโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มอยู่ประมาณ 35 โรงงานซึ่งมีจำนวนโรงงานสูงเป็นลำดับที่ 3 รองจากกลุ่มโรงงานผลิตแบริ่งและแม่พิมพ์ (72 โรงงาน) และกลุ่มโรงงานผลิตอาหารและเครื่องดื่ม (42 โรงงาน) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักที่สำคัญในภาคใต้ของประเทศไทย แต่กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐานหรือแบบเปียกเป็นกระบวนการที่ใช้ไอน้ำและน้ำช่วยในการสกัดดังนั้นจึงเกิดน้ำเสียจากขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการสกัดเป็นปริมาณมาก การผลิตน้ำมันปาล์มทุก ๆ 1 ตัน จะเกิดการผลิ น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (Palm Oil Mill Effluents: POME) 2.5 ตันในประเทศไทยมีการผลิตน้ำมันปาล์ม 1.35 ล้านตันในปี 2010 และเกิดการผลิของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม 6 ล้านลูกบาศก์เมตร (Prasertsan *et al.*, 2009; O-Thong *et al.*, 2008) น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีลักษณะเป็นอิมัลชันสีน้ำตาลเข้มและมีปริมาณสารอินทรีย์สูง โดยความเข้มข้นประมาณ 44-103 g-COD/L และถูกจัดเป็นของเสียที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งมีปริมาตรและความเข้มข้นสารอินทรีย์สูงได้ถูกจัดให้เป็นวัตถุดิบ (Feedstock) ที่มีศักยภาพสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ถึงแม้ว่าโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มส่วนใหญ่ได้ติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเพื่อบำบัดสารอินทรีย์ควบคู่กับการผลิตแก๊สชีวภาพเนื่องจากข้อกำหนดทางกฎหมาย แต่ยังมีประสพปัญหาหลักในการดำเนินการได้แก่การมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และผลิตแก๊สชีวภาพได้ต่ำ (Chin *et al.*, 2013; Harsono *et al.*, 2013) เนื่องจากการใช้น้ำ

ทั้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเสียเพียงอย่างเดียวซึ่งเป็นระบบการย่อยสลายซับสเตรตเดี่ยว (Single substrate digestion) ขาดสารอาหารหลัก (Macronutrient) เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียคือ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งส่งผลให้มืองค์ประกอบไม่เหมาะต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ นอกจากนี้แล้ว น้ำทิ้งโรงงานน้ำมันปาล์มมีค่าความเป็นกรดสูงซึ่งส่งผลให้ระบบถึงปฏิกิริยาไม่เสถียร (O-Thong *et al.*, 2008) โดย Chin *et al.* (2013) ประเมินผลผลิตได้มีเทนจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ประมาณ 15.5 L-CH₄/L-POME อย่างไรก็ตาม Angelidaki and Ellegaard (2003) ได้ประเมิน จุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพที่ผลผลิตได้มีเทนสูงกว่า 20 L-CH₄/L-substrate ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำทิ้ง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเพื่อให้ได้ผลผลิตได้มีเทนถึงจุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ดังกล่าว

แนวทางหลักในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมัน ปาล์มโดยได้แก่การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการย่อยสลายร่วมแบบไร้อากาศ (Anaerobic co-digestion) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีสารอินทรีย์สองชนิดหรือมากกว่า (Co-substrates) เกิดการย่อยสลายในถัง ปฏิกิริยาในเวลาเดียวกัน เทคโนโลยีการผลิตแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายร่วมของสารอินทรีย์จะ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงกว่าการย่อยสลายแบบไร้อากาศของสารอินทรีย์ เพียงชนิดเดียว เนื่องจากการย่อยสลายร่วมจะเกิดปฏิสัมพันธ์เชิงบวก (Positive synergisms) ต่อ จุลินทรีย์ในระบบการย่อยสลายและช่วยเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ ปรับสัดส่วนสารอาหารหลักของ เช่นอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) และอัตราส่วน ระหว่างคาร์บอนต่อฟอสฟอรัส (C:P) ให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ลดการเกิดสภาวะ กรดเฉียบพลันภายในถังปฏิกิริยาเนื่องจากมี Buffering capacity เพิ่มขึ้น และช่วยเจือจางความ เข้มข้นของสารพิษ (Toxic compounds) (Angelidaki and Ellegaard (2003); Costa *et al.*, 2012; Mata-Alvarez *et al.*, 2000) การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพโดยเทคโนโลยีการ ย่อยสลายร่วมเป็นเป้าหมายหนึ่งในแผนการพัฒนางานทดแทนและพลังงานทางเลือกร้อยละ 25 ในอีก 10 ปี ข้างหน้า (2555-2564)

พรรณไม้ใต้น้ำ (Submerged macrophytes) ที่สำคัญได้แก่สาหร่ายขนาดใหญ่ (Macro algae) และพืชใต้น้ำ (Submerged plants) กำลังได้รับความสนใจในฐานะชีวมวลน้ำเพื่อการผลิตพลังงานรุ่นที่ 3 ที่ให้พลังงานมากกว่าชีวมวลบกถึง 6-12 เท่า เนื่องจากส่วนประกอบภายในโครงสร้างของพรรณไม้ใต้น้ำที่ประกอบด้วยเซลลูโลสในปริมาณที่ไม่สูงเกินและมืองค์ประกอบของลิกนินต่ำหรือไม่มีเลย ทำให้ จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่า (Vergara-Fernandez *et al.*; 2008, Koyama *et al.*, 2014) อีกทั้งอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่อยู่ในระดับต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น ๆ โดย สาหร่ายน้ำจืดจะมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 10.2 (Sialve *et al.*, 2009) โดยทั่วไปแล้วในระบบการผลิตแก๊สชีวภาพ อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) ควรมีค่า ระหว่าง 15-30 ถ้าหากมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนมากเกินไปจะทำให้เกิดการยับยั้ง การทำงานของแบคทีเรีย (Weiland, 2010) ดังนั้นการนำสาหร่ายน้ำจืดขนาดใหญ่บางชนิดที่ไม่ได้ เป็นพืชอาหารหลักมาเป็นสับสเตรตร่วมกับน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีสัดส่วนธาตุอาหาร C:N สูงกว่า 30 (Mamimin *et al.*, 2012) เพื่อปรับสัดส่วนธาตุอาหาร C:N ให้เหมาะสมสำหรับการผลิต แก๊สชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศจึงเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพ นอกจากนี้แล้ว

เนื่องจากสาหร่ายรวมถึงพืชใต้น้ำสามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ที่มีน้ำขัง ในแม่น้ำหรือในทะเลโดยใช้สารอาหารหลักไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และพลังงานจากดวงอาทิตย์ในการสังเคราะห์แสง (Cheewasedtham *et al.*, 2009; Koyama *et al.*, 2014) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการเพาะเลี้ยงพรรณไม้ใต้น้ำโดยการเชื่อมต่อกับระบบผลิตแก๊สชีวภาพ เนื่องจากน้ำทิ้งที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศนั้นอุดมด้วยสารประกอบไนโตรเจน ซึ่งเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพรรณไม้ใต้น้ำและใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของสารละลายไปคาร์บอนเนตจากระบบดูดซึมแก๊สเพื่อทำความสะอาดแก๊สชีวภาพ

ปัญหาที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายร่วมแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและสาหร่ายน้ำจืดขนาดใหญ่ เพื่อเป้าหมายการเพิ่มผลได้มีเทนให้ถึงจุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ปัญหาอัตราบรรทุกสารอินทรีย์เกิน (organic overloading) ทำให้มีอัตราการแตกตัวของซับสเตรตร่วมต่ำซึ่งส่งผลให้เกิดการผลิตมีเทนน้อย และเกิดความไม่เสถียรภายในถังปฏิกรณ์แนวทางที่มีศักยภาพและประหยัด สำหรับการแก้ปัญหาข้างต้นคือการประยุกต์ใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอนที่อุณหภูมิต่างกัน (Two-stage temperature phased anaerobic digestion: TPAD) ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการสร้างกรด (Acidogenesis) หรือขั้นตอนการหมัก (Fermentation) ที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (50-70 °C) สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนควบคู่กับการผลิตกรดอินทรีย์จากสารอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตและขั้นตอนการผลิตมีเทนจากกรดอินทรีย์ (Methanogenesis) ที่อุณหภูมิเมโซฟิลิก (25-40 °C) กระบวนการสองขั้นตอนดังกล่าว สามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนร้อยละ 10-30 ร้อยละ 70-90 โดยปริมาตร ตามลำดับ มีชื่อทางการค้าว่าไฮเทน (Hythane) การผสมไฮโดรเจนปนกับมีเทนช่วยทำให้การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีขึ้น และลดอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ส่งผลให้การเผาไหม้มีเทนมีความเสถียรมากขึ้น (Cooney *et al.*, 2007; Ge *et al.*, 2011) โดยทั่วไปกระบวนการหมักเพื่อผลิตไฮโดรเจนที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกมีข้อดีที่เหนือกว่ากระบวนการหมักที่อุณหภูมิเมโซฟิลิก เช่น เพิ่มความสามารถในการละลายของสารประกอบอินทรีย์ทำให้จุลินทรีย์สามารถแทรกเข้าไปเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น เป็นการเพิ่มอัตราการผลิตไฮโดรเจนและกรดอินทรีย์ ซึ่งช่วยลดระยะเวลาเก็บกักเก็บน้ำในถังปฏิกรณ์ให้สั้นลง (Kongjan *et al.*, 2011) นอกจากนี้แล้วปฏิบัติการหมักที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกสามารถป้อนน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันซึ่งมีอุณหภูมิสูงเข้าสู่ปฏิกรณ์โดยไม่ต้องพักรอให้มีอุณหภูมิลดลง ช่วยให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถป้องกันการเกิดแก๊สชีวภาพตามธรรมชาติในบ่อพักน้ำได้ ซึ่งสามารถช่วยลดปัญหาการปล่อยแก๊สเรือนกระจกสู่บรรยากาศได้อีกทางหนึ่ง แก๊สมีเทนเป็นแก๊สเรือนกระจกที่มีความรุนแรงกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 23 เท่า (Tilche and Galatola, 2008)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้ น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (บริษัท ปาล์มพัฒนาชายแดนใต้ จำกัด อ.หนองจิก จ.ปัตตานี) มาย่อยสลายร่วมแบบไร้อากาศกับพรรณไม้ใต้น้ำขนาดใหญ่เพื่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจนในขั้นตอนการผลิตกรดหรือการหมักที่สภาวะอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก และผลิตแก๊สมีเทนจากสารละลายกรดที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการหมัก ในขั้นตอนการผลิตมีเทนที่สภาวะอุณหภูมิเมโซฟิลิก โดยใช้พืชใต้น้ำจืดขนาดใหญ่ชนิดสาหร่ายพวงพะยอม (*Ceratophyllum demersum*) ซึ่งเป็นวัชพืชน้ำที่เจริญเติบโตเร็ว (Koyama *et al.*, 2014; Chambers *et al.*, 2014) พรรณไม้ใต้น้ำ

ดังกล่าวสามารถเพาะเลี้ยงได้ง่ายโดยใช้น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชีวภาพและสารละลายไบคาร์บอเนตจากกระบวนการทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซึมแก๊ส

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและมีเทน โดยกระบวนการย่อยสลายร่วมแบบไร้อากาศสองขั้นตอนของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME) และสาหร่ายพวงชะโดทั้งในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์และแบบป้อนต่อเนื่อง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยเน้นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากซับสเตรตร่วมของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและสาหร่ายพวงชะโด ที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกซ์ (55°C) และการผลิตแก๊สมีเทนในสภาวะอุณหภูมิห้อง ($25-30^{\circ}\text{C}$) จากน้ำหมักการผลิตแก๊สไฮโดรเจนที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกซ์ขนาดระดับห้องปฏิบัติการ มีศึกษาดังต่อไปนี้

1.3.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของ POME และสาหร่ายพวงชะโด

1.3.2 ศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและมีเทนในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์จากซับสเตรตที่อัตราส่วนผสมของ POME และสาหร่ายพวงชะโดต่างกัน

1.3.3 ศึกษาการเริ่มต้นและหาสภาวะที่เหมาะสมของอัตราบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) และระยะเวลาพักเก็บน้ำ (HRT) ของถังปฏิกรณ์ผลิตไฮโดรเจนแบบถังกวนต่อเนื่อง (CSTR) ซึ่งมีปริมาตรใช้งานประมาณ 7 ลิตร โดยการป้อนซับสเตรตร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพวงชะโดเข้าไปในถังปฏิกรณ์ที่มีการควบคุมอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 55°C

1.3.4 ศึกษาการเริ่มต้นหาสภาวะที่เหมาะสมของอัตราบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) และระยะเวลาพักเก็บน้ำ (HRT) ของถังปฏิกรณ์ผลิตมีเทน Plug flow reactor (PFR) ซึ่งมีปริมาตรใช้งานประมาณ 29 ลิตร โดยใช้น้ำทิ้งขาออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตไฮโดรเจนเป็นซับสเตรตป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ PFR ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ($28-35^{\circ}\text{C}$)