

4. ผลการทดลอง

โรงงานกระดาษที่ร่วมการศึกษานี้ ผลิตกระดาษจากเยื่อกระดาษใหม่และเยื่อกระดาษเก่า ซึ่งเป็นการหมุนเวียนกระดาษที่ใช้แล้ว เช่น วารสารต่างประเทศ และหนังสือพิมพ์ เป็นต้น เนื่องจากสิ่งตีพิมพ์เหล่านี้ประกอบด้วยเยื่อกระดาษที่เป็นเส้นใยยาวมากกว่าเยื่อกระดาษที่ผลิตจากวัตถุดิบในประเทศ เช่นเยื่อกระดาษจากไม้ยูคาลิปตัส และเยื่อกระดาษจากชานอ้อย เป็นต้น เป็นการเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษที่ผลิตได้ เป็นแนวทางหนึ่งในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

4.1 การผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากเชื้อ *Trichoderma reesei*

การผลิตกระดาษมีการหมุนเวียนเส้นใยจากสิ่งตีพิมพ์ด้วยกระบวนการทางเคมี โดยใช้สารเคมีกำจัดหมึกออกจากสิ่งตีพิมพ์เหล่านี้ นอกจากนี้เติมสารเคมีปรับปรุงคุณภาพกระดาษในกระบวนการผลิตกระดาษ ทำให้ตะกอนของหมึกและสารเคลือบผิวหน้ากระดาษเหล่านี้สะสมในตะกอนน้ำเสีย จึงทำให้กากตะกอนมีปริมาณคาร์บอนเพียง $19.23 \pm 0.24\%$ และมีปริมาณไนโตรเจน $0.63 \pm 0.01\%$ ในขณะที่มีปริมาณเถ้าสูง ($65.39 \pm 0.42\%$) ดังแสดงในตารางที่ 1 ปริมาณคาร์บอนในกากตะกอนส่วนใหญ่เป็นเส้นใยเยื่อกระดาษซึ่งเป็นสารประกอบเซลลูโลส การใช้กากตะกอนเป็นสับสเตรตเพียงชนิดเดียว อาจมีสัดส่วนของปริมาณคาร์บอนและปริมาณไนโตรเจนไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ *Trichoderma reesei* ที่ใช้ในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส จึงใช้วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรเป็นแหล่งวัตถุดิบเสริม โดยเลือกใช้ฟางข้าว รำข้าว และชานอ้อยหลังจากการคั้นน้ำออก หมักร่วมกับกากตะกอน คุณสมบัติของวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร และกากตะกอนที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงในตารางที่ 1

จากการเพาะเลี้ยงเชื้อ *Trichoderma reesei* บนส่วนผสมของวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรในสัดส่วนต่างๆ เพื่อปรับอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนของส่วนผสมเหล่านี้ให้มีค่า 25:1 พบว่าหลังจากการเพาะเลี้ยง 10 วัน ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสในส่วนผสมระหว่างฟางผสมกับรำข้าวในอัตราส่วน 4:1 *T. reesei* ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสสูงกว่าส่วนผสมอื่นๆ ดังตารางที่ 2 กากตะกอนที่ใช้ในการศึกษานี้มีปริมาณเถ้าสูงและปริมาณคาร์บอนน้อย เมื่อนำกากตะกอนมาใช้ในการเป็นแหล่งสับสเตรต ควรมีการเพิ่มปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจน เพื่อได้ผลผลิตเอนไซม์เซลลูเลสมากขึ้น (Zhao *et al.*, 2009) ฟางข้าวและชานอ้อยมีปริมาณคาร์บอนและเซลลูโลสสูงจึงสามารถนำมาเป็นแหล่งสับสเตรตในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ นอกจากนี้รำข้าวมีสัดส่วนไนโตรเจนถึง 1.6% โดยน้ำหนักแห้ง สามารถใช้เป็นแหล่งอินทรีย์ไนโตรเจนได้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานกระดาษ ฟางข้าว ชานอ้อย
รำข้าว และเศษกระดาษสำนักงาน

	คุณสมบัติ			
	ความชื้น (%)	เถ้า (%)	คาร์บอน (%)	ไนโตรเจน (%)
กากตะกอนเยื่อ	47.53 ± 0.56	65.39 ± 0.42	19.23 ± 0.24	0.63 ± 0.01
ฟางข้าว	7.06 ± 0.36	11.61 ± 0.14	49.10 ± 0.08	0.95 ± 0.01
ชานอ้อย	7.72 ± 0.41	0.94 ± 0.22	55.03 ± 0.12	0.61 ± 0.01
รำข้าว	9.23 ± 0.16	10.85 ± 0.20	49.52 ± 0.11	1.61 ± 0.02
เศษกระดาษสำนักงาน	2.86 ± 0.12	20.08 ± 0.78	44.40 ± 0.43	Not analyzed-

ตารางที่ 2 การผลิตเอนไซม์เซลลูเลสบนอาหารแข็งจากส่วนผสมของวัสดุเหลือใช้การเกษตรที่
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 25:1 โดยหมักด้วยเชื้อ *Trichoderma reesei* ที่
อุณหภูมิห้อง

แหล่งอาหารผสม (อัตราส่วนผสม)	เอนไซม์เซลลูเลส (FPU/g)	
	5 วัน	10 วัน
ชานอ้อย:รำข้าว (4:1)	0	0.3
ฟางข้าว:รำข้าว (4:1)	1.0	2.4
กากตะกอนเยื่อ:รำข้าว (2.5:2.5)	0.2	0.4

4.2 การไฮโดรไลซิสกากตะกอนเชื้อเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซิ่ง โดยเอนไซม์เซลลูเลสจากเชื้อ

Trichoderma reesei

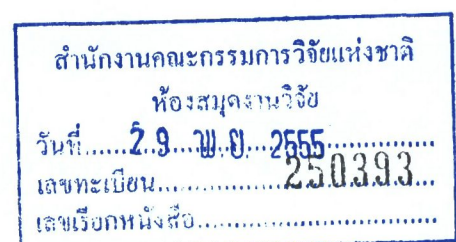
การผลิตน้ำตาลรีดิวซิ่งโดยไฮโดรไลซิสเซลลูโลสในกากตะกอนด้วยเอนไซม์เซลลูเลสหายาบที่ผลิตจากการบ่มฟางข้าวและรำข้าวด้วยเชื้อ *T. reesei* จากข้อ 4.1 ปริมาณอัลฟาเซลลูโลส ไฮโลเซลลูโลส และลิกนินในกากตะกอน ฟางข้าว และชานอ้อย แสดงในตารางที่ 3 ศึกษาปัจจัยความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของส่วนผสม และอุณหภูมิของการบ่มที่มีต่อประสิทธิภาพการไฮโดรไลซิสกากตะกอน

ตารางที่ 3 สัดส่วนลิกนิน ไฮโลเซลลูโลส และอัลฟาเซลลูโลสของกากตะกอน ฟางข้าว และชานอ้อย

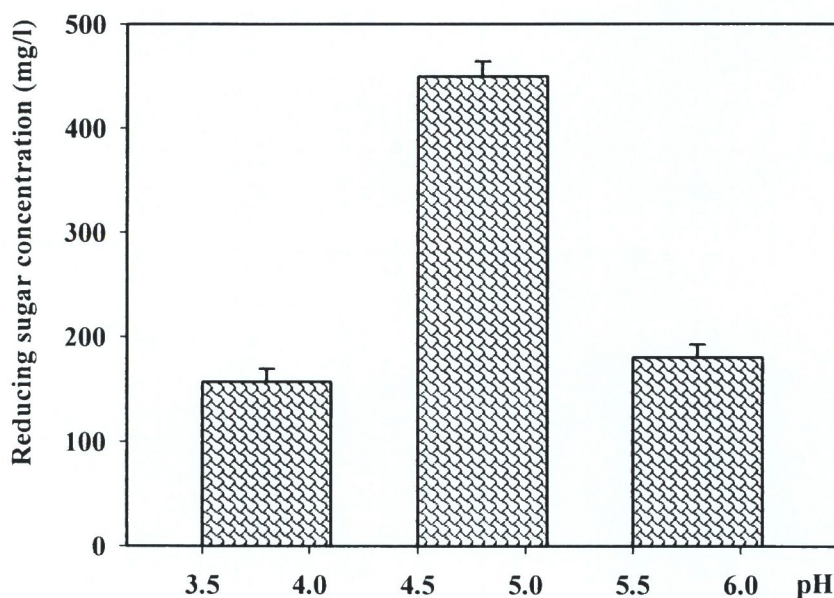
ชนิดวัสดุเหลือทิ้ง	คุณสมบัติ		
	ลิกนิน (%)	ไฮโล- เซลลูโลส (%)	อัลฟา- เซลลูโลส (%)
กากตะกอน	37.65±0.16	16.06±0.62	11.60±0.03
ฟางข้าว	24.03±0.01	51.65±0.02	43.73±0.11
ชานอ้อย	14.81±0.06	63.89±2.46	48.42±0.11



กากตะกอนในสารละลายเอนไซม์เซลลูเลสหายาบ (crude cellulase) ที่ 5 FPU และสารละลายซิริทริกบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.05 โมล ที่ ปรับค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นเป็น pH 3.8 pH 4.8 และ pH 5.8 บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงพบว่า การไฮโดรไลซิสกากตะกอนในสารละลายเอนไซม์เซลลูเลสที่ pH 4.8 ได้น้ำตาลรีดิวซิ่งสูงสุด คือ 449.77±14.41 mg/l ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรดต่างในผลการศึกษานี้ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Dienes *et al.* (2004) โดย pH ที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสทางการค้าจากเชื้อ *Trichoderma sp.* 2 ชนิดอยู่ที่ pH 5 ค่าความเป็นกรดต่างมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ชนิดต่างๆ โดยจะส่งผลต่อกลุ่มอะมิโนและคาร์บอกซิลของเอนไซม์จึงทำให้เอนไซม์แต่ละชนิดมีค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการย่อยสลายแตกต่างกัน



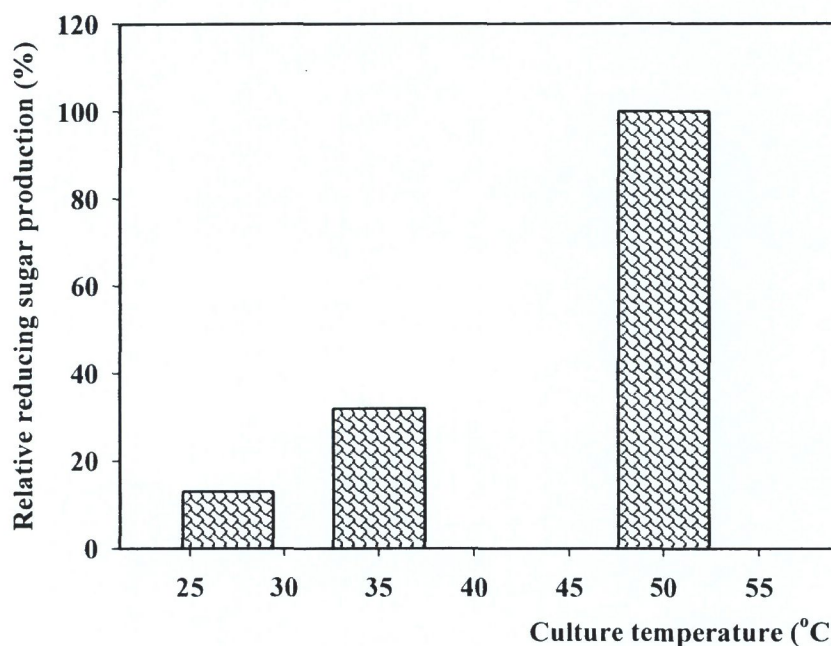
นอกจากนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสในกากตะกอนด้วย สารละลายเอนไซม์เซลลูเลสหยาบในสารละลายบัฟเฟอร์เดียวกับการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยบ่มกากตะกอนที่อุณหภูมิห้อง (27°C) ที่ 35°C และที่ 50°C พบว่าในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา อุณหภูมิในการไฮโดรไลซิสกากตะกอนด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่สูงขึ้น ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่สูงขึ้น และการไฮโดรไลซิสกากตะกอนที่อุณหภูมิ 50°C ให้น้ำตาลรีดิวซ์ในสัดส่วนที่มากกว่าการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 35°C และ 27°C ตามลำดับ (ภาพที่ 2) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kaur *et al.* (1998) ที่ไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสจากเชื้อ *Trichoderma sp.* ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุด



ภาพที่ 1 ผลของค่าเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากการไฮโดรไลซิสกากตะกอนด้วย เอนไซม์เซลลูเลสหยาบ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชม

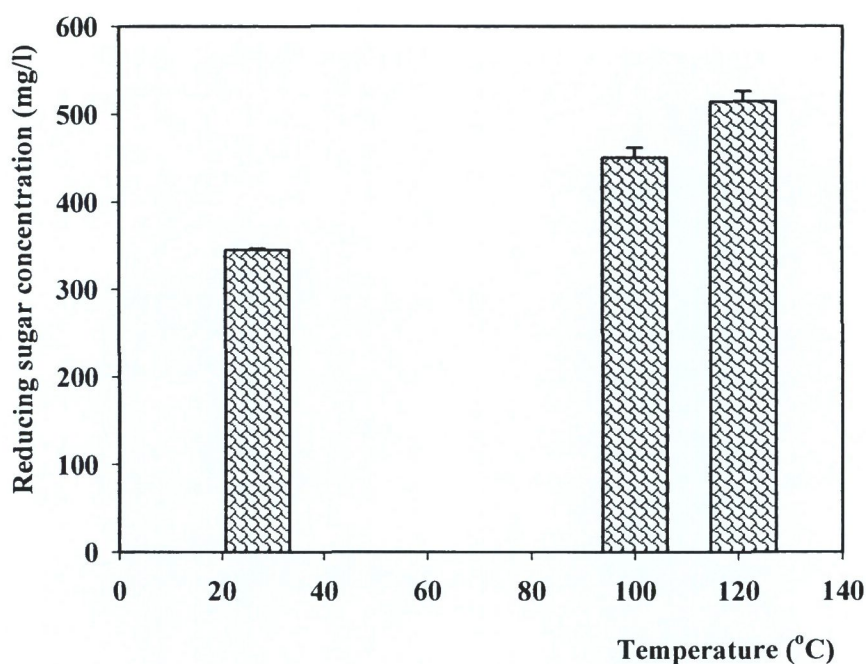
เนื่องจากกากตะกอนประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส รวมทั้งลิกนิน และสารอื่นๆ ดังนั้นการปรับสภาพกากตะกอนด้วยความร้อน และหรือด้วยสารเคมีช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการไฮโดรไลซิส (Alvira *et al.*, 2010) การศึกษานี้ปรับสภาพกากตะกอนด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C และ 121°C เปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิห้อง (27°C) เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากภาพที่ 3 การไฮโดรไลซิสกากตะกอนที่ปรับสภาพด้วยความร้อน (ที่ 100°C และ 121°C) ผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ที่ความเข้มข้นสูงกว่าการไฮโดรไลซิสกากตะกอนที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิห้อง โดยการไฮโดรไลซิสกากตะกอนที่ผ่านการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 121°C ให้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด (514.77±11.31 mg/l) ความร้อนจะทำให้เฮมิเซลลูโลสและลิกนินละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น โครงสร้างของกากตะกอนหลวมตัวมากขึ้น ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเซลลูโลสและเอนไซม์เซลลูเลสเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เอนไซม์เซลลูเลสสามารถซึมผ่านและย่อยเซลลูโลสเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ

Zhao *et al.* (2009) ที่ได้ปรับสภาพขานอ้อยด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70 80 90 และ 100 °C ก่อนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ พบว่าการปรับสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ได้ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการไฮโดรไลซิสกากตะกอนที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 100°C มีน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งน้อยกว่าการไฮโดรไลซิสกากตะกอนที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 121°C เล็กน้อย แต่ค่าใช้จ่ายในการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 100°C น่าจะถูกลงกว่าการปรับสภาพกากตะกอนที่อุณหภูมิ 121°C ดังนั้นจึงเลือกอุณหภูมิ 100°C ในการปรับสภาพกากตะกอน



ภาพที่ 2 สัดส่วนความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งจากการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสในกากตะกอนด้วยเอนไซม์เซลลูเลสหยาบ ที่ pH 4.8 และที่อุณหภูมิต่างๆ (27°C 35°C และ 50°C) ในระยะเวลา 24 ชม.

นอกจากการปรับสภาพกากตะกอนด้วยสารเคมีร่วมกับการใช้ความร้อน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการไฮโดรไลซิส การศึกษานี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ความเข้มข้น 1 2 และ 3% (มวล/ปริมาตร) ในการปรับสภาพกากตะกอนที่สถานะเป็นค้างและเป็นกรด ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสหยาบที่ผลิตจากเชื้อ *Trichoderma reesei*

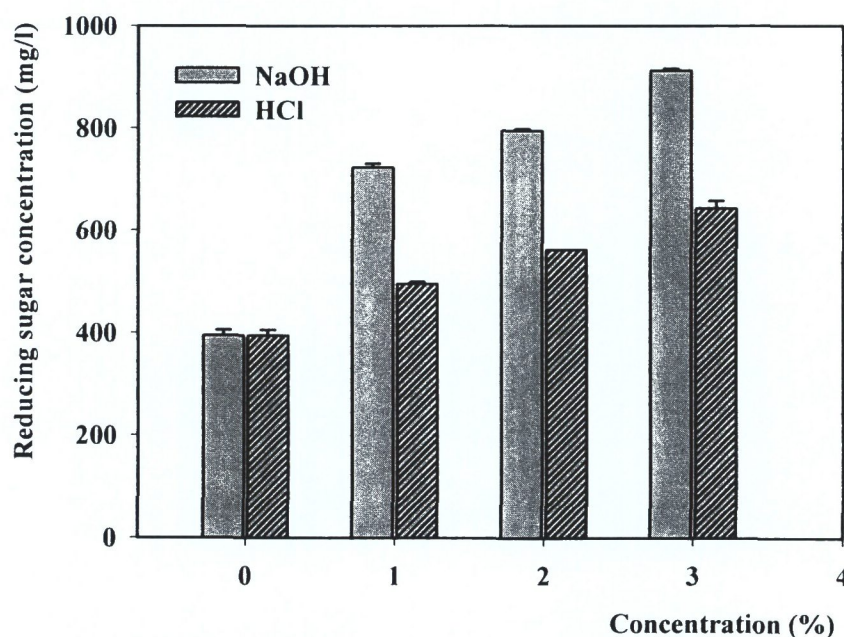


ภาพที่ 3 ผลของการปรับสภาพกากตะกอนด้วยความร้อน (ที่ 27°C 100 °C และ 121°C) ต่อความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งจากการไฮโดรไลซิสกากตะกอนด้วยเอนไซม์เซลลูเลส ที่อุณหภูมิ 50°C และ pH 4.8 ในระยะเวลา 24 ชม.

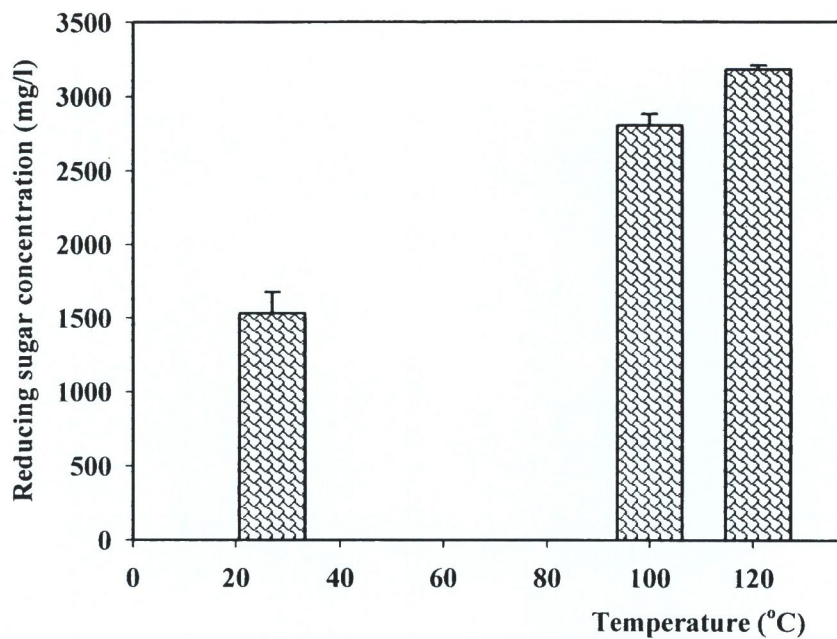
การปรับสภาพกากตะกอนด้วยสารละลายด่างหรือสารละลายกรดส่งเสริมประสิทธิภาพการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสในกากตะกอน โดยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งจากการไฮโดรไลซิสกากตะกอนที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดหรือด่างมีค่าสูงกว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งจากการไฮโดรไลซิสกากตะกอนที่ไม่มีการปรับสภาพ ดังแสดงในภาพที่ 4 นอกจากนี้การไฮโดรไลซิสกากตะกอนที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ที่เข้มข้น 1 2 และ 3% (มวลต่อปริมาตร) ให้น้ำตาลรีดิวซ์ที่ความเข้มข้น 722.81 ± 7.54 794.82 ± 3.77 และ 912.18 ± 3.77 mg/l ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าการไฮโดรไลซิสกากตะกอนที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรด HCl ที่เข้มข้น 1 2 และ 3% โดยปริมาตร (496.10 ± 3.77 566.78 ± 5.66 และ 642.80 ± 15.09 mg/l ตามลำดับ) และจากกากตะกอนที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ (394.75 ± 11.32 mg/l)

การปรับสภาพกากตะกอนด้วยสารละลาย NaOH และสารละลาย HCl ที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากการไฮโดรไลซิส เนื่องจากสารละลาย NaOH และสารละลาย HCl ทำให้เฮมิเซลลูโลสและลิกนินละลายน้ำออกมาได้เพิ่มขึ้น ทำให้เส้นใยเรียงตัวหลวมมากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวของเซลลูโลสในการสัมผัสกับสารละลายเอนไซม์เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการปรับสภาพด้วยความร้อน จึงทำให้เอนไซม์สามารถไฮโดรไลซิสเซลลูโลสในกากตะกอนเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อปรับสภาพกากตะกอนด้วยสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (100°C และ 121°C) เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนการไฮโดรไลซิสด้วยสารละลาย

เอนไซม์เซลลูเลส ทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการไฮโดรลisisกาก
 ตะกอนที่ปรับสภาพด้วยสารละลายด่างที่อุณหภูมิห้อง (27°C) ดังแสดงในภาพที่ 5 การปรับสภาพ
 กากตะกอนทำให้โครงสร้างของกากตะกอนเปลี่ยนแปลงง่ายต่อการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์
 ส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลายด่างช่วยย่อยสลายประกอบอื่นๆ และทำให้
 โครงสร้างกลุ่มไฟเบอร์ในกากตะกอนหลวมมากขึ้น จึงง่ายต่อการซึมผ่านของสารละลายเอนไซม์
 และเมื่อใช้ความร้อนสูง จะช่วยให้ปฏิกิริยาของสารละลายด่างเพิ่มขึ้น การที่ใช้อุณหภูมิในการปรับ
 สภาพเพิ่มจาก 27 เป็น 100 และ 121°C สามารถเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส
 183 และ 207% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนลิกนิน ไฮโลเซลลูโลส และแอลฟาเซลลูโลสใน
 กากตะกอนก่อน และหลังจากการปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ
 100°C (ตารางที่ 4) พบว่ากากตะกอนที่ปรับสภาพมีสัดส่วนลิกนินลดลง และสัดส่วนของไฮโล
 เซลลูโลสเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4 ผลของการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายกรด
 ไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากการไฮโดรไลซิส
 ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 5 ผลของการปรับสภาพกากตะกอนด้วยสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสใน 12 ชม.

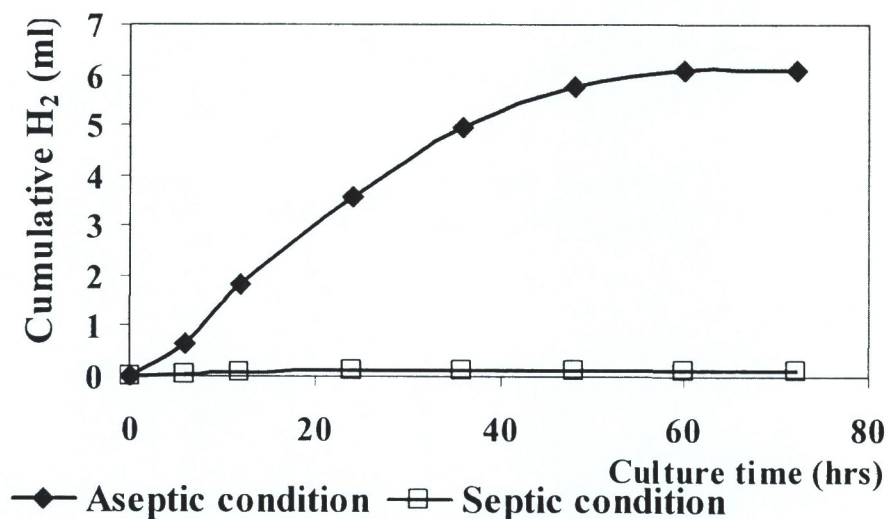
4.3 สภาวะการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกากตะกอนหลังจากการไฮโดรไลซิส

ศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยเชื้อ *Clostridium butyricum* ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่นิยมในการศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยหมักเชื้อ *Clostridium butyricum* ในน้ำเสียโรงงานหนึ่ง ภายใต้สภาวะปลอดเชื้อ (aseptic condition) และสภาวะที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ (septic condition) ที่อุณหภูมิ 37°C พบว่าเชื้อดังกล่าวผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้น้อยมากในตัวอย่างน้ำเสียที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ ดังแสดงปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในภาพที่ 6 เนื่องจากเชื้อดังกล่าวไม่สามารถเจริญเติบโตแข่งขันกับเชื้อจุลินทรีย์ท้องถิ่นในน้ำเสียได้ ดังนั้นการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยเชื้อ *Clostridium butyricum* ในสภาวะที่ปลอดเชื้อ จึงเป็นยุ่งยากที่นำไปใช้ในการปรับใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนในระดับอุตสาหกรรม

จากการศึกษาเบื้องต้นในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยกลุ่มเชื้อจุลินทรีย์ผสม (mixed culture) จากกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศแห่งหนึ่ง โดยปรับสภาพกลุ่มเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าวด้วยความร้อนที่ 104°C เป็นเวลา 30 และ 60 นาที พบว่าเชื้อจุลินทรีย์ผสมที่ปรับสภาพด้วยความร้อนที่ 104°C เป็นเวลา 60 นาที สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ และไม่เกิดแก๊สมีเทน ดังนั้นจึงใช้เชื้อผสมจากกากตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนที่ 104°C เป็นเวลา 60 นาทีในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยตัวอย่างกากตะกอนเยื่อกระดาษไม่จำเป็นต้องทำการฆ่าเชื้อ ทำให้ผลการศึกษาที่ได้น่าจะมีความเป็นไปได้ในการนำไปปรับใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้

ตารางที่ 4 องค์ประกอบของกากตะกอนก่อนและหลังการปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

กากตะกอน	เถ้า (%)	ลิกนิน (%)	โซโลเซลลูโลส (%)	อัลฟาเซลลูโลส (%)	อัตราส่วนอัลฟาเซลลูโลสต่อลิกนิน
ก่อน	65.39	13.03	25.77	18.75	1.44
หลัง	68.80	7.75	23.67	15.43	1.99

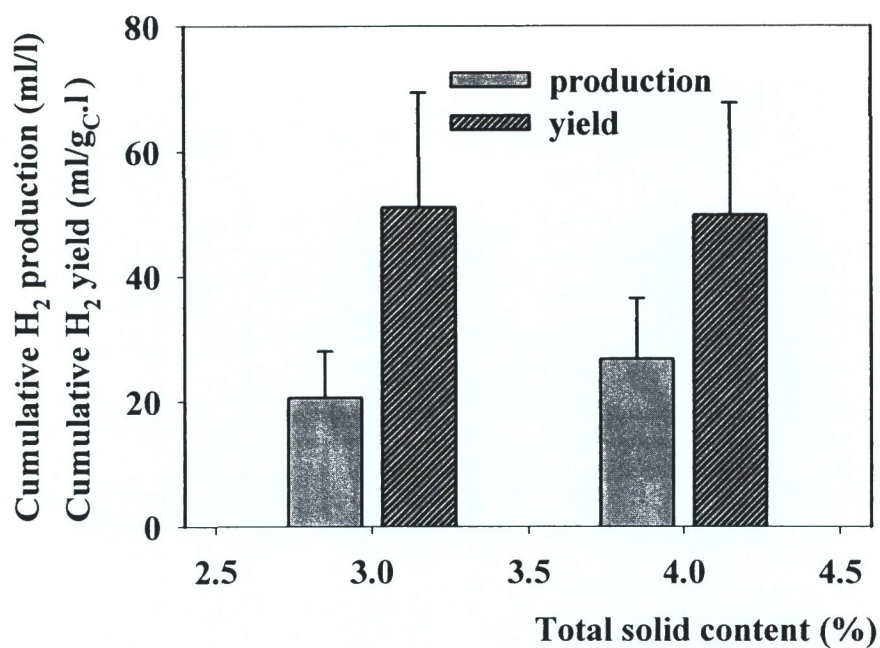


ภาพที่ 6 ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนสะสมในน้ำเสียสังเคราะห์โดย *Clostridium butyricum* ในสภาวะที่ปลอดเชื้อ (aseptic condition) และสภาวะที่ไม่ปลอดเชื้อ (septic condition)

หลังจากนั้นศึกษาปริมาณน้ำหนักแห้งของกากตะกอนเชื้อกระดาษ (3% และ 4% โดยน้ำหนัก/ปริมาตร) ที่มีผลต่อปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยนำกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพ และไฮโดรไลซ์ หมักที่ 37°C ด้วยเชื้อผสมที่ปรับสภาพที่ 104°C เป็นเวลา 60 นาที โดยปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็น 20 โดยการเติมสารสกัดยีสต์ (yeast extract) และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเป็น pH 5 พบว่าหลังจากการหมัก 216 ชั่วโมง การใช้กากตะกอนที่ความเข้มข้น 4% เกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมและผลผลิตแก๊สไฮโดรเจน 26.81±9.66 ml/l และ 49.79±17.94 ml/g_{c.l} ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าจากการหมักกากตะกอนที่ความเข้มข้น 3% (20.60±7.43 ml/l และ 51.01±18.40 ml/g_{c.l} ตามลำดับ) ดังแสดงในภาพที่ 7

เนื่องจากกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ กระจกาศ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นส่วนใหญ่ และมีปริมาณคาร์บอนเพียง 19.23% จึงเพิ่มเศษ กระจกาศสำนักงานเป็นแหล่งคาร์บอนอีกแหล่งในการหมัก โดยศึกษาผลของสัดส่วนกากตะกอนเชื้อ กระจกาศร่วมกับเศษกระจกาศต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งหมักที่ 37°C และปรับอัตราส่วน คาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็น 20:1 ในปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ 4% ปรับสัดส่วนกากตะกอนเชื้อ กระจกาศต่อเศษกระจกาศสำนักงาน เป็น 4.0: 0.0 3.5: 0.5 3.0: 1.0 2.5: 1.5 และ 0.0:4.0 เศษ กระจกาศที่ใช้ในการศึกษานี้มีความชื้น $2.86 \pm 0.12\%$ เถ้า $20.08 \pm 0.78\%$ และคาร์บอน $44.40 \pm 0.43\%$ ก่อนนำไปหมักร่วมกับกากตะกอนเชื้อกระจกาศ นำเศษกระจกาศปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ที่ ความเข้มข้น 3% ที่ 100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เช่นเดียวกับการปรับสภาพของกากตะกอนเชื้อ กระจกาศ จากการปรับสภาพเศษกระจกาศทำให้สัดส่วนอัลฟาเซลลูโลสในเศษกระจกาศเพิ่มขึ้นจาก 28.09% เป็น 40.04% และสัดส่วนอัลฟาเซลลูโลสต่อลิกนินเพิ่มขึ้นจาก 15.96 เป็น 26.87 ดังแสดง ในตารางที่ 5

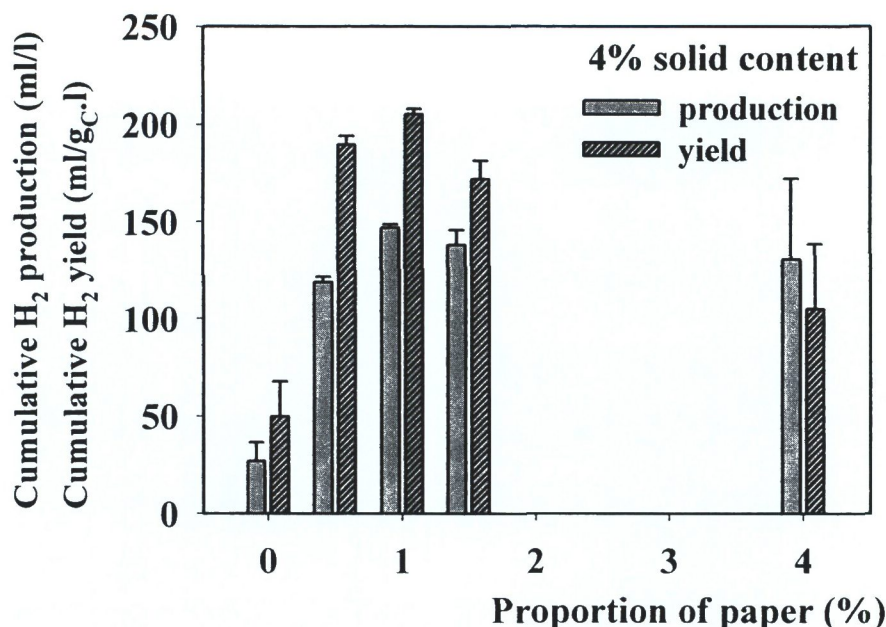
จากการหมักกากตะกอนเชื้อกระจกาศร่วมกับเศษกระจกาศในสัดส่วนต่างๆ ที่ 37°C พบว่า การหมักเพียงกากตะกอนเชื้อให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนสะสม และผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนน้อยที่สุด (26.81 ± 9.66 ml/l และ 49.79 ± 17.94 ml/g_{c.l} ตามลำดับ) การเพิ่มเศษกระจกาศเป็นแหล่งคาร์บอน ร่วมกับกากตะกอนเชื้อส่งเสริมให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 8 และการหมักเศษ กระจกาศที่ความเข้มข้น 1% ร่วมกับกากตะกอนเชื้อที่ความเข้มข้น 3% ให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน และผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนสูงสุด (146.84 ± 1.84 ml/l และ 205.47 ± 2.58 ml/g_{c.l} ตาม ลำดับ) แต่ อย่างไรก็ตามการหมักที่มีเศษกระจกาศในสัดส่วน 0.5% เกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมและผลผลิตแก๊ส ไฮโดรเจนไม่แตกต่างจากการหมักด้วยเศษกระจกาศ 1% เพื่อที่จะใช้เศษกระจกาศดังกล่าวในการศึกษา ขั้นตอนที่ต่อไป จึงเติมเศษกระจกาศในสัดส่วน 0.5% ร่วมกับกากตะกอนเชื้อ 3.5% เพื่อเป็นแหล่ง คาร์บอนให้แก่เชื้อจุลินทรีย์ผสม



ภาพที่ 7 ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนสะสมและผลผลิตไฮโดรเจนจากการหมักกากตะกอนความเข้มข้น 3% และ 4% ที่ 37°C ใน 216 ชม.

ตารางที่ 5 องค์ประกอบของเศษกระดาษสำนักงานก่อนและหลังการปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 3% ที่ 100°C เป็น 2 ชั่วโมง

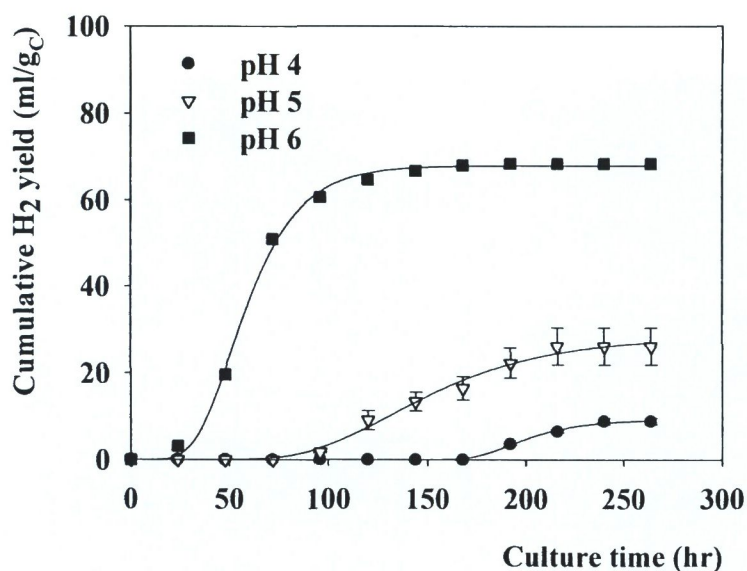
กระดาษ	เถ้า (%)	ลิกนิน (%)	โซโล-เซลลูโลส (%)	อัลฟา-เซลลูโลส (%)	อัตราส่วน อัลฟาเซลลูโลส ต่อลิกนิน
ก่อนปรับสภาพ	20.08	1.76	57.32	28.09	15.96
หลังปรับสภาพ	22.66	1.49	68.18	40.04	26.87



ภาพที่ 8 ผลของสัดส่วนเศษกระดาษในการหมักร่วมกับกากตะกอนเชื้อ ที่ปริมาณของแข็งรวม 4% ที่มีต่อปริมาณแก๊สไฮโดรเจนสะสมและผลผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยใช้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 20 pH 5 หมักที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลา 216 ชม.

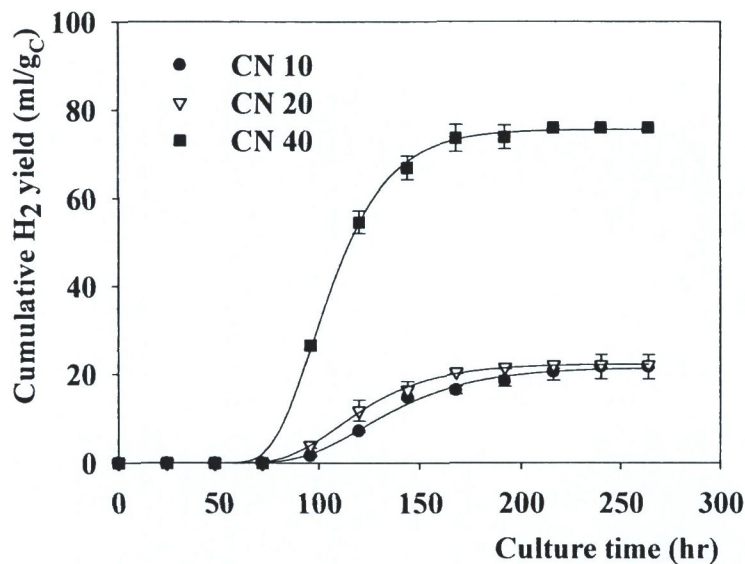
จุลินทรีย์ชนิดต่างๆสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะค่าความเป็นกรดต่าง (pH) แตกต่างกัน นอกจากนี้ค่า pH มีอิทธิพลต่อการทำงานของเอนไซม์ ดังนั้นจึงศึกษาผลของค่า pH ในการหมักที่มีปริมาณแก๊สไฮโดรเจน โดยปรับค่า pH ในกากตะกอน (3.5%) และเศษกระดาษ (0.5%) เป็น pH 4 pH 5 และ pH 6 และปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 20 ด้วย yeast extract หมักที่อุณหภูมิ 37°C จากการหมักกากตะกอนและเศษกระดาษพบว่า การหมักในสภาวะที่ pH ต่ำ แก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้น จากภาพที่ 9 การหมักที่ pH 4 เริ่มเกิดแก๊สไฮโดรเจนในชั่วโมงที่ 192 และที่ pH 5 เริ่มผลิตแก๊สไฮโดรเจนในชั่วโมงที่ 96 ในขณะที่ pH 6 เกิดแก๊สไฮโดรเจนเร็วที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับหมักที่ pH 5 และ pH 4 ตามลำดับ โดยเริ่มเกิดแก๊สไฮโดรเจนในชั่วโมงที่ 24 นอกจากนี้การหมักที่ pH 6 ให้ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนสูงสุดคือ 68.45 ± 1.89 รองลงมาเป็นการหมักที่ pH 5 และ pH 4 ตามลำดับ (26.14 ± 4.29 และ 8.85 ± 0.72 ml/g_C ตามลำดับ)

ค่า pH มีผลโดยตรงต่อกิจกรรมต่างๆ ของจุลินทรีย์ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อโปรตีน ประจุของกรดอะมิโน polypeptide chain และมีอิทธิพลต่อโครงสร้างและหน้าที่ของโปรตีน โดยปกติเอนไซม์จะหมักกิจกรรมที่ค่าพีเอชต่ำมากหรือสูงมาก ทำให้เอนไซม์และสารต่างๆ ภายในเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ถูกทำลาย (ดวงพร, 2545)



ภาพที่ 9 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อผลผลิตไฮโดรเจนจากการหมักกากตะกอน (3.5%) และกระดาษ (0.5%) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 20 หมักที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสในระยะเวลา 264 ชม.

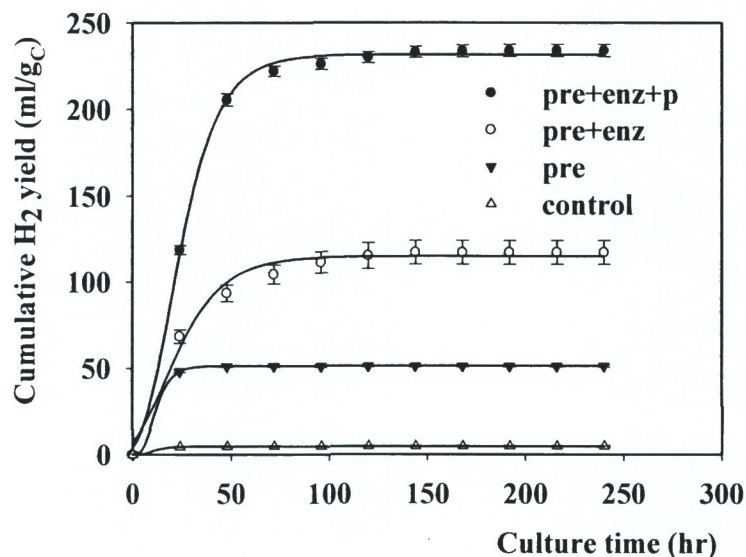
นอกจากนี้ศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ในการหมักที่มีต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยปรับอัตราส่วน C/N เป็น 10 20 และ 40 โดยการเติม yeast extract และหมักที่ pH 6 และ 37°C หลังจากการหมัก 240 ชั่วโมง ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่ได้จากการหมักที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 10 20 และ 40 เป็น 21.68 ± 2.75 22.10 ± 0.75 76.06 ± 0.31 ml/g_C ตามลำดับ ซึ่งแสดงในภาพที่ 10 การหมักที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำมีปริมาณไนโตรเจนไม่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ในการสร้างเซลล์ใหม่ และผลผลิตที่ได้เป็นแก๊สชนิดอื่น ส่งผลให้เกิดปริมาณแก๊สไฮโดรเจนน้อย สำหรับการหมักที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำเกินไป อาจจะทำให้มีความเข้มข้นของแอมโมเนียในระบบสูง ส่งผลต่อกิจกรรมการทำงานของจุลินทรีย์ (Lin and Lay, 2004) ไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับโปรตีน กรดนิวคลีอิก และเอนไซม์มีความสำคัญต่อเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากเป็นสารอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียจึงต้องมีปริมาณที่เหมาะสมกับกลุ่มจุลินทรีย์ชนิดนั้นๆ (Bisailon *et al.*, 2006) อัตราส่วน C/N ที่มีความเหมาะสมจะทำให้มีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นสูง ดังนั้นอัตราส่วน C/N ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สไฮโดรเจนในการศึกษานี้คือ 40



ภาพที่ 10 ผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากการหมักกากตะกอนเยื่อ (3.5%) และเศษกระดาษ (0.5%) ที่อุณหภูมิ 37°C และ pH 6

เนื่องจากกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานกระดาษมีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบ ลิกนินจะเรียงตัวเป็นผนังหุ้มเซลลูโลส มีเฮมิเซลลูโลสเป็นตัวเชื่อมด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้เอนไซม์เซลลูเลสเข้าไปย่อยสลายเซลลูโลสในกากตะกอนเยื่อได้น้อย ดังนั้นการใช้ประโยชน์เซลลูโลสในกากตะกอนเยื่อในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยจุลินทรีย์ควรมีการปรับสภาพกากตะกอนเยื่อ ก่อนไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส เพื่อให้เอนไซม์สามารถซึมเข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ง่าย ภาพที่ 11 แสดงผลของการปรับสภาพกากตะกอนต่อปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ถึงผลของการไม่ปรับสภาพกากตะกอนเยื่อ (control) การปรับสภาพกากตะกอนด้วยด่างร่วมกับความร้อน (pre) การใช้เอนไซม์เซลลูเลสร่วมในการไฮโดรไลซิสกากตะกอนที่ปรับสภาพก่อนการหมัก (pre+enz) และการใช้เอนไซม์เซลลูเลสไฮโดรไลซิสกากตะกอนและกระดาษก่อนการหมัก (pre+enz+p) ต่อผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้ พบว่าการปรับสภาพกากตะกอนเยื่อ การไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ และการเติมเศษกระดาษส่งเสริมการผลิตแก๊สไฮโดรเจน เมื่อเปรียบเทียบกับกากตะกอนเยื่อดั้งเดิมจากระบบบำบัดน้ำเสีย ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากการหมักของ pre+enz+p มีค่าสูงสุด รองลงมาเป็นการหมักจาก pre+enz และ pre ตามลำดับ (233.87 ± 3.62 117.05 ± 6.97 51.22 ± 0.65 และ 4.66 ± 0.44 ml/gC ตามลำดับ) จากผลการศึกษานี้การปรับสภาพกากตะกอนด้วยด่างร่วมกับความร้อน (pre) ให้ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนสูงกว่าการไม่ปรับสภาพกากตะกอน (control) กว่า 10 เท่า โดยการปรับสภาพกากตะกอนเยื่อด้วยสารละลายด่างกำจัดลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสออกจากกากตะกอนเยื่อ ทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสสลายตัวและเรียงกันอย่างหลวมๆ ส่งผลให้เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นเอนไซม์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์จึงสามารถเข้าไป

ซึมเข้าไปและย่อยสลายเซลลูโลสได้มากขึ้น และได้ผลผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น (Zhang and Cai, 2008; Hendriks and Zeeman, 2009) นอกจากนี้การลดลงของปริมาณเฮมิเซลลูโลส และลิกนินจากปรับสภาพกากตะกอนเยื่อ จะทำให้สารยับยั้งและสารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ซึ่งเกิดจากสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ลดลง เช่นสารประกอบฟูเฟอร์อล (fufural) และสารประกอบโพลีฟีนอลิก (polyphenolic compounds) เป็นต้น (Hendriks and Zeeman, 2009)

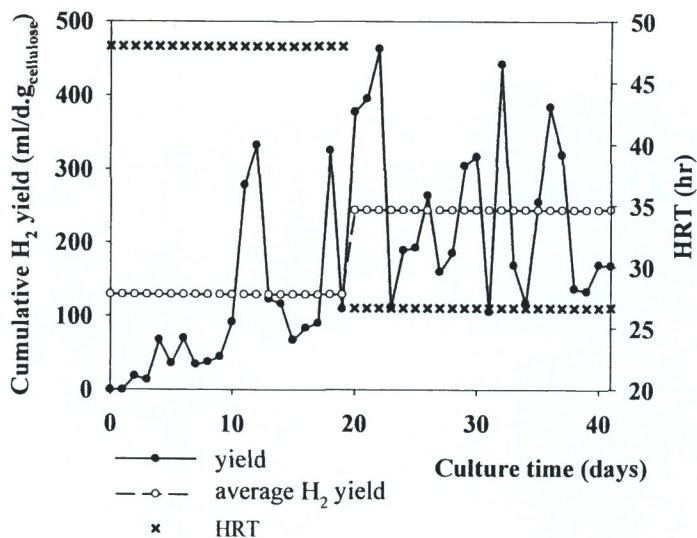


ภาพที่ 11 ผลของการปรับสภาพกากตะกอน การใช้เอนไซม์และการใช้กระดาษร่วมต่อผลผลิตไฮโดรเจนจากการหมักกากตะกอน (3.5%) และกระดาษ (0.5%) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 40 พีเอช 6 หมักที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสในระยะเวลา 240 ชม.

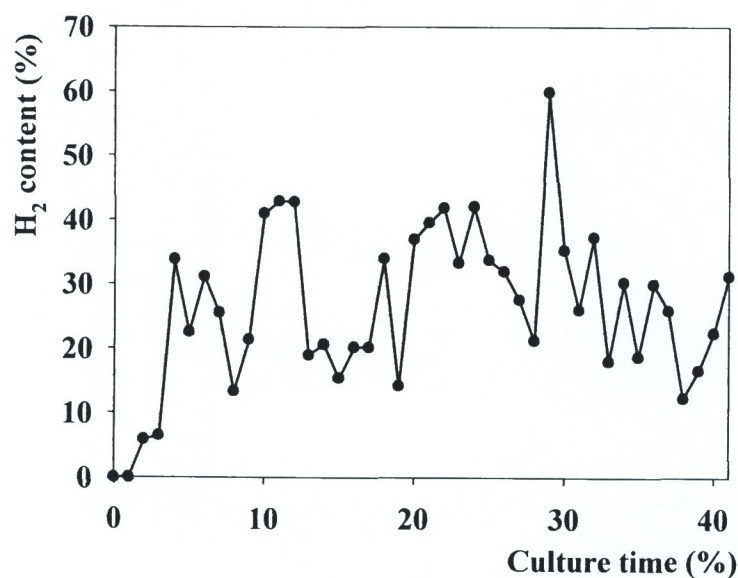
การใช้เอนไซม์เซลลูเลสไฮโดรไลซ์กากตะกอนเยื่อที่ปรับสภาพก่อนการหมัก (pre+enz) จะให้ปริมาณผลผลิตไฮโดรเจนสูงกว่าการปรับสภาพกากตะกอนเยื่อด้วยค่าร่วมกับความร้อนให้ผลผลิตไฮโดรเจน (pre) ถึง 2.3 เท่า เพราะการไฮโดรไลซ์กากตะกอนเยื่อด้วยเอนไซม์จะช่วยเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งจากการไฮโดรไลซ์เซลลูโลสทำให้ผลผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใช้เอนไซม์เซลลูเลสไฮโดรไลซ์กากตะกอนเยื่อและการใช้เศษกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพร่วม (pre+enz+p) จะให้ผลผลิตไฮโดรเจนมากกว่าการใช้เอนไซม์เซลลูเลสไฮโดรไลซ์กากตะกอนที่ปรับสภาพก่อนการหมัก (pre+enz) ถึง 1.7 เท่า เนื่องจากมีปริมาณเซลลูโลสที่สูงกว่าจึงได้น้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งจากการไฮโดรไลซ์มากกว่าการใช้กากตะกอนเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพเพียงอย่างเดียว

ศึกษาการหมักกากตะกอนเยื่อในถังปฏิกรณ์ระดับการทดลอง (laboratory-scaled reactor) ขนาด 2 ลิตร เพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจนแบบต่อเนื่อง โดยเติมกากตะกอนเยื่อที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ เนื่องจากกากตะกอนเยื่อมีปริมาณเถ้าสูง (65.39%) ซึ่งเถ้าเหล่านี้อาจมาจากสารประกอบปรับปรุงคุณภาพกระดาษที่เติมในกระบวนการผลิต เช่นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต และสารประกอบโพลิเมอร์ที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเครื่องรีดน้ำในตะกอน (belt press) จึงส่งให้มีกากตะกอนตกค้างในถังปฏิกรณ์ปริมาณมากในระหว่างการหมัก และเกิดการอุดตันของท่อในถังปฏิกรณ์ ดังนั้นจึงศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากการหมักกระดาษสำนักงาน ซึ่งใช้ประกอบด้วยเซลลูโลสเช่นเดียวกับที่มีอยู่ในกากตะกอนเยื่อ โดยหมักเศษกระดาษสำนักงานที่ผ่านการปรับสภาพและการไฮโดรไลซิสภายใต้สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้นจากกากตะกอนเยื่อ ในการศึกษานี้ได้รับความอนุเคราะห์เอนไซม์เซลลูเลสที่ทำให้บริสุทธิ์บางส่วน (partial purified cellulase solution) จากบริษัท The East Asiatic (Thailand) Public Co.Ltd. และหมักเศษกระดาษที่ปรับสภาพและไฮโดรไลซิสที่ความเข้มข้น 0.5% ที่ 55°C ในถังปฏิกรณ์แบบ sequencing batch reactor ขนาด 2 ลิตรด้วยเชื้อ *Clostridium thermopalmarium* HM 756303 ซึ่งคัดเลือกได้จากกากตะกอนที่ใช้เป็นกลุ่มเชื้อจุลินทรีย์ผสม ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนและความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้แสดงในภาพที่ 12 และภาพที่ 13 ตามลำดับ โดยผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนและสัดส่วนแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สชีวภาพสูงสูดมีค่า 463.18 ml/g_{cellulose} และ 59.9% ตามลำดับ นอกจากนี้ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณแก๊สมีเทนได้ในระหว่างการหมัก

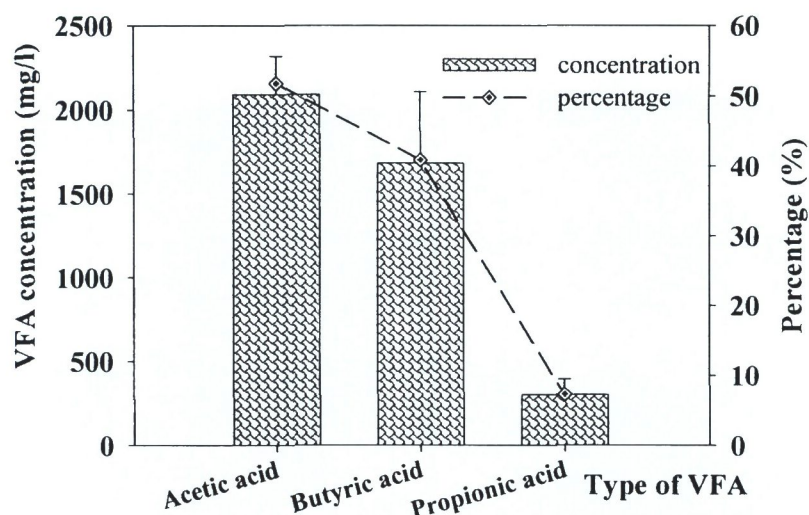
ระหว่างการหมักวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยได้ (volatile fatty acids) ในสารละลายจากการหมักพบว่ามีความเข้มข้นของกรดอะซิติก (acetic acid; Ac) มากที่สุด รองลงมาเป็นกรดบิวทิลิก (butyric acid, Bu) และกรดโพรไพโอนิก (propionic acid, Pr) ตามลำดับ (51.80±3.54 40.88±2.83 และ 7.32±1.39% ตามลำดับ) ดังแสดงในภาพที่ 14 และจากสัดส่วนของกรดไขมันระเหยได้นี้สามารถสันนิษฐานได้ว่าการหมักเศษกระดาษเพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจนนี้มีกลไกการหมักแบบอะซิติกและแบบบิวทิลิก (acetic and butyric pathway)



ภาพที่ 12 ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากการหมักเศษกระดาษสำนักงานด้วยเชื้อ *Clostridium thermopalmarium* HM 756303 ที่ 55°C ด้วยถังปฏิกรณ์แบบ sequencing batch reactor ขนาด 2 ลิตรในระยะเวลาการกักเก็บ 48 และ 26 ชม. เป็นเวลา 41 วัน



ภาพที่ 13 ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สชีวภาพจากการหมักเศษกระดาษสำนักงานด้วยเชื้อ *Clostridium thermopalmarium* HM 756303 ที่ 55°C ด้วยถังปฏิกรณ์แบบ sequencing batch reactor ขนาด 2 ลิตร



ภาพที่ 14 ความเข้มข้นและสัดส่วนของกรดไขมันระเหยได้จากการหมักเศษกระดาษสำนักงานด้วยเชื้อ *Clostridium thermopalmarium* HM 756303 ที่ 55°C ด้วยถังปฏิกรณ์แบบ sequencing batch reactor ขนาด 2 ลิตร

4.4 การประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

ผู้ประกอบการที่ร่วมการศึกษานี้มีกำลังผลิตกระดาษเฉลี่ย 125,000 ตัน/ปี และใช้น้ำมันเตาเพื่อผลิตไอน้ำ 104 ลิตร/ตันผลิตภัณฑ์ (วรวิฑู, 2552) โดยค่าความร้อนของน้ำมันเตาเกรดซีมีค่าความร้อนสูง 43,737.68 กิโลจูล/กิโลกรัม และมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.96 กิโลกรัม/ลิตร ที่ 15.6°C (บริษัทปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย จำกัด (มหาชน), 2552) การศึกษานี้คำนวณค่าความร้อนที่คาดว่าจะได้รับจากแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้เฉลี่ยจากการหมักกากตะกอนเยื่อ ดังแสดงในตารางที่ 6 ระบบบำบัดน้ำเสียมีกากตะกอนเกิดขึ้นประมาณ 0.52 ตัน/ตันผลิตภัณฑ์ และในกากตะกอนมีปริมาณเซลลูโลส 18.75% ดังนั้นในกากตะกอนเยื่อมีเซลลูโลสประมาณ 97.50 กิโลกรัม/ตันผลิตภัณฑ์ จากผลการศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากเศษกระดาษสำนักงานพบว่าผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนเฉลี่ยมีค่า 244.03 ml/g_{cellulose} ดังนั้นปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่คาดว่าจะได้รับจากการหมักประมาณ 23.79 ลูกบาศก์เมตร/ตันผลิตภัณฑ์ และพลังงานความร้อนที่คาดว่าจะได้รับจากแก๊สไฮโดรเจนประมาณ 303.78 เมกะจูล/ตันผลิตภัณฑ์ ซึ่งค่าความร้อนที่คำนวณได้จากแก๊สไฮโดรเจนเทียบเท่ากับพลังงานความร้อนที่ได้จากน้ำมันเตาเกรดซีประมาณ 7.24 ลิตร/ตันผลิตภัณฑ์ จากกำลังการผลิตกระดาษเฉลี่ย 125,000 ตัน/ปี ดังนั้นการใช้ประโยชน์แก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการหมักสามารถประหยัดการใช้น้ำมันเตาเกรดซีได้ประมาณ 904,375 ลิตร/ปี การคำนวณนี้พิจารณาเฉพาะพลังงานที่คาดว่าจะได้การใช้ประโยชน์แก๊สไฮโดรเจน โดยไม่พิจารณาด้านทุนในการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียที่มีอยู่ในปัจจุบันเพื่อรองรับระบบบำบัดที่ศึกษานี้

ตารางที่ 6 การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตจากกากตะกอนเชื้อ

รายการ	หน่วย (ต่อตันผลิตภัณฑ์)	
ปริมาณกากตะกอนเชื้อ	ton/ton _{product}	0.52
ปริมาณเซลลูโลสในกากตะกอน	%	18.75
	kg/ton _{product}	97.50
ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนเฉลี่ยจาก การศึกษาข้างต้น	ml/g _{cellulose}	244.03
ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่คาดว่าจะได้ จากการหมักกากตะกอนเชื้อ	m ³ /ton _{product}	23.79
	kmol/ton _{product}	1.06
ค่าพลังงานความร้อนจากแก๊ส ไฮโดรเจน (HHV)	kJ/mol	286
พลังงานความร้อนที่คาดว่าจะได้จาก แก๊สไฮโดรเจน	MJ/ton _{product}	303.78
ค่าพลังงานความร้อนจากน้ำมันเตา เกรดซี (HHV)	MJ/kg	43.74
ความหนาแน่นของน้ำมันเตาเกรดซี	kg/l	0.96
ทดแทนการใช้ น้ำมันเตาเกรดซีจาก การใช้แก๊สไฮโดรเจน	kg/ton _{product}	6.94
	l/ton _{product}	7.24
กำลังการผลิตกระดาษโดยเฉลี่ย	ton/year	125,000
ประหยัดน้ำมันเตา	l/year	904,375