

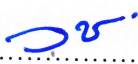
การสร้างแบบจำลองข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดและการออฟติไมซ์
สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง
โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน

นาถฤดี รวมทวี


วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
เมษายน 2560
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา


คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ นาดฤดี รวบรวมวิ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

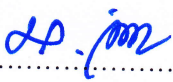
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์


.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วชิรา ดาวสุด)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....ประธาน
(ศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติสุกกร)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วชิรา ดาวสุด)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เล็ก วันทนา)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติพงษ์ บุญโถ่ง)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม
ของมหาวิทยาลัยบูรพา


.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อานันต์ ดีพัฒนา)

วันที่ 6 เดือน เมษายน พ.ศ. 2560

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วชิรา คาวสุต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้ความรู้ แนวคิด คำแนะนำตลอดจน ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดีมาโดยตลอด ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างยิ่ง ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้สละเวลามาดำเนินการสอบและกรุณาชี้แนะแนวทางจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่อนุเคราะห์ทุนอุดหนุน การศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาแก่ผู้จัดทำจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เล็ก วันทา หัวหน้าภาควิชา วิศวกรรมเคมี ตลอดจนคณาจารย์และเจ้าหน้าที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ และให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

นาถฤดี รวมทวี

57910222: สาขาวิชา: วิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม; วศ.ม. (วิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม)

คำสำคัญ: ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด/ กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ/ ออฟติไมเซชัน

นาถฤดี รวมทวี: การสร้างแบบจำลองข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดและการออฟติไมเซชันสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน (HYBRID NEURAL NETWORK MODELING AND OPTIMIZATION OF AN ANAEROBIC DIGESTION OF SHRIMP CULTURE POND SEDIMENTS IN BIOGAS PRODUCTION PROCESS) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: วชิรา ดาวสุด, ประ.ด., 109 หน้า. ปี พ.ศ. 2560.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างแบบจำลองข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดและการออฟติไมเซชันสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองเพื่อหาโปรไฟล์อุณหภูมิของกระบวนการซึ่งให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด ซึ่งดำเนินการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนที่อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง 39-42 และ 46-58 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 วัน จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมระหว่างข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดพบว่า ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่มีโครงสร้าง [7-5-4-1] สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด ทั้งในกรณีสภาวะปกติและกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด จากการออฟติไมเซชันกระบวนการโดยใช้ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดพบว่า โปรไฟล์อุณหภูมิที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 48.72-57.53 องศาเซลเซียส โดยจะให้ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมตลอด 12 วัน มีค่าเท่ากับ 371.80 มิลลิลิตร ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นถึง 8.06% เมื่อเทียบกับปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมจากการทดลอง

57910222: MAJOR: CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING; M.ENG.
(CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING)

KEYWORDS: HYBRID NEURAL NETWORK/ BIOGAS PRODUCTION PROCESS/
OPTIMIZATION

NARDRUEDEE RUAMTAWEE: HYBRID NEURAL NETWORK MODELING
AND OPTIMIZATION OF AN ANAEROBIC DIGESTION OF SHRIMP CULTURE POND
SEDIMENTS IN BIOGAS PRODUCTION PROCESS. ADVISORY COMMITTEE:
WACHIRA DAOSUD, Ph.D., 109 P. 2017.

Hybrid neural network (HNN) modeling and optimization of an anaerobic digestion of shrimp culture pond sediments in biogas production process were studied for determining optimum temperature profiles with maximal biogas production. The experiment of a 12-day process at room temperature, 39-42°C and 46-58°C was conducted using sediments from shrimp culture ponds. HNN, basing on mathematical models initially describing the anaerobic biogas production process, consisting of two-hidden layers with 5 and 4 nodes respectively gives the best prediction results in both normal case and model/ parameter mismatch case. Then, the optimization of operating temperature based on the HNN model gave satisfactory result at 48.72-57.53°C with a significantly higher yield of biogas (8.06%) compared with the experiment which had a cumulative volume of biogas equal to 371.80 ml.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
ขอบเขตของการศึกษา.....	3
ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมัก	
แบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน.....	5
ช่างงานนิวัตแบบไฮบริดและการออฟติไมซ์.....	15
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	39
การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมัก	
แบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน.....	39
การสร้างแบบจำลองช่างงานนิวัตและช่างงานนิวัตแบบไฮบริด	
ของกระบวนการ.....	48
การจำลองกระบวนการกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด	
(Model/ Parameter mismatch).....	54
การออฟติไมซ์กระบวนการโดยใช้ช่างงานนิวัตแบบไฮบริดเพื่อหาโปรไฟล์	
อุณหภูมิของกระบวนการซึ่งให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด.....	54

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	56
ผลการทดลองหมักตะกอนเลนเพื่อเก็บข้อมูล.....	56
การจำลองกระบวนการโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการหมัก แบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน.....	65
การสร้างชุดข้อมูลฝึกสอน ทดสอบและทดสอบประสิทธิภาพ สำหรับข่ายงานนิวรัล และข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด.....	66
การสร้างแบบจำลองข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด และการหา โครงสร้างที่เหมาะสมของข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด.....	73
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสม ของข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด.....	78
การจำลองกระบวนการกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (Model/ Parameter mismatch)	80
ผลการอพติไมซ์กระบวนการโดยใช้ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด.....	90
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	93
สรุปผลการทดลอง.....	93
สรุปผลการจำลองกระบวนการ.....	94
ข้อเสนอแนะ.....	96
บรรณานุกรม.....	97
ภาคผนวก.....	102
ภาคผนวก ก.....	103
ภาคผนวก ข.....	105
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	109

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนในถังหมักแบบกะ.....	14
4-1 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทำนายค่าปริมาณ การเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยข้อมูลงานนิเวศที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน.....	75
4-2 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทำนายค่าปริมาณ การเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยข้อมูลงานนิเวศแบบไฮบริดที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน.....	77
4-3 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการทำนายค่าปริมาณ การเกิดก๊าซชีวภาพสะสม ด้วยข้อมูลงานนิเวศและข้อมูลงานนิเวศแบบไฮบริด.....	80
4-4 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการทำนายค่าปริมาณ การเกิดก๊าซชีวภาพสะสม ด้วยข้อมูลงานนิเวศแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอน และไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (ในกรณีสภาวะปกติ)	85
4-5 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการทำนายค่าปริมาณ การเกิดก๊าซชีวภาพสะสม ด้วยข้อมูลงานนิเวศแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอน และไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) เพิ่มขึ้นจากเดิม 10%).....	87
4-6 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการทำนายค่าปริมาณ การเกิดก๊าซชีวภาพสะสม ด้วยข้อมูลงานนิเวศแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอน และไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ลดลงจากเดิม 10%).....	90

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1	กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนในถังหมักแบบกะ..... 10
2-2	ช่างงานนิวัลแบบไฮบริด..... 16
2-3	โครงสร้างระบบประสาท..... 16
2-4	โครงสร้างการทำงานของช่างงานนิวัล..... 17
2-5	โครงสร้างช่างงานนิวัลแบบชั้นเดียว..... 18
2-6	โครงสร้างช่างงานนิวัลแบบหลายชั้น..... 19
2-7	โครงข่ายที่ส่งสัญญาณแพร่ไปข้างหน้าแบบชั้นเดียว..... 19
2-8	โครงข่ายป้อนกลับแบบเวลาไม่ต่อเนื่องชั้นเดียว..... 20
2-9	การเรียนรู้แบบชี้หน้าหรือดูแล..... 21
2-10	การเรียนรู้แบบไม่มีการชี้หน้าหรือไม่มีการดูแล..... 21
2-11	การรับข้อมูลป้อนเข้าของเซลล์ประสาท..... 23
2-12	ซิกมอยด์ฟังก์ชัน..... 23
2-13	ช่างงานนิวัลแบบแพร่เดินทาง..... 24
2-14	ช่างงานนิวัลแบบแพร่ย้อนกลับ..... 25
2-15	การปรับค่าน้ำหนัก..... 26
2-16	ฟังก์ชันกระตุ้น 26
2-17	ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น..... 27
2-18	ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบซิกมอยด์..... 28
2-19	ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์..... 28
2-20	ช่างงานนิวัลแบบไฮบริด..... 30
2-21	โครงสร้างช่างงานนิวัลที่ใช้ทำนายค่าความแตกต่าง..... 30
2-22	ขั้นตอนการสร้างช่างงานนิวัลในช่างงานนิวัลแบบไฮบริด..... 32
2-23	ช่างงานนิวัลแบบไฮบริด..... 33
3-1	ชุดเครื่องคอมพิวเตอร์..... 41
3-2	Compact DAQ Chassis, Universal Analog Input module และสายแลน..... 41
3-3	อิเล็กโทรดวัดค่า pH..... 41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-4 โพรบวัดอุณหภูมิชนิด K.....	42
3-5 เครื่องนับฟองและเครื่องวัดปริมาณก๊าซ.....	42
3-6 เราเตอร์.....	42
3-7 หม้อน้ำมาเชื้อโรค.....	43
3-8 ขวดรูปชมพู่ขนาดบรรจุ 1 ลิตร.....	43
3-9 ถังเก็บก๊าซชีวภาพ.....	43
3-10 สายยาง.....	44
3-11 จุกยางขนาดต่างๆ	44
3-12 อลูมิเนียมฟอยล์.....	44
3-13 กาวซิลิโคน.....	44
3-14 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ.....	45
3-15 ตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง.....	45
3-16 การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสง และออกซิเจน.....	47
3-17 โครงสร้างของขำงานนิวรัล.....	49
3-18 โครงสร้างของขำงานนิวรัลในขำงานนิวรัลแบบไฮบริด.....	52
3-19 ขำงานนิวรัลแบบไฮบริด.....	53
3-20 ลักษณะของการออฟติไมซ์กระบวนการโดยใช้ขำงานนิวรัลแบบไฮบริด.....	55
4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง).....	57
4-2 ความสัมพันธ์ของค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง).....	57
4-3 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง).....	58
4-4 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง).....	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส).....	59
4-6 ความสัมพันธ์ของค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส).....	60
4-7 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส).....	61
4-8 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส).....	61
4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส).....	62
4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส).....	63
4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส).....	64
4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส).....	64
4-13 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง).....	65
4-14 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส).....	66
4-15 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส).....	66
4-16 ชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ในการฝึกสอนช่างงานนิเวศ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง).....	67

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-17 ชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ในการฝึกสอนช่างงานนิวัตร ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส).....	68
4-18 ชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ในการฝึกสอนช่างงานนิวัตร ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส).....	69
4-19 ชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ในการฝึกสอนช่างงานนิวัตร ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยวิธีหลักการสมการอย่างง่ายกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง).....	70
4-20 ชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ในการฝึกสอนช่างงานนิวัตร ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยวิธีหลักการสมการอย่างง่ายกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส).....	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-21 ชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ในการฝึกสอนช่างงานนิวรัล ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยวิธีหลักการสมการอย่างง่ายกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส).....	72
4-22 โครงสร้างของช่างงานนิวรัลที่เหมาะสมที่สุด [7-5-4-1].....	76
4-23 โครงสร้างของช่างงานนิวรัลที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายค่าความคลาดเคลื่อน [7-5-4-1].....	76
4-24 โครงสร้างของช่างงานนิวรัลแบบไฮบริด.....	76
4-25 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยช่างงานนิวรัลและช่างงานนิวรัลแบบไฮบริดที่มีโครงสร้าง [7-5-4-1] (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง).....	78
4-26 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยช่างงานนิวรัลและช่างงานนิวรัลแบบไฮบริดที่มีโครงสร้าง [7-5-4-1] (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส).....	79
4-27 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยช่างงานนิวรัลและช่างงานนิวรัลแบบไฮบริดที่มีโครงสร้าง [7-5-4-1] (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส).....	79
4-28 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) เพิ่มขึ้นและลดลงจากเดิม 10% (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง).....	81
4-29 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) เพิ่มขึ้นและลดลงจากเดิม 10% (อุณหภูมิการหมัก 39-42 องศาเซลเซียส).....	81
4-30 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) เพิ่มขึ้นและลดลงจากเดิม 10% (อุณหภูมิการหมัก 46-58 องศาเซลเซียส).....	82

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-31 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่สภาวะปกติด้วยข่างานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง).....	83
4-32 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่สภาวะปกติด้วยข่างานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิการหมัก 39-42 องศาเซลเซียส).....	83
4-33 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่สภาวะปกติด้วยข่างานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิการหมัก 46-58 องศาเซลเซียส).....	84
4-34 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 10% ด้วยข่างานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง).....	85
4-35 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 10% ด้วยข่างานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิการหมัก 39-42 องศาเซลเซียส).....	86
4-36 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 10% ด้วยข่างานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิการหมัก 46-58 องศาเซลเซียส).....	86
4.37 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าลดลงจากเดิม 10% ด้วยข่างานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง).....	88

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-38 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าลดลงจากเดิม 10% ด้วยข่างานนิวัธแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิกำรหมัก 39-42 องศาเซลเซียส).....	88
4-39 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าลดลงจากเดิม 10% ด้วยข่างานนิวัธแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิกำรหมัก 46-58 องศาเซลเซียส).....	89
4-40 โปรไฟล์อุณหภูมิกำรที่เหมาะสมของกระบวนการ ซึ่งได้จากการออฟติไมซ์กระบวนการโดยใช้ข่างานนิวัธแบบไฮบริด.....	91
4-41 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อดำเนินกระบวนการตามโปรไฟล์อุณหภูมิกำรที่ได้จากการออฟติไมซ์กระบวนการโดยใช้ข่างานนิวัธแบบไฮบริด.....	91

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กุ้งทะเลนับเป็นสัตว์น้ำที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจของประเทศไทยโดยนารายได้เข้าสู่ประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท โดยในปี พ.ศ. 2556 ประเทศไทยมีฟาร์มเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล 21,668 ฟาร์ม พื้นที่การเพาะเลี้ยง 311,589 ไร่ สามารถผลิตกุ้งทะเลได้ทั้งหมด 325,395 ตัน คิดเป็นมูลค่า 58,963.75 ล้านบาท (กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2556) อย่างไรก็ตาม การเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลซึ่งเป็นสัตว์น้ำชายฝั่งได้กลายเป็นภัยคุกคามที่สำคัญต่อระบบนิเวศชายฝั่งทะเล ซึ่งผลกระทบ คือ ของเสียที่เกิดขึ้นในบ่อเลี้ยงกุ้ง เนื่องจากน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งมีสารอินทรีย์อยู่มาก เมื่อหมกสลายตัวจะเกิดเป็นตะกอนเลนตกค้างที่พื้นบ่อ โดยปกติเกษตรกรมักปล่อยให้ตะกอนเลน ออกจากบ่อระหว่างการเลี้ยงหรือขนย้ายตะกอนเลนออกเมื่อต้องการจะเตรียมบ่อใหม่ ของเสียจึงถูก ถ่ายเทไปยังสภาพแวดล้อมชายฝั่ง จึงเป็นสาเหตุให้สภาพแวดล้อมของระบบนิเวศป่าชายเลน เกิดมลภาวะและดินเงิน (คณิต ไชยาคา และยงยุทธ ปริดาลัมพะบุตร, 2537) และส่งผลกระทบต่อ แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรง ในขณะที่เกษตรกรบางรายอาจตัดตะกอนเลนพักทิ้งไว้ข้างบ่อหรือ ในพื้นที่ที่ได้กำหนดไว้ ซึ่ง พบว่า พื้นที่บริเวณนั้นจะไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จนกว่าจะ มีการกำจัดหรือย่อยสลายของเสียเหล่านั้นแล้ว อย่างไรก็ตามการปล่อยตะกอนเลนทิ้งไว้ให้เกิด การย่อยสลายเองจะทำให้เกิดก๊าซมีเทนปล่อยออกสู่บรรยากาศซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่นกัน ดังนั้นการนำเอาตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งมาใช้ประโยชน์เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สามารถทำได้โดยการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งในภาคครัวเรือน และภาคอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักตะกอนเลนนั้นจำเป็นต้องมี การศึกษาสถานะที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพให้เกิดประโยชน์สูงสุด ในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนและพัฒนาไปเป็นการจัดการการเลี้ยงกุ้งแบบครบวงจร และยั่งยืนต่อไปในอนาคต

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักตะกอนเลนนั้นเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับตัวแปรหลายตัวแปรซึ่งต่างส่งผลกระทบต่อซึ่งกันและกัน จึงทำให้ มีผลกระทบต่อเนื่องกับปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (First principle model, FPM) ของกระบวนการนี้โดยใช้กฎการอนุรักษ์ (Conservation law) หรือ แบบจำลองเชิงทฤษฎี (Theoretical model) จึงยากที่จะเป็นไปได้ในการหาสมการทางคณิตศาสตร์

ที่ถูกต้องมาใช้เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของระบบ ทั้งนี้ นอกจากกระบวนการที่มีความซับซ้อนแล้ว การหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของกระบวนการนั้นยังค่อนข้างทำได้ยากและอาจประสบปัญหา ในการนำมาใช้เป็นตัวแทนของกระบวนการเนื่องจากถูกกำหนดให้อยู่ภายใต้สมมติฐานต่าง ๆ ดังนั้นการสรรหาวิธีในการจำลองกระบวนการได้อย่างถูกต้องจึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งจากการศึกษา พบว่า การจำลองกระบวนการด้วยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด (Hybrid neural network) เป็นวิธีการที่น่าสนใจเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการจำลองกระบวนการที่มีความซับซ้อน ได้ดีเยี่ยม สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการได้และยังสามารถใช้เป็นตัวแทนควบคุม กระบวนการทางเคมีและชีวภาพได้อย่างน่าพอใจอีกด้วย

ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดเป็นการจำลองกระบวนการ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของกระบวนการร่วมกับการทำงานของข่ายงานนิวรัล ซึ่งสามารถฝึกฝนได้โดยป้อนค่าข้อมูล ป้อนเข้า (Input) ที่สอดคล้องกับข้อมูลส่งออก (Output) และเรียนรู้ชุดข้อมูลกลับไปกลับมา เพื่อทำนายค่าข้อมูลส่งออกให้ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ได้ป้อนเข้าไป โดยในระหว่างนั้นข่ายงาน จะทำการสร้างแบบจำลองภายในแทนแบบจำลองจริงของกระบวนการ เมื่อข่ายงานได้รับการฝึกฝน จนกระทั่งได้ค่าข้อมูลส่งออกซึ่งเป็นที่ยอมรับแล้ว ข่ายงานนั้นจะสามารถนำไปใช้เป็นแบบจำลอง ของกระบวนการเพื่อทำนายข้อมูลส่งออกที่จะเกิดขึ้นตามเงื่อนไขของข้อมูลใหม่ที่ป้อนให้ข่ายงาน ได้ โดยข้อดีของการสร้างแบบจำลองด้วยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด คือ สามารถอธิบาย กระบวนการที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นสูงได้โดยอาศัยข้อมูลที่สามารถวัดค่าได้โดยตรง จากกระบวนการ ในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการด้วยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดนั้น อันดับแรกต้องทำความรู้จักกับ โครงสร้าง องค์ประกอบของข่ายงานและรูปแบบต่าง ๆ ของข่ายงาน ก่อน ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อสร้างแบบจำลองกระบวนการด้วยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน
2. เพื่อหาโปรไฟล์อุณหภูมิ (Temperature profile) ของกระบวนการที่ให้สัทธิภาพ ในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด โดยใช้เทคนิคการออปติไมซ์ (Optimization) ร่วมกับข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน
2. ดำเนินการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพในถังหมักแบบกะ (Batch reactor) โดยหมักตะกอนเลนปริมาณ 600 กรัม เป็นเวลา 12 วัน ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ช่วง ได้แก่ อุณหภูมิห้อง (26-33 องศาเซลเซียส) 39-42 องศาเซลเซียส และ 46-58 องศาเซลเซียส
3. ตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งที่นำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้จากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกรตำบลท่าข้าม อำเภอพนัสนิคม จังหวัดชลบุรี
4. สร้างแบบจำลองกระบวนการด้วยข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดแบบแพร่ไปข้างหน้า (Feedforward neural network) และทำการฝึกสอนข้อมูลด้วยวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ (Levenberg-Marquardt training algorithm)
5. วิเคราะห์และประเมินหาโปรไฟล์อุณหภูมิของกระบวนการที่ให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด โดยใช้เทคนิคการอพติไมซ์ร่วมกับแบบจำลองข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีของข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ และศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน
2. ดำเนินการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพในถังหมักแบบกะและบันทึกข้อมูลที่ได้จากกระบวนการ
3. สร้างชุดข้อมูลในการฝึกสอน (Training set) ชุดข้อมูลทดสอบ (Testing set) และชุดข้อมูลทดสอบประสิทธิภาพ (Validation set) สำหรับข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด
4. สร้างแบบจำลองข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนด้วยโปรแกรมช่วยจำลอง
5. เปรียบเทียบผลจากการจำลองกระบวนการ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

6. เปรียบเทียบผลจากการจำลองกระบวนการ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของช่างงานนิรวัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (Model/ Parameter mismatch)
7. นำเทคนิคการอพติไมซ์มาใช้ร่วมกับแบบจำลองช่างงานนิรวัลแบบไฮบริด เพื่อหาโปรไฟล์อุณหภูมิของกระบวนการที่เหมาะสมซึ่งให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด
8. รวบรวมข้อมูลเพื่อทำเล่มวิทยานิพนธ์

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองช่างงานนิรวัลและช่างงานนิรวัลแบบไฮบริดของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน ซึ่งสามารถทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ
2. ได้โปรไฟล์อุณหภูมิของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ซึ่งประกอบไปด้วยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน ข่างานนิเวศ ข่างานนิเวศแบบไฮบริดและการออฟติไมซ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแต่ละหัวข้อจะกล่าวดังรายละเอียดต่อไปนี้

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นกระบวนการทางธรรมชาติ ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยแบคทีเรียชนิดไม่อาศัยออกซิเจน (Anaerobic) ทำให้เกิดกลุ่มก๊าซขึ้นขณะเกิดการย่อยสลาย ซึ่งกลุ่มก๊าซดังกล่าวนี้เรียกว่า ก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นก๊าซผสมประกอบด้วยมีเทน (CH_4) เป็นหลัก รองลงมาคือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไนโตรเจน (N_2) ไฮโดรเจน (H_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และก๊าซอื่น ๆ อีกเล็กน้อย ซึ่งปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและสภาวะของกระบวนการหมัก โดยวัตถุดิบที่สามารถใช้ผลิตก๊าซชีวภาพได้ เช่น มูลสัตว์ เศษอาหาร น้ำเสีย วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรและกากตะกอน เป็นต้น สุรพล สุวคนธ์ (2526) วิเคราะห์ก๊าซชีวภาพจากการหมักมูลวัวแบบกึ่งต่อเนื่องในสภาพไร้ออกซิเจน โดยใช้ขวดหมักขนาด 2.75 ลิตร และใช้ไม้ไผ่เป็นตัวกลาง ระยะเวลาการหมัก 50 วัน พบว่า มีปริมาณก๊าซมีเทนอยู่ประมาณ 60.30% และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ประมาณ 36.10%

ตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง

ตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง คือ ของเสียที่เกิดจากการเลี้ยงกุ้งทะเลซึ่งประกอบไปด้วยเศษอาหารที่ใช้เลี้ยงกุ้ง มูลกุ้ง ซากแพลงก์ตอนพืช ซากแพลงก์ตอนสัตว์ ตะกอนดินและสารแขวนลอยอื่น ๆ ทั้งหมดรวมกันเป็นตะกอนของเสียที่อยู่ภายในบ่อเลี้ยงกุ้ง มีลักษณะเป็นโคลนเหลว (Sludge) สีดำเข้ม มีกลิ่นเหม็นเล็กน้อย ในการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลจะต้องมีระบบการดีน้ำเพื่อเพิ่มออกซิเจนให้กับกุ้งภายในบ่อ ซึ่งจะทำให้เกิดการไหลวนของกระแสน้ำภายในบ่อและทำให้

กากตะกอนของเสียรวมตัวกันอยู่ตรงกลางบ่อ โดยปัญหาที่พบ คือ ตะกอนดังกล่าวนี้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ อีกทั้งยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมดังนี้

สมศักดิ์ มณีพงศ์, ประวิทย์ โทวัฒน์ และพิภพ ปราบณรงค์ (2535) ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการทำนาุ้งที่อำเภอระโนด จังหวัดสงขลา พบว่า ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ทำให้สมบัติทั้งทางเคมีและทางกายภาพของดินในพื้นที่นาและบริเวณใกล้เคียงเปลี่ยนไป ไม่เหมาะกับการเจริญเติบโตของพืช ทำให้น้ำทะเลสกปรก ส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำชายฝั่งและทำลายแหล่งน้ำจืดธรรมชาติ ส่งผลให้ประชาชนขาดแคลนน้ำอุปโภคบริโภค

เชาว์ ศรีวิชัย, ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร, คณิต ไชยาคา และคุณิต ต้นวิไล (2537) ศึกษา พบว่า ตะกอนเลนซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงกุ้งทะเลเป็นสาเหตุทำให้ระบบนิเวศป่าชายเลนเกิดมลภาวะและสิ้นเงิน

สิริ เอกมหาราช และคณะ (2548) ทำการวิเคราะห์น้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งทะเลซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอนประกอบด้วยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ระบบนิเวศของทะเลสาบสงขลามีโอกาสเสื่อมโทรม เนื่องจากปัญหาแพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายเติบโตมากเกินไปในแหล่งน้ำ

Paez-osuna, Guerro-galvan and Ruiz-fernandez (1998) ศึกษาการเลี้ยงกุ้งทะเลในแถบตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศเม็กซิโก พบว่า การเลี้ยงกุ้งทะเลแบบพัฒนาส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำโดยเพิ่มปริมาณธาตุอาหารและสารอินทรีย์

ดังนั้นการนำตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลมาผลิตก๊าซชีวภาพจึงก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในด้านการอนุรักษ์พลังงานและการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร นอกจากนี้ยังให้ผลตอบแทนในรูปแบบต่าง ๆ อีกมากมาย

กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน

การหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน (Dark fermentation and anaerobic digestion) คือ การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ไปเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง โดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียในสภาพแวดล้อมที่ปราศจากออกซิเจน ซึ่งมีแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. แบคทีเรียสร้างกรด (Acid former bacteria) ซึ่งเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 4.00-6.05 และส่วนใหญ่เป็นกลุ่มกึ่งไม่ใช้ออกซิเจน (Facultative anaerobic bacteria) ดำรงชีวิตอยู่ได้โดยใช้สารอินทรีย์ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแบคทีเรียกลุ่มนี้คือ กรดอินทรีย์ แอลกอฮอล์ กิโตน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนีย เป็นต้น

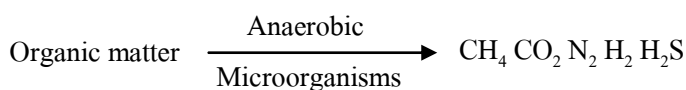
2. แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methane former bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้เจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 7.00-7.80 และส่วนใหญ่เป็นกลุ่มไม่ใช้ออกซิเจน (Obligate anaerobic bacteria) ดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจนเท่านั้น มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้น้อยกว่าพวกแรก ดังนั้นความแตกต่างของอัตราการเจริญเติบโตและข้อจำกัดด้านสภาพแวดล้อมนี้ทำให้แบคทีเรียที่สร้างมีเทนเป็นตัวหลักในการควบคุมความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดในกระบวนการ การดำรงชีวิตของแบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนในการเจริญเติบโตและมีผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทน

ปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นวิธีทางชีวภาพซึ่งสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนให้เป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์โดยที่ไม่มีออกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้อง สามารถแบ่งขั้นตอนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) หรือกระบวนการแตกสลายโพลิเมอร์ (Polymer break-down) สารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อน เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ที่ปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme) ทำให้กลายเป็นสารประกอบเชิงเดี่ยวหรือสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างกรด เช่น กลูโคส กรดอะมิโน และกรดไขมัน เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) สารที่ได้จากการย่อยสลายในขั้นตอนแรกถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับแบคทีเรียประเภทสร้างกรด โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะเปลี่ยนสารอาหารดังกล่าวให้เป็นกรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดวาเลอริก (Valeric acid) และกรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นจะมีสัดส่วนของกรดอะซิติกสูงที่สุด นอกจากนี้ยังเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนด้วย กรณีที่กลุ่มของแบคทีเรียสร้างกรดมีการสร้างกรดมากเกินไป จะก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพโดยรวม โดยแบคทีเรียสร้างมีเทนจะถูกยับยั้งการทำงานเนื่องจากมีกรดมากเกินไป ทำให้ค่า pH ของระบบลดลงอยู่ในช่วงที่เป็นกรดมาก ทำให้เกิดความไม่เหมาะสมกับการดำรงชีวิตของกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทน

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis) กรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรดจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทน การเกิดก๊าซมีเทนสามารถเกิดได้ 2 แบบ แบบแรกคือ เกิดจากการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนนี้มีปริมาณเป็น 72% ของก๊าซมีเทนที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ และอีกแบบหนึ่งจะเกิดจากการรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทน



(2-1)

ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน สภาพแวดล้อมของกระบวนการมีความสำคัญอย่างมากต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการมีดังนี้

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) จะส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียทั้งสองกลุ่ม โดยแบคทีเรียสร้างมีเทนจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของ pH มากที่สุด ซึ่งในขั้นตอนการเกิดก๊าซมีเทนจะเกิดได้ที่ pH ระหว่าง 6.80-7.20 ในขณะที่แบคทีเรียชนิดสร้างกรดสามารถอาศัยอยู่ได้ที่ pH ระหว่าง 5.00-8.00 ในทางปฏิบัติการรักษา pH ให้มีค่าเท่ากับ 7 จะทำให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มทำงานร่วมกันได้ดี

อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ไชโครฟิลิก (Psychrophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 10.00-20.00 องศาเซลเซียส เมโซฟิลิก (Mesophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 20.00-45.00 องศาเซลเซียส และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 50.00-60.00 องศาเซลเซียส ซึ่งในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพนั้นแบคทีเรียจะทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิเมโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิก โดยการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ในช่วงอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกแบคทีเรียจะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าช่วงเมโซฟิลิกประมาณ 20.00-50.00% จึงผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่า

ความเข้มข้นของของแข็ง (Solids concentration) ปริมาณของของแข็งในระบบมีความสำคัญต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ หากมีความเข้มข้นของของแข็งน้อยหรือมากเกินไปจะทำให้ปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นลดลง

สภาพแวดล้อมที่ปราศจากออกซิเจน ในกระบวนการหมักจะต้องไม่มีออกซิเจนอยู่เลย เนื่องจากออกซิเจนมีผลกระทบต่อเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน

สารอาหาร (Nutrients) แบคทีเรียที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน จะต้องการสารอินทรีย์ในอัตราส่วนของ C : N ประมาณ 20-30 : 1 นอกจากนี้แบคทีเรียยังต้องการแร่ธาตุบางชนิดในการสร้างเซลล์ใหม่ เช่น ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) โดยทั่วไปในมูลสัตว์จะมีธาตุอาหารเหล่านี้เพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรียอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเสริม

ธาตุอาหารเหล่านี้เข้าไปอีก

สารพิษ (Toxic substances) สารบางอย่างที่มีความเข้มข้นสูงเกินไปจะเป็นพิษกับแบคทีเรีย ได้แก่ สารประกอบของโลหะ เช่น โปแตสเซียม (K) โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) เป็นต้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน

การหมักแบบกะ (Batch fermentation) เป็นระบบการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียแบบปิดที่มีปริมาณสารอาหารเริ่มต้นจำกัด คือ มีการป้อนสารอาหารเพียงครั้งเดียวแล้วปล่อยให้ระบบเกิดการย่อยสลายไปจนถึงระยะเวลาที่ต้องการหรือจนหยุดกระบวนการแล้วจึงถ่ายสารออก (สมใจ ศิริ โภค, 2547) เมื่อเริ่มระบบการหมักแบบกะช่วงแรกจะเป็นระยะที่แบคทีเรียกำลังปรับตัวเซลล์ซึ่งจะยังไม่มีการเพิ่มจำนวน หลังจากนั้นแบคทีเรียจะมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสูงสุดและคงที่ แต่การเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะถูกจำกัดด้วยสารอาหารในระบบ เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ลดลงอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งหยุดการเจริญเติบโต ดังนั้นการศึกษาจลพลศาสตร์ของการหมัก (Fermentation kinetic) เป็นสิ่งจำเป็นที่จะทำให้เราทราบถึง ธรรมชาติการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมัก เช่น การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย การเกิดก๊าซชีวภาพ การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น หลักการสมการอย่างง่าย (First principle model, FPM) สามารถหาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เคยมีผู้ศึกษาไว้แล้ว โดยเกิดจากการทำสมดุลมวลสาร โดยใช้หลักการพื้นฐานของกฎอนุรักษ์มวล ดังสมการ

การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

$$\frac{dV}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (2-2)$$

การสะสมสุทธิของแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

$$\frac{d(VX)}{dt} = \mu VX - F_{out}X \quad (2-3)$$

การสะสมสุทธิของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

$$\frac{d(VS)}{dt} = -k_I \mu V X + F_{in} S_{in} - F_{out} S \quad (2-4)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรสารในระบบ (ลิตร)

X คือ ความเข้มข้นของแบคทีเรียในระบบ (กรัม/ลิตร)

S คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในระบบ (กรัม/ลิตร)

S_{in} คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ไหลเข้า (กรัม/ลิตร)

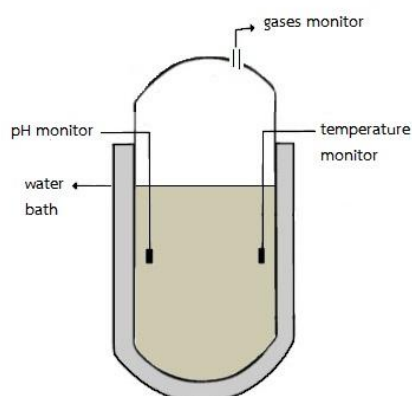
F_{in} คือ อัตราการไหลเข้า (ลิตร/นาที)

F_{out} คือ อัตราการไหลออก (ลิตร/นาที)

k_I คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายสารอินทรีย์

μ คือ อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (นาที⁻¹)

สมการดังกล่าว คือ สมมติฐานการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและระยะการบริโภคสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของแบคทีเรีย โดยสมมติฐานนี้ได้รับการตรวจสอบหลายครั้งและเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป (Monod, 1942)



ภาพที่ 2-1 กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนในถังหมักแบบกะ

สมการที่ (2-1) (2-2) และ (2-3) เป็นแบบจำลองเฉพาะที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในถังหมัก สำหรับการงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนในถังหมักแบบกะดั่งภาพที่ 2-1 ดังนั้นอัตราการไหลเข้าและไหลออกมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการ

$$F_{in} = F_{out} = 0 \quad (2-5)$$

ดังนั้นสมการที่ (2-1) (2-2) และ (2-3) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \quad (2-6)$$

$$\frac{dS}{dt} = -k_1 \mu X \quad (2-7)$$

การเจริญเติบโตของแบคทีเรียในถังหมักจะทำให้เกิดการสร้างผลิตภัณฑ์ซึ่งมีทั้งส่วนที่เป็นน้ำและก๊าซ ดังนั้นการทำสมดุลมวลของผลิตภัณฑ์ในถังหมักหาได้จากสมการ

$$\frac{dP}{dt} = vX - DP - Q \quad (2-8)$$

เมื่อ D คือ อัตราการเจือจาง (นาที่⁻¹)

P คือ ความเข้มข้นของสารสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว (ลิตร)

Q คือ อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ก๊าซชีวภาพ (ลิตร/นาที่)

v คือ อัตราการสร้างผลิตภัณฑ์ (ลิตร²/กรัม.นาที่)

ในบางครั้งความเข้มข้นของสารสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีน้อยมาก

($\frac{dP}{dt} = 0$) และไม่มีการไหลเข้า-ออกของสารในระบบ ($D=0$) ดังนั้นอัตราการไหลออกของ

ผลิตภัณฑ์ก๊าซจึงสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Q = vX \quad (2-9)$$

เมื่อการสร้างผลิตภัณฑ์ก๊าซสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ดังนั้นค่าเฉพาะของอัตราการสร้างผลิตภัณฑ์ก๊าซก็เป็นสัดส่วนกับค่าเฉพาะของอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ดังสมการ

$$v = k_2 \mu \quad (2-10)$$

เมื่อ k_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (ลิตร²/กรัม)

ดังนั้นอัตราการไหลออกของผลิตภัณฑ์ก๊าซจากถังหมักสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Q = k_2 \mu X \quad (2-11)$$

จากสมการที่ (2-5) (2-6) และ (2-10) อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (μ) คือ ตัวแปรที่สำคัญสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย การย่อยสลายและการสร้างผลิตภัณฑ์ก๊าซชีวภาพ ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพนั้นมีแบคทีเรียอยู่สองกลุ่มซึ่งต้องทำงานร่วมกันและสอดคล้องกัน โดยอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียนั้นจะขึ้นอยู่กับเวลา ($\mu(t)$) สมบัติทางกายภาพและเคมี ซึ่งปัจจัยทางด้านชีววิทยาสังแวดล้อมที่สำคัญคือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (S) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ (T) และปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ (Q) ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\mu(t) = \mu(S)\mu(pH)\mu(T)\mu(Q) \quad (2-12)$$

เมื่อ μ คือ อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (นาที่⁻¹)

S คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในระบบ (กรัม/ลิตร)

pH คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง

T คือ ค่าอุณหภูมิในระบบ (องศาเซลเซียส)

Q คือ อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (ลิตร/นาที่)

อิทธิพลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียหาได้จากสมการของ Monod law (Monod, 1942)

$$\mu(S) = \frac{\mu_{max}S}{k_s + S} \quad (2-13)$$

เมื่อ μ_{max} คือ อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสูงสุด (นาที่⁻¹)

k_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ (กรัม/ลิตร)

$k_{(s)}$ คือ ค่าคงที่

เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีปริมาณมากขึ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งแล้วจะค่อย ๆ คงที่

อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียหาได้จากสมการของ Parabolic law (Rozzi, 1984)

$$\mu(pH) = a(pH)^2 + b(pH) + c \quad (2-14)$$

เมื่อ a, b, c คือ ค่าคงที่

การเจริญเติบโตของแบคทีเรียสามารถเกิดขึ้นในช่วงระหว่าง pH 6.00-8.00 โดยจะมีการเจริญเติบโตได้ดีที่สุดอยู่ในช่วง pH ระหว่าง 6.80-7.20 (Ward et al., 2008)

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียหาได้จากสมการของ Arrhenius-type law (Topiwala and Sinclair, 1971)

$$\mu(T) = a_1 \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right) - a_2 \exp\left(\frac{-E_2}{RT}\right) - a_3 \quad (2-15)$$

เมื่อ E_1, E_2 คือ ค่าพลังงานของก๊าส (จูลส์/โมล)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าส (จูลส์/โมล. องศาเคลวิน)

a_1, a_2, a_3 คือ ค่าคงที่

การเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิซึ่งอุณหภูมิที่ทำให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียเกิดได้ดีนั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 32.00-42.00 องศาเซลเซียส

อิทธิพลของผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียหาได้จากสมการ

$$\mu(Q) = \frac{k_Q}{k_Q + Q} + k_{(Q)} \quad (2-16)$$

เมื่อ k_Q คือ ค่าสัมประสิทธิ์ (กรัม/ลิตร)

$k_{(Q)}$ คือ ค่าคงที่

การเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะมีความสัมพันธ์กับผลิตภัณฑ์ เมื่อเกิดผลิตภัณฑ์น้อย แสดงว่าปริมาณแบคทีเรีย ยังน้อยอยู่จึงทำให้มีการสร้างแบคทีเรียได้มากขึ้น เมื่อผลิตภัณฑ์มาก แสดงว่าปริมาณแบคทีเรียมีมากแล้วทำให้มีการสร้างแบคทีเรียได้น้อยลง

ตารางที่ 2-1 ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนในถังหมักแบบกะ (ประสิทธิ์ ศรีนคร, 2555)

พารามิเตอร์ ของกระบวนการ	ค่า	พารามิเตอร์ ของกระบวนการ	ค่า
k_1	2	a_1	1.68E ¹¹
k_2 (ลิตร ² /กรัม)	5	a_2	-5.10E ²³
μ_{max} (นาที่ ⁻¹)	0.9316	a_3	-0.0444
k_s (กรัม/ลิตร)	11.5905	k_Q (กรัม/ลิตร)	12
$k_{(S)}$	-0.7974	$k_{(Q)}$	19.434
a	-0.9949	R (จุดส์/โมล. องศาเซลวิน)	1.987
b	13.5861	E_1 (จุดส์/โมล)	16000
c	45.6025	E_2 (จุดส์/โมล)	34500

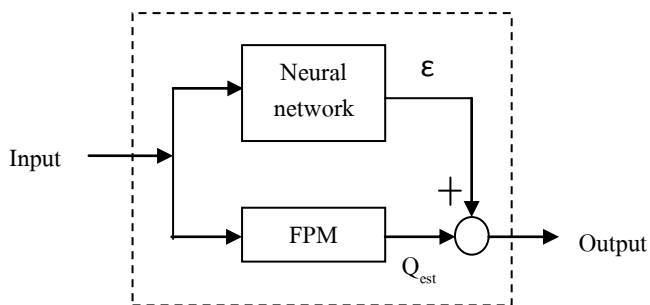
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นำมาจาก ประสิทธิ์ ศรีนคร (2555) ซึ่งได้ทำการศึกษาการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของ ตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งในถังหมักแบบกะและประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองโดยใช้ การค้นหาค่าตอบด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมไว้แล้ว ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ แสดงใน ตารางที่ 2-1

รายงานนิวัตแบบไฮบริดและการออฟติไมซ์

รายงานนิวัตแบบไฮบริด

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการ โดยใช้ระบบผสมหรือไฮบริด มักให้ค่าการทำนายที่แม่นยำกว่าการใช้วิธีในการทำนายเพียงวิธีเดียว เมื่อวิเคราะห์ถึงสาเหตุ พบว่า เป็นเพราะระบบไฮบริดมีการนำข้อดีของวิธีการพยากรณ์ต่าง ๆ มารวมกันทำให้มีประสิทธิภาพในการทำนายที่ดีกว่าการใช้วิธีการทำนายเพียงวิธีเดียว เช่น การพัฒนาข่ายงานนิวัตแบบไฮบริดเพื่อระบุและวัดค่าของตัวบวกรวนที่ไม่รู้จักได้ (Tsen, Shi and David, 1996) และ การใช้ข่ายงานนิวัตแบบไฮบริดร่วมกับในการทำนายพารามิเตอร์กระบวนการที่ไม่ทราบค่า (Qi, Zhou, Liu and Yuan, 1999) ซึ่งสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการทำนายได้

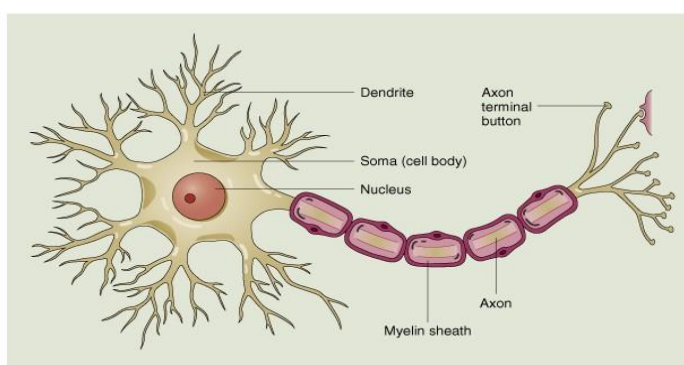
สำหรับข่ายงานนิวัตแบบไฮบริดที่ทำการศึกษานี้คือ การนำข่ายงานนิวัตมา ประยุกต์ใช้ร่วมกับหลักการสมการอย่างง่ายดังที่ได้กล่าวถึงแล้ว เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำนายค่าให้แม่นยำยิ่งขึ้น เนื่องจากกระบวนการที่ทำการศึกษานี้มีความไม่เป็นเชิงเส้น ค่าที่ทำนายได้จากสมการอาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ได้ตามสภาวะจริง ดังนั้นเพื่อเพิ่มความถูกต้องของการทำนายจึงได้นำข่ายงานนิวัตมาใช้ร่วมกัน โดยข่ายงานนิวัตมีหน้าที่ทำนายค่าความคลาดเคลื่อน (ϵ) ของการทำนายด้วยหลักการสมการอย่างง่ายซึ่งก็คือค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่เกิดขึ้นตามสภาวะจริงและค่าที่ได้จากการทำนายของหลักการสมการอย่างง่ายและเมื่อนำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากข่ายงานนิวัตมารวมเข้ากับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้หลักการสมการอย่างง่าย (Q_{est}) ค่าที่ทำนายได้จะมีความถูกต้องแม่นยำและใกล้เคียงกับค่าจริงมากยิ่งขึ้น ดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

ข่ายงานนิวรัล

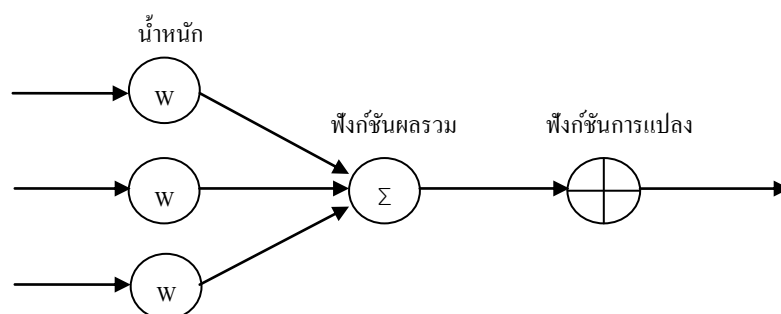
ข่ายงานนิวรัลหรือโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks, ANN) เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence: AI) ที่สามารถประยุกต์ใช้กับงานหลายด้านได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การทำนาย การควบคุม การจำแนกรูปแบบ การหาความเหมาะสม และการจัดกลุ่ม เป็นต้น หลักการสำคัญของข่ายงานนิวรัลคือ ความพยายามที่จะลอกเลียนแบบการทำงานของเซลล์ประสาทในสมองมนุษย์เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือ มีความสามารถในการรวบรวมความรู้ (Knowledge) โดยกระบวนการเรียนรู้ (Learning process) และความรู้เหล่านี้จะจัดเก็บอยู่ในรูปแบบค่าน้ำหนัก (Weight) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้เมื่อมีการเรียนรู้สิ่งใหม่ ๆ ค่าน้ำหนักทำหน้าที่เปรียบเสมือนความรู้ที่รวบรวมไว้เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาเฉพาะอย่างของมนุษย์ (ธนาวุฒิ ประกอบผล, 2552) ลักษณะโดยทั่วไปของโครงสร้างระบบประสาทแสดงดังภาพที่ 2-3



© 2000 John Wiley & Sons, Inc.

ภาพที่ 2-3 โครงสร้างระบบประสาท (นาถฤดี รวมทวี และมลฤดี ลัญชยานุกูล, 2556)

การประมวลผลเกิดขึ้นในหน่วยประมวลผลย่อยเรียกว่า โหนด (Node) ซึ่งเป็นการจำลองลักษณะการทำงานมาจากเซลล์การส่งสัญญาณ (Signal) ระหว่างโหนดที่เชื่อมต่อกัน (Connection) จำลองมาจากการเชื่อมต่อของแอกซอนและเดนไดรต์และแอกซอนในระบบประสาทของมนุษย์ภายในโหนดจะมีฟังก์ชันกำหนดสัญญาณส่งออกที่เรียกว่า ฟังก์ชันกระตุ้น (Activated function) หรือฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ทำหน้าที่เสมือนกระบวนการทำงานในเซลล์ ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 โครงสร้างการทำงานของข่ายงานนิวรัล (ชานวูฒิ ประกอบผล, 2552)

ข่ายงานนิวรัลประกอบด้วย 5 องค์ประกอบดังนี้

ข้อมูลป้อนเข้า (Input) เป็นข้อมูลที่เป็นตัวเลข หากเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพต้องแปลงให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลเชิงปริมาณที่ข่ายงานยอมรับได้

ข้อมูลส่งออก (Output) คือ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง (Actual output) จากกระบวนการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัล

ค่าน้ำหนัก คือ สิ่งที่ได้จากการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัล หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ค่าความรู้ (Knowledge) ค่านี้จะถูกเก็บเป็นทักษะเพื่อใช้ในการจดจำข้อมูลอื่น ๆ ที่อยู่ในรูปแบบเดียวกัน

ฟังก์ชันผลรวม (Summation function: S) เป็นผลรวมของข้อมูลป้อนเข้า (a_i) และค่าน้ำหนัก (w_i)

$$S = \sum_{i=1}^n a_i w_i \quad (2-16)$$

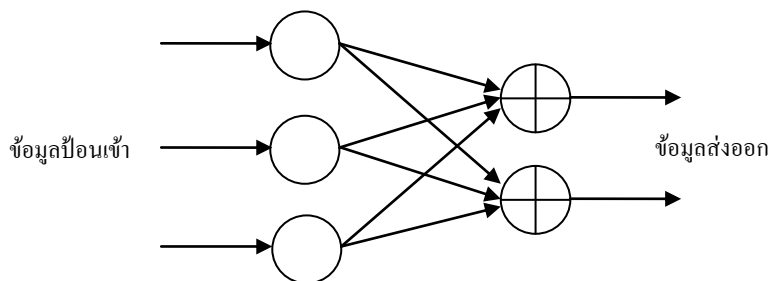
ฟังก์ชันถ่ายโอน เป็นการคำนวณจำลองการทำงานของข่ายงานนิวรัล เช่น

ซิกมอยด์ฟังก์ชัน (Sigmoid function) เป็นต้น

ลักษณะของข่ายงานนิวรัล

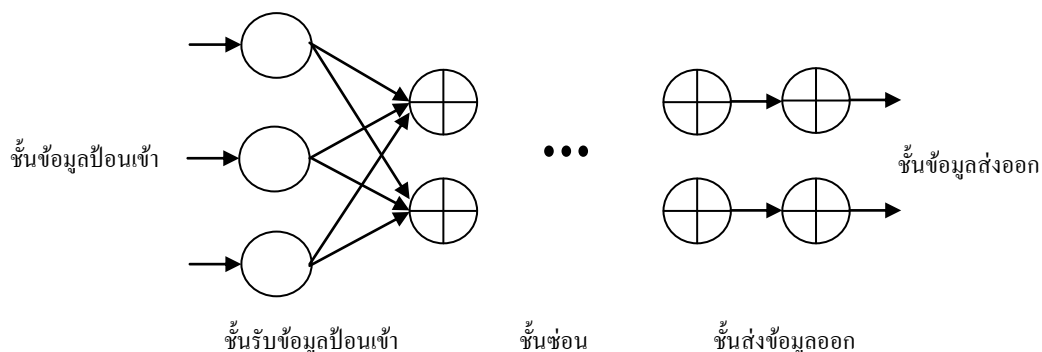
ข่ายงานนิวรัลประกอบด้วย เซลล์ประสาทเทียม หรือโหนดจำนวนมากเชื่อมต่อกัน ซึ่งการเชื่อมต่อแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยเรียกว่า ชั้น (Layer) ชั้นแรกเรียกว่า ชั้นข้อมูลป้อนเข้า (Input layer) ชั้นสุดท้ายเรียกว่า ชั้นข้อมูลส่งออก (Output layer) และชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นข้อมูลป้อนเข้ากับชั้นข้อมูลส่งออกเรียกว่า ชั้นซ่อน (Hidden layer) ซึ่งโดยทั่วไปอาจมีมากกว่า 1 ชั้นก็ได้ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถแบ่งประเภทของข่ายงานนิวรัลตามจำนวนชั้นของข่ายงานแบบกว้างๆ ได้ 2 แบบ ได้แก่

ข่ายงานนิวรัลแบบชั้นเดียว (Single layer) เป็นข่ายงานนิวรัลอย่างง่ายซึ่งมีเพียงชั้นรับข้อมูลป้อนเข้าและชั้นส่งข้อมูลส่งออกเท่านั้น โหนดในชั้นข้อมูลป้อนเข้าทำหน้าที่รับข้อมูลป้อนเข้า แล้วส่งข้อมูลผ่านเส้นเชื่อมโยงต่าง ๆ ไปให้โหนดในชั้นข้อมูลส่งออก ความเข้มของสัญญาณหรือปริมาณข้อมูลที่นำเข้าสู่โหนดในชั้นข้อมูลส่งออกจะขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนักที่อยู่บนเส้นเชื่อมโยง โหนดในชั้นข้อมูลส่งออกจะนำข้อมูลที่ได้รับมากำหนด โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่เหมาะสมกับปัญหาแล้วส่งผลลัพธ์ที่ได้ออกมาเป็นข้อมูลส่งออก ลักษณะข่ายงานแบบชั้นเดียวแสดงดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 โครงสร้างข่ายงานนิวรัลแบบชั้นเดียว (ธนาวุฒิ ประกอบผล, 2552)

ข่ายงานนิวรัลแบบหลายชั้น (Multi layer) มีลักษณะคล้ายกับข่ายงานนิวรัลแบบชั้นเดียว แต่จะมีชั้นซ่อนเพิ่มขึ้น โดยอยู่ส่วนกลางระหว่างชั้นนำข้อมูลป้อนเข้าและชั้นส่งข้อมูลออก ทั้งนี้ชั้นซ่อนอาจมีมากกว่า 1 ชั้น ข่ายงานแบบหลายชั้นจะใช้ในกรณีที่ปัญหาที่มีความซับซ้อนซึ่งข่ายงานแบบชั้นเดียวไม่สามารถแก้ปัญหาได้ จึงเพิ่มจำนวน โหนดหรือชั้นซ่อนให้กับข่ายงาน ลักษณะข่ายงานแบบหลายชั้นแสดงดังภาพที่ 2-6

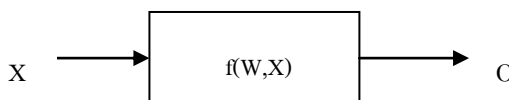


ภาพที่ 2-6 โครงสร้างข่ายงานนิวรัลแบบหลายชั้น (ธนาวุฒิ ประกอบผล, 2552)

การเชื่อมโยงของข่ายงานนิวรัล

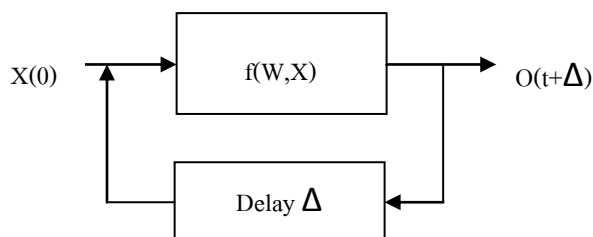
การเชื่อมโยงข่ายงานเพื่อให้ข่ายงานสามารถเรียนรู้และจดจำสิ่งที่เรียนรู้มาแล้วได้นั้น มีอยู่ 2 ลักษณะ ด้วยกันคือ

โครงข่ายที่ส่งสัญญาณแพร่ไปข้างหน้า (Feedforward network) โครงข่ายชนิดนี้จะประกอบไปด้วยชั้นต่าง ๆ โดยชั้นแรกจะเป็นค่าของข้อมูลป้อนเข้าและชั้นสุดท้ายจะเป็นค่าของข้อมูลส่งออก ส่วนระหว่างชั้นค่าของข้อมูลป้อนเข้าและชั้นค่าของข้อมูลส่งออกอาจจะมีหรือไม่มีชั้นที่แทรกอยู่ภายในอีกก็ได้ขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมที่ใช้ในการสอนโครงข่าย การเชื่อมต่อระหว่างชั้นโครงข่ายที่ส่งสัญญาณไปข้างหน้าจะมีค่าน้ำหนักเป็นตัวเชื่อมและสัญญาณของข้อมูลป้อนเข้าที่เข้ามาจะถูกส่งไปตามทิศทางของลูกศรจนถึงชั้นของข้อมูลส่งออกโดยไม่มีการป้อนกลับ ดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 โครงข่ายที่ส่งสัญญาณแพร่ไปข้างหน้าแบบชั้นเดียว (เจนจิรา ศรีสวัสดิ์ และเสาวลักษณ์ ผ่องใส, 2554)

โครงข่ายที่มีการป้อนกลับ (Feedback networks) ในส่วนแรกของโครงข่ายนี้จะมีลักษณะคล้ายกับโครงข่ายที่ส่งสัญญาณไปข้างหน้า แต่มีส่วนที่เพิ่มเข้ามาคือ ส่วนของการป้อนกลับ ดังแสดงในภาพที่ 2-8 และการป้อนกลับจะมีการหน่วงเวลาไปจากเวลาเดิม (Delay) ซึ่งโครงข่ายนี้จะเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า โครงข่ายรีเคอร์เรนท์ (Recurrent networks)

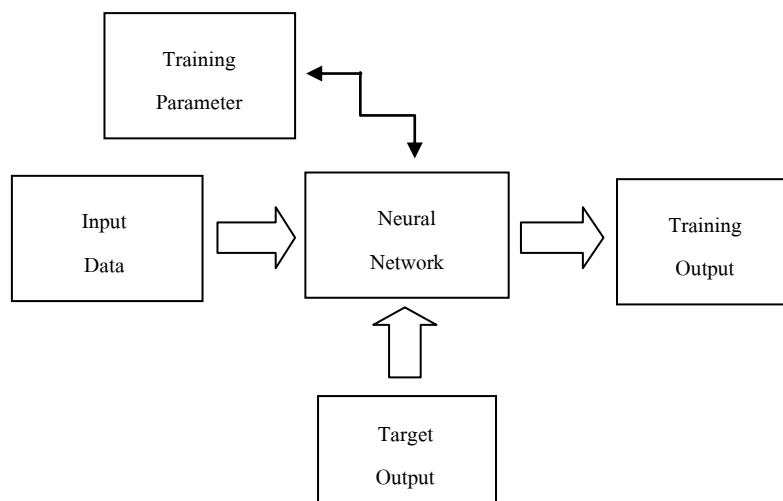


ภาพที่ 2-8 โครงข่ายป้อนกลับแบบเวลาไม่ต่อเนื่องชั้นเดียว (เจนจิรา ศรีสวัสดิ์ และเสาวลักษณ์ ผ่องใส, 2554)

การเรียนรู้ของข่ายงานนิเวรัล

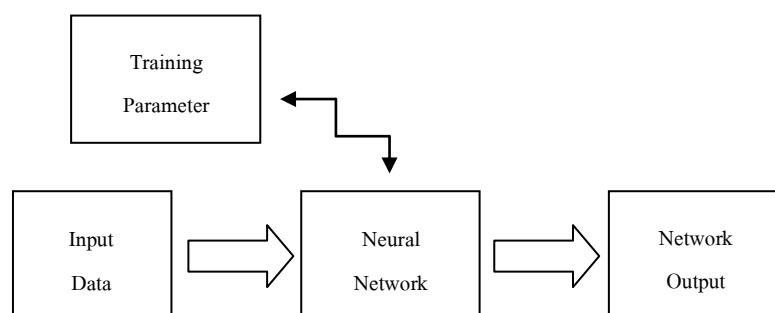
การเรียนรู้ของข่ายงานนิเวรัลจะมีประสิทธิภาพเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักของข่ายงานซึ่งได้จากการฝึกสอนข่ายงานเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมให้แก่ข่ายงานนั้น ๆ วิธีการฝึกสอนข่ายงานนิเวรัลมีอยู่สองแบบ ด้วยกันคือ

การสอนแบบชี้แนะหรือดูแล (Supervised learning) การสอนโดยวิธีนี้จะกำหนดเซตของการสอนให้กับข่ายงาน ซึ่งเซตการสอนนี้ประกอบด้วย ค่าของข้อมูลป้อนเข้าและค่าของข้อมูลส่งออกที่ต้องการ เมื่อป้อนค่าของข้อมูลป้อนเข้าให้กับข่ายงาน ข่ายงานจะทำการประมวลผลจนได้คำตอบและค่าถ่วงน้ำหนักออกมาชุดหนึ่ง โดยคำตอบที่ได้จากข่ายงานจะถูกนำมาคำนวณค่าความผิดพลาดโดยวัดเป็นระยะทางว่ามีความห่างจากคำตอบที่ต้องการมากน้อยเพียงใด ถ้ายังมีความผิดพลาดสูงอยู่ก็จะมี การปรับค่าถ่วงน้ำหนักและทำการสอนต่อไปจนกว่าค่าความผิดพลาดระหว่างคำตอบของข่ายงานกับค่าของข้อมูลส่งออกที่ต้องการมีค่าน้อยพอที่จะยอมรับได้จึงจะหยุดการสอนและค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จะเป็นเหมือนฟังก์ชันที่ใช้ในการแปลงข้อมูล



ภาพที่ 2-9 การเรียนรู้แบบชี้แนะหรือดูแล (เจนจิรา ศรีสวัสดิ์ และเสาวลักษณ์ ฝ่องใส, 2554)

การสอนแบบไม่มีการชี้แนะหรือไม่มีการดูแล (Unsupervised learning) ภายในข่ายงานจะมีโหนดของค่าข้อมูลส่งออกอยู่หลายโหนดด้วยกัน แต่ละโหนดจะแทนกลุ่มของข้อมูลที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน เมื่อป้อนค่าของข้อมูลป้อนเข้าสู่ข่ายงาน ข่ายงานจะคำนวณค่าความสัมพันธ์ที่มีอยู่ภายในเซตของค่าข้อมูลป้อนเข้า โดยอาศัยค่าถ่วงน้ำหนักเป็นตัวแยกความแตกต่างของค่าข้อมูลป้อนเข้าไปเก็บไว้ในโหนดของค่าข้อมูลส่งออก การสอนโดยวิธีนี้จะไม่สามารถระบุได้ว่าโหนดของค่าข้อมูลส่งออกใดเป็นของข้อมูลกลุ่มไหน ผู้ใช้จะต้องกำหนดเองซึ่งต่างจากการสอนแบบชี้แนะที่สามารถระบุกลุ่มค่าของข้อมูลส่งออกได้อย่างแน่นอน



ภาพที่ 2-10 การเรียนรู้แบบไม่มีการชี้แนะหรือไม่มีการดูแล (เจนจิรา ศรีสวัสดิ์ และเสาวลักษณ์ ฝ่องใส, 2554)

การฝึกสอนข่ายงานนิวิรัล

การฝึกสอนเป็นกระบวนการที่ใช้ตัวอย่างเพื่อพัฒนาข่ายงานนิวิรัลโดยรวบรวมรูปแบบของข้อมูลที่ป้อนเข้าด้วยคำตอบที่ถูกต้อง กลุ่มของตัวอย่างที่มีค่าของข้อมูลส่งออกที่รู้จักจะถูกส่งไปยังข่ายงานซ้ำ ๆ กันเพื่อฝึกฝนระบบข่ายงาน การฝึกสอนข่ายงานจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความแตกต่างระหว่างค่าของข้อมูลป้อนเข้าและรูปแบบค่าของข้อมูลส่งออกของกลุ่มที่ทำการฝึกสอนได้ผลลัพธ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งการฝึกสอนข่ายงานมีหลากหลายวิธี วิธีที่รู้จักกันทั่วไปคือการแพร่ย้อนกลับ ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ใช้เพื่อปรับค่าน้ำหนักในเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนดให้เหมาะสม โดยการปรับค่านี้อาศัยความแตกต่างของค่าข้อมูลส่งออกที่คำนวณได้กับค่าของข้อมูลป้อนเข้าที่ต้องการ

หลักการแพร่ย้อนกลับได้รับการพัฒนาโดย Rumelhart ถูกนำเสนอในช่วงปี 1986 โดยหลักการแพร่ย้อนกลับนี้สามารถประยุกต์เข้ากับโครงงานต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย ทำให้ได้รับความนิยมในการนำไปใช้เป็นอย่างมาก หลักการนี้มีพื้นฐานมาจากกฎเดลต้า (Delta rule) ที่พัฒนาขึ้นมาโดย Widrow และ Hoff ในช่วงปี 1960-1962 ซึ่งกระบวนการของกฎเดลต้าจะลดค่าความผิดพลาดที่ข้อมูลส่งออกของข่ายงานเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย โดยค่าผิดพลาดที่ลดลงนี้เกิดจากการปรับแต่งน้ำหนักที่ข้อมูลป้อนเข้าของแต่ละ โหนด Werbos (1974) ได้เสนอแนวคิดของการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ จากนั้น Parker (1982) ได้เสนออีกครั้งและเป็นที่ยอมรับมากขึ้นโดย Rumelhart et al. (1986) ในหนังสือ Parallel distributed processing ซึ่งได้กล่าวถึงศักยภาพของข่ายงานนิวิรัลและการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ

การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับสามารถแก้ปัญหาโดยการป้อนรูปแบบเข้าไป ข่ายงานนิวิรัลจะให้รูปแบบผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้องกัน (Dayhoff, 1990) การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับเป็นวิธีหนึ่งของข่ายงานนิวิรัลที่ง่ายต่อการเข้าใจ เนื่องจากกระบวนการเรียนรู้และปรับปรุงแก้ไขนั้นเป็นไปด้วยตนเอง หากข่ายงานนิวิรัลให้คำตอบที่ผิด ค่าน้ำหนักจะถูกปรับจนกว่าค่าความผิดพลาดน้อยลง หรืออยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ นั่นคือ ค่าที่ได้ในครั้งถัดไปจะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นด้วย ข่ายงานนิวิรัลที่มีลักษณะเป็นชั้นแต่ละชั้นเชื่อมโยงกันอย่างทั่วถึง เมื่อข่ายงานนิวิรัลได้รับข้อมูลป้อนเข้า ข่ายงานจะคำนวณค่าน้ำหนักของหน่วยรับข้อมูลป้อนเข้าไปยังชั้นซ่อนและจากชั้นซ่อนไปยังชั้นส่งข้อมูลออก เมื่อเกิดผลต่างระหว่างค่าผลลัพธ์จริงกับค่าผลลัพธ์เป้าหมาย ข่ายงานนิวิรัลจะปรับค่าความผิดพลาดจากชั้นส่งข้อมูลออกและแพร่ย้อนกลับไปยังชั้นซ่อน จากนั้นจึงแพร่ย้อนกลับไปยังชั้นรับข้อมูลป้อนเข้าตามลำดับ

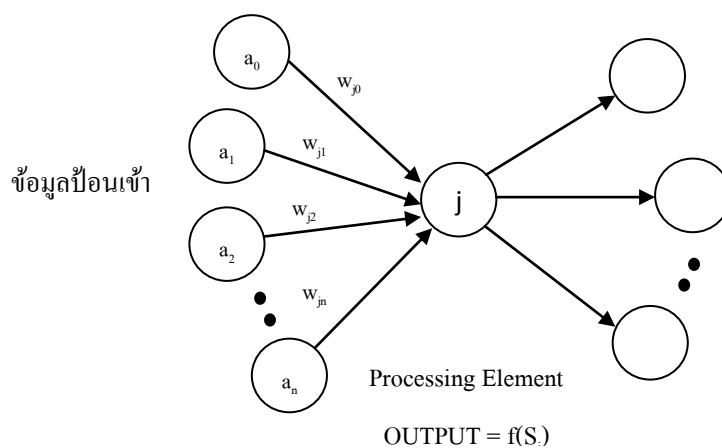
ขั้นตอนการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับประกอบด้วย 2 ขั้นตอนดังนี้

1. การแพร่คินหน้า ขั้นตอนนี้เริ่มขึ้นเมื่อเซลล์ประสาทได้รับข้อมูล แสดงดังภาพที่ 2-11 ซึ่งเป็นการคำนวณผลรวมของผลลัพธ์ที่เข้ามายังหน่วยที่ j ดังสมการ 2-17

$$S = \sum_{i=1}^n a_i w_i \quad (2-17)$$

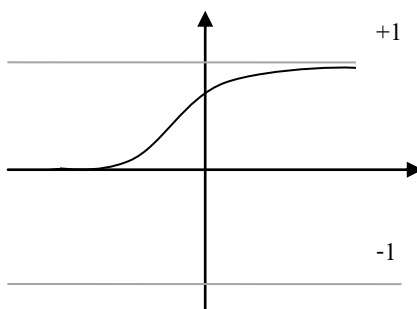
โดยที่ a_i คือ ข้อมูลจากหน่วยที่ i

w_i คือ ค่าน้ำหนักจากหน่วยที่ i ไปยังหน่วยที่ j



ภาพที่ 2-11 การรับข้อมูลป้อนเข้าของเซลล์ประสาท (ชนาวุฒิ ประกอบผล, 2552)

จากนั้นทำการแปลงค่าข้อมูลโดยการคำนวณค่าผลลัพธ์ $f(S)$ โดยใช้ซิกมอยด์ฟังก์ชัน ดังภาพที่ 2-12

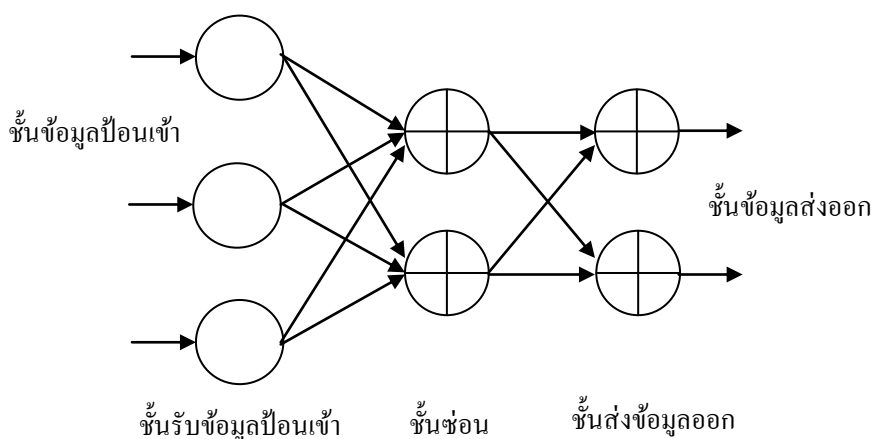


ภาพที่ 2-12 ซิกมอยด์ฟังก์ชัน

สมการของซิกมอยด์ คือ $f(x) = \frac{1}{1 - e^{-x}}$ เมื่อ x คือ ค่าผลรวมของหน่วยที่ j ดังนั้น

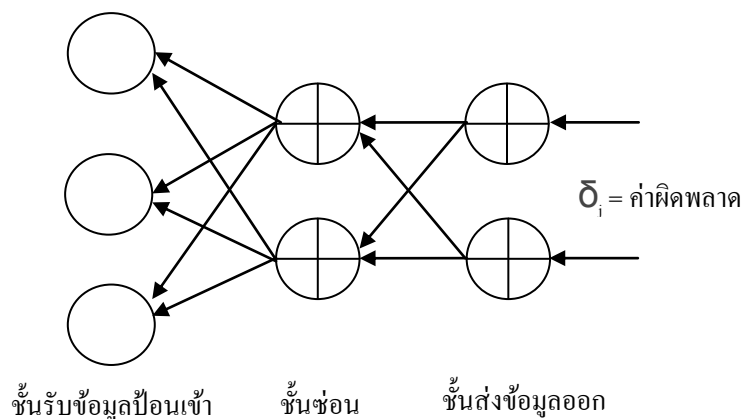
สมการนี้เมื่อได้รับค่า $f(S_j)$ แล้ว ค่า $f(S_j)$ จะกลายเป็นผลลัพธ์ของหน่วยที่ j

สำหรับชั้นรับข้อมูลป้อนเข้าจะไม่มีการประมวลผลเกิดขึ้นและไม่มีการแปลงค่าข้อมูล เนื่องจากแต่ละหน่วยประมวลผลจะใช้ค่าของข้อมูลป้อนเข้าเป็นค่าของตนเอง ข่ายงานนิวรัลแบบ การแพร่เดินหน้าแสดงดังภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 ข่ายงานนิวรัลแบบแพร่เดินหน้า (ธนาวุฒิ ประกอบผล, 2552)

2. การแพร่ย้อนกลับ ชั้นตอนนี้ค่าความผิดพลาด (δ) จะถูกคำนวณที่หน่วยประมวลผล ทั้งหมดและคำนวณค่าน้ำหนักของการเชื่อมโยง การคำนวณนี้เริ่มที่ชั้นส่งข้อมูลออกและแพร่ย้อนกลับไปยังชั้นรับข้อมูลป้อนเข้า แสดงดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 ข่ายงานนิวรัลแบบแพร่ย้อนกลับ (ชานวูฒิ ประกอบผล, 2552)

ชั้นปรับปรุงความผิดพลาดเกิดขึ้นหลังจากที่ดำเนินการแพร่เดินหน้าแล้ว หน่วยประมวลผลแต่ละหน่วยในชั้นส่งข้อมูลออกจะให้ค่าผลลัพธ์ที่ต้องนำมาเปรียบเทียบกับค่าผลลัพธ์เป้าหมายในชุดการสอน ความแตกต่าง คือ ค่าความผิดพลาดสำหรับแต่ละหน่วยในชั้นส่งข้อมูลออก ซึ่งค่าน้ำหนักของการเชื่อมโยงไปยังชั้นส่งข้อมูลออกจะถูกปรับ จากนั้น ค่าความผิดพลาดของหน่วยในชั้นซ่อนจะถูกปรับเช่นกัน กระบวนการนี้จะดำเนินไปจนกระทั่งถึงชั้นรับข้อมูลป้อนเข้า ค่าความผิดพลาด (δ_j) สามารถหาได้จากการคำนวณตามสมการที่ (2-18)

$$\delta_j = (t_j - a_j) f'(s_j) \quad (2-18)$$

เมื่อ t_j คือ ค่าเป้าหมายของหน่วยที่ j

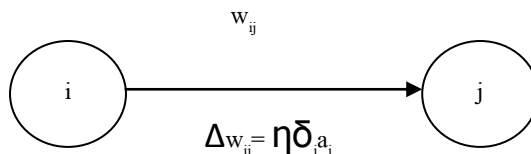
a_j คือ ค่าผลลัพธ์ของหน่วยที่ j

$f(x)$ คือ อนุพันธ์ของซิกมอยด์ฟังก์ชัน

s_j คือ ผลรวมของข้อมูลป้อนเข้าหน่วยที่ j

การปรับค่าน้ำหนักจะปรับโดยใช้ค่า δ ของทุกหน่วยที่รับผลลัพธ์จากหน่วยที่ j

ค่าน้ำหนักแต่ละค่าจะถูกปรับโดยสมการดังภาพที่ 2-15 แสดงการปรับค่าน้ำหนัก w_{ij} ซึ่งค่านี้ขึ้นกับตัวแปร 3 ตัว คือ η , δ_i และ a_j



ภาพที่ 2-15 การปรับค่าน้ำหนัก (ชนาวุฒิ ประกอบผล, 2552)

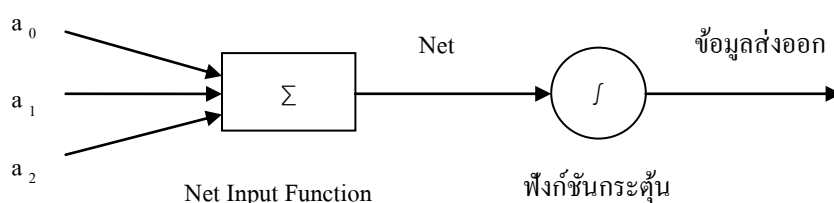
ตัวแปร η คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ซึ่งกำหนดโดยผู้ใช้ นอกจากค่า η แล้วยังมีค่าโมเมนต์ดัม (δ) ซึ่งคิดโดย William และ Rumelhart Hinton ซึ่งค่านี้จะช่วยให้การเรียนรู้เร็วขึ้น ดังนั้นค่าน้ำหนักจะถูกปรับโดยสมการที่ (2-19)

$$\Delta w_{ij}(k+1) = \eta \delta_i a_i + \alpha [\Delta w_{ij}(k)] \quad (2-19)$$

เมื่อ k คือ ดัชนีเวลา (Time index) หรือจำนวนรอบของการปรับค่าน้ำหนัก

ฟังก์ชันถ่ายโอน

ข่ายงานนิวรัลทั่วไปประกอบด้วย 3 ชั้น คือ ชั้นนำข้อมูลป้อนเข้า ชั้นซ่อน และชั้นส่งข้อมูลออก โดยชั้นซ่อนจะมีฟังก์ชันถ่ายโอนหรือบางครั้งเรียกว่าฟังก์ชันกระตุ้น แสดงดังภาพที่ 2-16

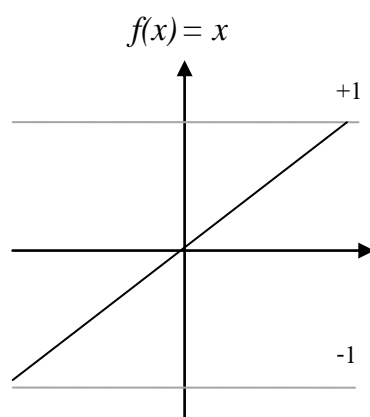


ภาพที่ 2-16 ฟังก์ชันกระตุ้น (ชนาวุฒิ ประกอบผล, 2552)

โดยปกติฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น (Linear transfer function) ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้นสามารถเรียนรู้เพียงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างข้อมูลป้อนเข้าและข้อมูลส่งออก ดังนั้นจึงไม่สามารถหาคำตอบได้สำหรับบางกรณี อย่างไรก็ตามถ้าคำตอบที่ได้ไม่ใช่คำตอบที่พอดี ฟังก์ชันถ่ายโอน

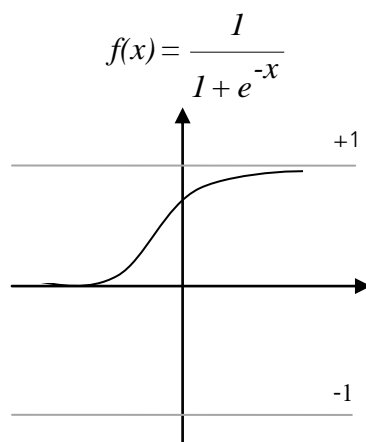
เชิงเส้นจะหาค่าต่ำสุดของผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสอง แต่ถ้าอัตราการเรียนรู้มีค่าน้อยข้างงาน
 นิวิธจะหาค่าตอบที่ใกล้เคียงเท่าที่จะเป็นไปได้ที่จะแสดงลักษณะเชิงเส้นของข่ายงาน ฟังก์ชัน
 ถ่ายโอนเชิงเส้นสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์และแสดงได้ดังภาพที่ 2-17



ภาพที่ 2-17 ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น

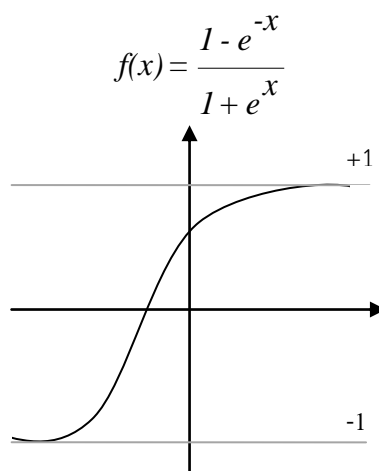
2. ฟังก์ชันถ่ายโอนไม่เชิงเส้น (Nonlinear transfer function) ฟังก์ชันถ่ายโอนไม่เชิงเส้น
 ประกอบด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน 2 ชนิด คือ

2.1 ซิกมอยด์ฟังก์ชัน หรือฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์ ซึ่งจะบีบช่วงระหว่างข้อมูล
 ป้อนเข้าที่ไม่จำกัดให้เป็นช่วงข้อมูลส่งออกที่จำกัด โดยช่วงของข้อมูลส่งออกจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1
 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบซิกมอยด์จะแสดงลักษณะที่มีความชันเข้าใกล้ศูนย์เมื่อข้อมูลป้อนเข้ามีจำนวน
 มาก ขั้นตอนการฝึกฝนแบบการแพร่ย้อนกลับมีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลกระทบต่อค่าน้ำหนัก
 ปัจจุบัน เมื่ออนุพันธ์ของฟังก์ชันสัมพันธ์กับค่าน้ำหนักที่มีเครื่องหมายเดียวกัน ค่าน้ำหนักปัจจุบัน
 และความโน้มเอียงแต่ละค่าจะเพิ่มขึ้น สำหรับการทำให้รอบสองค่าน้ำหนักปัจจุบันจะลดลงเมื่อ
 อนุพันธ์ที่สัมพันธ์กับน้ำหนักเปลี่ยนแปลงเครื่องหมายจากการกระทำรอบก่อน ถ้าอนุพันธ์
 เท่ากับศูนย์แสดงว่าค่าน้ำหนักปัจจุบันยังคงเดิม ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบซิกมอยด์สามารถเขียนเป็น
 สมการทางคณิตศาสตร์ แสดงได้ดังภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบซิกมอยด์

2.2 ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ มีลักษณะเช่นเดียวกับฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์ แต่ต่างกันเพียงช่วงของข้อมูลส่งออกจะอยู่ในช่วง -1 ถึง +1 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ แสดงได้ดังภาพที่ 2-19



ภาพที่ 2-19 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์

วิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

วิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ เป็นวิธีการหาค่าฟังก์ชันที่ต้องการ โดยกรรมวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นมีพัฒนาการมาจากวิธีของเกาส์-นิวตัน เพื่อหาค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดจากสมการไม่เป็นเชิงเส้นทั่วไป คือ

$$y(x) = f(X, \beta) + \varepsilon \quad (2-20)$$

$$\text{Minimize}(s) = \sum_{n=1}^n (y_i - f(x_i, \beta_i))^2 \quad (2-21)$$

การตรวจสอบความถูกต้องของข่ายงาน

การประเมินประสิทธิภาพจากการทำนายของข่ายงานนิวิรัลสามารถใช้สถิติในการทดสอบความถูกต้อง ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ในการวัดค่าความผิดพลาดระหว่างผลการทดสอบและข้อมูลจริงจากชุดตรวจสอบความถูกต้อง คือ ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean square error, MSE) ดังสมการที่ (2-22)

$$\text{Mean Square Error (MSE)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{Actual} - \text{Predict})^2 \quad (2-22)$$

เมื่อ *Actual* คือ ข้อมูลจริงที่ได้จากกระบวนการ

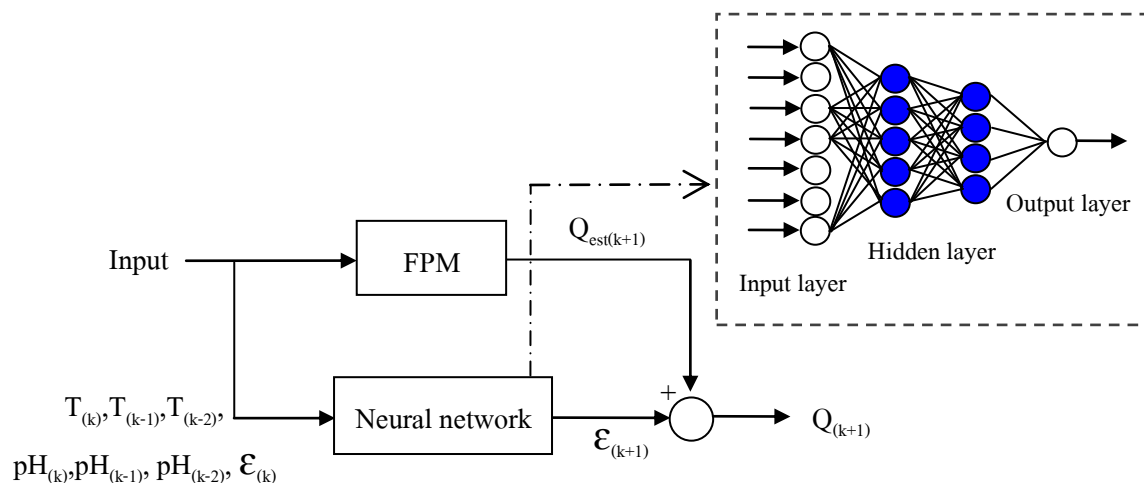
Predict คือ ข้อมูลที่ได้จากการทำนาย

n คือ จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้

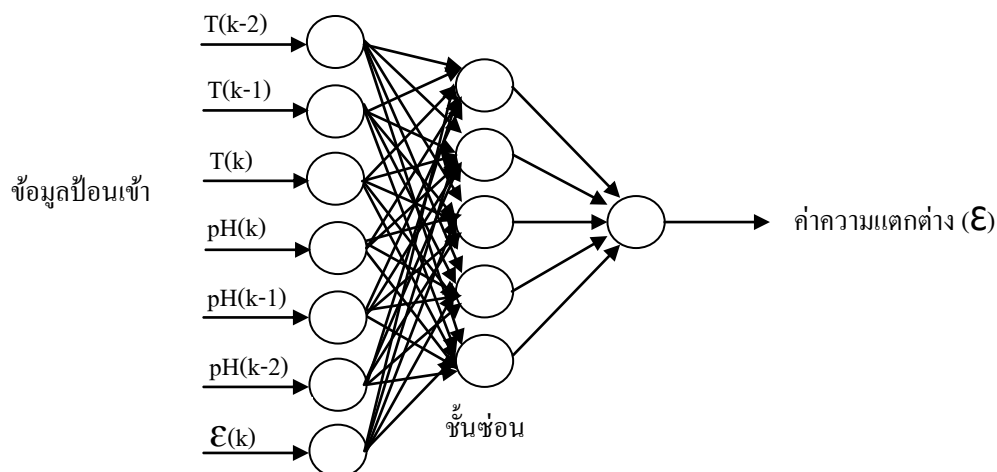
วิธีการสร้างข่ายงานนิวิรัลแบบไฮบริด

1. สร้างข่ายงานนิวิรัลแบบไฮบริดดังภาพที่ 2-20 โดยทำนายค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมของกระบวนการจากหลักการสมการอย่างง่ายซึ่งใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนในถังหมักแบบกะ โดยกำหนดเงื่อนไข ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากนั้นสร้างข่ายงานนิวิรัล โดยกำหนดโครงสร้างของข่ายงาน กำหนดข้อมูลป้อนเข้าและข้อมูลส่งออก ซึ่งข้อมูลป้อนเข้าสามารถมีได้หลายชุดข้อมูลในการนำมาใช้ฝึกสอนเพื่อกำหนดข้อมูลส่งออกของข่ายงานนิวิรัล

ซึ่งค่าชุดข้อมูลป้อนเข้าของกระบวนการและค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายด้วยหลักการสมการอย่างง่ายถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการฝึกสอนข่ายงานนิวรัลในข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด



ภาพที่ 2-20 ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด



ภาพที่ 2-21 โครงสร้างข่ายงานนิวรัลที่ใช้ทำนายค่าความแตกต่าง

2. ปรับช่วงของข้อมูลป้อนเข้าและข้อมูลส่งออกที่ใช้ในการฝึกสอนข่ายงานนิวรัลให้มีนัยสำคัญอยู่ในช่วงเดียวกัน ซึ่งเรียกว่าเป็นการปรับมาตรฐาน (Normalized value)

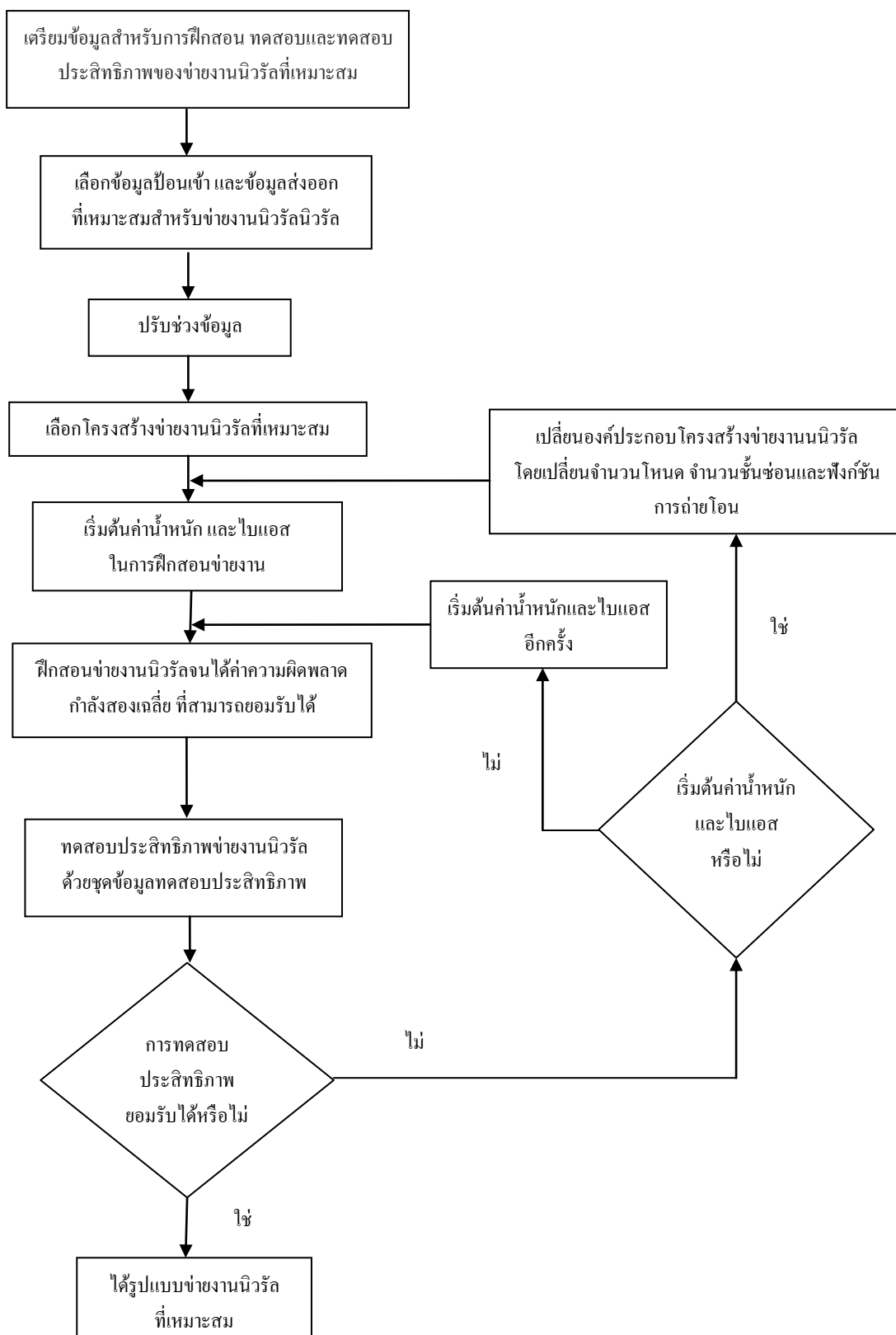
3. เลือกโครงสร้างของข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่เหมาะสมหรือโครงสร้างที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้โครงสร้างข่ายงานนิวรัลแบบแพร่ไปข้างหน้าที่เป็นที่นิยมใช้กันมาก

ในการประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรม ซึ่งในขั้นตอนนี้ คือ การกำหนดจำนวนของชั้นซ้อน จำนวนของโหนดแอมแปงในชั้นซ้อนนั้น ๆ พึ่งกันถ่ายโอนของช่างงานนิวัต ดังภาพที่ 2-21

4. เริ่มต้นคำนวณน้ำหนักและไบแอสในการฝึกสอนช่างงาน

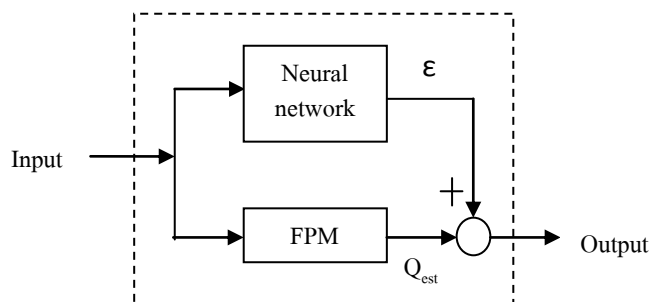
5. ฝึกสอนช่างงานนิวัตในช่างงานนิวัตแบบไฮบริดด้วยชุดข้อมูลในการฝึกสอน โดยกำหนดกำหนดขั้นตอนในการฝึกสอน ซึ่งในโครงการนี้เลือกใช้วิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ซึ่งทำให้เกิดการเรียนรู้ผู้เข้าหาคำตอบได้รวดเร็วและการฝึกสอนจะหยุดลงเมื่อค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมีค่าตรงกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้หรือสถานะที่กำหนด

6. ใช้ชุดข้อมูลในการทดสอบประสิทธิภาพซึ่งต้องไม่ใช่ชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน ช่างงานนิวัต เมื่อผ่านการทดสอบแล้วการฝึกสอนช่างงานจะหยุดทำงานและจะได้ผลลัพธ์จากการทำนายของช่างงานนิวัต ถ้าในขั้นตอนการทดสอบไม่เป็นที่น่าพอใจตามที่กำหนดไว้ ช่างงานนิวัตจะถูกสั่งให้คืนค่าข้อมูลและเริ่มการคำนวณน้ำหนักและไบแอสใหม่อีกครั้ง ตามขั้นตอนดังภาพที่ 2-22



ภาพที่ 2-23 ขำงานนิวรัลแบบไฮบริด

7. เมื่อได้ค่าความคลาดเคลื่อนจากข่ายงานนิวรัลแล้ว ค่าที่ได้นำมารวมเข้ากับค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมของกระบวนการที่ทำนายได้จากหลักการสมการอย่างง่ายจะทำให้ได้ค่าผลตอบแทนของกระบวนการที่ทำนายจากข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด ดังภาพที่ 2-23



ภาพที่ 2-23 ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

การออปติไมซ์

ออปติไมเซชัน (Optimization) เป็นสาขาหนึ่งของคณิตศาสตร์ประยุกต์ ซึ่งเป็นวิธีการแก้โจทย์ปัญหาทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยโจทย์ปัญหาส่วนใหญ่แสดงอยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากหลักพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของระบบนั้น ๆ ปัจจุบันเทคนิคการออปติไมซ์ไม่ได้จำกัดอยู่แค่สาขาวิชาทางด้านวิศวกรรมเท่านั้น แต่กลายเป็นสิ่งสำคัญในทุก ๆ สาขาวิชา มีการนำเทคนิคการออปติไมซ์มาใช้อย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ คณิตศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์ เป็นต้น สำหรับภาคอุตสาหกรรมนั้น การตัดสินใจที่จะปรับปรุงเพื่อให้ได้สิ่งที่ดีที่สุดเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นให้เห็นอยู่บ่อยครั้ง เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต หรือการลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการต่าง ๆ ซึ่งมีทางเลือกมากมายในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้

เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเทคนิคในการออปติไมซ์ที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับ เรียกว่า Modern optimization method ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่มีแบบแผน (Nontraditional) โดยการนำวิธีการออปติไมซ์เข้าไปใช้ร่วมกับสาขาวิชาทางด้านอื่น ๆ เช่น Particle swarm optimization, Ant colony optimization และ Neural network-based optimization เป็นต้น ซึ่งในปี ค.ศ. 1985 มีการใช้เทคนิคการออปติไมซ์ร่วมกับข่ายงานนิวรัลเป็นครั้งแรกโดย Hopfield และ Tank

หลักการพื้นฐานของการออปติไมซ์

การออปติไมซ์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับหลายสาขาวิชาดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งจะให้ผลในเชิงปริมาณ (Quantity) เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นจำนวนหรือค่าของตัวเลขของปัญหาที่กำหนด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจุดประสงค์ของการออปติไมซ์คือ เพื่อต้องการหาค่าสูงสุด (Maximum) หรือค่าต่ำสุด (Minimum) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนด (Objective function) และการหาค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์บางครั้งอาจมีการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เรียกว่า ข้อจำกัด (Constraints) ไว้ด้วย ดังนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับการออปติไมซ์คือ การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และการกำหนดข้อจำกัดเพื่อใช้ในการหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุด

ตัวแปรออกแบบ (Design Variable)

ตัวแปรออกแบบ หมายถึง ตัวแปรที่เป็นคำตอบของการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งตัวแปรออกแบบจะถูกกำหนดเพื่อใช้อธิบายลักษณะของระบบอย่างชัดเจน เช่น ขนาด น้ำหนัก หรือ อุณหภูมิ เป็นต้น โดยการกำหนดตัวแปรออกแบบนั้นต้องเลือกตัวแปรที่ใช้กำหนดในระบบให้ถูกต้องกับโจทย์แต่ละประเภท

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุด โดยจะต้องทำการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ติดอยู่ในรูปของตัวแปรออกแบบเพื่อที่จะทำการหาค่าของตัวแปรที่เป็นจุดต่ำสุดหรือสูงสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ได้จากกระบวนการหรือปัญหาที่เกิดขึ้นจริง ๆ ซึ่งอธิบายพฤติกรรมของระบบ โดยทุก ๆ ตัวแปรมีความสัมพันธ์กันเชิงปริมาณซึ่งอยู่ในรูปฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ชนิดของแบบจำลองมีหลายประเภท เช่น แบบจำลองเชิงเส้น (Linear model) แบบจำลองไม่เชิงเส้น (Nonlinear model) และแบบจำลองจากการจำลอง (Simulation model)

ข้อจำกัด (Constraints)

ข้อจำกัด คือ เงื่อนไขหรือข้อจำกัดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งโดยทั่วไปแล้วข้อจำกัดจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ข้อจำกัดภายนอกและข้อจำกัดภายใน ซึ่งข้อจำกัดภายนอกเป็นข้อจำกัดของระบบที่อยู่เหนือการควบคุม ของผู้ออกแบบ ข้อจำกัดภายในเป็นข้อจำกัดที่กำหนดขึ้นโดยผู้ออกแบบระบบ รูปแบบทั่วไปของข้อจำกัดเป็นดังสมการที่ (2-23)

$$U_{\min} \leq u_{(t)} \leq U_{\max} \quad (2-23)$$

ฟังก์ชันกำลังสอง (Quadratic function)

ในการออพติไมซ์ส่วนมากจะพบกับปัญหาที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น หรือเป็นปัญหาที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์อยู่ในรูปสมการที่มีเลขชี้กำลังมากกว่าสองซึ่งสามารถทำการประมาณสมการดังกล่าวให้มีเลขชี้กำลังต่ำ ๆ เพื่อง่ายแก่การหาคำตอบได้ โดยถ้าเราประมาณให้เป็นสมการที่มีเลขชี้กำลังเท่ากับหนึ่งสมการดังกล่าวจะเรียกว่า ฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear function) แต่ถ้าหากประมาณให้เป็นสมการที่มีเลขชี้กำลังเท่ากับ สอง จะเรียกสมการนี้ว่า ฟังก์ชันกำลังสอง

คุณสมบัติความเหมาะสม (Optimality)

โดยทั่วไปปัญหาในการออพติไมซ์นั้นจะเป็นการหาค่าต่ำสุด ซึ่งเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาค่าต่ำสุดหรือค่าสูงสุดนั้นจะคล้ายกัน โดยสามารถเปลี่ยนปัญหาที่เป็นการหาค่าสูงสุดให้เป็นปัญหาการหาค่าต่ำสุดได้โดยการใส่เครื่องหมายลบ (-) เข้าไปในฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้วทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้น จะทำให้ได้คำตอบของปัญหาค่าสูงสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งเรียกหลักการนี้ว่าคุณสมบัติความเหมาะสม โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{maximize } f(x) = \text{minimize } (-f(x)) \quad (2-24)$$

ประโยชน์ของการออพติไมซ์

การออพติไมซ์สามารถนำไปใช้กับปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้อย่างหลากหลาย เช่น ทางกระบวนการเคมี ทางเศรษฐศาสตร์ ทางธุรกิจ และอื่น ๆ ซึ่งเป็นการช่วยหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยเป็นวิธีที่สามารถแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน

Husain (1998) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทางจลนศาสตร์ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยพิจารณาแบบจำลองทางพลศาสตร์ที่สถานะคงตัว ซึ่งได้พัฒนาแบบจำลองทางพลศาสตร์จาก Hill (Auburn University, AL) สมการที่ได้สามารถทำนายความเข้มข้นของสารอินทรีย์และจุลินทรีย์จากอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในปฏิกิริยาของถังหมักแบบกวนผสม

Kim, Ahn and Speece (2001) ทำการศึกษาเปรียบเทียบเสถียรภาพและประสิทธิภาพของการหมักเศษอาหารในถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนที่อุณหภูมิมีโซฟิลิก (35 องศาเซลเซียส) และเทอร์โมฟิลิก (50 องศาเซลเซียส) ซึ่งหาค่าความแตกต่างของปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ โดยแต่ละถังมีการเติมน้ำเสียแตกต่างกัน 4 แบบ คือ เติมน้ำเสียวันละครั้ง เติมน้ำเสียต่อเนื่อง เติมน้ำเสียวันละครั้งแบบ 2 ขั้นตอนและเติมน้ำเสียวันละครั้งแต่ไม่มีการกวนผสม ซึ่งจากการทดสอบ พบว่าไม่ว่าจะเติมน้ำเสียด้วยวิธีใดกับถังชนิดไหนก็ตาม การทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะเกิดก๊าซชีวภาพมากกว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในทุก ๆ การทดลอง ถัดมา Vindis, Mursec and Janzekovic (2009) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในช่วงมีโซฟิลิก (35 องศาเซลเซียส) และเทอร์โมฟิลิก (50 องศาเซลเซียส) สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดย พบว่าอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกมีมากกว่าถึง 4 เท่า จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยอัตราที่มากขึ้น

จิรวัดน์ ชาลีวรรณ (2003) ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและการกำจัดสารอินทรีย์ของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋อง โดยใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนชนิดขั้นตอนเดียว ใช้ถังหมักปริมาตร 250 ลิตร และมีใบกวนอยู่ภายในถึงผลการทดลอง พบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บกัก 60 วัน ได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของระบบ 157 ลิตรต่อวัน มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ย 51.40%

ประสิทธิ์ ศรีนคร, ขวัญตา ดันติกำธน, อรรถวิโรจน์ เขียวนาค, จิระพล ศรีเสริฐผล และกนต์ธร ชำนิประศาสตร์ (2554) ได้ศึกษาการบำบัดตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้ตะกอนเลน 2 แบบ คือ ตะกอนจากการเลี้ยงกุ้งทะเลแบบไม่ใช้จุลินทรีย์ EM (Effective microorganisms) และแบบใช้จุลินทรีย์ EM ในขณะที่เลี้ยง ผลการศึกษา พบว่า การหมักตะกอนเลนแบบไม่ใช้จุลินทรีย์สามารถผลิตก๊าซชีวภาพ

สะสมทั้งหมดได้ 0.025 ลิตร/กรัม. ซีโอดีที่ถูกกำจัด และการหมักตะกอนเลนแบบใช้จุลินทรีย์ สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมดได้ 0.0015 ลิตร/กรัม. ซีโอดีที่ถูกกำจัด และในปี 2012 พวกเขาได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับกระบวนการแบบแบตช์เพื่อประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งและทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์โดยใช้วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับขำงานนิวัลแบบไฮบริดและการออฟติไมซ์

แนวคิดเกี่ยวกับการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อเลียนแบบการทำงานของสมองนั้น ถูกเสนอโดย McCulloch and Pitts (1943) และภายหลังในปี ค.ศ. 1962 Rosenblatt ได้สร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้งานได้เป็นคนแรก จากนั้น Naveen, Bhat, Minderman, Thomas and Wang (1990) ได้จำลองกระบวนการทางเคมีโดยใช้ขำงานนิวัลในการสร้างแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นของระบบ ซึ่งมีสามกรณีที่พิจารณา คือ ที่สภาวะคงตัวของเครื่องปฏิกรณ์ การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของระบบถึงกวนและการตีความข้อมูลไบโอเซ็นเซอร์ ซึ่งทั้งหมดนั้นประสบความสำเร็จในการจำลองระบบและแสดงให้เห็นว่าขำงานนิวัลสามารถแก้ปัญหาได้เร็วกว่า Serial digital number ในปี 2000 Nikraves, Farell and Stanford ได้ทำการศึกษาการนำขำงานนิวัลไปใช้ในการควบคุมกระบวนการทางเคมีต่างๆ โดยขำงานนิวัลถูกไปประยุกต์ใช้กับระบบไม่เป็นเชิงเส้นต่าง ๆ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบถึงกวนต่อเนื่องและกระบวนการทำให้สารมีความเป็นกลาง (Neutralization) โดยขำงานนิวัลถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการ ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมในการกำหนดคณณกักระบวนการ ตัวควบคุมขำงานทำหน้าที่ได้ดีในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์แบบถึงกวนต่อเนื่องที่มีอุณหภูมิไม่คงที่ (Non-isothermal CSTR)

ปัจจุบันขำงานนิวัลถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการอื่น ๆ ในการสร้างแบบจำลองและเป็นตัวควบคุมของกระบวนการ โดย Tsen, Shi and David (1996) ได้พัฒนาขำงานนิวัลแบบไฮบริดเพื่อระบบตัวรับกวนที่ไม่รู้จักและไม่สามารถวัดค่าได้สำหรับกระบวนการพอลิเมอร์เชชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของทำนายค่าโดยการนำขำงานนิวัลแบบไฮบริด ซึ่งพวกเขาแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้อาจการทดลองมีความถูกต้องแม่นยำ ถัดมา Kurt and Marcel (1998) ได้ทำการเปรียบเทียบขำงานนิวัลชนิดต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการระยะเวลาในห่วงโซ่พอลิเมอร์ พวกเขาแสดงให้เห็นว่าการใช้งานของความรู้ก่อนหน้าร่วมกับขำงานนิวัลให้ผลโครงสร้างในรูปแบบที่เหมาะสม

นอกจากนี้งานวิจัยของ Hussain and Kershenbaum (2000) พวกเขาใช้ข่ายงานนิวัลเป็นแบบจำลอง การควบคุมในการติดตาม โพรไฟล์การควบคุมที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่มีการคายความร้อน โดยการกำหนดและแก้ปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพแบบไดนามิก และในปี 2004 พวกเขาได้ทำการศึกษาข่ายงานนิวัลแบบไฮบริดซึ่งทำงานร่วมกับหลักการสมการอย่างง่าย สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการพอลิเมอร์โรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ ซึ่งจาก ผลการจำลองได้แสดงข้อดีและความทนทานของการใช้ข่ายนิวัลแบบไฮบริด

Kittisupakorn, Thitiyasook, Hussain and Daosud (2009) เสนอการควบคุมแบบโมเดล ฟรีดิกที่ฟร้อมกับข่ายงานนิวัลเพื่อควบคุมกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กด้วยกรดและใช้วิธีการ ออฟติไมซ์แบบซักเซสซีฟควอดราติกโปรแกรมมิ่ง (SQP) สำหรับหาค่าตัวแปรปรับกระบวนการ ที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า การควบคุมแบบโมเดลฟรีดิกที่ฟร้อมกับข่ายงานนิวัลให้สมรรถนะ การควบคุมที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอ และในปี 2014 พวกเขาได้ทำการศึกษา การควบคุมแบบโมเดลฟรีดิกที่ฟร้อมกับข่ายงานนิวัลเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดำเนินงาน ของกระบวนการผลิตเมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate) ผลจากการจำลองระบุว่า การควบคุม แบบโมเดลฟรีดิกที่ฟร้อมกับข่ายงานนิวัลให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุมแบบ พีไอดี (PID) และการควบคุมข่ายงานนิวัลแบบผกผันตรง (NNDIC) ในทุกกรณี Paengjuntuek, Thanasinthana and Arpornwichanop (2012) ทำการศึกษาออกแบบการควบคุมกระบวนการตกผลึก โดยใช้ข่ายงานนิวัล จากนั้นข่ายงานนิวัลถูกนำมาใช้ร่วมกับการออฟติไมซ์เพื่อหาโพรไฟล์ อุณหภูมิในการดำเนินการที่ดีที่สุดสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์คริสตัล ผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่าข่ายงานนิวัลสามารถทำนายและควบคุมกระบวนการได้ดีและสภาวะที่เหมาะสม ที่ได้จากข่ายงานนิวัลนั้นยังให้ประสิทธิภาพการควบคุมที่ดีเยี่ยมอีกด้วย

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

การสร้างแบบจำลองกระบวนการด้วยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดและการออฟติไมซ์สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน ได้แบ่งการศึกษาวิจัยออกเป็นหลัก ๆ ได้ดังนี้

1. การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน
2. การสร้างแบบจำลองข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดของกระบวนการ
3. การจำลองกระบวนการกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (Model/Parameter mismatch)
4. การออฟติไมซ์กระบวนการ เพื่อหาโปรไฟล์อุณหภูมิของกระบวนการซึ่งให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดโดยใช้ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน

การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจากการหมักตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีขั้นตอนดังนี้

การศึกษาคุณสมบัติของตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง

ตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งที่นำมาใช้ในการศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นตะกอนเลนสดที่ได้จากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกรตำบลท่าข้าม อำเภอพนังสนธิคม จังหวัดชลบุรี โดยทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนก่อนนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าอินทรีย์วัตถุ (Organic matter) โดยมีค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 7.14 และมีค่าอินทรีย์วัตถุเริ่มต้นเท่ากับ 73.50 กรัม/ลิตร

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

การผลิตก๊าซชีวภาพในการศึกษารุ่นนี้ใช้ระบบการย่อยสลาย (Sludge) แบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน ซึ่งจะเกิดการย่อยด้วยจุลชีพในสลัดจ์ทำให้เกิดก๊าซมีเทน ชุดสำหรับหมักก๊าซชีวภาพ

ใช้ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาดบรรจุ 1 ลิตร ดังภาพที่ 3-8 โดยใส่ตะกอนเลนลงไป ครั้งเดียวตลอดการทดลอง (Batch) ควบคุมอุณหภูมิการหมักด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ดังภาพที่ 3-14 โดยกำหนดอุณหภูมิการหมักที่แตกต่างกัน 3 ช่วง ได้แก่ อุณหภูมิห้อง (26-33 องศาเซลเซียส) 39-42 องศาเซลเซียส และ 46-58 องศาเซลเซียส

ระบบตรวจวัดค่า

ทำการติดตั้งอิเล็กโทรดวัดค่า pH (pH electrode) ดังภาพที่ 3-3 และ โพรบวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ดังภาพที่ 3-4 เพื่อวัดค่าของตะกอนเลนภายในถังหมัก ตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยใช้ชุดเครื่องนับฟอง (Bubble counter) หรือเครื่องวัดปริมาณก๊าซ (Gas meter) ดังภาพที่ 3-5 ซึ่งสามารถนับจำนวนฟองก๊าซและคำนวณปริมาตรได้อย่างแม่นยำ

ระบบบันทึกข้อมูล

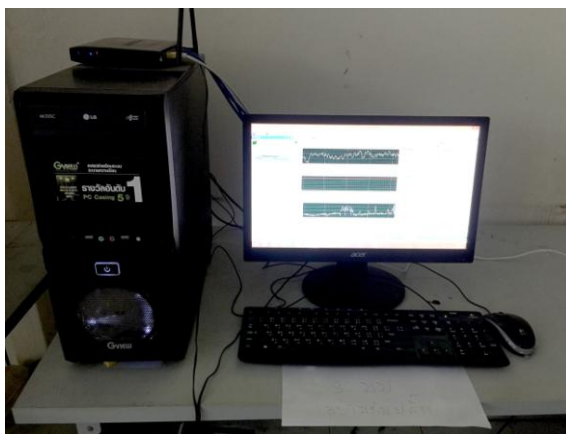
บันทึกข้อมูลการทดลองด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม NI Signal Express ในการแสดงค่าและบันทึกข้อมูลของค่า pH และอุณหภูมิ และตรวจสอบผลการวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพผ่านโปรแกรมเบราเซอร์ ซึ่งใช้โปรโตคอล TCP/IP เป็นตัวส่งข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ต ดังภาพที่ 3-16

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน แสดงดังภาพที่ 3-1 ถึง 3-15 ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

1. ชุดเครื่องคอมพิวเตอร์ สำหรับบันทึกข้อมูลการทดลอง ซึ่งได้แก่ ค่า pH อุณหภูมิ และปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ
2. อุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data acquisition hardware, DAQ) ได้แก่ Universal Analog Input module (NI 9219), Compact DAQ Chassis (NI cDAQ-9184) และสายแลน (LAN cable)
3. อิเล็กโทรดวัดค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมัก
4. โพรบวัดอุณหภูมิชนิด K สำหรับวัดค่าอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมัก
5. เครื่องนับฟอง หรือเครื่องวัดปริมาณก๊าซสำหรับวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ
6. เราเตอร์ (Router)
7. หม้อนึ่งฆ่าเชื้อโรค (Autoclave)
8. ขวดรูปชมพู่ขนาดบรรจุ 1 ลิตร สำหรับหมักตะกอนเลนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ
9. ถังเก็บก๊าซชีวภาพ จุกยาง สายยาง
10. กาวซิลิโคน (Silicone Sealant) และอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium Foil)

11. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ สำหรับควบคุมอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการ
12. ตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง



ภาพที่ 3-1 ชุดเครื่องคอมพิวเตอร์



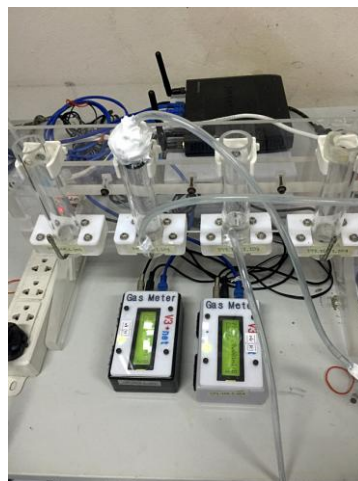
ภาพที่ 3-2 Compact DAQ Chassis, Universal Analog Input module และสายแลน



ภาพที่ 3-3 อิเล็กโทรดวัดค่า pH



ภาพที่ 3-4 โพรบวัดอุณหภูมิชนิด K



ภาพที่ 3-5 เครื่องนับฟองและเครื่องวัดปริมาณก๊าซ



ภาพที่ 3-6 เราเตอร์



ภาพที่ 3-7 หม้อนึ่งฆ่าเชื้อโรค



ภาพที่ 3-8 ขวดรูปชมพู่ขนาดบรรจุ 1 ลิตร



ภาพที่ 3-9 ถูงเก็บก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 3-10 สายยาง



ภาพที่ 3-11 จุกยางขนาดต่าง ๆ



ภาพที่ 3-12 อลูมิเนียมฟอยล์



ภาพที่ 3-13 กาวซิลิโคน



ภาพที่ 3-14 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ



ภาพที่ 3-15 ตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง

วิธีการทดลอง

ทำการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสง และออกซิเจน ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 3-16 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ก่อนทำการหมัก นำขวดรูปชมพู่ขนาดบรรจุ 1 ลิตร พร้อมจุกยางไปฆ่าเชื้อ โดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อโรคที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 psi เป็นเวลา 15 นาที
2. นำตะกอนเลนปริมาณ 600 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาดบรรจุ 1 ลิตร ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว
3. ติดตั้งสายยางสำหรับเครื่องวัดปริมาณก๊าซ อิเล็กโทรดวัดค่า pH และโพรบวัดอุณหภูมิภายในขวด

4. ปิดฝาขวดด้วยจุกยางให้แน่น ซีลรอบขวดด้วยกาวซิลิโคนและท่อขวดด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ให้มิดชิด

5. ต่อสายส่งสัญญาณของอิเล็กโทรดวัดค่า pH และ โพรบวัดอุณหภูมิเข้ากับอุปกรณ์เก็บข้อมูล คือ Universal Analog Input module (NI 9219) และนำไปต่อเข้ากับ Compact DAQ Chassis (NI cDAQ-9184)

6. ต่อสายแลนจากอุปกรณ์เก็บข้อมูลเข้ากับเราเตอร์ จากนั้นต่อสายแลนเข้ากับคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงและบันทึกข้อมูลของค่า pH และอุณหภูมิ โดยใช้โปรแกรม NI Signal Express กำหนดให้โปรแกรมบันทึกข้อมูลทุก ๆ 10 นาที ตลอดการทดลอง
7. ต่อสายยางเข้ากับเครื่องนับฟองและเครื่องวัดปริมาณก๊าซเพื่อวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ
8. ต่อสายส่งสัญญาณของเครื่องวัดปริมาณก๊าซเข้ากับเราเตอร์ ตรวจสอบผลการวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพผ่าน โปรแกรมเบรดาเซอร์ โดยกำหนดให้บันทึกข้อมูลทุก ๆ 10 นาที ตลอดการทดลอง
9. ต่อสายยางจากเครื่องนับฟองเข้ากับถุงเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อเก็บก๊าซที่ผลิตได้
10. ควบคุมอุณหภูมิการหมักด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ กำหนดอุณหภูมิการหมักที่แตกต่างกัน 3 ช่วง ได้แก่ อุณหภูมิห้อง (26-33 องศาเซลเซียส) 39-42 องศาเซลเซียส และ 46-58 องศาเซลเซียส
11. ทดลองหมักตะกอนเลนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเป็นระยะเวลา 12 วัน



ภาพที่ 3-16 การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน

การสร้างแบบจำลองข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดของกระบวนการ

1. การสร้างแบบจำลองข่ายงานนิวรัลแบบธรรมดา (Standard neural network)

ชุดข้อมูลในการฝึกสอนข่ายงานนิวรัล

การสร้างและฝึกสอนข่ายงานนิวรัลนั้นจำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์ข้อมูลป้อนเข้าและข้อมูลส่งออก เพื่อใช้ในการฝึกสอนให้ข่ายงานนิวรัล ซึ่งในโครงงานนี้ได้นำกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจาก ตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนมาใช้เป็นกรณีศึกษาและใช้ค่าจากการทดลองเป็นข้อมูลในการฝึกสอนข่ายงานนิวรัล ซึ่งข้อมูลแต่ละชุดนั้นได้กำหนดให้ค่าอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมัก ค่า pH และ ค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเป็นข้อมูลป้อนเข้า และกำหนดให้ค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเป็นข้อมูลส่งออก ทำการปรับช่วงของข้อมูลให้มีค่าอยู่ในช่วง 0.05-0.95 เพื่อให้ข้อมูลมีความสำคัญเท่า ๆ กัน ซึ่งเรียกว่าเป็นการปรับมาตรฐาน ดังสมการ 3-1 ก่อนที่จะนำข้อมูลไปใช้ในการฝึกสอนข่ายงานต่อไป

$$\text{Normalized value} = \frac{(\text{actual value} - \text{min value}) \times (0.95 - 0.05)}{(\text{max value} - \text{min value})} + 0.05 \quad (3-1)$$

เมื่อ *actual value* คือ ค่าที่ได้จากการทดลองจริง

min value คือ ช่วงต่ำสุดของข้อมูลเท่ากับ 0.05

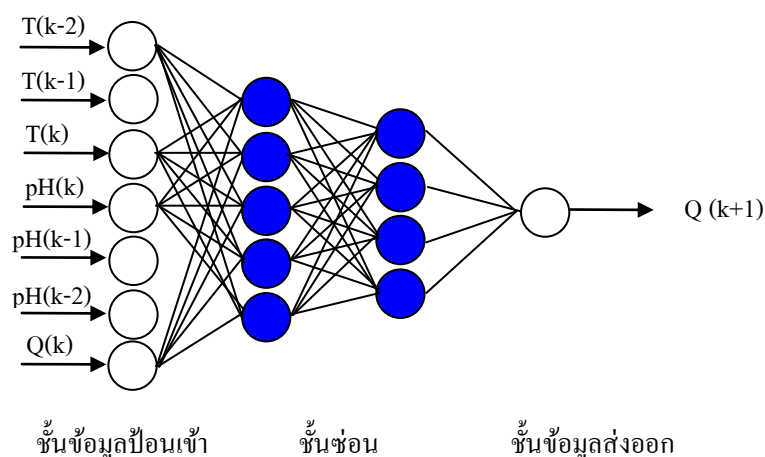
max value คือ ช่วงสูงสุดของข้อมูลเท่ากับ 0.95

สร้างข่ายงานนิวรัล

1. กำหนดชุดข้อมูลเพื่อใช้ในการฝึกสอน ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบ และชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพด้วยการกำหนดจำนวนค่าข้อมูลป้อนเข้าและค่าข้อมูลส่งออก สร้างข่ายงานด้วยการกำหนดโครงสร้างของข่ายงานของนิวรัลด้วยการกำหนดจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนโหนดในชั้นซ่อนนั้น ๆ โดยกำหนดให้มีข้อมูลป้อนเข้าทั้งหมด 7 ค่า ซึ่งพิจารณาจากปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ค่า pH ของตะกอนเลนที่เวลาปัจจุบัน (k) ในอดีตหนึ่งช่วงเวลา (k-1) และในอดีตสองช่วงเวลา (k-2) ค่าอุณหภูมิของตะกอนเลนที่เวลาปัจจุบัน (k) ในอดีตหนึ่งช่วงเวลา (k-1) และในอดีตสองช่วงเวลา (k-2) ค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่เวลาปัจจุบัน (k) และกำหนดข้อมูลส่งออกจากนิวรัล คือ ค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมในอนาคตหนึ่งช่วงเวลา (k+1) ดังภาพที่ 3-17

2. สร้างข่ายงานนิวัตแบบแพร่ไปข้างหน้าและกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของโหนดในชั้นซ่อนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนแบบซิกมอยด์ กำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของโหนดในชั้นข้อมูลส่งออกด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้นและกำหนดฝึกสอนข่ายงานนี้ด้วยวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของการสอนข่ายงานที่มีการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับเป็นลักษณะการเรียนรู้แบบมีผู้สอน

3. ทำการฝึกสอนข่ายงานนิวัต โดยกำหนดเวลาในการจำลองกระบวนการไว้ที่ 12 วัน และกำหนดค่าผลต่างของเวลาที่เหมาะสมเท่ากับ 10 นาที จากนั้นทำการฝึกสอนข่ายงานนิวัตโดยใช้ชุดข้อมูลที่เตรียมไว้



ภาพที่ 3-17 โครงสร้างของข่ายงานนิวัต

4. กำหนดตัวแปรของข่ายงานการสอนซึ่งก็คือ จำนวนการวนซ้ำระหว่างการแสดงผล อัตราการเรียนรู้ ค่าสูงสุดของการวนซ้ำของการสอนและกำหนดค่าสมรรถนะเป้าหมายด้วยค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยให้มีค่าเท่ากับ 1×10^{-7} จากนั้นสร้างโครงข่ายการสอนและทำการจำลองข่ายงานนิวัตด้วยข้อมูลที่ใช้ทดสอบที่เลือกไว้โดยกำหนดเงื่อนไขเมื่อการทำนายของข่ายงานให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมากกว่าที่ระบุไว้ให้ข่ายงานทำการคืนค่าและกำหนดเงื่อนไข เมื่อข่ายงานใช้จำนวนรอบในการทำนายมากกว่าที่กำหนดให้แสดงค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 0

5. ทำการจำลองข่ายงานนิวัตใหม่อีกครั้งด้วยข้อมูลที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพที่เลือกไว้ จากนั้นปรับช่วงของข้อมูลส่งออก ทั้งค่าที่ได้จากการจากการทำนายของข่ายงานนิวัตกลับ

ชุดทดสอบและจากการทำนายของข่ายงานนิวรัลกับชุดทดสอบประสิทธิภาพให้กลับไปมีช่วงค่าตามเดิม ซึ่งก่อนหน้ากำหนดให้มีช่วงค่าข้อมูลเท่ากับ 0.05-0.95 จากการเตรียมชุดข้อมูล ด้วยการปรับคืนค่าจริง ดังสมการ 3-2

$$Actual\ value = \frac{(normalized\ value - 0.05) \times (max\ value - min\ value)}{(0.95 - 0.05)} + min\ value \quad (3-2)$$

6. หลังจากปรับค่าจริงแล้ว หาค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทำนายของข่ายงานนิวรัลกับชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบดังสมการ 3-3 และใช้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยนี้เพื่อหาโครงสร้างที่ดีที่สุดของการทำนาย

$$Mean\ Square\ Error\ (MSE) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Actual - Predict)^2 \quad (3-3)$$

ทำการแสดงผลการตอบสนองของกระบวนการจากการทำนายด้วยข่ายงานนิวรัลเพื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการของชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบและทดสอบประสิทธิภาพ หาโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของข่ายงานนิวรัล โดยการกำหนดจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนโหนดในชั้นซ่อนให้มีโครงสร้างที่ต่างกันเพื่อหาโครงสร้างที่สามารถให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้ผลการทำนายของข่ายงานนิวรัลมีความใกล้เคียงกับผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ทำนายมากที่สุด โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองโครงสร้างของข่ายงานนิวรัลโดยกำหนดให้มีชั้นซ่อน 1 ถึง 2 ชั้น และจำนวนโหนดในชั้นซ่อนตั้งแต่ 3 ถึง 9 โหนด เพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของข่ายงานนิวรัล

2. การสร้างแบบจำลองข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

ชุดข้อมูลในการฝึกสอนข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

การสร้างและฝึกสอนข่ายงานนิวรัลในข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดนั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลป้อนเข้าและข้อมูลส่งออก เพื่อใช้ในการฝึกสอนให้ข่ายงานนิวรัล ซึ่งในโครงการนี้ได้นำกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนมาใช้เป็นกรณีศึกษาและใช้ค่าจากการทดลองเป็นข้อมูลในการฝึกสอนข่ายงานนิวรัล ซึ่งข้อมูลแต่ละชุดนั้นได้กำหนดให้ค่าอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมัก ค่า pH และ ค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเป็นข้อมูลป้อนเข้าและกำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายด้วย

หลักการสมการอย่างง่ายเป็นข้อมูลส่งออก ทำการปรับช่วงของข้อมูลให้มีค่าอยู่ในช่วง 0.05-0.95 เพื่อให้ข้อมูลมีความสำคัญเท่า ๆ กัน ซึ่งเรียกว่าเป็นการปรับมาตรฐาน ดังสมการ 3-1 ก่อนที่จะนำข้อมูลไปใช้ในการฝึกสอนข้างงานต่อไป

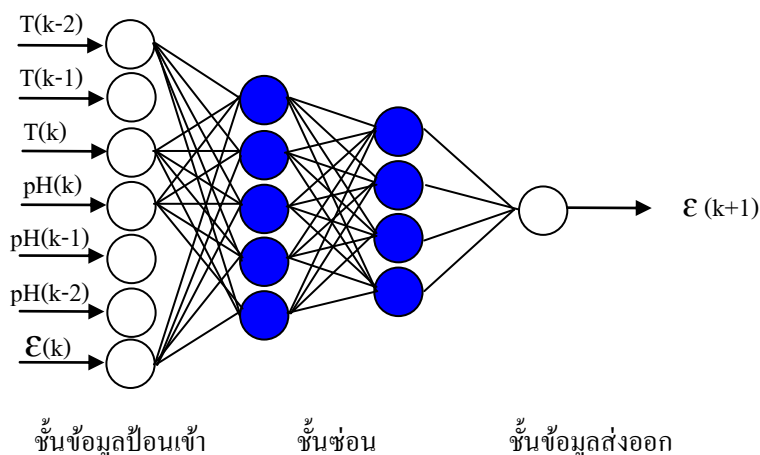
สร้างข่ายงานนิวรัลสำหรับข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

1. ทำนายค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมของกระบวนการจากหลักการสมการอย่างง่าย (First principle model, FPM) ซึ่งใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนในถังหมักแบบกะ โดยกำหนดเงื่อนไขและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากนั้นหาค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายด้วยหลักการสมการอย่างง่าย ซึ่งก็คือ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่เกิดขึ้นตามสภาวะจริงและค่าที่ได้จากการทำนายของหลักการสมการอย่างง่าย เพื่อใช้เป็นชุดข้อมูลการฝึกสอนข่ายงานนิวรัล

2. กำหนดชุดข้อมูลเพื่อใช้ในการฝึกสอน ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบ และชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพด้วยการกำหนดจำนวนค่าข้อมูลป้อนเข้าและค่าข้อมูลส่งออก สร้างข่ายงานด้วยการกำหนดโครงสร้างของข่ายงานของนิวรัลด้วยการกำหนดจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนโหนดในชั้นซ่อนนั้น ๆ โดยกำหนดให้มีข้อมูลป้อนเข้าทั้งหมด 7 ค่า ซึ่งพิจารณาจากปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ค่า pH ของตะกอนเลนที่เวลาปัจจุบัน (k) ในอดีตหนึ่งช่วงเวลา (k-1) และในอดีตสองช่วงเวลา (k-2) ค่าอุณหภูมิของตะกอนเลนที่เวลาปัจจุบัน (k) ในอดีตหนึ่งช่วงเวลา (k-1) และในอดีตสองช่วงเวลา (k-2) ค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายด้วยหลักการสมการอย่างง่ายที่เวลาปัจจุบัน (k) กำหนดข้อมูลส่งออกจากนิวรัล คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายด้วยหลักการสมการอย่างง่ายในอนาคตหนึ่งช่วงเวลา (k+1) ดังภาพที่ 3-18

3. สร้างข่ายงานนิวรัลแบบแพร่ไปข้างหน้าและกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของโหนดในชั้นซ่อนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนแบบซิกมอยด์ กำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของโหนดในชั้นข้อมูลส่งออกด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้นและกำหนดฝึกสอนข่ายงานนี้ด้วยวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของการสอนข่ายงานที่มีการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับเป็นลักษณะการเรียนรู้แบบมีผู้สอน

4. ทำการฝึกสอนข่ายงานนิวรัล โดยกำหนดเวลาในการจำลองกระบวนการไว้ที่ 12 วัน และกำหนดค่าผลต่างของเวลาที่เหมาะสมเท่ากับ 10 นาที จากนั้นทำการฝึกสอนข่ายงานนิวรัลโดยใช้ชุดข้อมูลที่เตรียมไว้



ภาพที่ 3-18 โครงสร้างของข่ายงานนิเวศในข่ายงานนิเวศแบบไฮบริด

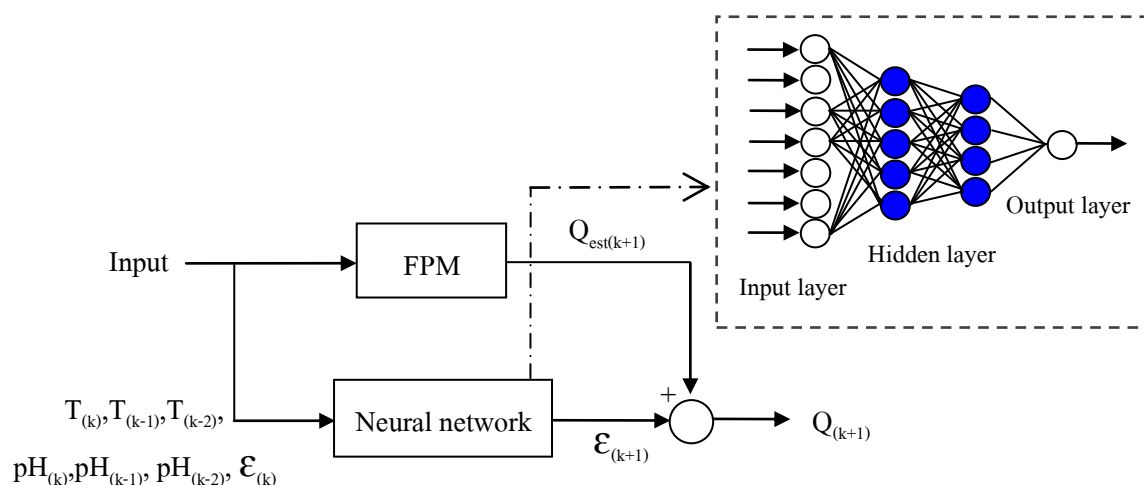
5. กำหนดตัวแปรของข่ายงานการสอน ซึ่งก็คือ จำนวนการวนซ้ำระหว่างการแสดงผล อัตราการเรียนรู้ ค่าสูงสุดของการวนซ้ำของการสอนและกำหนดค่าสมรรถนะเป้าหมายด้วยค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยให้มีค่าเท่ากับ 1×10^{-7} จากนั้นสร้างโครงข่ายการสอนและทำการจำลองข่ายงานนิเวศด้วยข้อมูลที่ใช้ทดสอบที่เลือกไว้โดยกำหนดเงื่อนไขเมื่อการทำนายของข่ายงานให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมากกว่าที่ระบุไว้ให้ข่ายงานทำการคืนค่าและกำหนดเงื่อนไข เมื่อข่ายงานใช้จำนวนรอบในการทำนายมากกว่าที่กำหนดให้แสดงค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 0

6. ทำการจำลองข่ายงานนิเวศใหม่อีกครั้งด้วยข้อมูลที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพที่เลือกไว้ จากนั้นปรับช่วงของข้อมูลส่งออก ทั้งค่าที่ได้จากการทำนายของข่ายงานนิเวศกับชุดทดสอบและจากการทำนายของข่ายงานนิเวศกับชุดทดสอบประสิทธิภาพให้กลับไปมีช่วงค่าตามเดิม ซึ่งก่อนหน้านี้นี้กำหนดให้มีช่วงค่าข้อมูลเท่ากับ 0.05-0.95 จากการเตรียมชุดข้อมูล ด้วยการปรับคืนค่าจริง ดังสมการ 3-2

7. หลังจากปรับคืนค่าจริงแล้ว หาค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทำนายของข่ายงานนิเวศกับชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบดังสมการ 3-3 และใช้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยนี้เพื่อหาโครงสร้างที่ดีที่สุดของการทำนาย ทำการแสดงผลการตอบสนองของกระบวนการจากการทำนายด้วยข่ายงานนิเวศเพื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการของชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบและทดสอบประสิทธิภาพ หาโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของข่ายงานนิเวศ โดยการกำหนดจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนโหนดในชั้นซ่อนนั้น ๆ ให้มีโครงสร้างที่ต่างกันเพื่อหาโครงสร้างที่สามารถให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้ผลการทำนายของข่ายงานนิเวศ

มีความใกล้เคียงกับผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ทำนายมากที่สุด โดยงานวิจัยนี้ ได้ทำการจำลองโครงสร้างของข่ายงานนิวรัลโดยกำหนดให้มีชั้นซ่อน 1 ถึง 2 ชั้น และจำนวน โหนดในชั้นซ่อนตั้งแต่ 3 ถึง 9 โหนด เพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของข่ายงานนิวรัล

8. เมื่อได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ทำนายได้จากข่ายงานนิวรัลแล้ว นำมารวมกับค่าอัตรา ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่ทำนายจากหลักการสมการอย่างง่าย ดังภาพที่ 3-19 จะทำให้ได้ ค่าผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 3-19 ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายระหว่างข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

ทำการเปรียบเทียบข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการที่ทำนายได้จากข่ายงานนิวรัล ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด และค่าจริงจากการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของข่ายงานในการทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการว่าสามารถทำนายได้ใกล้เคียงหรือตรงตามพฤติกรรมของกระบวนการจริงมากน้อยเพียงใด การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายของข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดสามารถทำได้โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการทำนายด้วยข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด ซึ่งข่ายงานที่สามารถนำมาทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้มีความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด คือ ข่ายงานที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด

การจำลองกระบวนการกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด

(Model/ Parameter mismatch)

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นค่าที่มีความสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน ซึ่งในงานวิจัยนี้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นค่าที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึมซึ่งเคยมีผู้ศึกษาไว้แล้ว โดยแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้อาจมีการปรับเปลี่ยนได้ในอนาคต ดังนั้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดในการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสม เมื่อแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงจากเดิม 10% จึงทำการทดสอบโดยเปรียบเทียบความสามารถในการทำนายระหว่างข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาดว่าข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดแบบใดสามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้ตรงตามพฤติกรรมของกระบวนการจริงมากที่สุดทั้งในสภาวะปกติและกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด โดยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่นำมาเปรียบเทียบกันนั้นเป็นข่ายงานที่มีโครงสร้างเหมือนกันทุกประการ แตกต่างกันที่ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดตัวหนึ่งจะได้รับการฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการทั้งในกรณีสภาวะปกติและกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด แต่ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดอีกตัวหนึ่งจะได้รับการฝึกสอนชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการในกรณีสภาวะปกติเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

การออฟติไมซ์กระบวนการโดยใช้ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด เพื่อหาโปรไฟล์อุณหภูมิของกระบวนการซึ่งให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด

จากการศึกษางานวิจัย Gavala, Yenal, Skiadas, Westermann and Ahring (2003); Chaea, Janga, Yimb and Kim (2008); Ma et al. (2013) พบว่า อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยในระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพนั้น กระบวนการจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิมิผลกระทบต่อจลพลศาสตร์ (Kinetic models) ของกระบวนการ ด้วยเหตุผลการออฟติไมซ์หาโปรไฟล์อุณหภูมิที่เหมาะสม (Temperature profile) จึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อเพิ่มศักยภาพให้ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด

ในงานวิจัยนี้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่ทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าสูงสุด โดยสามารถเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

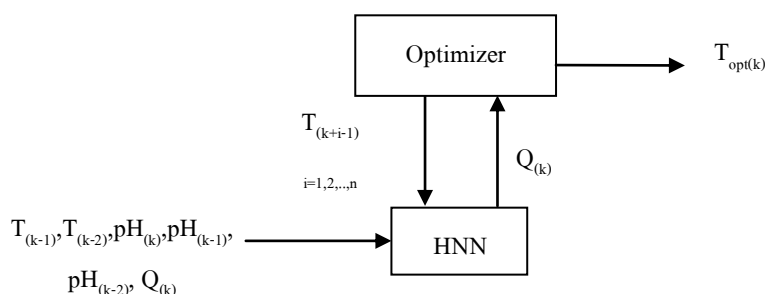
$$\begin{aligned} & \text{maximize } Q(t) \\ & T(t) \end{aligned} \quad (3-7)$$

$$\begin{aligned} & \text{maximize } Q(t) = \text{minimize } (-Q(t)) \\ & T(t) \quad T(t) \end{aligned} \quad (3-8)$$

เงื่อนไขภายใต้ แบบจำลองข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

$$26.00 \text{ องศาเซลเซียส} \leq T(t) \leq 58.00 \text{ องศาเซลเซียส}$$

ในงานวิจัยนี้ Sequential quadratic programming (SQP) เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้สำหรับแก้ปัญหาการอพติไมซ์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน เนื่องจากเป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการแก้ปัญหาของกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยลักษณะของการอพติไมซ์ร่วมกับข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดแสดงดังภาพที่ 3-20



ภาพที่ 3-20 ลักษณะของการอพติไมซ์กระบวนการ โดยใช้ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

เมื่อได้ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม (T_{opt}) จากการทำอพติไมซ์เซชันข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดแล้ว แสดงผลการจำลองปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมต่อเวลา เมื่อดำเนินกระบวนการตามโปรไฟล์อุณหภูมิที่ได้จากการอพติไมซ์และนำปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพรวมที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง เพื่อศึกษาว่าเมื่อดำเนินกระบวนการตามโปรไฟล์อุณหภูมิที่ได้จากการอพติไมซ์แล้ว ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพรวมเพิ่มขึ้นจากเดิมมากน้อยเพียงใด

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

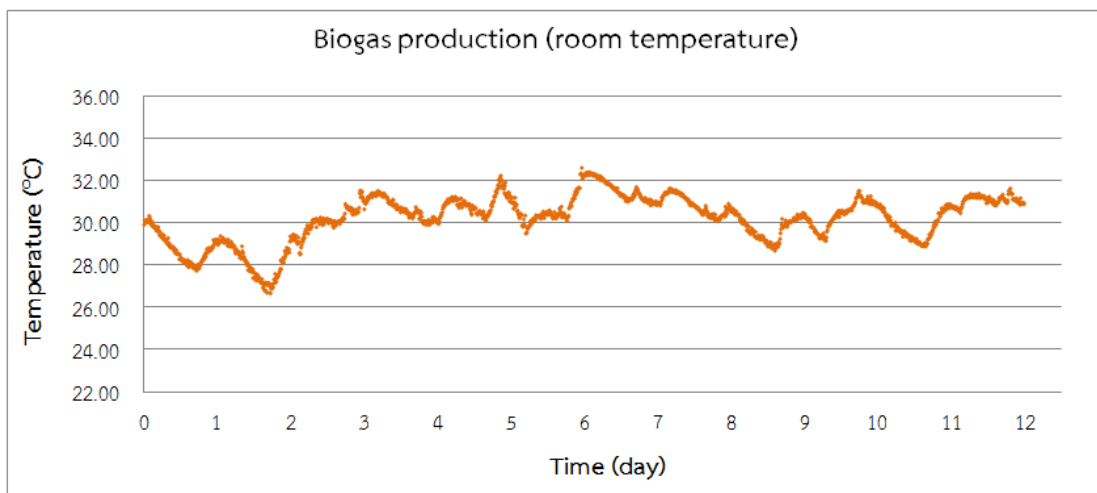
จากการศึกษาและดำเนินการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนเพื่อบันทึกข้อมูลของกระบวนการ การจำลองกระบวนการด้วยข่างานนิวัตและข่างานนิวัตแบบไฮบริดและการนำเทคนิคการออฟติไมซ์มาใช้ร่วมกับแบบจำลองข่างานนิวัตแบบไฮบริดเพื่อหาโปรไฟล์อุณหภูมิของกระบวนการที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด ทำให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผลจากการศึกษาได้ดังนี้

ผลการทดลองหมักตะกอนเลนเพื่อเก็บข้อมูล

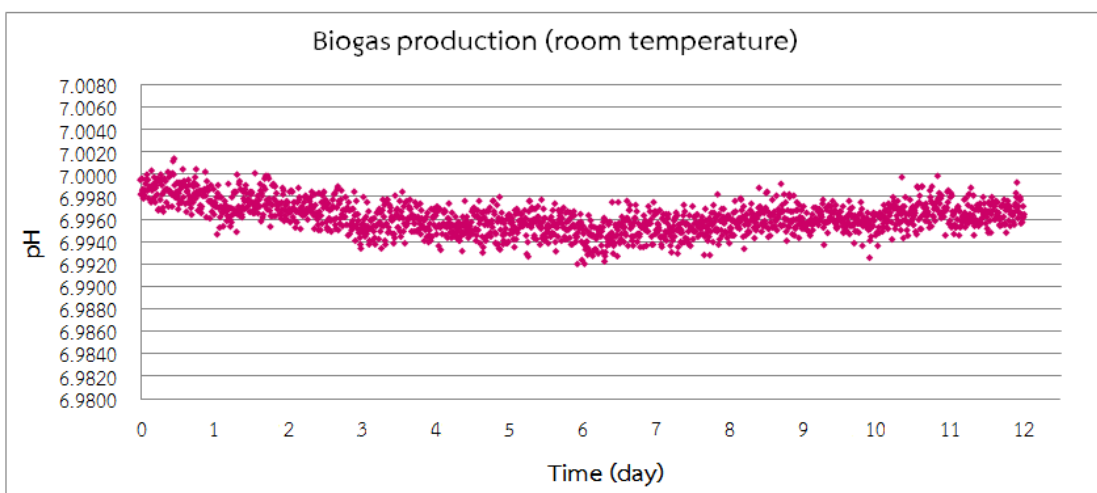
การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนในถังหมักแบบกะ (Batch reactor) เป็นเวลา 12 วัน ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ช่วง ได้แก่ อุณหภูมิห้อง (26-33 องศาเซลเซียส) 39-42 องศาเซลเซียส และ 46-58 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ผลการผลิตก๊าซชีวภาพ (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง)

อิทธิพลของอุณหภูมิ: จากภาพที่ 4-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา จะเห็นได้ชัดว่าอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพภูมิอากาศของแต่ละวัน โดยอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 30.20 องศาเซลเซียส ซึ่งตลอดการทดลอง 12 วัน อุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 26.65-32.59 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง)



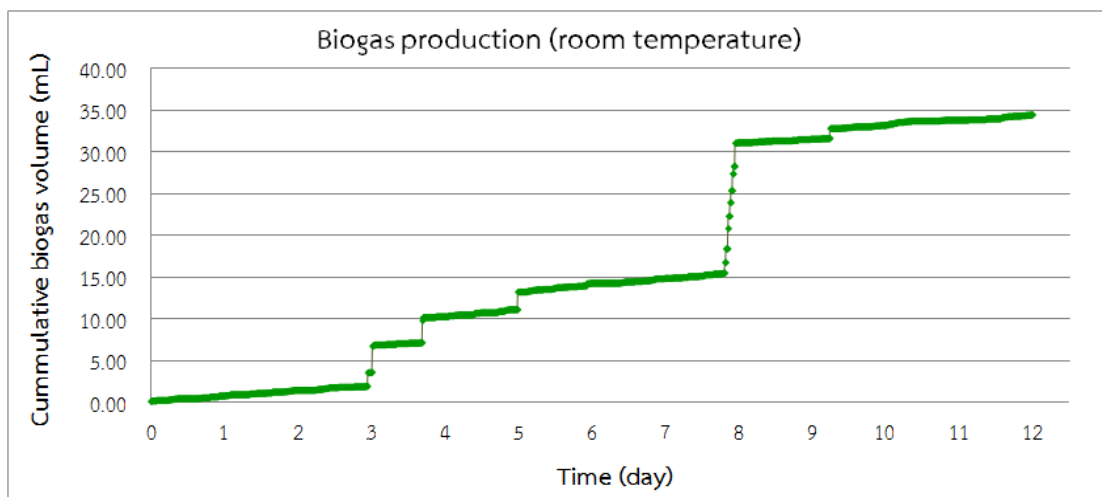
ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ของค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง)

อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง: จากภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ของค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา จะเห็นได้ว่าค่า pH ของตะกอนเลนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 6.99 และในช่วงวันที่ 1-3 ของการทดลอง ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากแบคทีเรียเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยในวันที่ 3 ของการทดลอง ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าลดลงเท่ากับ 6.99 ในช่วงวันที่ 4-6 ของการทดลอง ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าลดลงและสลับ

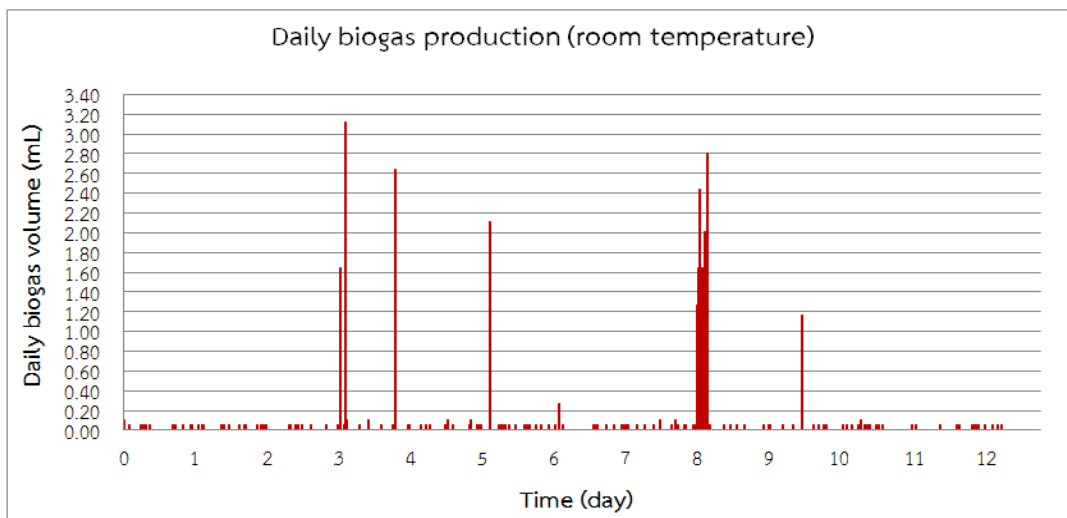
เพิ่มขึ้นบ้าง โดยในวันที่ 6 ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าเท่ากับ 6.99 และในช่วงวันที่ 7-12 ของการทดลอง ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารอาหารในตะกอนเลนลดน้อยลง จึงส่งผลให้แบคทีเรียลดการย่อยสลาย โดยในวันที่ 12 ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 6.99 ซึ่งตลอดการทดลอง 12 วัน ค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 6.99-7.00

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้: จากภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิด

ก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา จะเห็นได้ว่าในช่วงวันที่ 1-2 ของการทดลอง ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และในช่วงวันที่ 3-8 ของการทดลอง ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้แบคทีเรียทำงานได้ดี เนื่องจากแบคทีเรียจะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีที่อุณหภูมิสูง หลังจากนั้นในช่วงวันที่ 9-12 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนกระทั่งเกือบคงที่เนื่องจากอุณหภูมิที่ลดลงอีกและสารอาหารในตะกอนเลนลดน้อยลง จากภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับเวลา ในวันที่ 3 ของการทดลองมีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากที่สุดเท่ากับ 3.10 มิลลิลิตร และปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพตลอดการทดลอง 12 วัน เท่ากับ 34.46 มิลลิลิตร เฉลี่ยได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 2.87 มิลลิลิตร/วัน



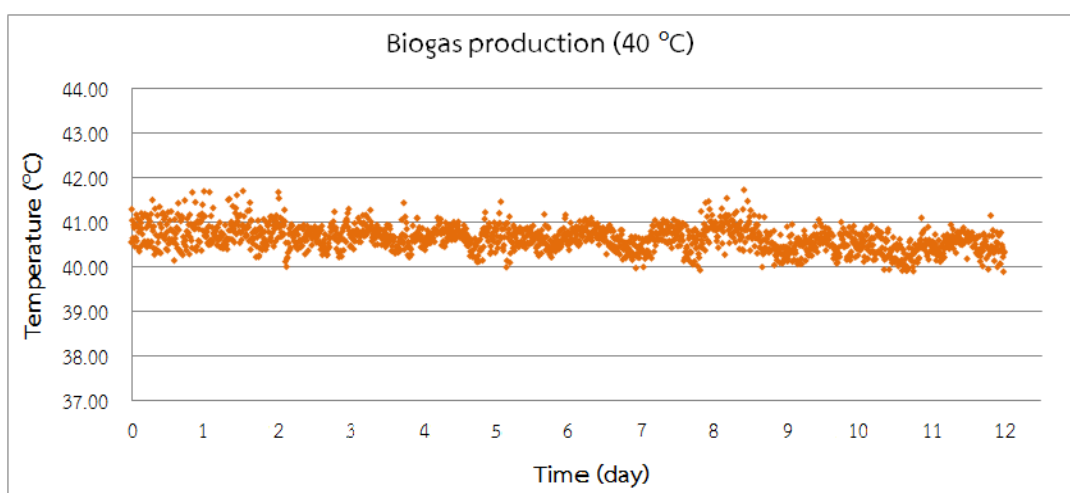
ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง)



ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง)

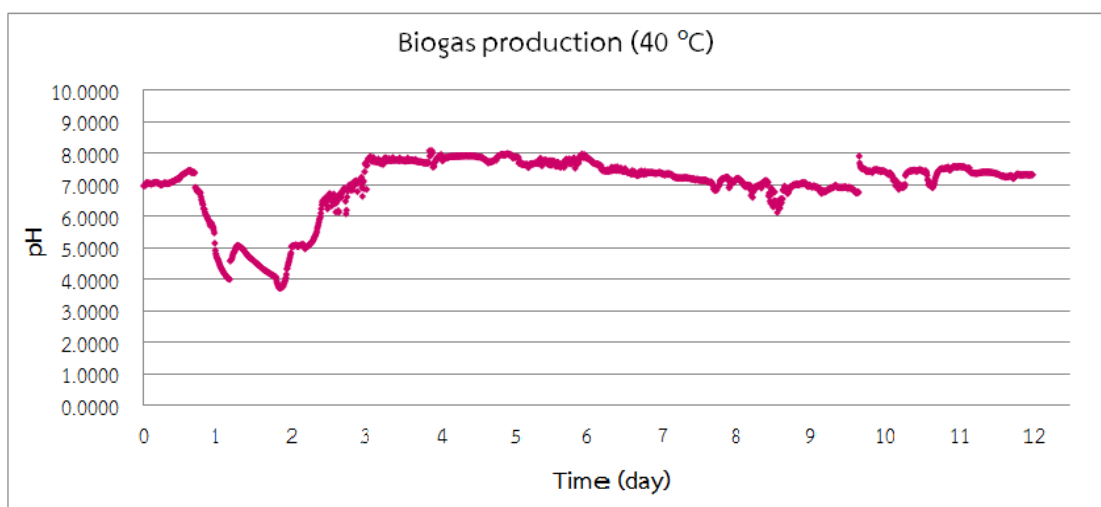
ผลการผลิตก๊าซชีวภาพ (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส)

อิทธิพลของอุณหภูมิ: จากภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิของระบบในช่วง 39-42 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 40.63 องศาเซลเซียส ซึ่งตลอดการทดลอง 12 วัน อุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 39.89-41.70 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส)

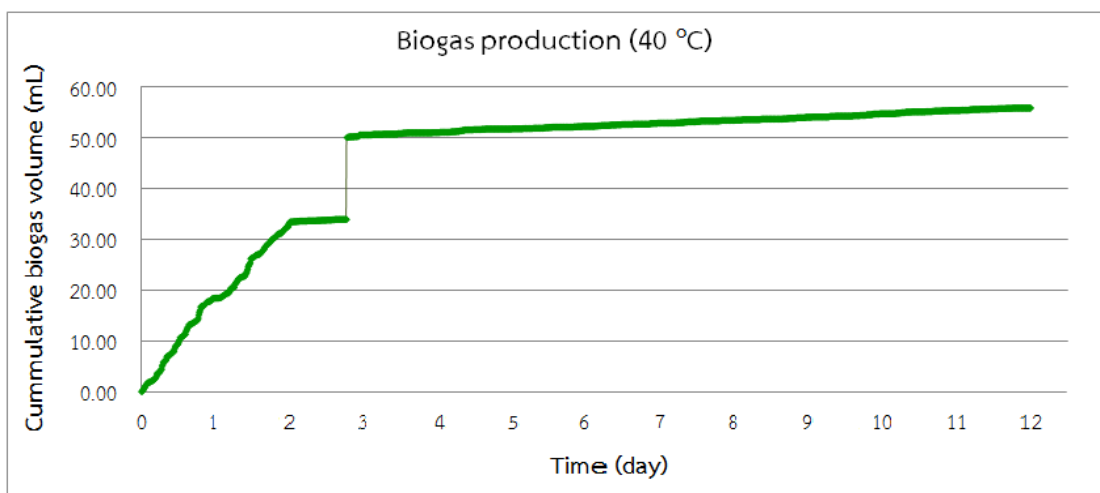
อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง: จากภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ของค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา จะเห็นได้ว่าค่า pH ของตะกอนเลนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 6.99 และในช่วงวันที่ 1-2 ของการทดลอง ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากแบคทีเรียเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างรวดเร็ว โดยในวันที่ 2 ของการทดลอง ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าลดลงต่ำสุดเท่ากับ 3.75 ในช่วงวันที่ 3-5 ของการทดลอง ค่า pH ของตะกอนเลนมีเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งเกือบคงที่ เนื่องจากสารอาหารในตะกอนเลนถูกย่อยสลายไปอย่างรวดเร็วใน 2 วันแรก ทำให้สารอาหารในตะกอนเลนลดน้อยลง โดยในวันที่ 5 ของการทดลอง ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าเท่ากับ 7.89 และในช่วงวันที่ 6-8 ของการทดลอง ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าลดลงอีก หลังจากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นและสลับลดลงบ้างในช่วงวันที่ 9-12 ของการทดลอง เนื่องจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอาหารด้วยแบคทีเรียลดลง โดยในวันที่ 12 ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าเท่ากับ 7.34 ซึ่งตลอดการทดลอง 12 วัน ค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 3.75-8.11



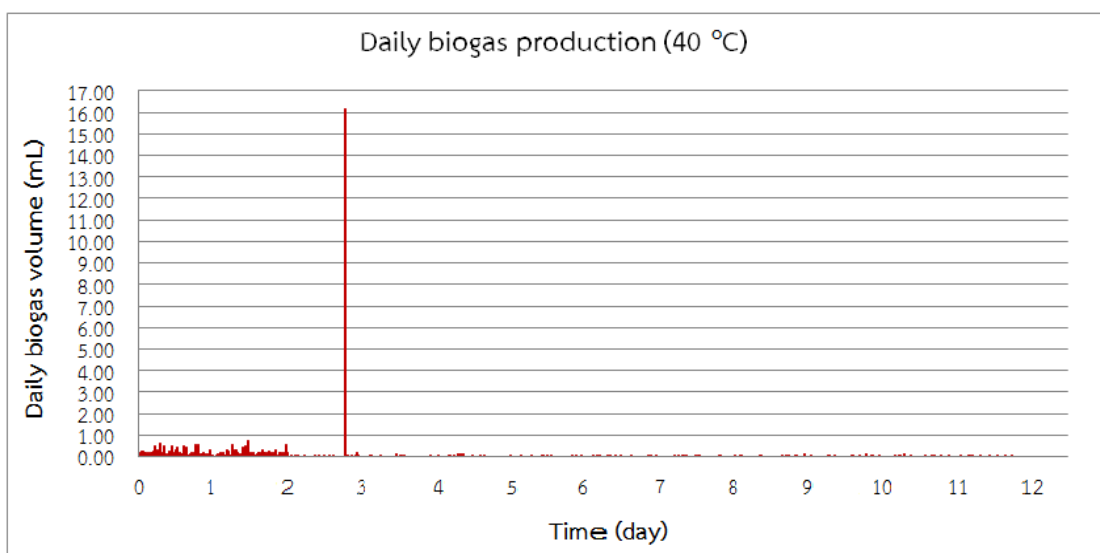
ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ของค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส)

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้: จากภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา จะเห็นได้ว่าในช่วงวันที่ 1-3 ของการทดลอง ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง จากนั้นในช่วงวันที่ 4-10 ของการทดลอง ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมจึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งเกือบคงที่ในช่วงวันที่ 11-12

ของการทดลอง เนื่องจากสารอาหารในตะกอนเลนลดน้อยลง จากภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์
ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับเวลา ในวันที่ 3 ของการทดลองมีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น
มากที่สุดเท่ากับ 1.60 มิลลิลิตร และปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพตลอดการทดลอง 12 วัน
เท่ากับ 55.95 มิลลิลิตร เฉลี่ยได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 4.66 มิลลิลิตร/วัน



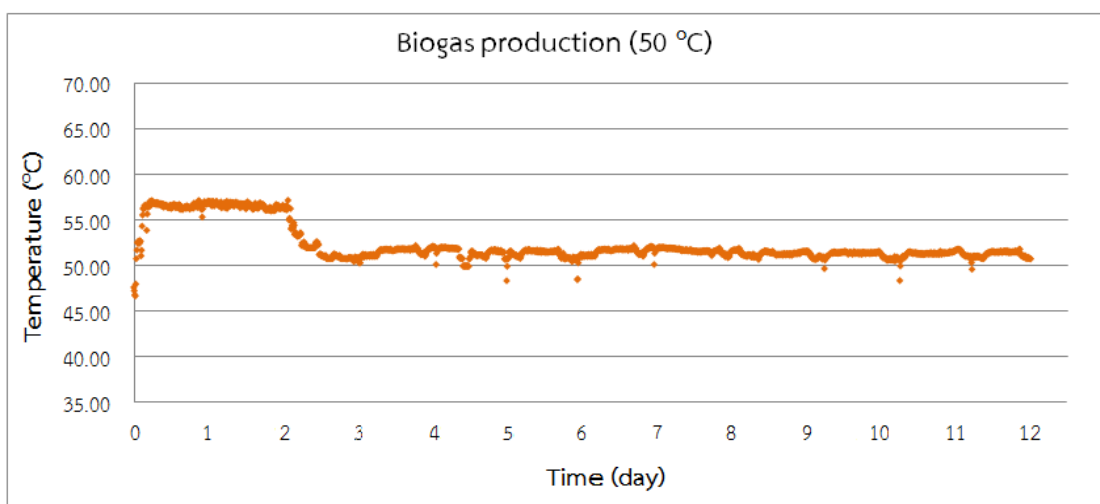
ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส)

ผลการผลิตก๊าซชีวภาพ (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส)

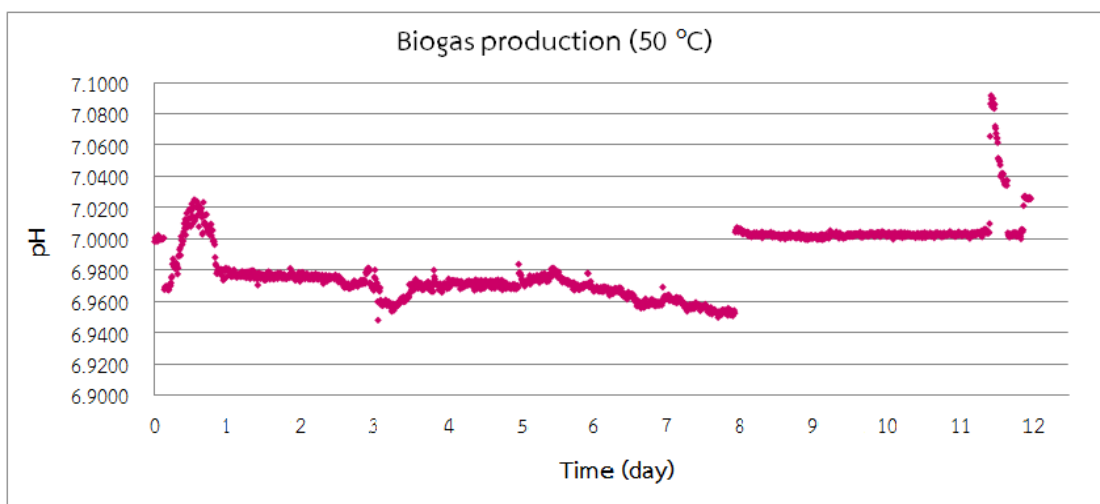
อิทธิพลของอุณหภูมิ: จากภาพที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 2 วันแรก ทั้งนี้เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ หลังจากนั้นในช่วงวันที่ 3 ของการทดลอง อุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักจึงลดลงและเริ่มคงที่ ในช่วงวันที่ 4-12 ของการทดลอง อุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักค่อนข้างคงที่ โดยทำการควบคุมอุณหภูมิของระบบในช่วง 46-58 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการทดลองมีค่าเท่ากับ 52.24 องศาเซลเซียส ซึ่งตลอดการทดลอง 12 วัน อุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 46.74-57.17 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส)

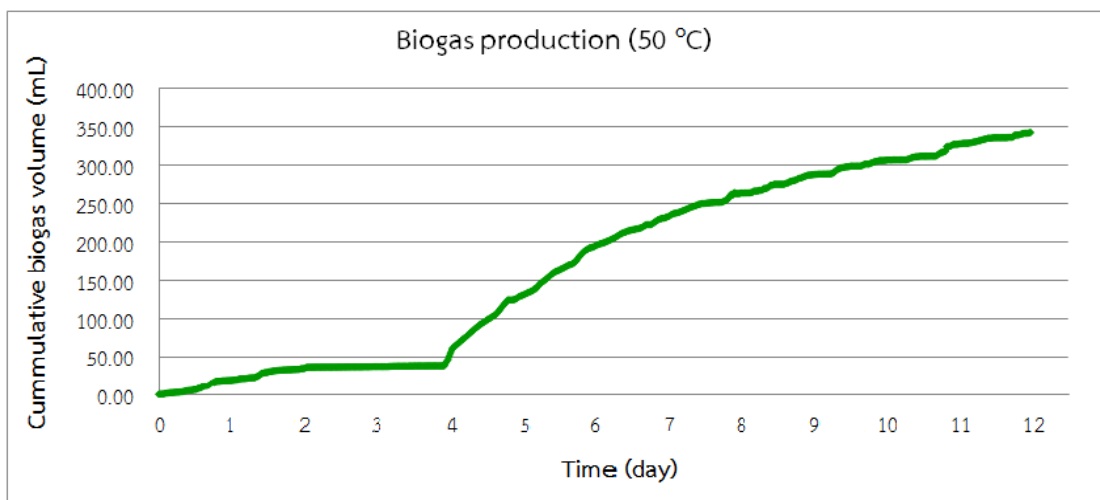
อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง: จากภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ของค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา จะเห็นได้ว่าค่า pH ของตะกอนเลนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 7.00 และในช่วงวันที่ 1-7 ของการทดลอง จะเห็นได้ว่าค่า pH ของตะกอนเลนมีแนวโน้มลดลงอย่างช้า ๆ เนื่องจากแบคทีเรียเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยในวันที่ 7 ของการทดลอง ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าลดลงเท่ากับ 6.96 และหลังจากนั้นในช่วงวันที่ 8-11 ของการทดลอง ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ โดยในวันที่ 11 ของการทดลอง ค่า pH ของตะกอนเลน

มีค่าเท่ากับ 7.00 และในช่วงวันที่ 12 ของการทดลอง ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าเพิ่มขึ้นอีก เนื่องจากสารอาหารในตะกอนเลนลดน้อยลง จึงส่งผลให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอาหาร ด้วยแบคทีเรียลดน้อยลงด้วย โดยในวันที่ 12 ค่า pH ของตะกอนเลนมีค่าเท่ากับ 7.02 ซึ่งตลอดการทดลอง 12 วัน ค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 6.95-7.09

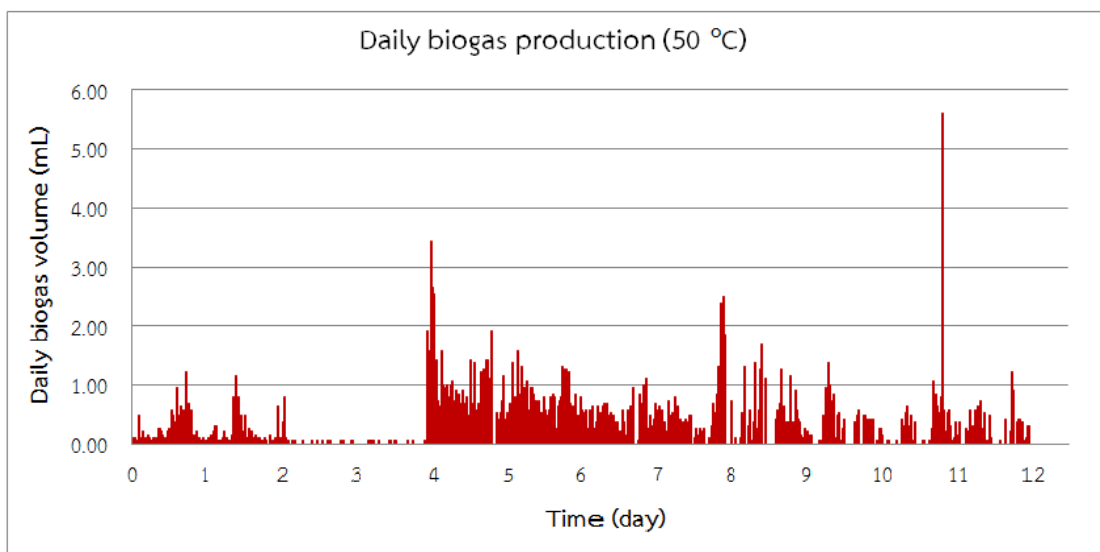


ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา (อุณหภูมิกำรหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส)

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้: จากภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา จะเห็นได้ว่าในช่วงวันที่ 1-4 ของการทดลอง ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากนั้นในช่วงวันที่ 5-11 ของการทดลอง ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเพิ่มขึ้นรวดเร็วมก จากภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับเวลา ในวันที่ 11 ของการทดลองมีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากที่สุดเท่ากับ 5.60 มิลลิลิตร และในช่วงวันที่ 12 ของการทดลอง ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมยังคงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย ซึ่งปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพตลอดการทดลอง 12 วัน เท่ากับ 344.07 มิลลิลิตร เฉลี่ยได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 28.67 มิลลิลิตร/วัน



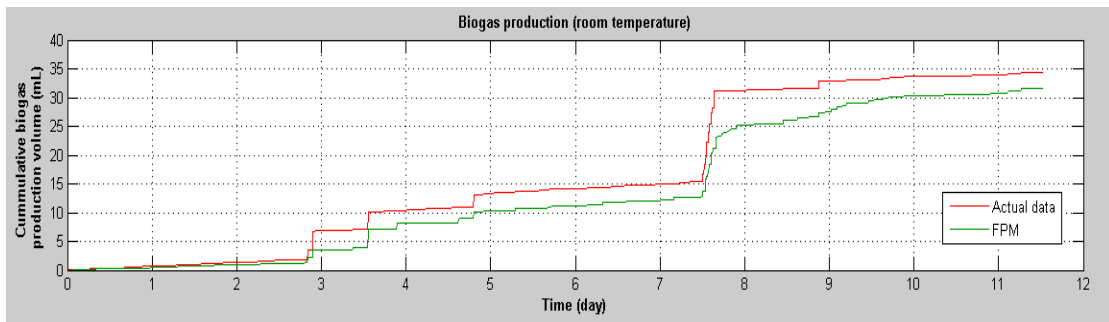
ภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส)



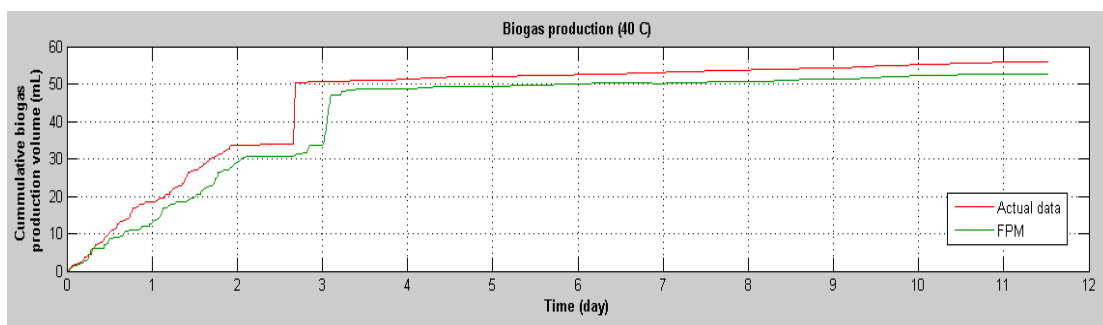
ภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส)

การจำลองกระบวนการโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน

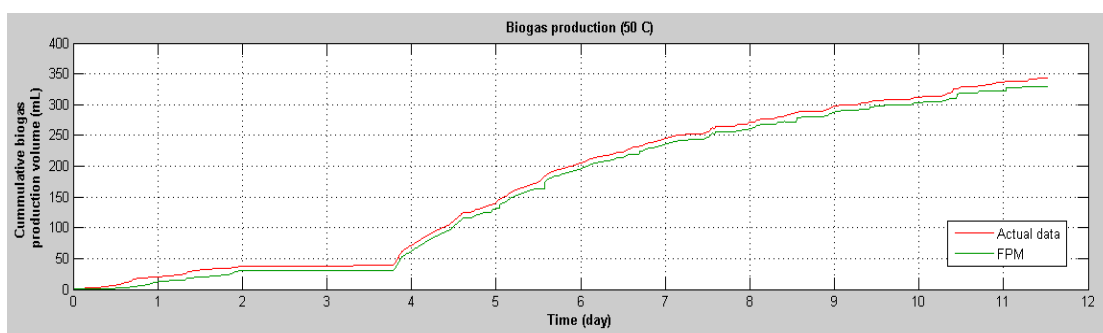
จากการจำลองกระบวนการ โดยใช้หลักการสมการอย่างง่าย (First principle model, FPM) ซึ่งสามารถหาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 ทำให้ได้ผลการตอบสนองของกระบวนการดังภาพที่ 4-13 4-14 และ 4-15 ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสม กับเวลา ที่อุณหภูมิหมักแตกต่างกัน 3 ช่วง ได้แก่ อุณหภูมิห้อง (26-33 องศาเซลเซียส) 39-42 องศาเซลเซียส และ 46-58 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการทดลองตามสถานะจริง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการมีความซับซ้อนสูง และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นั้นได้มาจากการประมาณค่า ดังนั้นผลการตอบสนองของกระบวนการที่ทำนายได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการจึงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น



ภาพที่ 4-13 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (อุณหภูมิหมักที่อุณหภูมิห้อง)



ภาพที่ 4-14 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (อนุกรมการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส)

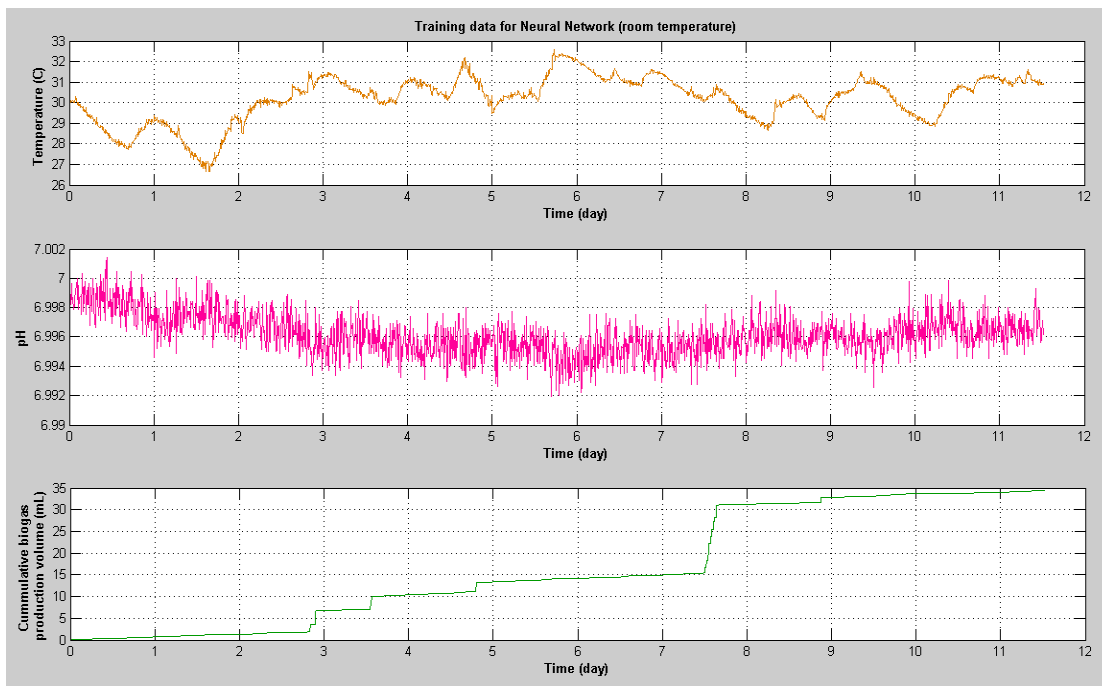


ภาพที่ 4-15 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (อนุกรมการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส)

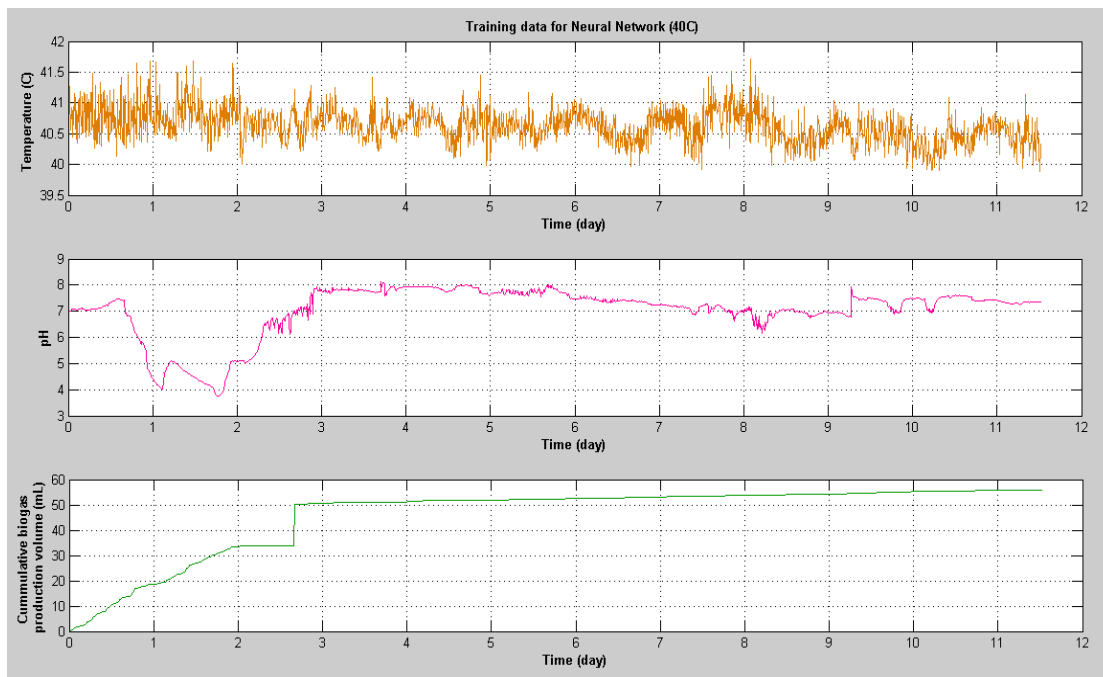
การสร้างชุดข้อมูลฝึกสอน ทดสอบและทดสอบประสิทธิภาพ สำหรับข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

สร้างชุดข้อมูลฝึกสอน ทดสอบ และทดสอบประสิทธิภาพสำหรับข่ายงานนิวรัล

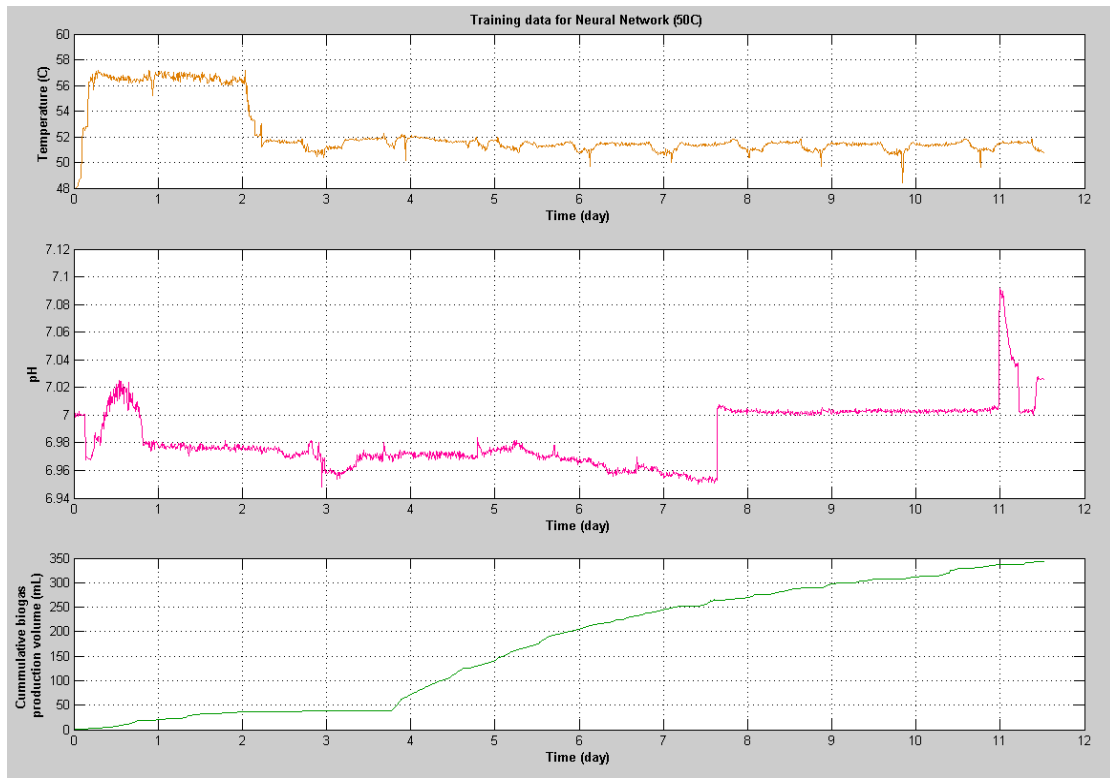
สร้างชุดข้อมูลเพื่อใช้เป็นข้อมูลฝึกสอน ทดสอบ และทดสอบประสิทธิภาพของข่ายงานนิวรัล โดยแบ่งช่วงข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นข้อมูลสำหรับฝึกสอน 60% ข้อมูลสำหรับทดสอบ 20% และข้อมูลสำหรับทดสอบประสิทธิภาพ 20% โดยกำหนดให้ค่าอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมัก ค่า pH และค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเป็นข้อมูลป้อนเข้านิวรัลและกำหนดให้ค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเป็นข้อมูลส่งออกจากนิวรัล โดยข้อมูลฝึกสอนข่ายงานนิวรัลแสดงดังภาพที่ 4-16 ถึง 4-18



ภาพที่ 4-16 ชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ในการฝึกสอนข่ายงานนิวรัล ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลาและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง)



ภาพที่ 4-17 ชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ในการฝึกสอนข่ายงานนิเวรัล ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลาและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส)

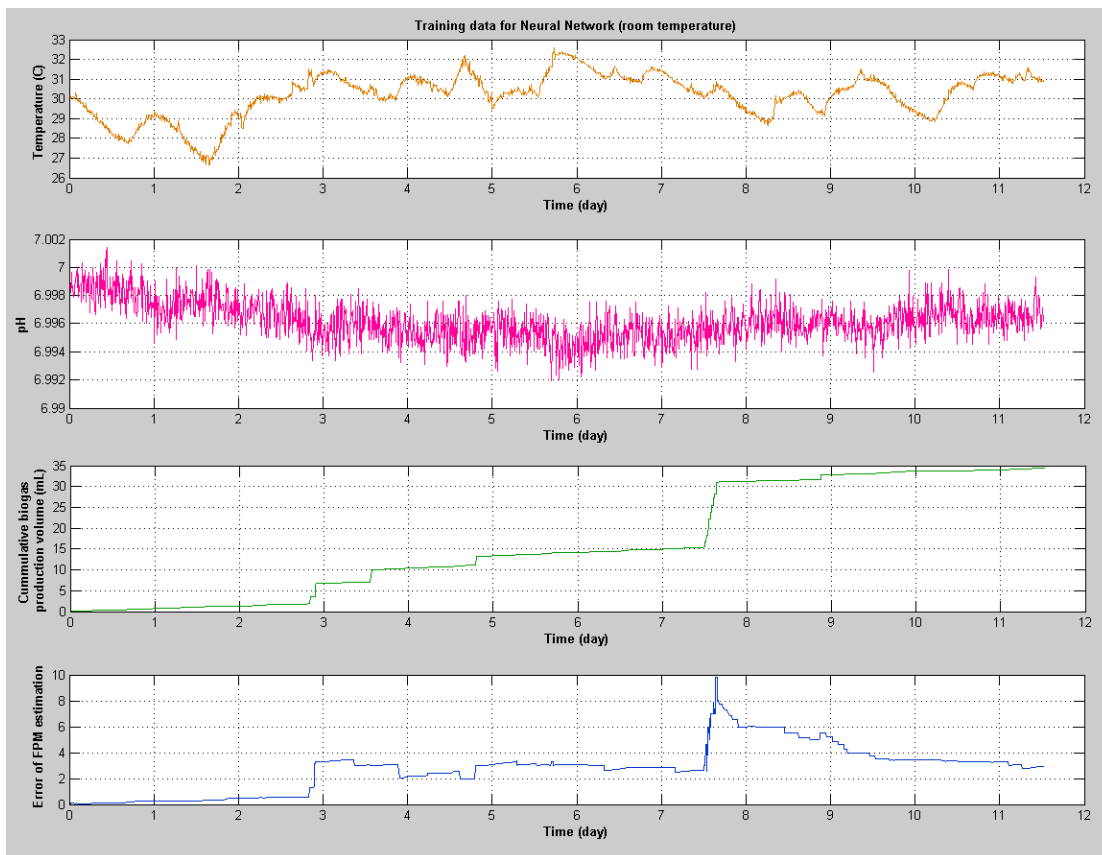


ภาพที่ 4-18 ชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ในการฝึกสอนข่ายงานนิวิรัล ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลาและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส)

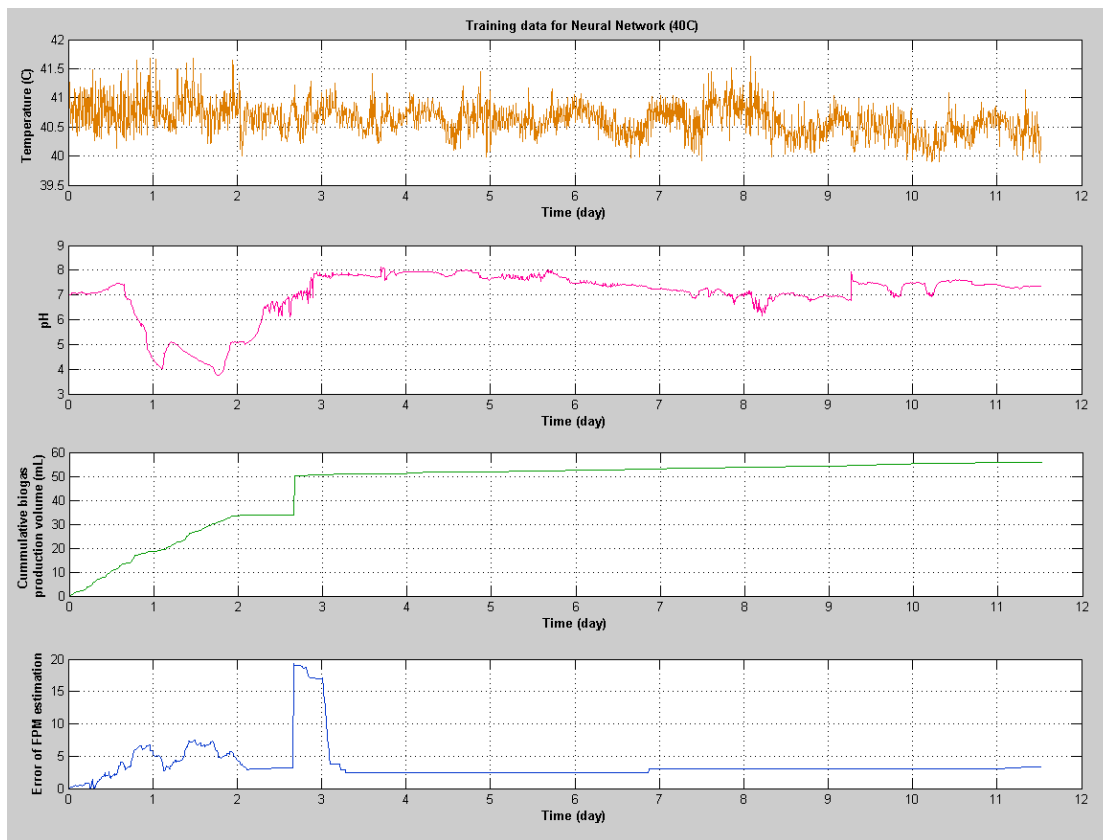
สร้างชุดข้อมูลฝึกสอน ทดสอบ และทดสอบประสิทธิภาพ สำหรับข่ายงานนิวิรัลแบบ

ไฮบริด

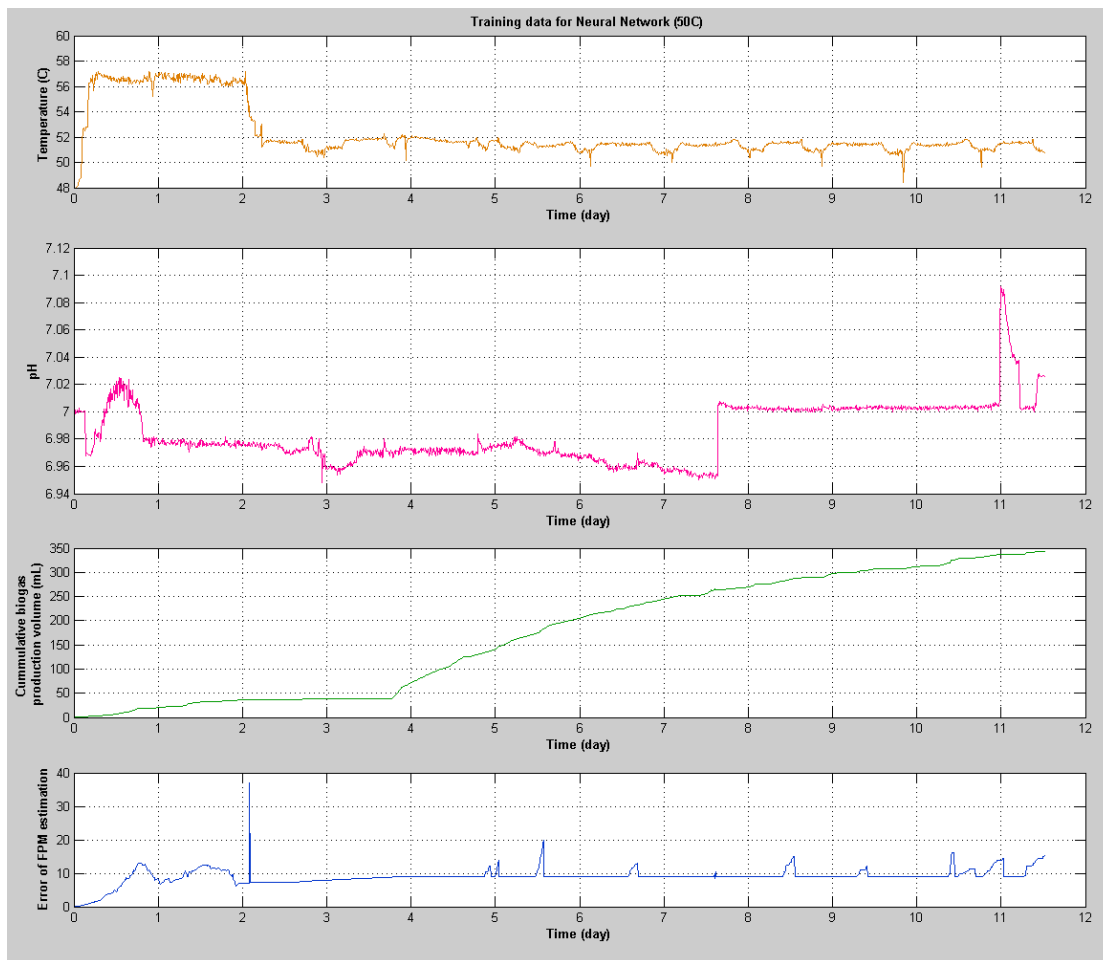
สร้างชุดข้อมูลเพื่อใช้เป็นข้อมูลฝึกสอน ทดสอบ และทดสอบประสิทธิภาพของข่ายงานนิวิรัลในข่ายงานนิวิรัลแบบไฮบริด โดยแบ่งช่วงข้อมูลที่ได้จากการจำลองกระบวนการโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นข้อมูลสำหรับฝึกสอน 60% ข้อมูลสำหรับทดสอบ 20% และข้อมูลสำหรับทดสอบประสิทธิภาพ 20% โดยกำหนดให้ค่าอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมัก ค่า pH และ ค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเป็นข้อมูลป้อนเข้านิวิรัลและกำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมจากการทำนายด้วยวิธีหลักการสมการอย่างง่ายเป็นข้อมูลส่งออกจากนิวิรัล โดยข้อมูลฝึกสอนข่ายงานนิวิรัลในข่ายงานนิวิรัลแบบไฮบริดแสดงดังภาพที่ 4-19 ถึง 4-21



ภาพที่ 4-19 ชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ในการฝึกสอนข่ายงานนิเวรัล ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลาและความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยวิธีหลักการสมการอย่างง่ายกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง)



ภาพที่ 4-20 ชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ในการฝึกสอนข่ายงานนิเวรล ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลาและความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยวิธี หลักการสมการอย่างง่ายกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 4-21 ชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ในการฝึกสอนข่ายงานนิวรัล ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักกับเวลาและความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยวิธี หลักการสมการอย่างง่ายกับเวลา (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส)

การสร้างแบบจำลองขบวนการนิ่วและขบวนการนิ่วแบบไฮบริด และการหาโครงสร้างที่เหมาะสมของขบวนการนิ่วและขบวนการนิ่วแบบไฮบริด

สร้างแบบจำลองขบวนการนิ่วและขบวนการนิ่วแบบไฮบริด

ทำการสร้างขบวนการนิ่วและขบวนการนิ่วแบบไฮบริดแบบแพร่ไปข้างหน้า และกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของโหนดในชั้นซ่อนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์ กำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของโหนดในชั้นข้อมูลส่งออกด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้นและกำหนดฝึกสอนขบวนการนี้ด้วยวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของการสอนขบวนการที่มีการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ เป็นลักษณะการเรียนรู้แบบมีผู้สอน

สร้างขบวนการนิ่วด้วยการกำหนดจำนวนค่าข้อมูลป้อนเข้าและค่าข้อมูลส่งออก กำหนดโครงสร้างของขบวนการของนิ่วด้วยการกำหนดจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนโหนดในชั้นซ่อนนั้น ๆ โดยกำหนดให้มีข้อมูลป้อนเข้า ทั้งหมด 7 ค่า ได้แก่ ค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมัก ที่เวลาปัจจุบัน (k) ในอดีตหนึ่งช่วงเวลา (k-1) และในอดีตสองช่วงเวลา (k-2) และค่าอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมัก ที่เวลาปัจจุบัน (k) ในอดีตหนึ่งช่วงเวลา (k-1) และในอดีตสองช่วงเวลา (k-2) ค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่เวลาปัจจุบัน (k) กำหนดให้ข้อมูลส่งออกจากนิ่ว คือ ค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสม ในอนาคตหนึ่งช่วงเวลา (k+1) และกำหนดค่าสมรรถนะเป้าหมายด้วยค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ให้มีค่าเท่ากับ 1×10^{-7} และทำการฝึกสอนขบวนการ ทดสอบ และทดสอบประสิทธิภาพขบวนการนิ่วด้วยชุดข้อมูลที่เตรียมไว้แล้ว จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทำนายด้วยขบวนการนิ่ว เพื่อหาโครงสร้างที่ดีที่สุดของขบวนการ

สร้างขบวนการนิ่วแบบไฮบริดด้วยการกำหนดจำนวนค่าข้อมูลป้อนเข้าและค่าข้อมูลส่งออก กำหนดโครงสร้างของขบวนการนิ่วในขบวนการนิ่วแบบไฮบริดที่จะใช้สำหรับทำนายค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมจากการทำนายด้วยวิธีหลักการสมการอย่างง่าย ด้วยการกำหนดจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนโหนดในชั้นซ่อนนั้น ๆ โดยกำหนดให้มีข้อมูลป้อนเข้า ทั้งหมด 7 ค่า ได้แก่ ค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมัก ที่เวลาปัจจุบัน (k) ในอดีตหนึ่งช่วงเวลา (k-1) และในอดีตสองช่วงเวลา (k-2) และค่าอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมัก ที่เวลาปัจจุบัน (k) ในอดีตหนึ่งช่วงเวลา (k-1) และในอดีตสองช่วงเวลา (k-2) ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมจากการทำนายด้วยวิธีหลักการสมการอย่างง่ายที่เวลาปัจจุบัน (k) กำหนดให้ข้อมูลส่งออกจากนิ่ว คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมจากการทำนายด้วยวิธีหลักการสมการอย่างง่ายในอนาคตหนึ่งช่วงเวลา (k+1) และกำหนดค่าสมรรถนะเป้าหมายด้วยค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย

ให้มีค่าเท่ากับ 1×10^{-7} และทำการฝึกสอนข่ายงาน ทดสอบ และทดสอบประสิทธิภาพข่ายงานนิวิรัล ด้วยชุดข้อมูลที่เตรียมไว้แล้ว จากนั้นเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทำนาย ด้วยข่ายงานนิวิรัลในข่ายงานนิวิรัลแบบไฮบริด เพื่อหาโครงสร้างที่ดีที่สุดของข่ายงาน เมื่อได้ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมจากข่ายงานนิวิรัลแล้ว นำมารวมเข้ากับค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่ทำนายได้จากหลักการสมการอย่างง่าย ค่าที่ทำนายได้จะมีความถูกต้องแม่นยำและใกล้เคียงกับค่าจริงมากยิ่งขึ้น

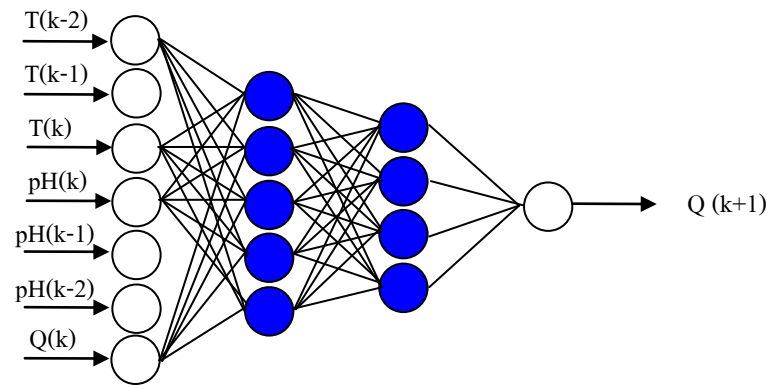
การหาโครงสร้างที่เหมาะสมของข่ายงานนิวิรัลและข่ายงานนิวิรัลแบบไฮบริด

การกำหนดโครงสร้างของข่ายงานนิวิรัลและข่ายงานนิวิรัลในข่ายงานนิวิรัลแบบไฮบริดให้มีชั้นซ่อนและจำนวนโหนดในชั้นซ่อนต่างกัน เพื่อหาแบบโครงสร้างที่สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายของข่ายงานนิวิรัลและข่ายงานนิวิรัลแบบไฮบริดที่มีโครงสร้างแตกต่างกันด้วยการพิจารณาจากค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ซึ่งโครงสร้างที่สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด คือ โครงสร้างที่ให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างอื่น ๆ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองโครงสร้างของข่ายงานนิวิรัลและข่ายงานนิวิรัลแบบไฮบริด โดยกำหนดให้มีชั้นซ่อน 2 ชั้น และจำนวนโหนดในชั้นซ่อน ตั้งแต่ 1 ถึง 9 โหนด

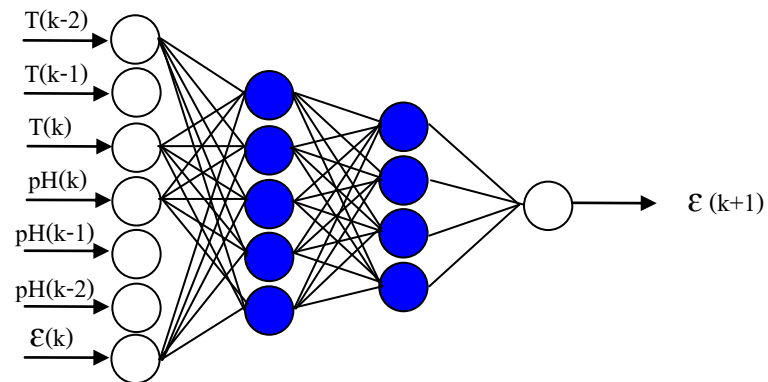
จากการเปรียบเทียบ พบว่า โครงสร้างของข่ายงานนิวิรัลและข่ายงานนิวิรัลแบบไฮบริดที่มีชั้นซ่อน 2 ชั้น และกำหนดให้มีโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 5 และ 4 โหนด ตามลำดับนั้น เป็นโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4-22 และ 4-23 เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับโครงสร้างอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-1 และ 4-2 ซึ่งค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทำนายค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยข่ายงานนิวิรัลมีค่าเท่ากับ 4.09×10^{-10} มิลลิลิตร² และค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทำนายค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยข่ายงานนิวิรัลแบบไฮบริดทำนายมีค่าเท่ากับ 3.16×10^{-13} มิลลิลิตร²

ตารางที่ 4-1 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทำนายค่าปริมาณการเกิด
ก๊าซชีวภาพสะสมด้วยข่างานนิวัตที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน

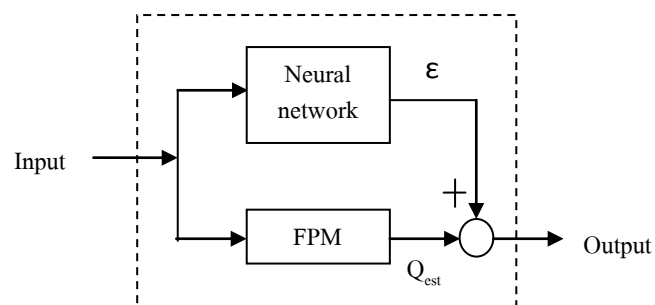
จำนวนโหนดในชั้นช่อนที่ 1	จำนวนโหนดในชั้นช่อนที่ 2	ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย
		จากการทดสอบประสิทธิภาพ (มิลลิลิตร ²)
1	2	4.68×10^{-6}
	4	9.23×10^{-7}
	6	6.71×10^{-7}
	8	5.83×10^{-7}
3	2	3.60×10^{-8}
	4	1.44×10^{-8}
	6	7.82×10^{-9}
	8	3.17×10^{-9}
5	2	6.25×10^{-10}
	4	4.09×10^{-10}
	6	5.72×10^{-10}
	8	6.35×10^{-10}
7	2	8.66×10^{-9}
	4	6.02×10^{-9}
	6	2.97×10^{-9}
	8	9.19×10^{-8}



ภาพที่ 4-22 โครงสร้างของข่ายงานนิวรัลที่เหมาะสมที่สุด [7-5-4-1]



ภาพที่ 4-23 โครงสร้างของข่ายงานนิวรัลที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายค่าความคลาดเคลื่อน [7-5-4-1]



ภาพที่ 4-24 โครงสร้างของข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

ตารางที่ 4-2 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทำนายค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน

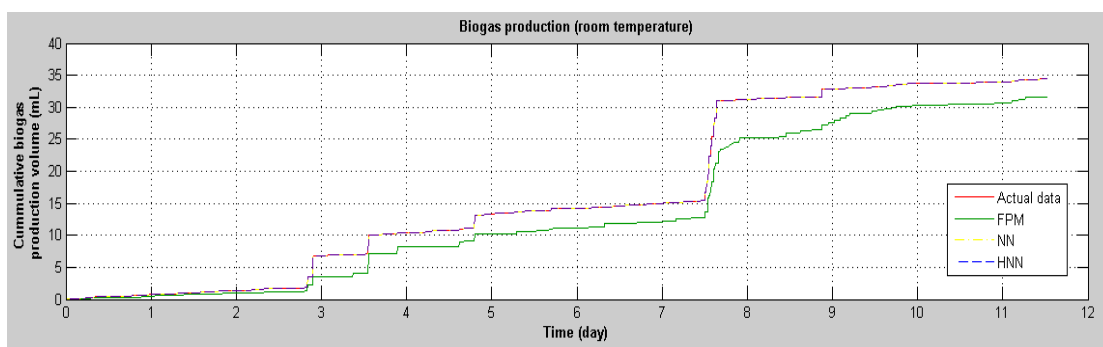
จำนวนโหนดในชั้นซ่อนที่ 1	จำนวนโหนดในชั้นซ่อนที่ 2	ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทดสอบประสิทธิภาพ (มิลลิเมตร ²)
1	2	6.02×10^{-8}
	4	3.46×10^{-8}
	6	9.10×10^{-9}
	8	8.85×10^{-9}
3	2	4.71×10^{-10}
	4	6.92×10^{-11}
	6	9.33×10^{-12}
	8	5.07×10^{-12}
5	2	7.42×10^{-13}
	4	3.16×10^{-13}
	6	4.28×10^{-13}
	8	7.77×10^{-13}
7	2	2.60×10^{-12}
	4	3.89×10^{-12}
	6	5.56×10^{-11}
	8	6.30×10^{-11}

เนื่องจากข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่สามารถทำนายกระบวนการได้ดีที่สุดในโครงการวิจัยนี้ คือ โครงสร้างที่มีชั้นซ่อน 2 ชั้น โดยกำหนดให้มีโหนดในชั้นซ่อนที่ 1 เท่ากับ 5 โหนด และ โหนดในชั้นซ่อนที่ 2 เท่ากับ 4 โหนด ดังภาพที่ 4-22 และ 4-23 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีจำนวนโหนดที่ไม่มากหรือน้อยจนเกินไป เพราะหากกำหนดจำนวนโหนดในชั้นซ่อนมากจะทำให้เสียเวลาในการฝึกสอนข่ายงาน เนื่องจากจำนวนการเชื่อมต่อของแต่ละโหนดมีจำนวนมากและหากกำหนดจำนวนโหนดในชั้นซ่อนน้อยเกินไปข่ายงานนิวรัลจะไม่สามารถเรียนรู้จนพบคำตอบที่ดีที่สุดได้

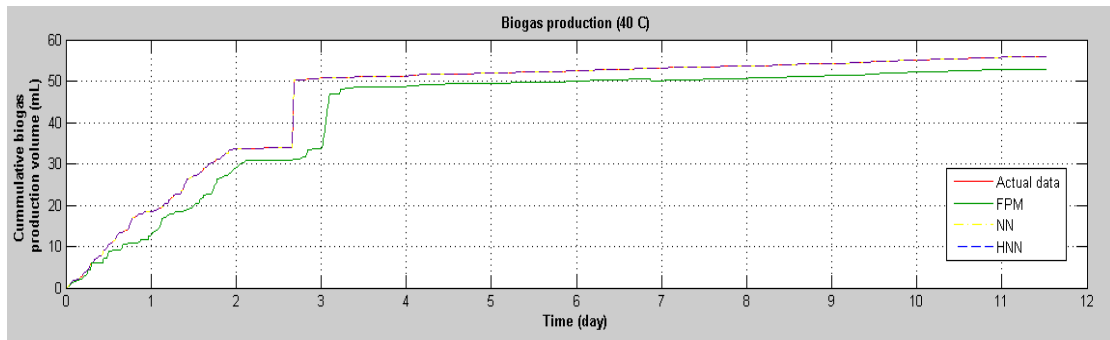
เมื่อหาโครงสร้างที่ดีที่สุดที่ทำให้ช่างงานนิวัลสามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้ใกล้เคียงหรือตรงตามกระบวนการจริงแล้ว จากนั้นทำการจำลองกระบวนการด้วยช่างงานนิวัลและช่างงานนิวัลแบบไฮบริดด้วยข้อมูลที่ใช้ทดสอบและจำลองกระบวนการใหม่อีกครั้งด้วยข้อมูลที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการทำนายระหว่างช่างงานนิวัลและช่างงานนิวัลแบบไฮบริด

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมของช่างงานนิวัลและช่างงานนิวัลแบบไฮบริด

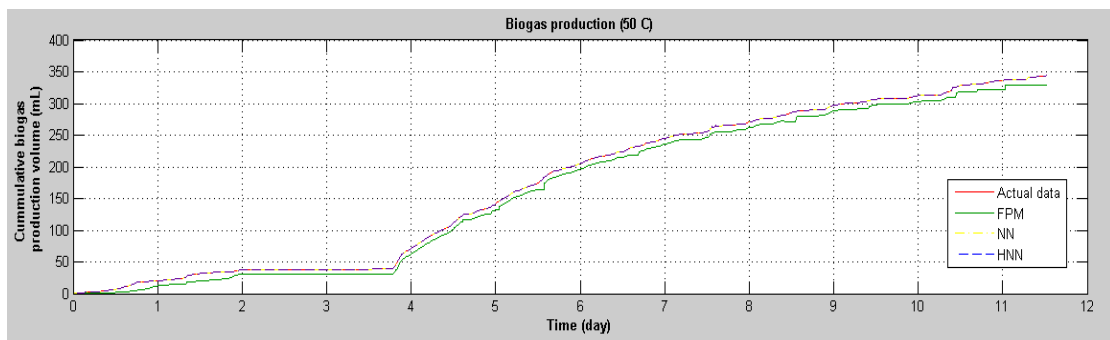
ทดสอบประสิทธิภาพของช่างงานนิวัลและช่างงานนิวัลแบบไฮบริดในการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสม เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการทำนายว่าช่างงานแบบใดสามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้ใกล้เคียงหรือตรงตามพฤติกรรมของกระบวนการจริงมากที่สุด โดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบประสิทธิภาพ ซึ่งผลการจำลองแสดงดังภาพที่ 4-25 ถึง 4-27



ภาพที่ 4-25 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยช่างงานนิวัลและช่างงานนิวัลแบบไฮบริดที่มีโครงสร้าง [7-5-4-1] (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง)



ภาพที่ 4-26 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่มีโครงสร้าง [7-5-4-1] (อุณหภูมิการหมักที่ 39-42 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 4-27 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่มีโครงสร้าง [7-5-4-1] (อุณหภูมิการหมักที่ 46-58 องศาเซลเซียส)

ผลการเปรียบเทียบปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมระหว่างผลการตอบสนองของกระบวนการจริงและจากการทำนายด้วยข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด ซึ่งมีโครงสร้างที่มีชั้นซ่อน 2 ชั้น โดยกำหนดให้มิโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 5 และ 4 โหนดตามลำดับ ดังภาพที่ 4-25 ถึง 4-27 พบว่า เส้นผลการตอบสนองของกระบวนการที่ข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดทำนายนั้น ทับแนบสนิทกับผลการตอบสนองของกระบวนการจริงที่ใช้ทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข่ายงานทั้งสองแบบสามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้ เหมือนกับผลการตอบสนองของกระบวนการจริง

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายของข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดสามารถทำได้โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย ซึ่งข่ายงานที่

สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการ ได้มีความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด คือ ค่าของงานที่ให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด ซึ่งพบว่า ค่าของงานที่สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการ ได้ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด คือ ค่าของงานนิวัตแบบไฮบริดที่มีโครงสร้าง [7-5-4-1] ซึ่งมีค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทดสอบประสิทธิภาพเท่ากับ 3.16×10^{-13} มิลลิลิตร² ดังตารางที่ 4-3

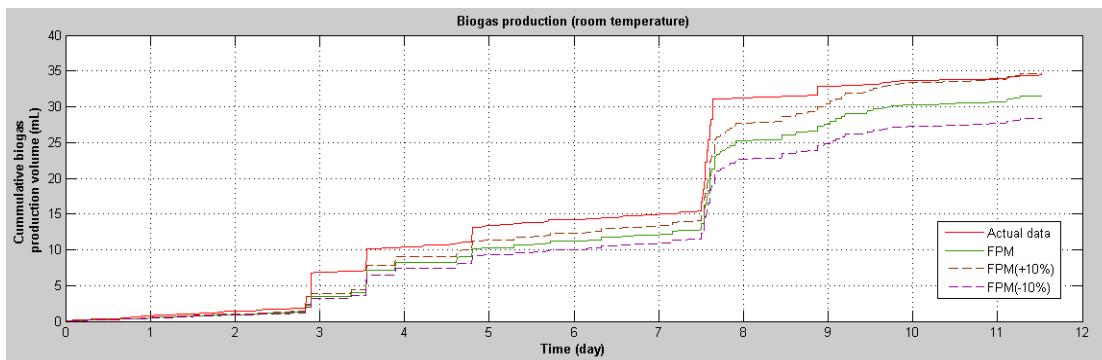
ตารางที่ 4-3 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการทำนายค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสม ด้วยค่าของงานนิวัตและค่าของงานนิวัตแบบไฮบริด

ชนิดของค่าของงาน	ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทดสอบประสิทธิภาพ (มิลลิลิตร ²)
ค่าของงานนิวัต	4.09×10^{-10}
ค่าของงานนิวัตแบบไฮบริด	3.16×10^{-13}

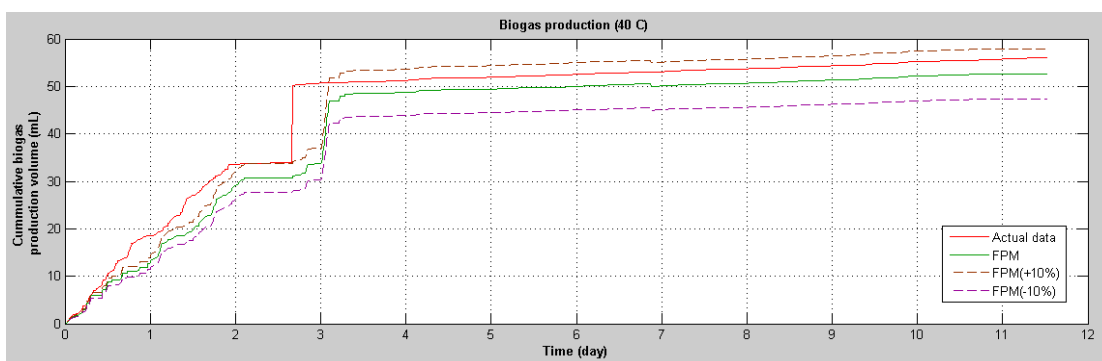
การจำลองกระบวนการกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด

(Model/ Parameter mismatch)

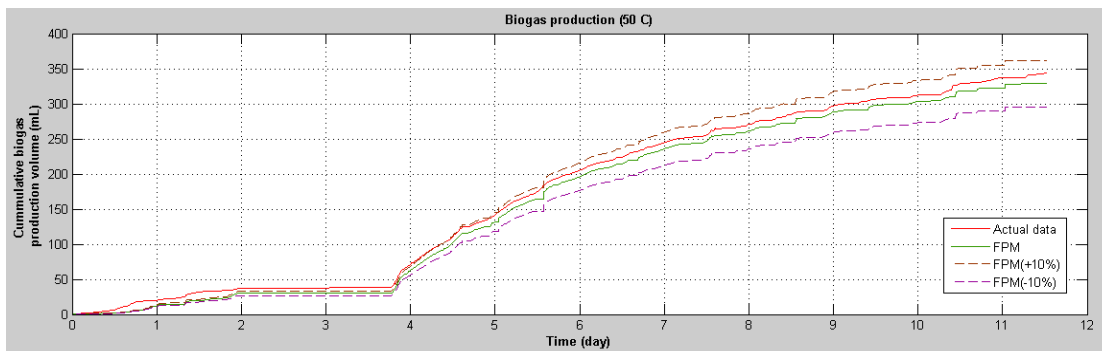
การจำลองกระบวนการ โดยใช้หลักการสมการอย่างง่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงจากเดิม 10% ผลการตอบสนองของกระบวนการซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลา แสดงดังภาพที่ 4-28 ถึง 4-30



ภาพที่ 4-28 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) เพิ่มขึ้นและลดลงจากเดิม 10%
(อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง)



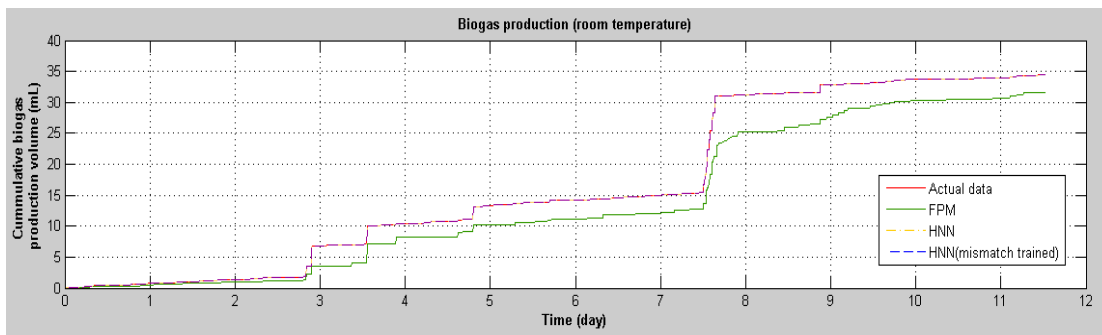
ภาพที่ 4-29 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) เพิ่มขึ้นและลดลงจากเดิม 10%
(อุณหภูมิการหมัก 39-42 องศาเซลเซียส)



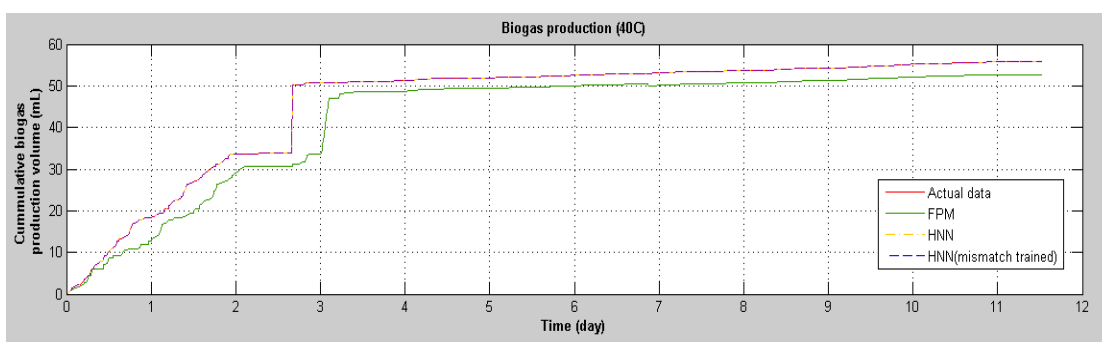
ภาพที่ 4-30 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) เพิ่มขึ้นและลดลงจากเดิม 10% (อุณหภูมิหมัก 46-58 องศาเซลเซียส)

จากผลการตอบสนองของกระบวนการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) มีผลต่อการทำนายค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสม โดยทำให้ผลการตอบสนองของกระบวนการที่ทำนายได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ

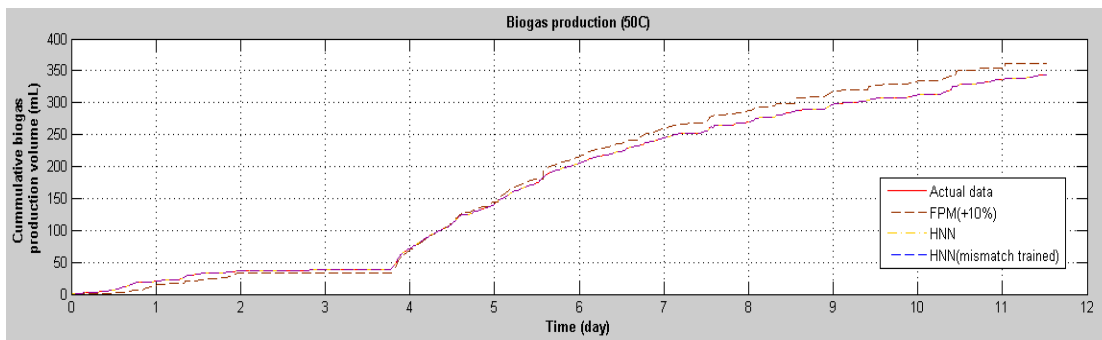
การเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมในกรณีสภาวะปกติ
ทดสอบประสิทธิภาพของช่างงานนิรวัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด โดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบประสิทธิภาพที่สภาวะปกติ โดยผลการจำลองแสดงดังภาพที่ 4-31 ถึง 4-33



ภาพที่ 4-31 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่สภาวะปกติด้วยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง)



ภาพที่ 4-32 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่สภาวะปกติด้วยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิการหมัก 39-42 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 4-33 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่สภาวะปกติด้วยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิการหมัก 46-58 องศาเซลเซียส)

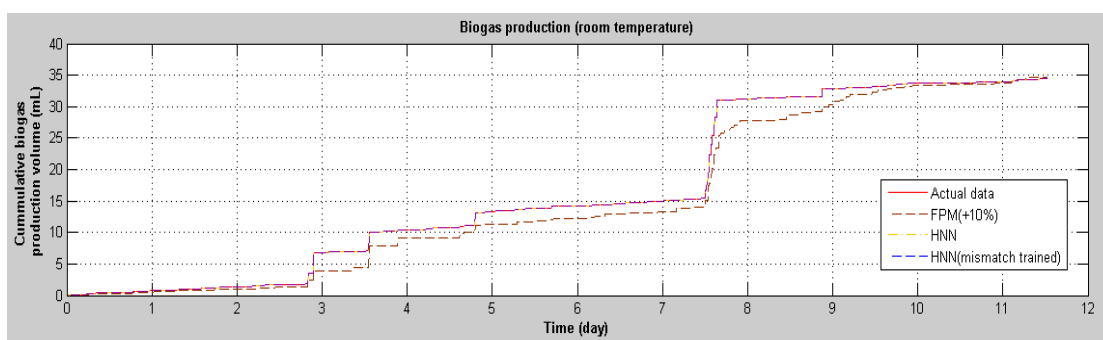
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายของข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด สามารถทำได้โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการทำนายด้วยข่ายงานทั้งสองแบบ ซึ่งข่ายงานที่สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้มีความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุดคือ ข่ายงานที่ให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด ซึ่งพบว่า ข่ายงานที่สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการในกรณีสภาวะปกติได้ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุดคือ ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด แต่ได้รับการฝึกสอนในกรณีสภาวะปกติเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยมีโครงสร้าง [7-5-4-1] ซึ่งมีความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทดสอบประสิทธิภาพเท่ากับ 3.16×10^{-13} มิลลิลิตร² ดังตารางที่ 4-4 ทั้งนี้ ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทำนายของข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาดนั้นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 4-4 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการทำนายค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสม ด้วยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (ในกรณีสภาวะปกติ)

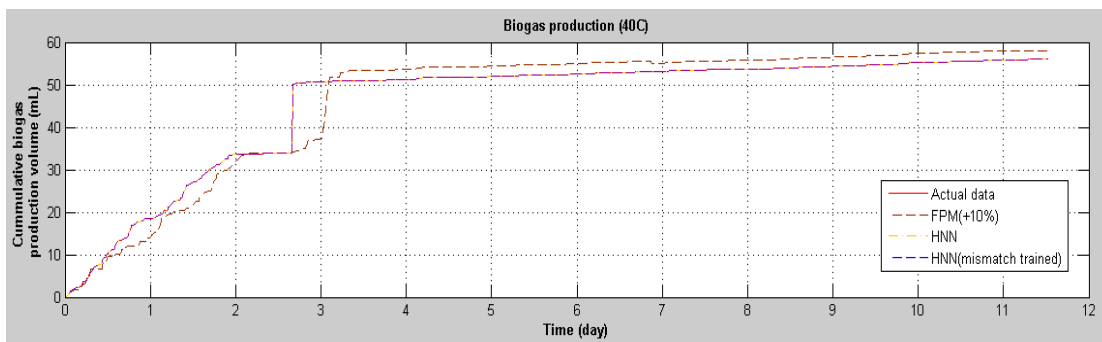
ชนิดของข่ายงาน	ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทดสอบประสิทธิภาพ (มิลลิลิตร ²)
ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด (ได้รับการฝึกสอนที่สภาวะปกติเพียงอย่างเดียว)	3.16×10^{-13}
ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด (ได้รับการฝึกสอนทั้งสองแบบ)	9.52×10^{-12}

การเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมในกรณีเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) เพิ่มขึ้น 10%

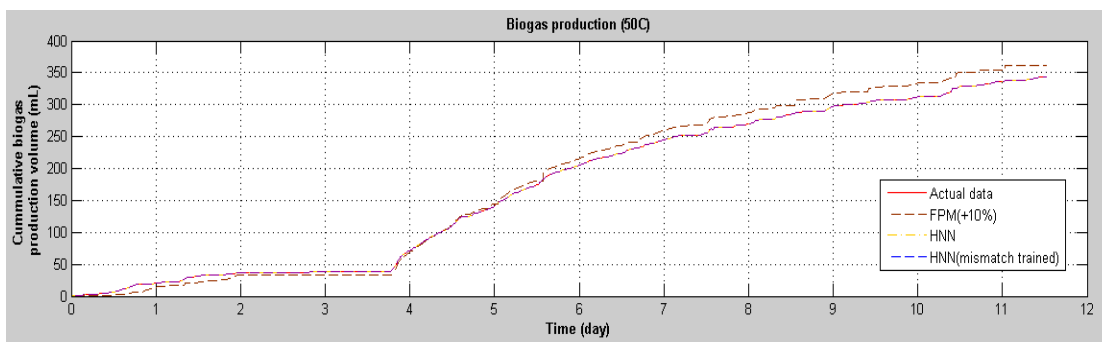
ทดสอบประสิทธิภาพของข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด โดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบประสิทธิภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 10% โดยผลการจำลองแสดงดังภาพที่ 4-34 ถึง 4-36



ภาพที่ 4-34 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 10% ด้วยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง)



ภาพที่ 4-35 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 10% ด้วยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อนุกรมการหมัก 39-42 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 4-36 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 10% ด้วยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อนุกรมการหมัก 46-58 องศาเซลเซียส)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายของข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด สามารถทำได้โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการทำนายด้วยข่ายงานทั้งสองแบบ ซึ่งข่ายงานที่สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้มีความถูกต้องและแม่นยำ

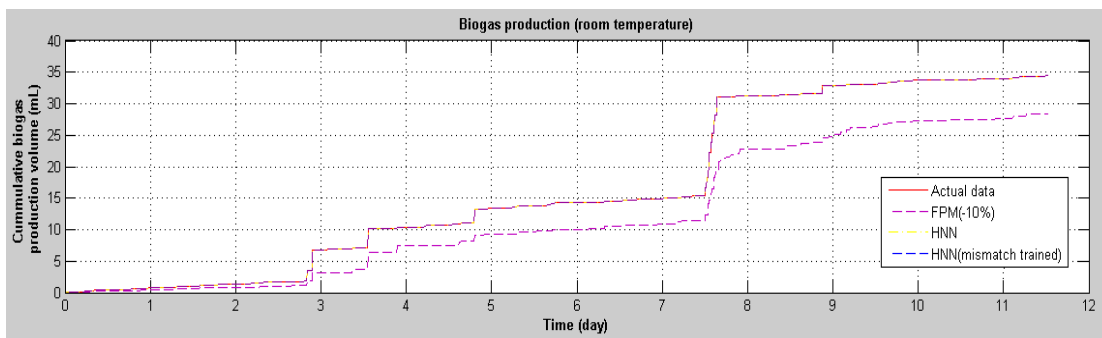
มากที่สุด คือ ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด ซึ่งพบว่า ค่างานที่สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่มีการมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 10% ได้ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด คือ ค่างานนิวัตต์แบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการทั้งในกรณีสภาวะปกติและกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด โดยมีโครงสร้าง [7-5-4-1] ซึ่งมีค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทดสอบประสิทธิภาพเท่ากับ 4.71×10^{-13} มิลลิลิตร² ดังตารางที่ 4-5 โดยในกรณีนี้ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองของกระบวนการของค่างานนิวัตต์แบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลทั้งสองกรณีนั้น มีประสิทธิภาพการทำนายที่ดีกว่าเนื่องจากค่างานได้ผ่านการฝึกสอนมาก่อน จึงทำให้มีค่าน้ำหนักจากการเรียนรู้ที่เหมาะสมและสามารถทำนายผลตอบสนองของกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4-5 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการทำนายค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสม ด้วยค่างานนิวัตต์แบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) เพิ่มขึ้นจากเดิม 10%)

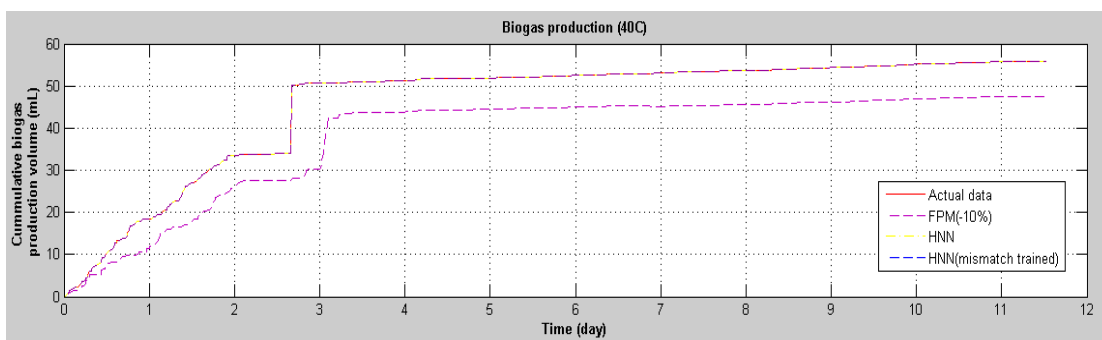
ชนิดของค่างาน	ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทดสอบประสิทธิภาพ (มิลลิลิตร ²)
ค่างานนิวัตต์แบบไฮบริด (ได้รับการฝึกสอนที่สภาวะปกติเพียงอย่างเดียว)	7.03×10^{-12}
ค่างานนิวัตต์แบบไฮบริด (ได้รับการฝึกสอนทั้งสองแบบ)	4.71×10^{-13}

การเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมในกรณีเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ลดลง 10%

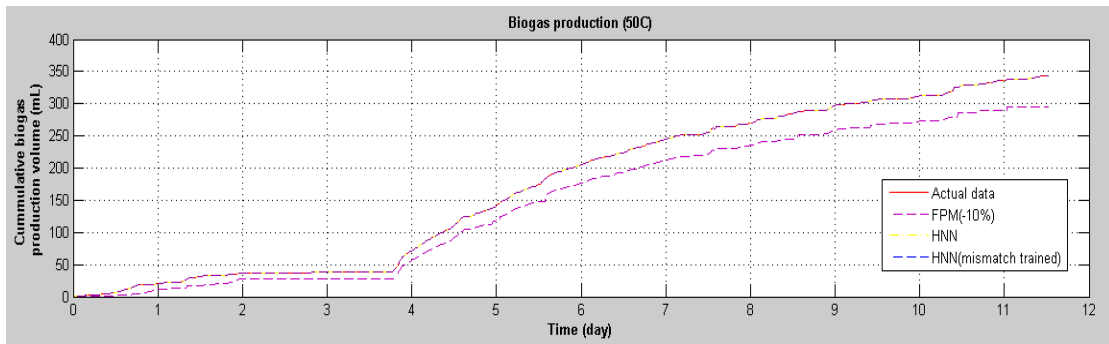
ทดสอบประสิทธิภาพของค่างานนิวัตต์แบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด โดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบประสิทธิภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าลดลงจากเดิม 10% โดยผลการจำลองแสดงดังภาพที่ 4-37 ถึง 4-39



ภาพที่ 4-37 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าลดลงจากเดิม 10% ด้วยข่ายงานนิเวศแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้อง)



ภาพที่ 4-38 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าลดลงจากเดิม 10% ด้วยข่ายงานนิเวศแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อุณหภูมิการหมัก 39-42 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 4-39 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าลดลงจากเดิม 10% ด้วยข่ายงานนิเวศแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (อนุกรมการหมัก 46-58 องศาเซลเซียส)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายของข่ายงานนิเวศแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด สามารถทำได้โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการทำนายด้วยข่ายงานทั้งสองแบบ ซึ่งข่ายงานที่สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้มีความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุดคือ ข่ายงานที่ให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด ซึ่งพบว่า ข่ายงานที่สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าลดลงจากเดิม 10% ได้ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุดคือ ข่ายงานนิเวศแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการทั้งในกรณีสภาวะปกติและกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด โดยมีโครงสร้าง [7-5-4-1] ซึ่งมีค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทดสอบประสิทธิภาพเท่ากับ 4.10×10^{-13} มิลลิลิตร² ดังตารางที่ 4-6 โดยในกรณีนี้ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองของกระบวนการของข่ายงานนิเวศแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลทั้งสองกรณีนั้น มีประสิทธิภาพการทำนายที่ดีกว่าเนื่องจากข่ายงานได้รับการฝึกสอนมาก่อน จึงทำให้มีค่าน้ำหนักจากการเรียนรู้ที่เหมาะสมและสามารถทำนายผลตอบสนองของกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

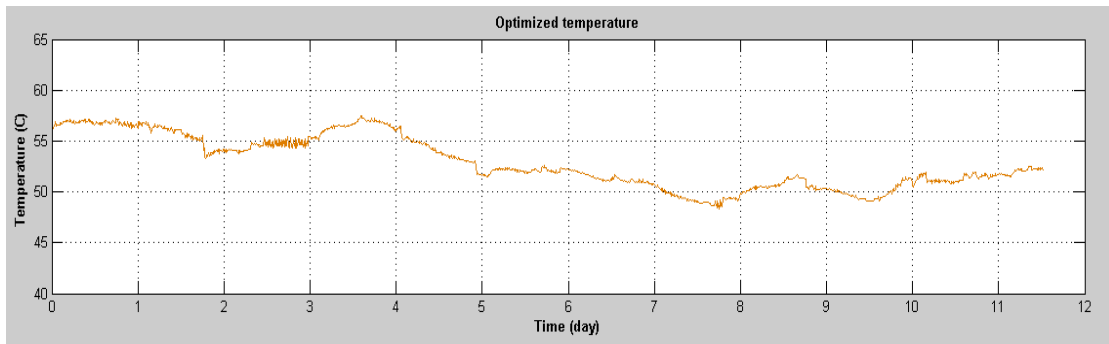
ตารางที่ 4-6 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการทำนายค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสม ด้วยข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ลดลงจากเดิม 10%)

ชนิดของข่ายงาน	ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทดสอบประสิทธิภาพ (มิลลิตร ²)
ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด (ได้รับการฝึกสอนที่สภาวะปกติเพียงอย่างเดียว)	6.91×10^{-12}
ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด (ได้รับการฝึกสอนทั้งสองแบบ)	4.10×10^{-13}

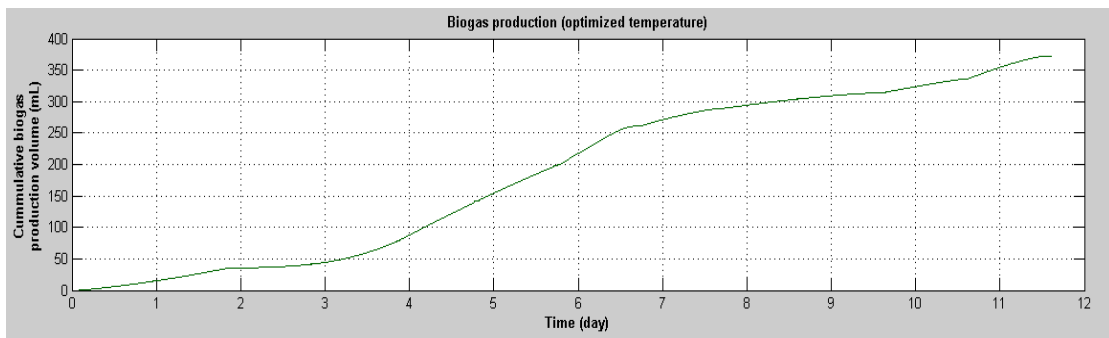
จากการจำลองกระบวนการกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาดจะเห็นได้ว่า ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลทั้งในกรณีสภาวะปกติและกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาดนั้น สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้อย่างถูกต้อง แม่นยำและมีประสิทธิภาพ ดังนั้นข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดนี้จึงสามารถนำมาใช้เป็นแบบจำลองของกระบวนการได้

ผลการอพติไมซ์กระบวนการโดยใช้ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

การอพติไมซ์กระบวนการ โดยใช้ข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดเพื่อหาโปรไฟล์อุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้โดยใช้อัลกอริธึมสำเร็จรูปในโปรแกรมช่วยจำลอง ซึ่งมีรากฐานมาจากอัลกอริธึมมาตรฐานที่เรียกว่า Sequential quadratic programming (SQP) โดยการหาค่าอุณหภูมิที่ทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าสูงสุดนั้น ได้ผลการจำลองดังนี้



ภาพที่ 4-40 โปรไฟล์อุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการซึ่งได้จากการออปติไมซ์กระบวนการ โดยใช้ข่างานนิ่วรลแบบไฮบริด



ภาพที่ 4-41 ผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อดำเนินกระบวนการตามโปรไฟล์อุณหภูมิที่ได้จากการออปติไมซ์กระบวนการ โดยใช้ข่างานนิ่วรลแบบไฮบริด

จากการออปติไมซ์กระบวนการ โดยใช้ข่างานนิ่วรลแบบไฮบริดของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจน ได้โปรไฟล์อุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการแสดงดังภาพที่ 4-40 โดยในระยะเวลา 12 วัน อุณหภูมิที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 48.72-57.53 องศาเซลเซียส และจากผลการจำลองปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่ทำนายได้แสดงดังภาพที่ 4-41 พบว่า เมื่อดำเนินกระบวนการตามโปรไฟล์อุณหภูมิที่เหมาะสมนี้ ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมตลอด 12 วัน จะมีค่าเท่ากับ 371.80 มิลลิลิตร เฉลี่ยได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 30.98 มิลลิลิตร/วัน ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากปริมาณที่เกิดขึ้นจากการทดลองถึง 8.06% เมื่อเทียบกับปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่อุณหภูมิการหมักในช่วง 46-58 องศาเซลเซียส ดังนั้นเพื่อเพิ่มศักยภาพให้ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดจึงควรดำเนินกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบ

ไม่ใช่แสงและออกซิเจนตามโปรไฟล์อุณหภูมิที่ได้จากการออฟติไมซ์กระบวนการโดยใช้ข่างาน
นิวัตแบบไฮบริด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและดำเนินการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนในถังหมักแบบกะ (Batch reactor) เพื่อบันทึกข้อมูลของกระบวนการเป็นเวลา 12 วัน ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ช่วง ได้แก่ อุณหภูมิห้อง (26-33 องศาเซลเซียส) 39-42 องศาเซลเซียส และ 46-58 องศาเซลเซียสนั้น ผลการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

1. ผลการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ตลอดการทดลอง 12 วัน เท่ากับ 34.46 มิลลิลิตร เฉลี่ยได้ อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 2.87 มิลลิลิตร/วัน ซึ่งมีปริมาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการหมักที่อุณหภูมิ 40 และ 46-58 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพภูมิอากาศของแต่ละวัน โดยอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 30.20 องศาเซลเซียส และตลอดการทดลอง 12 วัน อุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 26.65-32.59 องศาเซลเซียส ค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 6.99 และตลอดการทดลอง 12 วัน ค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 6.99-7.00

2. ผลการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักที่อุณหภูมิ 39-42 องศาเซลเซียส

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ตลอดการทดลอง 12 วัน เท่ากับ 55.95 มิลลิลิตร เฉลี่ยได้ อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 4.66 มิลลิลิตร/วัน อุณหภูมิเฉลี่ยของตะกอนเลนภายในถังหมักมีค่าเท่ากับ 40.63 องศาเซลเซียส และตลอดการทดลอง 12 วัน อุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 39.89-41.70 องศาเซลเซียส ค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 6.99 และตลอดการทดลอง 12 วัน ค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 3.75-8.11

3. ผลการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักที่อุณหภูมิ 46-58 องศาเซลเซียส

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ตลอดการทดลอง 12 วัน เท่ากับ 344.07 มิลลิลิตร เฉลี่ยได้ อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 28.67 มิลลิลิตร/วัน ซึ่งมีปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับการหมักที่อุณหภูมิห้อง และ 39-42 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเฉลี่ยของตะกอนเลนภายในถังหมักมีค่าเท่ากับ 52.24 องศาเซลเซียส และตลอดการทดลอง 12 วัน อุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักมีค่า

อยู่ในช่วงระหว่าง 46.74-57.17 องศาเซลเซียส ค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 7.00 และตลอดการทดลอง 12 วัน ค่า pH ของตะกอนเลนภายในถังหมักมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 6.95-7.09

สรุปผลการจำลองกระบวนการ

จากการจำลองกระบวนการเพื่อหาแบบจำลองข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนนั้น ผลการจำลองกระบวนการมีดังนี้

1. จำลองกระบวนการโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

จากการจำลองกระบวนการ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่อุณหภูมิการหมักแตกต่างกัน 3 ช่วง ได้แก่ อุณหภูมิห้อง (26-33 องศาเซลเซียส) 39-42 องศาเซลเซียส และ 46-58 องศาเซลเซียส สามารถจำลองพฤติกรรมของกระบวนการที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมกับเวลาได้ โดยผลการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการทดลองตามสถานะจริง เนื่องจากกระบวนการมีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับสภาวะแวดล้อมหลายปัจจัยซึ่งต่างส่งผลกระทบต่อซึ่งกันและกัน ดังนั้นผลการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎีของกระบวนการจึงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

2. สร้างชุดข้อมูลฝึกสอน ทดสอบ และทดสอบประสิทธิภาพของข่ายงานนิวรัลและข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริด

สร้างชุดข้อมูลของข่ายงานนิวรัลโดยกำหนดให้ค่าอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมัก ค่า pH และ ค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเป็นข้อมูลป้อนเข้าของนิวรัลและค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเป็นข้อมูลส่งออกจากนิวรัล สร้างชุดข้อมูลของข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดโดยกำหนดให้ค่า pH และค่าอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมักเป็นข้อมูลป้อนเข้าของวิธีการสมการอย่างง่ายและค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเป็นข้อมูลส่งออกจากวิธีการสมการอย่างง่าย จากนั้นกำหนดให้ค่าอุณหภูมิของตะกอนเลนภายในถังหมัก ค่า pH และค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมเป็นข้อมูลป้อนเข้าของนิวรัลและค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมจากการทำนายด้วยวิธีการสมการอย่างง่ายเป็นข้อมูลส่งออกจากนิวรัล

3. หาโครงสร้างของข่ายงานนิวัลและข่ายงานนิวัลแบบไฮบริดที่เหมาะสมที่สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

งานวิจัยนี้ได้สร้างข่ายงานนิวัลและข่ายงานนิวัลแบบไฮบริด แบบแพร่ไปข้างหน้าและกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของโหนดในชั้นซ่อนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนแบบซิกมอยด์ กำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของโหนดในชั้นข้อมูลส่งออกด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้นและกำหนดฝึกสอนข่ายนี้ด้วยวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ซึ่งโครงสร้างของข่ายงานนิวัลและข่ายงานนิวัลแบบไฮบริดที่สามารถทำนายค่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสม กับเวลา ได้ดีที่สุด คือ โครงสร้าง [7-5-4-1] ซึ่งมีชั้นซ่อน 2 ชั้น โดยกำหนดให้มีโหนดแอบแฝงเท่ากับ 5 และ 4 โหนด ตามลำดับ

4. การเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่ทำนายได้จากข่ายงานนิวัลและข่ายงานนิวัลแบบไฮบริด พบว่า ข่ายงานที่สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการที่สภาวะปกติได้ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด คือ ข่ายงานนิวัลแบบไฮบริดที่มีโครงสร้าง [7-5-4-1] เนื่องจากมีค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจากการทดสอบประสิทธิภาพน้อยที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 3.16×10^{-13} มิลลิลิตร² เมื่อเทียบกับกระบวนการจริง

5. การจำลองกระบวนการเมื่อแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด (Model/ Parameter mismatch) โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงจากเดิม 10%

เปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมระหว่างข่ายงานนิวัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนและไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด ซึ่งพบว่า ผลการทำนายกระบวนการที่สภาวะปกติ ข่ายงานนิวัลแบบไฮบริดที่ไม่ได้รับการฝึกสอนข้อมูลกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด แต่ได้รับการฝึกสอนในกรณีสภาวะปกติเพียงอย่างเดียวเท่านั้นสามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด สำหรับการทำนายกระบวนการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (k_2) เพิ่มขึ้นและลดลงจากเดิม 10% พบว่า ข่ายงานนิวัลแบบไฮบริดที่ได้รับการฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลผลการตอบสนองของกระบวนการทั้งในกรณีสภาวะปกติและกรณีแบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ผิดพลาดสามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด

6. ผลการออฟติไมซ์กระบวนการโดยใช้ข่ายงานนิวัลแบบไฮบริด ทำให้ได้โปรไฟล์อุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 48.72-57.53 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมตลอด 12 วัน มีค่าเท่ากับ 371.80 มิลลิลิตร หรือเฉลี่ยได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ

เท่ากับ 30.98 มิลลิลิตร/วัน ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นถึง 8.06% เมื่อเทียบกับปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ สะสมจากการทดลองที่อุณหภูมิการหมัก 46-58 องศาเซลเซียส

ข้อเสนอแนะ

1. การสร้างขำงานนิวัตแบบไฮบริดในโครงการนี้ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบซิกมอยด์ ในโหนดแอบแฝงและใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้นในชั้นของข้อมูลส่งออกและกำหนดให้ฝึกสอนขำด้วยวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ซึ่งเป็นชนิดที่มีการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ ซึ่งในการสร้างขำงานนิวัตแบบไฮบริดสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน หรือของการเรียนรู้ของ ขำที่ต่างออกไปได้
2. การกำหนดโครงสร้างในโครงการนี้ กำหนดให้มีชั้นซ่อน 2 ชั้น และมีโหนดแอบแฝง เท่ากับ 5 และ 4 โหนด ตามลำดับ โดยโครงสร้างนี้ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ซึ่งในการจำลองสามารถ กำหนดจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนโหนดในชั้นซ่อนให้ต่างออกไปได้ เพื่อให้เหมาะสมกับ กระบวนการและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายให้ดียิ่งขึ้น
3. ในการฝึกสอนขำงานนิวัตและขำงานนิวัตแบบไฮบริด การกำหนดข้อมูล ป้อนเข้าและข้อมูลส่งออกของขำงานนั้นพิจารณาเลือกจากตัวแปรที่มีความสำคัญซึ่งจะส่งผล กระทบต่อกระบวนการเป็นอย่างมาก โดยการกำหนดจำนวนและชนิดตัวแปรของข้อมูลป้อนเข้า และข้อมูลส่งออกสามารถเลือกใช้ให้แตกต่างออกไปได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนรู้ของ ขำงาน
4. การออฟติไมซ์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงและออกซิเจนโดยใช้ขำงานนิวัตแบบไฮบริดในงานวิจัยนี้ เทคนิคที่ ถูกนำมาใช้สำหรับแก้ปัญหาการออฟติไมซ์ คือ Sequential quadratic programming (SQP) ซึ่งใน การแก้ไขปัญหาการออฟติไมซ์นั้นมีหลายวิธี จึงสามารถเลือกใช้เทคนิคหรืออัลกอริธึมอื่น ๆ ในการแก้ไขปัญหาได้

บรรณานุกรม

- กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2556). *สถิติการประมง*. เข้าถึงได้จาก <http://www.fisheries.go.th/fish/web1/hotnews.php>
- คณิต ไชยาคา และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร (2537). ผลกระทบของน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ. *เอกสารวิชาการสถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัดสงขลา, สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง, กรมประมง, ฉบับที่ 7*. เข้าถึงได้จาก <http://www.nicaonline.com/web/index.php>
- จิรวัดน์ ชาลีวรรณ. (2546). *ผลของระยะเวลาเก็บกักต่อการเกิดก๊าซชีวภาพในการหมักแบบไร้ออกซิเจนอัตราการย่อยสูงของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋อง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เจนจิรา ศรีสวัสดิ์ และเสาวลักษณ์ ผ่องใส. (2554). *การสร้างแบบจำลองกระบวนการด้วยข่ายงานนิวรัลสำหรับกระบวนการของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- เขาว์ ศรีวิชัย, ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร, คณิต ไชยาคา และดุสิต ต้นวิไลย. (2537). การตรวจและติดตามคุณภาพน้ำและดินจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งกุลาดำ จังหวัดปัตตานี. *เอกสารวิชาการสถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัดสงขลา, สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง, กรมประมง, ฉบับที่ 5*. เข้าถึงได้จาก <http://www.nicaonline.com/web/index.php>
- ธนาวุฒิ ประกอบผล. (2552). *โครงข่ายประสาทเทียม*. *วารสาร มจร วิชาการ*, 12(24), 72–87.
- นาถฤดี รวมทวี และมลฤดี สัตยชานุกูล. (2556). *การสร้างแบบจำลองข่ายงานนิวรัลแบบไฮบริดสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ประสิทธิ์ ศรีนคร. (2555). *การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- ประสิทธิ์ ศรีนคร, ขวัญตา ตันติกำธน, อรรถวิโรจน์ เขียวนาค, จิระพล ศรีเสริญผล และกนต์ธร
 ชำนิประศาสตร์. (2554). การบำบัดตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลโดยกระบวนการย่อย
 สลายแบบไร้ออกซิเจน. *วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม*, 7(2), 10–21.
- สมศักดิ์ มณีพงษ์, ประวิทย์ โทวัฒน์ และพิภพ ปราบณรงค์. (2535). ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจาก
 การทำนาุ้งที่อำเภอระโนด จังหวัดสงขลา. ใน *เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องการ
 อนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย ครั้งที่ 3* (หน้า 561–565).
 กรุงเทพฯ: ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์.
- สมใจ ศิริโชค. (2547). *จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม*. กรุงเทพฯ: ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.
- สิริ เอกมหาราช, ก่อเกียรติ กุลแก้ว, พุทธ ส่องแสงจินดา, จุลรัตน์ พรหมสุด, นิคม ละอองศิริวงศ์
 และวลีรัตน์ มุสิกะสังข์. (2548). การศึกษาน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลเพื่อประเมินผล
 กระทบต่อระบบนิเวศในทะเลสาบสงขลา. *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการประมง
 ประจำปี 2548 กรมประมง 12-13 กรกฎาคม 2548* (หน้า 78–79). กรุงเทพฯ: โรงแรม
 เอเชีย แอร์พอร์ต.
- สุรพล สุวคนธ์. (2526). *การปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพในห้องปฏิบัติการ*. วิทยานิพนธ์วิทยา
 ศาตรมหาบัณฑิต, สาขาการสอนเคมี, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อรรถวิโรจน์ เขียวนาค. (2553). *แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยวิธีการระบุเอกลักษณ์*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Bastin, G. & Dochain, D. (1991). *On-line estimation and adaptive control of bioreactors*.
 Amsterdam and New York: Elsevier Science.
- Boggs, P.T. & Tolle, J.W. (2000). Sequential quadratic programming for large-scale nonlinear
 optimization. *J Comput Appl Math*, 124, 123–137.
- Chaea, K.J., Janga, A., Yimb, S.K. & Kim, I.S. (2008). The effects of digestion temperature and
 temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of
 swine manure. *Bioresource Technol*, 99, 1–6.
- Daosud, W., Jariyaboon, K., Kittisupakorn, P. & Hussain M.A. (2016). Neural network based
 model predictive control of batch extractive distillation process for improving purity of
 acetone. *EJ*, 20, 47–59.

- Daosud, W., Thitiyasook, P., Arpornwichanop, A., Kittisupakorn P. & Hussain M.A. (2016). Neural network inverse model-based controller for the control of a steel pickling process. *Comput Chem Eng*, 20, 47–59.
- Dayhoff, J.E. (1990). *Neural network architectures: An introduction*. Newyork: Van Nostrand Reinhold.
- Gavala, H.N., Yenal, U., Skiadas, L.V., Westermann, P. & Ahring, B.K. (2003). Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water Res*, 37, 4561–4572.
- Husain, A. (1998). Mathematical models of the kinetics of anaerobic digestion - a selected review. *Biomass Bioenerg*, 14(5/6), 561–571.
- Hussain, M.A. & Kershenbaum, L.S. (2000). Implementation of an inverse-model-based control strategy using neural networks on a partially simulated exothermic reactor. *ICHEME J*, 78(2), 299–311.
- Hussain, M.A., Ng, C.W., Aziz, N. & Mujtaba, I.M. (2002). Neural network techniques and application in chemical process control systems. In *Intelligent Systems Techniques and Application, V*. New Jersey: CRC Press LLC.
- Kim, M., Ahn, Y. & Speece, R. E. (2001). Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic. *Institute of Water Research*, 36, 4369–4385.
- Kittisupakorn, P., Charoennyom, T. & Daosud W. (2014). Hybrid neural network controller design for a batch reactor to produce methyl methacrylate. *EJ*, 18, 145–162.
- Kittisupakorn, P., Thitiyasook, P., Hussain, M.A. & Daosud W. (2009). Neural network based model predictive control for a steel pickling process. *J Process Contr*, 19, 579–590.
- Kurt, M. & Marce, I R. (1998). Intelligent modeling in the chemical process industry with neural networks: a case study. *Comput Chem Eng*, 22, 587–593.
- Ma, J., Yu, L., Frear, C., Zhao, Q., Li, X. & Chen, S. (2013). Kinetics of psychrophilic anaerobic sequencing batch reactor treating flushed dairy manure. *Bioresource Technol*, 131, 6–12.
- McCulloch, W.S. & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 115–133.

- Monod, J. (1942). *Recherches sur la croissance des cultures bactériennes*. Paris: Hermann & Cie.
- Naveen, V., Bhat, P., Minderman, A., Thomas, Jr.Mc. & Nam Sun Wang. (1990). Modeling chemical process system via neural computation. *IEEE Control Systems Magazine*, 10(3), 24–30.
- Ng C.W. & Hussain M.A. (2004). Hybrid neural network-prior knowledge model in temperature control of a semi-batch polymerization process. *Chem Eng Process*, 43, 559–570.
- Nikraves, M., Farrell, A.E. & Stanford, T.G. (2000). Control of nonisothermal CSTR with time varying parameters via dynamic neural network control (DNNC). *Chem Eng J*, 76(1), 1–16.
- Paengjuntuek, W., Thanasinthana, L. & Arpornwichanop, A. (2012). Neural network-based optimal control of a batch crystallizer. *Neurocomputing*, 83, 158–164.
- Paez-osuna, F., Guerro-galvan, S. R. & Ruiz-fernandez, A. C. (1998). The environmental impact of shrimp aquaculture and the coastal pollution in Mexico. *Mar Pollut Bull*, 36(1), 65–75.
- Parker, D.B. (1982). *Learning logic*. Invention report S81-64, File1, Office of Technology Licensing, Stanford University.
- Qi, H., Zhou, X.G., Liu, L.H. & Yuan, W.K. (1999). A hybrid neural network-first principles model for fixed-bed reactor. *Chem Eng Sci*, 54, 2521–2526.
- Rosenblatt, F. (1962). *Principles of neurodynamics: Perceptrons and the theory of brain mechanisms*. Washington: Spartan Book.
- Rozzi, A. (1984). Modeling and control of anaerobic digestion processes. *Trans Inst Meas Control*, 6, 153–159.
- Rumelhart, D.E. & McClelland, J.L. (1986). *Parallel distributed processing: Exploration in the microstructure of cognition*. Cambridge, MA: MIT Press/Bradford Books.
- Simeonov, I. & Stoyanov, S. (2003). Modelling and dynamic compensator control of the anaerobic digestion of organic wastes. *Chemical and Biochemical Engineering*, 17(4), 285–292.
- Srisertpol, J., Srinakorn, P., Kheawnak, A. & Chamniprasart, K. (2010). Mathematical modeling and parameters estimation of an anaerobic digestion of shrimp of culture pond sediment in a biogas process. *Int J Energ Environ*, 4, 213–220.

- Topiwala, H. & Sinclair, C.G. (1971). Temperature relationship in continuous culture. *Biotechnol Bioeng*, 13(6), 795–813.
- Tsen, Y-D.A., Shi, S.H. & David, S.H.W. (1996). Predictive control of quality in batch polymerization using hybrid ANN models. *AIChE J*, 42, 455–465.
- Vindis, P., Mursec, B. & Janzekovic, M. (2009). The impact of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion on biogas production. *Mater Manuf Process*, 36, 192–198.
- Ward, A.J., Hobbs, P.J., Holliman, P.J. & Jones, D.L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technol*, 99, 7928–7940.
- Werbos, P.J. (1974). *Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences*. Doctoral dissertation, Harvard University.
- Zhang, L. & Wu, M.C. (2006). Influence of temperature on performance of anaerobic digestion of municipal solid waste. *J Environ Sci*, 18, 810–816.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์และคำย่อ	คำจำกัดความ
t	เวลา (min)
V	ปริมาณอาหารเลี้ยงเชื้อ (l)
X	ความเข้มข้นของแบคทีเรียในระบบ (g/l)
S	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในระบบ (g/l)
S_m	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ไหลเข้า (g/l)
F_{in}	อัตราการไหลเข้า (l/min)
F_{out}	อัตราการไหลออก (l/min)
k_1	ค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายสารอินทรีย์
μ	อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (min^{-1})
D	อัตราการเจือจาง (min^{-1})
P	ความเข้มข้นของสารสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว (l)
Q	อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ก๊าซชีวภาพ (l/min)
U	อัตราการสร้างผลิตภัณฑ์ ($\text{l}^2/\text{g}\cdot\text{min}$)
k_2	ค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ (l^2/g)
pH	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
T	ค่าอุณหภูมิในระบบ (K)
μ_{max}	อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสูงสุด (min^{-1})
k_s, k_Q	ค่าสัมประสิทธิ์ (g/l)
$k_{(s)}, k_{(Q)}$	ค่าคงที่
a, b, c	ค่าคงที่
a_1, a_2, a_3	ค่าคงที่
E_1, E_2	ค่าพลังงานของก๊าซ (J/mol)
R	ค่าคงที่ของก๊าซ (J/mol.k)

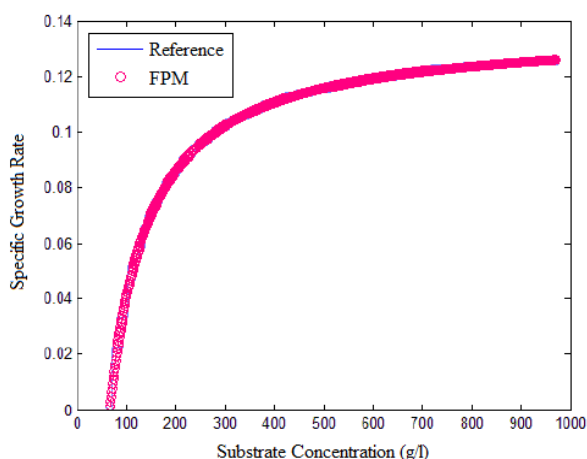
ภาคผนวก ข

การตรวจสอบความถูกต้องของหลักการสมการอย่างง่าย (First principle model, FPM)

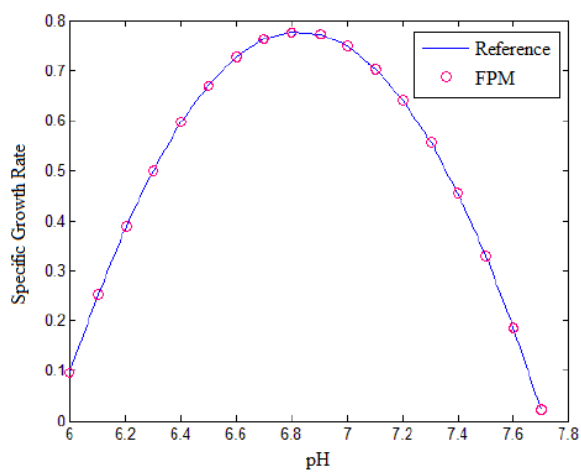
การตรวจสอบความถูกต้องของหลักการสมการอย่างง่าย (First principle model, FPM)

หลักการสมการอย่างง่าย (First principle model, FPM) สามารถหาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เคยมีผู้ศึกษาไว้แล้ว โดยเกิดจากการทำสมดุลมวลสารโดยใช้หลักการพื้นฐานของกฎอนุรักษ์มวล ดังสมการที่ (2-2) ถึง (2-16) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมาใช้ร่วมกับข่างานนิเวศในการสร้างข่างานนิเวศแบบไฮบริด โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นำมาจากประสิทธิ์ ศรีนคร (2555) ซึ่งได้ทำการศึกษาการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งในถังหมักแบบกะและประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองโดยใช้การค้นหาค่าตอบด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมไว้แล้ว

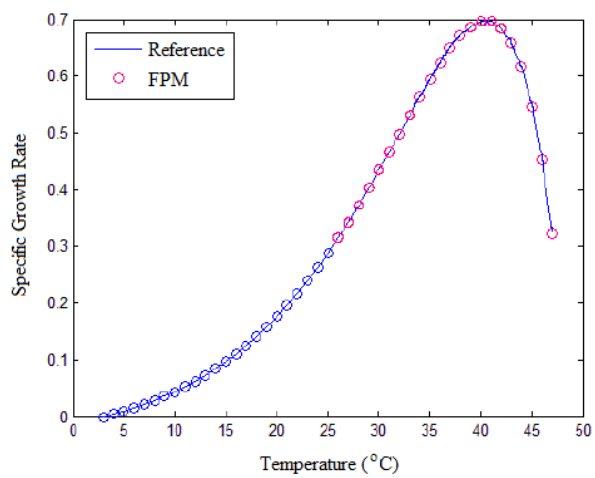
เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ จึงได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยของประสิทธิ์ ศรีนคร (2555) และทำการแสดงค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวเปรียบเทียบกับผลของงานวิจัยที่อ้างอิง ดังภาพที่ ข-1 ถึง ข-4 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ทำการเปรียบเทียบนั้น ได้แก่ อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ($\mu(S)$) อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่าง ($\mu(pH)$) อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ($\mu(T)$) และอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ขึ้นอยู่กับปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ ($\mu(Q)$)



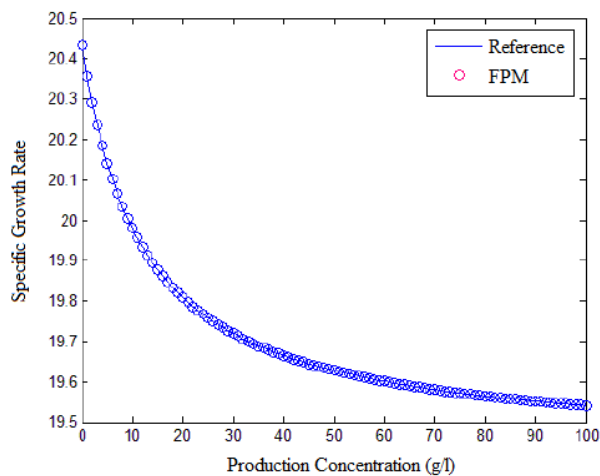
ภาพภาคผนวกที่ ข-1 อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ($\mu(S)$)



ภาพภาคผนวกที่ ข-2 อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่าง ($\mu(\text{pH})$)



ภาพภาคผนวกที่ ข-3 อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ($\mu(\text{T})$)



ภาพภาคผนวกที่ ข-4 อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ขึ้นอยู่กับปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ ($\mu(Q)$)

จากผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลของงานวิจัยที่อ้างอิง พบว่า เส้นผลการตอบสนองของค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แบบสนิทกับผลการตอบสนองของงานวิจัยที่อ้างอิง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้ถูกต้องเหมือนกับผลการตอบสนองของงานวิจัยที่อ้างอิง ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้เป็นแบบจำลองของกระบวนการได้