ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระภายใต้การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายด่าง

The Potential of Methane Production of the Dwarf Napier under Alkaline Pretreatment

นิลวรรณ ไชยทนุ[1*] ร่มไทร มุกเมืองทอง[2] วรุฒ ชมเจริญ[2] และอนุพันธ์ วรรณภิระ[2]
[1] สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว ต.ช้างเผือก อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50300
*ผู้รับผิดชอบบทความ : ninlawan_ch@hotmail.co.th

บทคัดย่อ
งานวิจัยนี้มุ้งเน้นศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระ ทั้งหญ้าสดและหญ้าที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายด่าง เพื่อให้เห็นถึงศักยภาพในการใช้เป็นพืชพลังงานทางเลือกในอนาคต โดยการปรับสภาพเบื้องต้นใช้สารละลายด่าง 2 ชนิด คือ สารละลายโซดาไฟและน้ำปูนขาวความเข้มข้น 1 %w/v ด้วยเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ทุกการทดลองกระทำที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ พบว่า หญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคมีมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ที่ 0.181 และ 0.273 $m^3/kgVS_{add}$ ตามลำดับ เมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยการแช่สารละลายโซดาไฟเข้มข้น 1%w/v นาน 1 ชั่วโมง คิดเป็นประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นถึง 30% สำหรับการปรับสภาพด้วยน้ำปูนขาวให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองหญ้าสด
คำสำคัญ ก๊าซมีเทน การผลิตก๊าซชีวภาพ ศักยภาพการย่อยสลาย หญ้าเนเปียร์แคระ

Abstract
This research focused on the potential of methane production of the dwarf napier; both fresh grass and pretreated grass with an alkaline solution in order to demonstrate the potential of using as an alternative energy plants in the future. Sodium hydroxide and calcium hydroxide of 1%w/v were used as an alkaline pretreatment to soak grass at 1 and 2 hr. All experiments were done at room temperature and atmospheric pressure. The result found that fresh grass had the potential to produce methane at 0.181 and 0.273 m3/kgVSadd of a 1%w/v sodium hydroxide pretreatment at 1 hr and 2 hr, respectively. A performance increased up to 30% of a 1% w/v sodium hydroxide pretreatment. As for the calcium hydroxide pretreatment, the yield gas was similar with fresh grass experiment.
Keywords: Methane Gas, Biogas Production, Biochemical Methane Potential, Dwarf Napier

1. บทนำ

ปัจจุบันโลกเกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงาน การนำชีวมวลภายในท้องถิ่นมาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ถือเป็นการดึงศักยภาพที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งประเทศไทยจัดเป็นประเทศเกษตรกรรม มีชีวมวลอยู่มากมายหลายชนิดที่สามารถนำมาทำเป็นพลังงานทดแทนได้ โดยพลังงานทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับการผลิตพลังงานเพื่อป้อนเข้าสู่โครงข่ายผลิตพลังงาน (smart grid energy) ในประเทศไทย คือ พลังงานในรูปของก๊าซชีวภาพ [1-2]

นอกจากการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียในฟาร์มเลี้ยงสัตว์แล้ว พืชตระกูลหญ้าถือว่ามีศักยภาพในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ เนื่องจากประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกหญ้าและพื้นที่ทุ่งหญ้าสาธารณะสำหรับพืชอาหารสัตว์ประมาณ 3.4 ล้านไร่ กระจายตามภูมิภาคของประเทศ [3] และมีปริมาณผลผลิตหญ้าอาหารสัตว์ที่เหลือเพิ่มมากขึ้นทุกปี ราว 7,353 ตัน [4] จากการสำรวจ พบพืชวงศ์หญ้าจำนวน 133 สกุล 501 ชนิด แต่ที่มีความสำคัญในด้านอาหารสัตว์อยู่ประมาณ 30 ชนิด หญ้าพื้นเมืองแม้ว่าจะปรับตัวได้ดี แต่มีข้อจำกัดในด้านศักยภาพคือการให้ผลผลิตที่ค่อนข้างต่ำ และระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นอาหารสัตว์ค่อนข้างสั้น เพราะมีการออกดอกและสะสมเยื่อใยเร็ว ทำให้คุณค่าทางอาหารลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับหญ้าที่นำมาจากต่างประเทศเพื่อปลูกเป็นอาหารสัตว์โดยตรง [3] ซึ่งปัจจุบันมีประมาณ 7 ชนิด ที่กรมปศุสัตว์แนะนำให้เกษตรกรปลูกคือ แพงโกล่า กินนีสีม่วง เนเปียร์ รูซี่ อะตราตัม พลิแคทูลั่ม และโร้ด โดยเฉพาะหญ้าเนเปียร์ที่ให้ผลผลิตต่อไร่สูงที่สุด การนำหญ้าที่มีปริมาณสารอาหารสูงเหล่านี้มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพนั้น มีข้อดีหลายประการคือหญ้าเป็นพืชที่

เจริญเติบโตง่าย ไม่ต้องการดูแลมากทำให้ต้นทุนในการเพาะปลูกนั้นต่ำ อีกทั้งยังให้ผลผลิตสูง สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้หลายครั้งต่อปี นอกจากนี้ ผลผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าบางชนิดเช่น หญ้าหมักจากทุ่งหญ้าสาธารณะยังให้ค่าพลังงานสุทธิเทียบเท่าปาล์มน้ำมัน [5] เมื่อประเมินศักยภาพก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตไฟฟ้าจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว ต้นและเหง้ามันสำปะหลัง และหญ้าเนเปียร์ เพื่อผลิตไฟฟ้าสำหรับชุมชนขนาด 1 MW มีต้นทุนวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ จากฟางข้าว ต้นและเหง้ามันสำปะหลัง และหญ้าเนเปียร์ เท่ากับ 4.43 3.87 และ 1.38 บาทต่อกิโลวัตต์ ใช้พื้นที่เพาะปลูกสำหรับการผลิตไฟฟ้า 21,417 71,993 และ 940 ไร่ ตามลำดับ [2]

แม้ว่าการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าหญ้าเนเปียร์มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ซึ่งมักพบในสายพันธุ์ลูกผสมที่ให้ผลผลิตต่อไร่สูงที่สุดเช่น เนเปียร์ปากช่อง1 แต่ในประเทศไทยยังพบการวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากเนเปียร์สายพันธุ์เดิมน้อยมาก ซึ่งนิยมปลูกกัน 3 สายพันธุ์ คือ หญ้าเนเปียร์ธรรมดา หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าเนเปียร์แคระ โดยเฉพาะหญ้าเนเปียร์แคระ (*P. purpureum cv. Mott*) จัดเป็นพืชพลังงานทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์หนึ่งที่กรมปศุสัตว์ส่งเสริมเป็นที่นิยมปลูกกันอย่างกว้างขวาง ให้ผลผลิตสูงราวๆ 3.0-4.0 ตันน้ำหนักแห้งต่อไร่ต่อปี ปลูกง่าย ขึ้นได้ในดินหลายชนิด เจริญเติบโตเร็ว และมีคุณค่ามีคุณค่าทางอาหารสัตว์อยู่ในเกณฑ์สูง อีกทั้งยังเป็นวัตถุอินทรีย์ที่อุดมไปด้วยสารประกอบคาร์บอน สามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ และเพื่อช่วยให้การผลิตก๊าซชีวภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากขึ้นนั้น ควรทำการปรับสภาพวัตถุดิบเบื้องต้นก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเสริมให้หญ้าซึ่งเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสเหมาะเป็นสารตั้งต้นง่ายต่อการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนกลายเป็นก๊าซชีวภาพได้ง่ายขึ้น [6] โดยวิธีการสภาพเบื้องต้นมีหลายวิธีได้แก่ การปรับสภาพด้วยสารเคมี (กรด-ด่าง) การปรับสภาพทางชีวภาพ การปรับสภาพทางความร้อน หรือการปรับสภาพร่วม เป็นต้น

จากที่กล่าวมาข้างต้น คณะวิจัยจึงมีความสนใจศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการนำหญ้าเนเปียร์แคระมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของหญ้าและใช้เป็นพืชพลังงานทางเลือกในอนาคต โดยในงานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นศึกษาผลที่เกิดขึ้นของการปรับสภาพวัตถุดิบเบื้องต้นด้วยสารละลายด่างที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ น้ำปูนขาว ($Ca(OH)_2$) และ สารละลายโซดาไฟ (NaOH) ที่เวลาต่างๆ เทียบกับหญ้าสด

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) ที่สภาวะบรรยากาศอุณหภูมิ 27 °C ความดัน 1 atm เพื่อศึกษาหาศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทน (biochemical methane potential; BMP) ของหญ้าเนเปียร์แคระที่สภาวะต่างๆ

2.1 วัตถุดิบและการเตรียม

หญ้าเนเปียร์แคระที่ใช้มีอายุราว 2 เดือน ภายหลังการเก็บเกี่ยวจากทุ่งหญ้าจะถูกนำมาบดลดขนาดประมาณ 2 mm และเตรียมหญ้าบดไว้ 15 g สำหรับใช้แต่ละการทดลอง ในการทดลองหญ้าสดจะถูกเก็บไว้ในตู้แช่ 4 °C ทันที ส่วนการทดลองที่ใช้หญ้าที่ผ่านการปรับสภาพ ภายหลังการบดจะนำมาแช่ในน้ำปูนขาวและสารละลายโซดาไฟ ที่ความเข้มข้น 1%w/v เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการล้างด้วยน้ำสะอาดก่อนเก็บไว้ในตู้แช่ และน้ำเชื้อจุลชีพใช้น้ำเสียมูลสุกรจากฟาร์มสุกรขุน โดยหญ้าและน้ำเชื้อจุลชีพที่ใช้มีคุณสมบัติดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของหญ้าเนเปียร์แคระและน้ำเชื้อจุลชีพที่เก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์

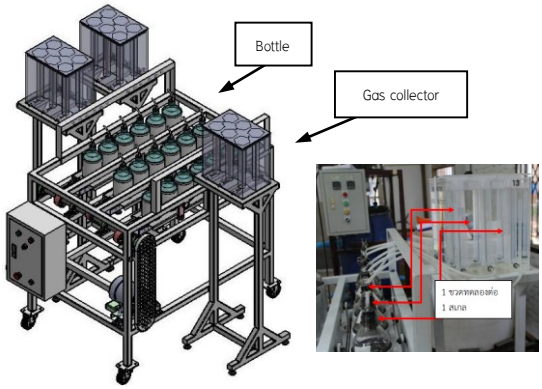
Parameters	Milled fresh grass (mg/kg)	Inoculum (mg/l)
Total solids (TS)	230,708	61,132
Volatile solids (VS)	215,044	40,905
C:N ratio	59.1:1	6.05:1

2.2 BMP test

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 1 ใช้ขวดทดลองขนาด 1000 ml สามารถทำได้พร้อมกัน 18 ขวด แท่นวางขวดเขย่าซ้าย-ขวาที่ความเร็ว 100 rpm การวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดใช้หลักการแทนที่น้ำ ก่อนเริ่มทดลองทำการไล่ก๊าซออกซิเจน (O_2) ด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2) บริสุทธิ์ที่อัตราการไหล 10 L/min นาน 30 s ในทุกๆการทดลองจะเติมน้ำเชื้อจุลชีพในปริมาณ 240 ml หญ้าที่เตรียมไว้ 15 g คิดเป็นสัดส่วนหญ้าต่อน้ำเชื้อ 1:3 (ในสัดส่วน VS) และเติมน้ำกลั่นเพิ่มจนได้ระดับที่ 800 ml ทำการทดลองละ 3 ซ้ำและหยุดการทดลองเมื่อปริมาณก๊าซสะสมที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่

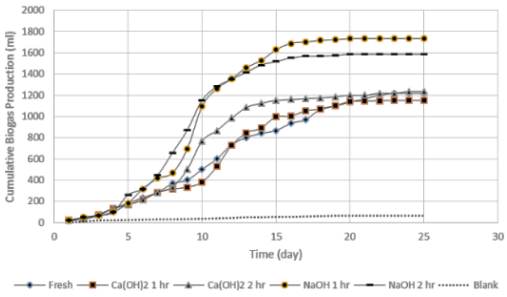
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการทดลองหาศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์แคระที่สภาวะต่างๆ สภาวะละ 3 ซ้ำ นำค่าที่บันทึกได้มาเฉลี่ยแสดงข้อมูลดังรูปที่ 2-3 และตารางที่ 2

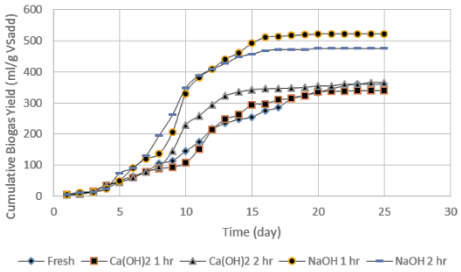


รูปที่ 1 ชุดทดสอบก๊าซชีวภาพ

พบว่า หญ้าที่ถูกปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการแช่สารละลายโซดาไฟเป็นเวลา 1 hr สามารถผลิตก๊าซได้มากที่สุดคิดเป็น 0.522 m^3Biogas/kgVS$_{add}$ และ 0.273 m^3CH_4/kgVS$_{add}$ รองลงมาคือ หญ้าที่ถูกปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการแช่สารละลายโซดาไฟ เป็นเวลา 2 hr คิดเป็น 0.475 m^3Biogas/kgVS$_{add}$ และ 0.245 m^3CH_4/kgVS$_{add}$ ซึ่งการทดลองทั้ง 2 สภาวะนี้ถือว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนหญ้าที่ถูกปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการแช่น้ำปูนขาวเป็นเวลาทั้ง 1 และ 2 hr มีค่าการผลิตก๊าซที่ใกล้เคียงกันกับการทดลองการผลิตก๊าซจากหญ้าสดคือ0.355m^3Biogas/kgVS$_{add}$ และ 0.180m^3CH_4/kgVS$_{add}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายด่างจะสามารถทำให้โครงสร้างลิกโนเซลลูโลสอ่อนแอลง ซึ่งทำให้ง่ายต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์กลุ่ม methanogen ให้เกิดเป็นก๊าซชีวภาพได้ง่ายและมากขึ้น [6,8] ส่วนสาเหตุที่น้ำปูนขาวเพิ่มความสามารถในการผลิตก๊าซได้น้อยกว่าเพราะอาจเกิดการก่อตัวระหว่าง Ca^+ กับลิกนินของพืชที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น ลิกนินจึงสลายพันธะได้ลดลงทำให้จุลินทรีย์กลุ่ม methanogen ทำงานยากขึ้น ปริมาณก๊าซที่เกิดจึงลดลงตาม [9] สำหรับสัดส่วนก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงการทุกการทดลองเฉลี่ยอยู่ที่ 51.18%CH_4



รูปที่ 2 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้ในแต่ละสภาวะ



รูปที่ 3 ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพสะสมของหญ้าเนเปียร์แคระที่สภาวะต่างๆ

และจากกราฟแสดงปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 25 วัน (รูปที่ 2) พบว่า หญ้าสดมีอัตราการผลิตก๊าซช้าที่สุดซึ่งดูได้จากเส้นกราฟที่ยังเพิ่มระดับขึ้นไปซึ่งหมายถึงยังเกิดก๊าซอยู่ แล้วจึงเริ่มคงที่ในวันที่ 22 ของการทดลอง ส่วนหญ้าที่ผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำปูนขาวปริมาณก๊าซสะสมเริ่มคงที่ในวันที่ 20 ทั้ง 2 สภาวะ และสำหรับหญ้าที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซดาไฟจะใช้เวลาในการย่อยสลายน้อยที่สุดซึ่งเห็นได้จากปริมาณก๊าซที่เริ่มคงที่ในวันที่ 16 ของการทดลอง โดยค่าเหล่านี้บ่งบอกถึงระยะเวลาในการหมักย่อยสารอินทรีย์หรือระยะเวลากักเก็บ (hydraulic retention time ; *HRT*) ซึ่งส่งผลต่อการนำไปใช้ออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดใช้งานจริงเพื่อให้มีขนาดที่เหมาะสมและคุ้มค่าต่อการลงทุน จากงานวิจัยที่ผ่านมาค่า methane yield ของหญ้าแต่ละสายพันธุ์ที่การผลิตก๊าซชีวภาพแบบเชิงเดี่ยวดังข้อมูลในตารางที่ 3 พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 0.110 – 0.242 m^3/kgVS$_{add}$ ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองนี้ถือว่าได้ค่าผลผลิตที่มากกว่าหญ้าสายพันธุ์อื่นๆ สำหรับหญ้าเนเปียร์แคระที่ถูกปรับสภาพก่อนด้วยการแช่สารละลายโซดาไฟทั้ง 2 สภาวะ

ตารางที่ 2 ปริมาณของ $\%CH_4$, Biogas yield และ Methane yield

Case	Average $\%CH_4$	Biogas yield ($m^3/kgVS_{add}$)	Methane yield ($m^3/kgVS_{add}$)
Fresh	50.3	0.360	0.181
$Ca(OH)_2$ 1 %(w/v),1 h	51.8	0.340	0.176
$Ca(OH)_2$ 1 %(w/v),2 h	49.8	0.366	0.182
NaOH 1 %(w/v),1 h	52.4	0.522	0.273
NaOH 1 %(w/v),2 h	51.6	0.475	0.245

ตารางที่ 3 ตัวอย่าง methane yield ของหญ้าแต่ละสายพันธุ์ที่การผลิตก๊าซชีวภาพแบบเชิงเดี่ยว

Ref	Grass type	Methane yield ($m^3/kgVS_{add}$)
[8]	เนเปียร์	0.158
[10]	เนเปียร์ปากช่อง1	0.242
[11]	เนเปียร์ยักษ์	0.110
	กินนีสีม่วง	0.170

4. สรุป

หญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ที่ 0.181 $m^3/kgVS_{add}$ เมื่อไม่ผ่านการปรับสภาพ และได้ 0.273 $m^3/kgVS_{add}$ เมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยการแช่สารละลายโซดาไฟเข้มข้น 1%w/v นาน 1 ชั่วโมง คิดเป็นประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นถึง 30% และมีค่าใกล้เคียงกันกับหญ้าสายพันธุ์อื่นๆ เช่น เนเปียร์ปากช่อง 1 ที่ถูกส่งเสริมให้ใช้เป็นพืชพลังงาน ดังนั้นจึงถือได้ว่า หญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระนี้มีศักยภาพที่จะสามารถใช้เป็นพืชพลังงานทางเลือกหนึ่งได้

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ต้องขอขอบคุณ กรมปศุสัตว์ จังหวัดเชียงใหม่ ที่อนุเคราะห์ให้หญ้าเนเปียร์แคระ และสุขสันติ์ฟาร์ม อำเภอแม่ออน จังหวัดเชียงใหม่ ที่อนุเคราะห์ให้น้ำเสียมูลสุกร สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนทุน Hands-on Researcher (Large) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ประจำปี 2557

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ปริพัฒน์ จึงชัยชนะ และ สุภวัฒน์ วิวรรธ์ภัทรกิจ (2555). ประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วย Biogas จากขยะ กรณีศึกษาตลาดไท, *วารสารวิจัยพลังงาน*, ฉบับที่ 2555/1, หน้า 73 – 83.

[2] น้ำเพชร พันธุ์พิพัฒน์ และ สุภวัฒน์ วิวรรธ์ภัทรกิจ (2555). ศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยไบโอแก๊สที่ผลิตจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร, *การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13*, จังหวัดเชียงใหม่

[3] Nanakorn W. and Norsangsri, M. (2001). Species enumeration of Thai Gramineae, *Queen Sirikit Botanic Garden*, Chiang Mai, Thailand.

[4] กลุ่มสารสนเทศและข้อมูลสถิติ กรมปศุสัตว์ (2552). *สรุปผลการผลิตและการใช้หญ้าแห้ง ปีงบประมาณ พ.ศ. 2548-2552*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.<dld.go.th/nutrition/data_stat/data_stat.htm> เข้าดูเมื่อวันที่ 21/01/2556.

[5] Beatrice, M. S., Jerry, D.M. and Catherine, M.O. (2009). What is the energy balance of grass biomethane in Ireland and other temperate northern European climates, *Renewable and Sustainable Energy* Reviews, vol. 13, pp. 2349-2360.

[6] Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F. and Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production; review, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 42, pp. 35-53.

[7] สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2554). *BMP*. เอกสารการวิเคราะห์หาค่า BMP.

[8] Rekha, B. N. and Aniruddha, B. P. (2013). Performance enhancement of batch anaerobic digestion of napier grass by alkali pre-treatment, *International Journal of ChemTech Research*, vol. 5, pp. 558-564.

[9] Emiliano, B., Anders, P. J. and Irini, A. (2010). Comparative study of mechanical, hydro-thermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production, Bioresource Technology, vol. 22, pp. 8713-8717.

[10] Janejadkarn, A. and Chavalrit, O. (2014). Biogas production from Napier grass (Pakchong1) (Pennisetum pururеum × Pennisetum americanum), *Advanced Materials Research*, Vol. 856, pp. 327-332.

[11] ณัฐกาญจน์ ชราพก (2555). การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าในระบบหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.