



รายงานการวิจัย

การออกแบบและทดสอบระบบทำความร้อนสำหรับกกลูกสุกรในโรงเรือน  
คสอตโดยใช้ความร้อนจากน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์

(Design and Testing of the Heating System for Piglet Farrowing  
House Using a Heat Source from the Cooling Water of Engine)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

การออกแบบและทดสอบระบบทำความร้อนสำหรับกกลูกสุกรในโรงเรือน  
คลอดโดยใช้ความร้อนจากน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์  
(Design and Testing of the Heating System for Piglet Farrowing  
House Using a Heat Source from the Cooling Water of Engine)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรชัย อัจฉาญ

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ดร. พยงค์ศักดิ์ จุฑายุเสน

นายพรรษา ลิบลับ

นายจรูญศักดิ์ สมพงษ์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2549

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2549 ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายสมชาย นิตินาฏจนา กรรมการผู้จัดการ บริษัท เอสพีเอ็ม อาหารสัตว์ จำกัด อำเภอปากท่อ จังหวัดราชบุรี ที่อนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่สำหรับการวิจัย นายคงเดช พะสีนาม และนายเฉลิมพล เมืองมุงคุณ นักศึกษาสหกิจศึกษา ที่ทำหน้าที่เก็บรวบรวมข้อมูล

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบทำความร้อนสำหรับกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอด ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อ ออกแบบและทดสอบระบบกกลูกสุกรสำหรับใช้ในโรงเรือนคลอด โดยการนำความร้อนที่เหลือทิ้งจากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพมาใช้เป็นแหล่งความร้อน การศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การศึกษาประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ 2) การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นกก และ 3) การติดตั้งและทดสอบประสิทธิภาพของระบบกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอด

จากการทดลองพบว่า สภาวะการทำงานที่ 60 kW เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้า เพราะมีค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 14% และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 1.22 m<sup>3</sup>/kWh ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเพิ่มขึ้นเป็น 37.7% และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของระบบลดเหลือ 0.45 m<sup>3</sup>/kWh แผ่นกกทำจากพลาสติกที่มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.58 W/m<sup>2</sup>°C สามารถรับแรงกดได้สูงสุด 8.1 kN และทนแรงดันได้สูงสุด 0.35 bar อุณหภูมิที่ผิวแผ่นกกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้า เมื่อป้อนน้ำอุณหภูมิ 44°C เข้าสู่โรงเรือนที่มีอุณหภูมิเฉลี่ย 26°C ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของแผ่นกกเฉลี่ยเป็น 33°C ระบบกกลูกสุกรนี้สามารถให้ความร้อนแก่โรงเรือนคลอดได้ 4.3 โรงเรือน และมีระยะเวลาการคืนทุนที่ 2.5 ปี

## Abstract

The aim of this study was to design and test a heating system for piglets in farrowing house by utilizing the waste heat from a biogas engine as a heat source. The study was separated into three parts: 1) the study on the biogas combined heat and power plant, 2) the investigation on the properties of the heat panel and 3) the installation and testing of the heating system.

From the experiments, the condition producing 60 kW of electrical power was a proper condition for generating the electricity, in which the electrical efficiency and the specific fuel consumption were 14% and 1.22 m<sup>3</sup>/kWh, respectively. Generating both electricity and heat increased the overall efficiency to 37.7% and decreased the specific fuel consumption to 0.45 m<sup>3</sup>/kWh. The heat panel, which was made of a plastic material, had the thermal conductivity of 0.58 W/m<sup>o</sup>C and the maximum compressive force and operating pressure of 8.1 kN and 0.35 bar, respectively. The panel's surface temperature was dependent on the inlet water's temperature. When the hot water of 44<sup>o</sup>C was supplied into the farrowing house with the room temperature of 26<sup>o</sup>C, the average surface temperature was 33<sup>o</sup>C. The developed heating system could provide the heat for 4.3 farrowing houses. The payback period of this project was 2.5 years.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์ .....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การเลี้ยงสุกร.....	3
2.2 ระบบกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอด .....	6
2.3 แก๊สชีวภาพ .....	8
2.4 เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ .....	13
2.5 การใช้เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพเพื่อผลิตไฟฟ้า.....	15
2.6 การนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพมาใช้ประโยชน์ .....	17
2.7 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน ด้วยแก๊สชีวภาพ .....	18
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	
3.1 บทนำ.....	20
3.2 ระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ .....	20
3.3 การถ่ายเทความร้อนในเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ .....	23
3.4 การศึกษาคุณสมบัติของแผ่นกัก .....	27
3.5 การติดตั้งและทดสอบประสิทธิภาพของระบบกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอด .....	30

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

### บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิจารณ์

4.1 ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ.....	32
4.2 คุณสมบัติของแผ่นกัก.....	34
4.3 การติดตั้งและทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักลูกสุกรในโรงเรือนคลอด.....	37
4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนของระบบกักลูกสุกร.....	41

### บทที่ 5 สรุป ปัญหาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป.....	42
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	43

บรรณานุกรม.....	45
-----------------	----

ภาคผนวก ก การทดสอบความแข็งแรงของแผ่นกัก.....	48
--	----

ภาคผนวก ข การทดสอบหาค่าการนำความร้อนของแผ่นกัก.....	51
---	----

ภาคผนวก ค การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบกักลูกสุกรในโรงเรือนคลอด.....	60
--	----

ประวัติผู้วิจัย.....	61
----------------------	----

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ต่อมูลสัตว์แต่ละชนิดใน 1 kg .....	9
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของแก๊สชีวภาพ .....	10
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบค่าความร้อนเทียบกับแก๊สชีวภาพ (60%CH <sub>4</sub> ) ปริมาตร 1 m <sup>3</sup> .....	10
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพดัดแปลง.....	14
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และเครื่องมือวัดในการทดสอบเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ.....	24
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และเครื่องมือวัดในการทดสอบแผ่นกัก.....	30
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์และเครื่องมือวัดในการทดสอบระบบกักลูกสุกรในโรงเรือนคลอด.....	31
ตารางที่ 4.1 การถ่ายเทความร้อนในเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ.....	32
ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ.....	33
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติแผ่นกัก.....	34



## สารบัญรูปลภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ระบบของโรงเรือนสุกร (ก) โรงเรือนระบบเปิด (ข) โรงเรือนระบบปิดที่มีระบบทำ ความเย็นแบบประหยศ.....	4
รูปที่ 2.2 โรงเรือนคตลอด.....	5
รูปที่ 2.3 ระบบกกลูกสุกรในโรงเรือนคตลอด (ก) แบบฟางข้าว (ข) แบบหลอดกก (ค) แบบพื้นกก ...	7
รูปที่ 2.4 แผนภูมิแสดงขั้นตอนหลักของการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ.....	9
รูปที่ 2.5 การใช้ประโยชน์จากการผลิตแก๊สชีวภาพ.....	13
รูปที่ 2.6 ลักษณะเฉพาะของความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	16
รูปที่ 2.7 ลักษณะเฉพาะของความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	17
รูปที่ 3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ (ก) แผนผังของระบบ (ข) การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเข้ากับเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ (ค) ถังเก็บน้ำร้อน	22
รูปที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การวัดสำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในเครื่องยนต์แก๊ส ชีวภาพ (ก) Anemometer (ข) Ultrasonic flow meter (ค) Tachometer (ง) Thermocouple (จ) Power meter.....	24
รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงระบบการวัดในระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานร้อน.....	25
รูปที่ 3.4 การทดสอบความแข็งแรงของแผ่นกด้วยเครื่อง UTM.....	28
รูปที่ 3.5 การทดสอบหาความต้านทานแรงดันน้ำของแผ่นก.....	28
รูปที่ 3.6 การทดสอบหาค่าการนำความร้อนของแผ่นกด้วยเครื่อง Heat Transfer Service Unit H110.....	29
รูปที่ 3.7 การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำร้อนและอุณหภูมิที่ผิวแผ่นก (ก) แผ่นก 1 แผ่น (ข) แผ่นก 3 แผ่น ต่อแบบอนุกรม.....	30
รูปที่ 3.8 แผนผังการติดตั้งแผ่นกและระบบท่อในโรงเรือนคตลอด.....	31
รูปที่ 4.1 ปริมาณความร้อนเหลือทิ้งที่นำกลับมาได้จากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ.....	34
รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบหาความแข็งแรงของแผ่นก (ก) ระยะบูบตัวและแรงกด (ข) สภาพของแผ่นกหลังการทดสอบ.....	35
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบการหาแรงดันที่แผ่นกรับได้.....	36
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของแผ่นก.....	37
รูปที่ 4.5 ติดตั้งแผ่นกและระบบท่อในโรงเรือนคตลอดของ บริษัท เอสพีเอ็ม อาหารสัตว์ จำกัด (ก) ผิวแผ่นกด้านบน (ข) ท่อน้ำด้านล่าง (ค) ระบบท่อของชุดแผ่นก.....	39

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำด้านเข้าและด้านออกโรงเรือน อุณหภูมิผิวแผ่นกกเฉลี่ย และอุณหภูมิของโรงเรือนตลอด .....	40
รูปที่ 4.7 พฤติกรรมการนอนของลูกสุกรบนแผ่นกกที่มีน้ำร้อนไหลผ่านในโรงเรือนตลอด .....	41
รูปที่ 5.1 แผ่นกกลูกสุกรแบบใหม่ (ก) แผ่นกก ขนาด 60 cm x 120 cm (ข) ส่วนประกอบของ แผ่นกก .....	44

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$C_{Pg}$	ความจุความร้อนจำเพาะของแก๊สชีวภาพ, (kJ/m <sup>3</sup> °C)
$C_{Pw}$	ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, (kJ/m <sup>3</sup> °C)
$HHV_g$	ความร้อนสูงของแก๊สชีวภาพ, (MJ/m <sup>3</sup> )
$I$	กระแสไฟฟ้า, (A)
$f$	ความถี่ของแรงดันป้อนเข้า, (Hz)
$\dot{m}_C$	อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น, (m <sup>3</sup> /s)
$\dot{m}_E$	อัตราการไหลของน้ำผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, (m <sup>3</sup> /s)
$\dot{m}_g$	อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ, (m <sup>3</sup> /s)
$N$	ความเร็วรอบเครื่องยนต์, (rpm)
$N_n$	ค่าความเร็วพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ, (rpm)
$N_s$	ความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ, (rpm)
$P$	จำนวนขั้วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
$P_b$	กำลังของเครื่องยนต์, (kW)
$P_e$	กำลังไฟฟ้า, (kW)
$Q$	พลังงานความร้อน, (kW)
$Q_{coolant}$	พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็น, (kW)
$Q_{EGR}$	พลังงานความร้อนของแก๊สไอเสียที่นำกลับมาได้, (kW)
$Q_{electrical}$	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้, (kW)
$Q_{fuel}$	พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แก๊สชีวภาพ, (kW)
$Q_{loss}$	พลังงานความร้อนที่สูญเสีย, (kW)
$S$	สลีปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
$sfc$	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ, (m <sup>3</sup> /kWh)
$T$	แรงบิดของเครื่องยนต์, (Nm)
$T_{Cin}$	อุณหภูมิของน้ำด้านเข้าเครื่องยนต์, (°C)
$T_{Cout}$	อุณหภูมิของน้ำด้านเข้าเครื่องยนต์, (°C)
$T_{Ein}$	อุณหภูมิของน้ำด้านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, (°C)
$T_{Eout}$	อุณหภูมิของน้ำด้านออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, (°C)
$V$	ความต่างศักย์ไฟฟ้า, (V)

$\eta_{heating}$	ประสิทธิภาพการทำความร้อน
$\eta_{electrical}$	ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$\rho_g$	ความหนาแน่นของแก๊สชีวภาพ, (kg/m <sup>3</sup> )
$\cos \phi$	เพาเวอร์แฟคเตอร์ทางไฟฟ้า

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การกกลูกสุกรมีความสำคัญต่อการเลี้ยงสุกรในโรงเรือนคลอดเป็นอย่างมาก เพราะว่าแม่สุกรและลูกสุกรที่อาศัยอยู่ด้วยกันต้องการอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับแม่สุกรมีค่าประมาณ 18–21 องศาเซลเซียส ขณะที่อุณหภูมิสำหรับลูกสุกรมีค่าประมาณ 32–35 องศาเซลเซียส การกกลูกสุกรช่วยลดอัตราการเสียชีวิตของลูกสุกร อันเนื่องมาจากการติดเชื้อและการถูกแม่สุกรทับ

การกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอดนิยมใช้หลอดกก (heat lamp) โดยใช้กระสอบกันเป็นคอกเพื่อกักเก็บความร้อนบริเวณโซนกก และใช้พลังงานในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ไฟฟ้า แก๊สหุงต้ม หรือแก๊สชีวภาพ เป็นแหล่งความร้อน อย่างไรก็ตามระบบกกลูกสุกรแบบนี้ใช้พลังงานค่อนข้างสูงและมีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น หลอดกกมีอายุการใช้งานที่สั้นและขาดบ่อยเมื่อเกิดไฟฟ้าตกหรือกระชาก เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการนำระบบการให้ความร้อนแก่ลูกสุกรแบบพื้นกกมาใช้ ซึ่งมีการทดสอบจนเป็นที่ยอมรับว่า สามารถกระจายความร้อนบริเวณโซนกกให้แก่ลูกสุกรในโรงคลอดได้เป็นอย่างดี

พื้นกกลูกสุกร (piglet heating panel) เป็นอุปกรณ์สำหรับให้ความอบอุ่นแก่ลูกสุกรที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ ซึ่งปัจจุบันสามารถผลิตเพื่อการค้า เช่น พื้นกกของบริษัท Big Dutchman International GmbH และ MIK International AG เป็นต้น โดยทั่วไปพื้นกกจะทำมาจากวัสดุเชิงประกอบที่ทนทานต่อความร้อน ภายในมีขดลวดนำความร้อนหรือท่อน้ำร้อนซึ่งได้รับพลังงานความร้อนจากไฟฟ้าหรือหม้อต้มน้ำ ตามลำดับ พื้นกคนั้นนอกจากจะให้ความอบอุ่นแก่ลูกสุกรในบริเวณโซนกกได้แล้ว ยังสามารถใช้แทนโครงสร้างของโรงเรือนในส่วนของพื้นคอกได้อีกด้วย สำหรับประเทศไทยไม่นิยมใช้พื้นกกในการเลี้ยงสุกร เนื่องจากยังไม่มีผู้ผลิตภายในประเทศและไม่มีเทคโนโลยีของพื้นกกที่เหมาะสมกับโรงเรือนที่ใช้อยู่ อย่างไรก็ตามฟาร์มสุกรบางฟาร์มได้มีการนำระบบพื้นกกมาใช้ในโรงเรือนอนุบาล โดยสร้างพื้นกกให้เป็นพื้นคอกตลอดความยาวของโรงเรือนและอาศัยความร้อนจากหม้อต้มน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแก๊สชีวภาพ เนื่องจากระบบนี้ทำให้พื้นกกมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันทั้งโรงเรือน จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในโรงคลอด

นอกจากนี้ ในปัจจุบันฟาร์มสุกรในประเทศไทยนิยมติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพเพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและกำจัดของเสียภายในฟาร์ม ระบบผลิตไฟฟ้าประเภทนี้ ส่วนใหญ่ประกอบด้วย เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพและมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยทั่วไปขณะปฏิบัติงาน ความร้อนของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพบางส่วนจะถูกถ่ายเทให้กับระบบระบายความร้อนและแก๊สไอเสีย เพื่อรักษา

อุณหภูมิของเครื่องยนต์ให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม การวิจัยเพื่อนำความร้อนเหลือทิ้งเหล่านี้มาใช้ ประโยชน์กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงวิกฤติทางด้านพลังงาน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อออกแบบและทดสอบระบบกักเก็บความร้อนสำหรับใช้ในโรงเรือนปลอด โดยใช้ความร้อนจากน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ ซึ่งเป็นการนำพลังงานความร้อนที่เหลือทิ้งกลับมาใช้ ประโยชน์ ทำให้สามารถลดต้นทุนด้านพลังงานในกระบวนการผลิตสุกรได้

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

พื้นที่ศึกษาในขั้นตอนการทดสอบระบบกักเก็บความร้อน ครอบคลุมพื้นที่ 1 โรงเรือน (56 คอก) โดยได้รับความอนุเคราะห์ อุปกรณ์ พื้นที่ทำการทดสอบและติดตั้งระบบจากฟาร์มสุกรของ บริษัท เอสพีเอ็ม อาหารสัตว์ จำกัด อำเภอปากท่อ จังหวัดราชบุรี

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้เกิดการเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตสุกรได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วยเพิ่มอัตราการรอดของลูกสุกรหลังคลอดได้ และทำให้ลูกสุกรแข็งแรงไม่ติดเชื้อง่าย
- 2) สามารถนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งก่อให้เกิดการอนุรักษ์พลังงานอันเป็นยุทธศาสตร์อย่างหนึ่งของชาติ
- 3) สามารถเป็นแนวทางที่ฟาร์มสุกรอื่นๆ จะนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้ได้ เพราะการออกแบบ จะเน้นความง่าย ระบบไม่ซับซ้อน สะดวกแก่การใช้งาน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การเลี้ยงสุกร

การเลี้ยงสุกรเป็นอาชีพหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทย สุกรเป็นสินค้าเกษตรกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ ทั้งทางด้านการผลิต การบริโภค และการค้าระหว่างประเทศ ปัจจุบันการเลี้ยงสุกรในประเทศไทยได้มีการพัฒนาด้านพันธุ์ อาหาร การจัดการ และการสุขาภิบาล จนทัดเทียมกับต่างประเทศ ปัจจัยหลักที่ทำให้การเลี้ยงสุกรประสบความสำเร็จ ประกอบด้วย 1) สุกรพันธุ์ดี 2) อาหารดี 3) โรงเรือนดี 4) การจัดการเลี้ยงดูดี และ 5) การป้องกันโรคดี (กรมปศุสัตว์, 2548)

##### 2.1.1 ระบบของโรงเรือนสุกร

โดยทั่วไประบบของโรงเรือนสุกรสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ (กรมปศุสัตว์, 2548) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 คือ

1. โรงเรือนระบบเปิด หมายถึง โรงเรือนสุกรที่ควบคุมสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ และอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพของอากาศรอบโรงเรือน
2. โรงเรือนระบบปิด หมายถึง โรงเรือนสุกรที่สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมกับความเป็นอยู่ของสุกร อันได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น การระบายอากาศ และแสงสว่าง สามารถป้องกันพาหะนำโรคได้ โรงเรือนที่มีระบบทำความเย็นแบบระเหย (Evaporative Cooling System) เป็นตัวอย่างของโรงเรือนระบบปิดที่ได้รับความนิยมอย่างมาก ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วย 1) ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน 2) พัดลมดูดอากาศ 3) เครื่องสูบน้ำ และ 4) ชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ถึงแม้ว่าราคาทุนของโรงเรือนประเภทนี้ค่อนข้างสูง แต่สุกรจะอาศัยอย่างสบายและเจริญเติบโตเร็ว

การสร้างโรงเรือนสุกรนั้นไม่มีข้อจำกัดตายตัวว่า จะต้องสร้างให้ถูกตามที่ได้กำหนด เพราะการสร้างนั้นจะต้องให้เหมาะสมกับสภาพอากาศและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างแต่ละชนิด อย่างไรก็ตามการก่อสร้างโรงเรือนสุกรจำเป็นต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

- เป็นโรงเรือนที่สุกรอยู่ได้อย่างสบาย อากาศภายในไม่ร้อนจัดการระบายอากาศเป็นไปโดยสะดวก ไม่มีกลิ่นอับเหม็น พื้นคอกแห้งไม่ชื้น
- สามารถใช้เนื้อที่ภายในโรงเรือนให้เป็นประโยชน์มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

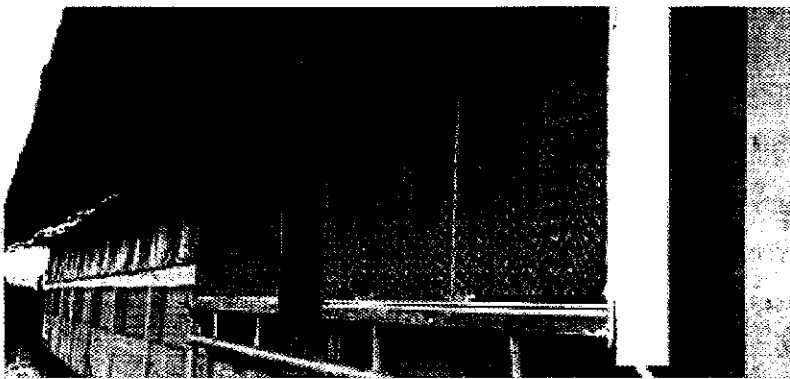
- ควรออกแบบและจัดแบ่งคอกตามประเภทและขนาดของสุกร ให้มีความคล่องตัวในการปฏิบัติงาน ทำให้เกิดความรวดเร็วและประหยัดแรงงาน ซึ่งจะช่วยให้คนงานแต่ละคนสามารถรับผิดชอบต่อสุกรได้มากตัวขึ้น

- โรงเรือนสุกรที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน สามารถยับยั้งหรือเปลี่ยนแปลงสภาพของคอกภายใน มาใช้เลี้ยงสุกรได้ตามขนาดและประเภทตามต้องการ โดยที่ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนโครงสร้างหลัก ๆ ของโรงเรือน และไม่ทำให้เกิดเสียเนื้อที่ภายในไปโดยเปล่าประโยชน์

- ควรดูหลักเศรษฐกิจสัมพันธ์กับการวางแผนการเลี้ยง คือ จะต้องคำนึงถึงอายุการใช้งานว่าจะมีโครงการเลี้ยงยาวนานแค่ไหน มีประมาณสุกรที่จะใช้เลี้ยงมากน้อยเท่าใด เพื่อที่จะได้จัดหาวัสดุการก่อสร้างมาใช้ให้เหมาะสม



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 ระบบของ โรงเรือนสุกร (ก) โรงเรือนระบบเปิด (ข) โรงเรือนระบบปิดที่มีระบบทำความเย็นแบบระเหย (กรมปศุสัตว์, 2548)



### 2.1.2 โรงเรือนคลอด

โรงเรือนคลอดเป็นโรงเรือนสำหรับแม่สุกรท้องแก่ใกล้คลอดจนถึงหลังคลอดลูกใหม่ ๆ อยู่อาศัย คอกคลอดในโรงเรือนคลอดมีความสำคัญต่อการผลิตสุกรอย่างมาก การปล่อยให้แม่สุกรคลอดลูกในคอกธรรมดาที่ไม่ได้จัดทำไว้ให้สำหรับการคลอดโดยเฉพาะ ลูกสุกรมักถูกแม่ทับตายในอัตราที่สูง การสร้างคอกคลอดสามารถลดปัญหานี้ได้ โดยปกติแม่สุกร 1 ตัว จะมีบริเวณคอกคลอดขนาด 2 m x 2.2 m สูง 1 m ซึ่งจะประกอบด้วย ช่องสำหรับแม่สุกรขนาด 0.6 m x 2.2 m สูง 1 m เพื่อบังคับให้แม่สุกรอยู่กับที่ พลิกตัวไปมาได้เท่านั้น ส่วนลูกสุกรจะวิ่งเข้าออกได้ และพื้นที่ที่เหลือจะเป็นบริเวณสำหรับลูกสุกร พื้นคอกของโรงเรือนคลอดจะเป็นพื้นสแลต (slat floor) ซึ่งทำมาจากคอนกรีตที่ไม่หยาบหรือลื่นจนเกินไป มีช่องสำหรับให้น้ำไหลจากพื้นลงไปด้านล่างได้ ตัวอย่างของโรงเรือนคลอดถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โรงเรือนคลอด

## 2.2 ระบบกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอด

การกกลูกสุกรมีความสำคัญต่อลูกสุกรอย่างมาก เนื่องจากลูกสุกรแรกเกิดต้องการความอบอุ่น เพื่อให้ร่างกายสามารถปรับตัวเข้ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งจะทำให้ลูกสุกรแข็งแรงเร็วขึ้นและมีภูมิต้านทานโรคได้มากขึ้น โดยปกติลูกสุกรต้องการอุณหภูมิประมาณ 30–32 °C (Mount, 1963) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกกลูกสุกรให้ความอบอุ่นอยู่เสมอ ประมาณ 80% ของการสูญเสียลูกสุกรเกิดขึ้นในช่วง 3 วันแรกของชีวิตลูกสุกร และสาเหตุการสูญเสียเกิดจากการถูกทับโดยแม่สุกร (Weary et al., 1998) เพราะฉะนั้นเพื่อเป็นการลดการสูญเสียลูกสุกร พื้นที่สำหรับกกลูกสุกรต้องอบอุ่นเพียงพอ (Ziron and Hoy, 2003) รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของระบบกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอด

### 2.2.1 การกกลูกสุกรโดยใช้ฟางข้าว

การกกลูกสุกรแรกเกิดจะใช้ฟางข้าวกองให้หนาประมาณ 2 คืบ แล้วนำลูกสุกรมาเก็บไว้โดยใช้ส้อมขึงไว้เพื่อป้องกันมิให้ลูกสุกรหนี แล้วใช้ผ้าปิดส้อมอีกชั้นหนึ่ง เพื่อป้องกันมิให้ลมโกรกจะทำให้อุณหภูมิภายในส้อมอุ่นเสมอ แต่ต้องเปิดให้ลูกสุกรกินนมแม่ทุกครั้งที่มีแม่สุกรเรียกลูกกินนม และหลังจากลูกสุกรกินนมเสร็จแล้ว ให้นำลูกสุกรเข้าที่เดิมทันทีทำให้ลูกสุกรแข็งแรงและโตเร็ว ถ้าฟางเปียกชื้นจากฉี่ลูกสุกรให้รีบเปลี่ยนฟางเอาชุดเก่าออกไปใส่ฟางใหม่เข้าไป เพื่อรักษาพื้นที่แห้งและสะอาดอยู่เสมอ ทำอย่างนี้ 3–4 วัน ลูกสุกรจะสามารถอยู่ในสภาพอากาศปกติได้อย่างดี

### 2.2.2 ระบบกกลูกสุกรแบบหลอดกก

หลอดกกที่ใช้ในการกกลูกสุกรมีทั้งแบบหลอดไฟ แบบหลอดอินฟราเรด (Infrared lamp) และหัวกกใช้แก๊สแอลพีจี (LPG) หรือแก๊สชีวภาพ ซึ่งจะอาศัยหลักการแผ่รังสีความร้อนให้ความอบอุ่นแก่ลูกสุกร (Xin et al., 1997) โดยทั่วไป ประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนของการกกแบบนี้ค่อนข้างต่ำ เกิดการสูญเสียความร้อนให้กับบรรยากาศ บางครั้งกรณีโรงเรือนเปิด หัวกกอาจจะดับจากการกรรโชกของลมซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียแก๊สเชื้อเพลิงโดยเปล่าประโยชน์ (จิรกุล และ วิรัชย์, 2546)

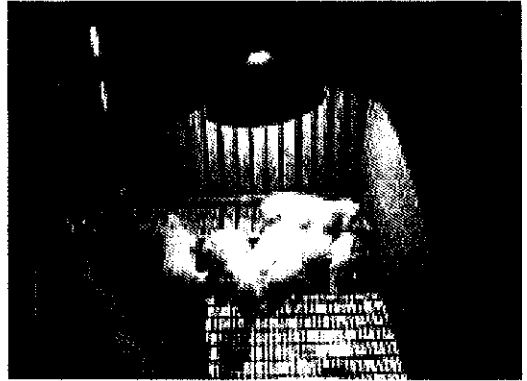
### 2.2.3 ระบบกกลูกสุกรแบบพื้นกก

ระบบกกลูกสุกรแบบพื้นนั้นเป็นการออกแบบพื้นสำหรับให้ลูกสุกรนอน โดยมีแผ่นความร้อนหรือท่อทำความร้อนอยู่ภายในพื้น เพื่อส่งความร้อนให้กับพื้นและให้ความอบอุ่นแก่ลูกสุกร โดยการนอนสัมผัสพื้นโดยตรง การกกลูกสุกรแบบนี้สามารถกระจายความร้อนให้กับลูกสุกรได้อย่างทั่วถึง โดยที่ลูกสุกรแต่ละตัวจะได้รับอุณหภูมิเดียวกัน (de Baey-Ernsten, et al., 1995; Ziron and Hoy, 2003; Cronin, et al., 1995) พื้นกกลูกสุกร สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบไฟฟ้า และแบบน้ำร้อน (Big Dutchman, 2005; MIK, 2007; Zhang and Xin, 2000)

Pandorfi and da Silva (2005) ทำการวิจัยเพื่อประเมินและเปรียบเทียบพฤติกรรมการอยู่อาศัยของลูกสุกรที่มีต่อระบบกกลูกสุกร การศึกษานี้ใช้ระบบกกลูกสุกร 4 แบบ คือ แบบพื้นกก แบบหลอดไฟ แบบขดลวดความร้อน และแบบหลอดอินฟราเรด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ลูกสุกรมีความถี่ในการใช้งานระบบกกแบบพื้นกมากกว่าชนิดอื่น ในทำนองเดียวกัน ผลการศึกษาของ Xin and Zhang (1999) แสดงให้เห็นว่า ในสภาพแวดล้อมที่มีลมแรงและหนาวเย็น ลูกสุกรชอบอาศัยบนระบบกกแบบพื้นกมากกว่าแบบหลอดกก



(ก)



(ข)

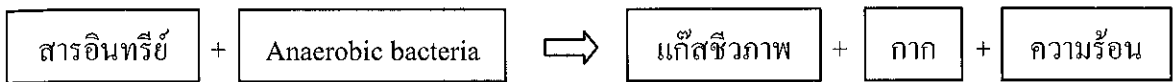


(ค)

รูปที่ 2.3 ระบบกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอด (ก) แบบฟางข้าว (ข) แบบหลอดกก (ค) แบบพื้นกก

### 2.3 แก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพ คือ แก๊สที่เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ ในสภาพที่ขาดแคลนออกซิเจน โดยปฏิกิริยาการย่อยสลายที่กระทำโดยแบคทีเรีย กลุ่ม anaerobic bacteria ซึ่งเรียกระบวนการนี้ว่าการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยมีปฏิกิริยาดังนี้



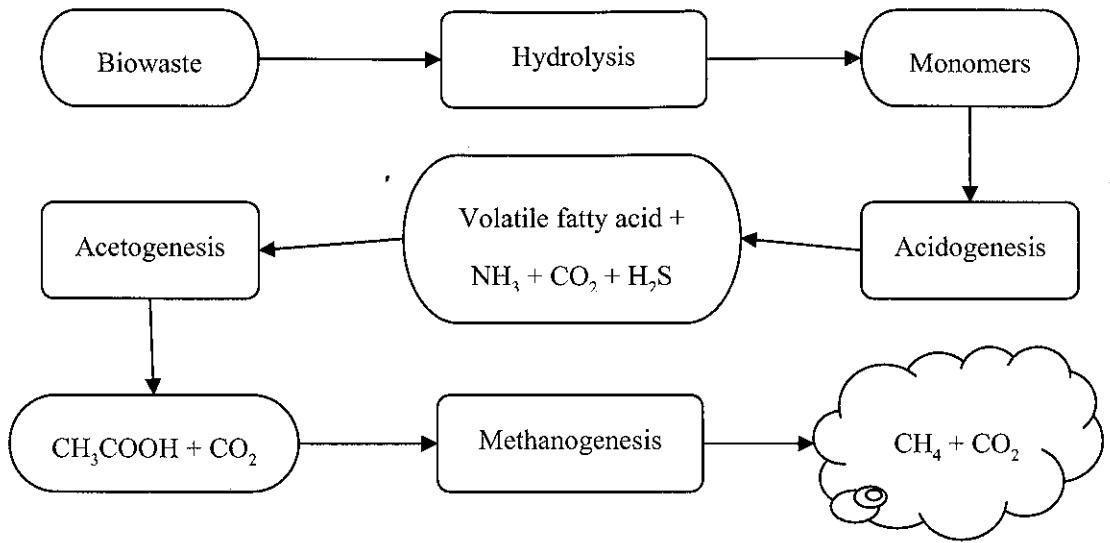
ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนที่สำคัญ ซึ่งถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ประกอบด้วย

1. Hydrolysis เป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่และมักจะไม่สามารถละลายน้ำให้แตกตัวมีโมเลกุลเล็กลงกลายเป็นสาร โมเลกุลเดี่ยวจำพวก น้ำตาล โมเลกุลเดี่ยว (simple sugars) กรดอะมิโน (amino acids) และกรดไขมัน (fatty acids) โดย hydrolytic bacteria เพื่อให้สามารถซึมผ่านเซลล์ของแบคทีเรียได้ และละลายน้ำได้ดียิ่งขึ้น

2. Acidogenesis เป็นปฏิกิริยาทางชีวภาพที่ย่อยสลายสาร โมเลกุลเดี่ยวให้กลายเป็นกรดไขมันที่ระเหยได้ง่าย (volatile fatty acid) โดย acidogenic bacteria ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำให้เกิด แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ด้วย

3. Acetogenesis เป็นปฏิกิริยาทางชีวภาพที่กรดไขมันที่ระเหยได้ง่าย ถูกเปลี่ยนให้เป็น กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) และ  $\text{CO}_2$  โดยแบคทีเรียกลุ่ม acetolclastic bacteria

4. Methanogenesis เป็นปฏิกิริยาทางชีวภาพที่กรดอะซิติกถูกเปลี่ยนเป็น มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และ  $\text{CO}_2$  โดย methanogenic bacteria ในขั้นตอนนี้  $\text{H}_2$  จะถูกใช้ไป



รูปที่ 2.4 แผนภูมิแสดงขั้นตอนหลักของการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ

การหมักมูลสัตว์แบบไร้ออกซิเจน ทำให้สารอินทรีย์ในมูลสัตว์ประมาณ 80% ถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สมีเทน จากการสำรวจพบว่า ปริมาณแก๊สชีวภาพ (ซึ่งมีแก๊สมีเทนอยู่ 60-80%) ที่ผลิตได้จากมูลสัตว์ในแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ต่อมูลสัตว์แต่ละชนิดใน 1 kg (Werner, 1989)

ชนิดมูลสัตว์	ค่าเฉลี่ยแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ต่อมูลสัตว์ 1 kg
สุกร	360 liter
วัว	200 liter
ไก่	370 liter
ม้า	200 liter
แกะ	160 liter

### 2.3.1 คุณสมบัติของแก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพประกอบด้วย แก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เป็นหลัก โดยมี  $\text{CH}_4$  ประมาณ 60-80%,  $\text{CO}_2$  ประมาณ 20-40% และ  $\text{H}_2\text{S}$  1% เนื่องจาก  $\text{CO}_2$  เป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟ ฉะนั้นในการติดไฟจึงขึ้นอยู่กับ  $\text{CH}_4$  แก๊สชีวภาพมีน้ำหนักเบากว่าอากาศ และมีความดันต่ำ อีกทั้งยังเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลวได้ยาก โดยความดันที่ทำให้แก๊สชีวภาพกลายเป็นของเหลว หรือเปลี่ยนสถานะได้จะอยู่ที่ 200-300 bar และอุณหภูมิกลั่นตัวเป็นของเหลวจะอยู่ที่  $-161^\circ\text{C}$  นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ส่วนตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนเทียบเท่ากับแก๊สชีวภาพ

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของแก๊สชีวภาพ

คุณสมบัติ	
ค่าความร้อนสูง (60% $\text{CH}_4$ ) ( $HHV_g$ ), $\text{MJ/m}^3$	21
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $C_{pg}$ ), $\text{kJ/m}^3\text{ }^\circ\text{C}$	1.6
ความหนาแน่น ( $\rho_g$ ), $\text{kg/m}^3$	1.15
ความเร็วเปลวไฟ, $\text{cm/s}$	25
อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี	6.19
อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศ, $^\circ\text{C}$	650

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบค่าความร้อนเทียบเท่ากับแก๊สชีวภาพ (60% $\text{CH}_4$ ) ปริมาตร  $1 \text{ m}^3$   
(โครงการแก๊สชีวภาพไทย-เยอรมัน, 2545)

ชนิด	ปริมาณ
1. แก๊สหุงต้ม (LPG)	0.47 kg
2. น้ำมันเบนซิน	0.67 liter
3. น้ำมันดีเซล	0.60 liter
4. ฟืนไม้	1.50 kg

### 2.3.2 รูปแบบบ่อหมักแก๊สชีวภาพสำหรับฟาร์มสุกร

รูปแบบบ่อหมักแก๊สชีวภาพที่มีการส่งเสริมให้นำมาใช้จัดการน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกร เพื่ออนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม ได้แก่

1. บ่อโดมคงที่ (Fixed Dome) เป็นบ่อหมักแก๊สชีวภาพที่เหมาะสมสำหรับฟาร์มเลี้ยงสุกรขนาดเล็ก (ฟาร์มที่เลี้ยงสุกรเทียบเท่าสุกรขุน ไม่เกิน 500 ตัว) ลักษณะบ่อหมัก ส่วนใหญ่สร้างด้วยคอนกรีตหรือก่ออิฐ โบกปูนฝังอยู่ในดิน โดยจะมีท่อเพื่อเติมมูลสุกรและท่อให้มูลสุกรไหลออก แก๊สชีวภาพจะเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของโดม โดยจะมีท่อเพื่อดึงแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์ ข้อเสียของบ่อแบบนี้คือ แรงดันของแก๊สไม่คงที่

2. บ่อหมักแบบรางตามด้วยบ่อหมักเร็วน้ำใส (Channel Digester + Upflow Anaerobic Sludge Blanket) เป็นบ่อหมักแก๊สชีวภาพ ที่พัฒนาขึ้น โดย สถานเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งเป็นบ่อหมักที่ได้มีการส่งเสริมให้ใช้ในฟาร์มเลี้ยงสุกรขนาดกลางและขนาดใหญ่ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนการทำงานต่อเนื่องกัน คือ

- บ่อหมักแบบราง (Channel Digester) ทำหน้าที่แยกของเสียส่วนขุ่นและส่วนใสออกจากกัน โดยของเสียส่วนขุ่นจะถูกหมักในบ่อหมักนี้จนอยู่ในสภาวะที่เสถียร (stabilized) ของเสียส่วนใสซึ่งมีปริมาณ 80-90% ของของเสียทั้งหมด จะไหลผ่านไปยังบ่อหมักแบบ UASB

- บ่อหมักเร็วน้ำใส (Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB) สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ในน้ำเสีย ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลาย จะถูกย่อยสลายในบ่อหมัก UASB และกลายเป็นแก๊สชีวภาพ อัตราส่วนปริมาตรของบ่อหมักแบบรางต่อปริมาตรของบ่อหมักแบบ UASB คือ ประมาณ 2-3 ต่อ 1 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะคุณสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มที่เข้าสู่บ่อหมัก

3. บ่อหมักเร็วน้ำขุ่น (High suspension solids - Upflow Anaerobic Sludge Blanket: H-UASB) เป็นบ่อหมักที่ถูกปรับปรุงจากบ่อหมักแบบ UASB เพื่อแก้ปัญหาการอุดตันระบบหัวจ่ายน้ำของ UASB อันเนื่องมาจากตะกอนของมูลสุกร โดยนำบ่อปรับสภาพ (Stabilizing Pond หรือ EQ) จากระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมมาใช้ เรียกว่า Buffer tank ซึ่งทำหน้าที่แยกตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำเสียและมูลสุกรให้มีปริมาณน้อยที่สุด พร้อมกันนี้ยังได้นำแผ่นยาง PE ที่ใช้คลุมบ่อหมักแก๊สชีวภาพแบบราง มาคลุมบน Buffer tank ทำหน้าที่เก็บแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้จากระบบ UASB จากผลการทดลองใช้งานในฟาร์มสุกรขนาดใหญ่ พบว่า บ่อหมักประเภทนี้สามารถทำงานได้ดีมีประสิทธิภาพสูง

4. บ่อหมักแบบพลาสติกคลุมบ่อดิน (Covered Lagoon) เป็นบ่อหมักแก๊สชีวภาพที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นบ่อดิน ด้านบนคลุมด้วยผืนพลาสติกขนาดใหญ่ เพื่อรวบรวมแก๊สชีวภาพที่

เกิดขึ้นก่อนนำแก๊สไปใช้ประโยชน์ ข้อดีของบ่อแก๊สแบบนี้คือ มีราคาถูก แต่มีข้อเสียคือ มีการสะสมของกากมูลสุกรภายในบ่อ ทำให้เมื่อใช้ไปได้ระยะหนึ่งจำเป็นต้องเปิดพลาสติกออกเพื่อนำกากมูลสุกรที่ตกตะกอนออก และอีกประการหนึ่งพื้นของบ่อแบบนี้เป็นพื้นดิน ดังนั้นน้ำมูลสุกรเข้มข้นจะซึมลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน ทำให้น้ำใต้ดินเสียเป็นอันตรายกับสิ่งแวดล้อมมาก บางประเทศห้ามไม่ให้มีการก่อสร้างบ่อแก๊สชนิดนี้ แต่ในปัจจุบันมีการปรับปรุงแก้ไข โดยในขณะที่ทำการสร้างบ่อจะมีการบดอัดพื้นพื้นหลุมให้แน่นแล้วปูพื้นด้วยพลาสติก เพื่อป้องกันการซึมผ่านของน้ำเสียซึมลงสู่ชั้นดิน

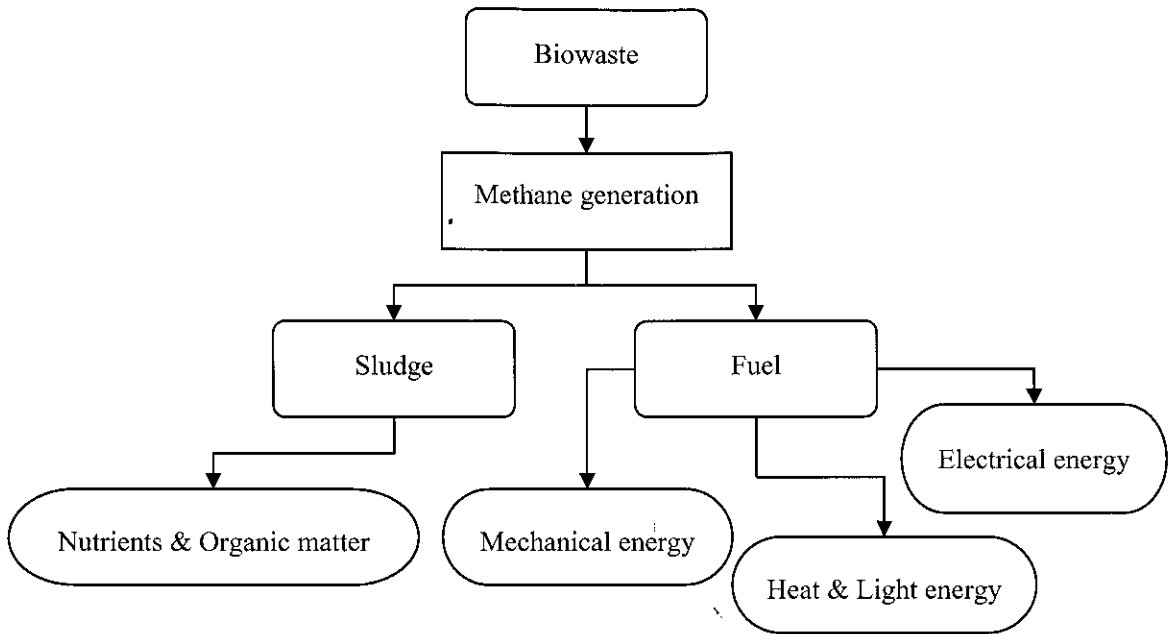
### 2.3.3 การใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพที่ได้จากบ่อหมักแบบ ไร้ออกซิเจนแบบต่าง ๆ นั้น ส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำ เนื่องจากแก๊สชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์นั้น จะต้องผ่านชั้นน้ำก่อนที่จะเข้าสู่ชั้นของแก๊ส ดังนั้นจึงควรทำการลดปริมาณของไอน้ำในแก๊สก่อนนำไปใช้งาน เช่น การส่งแก๊สชีวภาพไปตามท่อที่ฝังอยู่ใต้ดินซึ่งมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ จะทำให้เกิดการกลั่นตัวของไอน้ำ แก๊สชีวภาพจึงมีปริมาณไอน้ำลดลง เป็นต้น

ในบางระบบแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ จะมีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ปนเปื้อนอยู่มาก ซึ่งอาจจำเป็นต้องให้แก๊สชีวภาพผ่านระบบลดปริมาณ  $H_2S$  (desulphurization system) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เหล็กออกไซด์ ( $FeO$ ) เป็นตัวกลางทำให้เกิดปฏิกิริยากับ  $H_2S$  เป็นผลให้เกิดเหล็กซัลไฟด์และน้ำ ดังสมการ  $FeO + H_2S \rightarrow FeS + H_2O$  โดย  $FeS$  ที่เกิดขึ้นหลังจากใช้งานแล้วสามารถนำไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เพื่อปลดปล่อยซัลเฟอร์ ให้กลับเป็นเหล็กออกไซด์ได้อีก ดังปฏิกิริยา  $2FeS + O_2 \rightarrow FeO$  ซึ่ง  $FeO$  ที่ได้นั้นสามารถนำกลับไปใช้เป็นตัวกลางทำให้เกิดปฏิกิริยากับ  $H_2S$  ได้อีก

แก๊สชีวภาพที่มีความสะอาดเพียงพอ สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนแก๊สหุงต้ม น้ำมันเบนซิน และน้ำมันดีเซล ในอุปกรณ์ต่างๆ ได้ เช่น เตาหุงต้ม ตะเกียงแสงสว่าง หม้อต้มไอน้ำ เครื่องกลูกสุกร/ไก่ และเครื่องยนต์สันดาปภายใน (วิระพันธ์, 2538) ดังแสดงในรูปที่ 2.5





รูปที่ 2.5 การใช้ประโยชน์จากการผลิตแก๊สชีวภาพ

#### 2.4 เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ

การใช้แก๊สชีวภาพมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในนั้น จะต้องปรับปรุงลักษณะบางประการของเครื่องยนต์เพื่อที่จะทำให้เครื่องยนต์นั้น เหมาะสมแก่การใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงและสามารถทำงานได้ดีใกล้เคียงกันกับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน โดยทั่วไปการดัดแปลงเครื่องยนต์เพื่อนำมาใช้กับแก๊สชีวภาพ สามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี (สมบูรณ์, 2546)

1. การนำเครื่องยนต์ดีเซลมาใช้ร่วมกับแก๊สชีวภาพ หรือเรียกว่า ใช้เชื้อเพลิงคู่ (Gas-Diesel Engine or Dual-Fuel Engine) โดยใช้แก๊สชีวภาพผสมกับอากาศเป็นไอดีเข้าห้องเผาไหม้ ส่วนการจุดระเบิดยังใช้น้ำมันดีเซลฉีดเข้าห้องเผาไหม้ วิธีการแบบนี้เครื่องยนต์ต้องการใช้น้ำมันดีเซลเพื่อการจุดระเบิดประมาณ 10%-20% ของการใช้เครื่องยนต์ดีเซลปกติ ดังนั้นทำให้ประหยัดน้ำมันดีเซลได้ 80%-90% และไม่ต้องมีการดัดแปลงลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลแต่อย่างใด

2. การนำเครื่องยนต์ดีเซลมาดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์แก๊สโซลีนเพื่อใช้กับแก๊สชีวภาพ (Gas-Otto Engine) จากการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ดีเซลที่อัดอากาศให้มีความดันและอุณหภูมิสูง จากนั้นฉีดน้ำมันดีเซลเข้าไปให้เกิดการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ เปลี่ยนมาเป็น การอัดอากาศผสมแก๊สชีวภาพให้มีความดัน และอุณหภูมิสูง จากนั้นจึงจุดระเบิดด้วยประกายไฟจากหัวเทียน วิธีการแบบนี้เครื่องยนต์ต้องได้รับการดัดแปลงโดยการเปลี่ยนอัตราส่วนการอัด (compression ratio) ให้ได้ 10-12

และเพิ่มอุปกรณ์ผสมอากาศกับแก๊สชีวภาพหรือคาร์บูเรเตอร์ (carburetor) เข้าไป ซึ่งเป็นวิธีการที่ค่อนข้างยุ่งยาก

3. การนำเครื่องยนต์แก๊สโซลีนมาใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง (Gas-Otto Engine) วิธีการแบบนี้เครื่องยนต์ต้องได้รับการดัดแปลงโดยการเปลี่ยนอัตราส่วนการอัดให้ได้ 10-12 และต้องปรับปรุงคาร์บูเรเตอร์จากเดิมที่ผสมน้ำมันเบนซินกับอากาศ มาเป็นผสมอากาศกับแก๊สชีวภาพเป็นไอดีแทน

ในปัจจุบัน ประเทศไทยมีการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพดัดแปลงกันอย่างกว้างขวาง (ประเทือง และคณะ, 2546; สมบูรณ์, 2546; สมมาส และคณะ, 2549) และมีการนำมาใช้งานจริง โดยเฉพาะในฟาร์มเลี้ยงสุกร (วิระชัยฟาร์ม, บริษัท เอสพีเอ็ม อาหารสัตว์ จำกัด) ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ดัดแปลงจะต่ำกว่า ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงประมาณ 2 เท่า (กิตติ, 2548)

Mitzlaff (1988) เปรียบเทียบคุณสมบัติบางประการของ Gas-Diesel Engine และ Gas-Otto Engine ไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพดัดแปลง

Design Data	Gas-Diesel Engine	Gas-Otto Engine
Compression ratio	15-18	10-12
Excess air ratio	1.3-4.0	0.9-1.3
Specific fuel consumption, $m^3/kWh$	0.55-0.75 (+ pilot fuel)	0.65-1.0
Exhaust gas temperature, °C	500-700	500-900
Ignition type	Self-ignition of pilot fuel injected into a hot compressed mixture of air and gas which is ignited by the pilot fuel subsequently	As in other Otto engines

## 2.5 การใช้เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพเพื่อผลิตไฟฟ้า

ในการผลิตไฟฟ้า สามารถนำเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพมาต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. ไดนาโม (generator) วิธีนี้จะต้องมีอุปกรณ์หรือวงจรควบคุมความเร็วรอบของการทำงานให้คงที่ เพื่อให้แรงดันและความถี่ทางไฟฟ้าที่ผลิตออกมามีความคงที่ ซึ่งถ้าหากแรงดันและความถี่ไม่มีความคงที่ หากนำอุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่อใช้งานจะทำให้อุปกรณ์เสียหายได้

2. มอเตอร์เหนี่ยวนำ (induction motor) วิธีนี้จะใช้หลักการที่ว่า เมื่อเครื่องยนต์หมุนด้วยความเร็วรอบมากกว่าความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ของมอเตอร์ มอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นไดนาโม ข้อดีของวิธีนี้คือ ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถต่อพ่วงเข้ากับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าได้ทันที โดยระบบจะผลิตเฉพาะกระแสไฟฟ้า ส่วนแรงดันและความถี่จะใช้ของการไฟฟ้า ทำให้ไม่เกิดผลเปลี่ยนแปลงต่อแรงดันและความถี่ ซึ่งหากนำอุปกรณ์ทางไฟฟ้ามาต่อใช้งาน จะไม่ทำให้อุปกรณ์เสียหายแต่อย่างใด การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำมาต่อพ่วงกับเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ จะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของขนาดมอเตอร์และเครื่องยนต์ เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยมอเตอร์จะต้องมีความเร็วรอบและแรงบิดใกล้เคียงกับแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์

รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะเฉพาะของความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขณะใช้ปฏิบัติงานที่ความถี่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าคงที่ จากกราฟความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่าการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นในช่วงเสถียร (stable region) แรงบิดและกำลังส่งออกจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เปลี่ยนไป และที่ความซิงโครนัสจะไม่มีกำลังส่งออกเลย ความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัสและความเร็วใช้งานของมอเตอร์เรียกว่า สลิป (slip) แรงบิดและกำลังส่งออกจะเปลี่ยนแปลงกับสลิปด้วยความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Vaidya, J. and Gregory, E., 2002)

ถ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำถูกขับเคลื่อนด้วยต้นกำลังที่มีความเร็วรอบมากกว่าความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดจะมีลักษณะเฉพาะที่กลับกันกับกราฟในรูปที่ 2.6 ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ในช่วงเสถียร กำลังไฟฟ้าจะถูกผลิตขึ้นมาโดยใช้กำลังส่งเข้าจากตัวขับ ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ถูกผลิตขึ้นมาจะเป็นฟังก์ชันกับสลิปและจะเปลี่ยนแปลงตามสลิปด้วย

ความเร็วซิงโครนัส ( $N_s$ ) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้

$$N_s = \frac{120f}{P}$$

โดย  $N_s$  คือ ความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุนหรือความเร็วซิงโครนัส, (rpm)

$f$  คือ ความถี่ของแรงดันป้อนเข้า, (Hz)

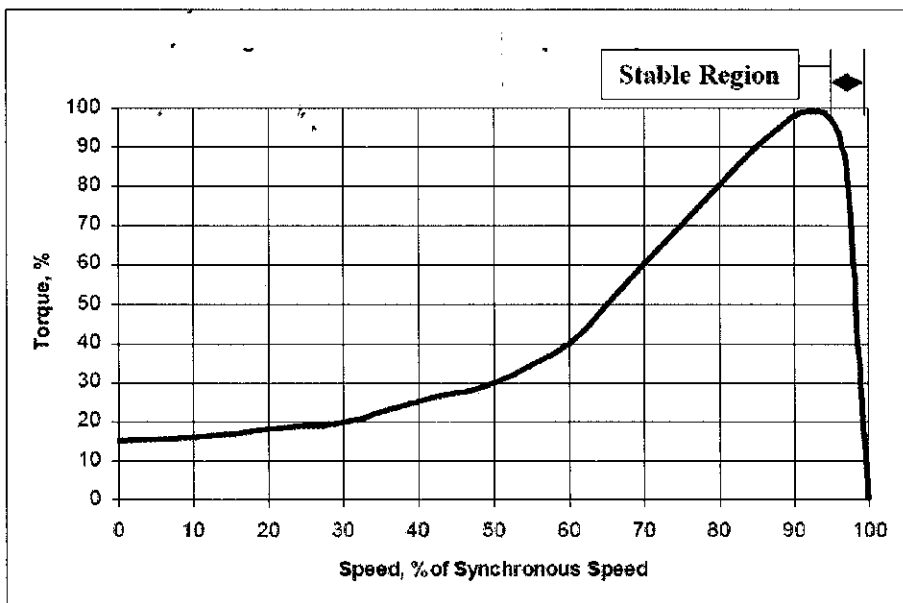
$P$  คือ จำนวนขั้วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ส่วน สลิป (S) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำคำนวณได้จาก

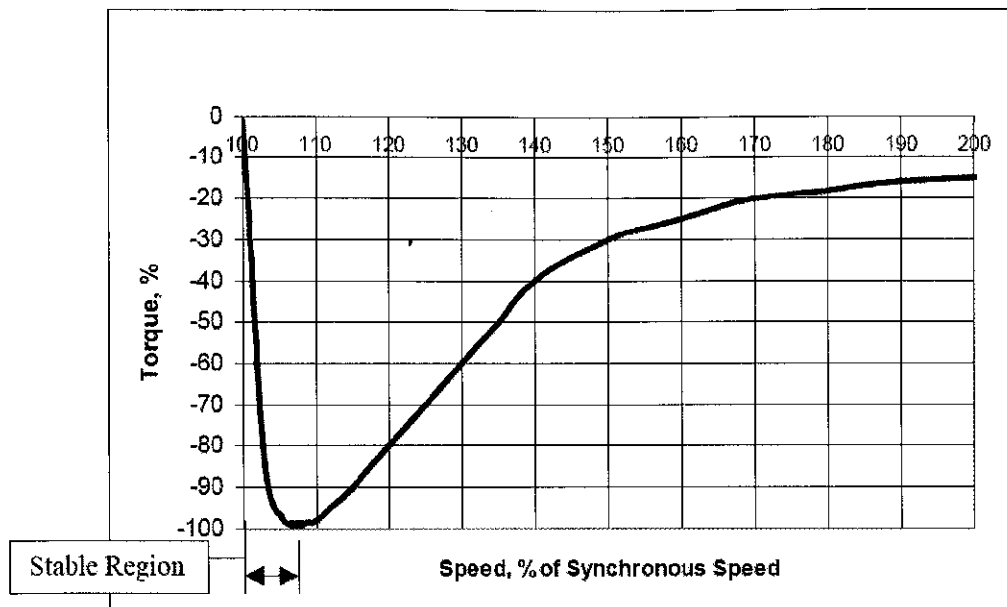
$$S = \frac{(N_s - N_n)}{N_s}$$

โดย  $N_n$  คือ ค่าความเร็วพิกัดหรือความเร็วใช้งาน, (rpm)

มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยทั่วไปจะทำงานที่สลิปประมาณ 2 - 4% (ชวัชชัย, 2538)



รูปที่ 2.6 ลักษณะเฉพาะของความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.7 ลักษณะเฉพาะของความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ

## 2.6 การนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพมาใช้ประโยชน์

ประมาณ 75 % ของพลังงานเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพจะถูกปลดปล่อยเป็นความร้อนเหลือทิ้ง (waste heat) ดังนั้น จึงควรมีการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์กลับมาใช้ประโยชน์ เช่น อุ่นบ่อหมักแก๊สชีวภาพ ต้มน้ำร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ในฟาร์ม เป็นต้น เนื่องจากแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์มีความร้อนเหลือทิ้งในปริมาณมาก ซึ่งเหมาะสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนความร้อนเหลือทิ้งจากน้ำหล่อเย็นมีค่อนข้างน้อย โดยอุณหภูมิของแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์มีค่าประมาณ 315 – 600 °C ขณะที่อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น มีค่าประมาณ 60 – 120 °C

การนำความร้อนเหลือทิ้งของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพมาใช้ใหม่ มีประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น เพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ลดค่าใช้จ่าย และลดมลพิษ เป็นต้น ตัวอย่างการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพมาใช้ใหม่ เช่น

ณรงค์ฤทธิ์ และทนงเกียรติ (2548) ประเมินความคุ้มค่าและความเหมาะสมของการนำเอาความร้อนทิ้งจากไอเสีย จากกระบวนการผลิต ไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพในฟาร์มสุกรมาใช้ในระบบทำความเย็นแบบดูดซึม เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเก็บคืนความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กรณีที่ไม่มีการเก็บคืนความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ ระบบผลิตไฟฟ้าแก๊สชีวภาพจะมีประสิทธิภาพเพียง 16.9% แต่ในกรณีที่มีการเก็บคืนความร้อน ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานจะ

เพิ่มขึ้นเป็น 24.8% และจากการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าโครงการจะให้อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน 29.34% มีระยะเวลาคืนทุน 3.47 ปี

ณัฐริชา (2548) ศึกษาศักยภาพและความเป็นไปได้ในการใช้แก๊สชีวภาพจากโรงงานเป็งมันสำปะหลังในการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม ผลการศึกษาทำให้ทราบว่า การนำแก๊สชีวภาพมาเป็นเชื้อเพลิงในระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมโดยใช้เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ จะให้ผลตอบแทนการลงทุนที่ดีที่สุด

## 2.7 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ

การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบทำความร้อนด้วยเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ ประกอบด้วย

1. การหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ

- กำลังของเครื่องยนต์, (kW) หาได้จากการวัดโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์

$$P_b = \frac{2\pi NT}{60}$$

โดยที่  $N$  คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์, (rpm)

$T$  คือ แรงบิดของเครื่องยนต์, (Nm)

- ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

$$\eta_b = \frac{P_b}{\dot{m}_f HHV}$$

โดยที่  $\dot{m}_f$  คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง, ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$HHV$  คือ ความร้อนของเชื้อเพลิง, ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ )

- อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ, ( $\text{m}^3/\text{kWh}$ )

$$sfc_b = \frac{\text{fuel consumption}}{P_b}$$

2. การหาประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ

- กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

$$P_e = \sqrt{3}VI \cos \phi$$

โดยที่  $V$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างสาย, (V)

$I$  คือ กระแสไฟฟ้าในสาย, (A)

$\cos \phi$  คือ เพาเวอร์แฟกเตอร์ทางไฟฟ้า

- ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า,

$$\eta_{electrical} = \frac{P_e}{\dot{m}_f HHV}$$

- อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะในการผลิตไฟฟ้า, ( $\text{m}^3/\text{kWh}$ )

$$sfc_{electrical} = \frac{\text{fuel consumption}}{P_b}$$

3. การหาประสิทธิภาพของการทำความร้อนด้วยความร้อนจากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ

- พลังงานความร้อนที่ถ่ายเท, (kW)

$$Q = \dot{m} C_p (T_2 - T_1)$$

โดยที่  $\dot{m}$  คือ อัตราการไหล, ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$C_p$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะ, ( $\text{kJ}/\text{m}^3\text{ }^\circ\text{C}$ )

$T_1$  คือ อุณหภูมิด้านเข้า, ( $^\circ\text{C}$ )

$T_2$  คือ อุณหภูมิด้านออก, ( $^\circ\text{C}$ )

- ประสิทธิภาพการทำความร้อน

$$\eta_{heating} = \frac{Q}{\dot{m}_f HHV}$$

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### 3.1 บทนำ

การศึกษาระบบทำความร้อนสำหรับกกกลูกลูกสุกรในโรงเรือนคลอดนี้ ได้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) การศึกษาประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ เพื่อหาค่าพลังงานความร้อนเหลือทิ้งที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในระบบกกกลูกลูกสุกร 2) การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นกักโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และ 3) การติดตั้งและทดสอบประสิทธิภาพของระบบกกกลูกลูกสุกรในโรงเรือนคลอด รวมทั้งการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เกี่ยวกับต้นทุน-กำไรของโครงการ เพื่อเป็นข้อมูลต้นแบบที่จะนำไปสู่การเผยแพร่และใช้ประโยชน์จริงแก่ฟาร์มอื่น ๆ

#### 3.2 ระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ

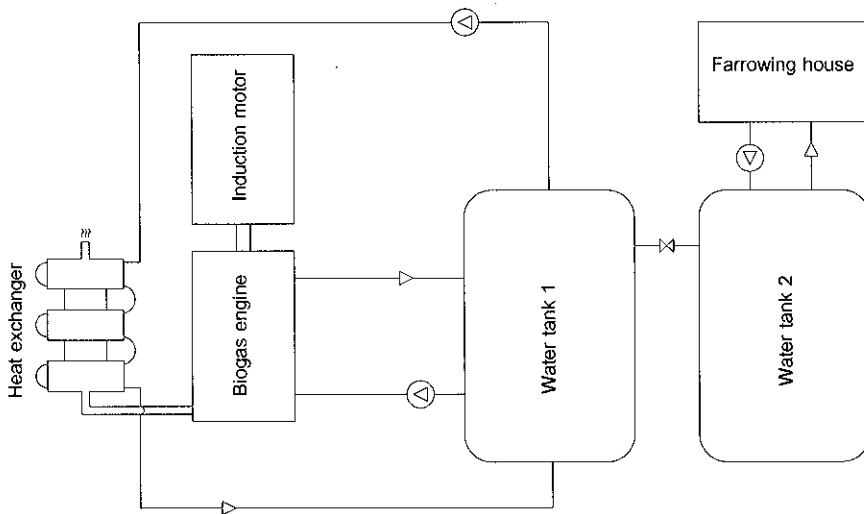
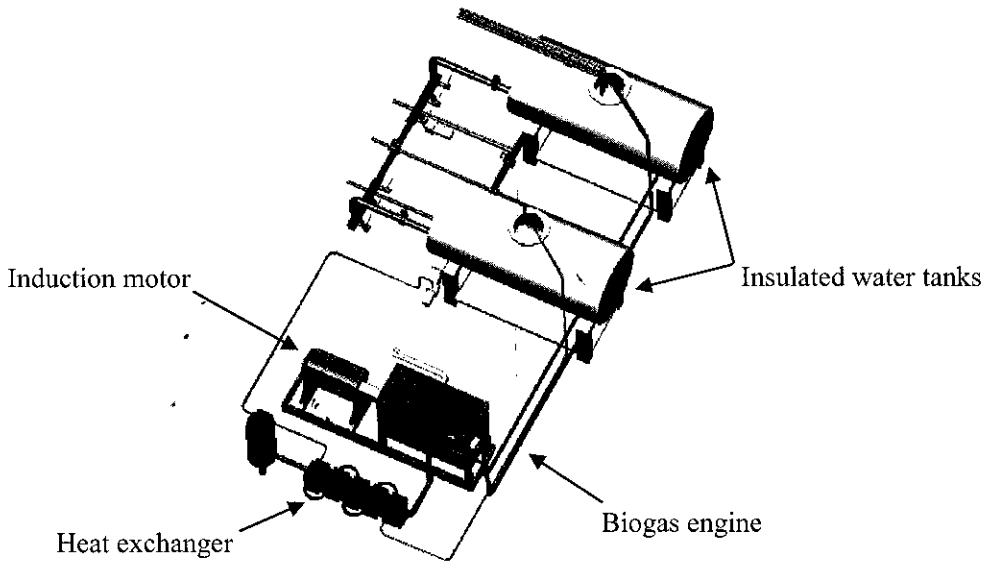
งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบ ระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ (biogas combined heat and power plant, or biogas CHP plant) ที่ใช้ในฟาร์มสุกร องค์ประกอบสำคัญของระบบ คือ เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ มอเตอร์เหนี่ยวนำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถังน้ำ เป็นต้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนนี้ ผลิตทั้งพลังงานไฟฟ้าสำหรับใช้ในฟาร์ม และน้ำร้อนสำหรับกกกลูกลูกสุกร โรงเรือนคลอด จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า พลังงานความร้อนของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพที่ถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นมีค่าน้อย และไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการกกกลูกลูกสุกร ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงระบบแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากน้ำหล่อเย็นและแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์มาใช้ในการผลิตน้ำร้อน

เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพเป็นเครื่องยนต์ที่ดัดแปลงมาจากเครื่องยนต์ดีเซล ขนาด 6 สูบ โดยได้รับการเปลี่ยนแปลงระบบการจุดระเบิด จากการอัดอากาศให้มีความดันและอุณหภูมิสูงแล้วฉีดน้ำมันดีเซลเข้าไปให้เกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ เป็นการอัดอากาศที่ผสมกับแก๊สชีวภาพให้มีความดันและอุณหภูมิสูงแล้วจุดระเบิดด้วยประกายไฟจากหัวเทียน เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพนี้ถูกติดตั้งไว้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 4 pole 380 V 50 Hz, 110 kW เพื่อทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์เหนี่ยวนำนี้มีความเร็วสนามแม่เหล็ก (synchronous speed) เท่ากับ 1,500 rpm



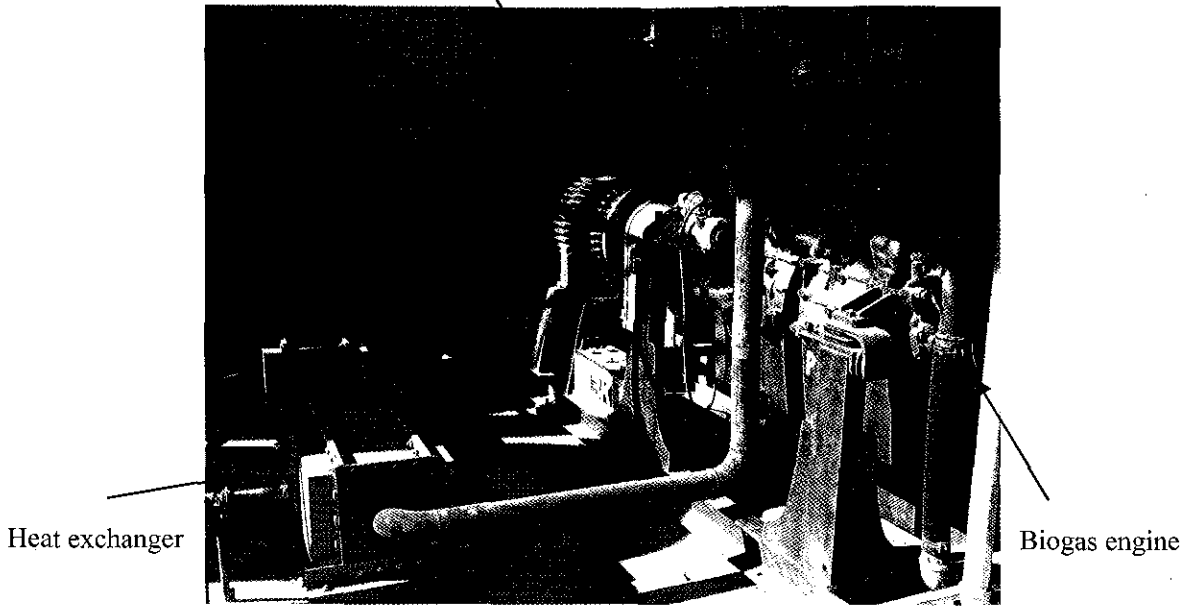
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) เป็นแบบท่อวางขวางการไหลของแก๊สไอเสีย โดยใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.05 mm เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน และมีพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมดเท่ากับ  $2.92 \text{ m}^2$

ถังน้ำที่ใช้มีขนาด 3,000 L จำนวน 2 ใบ หุ้มด้วยฉนวนป้องกันความร้อน ทำหน้าที่เก็บและรักษาอุณหภูมิน้ำที่ได้รับพลังงานความร้อนจากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ

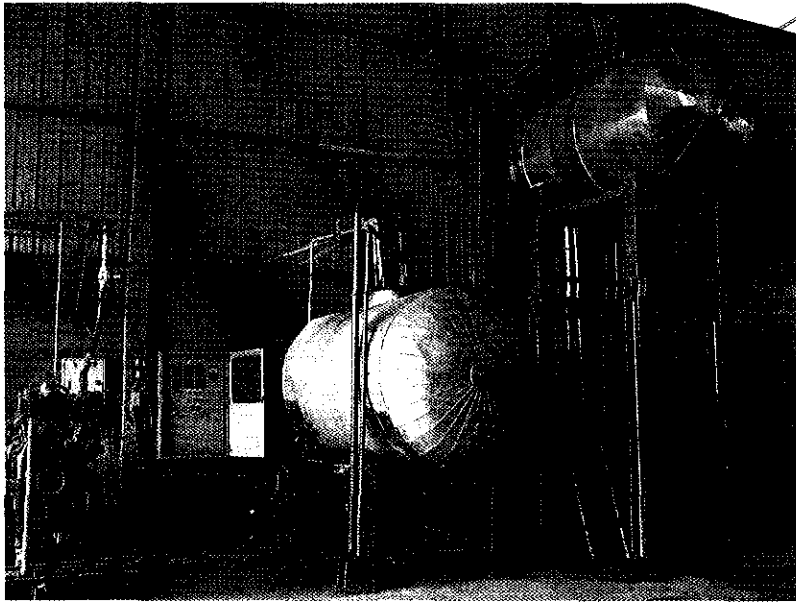


(ก)

Induction motor



(ง)

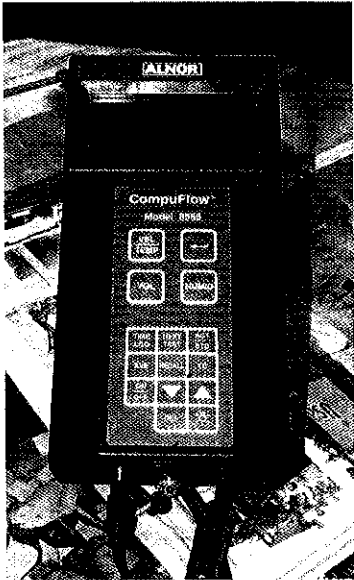


(ค)

รูปที่ 3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ (ก) แผนผังของระบบ (ง) การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเข้ากับเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ (ค) ถังเก็บน้ำร้อน

### 3.3 การถ่ายเทความร้อนในเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ

เครื่องมือและอุปกรณ์การวัดที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 และตารางที่ 3.1 แผนผังแสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.3



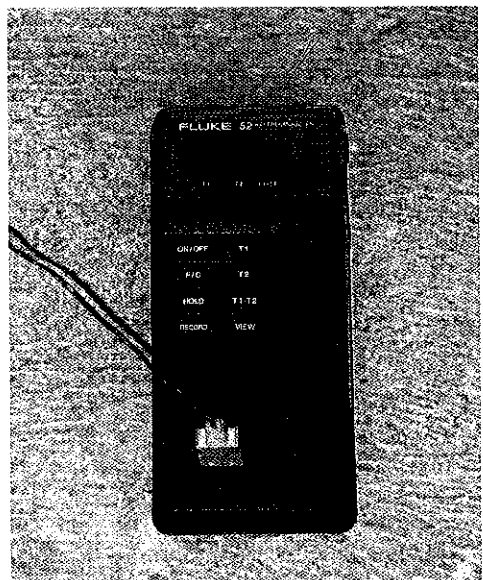
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



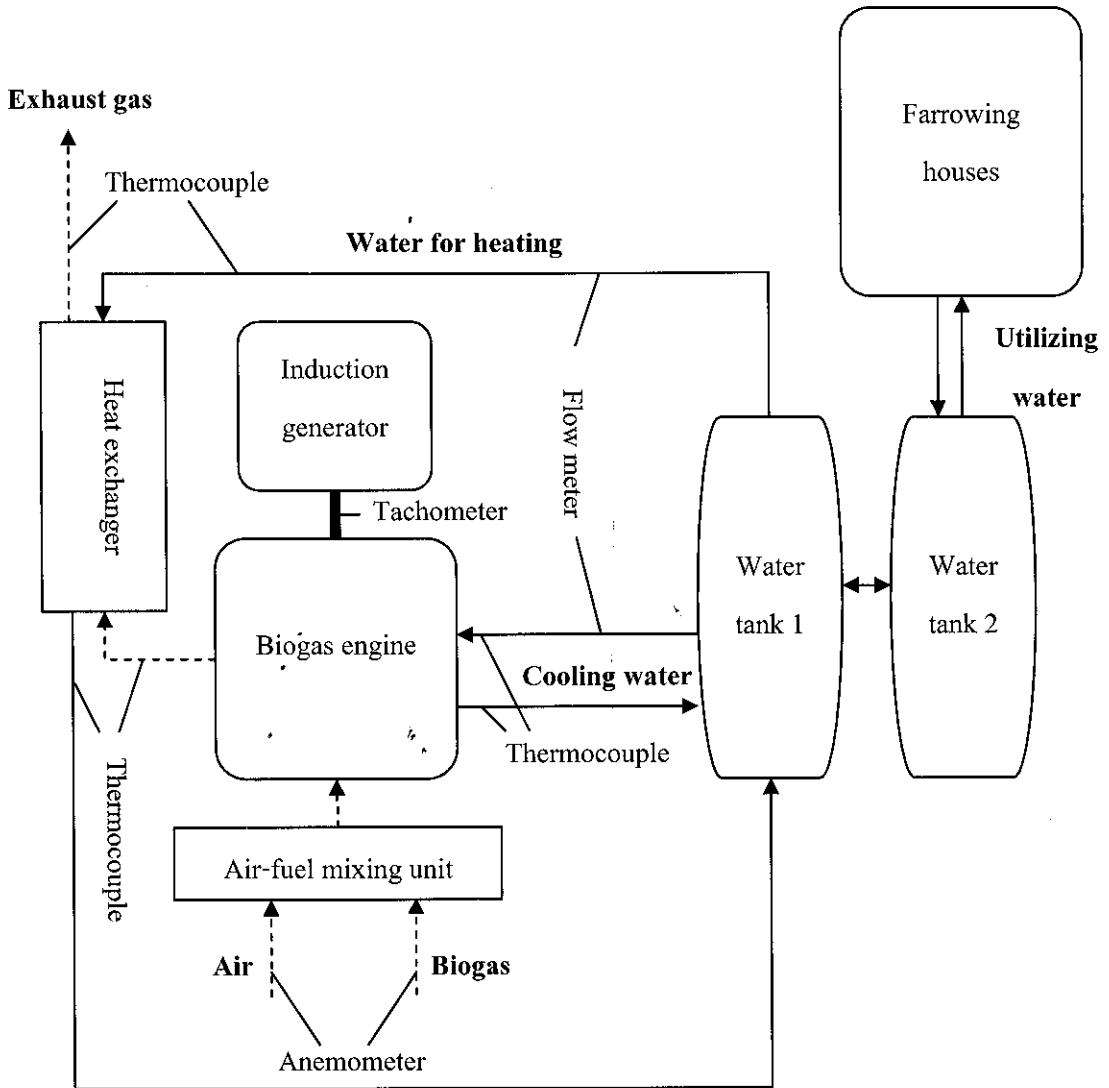
(จ)

รูปที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การวัดสำหรับการศึกษากล่าวหาความร้อนในเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ

(ก) Anemometer (ข) Ultrasonic flow meter (ค) Tachometer (ง) Thermocouple (จ) Power meter

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และเครื่องมือวัดในการทดสอบเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ

Parameters	Instruments
Flow rates	
Gas low rate, m <sup>3</sup> /h	Anemometer
Air flow rate, m <sup>3</sup> /h	Anemometer
Water flow rate, m <sup>3</sup> /h	Ultrasonic Flow meter
Temperatures	
Exhaust temperature, °C	Thermocouple
Cooling water temperatures, °C	Thermocouple
Water in heat exchanger temperatures, °C	Thermocouple
Biogas engine speed, rpm	Tachometer
Electrical measurement	
Voltage, V	Power meter
Ampere, A	Power meter
Power factor	Power meter



รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงระบบการวัดในระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานร้อน

พลังงานความร้อนทั้งหมดของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ สามารถหาได้จากการทดลองเดินระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน แก๊สชีวภาพจะถูกผสมกับอากาศเพื่อป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์ในจังหวะดูด โดยอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและแก๊สชีวภาพสามารถปรับได้โดยใช้วาล์วควบคุม จากสมมูลพลังงานของเครื่องยนต์พบว่า พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แก๊สชีวภาพ ( $Q_{fuel}$ ) มีค่าเท่ากับ ผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ( $Q_{electrical}$ ) พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็น ( $Q_{coolant}$ ) พลังงานความร้อนของแก๊สไอเสียที่นำกลับมาได้ ( $Q_{EGR}$ ) และพลังงานความร้อนที่สูญเสีย ( $Q_{loss}$ ) ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$Q_{fuel} = Q_{electrical} + Q_{coolant} + Q_{EGR} + Q_{loss} \quad (3.1)$$

$$Q_{fuel} = HHV_g \cdot \dot{m}_g \quad (3.2)$$

$$Q_{electrical} = \sqrt{3}VI \cos \phi \quad (3.3)$$

$$Q_{coolant} = \dot{m}_C C_{Pw} (T_{Cout} - T_{Cin}) \quad (3.4)$$

$$Q_{EGR} = \dot{m}_E C_{Pw} (T_{Eout} - T_{Ein}) \quad (3.5)$$

โดยที่  $HHV_g$  คือ ความร้อนสูงของแก๊สชีวภาพ  $\dot{m}_g, \dot{m}_C$  และ  $\dot{m}_E$  คือ อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ น้ำหล่อเย็น และน้ำผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ตามลำดับ  $V$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างสาย  $I$  คือ กระแสไฟฟ้าในแต่ละสาย  $\cos \phi$  คือ เพาเวอร์แฟคเตอร์ทางไฟฟ้า  $C_{Pw}$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $4.18 \text{ kJ/m}^3\text{C}$   $T_{Cin}$ ,  $T_{Cout}$ ,  $T_{Ein}$  และ  $T_{Eout}$  คือ อุณหภูมิของน้ำด้านเข้าเครื่องยนต์ น้ำด้านออกจากเครื่องยนต์ น้ำด้านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และน้ำด้านออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ตามลำดับ

ในการผลิต ไฟฟ้า เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพจะต้องทำงานที่ความเร็วรอบมากกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ เพื่อให้มอเตอร์ทำหน้าที่เป็นไดนาโม ระบบผลิตไฟฟ้านี้สามารถผลิตไฟฟ้าป้อนเข้าระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าฯ ได้ทันที โดยระบบจะผลิตเฉพาะกระแสไฟฟ้า ส่วนแรงดันและแรงดันที่ใช้ของการไฟฟ้าฯ ในการทดสอบ เนื่องจากมอเตอร์มีความเร็วสนามแม่เหล็กเท่ากับ 1,500 rpm ดังนั้นเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพจึงถูกกำหนดความเร็วรอบให้คงที่ไว้ที่ 1,520 rpm โดยมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นและน้ำผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 136.7 L/min และ 78 L/min ตามลำดับ เพื่อใช้ในการนำความร้อนออกจากเครื่องยนต์

ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (electrical efficiency) สามารถคำนวณหาได้จาก

$$\eta_{electrical} = \frac{Q_{electrical}}{Q_{fuel}} \quad (3.6)$$

และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะในการผลิตไฟฟ้า (specific fuel consumption : sfc) ซึ่งเป็นดัชนีวัดอัตราการใช้เชื้อเพลิงแก๊สชีวภาพต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ คือ

$$sfc_{electrical} = \frac{\dot{m}_g}{Q_{electrical}} \quad (3.7)$$

พลังงานความร้อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการกกลูกสุกร คือ ผลรวมของพลังงานความร้อนของน้ำหล่อเย็นและพลังงานความร้อนของแก๊สไอเสียที่นำกลับมาได้ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการทำความร้อน (heating efficiency) ได้ดังนี้

$$\eta_{\text{heating}} = \frac{Q_{\text{coolant}} + Q_{\text{EGR}}}{Q_{\text{fuel}}} \quad (3.8)$$

ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน (CHP efficiency) คือ

$$\eta_{\text{CHP}} = \eta_{\text{heating}} + \eta_{\text{electrical}} = \frac{Q_{\text{coolant}} + Q_{\text{EGR}} + Q_{\text{electrical}}}{Q_{\text{fuel}}} \quad (3.9)$$

และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน ซึ่งเป็นดัชนีวัดอัตราการใช้เชื้อเพลิงแก๊สชีวภาพต่อพลังงานที่ได้จากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ คือ

$$sfc_{\text{CHP}} = \frac{\dot{m}_g}{Q_{\text{electrical}} + Q_{\text{coolant}} + Q_{\text{EGR}}} \quad (3.10)$$

### 3.4 การศึกษาคุณสมบัติของแผ่นกก

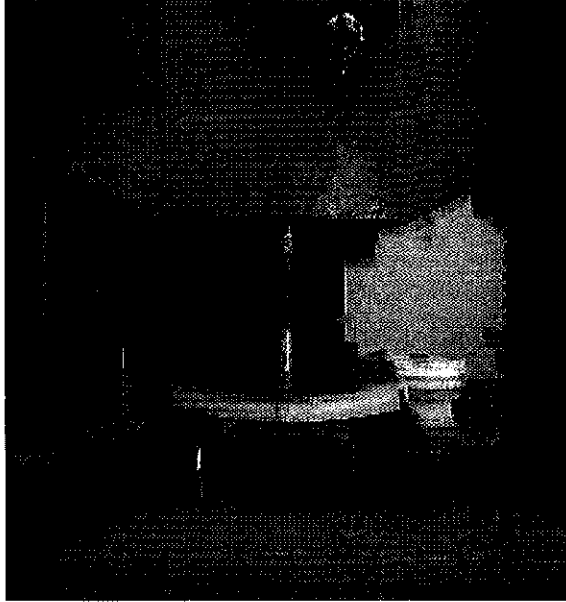
แผ่นกกทำจากพลาสติกชนิด high-density polyethylene (HDPE) ขนาด 40 cm x 40 cm ถูกขึ้นรูปให้มีความแข็งแรงสามารถรับน้ำหนักของลูกสุกร และใช้แทนพื้นคอกของโรงเรือนคอกได้ ด้านล่างของแผ่นติดฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อน

แผ่นกกถูกนำมาทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรง ความต้านทานแรงดันภายในแผ่น ค่าการนำความร้อน และค่าความสัมพัทธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำผ่านแผ่นกกและอุณหภูมิผิวแผ่นกก ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี การทดสอบแผ่นกกในห้องปฏิบัติการถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 – 3.7

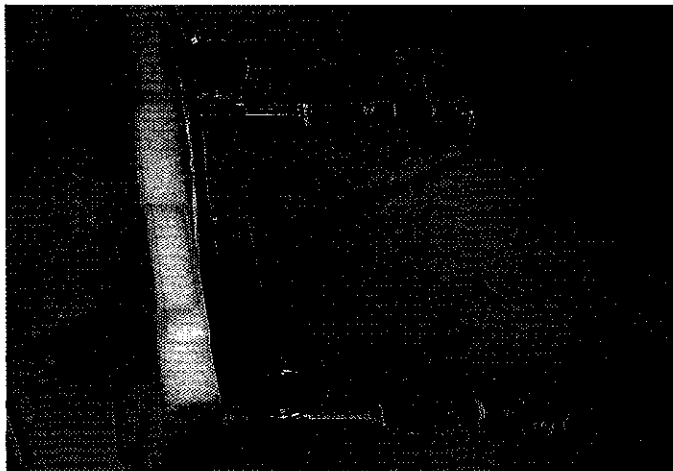
1. การทดสอบความแข็งแรงของแผ่นกกทำโดยอาศัยการกดด้วยเครื่องกด Universal Testing Machine (UTM) โดยใช้หัวกดแบบหน้าตัดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 cm กดตรงตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นกก
2. การทดสอบความต้านทานแรงดันของแผ่นกกทำโดยอาศัยการทดลองสูบน้ำที่มีอุณหภูมิ 26°C ผ่านแผ่นกกด้วยค่าแรงดันต่าง ๆ จนกระทั่งเกิดการรั่วซึมของน้ำออกจากแผ่นกก
3. การทดสอบหาค่าการนำความร้อนของแผ่นกก ทำโดยอาศัยหลักการนำความร้อนผ่านผนังหลายชั้นและวัสดุต่างชนิดกัน (conduction along a composite bar) ด้วยเครื่อง Heat Transfer Service Unit H110 ชิ้นทดสอบ (sample) ทำจากชิ้นส่วนของแผ่นกกที่ถูกตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm หนา 1.5 mm
4. ความสัมพัทธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำผ่านแผ่นกกและอุณหภูมิที่ผิวแผ่นกกสามารถหาจากการทดลองสูบน้ำผ่านแผ่น 1 แผ่น และแผ่นกกที่ต่อเรียงกันแบบอนุกรม 3 แผ่น ใน

ห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอุณหภูมิห้องไว้ที่  $25^{\circ}\text{C}$  โดยทำการวัดอัตราการไหลของน้ำ อุณหภูมิน้ำเข้า และออกแผ่นกก และอุณหภูมิที่ผิวแผ่นกก

พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการทดสอบเหล่านี้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

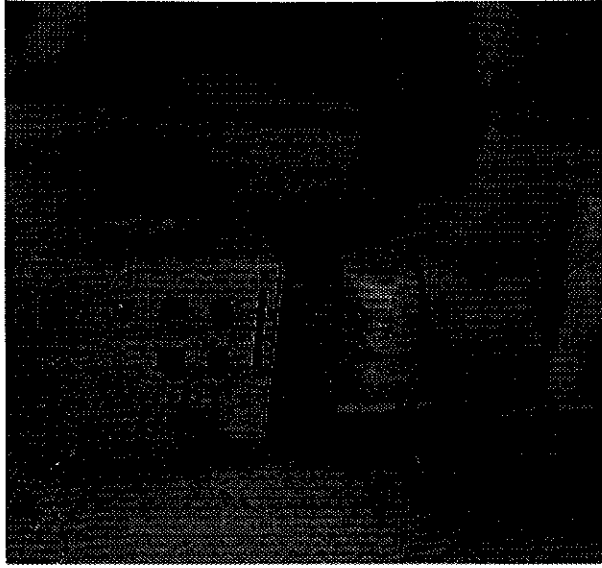


รูปที่ 3.4 การทดสอบความแข็งแรงของแผ่นกกด้วยเครื่อง UTM

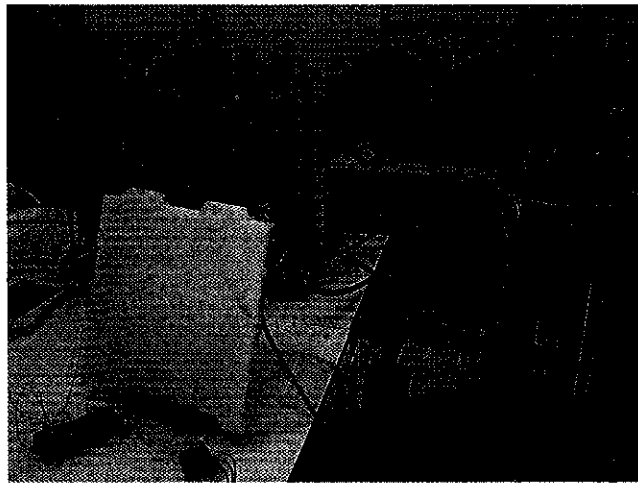


รูปที่ 3.5 การทดสอบหาความต้านทานแรงดันน้ำของแผ่นกก

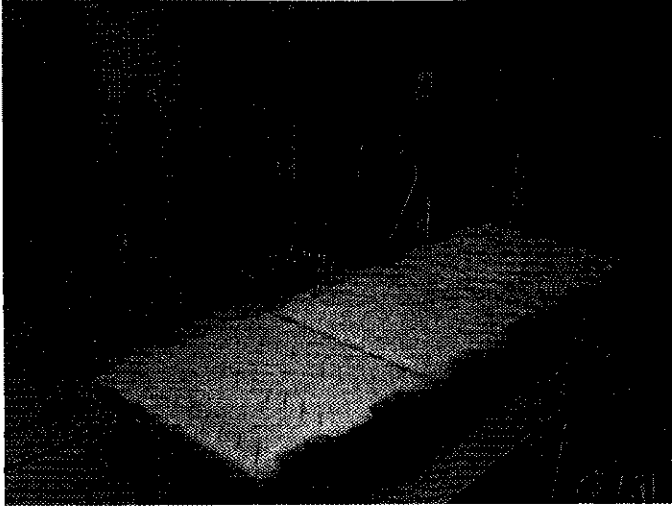




รูปที่ 3:6 การทดสอบหาค่าการนำความร้อนของแผ่นกักด้วย  
เครื่อง Heat Transfer Service Unit H110



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำร้อนและอุณหภูมิ  
ที่ผิวแผ่นก (ก) แผ่นก 1 แผ่น (ข) แผ่นก 3 แผ่น ต่อแบบอนุกรม

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และเครื่องมือวัดในการทดสอบแผ่นก

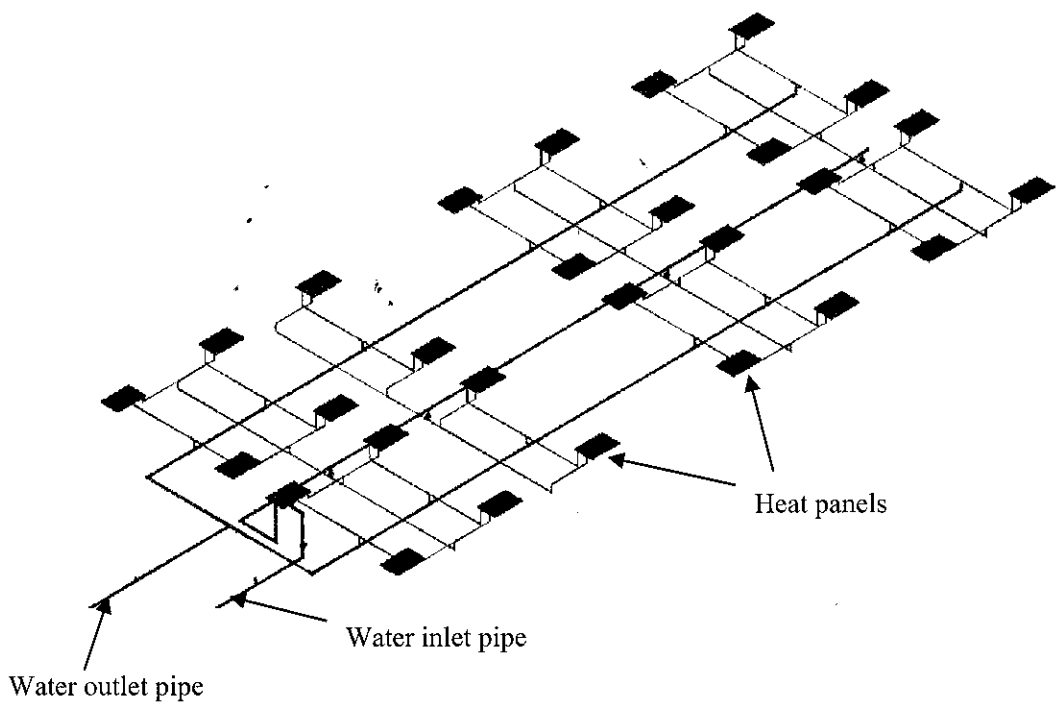
Parameters	Instruments
Strength, kN	UTM
Pressure, bar	Pressure Gauge
Thermal conductivity, $W/m^{\circ}C$	Heat Transfer Service Unit
Surface temperature, $^{\circ}C$	Thermocouple
Inlet & outlet water temperatures, $^{\circ}C$	Thermocouple
Water flow rate, $m^3/h$	Flow meter

### 3.5 การติดตั้งและทดสอบประสิทธิภาพของระบบกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอด

องค์ประกอบหลัก ๆ ของระบบกกลูกสุกรประกอบด้วย ถังน้ำ แผ่นก และปั้มน้ำ ถังน้ำที่ใช้มีขนาด 3,000 L จำนวน 2 ใบ หุ้มด้วยฉนวนป้องกันความร้อน ทำหน้าที่เก็บและรักษาอุณหภูมิน้ำที่ได้รับพลังงานความร้อนจากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ ส่วนแผ่นกถูกนำมาเรียงต่อกันเป็นพื้นคอกในโรงเรือนคลอด เพื่อทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากน้ำมาให้ความอบอุ่นแก่ลูกสุกร โดยนำแผ่นกจำนวน 6 แผ่น มาเรียงต่อกันเป็น 1 ชุด (2 แถว ๆ ละ 3 แผ่น) สำหรับกกลูกสุกร 2 คอก ใน 1 โรงเรือนประกอบด้วยคอกลูกสุกร 56 คอก ดังนั้นระบบกกลูกสุกรนี้ใช้แผ่นกทั้งสิ้น 168 แผ่น

การหมุนเวียนน้ำในระบบทำโดยการยกถังน้ำให้สูงขึ้นจากพื้น 3 m เพื่อให้ น้ำมีแรงดันมากพอที่จะไหลหมุนเวียนในระบบท่อซึ่งเป็นท่อเหล็กขนาด 25.4 mm และไม่ทำให้แผ่นกรั่ว เมื่อน้ำไหลผ่าน โรงเรือนตลอดแล้วจะถูกสูบกลับถังน้ำต่อไป ลักษณะการติดตั้งแผ่นกอกและระบบท่อได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.8

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบกกลูกสุกรทำโดยการวัดอัตราการไหลของน้ำ อุณหภูมิ น้ำเข้าและออกโรงเรือน อุณหภูมิที่ผิวของแผ่นกอก พารามิเตอร์ต่าง ๆ และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.8 แผนผังการติดตั้งแผ่นกอกและระบบท่อในโรงเรือนตลอด

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์และเครื่องมือวัดในการทดสอบระบบกกลูกสุกรในโรงเรือนตลอด

Parameters	Instruments
Water flow rate, m <sup>3</sup> /h	Flow meter
Surface temperature, °C	Infrared thermometer
Inlet & outlet water temperatures, °C	Thermocouple

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิจารณ์

#### 4.1 ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ

จากการทดลองเดินระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ ตารางที่ 4.1 แสดงการถ่ายเทความร้อนในเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพขณะทำการทดสอบที่ความเร็วรอบ 1,520 rpm จากตารางพบว่า ระบบสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 75 kW โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 2.17 m<sup>3</sup>/min ในขณะที่ สภาวะการทำงานที่ 40 kW เป็นสภาวะการทำงานต่ำสุดที่เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพสามารถทำงานได้ (เครื่องยนต์จะดับถ้าปรับอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพให้ต่ำกว่านี้)

ตารางที่ 4.1 การถ่ายเทความร้อนในเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ

$Q_{electrical}$	<b>Biogas</b>	$Q_{fuel}$	$Q_{coolant}$	$Q_{EGR}$	$Q_{loss}$
(kW)	<b>Consumption</b>	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)
	(m <sup>3</sup> /min)				
40	1.08	378.00	45.15	19.86	272.98
50	1.11	387.45	48.91	19.51	269.03
60	1.22	428.09	53.30	48.32	266.46
70	1.69	592.99	84.66	65.50	372.83
75	2.17	758.36	103.47	78.38	501.51

ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาถึง  $\eta_{electrical}$  เพียงอย่างเดียวพบว่า สภาวะการทำงานที่ 75 kW เป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในฟาร์ม เนื่องจากมีอัตราการสิ้นเปลืองแก๊สชีวภาพที่สูงมาก โดยมี  $\eta_{electrical}$  และ  $sfc_{electrical}$  เท่ากับ 9.9 % และ 1.73 m<sup>3</sup>/kWh ตามลำดับ สภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าคือ สภาวะการทำงานที่เครื่องยนต์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 60 kW เพราะว่าเป็นสภาวะนี้มีค่า  $\eta_{electrical}$  และ  $sfc_{electrical}$  เท่ากับ 14.0 % และ 1.22 m<sup>3</sup>/kWh ตามลำดับอย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึง  $\eta_{heating}$  เพียงอย่างเดียวพบว่า ในสภาวะการทำงานที่ 70 kW สามารถนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด ซึ่งมีค่า  $\eta_{heating}$  เท่ากับ 25.3 %

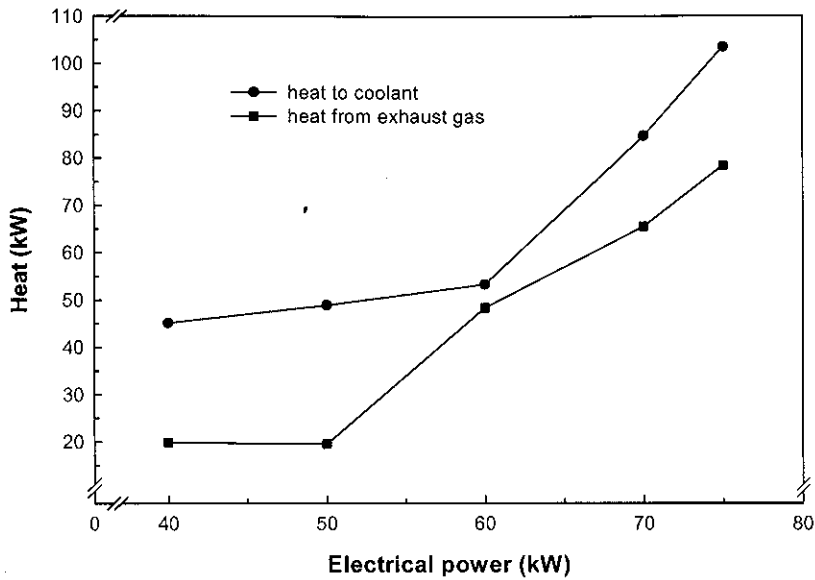
ผลการทดสอบในตาราง 4.2 แสดงให้เห็นว่า การผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนทำให้  $\eta_{CHP}$  ซึ่งเป็นประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเพิ่มขึ้นจากทุกสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ เช่น สภาวะการทำงานที่ 60 kW มีค่า  $\eta_{heating}$  เท่ากับ 23.7 % หรือมีค่าพลังงานความร้อนที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ได้เท่ากับ 101.62 kW ดังนั้นทำให้ค่า  $\eta_{CHP}$  สูงขึ้นเท่ากับ 37.7% และมี  $sfc_{CHP}$  เท่ากับ 0.45 m<sup>3</sup>/kWh และในสภาวะการทำงานนี้ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นและพลังงานความร้อนของแก๊สไอเสียที่ดึงกลับมาได้ มีค่าประมาณ 0.89 และ 0.8 kW ต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ 1 kW ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1

ถึงแม้ว่า สภาวะการทำงานที่ 50 kW จะมี  $\eta_{electrical}$  ใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานที่ 60 kW แต่มี  $\eta_{heating}$  ที่ต่ำกว่าประมาณ 7.0 % ดังนั้นสภาวะการทำงานนี้ไม่ถูกเลือกให้เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนนี้ ในทำนองเดียวกัน ถึงแม้ว่าสภาวะการทำงานที่ 70 kW จะมี  $\eta_{heating}$  ใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานที่ 60 kW แต่มี  $\eta_{electrical}$  เพียง 11.8 %

โดยทั่วไป แก๊สชีวภาพ 1 m<sup>3</sup> สามารถนำมาผลิตไฟฟ้าได้ 1.8 – 2.0 kWh และ 1.2 – 1.5 kWh เมื่อใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ และเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพดัดแปลง ตามลำดับ (Mitzlaff, 1988) แต่สำหรับเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพดัดแปลงที่ใช้ในการทดสอบนี้ สามารถผลิตไฟฟ้าได้เพียง 0.82 kWh ซึ่งจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้งานมานาน

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ

$Q_{electrical}$ (kW)	Biogas	Biogas combined heat and power plant				
	Consumption (m <sup>3</sup> /min)	$\eta_{electrical}$ (%)	$sfc_{electrical}$ (m <sup>3</sup> /kWh)	$\eta_{heating}$ (%)	$\eta_{CHP}$ (%)	$sfc_{CHP}$ (m <sup>3</sup> /kWh)
40	1.08	10.6	1.62	17.2	27.8	0.62
50	1.11	12.9	1.33	17.7	30.6	0.56
60	1.22	14.0	1.22	23.7	37.7	0.45
70	1.69	11.8	1.45	25.3	37.1	0.46
75	2.17	9.9	1.73	24.0	33.9	0.50



รูปที่ 4.1 ปริมาณความร้อนเหลือทิ้งที่นำกลับมาได้จากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ

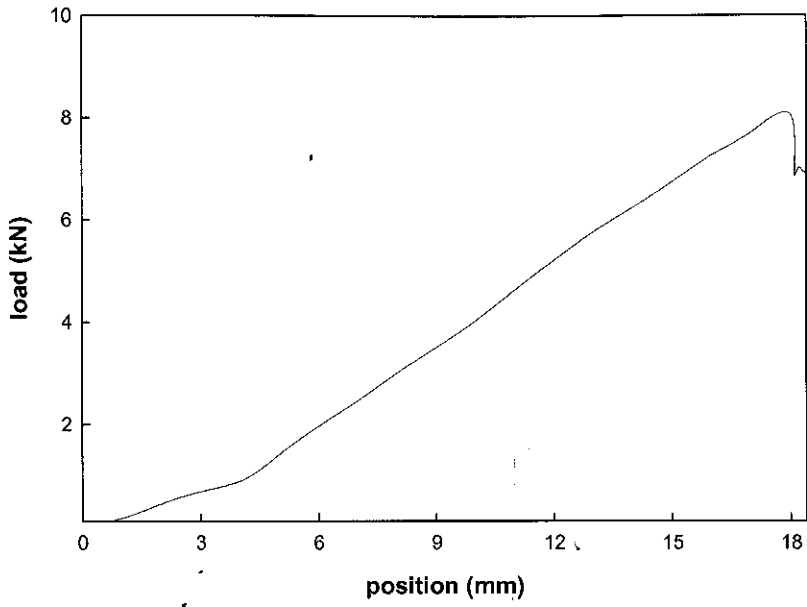
#### 4.2 คุณสมบัติของแผ่นกัก

ผลการทดสอบแผ่นกักเพื่อหาค่า ความแข็งแรง ความต้านทานแรงดันภายในแผ่น ค่าการนำความร้อน ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

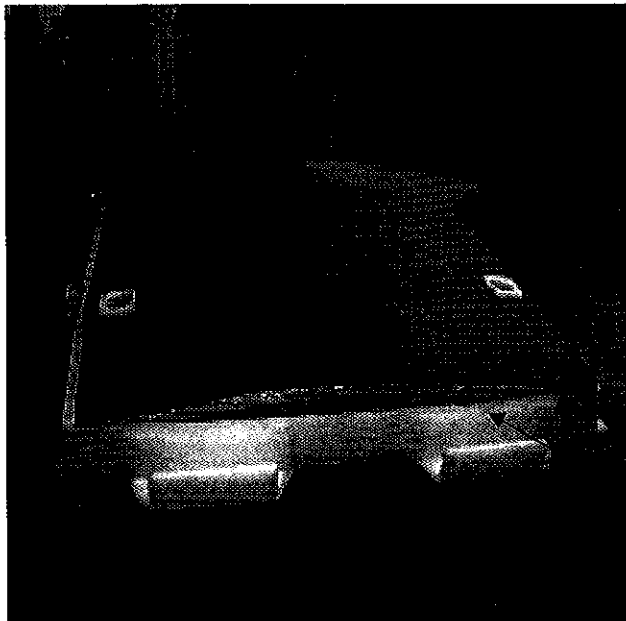
#### ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของแผ่นกัก

Parameters	
Maximum compression force, kN	8.10
Maximum pressure, bar	0.35
Thermal conductivity, $W/m^2\text{ }^{\circ}C$	0.58

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า แผ่นกักมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูงมาก ทำให้สามารถนำแผ่นกักมาใช้แทนพื้นคอกโรงเรือนคกคอดได้ รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะแอ่นตัวของแผ่นกัก และความเสียหายของแผ่นกักเนื่องจากแรงกด



(ก)

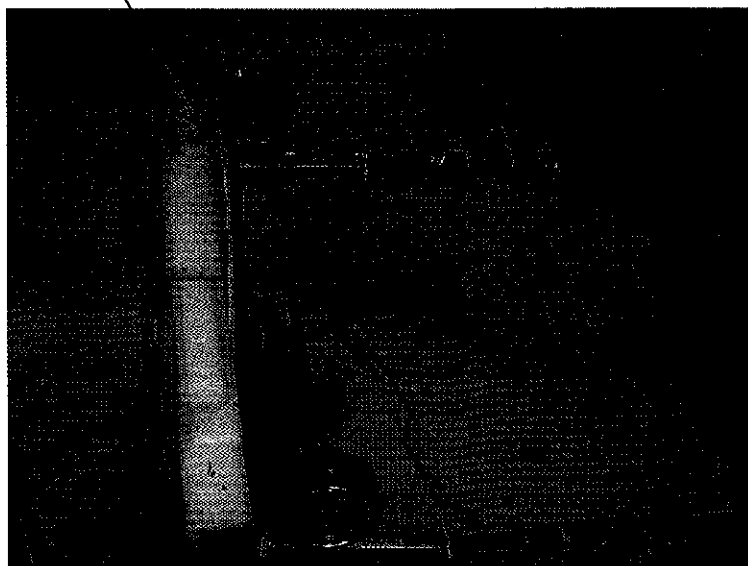


(ข)

รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบหาความแข็งแรงของแผ่นก (ก) ระยะขูดตัวและแรงกด  
(ข) สภาพของแผ่นกหลังการทดสอบ

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า แผ่นกสามารถรับแรงดันได้น้อยมาก โดยเกิดรอยแตกบริเวณขอบด้านล่างของแผ่น ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างแผ่นประกบด้านบนและด้านล่าง เนื่องจากรอยต่อนี้ถูกเชื่อมด้วยพลาสติกจึงทำให้มีความแข็งแรงน้อยกว่าบริเวณอื่นของแผ่นก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.3

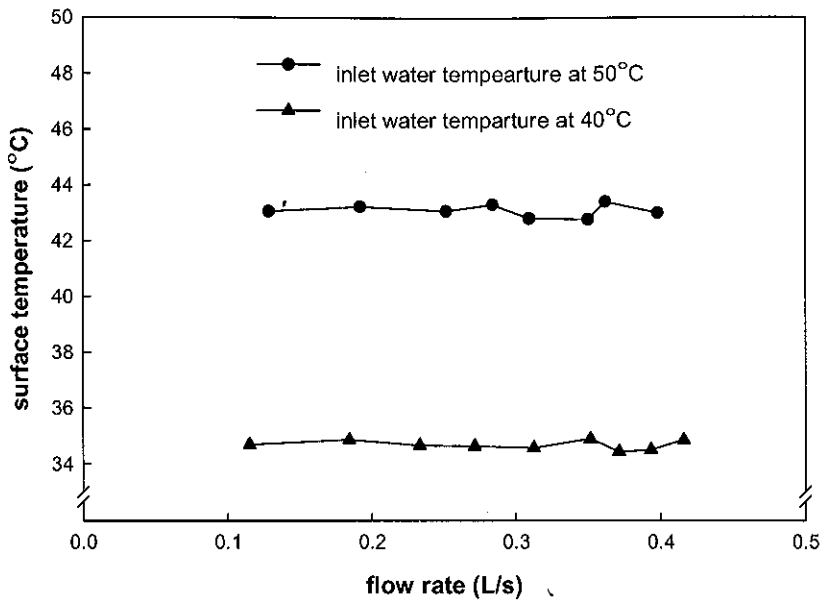
รอยแตกของแผ่นก



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบการหาแรงดันที่แผ่นกรับได้

รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบแผ่นกเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำผ่านแผ่นกและอุณหภูมิที่ผิวแผ่นก จากผลการทดสอบพบว่า อัตราการไหลของน้ำไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวแผ่นก โดยอุณหภูมิที่ผิวแผ่นกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าแผ่นก และจากการทดลองทั้ง 2 วิธี คือ สูบน้ำผ่านแผ่นก 1 แผ่น และ 3 แผ่น ที่ต่ออนุกรมกัน พบว่าอุณหภูมิที่ผิวแผ่นกมีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ เมื่อป้อนน้ำที่มีอุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$  และ  $50^{\circ}\text{C}$  ผ่านแผ่นกในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอุณหภูมิห้องไว้ประมาณ  $25^{\circ}\text{C}$  จะได้อุณหภูมิที่ผิวแผ่นกเฉลี่ยประมาณ  $35^{\circ}\text{C}$  และ  $43^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ



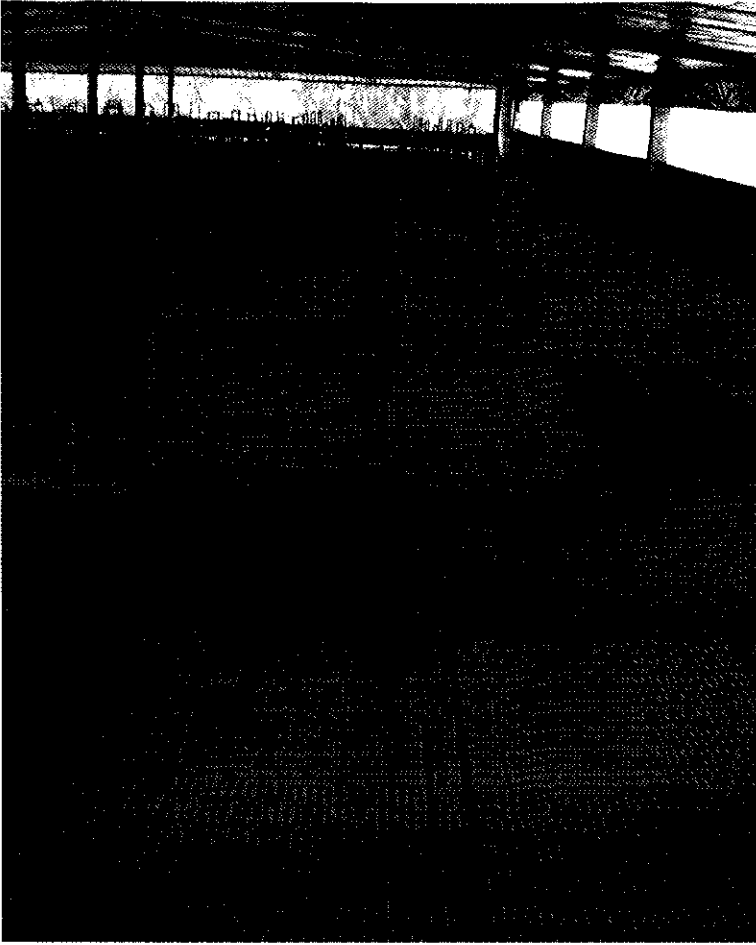


รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของแผ่นกัก

#### 4.3 การติดตั้งและทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักลูกสุกรในโรงเรือนคลอด

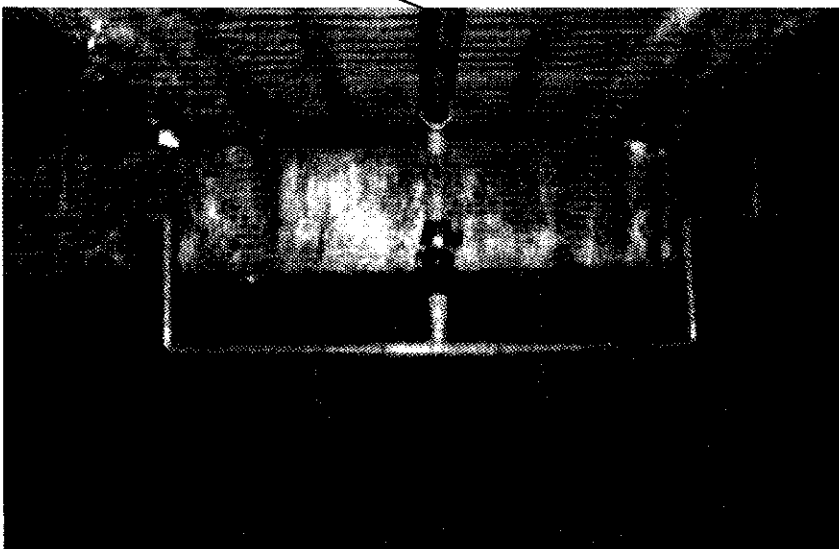
โดยปกติ บริษัทจะใช้งานเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพเพื่อผลิตไฟฟ้าวันละ 21 ชั่วโมง (พักเครื่อง 3 ชั่วโมง) แต่จะใช้งานระบบกักลูกสุกรตลอดทั้งวัน การทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบกักลูกสุกรสามารถทำได้โดยการทดลองเดินระบบกักลูกสุกรต่อเนื่อง 12 ชั่วโมง (15.00 น. - 02.00 น.) โดยทำการวัดอัตราการไหลของน้ำ อุณหภูมิน้ำเข้าและออกโรงเรือน และอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นกักทั้งโรงเรือน

รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการติดตั้งแผ่นกักและระบบท่อของระบบกักลูกสุกร ที่ถูกติดตั้งในโรงเรือนคลอดของ บริษัท เอสพีเอ็ม อาหารสัตว์ จำกัด

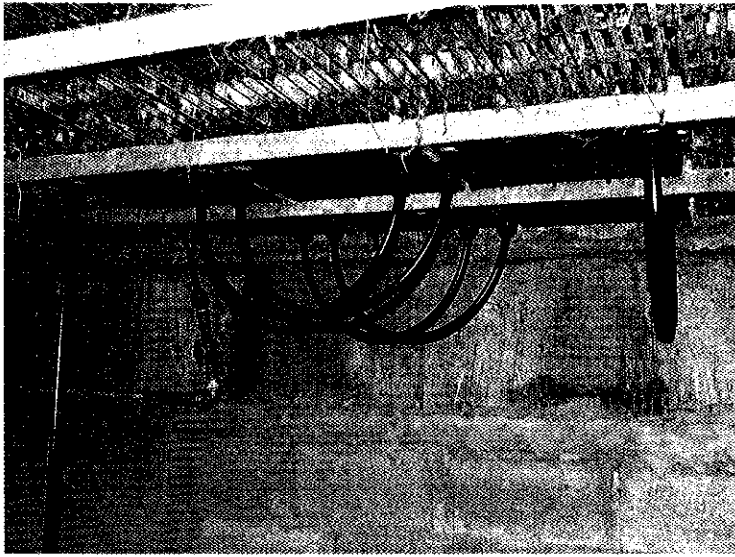


(n)

Water inlet pipe



(o)

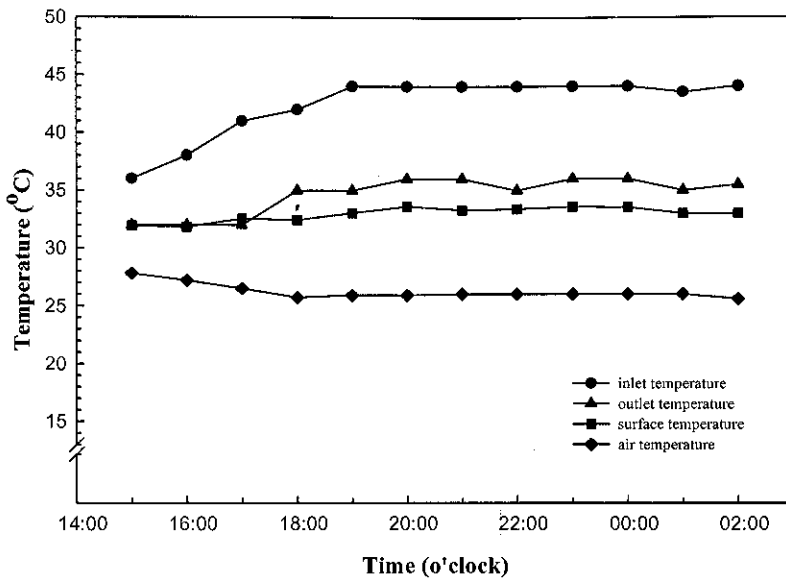


(ค)

**รูปที่ 4.5** การติดตั้งแผ่นกักและระบบท่อในโรงเรือนคลอดของ บริษัท เอสพีเอ็ม อาหารสัตว์ จำกัด (ก) ผิวแผ่นกักด้านบน (ข) ท่อน้ำด้านล่าง (ค) ระบบท่อของชุดแผ่นกัก

ประสิทธิภาพของระบบกกลูกสุกรสามารถอธิบายได้จากผลการทดสอบ ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.6 โดยการป้อนน้ำเข้าโรงเรือนด้วยอัตรา 40 L/min จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มเดินเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพและทำการเก็บข้อมูล (หลังจากการพักเครื่องยนต์ 3 ชั่วโมง) น้ำในถังเก็บมีอุณหภูมิ  $36^{\circ}\text{C}$  โดยอุณหภูมิที่ผิวแผ่นกักเฉลี่ย  $32^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิโรงเรือนเฉลี่ย  $28^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นอุณหภูมิของน้ำในถังและอุณหภูมิผิวแผ่นกักจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำด้านเข้าโรงเรือนจะถูกควบคุมไว้ที่  $44^{\circ}\text{C}$  ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของแผ่นกักมีค่าเป็น  $33^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิน้ำด้านออกจากโรงเรือนเป็น  $36^{\circ}\text{C}$  โดยมีอุณหภูมิโรงเรือนเฉลี่ย  $26^{\circ}\text{C}$

เมื่อพิจารณาถึงการถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงที่พบว่า ระบบกกลูกสุกรมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผ่านแผ่นกัก (heat flux) เท่ากับ  $0.88 \text{ kW/m}^2$  และมีอัตราการถ่ายเทความร้อนจากน้ำสู่ผิวแผ่นกักทั้งโรงเรือนเท่ากับ  $23.2 \text{ kW}$  เนื่องจากในสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพที่  $60 \text{ kW}$  สามารถนำพลังงานความร้อนกลับมาใช้ประโยชน์ได้เท่ากับ  $101.62 \text{ kW}$  ดังนั้นระบบกกลูกสุกรนี้สามารถให้ความร้อนแก่โรงเรือนคลอดได้ 4.3 โรงเรือน



**รูปที่ 4.6** ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำด้านเข้าและด้านออกโรงเรือน อุณหภูมิผิวแผ่นกกลด และอุณหภูมิของโรงเรือนตลอด

โดยทั่วไปลูกสุกรในโรงเรือนคลอดต้องการอุณหภูมิในที่พักประมาณ 30 – 32°C โดยพฤติกรรมของลูกสุกรในที่พักเป็นตัวบ่งชี้ถึงความพึงพอใจต่อสิ่งแวดล้อมที่ดีที่สุด (Zhang and Xin, 2005; Pandorfi and Da Silva, 2005) เมื่อลูกสุกรรู้สึกหนาวจะนอนเกาะกลุ่มกัน แต่จะนอนแยกกันเมื่อรู้สึกร้อน รูปที่ 4.7 แสดงพฤติกรรมการนอนของลูกสุกรบนแผ่นกที่ทำการทดลอง ซึ่งจะเห็นได้ว่า ลูกสุกรนอนอยู่บนแผ่นกอย่างสบายโดยแสดงท่าทางการนอนแบบเหยียดขา และแทบจะไม่นอนทับกันเลย ดังนั้นจากผลการทดสอบจึงสามารถสรุปได้ว่า ระบบกกลูกสุกรที่พัฒนาขึ้นมา เป็นระบบกกลูกสุกรรูปแบบหนึ่งที่เหมาะสม และสามารถนำไปใช้ได้จริงในการกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอด



รูปที่ 4.7 พฤติกรรมการนอนของลูกสุกรบนแผ่นกักที่มีน้ำร้อนไหลผ่านใน  
โรงเรือนคลอด

#### 4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนของระบบกักลูกสุกร

- เงินลงทุนในการติดตั้งระบบกักลูกสุกร

ค่าใช้จ่ายรวมในการก่อสร้างและติดตั้งระบบทำความร้อนสำหรับกักลูกสุกร จำนวน 4  
โรงเรือน

- แผ่นกักลูกสุกร จำนวน 672 แผ่น	672,000 บาท
- ชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	120,000 บาท
- ถังเก็บน้ำร้อน	100,000 บาท
- ท่อน้ำ ข้อต่อ วาล์ว และอุปกรณ์	80,000 บาท
- ระบบควบคุม	50,000 บาท
- โรงเรือนสุกร	400,000 บาท
รวม	1,622,000 บาท

- ค่าใช้จ่ายสำหรับการกักลูกสุกรเมื่อใช้ระบบกักลูกสุกรแบบไฟฟ้า

ค่าไฟฟ้าสำหรับกักลูกสุกร จำนวน 4 โรงเรือน ประมาณ 650,000 บาทต่อปี

ดังนั้น ระยะเวลาคืนทุนของระบบกักลูกสุกรอยู่ที่ 2.5 ปี โดยที่การคำนวณผลตอบแทนของระบบคิดเฉพาะการใช้ประโยชน์จากพลังงานความร้อนที่ได้จากระบบเท่านั้น ไม่รวมผลตอบแทนจากการผลิตไฟฟ้า

## บทที่ 5

### สรุป ปัญหาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบทำความร้อนสำหรับกกลูกสุกรในโรงเรือนตลอด ซึ่งมีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบและทดสอบระบบกกลูกสุกรสำหรับใช้ในโรงเรือนตลอด โดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ การศึกษานี้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) การศึกษาประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ เพื่อหาค่าพลังงานความร้อนเหลือทิ้งที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในระบบกกลูกสุกร 2) การศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพของแผ่นกกโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และ 3) การติดตั้งและทดสอบประสิทธิภาพของระบบกกลูกสุกรในโรงเรือนตลอด

องค์ประกอบสำคัญของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนด้วยแก๊สชีวภาพ ที่ใช้ในการทดสอบ คือ เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ มอเตอร์เหนี่ยวนำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถังน้ำ เป็นต้น ระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนนี้ ผลิตทั้งพลังงานไฟฟ้าสำหรับใช้ในฟาร์ม และน้ำร้อนสำหรับกกลูกสุกรโรงเรือนตลอด โดยพลังงานความร้อนที่ใช้ในระบบกกลูกสุกร คือ พลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากน้ำหล่อเย็นและแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ

จากการทดลองเดินระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนพบว่า เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 75 kW โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.17 m<sup>3</sup>/min เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวพบว่า สภาวะการทำงานที่ 75 kW เป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสำหรับการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในฟาร์ม เนื่องจากมีอัตราการสิ้นเปลืองแก๊สชีวภาพที่สูงมาก สภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าคือ สภาวะการทำงานที่เครื่องยนต์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 60 kW โดยมีค่า  $\eta_{electrical}$  สูงที่สุดเท่ากับ 14 % และ  $sfc_{electrical}$  เท่ากับ 1.22 m<sup>3</sup>/kWh

ผลการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนแสดงให้เห็นว่า การผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเพิ่มขึ้น โดยสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพที่ 60 kW มีค่า  $\eta_{CHP}$  สูงที่สุดเท่ากับ 37.7% โดยมีค่า  $sfc_{CHP}$  เท่ากับ 0.45 m<sup>3</sup>/kWh และมีค่า  $\eta_{heating}$  เท่ากับ 23.7 % หรือมีค่าพลังงานความร้อนเหลือทิ้งที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ได้เท่ากับ 101.62 kW และในสภาวะการทำงานนี้ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นและพลังงานความร้อนของแก๊สไอเสียที่ดึงกลับมาได้ มีค่าประมาณ 0.89 และ 0.8 kW ต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ 1 kW ตามลำดับ

ในการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นกักที่ทำจากพลาสติกชนิด high-density polyethylene (HDPE) ขนาด 40 cm x 40 cm พบว่า แผ่นกักมีค่าการนำความร้อน  $0.58 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีความแข็งแรงมาก ซึ่งสามารถรับแรงกดได้สูงสุด 8.1 kN ดังนั้น แผ่นกักสามารถนำมาใช้แทนพื้นคอกของโรงเรือนคลอดได้ อย่างไรก็ตาม แผ่นกักรับแรงดันน้ำได้เพียง 0.35 bar และจากการทดสอบแผ่นกัก เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำผ่านแผ่นกัก และอุณหภูมิที่ผิวแผ่นกัก พบว่า อัตราการไหลของน้ำไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวแผ่นกัก โดยอุณหภูมิที่ผิวแผ่นกักจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้า

ประสิทธิภาพของระบบทำความร้อน สามารถอธิบายได้จากผลการทดสอบกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอด เมื่อป้อนน้ำอุณหภูมิ  $44^{\circ}\text{C}$  เข้าสู่โรงเรือนที่มีอุณหภูมิโรงเรือนเฉลี่ย  $26^{\circ}\text{C}$  ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของแผ่นกักเฉลี่ยเป็น  $33^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิน้ำออกจากโรงเรือนเป็น  $36^{\circ}\text{C}$  เมื่อพิจารณาถึงการถ่ายเทความร้อนของระบบพบว่า ระบบกกลูกสุกรมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผ่านแผ่นกักประมาณ  $0.88 \text{ kW/m}^2$  และมีอัตราการถ่ายเทความร้อนจากน้ำสู่ผิวแผ่นกักทั้งโรงเรือนประมาณ 23.2 kW เนื่องจากพลังงานความร้อนของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ได้มีค่าประมาณ 101.62 kW ดังนั้น ระบบกกลูกสุกรนี้สามารถให้ความร้อนแก่โรงเรือนคลอดได้ 4.3 โรงเรือน และมีอัตราการคืนทุนที่ 2.5 ปี

จากผลการทดสอบข้างต้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ระบบทำความร้อนสำหรับกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอดที่ถูกพัฒนาขึ้นมาี้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและน่าพอใจในสถานะการใช้งานจริง

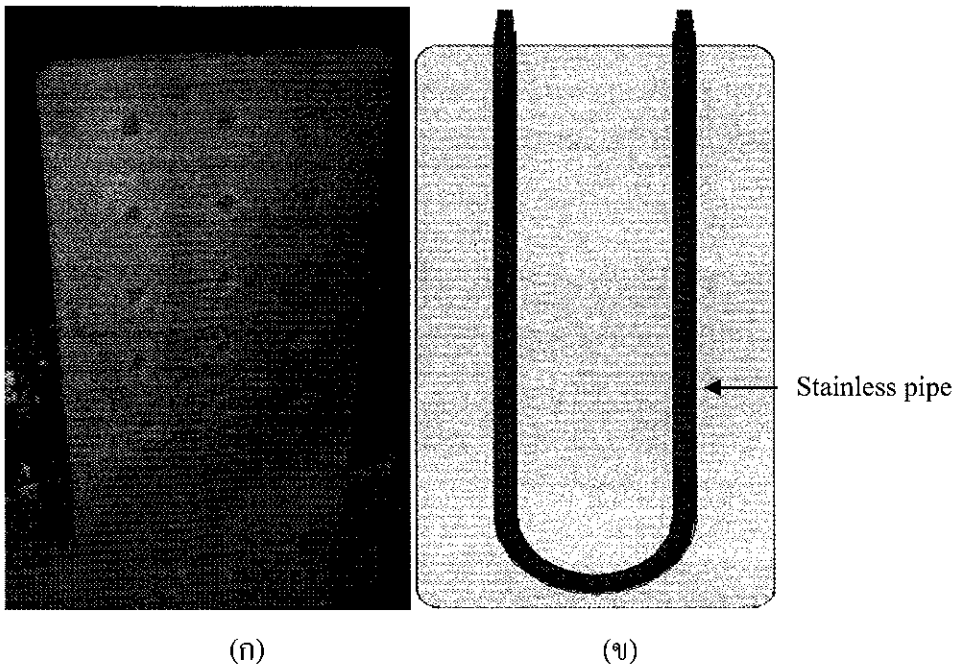
## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยในครั้งนี้ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงระบบทำความร้อนสำหรับกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอดโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ ให้มีประสิทธิภาพและการใช้ประโยชน์มากขึ้น จึงได้วิเคราะห์ปัญหาและข้อเสนอแนะดังนี้

1. ระบบทำความร้อนที่พัฒนาขึ้นมา สามารถนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ได้เพียง 23.7 % ของพลังงานความร้อนทั้งหมดจากเชื้อเพลิงแก๊สชีวภาพ ยังเหลือพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปประมาณ 60 % เนื่องจากปริมาณพลังงานความร้อนเหลือทิ้งที่นำกลับมาได้นั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ ดังนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพของชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้สูงขึ้น จะสามารถนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

2. ระบบผลิตไฟฟ้ามีชั่วโมงการทำงานวันละ 21 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะการทำงานที่หนักมาก สำหรับเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพดัดแปลง ควรเพิ่มจำนวนเครื่องยนต์อีก 1 เครื่อง และสลับใช้งานกันวันละ 12 ชั่วโมง ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าได้ตลอดทั้งวัน และยืดอายุการใช้งานของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนได้

3. แผ่นกกลูกสุกมีความต้านทานแรงดันน้ำได้เพียง 0.35 bar ซึ่งเป็นค่านี้น้อยมาก จึงควรทำการปรับปรุงคุณภาพแผ่นกกให้สามารถรับแรงดันได้มากขึ้น รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างแผ่นกกลูกสุกแบบใหม่ทำจากพลาสติกชนิด High-density Polyethylene (HDPE) ขนาด 60 cm x 120 cm ถูกขึ้นรูปให้มีความแข็งแรงสามารถรับน้ำหนักของลูกสุกได้ ภายในมีท่อเหล็กสแตนเลส (stainless pipe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 cm วางเป็นรูปตัว U ทำหน้าที่เป็นท่อน้ำร้อน ในการใช้งานต้องเติมน้ำเข้าไปในแผ่นกกให้เต็ม เพื่อให้สามารถนำความร้อนจากน้ำร้อนในท่อน้ำร้อนไปถ่ายเทให้กับผิวแผ่นกก



รูปที่ 5.1 แผ่นกกลูกสุกแบบใหม่ (ก) แผ่นกก ขนาด 60 cm x 120 cm  
(ข) ส่วนประกอบของแผ่นกก



## บรรณานุกรม

1. กรมปศุสัตว์. (2548). การเลี้ยงสุกร. เอกสารคำแนะนำ. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
2. กิตติ ดวงใจบุญ. 2548. การผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพและการทำความเย็นแบบระเหยในโรงเลี้ยงสุกร. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
3. โครงการแก๊สชีวภาพไทย-เยอรมัน. (2545). พลังงานและปฏิกิริยาชีวภาพจากบ่อแก๊สชีวภาพ. สำนักงานส่งเสริมการเกษตรภาคเหนือ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
4. จิรกุล จันทศิริ และ วิรัช ออาจหาญ. (2546). การออกแบบและทดสอบระบบทำความร้อนสำหรับบกกกลุสุกรในโรงเรือนอนุบาลโดยใช้แก๊สชีวภาพ. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 10(4) 300-306
5. ณรงค์ฤทธิ์ มูลเจริญ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2548). การนำความร้อนทิ้งจากไอเสียจากการผลิตไฟฟ้าก๊าซชีวภาพในฟาร์มสุกรมาใช้ในระบบทำความเย็นแบบดูดซึม. การประชุมวิชาการการถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 4 จังหวัดเชียงราย
6. ณัฐธิชา มะโน. 2548. ศักยภาพการใช้แก๊สชีวภาพจากโรงงานแป่งมันสำปะหลังในการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
7. ธวัชชัย อัดถวิบูลย์กุล. (2538). ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC MOTORS). ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ
8. บริษัท เอสพีเอ็ม อาหารสัตว์ จำกัด ตำบลคอนทราย อำเภอบางแพ จังหวัดราชบุรี
9. ประเทือง ฟื้นแก้ว เดช ดำรงศักดิ์ และ ตะวัน สุจริตกุล. (2546). สภาพะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับระบบปรับอากาศแบบอัดไอขับ โดยเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 จังหวัดปราจีนบุรี
10. สมบูรณ์ สิริพรมงคลชัย. 2546. การปรับปรุงคาร์บูเรเตอร์สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้แก๊สชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

11. สมมาส แก้วล้วน พิชัย อัญมมงคล และ สุรินทร์ พิพัฒน์มโนมัย. (2549). การประเมินทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ เพื่อนำก๊าซชีวภาพจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ขนาดเล็กมาใช้กับเครื่องยนต์เพื่อการผลิตไฟฟ้า. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา
12. วีระชัยฟาร์ม ตำบลวังมะนาว อำเภอปากท่อ จังหวัดราชบุรี
13. วีระพันธ์ เกียรติภักดิ์ และ ทรงชัย ใจสุข, (2538). การนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์. โครงการส่งเสริมการผลิตแก๊สชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ หน่วยบริการก๊าซชีวภาพสถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
14. de Baey-Ernsten, H., von der Haar, F., Bichmann, M. and Clausen, N. (1995). Heating systems for piglets in a practical comparison. Institute for Agricultural Process Engineering, University of Kiel, Kiel, Germany.
15. Big Dutchman, (2005). Floor systems for energetic sows and healthy piglets. Big Dutchman International GmbH. Germany.
16. Cronin, G., Simpson, G., Hemsworth, P., (1995). The effects of the gestation and farrowing environments on sow and piglet behaviour and piglet survival and growth in early lactation. Applied Animal Behaviour Science, 46, 175–192.
17. Liljedahl, J.B., Turnquist, P.K., Smith, D.W. and Hoki, M., (1996). Tractors and their power units (4th edition). American Society of Agricultural Engineering. USA.
18. MIK, (2007). Thermo W warm water heating panel. MIK International AG. Germany.
19. Mitzalf, K., (1988), Engine for biogas: theory, modification, economic operation. Germany.
20. Mount, E. (1963). Environmental temperature preferred by the young pig. Nature, 199, 48-99.
21. Pandorfi, H. and Da Silva, O., (2005). Evaluation of the behavior of piglets in different heating systems using analysis of image and electronic identification. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, 7, BC 03 021.

22. Vaidya, J. and Gregory, E., (2002). Advanced electric generator & control for high speed micro/mini turbine based power systems. PowerGen International Conference, Orlando, Florida, USA.
23. Weary, D. M., P. A. Phillips, E. A. Pajor, D. Fraser, and B. K. Thompson. (1998). Crushing of piglets by sows: Effects of litter features, pen features and sow behaviour. Applied Animal Behaviour Science, 61, 103–111.
24. Werner U., Stoehr U. and Hees N., (1989). Biogas plants in animal husbandry. A practical guide in Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit (GTZ), Germany.
25. Xin, H. and Zhang, Q., (1999). Preference for lamp or mat heat by piglets at cool and warm ambient temperatures with low to high drafts. Applied Engineering in Agriculture, 15(5), 547-551.
26. Xin, H., Zhou, H. and Bundy, S., (1997). 'Comparison of energy use and piglet performance' between conventional and energy-efficient heat lamps. Applied Engineering in Agriculture, 13(1), 95-99.
27. Zhang, Q. and Xin, H. (2000). Modeling heat mat operation for piglet creep heating. Transactions of the ASAE, 43(5), 1261-1267.
28. Zhang Q. and Xin, H. (2005). Resting Behavior of Piglets in Farrowing Crates Equipped with Heat Mats. Applied Engineering in Agriculture, 21(6), 1067-1071.
29. Ziron, M. and Hoy, St., (2003). Effect of a warm and flexible piglet nest heating system – the warm water bed – on piglet behaviour, live weight management and skin lesions. Applied Animal Behaviour Science, 80, 9-18.

## ภาคผนวก ก

### การทดสอบความแข็งแรงของแผ่นก

#### ทฤษฎี

การทดสอบเพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุด้วยการกด เป็นการทดสอบที่นิยมมากที่สุด การทดสอบนี้สามารถหาค่าความแข็งแรงภายใต้การกด (compress strength) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุ ในการทดสอบการกดนั้นจะเป็นการให้ความเค้นในแนวแกนเดียว (uni-axial stress) แก่ชิ้นทดสอบ โดยความเค้นนี้จะเกิดจากแรงกดตามแนวแกน ซึ่งเป็นแรงภายนอกที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ โดยแรงจะกระจายเฉลี่ยสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ค่าความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความเค้น (Stress)} \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad (ก.1)$$

$$\text{ความเครียด (Strain)} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (ก.2)$$

โดย  $F$  คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับหน้าตัด  $A$

$\Delta L$  คือ ความยาวที่เปลี่ยนไปจากความยาวเดิม  $L_0$

ในการที่จะหาความแข็งแรงของวัสดุ สามารถกระทำได้โดยการเพิ่มแรงที่กระทำต่อวัสดุทีละน้อย จนกระทั่งวัสดุเกิดการแตกหัก แรงกระทำสูงสุด  $F_{Max}$  ที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเป็นค่าที่นำไปหาความแข็งแรงของวัสดุ โดยค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกด ( $\sigma_M$ ) สามารถหาได้จาก

$$\sigma_M = \frac{F_{Max}}{A_0} \quad (ก.3)$$

โดย  $A_0$  คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุก่อนเกิดการยุบตัว

การพิจารณาความเค้นแบบนี้เป็นการพิจารณาความเค้นทางวิศวกรรม (engineering stress) ซึ่งจะพิจารณาพื้นที่หน้าตัดให้คงที่ ส่วนค่าความเค้นจริง (true stress) นั้นจะพิจารณาพื้นที่หน้าตัดจริงในขณะนั้น ๆ

สำหรับค่าการแอ่นตัวขณะวัสดุแตกหักนั้น คือ ค่าความเครียดที่จุดแตกหัก ในการทดสอบครั้งนี่จะเป็นการทดสอบเพื่อหาว่า วัสดุจะสามารถรับแรงได้มากที่สุดเท่าใด โดยไม่ได้สนใจถึงการหาค่าการแอ่นตัวของวัสดุ

## จุดประสงค์ในการทดลอง

เพื่อหาแรงกดสูงสุดที่แผ่นกักลูกตุกรสามารถรับได้

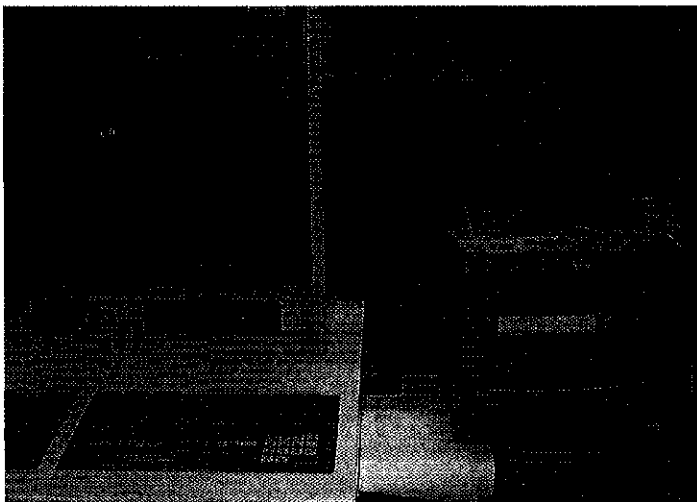
## อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. แผ่นกักลูกตุกรขนาด กว้าง x ยาว xหนา 400 mm x 400 mm x 32 mm.
2. เครื่องทดสอบแรงกด (Universal Testing Machine, UTM) ขนาด 200 kN ดังแสดงในรูปที่

ก.1



(ก)



(ข)

รูปที่ ก.1 Universal Testing Machine ขนาด 200 kN (ก) การวางแผ่นกักเพื่อทดสอบ  
(ข) ส่วนแสดงผลและบันทึกข้อมูล

## ขั้นตอนการทดสอบ

1. เปิดสวิตช์เครื่องทดสอบแรงกด (UTM) เปิดสวิตช์ระบบน้ำมันไฮดรอลิก และเปิด โปรแกรม WIN AG (เป็น โปรแกรมที่ใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบแรงกด)
2. คัดตั้งหัวกดตามขนาดที่ทำการเลือกไว้ตามรูปที่ ก.1 โดยใช้หัวกดหน้าตัดรูปวงกลมขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 220 mm
3. วางแผ่นกกที่จะทำการทดสอบลงบนคานที่ทำขึ้นมา เพื่อให้มีลักษณะการวางแผ่นกก เหมือนกับการวางในโรงเรือนทดลองจริง โดยจัดให้แผ่นกกอยู่ตรงกึ่งกลางกับหัวกด
4. ป้อนค่าพารามิเตอร์ของแผ่นกกในโปรแกรม WIN AG เช่น ขนาดความกว้าง = 400 mm, ความยาว = 400 mm และความหนา = 32 mm ในการทดสอบนี้จะใช้แรงกดสูงสุดที่ 50 kN และระยะการกดสูงสุด 50 mm แรงกดจากหัวกดจะเพิ่มขึ้นตามระยะของการกด และจะกด จนกว่าแผ่นกกจะแตกหัก
5. ป้อนคำสั่งให้เครื่องทดสอบทำงานด้วยฟังก์ชันการกดโดยอัตโนมัติ จากนั้นป้อนคำสั่งเริ่ม ทดสอบ
6. สังเกตการณ์แตกหักของแผ่นกก โดยดูจากกราฟที่ปรากฏบนจอคอมพิวเตอร์ เมื่อทดสอบ เสร็จแล้วจัดเก็บข้อมูล
7. นำแผ่นกกแผ่นใหม่มาทำการทดสอบ โดยทำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-6 อีกครั้ง

## ภาคผนวก ข

### การทดสอบหาค่าการนำความร้อนของแผ่นกติกสุกร

#### ทฤษฎี

การนำความร้อน คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในวัสดุ การนำความร้อนในวัสดุเป็นสิ่งที่เราสามารถพบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น การนำความร้อนผ่านกระจกรถยนต์ เป็นต้น การศึกษาถึงหลักการของการนำความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นต่องานหลายๆ ประเภท เพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ รวมไปถึงการเลือกใช้วัสดุอย่างถูกต้องในการออกแบบเครื่องมือต่างๆ ทางวิศวกรรม

Joseph Fourier นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้ทำการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการนำความร้อน และได้ตั้งกฎมูลฐานของการนำความร้อนขึ้น ซึ่งกล่าวว่า “อัตราการนำความร้อนในทิศทางใด ๆ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการนำและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อระยะทางในทิศทางนั้น” โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{ข.1})$$

โดย  $q_x$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน, W

$k$  คือ ค่าการนำความร้อน,  $\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$

$A$  คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน,  $\text{m}^2$

$\frac{\partial T}{\partial x}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อระยะทาง,  $^\circ\text{C}/\text{m}$

ดังนั้น หากทราบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ และค่าการนำความร้อนของวัสดุแล้ว จะสามารถคำนวณหาค่าของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งใด ๆ ของวัสดุ โดยใช้สมการของฟูเรียร์ได้

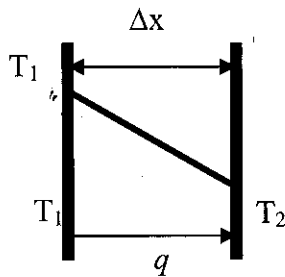
พื้นฐานสำคัญในการศึกษาการนำความร้อน คือ การวิเคราะห์ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของวัสดุ ซึ่งในการทดลองนี้จะวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนแบบง่าย โดยศึกษาจากการนำความร้อนผ่านผนังราบ

การนำความร้อนผ่านผนังราบ แบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

### 1. การนำความร้อนผ่านผนังชั้นเดียว

ในการวิเคราะห์จะกำหนดเงื่อนไขในการนำความร้อน ดังนี้

- 1) เป็นการนำความร้อนในมิติเดียว (one dimensional)
- 2) พิจารณาอุณหภูมิของผนังอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state)
- 3) ถือว่าผนังเป็นวัสดุเอกพันธ์ (homogeneous material)
- 4) ค่าการนำความร้อนของวัสดุมีค่าคงที่ (constant thermal conductivity)
- 5) อุณหภูมิในทิศทางตั้งฉากกับทิศทาง  $x$  มีค่าเท่ากันตลอดหน้าตัด (constant uniform temperature)



รูปที่ ข.1 การนำความร้อนผ่านผนังชั้นเดียว

จากกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์  $q = -kA \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)$

จากเงื่อนไขข้อ 1 ค่า  $T$  ขึ้นกับทิศทาง  $x$  อย่างเดียว จะได้ว่า

$$q = -kA \left( \frac{dT}{dx} \right) \quad (\text{ข.2})$$

จัดรูปสมการใหม่

$$q dx = -kA dT \quad (\text{ข.3})$$

Integrate สมการทั้งสองข้าง

$$q \int_{x_1}^{x_2} dx = -kA \int_{T_1}^{T_2} dT \quad (\text{ข.4})$$

จะได้

$$q = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)} = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x} \quad (\text{ข.5})$$

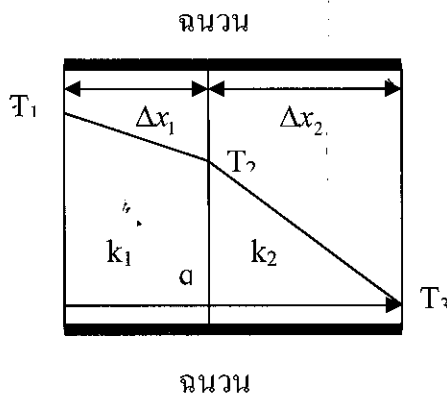


หรือ จัดให้อยู่ในรูป

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\Delta x / kA} \quad (\text{ข.6})$$

พจน์  $\Delta x / kA$  ในสมการ (ข.6) เป็นพจน์ของสิ่งที่ต้านการนำความร้อนหรือเรียกว่าการต้านทานความร้อน (thermal resistance,  $R_{th}$ ) จะเห็นว่าการต้านทานความร้อนจะมีค่าแปรผันกับความหนาของผนัง และแปรผกผันกับค่าพื้นที่หน้าตัดและค่าการนำความร้อน ซึ่งแสดงว่าถ้าความหนาและพื้นที่หน้าตัดของผนังเท่ากัน อัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรผกผันกับค่าการนำความร้อนของวัสดุเท่านั้น

## 2. การนำความร้อนผ่านผนังหลายชั้นและใช้วัสดุต่างกัน (composite plane wall)



รูปที่ ข.2 การนำความร้อนผ่านผนังหลายชั้นและวัสดุต่างกัน

จากรูป การถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงตัว ตรงทางเข้าและทางออกสามารถคำนวณได้จาก

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\Delta x_1 / k_1 A} = \frac{T_2 - T_3}{\Delta x_2 / k_2 A} \quad (\text{ข.7})$$

รวมสมการทั้งสองจะได้ว่า

$$T_1 - T_2 = q(\Delta x_1 / k_1 A) \quad (\text{ข.8})$$

$$T_2 - T_3 = q(\Delta x_2 / k_2 A) \quad (\text{ข.9})$$

สมการ (ข.8) รวมกับสมการ (ข.9) จะได้

$$(T_1 - T_2) + (T_2 - T_3) = q(\Delta x_1 / k_1 A) + q(\Delta x_2 / k_2 A) \quad (\text{ข.10})$$

$$T_1 - T_3 = q[(\Delta x_1 / k_1 A) + (\Delta x_2 / k_2 A)] \quad (\text{ข.11})$$

$$q = \frac{T_1 - T_3}{(\Delta x_1/k_1 A) + (\Delta x_2/k_2 A)} \quad (\text{ข.12})$$

$$\frac{q}{A} = \frac{T_1 - T_3}{(\Delta x_1/k_1) + (\Delta x_2/k_2)} \quad (\text{ข.13})$$

นิยาม ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน (Overall heat transfer coefficient, U) ว่า

$$U = \frac{1}{A \sum R_{th}} \quad (\text{ข.14})$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{q}{A} = U(\Delta T)_{overall} \quad (\text{ข.15})$$

$$q = UA(\Delta T)_{overall} \quad (\text{ข.16})$$

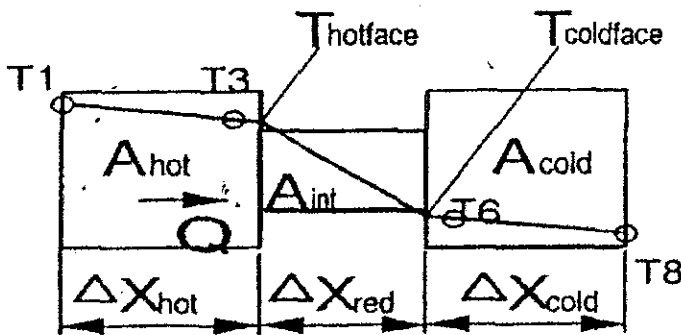
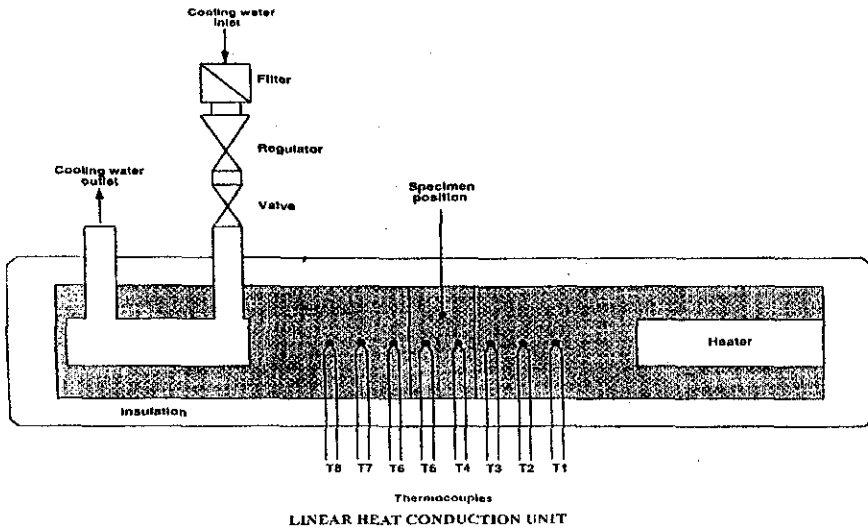
ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน เป็นตัวชี้ว่าในวัสดุรวมทั้งหมดมีการนำความร้อนดีเพียงใด

### จุดประสงค์

1. เพื่อหาค่าการนำความร้อน (thermal conductivity, k) ของแผ่นก
2. เพื่อให้เข้าใจถึงกฎมาตรฐานของฟูเรียร์ และนำมาใช้หาอัตราการนำความร้อนผ่านชั้นทดสอบผนังราบที่อัตราการนำความร้อนคงที่
3. เพื่อวัดค่าอุณหภูมิในการนำความร้อนที่สภาวะคงตัว เพื่อให้พลังงานความร้อนผ่านชั้นส่วนทดสอบเป็นค่าที่ต่างกัน

### อุปกรณ์การทดลอง

1. ชั้นทดสอบของแผ่นก
2. เครื่องมือวัดค่าการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Service Unit H110) ดังรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 เครื่อง Heat Transfer Service Unit H110

ผลต่างของอุณหภูมิสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของฟูเรียร์ ดังนี้

$$\Delta T = \left( \frac{1}{A} \right) \frac{Q \Delta x}{k}$$

โดย ค่าของ  $\Delta T$  จะอยู่ในแต่ละช่วงของพื้นที่ A ดังนั้นสามารถแยกคิดค่า Thermal conductivity เป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

ส่วนของ Heater 
$$\frac{\Delta T_{hot}}{\Delta x_{hot}} = \frac{Q}{k_{hot} A_{hot}}$$

ส่วนของชิ้นทดสอบ 
$$\frac{\Delta T_{int}}{\Delta x_{int}} = \frac{Q}{k_{int} A_{int}}$$

ส่วนของ Cooler 
$$\frac{\Delta T_{cold}}{\Delta x_{cold}} = \frac{Q}{k_{cold} A_{cold}}$$

**ขั้นตอนการทดลองหาการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังหลายชั้นและเป็นวัสดุต่างชนิดกัน (conduction along a composite bar)**

1. เตรียมเครื่องมือการทดลอง โดยต่อสายวัดอุณหภูมิ  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_6$ ,  $T_7$  และ  $T_8$  เข้ากับตัวเครื่อง
2. ทาสารตัวนำความร้อน (heat sink compound) ที่หน้าตัดทั้งสองด้านของชิ้นทดสอบ เพื่อป้องกันการเกิดช่องว่าง (air gap) ระหว่างหน้าสัมผัสของวัสดุทั้งสองด้าน
3. วางชิ้นทดสอบตรงกลางระหว่างทองเหลืองด้าน heater และ cooler
4. เปิดสวิตซ์เครื่อง
5. เปิดวาล์วน้ำหล่อเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิของผนังด้าน cooler วัดอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น
6. ปรับปุ่มควบคุมความต่างศักย์ (voltage control) ไปตามค่าที่ต้องการทดสอบ
7. หมุนปุ่มวัดค่าอุณหภูมิไปที่  $T_1$  รอจนกระทั่งแน่ใจว่าอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัวหรือมีค่าคงที่
8. หมุนสวิตซ์เลือกอ่านค่าอุณหภูมิทั้ง 6 จุด ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_6$ ,  $T_7$  และ  $T_8$ )
9. บันทึกค่าลงในตารางทั้งอุณหภูมิและปริมาณความร้อน ค่าของ  $V$  และ  $I$  อาจไม่ตรงกับที่ตั้งเอาไว้ตอนแรก ให้บันทึกค่าสุดท้ายที่ปรากฏ เมื่ออ่านค่าอุณหภูมิทั้ง 6 จุดเสร็จ
10. ปรับปุ่มควบคุมความต่างศักย์ไปที่ค่าอื่น ๆ ที่ต้องการแล้วทำตามขั้นตอนที่ 7-9 อีกครั้ง
11. เปลี่ยนชิ้นงานทดสอบ ทำตามขั้นตอนที่ 2-10 อีกครั้ง
12. เสร็จแล้วปิดสวิตซ์และปิดวาล์วน้ำหล่อเย็น ทำความสะอาดเครื่องมือทุกชิ้นและบริเวณที่ทำการทดลอง

ผลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นกัก

Sample No.	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Electrical Power (W)	Voltage (V)	Ampere (A)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)	T8 (°C)
1	25.00	1.50	2.65	5.00	0.53	43.30	42.90	42.70	28.50	28.10	28.00
2	25.00	1.50	2.65	5.00	0.53	43.50	43.10	42.90	28.60	28.20	28.10
3	25.00	1.50	6.80	8.00	0.85	70.50	69.40	68.60	29.80	29.00	28.40
4	25.00	1.50	6.80	8.00	0.85	70.60	69.60	68.70	30.00	29.20	28.60
<b>Distance from T1 (m)</b>						0.0000	0.0150	0.0300	0.0465	0.0615	0.0765

## การคำนวณหาค่าการนำความร้อนของแผ่นกัก

1. พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\pi D^2}{4} \\
 &= \frac{\pi \times 0.025^2}{4} \\
 &= 0.000491 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

2. อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจาก heater

$$Q = V \times I$$

ชิ้นทดสอบที่ 1 และ 2;

$$\begin{aligned}
 Q &= 5 \times 0.53 \\
 &= 2.65 \text{ W}
 \end{aligned}$$

ชิ้นทดสอบที่ 3 และ 4;

$$\begin{aligned}
 Q &= 8 \times 0.85 \\
 &= 6.8 \text{ W}
 \end{aligned}$$

3. หา  $T_{\text{hotface}}$  และ  $T_{\text{coldface}}$ 

$$T_{\text{hotface}} = T_3 - \frac{(T_2 - T_3)}{2}$$

$$T_{\text{coldface}} = T_6 + \frac{(T_6 - T_7)}{2}$$

ถ้า  $Q = 2.65 \text{ W}$  ;

$$\begin{aligned}
 T_{\text{hotface}} &= 42.8 - \frac{(43 - 42.8)}{2} \\
 &= 42.7 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{\text{coldface}} &= 28.55 + \frac{(28.55 - 28.15)}{2} \\
 &= 28.75 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{\text{int}} &= T_{\text{hotface}} - T_{\text{coldface}} \\
 &= 42.7 - 28.75 \\
 &= 13.95 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

ถ้า  $Q = 6.8 \text{ W}$  ;

$$T_{\text{hotface}} = 68.65 - \frac{(69.5 - 68.65)}{2}$$

$$= 68.225 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{coldface}} = 28.55 + \frac{(28.55 - 28.15)}{2}$$

$$= 28.75 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ดังนั้น

$$\Delta T_{\text{int}} = T_{\text{hotface}} - T_{\text{coldface}}$$

$$= 68.225 - 28.75$$

$$= 39.475 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

#### 4. ค่าการนำความร้อน

$$k_{\text{int}} = \frac{\dot{Q} \Delta X_{\text{int}}}{A_{\text{int}} (T_{\text{hotface}} - T_{\text{coldface}})}$$

ค่า  $\dot{Q} = 2.65 \text{ W}$  ;

$$= \frac{\dot{Q} \Delta X_{\text{int}}}{A_{\text{int}} \Delta T_{\text{int}}}$$

$$= \frac{2.65 \times 0.0015}{0.000491 \times 13.95}$$

$$= 0.58 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

ค่า  $\dot{Q} = 6.8 \text{ W}$  ;

$$= \frac{\dot{Q} \Delta X_{\text{int}}}{A_{\text{int}} \Delta T_{\text{int}}}$$

$$= \frac{6.80 \times 0.0015}{0.000491 \times 39.475}$$

$$= 0.526 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

## ภาคผนวก ค

การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบกกลูกสุกรในโรงเรือนคลด

$$\text{อัตราการถ่ายเทความร้อน } Q' = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

โดย  $\Delta x$  คือ ความหนาระหว่างผิวด้านนอกและด้านในของแผ่นก

$k$  คือ ค่าการนำความร้อนของแผ่นก

$\Delta T$  คือ ผลต่างอุณหภูมิของผิวด้านนอกและด้านในของแผ่นก

อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (heat flux)

$$q = \frac{Q}{A} = k \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

เมื่อ

$$k = 0.58 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\Delta x = 0.007 \text{ m}$$

ดังนั้น

$$q = (0.58 \text{ W/m}^\circ\text{C}) \frac{(43.9 - 33.3^\circ\text{C})}{(0.007 \text{ m})}$$
$$= 878 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

พื้นที่ผิวของแผ่นก 1 แผ่น =  $0.16 \text{ m}^2$  และภายใน 1 โรงเรือน มีแผ่นกทั้งหมด 168 แผ่น

$$\text{พื้นที่ถ่ายเทความร้อนทั้งหมด} = 168 \text{ m} \times 0.16 \text{ m} = 26.88 \text{ m}^2$$

ดังนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยต่อโรงเรือน  $Q = qA$

$$= 878 \text{ W/m}^2 \times 26.88 \text{ m}^2$$

$$= 23608.32 \text{ W}$$

$$= 23.6 \text{ kW / โรงเรือน}$$

เนื่องจากพลังงานความร้อนของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ได้มีค่า

101.62 kW ดังนั้น ระบบกกลูกสุกรสามารถจ่ายพลังงานความร้อนได้  $\frac{101.62}{23.6} \approx 4.3$  โรงเรือน



## ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ เกิดเมื่อวันที่ 26 มิถุนายน 2513 จังหวัดสิงห์บุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต(เกษตรกลวิธาน) ระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก Ph.D. (Agricultural and Forest Engineering) จาก University of Tsukuba ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร และหัวหน้าหน่วยปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงานวิชาการ/ผลงานวิจัย ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะทางด้านพลังงานทดแทนและการกำจัดของเสีย