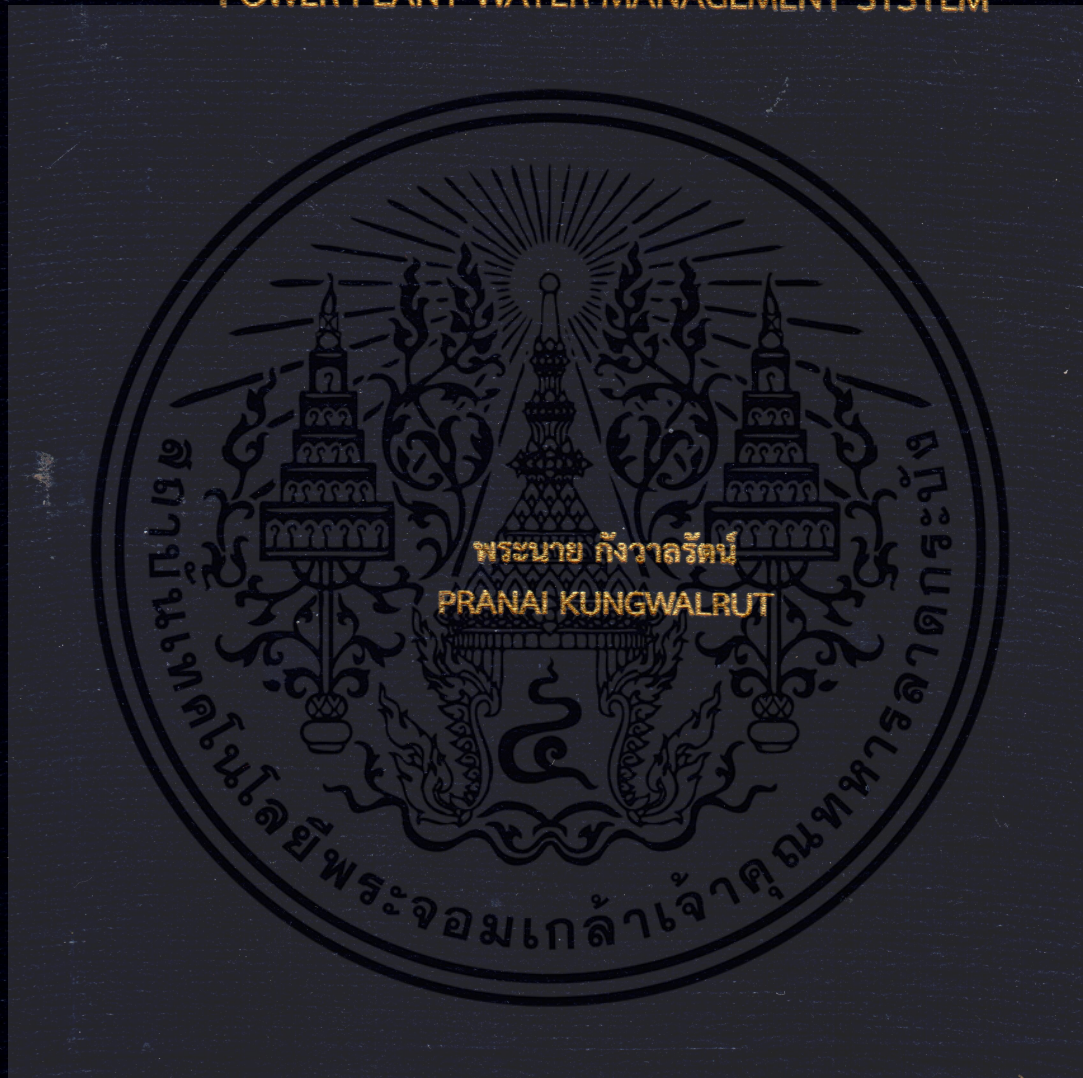


เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับระบบบริหารน้ำในโรงไฟฟ้า  
ขนาดเล็กมากอย่างยั่งยืน

INTERNET OF THING TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE VERY SMALL  
POWER PLANT WATER MANAGEMENT SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-D-018-070

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับระบบบริหารน้ำในโรงไฟฟ้า  
ขนาดเล็กมากอย่างยั่งยืน

INTERNET OF THING TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE VERY SMALL  
POWER PLANT WATER MANAGEMENT SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-D-018-070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTERNET OF THING TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE VERY SMALL  
POWER PLANT WATER MANAGEMENT SYSTEM



PRANAI KUNGWALRUT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING PROGRAM IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2018  
KMITL-2018-EN-D-018-070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2018**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับระบบบริหารน้ำในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมาก  
อย่างยั่งยืน

Thesis Title Internet of Thing Technology for Sustainable Very Small Power Plant Water  
Management System

นักศึกษา นายพระนาย กังวาลรัตน์

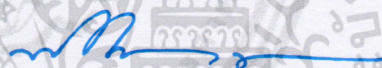
รหัสประจำตัว 55610129

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

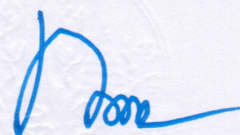
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-D-018-070

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จิระศักดิ์	ชาญวุฒิศรรม	
รศ.ดร.ทวีพล	ชื่อสัตย์	
รศ.ดร.พิสิฐ	บุญศรีเมือง	
รศ.ดร.วิศรุต	ศรীরัตนะ	
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 10.00-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-305 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ณ บดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับระบบบริหารน้ำในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมากอย่างยั่งยืน
นักศึกษา	นายพระนาย กังวาลรัตน์
รหัสนักศึกษา	55610129
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับระบบบริหารน้ำในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมากอย่างยั่งยืน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวทางการประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งอย่างเหมาะสมซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานและการบริหารจัดการ ในการวิจัยครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้กับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาด 9.9 เมกะวัตต์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง สถาปัตยกรรมของระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 3 ระดับชั้นทางกายภาพ ระดับชั้นที่ 1 เป็นอุปกรณ์ทางกายภาพ เช่น อุปกรณ์วัดความดัน อุปกรณ์วัดอัตราการไหล ตัวตรวจวัดพีเอช (pH) บั๊มน้ำ และวาล์ว ซึ่งมีหน้าที่ในการตรวจวัดข้อมูลทางกายภาพและทำการโต้ตอบกับกระบวนการ ระดับชั้นที่ 2 เอดจ์คอมพิวเตอร์ (Edge Computing) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม เซิร์ฟเวอร์ฝั่งตัว หน่วยจัดเก็บข้อมูล เกตเวย์และสวิตช์ เพื่อควบคุมการปฏิบัติงานทั้งหมดภายในเครือข่าย ระดับชั้นที่ 3 เป็นระบบคลาวด์ซึ่งสนับสนุนแอปพลิเคชันสำหรับข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น การติดตามกระบวนการทำงาน การวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการบำรุงรักษา ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอต่อความสามารถในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเพื่อการผลิตในโรงไฟฟ้าชีวมวล การควบคุมการดันของเมมเบรนแบบปรับตัวได้ สามารถควบคุมคุณภาพการผลิตน้ำบริสุทธิ์และเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาแม้ในระหว่างการผันผวนของคุณภาพน้ำดิบ นอกจากนี้การวิเคราะห์ข้อมูลในระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ยังสะท้อนให้เห็นถึงความต้องการน้ำสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวลในสภาพแวดล้อมตามฤดูกาล ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาสำหรับการวางแผนทรัพยากรน้ำอย่างยั่งยืนสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า

<b>Thesis Title</b>	Internet of Thing Technology for Sustainable Very Small Power Plant Water Management System
<b>Student</b>	Mr. Pranai Kungwalrut
<b>Student ID.</b>	55610129
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2018
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Vittaya Tipsuwanporn

### ABSTRACT

This thesis presents the Internet of Thing technology for sustainable very small power plant water management with the aim of developing the suitable IoT solution which enables the improvement of operational efficiency. In this research, a 9.9 MW biomass power plant is implemented to investigate the performance of IoT system. The architecture of the proposed system consists of three physical tiers. The first tier is a tier of physical devices such as pressure, flow, pH sensors, water pumps and valves that are responsible for detecting the physical data and interacting with the plant operation. The second tier is an edge computing device which functions as a controller, embedded server, data storage, gateway and switch to manage all operational tasks in an intranet area. The third tier is a cloud computing system which enables big data applications such as online monitoring and visualization of process operation, analytics to optimize the operation and maintenance. The results validate the effectiveness of the proposed system as the ability of the improvement of operational efficiency of water treatment system in a biomass power plant. Significantly, the ability of an adaptive fouling control achieves the target of purified water quality even during the fluctuation of raw water qualities. Furthermore, the data analytics in IoT system reflects current operational requirements of water under local environmental conditions, likewise contribute to the practical solution for sustainable water resource planning in the energy production.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.ดร. วิทยา ทิพย์สุวรรณพร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือ ในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และ ถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พระนาย กังวารรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.2 โรงไฟฟ้าชีวมวล.....	10
2.3 โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ.....	15
2.4 โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	19
2.5 สรุปท้ายบท.....	22
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	23
3.1 ตัวตรวจวัด .....	23
3.2 เอดจ์คอมพิวเตอร์ (Edge Computing).....	30
3.3 ระบบคลาวด์.....	46
3.4 เทคโนโลยีการผลิตน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล.....	53
3.5 สรุปท้ายบท.....	56
บทที่ 4 การออกแบบและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง.....	57
4.1 เทคโนโลยีล้ำยุคสำหรับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง.....	58

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การประยุกต์เพื่อบริหารจัดการโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนขนาดเล็กมาก.....	67
4.3 ระบบการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ (Cloud Computing Platform).....	74
4.4 สรุปท้ายบท.....	79
บทที่ 5 การทดลองและการอภิปรายผล.....	80
5.1 การปรับปรุงประสิทธิภาพระบบบริหารจัดการน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มาก.....	80
5.2 การอภิปรายผลการทดลอง.....	86
5.3 สรุปท้ายบท.....	90
บทที่ 6 บทสรุป.....	91
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	91
6.2 ปัญหาอุปสรรคและข้อเสนอแนะ.....	92
6.3 งานวิจัยในอนาคต.....	92
เอกสารอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติ WAGO PLC PFC200.....	31
5.1 คุณสมบัติโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก.....	81
5.2 คุณสมบัติของน้ำในกระบวนการ.....	82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลำดับวิวัฒนาการสำหรับอุตสาหกรรม.....	1
1.2 แผนการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานทางเลือก ปี พ.ศ. 2558-2579 โดยกระทรวงพลังงาน.....	2
1.3 เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง.....	3
2.1 เป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนในปี 2579 และผลการดำเนินงานด้านพลังงานทดแทน ไตรมาสที่ 1 ปี 2561.....	5
2.2 เป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนในปี 2579 ตามแผน AEDP 2015.....	6
2.3 สถานการณ์พลังงานทดแทนของประเทศไทย ไตรมาสที่ 1/2561.....	7
2.4 อัตราการรับซื้อไฟฟ้าแบบ Feed-in Tariff สำหรับ VSPP กลุ่มพลังงานธรรมชาติ.....	7
2.5 อัตราการรับซื้อไฟฟ้าแบบ Feed-in Tariff สำหรับ VSPP กลุ่มพลังงานชีวภาพ.....	8
2.6 วิธีการคำนวณราคาการรับซื้อไฟฟ้าแบบ Feed-in Tariff.....	8
2.7 วิธีการคำนวณราคาการรับซื้อไฟฟ้าแบบ Competitive Bidding.....	8
2.8 ไดอะแกรมกระบวนการทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล.....	11
2.9 โรงไฟฟ้าชีวมวล.....	12
2.10 ภาพถ่ายมุมมองสูงสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล.....	12
2.11 กระบวนการส่งจ่ายเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล.....	13
2.12 ไดอะแกรมระบบบำบัดน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล.....	13
2.13 การควบคุม Speed และ Load สำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล.....	14
2.14 การควบคุมกระบวนการโรงไฟฟ้าชีวมวล.....	14
2.15 คุณสมบัติ โรงไฟฟ้าชีวมวล.....	15
2.16 Anaerobic Contact: AC.....	16
2.17 Anaerobic Filter: AF.....	16
2.18 โรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ.....	17
2.19 ไดอะแกรมโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ.....	18
2.20 ภาพมุมมองสูงสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ.....	18
2.21 การควบคุมโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ.....	19
2.22 โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	20
2.23 ไดอะแกรมโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	20
2.24 การควบคุมโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	21
2.25 ผลการผลิตกระแสไฟฟ้าโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	21
3.1 ตัวตรวจวัดค่าพีเอช (pH) สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ.....	23
3.2 ตัวควบคุมค่าพีเอช (pH) สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ.....	23
3.3 ตัวตรวจวัดค่าความขุ่น (Turbidity) สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ.....	24

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 ตัวตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าหรือทีดีเอสสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ.....	24
3.5 ตัวควบคุมค่าความนำไฟฟ้าหรือทีดีเอสสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ.....	25
3.6 ทรานสมิตเตอร์ความดัน (Pressure Transmitter) สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ.....	25
3.7 ตัวตรวจวัดอัตราการไหล (Paddle Wheel Flow Sensor).....	26
3.8 คุณสมบัติที่แตกต่างกันของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ทของสรรพสิ่ง.....	27
3.9 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายสำหรับอินเทอร์เน็ทของสรรพสิ่ง.....	27
3.10 การเปรียบเทียบทางด้านความถี่.....	28
3.11 การเปรียบเทียบทางด้านพลังงาน.....	28
3.12 การเปรียบเทียบโดยรวม.....	28
3.13 สถาปัตยกรรมโครงข่ายอินเทอร์เน็ทของสรรพสิ่งสำหรับอุตสาหกรรม.....	29
3.14 อุปกรณ์โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์วาก์ (WAGO PLC).....	30
3.15 ไดอะแกรม WAGO PLC PFC200.....	31
3.16 โมดูลอนาล็อกอินพุท 4-20mA 4 ชาแนล.....	32
3.17 โมดูลดิจิตอลอินพุท 24V DC 8 ชาแนล.....	32
3.18 โมดูลดิจิตอลเอาต์พุท 24V DC 8 ชาแนล.....	33
3.19 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์โหมด 1 เฟส.....	33
3.20 IEC 61131-3 มาตรฐานชนิดของข้อมูล.....	34
3.21 5 รูปแบบภาษา ตามมาตรฐาน IEC 61131-3.....	35
3.22 ตัวอย่างภาษา Structured Text - ST.....	35
3.23 ตัวอย่างภาษา Ladder Diagram - LD.....	35
3.24 ตัวอย่างภาษา Sequential Function Chart - SFC.....	36
3.25 โครงสร้างของซอฟต์แวร์ตามมาตรฐาน IEC 61131-3.....	36
3.26 โครงสร้างของซอฟต์แวร์มาตรฐาน IEC 61131-3 สำหรับ WAGO PLC PFC200.....	37
3.27 การสร้างพีโอยู (Program Organization Unit).....	37
3.28 ภาพรวมองค์ประกอบโปรแกรมพีแอลซี WAGO PFC200.....	38
3.29 การเพิ่มโมดูลสำหรับโปรแกรมพีแอลซี WAGO PFC200.....	38
3.30 โอเอสไอเลเยอร์ (OSI Layer) และโปรโตคอลมอดบัส (Modbus).....	39
3.31 รูปแบบเฟรมข้อมูลของโปรโตคอลมอดบัส.....	40
3.32 มอดบัส (Master/Slave) สำหรับ WAGO PFC200.....	40
3.33 รหัสฟังก์ชันสำหรับโปรโตคอลมอดบัส.....	41
3.34 ลำดับการประมวลผลอินพุทและเอาต์พุท ของ I/O โมดูล WAGO PFC200.....	41
3.35 รหัสฟังก์ชันสำหรับโปรโตคอลมอดบัส.....	41

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.36 โพรโตคอลเอ็มคิวทีที.....	42
3.37 โครงสร้างข้อความที่ใช้โปรโตคอลเอ็มคิวทีที.....	43
3.38 Control Header.....	43
3.39 Control Message.....	43
3.40 Control Flags.....	43
3.41 ชนิดของข้อความ (Message Type).....	44
3.42 ตัวอย่างข้อความ Connect ที่ใช้โปรโตคอลเอ็มคิวทีที.....	44
3.43 ตัวอย่างระยะเวลาการส่งและเผยแพร่ (Publish) ข้อมูล.....	45
3.44 ภาพรวมการเชื่อมต่อสู่ระบบคลาวด์ โดยโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีของพีแอลซี WAGO.....	45
3.45 คำสั่งการติดต่อกับระบบคลาวด์ โดยโปรโตคอลเอ็มคิวทีที.....	46
3.46 WAGO Cloud Connectivity WBM.....	46
3.47 การเชื่อมต่อ WAGO PLC สู่ระบบคลาวด์ด้วยเอ็มคิวทีที.....	47
3.48 การควบคุมข้อมูลภายใน WAGO คลาวด์.....	48
3.49 การประยุกต์ใช้ WAGO คลาวด์.....	48
3.50 อุปกรณ์ WAGO PFC และระบบคลาวด์ Amazon IoT Core.....	49
3.51 โครงสร้างคลาวด์ Amazon AWS IoT.....	49
3.52 การยืนยันตัวตนและการตรวจสอบสิทธิ์บนแพลตฟอร์ม AWS IoT.....	50
3.53 Rules Engine และการเชื่อมโยงไปสู่บริการอื่นใน AWS.....	51
3.54 เปรียบเทียบคุณสมบัติบริการคลาวด์.....	52
3.55 ไดอะแกรมกระบวนการผลิตน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล.....	53
3.56 เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน.....	54
3.57 กระบวนการกรอง.....	54
3.58 กระบวนการล้างย้อน.....	55
3.59 เมมเบรนรีเวอร์สออสโมซิส.....	55
3.60 โมดูลการกรองอิเล็กทรอนิกส์ไอออนไนเซชัน.....	56
4.1 ภาพรวมอุปกรณ์ที่ใช้ในการประยุกต์ใช้ในงานวิจัย.....	57
4.2 อุปกรณ์สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานวิจัย.....	58
4.3 ไดอะแกรมการเชื่อมต่อระหว่างโมดูล.....	58
4.4 Ethernet Remote Unit และการ์ดอินพุต เอาท์พุต.....	59
4.5 Remote Terminal Unit (Ethernet RTU).....	59
4.6 การ์ดโมดูลอนาล็อกอินพุต.....	60
4.7 การ์ดโมดูลดิจิตอลเอาท์พุต.....	60

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 การ์ดโมดูลดิจิทัลอินพุต.....	61
4.9 การ์ดเชื่อมต่อแบบ RS-485 .....	61
4.10 ภาพโปรแกรมที่ประยุกต์ใช้กับ Remote Terminal Unit (Ethernet RTU).....	62
4.11 เอดจ์คอมพิวเตอร์ WAGO PFC200.....	62
4.12 เราเตอร์ 4G WiFi.....	63
4.13 โปรแกรม E-cockpit ที่ใช้เขียนโปรแกรมในเอดจ์คอมพิวเตอร์.....	63
4.14 การกำหนดค่าฮาร์ดแวร์โดยใช้โปรแกรม E-cockpit.....	64
4.15 การเขียนโปรแกรมในเอดจ์คอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม E-cockpit.....	64
4.16 โปรแกรม E-cockpit สำหรับการเขียน Virtualization.....	65
4.17 การกำหนดค่าผ่าน Web-based Management.....	65
4.18 การกำหนดค่า IoT ไปยังระบบคลาวด์.....	66
4.19 แพลตฟอร์ม WAGO Cloud.....	66
4.20 แพลตฟอร์ม AWS IoT Cloud.....	67
4.21 แผนผังระบบผลิตน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล.....	67
4.22 ไตอะแกรมระบบบำบัดน้ำขั้นเตรียมการ (Pre-treatment) และการกรองแบบอัลตราฟิวเตรชั่น.....	68
4.23 ไตอะแกรมการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse-osmosis).....	68
4.24 ไตอะแกรมกระบวนการอิเล็กโทรไดโอดไนเซชัน (EDI).....	69
4.25 Ladder และไตอะแกรมการเชื่อมต่อสำหรับควบคุมการกรองแบบอัลตราฟิวเตรชั่น.....	69
4.26 Ladder และไตอะแกรมการเชื่อมต่อสำหรับควบคุมการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส.....	70
4.27 Ladder และไตอะแกรมการเชื่อมต่อสำหรับควบคุมการอิเล็กโทรไดโอดไนเซชัน.....	70
4.28 HMI สำหรับการควบคุมกระบวนการบำบัดน้ำ.....	71
4.29 HMI สำหรับการกำหนดค่าพารามิเตอร์.....	71
4.30 HMI สำหรับการจำลองค่าอินพุตและเอาต์พุตของระบบ.....	72
4.31 HMI สำหรับดักข้อมูล (Data Logger).....	72
4.32 แพลตฟอร์ม AWS Cloud Computing.....	75
4.33 AWS RDS (ฐานข้อมูลแบบ SQL).....	75
4.34 AWS IoT Core.....	76
4.35 AWS IoT Rule.....	76
4.36 AWS Lambda.....	77
4.37 AWS DynamoDB (ฐานข้อมูลแบบ NoSQL).....	77
4.38 AWS S3.....	78
4.39 เว็บเพจแสดงผลกราฟตัวแปรผ่านระบบคลาวด์.....	78

## สารบัญรูป (ต่อ)

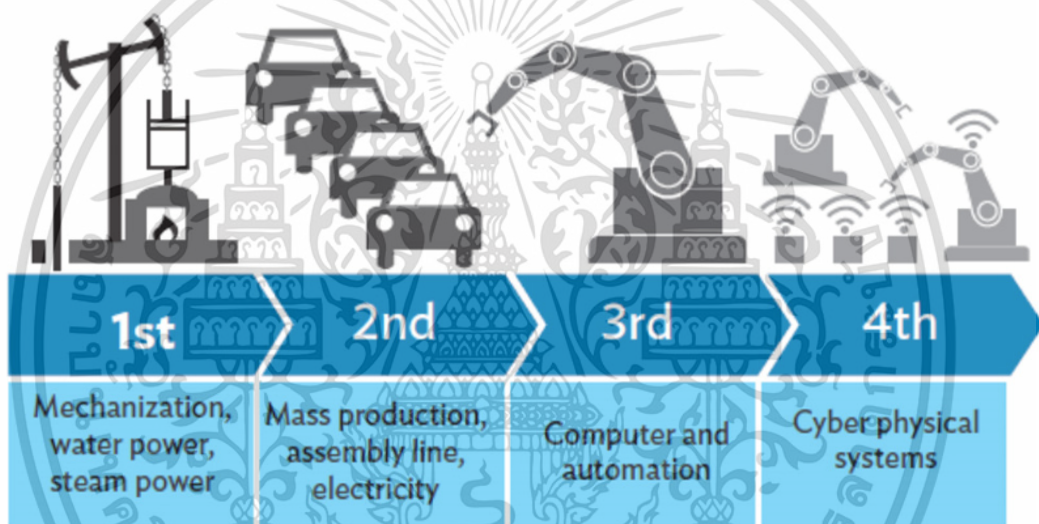
รูปที่	หน้า
5.1 ไดอะแกรมโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก.....	81
5.2 ไดอะแกรมระบบบำบัดน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล.....	82
5.3 ระบบคลาวด์คอมพิวเตอร์สำหรับไซเบอร์-กายภาพ (Cyber-physical cloud computing: CPCC) สำหรับการบริหารจัดการระบบการผลิตน้ำ.....	83
5.4 ไดอะแกรมอัลกอริทึมการควบคุมการผลิตน้ำแบบปรับตัวได้.....	85
5.5 ความต้านทานของเมมเบรนอัลตราฟิวเตรชั่นสำหรับเทคนิคการกรองและล้างย้อนแบบปรับตัวได้.....	87
5.6 การเติมสารเคมีแบบปรับตัวตามค่าความขุ่น (Turbidity) ของน้ำดิบ.....	87
5.7 ต้นทุนน้ำโดยรวม.....	88
5.8 คุณภาพการผลิตน้ำ.....	89
5.9 ผลรวมการใช้น้ำ.....	89

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์และความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมส่วนใหญ่กำลังเผชิญหน้ากับความท้าทายอย่างมากในการที่จะก้าวข้ามผ่านกระแสแห่งอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งอันเป็นคลื่นลูกที่สี่ของการปฏิวัติอุตสาหกรรม ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตและการดำเนินงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้า จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan : AEDP 2015) รัฐบาลไทยมีเป้าหมายที่จะเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าพลังงานทางเลือกให้เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของประเทศ ภายในปี 2579 การปรับตัวอย่างก้าวกระโดดโดยใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม ถือเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการสร้างศักยภาพในการแข่งขัน



Source: <http://www.allaboutlean.com/industry-4-0/>

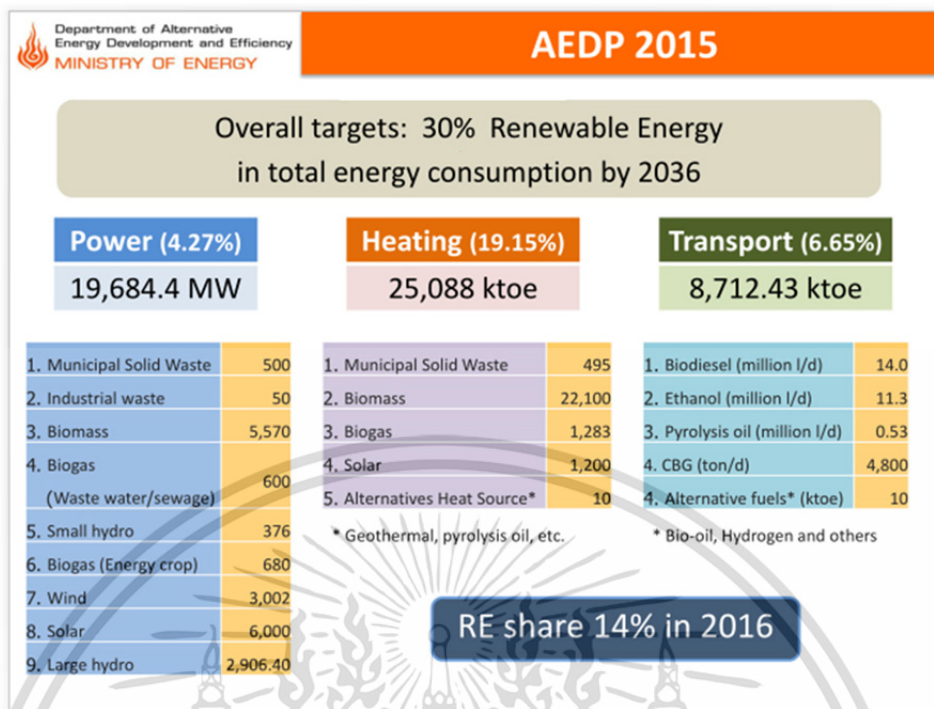
รูปที่ 1.1 ลำดับวิวัฒนาการสำหรับอุตสาหกรรม

ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งอย่างสมดุลระหว่างการใช้จ่ายทุนอย่างมีประสิทธิภาพกับคุณประโยชน์ที่เพิ่มขึ้นนั้น ถือเป็นประเด็นสำคัญที่จะต้องพิจารณาสำหรับการบรรลุผลสำเร็จต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับระบบบริหารน้ำในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมากอย่างยั่งยืน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวทางการประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งอย่างเหมาะสมซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานและการบริหารจัดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 แผนการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานทางเลือก ปี พ.ศ. 2558-2579 โดยกระทรวงพลังงาน

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบบริหารน้ำในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมากได้อย่างเหมาะสม สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานและการบริหารจัดการได้อย่างยั่งยืน

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัยนี้ เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เทคโนโลยีเพื่อการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในแบบต่างๆ เทคโนโลยีระบบเอดจ์ คอมพิวติ้ง (Edge Computing) โดยใช้เครื่องควบคุมเชิงตรรกที่สามารถโปรแกรม และเทคโนโลยีระบบคลาวด์ในปัจจุบัน โดยมุ่งเน้นถึงคุณสมบัติ ข้อดี ข้อเสีย ความแตกต่างในเทคโนโลยีที่ต่างกัน เพื่อนำไปสู่การออกแบบระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับการบริหารน้ำในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมากอย่างยั่งยืน

#### 1.4.1 เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

การเชื่อมโยงทุกอุปกรณ์ (Things) เข้าสู่เครือข่ายอินเทอร์เน็ตนั้นได้ถูกพัฒนาให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันตามความต้องการสำหรับงานประยุกต์ต่างๆ เช่น เทคโนโลยี Zigbee WiFi LoRa หรือ NB-IoT ซึ่งมีข้อได้เปรียบในด้านของปริมาณการรับ-ส่งข้อมูล การกินพลังงาน ความสามารถการครอบคลุมพื้นที่ในการเชื่อมต่อ

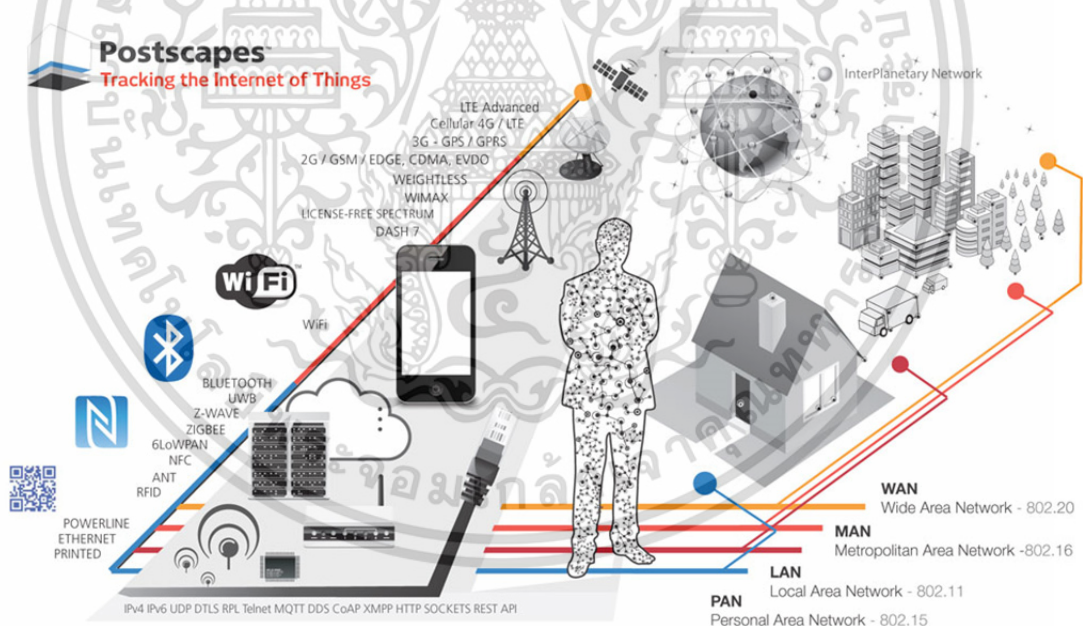
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.4.2 เทคโนโลยีระบบประมวลผลชายขอบ

เอดจ์คอมพิวติ้ง (Edge Computing) หมายถึง การประมวลผลและสั่งงานที่ตัวอุปกรณ์ภายในระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบเชื่อมโยงระยะใกล้ (Local Area Network : LAN) อุปกรณ์ที่ทำงานแบบเอดจ์ คอมพิวติ้ง ได้แก่ โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (PLC) ซึ่งในปัจจุบันถูกพัฒนาให้เป็นอุปกรณ์ที่มีระบบปฏิบัติการ สามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตผ่านเราเตอร์ 3G หรือสามารถเป็น IoT เกตเวย์ (Gateway) ที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นเราเตอร์ (Router) สำหรับเครือข่ายเซลลูลาร์ (Cellular) และเครือข่ายพื้นที่กว้าง พลังงานต่ำ (LPWAN)

### 1.4.3 เทคโนโลยีระบบคลาวด์

เทคโนโลยีระบบคลาวด์ หรือ การประมวลผลบนกลุ่มเมฆ Cloud Computing คือบริการที่ครอบคลุมถึง การให้ใช้หน่วยประมวลผล หน่วยจัดเก็บข้อมูล และระบบแอปพลิเคชันต่างๆ โดยมีรูปแบบการให้บริการที่แตกต่างกัน เช่น Infrastructure-as-a-Service (IaaS) บริการเวอร์ชวลแมชชีนที่สามารถเข้าถึงได้ผ่านเครือข่าย ช่วยรองรับความต้องการใช้งานในการประมวลผลหรือสตอเรจ Platform-as-a-Service (PaaS) เป็นบริการด้านแพลตฟอร์มสำหรับซอฟต์แวร์ Software-as-a-Service (SaaS) เป็นบริการด้านแอปพลิเคชันโดยคิดค่าบริการตามปริมาณการใช้งาน



รูปที่ 1.3 เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

### 1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

การเปรียบเทียบระหว่างระบบบริหารน้ำในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง กับระบบดั้งเดิมที่ไม่มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยพิจารณาที่ความสามารถในการควบคุมการต้นของเมมเบรนแบบปรับตัวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้กับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาด 9.9 เมกะวัตต์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง สถาปัตยกรรมของระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 3 ระดับชั้นทางกายภาพ ระดับชั้นที่ 1 เป็นอุปกรณ์ทางกายภาพ เช่น อุปกรณ์วัดความดัน อุปกรณ์วัดอัตราการไหล ตัวตรวจวัดพีเอช (pH) บัมพ์น้ำและวาล์ว ซึ่งมีหน้าที่ในการตรวจวัดข้อมูลทางกายภาพ และทำการโต้ตอบกับกระบวนการ ระดับชั้นที่ 2 เอดจ์ คอมพิวเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม เซิร์ฟเวอร์ฝั่งตัว หน่วยจัดเก็บข้อมูล เกตเวย์และสวิตช์ เพื่อควบคุมการปฏิบัติงานทั้งหมดภายในเครือข่าย ระดับชั้นที่ 3 เป็นระบบคลาวด์ซึ่งสนับสนุนแอปพลิเคชันสำหรับข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น การติดตามกระบวนการทำงาน การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการบำรุงรักษา ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอต่อความสามารถในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเพื่อการผลิตในโรงไฟฟ้าชีวมวล การควบคุมการต้นของเมมเบรนแบบปรับตัวได้ สามารถควบคุมคุณภาพการผลิตน้ำบริสุทธิ์และเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษา

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีแนวทางที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 4 กล่าวถึงการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับระบบบริหารน้ำในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมากอย่างยั่งยืน

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองและการอภิปรายผล

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอสรุปจากสมมติฐาน ปัญหาที่เกิดขึ้นพร้อมข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ยุคการปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่ 4 ที่มีความต้องการสร้าง โรงงานอุตสาหกรรมอัจฉริยะที่เครื่องจักรสามารถสื่อสารถึงกันได้ นำไปสู่ความท้าทายอย่างยิ่งสำหรับระบบอุตสาหกรรมอัตโนมัติดั้งเดิมในการที่จะปรับตัวให้ทันต่อเทคโนโลยี เพื่อสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขัน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนกระบวนทัศน์จากการผลิตที่ควบคุมโดยส่วนกลางที่มีอยู่ให้กลายเป็น การควบคุมแบบกระจายส่วน สร้างความอิสระทางการสื่อสารข้อมูลระหว่างกระบวนการภายในโรงงาน ผู้คนและหรือ อุปกรณ์ต่างๆ อย่างสัมฤทธิ์ผล ซึ่งสามารถบรรลุผลสำเร็จได้โดยอาศัยการผสมผสานของมาตรฐานของอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและทางเทคโนโลยีเข้ากับกระบวนการอุตสาหกรรม ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะฝังอยู่ในระบบการผลิต ติดตามข้อมูลตามวัฏจักรของผลิตภัณฑ์ไปจนถึง เครือข่าย เกิดเป็น Industrial Internet of Things (IIoT) ซึ่งช่วยให้องค์กรด้านการผลิตสามารถสร้างวิธีการใหม่สำหรับการดำเนินงาน เช่น การทำเหมืองข้อมูล การวิเคราะห์สถานะการทำงานของเครื่องจักรหรือการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์

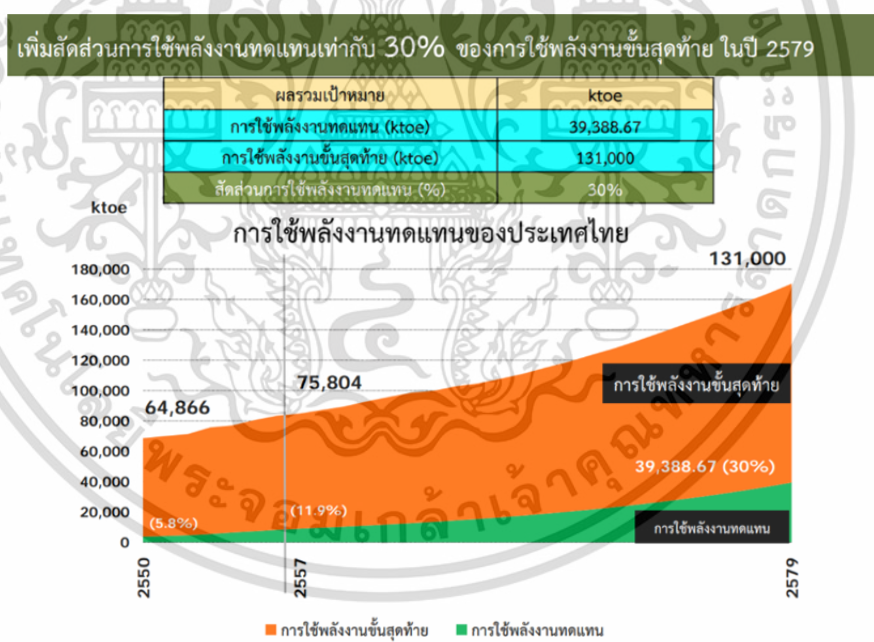


รูปที่ 2.1 เป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนในปี 2579 และผลการดำเนินงานด้านพลังงานทดแทน ไตรมาสที่ 1 ปี 2561

สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยการวิจัยด้านการออกแบบและประยุกต์ใช้ Industrial Internet of Things (IIoT) อย่างเหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานทางเลือกขนาดเล็กมาก (VSPP) โดยมุ่งเน้นการใช้ IIoT เพื่อบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล เหตุเพราะโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ต้องพึ่งพาทรัพยากรน้ำเพื่อทำวงจรไอน้ำและใช้กังหันไฟฟ้า [1] และในส่วนของแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015) กระทรวงพลังงานมีเป้าหมายในการเพิ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนที่ร้อยละ 20 ของปริมาณความต้องการไฟฟ้ารวมของประเทศ หรือคิดเป็นร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของประเทศ ซึ่งจะเป็นไปตามกรอบของแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 12-13 โดยเน้นการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก

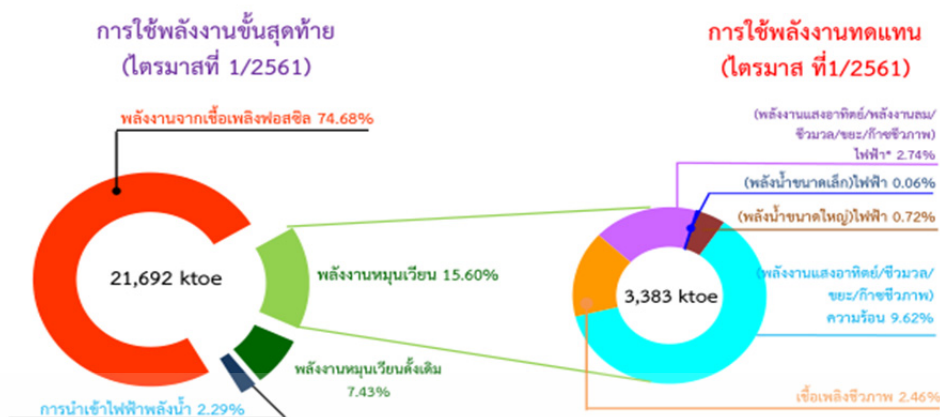
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558 - 2579 (PDP 2015) ที่ได้กำหนดสัดส่วนเชื้อเพลิงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนอยู่ในช่วงร้อยละ 15 - 20 ภายในปี 2579 โดยแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก หรือ AEDP 2015 ได้วางเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานชีวมวลอยู่ที่ 5,570 เมกะวัตต์ภายในปี พ.ศ. 2579 [2] สืบเนื่องมาจากนโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนของภาครัฐที่ต้องการแก้ไขปัญหาผลิตผลเหลือใช้จากภาคเกษตร และแก้ไขปัญหาขยะชุมชน ควบคู่กับนโยบายการบริหารจัดการพื้นที่เกษตรกรรม (โซนนิ่ง) ของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่ต้องการเพิ่มพื้นที่ปลูกอ้อย ปาล์ม และมันสำปะหลัง ซึ่งนโยบายดังกล่าวนี้คาดว่าจะช่วยเพิ่มศักยภาพเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าชีวมวลได้มากขึ้นอีก 1,500 เมกะวัตต์ จากเดิมที่ประเทศไทยมีศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ 2,500 เมกะวัตต์ สำหรับเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนอื่น ๆ นั้น แผน AEDP 2015 ได้วางเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ที่ 6,000 เมกะวัตต์ พลังงานลม 3,002 เมกะวัตต์ พลังน้ำขนาดเล็ก 376 เมกะวัตต์ พลังงานก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย/ของเสีย และพืชพลังงาน 1,280 เมกะวัตต์ พลังงานขยะ ประกอบด้วยขยะชุมชนและขยะอุตสาหกรรม รวม 550 เมกะวัตต์ และพลังน้ำขนาดใหญ่ 2,906.40 เมกะวัตต์ ซึ่งผลการดำเนินงานตามแผน AEDP 2015 ไตรมาสที่ 1 ปี 2561 ข้อมูล ณ เดือนพฤษภาคม 2561 นั้น มีเพียงแค่พลังน้ำขนาดใหญ่เท่านั้นที่บรรลุเป้าหมายแล้ว [2] ส่วนพลังงานทางเลือกอื่นๆ นั้นยังอยู่ระหว่างการพิจารณาเปิดรับซื้อไฟฟ้าของภาครัฐให้ครบตามเป้าหมาย



รูปที่ 2.2 เป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนในปี 2579 ตามแผน AEDP 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\*รวมไฟฟ้าที่ผลิตใช้เอง (off grid)

รูปที่ 2.3 สถานการณ์พลังงานทดแทนของประเทศไทย ไตรมาสที่ 1/2561 [3]

ซึ่งการรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนของประเทศไทยจากผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็ก ขนาดไม่เกิน 50 เมกะวัตต์ ( Small Power Producer: SPP) และผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กมาก ขนาดไม่เกิน 10 เมกะวัตต์ ( Very Small Power Producer: VSPP) นั้น เริ่มต้นในปี 2550 จากการรับซื้อแบบกำหนดส่วนเพิ่มราคาซื้อไฟฟ้าจากราคาพลังงาน หรือ Adder เพื่อส่งเสริมและกระตุ้นให้เกิดการลงทุนของภาคเอกชน เนื่องจากขณะนั้นเทคโนโลยีที่ใช้ในการสร้างโรงไฟฟ้ายังใช้เงินลงทุนที่สูงกว่าปัจจุบันมาก ก่อนจะปรับการรับซื้อเป็นแบบ Feed-in Tariff เมื่อปี 2557 ซึ่งการรับซื้อไฟฟ้าแบบ Feed-in Tariff นั้นประกอบด้วย 1.ส่วนคงที่ หรือ FIT<sub>F</sub> ที่มีพื้นฐานการคิดมาจากต้นทุนในการก่อสร้างและดูแลรักษาโรงไฟฟ้าตลอดอายุโครงการ 2.ส่วนผันแปร หรือ FIT<sub>V</sub> ซึ่งจะถูกนำไปคิดกับพลังงานชีวมวล พลังงานขยะ และพลังงานก๊าซชีวภาพ เท่านั้น เนื่องจากยังมีความเสี่ยงของราคาวัตถุดิบที่นำมาเป็นเชื้อเพลิง 3.ส่วนพิเศษ หรือ FIT Premium สำหรับโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานขยะ พลังงานชีวมวล และพลังงานก๊าซชีวภาพ และโรงไฟฟ้าในพื้นที่จังหวัดยะลา จังหวัดนราธิวาส จังหวัดปัตตานี และ 4 อำเภอในจังหวัดสงขลา ได้แก่ อำเภอนาทวี อำเภอสะบ้าย้อย อำเภอจะนะ และอำเภอเทพา เพื่อสนับสนุนการลงทุนตามนโยบายของภาครัฐและการจ้างงานในพื้นที่ชายแดนภาคใต้ของประเทศไทย

อัตราซื้อไฟฟ้าในรูปแบบ FIT ที่ประกาศใช้ในปี 2558 : สำหรับโครงการ VSPP กลุ่มพลังงานธรรมชาติ			
กำลังผลิต (MW)	FIT (บาท/หน่วย)	ระยะเวลาสนับสนุน (ปี)	FIT Premium (บาท/หน่วย) สำหรับโครงการในพื้นที่จังหวัดชายแดนภาคใต้* (ตลอดอายุโครงการ)
<b>1) พลังงานน้ำ</b>			
กำลังผลิตติดตั้ง ≤ 200 kW	4.90	20 ปี	0.50
<b>2) พลังงานลม</b>			
ทุกขนาด	6.06	20 ปี	0.50
<b>3) พลังงานแสงอาทิตย์</b>			
บนหลังคา กำลังผลิตติดตั้ง 0-10 kWp	6.85	25 ปี	0.50
บนหลังคา กำลังผลิตติดตั้ง >10-250 kWp	6.40	25 ปี	0.50
บนหลังคา กำลังผลิตติดตั้ง >250-1,000 kWp	6.01	25 ปี	0.50
บนพื้นดิน ทุกขนาด	5.66	25 ปี	0.50

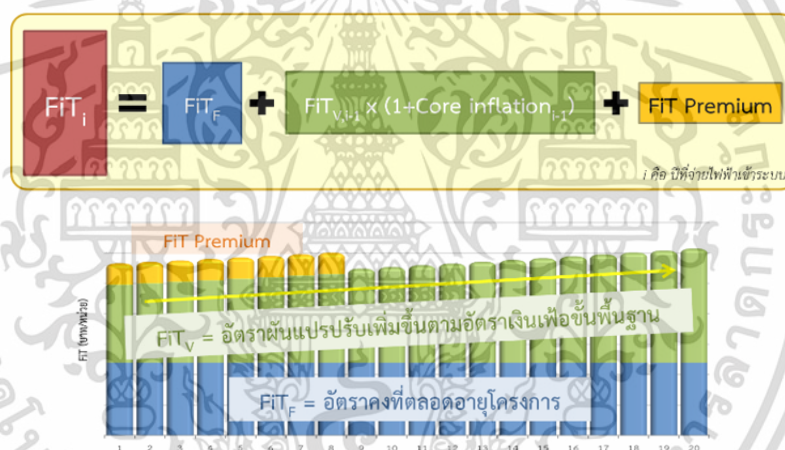
หมายเหตุ \*โครงการในพื้นที่จังหวัดยะลา ปัตตานี นราธิวาส และ 4 อำเภอในจังหวัดสงขลา ได้แก่ อ.จะนะ อ.เทพา อ.สะบ้าย้อย และ อ.นาทวี

รูปที่ 2.4 อัตราการรับซื้อไฟฟ้าแบบ Feed-in Tariff สำหรับ VSPP กลุ่มพลังงานธรรมชาติ [3] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

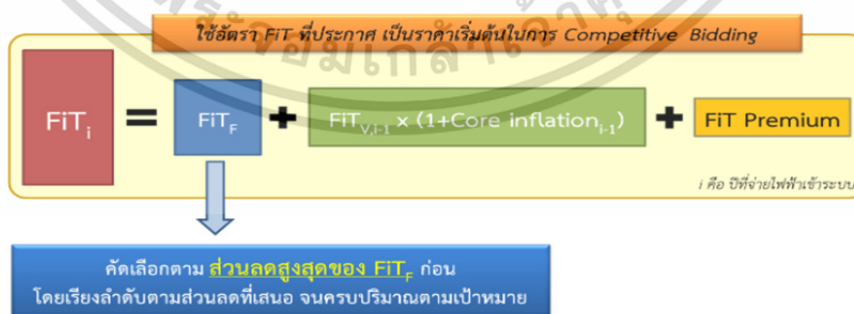
อัตราซื้อไฟฟ้าในรูปแบบ FIT ที่ประกาศใช้ในปี 2558 : สำหรับโครงการ VSPG กลุ่มพลังงานชีวมวล						
กำลังผลิต (MW)	FIT (บาท/หน่วย)			ระยะเวลาสนับสนุน (ปี)	FIT Premium (บาท/หน่วย)	
	FIT <sub>F</sub>	FIT <sub>V,2560</sub>	FIT <sup>(1)</sup>		สำหรับโครงการกลุ่มเชื้อเพลิงชีวมวล (8 ปีแรก)	สำหรับโครงการในพื้นที่จังหวัดชายแดนภาคใต้ <sup>(2)</sup> (ตลอดอายุโครงการ)
<b>1) ชยะ (การจัดการขยะแบบผสมผสาน)</b>						
กำลังผลิตติดตั้ง ≤ 1 MW	3.13	3.21	6.34	20 ปี	0.70	0.50
กำลังผลิตติดตั้ง > 1-3 MW	2.61	3.21	5.82	20 ปี	0.70	0.50
กำลังผลิตติดตั้ง > 3 MW	2.39	2.69	5.08	20 ปี	0.70	0.50
<b>2) ชยะ (หลุมฝังกลบขยะ)</b>						
ทุกขนาด	5.60	-	5.60	10 ปี	-	0.50
<b>3) ชีวมวล</b>						
กำลังผลิตติดตั้ง ≤ 1 MW	3.13	2.21	5.34	20 ปี	0.50	0.50
กำลังผลิตติดตั้ง > 1-3 MW	2.61	2.21	4.82	20 ปี	0.40	0.50
กำลังผลิตติดตั้ง > 3 MW	2.39	1.85	4.24	20 ปี	0.30	0.50
<b>4) ก๊าซชีวภาพ (น้ำเสีย/ของเสีย)</b>						
ทุกขนาด	3.76	-	3.76	20 ปี	0.50	0.50
<b>5) ก๊าซชีวภาพ (พืชพลังงาน)</b>						
ทุกขนาด	2.79	2.55	5.34	20 ปี	0.50	0.50

หมายเหตุ (1) อัตรา FIT<sub>V</sub> จะเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตามอัตราเงินเฟ้อขั้นพื้นฐาน (Core Inflation)  
 (2) โครงการในพื้นที่จังหวัดยะลา ปัตตานี นราธิวาส และ 4 อำเภอในจังหวัดสงขลา ได้แก่ อ.จะนะ อ.เทพา อ.สะบ้าย้อย และ อ.นาทวี

รูปที่ 2.5 อัตราการรับซื้อไฟฟ้าแบบ Feed-in Tariff สำหรับ VSPG กลุ่มพลังงานชีวมวล [3]



รูปที่ 2.6 วิธีการคำนวณราคาการรับซื้อไฟฟ้าแบบ Feed-in Tariff [3]



รูปที่ 2.7 วิธีการคำนวณราคาการรับซื้อไฟฟ้าแบบ Competitive Bidding [3]

และในปี 2560 ภาครัฐได้เปิดรับซื้อไฟฟ้าด้วยวิธีการประมูลราคา หรือ Competitive Bidding โดยคัดเลือกโครงการที่ยื่นประมูลด้วยราคาที่มีส่วนลดของอัตราค่า FIT<sub>F</sub> สูงที่สุดก่อน และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามด้วยลำดับราคาส่วนลดที่เสนอของรายอื่นๆ จนครบเป้าหมายที่เปิดรับซื้อ โดยที่ผู้ลงทุนยังได้รับ ส่วนพิเศษ

ปัจจัยที่สำคัญที่จะทำให้เป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนบรรลุเป้าหมายตาม แผน AEDP 2015 ได้นั้น นอกเหนือจากนโยบายสนับสนุนของภาครัฐแล้ว ตัวผู้ลงทุนเองก็จำเป็นต้อง มีความพร้อมและศักยภาพในการดำเนินโครงการอย่างแท้จริง ประกอบไปด้วยปัจจัยหลักดังนี้ 1. ความพร้อมด้านเทคโนโลยี ซึ่งถือเป็นหัวใจหลักของการผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในทุกประเภท การเลือกใช้เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมในการผลิตไฟฟ้า ประกอบกับการวิจัยพัฒนา เทคโนโลยีเฉพาะด้านที่เหมาะสมเพื่อใช้ในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมากของตนเองเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจาก โรงไฟฟ้าแต่ละโรงก็จะใช้วัตถุดิบต่างชนิดกัน ใช้เทคโนโลยีจากผู้ผลิตต่างกัน สภาพแวดล้อมของ โครงการที่ต่างกัน ทำให้ปัญหาที่พบในแต่ละโครงการอาจแตกต่างกันไป การวิจัยและพัฒนา เทคโนโลยีของตนเองเพื่อเน้นแก้ไขปัญหาได้อย่างตรงจุด เป็นส่วนที่สำคัญที่จะช่วยให้โครงการประสบความสำเร็จทั้งในด้านของผู้ลงทุน และด้านเสถียรภาพทางระบบไฟฟ้าที่จะเกิดประโยชน์กับประเทศ อย่างสูงสุด 2. ความพร้อมด้านการเงิน ในอดีตที่ผ่านมาหลายโครงการที่ไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากผู้ลงทุนติดปัญหาด้านเงินทุน จึงเกิดการชะลอหรือหยุดชะงักของโครงการจนพ้นกำหนดจ่าย ไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ ทำให้โครงการไม่สามารถจ่ายไฟเข้าระบบได้จริงและส่งผลกระทบต่อเป้าหมาย การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนที่ภาครัฐได้วางไว้ 3. ความพร้อมด้านที่ดิน ซึ่งที่ดินที่เหมาะสมในการ ดำเนินโครงการนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีส่วนส่งไฟฟ้าที่มีศักยภาพเพียงพอให้โครงการสามารถ จ่ายไฟเข้าระบบได้ พาดผ่านบริเวณที่ดินหรือใกล้เคียงที่ดินให้มากที่สุด เพื่อลดการสูญเสียของหน่วย ไฟฟ้าที่ผลิตได้และลดค่าใช้จ่ายในการขยายระบบส่งไฟฟ้าของผู้ลงทุนเอง ทั้งนี้ ในปัจจุบัน (2561) การเปิดรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กขนาดไม่เกิน 50 เมกะวัตต์ ( Small Power Producer: SPP) และผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กมากขนาดไม่เกิน 10 เมกะวัตต์ ( Very Small Power Producer: VSPP) ภาครัฐได้กำหนดโซนนิ่งที่จะเปิดรับซื้อไฟฟ้าตามศักยภาพของสายส่งที่ยัง สามารถรองรับการจ่ายไฟฟ้าได้ เพื่อไม่ให้เกิดกระแสไฟฟ้าย้อนจากระบบจำหน่ายเข้าสู่ระบบส่ง ทำให้ความพร้อมด้านที่ดิน ยิ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่จะพัฒนาโครงการให้ประสบความสำเร็จได้ 4. ความ พร้อมด้านใบอนุญาตต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ในการประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากนั้น ผู้ประกอบการจำเป็นต้องมีใบอนุญาตประกอบกิจการพลังงาน ใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน ใบอนุญาตก่อสร้างอาคาร ตลอดจนการจัดทำประชาคมเพื่อรับฟังความคิดเห็นของประชาชนในพื้นที่ ที่จะก่อสร้างโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมาก เพื่อให้เป็นไปตามพระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น การเพิ่มขึ้นของแผนการดำเนินงานด้านพลังงานทางเลือกของ ภาครัฐ โดยเฉพาะการปรับเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานชีวมวลสะท้อนให้เห็นถึงความ ต้องการนำปริมาณมหาศาลในอนาคตอันใกล้ ในขณะที่หลายพื้นที่ทั่วประเทศกำลังเผชิญกับปัญหา ขาดแคลนน้ำจืดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภาวะโลกร้อน [4] ดังนั้นการจัดการ ทรัพยากรน้ำที่มีประสิทธิภาพเป็นเรื่องสำคัญสำหรับการใช้พลังงานอย่างยั่งยืนของน้ำและพลังงาน

เพื่อให้หน้าที่มีอยู่เพียงพอต่อความต้องการในระยะยาวสำหรับระบบผลิตกระแสไฟฟ้า เทคนิค วิธีบริหารจัดการน้ำแบบต่างๆ ได้ถูกนำเสนอ เช่น วิธีการบำบัดน้ำและการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ใน โรงไฟฟ้าพลังความร้อน [5-6] การจัดการการอนุรักษ์น้ำในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนเพื่อลดปริมาณการ ใช้ น้ำ วิธีการสร้างแบบจำลองในการประมาณปริมาณการใช้น้ำเพื่อวิเคราะห์และคาดการณ์ปริมาณน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงสุดและต่ำสุดในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนประเภทต่างๆ [7] เทคโนโลยีการระบายความร้อน (Cooling) ด้วยน้ำปริมาณน้อยเพื่อประเมินความทนทานต่อสภาพแห้งแล้ง [8-9]

เนื้อหาการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการดำเนินงานเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ Industrial Internet of Things (IIoT) กับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก กำลังการผลิต 9.9 เมกะวัตต์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมาก สถาปัตยกรรมของระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 3 ระดับชั้นทางกายภาพ ได้แก่ ระดับชั้นที่ 1 เป็นอุปกรณ์ทางกายภาพ เช่น อุปกรณ์วัดความดัน อัตราการไหล pH ป้อนน้ำและวาล์ว ซึ่งมีหน้าที่ในการตรวจวัดข้อมูลทางกายภาพและทำการโต้ตอบกับกระบวนการ ระดับชั้นที่ 2 ระบบประมวลผลข้อมูลซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม เซิร์ฟเวอร์ฝั่งตัว หน่วยจัดเก็บข้อมูล เกตเวย์ และสวิตช์ เพื่อควบคุมการปฏิบัติงานทั้งหมดภายในเครือข่าย ระดับชั้นที่ 3 เป็นระบบคลาวด์ซึ่งสนับสนุนแอปพลิเคชันสำหรับข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น การติดตามกระบวนการทำงาน การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการบำรุงรักษา ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอต่อความสามารถในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเพื่อการผลิตในโรงไฟฟ้าชีวมวล การควบคุมการดันของเมมเบรนแบบปรับตัวสามารถควบคุมคุณภาพการผลิตน้ำบริสุทธิ์และเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาแม้ในระหว่างการผันผวนของคุณภาพน้ำดิบ นอกจากนี้การวิเคราะห์ข้อมูลในระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ยังสะท้อนให้เห็นถึงความต้องการน้ำสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวล ในสภาพแวดล้อมตามฤดูกาล ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาสำหรับการวางแผนทรัพยากรน้ำอย่างยั่งยืนสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า

## 2.2 โรงไฟฟ้าชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) หมายถึง วัสดุหรือสารที่ได้จากธรรมชาติโดยไม่รวมถึงเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ได้แก่ แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย ชังข้าวโพด ชี้เลื่อย ทลายปาล์ม เศษไม้ กะลาปาล์ม และสารอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีและให้ค่าพลังงานความร้อนในระดับที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ชากชีวมวลจากภาคการเกษตรจึงเป็นแหล่งพลังงานที่น่าสนใจและเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานทางเลือกทดแทนพลังงานจากฟอสซิล [10]

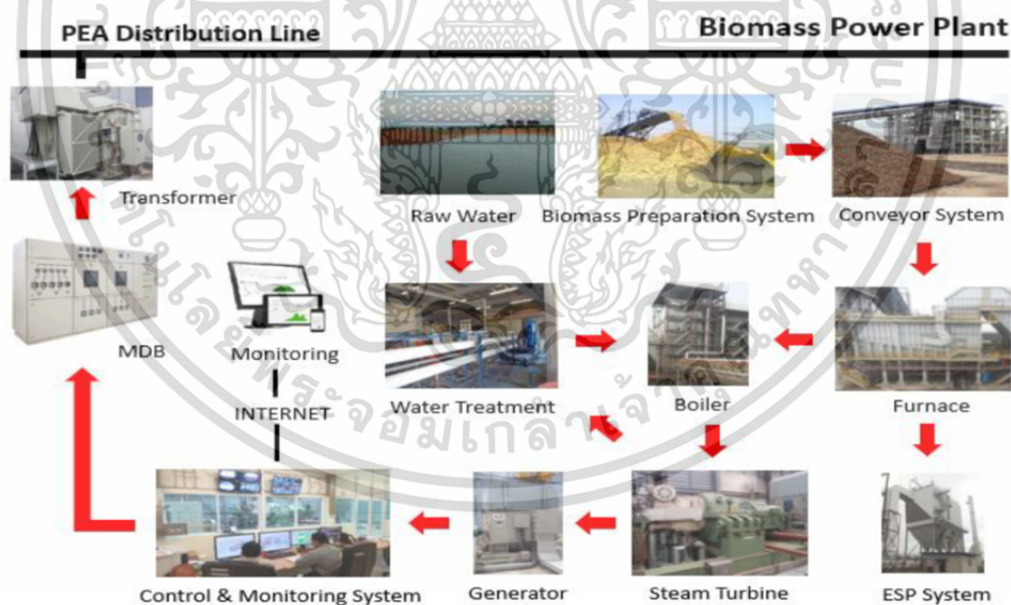
ปัจจุบันประเทศไทยมีการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลจำนวนมาก ซึ่งระบบอาจเป็นระบบขนาดเล็กมากถึงโรงไฟฟ้าขนาดกลาง เทคโนโลยีการแปลงเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นพลังงานได้แก่

- การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion)
- การใช้ความร้อนสลายโมเลกุล (Thermochemical conversion)
- การใช้ชีวเคมีสลายโมเลกุล (Biochemical conversion) ประกอบด้วย

การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) ถือเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล โรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงชีวมวลทำงานโดยการใช้ไอน้ำที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผา(Furnace) ต้มน้ำโดยหม้อไอน้ำ(Boiler) จนเดือดกลายเป็นไอน้ำที่มีแรงดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกป้อนเข้าไปยังกังหันไอน้ำ(Steam Turbine) ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Generator) ไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านระบบการควบคุมตามระบบการควบคุมที่เหมาะสม จากนั้นจะทำการจำหน่ายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

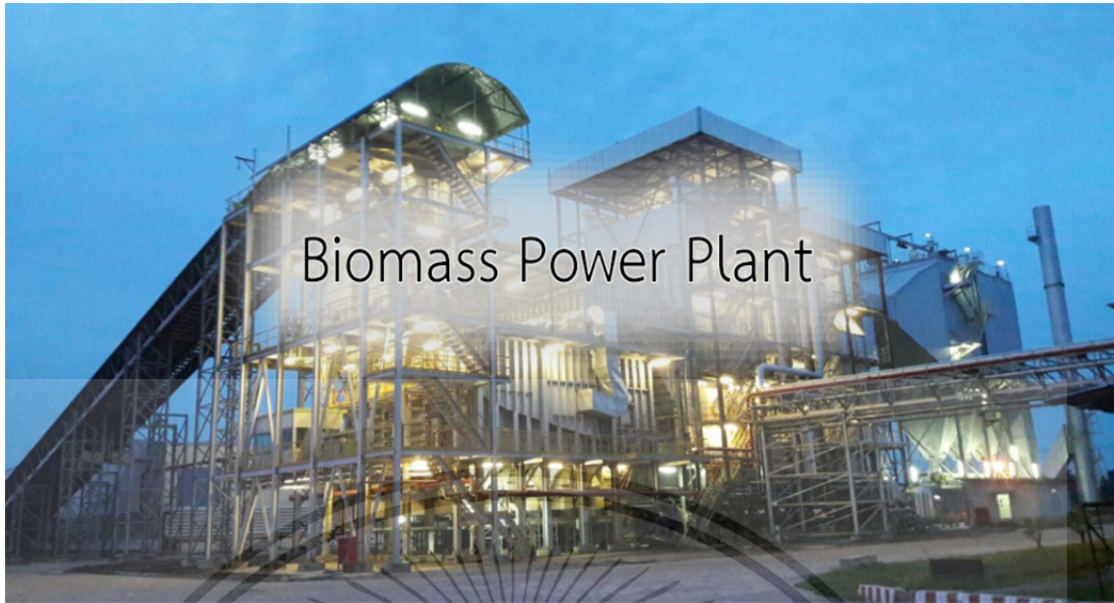
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.8 แสดงแผนผังกระบวนการทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก (VSPP) ขนาดกำลังการผลิตติดตั้งไม่เกิน 10 เมกะวัตต์ ตั้งอยู่ที่จังหวัดบุรีรัมย์ซึ่งเป็นจังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ โรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมากใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทขับเคลื่อนด้วยกังหันไอน้ำขนาดกำลังการผลิต 9,900 กิโลวัตต์หรือ 9.9 เมกะวัตต์ โดยผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตและเพื่อสาธารณูปโภคภายในโรงงาน 0.9 เมกะวัตต์ ผลิตใช้ในกลุ่มโรงงาน 1.0 เมกะวัตต์ จำหน่ายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 8.0 เมกะวัตต์ โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเช่นเศษไม้ เปลือก เปลือกข้าว ชังข้าวโพด ชี้อ้อยและเปลือกเมล็ดปาล์ม เศษวัสดุทางการเกษตรในพื้นที่ ใช้หม้อไอน้ำแบบ stoker boiler ที่มีระบบ steam reheat และระบบกังหันไอน้ำแบบ extraction-condensing steam turbine ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เชื้อเพลิงชีวมวลประมาณ 450 ตันต่อวันถูกเผาในระบบเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) เพื่อสร้างไอน้ำแรงดันสูง 45 ตันต่อชั่วโมง ระบบนำความร้อนที่เหลือจากเครื่องทำความร้อนและเครื่องทำความร้อนกลับมาใช้ใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนถ่ายพลังงานได้เกือบ 85% ระบบระบายความร้อนแบบเปิด (open cycle cooling system) ประกอบด้วยหอระบายความร้อน (cooling tower) และปั๊มสำหรับระบบระบายความร้อน (pump of cooling tower) น้ำระบายความร้อนจะถูกสูบจาก ถังน้ำ Clarified water ผ่านคอนเดนเซอร์ และถูกปล่อยกลับสู่แหล่งน้ำ สำหรับการปล่อย มลพิษสู่อากาศ จะได้รับการกำจัดโดยใช้เครื่องตกตะกอนโดยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitators: ESP) เพื่อขจัดอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ในอากาศ

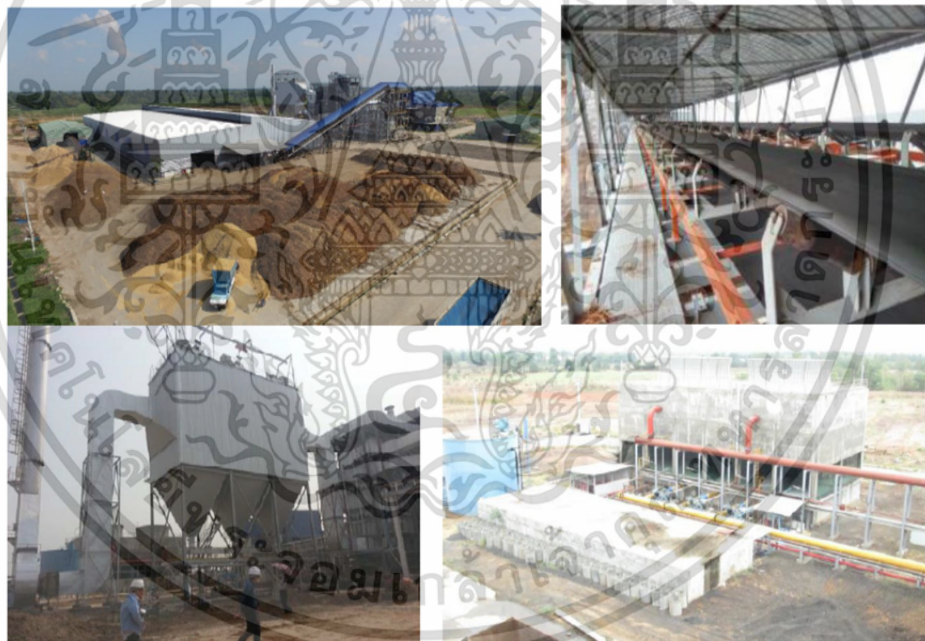


รูปที่ 2.8 ไตอะแกรมกระบวนการทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

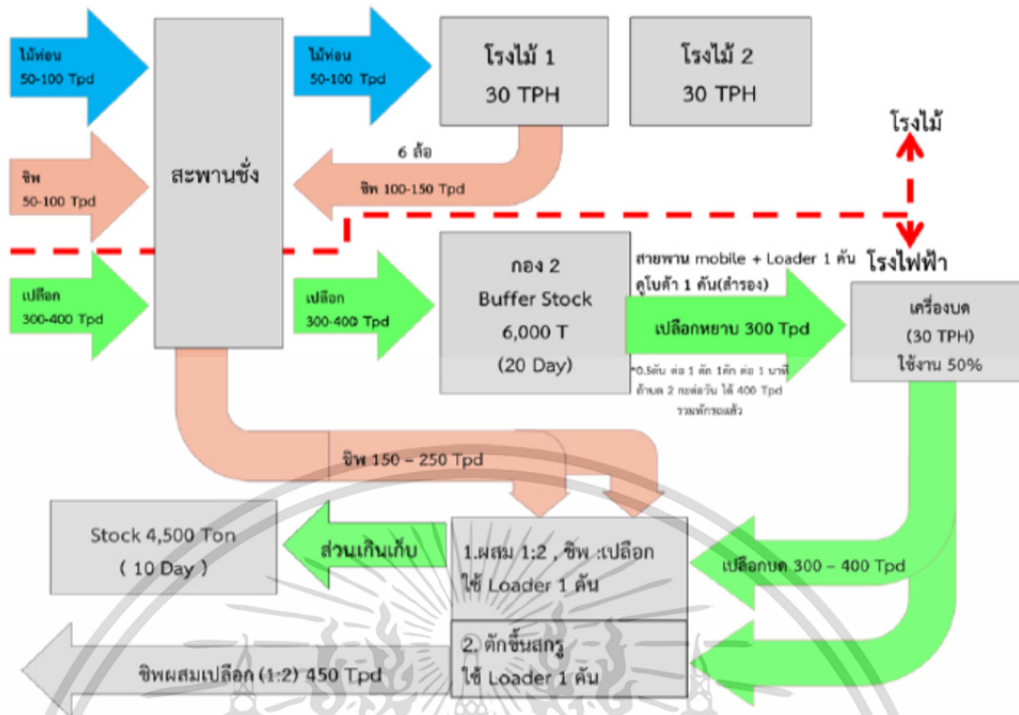


รูปที่ 2.9 โรงไฟฟ้าชีวมวล

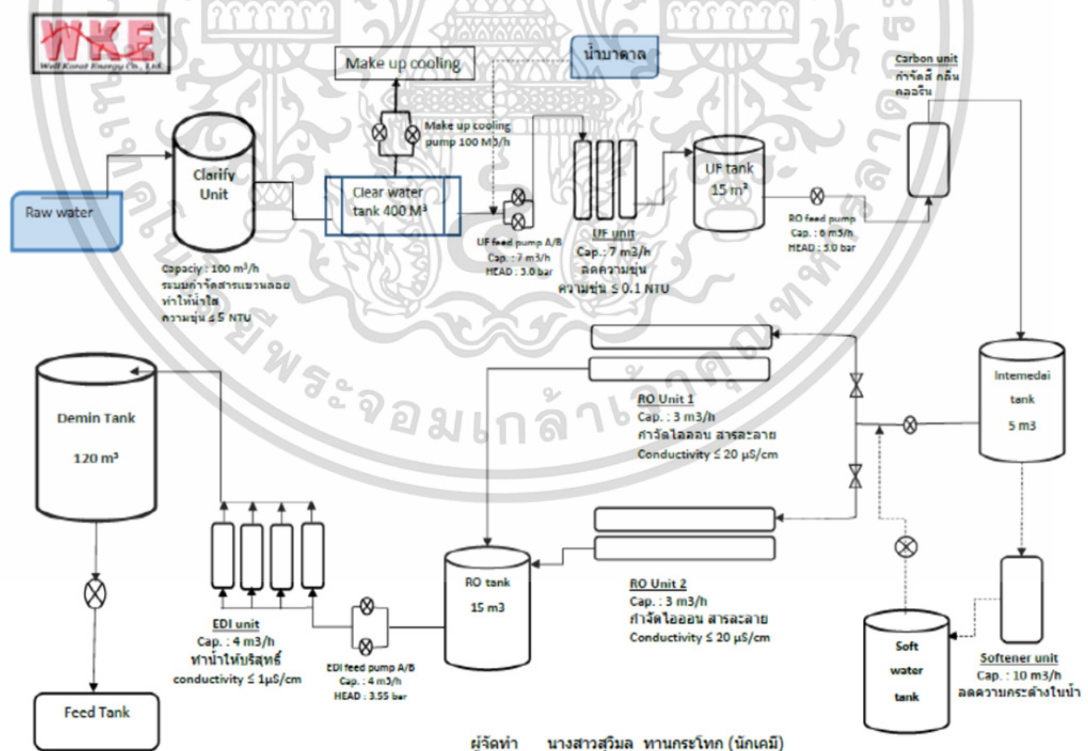


รูปที่ 2.10 ภาพถ่ายมุมสูงสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 กระบวนการส่งจ่ายเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล

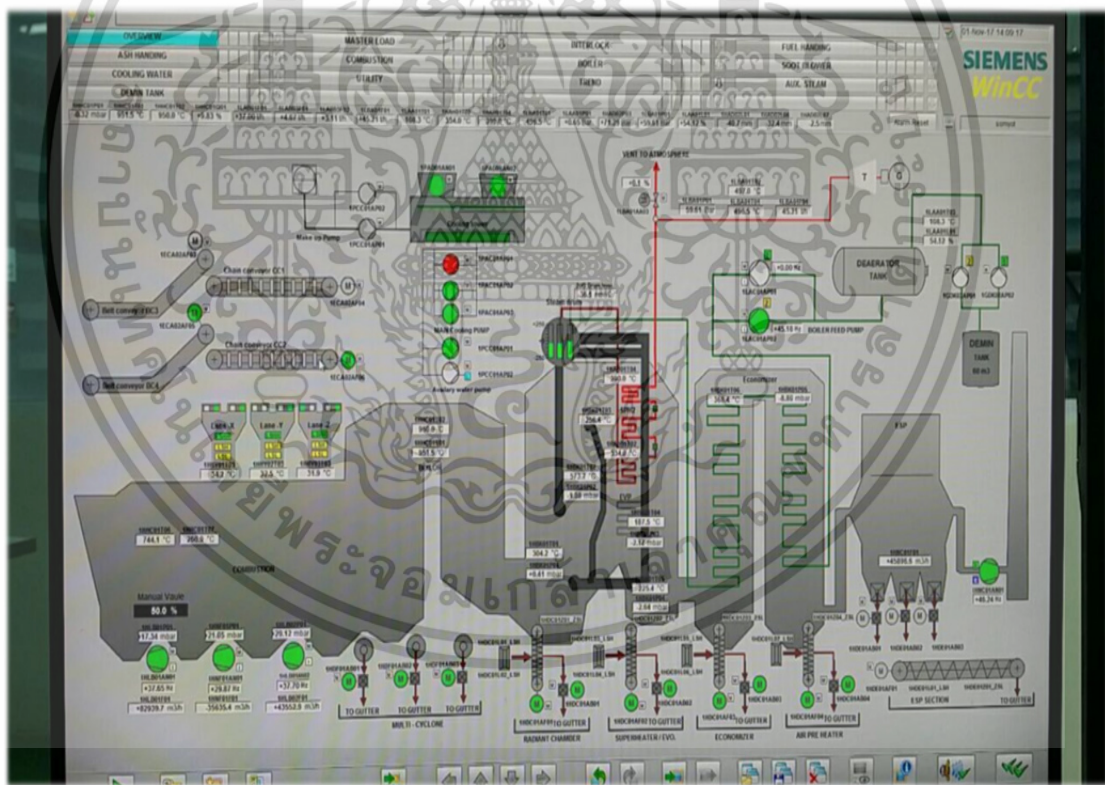


รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมระบบบำบัดน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

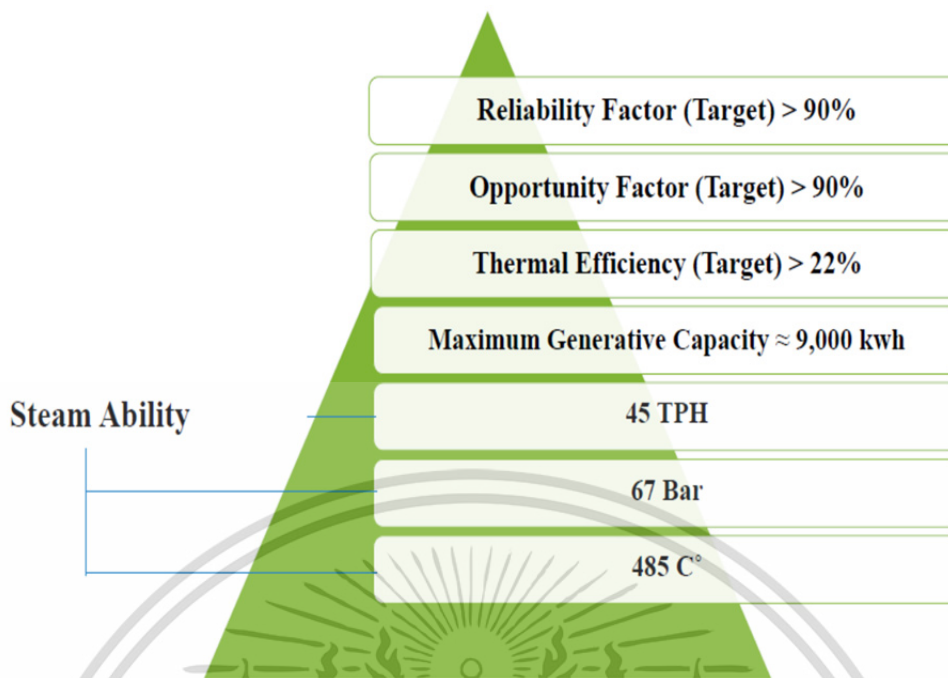


รูปที่ 2.13 การควบคุม Speed และ Load สำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล



รูปที่ 2.14 การควบคุมกระบวนการโรงไฟฟ้าชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 คุณสมบัติ โรงไฟฟ้าชีวมวล

### 2.3 โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ หรือ ไบโอก๊าซ (Biogas) คือก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน (anaerobic process) โดยก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ประมาณ 50 – 80 เปอร์เซ็นต์ และองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S), ก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>), ก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานสะอาด เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะผ่านกระบวนการบำบัด หรือทำให้ก๊าซมีความสะอาดปลอดภัยมากขึ้น โดยการกำจัดความชื้นและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกไป ปัจจุบันสารอินทรีย์ที่นิยมนำมาผ่านกระบวนการสร้างก๊าซชีวภาพ ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานแปงมันสำปะหลัง โรงงานน้ำตาล โรงงานเบียร์ โรงงานผลไม้แปรรูป เป็นต้น รวมทั้งน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ จากโดยก๊าซมีเทนมีค่าความร้อน 39.4 เมกะจูล/ลบ.ม. สามารถใช้ทดแทนน้ำมันเตาได้ 0.67 ลิตร ซึ่งเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้า 9.7 kWh [11-13]

ขั้นตอนและปฏิกิริยาการเกิดก๊าซชีวภาพ ปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาวะไร้ออกซิเจน แบ่งออกได้ 4 ขั้นตอน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ต่างชนิดกัน ดังนี้

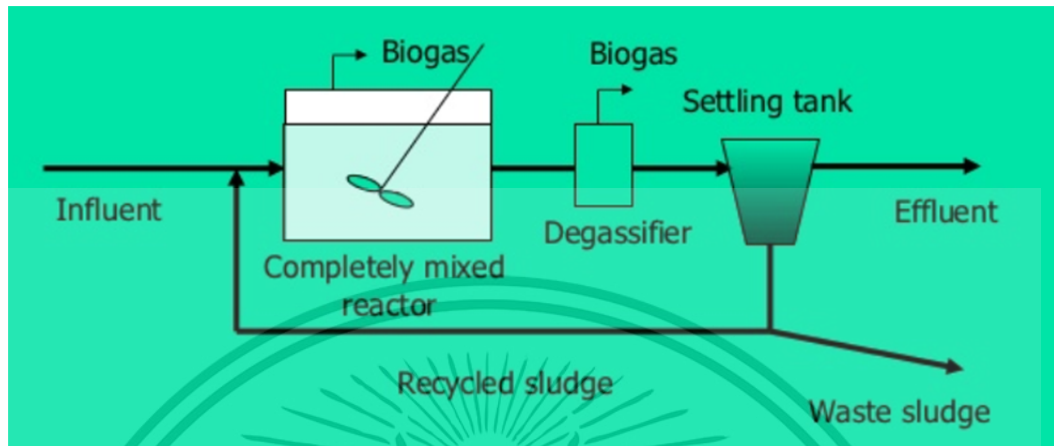
ขั้นที่ 1 การสลายสารโมเลกุลใหญ่ (Hydrolysis) สารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ ทำให้แตกตัวมีขนาดเล็กลงอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้

ขั้นที่ 2 การหมัก (Fermentation) จุลินทรีย์จะเปลี่ยนสารอินทรีย์ละลายน้ำกลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acid)

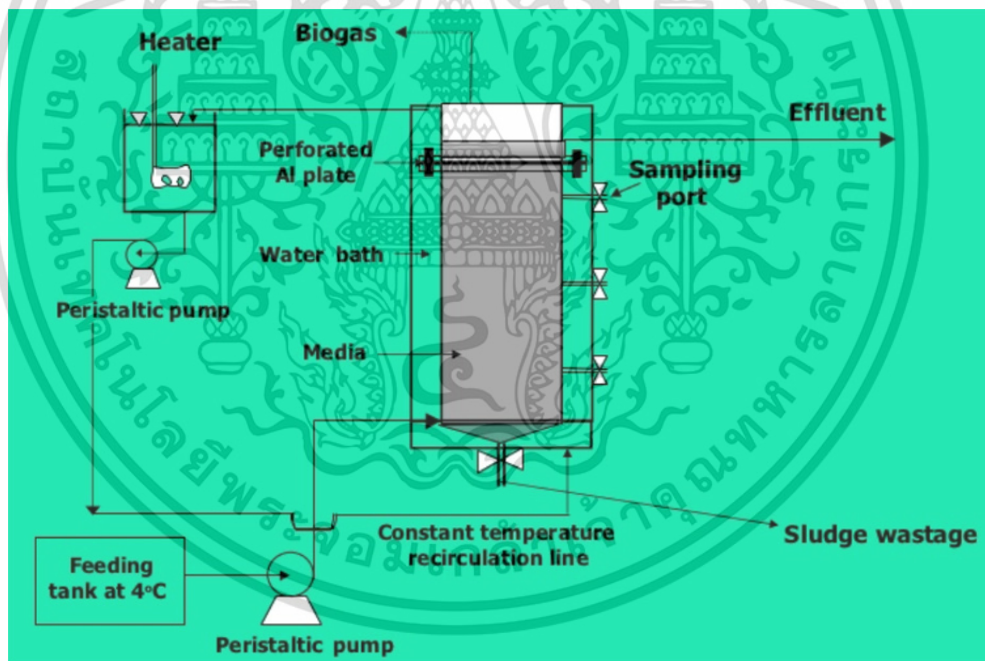
ขั้นที่ 3 การผลิตกรดอินทรีย์ (Acidogenesis) แบคทีเรียที่สร้างกรด (acid forming bacteria) จะย่อยสลายกรดอินทรีย์กลายเป็นกรดอะซิติก (Acetic Acid) หรือที่รู้จักกันคือ กรดน้ำส้ม ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 4 การผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis) กรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกย่อยสลายเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ อาจมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และไอน้ำผสมอยู่ด้วย ซึ่งรวมกันเรียกว่า "ก๊าซชีวภาพ"



รูปที่ 2.16 Anaerobic Contact: AC



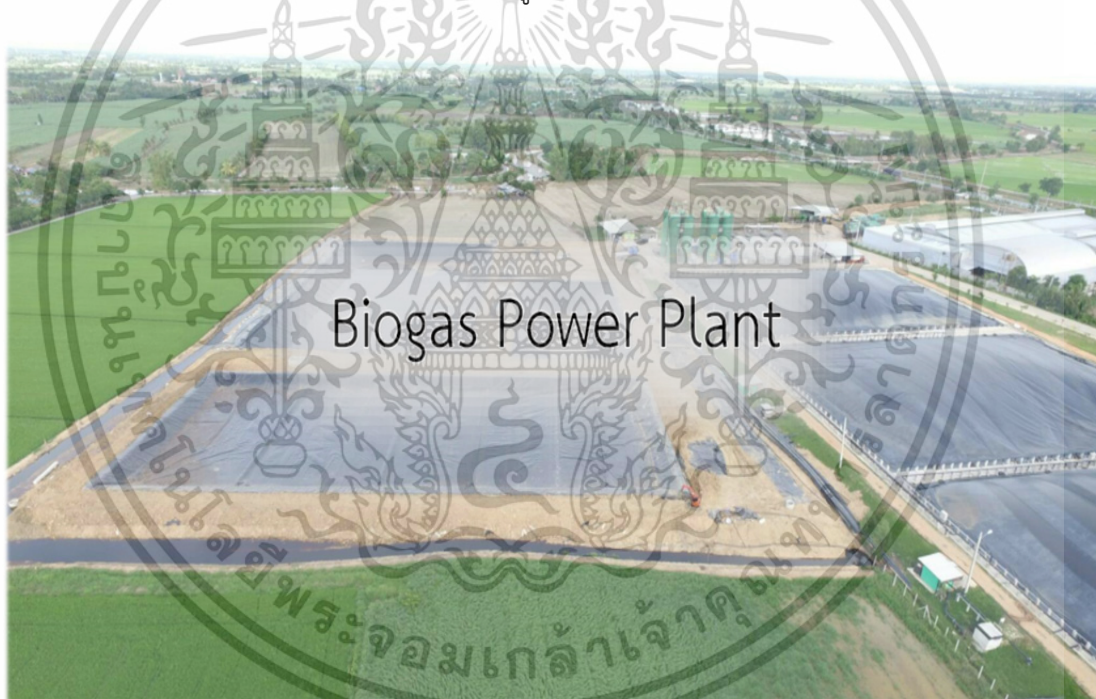
รูปที่ 2.17 Anaerobic Filter: AF

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพหรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน แบ่งออกเป็น 4 รูปแบบได้แก่

- ระบบหมักแบบตัวกลางกรอง (Anaerobic Filter: AF)
- ระบบหมักแบบคอนแทค (Anaerobic Contact: AC)
- ระบบหมักแบบยูเอสบี (Anaerobic Up-flow Sludge Blanket: UASB)
- ระบบหมักแบบฟลูอิดไรซ์ (Anaerobic Fluidized Bed: AFB)

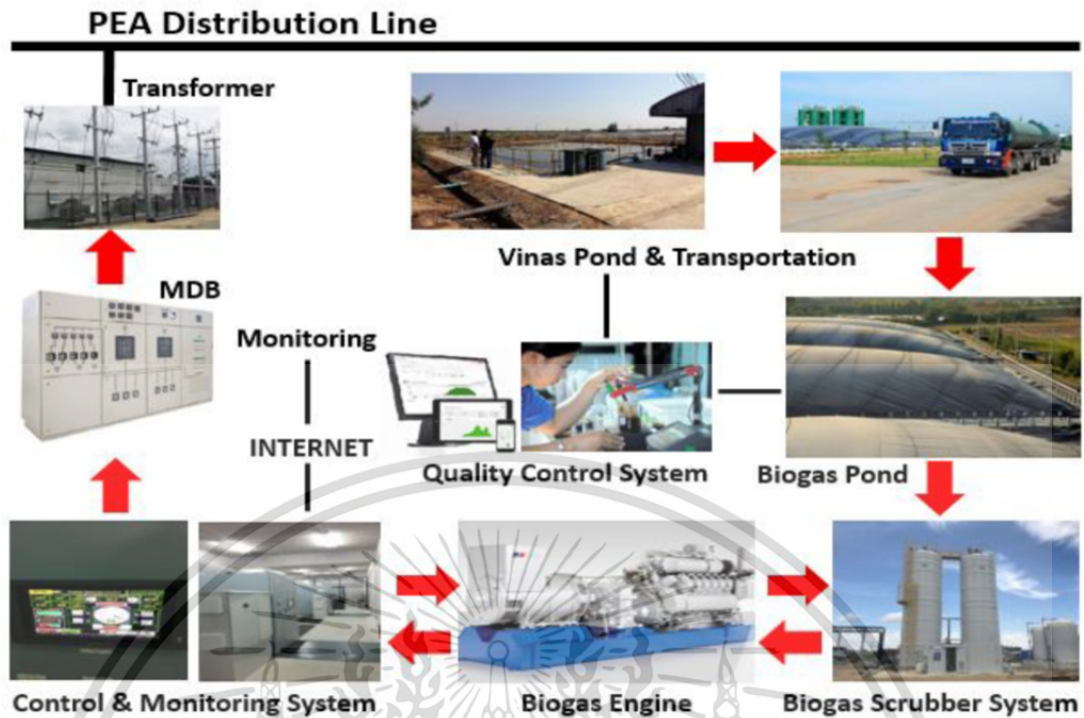
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสารละลายอินทรีย์ที่เติมลงในบ่อจะทำปฏิกิริยากับแบคทีเรียที่อยู่ในบ่อจนเกิดก๊าซ จากนั้นจึงนำก๊าซที่อยู่ในบ่อป้อนเข้าเครื่องผลิตไฟฟ้า แต่เนื่องจากก๊าซที่ได้จากการหมักมีทั้งก๊าซพิษประสงค์เช่นมีเทน(CH<sub>4</sub>) และไม่พึงประสงค์ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) จึงจะต้องทำการลดหรือดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้หมดไปหรือให้ลดลงได้มากที่สุดโดยใช้วิธีการดักหรือกรองก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ใช้สครับเบอร์ (Scrubber) เป็นตัวดักกรอง เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อสัมผัสกับน้ำหรือไอน้ำจะเปลี่ยนสภาพเป็นกรดซัลฟิวริกซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนสูง สามารถทำให้อายุการใช้งานของเครื่องสั้นลง ก๊าซที่ได้จากการหมักในบ่อและผ่านการดักกรองโดยสครับเบอร์จะมีความชื้นมาก จึงต้องมีการลดความชื้นและลดอุณหภูมิของก๊าซด้วยซิลเลอร์ (Chiller) ก่อนที่ก๊าซจะเข้าซิลเลอร์อุณหภูมิของก๊าซจะอยู่ที่ 35 องศา หลังออกจากซิลเลอร์อุณหภูมิจะลดลงเหลือประมาณ 16 องศา พร้อมด้วยน้ำที่ได้จากการดักความชื้น จากนั้นจะใช้โบลเวอร์ (Blower) เพื่อดูดก๊าซและเพิ่มแรงดันให้ก๊าซเคลื่อนไปสะสมที่ถังพักก๊าซ (Buffer Tank) และก๊าซที่อยู่ในถังก็จะไหลเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เป็นเชื้อเพลิงเพื่อทำการขับไดนาโมผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาปริมาณตามขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกส่งไปตู้ควบคุมไฟฟ้าต่างๆ GCP, MDB, MCC ในระดับแรงดัน 300 - 400 โวลต์ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จะถูกส่งจ่าย เพื่อขายให้การไฟฟ้าต่อไป

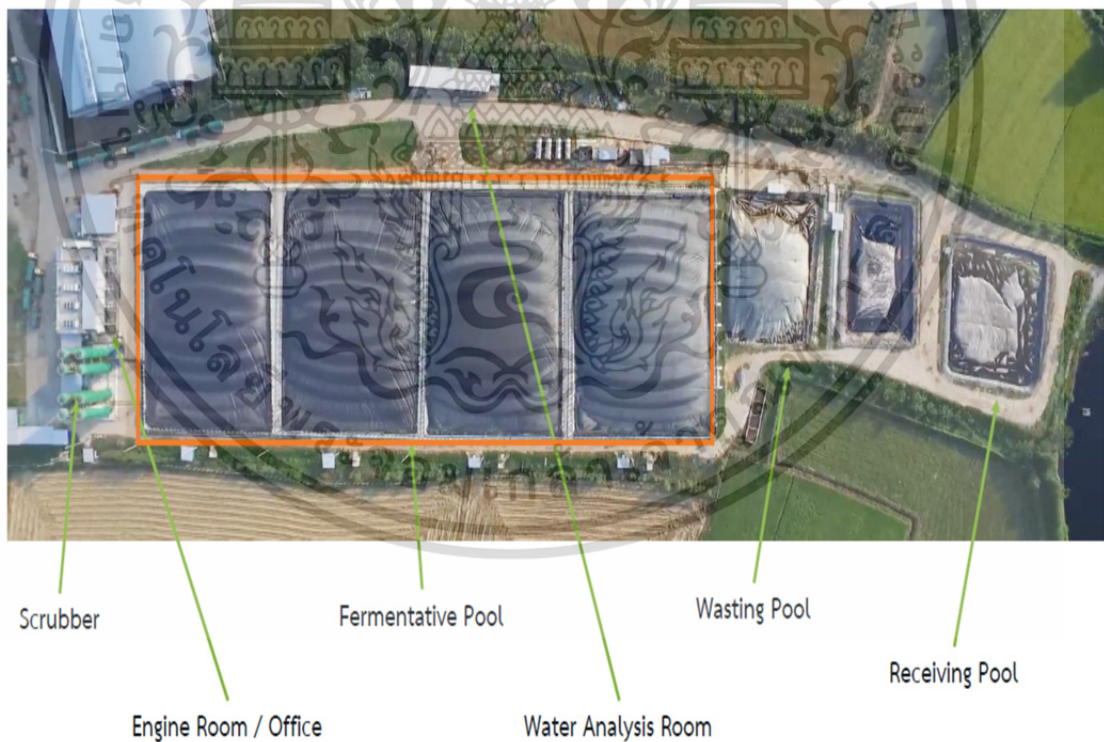


รูปที่ 2.18 โรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



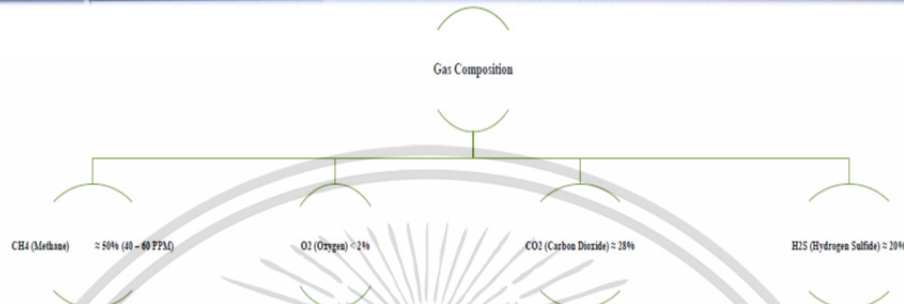
รูปที่ 2.19 ไดอะแกรมโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 2.20 ภาพมุมสูงสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

State Recent Values   History   Admin   Help   About				
Values   Settings   Extended Settings				
2212	CHP 1	CHP 2	CHP 3	CHP 4
CH4 (% Vol.)	21.8(10:02)	48.9(10:06)	0.1(10:11)	45.3(10:16)
O2 (% Vol.)	11.12(10:01)	1.83(10:06)	21.38(10:11)	1.43(10:16)
CO2 (% Vol.)	21.6(10:02)	39.9(10:06)	0.0(10:11)	41.9(10:16)
H2S hi (ppm)	44(10:03)	2355(10:09)	19(10:13)	140(10:18)



รูปที่ 2.21 การควบคุมโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ

## 2.4 โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรง DC (Direct Current) เมื่อได้รับแสงอาทิตย์ และเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้า เข้าอุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้า ชนิดต่อเข้าระบบจำหน่าย (Grid connected Inverter) เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรง เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ AC (Alternative current) ก่อนเชื่อมต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายไฟฟ้า

เซลล์แสงอาทิตย์แบ่งได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

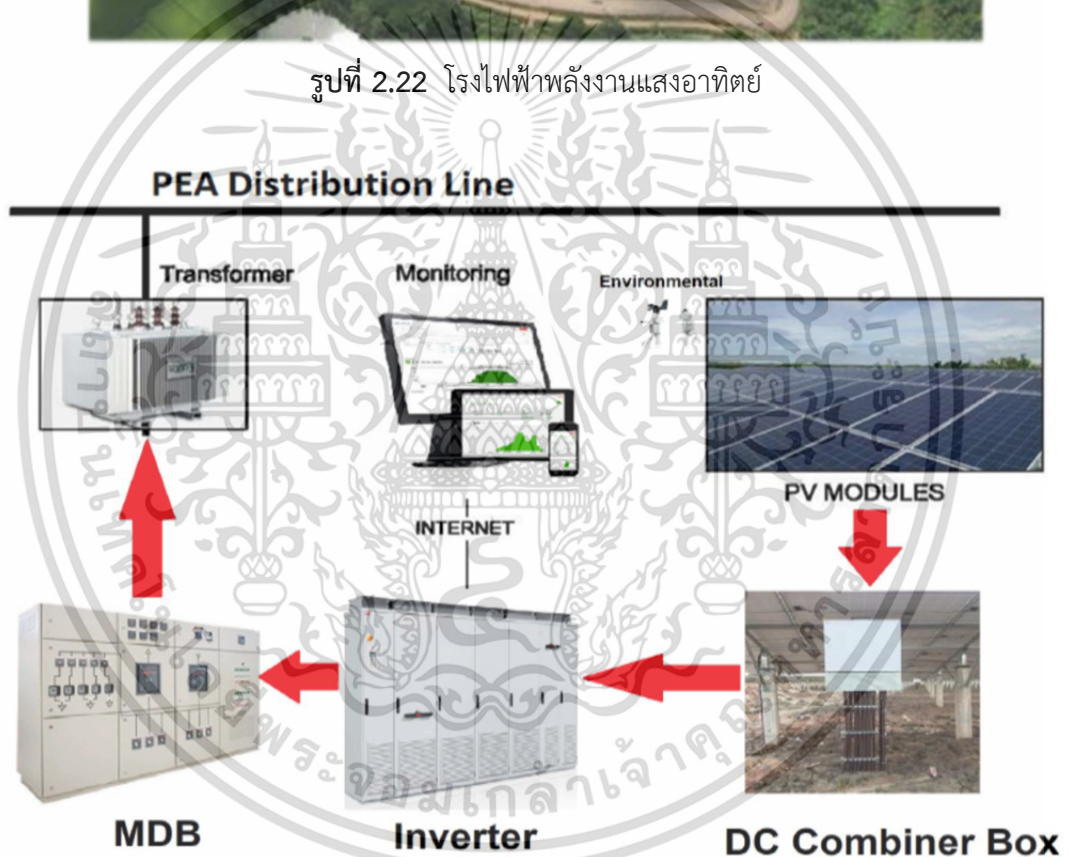
- เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน แบ่งตามลักษณะของรูปผลึกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ แบบผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) แบบผลึกรวม (Polycrystalline) และแบบฟิล์มบาง (Thin Film)
- เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารประกอบ เช่น สารประกอบแกลเลียมอาร์เซไนด์ แคดเมียมเทลเลอไรด์ คอปเปอร์อินเดียมไดอาร์เซไนด์ มีทั้งแบบผลึกเดี่ยว และผลึกรวม ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงแต่ราคาแพง

ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย Solar cell module สร้างจากเซลล์แสงอาทิตย์ต่อขนานกันเพื่อให้กระแสไฟฟ้ามาก หรือต่ออนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น Charge controller เป็นอุปกรณ์ควบคุมการประจุไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไปเก็บไว้ในแบตเตอรี่ในช่วงกลางวัน แล้วนำไฟฟ้าไปใช้งานในช่วงเวลากลางคืน Inverter อุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ Battery เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงไว้ใช้ในเวลาที่ต้องการ [11-13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

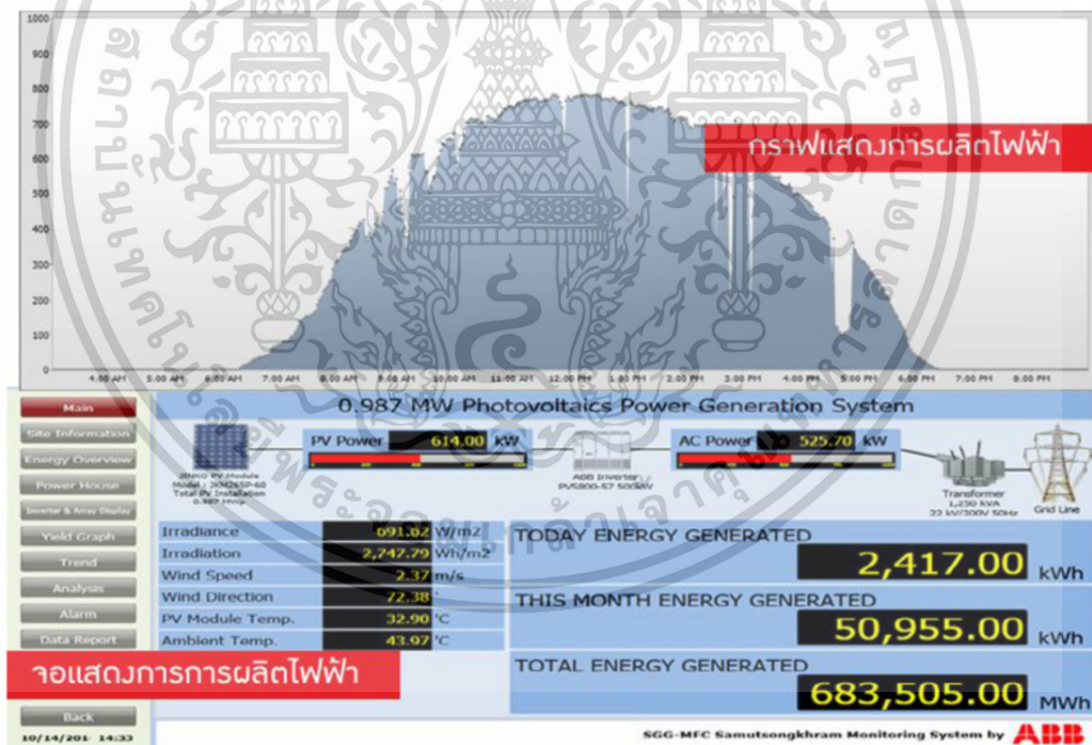


รูปที่ 2.23 ไดอะแกรมโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 การควบคุมโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.25 ผลการผลิตกระแสไฟฟ้าโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 สรุปท้ายบท

การพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทน ถือเป็นเรื่องที่สำคัญสำหรับยุคปัจจุบัน ทั้งในและต่างประเทศ ต่างให้ความสำคัญในการลงทุนทั้งในภาคการผลิตและภาคการวิจัยและพัฒนาพลังงานทางเลือกต่างๆ เช่น พลังงานชีวมวล พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานจากขยะมูลฝอย และพลังงานในคลื่นทะเล เป็นต้น

สำหรับประเทศไทย เพื่อลดการนำเข้าน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติจากต่างประเทศ ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (AEDP) รัฐบาลไทยมีเป้าหมายที่จะเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนของประเทศให้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายภายในปี พ.ศ. 2579 ทำให้ประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าพลังงานทางเลือกเกิดขึ้นมากมายในช่วงที่ผ่านมา ในการบริหารจัดการโรงไฟฟ้าพลังงานทางเลือกขนาดเล็กมากถึงขนาดเล็ก มักพบกับปัญหาด้านการบริหารจัดการทรัพยากร เช่น เชื้อเพลิง น้ำ แรงงานคน รวมถึงเครื่องจักร ที่ไม่สามารถดำเนินการกระบวนการได้เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากไม่สามารถใช้เครื่องจักรหรือระบบควบคุมที่ทันสมัยมีฟังก์ชันการทำงานที่ครอบคลุมในทุกด้านของกระบวนการผลิต ดังนั้นการนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งถือเป็นทางออกที่น่าสนใจ ในการออกแบบให้เครื่องจักรสามารถสื่อสารกับเครื่องจักรได้โดยตรง ลดความผิดพลาดอันเกิดจากผู้ดำเนินงาน สามารถนำเสนอข้อมูลที่วิเคราะห์ถึงความเสี่ยงต่อผู้มีอำนาจตัดสินใจได้อย่างทันท่วงที ทั้งนี้จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งอย่างสมดุลระหว่างการใช้ต้นทุนอย่างมีประสิทธิภาพกับคุณประโยชน์ที่เพิ่มขึ้นนั้น ถือเป็นประเด็นสำคัญที่จะต้องพิจารณาสำหรับการบรรลุผลสำเร็จ นำไปสู่ความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศไทยอย่างยั่งยืน

## บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ เช่น เทคโนโลยีตัวตรวจวัด เทคโนโลยีเอ็ดจ์คอมพิวติ้ง (Edge Computing) โดยใช้เครื่องควบคุมเชิงตรรกะที่สามารถโปรแกรมได้ (PLC) และเทคโนโลยีระบบคลาวด์ในปัจจุบัน รวมถึงเทคโนโลยีการผลิตน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน

### 3.1 ตัวตรวจวัด

#### 3.1.1 ตัวตรวจวัดคุณภาพของน้ำ

##### 3.1.1.1 ตัวตรวจวัดค่าพีเอช (pH)



รูปที่ 3.1 ตัวตรวจวัดค่าพีเอช (pH) สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ

ตัวตรวจวัดค่าพีเอช (pH) รุ่น Low Cost Submersion and In-Line pH Electrodes ของ Sensorex วัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ด้วยหลักเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด แปรผันตามค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ซึ่งหมายถึงค่าพีเอชของสารละลาย ย่านการวัดมีค่า 0-14 pH วัสดุทำจากโพลีเมอร์ไรทอน (Ryton) ข้อกำหนดอุณหภูมิและความดันที่ 0-80 °C /70 psig



รูปที่ 3.2 ตัวควบคุมพีเอช (pH) สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวควบคุมพีเอช (pH) ของ Black Stone ทำหน้าที่แปลงสัญญาณการวัดค่าพีเอช (pH) จากตัวตรวจวัด เป็นสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA ที่ความแม่นยำ  $\pm 0.20$  mA แหล่งจ่ายไฟ 115/230 Vac หรือ 12 Vdc ย่านการวัด 0-14 pH และให้สัญญาณดิจิทัลเอาต์พุตเพื่อควบคุมการทำงานเปิด-ปิดปั๊มสารเคมี ตามค่าพีเอช (pH) เป้าหมาย ที่กำหนดไว้

### 3.1.1.2 ตัวตรวจวัดค่าความขุ่น (Turbidity)



รูปที่ 3.3 ตัวตรวจวัดค่าความขุ่น (Turbidity) สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ

ตัวตรวจวัดค่าความขุ่น (Turbidity) วัดความขุ่นของน้ำโดยใช้หลักการกระเจิงของแสงเมื่อส่องผ่านสารละลาย ย่านการวัด 0-40 NTU ที่ความละเอียด 0.1 สำหรับสเกล 100-999 NTU ความแม่นยำ % ของย่านการวัด ตัวตรวจวัดสแตนเลสสตีล IP 68 กำลังไฟ  $\pm 12$  Vdc สัญญาณเอาต์พุต 4-20 mA

### 3.1.1.3 ตัวตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าหรือทีดีเอส (Conductivity / TDS)



รูปที่ 3.4 ตัวตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าหรือทีดีเอสสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ

ตัวตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าหรือทีดีเอส (Conductivity / Total Dissolved Solids : TDS) เป็นค่าการวัดสารอนินทรีย์และอินทรีย์ทั้งหมดที่มีอยู่ในของเหลว เช่น โมเลกุล ไอออนหรืออนุภาคที่ละลายทั้งหมดมีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน มีหน่วยเป็น (มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยค่า TDS เป็นค่าที่บอกถึงคุณภาพน้ำสำหรับแม่น้ำลำธารและทะเลสาบ ลักษณะของน้ำดื่มและเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณสารปนเปื้อน ด้วยหลักการวัดแบบ Contacting Electrode Method ที่กระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างแผ่นจะเป็นสัดส่วนกับความต้านทาน (หรือการนำไฟฟ้า) ของสารละลายที่ต้องการวัด ย่านการวัด 0.5 – 400 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) หรือ 0.25 – 200 (ppm หรือ  $\text{mg}/\text{L}$ ) อุณหภูมิ 0-70° C ความดัน 0 – 100 PSIG วัสดุทำจากอีพ็อกซี (Epoxy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ตัวควบคุมค่าความนำไฟฟ้าหรือทีดีเอสสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ

ตัวควบคุมค่าความนำไฟฟ้าหรือทีดีเอส ของ Black Stone ทำหน้าที่แปลงสัญญาณการวัดค่าความนำไฟฟ้าหรือทีดีเอสจากตัวตรวจวัดเป็นสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA ย่านการวัด 0.0 – 100.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  หรือ 0.0 – 50 ppm (mg/L) ที่ความแม่นยำ  $\pm 2\%$  ของย่านการวัด ความละเอียด 0.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  มีการชดเชยค่าอุณหภูมิในย่าน 5 - 50°C ที่  $\beta = 2\%/^{\circ}\text{C}$  โดยมีเอาท์พุทรีเลย์ 1 ตัว ที่กระแส 2 แอมป์ แหล่งจ่ายไฟที่ 12 VDC

### 3.1.2 ตัวตรวจวัดความดัน



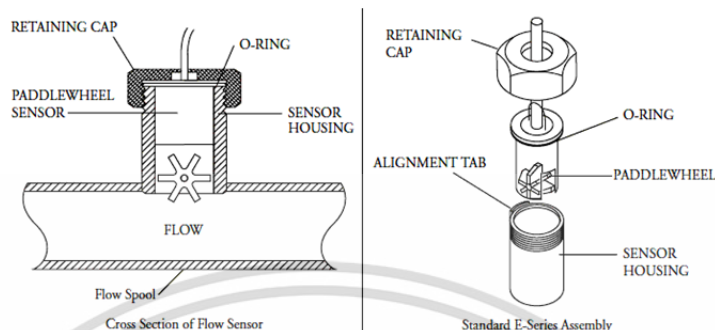
รูปที่ 3.6 ทรานสมิตเตอร์ความดัน (Pressure Transmitter) สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ

ทรานสมิตเตอร์ความดัน ทำหน้าที่แปลงค่าแรงดันของไหลให้เป็นค่าสัญญาณมาตรฐาน 4-20mA โดยหลักการของเพียโซรีซิสทีฟ (Piezo-resistive) ที่ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันที่กระทำต่อเซลล์การวัด ย่านการวัด 0-6 Bar และ 0-16 Bar อุณหภูมิกระบวนการ -25 ถึง +125 °C อุณหภูมิสภาพแวดล้อม -25 ถึง +85 °C ระยะเวลาการตอบสนอง  $\leq 10$  ms วัสดุตัวตรวจวัดทำจากสแตนเลสสตีล 304 วัสดุไดอะแฟรมเป็นเซรามิก ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  96 %) ซีล FKM (Viton) แหล่งจ่ายไฟ 2-wire DC 8–32 V สัญญาณเอาท์พุท 4–20 mA 2-wire

### 3.1.3 ตัวตรวจวัดอัตราการไหล

ตัวตรวจวัดอัตราการไหลชนิดแพดเดิลวีล (Paddlewheel Flowmeter) ที่ให้พัลส์เอาท์พุทที่มีความถี่แปรตามความเร็วของของไหลภายในท่อ มีเอาท์พุทเป็นสวิทช์ (Flow Switch) สัญญาณพัลส์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Multi-functional Pulse) หรือ สัญญาณ 4 to 20 mA ย่านการทำงานที่ 0.1 m/s ถึง 6 m/s ขนาดท่อ ½ - 8 นิ้ว ค่าความเที่ยงตรง  $\pm 0.5\%$  ของย่านการวัด @ 25 °C เวลาการตอบสนองคือ 100 ms



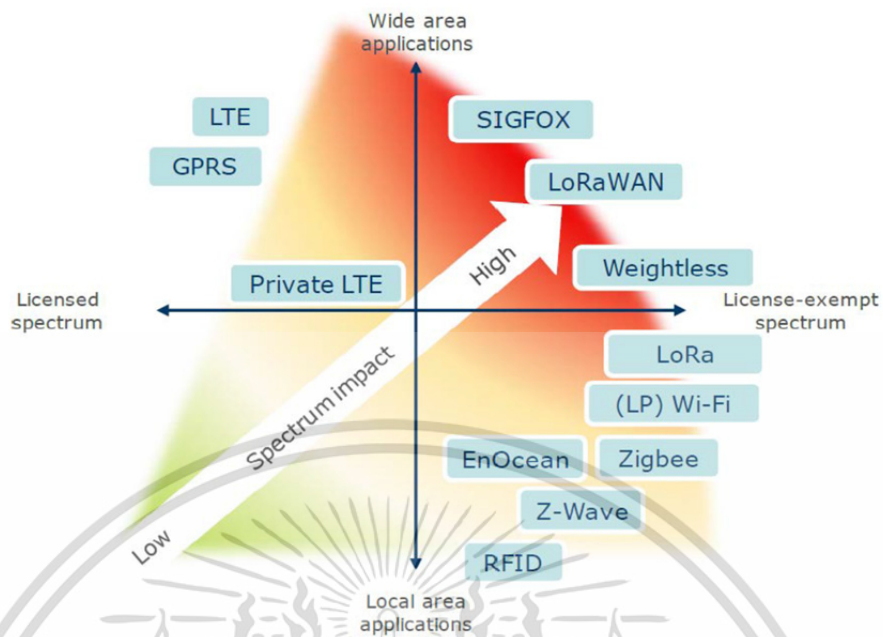
รูปที่ 3.7 ตัวตรวจวัดอัตราการไหล (Paddle Wheel Flow Sensor)

### 3.1.4 เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับตัวตรวจวัดในอุตสาหกรรม

แนวคิดของอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง Internet of things (IoT) มีจุดเริ่มต้นจากการพัฒนาของ Kevin Ashton ในปี ค.ศ. 1999 โครงการวิจัยเกี่ยวกับโครงข่ายเชื่อมโยงข้อมูลจากฉลาก Radio-frequency identification (RFID) เพื่อประโยชน์ทางการผลิตและการจัดการ โดย Auto-ID Center แห่งมหาวิทยาลัย Massachusetts Institute of Technology (MIT) จากอดีตถึงปัจจุบันเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ได้ถูกพัฒนาและประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางเพราะความพร้อมความก้าวหน้าทางการสื่อสาร หน่วยประมวลผลสมองกลฝังตัว รวมถึงอัลกอริทึมการวิเคราะห์และประมวลผล เกิดระบบอัจฉริยะ (Smart) ต่างๆ เช่น Smart device Smart grid Smart automation Smart home Smart Agriculture ที่มีการเชื่อมโยงทุกอุปกรณ์ (Things) เข้าสู่เครือข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อให้ผู้ใช้สามารถรับรู้ถึงข้อมูลสำคัญและสามารถสั่งการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ได้

สำหรับเทคโนโลยีการเชื่อมต่อของอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในปัจจุบัน ได้ถูกพัฒนาให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันตามความต้องการสำหรับงานประยุกต์ต่างๆ ที่ช่วงความถี่การสื่อสาร 13.56 MHz ถึง 2.4 GHz มีข้อได้เปรียบในด้านของปริมาณการรับ-ส่งข้อมูล การกินพลังงาน ความสามารถในการครอบคลุมพื้นที่ในการเชื่อมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

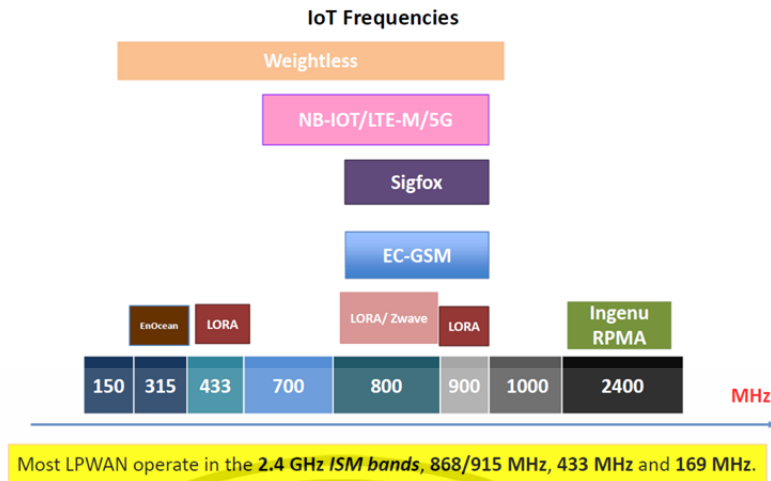


รูปที่ 3.8 คุณสมบัติที่แตกต่างกันของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

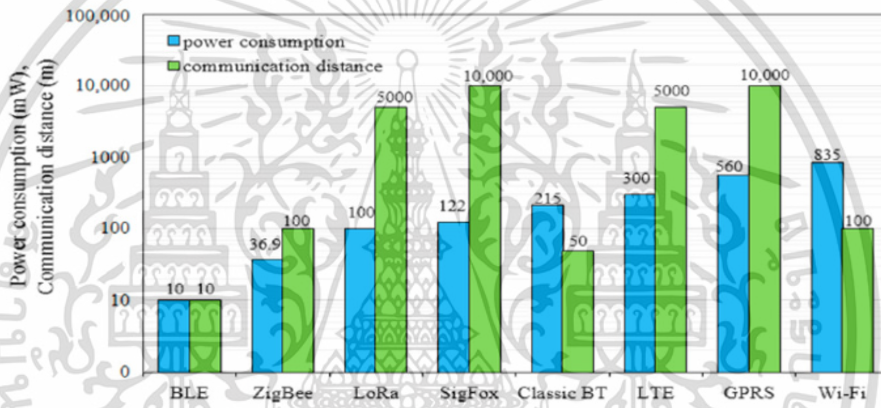
Technologies	SIGFOX	LORA	Weightless	NB-IOT	LTE-M	EC-GSM	5G
Range	< 13 km	< 11 km	< 5 km	< 15 km	< 11 km	< 15 km	< 15 km
Spectrum	Unlicensed 868MHz 915MHz	Unlicensed 433MHz	W: 470-790MHz N: 868 - 915 MHz P: 169/433/470/780/868/915/923 MHz	Licensed 700-900 MHz	Licensed 700-900 MHz	Licensed 800-900 MHz	Licensed 700-900 MHz
bandwidth	100 kHz	< 500 kHz	W: 5MHz N: Sub-GHz P: 12,5 kHz	200 kHz or shared	1.4 MHz or shared	2.4 MHz or shared	Shared
Data Rate	< 100 kbps	< 10 kbps	W: 1kbits/s to 10Mbits/s N: 500 bits/s P: 100Kbits to 200Kbits	< 150 kbps	< 1 Mbps	10 kbps	< 1 Mbps
Battery life	>10 years						
Availability	Today	Today	Today	2016 (standard)	2016 (standard)	2016 (standard)	Beyond 2020

รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายสำหรับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

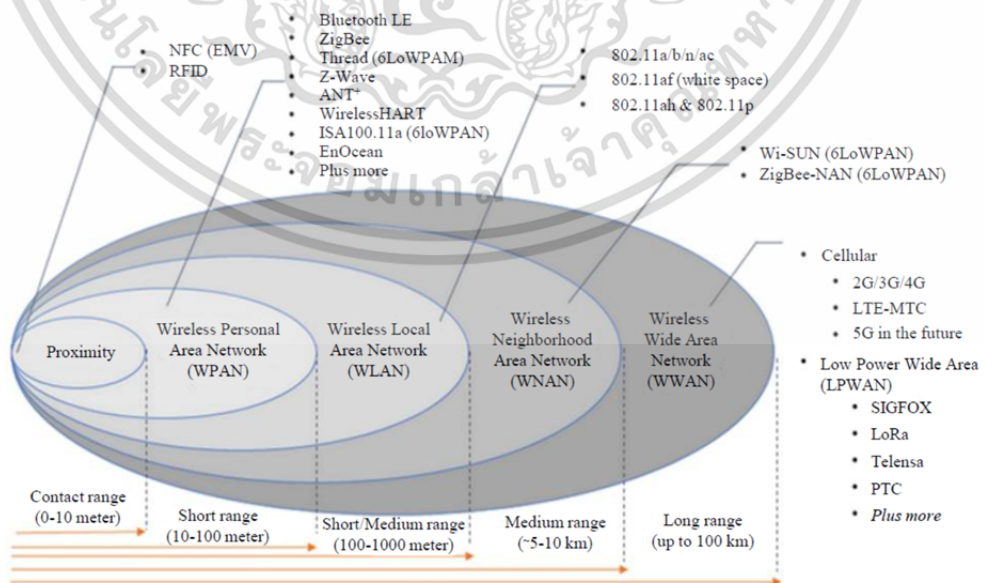
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การเปรียบเทียบทางด้านความถี่



รูปที่ 3.11 การเปรียบเทียบทางด้านพลังงาน

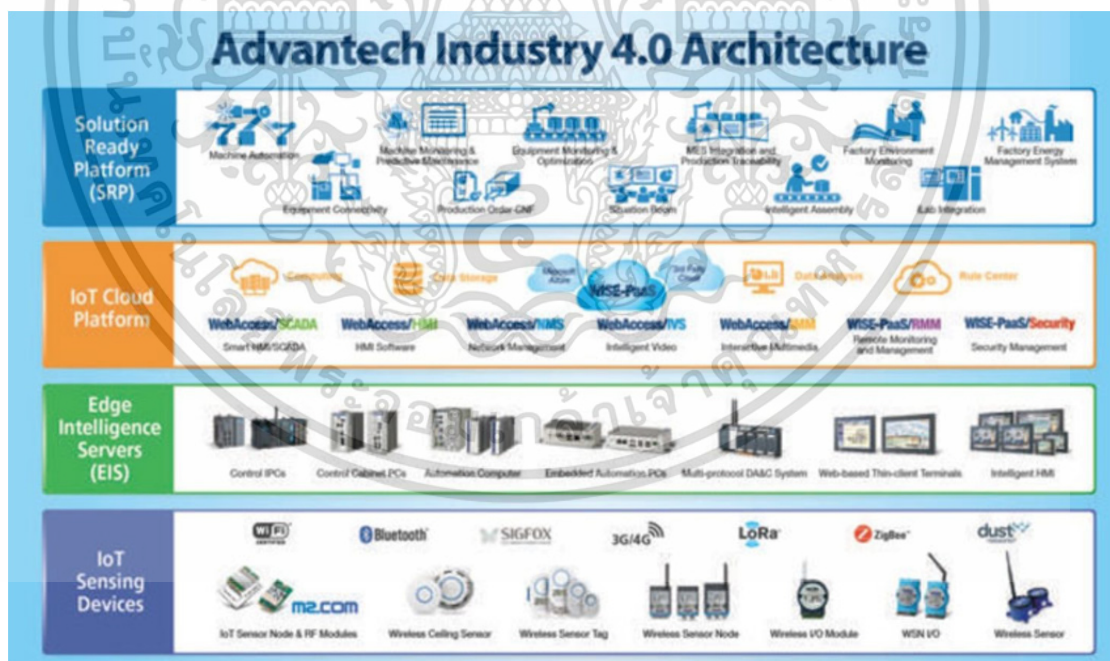


รูปที่ 3.12 การเปรียบเทียบโดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความก้าวหน้าของระบบอิเล็กทรอนิกส์ และความชาญฉลาดที่มีในอิเล็กทรอนิกส์ฝังตัว ความสามารถในการเชื่อมต่อสื่อสารข้อมูลที่ดีขึ้น จากการใช้เทคโนโลยีระบบไร้สาย อีเทอร์เน็ต และ อินเทอร์เน็ต รวมทั้งความก้าวหน้าด้านแพลตฟอร์มการบันทึก วิเคราะห์ข้อมูลในแบบของข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) ทำให้หลายประเทศทั่วโลกต่างมุ่งสู่การเปลี่ยนแปลงในยุคดิจิทัล เพื่อสร้างความก้าวหน้าให้กับเศรษฐกิจและสังคม สำหรับภาคอุตสาหกรรมพลังงานก็เช่นเดียวกัน แนวโน้มหรือความสนใจพุ่งเป้าไปที่การนำ Industrial Internet of Things (IIoT) มาใช้จะเพิ่มความฉลาดของระบบพลังงานและระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านพลังงาน ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการพลังงานจากท่อส่งอัจฉริยะ (Smart Pipelines) ถึงมิเตอร์อัจฉริยะ (Smart Meters) และโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) รวมถึงการขยายขีดจำกัดด้านความปลอดภัยให้มากขึ้น นอกจากนี้ IIoT จะช่วยผลักดันด้านการกระจายพลังงานและการสื่อสารผ่านโครงข่ายหรือกริดให้กว้างขึ้นแล้ว ยังเป็นการปรับปรุงกระบวนการดำเนินการหลัก ๆ ได้แก่ เรื่องของการตรวจสอบสถานะการทำงานได้จากระยะไกล การซ่อมบำรุงแบบพยากรณ์ได้ การควบคุมที่ล้ำหน้าด้านความปลอดภัย นำไปสู่ความก้าวหน้าแบบองค์รวมของระบบพลังงานอัจฉริยะ หรือ Smart Energy

ตัวอย่างเทคโนโลยีการวัดและควบคุมโดยอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในอุตสาหกรรม ผู้ผลิตจำนวนมากได้มุ่งพัฒนาโมดูลการสื่อสารที่สนับสนุนโปรโตคอลการสื่อสารใน Data Link Layer สำหรับ IoT เช่น WiFi, Bluetooth, SigFox, 3G/4G/ LoRa, Zigbee เป็นต้น หากเพียงแต่ราคาสำหรับการติดตั้งต่อจุดยังอยู่ในระดับสูงเนื่องจากเป็นเกรดที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐานอุตสาหกรรม



รูปที่ 3.13 สถาปัตยกรรมโครงข่ายอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับอุตสาหกรรม

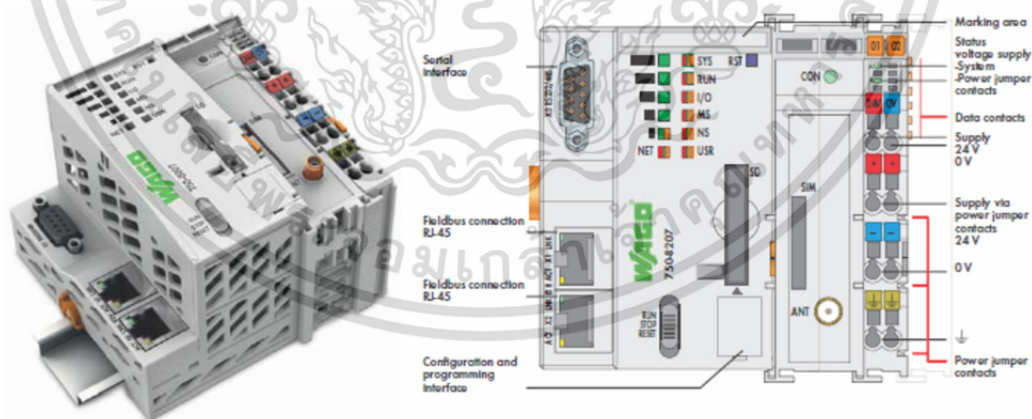
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 เอดจ์คอมพิวติ้ง (Edge Computing)

เอดจ์คอมพิวติ้ง (Edge Computing) หมายถึง การประมวลผลและสั่งงานที่ตัวอุปกรณ์ภายในเครือข่ายภายในพื้นที่ระยะใกล้ (Local Area Network : LAN) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์วาก์ (WAGO PLC) ทำงานเป็นเอดจ์คอมพิวติ้ง (Edge Computing) ซึ่งมีสมรรถนะสูงในการควบคุมกระบวนการทำงานโดยโปรแกรมที่พัฒนาตามมาตรฐาน IEC 61131-3 อีกทั้งมีความยืดหยุ่นในการประมวลผลและแสดงผลข้อมูล สามารถเชื่อมต่อกับระบบคลาวด์มาตรฐานด้วยมาตรฐานความปลอดภัยสำหรับระบบอินเทอร์เน็ต (SSL, SSH, OpenVPN และไฟร์วอลล์) โดยทำงานบนระบบปฏิบัติการ Linux® และโปรแกรม e! COCKPIT [14]

#### 3.2.1 คุณสมบัติโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์วาก์ (WAGO PLC) รุ่น PFC200

อุปกรณ์โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์วาก์ (WAGO PLC) รุ่น PFC200 มีระบบปฏิบัติการฝังตัว Linux® ที่มีความปลอดภัย สามารถรองรับการทำงานสำหรับควบคุมระบบอัตโนมัติ และมีความยืดหยุ่นในการใช้โอเพนซอร์สโค้ดที่ปรับเปลี่ยนตามความต้องการเฉพาะของผู้ใช้ได้ นอกเหนือจากควมมีเสถียรภาพที่สูงแล้ว ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในฟังก์ชันการทำงานอื่นได้โดยง่ายผ่านชุมชนโอเพนซอร์สทำให้สามารถปรับตัวเข้าได้กับการประยุกต์ใช้อื่นๆ ในอนาคต นอกจากนี้อุปกรณ์ WAGO PFC200 รองรับพอร์ตการเชื่อมต่อที่สำคัญต่างๆ เช่น อนาล็อกอินพุต อนาล็อกเอาต์พุต ดิจิตอลอินพุต ดิจิตอลเอาต์พุต และยังมีพอร์ต RJ-45 และ RS-232 / RS-485 จำนวนสองพอร์ต มีอินเตอร์เฟซ ETHERNET ที่สามารถกำหนดค่าได้เพื่อสร้างเครือข่ายแยกจาก PLC ได้สองเครือข่าย พอร์ต ETHERNET สองพอร์ตสามารถทำหน้าที่เป็นสวิตช์ มีช่องเสียบ SD การ์ด เพื่อสนับสนุนฟังก์ชันการจัดเก็บข้อมูลบนการ์ด SD การแสดงภาพแบบเว็บ หน่วยประมวลผลบน PLC ใช้โปรเซสเซอร์ Cortex A8 ขนาด 600 เมกะเฮิร์ตซ์ พร้อมด้วยแรม 256 MB



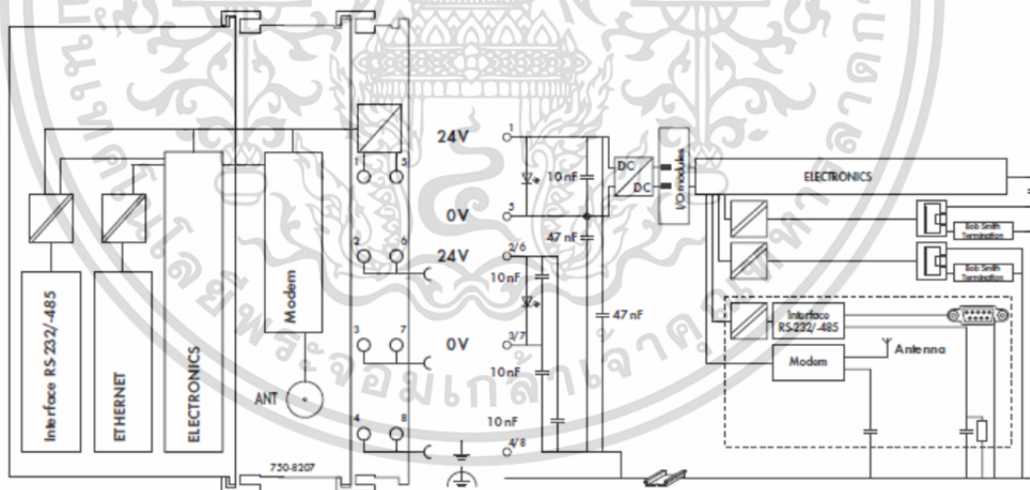
รูปที่ 3.14 อุปกรณ์โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์วาก์ (WAGO PLC)

สำหรับการเชื่อมต่อกับเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ สามารถเชื่อมต่อผ่านทาง Virtual Private Network (VPN) ที่มีการเข้ารหัสและสนับสนุนทั้งโปรโตคอล OpenVPN และ IPsec โดย VPN เชื่อมต่อกับคอนโทรลเลอร์ WAGO PLC สู่เครือข่ายผ่าน GPRS/ 3G Router และส่งข้อมูลที่เข้ารหัสทั้งหมดผ่าน SSL และ TLS ปกป้องข้อมูลจากการเข้าถึงโดยไม่ได้รับอนุญาต VPN สามารถกำหนดค่าได้โดยใช้การจัดการแบบเว็บ Web-Based Management บนตัวคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติ WAGO PLC PFC200

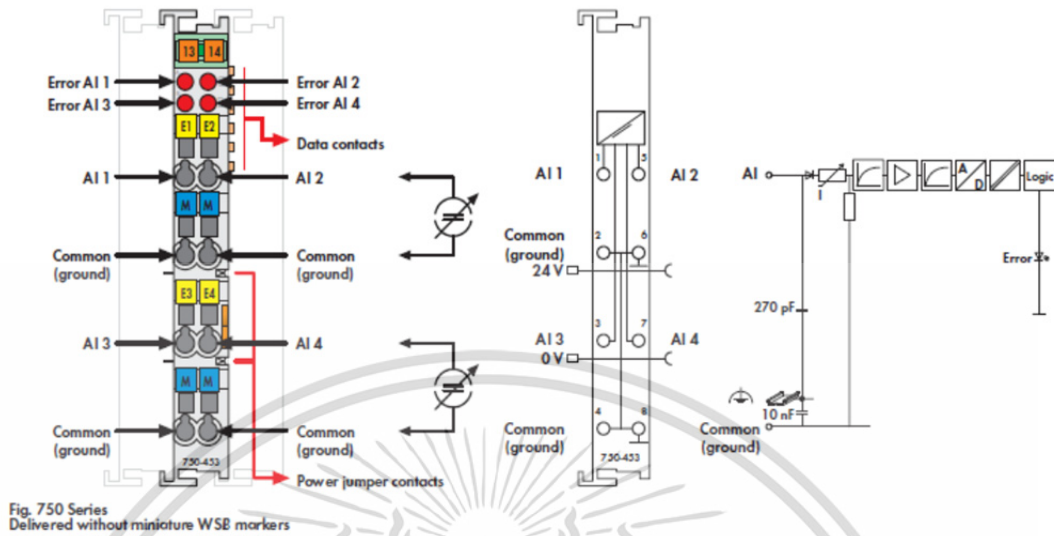
CPU	Cortex A8, 600 MHz
Operating system	Real-time Linux
Main memory (RAM)	256 Mbytes
Internal memory (flash)	256 Mbytes
ETHERNET	2 x RJ-45 (switched)
Baud rate	10/100 Mbit/s; 10Base-T/100Base-TX
Interface (serial)	RS-232/-485 (switchable)
Wireless technology	GSM/Edge/UMTS/HSPA+
Protocols	HTTPS, SSH, MODBUS (TCP, UDP, RTU)
Safety	OpenVPN, IPsec, firewall
IEC 61131-3	IL, LD, FBD (CFC), ST, FC
Memory card	SD and SDHC up to 32 GB
Number of I/O modules (per node)	64
with bus extension 250	250
Power supply	24 V DC (-25 % ... +30 %)
Degree of protection	IP20 acc. to DIN 60529
Operating temperature	0 °C ... +55 °C



รูปที่ 3.15 ไตอะแกรม WAGO PLC PFC200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

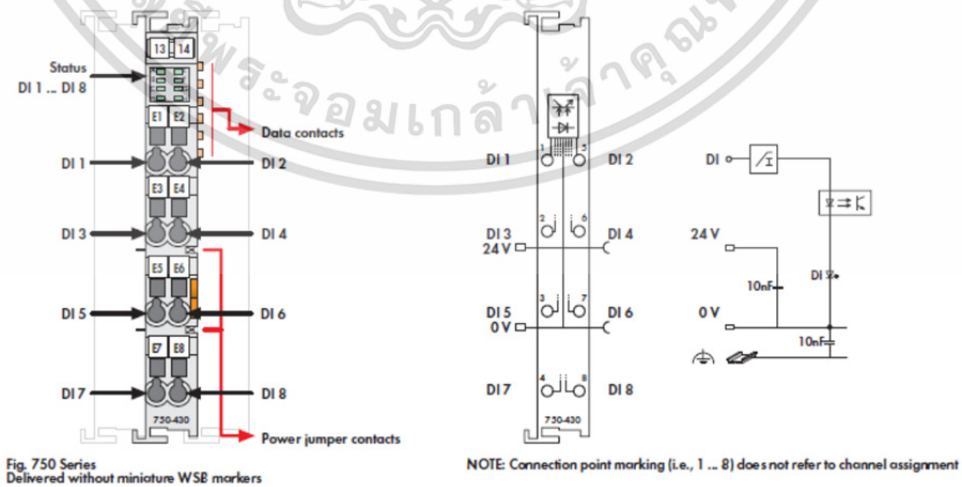
**4-Channel Analog Input Module 0/4-20 mA**  
Single-ended (S.E.)



รูปที่ 3.16 โมดูลอนาล็อกอินพุท 4-20mA 4 ช่อง

ในการรับค่าสัญญาณอินพุทจากตัวตรวจวัด เพื่อการแสดงผลและประมวลผล WAGO PLC PFC200 ใช้โมดูลอนาล็อกอินพุท 4-20mA โดยสัญญาณมีความละเอียด 12 bits Conversion time 10 มิลลิวินาที ค่าความผิดพลาดน้อยกว่า  $\pm 0.2\%$  ของย่านการวัดสูงสุด มาตรฐานการรับรอง CE, KC, ANSI/ISA 12.12.01, TÜV 07 ATEX 554086 X, IECEx TUN 09.0001 X นอกจากนี้ในการวัดค่าอัตราการไหลจากตัวตรวจวัดอัตราการไหล (Paddle Wheel Flow Sensor) จะใช้โมดูลดิจิตอลอินพุท 24V DC 8 ช่อง Max. Switching frequency 2 kHz ในการรับสัญญาณพัลส์เพื่อคำนวณหาค่าปริมาตรของไหลโดยรวม

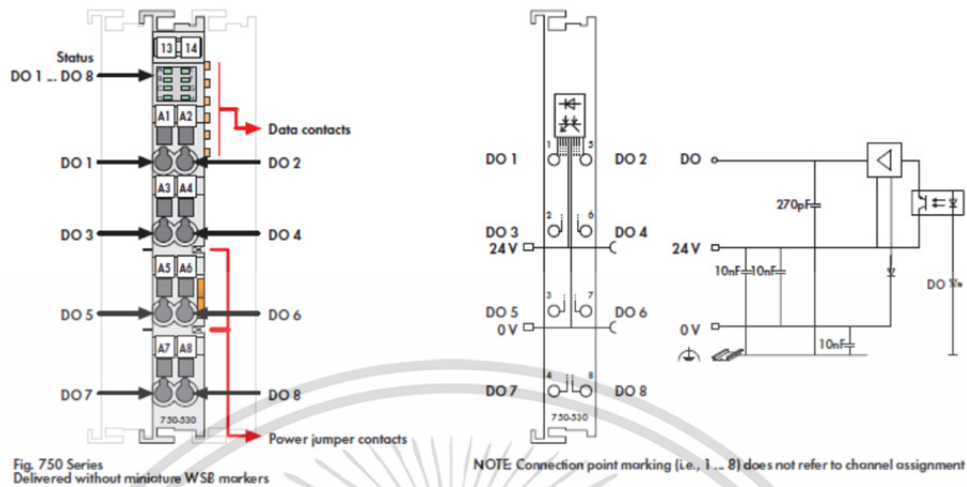
**8-Channel Digital Input Module 24 V DC**  
1-conductor connection; high-side switching



รูปที่ 3.17 โมดูลดิจิตอลอินพุท 24V DC 8 ช่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

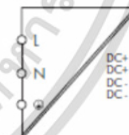
**8-Channel Digital Output Module 24 V DC**  
Short-circuit protected; high-side switching



รูปที่ 3.18 โมดูลดิจิทัลเอาต์พุต 24V DC 8 ช่อง

สำหรับสัญญาณควบคุมในกระบวนการบำบัดน้ำ เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อเปิด-ปิด ปั๊มน้ำ จึงใช้รูปที่ 3.4 โมดูลดิจิทัลเอาต์พุต 24V DC 8 ช่อง ใช้กระแสไฟฟ้า 25mA แรงดันไฟฟ้าหน้าสัมผัส 24 V DC ความถี่สวิชชิงสูงสุด 2 kHz มาตรฐานการรับรอง CE, KC, ANSI/ISA 12.12.01, TÜV 07 ATEX 554086 X, IECEx TUN 09.0001 X

**Switched-Mode Power Supply, 1-Phase**  
EPSITRON® ECO Power



รูปที่ 3.19 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์โหมด 1 เฟส

แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์โหมด 1 เฟส ใช้แรงดันไฟฟ้าอินพุต 240 VAC ความถี่ 47 - 63 Hz แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 24 VDC แรงดันไฟฟ้ากระแสเพี้ยน < 100 mV (peak-to-peak) ค่า Efficiency 86 % typ. (230 VAC) พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย PV 8.3 W อุณหภูมิทำงาน -10 °C - +70°C ที่ค่าความชื้น 95% การติดตั้งแบบ DIN-rail และมี IP20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 IEC 61131-3

เนื่องจากการเขียนโปรแกรม PLC จากหลายผู้ผลิตมีมาตรฐานที่ต่างกัน เพื่อความเชื่อมโยงและเข้ากันได้ของระบบควบคุม คณะกรรมการระดับประเทศและระดับนานาชาติ ได้ถูกแต่งตั้งขึ้น ในปี พ.ศ. 2522 เพื่อทำร่างมาตรฐาน PLC โดยในปัจจุบันมาตรฐาน IEC 61131 ประกอบด้วย 5 หมวดหมู่ ได้แก่

1. General information
2. Hardware and requirements for testing
3. Programming languages
4. User interface
5. Communications

สำหรับ มาตรฐาน IEC 61131-3 เป็นมาตรฐานชนิดของภาษาและข้อมูลสำหรับการพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงานของ PLC เช่น การระบุชนิดในการประกาศตัวแปรที่ใช้ในการเก็บข้อมูลหรือประมวลผล เป็น BOOL, INT หรือ REAL เป็นต้น [15]

*Data Types standard with IEC 61131-3*

No.	Keyword	Data Type	Bits
1	BOOL	Boolean	1
2	SINT	Short integer	8
3	INT	Integer	16
4	DINT	Double integer	32
5	LINT	Long integer	64
6	USINT	Unsigned short integer	8
7	UINT	Unsigned integer	16
8	UDINT	Unsigned double integer	32
9	ULINT	Unsigned long integer	64
10	REAL	Real numbers	32
11	LREAL	Long reals	64
12	TIME	Duration	32
13	DATE	Date (only)	16
14	TIME_OF_DAY or TOD	Time of day (only)	32
15	DATE_AND_TIME or DT	Date and time of day	64
16	STRING	Character string	8
17	BYTE	Bit string of length 8	8
18	WORD	Bit string of length 16	16
19	DWORD	Bit string of length 32	32
20	LWORD	Bit string of length 64	64

รูปที่ 3.20 IEC 61131-3 มาตรฐานชนิดของข้อมูล

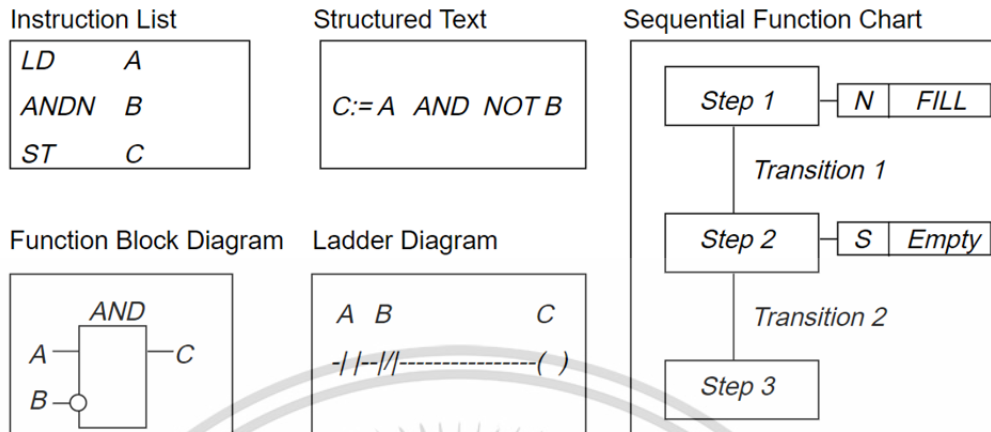
นอกจากนี้มาตรฐาน IEC 61131-3 สำหรับชนิดของภาษาในการพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงานของ PLC ได้มีการกำหนดไว้ 5 ภาษา คือ

1. Structured Text—ST
2. Function Block Diagram—FBD
3. Ladder Diagram—LD
4. Instruction List—IL
5. Sequential Function Chart—SFC

แต่ละภาษาจะมีรูปแบบและโครงสร้างทางภาษาที่แตกต่างกัน โดย Ladder, Function Block และ Sequential Function Chart จะเป็นภาษารูปภาพ ในขณะที่ Structured Text และ Instruction List เป็นภาษาตัวอักษร ซึ่ง IEC 61131-3 จะกำหนดรูปแบบรวมถึงองค์ประกอบต่างๆของแต่ละภาษา ให้มีลักษณะเป็นมาตรฐานเดียวกัน เช่น วิธีการประกาศตัวแปร การสร้างและเรียกใช้ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บล็อก เพื่อให้โปรแกรมที่พัฒนาสามารถใช้กับ PLC รุ่นใดและจากผู้ผลิตใดก็ได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนโปรแกรมใหม่



รูปที่ 3.21 5 รูปแบบภาษาตามมาตรฐาน IEC 61131-3

```

PROGRAM PLC_PRG
VAR
  Index      : INT := 1;
  Parameter  : ARRAY [0..10] OF REAL;
  Data AT %MW5 : ARRAY [0..10] OF REAL;
END_VAR
IF %MX0.1 THEN
  %MW0 := 0;
  %MX0.2 := %MX20.0;
ELSIF NOT %MX3.0 THEN
  %MW0 := 10;
END_IF;
FOR Index := 1 TO 10 BY 1 DO
  Parameter[Index] := Data[Index];
  Index := Index + 1;
END_FOR;

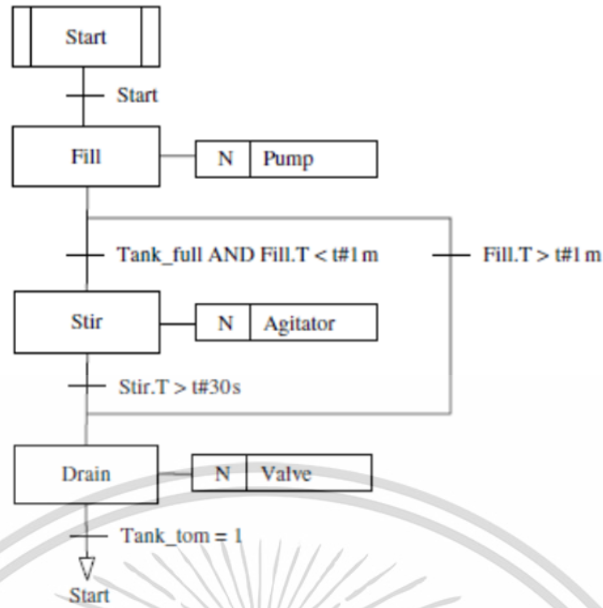
```

รูปที่ 3.22 ตัวอย่างภาษา Structured Text - ST



รูปที่ 3.23 ตัวอย่างภาษา Ladder Diagram - LD

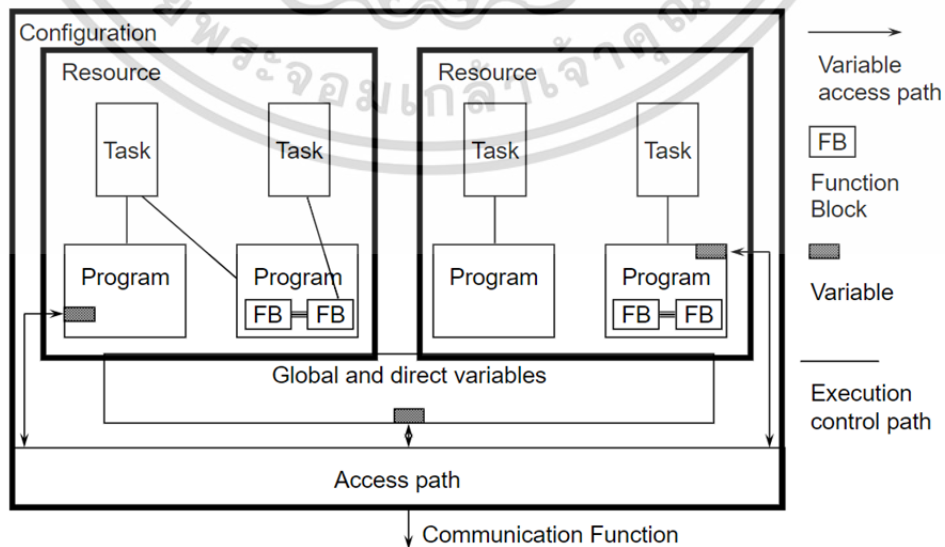
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 ตัวอย่างภาษา Sequential Function Chart - SFC

ภาษา Structured Text—ST เป็นภาษาที่มีพื้นฐานจากภาษา Pascal ซึ่งประกอบด้วย นิพจน์และคำสั่ง เช่น IF.....THEN.....ELSE, FOR....., WHILE..... ภาษา Function Block Diagram—FBD เป็นภาษาของฟังก์ชันบล็อกที่สร้างขึ้นเพื่อการประมวลผลเฉพาะอย่าง เช่น ฟังก์ชันบล็อกการดำเนินการทางลอจิก ฟังก์ชันบล็อกตัวควบคุมพีไอดี เป็นต้น

ภาษา Ladder Diagram—LD เป็นภาษากากราฟิกมีพื้นฐานมาจากวงจรควบคุมแบบรีเลย์ หรือวงจรไฟฟ้า สื่อถึงสวิตช์หน้าสัมผัส หรือขดลวด ภาษา Instruction List—IL เป็นภาษาที่เขียนในรูปข้อความ คล้ายภาษาแอสซิมบลี ซึ่งภายในคำสั่งจะประกอบด้วย ส่วนปฏิบัติการ (Operator) และส่วนที่ถูกดำเนินการ (Operand) ภาษา Sequential Function Chart—SFC เป็นภาษาที่ทำงานแบบซีแควนซ์ ประกอบด้วย คำสั่งในการปฏิบัติการในแต่ละขั้นตอน Transition เงื่อนไขที่กำหนดให้กระทำคำสั่งในแต่ละ Step

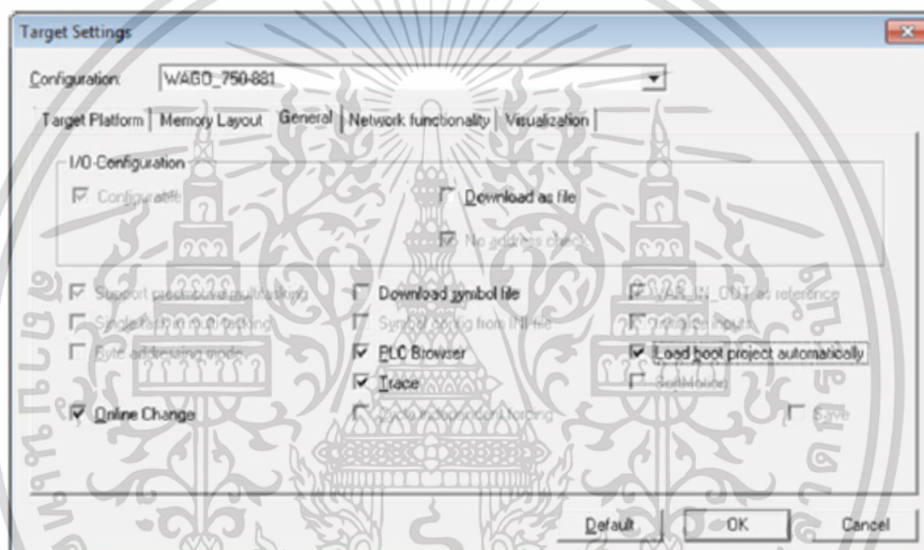


รูปที่ 3.25 โครงสร้างของซอฟต์แวร์ตามมาตรฐาน IEC 61131-3

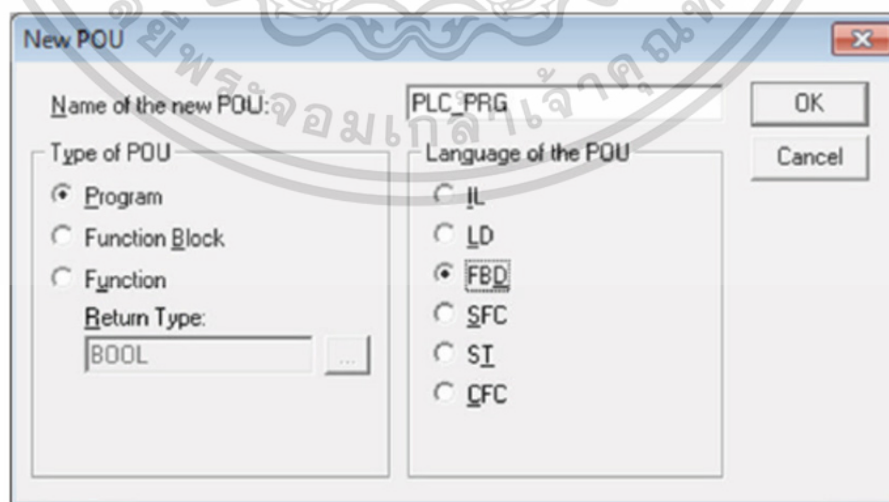
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของซอฟต์แวร์ตามมาตรฐาน IEC 61131-3 แสดงดังรูป 3.25 โปรแกรม PLC ภายใน Configuration ประกอบไปด้วย 1 ริชอร์ส หรือมากกว่า ภายใน 1 ริชอร์ส ประกอบด้วย หลาย Task แต่ละ Task จะควบคุมการทำงานของโปรแกรม โดยโปรแกรมจะถูกพัฒนาโดยภาษาใด ภาษาหนึ่งใน 5 รูปแบบ มีการกำหนดตัวแปรร่วม (Global Variables) ภายใน Configuration และ ภายใน ริชอร์ส เพื่อเชื่อมโยงค่าตัวแปรระหว่างริชอร์ส หรือระหว่างโปรแกรม

สำหรับพีแอลซี WAGO PFC200 สามารถใช้โปรแกรม CodeSys หรือ e! Cockpit ในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับงานต่างๆ ซึ่งรูปแบบภาษาที่พัฒนาเป็นไปตามมาตรฐาน IEC61131-3 ในการเริ่มต้นโปรแกรม จะทำการสร้าง Target ซึ่งเป็นการระบุถึงโมเดลของพีแอลซีที่ต้องการเชื่อมต่อ จากนั้นจะเป็นการสร้างพีโอยู (Program Organization Unit: POU) โดยอาจกำหนดให้เป็น Program, Function Block หรือ Function และเลือกภาษาในการพัฒนาเป็น IL, LD, FBD, SFC, ST, CFC

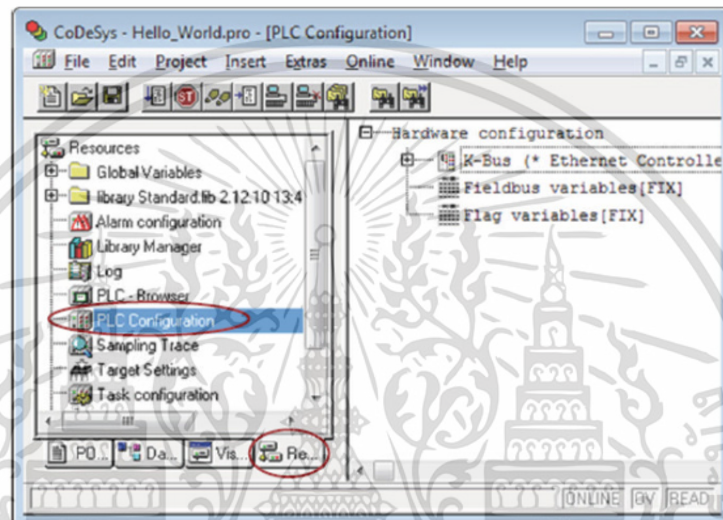
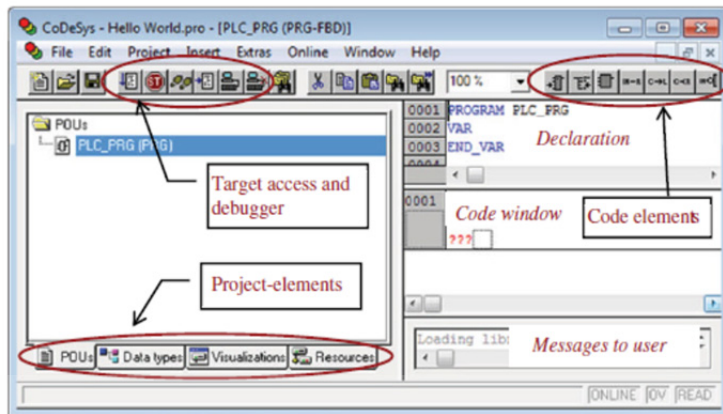


รูปที่ 3.26 โครงสร้างของซอฟต์แวร์มาตรฐาน IEC 61131-3 สำหรับ WAGO PLC PFC200



รูปที่ 3.27 การสร้างพีโอยู (Program Organization Unit: POU)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 ภาพรวมองค์ประกอบโปรแกรมพีแอลซี WAGO PFC200

Configuration			
Input / Output		PI-allocation	
Pos.	Item Number	Description	Comment
1	750-1405	16 DI 24V DC 3.0ms	
2	750-530	8 DO 24 V DC 0.5A	
3	750-464	2/4 AI RTD /ADJ./ HA	
4	750-459	4 AI 0-10V DC s.e.	
5	750-559	4 AO 0-10V DC	
6	753-646	KNX-TP1	
7	750-454	2 AI 4-20mA Diff	
8	750-517	2 DO 230V AC 1.0A Rel 2CO (PotFree)	
9	750-517	2 DO 230V AC 1.0A Rel 2CO (PotFree)	

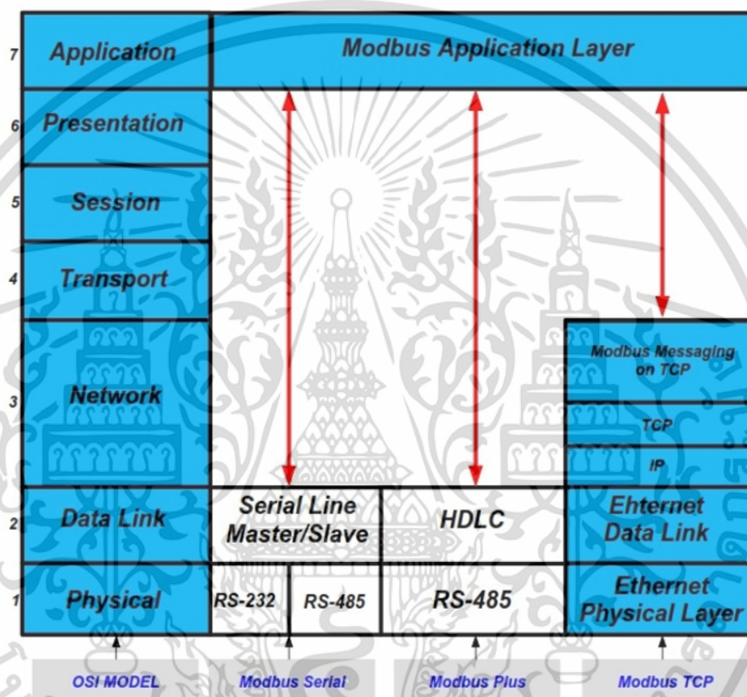
รูปที่ 3.29 การเพิ่มโมดูลสำหรับโปรแกรมพีแอลซี WAGO PFC200

ภาพรวมองค์ประกอบโปรแกรมพีแอลซี WAGO PFC200 แสดงดังรูป 3.28 ซึ่งประกอบด้วย POU, Data types, Visualizations และ Resources รวมถึง Libraries, Targets (PLCs) และการกำหนดตั้งค่าต่างๆ จากนั้นโปรแกรมสามารถเชื่อมต่อกับโมดูลต่างๆ ของพีแอลซี เช่น โมดูลดิจิทัล อินพุท โมดูลดิจิทัลเอาต์พุท โมดูลอนาล็อกอินพุท โมดูลอนาล็อกเอาต์พุท ฯลฯ โดยการเพิ่มและกำหนดการตั้งค่าให้ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 โพรโทคอล Modbus

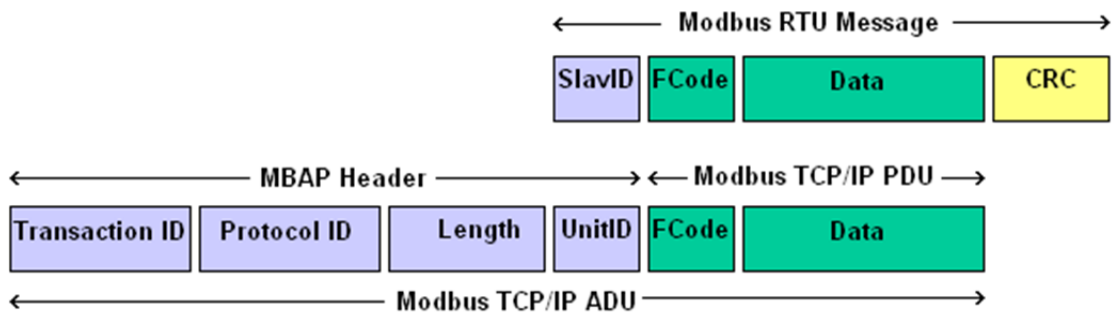
โพรโทคอล Modbus ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ 1979 เพื่อเป็นร่างมาตรฐานทางอินเทอร์เน็ตของ IETF (Internet Engineering Task Force) ใช้โครงสร้างการสื่อสารแบบไคลเอนต์/เซิร์ฟเวอร์ โดยมีโหมดการทำงานแบบ รีเควสต์/เรสปอนส์ (Request/Response) หรือการร้องขอและการตอบสนอง ทำงานอยู่ที่ชั้นที่ 7 ฟอรัมเมตข้อมูลหรือพีดียู (Protocol Data Unit: PDU) ประกอบด้วยรหัสฟังก์ชัน (Function Code) และข้อมูลที่ทำการร้องขอ ณ ที่ระดับโอเอสไอ (OSI) ชั้นที่ 2 จากนั้นข้อมูลพีดียู (PDU) จะถูกเพิ่มเติมจนเป็นเอเดียู (Application Data Unit: ADU) โดยการเพิ่มฟิลด์ที่เกี่ยวกับการระบุอุปกรณ์ เช่น หมายเลขสเลฟ และค่าสำหรับใช้ในการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูล (Error Detection)



รูปที่ 3.30 โอเอสไอเลเยอร์ (OSI Layer) และโพรโทคอลมอดบัส (Modbus)

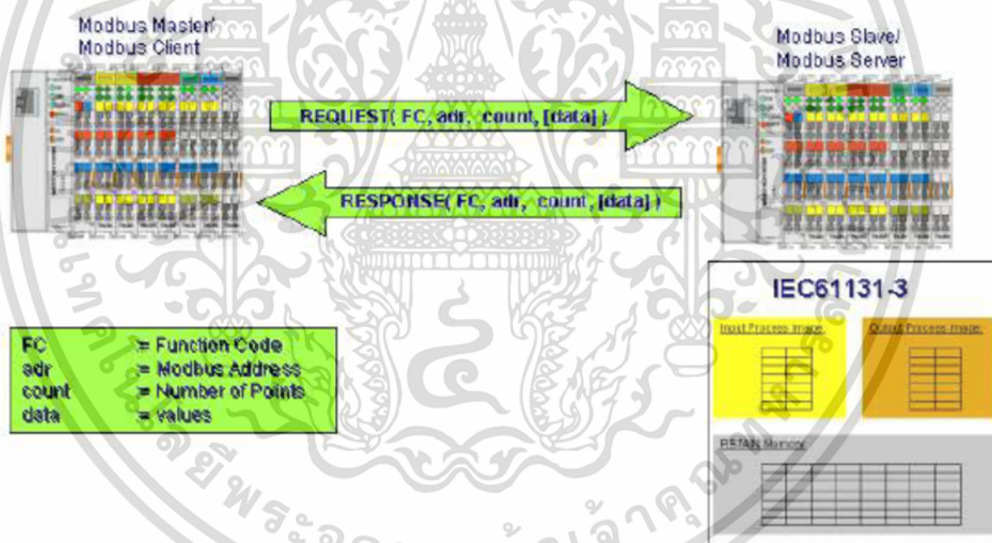
เฟรมข้อมูลในโหมดอาร์ทียู (RTU) ประกอบด้วยข้อมูลแสดงตำแหน่งแอดเดรส 1 ไบต์, หมายเลขฟังก์ชัน 1 ไบต์, ข้อมูลที่ทำการรับส่งจำนวนมากสุดไม่เกิน 252 ไบต์ และรหัสตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลแบบซีอาร์ซี (Cyclical Redundancy Checking: CRC) ขนาด 2 ไบต์ ค่า ซีอาร์ซี นี้เป็นค่าที่คำนวณมาจากข้อมูลทุกไบต์ ไม่รวมบิต Start, Stop และ Parity Check โดยที่ตัว Slave ตัวที่ส่งข้อมูลออกมาจะสร้างรหัสซีอาร์ซี (CRC) แล้วส่งตามท้ายไบต์ข้อมูลออกมา หลังจากนั้นเมื่อ Master ได้รับเฟรมข้อมูลและถอดข้อมูลออกจากเฟรมแล้วจะทำการคำนวณค่าซีอาร์ซี (CRC) ตามสูตรเดียวกับ Slave เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าซีอาร์ซี (CRC) ทั้ง 2 ค่าว่าตรงกันหรือไม่ หากไม่ตรงกันแสดงว่าเกิดความผิดพลาด จากรูปที่ 3.31 โหมดการส่งเฟรมของมอดบัสอาร์ทียู (Modbus RTU) ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลแบบเลขฐานสอง (Binary) เมสเสจประกอบด้วยแอดเดรส (Slave ID), Function code, Data และ Cyclical Redundancy Checking (CRC) สำหรับตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 รูปแบบเฟรมข้อมูลของโปรโตคอลมอดบัส

มอดบัส TCP/IP ถูกพัฒนาขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำการสื่อสารแบบอินเทอร์เน็ตมาใช้กับอุปกรณ์จำพวก Ethernet Device ระยะในการใช้งานสำหรับการเดินสาย LAN คือ 100 เมตร โดยสามารถขยายระยะในการสื่อสารได้โดยการใช้อุปกรณ์ Repeater ในการสื่อสารโดยทั่วไปมีความเร็ว 100,000,000 บิตต่อวินาที (100 Mbps) และเชื่อมต่ออุปกรณ์ได้ไม่จำกัดจำนวน จากรูปที่ 3.31 โหมดการส่งเฟรมของมอดบัส TCP เมสเสจประกอบด้วย Address (Modbus Application Header: MBAP), Function code และ Data



รูปที่ 3.32 มอดบัส (Master/Slave) สำหรับ WAGO PFC200

สำหรับพีแอลซี WAGO PFC200 MODBUS มาสเตอร์จะส่งคำร้องขอ (Request) ไปยังมอดบัสสเลฟ โดยคำร้องขอประกอบด้วยรหัสฟังก์ชัน (FC), มอดบัสแอดเดรส (adr), เลขนับและข้อมูล (Data) อ่านหรือเขียนที่ต้องการ ในขณะที่การตอบกลับ (Response) จะคืนค่าที่ต้องการกลับมา อันประกอบด้วย FC, adr, count จำนวนของบิตหรือเวิร์ท, data ข้อมูลกระบวนการ รูปแบบการอ้างแอดเดรสเพื่อเข้าถึงหน่วยความจำสำหรับอินพุตและเอาต์พุตโมดูลในโปรโตคอล MODBUS ตามมาตรฐาน IEC61131-3 แสดงดังรูป 3.3 โดย I หมายถึง อินพุต Q หมายถึง เอาต์พุต M หมายถึง Merker และ X คือ บิต B คือ ไบท์ W คือ เวิร์ท (16บิต) B คือ ดีเวิร์ท (32บิต) x คือ เวิร์ทแอดเดรส y คือ บิตแอดเดรส เช่น %IX1.7 หมายถึง อินพุตบิตที่แปดในเวิร์ทที่สอง %QD2 หมายถึง เอาต์พุตดับเบิลเวิร์ทที่สอง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hardware address		Description
%		Preliminary character
	I Q M	Input Output Merker
	X B W D	Bit BYTE WORD (16Bit) DWORD(32Bit)
		<b>x.y</b> x-Word address; y-Bit address
Examples		
	%IX1.7	Eighth Bit in second word
	%IW0	Input word 0
	%QB47	Output byte 47
	%QD2	Output double word 2
	%MX3.14	Bit 14 in merker word 3
	%MW3	Merker word 3

รูปที่ 3.33 รหัสฟังก์ชันสำหรับโปรโตคอลมอดบัส

I/O Modules	Type	Input image		Output image		Description
		run1	run2	run3	run4	
750-400	1		%IX8.0			2 DI 24VDC 3ms: First digital input module with a data width of two bits. Since the complex input modules from "run1" already occupy the first 8 words, the digital inputs are put to lower order bits in word 8.
	2		%IX8.1			
750-554	1			%QW0		2 AO 4-20mA: First analog output module with a data width of two words. This I/O module occupies the first two words in the output process image.
	2			%QW1		
750-402	1		%IX8.2			4 DI 24VDC: The four digital inputs of this I/O module are put behind the two inputs of the 750-400 and are in the eighth word of the input process image.
	2		%IX8.3			
	3		%IX8.4			
	4		%IX8.5			
750-504	1				%QX4.0	4 DO 24VDC: First I/O module of the digital output. The I/O modules of the analog outputs already occupy the first four words in the output process image.
	2				%QX4.1	
	3				%QX4.2	
	4				%QX4.3	
750-454	1	%IW0				2 AI 4-20mA: First I/O module of the analog inputs. This I/O module occupies the first two words of the input table.
	2	%IW1				
750-650	1	%IW2				RS232 C 9600/8/N/1: The serial interface module 750-650 is a complex I/O module represented both in the input and output process images with 4 bytes each.
		%IW3				
				%QW2		
				%QW3		
750-468	1	%IW4				4 AI 0-10V S.E: The I/O module 750-468 follows the 2 input words of the 750-454 and the 2 input words of the 750-650. The I/O module 750-467 occupies 4 input words (4 channels 0-10V).
	2	%IW5				
	3	%IW6				
	4	%IW7				
750-600						End module The I/O module 750-600 is a passive module.

C\* : Channelcount

รูปที่ 3.34 ลำดับการประมวลผลอินพุตและเอาต์พุต ของ I/O โมดูล WAGO PFC200

FC	Name	Description
FC5	Write coil	Write a single digital output
FC6	Write single register	Write a single analog output
FC15	Force multiple coils	Write several digital outputs
FC16	Write multiple registers	Writing several analog outputs
FC22	Mask write	Masked writing of a register
FC23	Read/write multiple registers	Read/write operation to analog inputs/outputs

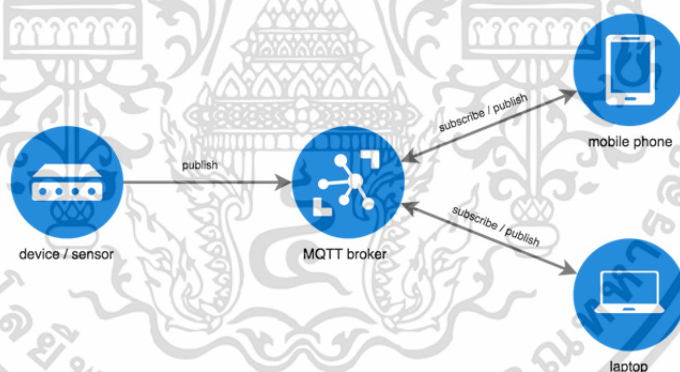
รูปที่ 3.35 รหัสฟังก์ชันสำหรับโปรโตคอลมอดบัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Input/ Output Image ในรูปที่ 3.34 หมายถึงการกำหนดหน่วยความจำสำหรับพอร์ต อินพุท-เอาต์พุทนั้น โดยกำหนดประเภท/ขนาดของข้อมูลสำหรับพอร์ตนั้น รูป 3.35 แสดงรหัส ฟังก์ชันสำหรับโปรโตคอลมอดบัส ซึ่งใช้ในการระบุชนิดการดำเนินการ เช่น การอ่าน/เขียน บิทหรือ เวิร์ท เช่น FC5 คือ ฟังก์ชันอนุญาตให้มาสเตอร์สามารถทำการเปลี่ยนสถานะของคอยล์ภายในตัว อุปกรณ์สเลฟฟิลด์ค่าของเฟรมร้องขอจะประกอบด้วยแอดเดรสของคอยล์และสถานะที่ต้องการจะ เปลี่ยนสำหรับคอยล์นั้น ๆ

### 3.2.4 เอ็มคิวทีที (MQTT)

เอ็มคิวทีที (Message Queuing Telemetry Transport: MQTT) เป็นโปรโตคอลใน ระดับแอปพลิเคชัน (Application Layer) ที่ทำงานบนสแต็ค TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) เป็นโปรโตคอลที่เรียบง่ายมีน้ำหนักเบาและใช้งานง่าย ซึ่งรูปแบบ การส่งข้อความแบบพับลิช-ซัสไครบ์ (Publish-Subscribe) ระหว่างไคลเอ็นท์ เซิร์ฟเวอร์ (Client-Server) เอ็มคิวทีที ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยบริษัท IBM และ Eurotech ในปี ค.ศ. 1999 ซึ่งถูก ออกแบบมาให้มีขนาดเล็กสำหรับการสื่อสารแบบเครื่องจักรถึงเครื่องจักร (Machine to Machine: M2M) ใช้พลังงานและแบนด์วิธต่ำมีประสิทธิภาพในการสื่อสารที่สูง QoS (Quality of Service) เพื่อนำไปใช้ในระบบสกาด้า (Supervisory Control and Data Acquisition: SCADA) สำหรับ เชื่อมต่อท่อส่งน้ำมันบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตดาวเทียม จากนั้นเอ็มคิวทีทีกลายเป็น OASIS Open Standard ในปี ค.ศ. 2014



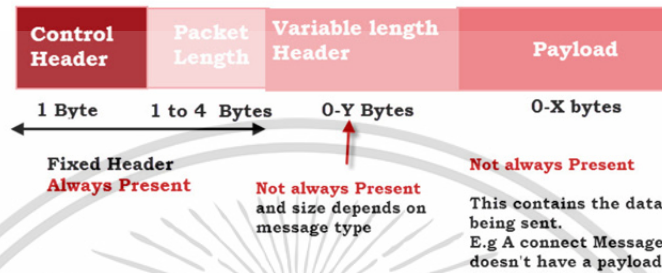
รูปที่ 3.36 โปรโตคอลเอ็มคิวทีที

เอ็มคิวทีที (MQTT) เป็นสถาปัตยกรรมแบบไคลเอ็นท์ เซิร์ฟเวอร์ (Client-Server) โดย อุปกรณ์หรือตัวตรวจวัดปลายทางจะทำหน้าที่เป็นไคลเอ็นท์ทำการเชื่อมต่อแบบ TCP ไปยัง เซิร์ฟเวอร์ หรือชื่อเรียกว่าโบรกเกอร์ (Broker) ซึ่งมีหน้าที่เป็นเสมือนท่อส่งข้อมูลในการรับส่ง ‘Message’ ระหว่างไคลเอ็นท์ ที่เป็นได้ทั้งพับลิชเซอร์ และ ซัสไครบ์เบอร์

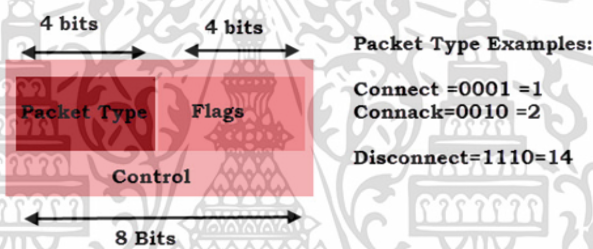
ไคลเอ็นท์ (Client) หมายถึง พับลิชเซอร์ หรือ ซัสไครบ์เบอร์ที่เชื่อมต่อแบบรวมศูนย์ไปยัง Broker ซึ่งสามารถเชื่อมต่อได้ทั้งแบบ persistent ที่สร้าง session ค้างไว้เปิดตลอดเวลาเพื่อติดต่อกับโบรกเกอร์ หรือแบบ transient ซึ่งโบรกเกอร์ไม่สามารถติดตามสถานะได้

โบรกเกอร์ (Broker) เป็น ซอฟต์แวร์ที่ทำหน้าที่รับข้อความทั้งหมดที่ได้จากพับลิชเชอร์ แล้วจึงส่งต่อไปให้ซับสไครบ์เบอร์ ตามแต่ Topic ที่ client ได้ทำการ subscribe ไว้ โดย MQTT Servers/Broker นั้นมีให้เลือกใช้จากหลายผู้พัฒนา เช่น Mosquitto, HiveMQ, paho, ActiveMQ, RabbitMQ เป็นต้น

ท๊อปิก (Topic) เป็นเหมือนแอดเดรส หรือเอนด์พอยต์ (Endpoint) บนโบรกเกอร์ที่ไคลเอนท์ทำการเชื่อมต่อเพื่อรับส่งข้อความระหว่างกัน



รูปที่ 3.37 โครงสร้างข้อความที่ใช้โปรโตคอลเอ็มคิวทีที



รูปที่ 3.38 Control Header

Name	Value	Direction of flow	Description	Decimal
Reserved	0	Forbidden	Reserved	
CONNECT	1	Client to Server	Client request to connect to Server	16
CONNACK	2	Server to Client	Connect acknowledgment	32
PUBLISH	3	Client to Server	Publish message	48

$= 0001000 = 0x10 = 16 \text{ decimal}$   
 $= 0010000 = 0x20 = 32 \text{ decimal}$

รูปที่ 3.39 Control Message

**MQTT Control Flags (Partial)**

Table 2.2 - Flag Bits

Control Packet	Fixed header flags	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
CONNECT	Reserved	0	0	0	0
CONNACK	Reserved	0	0	0	0
PUBLISH	Used in MQTT 3.1.1	DUP <sup>1</sup>	QoS <sup>2</sup>	QoS <sup>2</sup>	RETAIN <sup>3</sup>
PUBACK	Reserved	0	0	0	0
PUBREC	Reserved	0	0	0	0

Duplicate message

Quality of Service  
00,01,10 = QoS 0,1,2

Retain Message

รูปที่ 3.40 Control Flags

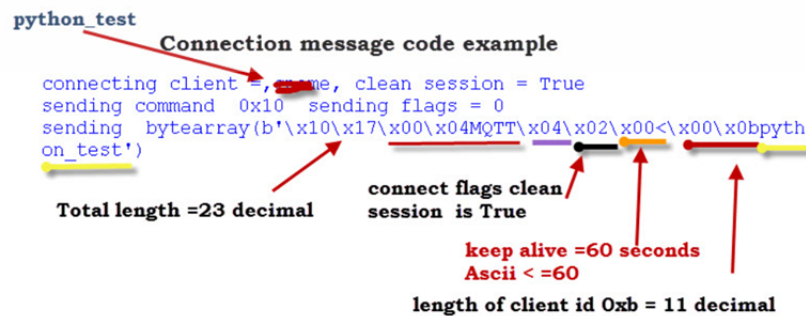
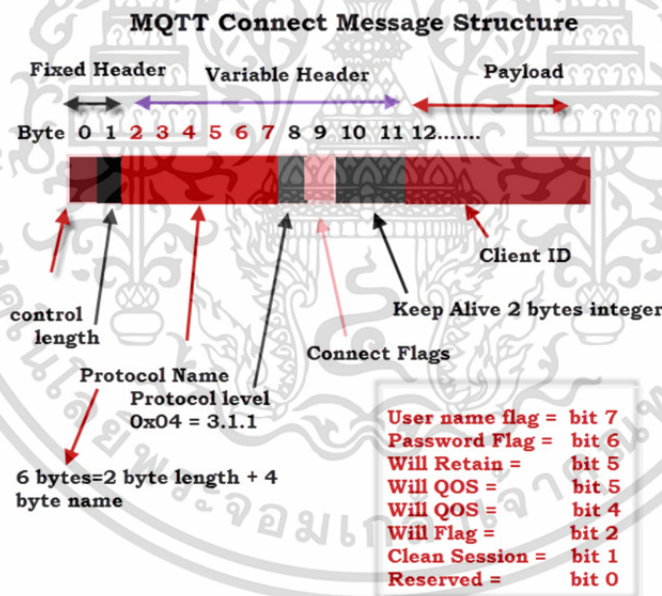
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพจเกจเอ็มคิวทีที (MQTT) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ fixed header 2-5 ไบท์, variable header (อาจไม่ปรากฏ) และ payload (อาจไม่ปรากฏ) ตามลำดับ

Control header ประกอบด้วย Package Type เพื่อบอกชนิดของข้อความ (Message Type) และ Flag เพื่อระบุ QoS ในกรณี Publish ข้อความ

# Message types	
CONNECT = 0x10	<b>=16 decimal</b>
CONNACK = 0x20	
PUBLISH = 0x30	
PUBACK = 0x40	
PUBREC = 0x50	
PUBREL = 0x60	
PUBCOMP = 0x70	
SUBSCRIBE = 0x80	<b>=128 decimal</b>
SUBACK = 0x90	
UNSUBSCRIBE = 0xA0	
UNSUBACK = 0xB0	
PINGREQ = 0xC0	
PINGRESP = 0xD0	
DISCONNECT = 0xE0	<b>=224 decimal</b>

รูปที่ 3.41 ชนิดของข้อความ (Message Type)



รูปที่ 3.42 ตัวอย่างข้อความ Connect ที่ใช้โปรโตคอลเอ็มคิวทีที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพีแอลซี WAGO สามารถเชื่อมต่อสู่ระบบคลาวด์โดยโพรโตคอลเอ็มคิวทีที (MQTT ) ผ่านแอปพลิเคชัน (API Application) ที่เรียกว่า Cloud Connectivity ซึ่งประกอบด้วย IEC 61131-3 ไสบริารี และลินุกซ์แอปพลิเคชัน (Linux Application) ที่ติดตั้งลงบนพีแอลซี

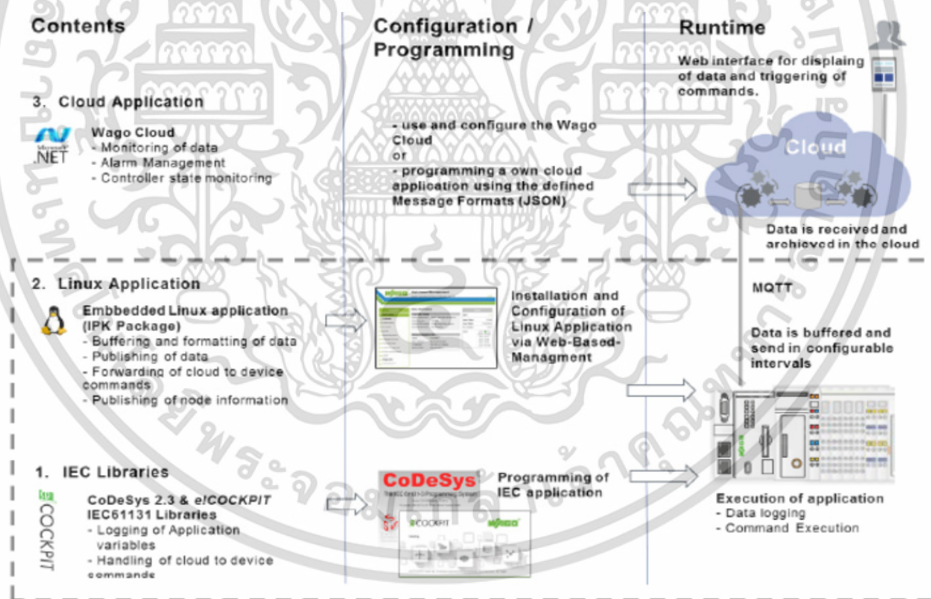
ไลบรารี IEC 61131-3 ที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อสู่ระบบคลาวด์ มีคุณสมบัติ ดังนี้

- Variable Logging (Telemetry): ฟังก์ชันบล็อกสำหรับบันทึกตัวแปรจากโปรแกรม PLC ไปยัง Cloud ผู้พัฒนาซอฟต์แวร์สามารถระบุตัวแปรที่ต้องการเผยแพร่ (publish) ได้ พร้อมทั้งสามารถระบุความถี่ในการสุ่มและความถี่ในการเผยแพร่ข้อมูลที่ต้องการไปสู่คลาวด์ได้

- ตัวแปรที่เชื่อมโยงกับคอลเล็กชันโดยใช้อาเรย์ชนิด typVariableDescription ซึ่งอาเรย์จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับตัวแปร เช่น Tag, Unit, Address, Value Type, Type ID พร้อมทั้งชี้ไปยังค่าของตัวแปรนั้น

Sample Interval	Publish Interval	Max. data points supported
1 Second	1 Minute	10 collections each 120 variables
100 Milliseconds	1 Second	10 collections each 20 variables

รูปที่ 3.43 ตัวอย่างระยะเวลาการสุ่มและเผยแพร่ (Publish) ข้อมูล

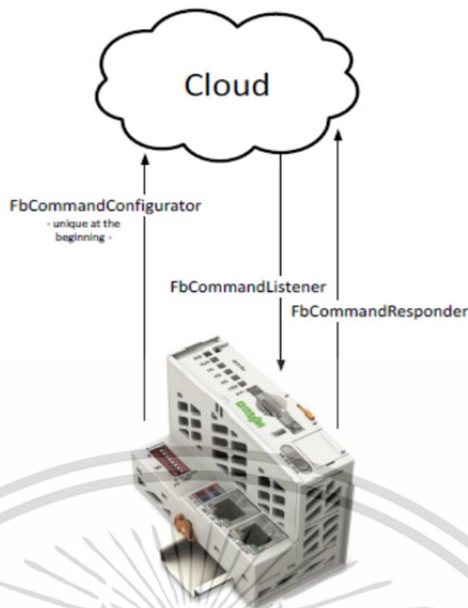


รูปที่ 3.44 ภาพรวมการเชื่อมต่อสู่ระบบคลาวด์ โดยโพรโตคอลเอ็มคิวทีทีของพีแอลซี WAGO

- Command Handling การเชื่อมต่อระหว่างพีแอลซีและระบบคลาวด์ ทำได้โดย 3 ขั้นตอน ดังนี้

- การลงทะเบียนโดยใช้ฟังก์ชันบล็อก FbCommandConfigurator
- ฟังก์ชันบล็อก FbCommandListener
- ตอบสนองการร้องขอโดยใช้ฟังก์ชันบล็อก FbCommandResponder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.45 คำสั่งการติดต่อกับระบบคลาวด์โดยโปรโตคอลเอ็มคิวทีที



รูปที่ 3.46 WAGO Cloud Connectivity WBM

ลินุกซ์แอปพลิเคชัน (Linux Application) คือ แอปพลิเคชันที่ทำงานบนพีแอลซี WAGO ซึ่งเชื่อมต่อกับไลบรารี IEC 61131-3 ด้วย Inter-process communication (IPC) ทำการสื่อสารกับคลาวด์ โดยใช้โปรโตคอล MQTT และเข้ารหัสโดยใช้ Transport Layer Security (TLS) การกำหนดค่าแอปพลิเคชันสามารถดำเนินการผ่านทางโปรแกรม Web Based Management (WBM) ดังรูป 3.46 จากรูปจะเป็นการเลือก Cloud platform กำหนดค่า Hostname ที่คุณใช้บริการเป็น IoT Hub กำหนดค่า Device Id, Activation key

### 3.3 ระบบคลาวด์

ระบบคลาวด์ หมายถึง ระบบคอมพิวเตอร์ที่อยู่ในรูปแบบของการกระจายพื้นที่โดยเชื่อมต่อกันเป็นระบบคลัสเตอร์ (Cluster Network) ผ่านการจัดสรรทรัพยากรด้วยเทคโนโลยีเวอร์ชวลไลเซชัน (Virtualization) เพื่อให้ตอบสนองงานบริการต่างๆ ให้รองรับกับจำนวนผู้ใช้งานจำนวนมากที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งบริการคลาวด์มีรูปแบบที่หลากหลาย เช่น

Infrastructure-as-a-Service (IaaS) – บริการเวอร์ชวลแมนชีนที่สามารถเข้าถึงได้ผ่านเครือข่าย ช่วยรองรับความต้องการใช้งานในการประมวลผลหรือสตอเรจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

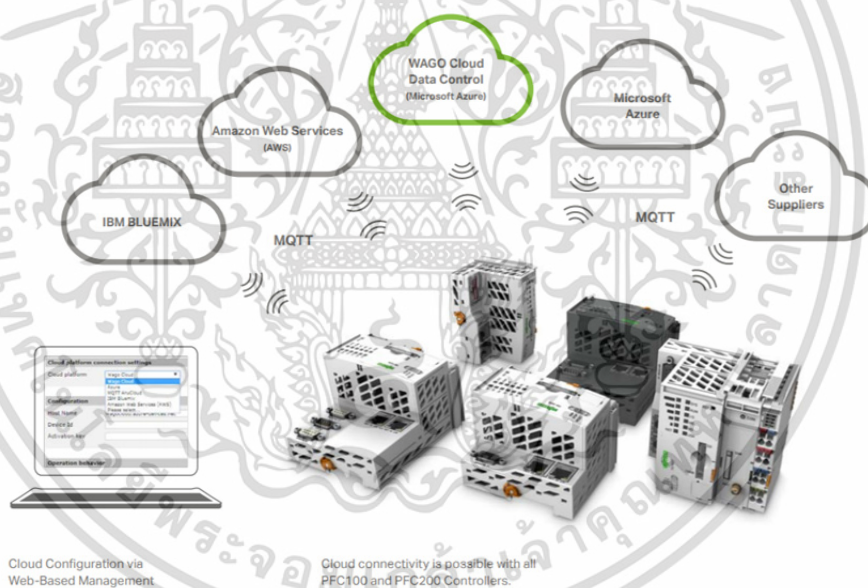
Platform-as-a-Service (PaaS) – บริการด้านแพลตฟอร์มสำหรับซอฟต์แวร์ (เช่น เว็บ แอปพลิเคชัน ดาต้าเบสเซิร์ฟเวอร์ ระบบประมวลผลกลางสำหรับองค์กรขนาดใหญ่ และมิดเดิลแวร์อื่นๆ โดยทำงานภายใต้การควบคุมด้านความปลอดภัยสูง) ที่เรียกใช้งานได้ผ่านเว็บแอปพลิเคชัน

Software-as-a-Service (SaaS) – เป็นบริการด้านแอปพลิเคชันโดยคิดค่าบริการเป็นไลเซนส์ของผู้ใช้ หรือตามปริมาณการใช้งาน

Data-as-a-Service (DaaS) – ให้บริการข้อมูลหรืออินฟอร์เมชันจากคลาวด์อื่นๆ เป็นแหล่งเก็บข้อมูลดิบหรือข้อมูลเพื่อใช้เชื่อมโยงการวิเคราะห์

Business Process-as-a-Service (BPaaS) – เป็นคลาวด์สำหรับบริการด้านธุรกิจที่ต้องการปรับปรุงกระบวนการทางธุรกิจและวัดผลลัพธ์ทางธุรกิจได้

สำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบ Industrial Internet of Things (IIoT) มีวัตถุประสงค์ให้กระบวนการอัตโนมัติมีความฉลาดที่เพิ่มขึ้น จากการเก็บรวบรวมและทำความเข้าใจข้อมูลจาก "Things" โดยใช้อินเทอร์เน็ตและเทคโนโลยีระบบคลาวด์ อุปกรณ์พีแอลซี WAGO PFC มีแอปพลิเคชันสนับสนุนการเชื่อมต่อกับระบบคลาวด์จากผู้ให้บริการต่างๆ เช่น IBM Bluemix, Amazon AWS, Microsoft Azure, Google Cloud รวมถึง Wago Cloud Data Control ที่พัฒนาบนแพลตฟอร์มของ Microsoft Azure [16-18]



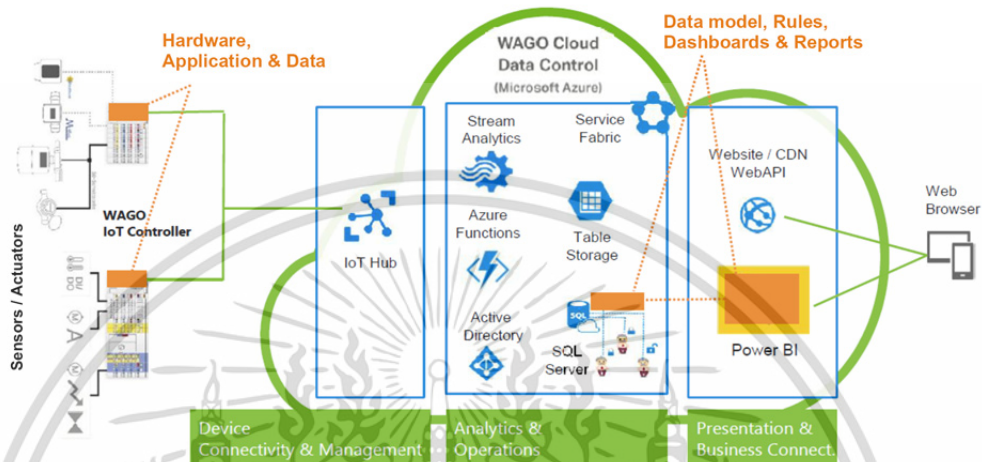
รูปที่ 3.47 การเชื่อมต่อ WAGO PLC สู่อินเทอร์เน็ตด้วยเอ็มคิวทีที

### 3.3.1 WAGO Cloud Data Control

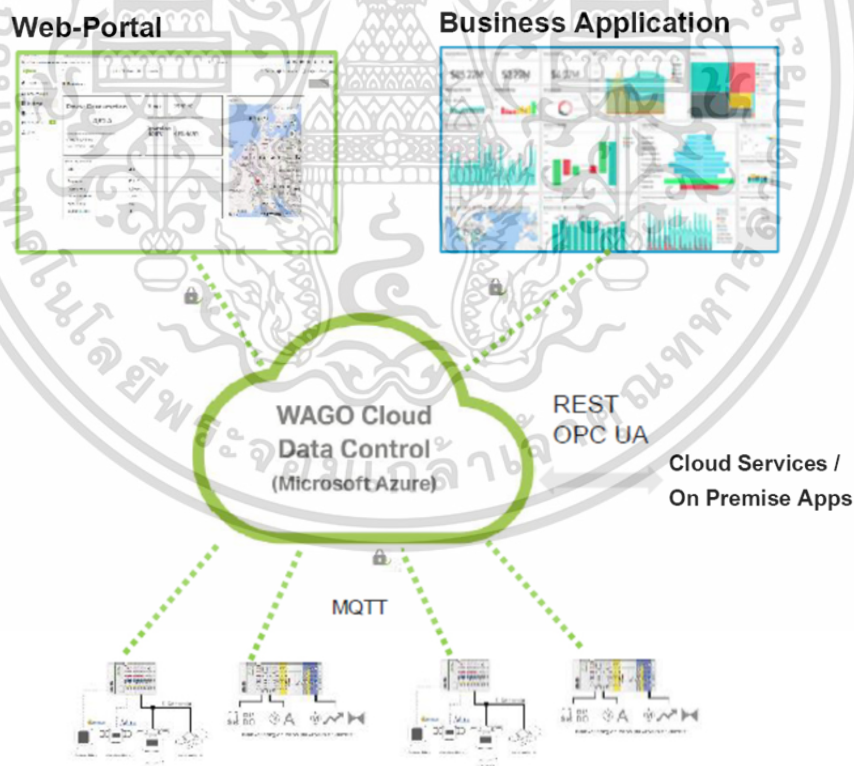
WAGO Cloud Data Control เป็นแพลตฟอร์มระบบคลาวด์ที่พัฒนาบน Microsoft Azure รองรับการส่งข้อมูลจาก WAGO PLC เพื่อประยุกต์ใช้กับงานควบคุมอัตโนมัติต่างๆ ในอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการอุตสาหกรรม กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ระบบบำบัดน้ำ และอาคารอัตโนมัติเพื่อเทคโนโลยีแสงสว่างและวิศวกรรมจราจร รองรับการขยายไปสู่ Industrial Internet of Things (IIoT) ที่ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลและระบุแนวโน้มที่ส่งผลกระทบต่อธุรกิจ หรือกระบวนการผลิต

อุปกรณ์ Wago PLC สามารถเชื่อมต่อหรือเป็น IoT gateway สามารถเข้าถึงข้อมูลจากโปรโตคอลภาคสนามด้วยโมดูลอินพุตต่างๆ ส่งผ่านข้อมูลไปยังระบบอินเทอร์เน็ตโดย Ethernet หรือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3G Mobile interfaces ด้วย MQTT โพรโตคอล สามารถเผยแพร่ข้อมูลจาก PLC ไปยัง Cloud รวมทั้งรับคำสั่งที่ส่งจาก Cloud มายัง PLC ผู้ใช้สามารถบริหารจัดการ WAGO Cloud Data Control ผ่านทางพอร์ทัลเว็บ เพื่อเข้าถึงฟังก์ชันคลาวด์ต่างๆ การจัดการผู้ใช้ การตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์ รวมถึงการแจ้งเตือน อีกทั้งมีการเข้ารหัสข้อมูลผ่านทางอนบอร์ด SSL / TLS 1.2 เพื่อรักษาความปลอดภัยของข้อมูล



รูปที่ 3.48 การควบคุมข้อมูลภายใน WAGO คลาวด์

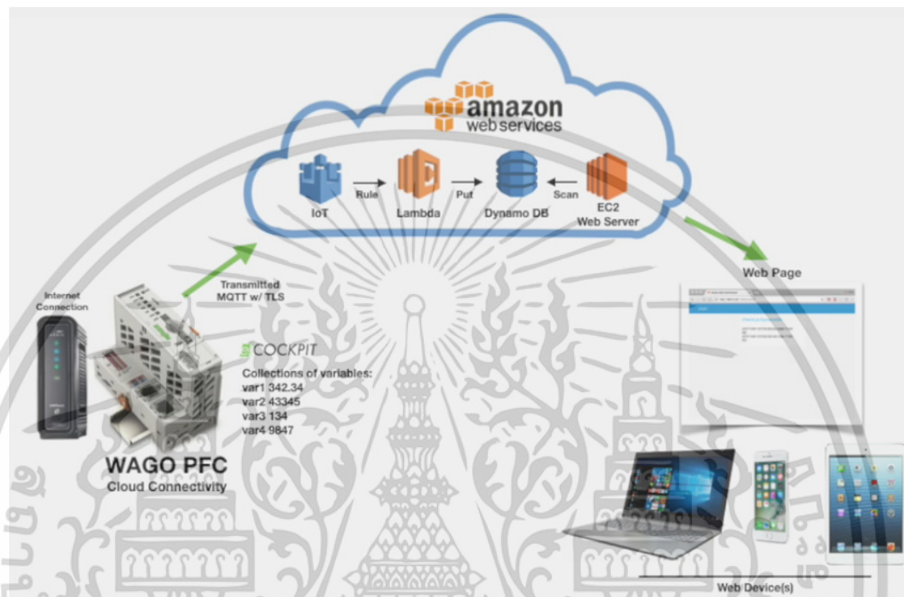


รูปที่ 3.49 การประยุกต์ใช้ WAGO คลาวด์

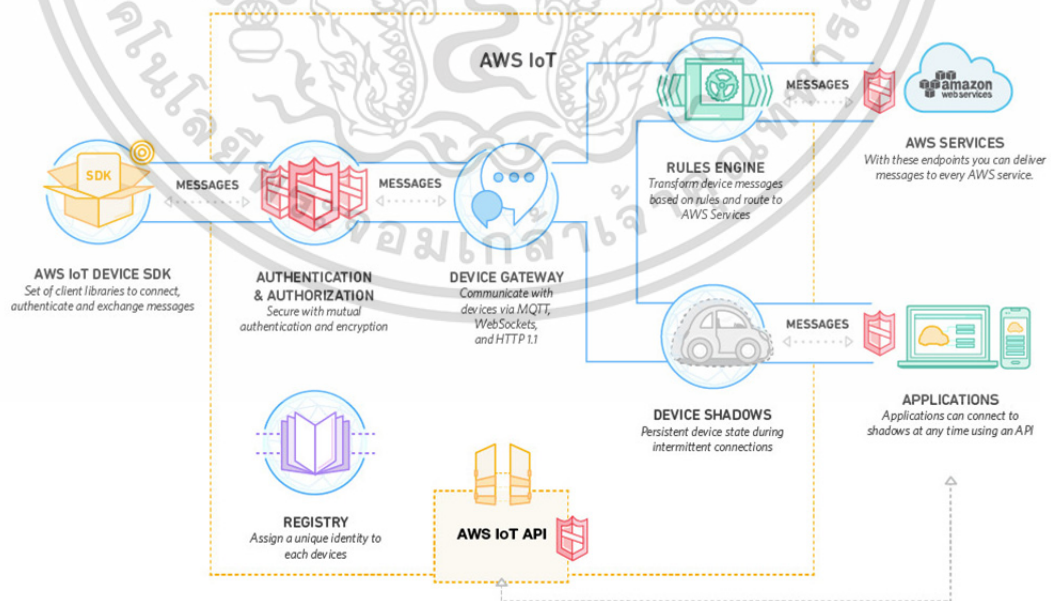
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 Amazon Cloud Service: AWS IoT Core

Amazon ให้บริการแพลตฟอร์มระบบคลาวด์สำหรับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ที่เรียกว่า AWS IoT Core ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มการจัดการระบบคลาวด์ที่เชื่อมโยงข้อมูลจากอุปกรณ์ปลายทาง (End devices) โดยโปรโตคอล HTTP หรือ Message Queue Telemetry Transport (MQTT) ไปสู่การวิเคราะห์ข้อมูลหรือโปรแกรมประยุกต์ต่างๆ ทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้โดยง่าย และปลอดภัย องค์ประกอบและหน้าที่ของ AWS IoT Core สำหรับงานประยุกต์ด้านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

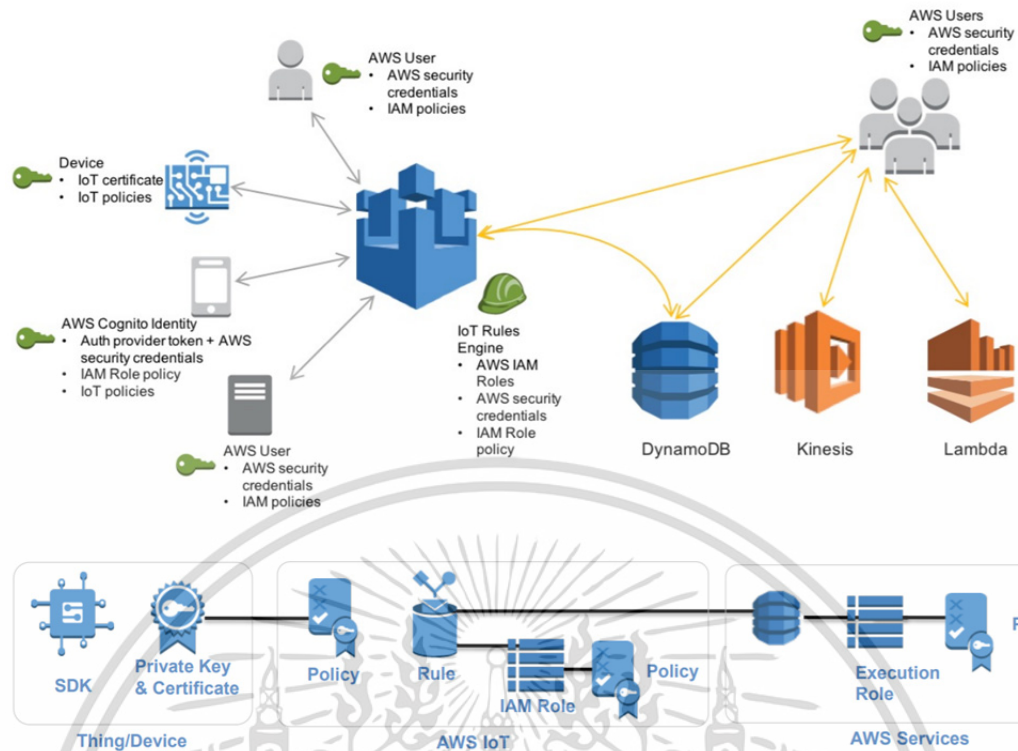


รูปที่ 3.50 อุปกรณ์ WAGO PFC และระบบคลาวด์ Amazon IoT Core



รูปที่ 3.51 โครงสร้างคลาวด์ Amazon AWS IoT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.52 การยืนยันตัวตนและการตรวจสอบสิทธิ์บนแพลตฟอร์ม AWS IoT

- AWS IoT Device SDK เป็นไลบรารี open source ภาษาต่างๆ เช่น ภาษาซี C, C++, JavaScript, Python ที่ช่วยให้ผู้พัฒนาสามารถเชื่อมต่อ Things ไปยัง AWS IoT ได้โดยสะดวกและปลอดภัย

- Authentication and Authorization AWS IoT Core มีขั้นตอนการยืนยันตัวตนและการเข้ารหัสในหลายๆจุดของการเชื่อมต่อ เพื่อเป็นการพิสูจน์ตัวตนและการตรวจสอบสิทธิ์ในทุกครั้งของการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์และ AWS IoT Core

AWS IoT Core ใช้วิธีการพิสูจน์ตัวตนที่เรียกว่า “SigV4” (Signature Version 4) ซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มข้อมูลการยืนยันตัวตนไปยัง AWS Request เพื่อสร้างความปลอดภัย โดยอุปกรณ์ Things จะต้องแสดงตนด้วย Access key (Access key ID และ Secret access key) และ Certificate ในการเชื่อมต่อ Things เข้ากับ AWS IoT ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

- สร้าง Thing ในหน้าต่าง Management Console โดยกำหนด Name และ Attribute

- สร้าง Certificate และแนบเข้ากับ Thing

- สร้าง Policy สิทธิใน Action ของ Thing และแนบเข้ากับ Certificate

เมื่อดำเนินการทั้ง 3 ขั้นตอนอย่างถูกต้อง จะสามารถเชื่อมต่อ Thing เข้ากับ AWS IoT ได้

- Device gateway เป็นโพรโทคอลสำหรับการสื่อสารกับ Things ผ่านทางโปรโตคอล MQTT, WebSockets และ HTTP 1.1

- Registry เป็นการกำหนดข้อมูลประจำตัวสำหรับอุปกรณ์ Things เช่น Attribute หรือ Capabilities

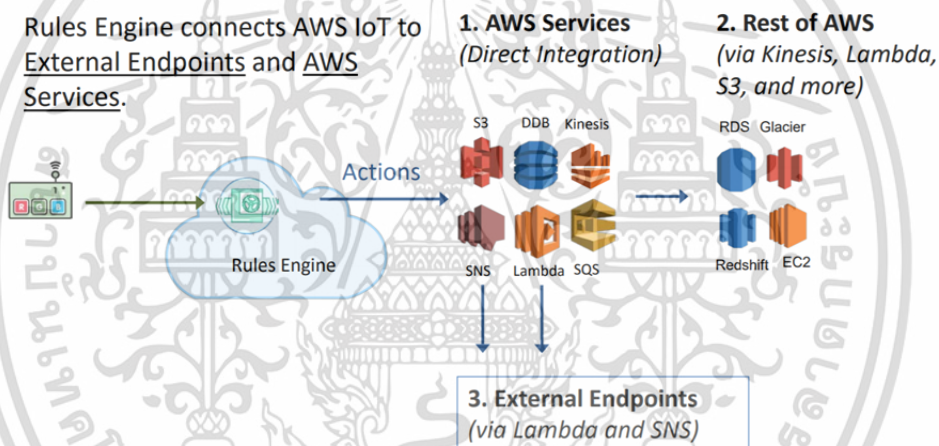
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- AWS IoT API เป็นเครื่องมือ Application Programming Interface ทำหน้าที่ช่วยในการบริหารจัดการหรือเข้าถึงข้อมูลต่างๆ ในระบบคลาวด์ เช่น บริหารจัดการ Things, Certificates, Rules, และ Policies เพื่อสร้างโปรแกรมงานประยุกต์ สำหรับ IoT โดยใช้การร้องขอแบบ HTTP หรือ HTTPS

- Message broker เป็นกลไกการรับ-ส่งข้อความระหว่างอุปกรณ์ Things และงานประยุกต์ AWS IoT ในลักษณะ Publish และ Subscribe โดยโปรโตคอล MQTT โดยตรง หรือผ่าน WebSocket

- Rules engine เป็นอัลกอริทึมในการประมวลผลข้อความ/ข้อมูล และการเชื่อมโยงไปสู่บริการอื่นในแพลตฟอร์มของ AWS เช่น ส่งต่อในส่วนของ payloads ของข้อมูลไปยัง Amazon S3, Amazon DynamoDB หรือ AWS Lambda เป็นต้น

- Device shadow เป็นอุปกรณ์ Things เสมือนหรือ "เงา" ที่สร้างขึ้นเพื่อแสดงสถานะล่าสุดของอุปกรณ์ สำหรับให้แอปพลิเคชันหรืออุปกรณ์อื่นสามารถอ่านข้อความและโต้ตอบกับอุปกรณ์ได้ แม้ว่าอุปกรณ์นั้นจะออฟไลน์ก็ตาม



รูปที่ 3.53 Rules Engine และการเชื่อมโยงไปสู่บริการอื่นใน AWS

ทั้งนี้ยังมีบริการอื่นในแพลตฟอร์ม AWS ที่สามารถประยุกต์ใช้สำหรับ Industrial Internet of Things (IIoT) เช่น

- Amazon S3 (Amazon Simple Storage) เป็น Cloud Storage ที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูล

- Dynamo DB เป็นฐานข้อมูลแบบ NoSQL ซึ่งเหมาะสำหรับงานประยุกต์สำหรับ Big Data, Machine Learning หรือปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence)

- Lambda เป็น FaaS (Function as a Service) ที่สนับสนุนงานประยุกต์แบบ Serverless พัฒนาด้วย Java, Node.js หรือ Python โดยจะรันคำสั่งเมื่อมีเหตุการณ์ (Event) มากระตุ้น เช่น ให้ฟังก์ชันไปอ่านข้อมูลจาก database แล้วประมวลผล เพื่อหาค่าที่น้อยที่สุดแล้วส่งข้อมูลกลับมา เป็นต้น

- EC2 (Elastic Compute Cloud) เป็นบริการโฮสต์เซิร์ฟเวอร์ของ Amazon โดย เป็นเซิร์ฟเวอร์เสมือน (virtual machine / virtual server) สามารถติดตั้งระบบปฏิบัติการ (OS) หรือซอฟต์แวร์ที่ต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	amazon web services™	Microsoft Azure
<b>COMPUTING</b>		
Instance Families	7	7
Instance Types Predefined	54	52
Custom Instance Types	N/A	N/A
Regions	12	22
New Regions (Announced for 2016)	5	5
Zones	32	N/A
<b>STORAGE AND DATABASE</b>		
Ephemeral (Temporary)	Yes	Yes
Storage	EBS- Magnetic Volumes, PIOPs SSD, GP-SSD	Standard, Premium
Object Storage	S3	Blob Storage
Relational Database	RDS	AzureSQL Database
Archiving	Glacier	Azure Backup
NoSQL and Big Data	DynamoDB, EMR, Kinesis, Redshift, Machine Learning, S3, ElasticSearch	Azure Data Factory, Azure DocumentDB, Azure HDInsight, Azure Stream Analytics
<b>NETWORKING</b>		
Virtual Network	VPC	Vnet
Public IP	Yes	Yes
Hybrid Cloud	Yes	Yes
DNS	Route53	Azure DNS
Firewall/ACL	Yes	Yes
<b>PRICING STRUCTURE</b>		
Pricing	Per hour, rounded up	Per minute, rounded up
Models	On demand, reserved, spot	On demand, 12 month prepay

รูปที่ 3.54 เปรียบเทียบคุณสมบัติบริการคลาวด์

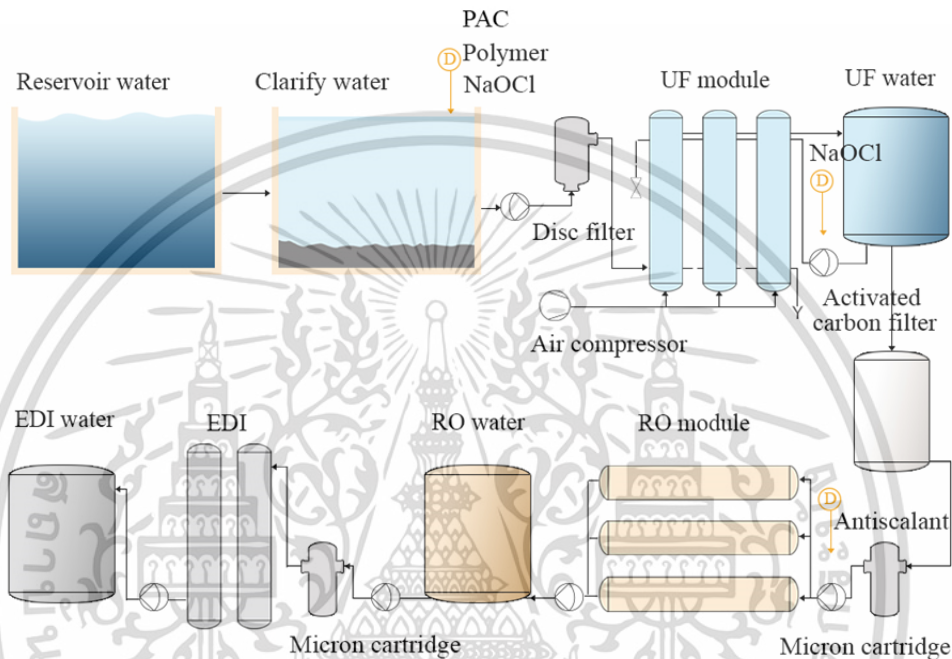
การเปรียบเทียบข้อแตกต่างทางคุณสมบัติสำหรับระบบคลาวด์ที่เหมาะสมกับงานประยุกต์ด้านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง พิจารณาจากความสามารถในการให้บริการโซลูชันที่ง่ายต่อการพัฒนาและใช้งานได้จากบริการ ความสามารถในการวิเคราะห์เชิงลึก การจัดการคิวการส่งข้อความ รวมถึงคุณลักษณะเฉพาะที่สนับสนุนการทำงาน IoT

สำหรับการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ เปรียบเทียบระหว่าง Wago Cloud ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มที่พัฒนาบน Microsoft Azure และ AWS IoT Core จะเห็นได้ว่า ทั้ง Azure และ AWS สามารถตรวจสอบและรักษาความปลอดภัยระดับอุปกรณ์ สนับสนุนโปรโตคอล IoT เช่น MQTT และ AMQPS พร้อมกับ HTTP แต่เนื่องจาก Wago Cloud ยังอยู่ใน Beta Version ซึ่งเป็นระดับกำลังพัฒนา ทำให้ขาดองค์ประกอบหรือฟังก์ชันที่สนับสนุนด้านการประมวลผล และการยืดหยุ่นในการจัดเก็บข้อมูล ในการศึกษาวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาและพัฒนางานประยุกต์ โดยแพลตฟอร์ม AWS IoT Core เป็นหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 เทคโนโลยีการผลิตน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล

โรงไฟฟ้าชีวมวลผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีไอน้ำเป็นตัวกลางในการหมุนกังหัน (Stream turbine) ดังนั้น นอกจากเชื้อเพลิงแล้ว น้ำถือเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการผลิตโดยตรง การใช้น้ำในโรงไฟฟ้าชีวมวล ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ น้ำสำหรับระบบหล่อเย็นและน้ำสำหรับกระบวนการผลิตไอน้ำแรงดันสูง โดยน้ำจากแหล่งธรรมชาติจะถูกนำมาผ่านกระบวนการบำบัดให้มีคุณสมบัติทางกายภาพหรือองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม [19-20]



รูปที่ 3.55 ไตอะแกรมกระบวนการผลิตน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล

กระบวนการผลิตน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลประกอบด้วยระบบการบำบัดและการกรอง ดังนี้

#### 3.4.1 Pre-treatment การบำบัดน้ำขั้นเตรียมการ

เป็นส่วนที่ใช้ผลิตน้ำ Clarify water ที่ใช้ในระบบหล่อเย็น โดยเป็นขั้นตอนของการนำน้ำดิบจากบ่อเก็บน้ำดิบเข้าสู่กระบวนการตกตะกอน โดยเติมสารเคมีเพื่อเร่งปฏิกิริยา Coagulation และ Flocculation โดยสารเคมีที่ใช้ได้แก่ PAC, Polymer นอกจากนี้มีการเติมสารคลอรีน (NaOCl) เพื่อฆ่าเชื้อ และอาจจะมีการเติมเบส NaOH เพื่อปรับ pH ในกรณีที่น้ำเป็นกรด

#### 3.4.2 Ultra-filtration กระบวนการกรองแบบอัลตราฟิวเตรชั่น

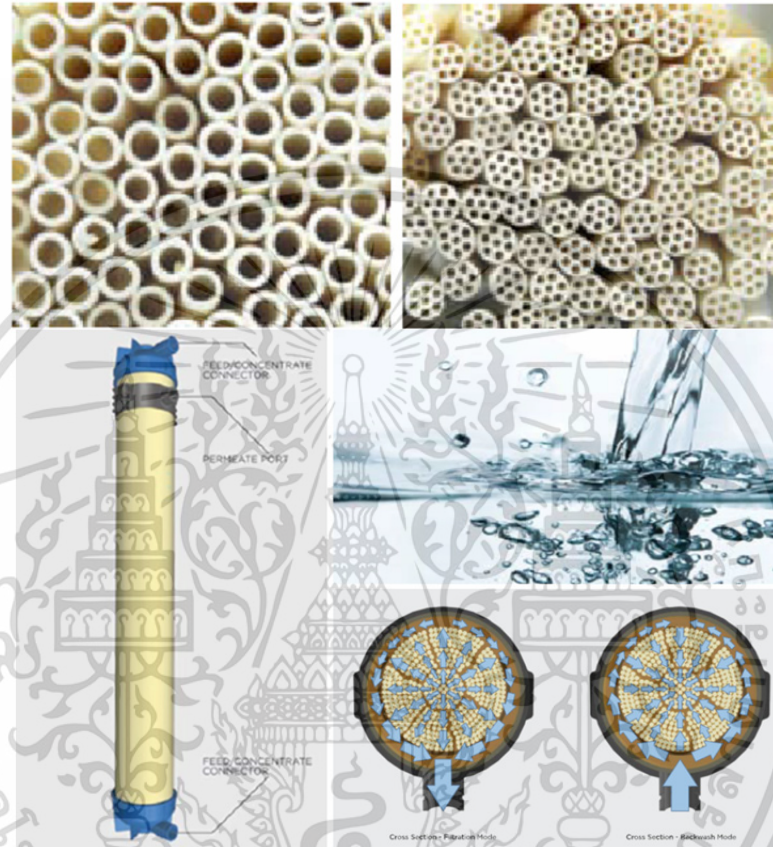
กระบวนการกรองแบบอัลตราฟิวเตรชั่น คือ การใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนน้ำไหลผ่านเมมเบรน เพื่อแยกโมเลกุลของสารคอลลอยด์ จุลินทรีย์ และสารอื่น ๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 300~500,000 ดาลตัน (Dalton, Da) ออกจากน้ำ ซึ่งประกอบด้วย

- ขั้นตอนการกรอง (Filtration) เป็นกระบวนการนำน้ำผ่านเครื่องสูบน้ำเข้าบริเวณด้านล่างไส้กรอง สิ่งที่ไม่ผ่านการกรองจะถูกสะสมอยู่บริเวณด้านในไส้กรอง น้ำที่ผ่านการกรองส่วนหนึ่งจะถูกเก็บไว้ล้างย้อนเพื่อทำความสะอาดไส้กรอง หนึ่งจากนั้นจะเก็บไว้ในถังเก็บน้ำสะอาดเพื่อบริโภค

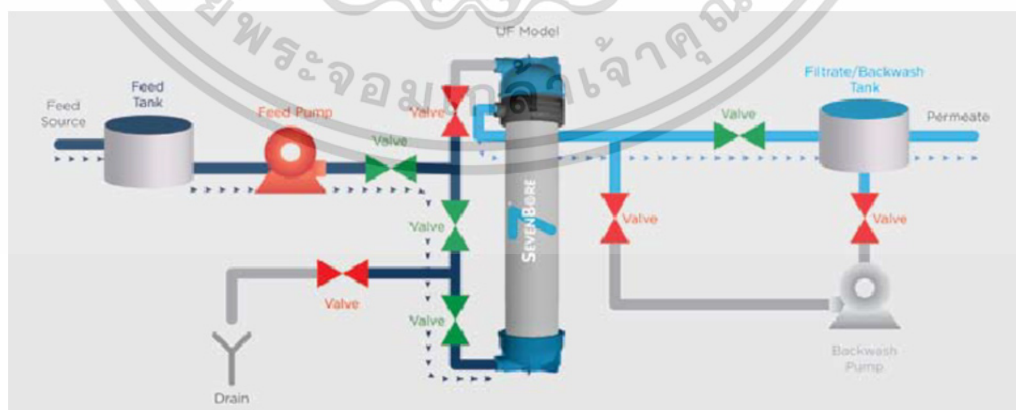
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเวลาในการกรองขึ้นอยู่กับคุณภาพของแหล่งน้ำที่นำมาผลิต ควรน้อยกว่า 48 นาที แล้วควรล้างย้อนเพื่อทำความสะอาด

- ขั้นตอนการล้างย้อน (Backwash) เป็นการทำความสะอาดไส้กรองด้วยการอัดอากาศผ่านไส้กรองเพื่อให้ เมมเบรนสั้นและสิ่งสกปรกหลุดออก โดยเวลาการล้างย้อนนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำที่นำมาผลิต ควรอยู่ 20- 60 วินาที

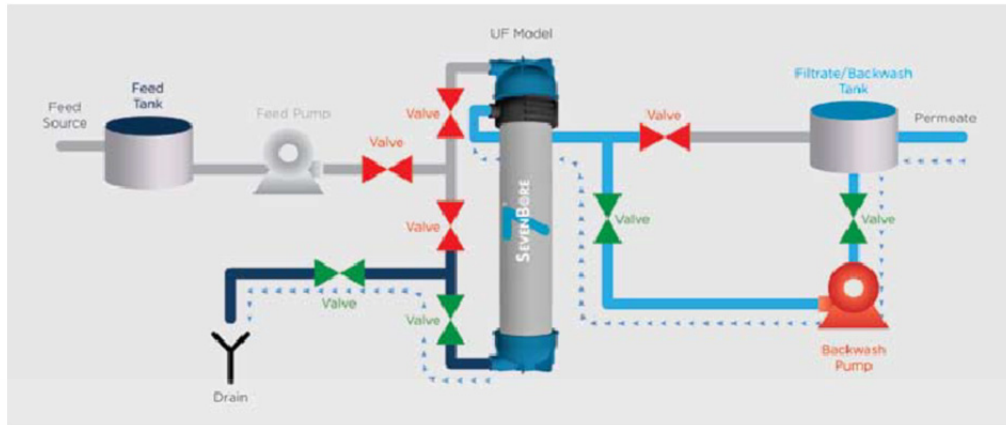


รูปที่ 3.56 เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน



รูปที่ 3.57 กระบวนการกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



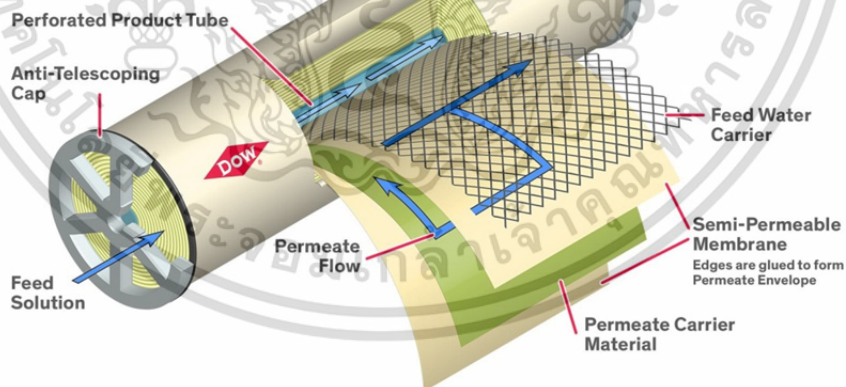
รูปที่ 3.58 กระบวนการล้างย้อน

### 3.4.3 กระบวนการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse-osmosis)

เป็นการกรองด้วยเยื่อแบบหนึ่ง (membrane filtration) โดยการให้ความดันที่สูงกว่าความดันออสโมติก (osmotic pressure) ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่จากสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงผ่านเมมเบรนที่มีขนาดละเอียดสูงถึง 0.0001 ไมครอน ไปยังสารละลายที่เจือจางกว่า

ระบบ Reverse Osmosis เป็นระบบการกรองที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถกรองสารละลายที่มีอยู่ในน้ำออกได้เกือบหมด โดยสามารถลดค่า TDS ของน้ำได้ต่ำกว่า 10 ppm เหมาะสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้แหล่งน้ำจากตบที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูง

#### Spiral Wound Element Design



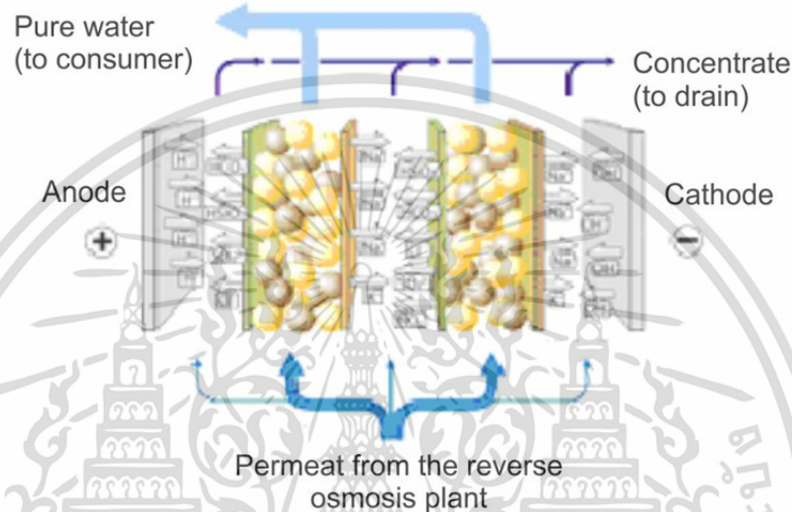
รูปที่ 3.59 เมมเบรนรีเวอร์สออสโมซิส

### 3.4.4 กระบวนการอิเล็กโทรไลต์ไอออนไนเซชัน (Electro Deionization: EDI)

กระบวนการอิเล็กโทรไลต์ไอออนไนเซชัน (Electro Deionization: EDI) เป็น การแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินและแยกไอออนด้วยไฟฟ้า ภายในโมดูลประกอบด้วยเยื่อเมมเบรนที่มีเรซินบรรจุอยู่ระหว่างกลาง วางเรียงซ้อนสลับประจุกันเป็นห้อง เมื่อป้อนความต่างศักย์ที่ปลายขั้วแอโนด (Anode) และแคโทด (Cathode) ไอออนในน้ำจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วตรงข้าม โดยเยื่อเมมเบรนประจุบวกจะยอมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ประจุบวกไหลผ่านในขณะที่เยื่อเมมเบรนประจุลบจะยอมให้ประจุลบไหลผ่านเท่านั้น เรซินที่อยู่ระหว่างเยื่อเมมเบรนทำหน้าที่ช่วยในการดูดจับไอออนต่างๆ ให้ดียิ่งขึ้น ทำให้ไอออนบวกและไอออนลบที่ปนเปื้อนในน้ำถูกแยกไปอยู่ในห้องที่มีความเข้มข้นประจุสูง และสามารถแยกส่วนที่เป็นน้ำสะอาดออกมาใช้งานได้

อิเล็กโทรไลต์ไอออนไนเซชันเหมาะกับการใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการใช้น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงในปริมาณมากๆ เช่นการผลิตไอน้ำแรงดันสูงสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยสามารถลดค่า ทีดีเอส (TDS) ของน้ำได้ต่ำกว่า 1 ppm



รูปที่ 3.60 โมดูลการกรองอิเล็กโทรไลต์ไอออนไนเซชัน

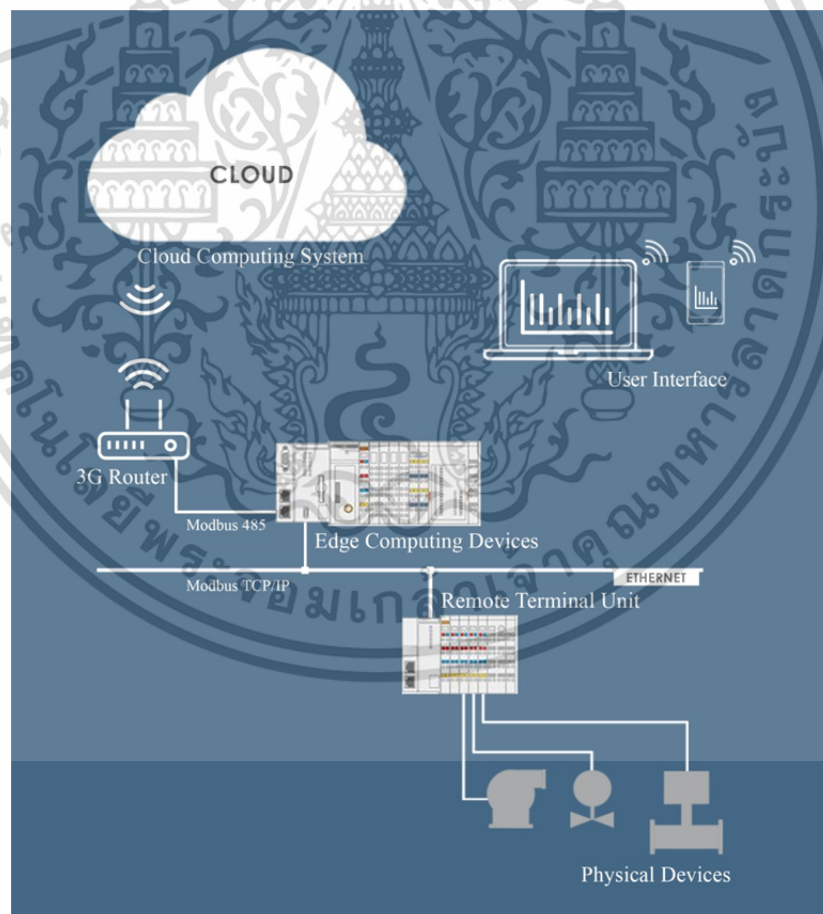
### 3.5 สรุปท้ายบท

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการงานประยุกต์ทางอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง Internet of things (IoT) สำหรับอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลนั้นประกอบด้วยรายละเอียดเชิงลึก และรายละเอียดเชิงกว้าง ครอบคลุมองค์ความรู้ทางด้าน วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และเครือข่าย รวมทั้งวิศวกรรมการวัดและควบคุม การออกแบบและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งอย่างสมดุลระหว่างการใช้จ่ายเงินอย่างมีประสิทธิภาพกับคุณประโยชน์ที่เพิ่มขึ้นนั้นถือเป็นประเด็นสำคัญที่ท้าทาย ซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป

## บทที่ 4

# การออกแบบและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยี อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

บทนี้กล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับระบบบริหารน้ำในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมาก สถาปัตยกรรมของระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 3 ระดับชั้นทางกายภาพ ระดับชั้นที่ 1 เป็นอุปกรณ์ทางกายภาพ เช่น อุปกรณ์วัดความดัน อุปกรณ์วัดอัตราการไหล ตัวตรวจวัดพีเอช (pH) บั๊มน้ำและวาล์ว ซึ่งมีหน้าที่ในการตรวจวัดข้อมูลทางกายภาพ และทำการโต้ตอบกับกระบวนการ ระดับชั้นที่ 2 เอดจ์คอมพิวติ้ง (Edge Computing) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม เซิร์ฟเวอร์ฝังตัว หน่วยจัดเก็บข้อมูล เกตเวย์และสวิตช์ เพื่อควบคุมการปฏิบัติงานทั้งหมดภายในเครือข่าย ระดับชั้นที่ 3 เป็นระบบคลาวด์ซึ่งสนับสนุนแอปพลิเคชันสำหรับข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น การติดตามกระบวนการทำงาน การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการบำรุงรักษา

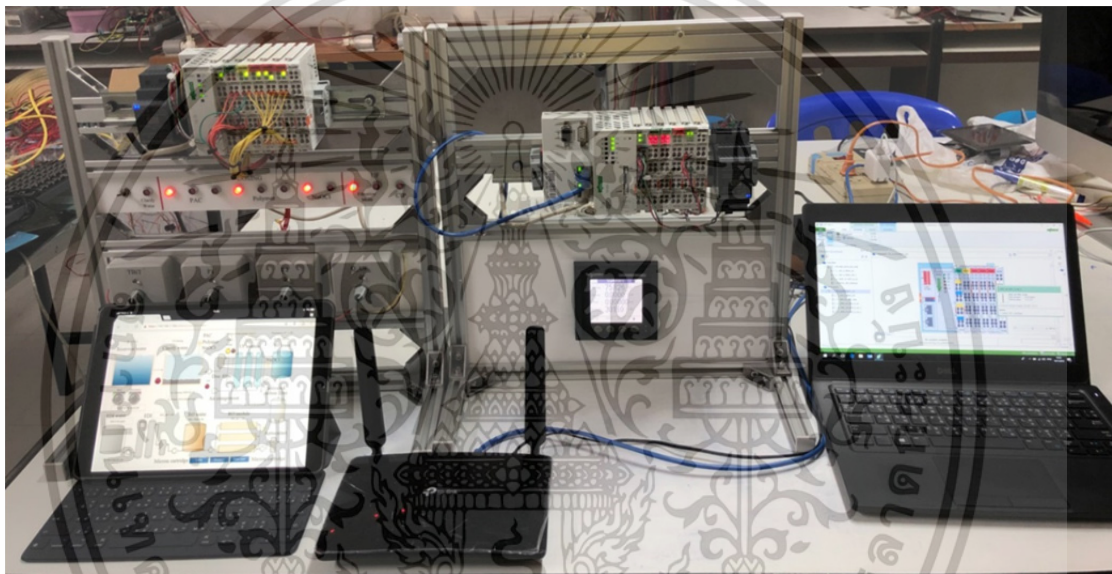


รูปที่ 4.1 ภาพรวมอุปกรณ์ที่ใช้ในการประยุกต์สำหรับงานวิจัย

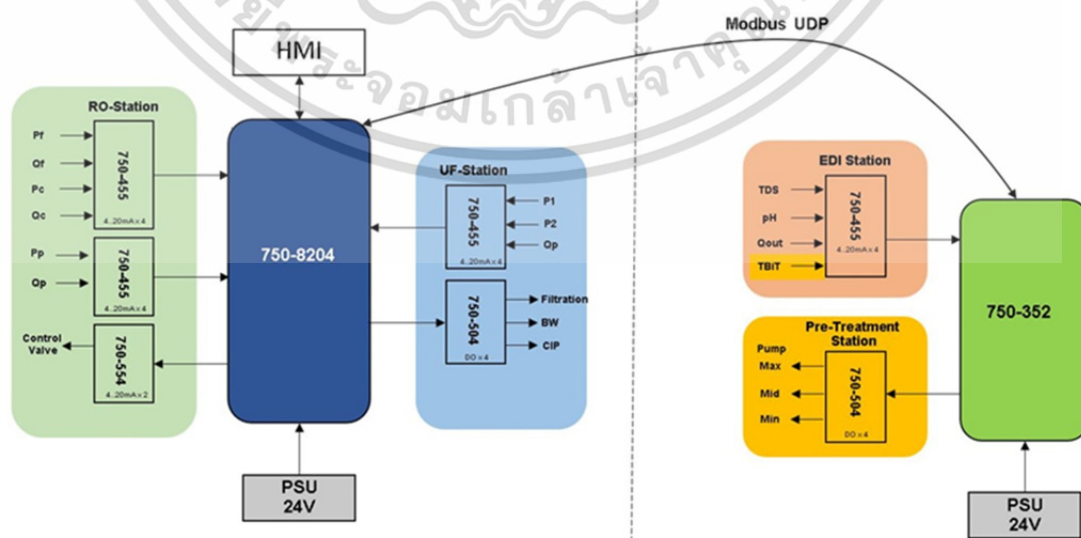
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 เทคโนโลยีล้ำยุคสำหรับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) มีหลายอย่างที่ทำให้บริการสามารถเลือกใช้ในงานเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อให้สามารถใช้งานได้ครอบคลุมพื้นที่ได้ไกลยิ่งขึ้น ผู้ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ส่วนใหญ่ จำเป็นต้องเลือกการให้บริการเพราะเป็นฐานลูกค้าที่สำคัญ ที่ต้องการใช้เทคโนโลยีเป็นจำนวนมาก มองดูเหมือนกับบริการต่างๆ ที่จัดหามาไว้ให้บริการจะดูไม่แตกต่างกันแต่ในทางวิศวกรรมการควบคุมและบริหารจัดการข้อมูลสารสนเทศในโรงงานกลับมีความจำเป็นต้องพิจารณาส่วนต่างๆ ของการให้บริการโดยละเอียด ในการประยุกต์ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ มุ่งเป้าไปในส่วนการเชื่อมต่อแบบอินเทอร์เน็ตเป็นหลักและเน้นไปที่อุปกรณ์เอ็ดจคอมพิวเตอร์เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพในการควบคุมและสามารถที่จะควบคุมกระบวนการได้แม้การสื่อสารขัดข้อง โครงสร้างที่เลือกใช้แสดงดังรูปที่ 4.2 และขยายความในส่วนของการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 อุปกรณ์สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานวิจัย



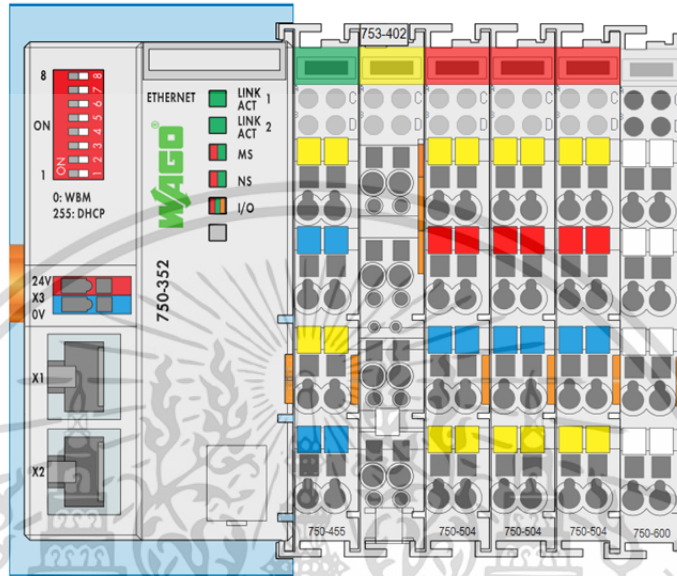
รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมการเชื่อมต่อระหว่างโมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

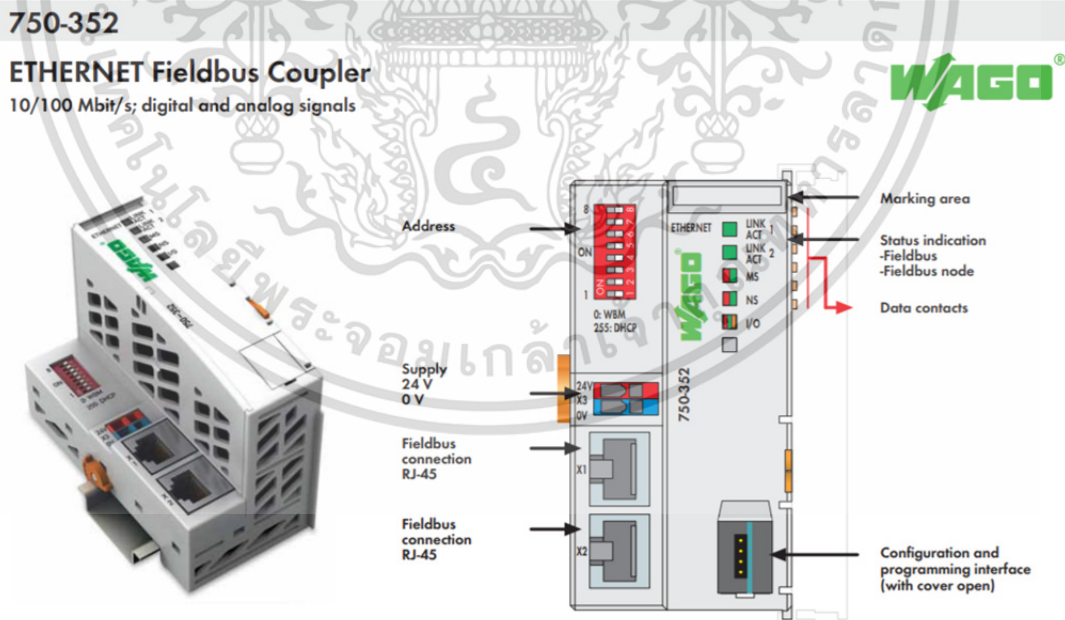
### 4.1.1 ระดับชั้นที่ 1

เป็นอุปกรณ์ทางกายภาพที่ใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วัดและส่งสัญญาณมาตรฐานในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าในทางอุตสาหกรรมและเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตแบบดิจิทัลซึ่งองค์ประกอบโมดูล ดังรูปที่ 4.4 – 4.9

- ฮาร์ดแวร์ : Wire



รูปที่ 4.4 Ethernet Remote Unit และการ์ดอินพุต เอาท์พุต

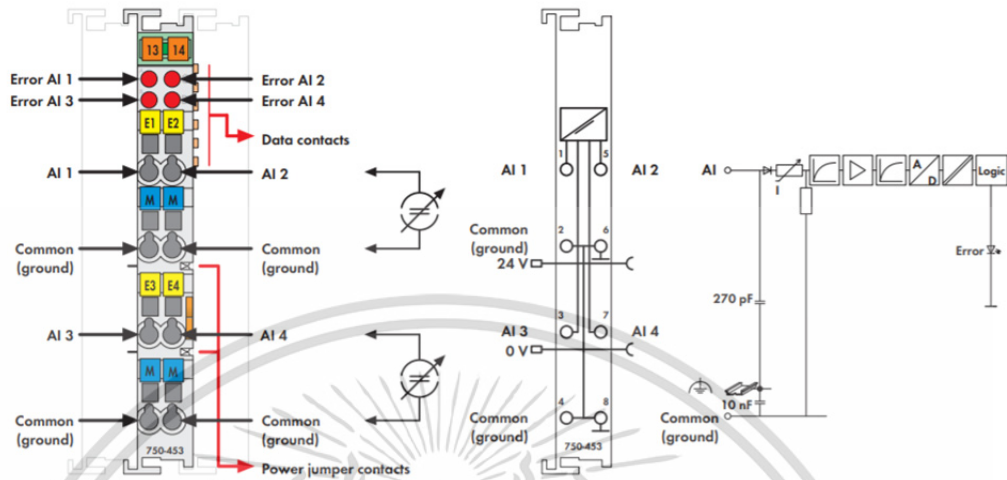


รูปที่ 4.5 Remote Terminal Unit (Ethernet RTU)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 750-453, 750-455 / 753-453, 753-455

### 4-Channel Analog Input Module 0/4-20 mA single-ended (S.E.)

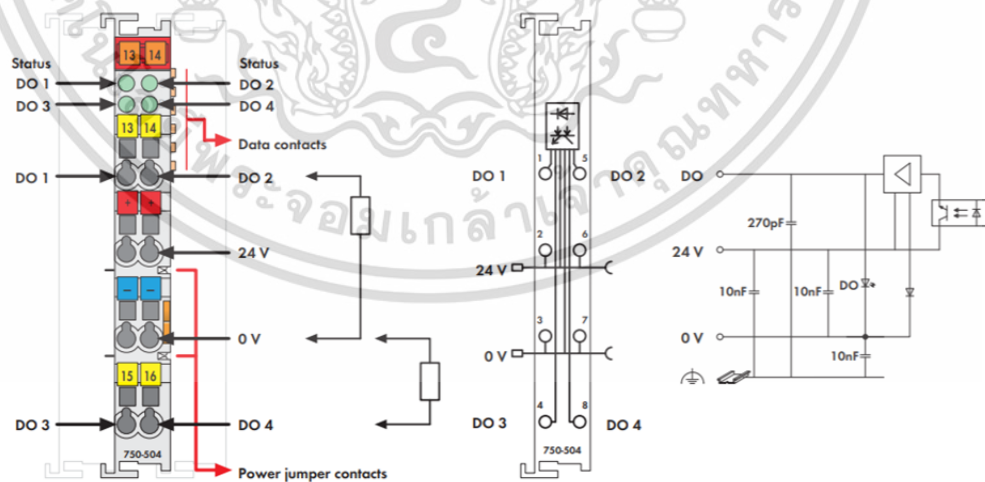


รูปที่ 4.6 การ์ดโมดูลอนาล็อกอินพุต

ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ส่งสัญญาณ (Transmitter) โดยส่วนใหญ่จะเป็นกระแสมาตรฐาน จึงเลือกใช้การ์ดอนาล็อก ที่สามารถเชื่อมกับสัญญาณกระแสมาตรฐานโดยตรง ทำให้สะดวกในการเชื่อมต่อกับตัว RTU ได้สะดวก เลือกใช้ โมเดล 750-453 ดังรูปที่ 4.6

## 750-504 / 753-504

### 4-Channel Digital Output Module 24 V DC Short-circuit protected; high-side switching

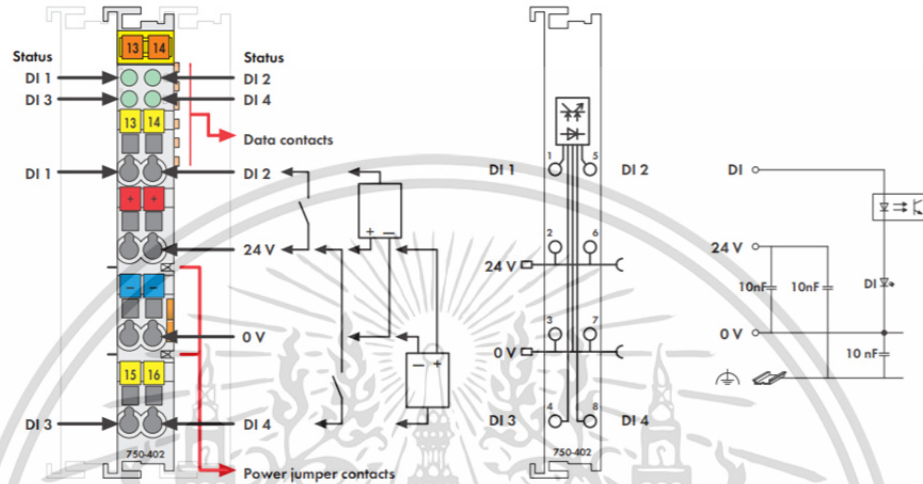


รูปที่ 4.7 การ์ดโมดูลดิจิทัลเอาต์พุต

การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เอาต์พุตโดยสามารถแยกแรงดันได้เพื่อป้องกันอันตรายแรงดันย้อนกลับ สามารถที่จะขับเอาต์พุตรีเลย์ และขับสวิตช์แม่เหล็ก (Magnetic switch) จึงเลือกใช้การ์ดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิจิตอลเอาต์พุต และสะดวกในการเชื่อมต่อกับตัว RTU ได้สะดวก เลือกใช้ โมเดล 750-504 ดังรูปที่ 4.7

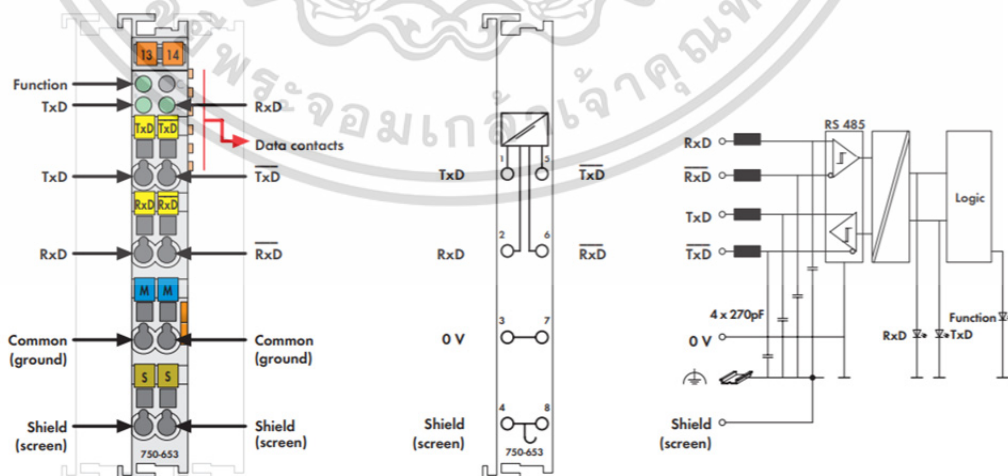
**750-402, 750-403 / 753-402, 753-403**  
**4-Channel Digital Input Module 24 V DC**  
 2- to 3-conductor connection; high-side switching



รูปที่ 4.8 การ์ดโมดูลดิจิตอลอินพุต

ในระบบนี้มีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์การวัด คือลูกกลอยเป็นสวิทช์เปิด-ปิดแบบหน้าสัมผัส สามารถจะเชื่อมต่อได้โดยตรง เลือกใช้การ์ด 750-402 ดังรูปที่ 4.8

**750-653 / 753-653**  
**Serial Interface RS-485**



รูปที่ 4.9 การ์ดเชื่อมต่อแบบ RS-485

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

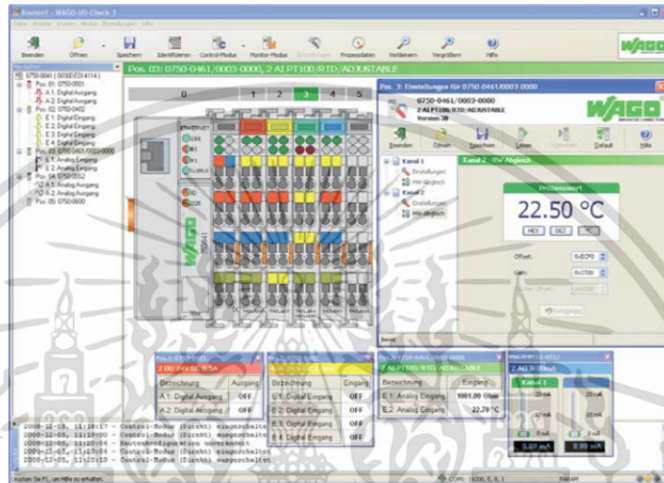
การอ่านค่าวัตต์มิเตอร์ (Watt meter) ผ่านบัส RS-485 เชื่อมต่อโดยโปรโตคอลมอดบัส RTU เป็นการสื่อสารแบบอนุกรม สามารถจะเชื่อมต่อได้โดยตรง เลือกใช้การ์ด 750-653 ดังรูปที่ 4.9

การตรวจสอบเวลาเชื่อมต่อในขณะที่ยังไม่ได้เขียนโปรแกรม แต่สามารถเชื่อมต่อและทดสอบได้โดยตรง โดยใช้ซอฟต์แวร์ ดังรูปที่ 4.10

- ซอฟต์แวร์

### WAGO-I/O-CHECK

Commissioning tool for the WAGO-I/O-SYSTEM 750

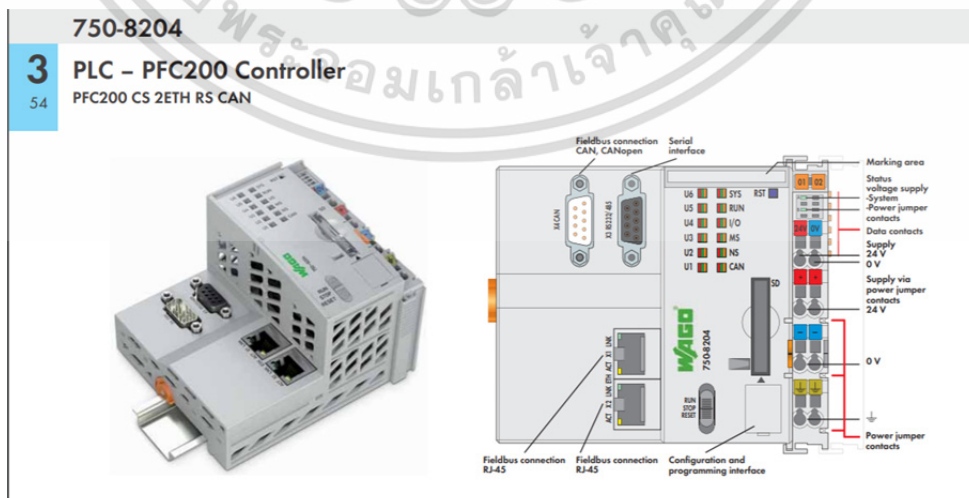


รูปที่ 4.10 ภาพโปรแกรมที่ประยุกต์ใช้กับ Remote Terminal Unit (Ethernet RTU)

#### 4.1.2 ระดับชั้นที่ 2

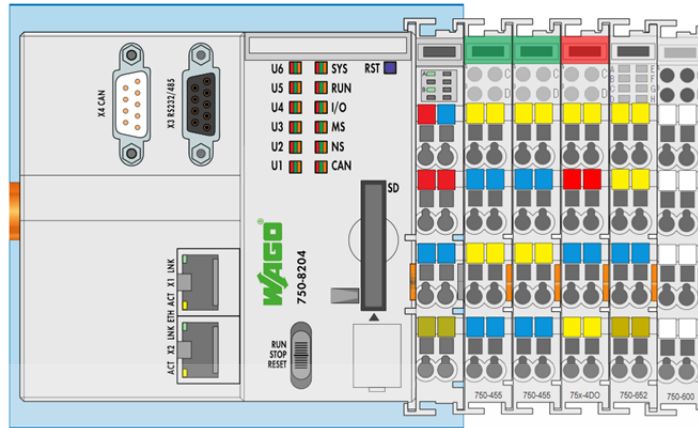
เอดจ์คอมพิวเตอร์ (Edge Computing) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม เซิร์ฟเวอร์ฝังตัว หน่วยจัดเก็บข้อมูล เกตเวย์และสวิตช์ เพื่อควบคุมการปฏิบัติงานทั้งหมดภายในเครือข่ายเชื่อมต่อภายนอกผ่านทาง 3G/4G router ดังรูปที่ 4.11 - 4.12

- องค์กรประกอบฮาร์ดแวร์



รูปที่ 4.11 เอดจ์คอมพิวเตอร์ WAGO PFC200

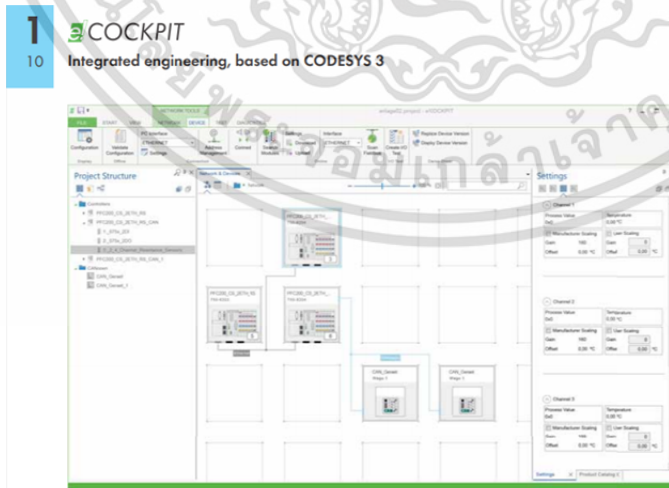
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 เราเตอร์ 4G WIFI

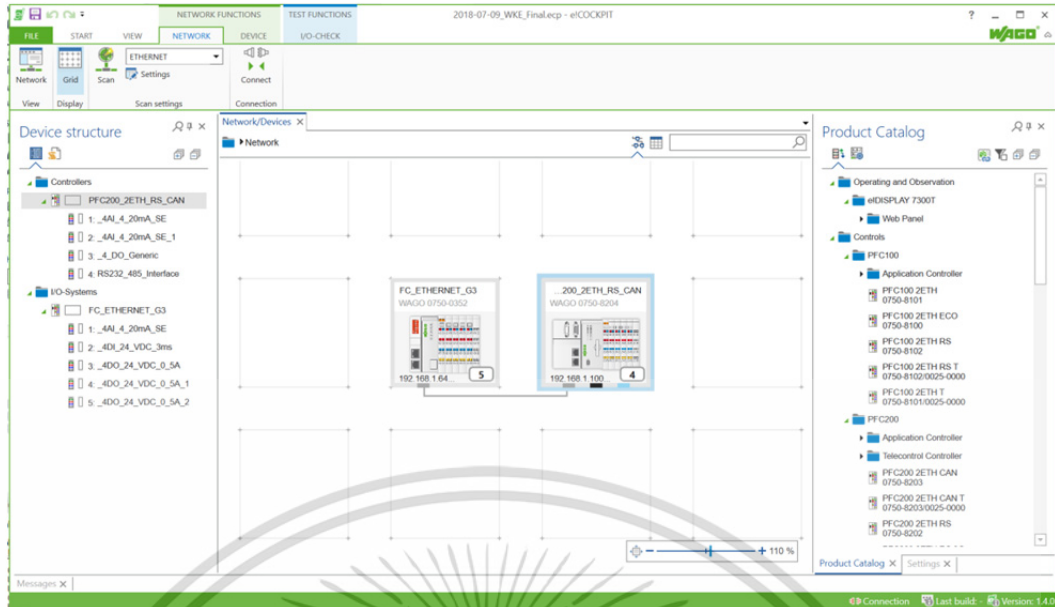
- องค์ประกอบซอฟต์แวร์ สามารถใช้ E-cockpit ในการเขียนโปรแกรมภาษา IEC-61131-3

ดังรูปที่ 4.13



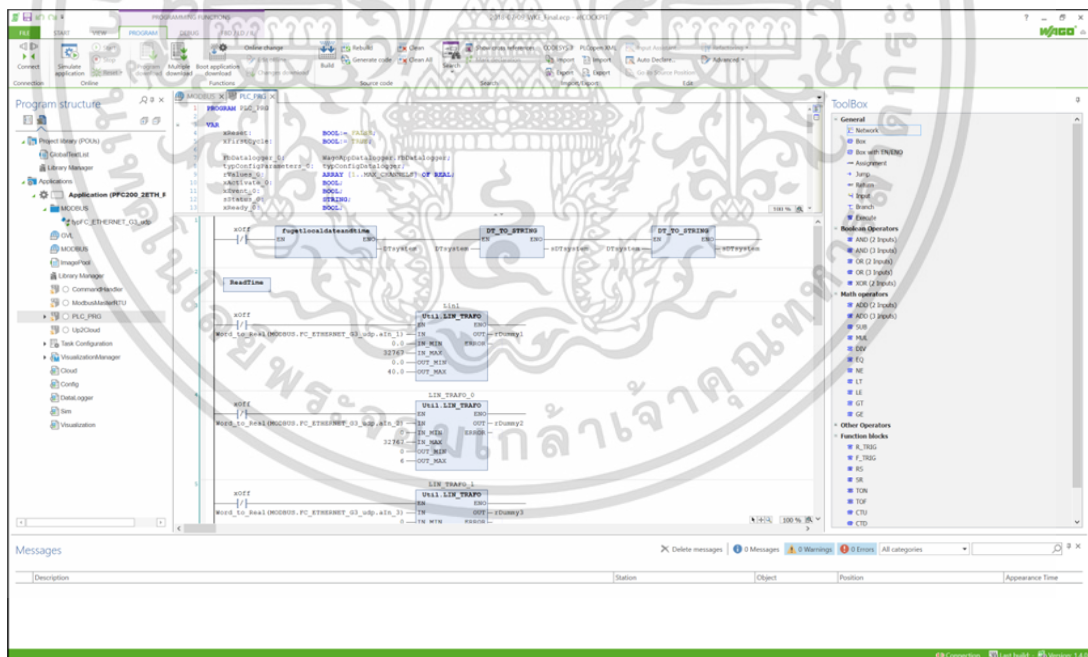
รูปที่ 4.13 โปรแกรม E-cockpit ที่ใช้เขียนโปรแกรมในเอตจคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 การกำหนดค่าฮาร์ดแวร์โดยใช้โปรแกรม E-cockpit

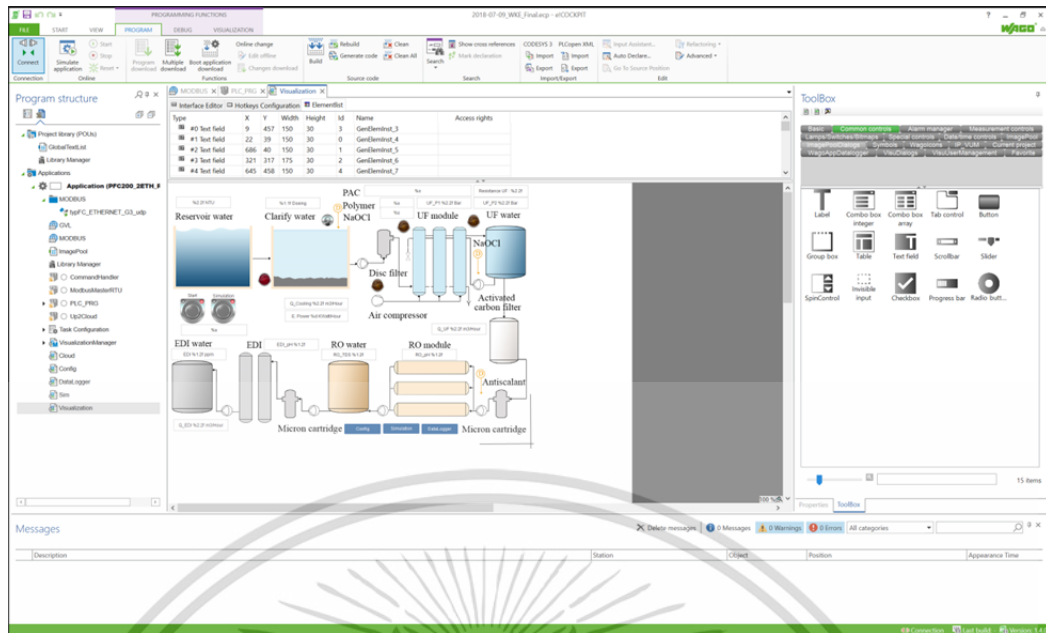
สามารถกำหนดค่าเริ่มต้นในการเชื่อมต่อ และสามารถประกาศตัวแปรเชื่อมโยงการใช้ อุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตระยะไกล ดังรูปที่ 4.14 และสามารถเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Ladder ที่ นิยมใช้ ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การเขียนโปรแกรมในเอ็ดจคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม E-cockpit

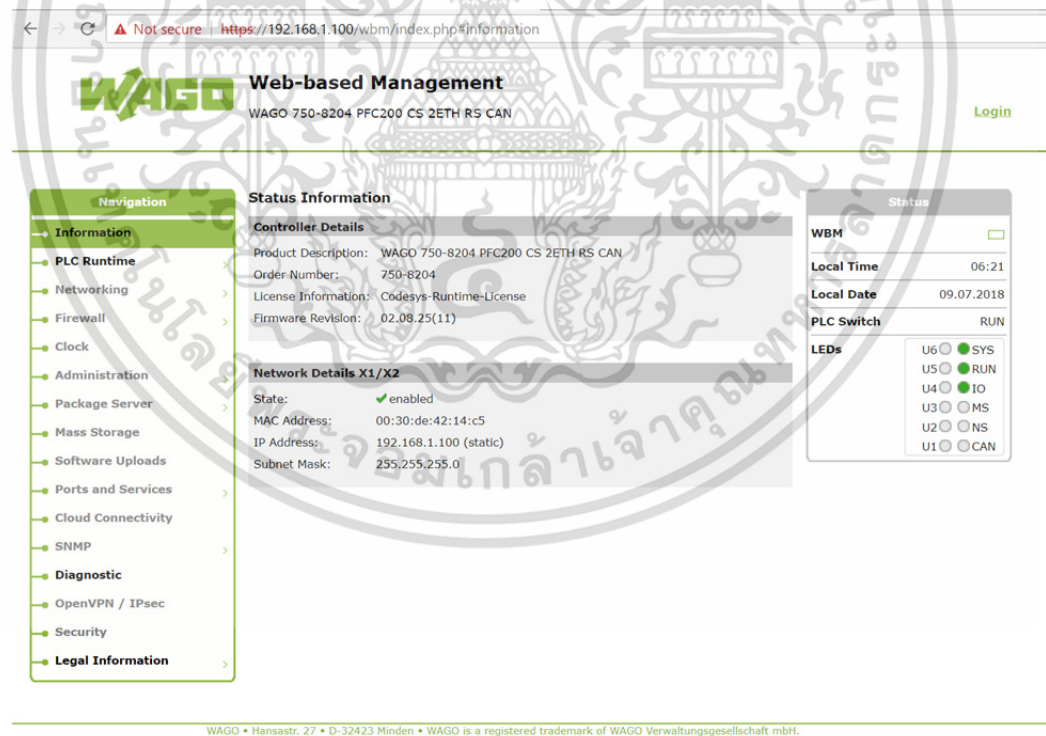
ซึ่งโปรแกรมสามารถวาดและใช้เครื่องมือในการสร้าง Human Machine Interface (HMI) ติดต่อกับผู้ใช้งานแบบ Visualization ได้สวยงาม ดังรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 โปรแกรม E-cockpit สำหรับการเขียน Virtualization

ในอุปกรณ์เอ็ดจ์คอมพิวเตอร์ สามารถกำหนดค่าได้ผ่านระบบ Web-based Management แสดงหน้าจอดังรูปที่ 4.17

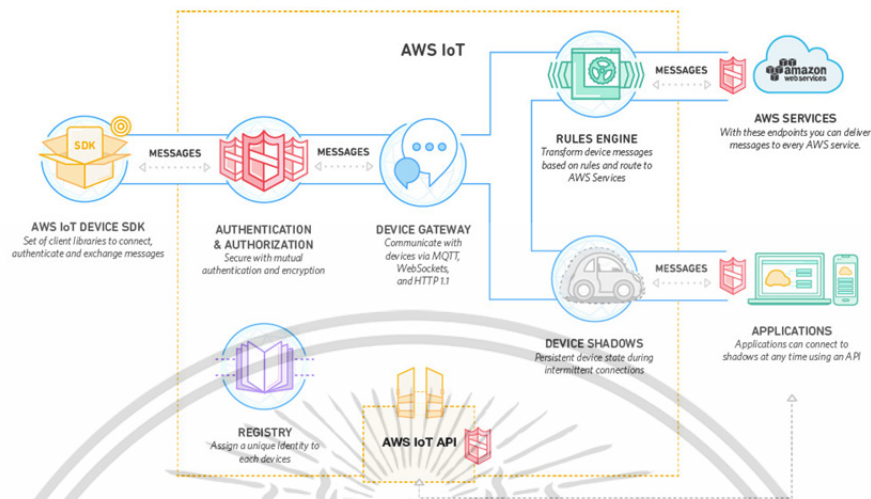


รูปที่ 4.17 การกำหนดค่าผ่าน Web-based Management

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



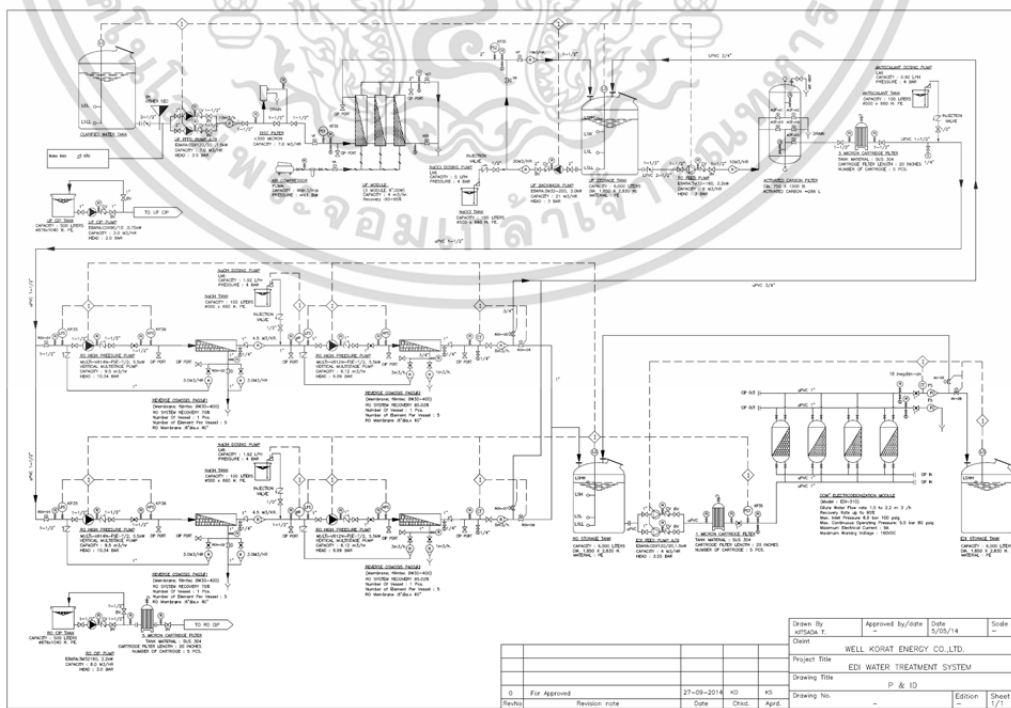
ส่วนแพลตฟอร์ม IoT Cloud ของ AWS มีความพร้อมในการให้บริการอยู่มากและสามารถเชื่อมต่อกับ Machine learning และ ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent) ได้โดยง่าย



รูปที่ 4.20 แพลตฟอร์ม AWS IoT Cloud

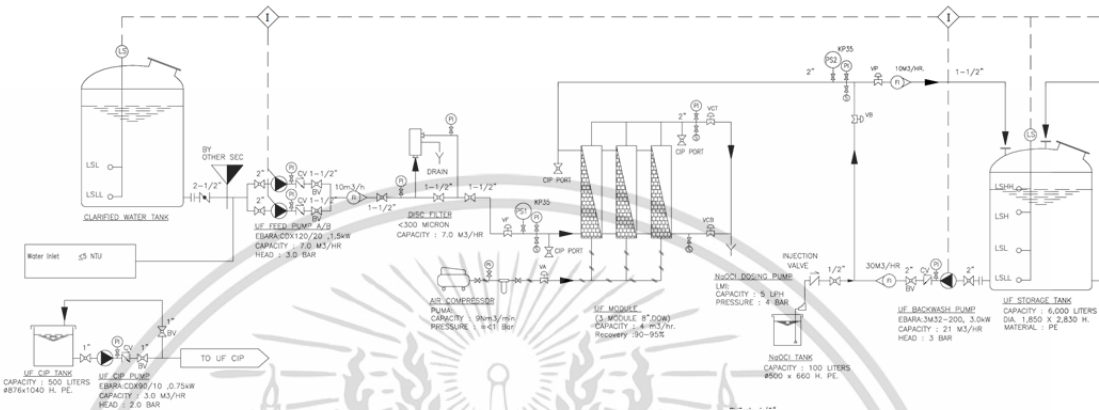
#### 4.2 การประยุกต์เพื่อบริหารจัดการโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนขนาดเล็กมาก

การปรับปรุงระบบและการเชื่อมต่อจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ต้องทราบอุปกรณ์ต่างๆ หรือมาตรฐานการเชื่อมต่อ แสดงดังรูปที่ 4.21 ภาพรวมรวมของกระบวนการในเบื้องต้น การปรับปรุงต้นทุนหรือค่าบำรุงรักษาระบบน้ำมีความจำเป็นอย่างมาก ในโรงไฟฟ้าชีวมวลนี้มีกระบวนการผลิตน้ำ ซึ่งใช้ในระบบหล่อเย็นและใช้ในการทำน้ำกลั่นให้หม้อต้มความดันไอน้ำ สำหรับสร้างไอน้ำขับเคลื่อนกังหันเพื่อปั่นกระแสไฟฟ้า



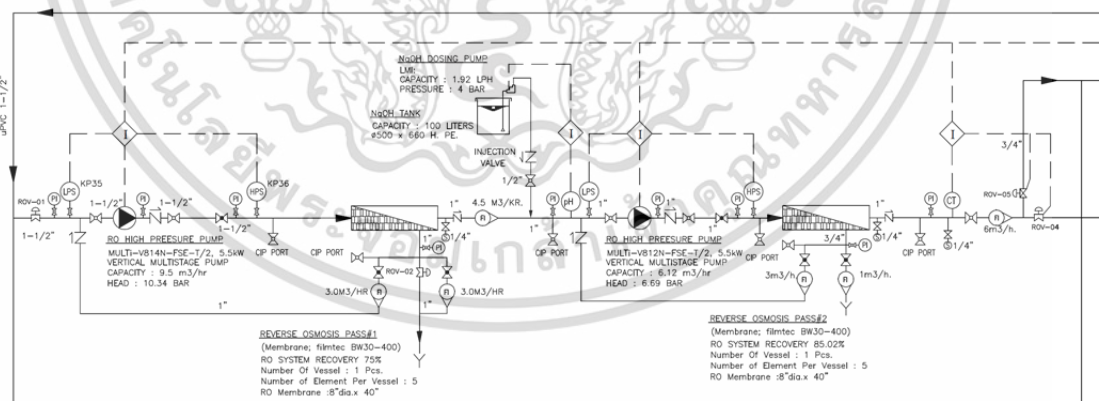
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 4.21 แผนผังระบบผลิตน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมการกรองแบบอัลตราฟิวเตรชั่น (Ultra-filtration) จะใช้เมมเบรนแบบอัลตราฟิวเตรชั่น ในการกรองดังนั้นเวลาในการกรองจึงมีส่วนสำคัญในการใช้พลังงานและต้องล้างย้อนเพื่อทำความสะอาดหรือยืดอายุไส้กรอง ทำให้ประหยัดต้นทุนในการดูแลรักษาซึ่งมีพีแอลซี (PLC) ควบคุมกระบวนการโดยตรงเพียงเราสื่อสารข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรม เพื่อสั่งการพีแอลซี (PLC) จากเอจด์คอมพิวติ้ง (Edge Computing) ได้ ซึ่งระบบแสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 โดะแกรมระบบบำบัดน้ำขั้นเตรียมการ (Pre-treatment) และการกรองแบบอัลตราฟิวเตรชั่น

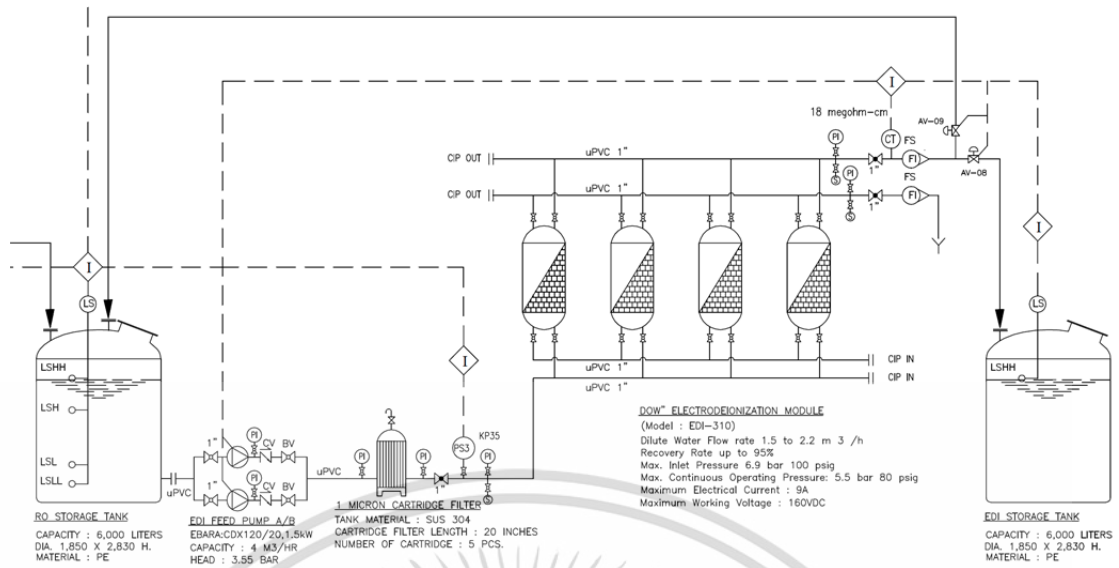
ในการควบคุมการกรองในระดับรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse-osmosis) ก็เช่นกันมีพีแอลซี (PLC) ควบคุมการกรองโดยตรง แต่ในงานวิจัยนี้จะเฝ้าติดตามคุณภาพน้ำใน 2 ตัวแปรคือ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และค่าทีดีเอส (TDS) เพื่อเฝ้าติดตามคุณภาพน้ำว่าเป็นดังข้อกำหนดหรือไม่ เป็นต้น ซึ่งแผนภาพแสดงดังรูปที่ 4.23



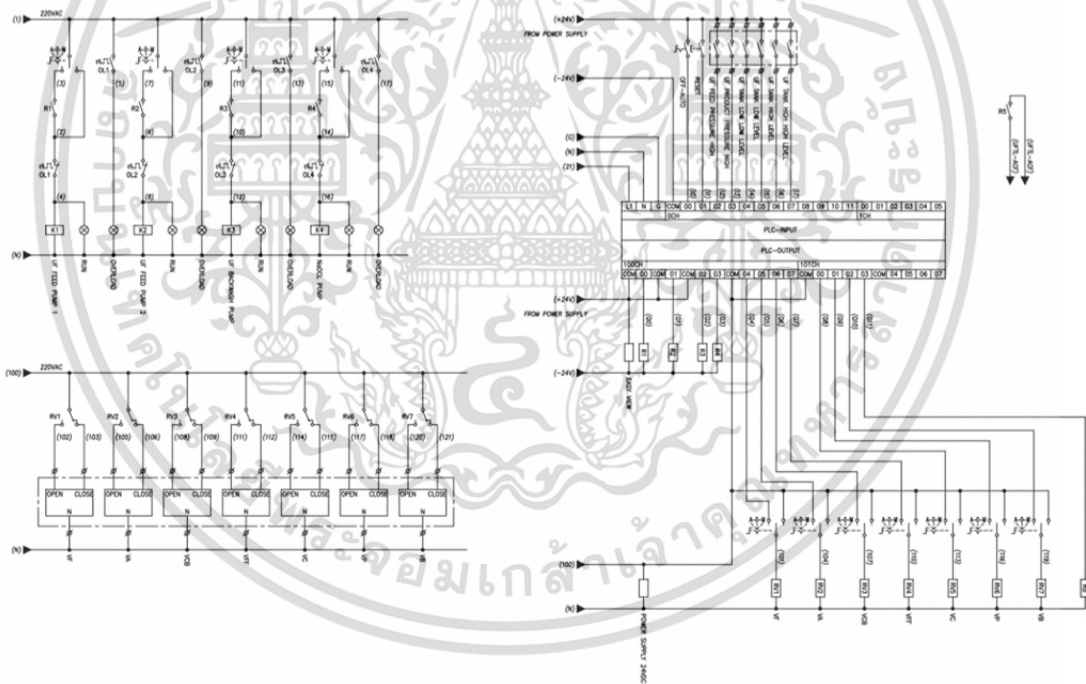
รูปที่ 4.23 โดะแกรมการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse-osmosis)

ส่วนการกรองเพื่อลดค่าความนำของไฟฟ้าของกระบวนการบำบัดน้ำแบบอิเล็กโทรไดโอนไนเซชัน (Electro Deionization: EDI) ใช้ในการกรองน้ำโดยใช้แรงดันทางไฟฟ้าแยกประจุ ดังรูปที่ 4.24 ส่วนรูปการเชื่อมต่อสายและการเชื่อมต่อกับพีแอลซี แสดงรูปที่ 4.25 - 4.27 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

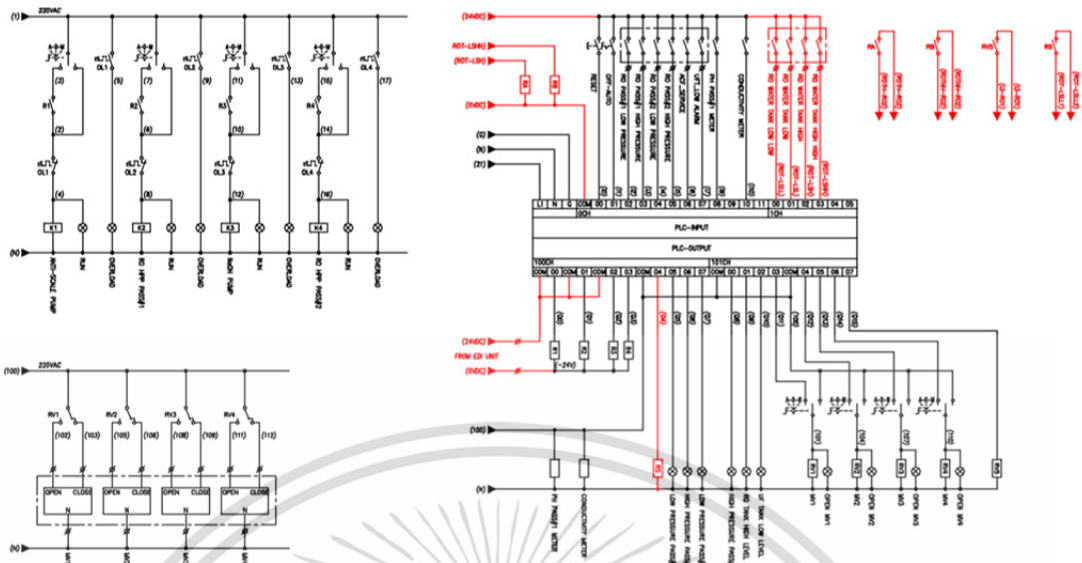


รูปที่ 4.24 ไตอะแกรมกระบวนการอิเล็กโทรดีไอออไนเซชัน (EDI)

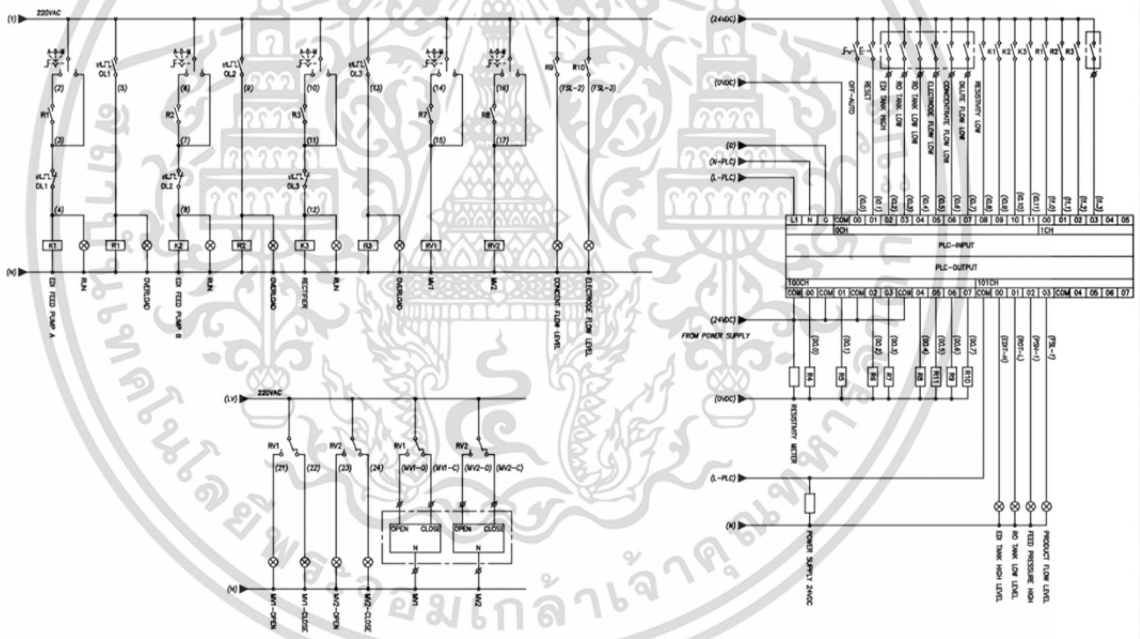


รูปที่ 4.25 Ladder และไตอะแกรมการเชื่อมต่อสำหรับควบคุมการรองแบบอัลตราฟิวเตรชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



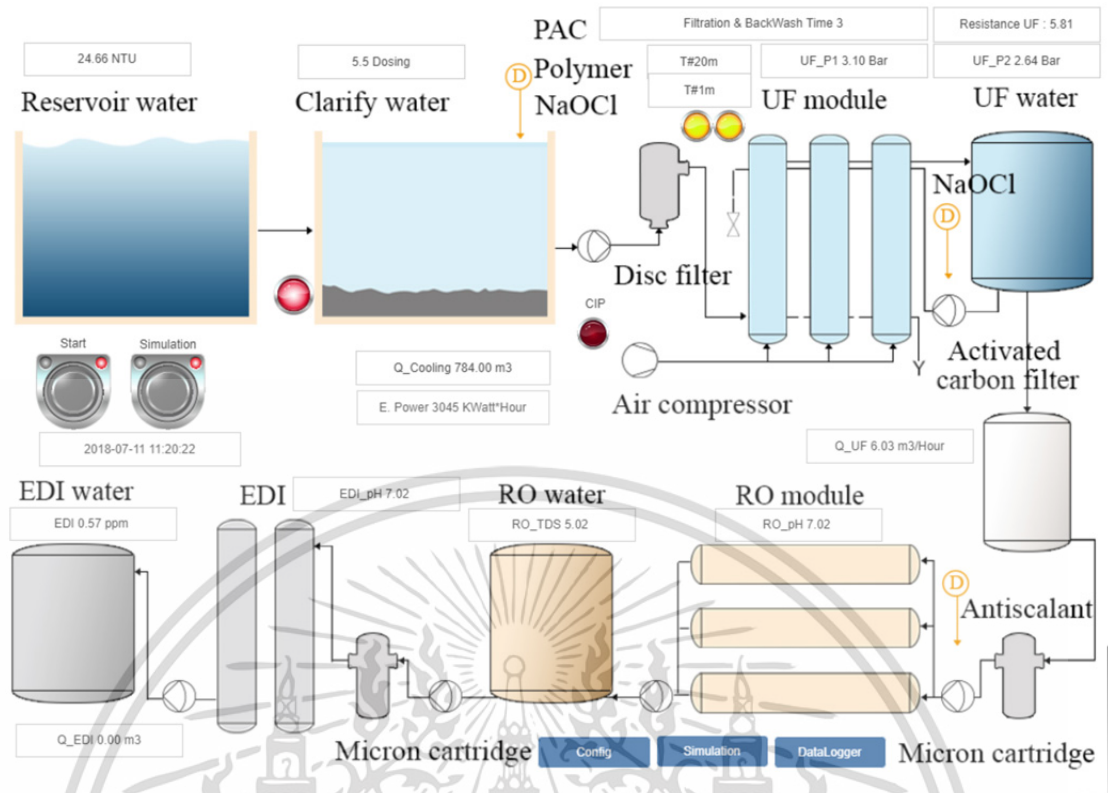
รูปที่ 4.26 Ladder และโต๊ะแกรมการเชื่อมต่อสำหรับควบคุมการกรองแบบรีเวอร์สของมอเตอร์ 220 โวลต์



รูปที่ 4.27 Ladder และโต๊ะแกรมการเชื่อมต่อสำหรับควบคุมการอิเล็กทรอนิกส์อินเวอร์ชัน

การเชื่อมโยงกับผู้ควบคุมกระบวนการจำเป็นต้องติดต่อกับผู้ใช้ (Human Machine Interface: HMI) โดยผ่านเว็บเพจ แสดงรูปที่ 4.28 -4.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 HMI สำหรับการควบคุมกระบวนการบำบัดน้ำ

n	1	Dosing_Min	3.5	FiltrationTime1	T#40m
Am	77	Dosing_Medium	5.5	BackwashTime1	T#20s
Mu	1	Dosing_Max	8.0	FiltrationTime2	T#30m
Delta_P_limit	0.20	FiltrationTime	T#20m	BackwashTime2	T#40s
Turbid_limit1	20.00	BackwashTime	T#1m	FiltrationTime3	T#20m
Turbid_limit2	25.00	tSampleInterval0	T#15s	BackwashTime3	T#1m
uiReadAddress	0	tPublishInterval0	T#30s	SamepleComputTime	T#1h

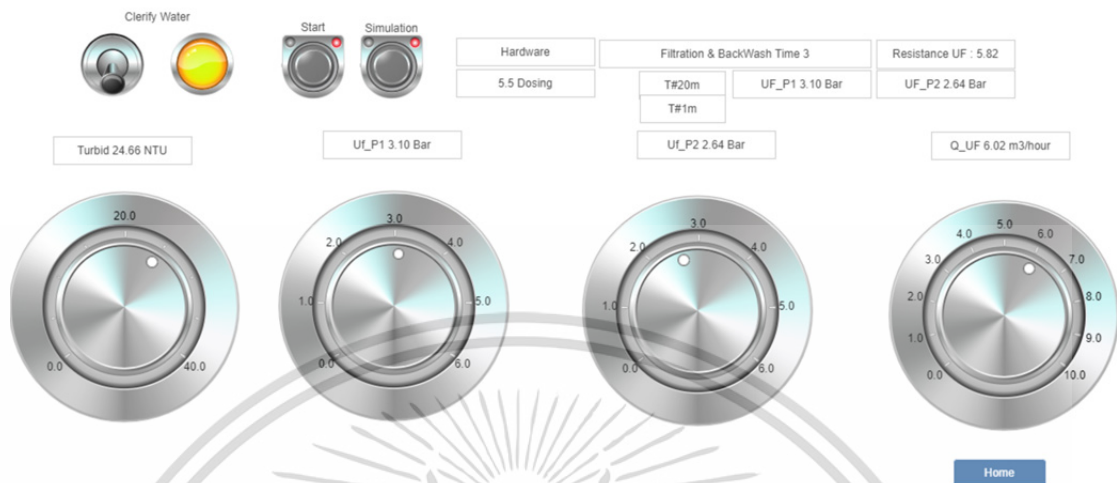
[Home](#)

### Parameter Configuration

รูปที่ 4.29 HMI สำหรับการกำหนดค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดค่าเริ่มต้นเพื่อใช้ในการคำนวณหรือประมวลผล สามารถเขียนให้กำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ ได้ ดังรูปที่ 4.29 ส่วนการจำลองเมื่อยังไม่เชื่อมกับอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุต ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 HMI สำหรับการจำลองค่าอินพุตและเอาต์พุตของระบบ

Log status	Name	Value	Unit	Alarm	Lower limit	Upper limit
1	RawWater_Turbid	24.66386	NTU		15.0	25.0
2	Q_Dosing	5.50000	mL/hour		0.0	10.0
3	UF_P1	3.09604	Bar		0.0	6.0
4	UF_P2	2.64120	Bar		0.0	6.0
5	Q_UF	6.02192	m3/hour		0.0	10.0
6	R_UF	5.91598	Mohm		0.0	30.0
7	RO_pH	7.836	-		0.0	14.0
8	RO_TDS	5.836	ppm		0.0	10.0
9	EDI_pH	7.836	-		0.0	14.0
10	EDI_TDS	0.547	ppm		0.0	10.0
11	Q_Cooling	657.00556	m3		0.0	9000.0
12	Q_EDI	0.00000	m3		0.0	1000.0
13	Energy	3045.00192	Kwatts		0.0	100000.0

รูปที่ 4.31 HMI สำหรับดาต้าลอจเจอร์ (Data Logger)

เอ็ดจ์คอมพิวติ้ง (Edge Computing) สามารถจัดเก็บข้อมูลลงเอสดีการ์ด (SD card) ได้ตลอดเวลา สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลได้ ดังรูปที่ 4.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการสร้างฐานข้อมูล ได้ทั้งแบบ SQL และ NoSQL โดยกำหนดรูปแบบ ดังต่อไปนี้

#### SQL

```
CREATE TABLE `WKE_water1` (
  `Hrs` int(11) DEFAULT NULL,
  `Turbid` float DEFAULT NULL,
  `Q_Dosing` float DEFAULT NULL,
  `UF_P1` float DEFAULT NULL,
  `UF_P2` float DEFAULT NULL,
  `Q_UF` float DEFAULT NULL,
  `EDI_TDS` float DEFAULT NULL,
  `EDI_pH` float DEFAULT NULL,
  `RO_TDS` float DEFAULT NULL,
  `RO_pH` float DEFAULT NULL,
  `Q_Cooling` float DEFAULT NULL,
  `Q_EDI` float DEFAULT NULL,
  `KWatt` float DEFAULT NULL,
  `Timestamp` datetime DEFAULT NULL
) ENGINE=MyISAM DEFAULT CHARSET=utf8'
```

```
CREATE TABLE `WKE_TWC` (
  `Hrs` int(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT,
  `Q_Dosing` float DEFAULT NULL,
  `Q_Cooling` float DEFAULT NULL,
  `Q_EDI` float DEFAULT NULL,
  `Cost_Dosing` float DEFAULT NULL,
  `KWatt` float DEFAULT NULL,
  `Cost_Electrical` float DEFAULT NULL,
  `Fixed Cost` float DEFAULT NULL,
  `TWC` float DEFAULT NULL,
  `Timestamp` datetime DEFAULT NULL,
  PRIMARY KEY (`Hrs`)
) ENGINE=MyISAM DEFAULT CHARSET=utf8
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) สำหรับ Machine Learning และปัญญาประดิษฐ์ (AI)

#### NoSQL

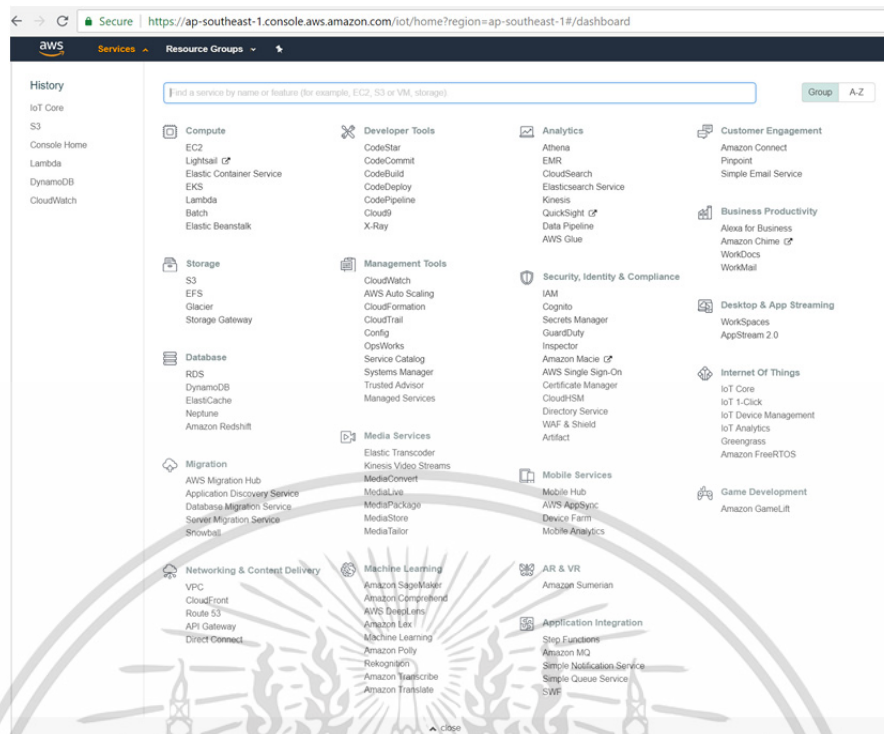
```
{
  "GMT": 1530177127624,
  "ID": 1,
  "topic": {
    "Time": "2018-06-28T14:11:41.109+00:00",
    "Values": {
      "MyVariable3": 239,
      "MyVariable4": 8496791
    }
  }
}
```

#### 4.3 ระบบการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ (Cloud Computing Platform)

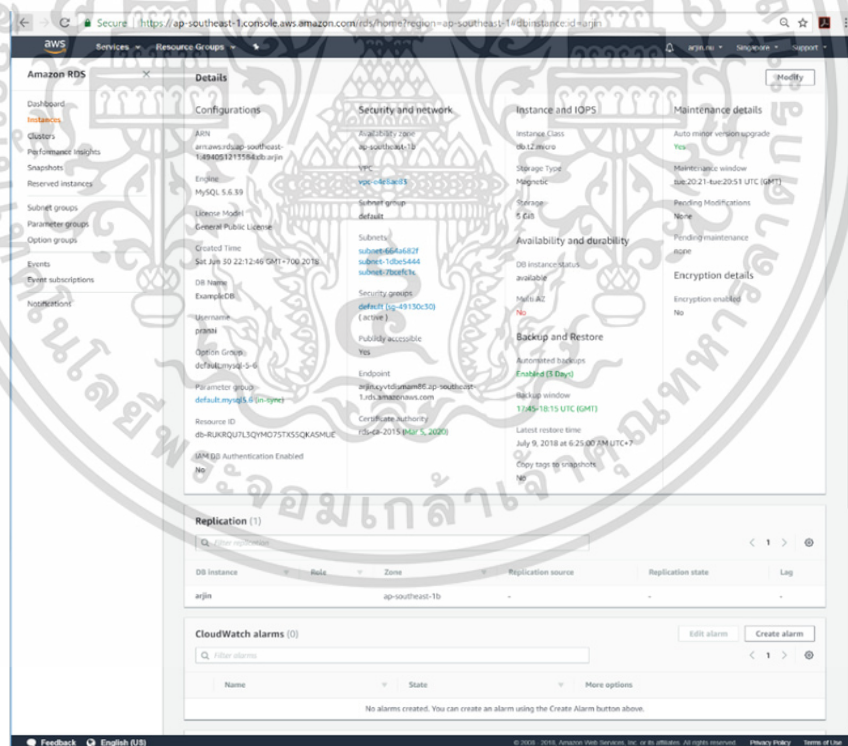
- AWS IOT Core (Things Management)
- AWS IAM (Security)
- AWS Lambda (Rule)
- AWS RDS (SQL)
- AWS DynamoDB (NoSQL)
- AWS S3 (Storage)
- AWS Cloud9 (Programming Platform)
- AWS EC2 (Computing Unit)

เมื่อกำหนด รูปแบบของฐานข้อมูลแล้ว ในส่วนของระบบการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ จะมี ส่วนที่เกี่ยวข้องในการกำหนดค่าดังรูปที่ 4.32 - 4.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

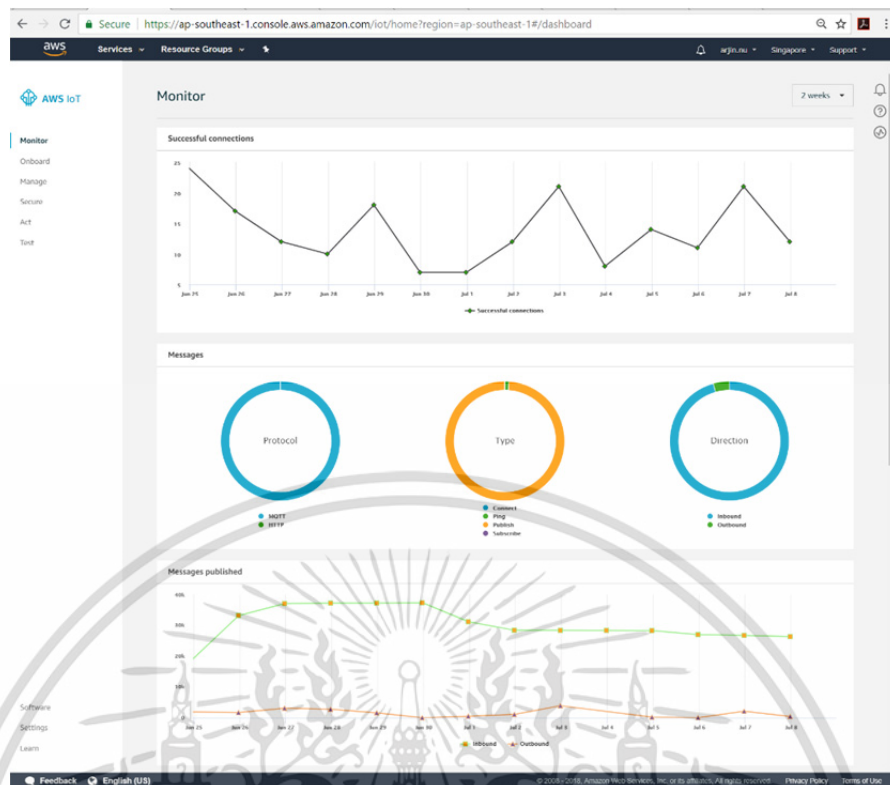


รูปที่ 4.32 แพลตฟอร์ม AWS Cloud Computing

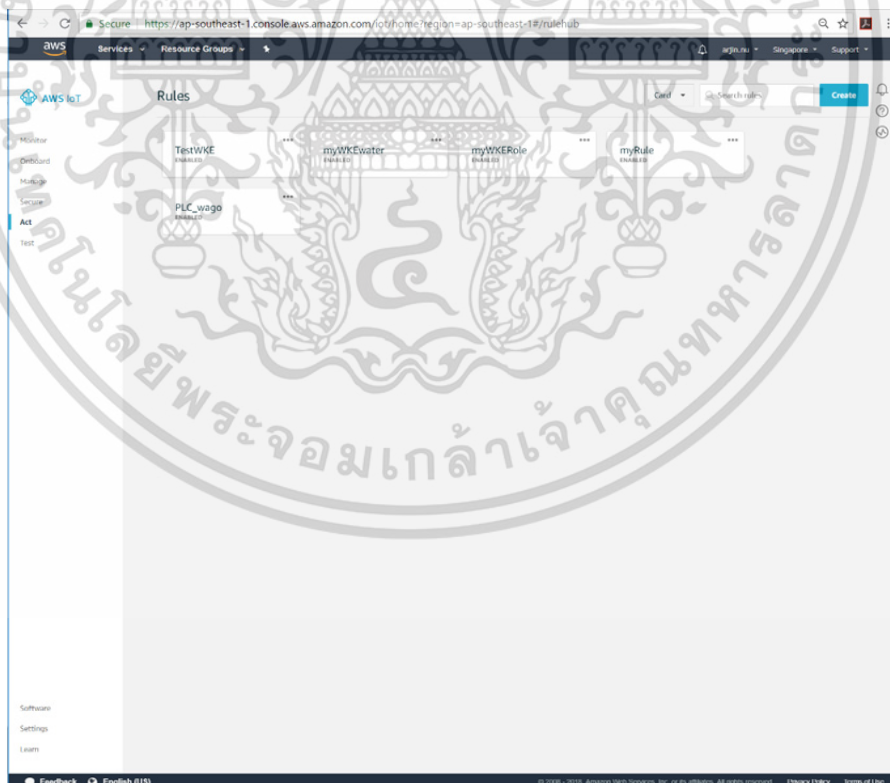


รูปที่ 4.33 AWS RDS (ฐานข้อมูลแบบ SQL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

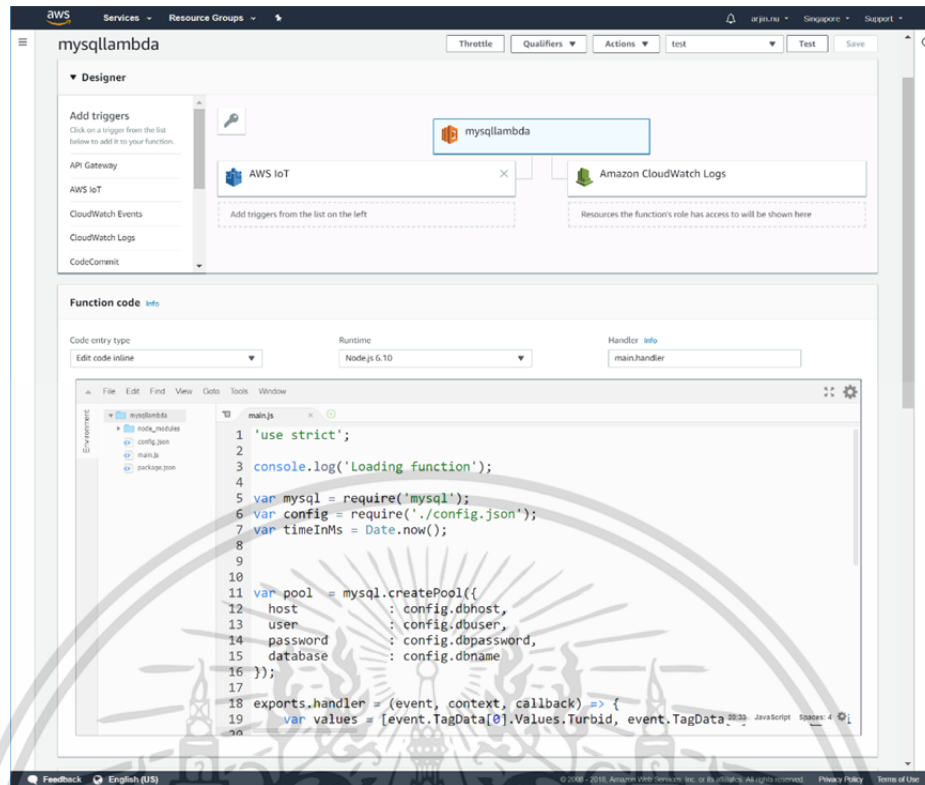


รูปที่ 4.34 AWS IoT Core

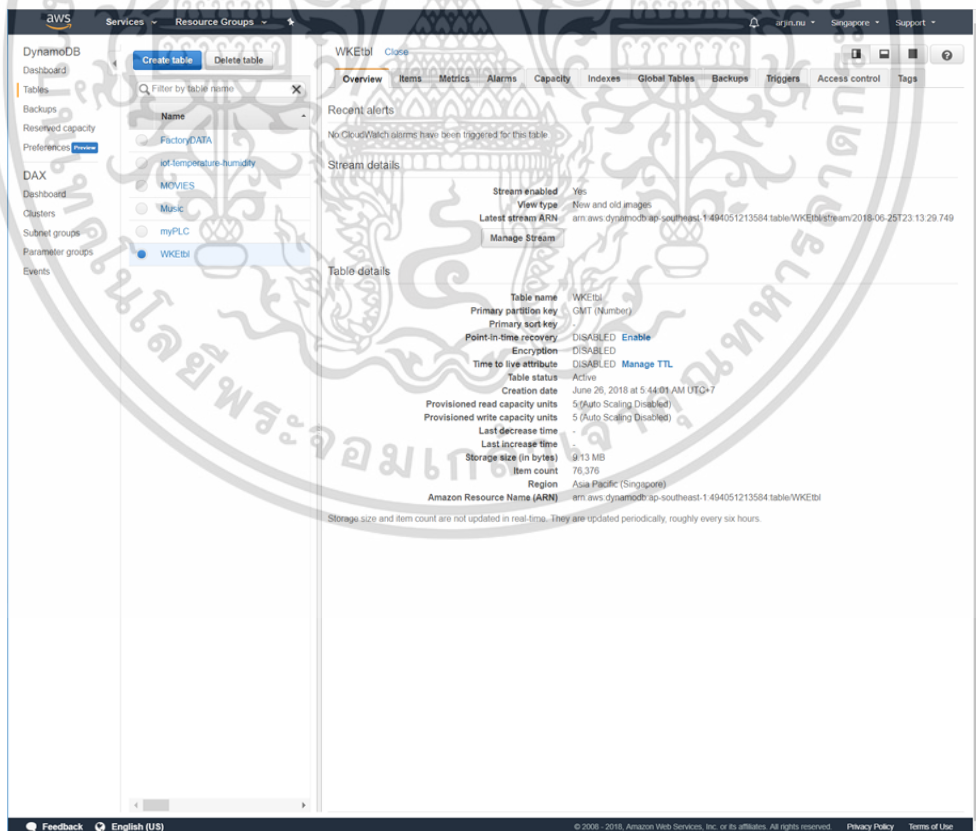


รูปที่ 4.35 AWS IoT Rule

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

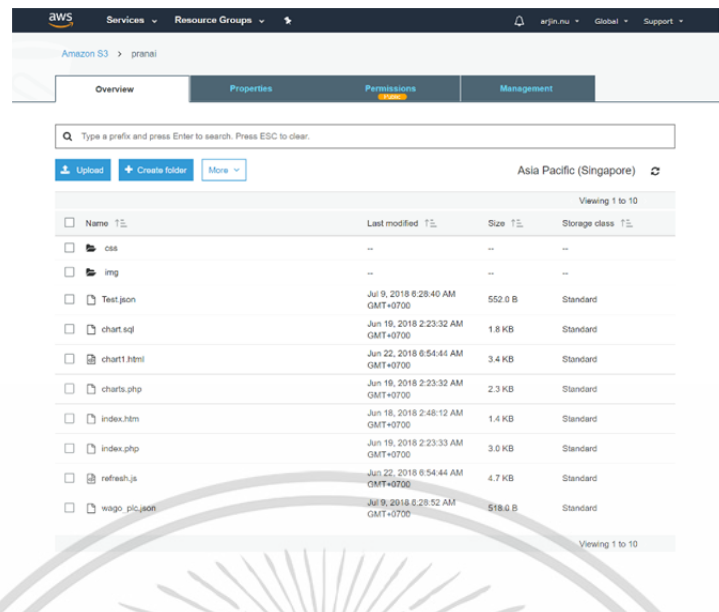


รูปที่ 4.36 AWS Lambda

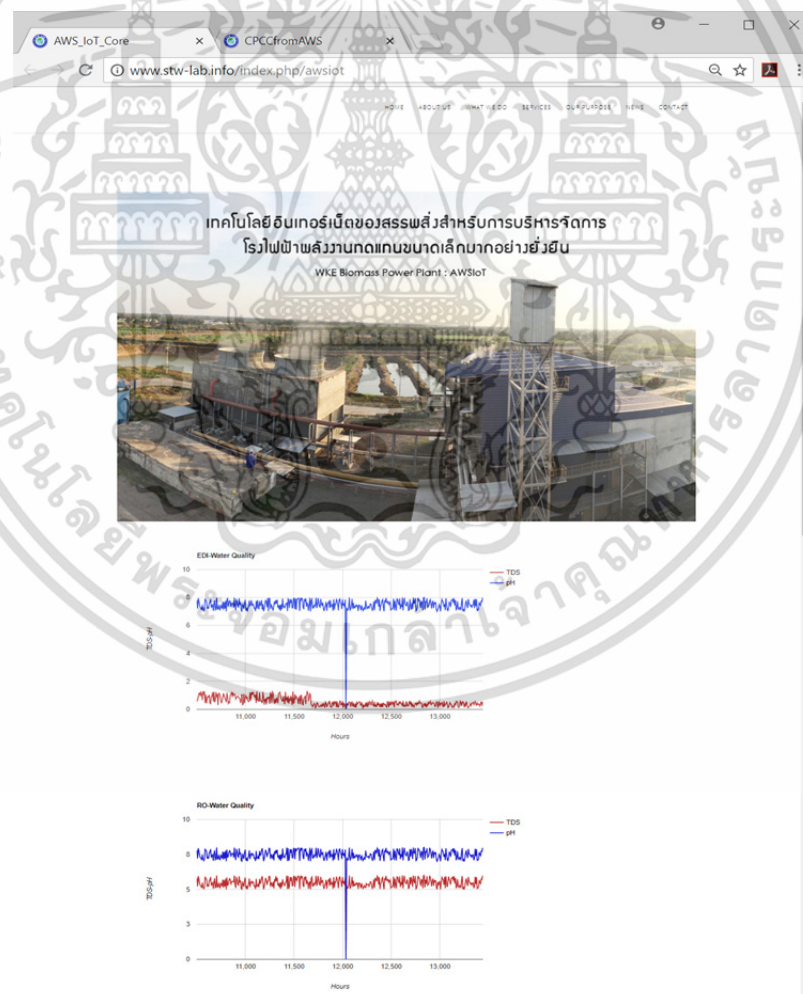


รูปที่ 4.37 AWS DynamoDB (ฐานข้อมูลแบบ NoSQL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 AWS S3



รูปที่ 4.39 เว็บไซต์แสดงผลกราฟตัวแปรผ่านระบบคลาวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้เครื่องมือต่างๆ ในแพลตฟอร์ม AWS ให้ความยืดหยุ่นในการพัฒนามากกว่าระบบคลาวด์ของ Wago ซึ่งให้ใช้งานได้ฟรีแต่ยังไม่สมบูรณ์ การวิจัยนี้จำเป็นต้องสร้างระบบจาก AWS ซึ่งนับว่ามีความยืดหยุ่นกว่ามาก

#### 4.4 สรุปท้ายบท

จากการออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆ เพื่อบริหารจัดการควบคุมระบบบำบัดน้ำในโรงงานไฟฟ้าชีวมวล ระบบนี้สามารถวิเคราะห์และปรับกระบวนการตามน้ำดิบโดยอุปกรณ์เอดจ์คอมพิวเตอร์ (Edge Computing) ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมและส่งต่อข้อมูลไปยังระบบอินเทอร์เน็ตและสามารถนำข้อมูลไปบริหารจัดการในรูปแบบข้อมูลขนาดใหญ่หรือ Big Data รวมถึงสามารถประยุกต์ใช้งานได้ทุกฟังก์ชันในการสื่อสารข้อมูล โดยในบทถัดไปจะเป็นการนำระบบไปทดลองและบันทึกผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

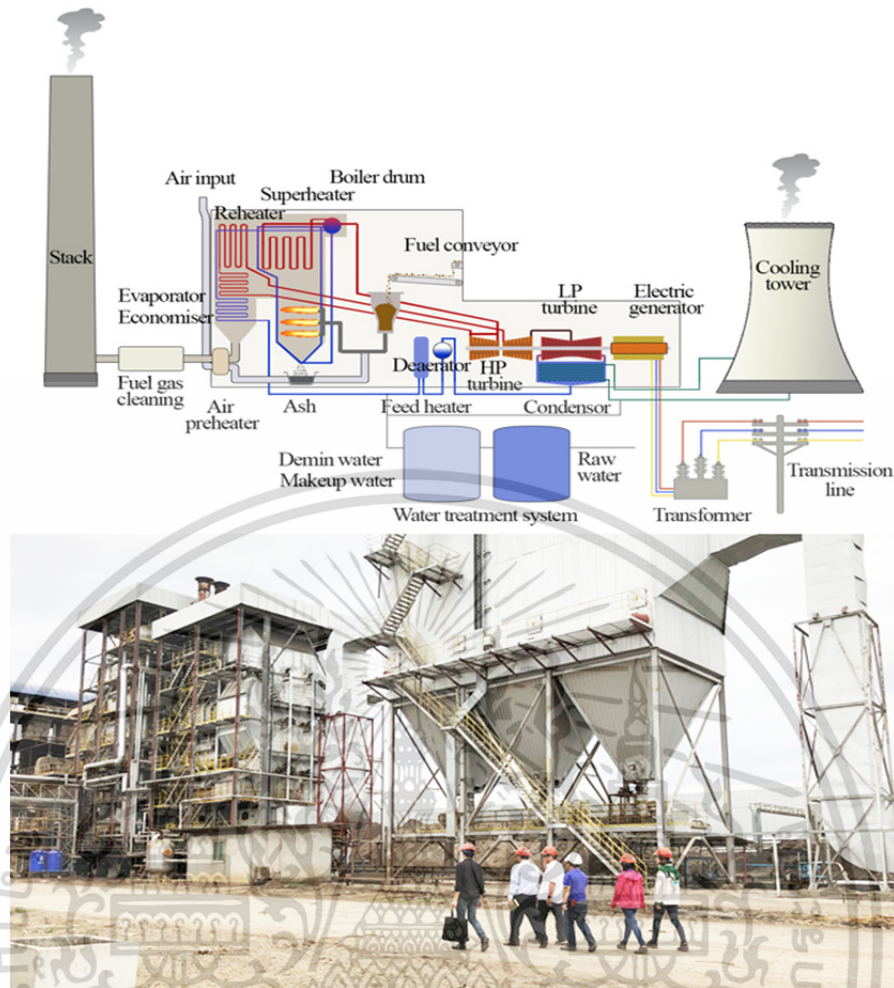
## บทที่ 5

### การทดลองและการอภิปรายผล

บทนี้กล่าวถึงการทดลองและการอภิปรายผลการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบบริหารจัดการน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก โดยออกแบบให้สามารถควบคุมและติดตามกระบวนการทำงาน วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการบำรุงรักษา ด้วยเทคนิคการควบคุมการต้นของไส้กรองแบบปรับตัวได้ ที่สามารถปรับตารางการกรองและการล้างย้อนรวมถึงปรับแต่งปริมาณการเติมสารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบตามคุณสมบัติของน้ำจากแหล่งธรรมชาติที่อาจมีความผันผวนตามฤดูกาล

#### 5.1 การปรับปรุงประสิทธิภาพระบบบริหารจัดการน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก

การทดลองปรับปรุงประสิทธิภาพระบบบริหารจัดการน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับอุตสาหกรรม (Industrial Internet of Things : IIoT) ดำเนินการในโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก ดังรูปที่ 5.1 โรงไฟฟ้ามีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งไม่เกิน 10 เมกะวัตต์ ตั้งอยู่ที่จังหวัดบุรีรัมย์ ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทขับเคลื่อนด้วยกังหันไอน้ำขนาดกำลังการผลิต 9.9 เมกะวัตต์ ด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น เศษไม้ เปลือกข้าว ชังข้าวโพด ชี้อ้อย รวมถึงเศษวัสดุทางการเกษตรในพื้นที่ ใช้หม้อไอน้ำแบบ Stoker boiler ที่มีระบบ Steam reheat และระบบกังหันไอน้ำแบบ Extraction-condensing steam turbine ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เชื้อเพลิงชีวมวลประมาณ 450 ตันต่อวัน ถูกเผาในระบบเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) เพื่อสร้างไอน้ำแรงดันสูง 45 ตันต่อชั่วโมง ระบบนำความร้อนที่เหลือจากเครื่องทำความร้อนและเครื่องทำความร้อนกลับมาใช้ใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนถ่ายพลังงานได้เกือบ 85% ระบบระบายความร้อนแบบเปิด (open cycle cooling system) ประกอบด้วยหอระบายความร้อน (cooling tower) และปั๊มสำหรับระบบระบายความร้อน (Pump of cooling tower) น้ำระบายความร้อนจะถูกสูบจากถังน้ำ Clarified water ผ่านคอนเดนเซอร์ และถูกปล่อยกลับสู่แหล่งน้ำ สำหรับการปล่อยมลพิษสู่อากาศจะได้รับการกำจัดโดยใช้เครื่องตกตะกอนโดยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitators: ESP) เพื่อขจัดอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ในอากาศ



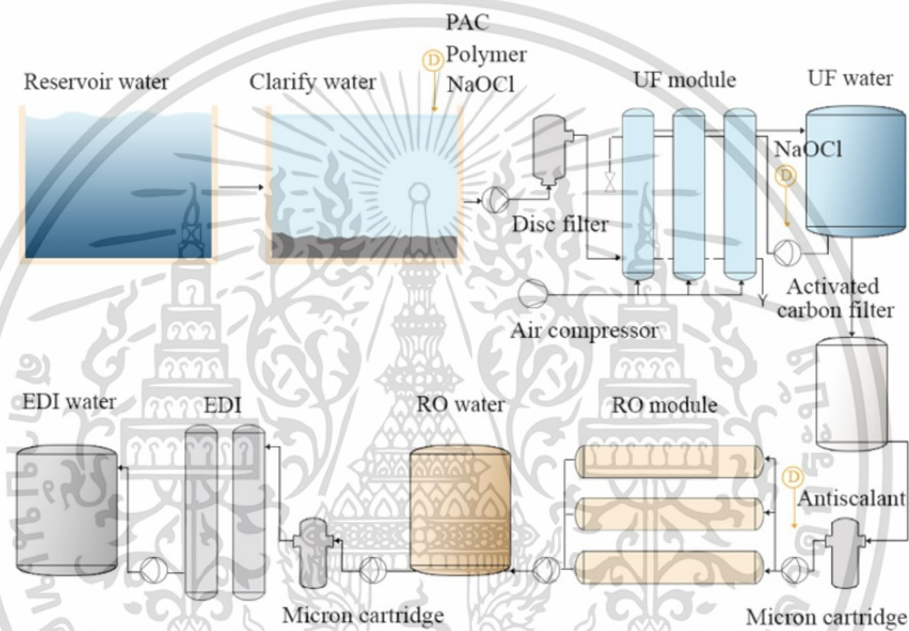
รูปที่ 5.1 ไดอะแกรมโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก

กัณฑ์ไอน้ำขนาดกำลังการผลิต	9.9 MW
ค่า Generator power factor	0.85
ค่า Generator electrical voltage	11,000 Volts
ปริมาณไอน้ำแรงดันสูง	45 t/hr
ค่าความดัน ณ จุดทำงาน	6.5 MPa
ค่าอุณหภูมิ ณ จุดทำงาน	480 °C
ค่าอุณหภูมิไอน้ำที่ป้อนเข้า economizer	110 °C
ค่าความชื้นของไอน้ำ Saturated steam	0.5%
อนุภาคฝุ่นจากการเผาไหม้ในอากาศ	<50 PPM

กระบวนการผลิตน้ำในโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก แบ่งตามวัตถุประสงค์ของการใช้คือ น้ำสำหรับระบบการผลิตไอน้ำแรงดันสูง และน้ำสำหรับระบบหล่อเย็น ดังรูปที่ 5.2 ระบบประกอบด้วยระบบการบำบัดน้ำขั้นเตรียมการ (Pre-treatment) ระบบการกรองแบบอัลตราฟิวเตรชัน (Ultra-filtration) ระบบการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส (RO-filtration) และระบบการแยกอิมัลชันด้วยเอกซเรย์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้า (Electrodeionization) โดยนำดิบจากบ่อกักเก็บน้ำถูกป้อนเข้าสู่ระบบการบำบัดน้ำขั้นเตรียมการ มีการเติมสารเคมี PAC, Polymer เพื่อตกตะกอน และเติมสารละลายโซเดียมไฮเปอร์คลอไรด์เพื่อการฆ่าเชื้อ เก็บน้ำไว้ในถัง Clarify เพื่อใช้ในระบบหล่อเย็น และส่งต่อไปยังระบบการกรองด้วยเมมเบรน UF-RO filtration เพื่อกรองอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1.0 นาโนเมตร ออกและมีการเติมละลาย Anti-scalant ในกระบวนการ RO-filtration เพื่อป้องกันการเกิดตะกอนที่ไส้กรอง จากนั้นน้ำในถังพัก RO จะสูบส่งไปยังระบบการแยกไอออนด้วยไฟฟ้าเพื่อลดปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำรวมถึงไอออน แร่ธาตุเกลือหรือโลหะในน้ำให้มีค่าที่ไอเอส (TDS) <1.0 ppm ปริมาณน้ำ EDI ที่ผลิตได้ 96 ลูกบาศก์เมตร/วัน จะถูกเก็บไว้ในถังเก็บขนาด 120 ลูกบาศก์เมตร เพื่อเตรียมเป็นน้ำป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิตไอน้ำแรงดันสูง คุณสมบัติ น้ำในกระบวนการแสดงดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ไคอะแกรมระบบบำบัดน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของน้ำในกระบวนการ

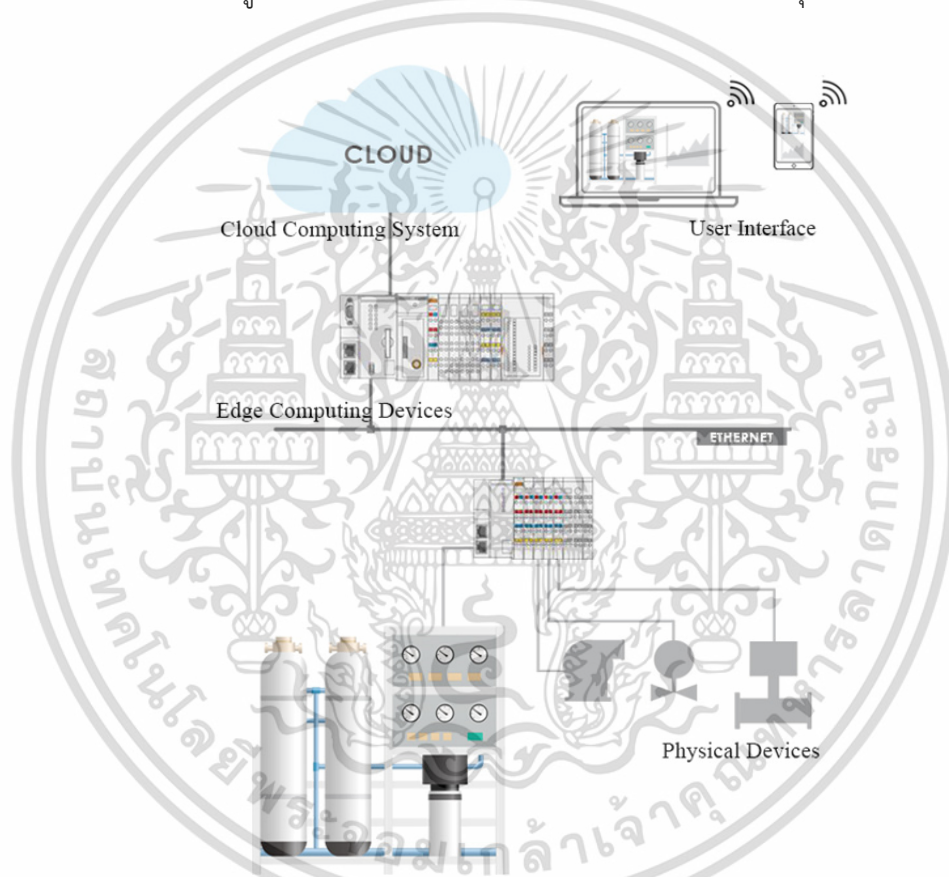
พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำดิบ	Pre-Treatment	UF/RO	EDI
TDS	mg/L	1,920	1,984	< 6.4	< 0.64
pH	-	7.25	7.2	5.0-9.0	6.5-8.5
Turbidity	NTU	15.68	1	< 0.1	< 0.1

การควบคุมการทำงานของกระบวนการผลิตน้ำในปัจจุบัน ใช้ตัวควบคุมตรรกะแบบโปรแกรมได้ (Programmable logic controller) [21] โดยอัลกอริทึมการควบคุมการกรองในกระบวนการ UF-filtration เป็นแบบเวลาคงที่ อีกทั้งการควบคุมในกระบวนการ Pre-treatment ใช้การเติมสารเคมีด้วยปริมาณคงที่ ทำให้เกิดความสูญเสียทั้งในกรณีที่น้ำดิบมีความสกปรกมากหรือน้อยก็ตาม วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบบริหารจัดการน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก โดยออกแบบให้สามารถ

ควบคุมและติดตามกระบวนการทำงาน วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บำรุงรักษา ด้วยเทคนิคการควบคุมการดันของไส้กรองแบบปรับตัวได้ ที่สามารถปรับตารางการกรอง และการล้างย้อนรวมถึงปรับแต่งปริมาณการเติมสารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบตามคุณสมบัติของน้ำจากแหล่งธรรมชาติที่อาจมีความผันผวนตามฤดูกาล [22-23]

สถาปัตยกรรมของระบบที่พัฒนาขึ้นในรูปที่ 5.3 ประกอบด้วย ระดับชั้นทางกายภาพ ที่ 1 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางกายภาพ เช่น อุปกรณ์วัดความดัน อุปกรณ์วัดอัตราการไหล ตัวตรวจวัดค่าพีเอช (pH) บัมพ์น้ำและวาล์ว ซึ่งมีหน้าที่ในการตรวจวัดข้อมูลทางกายภาพและทำการโต้ตอบกับกระบวนการ ระดับชั้นที่ 2 เอดจ์คอมพิวติ้ง (Edge Computing) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม เซิร์ฟเวอร์ฝั่งตัวหน่วยจัดเก็บข้อมูล เกตเวย์และสวิตช์ เพื่อควบคุมการปฏิบัติงานทั้งหมดภายในเครือข่าย ระดับชั้นที่ 3 เป็นระบบคลาวด์ซึ่งสนับสนุนแอปพลิเคชันสำหรับข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น การติดตามกระบวนการทำงาน การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการบำรุงรักษา



รูปที่ 5.3 ระบบคลาวด์คอมพิวติ้งสำหรับไซเบอร์-กายภาพ (Cyber-physical cloud computing: CPCC) สำหรับการบริหารจัดการระบบการผลิตน้ำ

การปรับปรุงประสิทธิภาพระบบบริหารจัดการน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก มุ่งเน้นในประเด็นการประหยัดต้นทุนการผลิต ทั้งต้นทุนจากการใช้สารเคมี การบำรุงรักษาไส้กรอง โดยระบบที่นำเสนอตั้งรายละเอียดที่ได้กล่าวในบทที่ 4 มีการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการเติมสารเคมี และอัลกอริทึมการกรองแบบปรับตัวได้ โดยพิจารณาจากค่าความขุ่นของน้ำดิบและค่าความต้านทานของไส้กรอง ตามสมการ

ค่าความต้านทานของเมมเบรนอัลตราฟิวเตรชั่น [24-25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_T = \frac{\Delta P_m}{\mu \cdot J} \quad (5.1)$$

$$J = \frac{n \cdot Q_{UF}}{A_m} \quad (5.2)$$

โดย

$R_T$  คือ ความต้านทานของเมมเบรนอัลตราฟิวเตรชั่น (Bar·hr/[Centipoise·m])

$\Delta P_m$  คือ ค่าความดันตกคร่อมเมมเบรน (Bar)

$\mu$  คือ ค่าความหนืดของน้ำ (mPa·second หรือ Centipoise)

$J$  คือ ค่าฟลักซ์การไหลของน้ำ ( $m^3/[hr \cdot m^2]$ )

$n$  คือ จำนวนของ UF skid

$Q_{UF}$  คือ ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเอาร์ทพุทในกระบวนการอัลตราฟิวเตรชั่น ( $m^3/hr$ )

$A_m$  คือ พื้นที่การกรองของเมมเบรนอัลตราฟิวเตรชั่น ( $m^2$ )

ต้นทุนการผลิตน้ำโดยรวม (Total water cost : TWC) [26-28] ในสมการที่ 5.3 เป็นการพิจารณาต้นทุนที่เกิดขึ้นจริงและเป็นตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการผลิตน้ำที่สามารถปรับปรุงค่าได้ ทั้งนี้ไม่ได้รวมถึงต้นทุนน้ำดิบเพราะเป็นแหล่งน้ำผิวดินจากน้ำฝน

$$f_{TWC} = f_{Chemical} + f_{Energy} + f_{Fix} \quad (5.3)$$

$$f_{Chemical} = \left( \sum_{i=1}^n k_i u_i \right) Q_r \quad (5.4)$$

$$f_{Energy} = \frac{\left( \sum_i m_i Q_f \Delta P_{pump_i} / \eta_{pump_i} \right)}{Q_{Ptotal} \Delta \pi_0} \quad (5.5)$$

โดย

$f_{Chemical}$  คือ ฟังก์ชันต้นทุนสารเคมี (บาท)

$k_i$  คือ ราคาต่อหน่วยของสารเคมี (บาท/หน่วย)

$u_i$  คือ ปริมาณหน่วยของสารเคมีในสารละลาย 1 ลิตร (หน่วย/ลิตร)

$Q_r$  คือ ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)

$f_{Energy}$  คือ ฟังก์ชันต้นทุนพลังงานไฟฟ้า (บาท)

$m_i$  คือ ค่าไฟฟ้า (บาท· $m^3/kW \cdot hr$ )

$Q_f$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำอินพุท ( $m^3/hr$ )

$\Delta P_{pump_i}$  คือ ค่าความดันตกคร่อมปั๊ม (Bar)

$\eta_{pump_i}$  คือ ค่า efficient factor ของปั๊ม

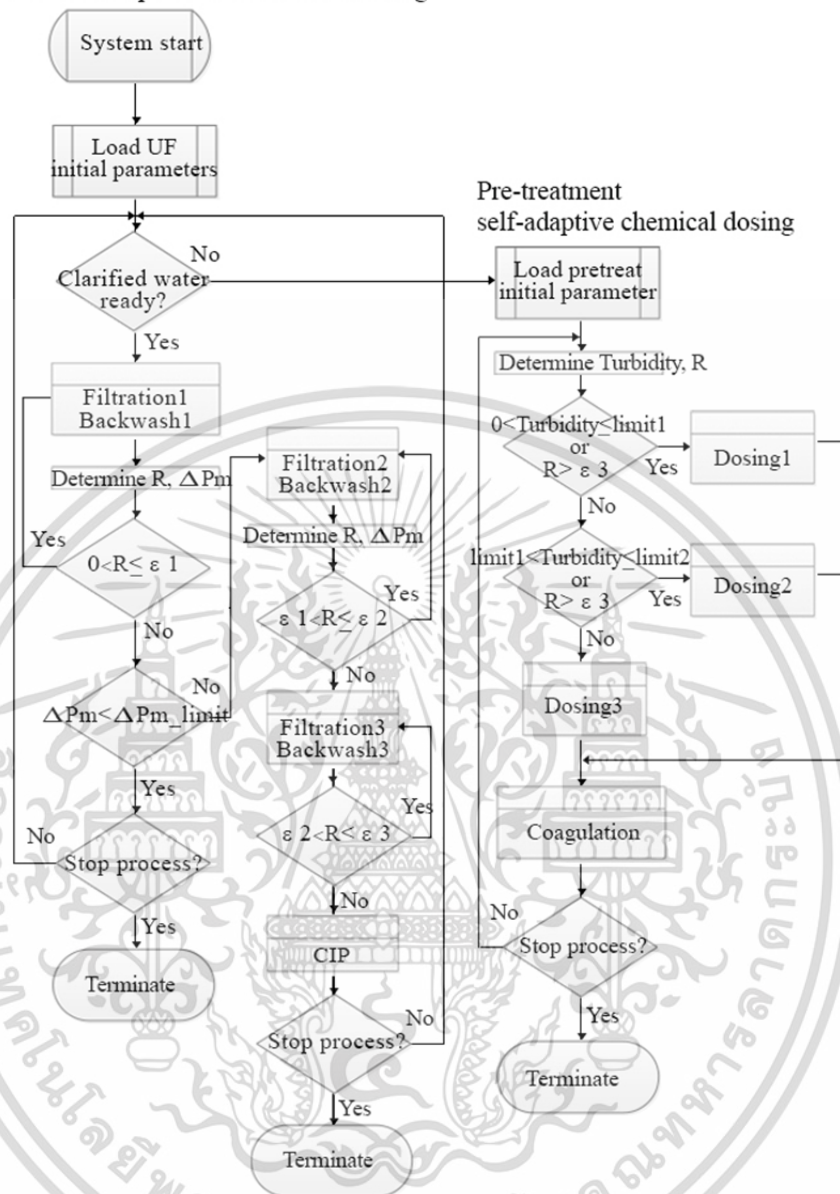
$Q_{Ptotal}$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเอาร์ทพุท ( $m^3/hr$ )

$\Delta \pi_0$  คือ ค่าแรงดันออสโมติก (Bar)

$f_{Fix}$  คือ ฟังก์ชันต้นทุนคงที่ (บาท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## UF self-adaptive backwash scheduling



รูปที่ 5.4 ไดอะแกรมอัลกอริทึมการควบคุมการผลิตน้ำแบบปรับตัวได้

อัลกอริทึมการผลิตน้ำในรูป 5.4 ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก [29-31] ได้แก่

- อัลกอริทึมการเติมสารเคมีแบบปรับตัวได้ มีหลักการทำงานคือ ตัวควบคุมจะพิจารณาคุณสมบัติของน้ำดิบ หากค่าความขุ่น (Turbidity) ของน้ำดิบ มีค่าอยู่ในช่วง  $0 < \text{Turbidity} \leq 20$  (NTU) ตัวควบคุมจะเลือกแผนการเติมสารเคมีแบบ Minimum หากค่าความขุ่นของน้ำดิบ มีค่าอยู่ในช่วง  $20 < \text{Turbidity} \leq 25$  (NTU) ตัวควบคุมจะเลือกแผนการเติมสารเคมีแบบ Medium และหากค่าความขุ่นของน้ำดิบ มีค่าอยู่ในช่วง  $25 < \text{Turbidity}$  (NTU) ตัวควบคุมจะเลือกแผนการเติมสารเคมีแบบ Maximum ถือเป็นวิธีการใช้สารเคมีอย่างมีประสิทธิภาพตามคุณสมบัติของน้ำดิบ ซึ่งสามารถช่วยลดการใช้สารเคมีเกินความจำเป็น และสามารถเพิ่มปริมาณสารเคมีในกรณีที่น้ำดิบมีความสกปรกมาก อีกทั้งข้อมูลจากระบบคลาวด์ทำให้ทราบถึงข้อมูลการใช้สารเคมีที่แท้จริงสามารถตรวจสอบได้โดยง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

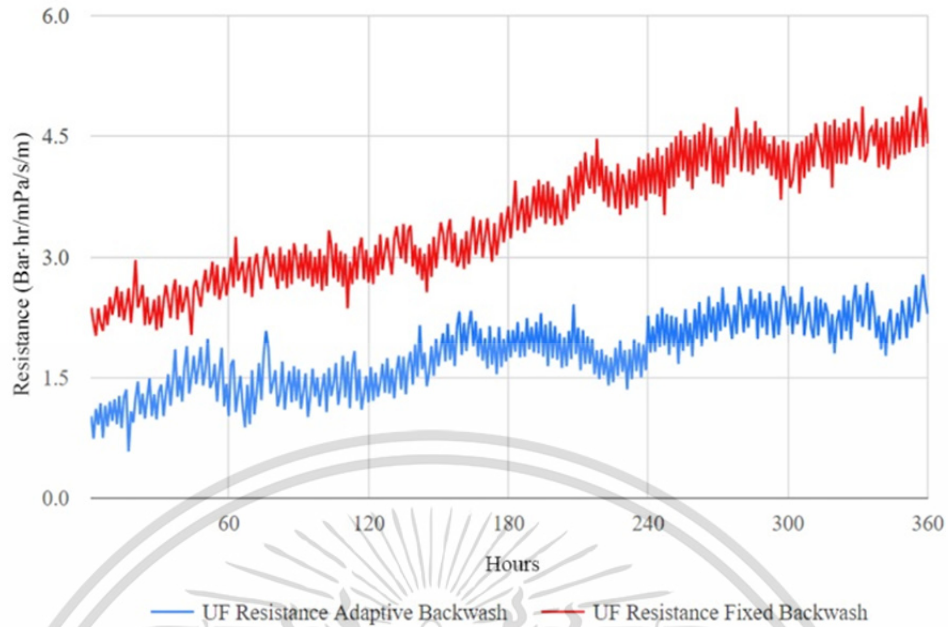
- อัลกอริทึมการกรองแบบปรับตัวได้ มีหลักการทำงานคือ ตัวควบคุมจะทำการตรวจสอบว่ามีน้ำในถัง Clarify หรือไม่ หากไม่มีน้ำเพียงพอจะเริ่มการทำงานในกระบวนการ Pre-treatment ก่อน หากมีน้ำในถัง Clarify เพียงพอ จะเริ่มกระบวนการด้วยแผน Filtration1 (2400 วินาที) Backwash1 (20 วินาที) จากนั้นจะคำนวณค่าความต้านทานของเมมเบรนอัลตราฟิวเตรชั่น ( $R_f$ ) และค่าความดันตกคร่อมเมมเบรน ( $\Delta P_m$ ) จากสมการที่ 5.1 หากค่า  $R_f$  ของเมมเบรน มีค่าอยู่ในช่วง  $0 < R_f \leq 1.5$  กระบวนการจะยังคงผลิตน้ำด้วยแผน Filtration1 (2400 วินาที) Backwash1 (20 วินาที) ต่อไป

หากค่า  $R_f$  ของเมมเบรน มีค่าอยู่ในช่วง  $1.5 < R_f \leq 2.5$  กระบวนการจะผลิตน้ำด้วยแผน Filtration2 (1800 วินาที) Backwash2 (40 วินาที) หากค่า  $R_f$  ของเมมเบรน มีค่าอยู่ในช่วง  $2.5 < R_f < 10$  กระบวนการจะผลิตน้ำด้วยแผน Filtration3 (1200 วินาที) Backwash3 (60 วินาที) ทั้งนี้ระหว่างการทำงานจะมีการตรวจสอบเงื่อนไขจากค่าความดันตกคร่อมเมมเบรน ( $\Delta P_m$ ) หากมีค่ามากกว่า 2.5 Bar (Maximum transmembrane pressure) หรือค่า  $R_f \geq 10$  ระบบจะไม่เริ่มกระบวนการ เพราะแสดงถึงการตันของไส้กรอง จำเป็นต้องหยุดกระบวนการเพื่อการถอดล้างไส้กรอง

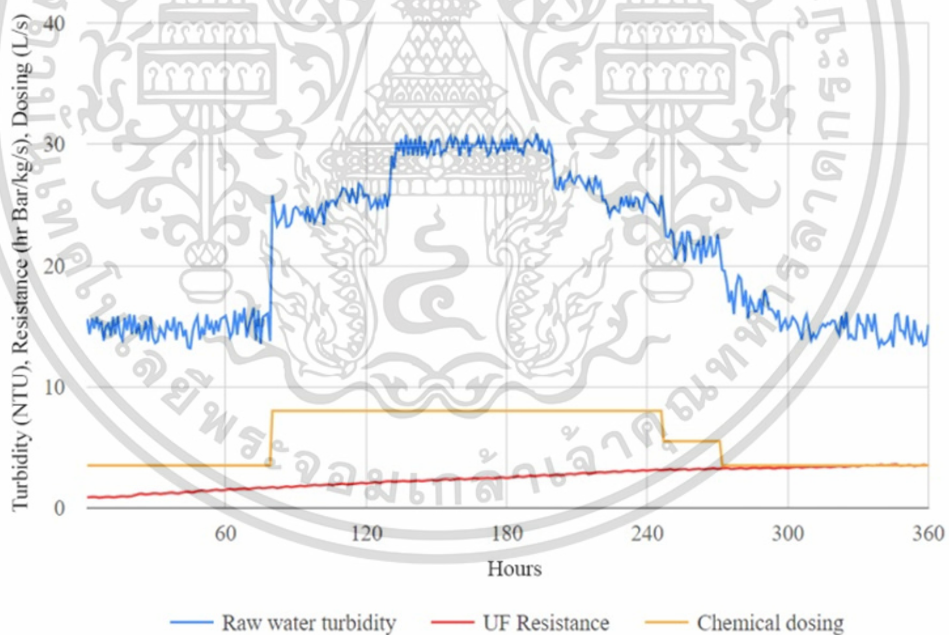
## 5.2 การอภิปรายผลการทดลอง

จากอัลกอริทึมการกรองแบบปรับตัวได้ ผลการทดลองปรับปรุงประสิทธิภาพระบบบริหารจัดการน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก รูปที่ 5.5 แสดงค่าความต้านทานของเมมเบรนอัลตราฟิวเตรชั่น สำหรับเทคนิคการกรองและล้างย้อนแบบปรับค่าได้เปรียบเทียบกับกรองและล้างย้อนแบบคงที่ ระบบการกรองแบบอัลตราฟิวเตรชั่น (Ultra-filtration) กำลังผลิตน้ำสูงสุด  $10 \text{ m}^3/\text{hr}$  ด้วยโมดูล อัลตราฟิวเตรชั่นขนาด 8 นิ้วของ DOW พื้นที่การกรองของเมมเบรนอัลตราฟิวเตรชั่น  $77 \text{ m}^2$  ค่าความดันทางเข้า 1-4 Bar ค่าความดันทางออก 1-4 Bar ค่าความดันตกคร่อมเมมเบรนสูงสุด 2.5 Bar แรงดันอากาศล้างย้อน 2.5 Bar อัตราการไหลของอากาศล้างย้อน  $12 \text{ Normal m}^3/\text{hr}$  (Standard Volume @  $0^\circ\text{C}$  &  $1.013 \text{ BarA}$ ) ผลการทดลองแสดงให้เห็นความแตกต่างแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานของเมมเบรนอัลตราฟิวเตรชั่น ที่น้อยกว่าของเทคนิคการกรองและล้างย้อนแบบปรับค่าได้ (สีน้ำเงิน) ซึ่งพิสูจน์ได้ว่าแนวคิดการกรองและล้างย้อนแบบปรับค่าได้ สามารถผลิตน้ำสะอาดได้ตามต้องการ รวมถึงสามารถชะลออัตราการตันของไส้กรอง ส่งผลดีในการยืดอายุการใช้งานของไส้กรองพร้อมทั้งลดความถี่การถอดล้างไส้กรอง (Clean In Place : CIP) [32]

จากอัลกอริทึมการเติมสารเคมีแบบปรับตัวได้ ผลการทดลองในรูปที่ 5.6 แสดงการเติมสารเคมีแบบปรับตัวตามค่าความขุ่น (Turbidity) ของน้ำดิบ ระบบการบำบัดน้ำขั้นเตรียมการ (Pre-treatment) กำลังผลิตน้ำสูงสุด  $100 \text{ m}^3/\text{hr}$  โดยมีปริมาณการใช้น้ำดิบ  $600\text{-}900 \text{ m}^3/\text{วัน}$  ค่าความขุ่น (Turbidity) ของน้ำดิบมีค่าอยู่ในช่วง 13 – 31 NTU โดยในฤดูฝนหรือฤดูแล้งมากน้ำดิบจะมีค่า NTU สูง ผลการทดลองแสดงให้เห็นพฤติกรรมกรการเติมสารเคมีแบบปรับตัวได้ (สีเหลือง) โดยหากค่าความขุ่นของน้ำดิบมีค่าสูง (สีน้ำเงิน) ตัวควบคุมจะเลือกแผนการเติมสารเคมีแบบ Maximum และหากค่าความขุ่นของน้ำดิบมีค่าลดลงตัวควบคุมจะเลือกแผนการเติมสารเคมีแบบ Medium และ Minimum ตามลำดับ ส่วนเส้นสีแดงแสดงถึงค่าความต้านทานของ UF เมมเบรนที่ได้รับผลกระทบทำให้มีค่าเพิ่มขึ้นสะสม เพราะค่าความขุ่น (Turbidity) ของน้ำดิบที่มีค่าสูง



รูปที่ 5.5 ความต้านทานของเมมเบรนอัลตราฟิวเตรชั่นสำหรับเทคนิคการกรองและล้างย้อนแบบปรับค่าได้

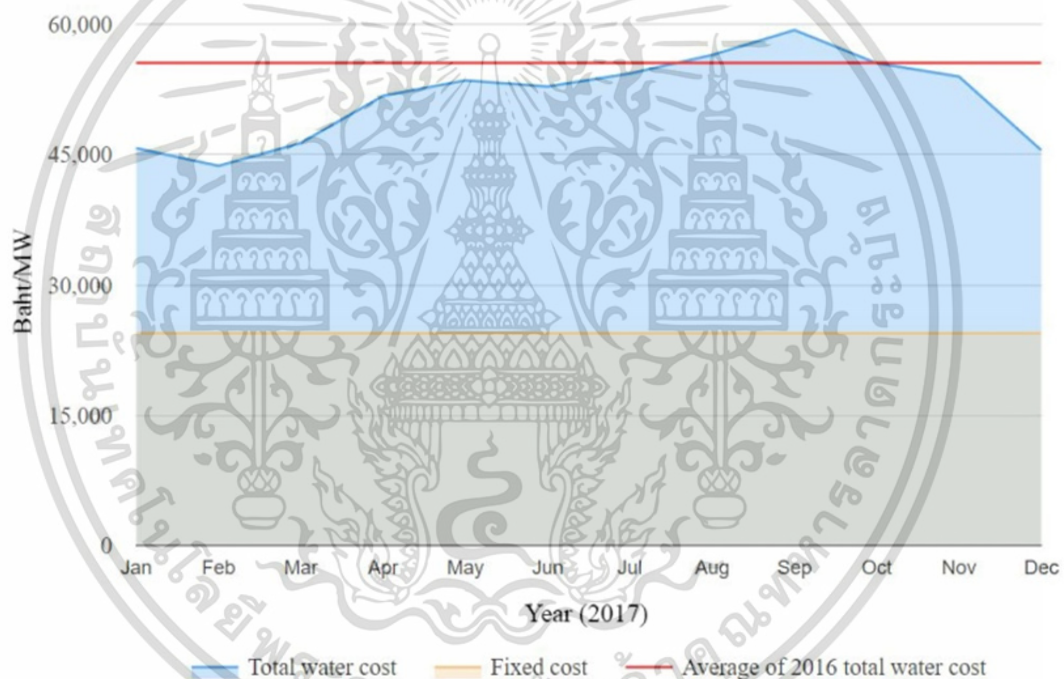


รูปที่ 5.6 การเติมสารเคมีแบบปรับตัวตามค่าความขุ่น (Turbidity) ของน้ำดิบ

จากการพิจารณาต้นทุนการผลิตน้ำโดยรวม (Total water cost : TWC) ในสมการที่ 5.3 ผลการคำนวณต้นทุนการผลิตน้ำโดยรวม ในปี ค.ศ. 2017 ซึ่งเป็นผลรวมของต้นทุนสารเคมี ต้นทุนพลังงานไฟฟ้า และต้นทุนคงที่ แสดงดังรูปที่ 5.7 (สีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิตน้ำโดยเฉลี่ยของปี ค.ศ. 2016 ซึ่งจะเห็นได้ว่าต้นทุนการผลิตน้ำโดยรวม ในปี ค.ศ. 2017 มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากการลดค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีและพลังงานไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

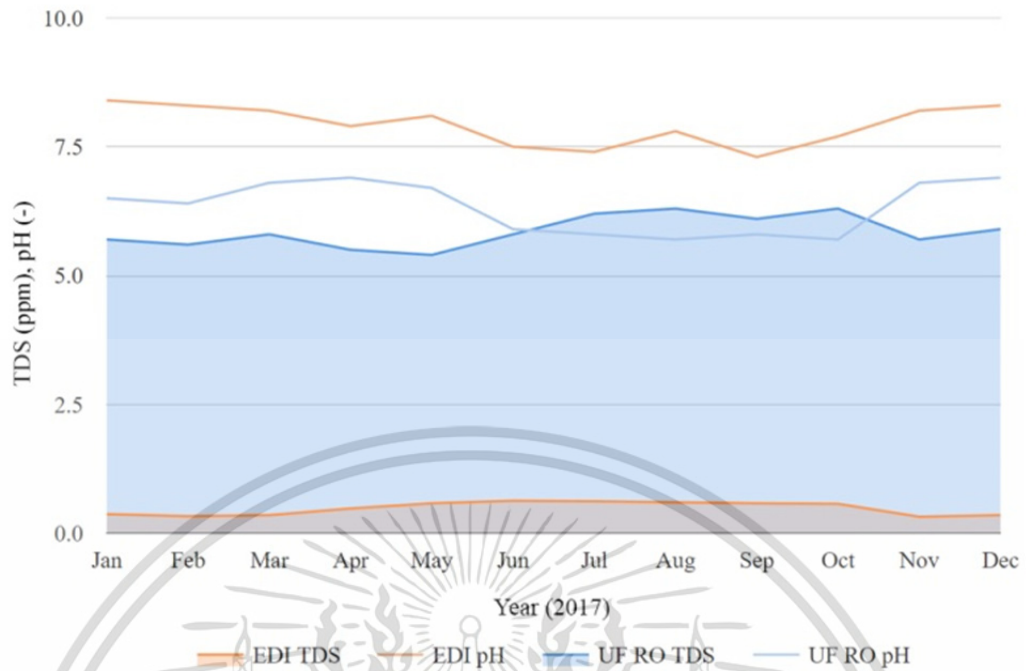
รูปที่ 5.8 แสดงคุณภาพการบำบัดน้ำในกระบวนการกรองแบบอัลตราฟิวเตรชั่น-รีเวอร์สออสโมซิส (UF-RO) โดยค่าที่ติเอส (TDS) ของน้ำอัลตราฟิวเตรชั่น-รีเวอร์สออสโมซิส (UF-RO) มีค่า 5.4-6.4 ppm ค่าพีเอช (pH) ของน้ำอัลตราฟิวเตรชั่น-รีเวอร์สออสโมซิส (UF-RO) มีค่า 5-9 (สีน้ำเงิน) และ คุณภาพการบำบัดน้ำในกระบวนการแยกไอออนด้วยไฟฟ้า (EDI) มีค่าที่ติเอส (TDS) 0.32-0.64 ppm และมีค่าพีเอช (pH) 6.5-8.5 (สีส้ม) อันเป็นคุณสมบัติทางเคมีของน้ำที่เหมาะสมสำหรับระบบบริหารจัดการน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก

รูปที่ 5.9 แสดงผลรวมการใช้น้ำในระยะเวลา 12 เดือนสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก (สีน้ำเงิน) โดยเป็นผลรวมของการใช้น้ำอดีไอ (EDI: สีส้ม) และน้ำหล่อเย็น (Cooling: สีเทา) ซึ่งข้อมูลการใช้น้ำสื่อให้เห็นถึงปริมาณน้ำที่จำเป็นต้องใช้ในแต่ละช่วงฤดูกาล สามารถใช้ในการวางแผนการบริหารจัดการแหล่งน้ำให้เพียงพอต่อความต้องการเพื่อป้องกันการภาวะการขาดแคลนน้ำอันส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต

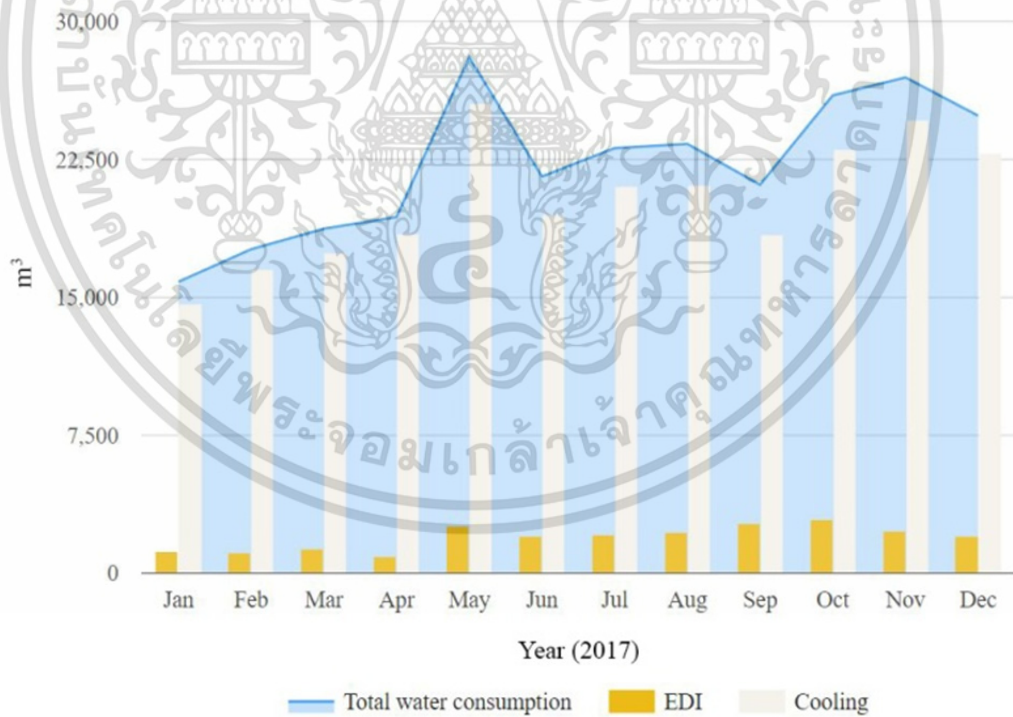


รูปที่ 5.7 ต้นทุนน้ำโดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 คุณภาพการผลิตน้ำ



รูปที่ 5.9 ผลรวมการใช้น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 สรุปท้ายบท

ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบบริหารน้ำในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมาก โดยออกแบบให้สามารถควบคุมและติดตามกระบวนการทำงาน วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน และการบำรุงรักษา ด้วยเทคนิคการควบคุมการดันของไส้กรองแบบปรับตัวได้ ที่สามารถปรับตารางการกรองและการล้างย้อนรวมถึงปรับแต่งปริมาณการเติมสารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบตามคุณสมบัติของน้ำจากแหล่งธรรมชาติที่อาจมีความผันผวนตามฤดูกาล โดยระบบบำบัดน้ำสามารถผลิตน้ำที่มีคุณสมบัติทางเคมีตามต้องการ อีกทั้งข้อมูลจากระบบคลาวด์ยังสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการผลิตน้ำของระบบ ต้นทุนโดยรวมสำหรับระบบการผลิตน้ำ รวมถึงภาพรวมของปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับโรงไฟฟ้าในปัจจุบันภายใต้สภาพอากาศในท้องถิ่น เพื่อช่วยในการวางแผนและเตรียมความพร้อมด้านทรัพยากรน้ำสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าในอนาคต



## บทที่ 6

### บทสรุป

บทสรุปนี้กล่าวถึงสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอจากสมมติฐานปัญหาอุปสรรคและข้อเสนอแนะ รวมถึงงานวิจัยในอนาคต เพื่อให้สามารถมองเห็นภาพสรุปรวมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อย่างชัดเจน

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับระบบบริหารน้ำในโรงไฟฟ้า ขนาดเล็กมากอย่างยั่งยืน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวทางการประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งอย่างเหมาะสมซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานและการบริหารจัดการ โดยการวิจัยครั้งนี้ได้ออกแบบ พัฒนาและประยุกต์ใช้กับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาด 9.9 เมกะวัตต์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งต่อกระบวนการผลิตน้ำภายในโรงไฟฟ้า สถาปัตยกรรมของระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 3 ระดับชั้นทางกายภาพ ระดับชั้นที่ 1 เป็นอุปกรณ์ทางกายภาพ เช่น อุปกรณ์วัดความดัน อุปกรณ์วัดอัตราการไหล ตัวตรวจวัดพีเอช (pH) ป้อนน้ำและวาล์ว ซึ่งมีหน้าที่ในการตรวจวัดข้อมูลทางกายภาพและทำการโต้ตอบกับกระบวนการ ระดับชั้นที่ 2 เอดจ์ คอมพิวติ้ง (Edge Computing) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม เซิร์ฟเวอร์ฝังตัว หน่วยจัดเก็บข้อมูล เกตเวย์และสวิตช์ เพื่อควบคุมการปฏิบัติงานทั้งหมดภายในเครือข่าย ระดับชั้นที่ 3 เป็นระบบคลาวด์ ซึ่งสนับสนุนแอปพลิเคชันสำหรับข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น การติดตามกระบวนการทำงาน การวิเคราะห์ ข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการบำรุงรักษา

ข้อเสนอจากสมมติฐานในการนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง มาประยุกต์ใช้กับระบบบริหารน้ำในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมากอย่างเหมาะสม มีความสมดุลระหว่างการใช้ต้นทุนอย่างมีประสิทธิภาพกับคุณประโยชน์ที่เพิ่มขึ้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานและการบริหารจัดการได้อย่างยั่งยืน มุ่งเป้าดำเนินการวิจัยออกแบบและประยุกต์ใช้ Industrial Internet of Things (IIoT) เพื่อบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล เหตุเพราะโรงไฟฟ้าชีวมวลเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ต้องพึ่งพาทรัพยากรน้ำสำหรับวงจรไอน้ำสำหรับขับเคลื่อนกังหันไฟฟ้า ดังนั้นการจัดการทรัพยากรน้ำที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นเรื่องสำคัญ สำหรับการบริหารทรัพยากรอย่างยั่งยืนระหว่างน้ำและพลังงาน

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอ ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเพื่อการผลิตในโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก การประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับอุตสาหกรรม (IIoT) สามารถควบคุมและติดตามกระบวนการทำงาน วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการบำรุงรักษา ด้วยอัลกอริธึมการควบคุมการตันของไส้กรองแบบปรับตัวได้ ที่สามารถปรับตารางการกรองและการล้างย้อน รวมถึงปรับแต่งปริมาณการเติมสารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบตามคุณสมบัติของน้ำจากแหล่งธรรมชาติที่อาจมีความผันผวนตามฤดูกาล โดยระบบบำบัดน้ำสามารถผลิตน้ำที่มีคุณสมบัติทางเคมีตามต้องการ อีกทั้งข้อมูลจากระบบคลาวด์ยังสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการผลิตน้ำของระบบ ต้นทุนโดยรวมสำหรับระบบการผลิตน้ำ รวมถึงภาพรวมของปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับโรงไฟฟ้าใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบัน ภายใต้สภาพอากาศในท้องถิ่น ข้อมูลจากระบบที่นำเสนอสามารถใช้ในการวางแผนและเตรียมความพร้อมด้านทรัพยากรน้ำสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าในอนาคต

## 6.2 ปัญหาอุปสรรคและข้อเสนอแนะ

สำหรับปัญหาอุปสรรคในการดำเนินการวิจัยในหัวข้อ “เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับระบบบริหารน้ำในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมากอย่างยั่งยืน” ได้แก่

- อุปสรรคทางด้านเทคโนโลยี

เนื่องจากเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) เป็นที่สนใจเริ่มมีบทบาทในชีวิตประจำวันรวมถึงภาคอุตสาหกรรมในช่วง 9-10 ปีที่ผ่านมา ทำให้เกิดอุปกรณ์หรือเทคโนโลยีต่างๆ มากมายจากผู้ผลิตหลายผู้ให้บริการ ส่งผลให้การเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสมและลงตัวนั้นไม่ใช่เรื่องง่าย เช่น พิจารณาระหว่างตัวตรวจวัดแบบมีสายหรือไร้สาย เลือกส่งข้อมูลสู่เครือข่ายอินเทอร์เน็ตด้วย WiFi หรือ 3G เลือกบริการคลาวด์จาก Wago Cloud Connectivity, Microsoft Azure หรือ AWS IoT Core ทุกสิ่งเหล่านี้แสดงให้เห็นถึง ทุกทางเลือกทุกการตัดสินใจ ล้วนมีผลกระทบต่อต้นทุนและเวลา รวมถึงความเป็นไปได้ในการดำเนินงานให้ประสบความสำเร็จอีกด้วย

- อุปสรรคทางด้านต้นทุน

อุปกรณ์อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับอุตสาหกรรม รวมถึงบริการอื่นๆ ที่สนับสนุนงานประยุกต์ด้าน IIoT นั้นมีราคาที่ยังค่อนข้างสูง เช่น PLC ของ Wago หรือ Beckhoff โมดูล IoT สำหรับตัวตรวจวัด ของ Advantech หรือของ Libelium ยังมีราคาต่อจุดที่สูง รวมถึงบริการคลาวด์ของ AWS IoT Core รวมองค์ประกอบเสริมอื่นๆ เช่น Bitnami Stacksmith, AWS EC2, AWS S3 ล้วนมีค่าบริการต่อเดือนที่สูงเช่นกัน

ทั้งนี้ ทางออกของปัญหาที่จะสามารถพัฒนาเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับอุตสาหกรรมได้อย่างสมดุลระหว่างการใช้ต้นทุนอย่างมีประสิทธิภาพกับคุณประโยชน์ที่ได้รับนั้น ต้องอาศัยองค์ความรู้ ความเข้าใจในเทคโนโลยีเพื่อเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งต้องให้ความสนใจในกระบวนการ มองเห็นจุดวิกฤติที่สำคัญมากพอ ที่ข้อมูลจาก IIoT จะสามารถให้คุณค่าต่อกระบวนการผลิต การบำรุงรักษาระบบ การป้องกันความเสี่ยง หรือการต่อยอดคุณประโยชน์จากการวิเคราะห์ข้อมูล

## 6.3 งานวิจัยในอนาคต

สำหรับงานวิจัยในอนาคต มีแนวทางมุ่งไปสู่การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับอุตสาหกรรม (IIoT) เพื่อการบริหารจัดการโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ (Biogas Power Plant) ขนาดเล็ก – เล็กมาก เพิ่มประสิทธิภาพระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) ของปัจจัยทางชีวเคมีและสิ่งแวดล้อม

## เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Gadonneix, “Water for Energy”, World Energy Council, 2010.
- [2] “Alternative Energy and Development Plan (AEDP) 2015-2036”, Ministry of Energy, THAILAND, 2015.
- [3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- [4] T. Koanantakool, “Thai Energy Policy for Science and Technology Development”, The 4th Kyoto University Asian Network Forum, Japan, 2016.
- [5] B. Al Smadi, K. Alzboon, and T. Al Azab, “Water Management and Reuse Opportunities in a Thermal Power Plant in Jordan”, *African Journal of Biotechnology*, Vol. 9 (29), 2010. pp. 4606-4614.
- [6] A. Mercè Rio Carrillo, and C. Frei, “Water: A Key Resource in Energy Production”, *Energy Policy*, Vol. 37 (11), 2009. pp. 4303-4312.
- [7] M. S. Mohsen, “Treatment and Reuse of Industrial Effluents: Case Study of a Thermal Power Plant”, *Desalination*, Vol. 167, 2004. pp 75-86.
- [8] J. M. Salazar, U. Diwekar, E. Constantinescu, and V. M. Zavala, “Stochastic Optimization Approach to Water Management in Cooling-Constrained Power Plants”, *Applied Energy*, Vol. 112, 2013. pp. 12-22.
- [9] M. Farahani, S. M. Borghei, and V. Vatanpour, “Recovery of Cooling Tower Blowdown Water for Reuse: The Investigation of Different Types of Pretreatment Prior Nanofiltration and Reverse Osmosis”, *Journal of Water Process Engineering*, Vol. 10, 2016. pp. 188-199.
- [10] K. J. Ptasiński, “Efficiency of Biomass Energy”, John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [11] “คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 4 พลังงานชีวมวล”, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554.
- [12] “Energy Plus”, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2560.
- [13] “พลังงานทดแทน Energy Renewable”, กระทรวงพลังงาน ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [14] K. Bilal, O. Khalid, A. Erbad, S. U. Khan, "Potentials, Trends, and Prospects in Edge Technologies: Fog, Cloudlet, Mobile Edge, and Micro Data Centers", *Computer Networks*, Vol. 130, 2018. pp. 94-120.
- [15] Dag H. Hanssen, “Programmable Logic Controllers: A practical Approach to IEC61131-3 Usinf CodeSys”, Wiley, 2015.
- [16] C. Kirsch, E. Pereira, and R. Sengupta, "Cyber-Physical Cloud Computing: The Binding and Migration Problem", In: *Proc. of International Conf. On Design, Automation & Test in Europe*, Dresden, Germany, 2012. pp. 1425-1428.

- [17] X. F. Liu, M. Shahriar, S.M. N. Al Sunny, M. C. Leu, and L. Hu, "Cyber-Physical Manufacturing Cloud: Architecture, Virtualization, Communication, and Testbed", **Journal of Manufacturing Systems**, Vol. 43 (2), 2017. pp. 352-364.
- [18] B. Varghese, and R. Buyya, "Next Generation Cloud Computing: New Trends and Research Directions", **Future Generation Computer Systems**, Vol.79 (3), 2018. pp. 849-861.
- [19] J. Lee, K. Park, H. Eum, and C. Lee, "Desalination of a Thermal Power Plant Wastewater by Membrane Capacitive Deionization", **Desalination**, Vol. 196 (1-3), 2006. pp. 125-134.
- [20] M. Xing, "Study on the Water Conservation Management Measures in Thermal Power Plants", **International Journal of Business and Management**, Vol. 5 (3), 2010. pp. 160-164.
- [21] L. O. Villacorte, S. Tabatabai, D. M. Anderson, G. L. Amy, J. C. Schippers, and M. D. Kennedy, "Seawater Reverse Osmosis Desalination and (Harmful) Algal Blooms", **Desalination**, Vol. 360, 2015. pp. 61-80.
- [22] X. Zheng, S. Plume, M. Ernst, J. Croué, and M. Jekel, "In-Line Coagulation Prior to UF of Treated Domestic Wastewater – Foulants Removal, Fouling Control and Phosphorus Removal", **Journal of Membrane Science**, Vol. 403-404, 2012. pp. 129-139.
- [23] L. Henthorne, and B. Boysen, "State of the Art of Reverse Osmosis Desalination Pretreatment", **Desalination**, Vol. 356, 2015. pp. 129-139.
- [24] S. Duranceau, "**Membrane Practices for Water Treatment**", American Water Works Association, 2001.
- [25] C. M. Chew, M. K. Aroua, M. A. Hussain, and W. M. Ismail, "Evaluation of Ultrafiltration and Conventional Water Treatment Systems for Sustainable Development: An Industrial Scale Case Study", **Journal of Cleaner Production**, Vol. 112, 2016. pp. 3152-3163.
- [26] T. Zhou, and Z. W. Li, "A Cost Model Approach for RO Water Treatment of Power Plant", **Procedia Environmental Sciences**, Vol. 11, 2011. pp. 581-588.
- [27] N. Zarai, F. Tadeo, and M. Chaabene, "Planning of the Operating Points in Desalination Plants Based on Energy Optimization", **International Journal of Computer Applications**, Vol. 68 (18), 2013. pp. 6-11.
- [28] M. Li, "Optimization of Multitrain Brackish Water Reverse Osmosis (BWRO) Desalination", **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Vol. 51 (9), 2012. pp. 3732-3739.
- [29] T. Nguyen, F. Roddick, and L. Fan, "Biofouling of Water Treatment Membranes: A Review of the Underlying Causes, Monitoring Techniques and Control Measures", **Membranes**, Vol. 2(4), 2012. pp. 804-840.

- [30] L.G. van Willigenburg, H.M. Vollebregt, and R.G.M. van der Sman, "Optimal Adaptive Scheduling and Control of Beer Membrane Filtration", **Control Engineering Practice**, Vol. 34, 2015. pp. 77-87.
- [31] S. Jiménez, M.M. Micó, M. Arnaldos, F. Medina, and S. Contreras, "State of the Art of Produced Water Treatment", **Chemosphere**, Vol. 192, 2018. pp. 186-208.
- [32] G. K. Pearce, "**UF/MF Membrane Water Treatment Principle and Design**", Water Treatment Academy, TechnoBiz Communications Co., Ltd., 2012.



ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Improving the Efficiency of Water Management System in Biomass Power Plant Using Cyber-Physical Cloud Computing

Pranai Kungwalrut<sup>1</sup>    Viriya Kongratana<sup>1</sup>    Thanit Trisuwannawat<sup>1</sup>  
 Vittaya Tipsuwanporn<sup>1</sup>    Arjin Numsomran<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering,  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

\* Corresponding author's Email: arjin.nu@kmitl.ac.th

---

**Abstract:** Optimized water management strategies are among the most crucial concerns in a biomass power plant. Especially during the times of water scarcity, an improper water supply planning and operation result in a detrimental power generation or shut down processes. This paper aims to propose the cyber-physical cloud computing (CPCC), a mechanism of analysis and control physical process using cloud-based framework, in order to improve the efficiency of water management system in a biomass power plant. In this study, a 9.9 MW biomass power plant is implemented to investigate the performance of CPCC. The architecture of the proposed system consists of three physical tiers. The first tier is a tier of physical devices included with pressure, flow, pH sensors, water pumps and valves that are responsible for detecting the physical data and interacting with the water production process. The second tier is an edge computing device which functions as a controller, embedded server, data storage, gateway and switch to manage all operational tasks in an intranet area. The third tier is a cloud computing system which enables big data applications such as online monitoring and visualization of process operation, adaptive filtration fouling control, consuming water and total water cost analysis. The results validate the effectiveness of the proposed system as the ability of an adaptive fouling control system to adjust backwash scheduling and chemical dosing so that achieving the target of purified water quality even during the fluctuation of raw water qualities. Subsequently, the water treatment system can achieve the capability for optimal total water cost operations under a target permeate flow rate and the percent of the recovery. Significantly, the data analytics in the CPCC reflect current operational requirements of water under local climate conditions, likewise contribute to the practical solution for sustainable water resource planning in the energy production.

**Keywords:** Water management system, Biomass power plant, Cyber-physical cloud computing, Optimal energy consumption, Adaptive fouling control.

---

### 1. Introduction

Biomass power plant is one of the industries, which is highly dependent on water resources to complete the steam cycle and operate the electric turbines (Water for Energy 2010). Regarding Alternative Energy and Development Plan (AEDP), the Government of Thailand targets to increase biomass power plant capacity to 5,570 megawatts by the year 2036 [1]. The rising of biomass operation reflects huge volumes of water needs in the near future while many areas across the country are

facing scarcity of fresh water due to climate changes and global warming [2]. Therefore, the effective water resource management is crucial issue for sustainable water and energy availability.

To accomplish a long-term availability of water reserved for power generation system, several solutions have been published. For instance, water treatment and reuse in a thermal power plant was proposed for providing the scenarios of reusing wastewater from power plant industries [3-4]. The water conservation management in thermal power

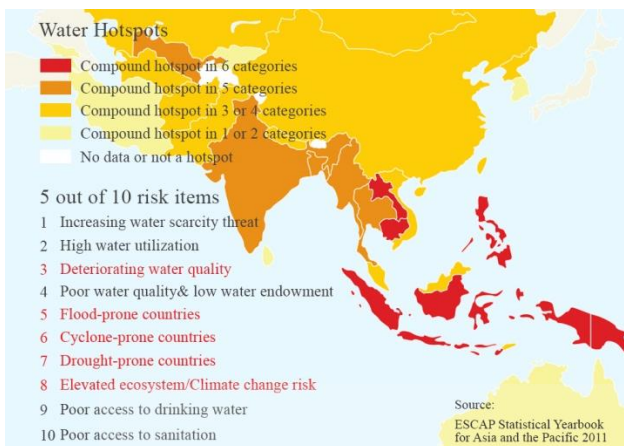


Figure.1 A potentially high water-risk country

plants was addressed with the intention of reducing the water consumption [5]. The modeling methods for estimating water consumption were proposed to analyze and predict maximum and minimum water consumption in the various types of thermo-electric power plants [6]. A low-water cooling technologies at thermos-electric power plants was addressed to evaluate drought resiliency using economic and technical performance parameters [7, 8].

Through the aforementioned aspects, this paper aims to propose the cyber-physical cloud computing (CPCC), a mechanism of analysis and control physical process using cloud-based framework, in order to improve the efficiency of water management system in a biomass power plant. In this study, a 9.9 MW biomass power plant is implemented to investigate the performance of CPCC. Architecture of the proposed system consists of three physical tiers. The first tier is a tier of physical devices included with pressure, flow, pH sensors, water pumps and valves that are responsible for detecting the physical data and interacting with the water production process. The second tier is an edge computing device which functions as a controller, embedded server, data storage, gateway and switch to manage all operational tasks in an intranet area. The third tier is a cloud computing system which enables big data applications such as online monitoring and visualization of process operation, adaptive filtration fouling control, consuming water and total water cost analysis. The essential features advanced the previous methods are self-adaptive backwash and self-adaptive chemical dosing functioned for adaptive fouling control, likewise the feature of total water cost optimization which is used for controlling the energy consumption of water treatment system. The proposed method represents a valuable alternative to achieve the target of purified water quality even

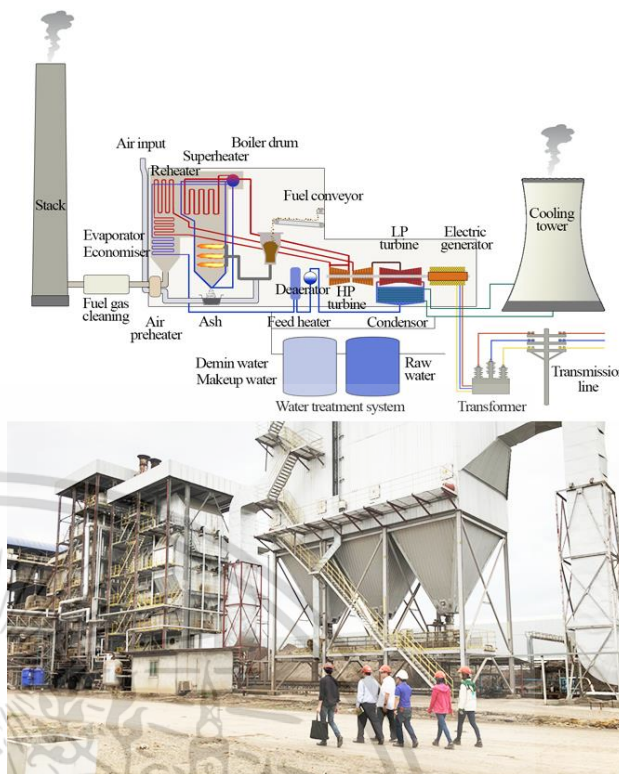


Figure.2 Biomass power plant and schematic diagram

during the fluctuation of raw water qualities as well as increase the capability for optimal total water cost operations under a target permeate flow rate and the percent of the recovery. Significantly, more than the 12 months of the data analytics in the CPCC reflect current operational requirements of water under local climate conditions, achieve the superior performance of the water treatment operation, likewise contribute to strategic of sustainable water resource planning in the energy production. The rest of this paper is organized as follows: in section 2, Materials and methods of CPCC are described as a proposed system for water management system in a biomass power plant; in section 3, the results obtained through experimental implementation has been evaluated; in section 4, the discussion is presented; while section 5 is dedicated to the conclusions.

## 2. Materials and methods

### 2.1 Biomass power plant

The implemented biomass power plant site is located in Buriram, a province in the northeastern Thailand. It can generate 9.9 MW of electricity production capacity using biomass fuel such as wood chips, bark, rice husk, corn cobs, corn stalk, wood shaving, sawdust and palm kernel shell from agricultural residues in the local area.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Table 1. Biomass power plant description

Description	Value
Electrical energy output at full condensing	9.9 MW
Generator power factor	0.85
Generator electrical voltage	11,000 Volts
Maximum steam flow at operating pressure	45 t/hr
Operating pressure	6.5 MPa
Operating temperature	480 ° C
Feed water temperature at economizer inlet	110 ° C
Saturated steam carryover moisture	0.5%
Fuel flow	14.0 t/hr
Particulate emissions	<50 PPM

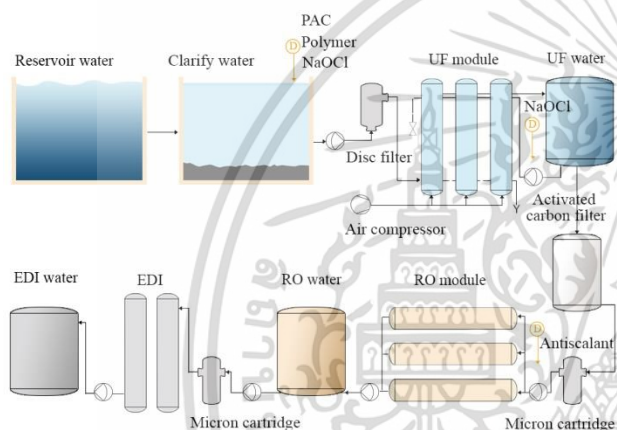


Figure.3 Schematic diagram of water treatment system

In Fig. 2, a schematic diagram demonstrates the structure of biomass power plant using a stoker boiler with a steam reheat system and extraction-condensing steam turbine for power generation [9]. The biomass fuel about 450 tons per day is burned in a direct-fired system of water tube boiler to create 45 tons per hour of high pressure steam. A system reuses the waste heat through preheater and reheat for increasing energy conversion efficiencies of almost 85%. The open cycle cooling system composes of a steam, cooling tower, and cooling system pumps. The cooling water will be pumped from clarified water reservoir through the condenser and discharged back to the source. Air emissions are treated using electrostatic precipitators (ESP) for removing particulate matter. In addition, the details of biomass power plant description are mentioned in a Table 1.

### 2.2 Water treatment system

The water treatment process in a biomass power plant is divided by the purpose of using as a boiler

water treatment and a cooling water treatment [10-11]. The water treatment system of experimental biomass power plant is shown as the schematic diagram in Fig. 3. The system comprises of pre-treatment, ultrafiltration, reverse osmosis and electrodeionization system that can purify water with low contaminants at flows up to 4 m<sup>3</sup>/hour. The raw water from reservoirs is fed into a pre-treatment system for coagulation and disinfection using chemical dosing such as polyaluminium chloride, polymer and chlorine, and then the treated water is used as a clarified water in the cooling process. The remainder is fed into ultrafiltration and reverse osmosis system for pH adjusting and removing all the particles larger than 1.0 nanometer, and afterwards the water is treated in the electrodeionization system for eliminating ionizable species. The net output of 96 m<sup>3</sup>/day high-purity permeate water from the last treatment stage is stored in a 120 m<sup>3</sup> storage tank for preparation as a feed water in the steam production process. The characteristics of water treatment system are presented in Table 2.

To control the operation of water treatment system, currently the logical sequencing and timing control has been used by programmable logic controller [12]. However, using fixed timing of filtration or cleaning operation can induce the loss of membrane permeability, increase of operational expenditure, and reduction of treated water quality because the fluctuation characteristics of the raw water influenced by daily and seasonal variations [13, 14].

### 2.3 Cyber-physical cloud computing (CPCC) technology for water management system

The cyber-physical cloud computing (CPCC), a mechanism of analysis and control physical process using cloud-based framework, has been developed in this research with the aim of improving the efficiency of water management system in a biomass power plant. An infrastructure of the proposed system in Fig. 4 consists of three physical tiers: physical devices, edge computing device and cloud computing system [15].

#### 2.3.1. Physical devices

The physical devices are the instruments included with pressure transmitter, temperature transmitter, flow transmitter, pH sensor, turbidity sensor, water pump and control valve that are responsible for detecting the physical data and interacting with the water production process.

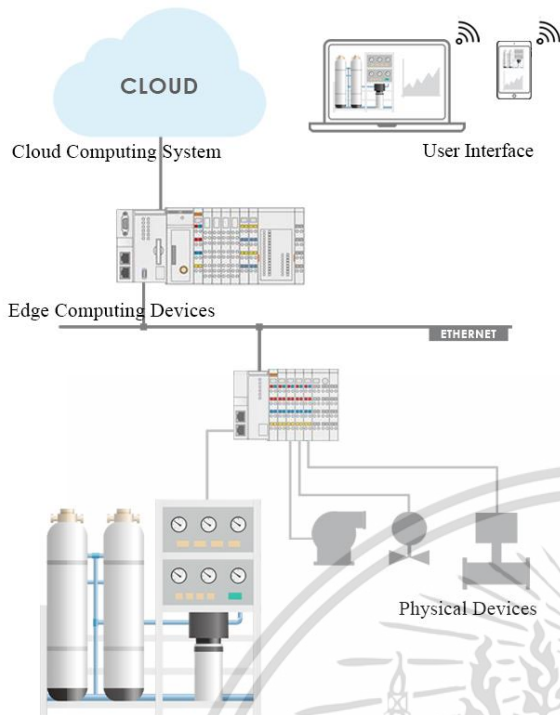


Figure.4 Cyber-physical cloud computing (CPCC) technology for water management system

system architecture as demonstrated in Fig. 5. PLC edge computing device connects to remote I/O of the physical device via Ethernet networks using MODBUS TCP protocol, so that controls water treatment process operation as well as collects and sends the specified data about once per hour to the cloud. The communication between edge computing device and public cloud platform is executed via MQTT protocol and encrypted via SSL 3.1. AWS IoT Core is a cloud management platform which supports communication protocol to enable secure connection including data transmission between physical devices and cloud services. Amazon EC2 provides secure and resizable computing resources implemented for developing the applications of adaptive filtration fouling control and consuming water and total water cost analysis. Amazon Route 53 provides scalable cloud Domain Name System (DNS) while AWS ELB is implemented to automatic load balancing. The operations data and analysis results are demonstrated in dashboard web service developed by JavaScript [17, 18].

**2.4 Total water cost**

In this research, the total water cost function is developed for assessment of operation cost by emphasizing the cost of chemical dosing and the cost of energy consumption.

**2.4.1. Chemical dosing cost**

Reagents in the water treatment system include NaOCL, NaOH, coagulant and antiscalant which can be is represented as the chemical dosing cost function by [19]

$$f_{dosing} = \left( \sum_{i=1}^n k_i u_i \right) Q_r \tag{1}$$

- $f_{dosing}$  : Total chemical reagent cost (Baht)
- $k_i$  : Unit price of reagent (Baht / unit)
- $u_i$  : Dosage of reagent (unit / L)
- $Q_r$  : Volume flow of raw water (L / s)

$f_{dosing}$  is a cost function representing the cost of all chemical dosing in water treatment plant which is proportional to the volume of applied reagents, the price of reagents and the volume of raw water. In this study, the total volume of chemical reagents have been measured and recorded for calculating the total water cost as well as using as a manipulate variable in self-adaptive chemical dosing process.

**2.3.2. Edge computing device**

The edge computing device is a programmable logic controller integrated with industrial IoT gateway which provides functionalities of process operation control as well as enable cloud connection to physical devices [16].

**2.3.3. Cloud computing system**

The cloud computing system is a platform of on-demand computing resources which provide the functionalities of data storage, online monitoring and visualization of process operation, process data processing and analysis application.

The proposed cyber-physical cloud computing technology for a water management system has a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

**2.4.2. Energy consumption cost**

The energy consumption cost of water treatment system is expressed in this analysis as the Specific Energy Consumption (SEC), which is defined as the cost of the electrical energy required to purify a volume of permeate water [20-21].

$$f_{SEC} = \frac{\left(\sum_i m_i Q_{f_i} \Delta P_{pump_i} / \eta_{pump_i}\right)}{Q_{P_{total}} \Delta \pi_0} \quad (2)$$

$f_{SEC}$ : Total energy consumption cost (Baht)

$m_i$ : Unit price factor (Baht / kW · h)

$Q_{f_i}$ : Volume flow rate of feed water (m<sup>3</sup>/h)

$\Delta P_{pump}$ : Difference pressure across pump (Bar)

$\eta_{pump}$ : Pump efficiency

$Q_{P_{total}}$ : Total flow rate of permeate (m<sup>3</sup>/h)

$\Delta \pi_0$ : Osmotic pressure (bar)

$f_{SEC}$  is a cost function representing the cost of energy consumption to purify the water in a RO water treatment plant which is mainly proportional to the values of feed flow rate ( $Q_f$ ), differential pressure across the pump ( $\Delta P_{pump}$ ), permeate flow rate ( $Q_p$ ). In this study, there are five control variables (the feed pressure, feed flow rate, concentrate pressure, concentrate flow rate and water recovery) which the optimal values are determined. The optimization objective is to minimize the energy consumption that affects to the total water cost, while producing a specified volume of permeate water.

**2.5 Optimization of energy consumption**

The optimization of energy consumption in water treatment operation is developed using the energy-optimal control system which control feed pressure and flow rates of RO system for achieving the water treatment recovery at the energy optimal conditions [22]. The schematic diagram of energy-optimal control system in Fig. 6 demonstrates the cooperation between controllers and RO water treatment system. The two stages of RO water treatment system are controlled by an edge controller for achieving the required permeate flow rate set-point at the specified water recovery, while the supervisory controller calculates the optimal RO feed pressure and the feed flow rate so that establish the trajectories and operational set-point for edge computing control. The actuators are high pressure pump and concentrate valve which are used for adjusting RO feed pressure, feed flow rate and concentrate flow.

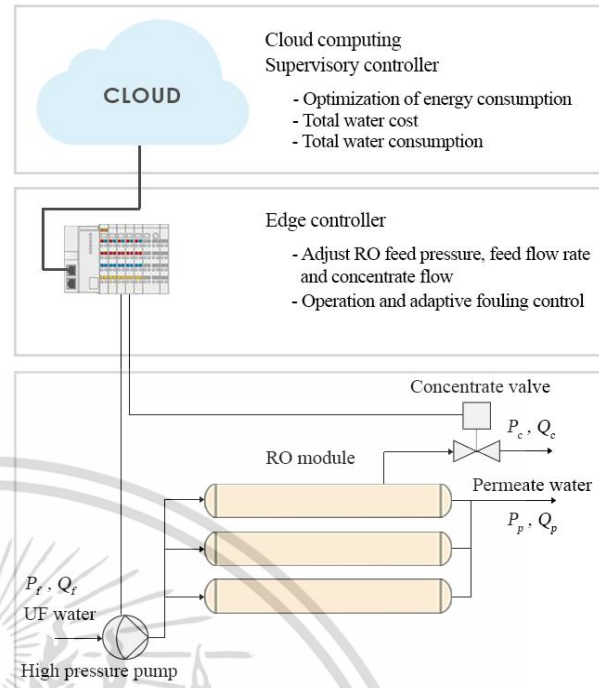


Figure.6 Energy-optimal control system

**2.6 Adaptive fouling control methodology**

The actual applications of membrane water treatment system are still confronted with the problem of filtration and fouling control because the fluctuation characteristics of the raw water influenced by daily and seasonal variations. An improper water treatment process operation results in the loss of membrane permeability, increase of operational expenditure, and reduction of treated water quality. Therefore, an adaptive fouling control methodology is developed as a crucial part of cyber physical cloud computing for optimizing water treatment operation in the appropriate scheduling and chemical dosing quantity in order to treat the varying quality of raw water efficiently [23-24].

**2.6.1. UF self-adaptive backwash scheduling**

This research develops the self-adaptive backwash scheduling using a deviation of UF resistance as a threshold triggering for air scouring backwash [25].

$$R_r = \frac{\Delta P_m}{\mu \cdot J} \quad (3)$$

where

$$J = \frac{n \cdot Q_{UF}}{A_m} \quad (4)$$

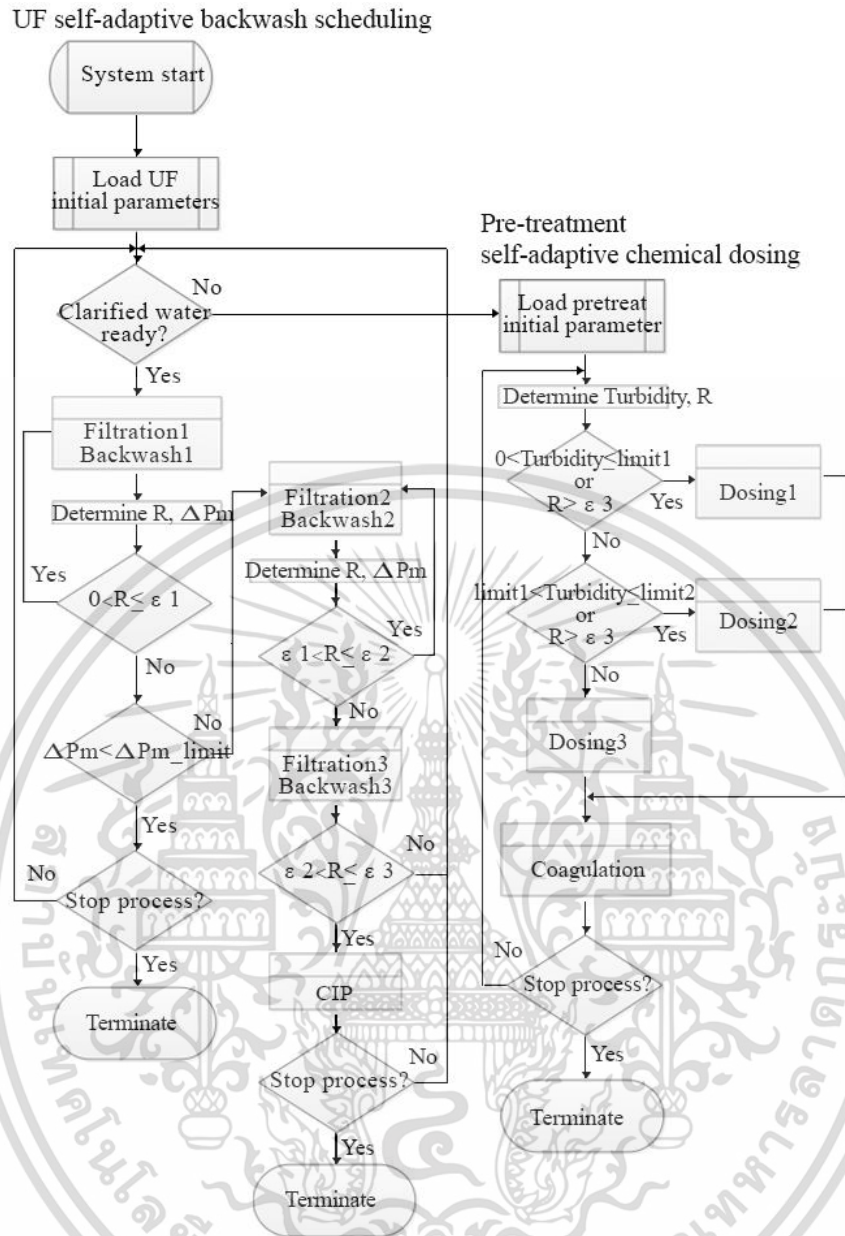


Figure.7 A flow diagram of the adaptive fouling control

$R_T$  is the total UF resistance.  $\Delta P_m$  is pressure difference across the membrane (Bar).  $\mu$  is the water viscosity (mPa.s).  $J$  is penetration flux ( $L/m^2 \cdot h$ ).  $n$  is number of UF skids.  $Q_{UF}$  is permeate flow rate of the UF skid.  $A_m$  is the active membrane area.

In self-adaptive backwash control, the 1'st filtration and backwash scheduling plan is performed an operation as an initial state. In case the value of UF resistance ( $R_T$ ) rises towards the threshold ( $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ), the adaptive fouling control is proceeded by adjusting the filtration and backwash scheduling plan which properly with varying characteristics of the raw water.

### 2.6.2. Pre-treatment self-adaptive chemical dosing

A pre-treatment is an important part of water treatment system, functioning as a first contamination screening. Numerous chemicals are used for coagulant and disinfection. An improper quantity of chemical dosing results in the increasing of operational expenditure. Therefore, self-adaptive chemical dosing is developed in this research.

The self-adaptive chemical dosing controller collects physical data of raw water, such as pH, turbidity and calculates the value of UF resistance so that performs the effective chemical dosing control corresponding to the presence of substances in raw water along with UF resistance.

The self-adaptive fouling control algorithm of water treatment system for backwash scheduling and chemical dosing is demonstrated in Fig. 7.

### 3. Experimental results

As aforementioned research methodology, the experiments of proposed cyber-physical cloud computing (CPCC) were implemented on a water treatment system of biomass power plant in Fig. 3 to validate system efficiency. The experiment tests included performance validation of water treatment system, particularly the ability of an adaptive fouling control system to adjust backwash scheduling and chemical dosing complying with the varying properties of raw water. Subsequently, the capability of total water cost optimization in biomass power plant compared with existing operation was considered.

Referring to the membrane resistance previously mentioned in Eq. (3),  $R_T$  has been calculated and used as a threshold triggering for air scouring backwash so that decreases the membrane fouling rate as well as increases the purification performance. The UF controller operated filtration-backwash cycles with adaptive backwash scheduling. The 1<sup>st</sup> filtration and backwash scheduling plan was performed an operation as an initial state. In case the value of UF resistance ( $R_T$ ) rose towards the thresholds ( $\epsilon_1=1.5$ ,  $\epsilon_2=2.5$ ,  $\epsilon_3=10$ ), the appropriate scheduling plan was operated with air-pressure entrance pressure 2.5 bar and flow rate 12 m<sup>3</sup>/hr for 20, 40 and 60 second interval time. The system produced the filtrate flux of 100 L/m<sup>2</sup>/hr at feed pressure 3 bar. UF membrane resistances resulting from self-adaptive backwash scheduling control, compared with fix backwash scheduling are illustrated in Fig. 8. It is noted that the proposed self-adaptive backwash scheduling impacts on the lower rate of UF resistance increase (Blue line) compared to the fixed frequency backwash (Red line). The result demonstrated that self-adaptive backwash, based on a membrane resistance threshold, was superior to fixed frequency backwash in decreasing the membrane fouling rate and extending the frequency of requiring chemical cleaning in place (CIP), likewise increases the effectiveness of water purification [26].

Pre-treatment controller operated the water clarifying cycles with adaptive chemical dosing. The raw water turbidity and UF membrane resistances mentioned in Eq. (3) were considered for controlling the chemical dosing quantity corresponding to the quality of raw water. The system produced the clarify water of 100 m<sup>3</sup>/hr. Adaptive chemical

dosing manipulation corresponding to raw water turbidity was performed using different chemical reagents volume 3.5, 5.5, 8 L/s complied by respectively water turbidity limit 20, 25, 30 NTU. The results in Fig. 9 demonstrated that the proposed self-adaptive chemical dosing achieved the effectiveness of adaptive fouling control compared to conventional water treatment processes which always applies fixed volume of chemical reagents affects the worse cost of exceeded chemical dosing or lower purified water quality [27]. The adjustable chemical dosing volume (Yellow line) is capable of change corresponding to the presence of raw water turbidity (Blue line) so that decreasing membrane fouling rate of filtration membrane represented by the UF resistance (Red line) even in the situation of high suspended particulates in the raw water.

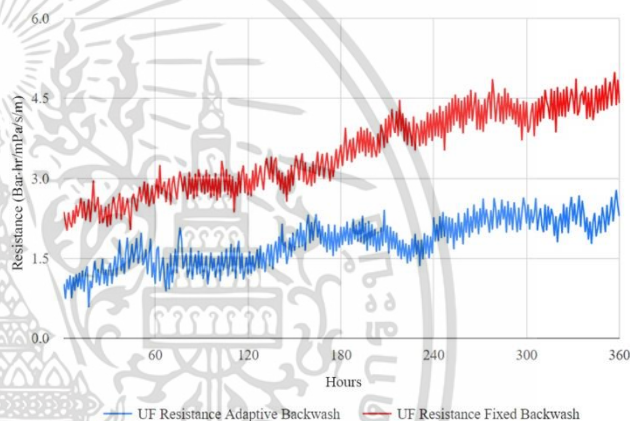


Figure.8 UF membrane resistance with self-adaptive backwash

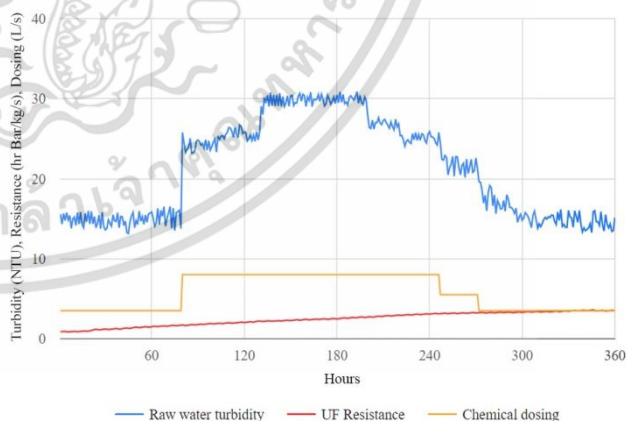


Figure.9 Adaptive fouling control impact

RO water treatment operation constrained by target recovery ( $Y$ ), required permeate flow rate ( $Q_p$ ), feed flow rate ( $Q_f$ ), maximum feed pressure ( $P_f$ ) and permeate pressure ( $P_p$ ). Low-level RO filtration controller received set point of RO feed pressure and concentrate flow from the supervisory RO controller as well as collected process variables ( $P_f$ ,  $Q_f$ ,  $P_c$ ,  $Q_c$ ,

$P_p, Q_p$ ) so that performed system operation maintain energy optimal as derived in Section 2.4.2. Referring to given permeate flow rate ( $Q_p$ ) of 4 m<sup>3</sup>/h, maximum permeate pressure ( $P_f$ ) of 8.5 Bar, and recovery ( $Y$ ) of 90% will lead to calculate the set point of RO feed pressure ( $P_f$ ) and feed flow rate ( $Q_f$ ) that is relative to the optimal energy consumption cost function expressed by Eq. (2).

As aforementioned methodology, water treatment system is able to achieve the target of improving the operation efficiency as illustrated by the impact on total water cost in Fig. 10 as well as purified water quality in Fig. 11. The results in Fig. 10 demonstrated the total water cost (Blue line) of water treatment operation for biomass power plant which computed by the summation of chemical dosing cost in Eq. (1) and energy consumption cost in Eq. (2) added with the average fixed cost (Yellow line). Comparing with the average total water cost of the system without the proposed cyber-physical cloud computing (Red line) [28], the total water cost (Blue line) was decreased by the major impact of chemical dosing cost reduction as well as energy consumption cost optimization. Furthermore, the results in Fig. 11 illustrated the fact that the water treatment operation with the functions of proposed adaptive-fouling control and energy consumption optimization was able to achieve the effectiveness of water purification complied by the required specification EDI TDS<0.64 (Orange area), EDI pH=6.5-8.5 (Orange line) UF/RO TDS<6.5 (Blue area) and UF/RO pH=5.5-7.5 (Blue line), even during the fluctuation of raw water qualities.

In this research, the total water consumption has been observed and demonstrated as the graphical data depicted in Fig. 12 which is the important information from the proposed system reflecting the operational requirement of water under local climate conditions. Comparing with the conventional biomass power plant [29-30], the proposed cyber-physical cloud computing (CPCC) is able to expose the crucial data which are appropriately used for water resources planning in case of water scarcity.

#### 4. Discussion

The performance of CPCC for water management system was initially concentrated on capability for adaptive fouling control corresponding to the variation of raw water properties. In Fig. 8, the comparison of fouling control results, UF membrane resistance with self-adaptive backwash and fixed backwash are demonstrated. In case higher of turbidity of raw water and pressure across the membrane, backwash

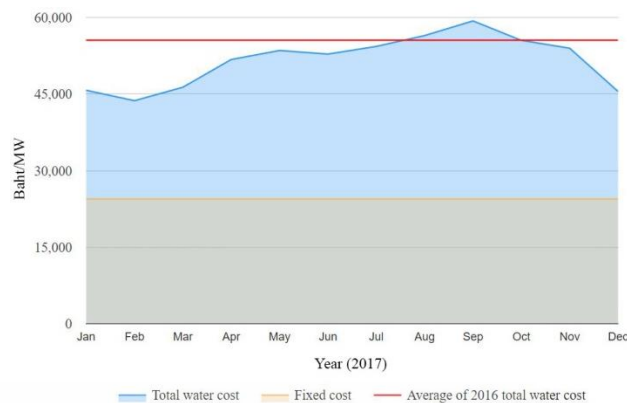


Figure.10 Total water cost

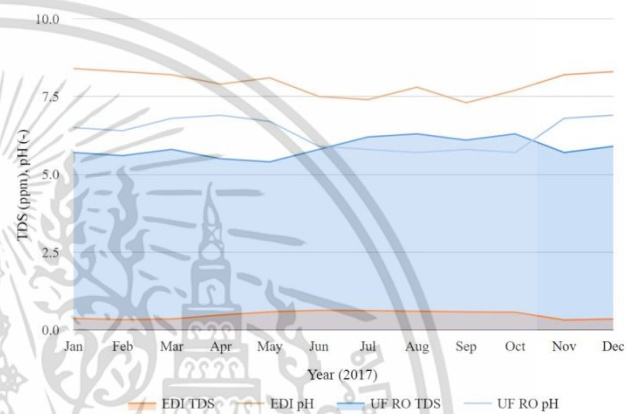


Figure.11 Water treatment quality



Figure.12 Total water consumption

frequency and interval time was increased, while filtration interval time was decreased so that decreased raising the rate of membrane resistance. In Fig. 9, self-adaptive chemical dosing control was illustrated. The different dosing plans were operated corresponding to variation of raw water turbidity. The results of self-adaptive fouling in Fig. 10, demonstrate that the control action can achieve the target to control, purified water quality complied by the required specification TDS<0.64, pH=6.5-8.5, even during the fluctuation of raw water qualities,

furthermore can restrain a membrane fouling as well as extend a membrane lifetime. Subsequently, the capability of optimal energy operation was focused. In Fig. 11 clearly presents that the water treatment system can achieve the capability for optimal total water cost operation under a target permeate flow rate 4m<sup>3</sup>/h and recovery (Y) of 90%. In this research, the total water consumption has been observed as the graphical data depicted in Fig. 12 which is the appropriate information reflecting the operational requirement of water under local climate conditions, also it is available for a water resource planning in the energy production.

### 5. Conclusion

Improving the efficiency of water management system in a biomass power plant using cyber-physical cloud computing has been presented in this study. The proposed infrastructure and methodologies were developed and implemented on

UF/RO water treatment process of biomass power plant. The three physical tiers constructed of physical instrumentation, edge computing and cloud computing were deployed with the aim of providing the superior performance of the water treatment operation. The self-adaptive fouling control efficiently accomplished a capability of purification during variation of raw water properties. In case of optimal total water cost operation, the energy consumption and chemical dosing were optimized while achieving the requirement of permeates flow rate and percent of the recovery. Furthermore, the tracking of total water consumption reflected the volumes of water needs which advantaged for a water resource planning in the energy production.

The future research plans include optimization of fuel consumption and fuel cost of biomass power generation for improving combustion efficiency, likewise sustaining operation resources.

Table 2. Characteristics of water treatment system

Water quality parameter	Units	Raw water	Pre-Treatment	UF/RO	EDI
TDS	mg/L	1920	1984	< 6.4	< 0.64
pH	-	7.25	7.2	5.0-9.0	6.5-8.5
Turbidity	NTU	15.68	1	< 0.1	< 0.1

#### Nomenclature

$P_f$	Pressure of feed water (Bar)	$\Delta P_{pump}$	Difference pressure across pump (Bar)
$P_c$	Pressure of concentrate (Bar)	$\Delta P_m$	Pressure across membrane (Bar)
$P_P$	Pressure of permeate (Bar)	Y	RO Recovery rate (%)
$Q_f$	Flow rate of feed water (m <sup>3</sup> /h)	$R_T$	Total UF resistance (Bar/mPa.s · m/hr)
$Q_c$	Flow rate of concentrate (m <sup>3</sup> /h)	n	Number of UF skids
$Q_P$	Flow rate of permeate (m <sup>3</sup> /h)	$A_m$	Active membrane area (m <sup>2</sup> )
$Q_{P\ total}$	Total flow rate of permeate (m <sup>3</sup> /h)	$\mu$	Dynamic viscosity (Pa.s)
$Q_{UF}$	Total flow rate of UF permeate (m <sup>3</sup> /h)	$\epsilon$	Maximum threshold of UF resistance
$\eta_{pump}$	Pump efficiency	$k_i$	Unit price of reagent (Baht/Unit)
$\Delta \pi_0$	Osmotic pressure (bar)	$m_i$	Unit price of energy (Baht/Unit)

### References

[1] P. Gadonneix, “Water for Energy”, *World Energy Council*, 2010.  
 [2] Ministry of Energy, “Alternative Energy and Development Plan (AEDP) 2015-2036”, THAILAND, 2015.  
 [3] T. Koanantakool, “Thai Energy Policy for Science and Technology Development”, *The 4<sup>th</sup> Kyoto University Asian Network Forum*, Japan, 2016.

[4] B. Al Smadi, K. Alzboon, and T. Al Azab, “Water Management and Reuse Opportunities in a Thermal Power Plant in Jordan”, *African Journal of Biotechnology*, Vol. 9, No. 29, pp. 4606-4614, 2010.  
 [5] A. Mercè Rio Carrillo and C. Frei, “Water: A Key Resource in Energy Production”, *Energy Policy*, Vol. 37, No. 11, pp. 4303-4312, 2009.  
 [6] M. S. Mohsen, “Treatment and Reuse of Industrial Effluents: Case Study of a Thermal Power Plant”, *Desalination*, Vol. 167, pp 75-86, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ควรเผยแพร่ที่สงวน ยกเว้นที่สงวนสิทธิ์แต่เพียงผู้เดียว และต้องยกย่องเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการใช้

- [7] J. M. Salazar, U. Diwekar, E. Constantinescu, and V. M. Zavala, "Stochastic Optimization Approach to Water Management in Cooling-Constrained Power Plants", *Applied Energy*, Vol. 112, pp. 12-22, 2013.
- [8] M. Farahani, S. M. Borghei, and V. Vatanpour, "Recovery of Cooling Tower Blowdown Water for Reuse: The Investigation of Different Types of Pretreatment Prior Nanofiltration and Reverse Osmosis", *Journal of Water Process Engineering*, Vol. 10, pp. 188-199, 2016.
- [9] K. J. Ptasiniski, "Efficiency of Biomass Energy", *John Wiley & Sons, Inc.*, 2016.
- [10] J. Lee, K. Park, H. Eum, and C. Lee, "Desalination of a Thermal Power Plant Wastewater by Membrane Capacitive Deionization", *Desalination*, Vol. 196, No. 1-3, pp. 125-134, 2006.
- [11] M. Xing, "Study on the Water Conservation Management Measures in Thermal Power Plants", *International Journal of Business and Management*, Vol. 5, No. 3, pp. 160-164, 2010.
- [12] L. O. Villacorte, S. Tabatabai, D. M. Anderson, G. L. Amy, J. C. Schippers, and M. D. Kennedy, "Seawater Reverse Osmosis Desalination and (Harmful) Algal Blooms", *Desalination*, Vol. 360, pp. 61-80, 2015.
- [13] L. Henthorne and B. Boysen, "State of the Art of Reverse Osmosis Desalination Pretreatment", *Desalination*, Vol. 356, pp. 129-139, 2015.
- [14] X. Zheng, S. Plume, M. Ernst, J. Croué, and M. Jekel, "In-Line Coagulation Prior to UF of Treated Domestic Wastewater – Foulants Removal, Fouling Control and Phosphorus Removal", *Journal of Membrane Science*, Vol. 403-404, pp. 129-139, 2012.
- [15] C. Kirsch, E. Pereira, and R. Sengupta, "Cyber-Physical Cloud Computing: The Binding and Migration Problem", In: *Proc. of the International Conf. on Design, Automation & Test in Europe*, pp. 1425-1428, 2012.
- [16] K. Bilal, O. Khalid, A. Erbad, and S. U. Khan, "Potentials, Trends, and Prospects in Edge Technologies: Fog, Cloudlet, Mobile Edge, and Micro Data Centers", *Computer Networks*, Vol. 130, pp. 94-120, 2018.
- [17] X. F. Liu, M. Shahriar, S.M. N. Al Sunny, M. C. Leu, and L. Hu, "Cyber-Physical Manufacturing Cloud: Architecture, Virtualization, Communication, and Testbed", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 43, No. 2, pp. 352-364, 2017.
- [18] B. Varghese and R. Buyya, "Next Generation Cloud Computing: New Trends and Research Directions", *Future Generation Computer Systems*, Vol.79, No. 3, pp. 849-861, 2018.
- [19] T. Zhou and Z. W. Li, "A Cost Model Approach for RO Water Treatment of Power Plant", *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 11, pp. 581-588, 2011.
- [20] G. K. Pearce, "UF/MF Membrane Water Treatment Principle and Design", *Water Treatment Academy, TechnoBiz Communications Co., Ltd.*, 2012.
- [21] N. Zarai, F. Tadeo, and M. Chaabene, "Planning of the Operating Points in Desalination Plants Based on Energy Optimization", *International Journal of Computer Applications*, Vol. 68, No. 18, pp. 6-11, 2013.
- [22] M. Li, "Optimization of Multitrain Brackish Water Reverse Osmosis (BWRO) Desalination", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 51, No. 9, pp. 3732-3739, 2012.
- [23] T. Nguyen, F. Roddick, and L. Fan, "Biofouling of Water Treatment Membranes: A Review of the Underlying Causes, Monitoring Techniques and Control Measures", *Membranes*, Vol. 2, No. 4, pp. 804-840, 2012.
- [24] L.G. van Willigenburg, H.M. Vollebregt, and R.G.M. van der Sman, "Optimal Adaptive Scheduling and Control of Beer Membrane Filtration", *Control Engineering Practice*, Vol. 34, pp. 77-87, 2015.
- [25] S. Duranceau, "Membrane Practices for Water Treatment", *American Water Works Association*, 2001.
- [26] C. M. Chew, M. K. Aroua, M. A. Hussain, and W. M. Ismail, "Evaluation of Ultrafiltration and Conventional Water Treatment Systems for Sustainable Development: An Industrial Scale Case Study", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, pp. 3152-3163, 2016.
- [27] S. Jiménez, M.M. Micó, M. Arnaldos, F. Medina, and S. Contreras, "State of the Art of Produced Water Treatment", *Chemosphere*, Vol. 192, pp. 186-208, 2018.
- [28] V. G. Gude, "Energy and Water Autarky of Wastewater Treatment and Power Generation Systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45, pp. 52-68, 2015.
- [29] J. R. Wolfe, R. A. Goldstein, J. S. Maulbetsch, and C. R. McGowin, "An Electric Power Industry Perspective on Water Use Efficiency", *Journal of Contemporary Water Research & Education*, Vol. 143, pp. 30-34, 2009.
- [30] W. Shao, J. Feng, J. Liu, G. Yang, Z. Yang, and J. Wang, "Research on the Status of Water Conservation in the Thermal Power Industry in

China", Energy Procedia, Vol. 105, pp. 3068-3074, 2017.



# ICCAS 2017



2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems

» PROCEEDINGS

**October 18~21, 2017**  
Ramada Plaza, Jeju, Korea

IEEE Catalog Number: CFP1710D-USB  
ISBN: 978-89-93215-13-7  
ISSN: 2093-7121

<http://2017.iccas.org>



Welcome Message

Conference Organization

Conference Information

Plenary Lectures & Special Sessions

Table of Contents

Author Index

Reviewers

Financial Contribution

E-proceeding Search

Copyright © 2017 Institute of Control, Robotics and Systems (ICROS)  
Tel: +82-2-6949-5801 / Fax: +82-2-6949-5807 / E-mail: [conference@icros.org](mailto:conference@icros.org)

Exit



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## A $PI^\lambda D^\mu$ Controller Design for Peltier-Thermoelectric Cooling System

P. Kungwalrut<sup>1</sup>, A. Numsomran<sup>1</sup>, P. Chaiyasith<sup>2</sup>, J. Chaoraingern<sup>1</sup>, V. Tipsuwanporn<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand (vittaya.ti@kmitl.ac.th) \* Corresponding author

<sup>2</sup>Department of Chemistry, Faculty of Science,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

**Abstract:** This paper describes the fractional-order controller design to achieve stability, performance and robustness of peltier-thermoelectric cooling system modeled as a first-order plus dead-time process which is widely used in a variety of applications. By using the purposed method, the process parameters are estimated from experimental based model identification. Then, the fractional-order controller is designed and optimized by minimizing the function of ISE performance index. Simulation validates theoretical analysis and demonstrates the enhanced performance of the fractional-order controller compared with integer-order.

**Keywords:** Fractional-order Control, PID Control, Peltier, Thermoelectric Cooling Module, Control System

### 1. INTRODUCTION

A Peltier - Thermoelectric Cooling System (TCS) consists of a element that utilizes the peltier effect to create a differential thermal controlled by applying a DC power. [1], [2] Peltier thermoelectric system is used in a variety applications of cooling electronic and electro-optic components, thus thermal control system design for TCS have been developed continuously for higher system performance. However, a superior performance and robustness of peltier- thermoelectric cooling system is difficult to achieve because of its nonlinearity characteristics [3]~[8]. In a previous research [9],  $PID$  controller design using Ziegler-Nichols' open loop and closed loop tuning method for achieving stability and transient response was proposed. Because the process model exhibits significant nonlinear behavior, a conventional  $PID$  controller could not satisfy a superior performance. In this paper, an implementable of fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller proposed by YangQuan Chen, Ivo Petras and Dingyu Xue [10] is developed and evaluated. This paper describes the fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller design to achieve stability, performance and robustness of peltier - thermoelectric cooling system. By using the purposed method, the process parameters are estimated from experimental based model identification. Then, the fractional-order  $PID$  controller is designed and optimized by minimizing the function of ISE performance index. Simulation validates theoretical analysis and demonstrates the enhanced performance of the fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller compared with integer order one. The rest of this paper is organized as follows: in section II, problem formulation of peltier - thermoelectric control system has been analyzed; in section III, fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller is proposed as design method for the current application;

in section IV the results obtained through simulation are described; while section V is dedicated to the conclusions.

### 2. PROBLEM FORMULATION

Consider a thermoelectric cooling system in Fig.1. The constructed TCS consists of a peltier device which is installed on front side of an aluminum plate. Cooling is performed on the aluminum plate when DC power is applied to the peltier device. A thermal transference in TCS is controlled by input current and diffused by fan-motor installed on cooling side of the peltier module.

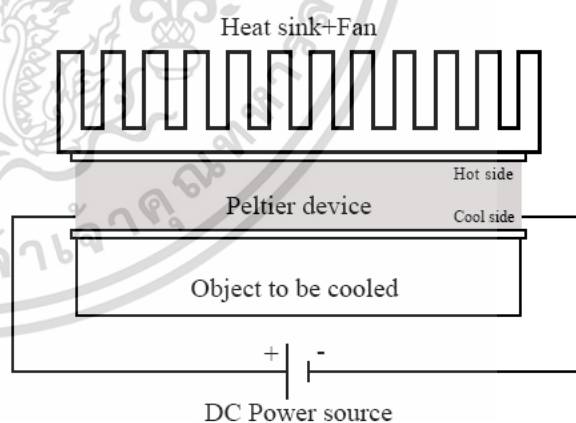


Fig. 1 Thermoelectric cooling system.

In general, a model of the thermoelectric cooling system has been identified by Fourier's law of thermal conduction and Newton's cooling law. However, TCS transfer function identified by mathematic modeling is not appropriate for controller design due to variation of system parameters. In this paper, the thermoelectric cooling system is considered as a first order plus dead time model (FOPDT) for demonstrating its nonlinear dynamic characteristics. The FOPDT transfer function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

can be written as:

$$G_p(s) = \frac{k_p e^{-st}}{\tau s - 1} \quad (1)$$

Due to a nonlinearity characteristic of thermoelectric cooling system (TCS), it is difficult to achieve a superior performance and robustness. Thus, this paper aims to design a fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller which can be optimized parameters of controller.

### 3. Fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ controller

A differentiation- integration operator used in fractional calculus is defined as:

$${}_a D_t^q = \begin{cases} \frac{d^q}{dt^q} & q > 0 \\ 1 & q = 0 \\ \int_a^t (dt)^{-q} & q < 0 \end{cases} \quad (2)$$

where  $q$  is the fractional-order.  $a$  and  $t$  are the limits of the operation.

A definitions for fractional derivatives given by Grunwald–Letnikov is shown as follows:

$${}_a D_t^q f(t) = \frac{d^q f(t)}{d(t-a)^q} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[ \frac{t-a}{N} \right]^{-q} \sum_{j=0}^{N-1} (-1)^j \binom{q}{j} f\left(t - j \left[ \frac{t-a}{N} \right]\right) \quad (3)$$

where  $N$  is the first integer which is not less than  $q$  i.e.  $n-1 \leq q < n$

For functions  $f(t)$  having  $n$  continuous derivatives for  $t \geq 0$  where  $n-1 \leq q < n$ ,

The Laplace transforms of fractional integral and derivative are given as follows:

$$L\{ {}_a D_t^q f(t) \} = s^q F(s) \quad (4)$$

A fractional-order PID controller is the  $PI^\lambda D^\mu$  controller involving an integrator of order  $\lambda$  and a differentiator of order  $\mu$ . The transfer function of the  $PI^\lambda D^\mu$  controller can expressed as

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + k_I \frac{1}{s^\lambda} + k_D s^\mu, \quad (\lambda, \mu > 0) \quad (5)$$

where  $G_c(s)$  is the transfer function of the controller,

$E(s)$  is an error, and  $U(s)$  is a controller' s output,  $\lambda$  and  $\mu$  are real numbers.

Fig. 2 depicts a block-diagram of  $PI^\lambda D^\mu$  controller which has a control characteristic described by bode plot in Fig.5. The advantage of fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller is control performance for dynamical system; moreover it has a robustness to resist changes of parameters of a controlled system [10].

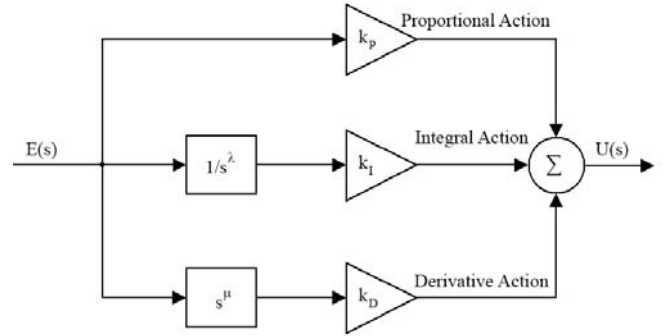


Fig. 2 Block-diagram of FOPID.

### 4. SIMULATION & RESULTS ANALYSIS

In order to validate the performance of the proposed controller design, a simulation application is developed in SIMULINK, MATLAB for two cases: evaluation of control performance and robustness. The comparison between the responses that result from the fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  control and integer-order  $PID$  control is made. The details of simulation and results analysis are as follows;

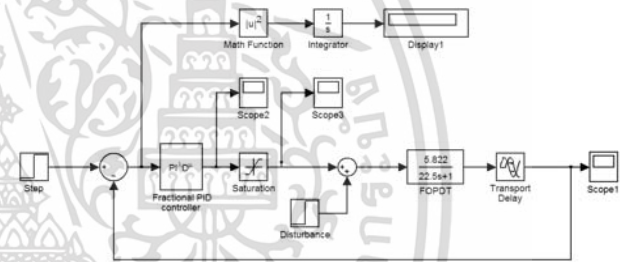


Fig. 3 Simulink of fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  control for TCS.

#### 4.1 Evaluation of Control Performance

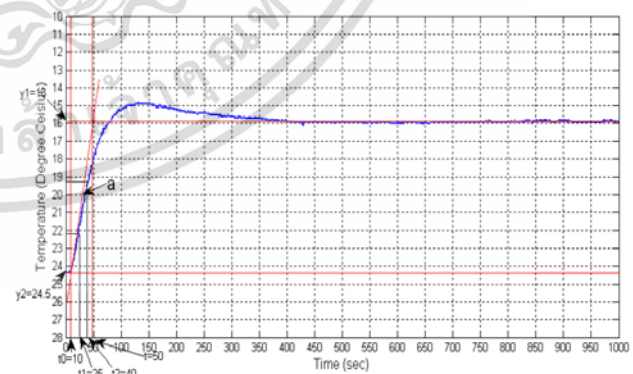


Fig. 4 Open-loop step responses of TCS.

In Fig. 4, the open-loop step responses of TCS, the response of thermoelectric cooling system without controller is presented. A time-domain curve fitting is used to determine the values of parameters in the first order plus dead time model, which can provide TCS transfer function as:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_p(s) = \frac{5.822e^{-2.5s}}{22.5s + 1} \quad (6)$$

The design of fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller is performed for TCS model in eq. (6) using the optimization tool [11]. Initially the  $PID$  parameters are set to  $K_p = K_i = K_d = 1$ ,  $\lambda = \mu = 0.5$ . Search limits are set to  $K = [-100; 100]$  for gains  $\lambda = [1.01; 1.90]$  and  $\mu = [0.01; 0.90]$ . Specifications are as follows. Gain margin is set to 10 dB, and phase margin to 65 degrees. A selected optimize function is integral square error (ISE).

Optimization with these settings leads to the following fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller parameter set:  $K_p = 0.57331$ ,  $K_i = 0.049723$ ,  $K_d = 0.5601$ , while  $\lambda = 1.0184$  and  $\mu = 0.49709$ . In case of integer-order  $PID$  controller, Ziegler-Nichols tuning method is used to determine the controller parameters which are the values as:  $K_p = 1.47$ ,  $K_i = 0.2$ ,  $K_d = 1.72$ ,

$$G_c(s) = k_p + k_i \frac{1}{s^\lambda} + k_d s^\mu \quad (7)$$

The frequency responses of two controllers are shown in Fig.5, where a blue line shows bode plot of  $PI^\lambda D^\mu$  controller, a green line shows bode plot of  $PID$  controller.

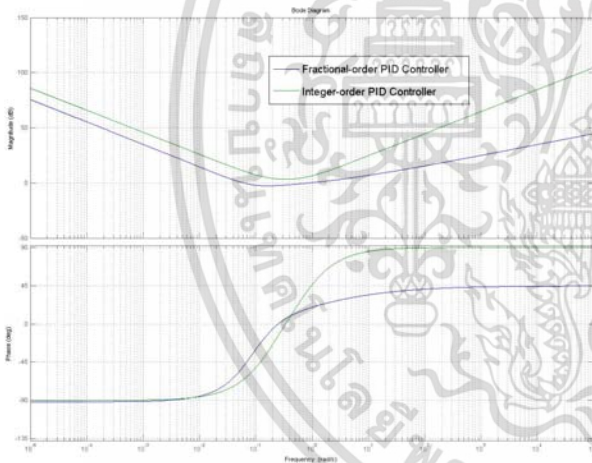


Fig. 5 Bode diagram of controllers.

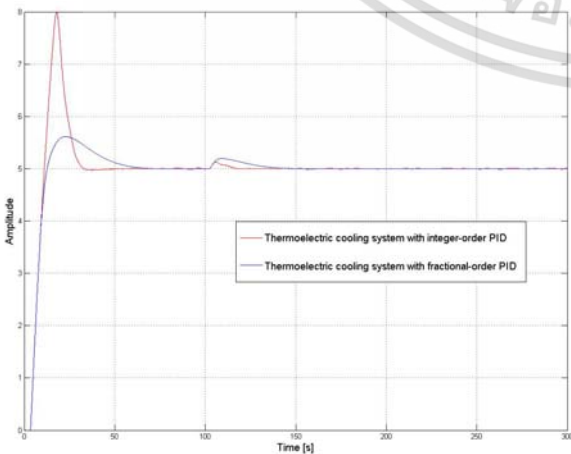


Fig. 6 Step Responses of TCS with fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller compared with  $PID$  controller.

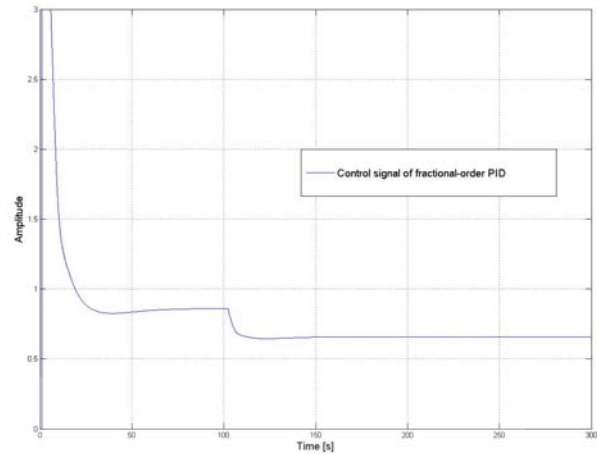


Fig. 7 Control signal of fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller.

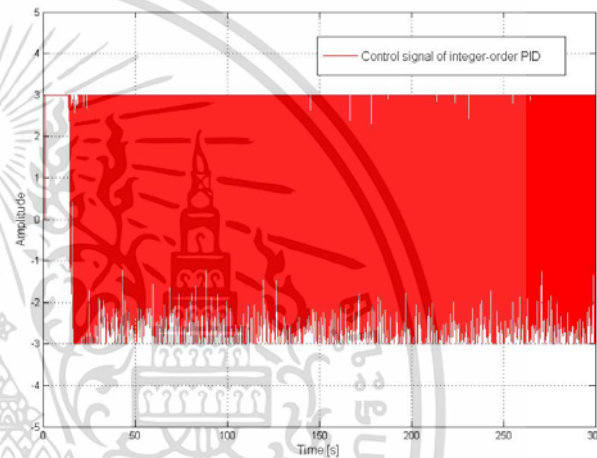


Fig. 8 Control signal of integer-order  $PID$  controller.

A comparison step response of the proposed fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  control system with integer-order  $PID$  control system is shown in Fig. 5. It can be seen that the results value of overshoot has been improved for 59.76% to 12.28%, settling time is 44.45 second and the value of steady state error is zero.

Comparing the result with the response of fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller in Fig. 5, we can notice the fact that the performances obtained in the case of the proposed controller design is better than in the case of using integer-order  $PID$  controller.

#### 4.2 Fractional Parameter Optimization

To validate appropriate values of fractional parameter  $(\lambda, \mu)$  for thermoelectric cooling system, we plot results of Integral Square Error (ISE), with respect to  $\lambda$  and  $\mu$  which are enumerated from 0.1 to 1.4 and 0.1 to 0.9 with step of 0.1 and approximate order  $N = 5$ . In Fig.9, mesh plot of ISE of control system with respect to  $\lambda$  and  $\mu$  has been presented. It can be seen, that the proper values of fractional parameter  $(\lambda, \mu)$  are in the range of  $\lambda = [0.95; 1.15]$  and  $\mu = [0.35; 0.59]$  respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

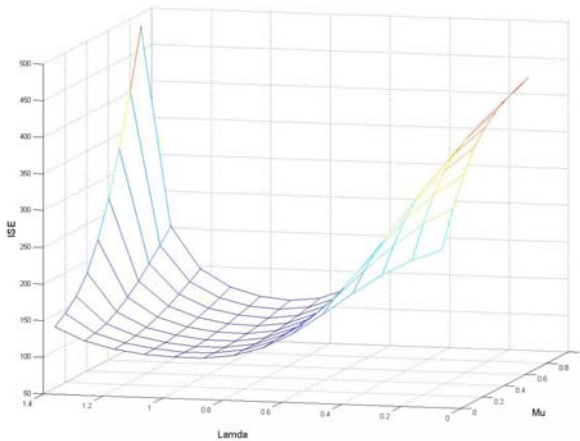


Fig. 9 Appropriate values of  $\lambda$  and  $\mu$  (ISE).

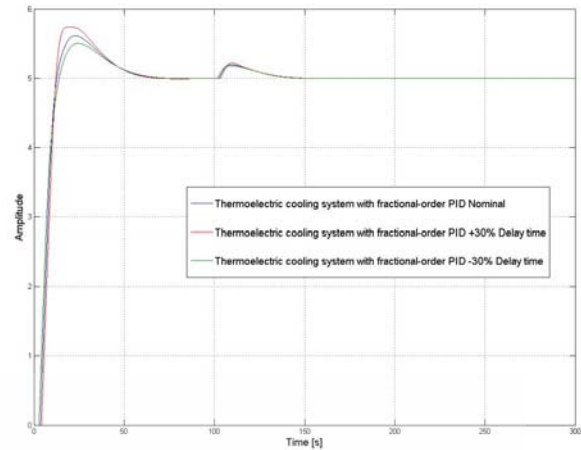


Fig. 11 Step Responses of TCS fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller with delay time perturbation.

### 4.3 Evaluation of Robustness

In order to evaluate characteristics of controller, we consider the perturbation of process gain and delay time of the process. The perturbations of the parameters are presented in Table 1.

Table 1 The perturbation of process gain and delay time.

	Nominal parameters	+30% Perturbed parameters	-30% Perturbed parameters
Process gain	5.822	7.5686	4.0754
Delay [s]	2.5	3.25	1.75

In this case, the simulation of TCS control system in Fig. 3 has been considered to validate a robustness of the proposed control scheme for rejecting the effects of the process perturbation.

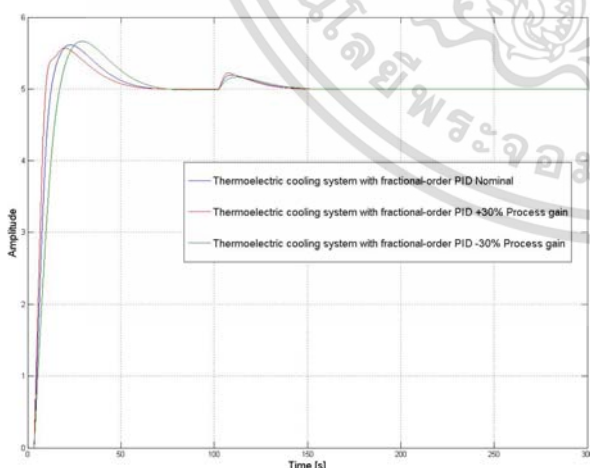


Fig. 10 Step Responses of TCS fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller with process gain perturbation.

Resulting time responses are shown in Fig.10. The blue line shows a response of the nominal plant, the red line shows a response of a +30% process gain perturbation, while the green line shows a response of the -30% process gain perturbation. In Fig.11, The blue line shows a response of the nominal plant, the red line shows a response of the +30% of delay time perturbation, while the green line shows a response of the -30% of delay time perturbation. It can be seen, that the fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller can achieve robustness evaluation for nominal and perturbed plant. From these results, fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller can achieve both of control performance and robustness evaluation.

### 5. CONCLUSION

The  $PI^\lambda D^\mu$  Controller Design for peltier - thermoelectric cooling module has been presented in this study. The proposed fractional-order PID controller is implemented to achieve control performance and robustness of control system. The controller design of the proposed system has been derived, and the effective performance has been validated via MATLAB simulation. The results from the evaluation, fractional-order  $PI^\lambda D^\mu$  controller can keep stability and satisfy the performance specification even if the parameters of the plant are perturbed.

### REFERENCES

- [1] M. Deng, "Operator based Thermal Control of an Aluminum Plate with a Peltier Device", ICICIC'07, pp. 319-319.
- [2] X. Qiu and J. Yuan, "Temperature Control for PCR Thermocyclers Based on Peltier-Effect Thermoelectric", Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference, pp. 7509-7512.
- [3] J. Augustus And P. Cuperus, "A Temperature Control System for Small Biological

- Preparations, Displaying Relatively Fast Heating and Cooling Capability”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.59, 1977.
- [4] J. Ventura, T. H. Moita and M. B. dos Santos, "Characterization of temperature sensors using Peltier cells," 2016 IEEE 21st International Mixed-Signal Testing Workshop (IMSTW), Sant Feliu de Guixols, 2016, pp. 1-6xx
- [5] B. Huang and C. Duang "System dynamic model and temperature control of a thermoelectric cooler", International Journal of Refrigeration, vol. 23 no. 3 pp. 197-207 2000.
- [6] J. V. F. Neto D. F. S. de Sá and L. R. Lopes "State space modeling of thermal actuators based on peltier cells for indirect measurements and optimal control", Computer Modelling and Simulation (UKSim) 2010 12th International Conference, pp. 392-397.
- [7] H. Morimitsu and S. Katsura "A method to control a peltier device based on heat disturbance observer", IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1222-1227.
- [8] T. Hatano, M. Deng and S. Wakitani, "A Cooling and Heat-retention System actuated by Peltier device considering fan-motor control," IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Taipei, 2014, pp. 164-169.
- [9] Sarawut P., Jutarut C., Vittaya T. and Arjin N., "The Design of PID Controller for Peltier Cooler Process", International Symposium on Technology for Sustainability, November 2012.
- [10] YangQuan Chen, Ivo Petráš and Dingyu Xue, Fractional Order Control - A Tutorial, 2009 American Control Conference, USA June 10-12, 2009
- [11] Aleksei Tepljakov, Eduard Petlenkov and Juri Belikov, "FOMCON: a MATLAB Toolbox for Fractional-order System Identification and Control", <https://www.researchgate.net/publication/259741855>
- [12] K. Erenturk, "Fractional-Order and Active Disturbance Rejection Control of Nonlinear Two-Mass Drive System," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 9, pp. 3806-3813, Sept. 2013.
- [13] I. Pan and S. Das, "Kriging Based Surrogate Modeling for Fractional Order Control of Microgrids," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 1, pp. 36-44, Jan. 2015.
- [14] L. Angel and J. Viola, "Design and statistical robustness analysis of FOPID, IOPID and SIMC PID controllers applied to a motor-generator system," in IEEE Latin America Transactions, vol. 13, no. 12, pp. 3724-3734, Dec. 2015.
- [15] C. Jauregui, M. Duarte Mermoud, G. Lefranc, R. Orostica, J. C. Travieso Torres and O. Beytia, "Conical Tank Level Control with Fractional PID," in IEEE Latin America Transactions, vol. 14, no. 6, pp. 2598-2604, June 2016.
- [16] W. Zhenbin, W. Zhenlei, C. Guangyi and Z. Xinjian, "Digital implementation of fractional order PID controller and its application," in Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 16, no. 1, pp. 116-122, March 2005.
- [17] E. Hamamci, "An Algorithm for Stabilization of Fractional-Order Time Delay Systems Using Fractional-Order PID Controllers," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 52, no. 10, pp. 1964-1969, Oct. 2007.
- [18] N. Hohenbichler, "Comments on "An Algorithm for Stabilization of Fractional-Order Time Delay Systems Using Fractional-Order PID Controllers," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 53, no. 11, pp. 2712-2712, Dec. 2008.
- [19] R. Schmid, "Comments on "A New Trace Bound for a General Square Matrix Product," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 53, no. 11, pp. 2712-2712, Dec. 2008.
- [20] S. Saha et al., "Design of a Fractional Order Phase Shaper for Iso-Damped Control of a PHWR Under Step-Back Condition," in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 57, no. 3, pp. 1602-1612, June 2010.

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ICCAS 2017



2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems

» PROCEEDINGS

**October 18~21, 2017**  
Ramada Plaza, Jeju, Korea

IEEE Catalog Number: CFP1710D-USB  
ISBN: 978-89-93215-13-7  
ISSN: 2093-7121

<http://2017.iccas.org>



Welcome Message

Conference Organization

Conference Information

Plenary Lectures & Special Sessions

Table of Contents

Author Index

Reviewers

Financial Contribution

E-proceeding Search

Copyright © 2017 Institute of Control, Robotics and Systems (ICROS)  
Tel: +82-2-6949-5801 / Fax: +82-2-6949-5807 / E-mail: [conference@icros.org](mailto:conference@icros.org)

Exit



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Chemical Dosing Control for Ultrafiltration Water Treatment System

P. Kungwalrut<sup>1</sup>, A. Numsomran<sup>1\*</sup>, P. Chaiyasith<sup>2</sup>, J. Chaoraingern<sup>1</sup>, V. Tipsuwanporn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand (arjin.nu@kmitl.ac.th) \* Corresponding author

<sup>2</sup>Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

**Abstract:** Chemical dosing is a significant process of water treatment system because it influences on water quality and operational cost. This paper presents a chemical dosing pH control using temporal logic technique for ultrafiltration water treatment system, in order to validate and analyze an appropriate control approach. In this study, a simulation was built in Matlab Simulink, and has been tested with the data collected from a pilot-scale ultrafiltration water treatment system. As stated in the simulation results, the proposed control scheme can achieve the performance specification in pH control.

**Keywords:** Ultrafiltration, Water Treatment System, Chemical Dosing Control, Temporal Logic Stateflow

### 1. INTRODUCTION

Ultrafiltration water treatment system is widely used for water purification application. To produce the purified water that appropriates for using in industrial or residential area, several chemical dosing have been provided in pre-treatment stage to enhance filtration efficiency, for instance, chlorination applying for algae control, polyaluminium chloride (PAC) applying coagulation for removal of colloids, and neutralization for pH control. This paper presents a chemical dosing pH control using temporal logic technique for ultrafiltration water treatment system, in order to validate and analyze an appropriate control approach. In this study, a simulation was built in Matlab Simulink, and has been tested with the data collected from a pilot-scale ultrafiltration water treatment system. As stated in the simulation results, the proposed control scheme can achieve the performance specification in pH control. The rest of this paper is organized as follows: in section II, pH Control System Model has been explained; in section III, temporal logic controller is proposed as control method; in section IV the simulation results are described; while section V is dedicated to the conclusions.

### 2. PH CONTROL SYSTEM

The pH of water is controlled in a tank as shown in fig. 1. The untreated water flows into the top of the tank while the acid and caustic reagent is added into the tank. The water in tank is stirred in order to uniform the pH of all liquid in the tank. The treated water is pumped out at a bottom of the tank after specific batch time.

From mass balance equation, a dynamic model of the strong acid or caustic system is shown in (1).

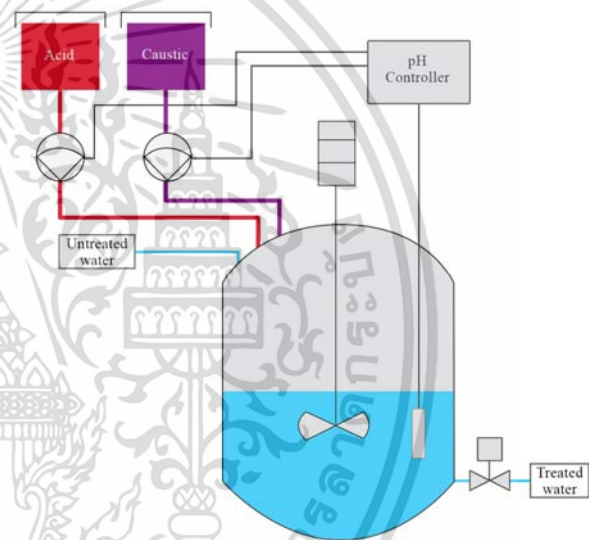


Fig. 1 pH Control System.

$$\frac{dc_o(t)}{dt} = \frac{u(t)}{V}(c_u(t) - c_o(t)) + \frac{q(t)}{V}(c_i(t) - c_o(t)) \quad (1)$$

where

$c_o(t)$  is a concentration of the excess hydrogen ion in treated water (mol/L)

$c_u(t)$  is a concentration of the excess hydrogen ion of reagent (mol/L)

$c_i(t)$  is a concentration of the excess hydrogen ion in untreated water (mol/L)

$u(t)$  is volume flow rate of reagent (L/s)

$q(t)$  is volume flow rate of untreated water (L/s)

$V$  is volume of tank (L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The pH of water can be calculated from a concentration of the excess hydrogen ion as describing in equation (2).

$$pH = -\log \left[ \sqrt{0.25c^2 + 10^{-14}} + 0.5c \right] \quad (2)$$

In this study, we define a concentration of reagent as a constant value, and control the value of an effluent pH by varying volume flow rate of the reagent.

### 3. TEMPORAL LOGIC CONTROL

Temporal logic control is a scheme of logical condition control technique that performs state actions and transitions in term of time. The event-based and absolute-time are two types of temporal logic operation. Event-based temporal logic use operators as following description.

Operators *after* : *after(n, E)*

where E is the base event for the after operator, n is a positive integer.

Operators *before* : *before(n, E)*

where E is the base event for the before operator, n is a positive integer.

Absolute-time temporal logic use operators as following description.

Operators *after* : *after(n, sec)*

where n is positive number or expression.

Operators *before* : *before(n, sec)*

Temporal Logic Stateflow diagram in fig. 2 depicts a structure of Stateflow controller which includes 2 state of exclusive (OR) and 3 graphical functions of Function On, Function turn\_pump, Function and Function dose. Absolute-time temporal logic operators have been used as the conditions of transitions for the action of turn on or turn off the dosing pump.

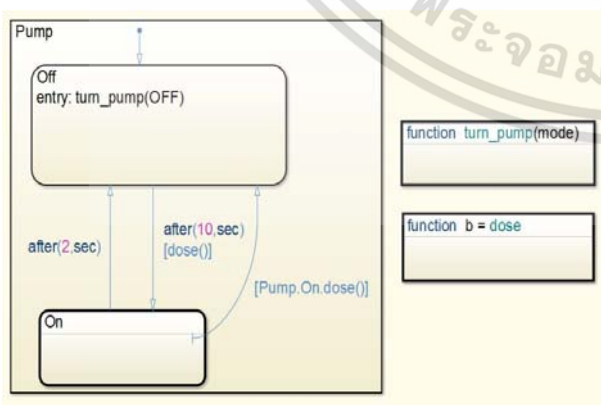


Fig. 2 Temporal Logic Stateflow diagram.

### 4. SIMULATION & DISCUSSION

Using experimental process values of pilot-scale ultrafiltration water treatment system in table 1, the proposed control scheme has been tested. From the initial condition, the target is to control reference at pH7.

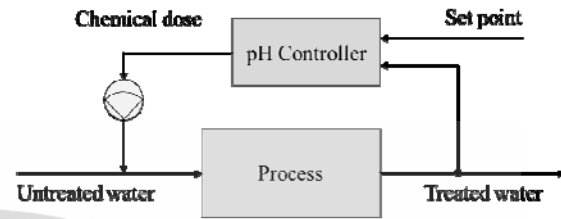


Fig. 3 Control System Block Diagram.

Table 1 The process values of pH control system

	Description	Value
$c_{u\_acid}$	concentration of the excess hydrogen ion of reagent (acid: mol/L)	$1.0E-04$
$c_{u\_caustic}$	concentration of the excess hydrogen ion of reagent (caustic: mol/L)	$-1.0E-03$
$c_i$	concentration of the excess hydrogen ion in treated water (mol/L)	$-1.0E-03$ to $1.0E-04$
$q_i$	volume flow rate of untreated water (L/s)	$5.0E-03$
$V$	volume of a tank (L)	50

The simulation of chemical dosing control for ultrafiltration water treatment system using temporal logic control has been done by Matlab, Simulink program as the diagram showing in fig. 6~9.

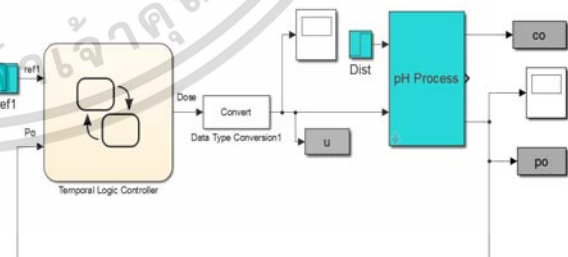


Fig. 4 pH Control Using Temporal Logic Stateflow.

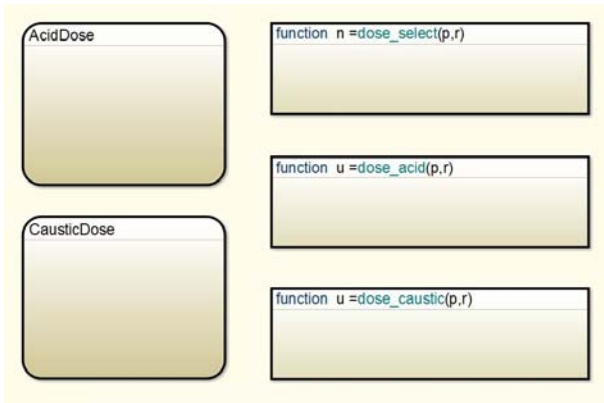


Fig. 5 Temporal Logic Stateflow diagram.

Referring to the diagram of temporal logic control in fig. 5, when subsystem AcidDose becomes active, function dose\_select will be executed for checking a current pH value. If pH is more than 7, function dose\_acid will be executed with appropriate temporal operators. On the contrary, if the pH is less than 7, function dose\_caustic will be executed with appropriate temporal operators.

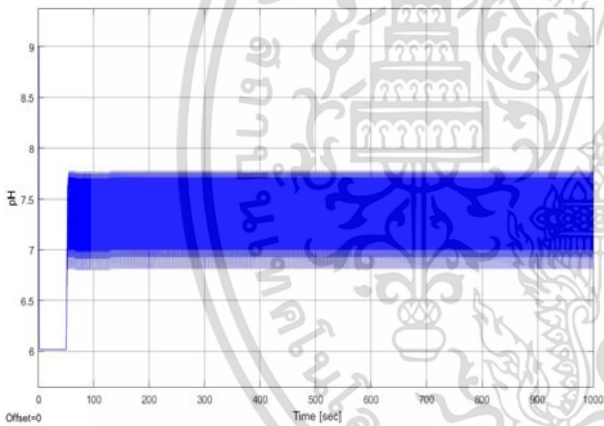


Fig. 6 Step Response of Temporal Logic Stateflow Control for Acid Dosing.

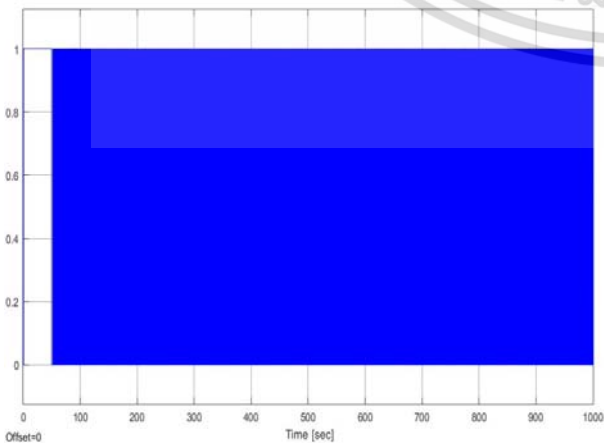


Fig. 7 Control Signal of Acid Dosing

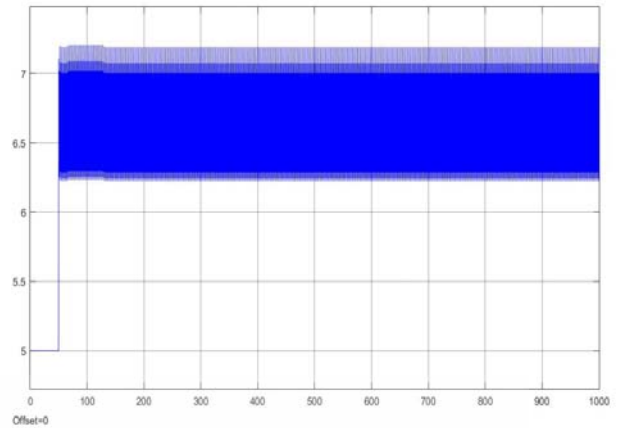


Fig. 8 Step Response of Temporal Logic Stateflow Control for Caustic Dosing.

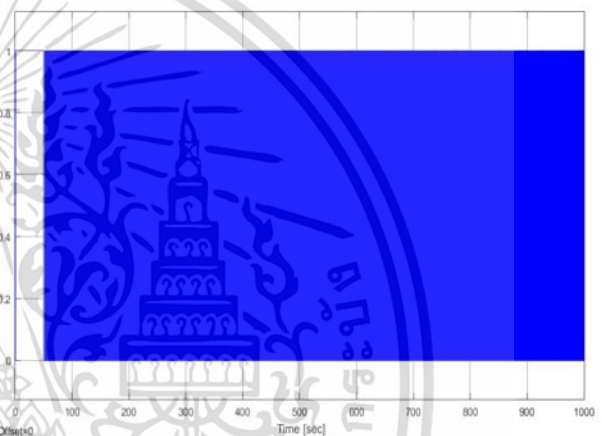


Fig. 9 Control Signal of Caustic Dosing.

## 5. CONCLUSION

Chemical dosing control for ultrafiltration water treatment system has been presented in this study. The temporal logic control technique is implemented to achieve pH control performance. The controller design of the proposed system has been derived, and the effective performance has been tested and validated via MATLAB simulation. The simulation results have also been proved an achievement of control scheme for pH control.

## REFERENCES

- [1] Hadas Kress-Gazit, "Temporal-Logic-Based Reactive Mission and Motion Planning", *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 25, No. 6, December 2009.
- [2] Il Moon, Gary J. Powers, Jerry R. Burch and Edmund M. Clarke, "Automatic Verification of Sequential Control Systems using Temporal Logic", *American Institute of Chemical Engineers Journal*, November 1991.
- [3] William G. Wood, "Temporal Logic Case Study", *Technical Report*, Software Engineering

- Institute Carnegie Mellon University, August 1989.
- [4] Prof. Bernd Finkbeiner, Ph.D., “Embedded Systems– Stateflow Tutorial”, Reactive Systems Group Saarland University.
- [5] Sara L. Uckelman, “Temporal Logic”, Institute for Logic, Language, and Computation, February 26, 2010.
- [6] Nicholas Rescher and Alasdair Urquhart, “Temporal Logic”, Springer-Verlag Wien New York, 1971.
- [7] www.csd.newcastle.edu.au, “Control System Design - pH Simulation”
- [8] Ghiasy D, Boodhoo KVK, Tham MT, “Control of Intensified Equipment: A simulation study for pH Control in a Spinning Disc Reactor. Chemical Engineering and Processing”, Process Intensification 2012, 55, 1-7
- [9] Mrs.Gayatri K Palnitkar, “Study Of Fuzzy Logic Controller And Its Application To Ph Neutralization Plant”, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 02 Issue: 06, 2015.
- [10] Abdullah, M.N.Karsiti and Rosdizali, “Review of pH Neutralization Process Control”, in 2012 4th International conference on intelligent and Advanced Systems(ICIAS2012), IEEE.
- [11] .T. Jadhav, R.R. Mudholkar & S.R.Sawant ,”Fuzzy Logic pH control technique”, Industrial Automation- April 2003, pp42-46.
- [12] Gaylon Lynn Williams, B.S., “A thesis on Process Model Based control of wastewater pH “, August 1989, Texas Tech University.
- [13] Claudio Garcia and Radrigo Juliani Correa De Godoy, “Application of MATLAB in Science and Engineering”.
- [14] Salehi S., Shahrokhi M. And Nejati M. “Adaptive nonlinear control of pH neutralization process using fuzzy approximators” Control Engineering Practice 17, (2009) 1329-1337
- [15] McAvoy, T. J., Hsu, E. and Lowenthal, S. (1972), —Dynamic of pH in control stirred tank reactor□ Ind. Engng Chem. Process Des.Dev.11,68-70

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายพระนาย กังวารรัตน์  
 วัน เดือน ปีเกิด 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2517  
 ที่อยู่ 15/191 ซอยสาทร 11  
 แขวงยานนาวา เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

## ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2554 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกรดเฉลี่ย 4.00  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 พ.ศ. 2544 บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต  
 มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย  
 พ.ศ. 2539 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์)  
 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2560 – ปัจจุบัน บริษัท พีเอสทีซี อินเทอร์เน็ตเซ็นแนล จำกัด  
 กรรมการบริษัท  
 พ.ศ. 2560 – ปัจจุบัน บริษัท พีเอสที เอ็มเอสดับบลิว 1 จำกัด  
 กรรมการบริษัท  
 พ.ศ. 2559 – ปัจจุบัน บริษัท พีเอสที เอนเนอร์ยี 8 จำกัด  
 กรรมการบริษัท  
 พ.ศ. 2559 – ปัจจุบัน บริษัท พีเอสที เอนเนอร์ยี 7 จำกัด  
 กรรมการบริษัท  
 พ.ศ. 2558 – ปัจจุบัน บริษัท พีเอสทีซี เอนจิเนียริง จำกัด  
 กรรมการบริษัท  
 พ.ศ. 2558 – ปัจจุบัน บริษัท พีเอสที เอนเนอร์ยี จำกัด  
 กรรมการบริษัท  
 พ.ศ. 2558 – ปัจจุบัน บริษัท พีเอสที เอนเนอร์ยี 1 จำกัด  
 กรรมการบริษัท  
 พ.ศ. 2558 – ปัจจุบัน บริษัท พีเอสที เอนเนอร์ยี 2 จำกัด  
 กรรมการบริษัท  
 พ.ศ. 2557 – ปัจจุบัน บริษัท พีเอสที (อุบลราชธานี) จำกัด  
 กรรมการบริษัท  
 พ.ศ. 2556 – ปัจจุบัน บริษัท เพาเวอร์ วี กรีน จำกัด  
 กรรมการบริษัท  
 พ.ศ. 2556 – ปัจจุบัน บริษัท โซลาร์โกกรีน จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรรมการบริษัท
- พ.ศ. 2556 – ปัจจุบัน บริษัท ไบโอดีกรีน จำกัด  
กรรมการบริษัท
- พ.ศ. 2556 – ปัจจุบัน บริษัท วินด์โอดีกรีน จำกัด  
กรรมการบริษัท
- พ.ศ. 2556 – ปัจจุบัน บริษัท โรงไฟฟ้าสระยายโสม จำกัด  
กรรมการบริษัท
- พ.ศ. 2555 – ปัจจุบัน บริษัท โรงไฟฟ้าขุนพุดเพ็ง จำกัด  
กรรมการบริษัท
- พ.ศ. 2554 – ปัจจุบัน บริษัท อรัญ เพาเวอร์ จำกัด  
กรรมการบริษัท
- พ.ศ. 2554 – ปัจจุบัน บริษัท เศรษฐีสุพรรณ ไบโอดีกรีน เพาเวอร์ จำกัด  
กรรมการบริษัท
- พ.ศ. 2553 – ปัจจุบัน บริษัท นวัตกรรม บีเวอร์เรส จำกัด  
กรรมการบริษัท
- พ.ศ. 2553 – ปัจจุบัน บริษัท กันทา โซล่าพาวเวอร์ จำกัด  
กรรมการบริษัท
- พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน บริษัท เวลต์ โคราช เอ็นเนอร์ยี จำกัด  
กรรมการบริษัท
- พ.ศ. 2544 - ปัจจุบัน บริษัท เพาเวอร์ โซลูชั่น เทคโนโลยี จำกัด (มหาชน)  
กรรมการ / ประธานกรรมการบริหาร / ประธานเจ้าหน้าที่บริหาร
- พ.ศ. 2541 - 2544 บริษัท เอ็ม.วี.ที. คอมมิวนิเคชั่น จำกัด (มหาชน) กรรมการบริษัท /  
กรรมการบริหาร / ผู้จัดการฝ่ายขาย
- พ.ศ. 2539 - 2541 บริษัท ยูไนเต็ด คอมมิวนิเคชั่น อินดัสตรี จำกัด (มหาชน) - UCOM  
Sales Engineer (พ.ศ. 2540 – 2541)  
Engineer (พ.ศ. 2539 – 2540)

รางวัลและหลักสูตรการอบรม

- พ.ศ. 2560 ศิษย์เก่าดีเด่น แผนกวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี  
สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา (สอศ.)
- พ.ศ. 2560 หลักสูตรพัฒนาสัมพันธเครือข่ายความมั่นคงระดับผู้บริหาร  
กองอำนวยการรักษาความมั่นคงภายในราชอาณาจักร (กอ.รมน.)
- พ.ศ. 2556 หลักสูตร Director Certification Program (DCP)  
สมาคมส่งเสริมสถาบันกรรมการบริษัทไทย (IOD)
- พ.ศ. 2548 หลักสูตร Director Accreditation Program (DAP)  
สมาคมส่งเสริมสถาบันกรรมการบริษัทไทย (IOD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้