



ระบบแสดงผลภาพถ่ายภาพแบบต่อเนื่องบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง



โดย
นายวีระวัฒน์ อ้นพล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

ระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

A DYNAMIC BIOGAS MONITORING SYSTEM BASED-ON IOT PLATFORM



By
MR. Viravat ONPOL

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (ENERGY ENGINEERING)
Department of MECHANICAL ENGINEERING
Academic Year 2024
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ ระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ต
เพื่อทุกสรรพสิ่ง
โดย นายวีระวัฒน์ อ้นพล
สาขาวิชา วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. สาโรช พูลเทพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติ
ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

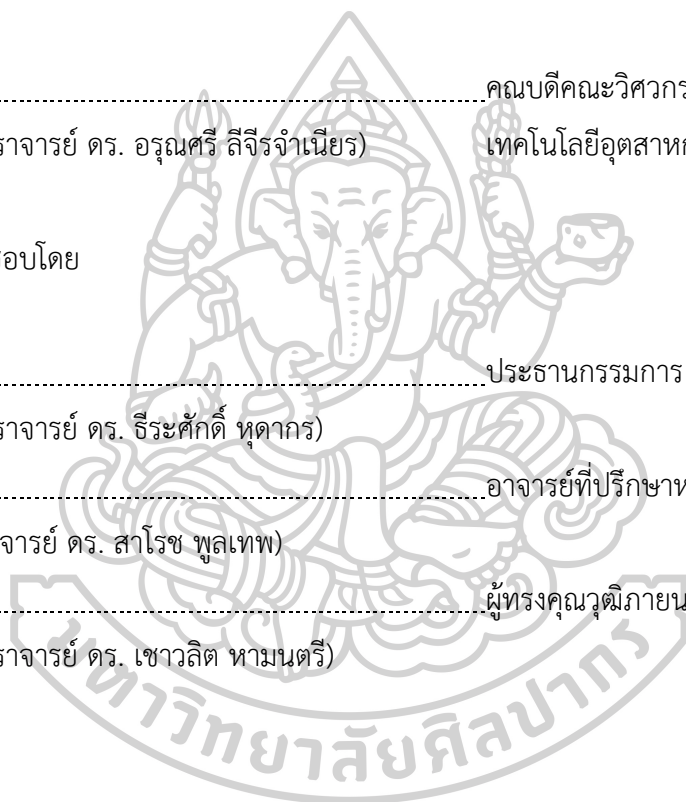
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณศรี ลีจรรย์เนียร) เทคโนโลยีอุตสาหกรรม

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีระศักดิ์ หุตากร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สาโรช พูลเทพ)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขวลิต หามนตรี)



61406202 : วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2

คำสำคัญ : การตรวจวัดก๊าซ, ระบบแสดงผลแบบเรียลไทม์, อินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง,
ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด

นาย วีระวัฒน์ อ้นพล: ระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ต
เพื่อทุกสรรพสิ่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. สาโรช พูลเทพ

วิทยานิพนธ์นี้จัดทำเพื่อพัฒนาระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพโดยใช้ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์ (Fiber Optic-Based-Refractometer: FOR) สำหรับตรวจวัดก๊าซชีวภาพ เป้าหมาย วิทยานิพนธ์ได้นำตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ (Variable resistor: VR) ขนาด 100 โอห์ม มาจำลองเป็นตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์ที่เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดตระกูล Arduino รุ่น Portenta H7 สำหรับแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog-to-digital converter: ADC) ขนาด 16 บิต และทำการส่งค่าสัญญาณดิจิทัลผ่านระบบโครงข่าย ส่วนตัวเสมือนที่สร้างขึ้นจากโมดูลสื่อสารที่มีค่าความหน่วงแฝงเท่ากับ 70 มิลลิวินาที สุ่มคอมพิวเตอร์แม่ข่ายเพื่อจัดเก็บเข้าสู่ระบบฐานข้อมูลสำหรับใช้ในการแสดงผลผ่านโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ที่สามารถแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพได้ทั้งแบบเรียลไทม์ และสามารถกำหนดช่วงเวลาที่ต้องการได้ นอกจากนี้ ระบบยังสามารถกำหนดระดับของผู้ใช้งานระหว่างผู้ดูแลระบบและผู้ใช้งานทั่วไปได้ โดยอัลกอริทึมที่พัฒนาสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพที่จุดทัศนียม 3 ตำแหน่ง อย่างไรก็ตาม ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0.074 โวลต์ จนถึง 2.827 โวลต์ และมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 3.793% มีค่าความไว (Sensitivity) เท่ากับ 0.0283 โวลต์ต่อเปอร์เซ็นต์ (V/%) หรือ 28.3 มิลลิโวลต์ต่อเปอร์เซ็นต์ (mV/%) ทั้งนี้โปรแกรมประยุกต์ที่ใช้สำหรับพัฒนาระบบประกอบด้วยโปรแกรมภาษาเอชทีเอ็มแอล (HTML), พีเอชพี (PHP), และจาวาสคริปต์ (JavaScript) ซึ่งเป็นโปรแกรมชนิดโอเพนซอร์ส (Open source) ที่สามารถนำชุดคำสั่งไปทำการพัฒนาต่อไปในอนาคตได้

61406202 : Major (ENERGY ENGINEERING)

Keyword : Gas measurement, Real-time monitoring, Internet of Things,
Microcontroller board

MR. Viravat ONPOL : A dynamic Biogas Monitoring System Based-on IoT
Platform Thesis advisor : Associate Professor Dr. Saroj Pullteap

This thesis is to develop a biogas monitoring system using a fiber-optic-based refractometer (FOR) for measuring target biogas. A 100 ohm variable resistor (VR) has been operated as a FOR, which is connected to an Arduino Portenta H7 microcontroller board for converting analog signals to 16 bits digital signal, and send such signal through a virtual private network created from communication modules with a latency of 70 millisecond. The output digital is then passed to the computer server for data storage and monitoring the results via a web browser program. However, the output signal can display biogas concentration values both in real-time and continuously. In addition, the system can identify the user levels between administrator and general user. Besides, the developed algorithm can also calculate the biogas concentration at 3 significant digits. Further, the developed system can be displayed the voltage values in the range from 0.074 volt to 2.827 volt, and obtains an average percentage error of 3.793% with a sensitivity of 0.0283 volts per percent (V/%) or 28.3 millivolts per percent (mV/%), respectively. Finally, the application programs used for developing the system include: HTML, PHP, and JavaScript, which is an open-source program.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.สาโรช พูลเทพ ให้สำเร็จลุล่วง ด้วยดี ซึ่งอาจารย์ได้สั่งสอน ชัดเจน เสนอแนะ และวิจารณ์เนื้อหาวิทยานิพนธ์ เพื่อปรับแก้ให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดีที่สุดทั้งในด้านเนื้อหา และความรู้ใหม่ ๆ ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้รับการสั่งสอนให้เป็น คนที่มีความละเอียดรอบคอบ ไม่ทำในสิ่งที่ผิดหรือสิ่งที่ไม่ถูกต้อง ทั้งเรื่องของการเรียนรู้ในวิชาต่าง ๆ การทำงานวิจัย การทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งสิ่งที่ดีเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตการทำงาน และการ ดำรงชีวิตให้ดีขึ้นได้ และขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ หุตากร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวลิต หามนตรี ที่กรุณาตอบรับเป็นประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งในทุกคำชี้แนะ และทุกคำสั่งสอนจากอาจารย์ทั้ง 3 ท่านที่เกิดขึ้น ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอน้อมรับทั้งคำชี้แนะและคำสั่ง สอนเหล่านี้ ได้นำมาปรับใช้กับการเรียนรู้สิ่งใหม่ ๆ ในอนาคตต่อไป นอกจากนี้ขอขอบคุณกำลังใจดี ๆ จากครอบครัว อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ในวิชาต่าง ๆ ให้แก่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงเหล่าเจ้าหน้าที่ภายในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวก ทั้งในเรื่องของงานเอกสาร และการติดต่อประสานงานภายนอกภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สุดท้ายนี้ขอขอบคุณความช่วยเหลือและมิตรภาพดี ๆ ที่เกิดขึ้นจากสมาชิกและน้อง ๆ ทุกคนภายใน ห้องปฏิบัติการระบบฝังตัวทางกล (Mechanical Embedded System Laboratory: MESL) วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย นวัตกรรมและการสร้างสรรค์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

วีระวัฒน์ อ้นพล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3.1 ออกแบบและพัฒนาระบบแสดงผลแบบออนไลน์และต่อเนื่อง.....	2
1.3.2 พัฒนาระบบรับและส่งข้อมูล.....	3
1.3.3 พัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูล.....	3
1.3.4 พัฒนาแอปพลิเคชัน.....	3
1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
1.4.1 ก๊าซชีวภาพ (Biogas).....	3
1.4.2 อินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง (IoT).....	3
1.4.3 โครข่ายส่วนตัวเสมือน (VPN).....	3
1.4.4 อัลกอริทึม (Algorithm).....	3
1.4.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด (Microcontroller board).....	3
1.4.6 โมดูลสื่อสาร (Communication module).....	3

1.4.7 การส่งข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Continuous data transmission)	3
1.4.8 ฐานข้อมูล (Database)	3
1.4.9 เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server).....	4
1.5 งบประมาณที่ใช้ในการดำเนินการ.....	4
1.6 สถานที่ดำเนินการ	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.8 ระยะเวลาและขั้นตอนดำเนินการวิทยานิพนธ์	5
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ก๊าซชีวภาพ (Biogas).....	6
2.2 เครื่องมือตรวจวัดก๊าซชีวภาพ (Biogas instrument)	8
2.2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบพกพา (Handheld)	9
2.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งคงที่.....	13
2.3 ระบบแสดงผล (Monitoring system).....	15
2.3.1 ระบบแสดงผลแบบปิด (Offline monitoring).....	15
2.3.2 ระบบแสดงผลแบบออนไลน์ (Online monitoring).....	15
2.4 อินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT).....	16
2.4.1 เทคโนโลยี Zigbee.....	16
2.4.2 เทคโนโลยี LoRaWAN.....	18
2.4.3 เทคโนโลยี Cellular.....	20
2.5 โครงข่ายส่วนตัวเสมือน (Virtual private network: VPN).....	21
2.6 โปรแกรมสำหรับพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพ.....	24
2.6.1 โปรแกรม phpMyAdmin และ MySQL	24
2.6.2 โปรแกรมอาปาเช่ (Apache).....	24
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25

บทที่ 3	วิธีการดำเนินการ	27
3.1	ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ (Hardware and software)	30
3.1.1	ชุดตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง	30
3.1.2	เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server).....	40
3.2	การทดสอบระบบ	52
3.2.1	การทดสอบความเร็วในการส่งและรับข้อมูล	52
3.2.2	การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง	53
3.2.3	การทดสอบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทมิเตอร์สำหรับตรวจวัดก๊าซ	54
บทที่ 4	ผลการทดสอบและการอภิปรายผล	56
4.1	ผลการทดสอบหาค่าความหน่วงแฝง	56
4.2	ผลการทดสอบของระบบตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง	58
4.3	ผลการทดสอบของหน้าแสดงผลของระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่อง	66
4.4	ผลการทดสอบการต่อร่วมกับตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทมิเตอร์	74
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย	81
5.1	การสรุปผลการวิจัย	81
5.2	ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย.....	83
5.3	ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพในอนาคต	84
รายการอ้างอิง		86
ภาคผนวก ก.....		89
ภาคผนวก ข.....		110
ภาคผนวก ค.....		124
ประวัติผู้เขียน.....		136

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1	อัตราการใช้ข้อมูลและค่าความหน่วงแฝงของเทคโนโลยีโทรศัพท์มือถือในแต่ละยุค... 57
ตารางที่ 4.2	ตารางผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของชุดตัวตรวจวัดต้นทางครั้งที่ 1.... 59
ตารางที่ 4.3	ตารางผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของชุดตัวตรวจวัดต้นทางครั้งที่ 2.... 61
ตารางที่ 4.4	ตารางผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของชุดตัวตรวจวัดต้นทางครั้งที่ 3.... 62
ตารางที่ 4.5	ตารางค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ครั้ง..... 63



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดก๊าซชีวภาพ	8
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซแบบพกพา (Handheld).....	9
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของตัวตรวจจับก๊าซแบบ NDIR.....	10
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเม็ดเร่งปฏิกิริยา.....	11
รูปที่ 2.5 ตัวตรวจจับก๊าซชนิดการเผาเม็ดเร่งปฏิกิริยาต่อร่วมกับวงจร Wheatstone bridge.....	11
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเครื่องมือวัดก๊าซแบบพกพา.....	13
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งคงที่.....	14
รูปที่ 2.8 รูปแบบการเชื่อมต่อโครงข่าย Zigbee.....	17
รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบต่าง ๆ ในระบบโครงข่าย LoRaWAN	19
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างอุปกรณ์ 4G Dongle.....	21
รูปที่ 2.11 แพคเกจข้อมูลที่เปลี่ยนไปในรูปของ IPsec.....	23
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างโปรแกรม phpMyAdmin สำหรับจัดการฐานข้อมูล MySQL.....	24
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์.....	27
รูปที่ 3.2 แนวคิดของระบบแสดงผลตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์.....	29
รูปที่ 3.3 ฮาร์ดแวร์ในส่วนของตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง.....	30
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการเชื่อมต่อระหว่างตัวต้านทานปรับค่าได้ และไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด.....	31
รูปที่ 3.5 ผังงานแสดงการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด.....	32
รูปที่ 3.6 ชุดคำสั่งที่ทำการโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด.....	33
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างโปรแกรมวินบ็อกสำหรับกำหนดค่าอุปกรณ์ราวเตอร์.....	37
รูปที่ 3.8 การกำหนดคุณสมบัติอุปกรณ์ต้นทางสำหรับสร้างโครงข่ายส่วนตัวเสมือน.....	37
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการกำหนดค่าในส่วนของ L2TP Client.....	38

รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการเพิ่มตารางการจัดเส้นทางสำหรับโครงข่ายส่วนตัวเสมือน	39
รูปที่ 3.11 การทดสอบการส่งข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย	40
รูปที่ 3.12 ส่วนประกอบในชุดเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Database server)	41
รูปที่ 3.13 ผังการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย	41
รูปที่ 3.14 โครงสร้างฐานข้อมูลชั่วคราว (gas_temp).....	42
รูปที่ 3.15 โครงสร้างฐานข้อมูลหลัก (gas_db).....	43
รูปที่ 3.16 ตัวอย่างชุดคำสั่งหน้าประมวลผล gas.php	44
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างหน้าจอเข้าสู่ระบบ (Login) สำหรับใช้งานระบบ	46
รูปที่ 3.18 ตัวอย่างหน้าเมนูหลัก	46
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างหน้าจอการเพิ่มผู้ใช้งานระบบ.....	47
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างหน้าแสดงความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์.....	47
รูปที่ 3.21 ผังการทำงานของหน้าแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์.....	48
รูปที่ 3.22 ตัวอย่างหน้าแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบกำหนดช่วงเวลา	50
รูปที่ 3.23 ผังการทำงานของหน้าแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบกำหนดช่วงเวลา	50
รูปที่ 3.24 ตัวอย่างโครงข่ายส่วนตัวเสมือน	52
รูปที่ 3.25 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดสอบคุณสมบัติของชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง	54
รูปที่ 3.26 ผังโครงสร้างการพัฒนาระบบ.....	54
รูปที่ 4.1 คำสั่ง Ping จาก Router board	57
รูปที่ 4.2 การต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง.....	58
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและค่าแรงดันไฟฟ้าที่แปลงจากสัญญาณดิจิตอล ..	64
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าจากการวัดด้วยอุปกรณ์แสดงรูปคลื่นสัญญาณแบบ ดิจิตอลและค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น.....	65
รูปที่ 4.5 หน้าแสดงผลแรกสำหรับป้อนชื่อผู้ใช้งาน และรหัสผ่านเพื่อใช้งานระบบ	66
รูปที่ 4.6 โครงสร้างฐานข้อมูลผู้ใช้งานระบบ (admin)	68

รูปที่ 4.7 ข้อความแจ้งหากผู้ใช้งานระบบป้อนข้อมูลชื่อผู้ใช้งาน และรหัสผ่านไม่ถูกต้อง.....	68
รูปที่ 4.8 หน้าแสดงผลเมนูหลัก.....	69
รูปที่ 4.9 หน้าแสดงผลของการเพิ่มผู้ใช้งานระบบ (addadmin.php)	70
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างการแจ้งเตือนความผิดพลาดจากหน้าประมวลผล insertadmin.php	70
รูปที่ 4.11 หน้าแสดงผลแจ้งข้อความในการเพิ่มผู้ใช้งานสำเร็จ.....	71
รูปที่ 4.12 หน้าแสดงผลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบกำหนดช่วงเวลา.....	72
รูปที่ 4.13 หน้าแสดงผลสำหรับแจ้งเตือนให้ผู้ใช้งานทำการยืนยันตัวตนเพื่อใช้งานระบบ	73
รูปที่ 4.14 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับตรวจจับก๊าซชีวภาพ.....	74
รูปที่ 4.15 หน้าแสดงผลที่แสดงค่าสัญญาณดิจิทัลทั้งค่าอ้างอิงและค่าคาร์บอนไดออกไซด์	75
รูปที่ 4.16 ฐานข้อมูลชั่วคราวที่เพิ่ม co2_deltav.....	76
รูปที่ 4.17 หน้าแสดงผล gas_realtime.php แสดงค่า co2_deltav.....	76
รูปที่ 4.18 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังกรองสัญญาณ	77
รูปที่ 4.19 การทำเส้นกราฟมาตรฐานเพื่อหาสมการเชิงเส้น	78
รูปที่ 4.20 ตัวอย่างกราฟแสดงผลค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเรียลไทม์.....	79
รูปที่ 4.21 ตัวอย่างกราฟความเข้มข้นด้วยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	80
รูปที่ 4.22 ตัวอย่างกราฟความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบช่วงเวลา	80
รูปที่ ก.1 ชุดคำสั่งที่โปรแกรมเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด.....	90
รูปที่ ก.2 ชุดคำสั่งหน้าประมวลผล gas.php.....	91
รูปที่ ก.3 ชุดคำสั่งหน้าประมวลผล index.php.....	92
รูปที่ ก.4 ชุดคำสั่งหน้าประมวลผล validate.php	93
รูปที่ ก.5 ชุดคำสั่งหน้าประมวลผล validate.php (ต่อ).....	94
รูปที่ ก.6 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล menu.php.....	95
รูปที่ ก.7 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล co2chart.php.....	96
รูปที่ ก.8 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล co2chart.php (ต่อ).....	97

รูปที่ ก.9 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล co2chart.php (ต่อ).....	98
รูปที่ ก.10 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล co2chart.php (ต่อ).....	99
รูปที่ ก.11 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล co2chart.php (ต่อ).....	100
รูปที่ ก.12 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล co2chart.php (ต่อ).....	101
รูปที่ ก.13 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล co2chart.php (ต่อ).....	102
รูปที่ ก.14 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล filterrealtime.php.....	103
รูปที่ ก.15 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล filterrealtime.php (ต่อ)	104
รูปที่ ก.16 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล filterrealtime.php (ต่อ)	105
รูปที่ ก.17 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล filterrealtime.php (ต่อ)	106
รูปที่ ก.18 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล addadmin.php.....	107
รูปที่ ก.19 ชุดคำสั่งหน้าประมวลผล insertadmin.php.....	108
รูปที่ ก.20 ชุดคำสั่งหน้าประมวลผล insertadmin.php (ต่อ).....	109



รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
NIR	แสงอินฟราเรดระยะใกล้ (Near infrared)
MIR	แสงอินฟราเรดระยะกลาง (Middle infrared)
ppb	ปริมาณเมื่อเทียบกับจำนวนพันล้านส่วน (part-per-billion)
MPa	หน่วยวัดแรงดันเมกะปาสคาล (มีค่าเท่ากับ 10^6)
IoT	ระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things)
M2M	การรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ (Machine to machine)
FOR	ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์ (Fiber Optic-Based-Refractometer)
VPN	โครงข่ายส่วนตัวเสมือน (Virtual private network)
3G/4G	วิวัฒนาการระบบขอระบบโทรศัพท์มือถือ
GUI	รูปแบบการแสดงผล (Graphical user interface)
json	รูปแบบข้อมูลชนิด json
AVG()	ฟังก์ชันสำหรับการดึงค่าเฉลี่ยจากฐานข้อมูล
INSTINCT()	ฟังก์ชันสำหรับการดึงข้อมูลที่ซ้ำ 1 ค่า
Null	เป็นค่าว่างเปล่าที่กำหนดตัวแปร
ΔV	ค่าความต่างแรงดันไฟฟ้า (Delta V)
Ω	หน่วยความต้านทาน (Ohm)
A	ขารับสัญญาณอนาล็อกของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด
V_{in}	แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด (Input voltage)
V_{ref}	แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (Reference voltage)
R^2	ค่าความผันแปรของตัวแปรแบบเชิงเส้น

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้ามีทั้งพลังงานทางเลือก และพลังงานทดแทน ซึ่งพลังงานทางเลือกที่ได้จากวัสดุธรรมชาติ ทั้งก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน ถ่านหิน หรือแม้แต่วัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติล้วนแล้วแต่ใช้แล้วหมดไปทั้งสิ้น แต่พลังงานทดแทนจะเป็นพลังงานสะอาด หรือเป็นพลังงานที่ใช้แล้วไม่หมดไปทั้งพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม หรือแม้แต่พลังงานชีวภาพ ก๊าซชีวภาพเป็นหนึ่งในพลังงานชีวภาพที่เกิดจากแบคทีเรียบางชนิดเป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ ที่เป็นของเสียหรือเศษสิ่งปฏิกูลที่เกิดจากชุมชนหรือบ้านเรือน หรือมูลสัตว์จากฟาร์มปศุสัตว์ต่าง ๆ โดยโครงสร้างของก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วย ก๊าซมีเทน (Methane: CH₄), ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide: H₂S), และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide: CO₂) [1] เป็นต้น ก๊าซชีวภาพนั้นมีประโยชน์มากมาย สามารถนำมาใช้ภายในครัวเรือน หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในการสร้างความอบอุ่นภายในบ้านในช่วงฤดูหนาว และในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความจำเป็นต้องใช้ความร้อนในกระบวนการผลิตสินค้าบางอย่าง เช่น การนำก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการต้มของเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) หรือการนำก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าก๊าซชีวภาพจะมีประโยชน์มากมายดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น แต่ก๊าซชีวภาพยังเป็นอันตรายต่อระบบการหายใจของมนุษย์และทำให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ (Air pollution) [2] ได้เช่นกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์วัดก๊าซชีวภาพ เพื่อทราบถึงปริมาณและความเข้มข้นของก๊าซเป้าหมายที่ทำการวัด และเพื่อประเมินความเสี่ยงในการทำงานบริเวณนั้น ๆ ซึ่งในปัจจุบัน การตรวจวัดก๊าซชีวภาพทั่วไปมี 2 ลักษณะด้วยกัน คือ การตรวจวัดที่แสดงให้เห็นจากเครื่องมือที่วัดได้ ณ ขณะนั้น (Discrete measurement) และการวัดแบบต่อเนื่อง (Continuous measurement) นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยอีกเป็นจำนวนมากที่ดำเนินการสร้างเครื่องมือดังกล่าว อาทิเช่น Z. Dashtban, M. R. Salehi *et al.*, [3] ทำการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพที่อันตราย เช่น ก๊าซมีเทน (CH₄) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) สำหรับงานชุดเจาะและสำรวจน้ำมัน โดยใช้เส้นใยแก้วชนิดโฟโตนิกคริสตัล (Photonic crystal fiber: PCB) ที่ประกอบด้วยแมกนีเซียมฟลูออไรด์ (MgF₂) ซึ่งสามารถใช้ความยาวคลื่นแสงได้ตั้งแต่ 1 ไมโครเมตร จนถึง 3.3 ไมโครเมตร ครอบคลุมทั้งแสงอินฟราเรดระยะใกล้ (Near infrared: NIR) และแสงอินฟราเรดระยะกลาง (Mid infrared: MIR) ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้มีค่าสัมประสิทธิ์ความไวมากกว่า 50% นอกจากนี้ D. E. Williams *et al.*, [4] ได้สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซโอโซน (O₃) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ต้นทุนต่ำโดยใช้เทคนิค

ตัวตรวจจับก๊าซทั้งสแตนด์บายที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลอินพุตสำหรับระบบแสดงผลแบบโครงข่าย ซึ่งสามารถตรวจจับก๊าซไอโซนและไนโตรเจนไดออกไซด์ที่มีปริมาณน้อยถึง 10 ส่วนในพันล้านส่วน (part-per-billion: ppb) และ E. V. Perez *et al.*, [5] ได้สร้างเครื่องมือสำหรับตรวจวัดก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่ซึมผ่านแผ่นโพลีเมอร์ภายใต้แรงดันที่ 3.0 MPa และอุณหภูมิที่สูง 300 °C โดยใช้แผ่นปะเก็นอลูมิเนียมและกราฟท์ ทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ที่มีอัลกอริทึมสำหรับควบคุมแรงดันและอุณหภูมิไม่ให้สูงเกิน

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงได้พัฒนาระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องด้วยการแสดงผลผ่านระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) [6-8] และด้วยแนวคิดที่ต้องเป็นระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพโดยใช้ตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพที่ปลอดภัยโดยผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องอยู่ในจุดที่ทำการตรวจวัด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการส่งข้อมูลระหว่างจุดตรวจวัดและเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายที่ทำหน้าที่จัดเก็บค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพนั้น ๆ ซึ่งเป็นการส่งและรับค่าระหว่างอุปกรณ์ถึงอุปกรณ์ (Machine to Machine: M2M) [9] บนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง วิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องเป็น 2 ส่วนหลักด้วยกัน คือ ส่วนที่เป็นชุดตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง ในชุดนี้ประกอบด้วยตัวตรวจวัดใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรคโตมิเตอร์ (Fiber Optic-Based-Refractometer: FOR) [3] ที่เชื่อมต่อด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด และทำการส่งค่าที่ได้ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server) ด้วยโมดูลสื่อสาร (Communication module) และส่วนจัดการข้อมูล (Data management) ซึ่งทำหน้าที่เก็บค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพที่ส่งมาจากชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง โดยเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายยังมีโปรแกรมต่าง ๆ สำหรับสร้างหน้าเว็บแสดงผลที่แสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพในรูปแบบของกราฟ ด้วยอัลกอริทึมที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมภาษาต่าง ๆ เพื่อให้ผู้ใช้งานระบบได้ใช้งานสะดวกมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อพัฒนาระบบแสดงผลการตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์และต่อเนื่องโดยทำงานบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT)

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ออกแบบและพัฒนาระบบแสดงผลแบบออนไลน์และต่อเนื่อง สำหรับระบุปริมาณความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพบนพื้นฐานอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง (IoT)

1.3.2 พัฒนาระบบรับและส่งข้อมูล จากจุดตรวจวัดต้นทางไปยังฐานข้อมูล (Database) ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด (Microcontroller board) และชุดโมดูลสื่อสาร เพื่อสร้างโครงข่ายเสมือนส่วนตัว (Virtual private network: VPN) [8] เชื่อมระหว่างจุดตรวจวัดกับฐานข้อมูล

1.3.3 พัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูล โดยใช้คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ประยุกต์ เพื่อใช้ในการประมวลผลค่าที่ส่งมาจากจุดตรวจวัด และทำการจัดเก็บข้อมูลลงฐานข้อมูล

1.3.4 พัฒนาแอปพลิเคชัน โดยใช้ซอฟต์แวร์ประยุกต์ เพื่อแสดงให้เห็นค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพที่วัดได้จากจุดตรวจวัดต้นทาง

1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.4.1 ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นก๊าซที่เกิดจากธรรมชาติ โดยอาจเกิดจากแบคทีเรียบางชนิดได้ ทำการย่อยสลายซากพืช ซากสัตว์ หรือมูลสัตว์ แล้วทำให้เกิดก๊าซต่าง ๆ ขึ้นมา มีทั้งก๊าซมีเทน (CH_4), ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S), และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ก่อให้เกิดอันตรายกับมนุษย์หากมีการสูดดม

1.4.2 อินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง (IoT) หมายถึง รูปแบบการส่งและรับข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ที่อยู่บนโครงข่ายเดียวกันและรูปแบบการส่งที่เหมือนกัน

1.4.3 โครงข่ายส่วนตัวเสมือน (VPN) หมายถึง การเชื่อมต่อเพื่อรับ-ส่งข้อมูลจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่ง โดยทั้งสองจุดไม่ได้อยู่ในโครงข่ายเดียวกัน เมื่อทั้งสองจุดเชื่อมโครงข่ายเข้าด้วยกันทำให้เกิดโครงข่ายส่วนตัวที่ผู้ใช้งานอื่นไม่สามารถเข้าถึงโครงข่ายส่วนตัวได้

1.4.4 อัลกอริทึม (Algorithm) เป็นชุดคำสั่งของโปรแกรมประยุกต์ในเครื่องคอมพิวเตอร์ แมข่ายในการพัฒนาระบบตรวจวัดแบบเรียลไทม์ ใช้สำหรับการประมวลผลหรือการคำนวณ รวมถึงแสดงผลผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการตัดสินใจ

1.4.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด (Microcontroller board) เป็นแผงอุปกรณ์ที่มีวงจรอิเล็คทรอนิกส์สำหรับประยุกต์การใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ที่ต้องการ โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดสำหรับรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพ และแปลงสัญญาณแบบอนาล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital: ADC) [10]

1.4.6 โมดูลสื่อสาร (Communication module) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ต และทำให้อุปกรณ์ที่ต่างสถานที่กันสามารถเชื่อมต่อให้เป็นโครงข่ายเดียวกันได้

1.4.7 การส่งข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Continuous data transmission) [11] เป็นการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ที่มีความต่อเนื่อง และสม่ำเสมอ

1.4.8 ฐานข้อมูล (Database) เป็นส่วนความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ที่ต้องการจัดเก็บ สามารถดึงข้อมูลมาใช้หรือจัดเก็บเพิ่มเติมได้ผ่านอัลกอริทึมของโปรแกรม

1.4.9 เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server) เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ปลายทางที่ใช้สำหรับรับข้อมูลจากจุดตรวจวัดแล้วทำการจัดเก็บเข้าระบบฐานข้อมูล โดยในเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายจะประกอบด้วยโปรแกรมต่าง ๆ สำหรับพัฒนาระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์

1.5 งบประมาณที่ใช้ในการดำเนินการ

เงินทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยนวัตกรรมและการสร้างสรรค์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จำนวนเงินทั้งสิ้น 30,000 บาท

1.6 สถานที่ดำเนินการ

ห้องปฏิบัติการระบบฝังตัวทางกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เพื่อพัฒนาระบบแสดงผลความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ หรือก๊าซเป้าหมาย ที่มีความต่อเนื่องและปลอดภัย

1.7.2 เพื่อพัฒนาระบบแสดงผลความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ หรือก๊าซเป้าหมายที่สามารถแสดงผลได้โดยใช้โปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ (Web browser) เนื่องจากโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์มีอยู่ในทุกอุปกรณ์แบบพกพา เช่นโทรศัพท์มือถือ หรือเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Note book)

1.7.3 เพื่อพัฒนาระบบที่สามารถดูค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพได้แบบเรียลไทม์ หรือแบบเลือกช่วงเวลา เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคาดคะเนการเกิดก๊าซชีวภาพที่ต้องการได้

1.7.4 เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับการผลิตเครื่องมือเพื่อการวัด หรือแสดงผล และนำมาสร้างเป็นเครื่องมือสำหรับให้ผู้ที่ทำงานในจุดที่เสี่ยงต่อก๊าซชีวภาพ

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้เป็นการบรรยายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์ (Hardware) หลักการทำงานของอุปกรณ์ต่อพ่วง โปรแกรมประยุกต์ต่าง ๆ รวมถึงการศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีในการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์บนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) เพื่อพัฒนาระบบสำหรับตรวจวัดก๊าซชีวภาพให้แสดงผลในรูปแบบของ User interface บนโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ (Web browser) โดยได้มีการแบ่งหัวข้อการบรรยายทฤษฎีดังนี้

- 2.1 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)
- 2.2 เครื่องมือตรวจวัดก๊าซชีวภาพ (Biogas instrument)
- 2.3 ระบบแสดงผล (Monitoring system)
- 2.4 อินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT)
- 2.5 โครงข่ายส่วนตัวเสมือน (Virtual private network: VPN)
- 2.6 ซอฟต์แวร์ประยุกต์สำหรับระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพ (Application software for biogas sensing system)
- 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature reviews)

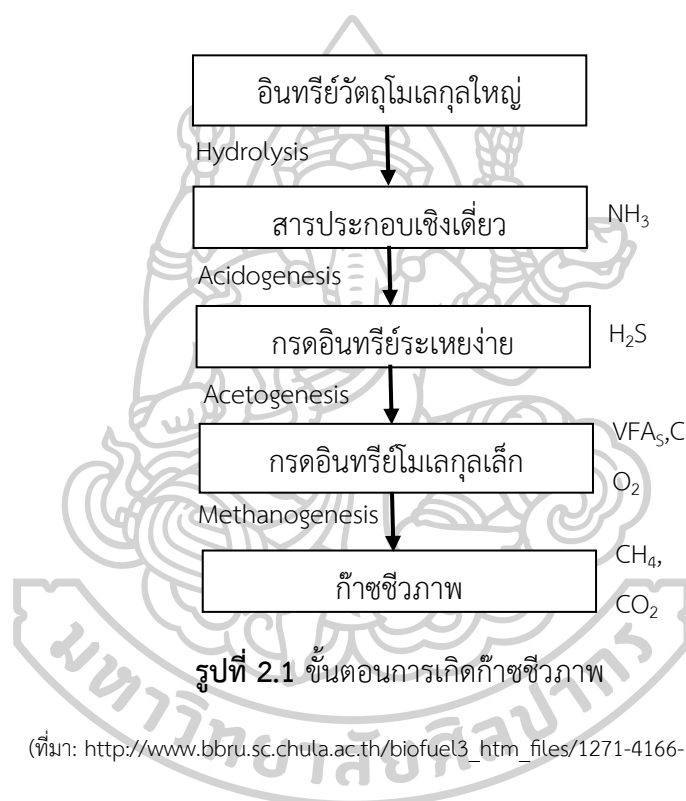
โดยในรายละเอียดแต่ละหัวข้อ ทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ทั้งในส่วนของโปรแกรมภาษา และโปรแกรมสำหรับควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด รวมถึงข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้ค้นคว้าจากแหล่งข้อมูลหลากหลาย โดยสามารถอธิบายรายละเอียดในแต่ละหัวข้อได้ดังนี้

2.1 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ก๊าซชีวภาพเกิดจากการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุจำพวกมูลสัตว์ ปุ๋ยคอก โคลนน้ำเสีย ขยะจากการทำอาหาร กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Anaerobic) ในลักษณะนี้จะทำให้เกิดก๊าซชีวภาพขึ้น โดยปกติก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมักประกอบด้วย มีเทน (CH_4) ในอัตราส่วนประมาณ 50 – 70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอัตราส่วนประมาณ 30 – 50% และในส่วนที่เหลือประกอบด้วยไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไอน้ำตามลำดับ

กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพเริ่มจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโมเลกุลใหญ่ให้เล็กลงจนเป็นกรดที่มีโมเลกุลขนาดเล็กที่สามารถระเหยได้ เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid, CH_3COOH) โดยในการย่อยสลายจนถึงขั้นเป็นกรดอะซิติก สามารถแบ่งออกได้ 2 กระบวนการด้วยกัน คือ กระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้นภายนอกเซลล์ (Extracellular digestion) และกระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ (Intracellular digestion) โดยกระบวนการย่อยสลายภายนอกเซลล์นี้เรียกว่า กระบวนการไฮโดรลิซิส (Hydrolysis) เป็นกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ชนิดหนึ่งที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีภายใต้สภาวะไร้อากาศ ซึ่งจุลินทรีย์นี้จะทำหน้าที่ย่อยอินทรีย์วัตถุโมเลกุลใหญ่ด้วยเอนไซม์ที่จุลินทรีย์ปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme) ให้เป็นสารประกอบเชิงเดี่ยวหรือน้ำตาลเชิงเดี่ยว (Monomer) สำหรับการสร้างกรดอะซิติก โดยความเร็วในกระบวนการย่อยดังกล่าว ขึ้นอยู่กับเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจากจุลินทรีย์ มีทั้งเอนไซม์ที่ย่อยโปรตีน เอนไซม์ที่ย่อยไขมัน เอนไซม์ที่ย่อยคาร์โบไฮเดรต และเอนไซม์ที่ย่อยเส้นใยจากพืช ทั้งนี้เอนไซม์แต่ละชนิดจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสารอินทรีย์ด้วยจุลินทรีย์ชนิดนั้น ๆ ซึ่งสามารถแบ่งจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ย่อยสารอินทรีย์ที่ต่างกัน คือ จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายโปรตีน (Proteolytic bacteria), จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายไขมัน (Lipolytic bacteria), และจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายเซลลูโลส (Cellulolytic bacteria) ทั้งนี้ความเร็วในกระบวนการย่อยสารอินทรีย์นี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นทั้งในส่วนของสารอินทรีย์และความเข้มข้นของเอนไซม์รวมถึงอุณหภูมิบริเวณโดยรอบ กระบวนการต่อมาคือกระบวนการย่อยภายในเซลล์ (Intracellular digestion) ที่ประกอบด้วยขั้นตอนการสร้างกรดระเหยง่าย (Acidogenesis) เป็นการนำสารประกอบเชิงเดี่ยวที่ได้จากการย่อยของจุลินทรีย์ในขั้นตอนแรกมาเป็นสารตั้งต้น ต่อจากนั้นจุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างกรดจะทำหน้าที่เปลี่ยนสารประกอบเชิงเดี่ยวให้เป็กรดอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ได้แก่ กรดคาร์บอน แอลกอฮอล์ คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย และไฮโดรเจน ในขั้นตอนต่อมาจะเป็นการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ขนาดใหญ่ให้เป็กรดอินทรีย์ขนาดเล็ก (Acetogenesis) ได้แก่ กรดอะซิติก (Acetic acid), กรดแลคติก (Lactic acid), กรดโพรพิโอนิก (Propionic acid), และกรดวาเลอริก (Valeric acid) ซึ่งในกระบวนการดังกล่าว ยังทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นมาด้วย และจุลินทรีย์กลุ่มนี้เติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมปิดที่ไร้ออกซิเจน อย่างไรก็ตาม หากมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เป็นจำนวนมากเกินจะส่งผลทำให้การหมักดังกล่าวมีกรดมากเกินไปด้วย ทำให้สภาวะในบ่อหมักมีค่าพีเอช (pH) ที่ไม่สมดุล ซึ่งจะส่งผลทำให้จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่สร้างก๊าซมีเทนถูกยับยั้งไม่สามารถสร้างก๊าซมีเทนได้ และในกระบวนการสุดท้ายคือ กระบวนการในการเกิดก๊าซมีเทน (Methanogenesis), กรดอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็ก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน (Methanogenic bacteria หรือ Methanogens) จุลินทรีย์ชนิดนี้จะอ่อนไหวกับการเปลี่ยนแปลงกะทันหันทั้งทางกายภาพและทางเคมีซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดก๊าซมีเทน

โดยตรง แต่จุลินทรีย์ชนิดนี้สามารถสร้างก๊าซมีเทนได้นานเป็นเดือนแม้ไม่มีการเติมอาหาร สำหรับจุลินทรีย์ชนิดนี้ การเกิดก๊าซมีเทนในระบบการย่อยสลายที่ไร้อากาศหรือไร้ออกซิเจน จะเกิดได้ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบการเกิดก๊าซมีเทนที่เปลี่ยนกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็กร่วมกับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนในรูปแบบนี้เท่ากับ 70% ของก๊าซมีเทนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ และรูปแบบการเกิดก๊าซมีเทนรูปแบบที่สองจะเกิดจากการ เปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับก๊าซไฮโดรเจนให้เป็นก๊าซมีเทนด้วยจุลินทรีย์ชนิด Hydrogen-utilizing methane bacteria โดยกระบวนการทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 2.1



โดยในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีทั้งก๊าซที่ให้ประโยชน์อย่างเช่น ก๊าซมีเทนที่สามารถนำไปเป็น เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือสร้างพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ รวมถึงก๊าซชีวภาพชนิดอื่น ที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นก็มีโทษเช่นกัน เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่มีผล ต่อทางเดินหายใจของมนุษย์โดยตรง ดังนั้นเครื่องมือตรวจวัดก๊าซชีวภาพจึงเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็น สำหรับความปลอดภัยของอุตสาหกรรมการผลิตก๊าซชีวภาพ

2.2 เครื่องมือตรวจวัดก๊าซชีวภาพ (Biogas instrument)

เครื่องมือตรวจวัดก๊าซชีวภาพในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด และที่ได้รับความนิยมอย่างมาก จะถูกจำแนกได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่

2.2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบพกพา (Handheld)

เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพที่ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างมาก เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพที่มีราคาไม่สูงมากและสะดวกในการใช้งาน ทำให้สามารถตรวจวัดก๊าซได้รวดเร็ว แต่ข้อเสียของอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซแบบพกพา คือ อันตรายที่เกิดจากตัวผู้ใช้งานเนื่องจากขณะทำการตรวจวัดก๊าซชีวภาพเป้าหมาย ซึ่งผู้ใช้งานจำเป็นต้องอยู่ในสถานที่ที่มีก๊าซปะปนอยู่ในอากาศโดยรอบ ในบางครั้งอาจมีก๊าซพิษปะปนอยู่ด้วยเช่นกัน และอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพชนิดนี้สามารถวัดได้แบบครั้งต่อครั้ง (Discrete measurement) ไม่สามารถแสดงผลแบบเรียลไทม์และต่อเนื่องได้ อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบพกพา สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซแบบพกพา (Handheld)

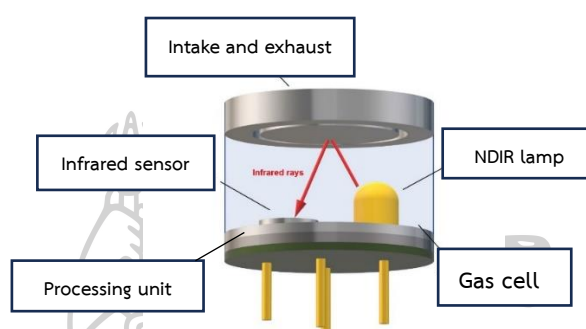
(ที่มา: <https://www.amazon.ca/Portable-Rechargeable-Handheld-Detector-Analyzer>)

อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบพกพามีการวัดก๊าซชีวภาพที่หลากหลายมีการจัดวางหน้าจอแสดงผลและปุ่มกดที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับบริษัทที่ผลิต แต่หลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบพกพา จะประกอบด้วย

- ตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพ (Biogas sensor) ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพแล้วส่งสัญญาณในรูปแบบอนาล็อกหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการตรวจจับก๊าซชีวภาพเป้าหมายได้ โดยในปัจจุบันเครื่องตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบพกพามีการใช้ตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพหลายชนิด และที่นิยมนำมาใช้ในอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพ 2 ชนิด ได้แก่

- ตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพชนิด NDIR (Non-Dispersive Infrared)

โครงสร้างหลักของตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพแบบ NDIR [12, 13] ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรด (NDIR lamp), แผ่นสะท้อนกลับแบบกรงเฉพาะความยาวคลื่นแสง (Intake and exhaust), ตัวตรวจจับแสงอินฟราเรด (Infrared sensor), และหน่วยประมวลผล (Processing unit) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของตัวตรวจจับก๊าซแบบ NDIR

(ที่มา: <https://www.oshinolamps.co.jp>)

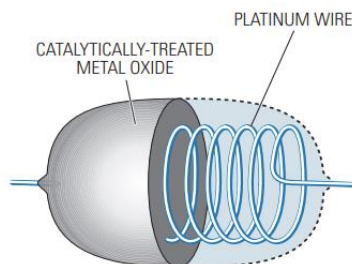
หลักการทำงานของตัวตรวจวัดก๊าซชนิด NDIR คือ แหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรด (Infrared lamp) ทำการปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะที่มีผลกับโมเลกุลของก๊าซชีวภาพ เป้าหมายเท่านั้น โดยแผ่นสะท้อนกลับ (Intake and exhaust) ยอมให้แสงบางความยาวคลื่นสะท้อนกลับ เมื่อแสงสะท้อนกลับมาที่ตัวตรวจจับแสงอินฟราเรด โดยจะทำการแปลงความเข้มแสงเป็นข้อมูลเพื่อส่งให้กับหน่วยประมวลผล (Processing unit) ของตัวตรวจจับเพื่อหาความเข้มข้นก๊าซชีวภาพเป้าหมายที่ทำการตรวจวัดที่มีปริมาณที่เข้มข้น โมเลกุลของก๊าซจะมีปริมาณน้อย ในทางตรงกันข้ามก๊าซชีวภาพเป้าหมายที่ทำการตรวจวัดที่มีปริมาณน้อย โมเลกุลของก๊าซจะทำการดูดซับแสงอินฟราเรดน้อยเช่นกัน ทำให้แสงตกกระทบที่ตัวตรวจจับแสงอินฟราเรดมีปริมาณมาก และเมื่ออัลกอริทึมทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลในหน่วยประมวลผล (Processing unit) จะสามารถระบุได้ว่ามีความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพมากน้อยเพียงใด

ข้อดี ของตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพแบบ NDIR คือ มีความแม่นยำสูงไม่จำเป็นต้องมีก๊าซออกซิเจนร่วมกับก๊าซชีวภาพเป้าหมายสำหรับการวัด และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

ข้อเสีย ของตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพแบบ NDIR คือ เป็นตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพที่มีผลกับความชื้น สามารถใช้ตรวจวัดก๊าซชีวภาพได้บางชนิด

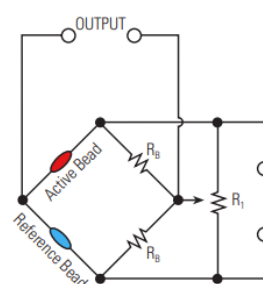
- ตัวตรวจจับก๊าซชนิดการเผาไหม้เร่งปฏิกิริยา (Catalytic combustion sensor)

โครงสร้างของตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพชนิดนี้ประกอบด้วยเม็ดเร่งปฏิกิริยา (Catalytic bead) [14] และวงจร Wheatstone bridge [15] ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเม็ดเร่งปฏิกิริยา

(ที่มา: <https://naichangmashare.com>)



รูปที่ 2.5 ตัวตรวจจับก๊าซชนิดการเผาไหม้เร่งปฏิกิริยาต่อรวมกับวงจร Wheatstone bridge

(ที่มา: <https://naichangmashare.com>)

โดยหลักการทำงานของตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพชนิดนี้เริ่มจากเม็ดเร่งปฏิกิริยา (Catalytic bead) และเม็ดทั้งสองที่อยู่ภายในตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพ และมีโครงสร้างต่างกัน โดยเม็ดเร่งปฏิกิริยาที่ทำหน้าที่เป็นเม็ดตรวจสอบ (Active bead) จะมีโครงสร้างที่ทำจากขดลวดทองคำขาวที่อยู่ภายในชั้นของตัวนำอะลูมิเนียมออกไซด์ (Alumina carrier) ที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของโมเลกุลก๊าซชีวภาพที่มาสัมผัสกับเม็ดตรวจสอบ แล้วทำให้เกิดความร้อน ในขณะที่เม็ดเร่งปฏิกิริยาที่ทำหน้าที่เป็นเม็ดอ้างอิง (Reference bead) ที่มีโครงสร้างทำจากขดลวดทองคำขาวเหมือนกัน แต่ถูกเคลือบด้วยโลหะที่กันความร้อนในชั้นนอกเพื่อป้องกันความร้อน เมื่อก๊าซชีวภาพที่ติดไฟได้ไหลเข้ามาภายในตัวตรวจจับก๊าซจะทำปฏิกิริยากับเม็ดตรวจสอบจนเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ไหลผ่านขดลวดทองคำขาวภายในเม็ดตรวจสอบเปลี่ยนไป และเมื่อเทียบกับเม็ดอ้างอิงจะเกิดความต่างศักย์เกิดขึ้น วงจรวัดสโตน

(Wheatstone) จะทำการชดเชยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เปลี่ยนไป ทำให้ทราบได้ถึงความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพที่ทำการตรวจวัดนั้น ๆ ได้

ข้อดี ของตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพชนิดการเผาเม็ดเร่งปฏิกิริยา คือ ความดัน ความชื้น และอุณหภูมิไม่ส่งผลต่อตัวตรวจจับประเภทนี้ การตอบสนองที่ค่อนข้างไวต่อก๊าซชีวภาพ

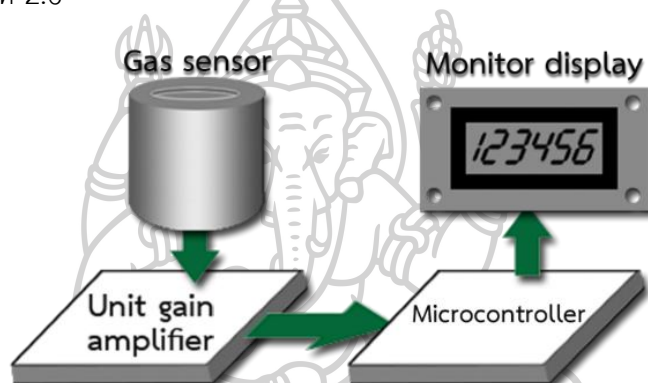
ข้อเสีย ของตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพชนิดการเผาเม็ดเร่งปฏิกิริยา คือ ในการทำงาน ของตัวตรวจจับชนิดนี้จะต้องมีออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้เมื่อเกิดการเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิด ความร้อนจนถึงจุดเผาไหม้ ดังนั้นในการวัดที่พบว่ามีการเผาไหม้ 100% จะทำให้ตัวตรวจจับ ก๊าซชีวภาพแบบนี้ไม่สามารถวัดได้ และสารประกอบบางชนิดส่งผลต่อตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพแบบนี้ มีประสิทธิภาพลดลง รวมถึงเม็ดเร่งปฏิกิริยาที่ทำหน้าที่เป็นเม็ดตรวจสอบ ซึ่งต้องเผาไหม้ทุกครั้งที่ทำ การตรวจสอบ ทำให้ในระยะยาวจะส่งผลต่อการตรวจวัดทำให้คลาดเคลื่อนได้

- วงจรมายาลัญญาน (Unit gain amplifier) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณจาก ตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพชนิดต่าง ๆ โดยตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพบางชนิดส่งค่าที่ได้เพื่อเข้าสู่ การประมวลผลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์มีสัญญาณที่ต่ำ หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วงที่ต่ำมาก อาจต่ำจนอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์ (mV) ส่งผลทำให้ค่าสัญญาณดิจิตอลที่แปลงจากค่าจากแรงดันไฟฟ้า (Analog to digital convertor: ADC) แปลงค่าได้น้อยด้วยเช่นกัน หากหน่วยประมวลผลของ คอนโทรลเลอร์บอร์ด มีจำนวนบิตของฟังก์ชันแปลงค่าสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลน้อย ตัวอย่างเช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดมี 10 บิต ช่วงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0 – 3.3 V จะสามารถ แปลงค่าโดยใช้ฟังก์ชันแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล (Analog to digital convertor: ADC) ที่มีค่าระหว่าง 0 – 1,024 หากตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพส่งสัญญาณหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ ต่ำมากในช่วงใดช่วงหนึ่ง ซึ่งอาจทำให้ฟังก์ชันการแปลงค่าจากสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณ ดิจิตอลที่แปลงค่าได้ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำสุด จนถึงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุด มีค่าความต่างไม่เกิน 10 ของค่าดิจิตอล ส่งผลทำให้การแสดงผลค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ มีความคลาดเคลื่อนสูงและความแม่นยำต่ำ ดังนั้นวงจรมายาลัญญานจากตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพ จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้แรงดันไฟฟ้านี้อยู่ในช่วง 0 – 3.3 V เพื่อทำให้ค่าสัญญาณดิจิตอลที่แปลงจากค่าจากสัญญาณอนาล็อก แสดงค่าได้เต็มตามจำนวนบิต เพื่อความแม่นยำและถูกต้อง

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ทำหน้าที่ประมวลผล โดยการแปลง สัญญาณหรือค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ได้ทำการเพิ่มหรือขยายสัญญาณให้อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้า สำหรับป้อนเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดจากวงจรมายาลัญญาน (Unit gain amplifier)

และฟังก์ชันแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to digital: ADC) ที่เป็นฟังก์ชันภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการแปลงสัญญาณอนาล็อก หรือแรงดันไฟที่รับเข้ามาไปเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นใช้อัลกอริทึมที่ถูกสร้างขึ้นมาทำการแปลงค่าดิจิทัลที่ได้เป็นค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพเป้าหมาย ก่อนแสดงค่าที่ได้ออกทางหน่วยแสดงผลหรือจอภาพต่อไป

- หน้าจอแสดงผล (Monitor display) เป็นส่วนประกอบสุดท้ายของอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบพกพา โดยหน้าจอแสดงผลจะทำหน้าที่รับค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพเป้าหมายจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อแสดงให้ผู้ใช้งานเห็นถึงค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพนั้นตามความต้องการ โดยส่วนประกอบหลักของตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบพกพาทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงดังรูปที่ 2.6



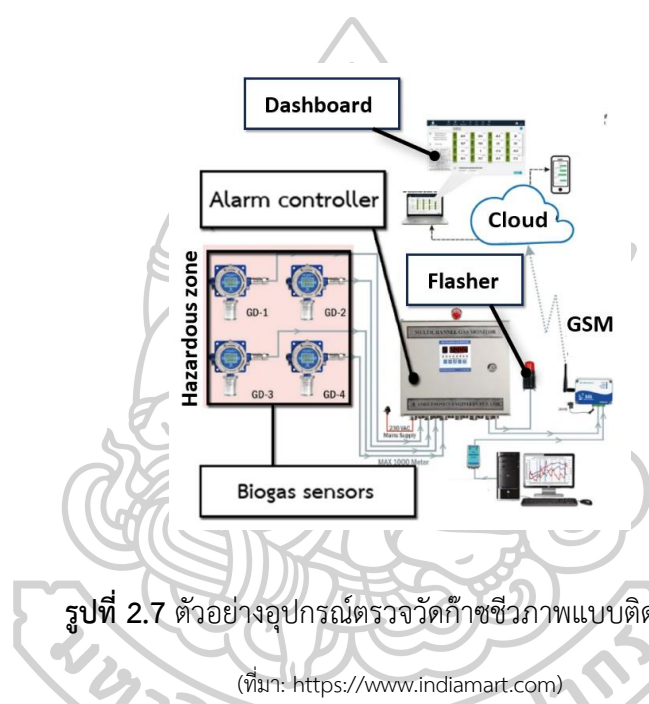
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเครื่องมือวัดก๊าซแบบพกพา

2.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งคงที่

เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพที่นิยมติดตั้งในสถานที่ปิดอย่างเช่นโรงงาน หรือสถานที่จำหน่ายก๊าซอันตรายบางประเภทเพื่อตรวจจับก๊าซชีวภาพที่ติดไฟหรือก๊าซอันตรายชนิดต่าง ๆ ส่วนใหญ่มักติดตั้งกับท่อส่งก๊าซภายในโรงงานเพื่อตรวจจับก๊าซที่รั่วออกมาจากท่อส่ง โดยอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งคงที่ที่จะประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุม (Alarm controller) ที่ต่อร่วมกับตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งคงที่ อุปกรณ์ควบคุม 1 ตัว สามารถใช้ร่วมกับตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งคงที่ได้หลายตัว และตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพแบบคงที่ก็สามารถติดตั้งแบบไม่มีอุปกรณ์ควบคุมได้ เนื่องจากตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพแบบนี้มีทั้งหน้าจอแสดงผลและการแจ้งเตือนในรูปแบบเสียงและไฟกระพริบ

หลักการทำงานอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งชนิดคงที่ เริ่มจากตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพซึ่งส่วนใหญ่ตัวตรวจจับแบบนี้มักนิยมใช้ตัวตรวจจับก๊าซชนิดการเผาเม็ดเร่งปฏิกิริยา

(Catalytic combustion sensor) เนื่องจากผู้ใช้งานส่วนใหญ่มักนำไปติดตั้งเพื่อตรวจจับก๊าซติดไฟที่รั่วไหลตามท่อส่งก๊าซ จากนั้นทำการเชื่อมต่อตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพชนิดนี้ทั้งหมดเข้ามาที่อุปกรณ์ควบคุม เพื่อมอนิเตอร์ตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพที่ติดตั้งแบบคงที่ทุกตัว และตัวควบคุมยังสามารถต่อร่วมกับอุปกรณ์การแจ้งเตือนในรูปแบบต่าง ๆ ได้ รวมถึงการส่งข้อมูลทั้งระบบเข้าไปยังคอมพิวเตอร์แม่ข่ายเสมือน (Cloud server) ผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต สำหรับการแสดงผลในรูปแบบการนำเสนอข้อมูลทั้งหมดภายในหน้าจอเดียว (Dashboard) ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งคงที่ สามารถแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งคงที่

(ที่มา: <https://www.indiamart.com>)

ข้อดี ของอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งคงที่ คือ ความรวดเร็วในการตรวจหาก๊าซที่รั่วไหลเนื่องจากติดตั้งอยู่ใกล้กับจุดที่เสี่ยงต่อการรั่วไหลของท่อส่งก๊าซ เนื่องจากใช้ตัวตรวจจับชนิดการเผาไหม้เร่งปฏิกิริยา และสามารถต่อร่วมกับอุปกรณ์ควบคุมเพื่อมอนิเตอร์ระบบทั้งหมดพร้อมทั้งสามารถต่อร่วมกับอุปกรณ์การแจ้งเตือนต่าง ๆ รวมถึงสามารถส่งข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์แม่ข่ายเสมือน (Cloud server) เพื่อแสดงข้อมูลในรูปแบบการนำเสนอข้อมูลทั้งหมดภายในหน้าจอเดียว (Dashboard) ได้ด้วย

ข้อเสีย ของอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งคงที่ คือ ไม่สามารถตรวจวัดก๊าซเฉพาะได้ เนื่องจากสามารถตรวจวัดก๊าซไวไฟได้เพียงอย่างเดียว และหากต้องติดตั้งทั้งระบบจะมีราคาสูงมากเนื่องจากต้องมีค่าสายสัญญาณในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการดูแลระบบที่สูงเช่นกัน

2.3 ระบบแสดงผล (Monitoring system)

ในการตรวจวัดก๊าซชีวภาพจากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2 หากพิจารณาความปลอดภัยในการใช้งานแล้ว อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซแบบติดตั้งคงที่จะเป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัดก๊าซที่ปลอดภัยมากกว่าตัวอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบพกพา เนื่องจากผู้ใช้งานระบบไม่จำเป็นต้องอยู่ในจุดที่ทำการตรวจวัด หรือจุดที่มีก๊าซรั่วไหล และสามารถทราบผลในการตรวจวัดได้ทันทีจากระบบแสดงผล (Monitor) โดยระบบแสดงผลยังสามารถแยกได้เป็นสองลักษณะดังนี้

2.3.1 ระบบแสดงผลแบบปิด (Offline monitoring)

เป็นการมอนิเตอร์ระบบการตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบปิดหรือโครงข่ายส่วนตัว โดยไม่มีการส่งข้อมูลข้ามโครงข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อจัดเก็บข้อมูลหรือแสดงผลในรูปแบบต่าง ๆ การส่งข้อมูลเกิดขึ้นภายในระบบตรวจวัดก๊าซเท่านั้น เช่นการส่งข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซแบบติดตั้งคงที่ไปยังอุปกรณ์ควบคุมโดยสายสื่อสารสัญญาณเชื่อมต่อเข้าหากัน หรือการมอนิเตอร์ทางหน้าจอแสดงผล อาจมีการต่อโดยใช้โครงข่ายเฉพาะภายใน หรือ Local area network: LAN ภายใน ผ่านสายคู่ตีเกลียวที่ไม่มีฉนวนป้องกันสัญญาณรบกวน (Unshielded twisted pairs: UTP) ซึ่งการมอนิเตอร์ลักษณะนี้จะเป็นการดึงข้อมูลจากเครื่องควบคุมระบบโดยตรงแบบไม่ผ่านโครงข่ายอื่น หรือโครงข่ายสาธารณะแบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ต รวมถึงการส่งข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์แม่ข่ายเสมือนเพื่อจัดเก็บข้อมูล

ข้อดี ของระบบแสดงผลแบบปิด คือ ข้อมูลที่ส่งผ่านในการจัดเก็บหรือแสดงผลจะมีความปลอดภัย และรวดเร็วเนื่องจากการส่งข้อมูล หรือการแสดงผลที่ไม่ข้ามโครงข่าย หรือไม่มีการแสดงผลผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ทำให้การแสดงผลช้ากว่าความเป็นจริง

ข้อเสีย ของระบบระบบแสดงผลแบบปิด คือ ไม่สามารถแสดงข้อมูลที่ต้องการจากโครงข่ายอื่น ๆ ได้ หรือไม่สามารถแสดงได้จากอินเทอร์เน็ต ทำให้ผู้ใช้งานหรือผู้ที่ต้องการข้อมูลต้องอยู่ในสถานที่ติดตั้งระบบนี้เท่านั้น และไม่มีการสำรองข้อมูลของระบบไว้ในที่อื่น ๆ เพื่อความปลอดภัยและมั่นคงของระบบ

2.3.2 ระบบแสดงผลแบบออนไลน์ (Online monitoring)

เป็นการแสดงผลระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตในรูปแบบของที่อยู่ไอพี (Internet protocol: IP) [16] และในการแสดงผลค่าความเข้มข้นของก๊าซผ่านจอแสดงผลในรูปแบบออนไลน์สามารถดึงข้อมูลได้หลายลักษณะ ทั้งการดึงข้อมูลจากอุปกรณ์ควบคุมโดยตรงผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต และการดึงข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server) ที่รับข้อมูลจากระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพ โดยในเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายจะประกอบด้วยโปรแกรมต่าง ๆ ทั้งโปรแกรมที่ทำหน้าที่เป็นระบบฐานข้อมูล โปรแกรมสำหรับแสดงผลผ่านโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์

(Web browser) และโปรแกรมภาษาสำหรับสร้างอัลกอริทึมแสดงความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ ในปัจจุบันมีการใช้คอมพิวเตอร์แม่ข่ายเสมือน (Cloud server) เป็นระบบจัดการในการแสดงผล โดยมีการรับข้อมูลจากอุปกรณ์ควบคุมของระบบตรวจจับก๊าซชีวภาพ ซึ่งการให้บริการรูปแบบคอมพิวเตอร์เสมือน จะมีโปรแกรมที่เหมาะสมกับงานที่ต้องการให้เลือกใช้งานมากมาย ทั้งโปรแกรมสำหรับจัดการฐานข้อมูล และโปรแกรมสำหรับการแสดงผลระบบต่าง ๆ

ข้อดี ของระบบแสดงผลแบบออนไลน์ คือ สามารถตรวจสอบสถานะระบบได้จาก เครื่องข่ายอินเทอร์เน็ต นั้นหมายถึงสามารถตรวจสอบจากที่ใด ๆ ได้ตลอดเวลาและระบบสามารถ แจ้งเตือนสถานะแบบเรียลไทม์ได้ ทำให้ผู้ควบคุมและผู้จัดการระบบสามารถตัดสินใจกระทำการ ได้ทันที

ข้อเสีย ของระบบแสดงผลแบบออนไลน์ คือ เครื่องข่ายอินเทอร์เน็ตเป็นเครื่องข่าย สาธารณะมีการเข้าถึงข้อมูลได้หลายรูปแบบ อาจส่งผลทำให้มีการโจมตีในลักษณะต่าง ๆ จากโลก ไชเบอร์ และการตรวจสอบระบบในรูปแบบการแสดงผลแบบออนไลน์ผ่านเครื่องข่ายอินเทอร์เน็ตจะไม่สามารถเลือกเส้นทางที่สั้นและรวดเร็วได้ เนื่องจากเส้นทางที่ข้อมูลส่งผ่านขึ้นอยู่กับผู้ให้บริการ เครื่องข่ายอินเทอร์เน็ตรายนั้น ๆ

2.4 อินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT)

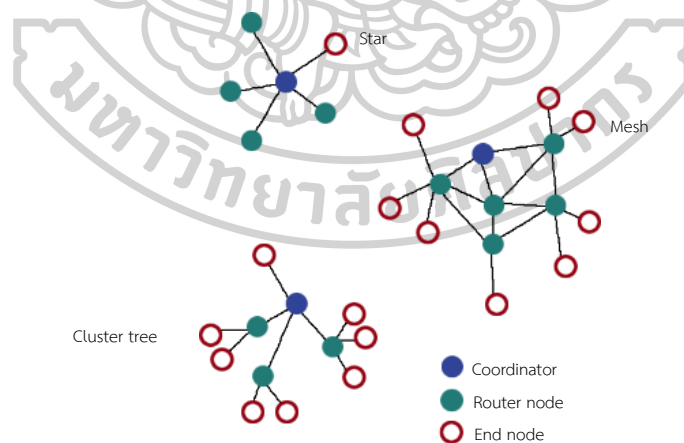
เป็นรูปแบบการรับและส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายได้ใน ลักษณะแบบเครื่องสู่เครื่อง (Machine to Machine: M2M) [9] จะอยู่ภายใต้เครื่องข่ายเดียวกัน หรือต่างเครื่องข่ายก็ได้ สามารถเชื่อมต่อในลักษณะหนึ่งต่อหนึ่ง หนึ่งต่อหลายอุปกรณ์ หรือหลาย อุปกรณ์ต่อกับหลายอุปกรณ์ก็ได้เช่นกัน ขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ ประเภทของงาน ความปลอดภัยของข้อมูลที่ทำกรรับและส่งระหว่างอุปกรณ์นั้น ๆ และอุปกรณ์ในการรับและส่ง จำเป็นต้องอยู่ภายใต้เทคโนโลยีหรือโพรโตคอลเดียวกัน จึงจะสามารถรับและส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ ทั้งสองได้ ซึ่งเทคโนโลยีที่นิยมใช้ในการรับและส่งข้อมูลนั้นมีหลายรูปแบบด้วยกันดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.4.1 เทคโนโลยี Zigbee [17] เป็นมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่มีการทำงานโดยใช้คลื่นวิทยุ สาธารณะความถี่ต่ำ 2.4 GHz และมีอัตราการส่งถ่ายข้อมูลอยู่ที่ 250 Kbit/s Zigbee ทำงานบน ความถี่ที่ได้รับอนุญาตจากองค์กรที่ควบคุมคลื่นความถี่คลื่นวิทยุของแต่ละประเทศซึ่งในแต่ละประเทศ อาจใช้งานความถี่ต่างกัน บางประเทศใช้งานบนคลื่นความถี่ 784 MHz, 868 MHz และบางประเทศ ใช้งานความถี่ 915 MHz ซึ่งข้อดีของการใช้คลื่นความถี่ต่ำจะทำให้สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ในระยะไกล เกินกว่า 700 เมตร และมีการใช้พลังงานค่อนข้างต่ำ ทำให้การใช้งานต่อเนื่องของอุปกรณ์ปลายทาง

มีระยะเวลาที่ยาวนาน กว่าที่จะเปลี่ยนแบตเตอรี่หนึ่งครั้ง โดยโครงข่ายของเทคโนโลยีแบบ Zigbee จะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ต่างกันอยู่ 3 รูปแบบคือ

- อุปกรณ์เชื่อมต่อ (Coordinator device) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลเกี่ยวกับโครงข่ายและกำหนดเส้นทางในการส่งข้อมูล ระหว่างโหนด โดย Zigbee หนึ่งโครงข่ายจะมีอุปกรณ์เชื่อมต่อเพียงหนึ่งตัวเท่านั้น
- อุปกรณ์จัดการเส้นทาง (Router device) ทำหน้าที่เป็นโหนดกลางที่รับและส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์เชื่อมต่อและโหนดปลาย (End node) เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานตลอดเวลา ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างโหนดตลอดเวลา
- อุปกรณ์ปลายทาง (End device) เป็นอุปกรณ์ปลายสุดของระบบส่วนมากจะเป็นอุปกรณ์ที่เป็นตัวตรวจวัดต่าง ๆ หรือตัวตรวจจับ (Sensor) บางชนิด ซึ่งทำหน้าที่ส่งข้อมูลกลับมายังโหนดกลาง หรืออุปกรณ์เชื่อมต่อโดยตรง ซึ่งอุปกรณ์ปลายทางจะอยู่ในสภาวะการเตรียมพร้อม (Sleep mode) และจะทำงานทันทีที่มีข้อมูลหรือสัญญาณส่งมา

การใช้งานเทคโนโลยี Zigbee จะนิยมใช้กับงานที่มีการส่งข้อมูลจากโหนดปลายไม่บ่อยนัก และไม่เหมาะกับการส่งข้อมูลแบบต่อเนื่องหรือการสตรีมข้อมูล แต่โครงข่ายอุปกรณ์ของระบบ Zigbee ก็สามารถมีอุปกรณ์รวมกันในหนึ่งโครงข่ายได้สูงถึง 256 อุปกรณ์ และเทคนิคการต่อระหว่างอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.8



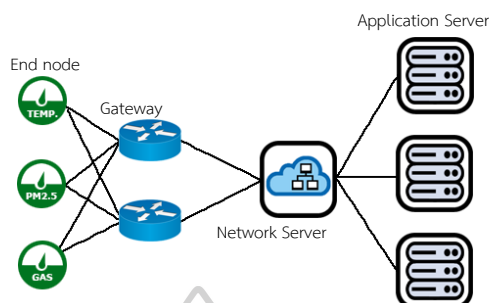
รูปที่ 2.8 รูปแบบการเชื่อมต่อโครงข่าย Zigbee

(ที่มา: <https://iiot.riverplus.com/zigbee-technology/>)

2.4.2 เทคโนโลยี LoRaWAN [18] ย่อมาจากคำว่า Long Range Wide Area Network เป็น การเชื่อมต่อระหว่างตัวอุปกรณ์ที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายได้ในระยะที่ไกลกว่าเทคโนโลยี Zigbee โดยใช้เทคโนโลยีของคลื่นวิทยุความถี่ต่ำที่ได้รับการอนุญาตจากองค์กรที่ควบคุมคลื่นความถี่ ของรัฐบาล หากเปรียบเทียบเทคโนโลยีของ Zigbee เป็นคลื่นความถี่วิทยุแบบ FM เทคโนโลยีการรับ-ส่ง ข้อมูลแบบ LoRaWAN ก็เปรียบได้กับคลื่นวิทยุแบบ AM ที่ เป็นความถี่ที่ต่ำกว่า FM การใช้คลื่น ความถี่ต่ำในการรับและส่งข้อมูลจะทำให้ระยะในการรับและส่งข้อมูลนั้นไปได้ไกลมาก สามารถรับ และส่งข้อมูลได้มากกว่า 15 กิโลเมตร การใช้คลื่นความถี่ต่ำในการรับและส่งข้อมูลทำให้ข้อจำกัดของ ระบบ LoRaWAN ส่งข้อมูลได้ค่อนข้างจำกัด ทำให้ระบบ LoRaWAN เหมาะกับการรับและส่งข้อมูล ที่มีข้อมูลขนาดเล็ก และอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูลของระบบ LoRaWAN ยังใช้พลังงานที่ต่ำ มากจนมีระยะเวลาในการทำงานแบตเตอรี่มากกว่าสิบปี ในระบบโครงข่ายของ LoRaWAN จะประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่

- โหนดปลายทาง (End node) เป็นอุปกรณ์หลักในส่วนของอุปกรณ์ปลายทางจะเป็น อุปกรณ์ในการตรวจวัดต่าง ๆ เช่น ตัวตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature sensor), ตัวตรวจจับก๊าซ (Gas sensor), และเครื่องวัดความดันบรรยากาศ (Barometer) เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ในส่วนของ โหนดปลายทางจะส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับตัวเชื่อมโครงข่าย (Concentrator/Gateway) เท่านั้น แต่อุปกรณ์ที่เป็นโหนดปลายทางจะสามารถเชื่อมต่อกับตัวเชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายได้หลายอุปกรณ์
- ตัวเชื่อมโครงข่าย (Concentrator/Gateway) เป็นส่วนที่เชื่อมเส้นทาง ระหว่างอุปกรณ์ปลายและเซิร์ฟเวอร์โครงข่าย (Network server) ที่มีการเชื่อมต่อกันโดย ใช้โปรโตคอลแบบยูดีพี (User datagram protocol: UDP) ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่เสมือนเป็นการส่ง ข้อมูลอย่างเดียวโดยไม่รู้ว่ปลายทางจะได้รับข้อมูลสำเร็จหรือไม่ ซึ่งหน้าที่หลักของตัวเชื่อมโครงข่าย คือ การตรวจสอบข้อมูล (Authenticates data) จากอุปกรณ์ปลายก่อนส่งข้อมูลผ่านไปยัง ตัวส่งผ่านข้อมูล
- เซิร์ฟเวอร์โครงข่าย (Network server) เป็นตัวเชื่อมระหว่างตัวเชื่อมโครงข่าย กับเซิร์ฟเวอร์โปรแกรมประยุกต์ (Application server) มีหน้าที่ในการกำหนดและออกแบบโครงข่าย ของ LoRaWAN ที่มีทั้งโครงข่ายส่วนตัว (Private network), โครงข่ายสาธารณะส่วนกลาง (Centralized public network) และโครงข่ายสาธารณะที่แยกออกหรือประสานกับโครงข่าย (Distributed/Coordinative public network)
- เซิร์ฟเวอร์โปรแกรมประยุกต์ (Application server) เป็นส่วนท้ายสุดของระบบ LoraWAN มีการส่งและรับข้อมูลจากตัวส่งผ่านข้อมูลโดยใช้โปรโตคอลแบบ TCP/IP มีหน้าที่รับข้อมูล จากปลายทางหรืออุปกรณ์ปลายจากจุดต่าง ๆ มาเพื่อประมวลผลและแสดงในรูปแบบต่าง ๆ และใน

บางครั้งเซิร์ฟเวอร์โปรแกรมประยุกต์ และตัวส่งผ่านข้อมูลสามารถติดตั้งในคอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการเพียงเครื่องเดียวได้ โดยองค์ประกอบหลักของระบบ LoRaWAN แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบต่าง ๆ ในระบบโครงข่าย LoRaWAN

(ที่มา: <https://medium.com/deaware/lora-lorawan>)

ในระบบการส่งและรับข้อมูลแบบ LoRaWAN เป็นการเชื่อมต่อด้วยคลื่นวิทยุในระยะที่ไกลที่สุดจากอุปกรณ์ปลายทางถึงตัวเชื่อมโครงข่ายแต่ด้วยระยะทางที่ไกลที่มีผลกับความกว้างของช่องสัญญาณ (Bandwidth) นั่นคือ ระยะทางยิ่งไกลความกว้างของช่องสัญญาณจะยิ่งลดลง แต่ในระยะไกลสุดที่อุปกรณ์ปลายทางสามารถส่งข้อมูลได้ ต้องมีข้อมูลดังต่อไปนี้

- ที่อยู่ไอพีบนโครงข่ายของอุปกรณ์ (Device IP address) มีขนาดอยู่ที่ 32 บิต และต้องเป็นที่อยู่ไอพี (IP Address) ที่ไม่ซ้ำกันภายในวงแลนกลุ่มเดียวกัน และที่อยู่ไอพีของอุปกรณ์จะอยู่ในแพคเกจหรือชุดข้อมูล ซึ่งทุกอุปกรณ์ที่รับชุดข้อมูลมา จะเห็นที่อยู่ไอพีของอุปกรณ์ที่อยู่ในโครงข่ายทั้งหมด ทั้งตัวเชื่อมระหว่างโครงข่ายของตัวส่งผ่านข้อมูล (Network server) หรือเซิร์ฟเวอร์โปรแกรมประยุกต์ (Application server)
- รหัสเข้าโครงข่าย (Network session key) เป็นรหัสในการเข้ากลุ่มตัวส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายโดยรหัสดังกล่าวนี้ สามารถระบุได้ว่าชุดข้อมูลที่ส่งมานั้น สามารถส่งข้อมูลผ่านกลุ่มใด ซึ่งเป็นข้อมูลดังกล่าวนี้ใช้เฉพาะอุปกรณ์ปลายทาง และตัวส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายเท่านั้น
- รหัสเข้าระบบโปรแกรมประยุกต์ (Application session key) เป็นการเข้ารหัสเฉพาะระหว่างอุปกรณ์ปลายทางและเซิร์ฟเวอร์โปรแกรมประยุกต์ (Application server) เท่านั้น ซึ่งเป็นชุดข้อมูลเดียวกับที่เซิร์ฟเวอร์โปรแกรมประยุกต์รับมาจากตัวส่งผ่านข้อมูล
- ข้อมูล (Data) เป็นข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ปลายทางที่เป็นตัวตรวจจับ (Sensor) หรือตัวตรวจวัดค่าต่าง ๆ ซึ่งในข้อมูลส่วนนี้จะเป็ข้อมูลที่น้อยมาก อาจเป็นสถานการณ์เปิดหรือปิด (On/Off) หรือค่าตัวเลขเพียงไม่กี่ตัว เมื่อรวมกับข้อมูลข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว ทั้งที่อยู่บนโครงข่าย

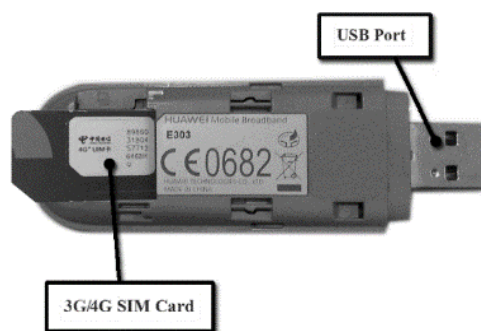
ของตัวส่งผ่านข้อมูลและเซิร์ฟเวอร์ข้อมูลแล้ว ยังเป็นแพคเกจหรือชุดข้อมูลที่ยังสามารถส่งผ่านไปในระบบ LoRaWAN ในส่วนปลายทาง ระหว่างอุปกรณ์กับตัวเชื่อมระหว่างโครงข่าย

2.4.3 เทคโนโลยี Cellular เป็นระบบการรับและส่งข้อมูล ที่ทำให้อุปกรณ์ที่รองรับระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ต หรืออุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้ด้วยโปรโตคอลแบบควบคุมการส่งข้อมูล/ที่อยู่ไอพี (Transmission control protocol / Internet protocol: TCP/IP) เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด กล้องวงจรปิด อุปกรณ์ราวเตอร์ หรือตัวตรวจวัดต่าง ๆ สามารถเชื่อมต่อกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตได้ โดยระบบจะรับและส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่มีลักษณะการเชื่อมต่อโครงข่ายเสาโทรศัพท์แบบรังผึ้ง (Cellular) โดยใช้ความถี่สำหรับโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่มีหน่วยงานต้องกำกับดูแลการใช้คลื่นวิทยุให้ถูกต้อง เช่น

- คลื่นความถี่ 900 MHz = Truemove
- คลื่นความถี่ 1800 MHz = AIS, Truemove H
- คลื่นความถี่ 2100 MHz = Dtac, Truemove, AIS , NT AIS
- คลื่นความถี่ 2300 MHz = TOT, Dtac

ในปัจจุบันผู้ให้บริการโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่างพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมต่อและการรับ-ส่งข้อมูล รวมถึงประสิทธิภาพการใช้งานโครงข่ายอินเทอร์เน็ตให้มีความรวดเร็วและเชื่อถือได้เพิ่มขึ้นมาก อีกทั้งมีระยะทำการ (Coverage area) ที่ครอบคลุมเกือบทุกพื้นที่และในสภาวะการณปัจจุบันที่มีผู้ให้บริการด้านการรับ-ส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่มีจำนวนมาก จึงทำให้การให้ค่าใช้บริการด้านการรับ-ส่งข้อมูลมีราคาที่ถูกกลงมากเช่นกัน ซึ่งการใช้เทคนิคการรับ-ส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่จะทำให้ระยะในการรับ-ส่งข้อมูล หรือการโต้ตอบระหว่างอุปกรณ์ในการรับหรือส่งข้อมูลนั้นทำได้ทุกที่ ที่สามารถเชื่อมต่อกับเสาโทรศัพท์ (Cellular base) ของค่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ และมีความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูล รวมถึงความกว้างของช่องสัญญาณ (Bandwidth) และขนาดของข้อมูล (Data package) ที่มากกว่าเทคโนโลยี Zigbee และ LoRaWAN ด้วย ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการรับ-ส่งข้อมูลที่ได้อาจกล่าวมาข้างต้นนั้นจะขึ้นอยู่กับพื้นที่การให้บริการของโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้น ๆ โดยอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อเชื่อมต่อกับเสาโทรศัพท์จะใช้ 3G/4G Dongle เป็นอุปกรณ์สำหรับใส่ SIM Card ที่สามารถใช้งานโครงข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านเสาโทรศัพท์มือถือ โดยมีพอร์ต USB สำหรับต่อเข้าอุปกรณ์ที่ต้องการใช้งานผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server) หรือคอมพิวเตอร์ส่วนตัว (Personal computer) หรือคอมพิวเตอร์พกพา (Laptop) รวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สามารถใช้งานผ่านโปรโตคอลแบบควบคุมการส่งข้อมูล (TCP/IP) ได้ ซึ่งความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูล

และความกว้างของช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับข้อตกลงของบริษัทผู้ให้บริการ และความสามารถของอุปกรณ์ 3G/4G Dongle รวมถึงความเข้มของสัญญาณที่อุปกรณ์เชื่อมต่อเครือข่ายโทรศัพท์แบบพกพา (Dongle) ได้รับจากเสาโทรศัพท์มือถือ โดยตัวอย่างของอุปกรณ์ 3G/4G Dongle สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



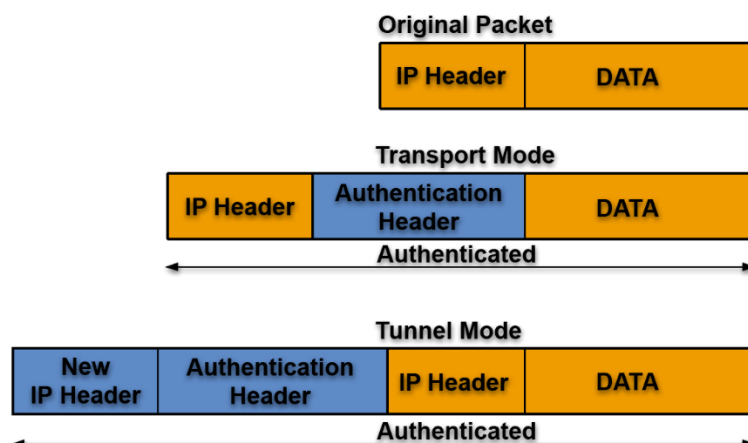
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างอุปกรณ์ 4G Dongle

2.5 โครงข่ายส่วนตัวเสมือน (Virtual private network: VPN)

เป็นเทคนิคการทำให้ผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตสองจุดที่อยู่ต่างโครงข่าย หรือไม่ได้อยู่ภายใต้โครงข่ายระยะใกล้ (LAN) เดียวกัน ให้สามารถเชื่อมต่อกันได้เสมือนอยู่ในโครงข่ายระยะใกล้เดียวกัน (Local area network) เพื่อความสะดวกในการจัดการระบบโครงข่ายและเพื่อความปลอดภัยในการรับและส่งข้อมูล เทคนิคการทำโครงข่ายส่วนตัวเสมือนหรือ (Virtual private network: VPN) [8] ที่มีคุณสมบัติด้านความปลอดภัย จึงมักนิยมนำมาใช้กับระบบโครงข่ายขององค์กรที่มีความเสี่ยงในการทำงานผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ตัวอย่างเช่น ระบบงานของสำนักงานตำรวจ ระบบงานของธนาคาร ระบบงานของโรงพยาบาล เป็นต้น ซึ่งระบบงานขององค์กรที่ได้กล่าวมาแล้วส่วนใหญ่จะมีการใช้งานทั้ง โครงข่ายอินเทอร์เน็ต และโครงข่ายอินทราเน็ตหรือโครงข่ายภายในขององค์กร ซึ่งการทำงานต่าง ๆ ที่อยู่บนโครงข่ายอินทราเน็ตผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตย่อมมีความเสี่ยงต่อภัยที่เกิดจากไซเบอร์ ทั้ง Hacker, Robot, DDoS (Distributed Denial of Service) และภัยคุกคาม (Intrusion) ในรูปต่าง ๆ เพราะโครงข่ายอินเทอร์เน็ตเป็นโครงข่ายแบบสาธารณะ หรือ Public Network ที่ทุกคนสามารถเข้าถึงได้ ดังนั้นทางที่ดีที่สุดหากต้องทำงานผ่านโครงข่ายส่วนตัว หรืออินทราเน็ต (Intranet) ที่จำเป็นต้องมีความปลอดภัยในการใช้งาน เทคนิคการใช้งานโครงข่ายเสมือน เป็นเทคนิคที่ช่วยให้การเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตจากภายนอกองค์กรให้เข้าใช้อินทราเน็ตขององค์กรเป็นไปด้วยความปลอดภัยเสมือนว่าผู้ใช้งานทำงานจากสำนักงานโดยตรง

โดยปกติในการใช้งานโครงข่ายอินเทอร์เน็ตของผู้ให้บริการ ผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต (Internet service provider: ISP) จะมีการจัดเก็บข้อมูลในการใช้งานต่าง ๆ (Log file) ราวเตอร์เพื่อใช้งานโครงข่ายอินเทอร์เน็ต และเวลาที่หยุดใช้งานโครงข่ายอินเทอร์เน็ตหรือเวลาผู้ใช้ได้ทำการปิดอุปกรณ์ ราวเตอร์ ซึ่งหลังจากทำการเปิดสวิตช์เพื่อใช้งานที่อุปกรณ์ราวเตอร์ ราวเตอร์จะทำการยืนยันตัวตน (Authentication) เข้าที่เซิร์ฟเวอร์ตรวจสอบสิทธิ์ (Radius server) ของผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต ถ้าอุปกรณ์ราวเตอร์ทำการยืนยันตัวตนสำเร็จ ผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตจะทำการส่งที่อยู่พีระดับกว้าง (Wide Area Network Internet Protocol: WAN IP) มาที่ราวเตอร์ และราวเตอร์จะทำการสร้างเส้นทางมาที่ผู้ให้บริการเพื่อใช้งานอินเทอร์เน็ต ในช่วงที่ราวเตอร์สามารถยืนยันตัวตนได้สำเร็จ ผู้ให้บริการจะทำการเก็บข้อมูลการใช้งานไว้ในอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บข้อมูล (Log server) เพื่อใช้เป็นหลักฐานในการใช้งานโครงข่ายอินเทอร์เน็ต รวมถึงปริมาณการใช้งานทั้งการดาวน์โหลดและอัปโหลด ข้อมูล แต่ด้วยเทคนิคการเชื่อมต่อแบบโครงข่ายส่วนตัวเสมือนจะทำให้ผู้ใช้บริการโครงข่ายส่วนตัวเสมือนปลายทาง (VPN Client) ใช้งานผ่านโครงข่ายของอุปกรณ์ที่ให้บริการโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (VPN Server) แทน โดยผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตหรือ ISP จะไม่สามารถเก็บพฤติกรรมการใช้งานของผู้ใช้งานโครงข่ายส่วนตัวเสมือนได้ เนื่องจากโครงข่ายส่วนตัวเสมือนได้ใช้รูปแบบความปลอดภัยบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ต (Internet Protocol Security: IPSec) [19] เป็นตัวจัดการแพคเกจข้อมูล ให้มีความปลอดภัยจนถึงการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ที่ให้บริการโครงข่ายส่วนตัวเสมือน และอุปกรณ์โครงข่ายส่วนตัวเสมือนปลายทาง โดยกระบวนการนี้เรียกว่ารูปแบบอุโมงค์เสมือน ระดับชั้นที่ 2 (Layer Two Tunneling Protocol: L2TP) ซึ่งจะซ่อนพฤติกรรมการใช้งาน และที่อยู่ไอพีบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ต (IP address) จากผู้ให้บริการโครงข่ายอินเทอร์เน็ตได้

การเชื่อมต่อแบบโครงข่ายส่วนตัวเสมือนด้วยรูปแบบความปลอดภัยบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ต (Internet Protocol Security Virtual Private Network: IPSec VPN) โดยการเชื่อมต่อนี้จะมีความปลอดภัยสูง ด้วยการเข้ารหัสเพื่อยืนยันตัวตน (Authentication) และความถูกต้องของข้อมูล โดยมีการเข้ารหัส 2 แบบ คือ การเข้ารหัสเฉพาะส่วนของข้อมูลที่ยกเว้นส่วนหัวของข้อมูล (Header) เรียกว่ารูปแบบการขนถ่ายข้อมูล (Transport mode) และการเข้ารหัสทั้งส่วนของข้อมูลและส่วนหัวของข้อมูล เรียกว่ารูปแบบอุโมงค์เสมือน (Tunnel mode) จะทำให้ข้อมูลมีความปลอดภัยมากขึ้น ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แพคเกจข้อมูลที่เปลี่ยนไปในรูปแบบของ IPsec

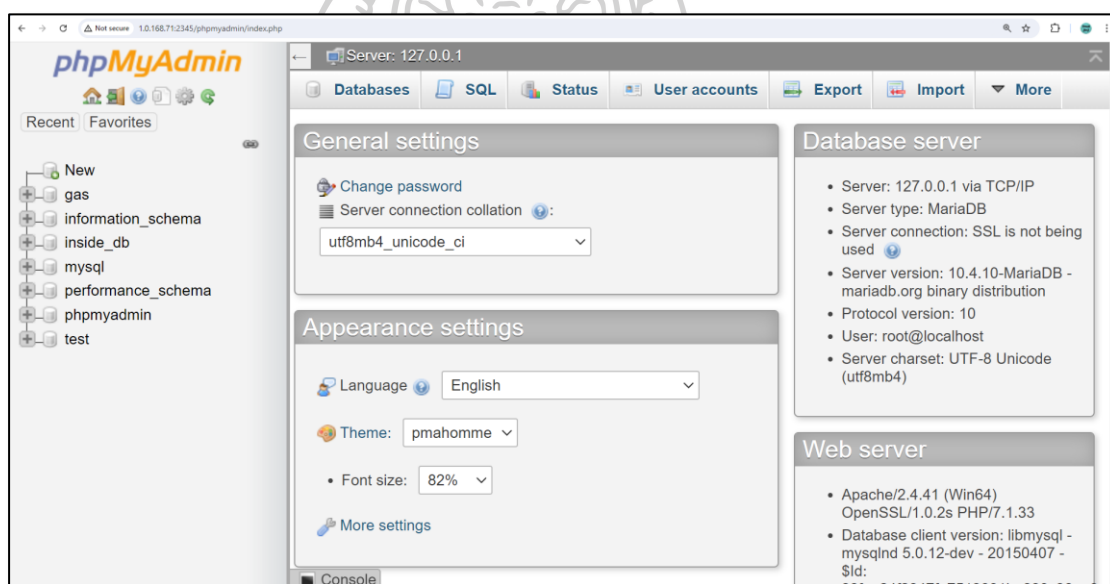
IPsec เป็นวิธีการสร้างเส้นทางในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์สื่อสารที่ต้องการรับและส่งข้อมูลที่เรียกว่าอุโมงค์เสมือน (Tunnel) ซึ่งมีการกำหนดรูปแบบการส่งข้อมูล หรือการจราจรทางด้านโครงข่าย (Network Traffic) และค่าต่าง ๆ เพื่อป้องกันชุดข้อมูลที่แปลกปลอมเข้ามาในอุโมงค์เสมือน โดยอุโมงค์เสมือนนี้จะสร้างข้อตกลงร่วมในความปลอดภัย (Security association: Sas) เพื่อกำหนดโปรโตคอลและอัลกอริทึมสำหรับใช้กับการจราจรทางด้านโครงข่ายโดยรูปแบบของข้อตกลงร่วมในความปลอดภัยจะขึ้นอยู่กับการใช้งานว่าจะใช้สำหรับสร้างความปลอดภัยในส่วนต้นของชุดข้อมูล (Authentication Header: AH) หรือสร้างความปลอดภัยในส่วนต้นและส่วนปลายของชุดข้อมูล (Encapsulation Security Payload: ESP)

การกำหนดการจราจรของข้อมูลในอุโมงค์เสมือนจะมีการสร้างแผนที่คริปโต (Crypto map) ที่เก็บข้อมูลเส้นทาง การเข้าถึงอุปกรณ์ปลายทาง เพื่อนำไปใช้ในการส่งข้อมูลที่ต้องการ เมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ได้รับอนุญาต และนำไปใช้กับระบบจัดการเส้นทางเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลที่ถูกตั้งค่าจำเป็นต่าง ๆ ด้วยระบบการจัดการรหัสและข้อตกลงร่วมสำหรับความปลอดภัยผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต (Internet security association and key management protocol: Isakmp) และใช้การแลกเปลี่ยนรหัสอินเทอร์เน็ต (Internet Key Exchange: IKE) ในการแลกเปลี่ยนค่าที่จำเป็นที่เพื่อกำหนดข้อตกลงร่วม สำหรับความปลอดภัยผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต หากใช้พารามิเตอร์ที่ได้รับสิทธิ์ในการเข้าถึงข้อมูลและนำไปใช้งานกับระบบจัดการเส้นทางในการส่งข้อมูล ที่ถูกตั้งค่าเพื่อความปลอดภัยแบบกำหนดเองจะต้องทำการติดตั้งค่าสำหรับข้อตกลงร่วม เพื่อความปลอดภัยในการส่งข้อมูลโดยต้องกำหนดค่าด้วยตนเอง และไม่ได้ใช้การแลกเปลี่ยนรหัสอินเทอร์เน็ตในระบบจัดการเส้นทางในการส่งข้อมูล แต่จะมีการกำหนดชุดการแปลง (Transform sets) ไว้ ทั้งนี้ชุดการแปลงนี้จะเป็นกลุ่มรูปแบบของโปรโตคอลที่ใช้งานในการสร้างความปลอดภัยกับอุโมงค์เสมือน (Tunnel) ขึ้นระหว่างอุปกรณ์ในการรับ-ส่งข้อมูล

2.6 โปรแกรมสำหรับพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพ

2.6.1 โปรแกรม phpMyAdmin และ MySQL

โปรแกรม phpMyAdmin เป็นโปรแกรมสำหรับจัดการฐานข้อมูล MySQL ผ่านโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ (Web browser) โดยสามารถสร้างฐานข้อมูล (Database) เพิ่มตารางข้อมูล (Table) ในฐานข้อมูล เพิ่มข้อมูล แก้ไขเปลี่ยนแปลงข้อมูล ลบข้อมูล รวมถึงการหาข้อมูล และการดึงข้อมูลทั้งหมดให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์โปรแกรมต่าง ๆ ที่ต้องการ เช่น ไฟล์ Excel, CSV และ .sql โปรแกรม phpMyAdmin สามารถใช้การสั่งงานในลักษณะการโต้ตอบแบบบรรทัดคำสั่ง (Command line interface: CLI) ได้ และโปรแกรมภาษาพีเอชพี (PHP) และจาวาสคริปต์ JavaScript สามารถใช้ชุดคำสั่ง (Source code) เพื่อการจัดการฐานข้อมูลใน MySQL ได้ โดยโปรแกรม MySQL สามารถแสดงผ่านโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างโปรแกรม phpMyAdmin สำหรับจัดการฐานข้อมูล MySQL

2.6.2 โปรแกรมอาปาเช (Apache) เป็นโปรแกรมผู้ให้บริการเว็บ (Web server) ที่ทำหน้าที่โต้ตอบกับผู้ใช้งานเว็บ (Web client) ผ่านโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์จากอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สามารถติดตั้งโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ได้ ซึ่งโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์จะประมวลผลหน้าแสดงผลต่าง ๆ ของระบบที่พัฒนาขึ้น และเป็นโปรแกรมที่สามารถใช้งานร่วมกันได้หลายภาษา นอกเหนือจากภาษาหลักอย่าง HTML ยังสามารถใช้โปรแกรมภาษา PHP และภาษา JavaScript ได้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M. Köhring *et al.* [20] ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดใหม่เพื่อใช้ในการการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ ทีมวิจัยได้ทำการใช้หลอด LED เป็นตัวสร้างอินฟราเรดสเปกตรัมกลาง เป็นแหล่งกำเนิดแสงราคาถูก การรวมกันของสเปกโตรสโคป (Spectroscope) แบบปรับแสงด้วยควอทซ์พร้อมเส้นทางการดูดกลืนนำไปสู่การตั้งค่าตัวตรวจวัดที่เหมาะสม กับสภาพแวดล้อมการใช้งานที่เข้มข้น ระบบตัวตรวจวัดประกอบด้วยหน่วยอิเล็กทรอนิกส์และตัวตรวจวัดก๊าซสองตัว ถูกออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แบบสแตนด์อโลน และผ่านการทดสอบในโรงงานก๊าซชีวภาพเป็นเวลาหลายสัปดาห์ การวัดที่ขึ้นกับความเข้มข้นของก๊าซแสดงความแม่นยำดีกว่า 1% ในช่วงระหว่างความเข้มข้นก๊าซเป้าหมาย 40% และ 60% สำหรับตัวตรวจวัดทั้งสอง การตรวจวัดที่ขึ้นกับความเข้มข้นของก๊าซที่เป็นส่วนประกอบ ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความไวต่อการลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับส่วนประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ ถ้าเปรียบเทียบโดยตรงกับตัวตรวจวัดที่ใช้ในการดูดซึมทั่วไป

S.D. Hafner *et al.* [21] ได้สร้างแอปพลิเคชันบนเว็บให้การเข้าถึงฟังก์ชันหลัก ซอฟต์แวร์สามารถใช้ในการคำนวณศักยภาพทางชีวเคมีของก๊าซมีเทน (BMP) ได้อย่างแม่นยำจากประเภทการวัดก๊าซชีวภาพหลากหลายประเภท ทีมผู้วิจัยได้จัดการกับโปรแกรมประยุกต์ โดยการแบ่งฟังก์ชันการทำงานออกเป็น 3 ส่วน หรือ 3 Function ด้วยกัน คือ 1) Basic Function จะเป็นฟังก์ชันที่ทำหน้าที่แปลงค่า และคำนวณแบบพื้นฐาน 2) Two data processing Function เป็นฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ประมวลผล และคำนวณ BMP (Biochemical Methane Potential) โดยใช้ข้อมูลจากการวัด และ 3) Methane (CH₄) predicting production Function เป็นฟังก์ชันสำหรับการคาดคะเนที่จะเกิดก๊าซมีเทนว่ามากน้อยเพียงใด นอกจากนี้ศักยภาพของก๊าซมีเทนสามารถทำนายได้จากองค์ประกอบของสารตั้งต้นช่วยในการออกแบบการทดลองและการตีความผลลัพธ์

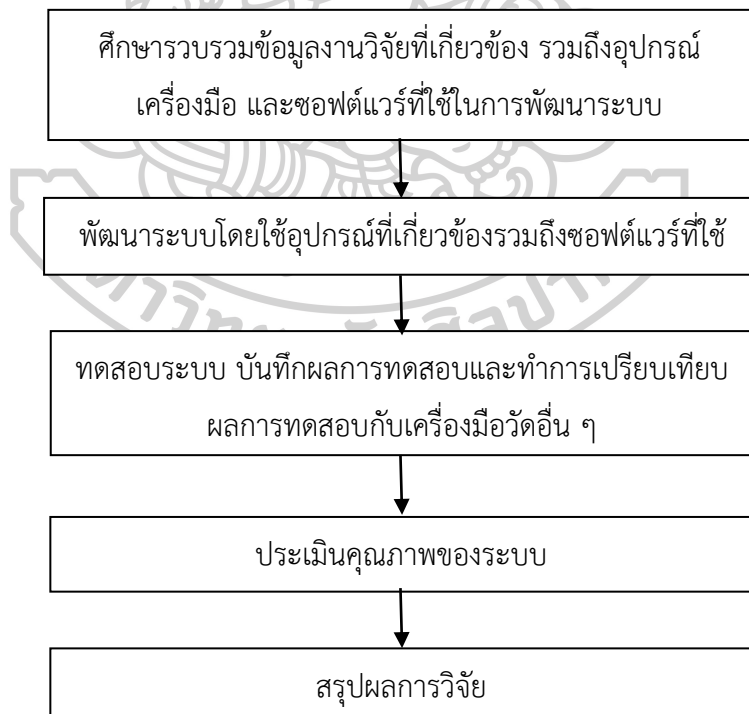
R. Selvaraj *et al.* [22] ได้สร้างระบบตรวจสอบก๊าซมีเทน (CH₄) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในก๊าซชีวภาพจากอาหารสัตว์ต่าง ๆ โดยใช้ Superluminescent diode (SLED) ซึ่ง SLED มีสเปกตรัมบรอดแบนด์ (1,540 nm – 1,640 nm) และเป็นตัวช่วยให้สามารถตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 1,570 nm และ CH₄ ที่ช่วง 1,600 nm พร้อมกัน และทำการทดลองกับก๊าซชีวภาพที่รวบรวมจากชีวมวลต่าง ๆ เช่น เศษอาหาร ขยะ น้ำเสีย และมูลโค ระดับความเข้มข้นของ CO₂ และ CH₄ ถูกตรวจสอบในแต่ละแหล่งที่มาของก๊าซชีวภาพ ระบบตรวจจับแบบอิง Etalon ที่มีการเลือกเส้นทางการดูดซับด้วยสเปกโตรมิเตอร์ความละเอียดต่ำ นอกจากนี้การวัดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น CH₄ และ CO₂ จะขึ้นอยู่กับการป้อนของเสียจากอาหารไปยังระบบ

L. Matindife *et al.* [23] ได้พัฒนาระบบการวัด และการควบคุมเพื่อรวมพลังงานเหล่านี้เข้ากับก๊าซชีวภาพ และระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์แบบผสมซึ่งสามารถบรรลุการใช้พลังงานอย่างปลอดภัยและเหมาะสมที่สุด ในบทความนี้ได้มีการพัฒนาระบบการวัด และการควบคุมตามอัลกอริทึมแบบคลุมเครือ หรือตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) สำหรับก๊าซชีวภาพและระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์แบบผสม วัตถุประสงค์โดยรวมของระบบนี้ คือ การพัฒนาวิธีการในการเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถในการส่งออกของก๊าซชีวภาพผสมและระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์นี้ได้มีการเลือกและใช้อัลกอริทึมตรรกศาสตร์คลุมเครือ สำหรับการวัด และการควบคุมของก๊าซชีวภาพ และพลังงานไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ผสมเนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการผลิตพลังงานที่เกี่ยวข้อง และความสามารถอันชาญฉลาดที่มีประสิทธิภาพ อัลกอริทึมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือได้รับการพัฒนาสำหรับแต่ละหน่วยการวัด และการควบคุม จาก MPLABX ซึ่งเป็น Integrated Development Environment (IDE) การจำลองบางอย่างได้กระทำโดยใช้ซอร์สโค้ดภาษา C และผลการจำลองแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของการใช้อัลกอริทึมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ เพื่อทำนายความล้มเหลวของระบบแก้ไขปัญหาระบบผิดปกติ ระดับกระแสไฟฟ้า

M.Rasapoor *et al.* [24] ได้ใช้คลื่นเสียงจัดการปรับสภาพ และปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยส่งผลกระทบต่ออนุภาคที่ละลายน้ำได้ ในการศึกษานี้ผลของความหนาแน่นพลังงานอัลตราโซนิกสามแบบ (0.2 W / mL, 0.4 W / mL และ 0.6 W / mL) ทั้ง 3 ครั้งชี้ให้เห็นว่าแตกต่างกัน (10 นาที 20 นาทีและ 30 นาที) ต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพของส่วนอินทรีย์ของแหล่งชุมชน การวิเคราะห์ขยะมูลฝอย (OFMSW) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดแตกต่างกันทั้งสาม (6%, 8% และ 10%) ถูกวิเคราะห์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) ทั้งความหนาแน่น Sonication และเวลาของ Sonication ต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพสุดท้าย และผลผลิตก๊าซชีวภาพหลังจากการย่อยอาหาร 72 ชั่วโมงด้วย 6% TS พารามิเตอร์ เช่น อินพุตพลังงานเฉพาะและปริมาณกรดไขมันระเหยรวม (TVFA) ได้รับการประเมิน เพื่อหาวิธีการรักษา Sonication ที่ดีที่สุดสำหรับ OFMSW สำหรับเนื้อหา TS ที่ต่ำกว่า (6% และ 8%) การรักษาด้วย Sonication อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) เพิ่มความเข้มข้นของ TVFA ก่อนการย่อย นอกจากนี้ยังได้รับการพิสูจน์ว่าการป้อนพลังงานเฉพาะระหว่าง 5,000 kJ / kg TS และ 10,000 kJ / kg TS สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเนื้อหา 6% TS และทำให้เกิดผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดหลังจาก 72 ชั่วโมงของการย่อยอาหาร

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ

บทนี้เป็นการอธิบายขั้นตอนการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ต่าง ๆ ทั้งไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด โมดูลสื่อสาร อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด และอ้างอิงค่าต่าง ๆ โดยในส่วนของซอฟต์แวร์จะมีการกล่าวถึงโปรแกรมประยุกต์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการพัฒนาระบบขึ้นมา ทั้งซอฟต์แวร์ในส่วนของอุปกรณ์ที่ทำการตรวจวัดหรือจำลองค่าก๊าซชีวภาพ หรือก๊าซเป้าหมาย และโปรแกรมประยุกต์ในส่วนของเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายที่มีหน้าที่ในการรับค่าจากการส่งผ่านมาจากส่วนของอุปกรณ์ตรวจวัด โปรแกรมประยุกต์สำหรับประมวลผลค่าดิจิทัลที่ได้รับแล้วทำการจัดเก็บเข้าสู่ระบบฐานข้อมูล โปรแกรมภาษาสำหรับสร้างอัลกอริทึมเพื่อการแสดงผลในรูปแบบของกราฟเส้น รวมถึงเทคนิคการสร้างการเชื่อมต่อโครงข่ายเสมือน (Virtual Private Network: VPN) โดยผังขั้นตอนการดำเนินงานสามารถแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์

จากรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์ ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ๆ สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

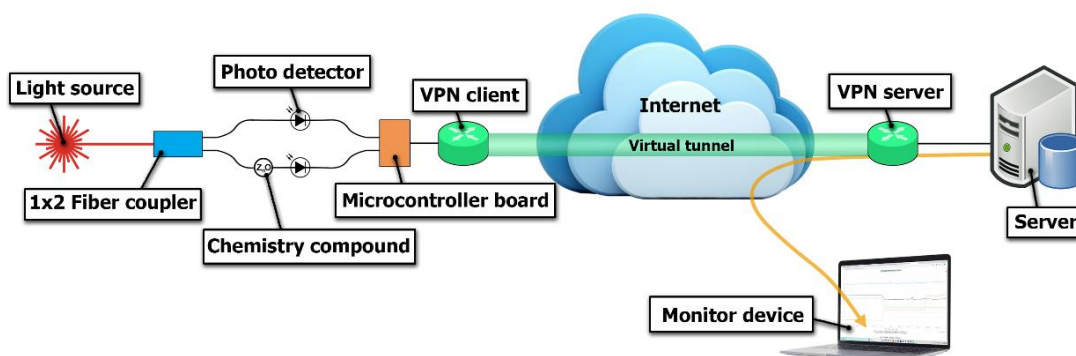
ขั้นตอนที่หนึ่ง เริ่มจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ความเป็นไปได้ในการพัฒนาระบบที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หรือฮาร์ดแวร์ที่จำเป็น เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด อุปกรณ์ในการสื่อสารหรือโมดูลสื่อสาร และคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server) เป็นต้น รวมถึงศึกษาซอฟต์แวร์หรือโปรแกรมประยุกต์ต่าง ๆ เช่น โปรแกรมที่ใช้สำหรับควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด โปรแกรมสำหรับจัดการฐานข้อมูล โปรแกรมภาษาที่ใช้สร้างอัลกอริทึมสำหรับการประมวลผล และทำการแสดงผลที่ได้ในรูปแบบของกราฟหรือแผนภูมิเชิงเส้น ทั้งแบบเรียลไทม์และแบบกำหนดช่วงเวลา นอกจากนี้ยังต้องศึกษาเทคนิคการส่งผ่านข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดกับเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายตามหลักการของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง และยังคงคำนึงถึงความปลอดภัยของข้อมูลที่ทำกรรับ-ส่งอีกด้วย

ขั้นตอนที่สอง จะเป็นการดำเนินการพัฒนาระบบขึ้นมาโดยใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด และอุปกรณ์ที่จำเป็นในการพัฒนาระบบรวมถึงการปรับเปลี่ยนตัวอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการทำงานจริง ทำการติดตั้งคอมพิวเตอร์แม่ข่าย อุปกรณ์ในการสื่อสาร ติดตั้ง และใช้งานโปรแกรมประยุกต์ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในขั้นตอนแรก เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการด้วยโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์

ขั้นตอนที่สาม เป็นขั้นตอนหลังจากพัฒนาระบบที่ประกอบด้วยฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการทดสอบ และบันทึกผลการทดลองเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน (Standard instrument) และค่าที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้น

ขั้นตอนที่สี่ เป็นขั้นตอนในการประเมินคุณภาพของระบบที่สร้างขึ้นโดยการหาค่าต่าง ๆ ด้วยการใช้ค่าที่ได้จากระบบ และนำค่าที่ได้มาทำการประเมินผลด้วยการเข้าสมการเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ระบบประเมินได้กับเครื่องมือวัดมาตรฐาน (Standard instrument)

ขั้นตอนสุดท้าย เป็นการสรุปผลการวิจัยว่าระบบที่สร้างขึ้น มีรูปแบบเป็นไปตามสมมุติฐาน และมีความเที่ยงตรง หรือค่าผิดพลาดมากน้อยเพียงใด และเหมาะสมที่จะเป็นต้นแบบเพื่อพัฒนาเป็นเครื่องมือวัดที่สามารถสร้างในระดับอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต



รูปที่ 3.2 แนวคิดของระบบแสดงผลตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์

จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงผังแนวคิดในการพัฒนาระบบแสดงผลการตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์บนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง ซึ่งการพัฒนาระบบเริ่มจากแหล่งกำเนิดแสงเดี่ยว (Monochromatic light source) ที่มีความยาวคลื่น 1,310 นาโนเมตร ส่งผ่านแสงไปยังอุปกรณ์แยกแสง 1x2 Fiber coupler เพื่อแยกแสงแล้วส่งเข้าสู่ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรคโตมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดก๊าซชีวภาพ ที่มีการพอกสารประกอบเคมีสำหรับตรวจวัดก๊าซชีวภาพแต่ละชนิด โดยมีสายใยแก้วนำแสงเพียง 1 เส้นที่ไม่มีการพอกสารประกอบเคมีเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง (Reference) จากนั้นปลายสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 เส้นจะถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photodetector: PD) เพื่อทำการแปลงความเข้มแสงที่ได้จากปลายสายใยแก้วนำแสงเป็นแรงดันไฟฟ้าก่อนส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดเพื่อทำการส่งค่าที่ได้เข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายที่อยู่ต่างสถานที่กับตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งข้อมูลที่ส่งจากตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพจะถูกส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายโดยผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตที่เป็นโครงข่ายสาธารณะ และมีการสร้างโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (Virtual private network: VPN) บนโครงข่ายอินเทอร์เน็ตเพื่อความปลอดภัยในการรับ-ส่งข้อมูล ในขั้นตอนถัดมาเมื่อเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายได้รับข้อมูลจากตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพต้นทางแล้ว เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายจะทำการจัดเก็บข้อมูลที่ได้รับเข้ามาสู่ระบบฐานข้อมูล เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการแสดงผลให้กับอุปกรณ์สื่อสารที่ต้องการข้อมูลของก๊าซชีวภาพจากระบบโดยอัลกอริทึมที่สร้างขึ้นผ่านทางโปรแกรม Web browser ทั้งการแสดงผลแบบเรียลไทม์ และแบบการแสดงผลแบบกำหนดช่วงเวลา

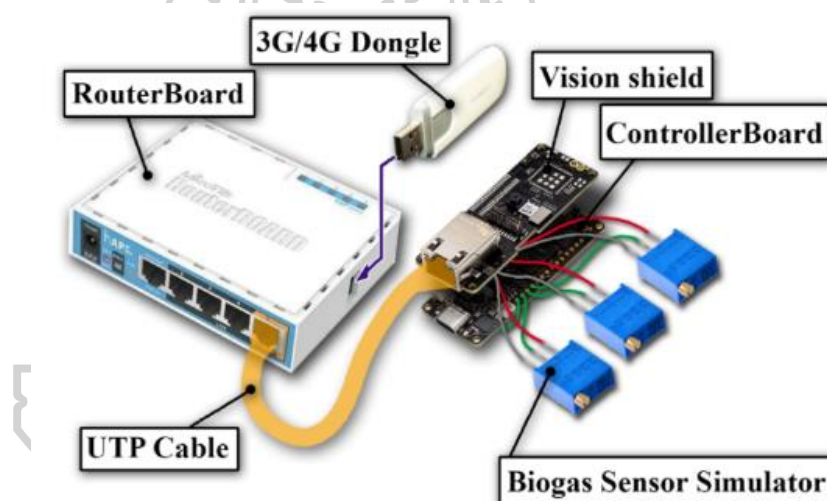
จากแนวคิดที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่

3.1 ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ (Hardware and software)

ในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ประกอบด้วยวิธีการกำหนดคุณสมบัติ (Configuration) ของอุปกรณ์/คอมพิวเตอร์ การใช้งานซอฟต์แวร์ และการสร้างอัลกอริทึมสำหรับการประมวลผล รวมถึงการสร้างหน้าแสดงผล ทั้งนี้สามารถแบ่งการอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ได้ดังนี้

3.1.1 ชุดตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง

ตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางจะประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดที่รับสัญญาณอนาล็อกหรือแรงดันไฟกระแสตรงจากอุปกรณ์ตรวจวัดแสงเข้าที่ขาอินพุตแบบอนาล็อก จากนั้นทำการแปลงแรงดันไฟกระแสตรงหรือสัญญาณอนาล็อกที่ได้รับเข้ามาเป็นค่าดิจิทัลก่อนส่งค่าดิจิทัลที่ได้เข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายโดยการส่งผ่านโมดูลสื่อสาร ดังแสดงในรูปที่ 3.3

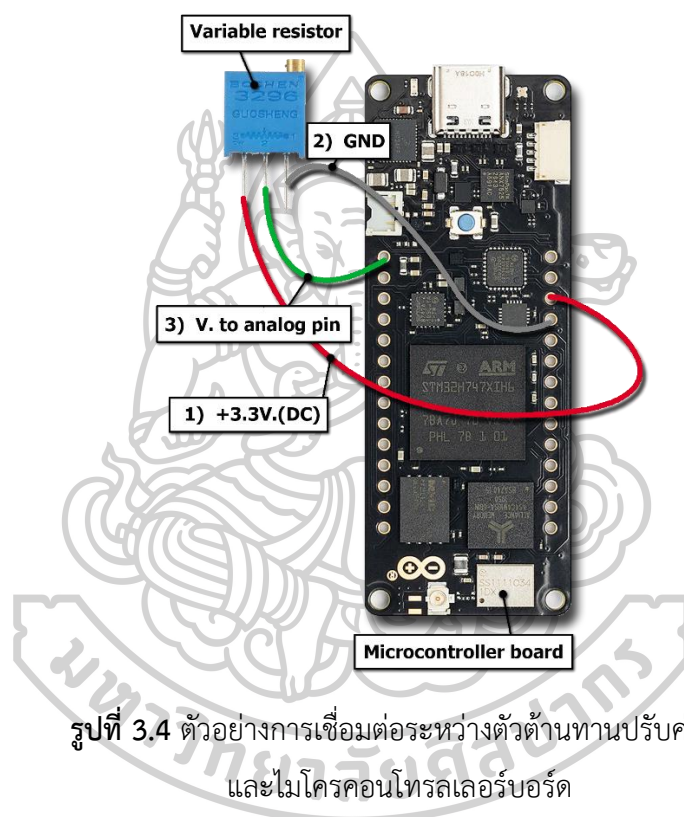


รูปที่ 3.3 ฮาร์ดแวร์ในส่วนของตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง

จากรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและอุปกรณ์ต่อพ่วงในส่วนของการจำลองการเกิดก๊าซชีวภาพ ก่อนจะนำไปเชื่อมต่อเข้ากับตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดก๊าซชีวภาพ

วิทยานิพนธ์นี้ต้องการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง เช่น ค่าความหน่วงแฝงในการส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%Error), ค่าความไว (Sensitivity) โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ตัวด้านทานแบบปรับค่าได้

(Variable resistor) เป็นอุปกรณ์ในการจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ แทนตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง ชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์ สำหรับการตรวจวัดก๊าซชีวภาพ (Biogas sensor simulator) โดยกำหนดให้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ทำหน้าที่ในการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นสัญญาณอินพุตป้อนเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด นอกจากนั้นในรูปที่ 3.3 จะใช้อุปกรณ์ราวเตอร์และ 3G/4G Dongle เป็นโมดูลสื่อสารสำหรับส่งข้อมูลยังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย โดยการต่อตัวต้านทานแบบปรับค่าได้กับไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดแสดงดังรูปที่ 3.4

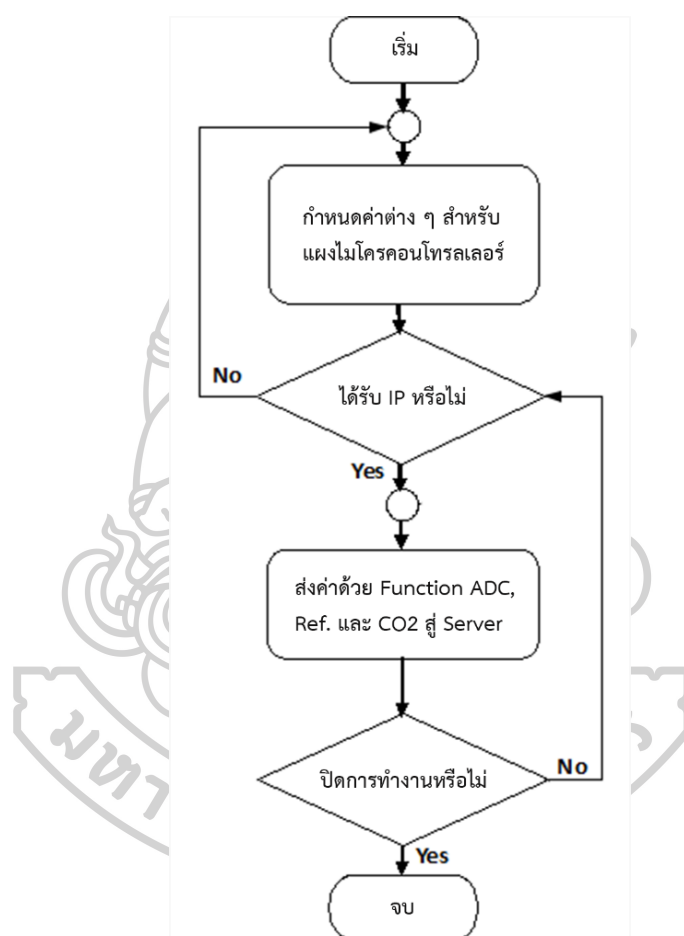


รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการเชื่อมต่อระหว่างตัวต้านทานปรับค่าได้ และไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด

จากรูปที่ 3.4 เป็นกระบวนการเพื่อเชื่อมต่อตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ให้เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด โดยใช้สายไฟจำนวน 3 เส้น ซึ่งสายเส้นที่หนึ่งเป็นการเชื่อมสายไฟจากขาค่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3.3 โวลต์ ของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดหรือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเข้าที่ขารับไฟของตัวต้านทานปรับค่าได้ จากนั้นทำการเชื่อมสายไฟเส้นที่สองระหว่างขากราวด์ (Ground) ของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดและขากราวด์ของตัวต้านทานปรับค่าได้ และสายเส้นสุดท้ายเป็นสายที่ส่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือสัญญาณอนาล็อกที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามการหมุนของแกนปรับค่า จะให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงระหว่าง 0 ถึง 3.3 โวลต์ เป็นการ

จำลองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากอุปกรณ์ตรวจจับแสง ซึ่งทำหน้าที่แปลงความเข้มแสงจากตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดก๊าซชีวภาพ

จากชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดเป็นอุปกรณ์หลักในการแปลงค่าจากสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล จะต้องมีการโปรแกรมการทำงานหรือใส่ชุดคำสั่งให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด เพื่อให้มีการทำงานดังผังงาน (Flowchart) ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ผังงานแสดงการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด

จากรูปที่ 3.5 การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด โดยกำหนดเลขประจำเครื่อง (Mac address), ที่อยู่ไอพีของเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (IP server), ขารับสัญญาณอนาล็อกจากอุปกรณ์ตรวจจับแสง การกำหนดรอบในการวนลูป (Loop) และการรับไอพีประจำเครื่อง (IP Address) จากอุปกรณ์ราวเตอร์ หลังจากนั้นทำการตรวจสอบว่าได้รับไอพีจากอุปกรณ์ราวเตอร์หรือไม่ หากไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดไม่ได้รับไอพีจากอุปกรณ์ราวเตอร์ให้ทำการวนลูป

กลับไปขั้นตอนแรกใหม่ หากคอนโทรลเลอร์บอร์ดได้รับที่อยู่ไอพีจากอุปกรณ์ราวเตอร์สำเร็จ ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดทำการส่งค่าดิจิทัลที่แปลงจากค่าสัญญาณอนาล็อกที่ได้รับจากขารับสัญญาณอนาล็อก เข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายต่อไป และทำการวนซ้ำขั้นตอนสุดท้ายไปจนกว่าผู้ใช้งานจะปิดการทำงาน โดยชุดคำสั่งแสดงดังรูปที่ 3.6

```

1  #include <SPI.h>
2  #include <Ethernet.h>
3  byte My_MAC_address[] = { 0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED }; //Setting MAC Address
4
5  char server[] = "192.168.100.234";
6  //IPAddress ip(192,168,0,100);
7  EthernetClient client;
8
9  /* Setup for Ethernet and RFID */
10
11 void setup() {
12   Serial.begin(9600);
13   Serial.println("Starting...");
14
15   // start the Ethernet connection:
16   while(Ethernet.begin(My_MAC_address) != 1)
17   {
18     Serial.print(".");
19   }
20   Serial.print("My IP :");
21   Serial.println(Ethernet.localIP());
22 }
23 //-----
24
25
26 /* Infinite Loop */
27 void loop(){
28   Sending_To_phpmyadmindatabase();
29
30   delay(1000); // interval
31 }
32
33
34 void Sending_To_phpmyadmindatabase() //CONNECTING WITH MYSQL
35 { int reference = analogRead(A0);
36   int carbon = analogRead(A1);
37   if (client.connect(server, 80)) {
38     Serial.println("connected");
39     // Make a HTTP request:
40     Serial.print("GET /gas.php?reference=");
41     client.print("GET /gas.php?reference="); //YOUR URL
42     Serial.println(reference);
43     client.print(reference);
44     client.print("&carbondioxide=");
45     Serial.println("&carbondioxide=");
46     client.print(carbondioxide);
47     Serial.println(carbondioxide);
48     client.print(" "); //SPACE BEFORE HTTP/1.1
49     client.print("HTTP/1.1");
50     client.println();
51     client.println("Host:192.168.0.253");
52     client.println("Connection: close");
53     client.println();
54   } else {
55     // if you didn't get a connection to the server:
56     Serial.println("connection failed");
57   }
58 }

```

รูปที่ 3.6 ชุดคำสั่งที่ทำการโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด

ในส่วนแรกคำสั่ง #include เป็นการเลือกใช้โมดูลรูปแบบการสื่อสารลักษณะอนุกรมแบบซิงโครนัส และเลือกใช้โมดูล Ethernet.h เพื่อส่งข้อมูลผ่าน Vision shield โดยมีชุดคำสั่งในการสั่งการไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด ดังนี้

```
byte My_MAC_address[ ] = {0XDE, 0XAD, 0XBE, 0XFE, 0XED};
```

เป็นการกำหนดค่า Mac address ให้กับ Ethernet port

```
char server[ ] = "192.168.100.234";
```

เป็นการระบุไอพีคอมพิวเตอร์แม่ข่ายปลายทางที่ต้องการส่งข้อมูลในส่วนถัดมาจะเป็นการประกาศการกำหนดค่าต่าง ๆ ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด

```
Serial.begin(9600);
```

เป็นการกำหนดอัตราการส่งข้อมูล

```
while(Ethernet.begin(My_MAC_address) != 1)
```

เป็นการวนรอบเพื่อรับที่อยู่ไอพี (IP Address) จากระบบการแจกที่อยู่ไอพี (Dynamic host configuration protocol: DHCP) หากพอร์ตอีเทอร์เน็ต (Ethernet) ได้รับไอพีสำเร็จจะมีการบันทึกไอพีที่ได้นั้นเข้าที่ตัวแปรต่อไป

```
void loop(){
```

```
    Sending_to_phpmyadmindatabase( );
```

```
    Delay(1000);
```

```
}
```

จะเป็นคำสั่ง void loop() เป็นการสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดทำงานวนซ้ำหลังจากทำงานตามฟังก์ชัน Sending_to_phpmyadmindatabase() เพื่อทำการส่งข้อมูลที่ได้ออกไป

เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย และจะต้องทำหลังจากจบการทำงานเป็นเวลา 1 วินาที ด้วยฟังก์ชัน
หน่วงเวลา delay(1000)

```
void Sending_To_phpmyadmindatabase( )
```

ฟังก์ชันการทำงานต่าง ๆ เพื่อส่งข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพที่ได้ทำการตรวจวัด
จากชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง ที่อยู่ภายในฟังก์ชัน Sending_to_phpmyadmindatabase()
ประกอบด้วย

analogRead() เป็นการประกาศขาอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด เพื่อ
กำหนดให้เป็นขารับค่าสัญญาณอนาล็อก หรือรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ชุดคำสั่งจะมีการกำหนดใช้
ขา A₀ และ A₁ ในการรับสัญญาณอนาล็อก โดยขา A₀ รับค่าแรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์และขา A₁
จะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ที่มีแรงดันไฟอยู่ระหว่าง 0 – 3.3 โวลต์
และในคำสั่ง int reference = analogRead(A0); และ int carbon = analogRead(A1);
คือ ตัวแปรชนิด Integer ชื่อ reference และ carbon ที่เป็นตัวเก็บค่าดิจิตอลจากการแปลง
ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขาอนาล็อก A₀ และ A₁ ตามลำดับ ในการแปลงค่าอนาล็อกเป็นดิจิตอลด้วยฟังก์ชัน
การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล (ADC) ของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด ซึ่งสามารถ
คำนวณได้จาก (3.1)

$$ADC = \frac{V_{in} \times 2^n}{V_{ref}} \quad (3.1)$$

โดย V_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขา analogRead รับผิดชอบ

V_{ref} คือ แรงดันไฟอ้างอิง

n คือ จำนวนบิตที่ฟังก์ชัน ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์
บอร์ดสามารถแปลงได้

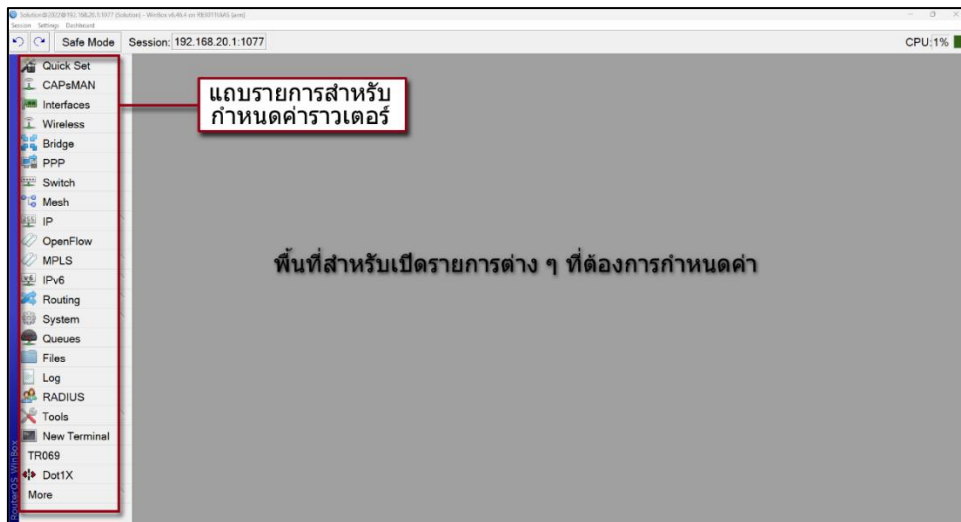
client.connect(server,80) เป็นฟังก์ชันการเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย
ด้วยพอร์ต 80 หรือพอร์ตสำหรับโปรโตคอลหรือข้อตกลงที่ใช้ในการเรียกให้เครื่องแม่ข่ายส่งข้อมูล
มาให้เพื่อแสดงผลบนโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ (Hypertext transfer protocol: HTTP)

`serial.println()` จะเป็นการแสดงข้อความผ่านทางช่องแสดงผล (Serial monitor) ของโปรแกรม Arduino IDE โดย `serial.println("GET /gas.php?reference=")` เป็นการระบุชื่อหน้าประมวลผลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดจะส่งไปยังคอมพิวเตอร์แม่ข่าย พร้อมตัวแปรที่ต้องการส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายต่อท้าย ซึ่งจะมีการรวมข้อความ หรือ string ในฟังก์ชัน `serial.println()` ในบรรทัดต่อ ๆ มา

`client.println("GET /gas.php?reference=")` เป็นการส่งข้อมูลในรูปแบบที่มีการรวมตัวแปรต่าง ๆ สู่หน้าแสดงผล `gas.php` ของเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย ด้วยตัวแปร `reference=(ตัวแปรอ้างอิง (reference) ด้วยฟังก์ชัน client.println(reference))` และจะทำการต่อข้อความ เพื่อเพิ่มตัวแปรด้วยคำสั่ง `client.println()` สุดท้ายจะได้รูปแบบสำหรับการส่งตัวแปรสู่เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายคือ `gas.php?reference=[ค่าดิจิทัลจากฟังก์ชันการแปลงค่าสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลในตัวแปร reference]&carbondioxide=[ค่าดิจิทัลในตัวแปร carbondioxide]` และคอมพิวเตอร์แม่ข่ายปลายทางจะทำการรับค่าด้วยหน้าประมวลผล `gas.php` พร้อมกับค่าตัวแปรทั้งหมดที่ส่งมา เพื่อประมวลผลต่อไป

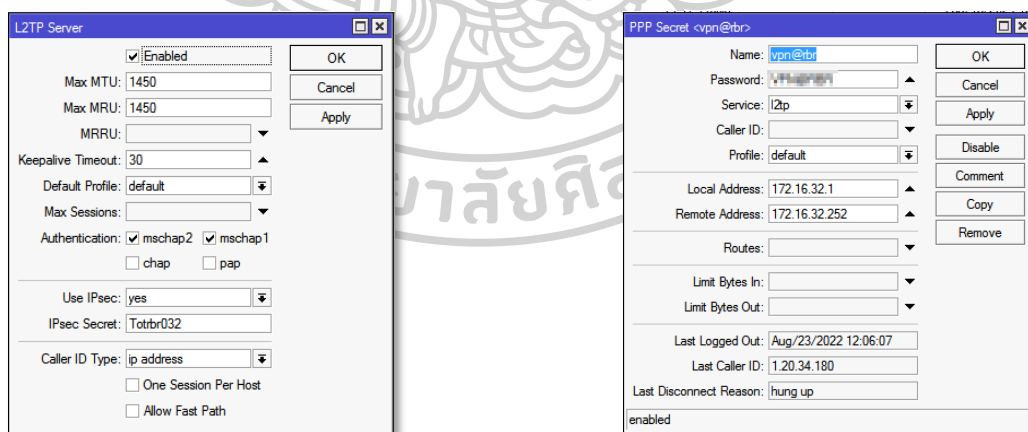
จากนั้นสัญญาณดิจิทัลที่ได้จะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายโดยผ่านทางพอร์ต Ethernet ของ Vision shield ที่ต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด เข้าสู่อุปกรณ์เราเตอร์ที่มีการใช้งานฟังก์ชันโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (Virtual private network: VPN) เพื่อกำหนดให้ช่องทางการเชื่อมโครงข่ายอินเทอร์เน็ต หรือ (Internet gateway) ในส่วนนี้เป็นอุปกรณ์ที่ต้องการเชื่อมโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (VPN client) และมีการกำหนดเส้นทางการส่งข้อมูล (Routing) เพื่อส่งข้อมูลสู่เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายไว้ด้วย ซึ่งตัวอุปกรณ์เราเตอร์ยังมีการต่อเข้ากับ 3G/4G Dongle ที่เป็นอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ทำให้สัญญาณดิจิทัลจากไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดถูกส่งผ่านช่องทางโครงข่ายส่วนตัวเสมือนบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสู่เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายต่อไป

การกำหนดคุณสมบัติ (Configuration) อุปกรณ์เราเตอร์ยี่ห้อ Router board [25] สำหรับสร้างโครงข่ายส่วนตัวเสมือนโดยการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่เราเตอร์ ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการใช้โปรแกรมวินบ็อก (Winbox) โดยสามารถดาวน์โหลดโปรแกรมวินบ็อกเพื่อใช้งานได้จากเว็บไซต์ <http://www.mikrotik.com/download> ซึ่งรูปแบบของโปรแกรมวินบ็อก แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างโปรแกรมวินบ็อกสำหรับกำหนดค่าอุปกรณ์ราวเตอร์

รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างของโปรแกรมวินบ็อก สำหรับกำหนดค่าอุปกรณ์ราวเตอร์ทางซ้ายของโปรแกรมจะเป็นแถบรายการ สำหรับเลือกรายการที่ต้องการกำหนดคุณสมบัติโดยราวเตอร์ในส่วนของเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายสามารถกำหนดคุณสมบัติให้เป็นอุปกรณ์ต้นทางสำหรับสร้างโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (VPN Server) สามารถกำหนดค่าได้ดังรูปที่ 3.8



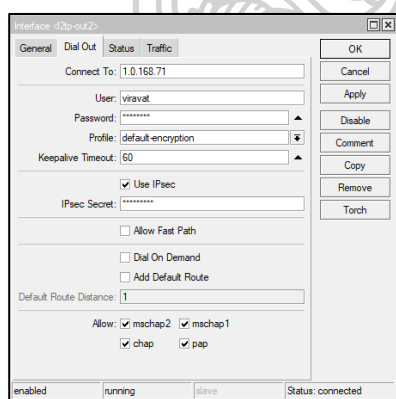
(ก)

(ข)

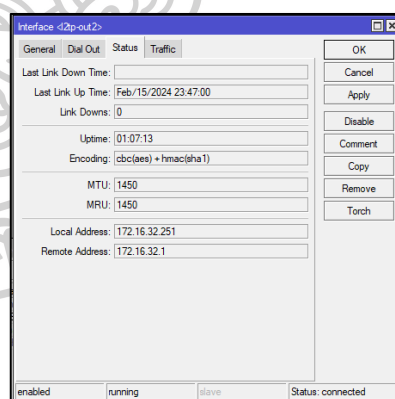
รูปที่ 3.8 การกำหนดคุณสมบัติอุปกรณ์ต้นทางสำหรับสร้างโครงข่ายส่วนตัวเสมือนจากโปรแกรมวินบ็อก; (ก) อุปกรณ์ต้นทางสำหรับสร้างโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (ข) อุปกรณ์ปลายทางสำหรับเชื่อมต่อโครงข่ายส่วนตัวเสมือน

การกำหนดค่าเราเตอร์ให้เป็นอุปกรณ์ต้นทางสำหรับสร้างโครงข่ายส่วนตัวเสมือนที่ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักด้วยกัน คือ การสร้างระบบอุโมงค์เสมือนต้นทางระดับชั้นที่ 2 (Layer 2 tunneling protocol server: L2TP Server) แสดงในรูปที่ 3.8(ก) และการกำหนดค่าชื่อผู้ใช้งาน (Username) และรหัสผ่าน (Password) สำหรับให้เครื่องปลายทางหรืออุปกรณ์ปลายทางที่ต้องการเชื่อมต่อโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (VPN Client) แสดงในรูปที่ 3.8(ข) หากอุปกรณ์เราเตอร์ปลายทางสามารถยืนยันตัวตนที่อุปกรณ์ต้นทางสำหรับสร้างโครงข่ายส่วนตัวเสมือนได้สำเร็จ ระบบจะเกิดอุโมงค์เสมือน (Virtual tunnel) สำหรับส่งและรับข้อมูลได้และเป็นอุโมงค์เสมือนที่มีความปลอดภัย เนื่องจากระบบที่สร้างขึ้นมีการเข้ารหัสความปลอดภัยสำหรับระบบไอพี (Internet protocol security Secret: IPsec Secret) ที่เป็นเสมือนกุญแจที่มีความปลอดภัยในการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต้นทางถึงอุปกรณ์ปลายทาง (Site to Site)

การกำหนดคุณสมบัติของเราเตอร์ในส่วนต้นทางที่รับสัญญาณดิจิทัล (ADC) จากไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด ทำได้โดยเพิ่มการกำหนดค่าให้อุปกรณ์ปลายทางเชื่อมต่อแบบอุโมงค์เสมือนระดับชั้นที่ 2 (L2TP Client) จากแถบรายการในส่วนของการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ (Point-to-Point protocol: PPP) จากนั้นกำหนดค่าตามที่เราเตอร์ฝั่งคอมพิวเตอร์แม่ข่ายได้กำหนดไว้ในข้างต้น ดังรูปที่ 3.8 ทั้งนี้สามารถแสดงการกำหนดค่าในส่วนของ L2TP client ได้ดังรูปที่ 3.9



(ก)



(ข)

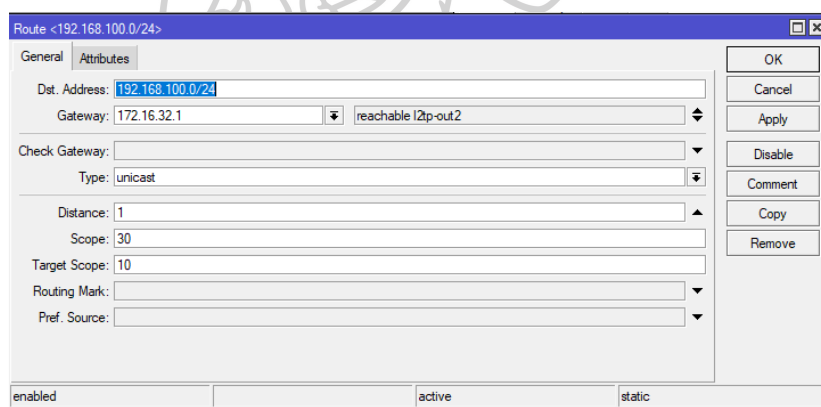
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการกำหนดค่าในส่วนของ L2TP Client; (ก) การกำหนดค่า L2TP ฝั่ง Client (ข)

หน้าแสดงสถานการณ์เชื่อมต่อของ L2TP Client

จากรูปที่ 3.9 เป็นการกำหนดค่าตามอุปกรณ์ต้นทางที่ให้บริการโครงข่ายส่วนตัวเสมือน โดยในช่อง Connect To จะเป็นที่อยู่ไอพีแบบกว้าง (Wide area network internet protocol address: WAN IP Address) ซึ่งเป็นที่อยู่ไอพีของอุปกรณ์ต้นทางที่ให้บริการโครงข่ายส่วนตัวเสมือน

(VPN Server) หรือที่อยู่ไอพีของอุปกรณ์ปลายทางที่ต้องการเชื่อมโยงโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (VPN Client) ต้องทำการยืนยันตัวตนด้วย Username และ Password ที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์ต้นทางที่ให้บริการโครงข่ายส่วนตัวเสมือนและต้องใส่ค่ารหัสความปลอดภัยสำหรับไอพี (IPsec Secret) ที่เป็นเหมือนกุญแจอีกหนึ่งดอกสำหรับการยืนยันตัวตนกับอุปกรณ์ต้นทางที่ให้บริการโครงข่ายส่วนตัวเสมือนเพื่อเพิ่มความปลอดภัยตามรูปที่ 3.9(ก)

หลังจากอุปกรณ์ปลายทางที่ต้องการเชื่อมโยงโครงข่ายส่วนตัวเสมือนทำการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต้นทางที่ให้บริการโครงข่ายส่วนตัวเสมือนสำเร็จ แท็บสถานะ (Status) จะปรากฏคำว่าเชื่อมต่อสำเร็จ (Connected) เพื่อแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ทั้งสองตัวสามารถเชื่อมต่อระบบโครงข่ายส่วนตัวเสมือนได้สำเร็จและจะปรากฏที่อยู่ไอพี (IP Address) ในส่วนของอุปกรณ์ปลายทางที่ต้องการเชื่อมต่อโครงข่ายส่วนตัวเสมือนได้รับในภาพ คือ 172.16.32.251 และที่อยู่ไอพีปลายทางจะเป็นเลข 172.16.32.1 ตามรูปที่ 3.9(ข) แต่ระบบยังไม่สามารถส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ได้ ในขั้นตอนต่อมาต้องทำการกำหนดเส้นทางการส่งข้อมูล (Add route) เพื่อทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดสามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการเพิ่มตารางการจัดเส้นทางสำหรับโครงข่ายส่วนตัวเสมือน

การเพิ่มตารางการกำหนดเส้นทาง (Route table) สามารถกำหนดได้โดยเลือกหัวข้อ IP จากแถบรายการ แล้วกดเลือกที่ Routes จากนั้นทำการกำหนดค่าที่อยู่ไอพีปลายทาง (Dst Address) หรือที่อยู่ไอพีกลุ่มที่คอมพิวเตอร์แม่ข่ายถูกกำหนดไว้ จากรูปที่ 3.10 ทำการกำหนดค่าชุดที่อยู่ไอพีปลายทาง (Dst Address) ปลายทาง คือ 192.168.100.0/24 เป็นการกำหนดขอบเขตของที่อยู่ไอพีตั้งแต่ 192.168.100.1 – 192.168.100.254 จากนั้นกำหนดเส้นทางการเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์ต้นทางที่ให้บริการโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (Gateway) โดยกำหนดจากที่อยู่ไอพีปลายทาง (Remote

Address) ตามภาพที่ 3.9(ข) หากอุปกรณ์ปลายทางที่ต้องการเชื่อมต่อโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (VPN Client) สามารถติดต่อกับเส้นทางเชื่อมต่อโครงข่ายส่วนตัวเสมือนได้สำเร็จ จะปรากฏคำว่า Reachable l2tp-out จากนั้นทำการทดสอบส่ง-รับข้อมูลด้วยการใช้คำสั่ง Ping เข้าที่อยู่ไอพีของเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย ดังรูปที่ 3.11

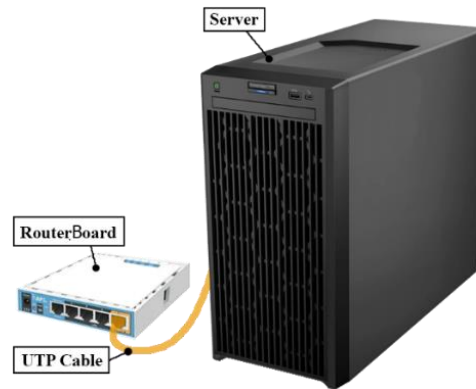
```
Terminal <1>
[tongeshi@Uni Home] > ping 192.168.100.234
  SEQ HOST                                SIZE TTL TIME  STATUS
    0 192.168.100.234                      56 127 2ms
    1 192.168.100.234                      56 127 2ms
    2 192.168.100.234                      56 127 3ms
    3 192.168.100.234                      56 127 2ms
    4 192.168.100.234                      56 127 2ms
    5 192.168.100.234                      56 127 2ms
    6 192.168.100.234                      56 127 3ms
    7 192.168.100.234                      56 127 2ms
    8 192.168.100.234                      56 127 2ms
    9 192.168.100.234                      56 127 2ms
   10 192.168.100.234                      56 127 2ms
   11 192.168.100.234                      56 127 2ms
   12 192.168.100.234                      56 127 2ms
   13 192.168.100.234                      56 127 2ms
   14 192.168.100.234                      56 127 2ms
   15 192.168.100.234                      56 127 2ms
   16 192.168.100.234                      56 127 2ms
   17 192.168.100.234                      56 127 2ms
   18 192.168.100.234                      56 127 3ms
   19 192.168.100.234                      56 127 3ms
sent=20 received=20 packet-loss=0% min-rtt=2ms avg-rtt=2ms max-rtt=3ms
```

รูปที่ 3.11 การทดสอบการส่งข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย

จากรูปที่ 3.11 เป็นการตรวจสอบการเชื่อมต่อโครงข่ายส่วนตัวเสมือน โดยใช้คำสั่ง Ping จะเห็นได้ว่าชุดข้อมูลที่ส่งไปไม่มีการสูญเสีย (Loss) เกิดขึ้นเลย แสดงว่าการเชื่อมต่อระหว่างชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง และชุดเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายสามารถใช้งานผ่านโครงข่ายส่วนตัวเสมือนได้

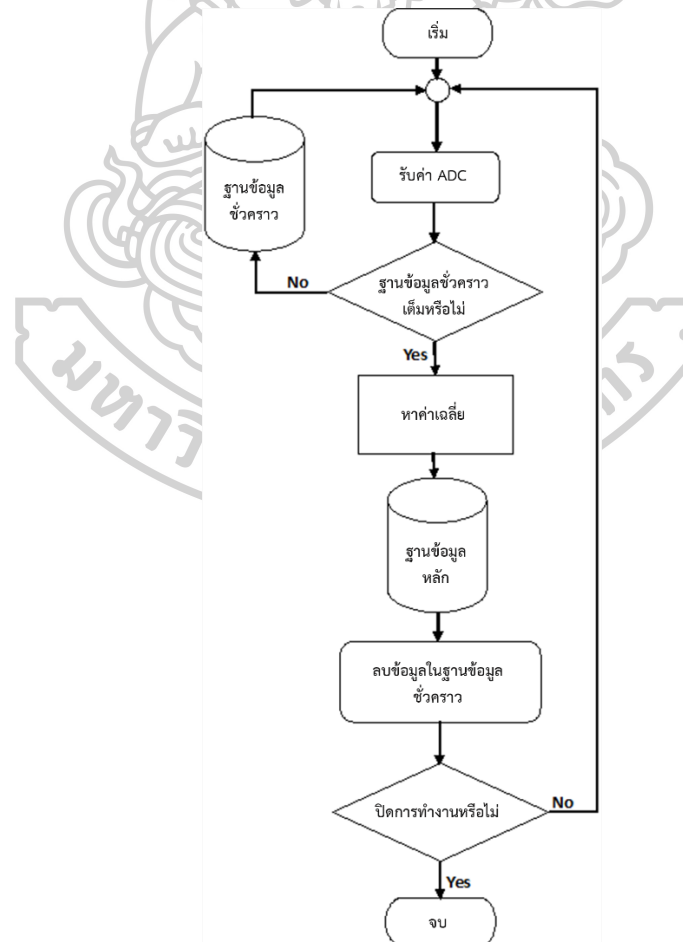
3.1.2 เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server)

เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ที่รองรับค่าดิจิทัลที่ส่งมาจากชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตหลังจากการทำโครงข่ายส่วนตัวเสมือนด้วยอุปกรณ์เราเตอร์ ทั้งนี้ในชุดของเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ส่วนประกอบในชุดเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Database server)

การทำงานของโปรแกรมภายในเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายมีการทำงานที่เชื่อมโยงกัน และมีการทำงานเป็นขั้นตอนดังผังการทำงานของโปรแกรมในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ผังการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย

การทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายเริ่มจากอัลกอริทึมที่รับค่าดิจิทัลหรือข้อมูลจากชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางผ่านทางอุปกรณ์ราวเตอร์ จากนั้นทำการตรวจสอบว่าในฐานข้อมูลชั่วคราวมีข้อมูลเต็มจำนวนที่กำหนดแล้วหรือไม่ หากข้อมูลในฐานข้อมูลชั่วคราวยังไม่เต็มจำนวนที่กำหนด อัลกอริทึมจะทำการบันทึกข้อมูลนั้นเข้าฐานข้อมูลชั่วคราว แล้วทำการกลับไปรอรับข้อมูลจากตัวชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางใหม่จนกระทั่งฐานข้อมูลชั่วคราวมีข้อมูลเต็มตามที่กำหนด จากนั้นอัลกอริทึมจะทำการหาค่าเฉลี่ยจากข้อมูลทั้งหมดแล้วทำการบันทึกลงฐานข้อมูลหลัก เมื่อบันทึกค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมดจากฐานข้อมูลชั่วคราวลงฐานข้อมูลหลักสำเร็จ อัลกอริทึมจะทำการลบข้อมูลในฐานข้อมูลชั่วคราวทั้งหมด เพื่อรอรับข้อมูลใหม่จากชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง โดยอัลกอริทึมจะทำการวนซ้ำจากขั้นตอนแรกแบบต่อเนื่อง จนกว่าผู้ใช้ระบบจะทำการปิดระบบ

วิทยานิพนธ์นี้ได้แยกฐานข้อมูลเป็น 2 ฐานข้อมูล ในฐานข้อมูลแรก คือ gas_temp เป็นฐานข้อมูลชั่วคราวที่จัดเก็บค่าดิจิทัลจากชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลค่าเลขลำดับ (Id), ค่าอ้างอิง (Reference), และค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Concentration of Carbondioxide) ที่ได้ทำการบันทึกจากหน้าประมวลผล gas.php ในทุก ๆ 1 วินาที โดยโครงสร้างของฐานข้อมูลมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.14

Name	Type	Collation	Attributes	Null	Default	Comments	Extra
id	int(7)			No	None		AUTO_INCREMENT
ref	int(5)			No	None		
co2	int(5)			No	None		

รูปที่ 3.14 โครงสร้างฐานข้อมูลชั่วคราว (gas_temp)

จากรูปที่ 3.14 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของฐานข้อมูลชั่วคราว ซึ่งจะประกอบด้วยค่าเลขลำดับ (Id) สำหรับจัดเก็บค่าลำดับเลขประจำข้อมูล (Record) โดยเก็บเป็นชนิดตัวเลข (Integer) ความยาวของข้อมูลในการจัดเก็บได้ไม่เกิน 7 หลัก สามารถเก็บค่าเป็นตัวเลขจำนวนเต็มได้ตั้งแต่ 1 ถึง 9,999,999 และชนิดข้อมูลของค่าอ้างอิง (Ref) และค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นชนิดตัวเลขเช่นกัน และความยาวในการจัดเก็บได้ไม่เกิน 5 หลัก เนื่องจากค่าสัญญาณดิจิทัลจากไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดมีค่าระหว่าง 0 ถึง 65535 ซึ่งเป็นเลขจำนวนเต็มที่ยาวไม่เกิน 5 หลัก และมีค่าไม่เกิน 65535 ฐานข้อมูลที่สองเป็นฐานข้อมูลหลัก คือ gas_db แสดงดังรูปที่ 3.15

Name	Type	Collation	Attributes	Null	Default	Comments	Extra
id	int(7)			No	None		AUTO_INCREMENT
ref	float(5,2)			No	None		
co2	float(5,2)			No	None		
date	timestamp			No	current_timestamp()		

รูปที่ 3.15 โครงสร้างฐานข้อมูลหลัก (gas_db)

ความเกี่ยวเนื่องของฐานข้อมูลชั่วคราว gas_temp และฐานข้อมูลหลัก gas_db เริ่มจากหน้าประมวลผล gas.php ทำการบันทึกค่าสัญญาณดิจิตอลทั้งค่าอ้างอิงและค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในฐานข้อมูลชั่วคราวทุก 1 วินาที จนฐานข้อมูลเต็ม หน้าประมวลผล gas.php จะทำการเฉลี่ยค่าที่ได้บันทึกในฐานข้อมูล ทั้งค่าอ้างอิงและค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นทำการจัดเก็บเข้าฐานข้อมูลหลัก ซึ่งในฐานข้อมูลหลักจะมีโครงสร้างต่างจากฐานข้อมูลชั่วคราว คือ มีการบันทึกค่าดิจิตอลเป็นชนิดตัวเลขทศนิยม (Float) เนื่องจากค่าสัญญาณดิจิตอลจากการหาค่าเฉลี่ยจะมีจุดทศนิยมในโครงสร้างฐานข้อมูล ซึ่งข้อมูลชนิดตัวเลขทศนิยมรูปแบบ Float(5,2) เป็นการเก็บจำนวนเต็มไม่เกิน 5 หลัก และจำนวนตัวเลขหลังทศนิยม 2 หลัก ฐานข้อมูลหลักจะทำการจัดเก็บวันที่ และเวลาในการบันทึกเป็นการบันทึกเวลา (Timestamp) อัตโนมัติที่บันทึกเวลาและวันที่ด้วยรูปแบบ ปี-เดือน-วัน ชม.-นาทื-วินาที (yyyy-mm-dd hh:mm:ss) เพื่อแสดงวันที่และเวลาในการสร้างกราฟแสดงผลแบบเลือกช่วงเวลาหรือวันที่และเวลาที่ต้องการได้ หลังจากการหาค่าเฉลี่ยจากฐานข้อมูล และทำการบันทึกเข้าฐานข้อมูลหลัก โปรแกรมจะทำการลบข้อมูลในฐานข้อมูลชั่วคราว เพื่อรองรับข้อมูลหรือค่าดิจิตอลจากชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพใหม่ โดยชุดคำสั่งของหน้าประมวลผล gas.php สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16

```

1 <?php
2 class gas_intense{
3     public $link="";
4     function __construct($reference,$scarbon){
5         $this->connect();
6         $this->storeInDB($reference,$scarbon);
7     }
8
9     function connect(){
10        $this->link = mysqli_connect('localhost','root','root','gas') or die('Cannot connect to the DB');
11        mysqli_select_db($this->link,'gas') or die('Cannot select the DB');
12    }
13
14    function storeInDB($reference,$methane,$hydrosul,$scarbon){
15        $query = "insert into gas_temp set ref = '".$reference."',co2 = '".$scarbon.'";
16        $result = mysqli_query($this->link,$query) or die('Errant query: '.$query);
17    }
18
19 }
20 if($_GET['reference'] != '' & $_GET['carbon'] != ''){
21     $gas_intense=new gas_intense($_GET['reference'],$_GET['carbon']);
22 }
23
24 $conn=mysqli_connect("localhost","root","root","gas");
25
26 $sqlcount="select count(ref) from gas_temp";
27 $resultcount=mysqli_query($conn,$sqlcount);
28 $recordcount=mysqli_fetch_row($resultcount);
29 $count=$recordcount[0];
30
31 if(!isset($_REQUEST['row']))
32 {
33     $row=1;
34 }
35 else if(isset($_REQUEST['row']))
36 {
37     $row=$_REQUEST['row'];
38 }
39
40 $row++;
41
42 if($count >= 360)
43 {
44     $sqlgas="select avg(ref),avg(co2) from gas_temp";
45     $resultgas=mysqli_query($conn,$sqlgas);
46     $recordgas=mysqli_fetch_row($resultgas);
47
48     $ref=$recordgas[0];
49     $co2=$recordgas[1];
50
51     $sqlinsert="insert into gas_db (ref,co2) values ('$ref','$co2)";
52     mysqli_query($conn,$sqlinsert);
53     $sqldelete="delete from gas_temp";
54     mysqli_query($conn,$sqldelete);
55 }
56 else ;;
57 ?>

```



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างชุดคำสั่งหน้าประมวลผล gas.php

การทำงานของหน้าประมวลผล gas.php เริ่มจากตรวจสอบค่าสัญญาณดิจิทัลของค่าอ้างอิง (Reference), และค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีการส่งมาที่หน้าประมวลผลหรือไม่ด้วยการรับค่าแบบ \$_GET ด้วยชุดคำสั่งต่อไปนี้

```
if($_GET['reference'] != '' & $_GET['carbon'] != '')
```

หลังจากการตรวจสอบค่าดิจิทัลที่ส่งมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดในชุดตรวจวัด
ก๊าซชีวภาพต้นทาง และไม่เป็นค่าว่างเปล่า ‘ ‘ หรือค่า null โปรแกรมจะทำการสร้างคลาส
gas_intense() ขึ้นมาใหม่ด้วยชุดคำสั่งดังนี้

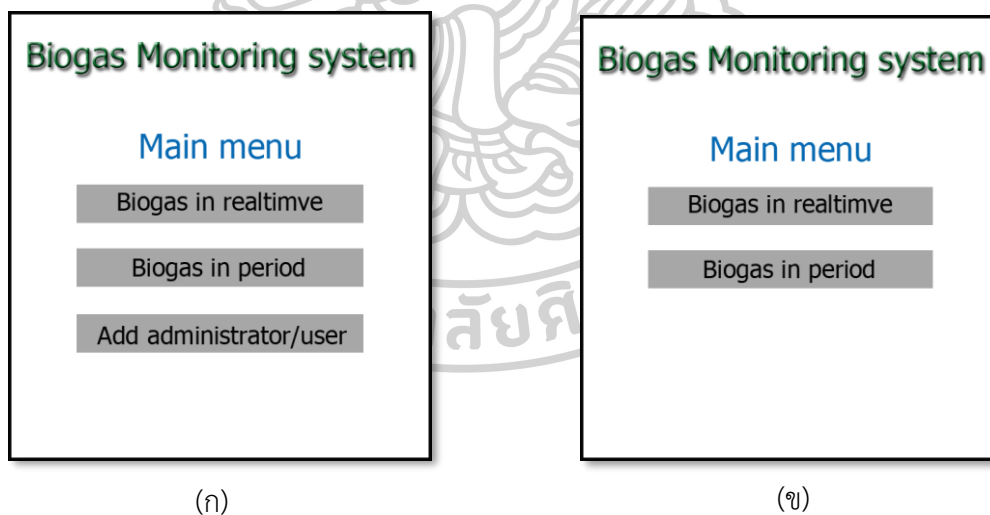
```
$gas_intense=new gas_intense($_GET['reference'],$_GET['carbon']);
```

ฟังก์ชัน connect() เป็นฟังก์ชันสำหรับเชื่อมต่อเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย
และฐานข้อมูล ซึ่งในฟังก์ชัน connect() จะประกอบด้วยฟังก์ชันสำหรับเชื่อมต่อฐานข้อมูล
คือ mysqli_connect() โดยต้องส่งพารามิเตอร์ทั้งหมดด้วยที่อยู่ไอพีของฐานข้อมูล สามารถเลือกใช้
ได้ทั้งการเรียกด้วยตัวเครื่องแม่ข่าย (Localhost) หรือที่อยู่ไอพี 127.0.0.1 พร้อมกับชื่อผู้ใช้
(Username) และรหัสผ่าน (Password) สำหรับการเข้าถึงฐานข้อมูลและพารามิเตอร์สุดท้าย
คือ ฐานข้อมูลที่ต้องการใช้งาน และการจัดเก็บข้อมูลได้ใช้ฟังก์ชัน storeInDB() ที่มีคำสั่งในการ
จัดเก็บข้อมูลเข้าฐานข้อมูลด้วยคำสั่งบันทึกข้อมูล (Insert into) จากนั้นอัลกอริทึมจะทำการ
ตรวจสอบจำนวนข้อมูลที่ทำกรบันทึก หากมีจำนวนข้อมูลครบ 360 ข้อมูล กำหนดให้ MySQL
ทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าอ้างอิง (Reference) และค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)
ด้วยฟังก์ชันหาค่าเฉลี่ยของโปรแกรม MySQL คือ AVG() ที่เป็นฟังก์ชันพิเศษเพิ่มเติมจากการใช้คำสั่ง
เลือกข้อมูล (Select) แล้วทำการบันทึกเข้าฐานข้อมูลหลัก (gas_db) พร้อมทั้งทำการบันทึกเวลา
(Timestamp) ด้วยคำสั่งการบันทึก หลังจากการบันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูลหลักสำเร็จ โปรแกรม
จะทำการลบข้อมูลทั้งหมดจากฐานข้อมูลชั่วคราว (gas_temp) เพื่อรอรับค่าสัญญาณดิจิทัล
จากชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางใหม่ และนับข้อมูลการบันทึกข้อมูลจนถึง 360 ข้อมูล ดังนั้น
ในฐานข้อมูลหลักจะมีข้อมูลเข้า 1 ข้อมูล ในทุก 6 นาทีโดยประมาณ ภายใน 1 ชั่วโมงจะมีข้อมูลเข้า
ฐานข้อมูลหลัก 10 ข้อมูล

การใช้งานระบบผ่านโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ (Web browser) ของระบบแสดงผล
ก๊าซชีวภาพประกอบด้วย 2 รูปแบบ คือ การแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์ และการแสดงผล
ก๊าซชีวภาพแบบกำหนดช่วงเวลาที่ต้องการ ทำให้ผู้ใช้งานระบบสามารถย้อนกลับไปดูหน้าแสดงผลค่า
ความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพก่อนหน้าได้ โดยการแสดงผลทั้ง 2 แบบต้องผ่านการยืนยันตัวตนในการ
ใช้งานก่อนดังแสดงได้ในรูปที่ 3.17

รูปที่ 3.17 ตัวอย่างหน้าจอเข้าสู่ระบบ (Login) สำหรับเข้าใช้งานระบบ

หน้าเข้าสู่ระบบ (Login) ผู้ใช้ต้องกรอกชื่อผู้ใช้ (Username) และรหัสผ่าน (Password) เพื่อยืนยันตัวตนก่อนใช้ระบบ ซึ่งในระบบจะแบ่งผู้ใช้งานออกเป็น 2 ระดับ คือ ระดับผู้ดูแลระบบ (Admin) และระดับผู้ใช้งานทั่วไป (User) ดังนั้นเมื่อผ่านเข้ามาในระบบสำเร็จจะสังเกตเห็นว่าเมนูของผู้ดูแลระบบจะมีฟังก์ชันการเพิ่มผู้ใช้งานทั่วไปให้สามารถเข้ามาใช้งานของระบบได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างหน้าเมนูหลัก ; (ก) หน้าเมนูหลักของผู้ดูแลระบบ และ (ข) หน้าเมนูหลักผู้ใช้งานทั่วไป

รูปที่ 3.18(ก) แสดงให้เห็นถึงหน้าเมนูสำหรับผู้ใช้งานในระดับผู้ดูแลระบบ (Admin) และรูปที่ 3.18(ข) เป็นเมนูสำหรับผู้ใช้งานทั่วไป (User) ซึ่งทั้ง 2 หน้าจอแสดงผลรายการที่เหมือนกันคือปุ่มกดสำหรับแสดงผลหน้าจอในรูปแบบเรียลไทม์และหน้าจอแสดงผลแบบกำหนด

ช่วงเวลาแสดง โดยในเมนูของผู้ดูแลระบบจะมีปุ่มสำหรับสร้างผู้ใช้งาน (Add administrator/user) โดยปุ่มกดนี้เมื่อทำการกด จะแสดงรูปที่ 3.19

Biogas Monitoring system

Add Administrator/User

Name:

Surname:

Username:

Password:

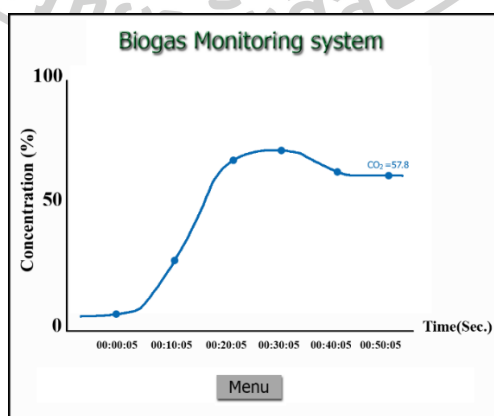
Confirmpassword:

Priority: Admin User

รูปที่ 3.19 ตัวอย่างหน้าจอการเพิ่มผู้ใช้งานระบบ

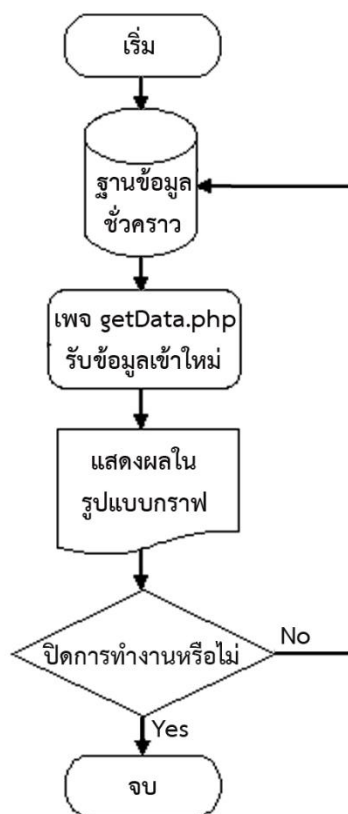
จากรูปที่ 3.19 เป็นหน้าแสดงผลสำหรับการป้อนข้อมูลเพื่อสร้างผู้ใช้งานระบบรายใหม่ ที่ต้องกรอกข้อมูลทั้ง ชื่อผู้ใช้งาน (Name), นามสกุล (Surname), ชื่อผู้ใช้ (Username), รหัสผ่าน (Password), รหัสผ่านเพื่อตรวจสอบ (Confirmpassword), และระดับการใช้งาน (Priority) ของผู้ใช้งานรายใหม่

จากเมนูรายการรูปที่ 3.18(ก) และ 3.18(ข) หากผู้ใช้งานระบบทำการกดปุ่มเพื่อดูข้อมูล ก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์ (Realtime) จะปรากฏหน้าแสดงผลตามรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างหน้าแสดงความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์

หน้าแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์มีการทำงานที่สามารถอธิบายด้วยผังการทำงาน (Flowchart) ของโปรแกรม ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ผังการทำงานของหน้าแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์

จากรูปที่ 3.21 แสดงถึงผังการทำงานในส่วนของการแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์ โดยเริ่มจากหน้าประมวลผล getData.php ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อมูลที่เข้ามาใหม่ในฐานข้อมูลชั่วคราวด้วยชุดคำสั่งดังนี้

```

function requestData() {
    $.ajax({
        url: 'getData2.php',
        datatype: "json",
        success: function(data) {

```

ข้อมูลที่เข้ามาใหม่หน้าประมวลผล getData.php จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลใหม่มาที่หน้าแสดงผลแบบเรียลไทม์ และหน้าแสดงผลเรียลไทม์จะทำการนำค่าที่ได้เข้าตัวแปร จากนั้นนำตัวแปรเข้าฟังก์ชันการแสดงผลในรูปแบบของกราฟในทันทีด้วยชุดคำสั่งดังนี้

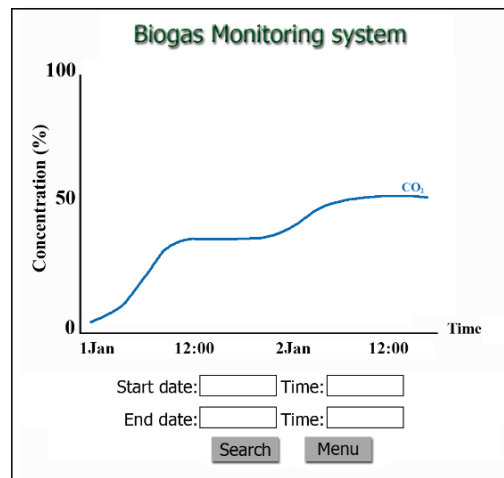
```
chart.series[0].addPoint([x, CO2], true, shift);
```

โดยมีหน้าแสดงผล getData.php ประกอบกับชุดคำสั่งดังนี้

```
<?php
$objConnect = mysqli_connect("localhost","root","Password","gas") or die (mysql_error());
$strSQL = "SELECT * FROM gas_tem order by id desc limit 1";
$result = mysqli_query($objConnect,$strSQL) or die (mysql_error());
$resultArray = array();
While($row = $result ->fetch_assoc())
{
$resultArray[ ]=$row;
}
mysqli_close($objConnet);
echo json_encode($resultArray);
?>
```

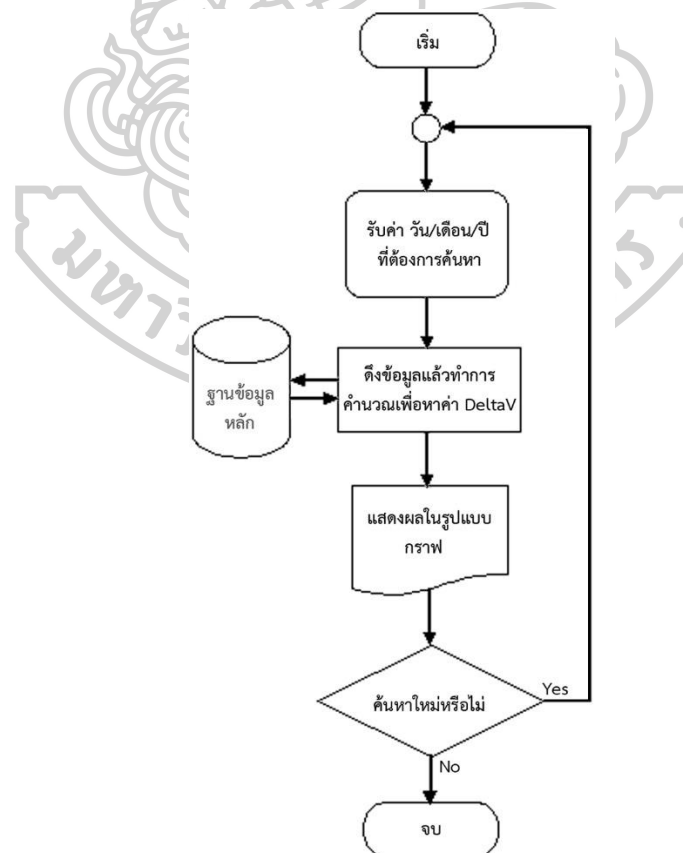
การทำงานของหน้าประมวลผล getData.php จะทำการดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลชั่วคราว (gas_temp) ให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลเจสัน (Jason form) และหน้าแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์ จะทำงานต่อเนื่องจนกว่าผู้ใช้งานจะปิดโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์

จากรูปที่ 3.18 ปุ่มการแสดงผลก๊าซชีวภาพรูปแบบกำหนดช่วงเวลา (Biogas in period) เป็นหน้าแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบกำหนดช่วงเวลา โดยในหน้าแสดงผลจะมีการรับค่าวันที่ ที่ต้องการค้นหา เริ่มต้นค้นหาพร้อมกับเวลา และเลือกวันสิ้นสุดการค้นหา ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ตัวอย่างหน้าแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบกำหนดช่วงเวลา

ในหน้าแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบกำหนดช่วงเวลา มีการทำงานหรือการแสดงผลด้วย อัลกอริทึมที่สามารถอธิบายด้วยผังการทำงานดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ผังการทำงานของหน้าแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบกำหนดช่วงเวลา

การทำงานของหน้าแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบกำหนดช่วงเวลาจะเริ่มจากหน้าแสดงผลความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ โดยจะกำหนดวันที่ในการค้นหาเป็นวันปัจจุบัน และมีการกำหนดเวลาเริ่มในการค้นหา คือ 00:00 และสิ้นสุดข้อมูลในการค้นหาจะกำหนดให้เป็นวันที่และเวลาปัจจุบัน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากฐานข้อมูลหลัก (gas_db) ที่ประกอบด้วยข้อมูลของค่าอ้างอิง (Reference) และค่าความเข้มข้นก๊าซชีวภาพ (Biogas) มาคำนวณเพื่อหาค่าความต่างหรือค่าเดลต้า (Delta) แล้วนำค่าที่ได้มาแสดงผลในรูปแบบของกราฟ หลังจากการประมวลผลค่าความเข้มข้นของก๊าซแสดงเป็นกราฟได้สำเร็จ ผู้ใช้งานจะสามารถกำหนดวันที่เริ่มต้นที่ต้องการค้นหาข้อมูล และวันที่สิ้นสุดของข้อมูลที่ต้องการค้นหา โดยในการดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลตามชุดคำสั่งดังต่อไปนี้

```
$sql="select ref,co2 from gas_db where (date between '$bdate' and '$edate') order by id asc";
$result=mysqli_query($conn,$sql);
```

จากชุดคำสั่งเป็นการดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลหลัก (gas_db) ที่ต้องการเฉพาะค่าอ้างอิงและค่าของก๊าซชีวภาพที่อยู่ระหว่างวันที่ ที่ต้องการเริ่มต้นค้นหาจนถึงวันที่ ที่ต้องการค้นหาสุดท้าย (date between '\$bdate' and '\$edate') โดยเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก (Order by ID asc) และใช้ฟังก์ชัน Highcharts.chart() ที่เป็นฟังก์ชันเฉพาะของโปรแกรมจาวาสคริปต์ (JavaScript) เพื่อทำการสร้างกราฟจากข้อมูลที่ดึงมาจากฐานข้อมูลหลัก และมีการรับข้อมูลวันที่และเวลาที่ต้องการค้นหาข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพด้วยโปรแกรมภาษาเอชทีเอ็มแอล (HTML) และพีเอชพี (PHP) ที่มีชุดคำสั่งดังนี้

```
<input type="date" name="begindate" min="<?php echo"$mindate";?>
max="<?php echo"$maxdate";?>">
```

ในชุดคำสั่งดังกล่าวจะมีการใช้แท็ก <tag> ในภาษาเอชทีเอ็มแอลและมีการใช้งานตัวแปรด้วยโปรแกรมพีเอชพีเพื่อการเรียกใช้ตัวแปร \$mindate และ \$maxdate ทำให้อัลกอริทึมมีความยืดหยุ่นในการใช้งานระบบ

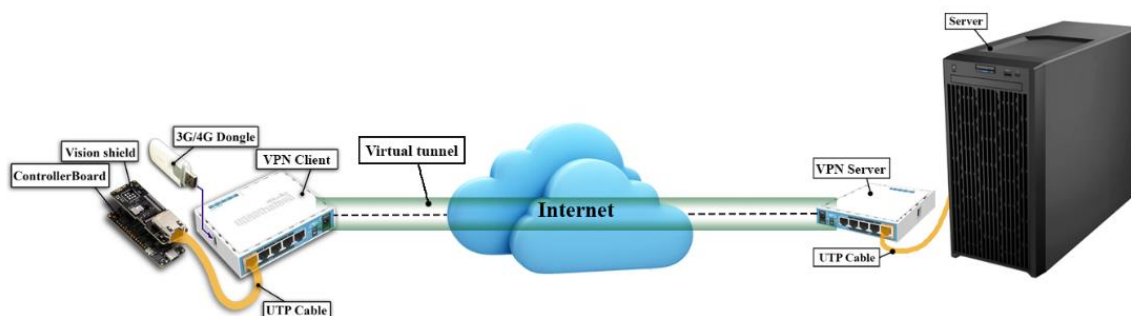
3.2 การทดสอบระบบ

ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งการทดสอบระบบออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน โดยเริ่มจากการทดสอบในเรื่องของการรับ-ส่งข้อมูล เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้มีส่วนที่ต้องใช้เทคนิคในการส่งข้อมูลรูปแบบของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง (Internet of things: IoT) ดังนั้นการทดสอบความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลจึงเป็นสิ่งสำคัญ และการทดสอบที่ 2 จะเป็นในส่วนของการหาค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นของชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง เช่น ค่าความไว (Sensitivity), และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%Error) การทดสอบสุดท้าย คือการนำชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางต่อร่วมกับตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดก๊าซชีวภาพ เพื่อหาค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพโดยการทดสอบทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.2.1 การทดสอบความเร็วในการส่งและรับข้อมูล

ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความหน่วงแฝง (Latency time) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความล่าช้าในการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์หนึ่งถึงอุปกรณ์หนึ่งผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต โดยการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตนั้น ผู้ส่งไม่สามารถเลือกเส้นทางหรืออุปกรณ์ที่ข้อมูลจะส่งผ่านได้ ทำได้เพียงใช้คำสั่ง Tracert เพื่อดูข้อมูลเบื้องต้นของเส้นทางที่ข้อมูลส่งข้ามโครงข่ายอินเทอร์เน็ต โดยทั่วไปการหาค่าความหน่วงแฝงจะวัดจากค่าเฉลี่ยในเส้นทางที่เกิดขึ้น

การทดสอบเพื่อหาค่าความหน่วงแฝงในการส่งหรือรับข้อมูลของวิทยานิพนธ์นี้เกิดขึ้นหลังจากที่อุปกรณ์ราวเตอร์ทั้งในส่วนเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายที่ถูกกำหนดให้เป็นอุปกรณ์ต้นทาง และในส่วนที่ทำหน้าที่เป็นโมดูลสื่อสารของชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางที่ถูกกำหนดให้เป็นอุปกรณ์ที่ต้องการเชื่อมต่อกับโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (VPN Client) ที่ทำการเชื่อมต่อด้วยระบบโครงข่ายส่วนตัวเสมือนสำเร็จ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.24

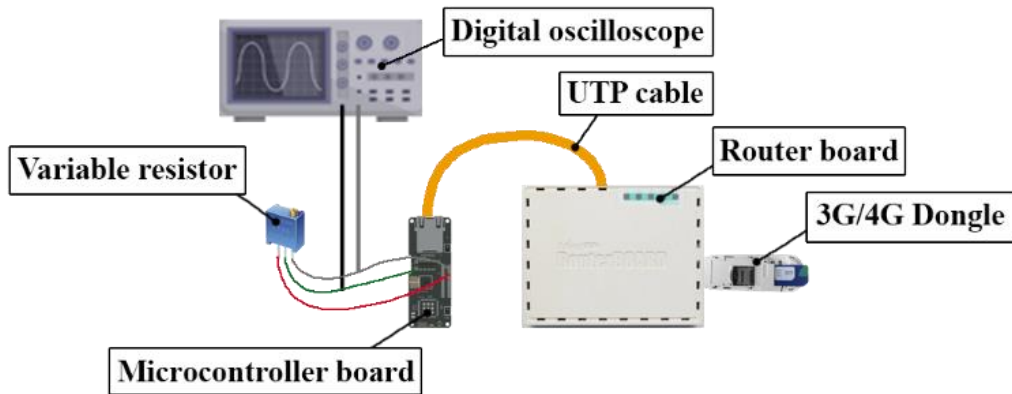


รูปที่ 3.24 ตัวอย่างโครงข่ายส่วนตัวเสมือน

การทดสอบเพื่อหาค่าความหน่วงแฝงจะใช้คำสั่ง Ping ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่ใช้ในการตรวจสอบข้อผิดพลาดการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ภายในโครงข่าย (Internet control message protocol: ICMP) ที่มีขนาด 32 bytes ซึ่งเป็นขนาดของชุดข้อมูลปกติ แต่สามารถปรับขนาดได้ด้วยส่วนเพิ่มของคำสั่ง -L พร้อมด้วยขนาดของข้อมูลที่ต้องการส่ง โดยคำสั่ง Ping เป็นชุดคำสั่งในการเรียกคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Echo requests) แล้วส่งไปยังที่อยู่ไอพีของอุปกรณ์ปลายทาง หากอุปกรณ์ปลายทางสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต้นทางได้ อุปกรณ์ปลายทางจะส่งข้อความตอบกลับ (Echo reply) มายังอุปกรณ์ต้นทางพร้อมกับเวลาในการตอบกลับ โดยในการหาค่าความหน่วงแฝงจะเป็นการนำค่า Ping มาหาค่าเฉลี่ย

3.2.2 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง

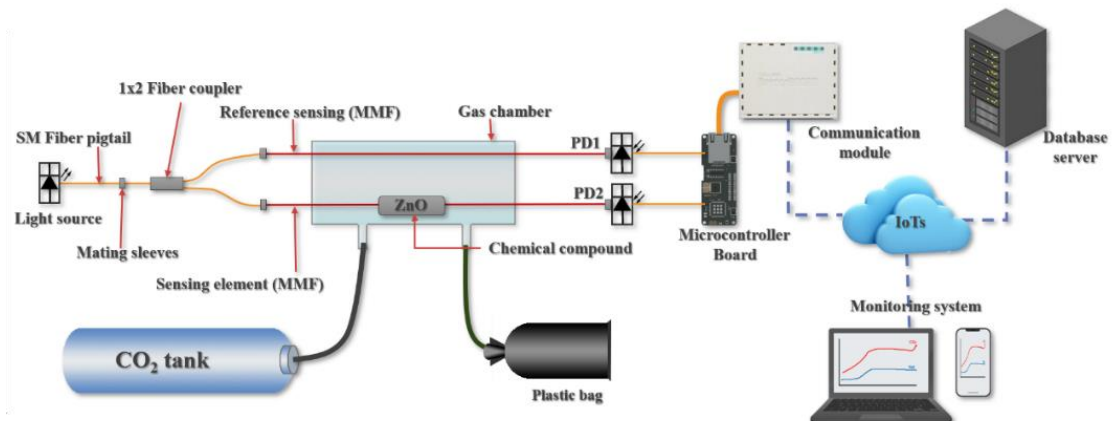
เป็นการทดสอบชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางเพื่อหาคุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งค่าความไว (Sensitivity), ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%Error), และค่า R-Squared โดยการทดสอบชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางจะใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ที่มีค่าความต้านทาน 100 โอห์ม เป็นอุปกรณ์ในการจำลองตัวตรวจจับไบโอแก๊สที่แสงซินิตรีแฟรคโตมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือสัญญาณอนาล็อกให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด ด้วยวิธีการปรับแกนมุมของตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ เป็นมุม 360 องศา หรือ 1 รอบ จากนั้นทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องแสดงรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า (Oscilloscope: OSC) และทำการบันทึกค่าเข้าฐานข้อมูลหลัก ขั้นตอนต่อมา นำค่าที่วัดได้มาทำการเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการบันทึกจากเครื่องแสดงรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า ทั้งนี้จะเป็นการเก็บข้อมูลจนกระทั่งแกนมุมของตัวต้านทานปรับค่าได้ไม่สามารถหมุนปรับค่าได้อีก จากนั้นนำค่าที่ได้จากการบันทึกทั้งค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกับค่าดิจิตอลที่บันทึกเข้าฐานข้อมูลมาทำการหาค่ามาตรฐาน (Calibration line) เพื่อดูความสัมพันธ์ทั้งสองค่า และนำทั้งสองค่ามาทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเส้น (Linear regression) เพื่อได้สมการเส้นตรงเพื่อหาค่า R-Squared โดยรูปแบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดสอบคุณสมบัติของชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง

3.2.3 การทดสอบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์สำหรับตรวจวัดก๊าซ

เป็นการทดสอบระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องที่ได้พัฒนาขึ้น โดยการใช้ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดก๊าซชีวภาพต่อร่วมกับอุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photodetector: PD) จากนั้นจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับแสง (PD) เข้าไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดโดยระบบตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางจะส่งค่าสัญญาณดิจิทัลที่ได้เข้าสู่ฐานข้อมูลหลักในเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ผังโครงสร้างการพัฒนาาระบบ

โดยจะมีการป้อนก๊าซชีวภาพเข้าสู่ภาชนะทดลอง (Chamber) ที่ติดตั้งตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์คอยตรวจวัดก๊าซชีวภาพ และมีการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของกราฟและค่าสัญญาณดิจิทัลโดยแบ่งออกเป็น 3 สถานะ คือ สถานะก่อนการป้อนก๊าซชีวภาพ

สถานะระหว่างป้อนก๊าซชีวภาพ และสถานะที่ก๊าซชะงักมีก๊าซชีวภาพอยู่ 100% จากนั้นนำค่าสัญญาณดิจิทัลที่บันทึกในฐานข้อมูล ซึ่งประกอบด้วยค่าต่ำสุด (Min), ค่าสูงสุด (Max), และค่าระหว่างกลาง (Mean) สำหรับการหาค่ามาตรฐาน (Calibration line) เพื่อนำสมการมาใช้ในการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ และการตอบสนองของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์และระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องบนพื้นฐานของอินเตอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งที่สร้างขึ้น

จากข้อมูลทั้งหมดในบทที่ 3 ที่ได้ดำเนินการทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์ต่าง ๆ ที่ได้กำหนดและติดตั้งให้ทำงานร่วมกัน รวมถึงโปรแกรมประยุกต์ต่าง ๆ ทั้งในส่วนของโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดให้ทำงานร่วมกับตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ที่ใช้แทนตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์สำหรับตรวจวัดก๊าซชีวภาพ และการเชื่อมต่อกับราวเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นโมดูลสื่อสาร การใช้โปรแกรมภาษาเอชทีเอ็มแอล พีเอชพี และจาวาสคริปต์ สำหรับสร้างอัลกอริทึมในการสร้างหน้าประมวลผล และหน้าแสดงผลสำหรับแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพตามความต้องการของผู้ใช้งานระบบ โดยในการดำเนินการในบทนี้มีการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบโดยการทำงานของตัวจำลองตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์สำหรับตรวจวัดก๊าซชีวภาพ และการทดสอบโดยกำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดต่อร่วมกับตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์สำหรับตรวจวัดก๊าซชีวภาพโดยตรง ทั้งนี้การทดสอบดังกล่าวได้สรุปผลการทดสอบทั้งหมดถัดไป



บทที่ 4

ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

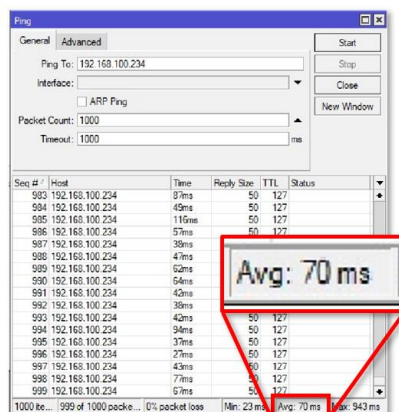
บทนี้เป็นกรกล่าวถึงผลการทดสอบระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพที่พัฒนาขึ้น จากการทำวิทยานิพนธ์ทั้งในเรื่องของฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยผลการทดสอบในบทนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 4 ผลการทดสอบดังนี้

- 4.1 ผลการทดสอบหาค่าความหน่วงแฝง
- 4.2 ผลการทดสอบของชุดตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง
- 4.3 ผลการทดสอบของหน้าแสดงผล (Graphic user interface: GUI) ของระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง
- 4.4 ผลการทดสอบการต่อรวมกับตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์

โดยในการทดสอบแต่ละหัวข้อจะเป็นการทดสอบในรูปแบบที่แตกต่างกัน เช่น การทดสอบหาค่าความหน่วงแฝง ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางกับเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย ในการทดสอบถัดมาคือการทดสอบเพื่อหาค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับคุณสมบัติของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง รวมถึงการทดสอบของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางที่ทำการต่อรวมกับตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์สำหรับตรวจวัดก๊าซชีวภาพ และการทดสอบของหน้าแสดงผลต่าง ๆ ของระบบที่พัฒนาขึ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบหาค่าความหน่วงแฝง

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความหน่วงแฝงในการส่งข้อมูลระหว่างชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางถึงเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย โดยผ่านโครงข่ายโทรศัพท์ค่ายทีโอที ประเภทซิม 4G ตามหัวข้อที่ 3.2.1 เมื่อใช้คำสั่ง Ping จากอุปกรณ์ราวเตอร์ในฝั่งของชุดตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง หรือในส่วนของอุปกรณ์ปลายทาง ไปยังที่อยู่ไอพี (IP Address) ปลายทางหรือที่อยู่ไอพีของเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายที่ถูกกำหนดเป็นเลข 192.168.100.234 จะได้ค่าความหน่วงแฝงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 คำสั่ง Ping จาก Router board

จากรูปที่ 4.1 เป็นการแสดงผลของการใช้คำสั่ง Ping จำนวน 1,000 ครั้ง จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยเวลาในการตอบกลับของข้อมูล (Echo packets) จากเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายที่ส่งกลับมาไปยังอุปกรณ์ปลายทางที่ต้องการเชื่อมต่อโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (VPN client) โดยค่าเฉลี่ยของการตอบกลับจากคำสั่ง Ping เท่ากับ 70 ms ทั้งนี้ในการส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตบนโครงข่ายโทรศัพท์ ด้วยซิม 4G ปกติต้องมีความหน่วงน้อยกว่า 100 ms เมื่อเทียบกับตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าความหน่วง และอัตราการส่งข้อมูลระหว่างโครงข่ายโทรศัพท์มือถือ ซึ่งผลในการทดสอบจากระบบตัวตรวจวัดक्षाชีวภาพต้นทางนี้ ถือได้ว่าเป็นการส่งข้อมูลที่มีความไวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราการส่งข้อมูลและค่าความหน่วงของเทคโนโลยีโทรศัพท์มือถือในแต่ละยุค

Generation	Data rate	Latency
2G	100 – 400 Kbit/s	300 – 1000 ms
3G	0.5 – 5 Mbit/s	100 – 500 ms
4G	1 – 50 Mbit/s	<100 ms

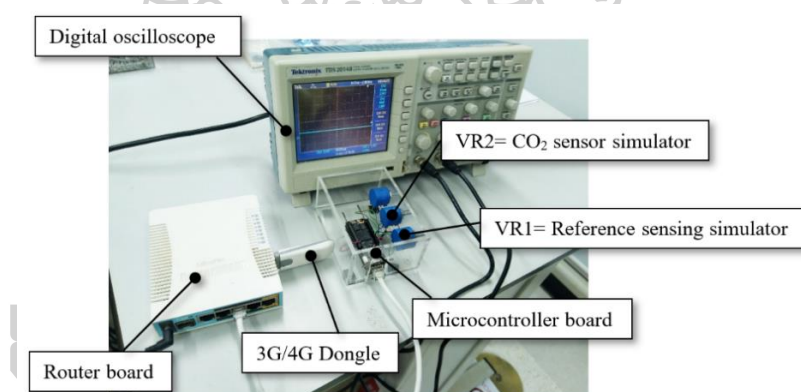
(ที่มา: <https://hpbn.co/mobile-networks/>)

ทั้งนี้ในการทดสอบหาค่าความหน่วงในแต่ละครั้งอาจจะไม่เท่ากันทุกครั้งเนื่องจากมีปัจจัยหลายด้านที่มีผลต่อการส่งข้อมูล เช่น ช่วงเวลาในการใช้งาน วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เทคนิคโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (VPN) ในการส่งข้อมูล แต่เป็นการทำเทคนิคโครงข่ายส่วนตัวเสมือนบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งโครงข่ายอินเทอร์เน็ตเป็นโครงข่ายที่มีลักษณะเป็นโครงข่ายสาธารณะ ทำให้บางช่วงเวลามีผู้ใช้งานโครงข่ายเดียวกันเป็นจำนวนมากทำให้เกิดการแบ่งช่องสัญญาณ

(Share bandwidth) ขึ้นได้ ซึ่งมีผลทำให้การส่งข้อมูลล่าช้า และในบางครั้งผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตบนโครงข่ายมือถืออาจมีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางของการส่งผ่านข้อมูลหรืออุปกรณ์บางอย่างโดยไม่มี การแจ้งให้ผู้รับบริการทราบ ส่งผลทำให้ค่าความหน่วงแฝงดีขึ้นหรือแย่ลง เป็นต้น

4.2 ผลการทดสอบของระบบตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง

จากผลการทดสอบแรกทำให้ทราบถึงความเร็วที่เป็นไปได้จากค่าความหน่วงแฝงในการส่งข้อมูลระหว่างชุดโมดูลสื่อสารของชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางถึงเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย ในการทดสอบต่อมาเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติหรือค่าต่าง ๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดของชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง เป็นการทดสอบโดยใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ (Variable resistor: VR) ที่มีความต้านทาน 100 โอห์ม โดยการหมุนแกนครึ่งละ 360 องศา จากนั้นทำการบันทึกค่าความต้านทานจากตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ และทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์แสดงรูปคลื่นสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital oscilloscope: DSO) ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง

หน้าจอการแสดงผล gas.php ที่ได้ทำการรับค่าสัญญาณดิจิทัล (ADC) จากชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางจะทำการบันทึกเข้าฐานข้อมูลชั่วคราว (gas_temp) ในทันที จากนั้นอัลกอริทึมของหน้าจอแสดงผล gas.php จะทำการกำหนดให้นับค่าสัญญาณดิจิทัลที่ทำการบันทึกได้เป็นจำนวน 10 ครั้ง หรือ 10 ข้อมูล เมื่อข้อมูลทำการบันทึกจนครบ 10 ครั้งแล้วให้ทำการหาค่าเฉลี่ยแล้วทำการบันทึกข้อมูลเข้าฐานข้อมูลหลัก ดังนั้นข้อมูลค่าสัญญาณดิจิทัลในฐานข้อมูลหลัก (gas_db) ล่าสุดจึงเป็นข้อมูลดิจิทัลที่ทำการจดบันทึกเพื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์แสดงรูปคลื่นสัญญาณแบบดิจิทัลและจากการบันทึกหาค่าเฉลี่ยจากหน้าจอแสดงผล gas.php ทำให้ทราบว่าการหาค่าเฉลี่ยทุก 10 ครั้ง และทุก 20 ครั้งนั้นมีผลลัพธ์ที่แตกต่างกันน้อย ดังนั้นในการทดสอบนี้

จึงเลือกใช้ค่าเฉลี่ยค่าสัญญาณดิจิทัลทุก ๆ 10 ครั้ง หรือทุก 10 ข้อมูล ซึ่งในการบันทึกค่าที่ได้ทั้งค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์แสดงรูปคลื่นสัญญาณแบบดิจิทัล และค่าสัญญาณดิจิทัลจากฐานข้อมูลหลัก ทำให้สามารถคำนวณหาข้อมูลอื่นเพิ่มเติมได้ ทั้งค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%Error) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ (%Concentration) ที่ทำการจำลองด้วยตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ ทั้งนี้ข้อมูลครั้งที่ 1, 2, และ 3 ที่ได้ทำการบันทึกสามารถแสดงให้ดูดังตารางที่ 4.2 - 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ตารางผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของชุดตัวตรวจวัดต้นทางครั้งที่ 1

รอบที่	ค่าความต้านทานจากตัวต้านทานปรับค่าได้ (Ω)	แรงดันไฟฟ้าจากการวัดของอุปกรณ์ Digital oscilloscope (V)	ค่าสัญญาณดิจิทัล (N.A.)	แรงดันไฟฟ้าจากการแปลงค่าสัญญาณดิจิทัล (V)	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น (%)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
1	3.85	0.07	1498.4	0.069	2.5	2.012
2	7.69	0.207	4376.1	0.200	7.3	3.226
3	11.54	0.34	7184.4	0.329	12.1	3.272
4	15.38	0.482	10069	0.461	16.9	4.373
5	19.23	0.622	13058.3	0.598	21.9	3.897
6	23.08	0.742	15548.1	0.712	26.1	4.079
7	26.92	0.856	18018.6	0.825	30.2	3.642
8	30.77	0.975	20549.5	0.941	34.5	3.520
9	34.61	1.09	22973	1.052	38.6	3.521
10	38.46	1.202	25355.2	1.161	42.6	3.439
11	42.31	1.292	27215.2	1.246	45.7	3.575
12	46.15	1.383	29152.6	1.335	48.9	3.507
13	50.00	1.482	31266.8	1.431	52.5	3.422
14	53.84	1.575	33015.6	1.511	55.4	4.042
15	57.69	1.685	35224.5	1.612	59.1	4.306
16	61.54	1.79	37489.5	1.716	62.9	4.127
17	65.38	1.9	39837.9	1.824	66.9	4.019
18	69.23	2.01	42237.2	1.933	70.9	3.808
19	73.07	2.12	44648.7	2.044	74.9	3.592

ตารางที่ 4.2 ตารางผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของชุดตัวตรวจวัดต้นทางครั้งที่ 1 (ต่อ)

รอบที่	ค่าความต้านทานจากตัวต้านทานปรับค่าได้ (Ω)	แรงดันไฟฟ้าจากการวัดของอุปกรณ์ Digital oscilloscope (V)	ค่าสัญญาณดิจิทัล (N.A.)	แรงดันไฟฟ้าจากการแปลงค่าสัญญาณดิจิทัล (V)	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น (%)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
20	76.92	2.23	46889	2.146	78.7	3.749
21	80.77	2.33	49126.6	2.249	82.5	3.483
22	84.61	2.46	51853.3	2.374	87.0	3.510
23	88.46	2.59	54579.6	2.498	91.6	3.535
24	92.30	2.71	57077.9	2.613	95.8	3.586
25	96.15	2.83	59600.5	2.728	100.0	3.594
					Error avg.	<u>3.633</u>

จากตารางที่ 4.2 ประกอบด้วยค่าความต้านทานที่วัดได้จากการปรับแกนหมุนของตัวต้านทานปรับค่าได้ (Variable resistor: VR) ทำมุม 360 องศา ค่าแรงดันไฟฟ้าจากการวัดค่าของอุปกรณ์แสดงรูปคลื่นสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital oscilloscope: DSO) ที่วัดจากตัวต้านทานปรับค่าได้ก่อนจ่ายเข้าที่ขาอินพุตแบบสัญญาณอนาล็อกของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด ค่าสัญญาณดิจิทัลล่าสุดจากฐานข้อมูลหลักของเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณค่าสัญญาณดิจิทัลจาก (4.1)

$$V = \frac{ADC_{value} \times V_{ref}}{2^n} \quad (4.1)$$

- โดย ADC_{value} คือ ค่าสัญญาณดิจิทัลจากฐานข้อมูล
- V_{ref} คือ ค่าแรงดันอ้างอิงก่อนต่อเข้าตัวต้านทานปรับค่าได้
- n คือ จำนวนบิต (Bit) ที่ฟังก์ชันแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลในไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด

ตารางที่ 4.3 ตารางผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของชุดตัวตรวจวัดต้นทางครั้งที่ 2

รอบที่	ค่าความ ต้านทานจาก ตัวต้านทานปรับ ค่าได้ (Ω)	แรงดันไฟฟ้าจาก การวัดของ อุปกรณ์ Digital oscilloscope (V)	ค่าสัญญาณ ดิจิตอล (N.A.)	แรงดันไฟฟ้า จากการแปลง ค่าสัญญาณ ดิจิตอล (V)	เปอร์เซ็นต์ ความ เข้มข้น (%)	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน (%)
1	4.02	0.074	1573.8	0.072	2.64	2.645
2	7.62	0.208	4342	0.199	7.29	4.442
3	11.54	0.339	7112.3	0.326	11.94	3.960
4	15.36	0.481	10051.3	0.460	16.87	4.343
5	19.31	0.624	13109.4	0.600	22.00	3.830
6	23.17	0.744	15634.3	0.716	26.24	3.806
7	26.19	0.86	17987.5	0.823	30.19	4.256
8	30.57	0.973	20439.7	0.936	34.31	3.838
9	35.02	1.094	23013.3	1.053	38.63	3.705
10	38.42	1.204	25310.3	1.159	42.48	3.770
11	42.25	1.291	27079.4	1.240	45.45	3.982
12	46.08	1.382	28987.4	1.327	48.66	3.984
13	49.96	1.483	31107.3	1.424	52.21	3.980
14	53.85	1.581	33081	1.514	55.53	4.217
15	57.83	1.683	35336	1.618	59.31	3.889
16	61.57	1.79	37560.1	1.719	63.04	3.946
17	65.34	1.9	39755.7	1.820	66.73	4.217
18	69.2	2.01	42210.9	1.932	70.85	3.868
19	72.98	2.12	44584.7	2.041	74.84	3.730
20	76.91	2.23	46867.8	2.145	78.67	3.792
21	80.77	2.33	49126.7	2.249	82.46	3.483
22	83.98	2.46	51682.2	2.366	86.75	3.828
23	88.26	2.59	54300.3	2.486	91.14	4.028
24	92.22	2.72	56766.7	2.599	95.28	4.464
25	96.04	2.82	59148.2	2.708	99.28	3.986
					Error avg.	<u>3.920</u>

ตารางที่ 4.4 ตารางผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของชุดตัวตรวจวัดต้นทางครั้งที่ 3

รอบที่	ค่าความต้านทานจากตัวต้านทานปรับค่าได้ (Ω)	แรงดันไฟฟ้าจากการวัดของอุปกรณ์ Digital oscilloscope (V)	ค่าสัญญาณดิจิทัล (N.A.)	แรงดันไฟฟ้าจากการแปลงค่าสัญญาณดิจิทัล (V)	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น (%)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
1	3.95	0.078	1712.3	0.078	2.874	0.491
2	7.49	0.205	4262.2	0.195	7.154	4.825
3	11.52	0.34	7122	0.326	11.954	4.112
4	15.43	0.482	10109.9	0.463	16.969	3.985
5	19.21	0.622	12962.5	0.593	21.758	4.602
6	23.07	0.741	15544.1	0.712	26.091	3.974
7	27.04	0.86	18107.1	0.829	30.393	3.619
8	29.98	0.971	20399.9	0.934	34.241	3.828
9	34.57	1.09	22827.8	1.045	38.316	4.131
10	38.42	1.2	25143.5	1.151	42.203	4.085
11	42.26	1.291	27078	1.240	45.450	3.987
12	46.1	1.381	28990.6	1.327	48.661	3.904
13	49.93	1.485	31101.9	1.424	52.205	4.126
14	53.9	1.58	33112.5	1.516	55.579	4.065
15	57.62	1.683	35182	1.611	59.053	4.308
16	61.59	1.79	37539	1.718	63.009	4.000
17	65.28	1.898	39752	1.820	66.724	4.125
18	69.01	2.01	42178.6	1.931	70.797	3.941
19	72.94	2.12	44498.1	2.037	74.690	3.917
20	76.85	2.23	46718.4	2.139	78.417	4.099
21	80.48	2.33	49060.4	2.246	82.348	3.613
22	84.21	2.46	51745.8	2.369	86.855	3.710
23	88.32	2.59	54430.2	2.492	91.361	3.799
24	92.2	2.71	56992.1	2.609	95.661	3.731
25	96.1	2.83	59473.8	2.722	99.827	3.799
					Error avg.	<u>3.871</u>

จากตารางที่ 4.3 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 3.920 และตารางที่ 4.4 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยที่ 3.871 โดยเมื่อนำค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ตารางมาหาค่าเฉลี่ย ทั้งค่าแรงดันไฟฟ้าจากการวัดด้วยอุปกรณ์แสดงรูปคลื่นสัญญาณดิจิทัล ค่าสัญญาณดิจิทัล และค่าแรงดันไฟฟ้าที่แปลงจากค่าสัญญาณดิจิทัล ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะเป็นการ คำนวณจากค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าด้วยการวัดของอุปกรณ์แสดงรูปคลื่นสัญญาณดิจิทัล และแรงดันไฟฟ้าที่แปลงจากค่าสัญญาณดิจิทัล ดังตารางที่ 4.5

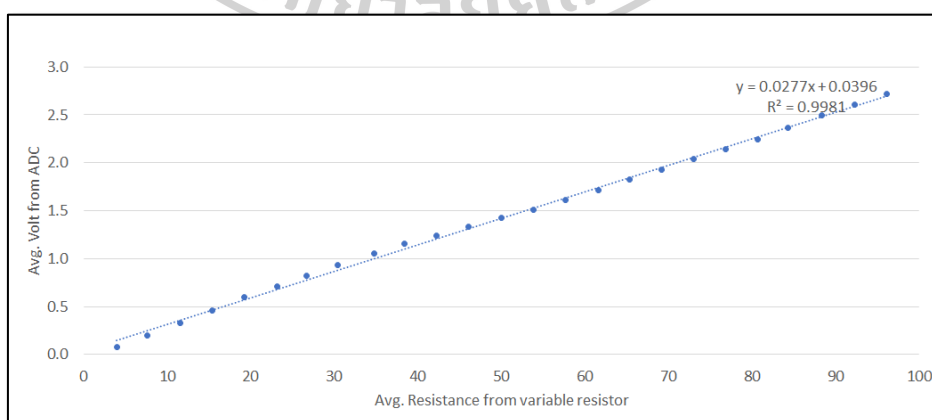
ตารางที่ 4.5 ตารางค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ครั้ง ของค่าแรงดันไฟฟ้าจากการวัดด้วยอุปกรณ์ แสดงรูปคลื่นสัญญาณดิจิทัล และค่าแรงดันไฟฟ้าที่แปลงจากค่าสัญญาณดิจิทัล

รอบที่	ค่าความ ต้านทานจาก ตัวต้านทานปรับ ค่าได้ (Ω)	แรงดันไฟฟ้าจาก การวัดของ อุปกรณ์ Digital oscilloscope (V)	ค่าสัญญาณ ดิจิทัล (N.A.)	แรงดันไฟฟ้า จากการแปลง ค่าสัญญาณ ดิจิทัล (V)	เปอร์เซ็นต์ ความ เข้มข้น (%)	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน (%)
1	3.94	0.074	1594.8	0.073	2.677	1.344
2	7.60	0.207	4326.8	0.198	7.262	4.163
3	11.53	0.340	7139.6	0.327	11.984	3.781
4	15.39	0.482	10076.7	0.461	16.914	4.233
5	19.25	0.623	13043.4	0.597	21.893	4.109
6	23.11	0.742	15575.5	0.713	26.143	3.953
7	26.72	0.859	18037.7	0.826	30.276	3.839
8	30.44	0.973	20463.0	0.937	34.347	3.728
9	34.73	1.091	22938.0	1.050	38.501	3.786
10	38.43	1.202	25269.7	1.157	42.415	3.764
11	42.27	1.291	27124.2	1.242	45.528	3.848
12	46.11	1.382	29043.5	1.330	48.750	3.798
13	49.96	1.483	31158.7	1.426	52.300	3.843
14	53.86	1.579	33069.7	1.514	55.507	4.108
15	57.71	1.684	35247.5	1.614	59.163	4.167
16	61.57	1.790	37529.5	1.718	62.993	4.024
17	65.33	1.899	39781.9	1.821	66.774	4.121
18	69.15	2.010	42208.9	1.932	70.848	3.872
19	73.00	2.120	44577.2	2.041	74.823	3.746

ตารางที่ 4.5 ตารางค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ครั้งของค่าแรงดันไฟฟ้าจากการวัดด้วยอุปกรณ์แสดงรูปคลื่นสัญญาณดิจิทัล และค่าแรงดันไฟฟ้าที่แปลงจากค่าสัญญาณดิจิทัล (ต่อ)

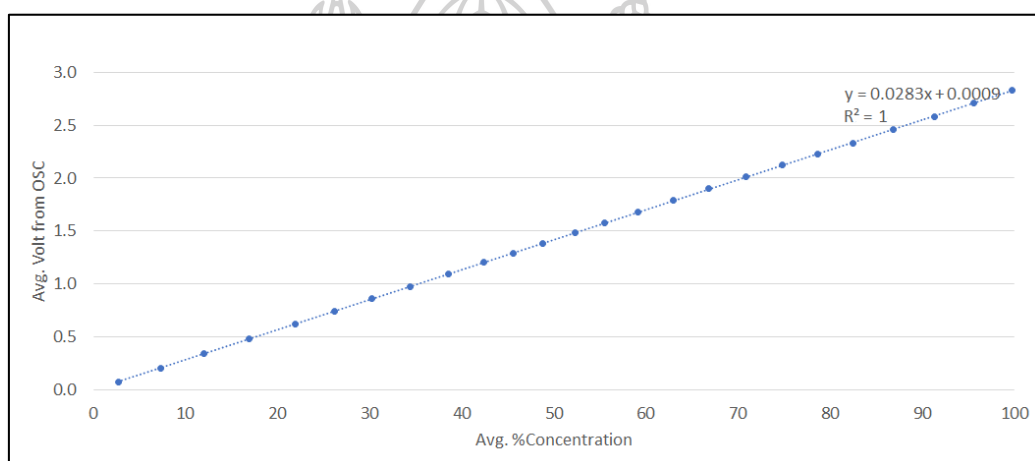
รอบที่	ค่าความต้านทานจากตัวต้านทานปรับค่าได้ (Ω)	แรงดันไฟฟ้าจากการวัดของอุปกรณ์ Digital oscilloscope (V)	ค่าสัญญาณดิจิทัล (N.A.)	แรงดันไฟฟ้าจากการแปลงค่าสัญญาณดิจิทัล (V)	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น (%)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
20	76.89	2.230	46825.1	2.143	78.596	3.880
21	80.67	2.330	49104.6	2.248	82.422	3.527
22	84.27	2.460	51760.4	2.369	86.880	3.683
23	88.35	2.590	54436.7	2.492	91.372	3.787
24	92.24	2.713	56945.6	2.607	95.583	3.928
25	96.10	2.827	59407.5	2.719	99.715	3.793
					Error avg.	<u>3.793</u>

ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการทดสอบ 3 ครั้งพบว่า มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเท่ากับ 3.793 (%Error = 3.793) และจากตารางที่ 4.4 ที่เก็บค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 3 ครั้ง สามารถหาค่าความไว (Sensitivity) ของชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางได้ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเส้น (Linear regression) โดยการนำค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานซึ่งถูกกำหนดให้เป็นแกน Y และกำหนดค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่แปลงจากค่าสัญญาณดิจิทัลซึ่งกำหนดให้เป็นแกน X ทำให้ได้สมการเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและค่าแรงดันไฟฟ้าที่แปลงจากสัญญาณดิจิทัล

จากรูปที่ 4.3 เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเส้น (Linear regression) เพื่อให้ทราบถึงค่าความไว (Sensitivity) ของชุดตัวตรวจวัดต้นทางที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดในการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นค่าสัญญาณดิจิทัล โดยค่า $R^2 = 0.9981$ และมีค่าความไวของระบบ คือ $0.0277 \text{ V}/\Omega$ หรือ $27.7 \text{ mV}/\Omega$ และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเส้นเพื่อหาค่าความไวของชุดตัวตรวจวัดต้นทางระหว่างแรงดันไฟฟ้าและค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซที่เปลี่ยนตามแรงดันไฟฟ้า ทั้งนี้ได้กำหนดให้ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่แปลงค่าจากการวัดด้วยอุปกรณ์แสดงรูปคลื่นสัญญาณแบบดิจิทัล (คอลัมน์ที่ 3 จากตารางที่ 4.4) กำหนดให้เป็นแกน Y และค่าเฉลี่ยของความเข้มข้น (คอลัมน์ที่ 7 จากตารางที่ 4.4) ถูกกำหนดให้เป็นแกน X ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าจากการวัดด้วยอุปกรณ์แสดงรูปคลื่นสัญญาณแบบดิจิทัลและค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น

จากรูปที่ 4.4 เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเส้นเพื่อทราบถึงค่าความไวของชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง โดยค่า $R^2 = 1$ ค่าความไว ระหว่างค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าจากตัวต้านทานปรับค่าได้ ที่วัดได้จากอุปกรณ์แสดงรูปคลื่นสัญญาณแบบดิจิทัลเทียบกับค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น คือ $0.0283 \text{ V}/\%$ หรือ $28.3 \text{ mV}/\%$

4.3 ผลการทดสอบของหน้าแสดงผลของระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงรูปแบบการแสดงผลค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การโต้ตอบในรูปแบบต่าง ๆ ของระบบที่พัฒนาขึ้นต่อผู้ใช้งาน โดยอัลกอริทึมที่สร้างจากชุดคำสั่งทั้งโปรแกรมภาษา HTML, PHP, และ JavaScript ซึ่งมีรูปแบบในการแสดงผลดังต่อไปนี้

โปรแกรมเริ่มจากหน้าแรก ซึ่งเป็นหน้าการยืนยันตัวตนด้วยการป้อนชื่อผู้ใช้งาน (Username) และรหัสผ่าน (Password) โดยผู้ที่สามารถใช้งานระบบได้จะต้องเป็นผู้ที่ได้รับอนุญาตจากผู้ดูแลระบบให้ใช้งานได้เท่านั้น หน้าแสดงผลการรับชื่อผู้ใช้งานและรหัสผ่าน แสดงดังรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.5 หน้าแสดงผลแรกสำหรับป้อนชื่อผู้ใช้งาน และรหัสผ่านเพื่อเข้าใช้งานระบบ

ระบบแสดงผลจะเริ่มจากหน้าแสดงผลชื่อ index.php เป็นหน้าแสดงผลในการรับค่าชื่อผู้ใช้งาน และรหัสผ่าน สำหรับผู้ที่ต้องการใช้งานระบบ และผู้ใช้งานต้องมีข้อมูลชื่อผู้ใช้งาน และรหัสผ่านอยู่ในฐานข้อมูลแล้วเท่านั้น ถึงจะใช้งานระบบได้ ในหน้าแสดงผลจะมีอัลกอริทึมในการรับชื่อผู้ใช้งาน และรหัสผ่าน ดังนี้

Username: </td><td><input type="text" name="username" value="">

Password:</td><td><input type="password" name="password" value="">

ชุดคำสั่ง Tag input หรือ <input> จะทำหน้าที่ในการรับค่าอินพุตที่ถูกกำหนดให้เป็นค่าชื่อผู้ใช้งาน ซึ่งลักษณะการรับค่าจะเป็นช่องให้กรอกข้อมูลโดย type="text" จะกำหนดให้การรับค่าเป็นแบบตัวหนังสือ ตัวเลขหรืออักขระพิเศษ และจะแสดงให้เห็นได้โดยปกติ ซึ่ง value="" จะเป็นตัวกำหนดให้ช่องรับค่าแสดงค่าปกติ หรือค่า Default หากไม่ได้กำหนดค่า เช่น "" แสดงว่าให้ช่องในการรับอินพุตแสดงช่องว่างเปล่า ไม่มีตัวอย่างอักขระหรือค่าปกติให้ผู้ใช้งานได้เห็นเป็นตัวอย่าง และในส่วนของการรหัสผ่าน อินพุตเป็นชนิด Password ซึ่งในขณะที่ผู้ใช้งานพิมพ์ตัวอักขระ ตัวเลขหรืออักขระพิเศษ ผู้ใช้งานจะเห็นเป็นจุดขึ้นตามจำนวนตัวอักษรของรหัสผ่านที่ใส่ไว้ และค่า value="" จะไม่มีตัวอย่าง หลังจากผู้ใช้กดปุ่ม Login อัลกอริทึมของหน้าแสดงผล index.php จะส่งทุกอย่างที่เป็นอินพุตทั้งชื่อผู้ใช้งานและรหัสผ่านไปยังหน้าแสดงผล validate.php เพื่อนำค่าที่ได้ไปประมวลผลต่อ

ทั้งนี้หน้าประมวลผล validate.php จะไม่แสดงผลในลักษณะรูปภาพ กับผู้ใช้งานระบบ (Graphical user interface: GUI) ใด ๆ หากค่าที่รับทั้งชื่อผู้ใช้งาน และรหัสผ่านนั้นมีรูปแบบที่ถูกต้องทุกอย่าง แต่ถ้าผู้ใช้งานใส่ชื่อผู้ใช้งานและรหัสผ่านผิด หรือข้อมูลที่ป้อนไม่ได้อยู่ในฐานข้อมูลผู้ใช้งานระบบ (admin) หน้าประมวลผล validate.php จะแสดงผลเป็นข้อความเพื่อแจ้งเตือน โดยชุดคำสั่งที่สำคัญในหน้าแสดงผล validate.php มีหลายส่วนด้วยกันสามารถอธิบายได้ดังนี้

```
$username=strtolower($_POST['password']);
```

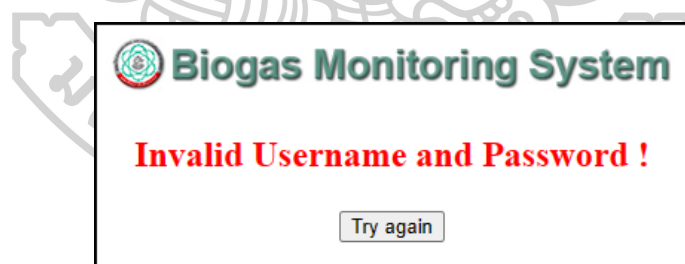
```
$password=base64_encode(strtolower($_POST['password']));
```

โดยในชุดคำสั่งทั้ง 2 บรรทัดนี้เป็นการรับค่าอินพุตจากหน้าแสดงผล index.php ที่มีการส่งข้อมูลเป็นแบบ Post แล้วทำการแปรทุกตัวอักษรให้เป็นตัวอักษรพิมพ์เล็กด้วยฟังก์ชัน strtolower() เพื่อป้องกันผู้ใช้งานป้อนชื่อผู้ใช้งานและรหัสผ่านผิด โดยในส่วนของการรับค่ารหัสผ่านเข้าตัวแปรจะเพิ่มฟังก์ชัน base64_encode เพื่อทำการใส่รหัสให้กับค่าอินพุตที่ผู้ใช้ระบบทำการกรอกเข้ามา เนื่องจากในการตรวจสอบกับฐานข้อมูลผู้ใช้งานระบบ (admin) ได้มีการเข้ารหัสด้วยการใช้ฟังก์ชัน base64_encode ป้องกัน ในกรณีที่ฐานข้อมูลถูกจารกรรม ทั้งนี้โครงสร้างของฐานข้อมูลผู้ใช้งานระบบดังแสดงในรูปที่ 4.6

Name	Type	Collation
name	varchar(30)	utf8_unicode_ci
surename	varchar(30)	utf8_unicode_ci
username	varchar(10)	utf8_unicode_ci
password	varchar(50)	utf8_unicode_ci
position	varchar(20)	utf8_unicode_ci
priority	int(1)	

รูปที่ 4.6 โครงสร้างฐานข้อมูลผู้ใช้งานระบบ (admin)

ภายในโครงสร้างฐานข้อมูล มีข้อมูล priority หรือความสำคัญของผู้ใช้งาน ที่เก็บข้อมูลเป็นตัวเลข 0 กับ 1 โดยกำหนดความสำคัญของผู้ใช้งานระบบมีค่าเป็น 0 ที่เป็นผู้ใช้งานระดับทั่วไป (User) หากความสำคัญของผู้ใช้งานระบบมีค่าเท่ากับ 1 จะเป็นผู้ใช้งานระดับผู้ดูแลระบบ (Administrator) ซึ่งหลังจากที่ได้ตัวแปรที่เก็บค่าทั้งรหัสผู้ใช้งานและรหัสผ่าน อัลกอริทึมในหน้าแสดงผล validate.php จะนำตัวแปรทั้งสองค่าไปค้นหาข้อมูลในฐานข้อมูลผู้ใช้งานระบบ (admin) หากการค้นหาข้อมูลทั้งชื่อผู้ใช้งานและรหัสผ่านไม่พบ จะมีข้อความแจ้งเตือนปรากฏข้อความดังรูปที่ 4.7

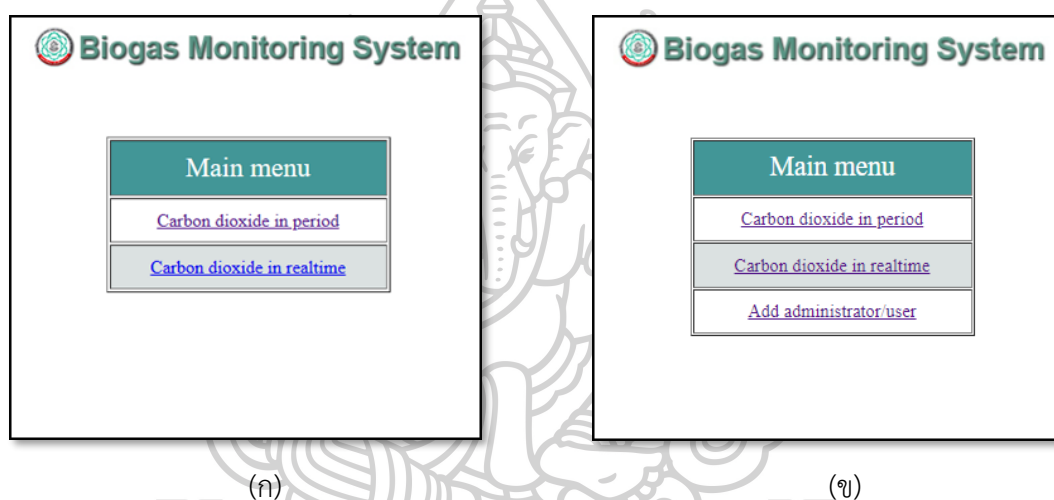


รูปที่ 4.7 ข้อความแจ้งเตือนหากผู้ใช้งานระบบป้อนข้อมูลชื่อผู้ใช้งาน และรหัสผ่านไม่ถูกต้อง

การแสดงผลข้อความแจ้งเตือนดังกล่าวเป็นอัลกอริทึมของหน้าแสดงผล validate.php และจะมีปุ่มลองใหม่ (Try again) เพื่อนำผู้ใช้งานกลับไปใส่ชื่อผู้ใช้งานระบบและรหัสผ่านที่หน้าแสดงผล index.php ใหม่ แต่ถ้าหากผู้ใช้งานระบบมีการใส่ชื่อผู้ใช้งาน และรหัสผ่านถูกต้อง อัลกอริทึมภายในหน้าแสดงผล validate.php จะทำงานดังชุดคำสั่งต่อไปนี้

```
$_SESSION['priority'] = $dbarr['priority'];
```

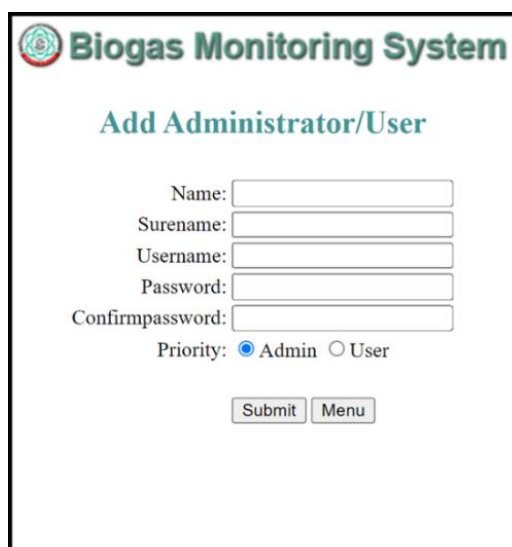
เป็นการประกาศตัวแปรระบบที่ชื่อ priority ที่ใช้งานได้ทั้งนำประมวลผล และหน้าแสดงผลภายในระบบ โดยตัวแปรนี้เก็บตัวเลข 0 หรือ 1 เพื่อบอกว่าผู้ใช้งานอยู่เป็นผู้ใช้งานระดับใด หน้าแสดงผลเมนูหลัก (menu.php) จะทำการดึงค่าตัวแปรของระบบ (priority) ด้วยการเปิดใช้ฟังก์ชัน session_start() ซึ่งเป็นฟังก์ชันของโปรแกรมภาษาพีเอชพี (PHP) ทำการดึงค่าความสำคัญของผู้ใช้งานระบบให้เป็นตัวแปรในหน้าแสดงผลเมนูหลักที่ชื่อ \$priority หากตัวแปร \$priority มีค่าเท่ากับ 0 จะเป็นหน้าแสดงผลเมนูหลักดังรูปที่ 4.8(ก) และหากตัวแปร \$priority เท่ากับ 1 อัลกอริทึมของหน้าแสดงผลเมนูหลักดังรูปที่ 4.8(ข)



รูปที่ 4.8 หน้าแสดงผลเมนูหลัก; (ก) เมนูหลักสำหรับผู้ใช้งานทั่วไป (ข) เมนูหลักสำหรับผู้ดูแลระบบ

จากรูปที่ 4.8 เป็นหน้าแสดงผลเมนูหลัก โดยอัลกอริทึมจะทำการแสดงเมนูเพิ่มในส่วนของผู้ใช้งานระบบ (Add administrator/user) ซึ่งสามารถกำหนดได้ว่าผู้ใช้งานที่ต้องการเพิ่มเป็นผู้ใช้งานระดับใด เป็นผู้ใช้งานระบบระดับผู้ใช้งานทั่วไป หรือผู้ใช้งานระบบในระดับผู้ดูแลระบบ หากตัวแปร \$priority มีค่าเท่ากับ 1 จะทำการเพิ่มเมนู Add administrator/user ตามรูปที่ 4.8(ข)

เมื่อผู้ใช้งานระบบระดับผู้ดูแลกดที่เมนู Add administrator/user อัลกอริทึมจะทำการเปิดหน้าแสดงผล addadmin.php ขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 4.9



Biogas Monitoring System

Add Administrator/User

Name:

Surname:

Username:

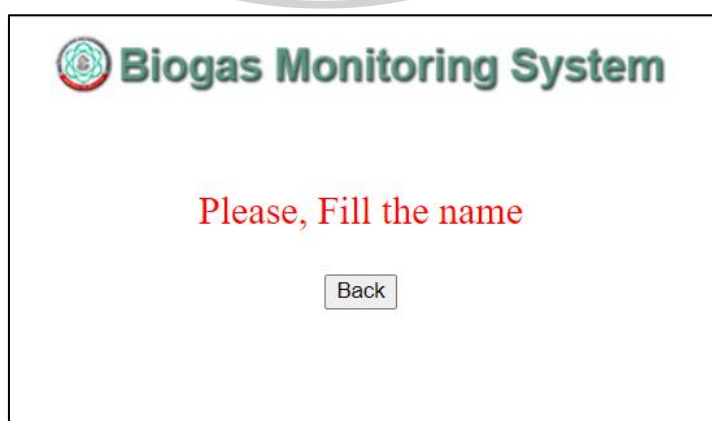
Password:

Confirm password:

Priority: Admin User

รูปที่ 4.9 หน้าแสดงผลของการเพิ่มผู้ใช้งานระบบ (addadmin.php)

หน้าแสดงผล addadmin.php ประกอบด้วยอัลกอริทึมในการรับค่าอินพุต ทั้งชนิดตัวอักษร (Text) และชนิดรหัส (Password) รวมทั้งมีการเก็บค่าอินพุต แบบตัวเลือกเดียว (Radio button) เพื่อกำหนดระดับผู้ใช้งานระบบที่สร้างใหม่ว่าเป็นผู้ใช้งานระบบระดับใด เมื่อได้ทำการกรอกข้อมูลจนครบแล้วทำการกดส่งข้อมูลด้วยปุ่ม Submit อัลกอริทึมจะทำการส่งค่าอินพุตที่ได้ทำการกรอกจากผู้ใช้งานไปยังหน้าประมวลผล insertadmin.php พร้อมกับการกระบวนการในการจัดการความผิดพลาด (Error handling) ที่เกิดขึ้นจากการกรอกข้อมูลของผู้ใช้งานระบบ ทั้งการกรอกข้อมูลที่ผิดพลาดหรือไม่ครบถ้วน รวมถึงการกรอกข้อมูลรหัสผ่าน (Password) และข้อมูลยืนยันรหัสผ่าน (Confirm password) ไม่ตรงกัน โดยการแจ้งเตือนจะเป็นการแสดงผลประเภทความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้น ๆ ดังรูปที่ 4.10



Biogas Monitoring System

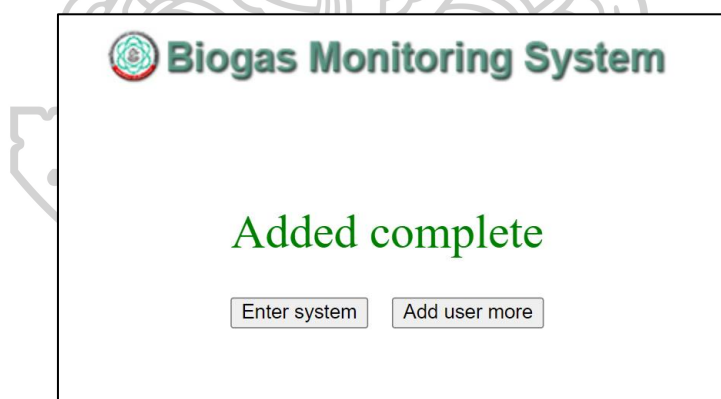
Please, Fill the name

รูปที่ 4.10 ตัวอย่างการแจ้งเตือนความผิดพลาดจากหน้าประมวลผล insertadmin.php

จากรูปที่ 4.10 เป็นตัวอย่างของหน้าการแสดงผลข้อความจากระบบการจัดการข้อผิดพลาด (Error handling) จากรูปเป็นข้อความแจ้งเตือนในกรณีที่ผู้ใช้งานระบบ ไม่ได้กรอกข้อมูลชื่อของผู้ใช้งานใหม่ และมีปุ่ม Back เพื่อให้ผู้ใช้งานระบบได้ทำการกลับมาใส่รายละเอียดหรือแก้ไขข้อมูลให้ถูกต้องใหม่ หากอัลกอริทึมภายในหน้าประมวลผล insertadmin.php ได้ทำการจัดการข้อผิดพลาดกับตัวแปรทั้งหมดที่ได้รับค่าจากอินพุตที่ส่งมาจากหน้า addadmin.php ทุกค่า แล้วไม่พบข้อผิดพลาดใด ๆ อัลกอริทึมจะทำการบันทึกตัวแปรทุกตัวนั้นเข้าสู่ฐานข้อมูลผู้ใช้งานด้วยชุดคำสั่งดังต่อไปนี้

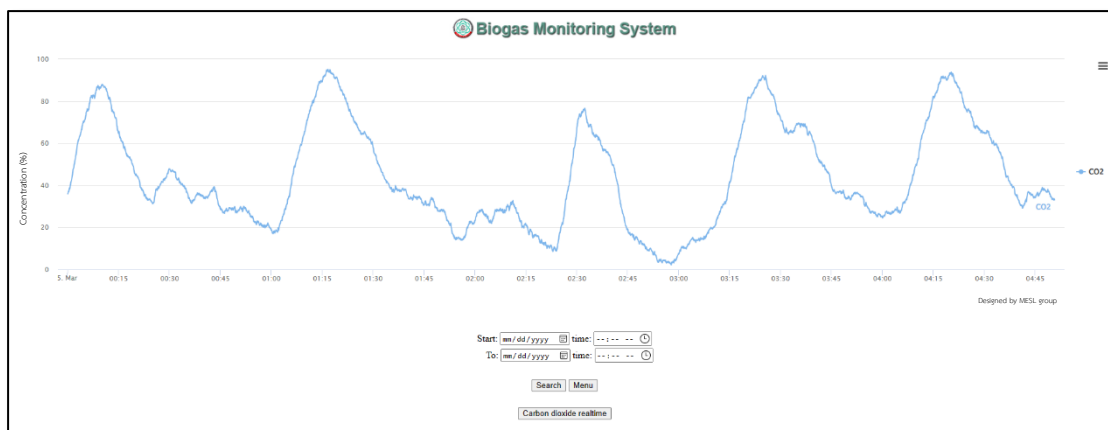
```
$sqlinsert="INSERT INTO admin (name,surname,username,password,priority)
VALUES ('$name','$surname','$username','$password','$priority');"
```

หลังจากอัลกอริทึมได้ทำการบันทึกค่าตัวแปรทั้งหมดเข้าสู่ฐานข้อมูลผู้ใช้งาน โปรแกรมจะทำการแสดงผลข้อความแจ้งว่าระบบได้ทำการบันทึกสำเร็จ (Add complete) และมีปุ่มให้เลือกทำการ ทั้งปุ่มเข้าสู่ระบบ (Enter system) เพื่อเข้าสู่หน้าแสดงผล index.php สำหรับยืนยันตัวตน ด้วยชื่อผู้ใช้และรหัสผ่าน ที่สร้างขึ้นใหม่ และปุ่มสำหรับสร้างผู้ใช้งานระบบเพิ่ม (Add user more) ตามรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 หน้าแสดงผลแจ้งข้อความในการเพิ่มผู้ใช้งานสำเร็จ

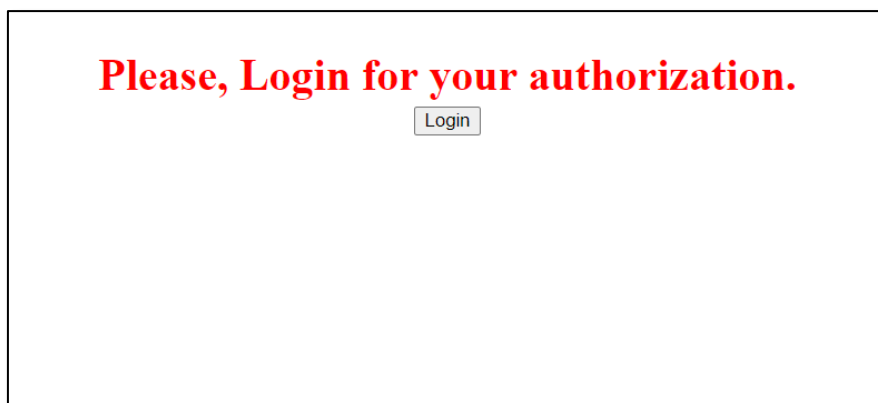
เมื่อผู้ใช้งานผ่านหน้าแสดงผล index.php ด้วยการใส่ข้อมูลที่ถูกต้องทั้งชื่อผู้ใช้งานและรหัสผ่าน สำเร็จระบบจะแสดงหน้าเมนูหลักขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยในหน้าเมนูหลักจะมีปุ่มเพื่อแสดงผลกราฟของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในรูปแบบกำหนดช่วงเวลา (Carbon dioxide in period) ด้วยหน้าแสดงผล co2chart.php ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 หน้าแสดงผลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบกำหนดช่วงเวลา

จากรูปที่ 4.12 เป็นการแสดงผลค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบกำหนดช่วงเวลาที่ต้องการให้แสดงผลได้ โดยภายใต้กราฟค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีช่องรับอินพุตที่สร้างจากแท็กอินพุตชนิดวันที่ (Date) และแท็กอินพุตชนิดเวลา (Time) โดยในหน้าแสดงผลจะมีตัวเลือกในส่วนของวันที่ เวลาในการเริ่มค้นหา และตัวเลือกวันที่ เวลาสุดท้ายที่ต้องการค้นหา

หน้าแสดงผลทั้งหมดของวิทยานิพนธ์นี้จะไม่สามารถเข้าได้โดยตรงจากตำแหน่งหน้าแสดงผล (Uniform resource locator: URL) ด้วยการคัดลอกชื่อ URL จากระบบที่ได้แสดงผลจากโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ไปแล้ว จากนั้นให้เว็บเบราว์เซอร์ทำการเปิดหน้า URL ของระบบที่ได้คัดลอกมา หรือจากประวัติการใช้งานผ่านโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ ซึ่งเป็นวิธีเข้าใช้งานระบบที่ไม่ถูกต้อง ดังนั้นเพื่อป้องกันการเข้าใช้ระบบที่ไม่ถูกต้องดังที่ได้กล่าวมา วิทยานิพนธ์นี้จะใช้ความสามารถของโปรแกรมภาษาพีเอชพี (PHP) ซึ่งเป็นโปรแกรมภาษาที่สามารถป้องกันการเข้าใช้งานระบบที่ไม่ถูกต้อง เนื่องจากโปรแกรมภาษาพีเอชพี มีฟังก์ชันที่สามารถรับ-ส่งตัวแปรระบบระหว่างหน้าได้ โดยค่าของตัวแปรระบบนี้จะเป็นตัวกำหนดสิทธิ์ในการเข้าใช้งาน หากผู้ใช้งานเรียกหน้าแสดงผลหรือหน้าประมวลผลภายในระบบขึ้นมาโดยไม่ได้มีการยืนยันตัวตนจากหน้าแสดงผล index.php หน้าแสดงผลหรือหน้าประมวลผลนั้น ๆ จะเริ่มต้นตรวจสอบตัวแปรระบบก่อน เพื่อตรวจสอบสิทธิ์การเข้าถึงระบบ เมื่อหน้าแสดงผลหรือหน้าประมวลผลทำการตรวจสอบแล้วพบว่าตัวแปรระบบไม่มีค่าใด ๆ ทั้ง 0 หรือ 1 แสดงว่าผู้ใช้งานไม่ได้ทำการยืนยันตัวตนจากหน้าแสดงผล index.php หน้าแสดงผลหรือหน้าประมวลผลนั้น ๆ จะทำการแจ้งข้อความเตือน ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 หน้าแสดงผลสำหรับแจ้งเตือนให้ผู้ใช้งานทำการยืนยันตัวตนเพื่อใช้งานระบบ

ภายในหน้าแสดงผล และหน้าประมวลผลทุกหน้าของระบบจะมีอัลกอริทึมที่ประกอบด้วยชุดคำสั่ง (Source code) ที่สำคัญเพื่อการตรวจสอบตัวแปรระบบสำหรับตรวจสอบสิทธิ์หรือระดับในการเข้าใช้ระบบดังนี้

```
session_start( );
```

เป็นการเรียกใช้ฟังก์ชันเพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบตัวแปรระบบ

```
@$priority=$_SESSION['priority'];
```

เป็นการตั้งค่าตัวแปรระบบให้อยู่ในตัวแปรชื่อ \$priority

```
if($priority=="")
```

เป็นเงื่อนไขสำหรับตรวจสอบว่าตัวแปรระบบมีค่าหรือไม่ หากตัวแปรระบบมีค่าเท่ากับว่างเปล่าแสดงว่าเงื่อนไขนี้เป็นจริง

```
{
```

```
echo "Please, Login for your authorization <input type='button'
```

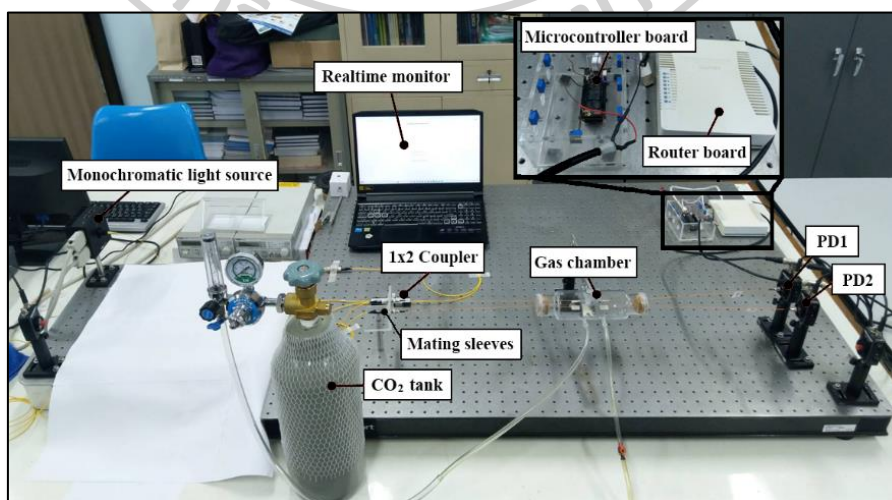
```
onClick=location.href='index.php' value='Login'>";
```

เป็นการสั่งให้ระบบแสดงข้อความแจ้งเตือนผู้ใช้งานให้ทำการยืนยันตัวตนก่อนการใช้งานระบบ แล้วแสดงปุ่ม "Login" ให้ผู้ใช้งานกด เพื่อแสดงหน้าแรกของระบบ (index.php) เพื่อทำการยืนยันตัวตนก่อนการใช้งาน

```
}
```

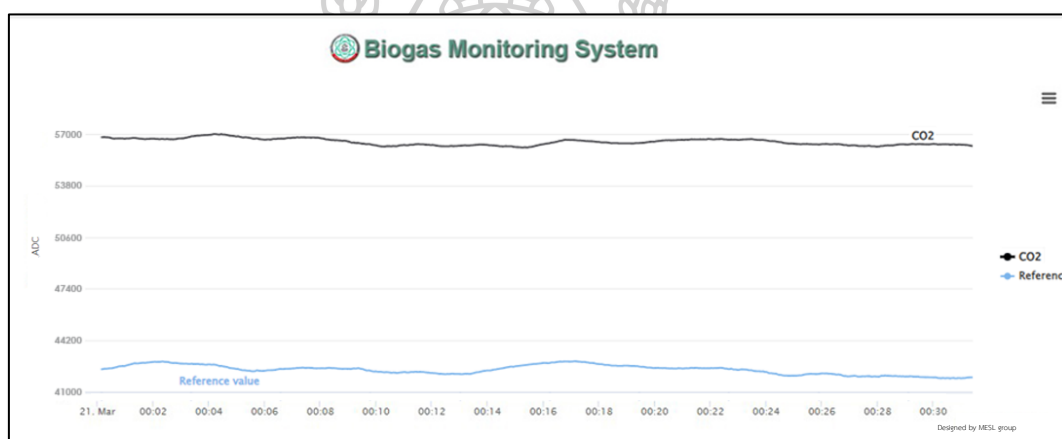
4.4 ผลการทดสอบการต่อร่วมกับตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบโดยนำชุดตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพต้นทางต่อร่วมกับตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์ โดยการติดตั้งอุปกรณ์เริ่มจากอุปกรณ์ปล่อยแสงเชิงเดี่ยว (Monochromatic light source) ปล่อยแสงเข้าที่สายไฟเบอร์พิกเทล (Fiber pigtail cord) ที่ได้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์แยกแสงแบบแสงเข้า 1 เส้น แสงแยกออก 2 เส้น (1x2 Coupler) ด้วยตัวเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง (Mating sleeves) ทั้งนี้แสงออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งต่อเข้ากับเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่เป็นค่าอ้างอิงและส่วนที่สองถูกต่อเข้ากับเส้นใยแก้วนำแสงที่มีการพอกสารซิงออกไซด์ (Zinc oxide: ZnO) โดยทั้งสองเส้นจะถูกติดตั้งในหลอดทดลอง (Gas chamber) ที่สามารถทำการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และกักเก็บได้ โดยด้านหนึ่งของหลอดทดลองจะมีช่องที่ต่อสายยางเพื่อปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้า และอีกช่องหนึ่งจะเป็นช่องสำหรับระบายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกที่ต่อกับภาชนะกักเก็บเพื่อนำไปกำจัดต่อไป ส่วนปลายเส้นใยแก้วทั้งเส้นที่กำหนดเป็นค่าอ้างอิง (Reference) และเส้นตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ZnO sensing) ได้ทำการต่อเข้ากับอุปกรณ์ตรวจวัดแสง (Photo detector: PD) ทั้ง 2 ตัว เพื่อทำหน้าที่แปลงความเข้มแสงจากเส้นใยแก้วทั้งสองเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแล้วป้อนเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดที่เชื่อมต่อกับโมดูลสื่อสารหรือราวเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่ส่งข้อมูลเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายหลังจากการทำโครงข่ายส่วนตัวเสมือนสำเร็จ และมีเครื่องคอมพิวเตอร์บุคคล (Personal computer: PC) หรือเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Laptop) สำหรับดูกราฟการแสดงผลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเรียลไทม์ผ่านโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ (Web browser) โดยการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.14




รูปที่ 4.14 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับตรวจจับก๊าซชีวภาพ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์ (FOR) สำหรับตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสารประกอบที่นำมาพอกในจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงเป็นสารซิงออกไซด์ (ZnO) ทั้งนี้ในการแสดงผลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านทางโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์จะเป็นหน้าแสดงผล gasrealtime.php ที่ดึงข้อมูลทั้งค่าอ้างอิง (Reference) และค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากฐานข้อมูลชั่วคราวมาแสดงทันทีที่มีข้อมูลเข้ามาใหม่ โดยกำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดส่งข้อมูลทุก 1 ms ด้วยฟังก์ชันหน่วงเวลา delay(1) หน้าประมวลผล getData2.php จะทำหน้าที่ดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลชั่วคราวแล้วทำการส่งข้อมูลที่เข้ามาใหม่ให้กับหน้าแสดงผล gasrealtime.php เพื่อแสดงผลค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ แสดงในรูปที่ 4.15



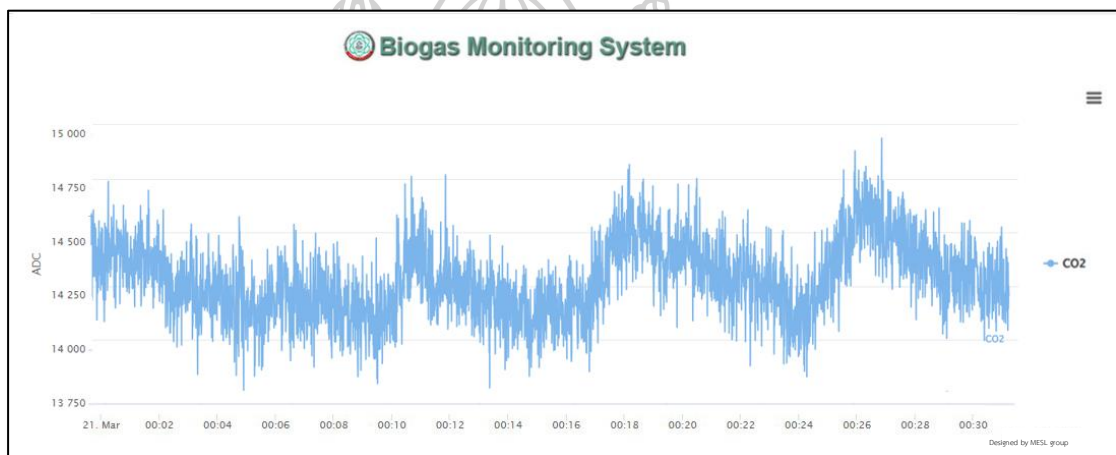
รูปที่ 4.15 หน้าแสดงผลที่แสดงค่าสัญญาณดิจิทัลทั้งค่าอ้างอิงและค่าคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.15 เป็นหน้าแสดงผลที่แสดงค่าสัญญาณดิจิทัล ที่ได้จากฟังก์ชันการแปลงค่าสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC) ทำการแปลงได้ทั้งค่าสัญญาณดิจิทัลอ้างอิง (Reference) และค่าสัญญาณดิจิทัลของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่จ่ายเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นต้องทำการหาค่าความแตกต่างแรงดันไฟฟ้า (ΔV) โดยนำค่าสัญญาณดิจิทัลอ้างอิง (Reference) และค่าสัญญาณดิจิทัลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทำการลบกันเพื่อให้เห็นถึงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นจึงต้องทำการเพิ่มชุดคำสั่งในหน้าประมวลผล gas.php เพื่อเพิ่มตัวแปรในการจัดเก็บค่าความต่างแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นในฐานข้อมูลชั่วคราว (gas_temp) จึงต้องเพิ่ม Field ในการเก็บข้อมูลสำหรับค่า co2_deltav ด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.16

Name	Type	Collation	Attributes	Null	Default	Comments	Extra
id 	int(8)			No	None		AUTO_INCREMENT
ref	int(5)			No	None		
co2	int(5)			No	None		
co2_delta	int(5)			No	None		

รูปที่ 4.16 ฐานข้อมูลชั่วคราวที่เพิ่ม co2_deltav

โดยในหน้าแสดงผลของ gasrealtime.php จะดึงค่า co2_deltav มาแสดง ดังรูปที่ 4.17



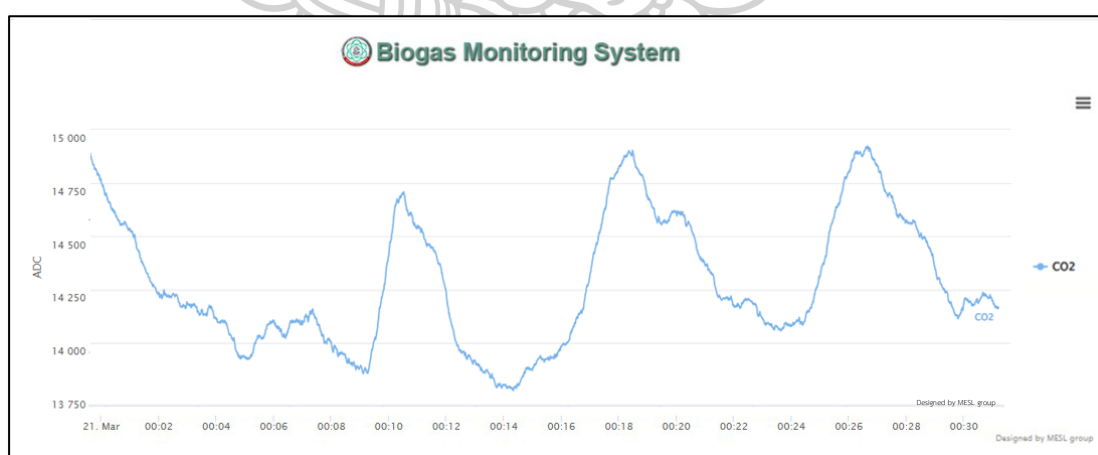
รูปที่ 4.17 หน้าแสดงผล gas_realtime.php แสดงค่า co2_deltav

จากรูปที่ 4.17 เป็นกราฟที่แสดงผลค่า co2_deltav โดยในภาพจะเห็นความเปลี่ยนแปลงจากรูปที่ 4.16 ในรูปที่ 4.17 ยังไม่สามารถอ่านความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ เนื่องจากมีสัญญาณรบกวน (Noise) เป็นจำนวนมาก ดังนั้นวิธีการในการกำจัดสัญญาณรบกวนให้น้อยลงคือ ต้องนำข้อมูลที่ได้มาทำการกรองข้อมูล (Filter) ด้วยการใช้เทคนิคการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average) โดยการนำข้อมูล co2_deltav มาทำการหาค่าเฉลี่ย ทั้งนี้ข้อมูลที่นำมาหาค่าเฉลี่ยมีจำนวนมากจะทำให้กราฟมีสัญญาณรบกวนน้อยลง เช่น หากนำข้อมูล co2_deltav จำนวน 400 ข้อมูล มาทำการกรองข้อมูลด้วยเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่จะสามารถลดสัญญาณรบกวนของกราฟได้มากกว่าการทำการกรองข้อมูล co2_deltav เป็นจำนวน 100 ข้อมูล ดังนั้นอัลกอริทึมที่สร้างขึ้นจะถูกกำหนดให้ทำการกรองข้อมูลด้วยการใช้เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่จำนวน 400 ข้อมูล เพื่อลดสัญญาณรบกวนให้มากที่สุด และจากความต้องการดึงข้อมูลที่มีจำนวนถึง 400 ข้อมูล และต้อง

ดึงชุดข้อมูลตามข้อมูลใหม่ที่เข้ามาให้ได้ 400 ข้อมูล ทำให้ฐานข้อมูลชั่วคราว (gas_temp) ไม่เหมาะสมในการนำข้อมูลมาใช้ เนื่องจากฐานข้อมูลชั่วคราวต้องลบออกทั้งหมดหลังจากการหาค่าเฉลี่ยแล้วทำการบันทึกเข้าฐานข้อมูลหลัก (gas_db) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างฐานข้อมูลขึ้นใหม่เพื่อเก็บข้อมูลจากชุดตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางโดยไม่มีการลบข้อมูลจากฐานข้อมูล ทั้งนี้ในการสร้างฐานข้อมูลใหม่จะกำหนดชื่อ gas_realtime ที่มีโครงสร้างของฐานข้อมูลเช่นเดียวกับกับฐานข้อมูลชั่วคราว (gas_temp) โดยชุดคำสั่งในหน้าแสดงผล gas_realtime.php จะมีการสร้างอัลกอริทึมสำหรับการกรองข้อมูลด้วยเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่จำนวน 400 ข้อมูล ด้วยชุดข้อมูลดังต่อไปนี้

```
$sql = "SELECT AVG(co2_deltav) FROM gas_realtime LIMIT $startid,400);
```

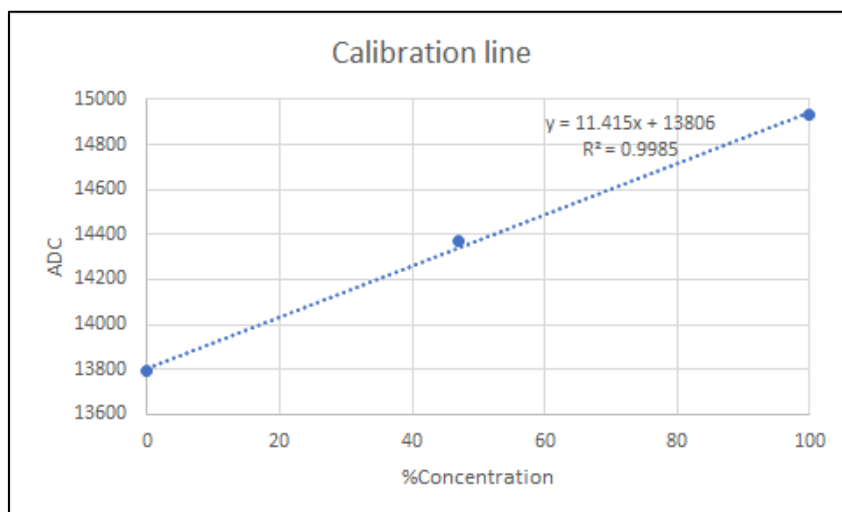
จากชุดคำสั่งเป็นการดึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยฟังก์ชัน AVG () ซึ่งเป็นฟังก์ชันตัวเลือกเพิ่มเติมของคำสั่ง SELECT ที่เป็นคำสั่งของโปรแกรม MySQL ฟังก์ชันจะทำการคำนวณค่าเฉลี่ยข้อมูล co2_deltav ตั้งแต่ \$startid เรื่อยไปจนครบ 400 ข้อมูล ตัวอย่างเช่น ถ้าตัวแปร \$startid เท่ากับ 100 โปรแกรมก็จะทำการหาค่าเฉลี่ยข้อมูลถัดไปจนครบ 400 คือข้อมูลที่ 500 และเมื่อโปรแกรมวนลูป ตัวแปร \$startid ก็จะเพิ่มอีก 1 เนื่องจากฐานข้อมูล gas_realtime มีข้อมูลที่บันทึกเข้ามาใหม่และเมื่อได้ตัวแปรที่ผ่านการกรองข้อมูลด้วยเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ทำให้ได้กราฟแสดงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีสัญญาณรบกวนของเส้นกราฟน้อยลง ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังกรองสัญญาณ

จากนั้นทำการเปลี่ยนค่าที่แกน Y จากค่าสัญญาณดิจิทัล (ADC) โดยการทำเส้นกราฟมาตรฐาน (Calibration line) โดยนำค่า ADC สูงที่สุด (Max.) ที่มีค่า 14935 ค่าต่ำสุด (Min.) ที่มีค่า 13806

และค่าระหว่างกลาง (Mean) ที่มีค่าเท่ากับ 14380 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเส้น เพื่อให้ได้สมการความเป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 การทำเส้นกราฟมาตรฐานเพื่อหาสมการเชิงเส้น

จากรูปที่ 4.19 การทำเส้นกราฟมาตรฐานทำให้ได้สมการสำหรับหาค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังนี้

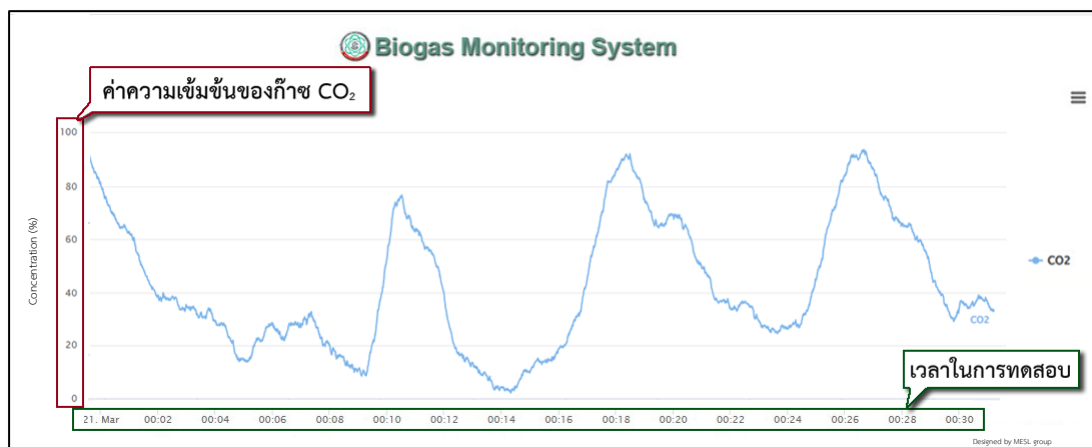
$$X = \frac{ADC - 13806}{11.415} \quad (4.2)$$

โดย ADC คือ ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการหาเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น

เมื่อได้สมการสำหรับหาค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว จากนั้นทำการเพิ่มชุดคำสั่งในหน้าแสดงผล `gas_realtime.php` ดังนี้

$$\$co2_concentraiton = (\$co2_filter - 13806) / 11.415$$

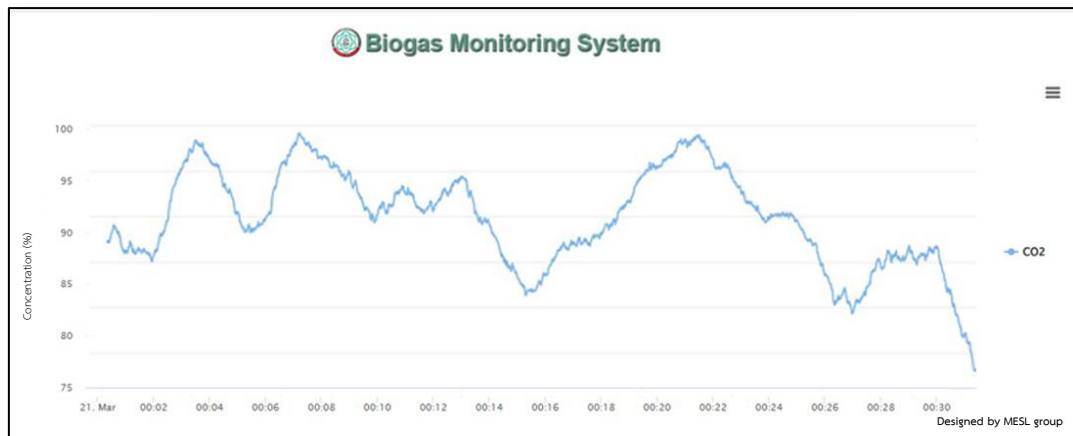
จากชุดคำสั่งเป็นการกำหนดตัวแปร \$co2_concentration ขึ้นมาใหม่เพื่อเก็บค่าตัวแปร \$co2_filter ที่ทำการลบด้วยค่า 13806 แล้วทำการหารด้วยค่า 11.415 จากนั้นนำตัวแปร \$co2_concentration มาพลอตกราฟเพื่อแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ตัวอย่างกราฟแสดงผลค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเรียลไทม์

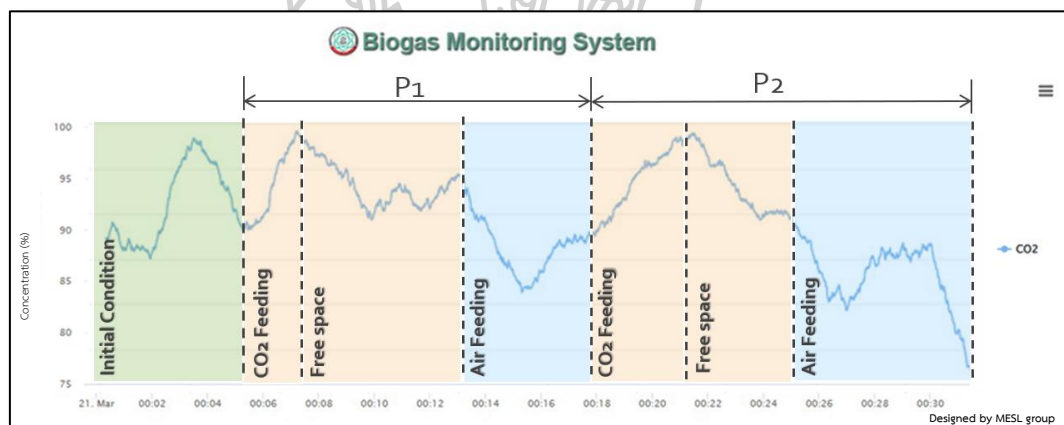
ส่วนหน้าแสดงผลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบกำหนดช่วงเวลา จะไม่มี อัลกอริทึมในการกรองข้อมูลเพื่อลดความซ้ำซ้อน เนื่องจากขั้นตอนก่อนการบันทึกค่าอ้างอิง (reference) และค่าสัญญาณดิจิทัลของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ลงในฐานข้อมูลหลัก อัลกอริทึมในหน้าประมวลผล gas.php จะทำการดึงข้อมูลทั้งหมดจากฐานข้อมูลชั่วคราว (gas_temp) มาทำการหาค่าเฉลี่ยแล้วทำการบันทึกเข้าฐานข้อมูลหลัก (gas_db) ดังนั้นในหน้าแสดงผลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบกำหนดช่วงเวลาจึงไม่จำเป็นต้องทำการกรองข้อมูลด้วยเทคนิค ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average)

จากการแก้ปัญหาข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้วจนสามารถพลอตกราฟแบบเรียลไทม์และสามารถบอกความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 100% จากนั้นจึงทำการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากถังเก็บเข้าสู่หลอดทดลอง โดยกำหนดเวลาป้อน เวลาหยุด เวลาในการคงสถานะ เวลาดูก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากหลอดทดลองและเวลาคงสถานะหลังดูก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจนหมด จากนั้นจึงทำการป้อนก๊าซใหม่เพื่อทำซ้ำด้วยกรรมวิธีเดิม พร้อมทั้งจดเวลาในการทำทุกขั้นตอน เพื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาในแต่ละขั้นตอนกับกราฟที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการทดสอบดังกล่าวทำให้ได้กราฟความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ตัวอย่างกราฟความเข้มข้นด้วยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมทั้งบันทึกเวลาในการทดสอบ

โดยเมื่อนำเวลาในที่บันทึกไว้มาเปรียบเทียบกับกราฟความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รูปที่ 4.21 จะได้ข้อมูล ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ตัวอย่างกราฟความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบช่วงเวลา

จากรูปที่ 4.22 เป็นการเปรียบเทียบกราฟแสดงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับระยะเวลาที่ได้บันทึกไว้ในแต่ละขั้นตอน ทั้งการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่หลอดทดลอง การกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้คงสถานะไว้ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากหลอดทดลองและการคงสถานะ ที่ในหลอดทดลองไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยในรูปจะเห็นได้ว่าช่วงเวลาที่ทำการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่หลอดทดลอง (CO₂ Feeding) กราฟเรียลไทม์จะมีความเข้มข้นตามความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และจะลดลงทันทีหลังจากที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจาก ด้วยการปล่อยก๊าซภายนอกเข้ามา (Air feeding) แทนที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง ซึ่งมีการใช้องค์ประกอบหลายอย่างทำงานเข้าด้วยกัน ทั้งฮาร์ดแวร์ที่เป็นวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ เครื่องมือ อุปกรณ์สื่อสารที่ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูล รวมถึงตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์ที่ใช้สำหรับตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เพื่อใช้ในการต่อร่วมกับระบบที่พัฒนาขึ้น และซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับควบคุมหรือสั่งการไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด โปรแกรมประยุกต์สำหรับระบบจัดการฐานข้อมูล และหน้าแสดงผลต่าง ๆ โดยระบบถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นจุดเริ่มต้นสำหรับสร้างเครื่องมือเพื่อตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอนาคตที่มีความปลอดภัยสำหรับผู้ใช้งาน รวมถึงเพื่อใช้เป็นข้อมูลสารสนเทศสำหรับการประเมินก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ณ จุดที่ทำการตรวจวัด และเพื่อให้มีการพัฒนาต่อยอดสำหรับตรวจวัดก๊าซชีวภาพอื่น ๆ เช่น ก๊าซมีเทน (CH_4), ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S), ก๊าซไฮโดรเจน (H_2), ก๊าซไนโตรเจน (N_2) รวมถึงก๊าซชนิดอื่น ๆ ที่ตัวตรวจจับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์สามารถทำการตรวจวัดได้ เนื่องจากระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับตัวตรวจจับได้ถึง 8 ช่องสัญญาณอนาล็อก ซึ่งในการวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้สามารถสรุปผลการทดสอบของการพัฒนาระบบที่ได้กล่าวมาแล้วดังต่อไปนี้

5.1 การสรุปผลการวิจัย

5.2 ปัญหาในการวิจัย

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพในอนาคต

5.1 การสรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสรุปผลการวิจัยได้เป็น 4 ส่วน เนื่องจากการพัฒนาระบบจะถูกแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

5.1.1 สรุปผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1 เป็นขั้นตอนในการทดสอบเพื่อหาค่าความหน่วงแฝงของการส่งข้อมูลบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง โดยการส่งข้อมูลระหว่างระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางถึงเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายมีค่าความหน่วงแฝงอยู่ที่ 70 ms ตามมาตรฐานการรับ-ส่งข้อมูลบนโครงข่ายสัญญาณโทรศัพท์ 4G

5.1.2 เป็นขั้นตอนในการทดสอบหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง โดยค่าความไว (Sensitivity) ของระบบ จะเป็นการนำค่าแรงดันไฟที่แปลงจากค่าสัญญาณดิจิทัลที่บันทึกภายในฐานข้อมูลหลักและค่าความต้านทานจากตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ 100 โอห์ม ที่ป้อนให้กับแผงคอนโทรลเลอร์บอร์ด นำมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเส้นซึ่งผลการทดสอบพบว่าค่าดังกล่าวเท่ากับ $0.0277 \text{ V}/\Omega$ หรือ $27.7 \text{ mV}/\Omega$ และการนำค่าแรงดันไฟกระแสตรงจากตัวต้านทานปรับค่าได้ 100 โอห์ม ที่ป้อนเข้าสู่คอนโทรลเลอร์บอร์ดกับค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซ ทำให้ได้ค่าความไวอยู่ที่ $0.0283 \text{ V}/\%$ หรือ $28.3 \text{ mV}/\%$

5.1.3 เป็นขั้นตอนในการทดสอบระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง ที่มีการต่อร่วมกับตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์สำหรับตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะเป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาคุณสมบัติของกราฟในขณะที่ทำการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่หลอดทดลอง (Chamber) และการระบายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากหลอดทดลอง โดยกราฟเรียลไทม์ที่แสดงในช่วงแรกจะเป็นการแสดงกราฟของค่าอ้างอิง (Reference) และค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีความต่างของค่าทั้งสอง จากนั้นจึงทำการหาค่าความต่างของแรงดันไฟฟ้าหรือค่าเดลต้า (ΔV) จึงทำให้กราฟมีการเปลี่ยนแปลง แต่ยังไม่สามารถอ่านค่าได้ เนื่องจากกราฟมีสัญญาณรบกวน (Noise) สูงจนทำให้ไม่สามารถอ่านค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ จึงได้ทำการกรองข้อมูล (Filter) ด้วยเทคนิคแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average) เพื่อลดสัญญาณรบกวนของกราฟลงจนทำให้อ่านค่ากราฟได้เป็นปกติ จากนั้นทำการแปลงค่าสัญญาณดิจิทัลให้เป็นค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามแนวแกน Y จากนั้นทำการสร้างอัลกอริทึมในหน้าแสดงผลเพื่อแสดงค่าแกน Y ให้เป็นเปอร์เซ็นต์ตั้งแต่ 0-100% ด้วยการนำค่าสัญญาณดิจิทัลที่มีค่าต่ำสุด (Min.) ซึ่งมีค่า 13793 ค่าสัญญาณดิจิทัลสูงสุด (Max.) คือ 14935 และค่าสัญญาณดิจิทัลระหว่างกลาง (Mean) คือ 14380 นำมาทำการหาสมการความเข้มข้นด้วยวิธีการทำเส้นกราฟมาตรฐาน (Calibration line) ทำให้ได้สมการดังนี้

$$\text{CO}_2 \text{ Concentration (\%)} = (\text{ADC} - 13806) / 11.415$$

จากสมการดังกล่าวทำให้กราฟแสดงผลค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเปอร์เซ็นต์แบบเรียลไทม์สมบูรณ์ จากนั้นนำตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์สำหรับตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเส้นใยแก้วนำแสงอ้างอิง (Reference) ที่อยู่ภายในหลอดทดลอง (Chamber) ทำการต่อร่วมกับชุดตัวตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง จากนั้นทำการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การคงสถานะของก๊าซที่อยู่ในหลอดทดลอง การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ออกจากหลอดทดลอง และการคงสถานะของหลอดทดลองที่ไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหลืออยู่ตามลำดับและทำซ้ำด้วยขั้นตอนเดิมอีกหนึ่งรอบ พร้อมทั้งจดเวลาทุกขั้นตอนแล้วทำการเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้ ทำให้ทราบถึงตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์ที่มีสารซิงออกไซด์ (ZnO) เป็นตัวตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีการตอบสนองกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งที่พัฒนาขึ้น ยังแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเรียลไทม์ได้เช่นกัน สังเกตได้จากการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าหลอดทดลองเส้นกราฟจะชันขึ้น หากปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากหลอดทดลองเส้นกราฟจะมีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

5.1.4 เป็นการแสดงผลหน้าแสดงผลในรูปแบบเว็บไซต์ บนโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ โดยระบบแสดงผลที่พัฒนาขึ้นมา สามารถแสดงผลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเรียลไทม์ได้ และสามารถหาค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบกำหนดช่วงเวลาได้เช่นกัน ซึ่งรูปแบบในการตอบสนองการใช้งานระบบต่อผู้ใช้งาน (Graphical user interface: GUI) มีลักษณะในการใช้งานที่ง่ายไม่ซับซ้อน

5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย

ในการสร้างระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบเรียลไทม์บนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่เป็นโปรแกรมประยุกต์ต่าง ๆ หรือซอฟต์แวร์ และส่วนที่เป็นเครื่องมือ อุปกรณ์ต่าง ๆ หรือฮาร์ดแวร์ ที่ใช้ทั้งในส่วนของผู้ตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทาง และชุดอุปกรณ์เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย โดยปัญหาในแต่ละส่วนสามารถแบ่งได้ดังนี้

5.2.1 โปรแกรมประยุกต์ต่าง ๆ หรือซอฟต์แวร์

- โปรแกรม Winbox ทำหน้าที่เป็นโปรแกรมสำหรับกำหนดค่าการเชื่อมต่อโครงข่ายส่วนตัวเสมือนของอุปกรณ์เราเตอร์ยี่ห้อ Router board มีความยากในการกำหนดค่า เนื่องจากเราเตอร์และโปรแกรม Winbox เป็นอุปกรณ์เฉพาะงานโทรคมนาคม หรืองานสื่อสาร จึงต้องทำการเรียนรู้เกี่ยวกับฟังก์ชัน และเมนูการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่ต้องเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด และ 3G Dongle รวมถึงการกำหนดค่าให้เป็นทั้งอุปกรณ์ที่ให้บริการโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (VPN server) และผู้ใช้บริการโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (VPN client)

5.2.2 อุปกรณ์เครื่องมือ หรือฮาร์ดแวร์

- โมดูลสื่อสาร ความไม่เสถียรของค่าความหน่วงแฝง (Latency time) ที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ 3G Dongle เชื่อมต่อกับเสาสัญญาณของโครงข่ายโทรศัพท์มือถือ (Cellular base) ที่ส่งผลให้การรับ-ส่งข้อมูลมีความไม่สม่ำเสมอขึ้นบ้าง สังเกตได้จากการใช้คำสั่ง Ping ในการหา

ค่าความหน่วงแฝง โดยมีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้ค่า Ping time มีความแตกต่างกัน ทั้งการแบ่งการใช้งานของช่องสัญญาณ (Bandwidth) ของผู้ใช้งานทั้งหมดภายในเสาสัญญาณของโครงข่ายมือถือ นั่น ๆ และช่วงเวลาในการใช้งาน รวมถึงระยะความห่างของอุปกรณ์ 3G Dongle กับเสาสัญญาณของโครงข่ายโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น

- ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์สำหรับตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (FOR) เป็นตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพที่สร้างจากเส้นใยแก้วนำแสงที่มีขนาดเล็ก และมีความเปราะบาง ทำให้การทดสอบต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพในอนาคต

ระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง เป็นระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยองค์ประกอบหลายอย่างเข้าด้วยกัน ดังนั้นข้อเสนอแนะจึงขอแสดงเป็นข้อได้ดังนี้

5.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด เป็นตระกูล Arduino รุ่น Portenta H7 ที่มีฟังก์ชันแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลหรือฟังก์ชัน Analog to digital converter: ADC เท่ากับ 16 บิต ที่สามารถให้ค่าดิจิทัลมากถึง 65535 หน่วย ดังนั้นจึงเหมาะกับการใช้งานสำหรับเครื่องวัดที่ต้องการความไว และความแม่นยำสูง แต่เนื่องจาก Portenta H7 ไม่มีพอร์ต หรือช่องทางสำหรับใช้ในการเชื่อมต่อกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแผงคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการเชื่อมต่อกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ในรูปแบบโปรโตคอลแบบควบคุมการส่งข้อมูล/ที่อยู่ไอพี (Transmission control protocol / Internet protocol: TCP/IP) ด้วยการเพิ่มแผงคอนโทรลเลอร์ Arduino Vision shield จะทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด Arduino Portenta H7 สามารถเชื่อมต่อโครงข่ายอินเทอร์เน็ตได้แต่ความกว้างในการส่งข้อมูล (Bandwidth) มีค่าเท่ากับ 100 Mbps ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์ภายในระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตส่วนใหญ่มีความกว้างของช่องสัญญาณเท่ากับ 1,000 Mbps แต่ด้วยขนาดของข้อมูลที่ส่งจากระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางมีขนาดที่น้อยกว่า 1 Mbps ทำให้การส่งข้อมูลเพียงพอ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการพัฒนาในอนาคตของนักวิจัยท่านอื่น ๆ ที่ต้องการนำระบบนี้ไปพัฒนาต่อ อาจเปลี่ยนบอร์ด Vision shield เป็นอุปกรณ์ต่อพ่วงแบบอื่นที่มีประสิทธิภาพในการรับ-ส่งข้อมูลที่ดีกว่าขึ้นอยู่กับการออกแบบของนักวิจัยและเทคโนโลยีที่เข้ากันได้ในการทำวิจัย

5.3.2 โมดูลสื่อสารของระบบที่พัฒนาขึ้นได้ใช้อุปกรณ์ราวเตอร์และซิม 4G สำหรับเชื่อมต่อโครงข่ายอินเทอร์เน็ตและการใช้เทคนิคโครงข่ายส่วนตัวเสมือน (Virtual private network: VPN) เพื่อความปลอดภัยในการส่งข้อมูล โดยการเซทอุปกรณ์เพื่อให้ทำงานร่วมกันระหว่างราวเตอร์และซิม 4G รวมถึงการเซทระบบโครงข่ายส่วนตัวเสมือนให้เชื่อมต่อกันได้ระหว่างราวเตอร์ที่คอมพิวเตอร์แม่ข่ายกับราวเตอร์ของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นทางนั้นมีความซับซ้อน

ค่อนข้างมากต้องใช้ทักษะเฉพาะด้าน ดังนั้นในอนาคตหากมีการพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง ซึ่งผู้ที่ทำการพัฒนาอาจจะไม่จำเป็นต้องใช้ราวเตอร์สำหรับการสร้างความปลอดภัยในการรับ-ส่งข้อมูลรวมถึงรูปแบบการส่งข้อมูลอาจใช้เทคนิคการส่งในรูปแบบอื่นที่มีความซับซ้อนของการปรับค่าระบบน้อยกว่า รวดเร็ว และเชื่อถือได้มากกว่าระบบโมดูลสื่อสารที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

5.3.3 โปรแกรมประยุกต์ต่าง ๆ ทั้งโปรแกรมจัดการฐานข้อมูลอย่างโปรแกรม MySQL โปรแกรมภาษา HTML, PHP และ JavaScript และนอกจากนี้ยังมีโปรแกรมสำหรับสร้างอัลกอริทึมอย่างเช่น โปรแกรม EditPlus โปรแกรมรวมอื่น ๆ เช่น Apache เป็นต้น โดยอัลกอริทึมทั้งหมดจะเป็นอัลกอริทึมของภาษาที่ทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรมภาษา HTML, PHP และ JavaScript ในทุกหน้า ซึ่งเป็นกลุ่มภาษาที่ผู้ทำวิจัยมีความชำนาญ และเป็นโปรแกรมภาษาที่ได้รับความนิยมในขณะนี้ รวมถึงโปรแกรมภาษาทั้ง 3 ล้วนเป็นภาษาที่สามารถทำการดาวน์โหลดมาใช้งานได้โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายใด ๆ ทำให้โปรแกรมทั้ง 3 มีผู้ใช้งานหลากหลายทำให้เกิดไลบรารีหรือฟังก์ชันการใช้งานใหม่ ๆ ให้ผู้พัฒนาโปรแกรมได้ใช้งานโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย ดังนั้นในอนาคตหากมีผู้ที่ต้องการพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง มีความถนัดในภาษาทั้ง 3 นี้ก็สามารถพัฒนาต่อเนื่องได้ทันที แต่หากผู้ที่ต้องการพัฒนาระบบต่อมีความสามารถด้านโปรแกรมภาษาอื่น ก็สามารถใช้โปรแกรมนั้น ๆ ทำการพัฒนาระบบต่อเนื่องได้เช่นกัน

ระบบแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง เป็นการพัฒนาระบบแสดงผลที่คำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้งาน ความสะดวก และต้นทุนที่ต่ำเพื่อใช้เป็นแนวคิด และเป็นต้นแบบในการสร้างระบบแสดงผล หรือผลิตเครื่องมือสำหรับใช้ในการตรวจวัดก๊าซชีวภาพในรูปแบบอุตสาหกรรม เพื่อลดต้นทุนในการนำเอาอุปกรณ์ตรวจวัดจากต่างประเทศที่มีราคาค่อนข้างสูง และส่งเสริมการใช้สินค้าภายในประเทศให้มากขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] N. Balagurusamy and A. K. Chandel, *Biogas Production: From Anaerobic Digestion to a Sustainable Bioenergy Industry*. Springer International Publishing, 2021.
- [2] P. J. Landrigan, "Air pollution and health," *The Lancet Public Health*, vol. 2, no. 1, pp. e4-e5, 2017.
- [3] Z. Dashtban, M. R. Salehi, and E. Abiri, "High sensitivity all-optical sensor for detecting toxic gases using hollow-core photonic crystal fiber composed of magnesium fluoride," *Optical Fiber Technology*, vol. 72, p. 102958, 2022.
- [4] D. E. Williams *et al.*, "Development of low-cost ozone and nitrogen dioxide measurement instruments suitable for use in an air quality monitoring network," in *SENSORS, 2009 IEEE*, pp. 1099-1104, 2009.
- [5] E. V. Perez, K. J. Balkus, Jr., J. P. Ferraris, and I. H. Musselman, "Instrument for gas permeation measurements at high pressure and high temperature," *Review of Scientific Instruments*, vol. 84, no. 6, p. 065107, 2013.
- [6] M. A. Iqbal, S. Hussain, H. Xing, and M. A. Imran, *Enabling the Internet of Things: Fundamentals, Design and Applications*. Wiley, 2020.
- [7] T. Urbanczyk and L. Peter, "Database Development for the Urgent Department of Hospital based on Tagged Entity Storage Following the IoT Concept," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 25, pp. 278-283, 2016.
- [8] M. Juma, A. A. Monem, and K. Shaalan, "Hybrid End-to-End VPN Security Approach for Smart IoT Objects," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 158, p. 102598, 2020.
- [9] V. S. Chakravarthi, *Internet of Things and M2M Communication Technologies: Architecture and Practical Design Approach to IoT in Industry 4.0*. Springer International Publishing, 2021.

- [10] X. Xing, X. Gui, X. Zheng, and H. Feng, "A fully-digital calibration algorithm for VCO-based ADC," *Microelectronics Journal*, vol. 139, p. 105879, 2023.
- [11] Y. Xu, X. Chen, J. L. Nicolau, and P. Luo, "Trust transfer in peer-to-peer accommodation: Does booking with one host transfer to other listings by the same host?," *Annals of Tourism Research*, vol. 101, p. 103603, 2023.
- [12] A. Lambrecht and K. Schmitt, "16 - Mid-infrared gas-sensing systems and applications," in *Mid-infrared Optoelectronics*, E. Tournié and L. Cerutti Eds.: Woodhead Publishing, pp. 661-715, 2020.
- [13] H. Wang, J. Wang, X. Ma, W. Chen, D. Chen, and Q. Li, "Note: A NDIR instrument for multicomponent gas detection using the galvanometer modulation," *Review of Scientific Instruments*, vol. 88, no. 11, p. 116103, 2017.
- [14] K. Jabłonski and T. Grychowski, "The Method for Easy Identifying Zero Temperature Drift of Catalytic Bead Sensor," in *2018 XV International Scientific Conference on Optoelectronic and Electronic Sensors (COE)*, pp. 1-4, 2018.
- [15] K. S. Cole and H. J. Curtis, "Wheatstone Bridge and Electrolytic Resistor for Impedance Measurements Over a Wide Frequency Range," *Review of Scientific Instruments*, vol. 8, no. 9, pp. 333-339, 1937.
- [16] P. Ilangovan, M. Sharmila Begum, and P. K. Srividhya, "Development of online monitoring device and performance evaluation of biogas plants using enhanced methane prediction algorithm (EMPA)," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 56, p. 103041, 2023.
- [17] B. Padma and S. B. Erukala, "End-to-end communication protocol in IoT-enabled ZigBee network: Investigation and performance analysis," *Internet of Things*, vol. 22, p. 100796, 2023.
- [18] J. R. Cotrim and J. H. Kleinschmidt, "An analytical model for multihop LoRaWAN networks," *Internet of Things*, vol. 22, p. 100807, 2023.

- [19] O. Abolade, A. Okandeji, A. Oke, M. Osifeko, and A. Oyedeji, "Overhead effects of data encryption on TCP throughput across IPSEC secured network," *Scientific African*, vol. 13, p. e00855, 2021.
- [20] M. Köhring, S. Böttger, U. Willer, and W. Schade, "LED-Absorption-QEPAS Sensor for Biogas Plants," *Sensors*, vol. 15, no. 5, pp. 12092-12102doi: 10.3390/s150512092.
- [21] S. D. Hafner, K. Koch, H. Carrere, S. Astals, S. Weinrich, and C. Rennuit, "Software for biogas research: Tools for measurement and prediction of methane production," *SoftwareX*, vol. 7, pp. 205-210, 2018.
- [22] R. Selvaraj, A. N. K.T, N. J. Vasa, and S. N. S.M, "Monitoring of CO₂ and CH₄ composition in a biogas matrix from different biomass structures," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 249, pp. 378-385, 2017.
- [23] L. Matindife and Z. Wang, "Fuzzy Logic Algorithms Based Measurement and Control System for Intermixed Biogas and Photovoltaic Systems," *Procedia Manufacturing*, vol. 7, pp. 339-344, 2017.
- [24] M. Rasapoor, Y. Ajabshirchi, M. Adl, R. Abdi, and A. Gharibi, "The effect of ultrasonic pretreatment on biogas generation yield from organic fraction of municipal solid waste under medium solids concentration circumstance," *Energy Conversion and Management*, vol. 119, pp. 444-452, 2016.
- [25] E. R. Amalia, Nurheki, R. Saputra, C. Ramadhana, and E. H. Yossy, "Computer network design and implementation using load balancing technique with per connection classifier (PCC) method based on MikroTik router," *Procedia Computer Science*, vol. 216, pp. 103-111, 2023.



ภาคผนวก ก

ชุดคำสั่งหน้าประมวลผล และหน้าแสดงผล

```

#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>
byte My_MAC_address[] = { 0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED };
char server[] = "192.168.100.234";
EthernetClient client;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Starting...");

  while(Ethernet.begin(My_MAC_address) != 1)
  {
    Serial.print(".");
  }
  Serial.print("My IP :");
  Serial.println(Ethernet.localIP());
}

void loop(){
  Sending_To_phpmyadmindatabase();

  delay(1000); // interval
}

void Sending_To_phpmyadmindatabase()
{ int reference = analogRead(A0);
  int methane = analogRead(A1);
  int hydrogensulfide = analogRead(A2);
  int carbondioxide = analogRead(A3);
  if (client.connect(server, 80)) {
    Serial.println("connected");
    // Make a HTTP request:
    Serial.print("GET /gas.php?reference=");
    client.print("GET /gas.php?reference=");
    Serial.println(reference);
    client.print(reference);
    client.print("&methane=");
    Serial.println("&methane=");
    client.print(methane);
    Serial.println(methane);
    client.print("&hydrogensulfide=");
    Serial.println("&hydrogensulfide=");
    client.print(hydrogensulfide);
    Serial.println(hydrogensulfide);
    client.print("&carbondioxide=");
    Serial.println("&carbondioxide=");
    client.print(carbondioxide);
    Serial.println(carbondioxide);
    client.print(" ");
    client.print("HTTP/1.1");
    client.println();
    client.println("Host:192.168.0.253");
    client.println("Connection: close");
    client.println();
  } else {
    Serial.println("connection failed");
  }
}
}

```

รูปที่ ก.1 ชุดคำสั่งที่โปรแกรมเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด

```

<?php
class gas_intense{
public $link='';
function __construct($reference,$carbon){
    $this->connect();
    $this->storeInDB($reference,$carbon);
}

function connect(){
    $this->link = mysqli_connect('localhost','root','root','gas') or die('Cannot connect to the DB');
    mysqli_select_db($this->link,'gas') or die('Cannot select the DB');
}

function storeInDB($reference,$methane,$hydrosul,$carbon){
    $query = "insert into gas_temp set ref = '". $reference."' ,co2 = '". $carbon."'";
    $result = mysqli_query($this->link,$query) or die('Errant query: ' . $query);
}

}
if($_GET['reference'] != '' & $_GET['carbon'] != ''){
    $gas_intense=new gas_intense($_GET['reference'],$_GET['carbon']);
}

$conn=mysqli_connect("localhost","root","root","gas");

$sqlcount="select count(ref) from gas_temp";
$resultcount=mysqli_query($conn,$sqlcount);
$recordcount=mysqli_fetch_row($resultcount);
$count=$recordcount[0];

if(!isset($_REQUEST['row']))
{
    $row=1;
}
else if(isset($_REQUEST['row']))
{
    $row=$_REQUEST['row'];
}

$row++;

if($count >= 360)
{
    $sqlgas="select avg(ref),avg(co2) from gas_temp";
    $resultgas=mysqli_query($conn,$sqlgas);
    $recordgas=mysqli_fetch_row($resultgas);

    $ref=$recordgas[0];
    $co2=$recordgas[1];

    $sqlinsert="insert into gas_db (ref,co2) values ('$ref','$co2')";
    mysqli_query($conn,$sqlinsert);
    $sqldelete="delete from gas_temp";
    mysqli_query($conn,$sqldelete);
}
else ;;
?>

```

รูปที่ ก.2 ชุดคำสั่งหน้าประมวลผล gas.php


```
        exit();
    }
    else
    {
        $login_true_admin = $username ;
        $_SESSION['priority']=$dbarr['priority'];
        echo "<meta http-equiv='refresh' content=0 ;url=menu.php>";
        exit();
    }
}
?>
</html>
```

รูปที่ ก.5 ชุดคำสั่งหน้าประมวลผล validate.php (ต่อ)



```

<!doctype html>
<html lang="en">
<head>
<meta charset="UTF-8">
<meta name="Generator" content="EditPlus®">
<meta name="Author" content="">
<meta name="Keywords" content="">
<meta name="Description" content="">
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1">
<table width=100% border=0<tr align=center><td align=center></td></tr><tr><td>&nbsp;&nbsp;&nbsp;</td></tr>
<tr align=center><td><font color=blue size=5>&nbsp;&nbsp;&nbsp;</font></td></tr></table>
<title>Document</title>
<?php
session_start();
@$priority=$_SESSION[priority];
if($priority=="")
{
echo"<table width=100% align=center><tr align=center><td><br><font size=6 color=red><b>Please, Login for your
authorization.</font></td></tr><tr align=center><td><input type='button' onclick=location.href='index.php'
value='Login'</td></tr></table>";
}
else
{
?>
<table width="250" border=1 align=center><tr align="center" size="30%"><td align="center" bgcolor="429697" size="30%" height="45"><font
size="5" color="white">Main menu</b></font></td></tr>
<tr><td align=center height="35"><a href="co2chart.php">Carbon dioxide in period</a></td></tr>
<tr><td align=center bgcolor="DBE1E1" height="35"><a href="filterrealtime.php">Carbon dioxide in realtime</a></td></tr>
<tr><td align=center bgcolor="DBE1E1" height="35"><a href="noh2srealtime.php">Carbon dioxide in realtime</a></td></tr-->
<?php
if($priority=="1")
{
echo"<tr><td align=center height=35><a href=addadmin.php>Add administrator/user</a></td></tr>";
}
else ;;
?>
</table>
<?php
}
?>

```

รูปที่ ก.6 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล menu.php

```

<!DOCTYPE HTML>
<html>
  <head>
    <meta http-equiv="Content-Type" content="text/html; charset=utf-8">
    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1">
    <?php date_default_timezone_set("Asia/Bangkok");?>
    <title>Gas intensive</title>
  </head>
  <style type="text/css">
    .highcharts-figure,
    .highcharts-data-table table {
      min-width: 360px;
      max-width: 100%;
      margin: 1em auto;
    }

    .highcharts-data-table table {
      font-family: Verdana, sans-serif;
      border-collapse: collapse;
      border: 1px solid #ebebeb;
      margin: 10px auto;
      text-align: center;
      width: 100%;
      max-width: 500px;
    }

    .highcharts-data-table caption {
      padding: 1em 0;
      font-size: 1.2em;
      color: #555;
    }

    .highcharts-data-table th {
      font-weight: 600;
      padding: 0.5em;
    }

    .highcharts-data-table td,
    .highcharts-data-table th,
    .highcharts-data-table caption {
      padding: 0.5em;
    }

    .highcharts-data-table thead tr,
    .highcharts-data-table tr:nth-child(even) {
      background: #f8f8f8;
    }
  </style>

```

รูปที่ ก.7 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล co2chart.php

```

}
.highcharts-data-table tr:hover {
    background: #f1f7ff;
}
</style>

<?php
session_start();
@$priority=$_SESSION[priority];
if($priority=="")
{
    echo"<table width=100% align=center><tr align=center><td><br><font size=6 color=red><b>Please, Login for your
authorization.</font></td></tr><tr align=center><td><input type='button' onclick=location.href='index.php'
value='Login'</td></tr></table>";
}
else
{
?>
<table width=100%><tr align=center><td align=center></td></tr></table>
</head>
<body>
<script src="highcharts.js"></script>
<script src="modules/series-label.js"></script>
<script src="modules/exporting.js"></script>
<script src="modules/export-data.js"></script>
<script src="modules/accessibility.js"></script>

<figure class="highcharts-figure">
<div id="container"></div>
<p class="highcharts-description">
</p>
</figure>
<form name="gasintense" action="<?php echo $_SERVER[PHP_SELF]; ?>" method="get">
<?php

if(!isset($_REQUEST['begindate']) & !isset($_REQUEST['enddate']) & !isset($_REQUEST['time1']) & !isset($_REQUEST['time2']))
{
    $bdate=date("Y-m-d 00:00:00");
    $edate=date("Y-m-d 23:59:59");
}
else
{
    $bdate=$_REQUEST['begindate'];
    $edate=$_REQUEST['enddate'];
}

```

รูปที่ ก.8 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล co2chart.php (ต่อ)

```

$time1=$_REQUEST[time1];
$time2=$_REQUEST[time2];

if($bdate != "")
{
    $bdate=$bdate;
}
else if($bdate == "")
{
    $bdate=date("Y-m-d");
}
else ;;

if($edate != "")
{
    $edate=$edate;
}
else if($edate == "")
{
    $edate=date("Y-m-d");
}
else ;;

if($time1 != "")
{
    $time1=$time1;$time1=$time1.':00';
}
else if($time1 == "")
{
    $time1=date("00:00:00");
}

if($time2 != "")
{
    $time2=$time2;$time2=$time2.':00';
}
else if($time2 == "")
{
    $time2=date("23:59:59");
}
else ;;

$bdate=$bdate." ".$time1;
$edate=$edate." ".$time2;

```

รูปที่ ก.9 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล co2chart.php (ต่อ)

```

}

$begdate=date_create($bdate);
$bedate=date_format($begdate,"d-m-Y");
$sendate=date_create($edate);
if($begdate > $sendate | $begdate == $sendate)
{
    echo"<table align=center><tr align=center><td align=center colspan='2'><font color=orange size=3><b>You were filled incorrect
values. Please try again.</td></tr><tr align=center><td align=right><font color=blue size=3>Start time:</font></td><td align=left><font
size=2>$bdate</font></td></tr><tr align=center><td align=right><font color=blue size=3>End time:</font></td><td align=left><font
size=2>$edate</font></td></tr>";
?>
<tr><td colspan="2">&nbsp;</td></tr>
<tr align=center><td align=center colspan="2">
<button name="redirect" onClick="redirect()">OK</button>

<script type="text/javascript">
function redirect()
{
var url = "gaschart.php";
window.location(url);
}
</script>
<?php
}
else
{
$conn=mysqli_connect("localhost","root","@insideRBR","gas");
$sql="select ref,h2s,co2 from gas_db order by id asc";
$result=mysqli_query($conn,$sql);
$sqlnum=mysqli_num_rows($result);
$sqlcount=$sqlnum-100;
$ref=array();
$h2s=array();
$co2=array();

$sttime=date_create($bdate);
$yeartime=date_format($sttime,"Y");
$monthtime=date_format($sttime,"m");$monthtime--;
$daytime=date_format($sttime,"d");
$hourtime=date_format($sttime,"H");
$minutetime=date_format($sttime,"T");
$secondtime=date_format($sttime,"s");
$starttime="$yeartime, $monthtime, $daytime, $hourtime, $minutetime";

```

รูปที่ ก.10 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล co2chart.php (ต่อ)

```

$znocount=1;
while($znocount <= $sqlcount)
{
    $sqlzno="select ref,h2s from gas_db limit $znocount,100";
    $resultzno=mysqli_query($conn,$sqlzno);
    $znosum="0";$refsum="0";
    while($recordsum=mysqli_fetch_row($resultzno))
    {
        $znosum=$znosum+$recordsum[1];
        $refsum=$refsum+$recordsum[0];
    }
    $znoavg=$znosum/100;
    $refavg=$refsum/100;
    $deltaavg=(abs(abs($refavg-$znoavg)-15000)/1150)*100;
    $deltav[]=$deltaavg;
    $znoavg="0";
    $refavg="0";
    $znocount++;
}
?>
<script type="text/javascript">
Highcharts.chart('container', {

    title: {
        text: ""
    },

    yAxis: {
        title: {
            text: 'Concentration(ADC)'
        }
    },

    xAxis: {
        type: 'datetime'
    },

    legend: {
        layout: 'vertical',
        align: 'right',

```

รูปที่ ก.11 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล co2chart.php (ต่อ)

```

        verticalAlign: 'middle'
    },
    plotOptions: {
        series: {
            label: {
                connectorAllowed: false
            },
            pointStart: Date.UTC(<?php echo $starttime; ?>),
            pointInterval: 0.165 * 23 * 1000
        }
    },
    series: [ {
        name: 'CO2',
        data: [<?php echo implode(";", $deltav); ?>]
    } ],
    responsive: {
        rules: [
            {
                condition: {
                    maxWidth: 500
                },
                chartOptions: {
                    legend: {
                        layout: 'horizontal',
                        align: 'center',
                        verticalAlign: 'bottom'
                    }
                }
            }
        ]
    }
});
</script>

<?php
$query="select distinct DATE_FORMAT(date,'%Y') from gas_db order by date asc";
$result=mysqli_query($conn,$query);
while($record=mysqli_fetch_row($result))

```

รูปที่ ก.12 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล co2chart.php (ต่อ)


```

<?php
session_start();
@$priority=$_SESSION[priority];
if($priority=="")
{
echo"<table width=100% align=center><tr align=center><td><br><font size=6 color=red><b>Please, Login for your
authorization.</font></td></tr><tr align=center><td><input type='button' onclick=location.href='index.php'
value='Login'</td></tr></table>";
}
else
{
?>
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
<title>Gas realtime</title>
<script src="https://code.jquery.com/jquery-3.1.1.min.js"></script>
<script src="highcharts.js"></script>
<script src="modules/series-label.js"></script>
<script src="modules/exporting.js"></script>
<script src="modules/export-data.js"></script>
<script src="modules/accessibility.js"></script>
<table width=100%><tr align=center><td align=center></td></tr></table>
</head>
<body>
<div id="monitor" style="height: 800px;"></div>
</body>
</html>
<script type="text/javascript">
$(document).ready(function() {
    chart,
    origChartWidth = 1000,
    origChartHeight = 800,
    chartWidth = origChartWidth,
    chartHeight = origChartHeight;
    var chart;
    function requestData() {
        $.ajax({
            url: 'getData2.php',
            datatype: 'json',
            success: function(data) {
                var midata = JSON.parse(data);
                console.log(midata);

                var zno_delta = JSON.parse(midata[0].zno_delta);
            }
        });
    }
    requestData();
    setInterval(requestData, 1000);
});

```

รูปที่ ก.14 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล filterrealtime.php

```

var phmb_delta = JSON.parse(midata[0].phmb_delta);

var x = (new Date()).getTime();
shift=chart.series[0].data.length > 10000;
chart.series[0].addPoint([x, zno_delta], true, shift);
chart.series[1].addPoint([x, phmb_delta], true, shift);
console.log(ref);

+ " </b>96" + "</td>";
</b>96" + "</td>";
</b>96" + "</td>";
</b>96" + "</td>";

    $("#myBody").empty();
    var tr = "<tr>";
    tr = tr + "<td align=center> " + "Reference:<b> " + parseFloat(ref).toFixed(3)

    tr = tr + "<td align=center> " + "CH4:<b> " + parseFloat(ch4).toFixed(3) + "

    tr = tr + "<td align=center> " + "H2S:<b> " + parseFloat(h2s).toFixed(3) + "

    tr = tr + "<td align=center> " + "CO2:<b> " + parseFloat(co2).toFixed(3) + "

    tr = tr + "</tr>";
    $("#myTable > tbody:last).append(tr);
}

    },
    });
}

Highcharts.setOptions({
  global: {
    useUTC: false
  }
});
chart = new Highcharts.Chart({
  chart: {
    renderTo: 'monitor',
    type: 'spline',
    events: {
      load: function () {
        setInterval(function () {
          requestData();
        }, 1000);
      },
      addSeries: function () {
        var label = this.renderer.label('A series was added, about to redraw chart', 100, 120)
        .attr({
          fill: Highcharts.getOptions().colors[0],
          padding: 10,
          r: 5,
          zIndex: 8
        })
      }
    }
  }
});

```

รูปที่ ก.15 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล filterrealtime.php (ต่อ)

```

    })
    .css({
        color: '#FFFFFF'
    })
    .add();

    setTimeout(function () {
        label.fadeOut();
    }, 3000);
}
}
},
title: {
    text: ""
},
tooltip: {
    headerFormat: '<span style="font-size:10px">{point.key}</span><br>',
    pointFormat: '<span style="font-size:14px">{series.name} : </span><span style="font-size:18px">{point.y} ,2f</span> ',
},
xAxis: {
    type: 'datetime',
    tickPixelInterval: 150,
    maxZoom: 20 * 1000
},
yAxis: {
    minPadding: 0.2,
    maxPadding: 0.2,
    title: {
        text: 'Concentration(%)',
        margin: 10
    }
},
series: [
    {
        name: 'ZnO',
        data: []
    }, {
        name: 'PHMB',
        data: []
    }
]
});
});
</script>
<table width="600" border="1" id="myTable" align="center">
<thead>

```

รูปที่ ก.16 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล filterrealtime.php (ต่อ)


```

<?php
require_once'connect_db.php';

?>

<table width=100% border=0><tr align=center><td align=center></td></tr><tr><td>&nbsp;</td></tr>
<tr align=center><td><font color=429697 size=5><b>Add Administrator/User</b></font></td></tr></table>
<title>Document</title>
<?php
session_start();
@$priority=$_SESSION[priority];
if($priority=="")
{
    echo<table width=100% align=center><tr align=center><td><br><font size=6 color=red><b>Please, Login for your
authorization.</font></td></tr><tr align=center><td><input type="button" onclick=location.href='index.php'
value='Login'</td></tr></table>;
}
else
{
?>
<div align=center>
<form name="adduser" action="insertadmin.php" method="post">
<table border=0><tr><td>&nbsp;</td></tr></table>
<table border=0px align=center>
<tr><td align=right>Name:</td><td><input type="text" name="name"></td></tr>
<tr><td align=right>Surname:</td><td><input type="text" name="surname"></td></tr>
<tr><td align=right>Username:</td><td><input type="text" name="username"></td></tr>
<tr><td align=right>Password:</td><td><input type="password" name="password"></td></tr>
<tr><td align=right>Confirmpassword:</td><td><input type="password" name="confirmpassword"></td></tr>
<tr><td align=right>Priority:</td><td><input type="radio" name="priority" value="1" checked>Admin
<input type="radio" name="priority" value="2">User
</td>
</tr>
<tr><td>&nbsp;</td></tr>
<tr><td>&nbsp;</td><td><input type="submit" name="submit" value="Submit">&nbsp;<input type="button"
onclick="location.href='menu.php'" value="Menu"></tr>
</table>
</form>
<?php
}
?>

```

รูปที่ ก.18 ชุดคำสั่งหน้าแสดงผล addadmin.php

```

<?php
require_once'connect_db.php';
?>

<table width=100% border=0><tr align=center><td align=center></td></tr><tr><td>&nbsp;</td></tr>
<tr align=center><td><font color=blue size=5>&nbsp;</font></td></tr></table>

<title>Document</title>

<?php
session_start();
@$priority=$_SESSION[ priority];
if($priority=="")
{
    echo"<table width=100% align=center><tr align=center><td><br><font size=6 color=red><b>Your 're unauthorized. Please, login
to Entry</font></td></tr><tr align=center><td><input type='button' onclick=location.href='index.php' value='Login'</td></tr></table>";
}
else
{
?>
<?php
$name=$_POST[name];
$surname=$_POST[surname];
$username=strtolower($_POST[username]);

$sqlusername="select username from admin where username='$username'";
$resultusername=mysqli_query($connect,$sqlusername);
$rows=mysqli_num_rows($resultusername);
$password=base64_encode(strtolower($_POST[password]));
$confirmpassword=base64_encode(strtolower($_POST[confirmpassword]));
$priority=$_POST[priority];
if($priority=="1")
{$position="Admin";}
else if($priority=="2")
{$position="Staff";}

if($name=="")
    echo"<table align=center><tr align=center><td><font color=red size=5>Please, Fill the
name</font></td></tr><tr><td>&nbsp;</td></tr><tr align=center><td><input type=button onclick=location.href='addadmin.php'
value='Back'></td></tr></table>";
else if($surname=="")
    echo"<table align=center><tr align=center><td><font color=red size=5>Please, Fill the
surname</font></td></tr><tr><td>&nbsp;</td></tr><tr align=center><td><input type=button onclick=location.href='addadmin.php'
value='Back'></td></tr></table>";

```

รูปที่ ก.19 ชุดคำสั่งหน้าประมวลผล insertadmin.php



1 Features

1.1 Microcontroller

Component	Details		Supported boards
ST STM32H747XI Processor	Dual Core	Arm® Cortex®-M7 core at up to 480 MHz with double-precision FPU and 16K data + 16K instruction L1 cache Arm® 32-bit Cortex®-M4 core at up to 240 MHz with FPU, Adaptive real-time accelerator (ART Accelerator™)	All
	Flash Memory	2Mbytes of Flash Memory with read-while-write support 1 Mbyte of RAM	
	Dual mode Quad-SPI memory interface running up to 133 MHz		
	CRC calculation unit		
	Security		
	ROP, PC-ROP, active tamper		
	3 separate power domains. Possible to be independently clock gated or switched off.	D1: high performance capabilities D2: communication peripherals and timers D3: reset/clock control/power management	
	Voltage scaling in Run and Stop mode 6 configurable ranges		
	4 DMA controllers to unload the CPU		
	1x high-speed master direct memory access controller (MDMA) With linked list support		
	2x Dual-port DMA with FIFO		
	1x basic DMA with request router capabilities		

Component	Details	Supported boards
	<p>Up to 35 communication peripherals</p> <p>4× I2Cs FM+ interfaces (SMBus/PMBus)</p> <p>4× USARTs/4x UARTs (ISO7816 interface, LIN, IrDA, up to 12.5 Mbit/s) and 1x LPUART</p> <p>6× SPIs, 3 with muxed duplex I2S audio class accuracy via internal audio PLL or external clock, 1x I2S in LP domain (up to 150 MHz) 4x SAIs (serial audio interface)</p> <p>SPDIFRX interface</p> <p>SWPMI single-wire protocol master I/F</p> <p>MDIO Slave interface</p> <p>2× SD/SDIO/MMC interfaces (up to 125 MHz)</p> <p>2× CAN controllers: 2 with CAN FD, 1 with time-triggered CAN (TT-CAN)</p> <p>2× USB OTG interfaces (1FS, 1HS/FS) crystal-less solution with LPM and BCD</p> <p>Ethernet MAC interface with DMA controller</p>	
	8-bit camera interface (up to 80 MHz)	
	11 analog peripherals	
	3x ADCs with 16-bit max. resolution (up to 36 channels, up to 3,6 MSPS)	
	1x temperature sensor	
	2x 12-bit D/A converters (1 MHz)	
	2x ultra-low power comparators	
	2x operational amplifiers (7.3 MHz bandwidth)	
	1x digital filters for sigma delta modulator (DFSDM) with 8 channel/4 filters	
	Graphics	

Component	Details	Supported boards
	Chrom.ART graphical hardware Accelerator™ (DMA2D) to reduce CPU load	
	Hardware JPEG Codec	
	Up to 22 timers and watchdogs	
	1x high-resolution timer (2.1 ns max resolution)	
	2x 32-bit timers with up to 4 IC/OC/PWM or pulse counter and quadrature (incremental) encoder input (up to 240 MHz)	
	2x 16-bit advanced motor control timers (up to 240 MHz)	
	10x 16-bit general-purpose timers (up to 240 MHz)	
	5x 16-bit low-power timers (up to 240 MHz)	
	4x watchdogs (independent and window)	
	2x SysTick timers	
	RTC with sub-second accuracy and hardware calendar	
	True random number generators (3 oscillators each)	
	96-bit unique ID	

1.2 Memory

Component	Details		Supported boards
External memories	SDRAM	8 MByte	All
	QSPI Flash	16 MByte	

1.3 USB

Component	Details	Supported boards
USB-C®	High speed (optional/FULL Speed USB)	All
	Host and Device operation	
	Power Delivery support (optional)	
	DisplayPort	H7 full

1.4 HD Connectors

Component	Details	Supported boards
High Density connectors	1x10/100 Ethernet with PHY	All
	1x CAN	
	4x UART (2 with flow control)	
	3x I2C	
	1x SD Card	
	1x SPI	
	1x I2S	
	1x PDM input	
	2 lane MIPI DSI output	
	8 bit parallel camera interface	
	10x PWM output	
	7x GPIO	
	8x ADC inputs with separate VREF	



1.5 Crypto Chip

Component	Details	Supported boards
ATECC608 Microchip® Crypto (optional)	Protected storage for up to 16 Keys, certificates or data	All
	Hardware support for asymmetric sign, verify, key agreement – ECDSA: FIPS186-3 Elliptic Curve Digital Signature	
	ECDH: FIPS SP800-56A Elliptic Curve Diffie-Hellman	
	NIST standard P256 elliptic curve support	
	Hardware support for symmetric algorithms	
	SHA-256 & HMAC hash including off-chip context save/restore	
	AES-128: encrypt/decrypt, galois field multiply for GCM	
	Networking key management support	
	Turnkey PRF/HKDF calculation for TLS 1.2 & 1.3	
	Ephemeral key generation and key agreement in SRAM – Small message encryption with keys entirely protected	
	Secure boot support	
	Full ECDSA code signature validation, optional stored digest/signature – optional communication key disablement prior to secure boot	
	Internal high-quality FIPS 800-90 A/B/C Random Number Generator (RNG)	
	Two high-endurance monotonic counters	
Guaranteed unique 72-bit serial number		

1.6 Secure Element

Component	Details	Supported boards
SE050C2 Secure element	Ready-to-use IoT secure element solution	H7 full
	Securely storing and provisioning credentials and performing cryptographic operations	
	based on NXP's Integral Security Architecture 3.0™	
	CC EAL 6+ certified HW	
	FIPS 140-2 certified platform with Security Level 3	
	Support for RSA and ECC asymmetric cryptography algorithms	
	Support for SCP03 protocol	
	up to 100 Mio write cycles / 25 years	

1.7 MKR Compatibility

Component	Details	Supported boards
MKR compatible header	7x PWM channels	All
	7x ADC channels	
	1x SPI	
	1x UART	
	1x I2C	

1.8 ESLOV

Component	Details	Supported boards
ESLOV Connector	I2C port with automatic device enumeration	All

1.9 Power Management

Component	Details	Supported boards
NXP PF1550 Programmable PMIC	Dynamic voltage scaling	All
	Programmable independent	
	1A voltage output to carrier board	
	Programmable I/O voltage	
	Integrated Li-Po/Li-Ion Battery charger	



2 Ratings

2.1 Recommended Operating Conditions

Symbol	Description	Min	Max
	Conservative thermal limits for the whole board:	-40 °C (-40 °F)	85 °C (185 °F)

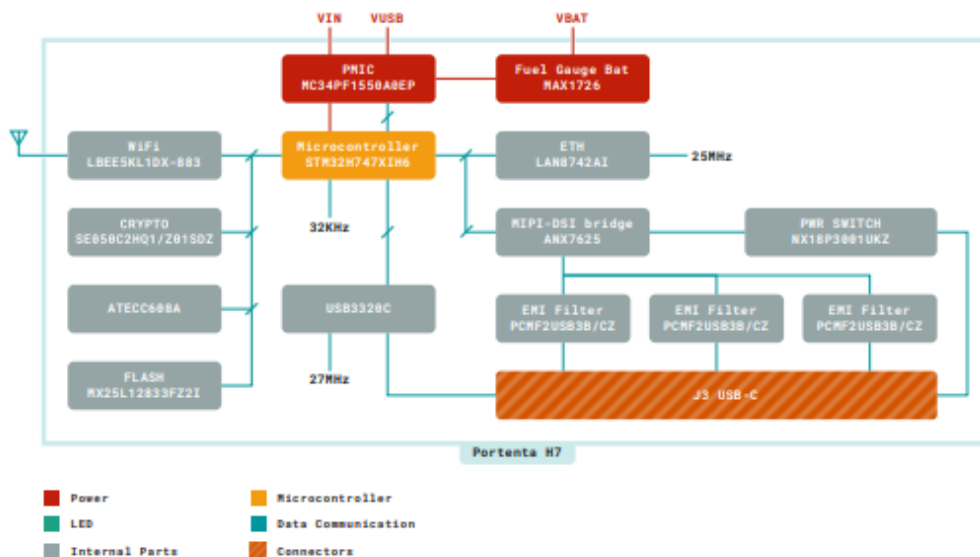
2.2 Power Consumption

Description	Min	Typ	Max	Unit
Current consumption in deep sleep mode (@3.7V)		0.67		mA
Current consumption in busy loop (@5V)		2.6		mA
Maximum current consumption with M7 ON and M4 ON blinking (@5V)		230		mA

Note: All the measurements have been performed with Portenta H7 full version (ABX00042). The current consumption in busy loop has been evaluated according to the following loop:

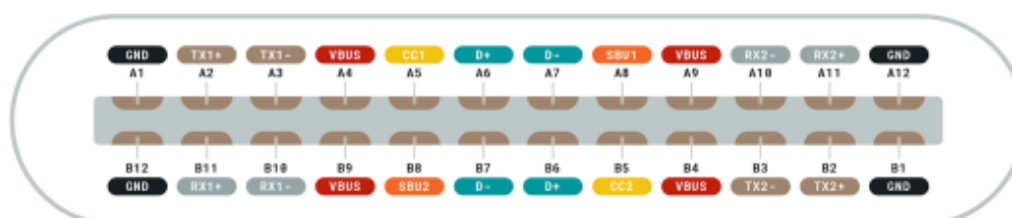
1. Deep sleep mode.
2. Wake up every 595 seconds.
3. Acquire data for 5 seconds.
4. Go back to deep sleep mode.

2.3 Block Diagram



Block diagram

3 Connector Pinouts



 Cable ground	 High speed data path (TX for USB, or RX for DP Alt Mode)	 For sideband use (Not used for USB)
 Cable bus power	 High speed data path (RX for USB, or TX for DP Alt Mode)	 Plug configuration detection • One becomes VCONN, for cable or adaptor power • CC is used for USB-PD communication
 USB 2.0 Interface		

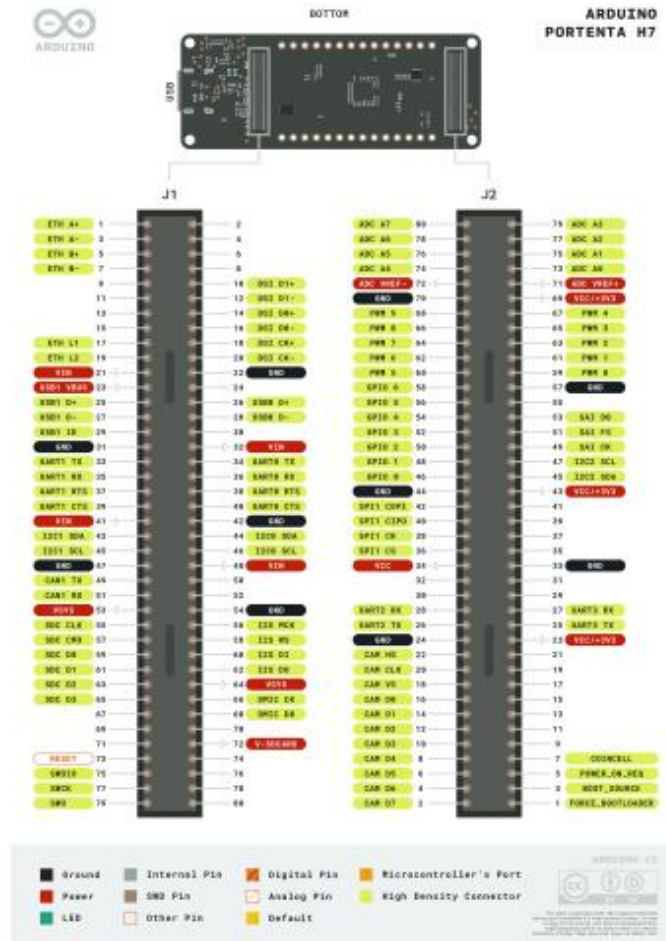
USB-C® Pinout

3.1 USB-C®

Pin	Description	Pin	Description
GND	Cable Ground	TX1 +/- TX2 +/-	High speed data path (TX for USB, or RX for DP Alt Mode)
VBUS	Cable bus power	RX1 +/- RX2 +/-	High speed data path (TX for USB, or RX for DP Alt Mode)
D+/D-	USB 2.0 Interface	SBU1 SBU2	For sideband use (Not used for USB)
CC1 CC2	Plug configuration detection * One becomes VCONN for cable or adaptor power * CC is used for USB-PD communication		



3.2 High Density Connector



Pin	Description	Pin	Description
GND	Ground	PWM	High Density Connector
GPIO	High Density Connector	SPI1	High Density Connector
SWDIOSWCK SWO	High Density Connector	ADC	High Density Connector
SDC	High Density Connector	RESET	Other Pin

3.3 I2C Ports

System integrators can use the Portenta H7's High-Density connectors to expand signals of the board to a custom-designed daughter board or carrier. The following table summarizes the I2C pins mapping on the board's High-Density connectors and shared peripherals/resources. Please refer to the board's High-Density connectors pinout section.

HD Connector	Interface Name	Pins on HD	Status ¹	Shared Peripherals
J1	I2C1	43-45	Shared	Secure Element (0x48) PMIC (0x08) ANALOGX (0x54, 0x58, 0x70, 0x72, 0x7A, 0x7E, 0x48)
J1	I2C0	44-46	Free	
J2	I2C2	45-47	Shared	Camera (D1P-D1N)

¹Status column indicates the current status of the pins. "Free" means the pins are not in use by another resource or peripheral of the board and are available for usage, while "Shared" means the pins are used by one or several resources or peripherals of the board.



4 Application Examples

Due to the dual core processing, the Portenta supports a wide array of applications.

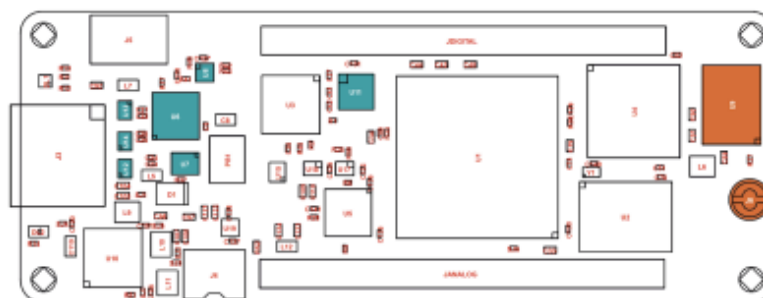
4.1 Accessories (Not Included)


- USB 2.0 Cable Type A/B
- Portenta Vision Shield
- Portenta Breakout Board
- Portenta Max Carrier
- Portenta Hat Carrier


5 Functional Overview

5.1 Board Topology

Depending on the variant, some of the components does not apply. The image below originates from the H7 form factor, see what components are applied on your board:



 Only with Portenta H7

 Only with Portenta H7 and Portenta H7 Lite Connected

Board Topology

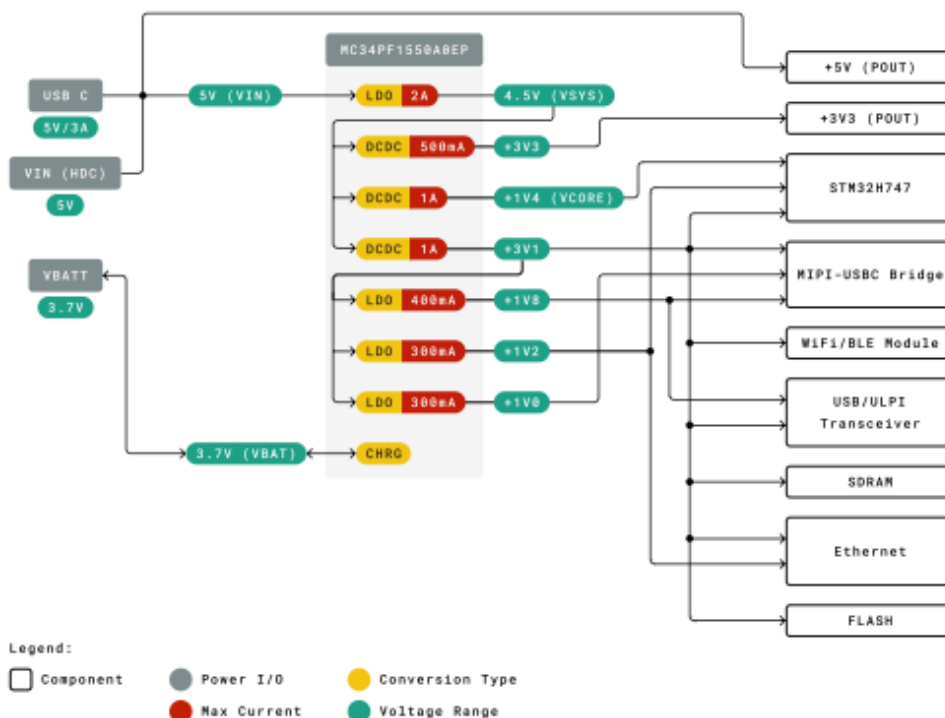
Ref.	Description	Ref.	Description
U1	Main processor	U10	Power manager
U2	QSPI Flash memory	U11	Crypto chip (NXP®)*
U3	USB HS PHY	U12, U13, U14	ESD protection*
U4	SDRAM	U16	Crypto chip (Microchip®)
U5	Ethernet PHY	J1, J2	High Density connectors
U6	MIPI to USB-C®/DisplayPort converter*	ANT1	Antenna or U.FL connector**

Ref.	Description	Ref.	Description
U7	Level shifter*	JANALOG JDIGITAL	MKR compatible headers
U8	I2C level shifter*	J4	Battery connector
U9	Wi-Fi®/Bluetooth® module**	J5	ESLOW connector
J6	Micro UFL connector		

* = Only with Portenta H7

** = Only with Portenta H7 and Portenta H7 Lite Connected

5.2 Power Tree



Portenta H7 Power Tree



ภาคผนวก ค

ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ระดับนานาชาติ

ST0702-0002

Development of an Online Monitoring System for Biogas Sensing Via IoT

Viravat Onpol^{1, a)} and Saroj Pullteap^{1, b)}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,
 Silpakorn University (Sanam Chandra Palace Campus), Nakhon Pathom, Thailand.

^{b)}Corresponding author: saroi@su.ac.th

Abstract. This study intends to develop a real-time biogas display system based on the Internet of Things (IoT) that can be used to continually measure biogas and monitor biogas from dangerous points. The biogas simulator provides a DC voltage from 0 to 3.3 volts to the microcontroller board for demodulating the biogas concentration. Additionally, a cellular system has been selected for data transmission. Therefore, this network can send data over unlimited distances. To ensure the security of data transfer, network transmission is carried out between the source and the destination using an IPSec VPN and the database server includes software such as MySQL, HTML, PHP, and Javascript for displaying results on graphs via a web browser. The experimental results showed that a browser can display in real-time, and also it can create continuous graph intervals of 3 seconds. Finally, the developed results showed the high performance of the biogas monitoring system and also were very accurate with a difference of 0.001 V / % concentration.

Keywords: Gas measurement; real-time monitoring; Internet of Things; microcontroller board

INTRODUCTION

Nowadays, renewable and alternative energy is used as the primary fuel for power generation. Natural resources like natural gas are the source of alternative energy. Utilized resources include coal, oil, and even natural garbage. But renewable energy, such as solar energy, wind energy, or even bio-energy like biogas, will be clean energy or energy that will not run out. Biogas is a gas created by specific bacteria when they break down organic waste, including manure from livestock farms, waste from communities, and household waste [1]. These biogases include methane (CH₄), hydrogen sulfide (H₂S), and carbon dioxide (CO₂). Biogas provides a lot of advantages that are suitable for usage in homes it can be used for instance, as cooking fuel, utilized as fuel to heat a home in the winter, and in industrial facilities where the creation of specific goods requires the use of heat, such as when utilizing biogas as a fuel to boil a boiler and used as a fuel to produce electricity. However, biogas also includes some problems with air pollution [2] and is dangerous for human respiratory systems. To determine the quantity and concentration of the target gas being tested and to weigh the danger of operating, a biogas measuring instrument is required [3-5].

Additionally, numerous studies have been conducted to develop instruments such as a portable methane measuring tool has been developed, according to a study by Yang et al. [5] using an Arduino Uno board coupled to humidity, temperature, and pressure sensors housed in a glass tube to measure methane gas and record data. By comparing a methane detector with a gas chromatograph fitted by a thermal conductivity detector, the concentration of methane was determined, with an average absolute error of 0.69% ± 0.55% when compared to measuring the gas chromatograph (GC) type. Furthermore, Tiwari et al. [6] used the Vocus-PTR-reaction mass spectrometer equipment for the online determination of sulfur compounds and undesirable pollutants, with real-time testing findings. Daily methane contamination testing can find up to 300 compounds, Hafner et al. [3] developed a tool for monitoring methane gas and forecasting its generation. The researchers developed the algorithm as a function, with a total of 10 functions, which are separated into three function groups, 1) Convert to standard values function 2) Processing and calculation functions 3) Analytical functions predict the occurrence of methane gas in advance. In addition, users can access it using the web interface or the online biogas app (OBA). Furthermore, Ilangovan et al. [7] created a tool for online presentation and utilized it to forecast the presence of methane, the enhanced methane prediction algorithm (EMPA) is used. Methane detectors provide EMPA with essential data, such as the concentration of methane. Compare the Naive Bayes algorithm with artificial neural network results for the pressure, temperature, and pH values used in calculations. The processing time is faster and the network accuracy is 94.84%.

Therefore, this research aims to create a biogas detection display system that is effective. In addition, it is also safer than the traditional measuring tools by using the Internet of Things (IoT) [8]. It has a communication model and transmits data between measuring devices and devices to receive data in the form of machine-to-machine



(M2M) to send the concentration of the target gas from the source biogas generator located far (remote plant) through an internet network with specific encryption for data security [9].

RELATED THEORIES

The Internet of Things (IoT) is used to implement a real-time biogas display system that can collaborate with several devices and application programs, using technology to link the database server and the location where the biogas or target gas detector is installed. The complete system has been split into the following three sections.

1. Hardware is the biogas measuring device part that transfers the observed value to the database server via a communication module which is detailed below:

1.1 Three 100 K Ω variable resistors have been used as the biogas detectors to simulate the operation.

1.2 A microcontroller board that is used for controlling gadgets like electric motors, sensors, machines, etc. The following are the major components of a microcontroller board:

- CPU (Central Processing Unit)
- RAM (Random Access Memory)
- EPROM (Erasable Programmable Read-Only-Memory)
- I/O (Input / Output interfaces)
- Timer (Clock-pulse generator)

The type and capabilities of a microcontroller board determine its capability or application. Board with a microprocessor, which in this study requires measurement data from precise sensors. This research uses a Portenta H7 microcontroller board from the Arduino family, which has a high resolution and a function for translating voltage from analog to digital signals (analog to digital converter: ADC) [10] at 16 bits, and also a DC voltage is applied to the analog pin of the analog microcontroller board is a digital signal with a value between 0 - 65535. The dual-core microcontroller board also features two CPUs. Furthermore, it utilizes the IEEE 802.3u-compliant ethernet connection on the Portenta vision shield to connect devices, as shown in its basic structure in Figure 1.

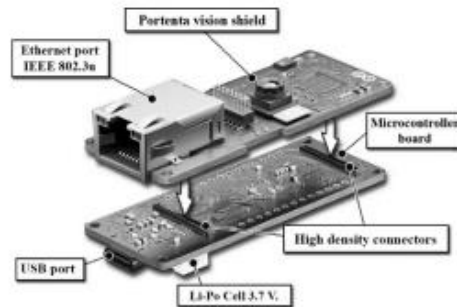


FIGURE 1. Structure of microcontroller board and I/O port

2. Software is, normally, operated to support the hardware. However, it consists of 4 main parts as follows:

2.1 The language program which consists of HTML, PHP, and Java HTML programming language is a language for easily creating web pages. However, it is not flexible or unable to interact with users. Therefore, the PHP language program is used to receive data from users to process and calculate the data. Consequently, this part includes the use of JavaScript programs to create interactions between users and the three programs mentioned above. HTML, PHP, and JavaScript are open-source languages, therefore, program developers are creating new functions and libraries. There are many out there for use.

2.2 MySQL is a data management system with a table format divided into columns. To store data from the biogas measurement equipment set, the PHP program can store, get, update, and delete data, etc.

2.3 EditPlus program is used to create algorithms and functions for calculating and processing data. It causes the program can be separated into colors according to type and type of language and is easy to use.

2.4 Web browser is a program that can be used on every operating system. However, it is available on almost every portable device such as computers, notebooks, cell phones, etc.

3. Communication module is regarding the method for transmitting and receiving data in different forms, it is an Internet of Things (IoT) technology, which is a way of sending and receiving data between devices that can be connected to a network system. Both the same network and distinct networks are possible. One-to-one, one-to-many, and many-to-many connections can be made. The technology and protocol used by the transmitting and



receiving devices must be similar protocols, depending on the capabilities of the device, the sort of work being done, and the security of the data being transferred and received between them. Data transmission and reception technologies can take many different forms, as described below:

3.1 Zigbee adheres to the IEEE 802.15.4 standard and uses low-frequency public radio that has been granted a license by the body in charge of overseeing each nation's frequency bands [11]. Low-frequency waves offer the advantages of having a relatively low power consumption and being able to transmit data across a distance of more than 700 meters. Devices in the ZigBee network carry out the following 3 components:

- Coordinator device gathers network data and chooses the path that information between nodes will take. There is only one coordinator per Zigbee network.
- Router device serves as a hub for data transfer between coordinators and endpoints. It is an active-mode device that is always able to transmit data between nodes.
- End device is the system's final piece of hardware. It is in charge of immediately sending data back to the coordinator or central node. When data or signals are sent, the final gadget will be in sleep mode and turn on.

Zigbee technology typically works well for applications that don't stream data or don't constantly send data from nodes. A network may contain up to 256 devices. The connection topology of Zigbee is shown in Figure 2.

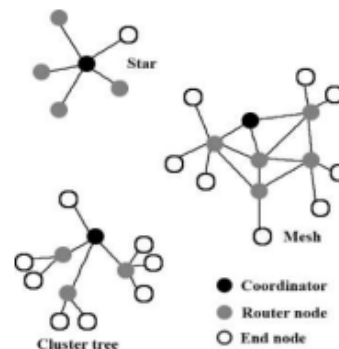


FIGURE 2. Example of connection topology of Zigbee

3.2 LoRaWAN is derived from the phrase "long-range wide area network" [12]. Using low-frequency radio wave technology permitted by governmental frequency control groups, it is a link between devices that can connect to the network over a greater distance than Zigbee technology. The distance required for data transmission and reception will increase with the use of low-frequency. This technology can send and receive data from 15 kilometers away. The LoRaWAN system is well suited for receiving and transferring data with modest amounts of data since it uses low-frequency waves, which significantly reduces its constraints in terms of data transmission. Additionally, the LoRaWAN system's data transmission and reception hardware consumes so little power that it has a battery life of more than 10 years. The LoRaWAN system is basically divided into 4 major components, which are described below:

- End node will mostly consist of measurement equipment like temperature sensors, gas sensors, etc. The end node's equipment will only transmit a signal to connect to the concentrator gateway.
- Concentrator gateway is the component that creates a conduit between the network server and the end node. The user datagram protocol (UDP) is used for communication between the concentrator gateway and the Network server, and the major job of the concentrator gateway is to validate data coming from the end node before delivering it to the network server.
- Network server includes a private network, centralized public network, and distributed coordinative public network in Lora's network design, which is determined by the data transmission between the concentrator gateway and the application server.
- Application server is the final component of the LoRaWAN network. Using the transmission control protocol/internet protocol (TCP/IP), it transmits and receives data from a network server. Data from many sources, including the destination or End node, must be received by it for processing and presentation in a variety of forms, and in some situations, to be used.



On occasion, an operating system computer with both an application server and a network server installed can be used. The topology of the LoRaWAN network system can be illustrated in Figure 3.

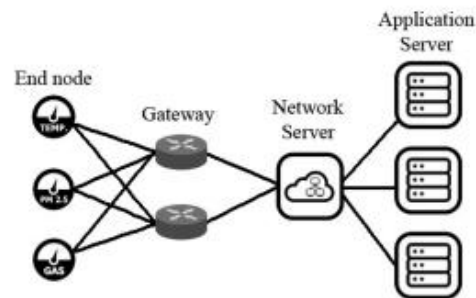


FIGURE 3. Topology of LoRaWAN network system

3.3 Cellular is a system that enables network-capable devices, as well as different sensors and microcontroller boards can access the internet. Data will be sent by the system over the mobile phone network. Cellular can connect to the internet network and has faster data transmission speeds, including bandwidth and data packet size, than Zigbee and LoRaWAN technologies, depending on the service area of the mobile phone network, making data transmission or interaction between devices to receive or send data possible anywhere. A 3G/4G Dongle device will be utilized to connect to the cellular base. It is a tool used to insert SIM cards so they can access the internet network via the cellular base. It contains a USB port for attaching to internet-dependent devices like a PC, notebook, laptop, etc. The service provider's agreement governs the speed and bandwidth, and the capabilities of the 3G/4G dongle device, as well as the strength of the signal received by the dongle device from the cellular base. An example of the 3G/4G Dongle is depicted in Figure 4.



FIGURE 4. Examples of 3G/4G Dongle device

In addition, this technique is more secure for connecting the devices. This research employs the internet protocol security virtual private network (IPSec VPN) [13]. However, This connection is extremely safe for data transmission. Encryption is used to confirm identity (authentication) and data accuracy. Encrypting only the data except the header, known as Transport mode, and encrypting both the data and the header, known as Tunnel mode, will make the data more secure as shown its structure in Figure 5.

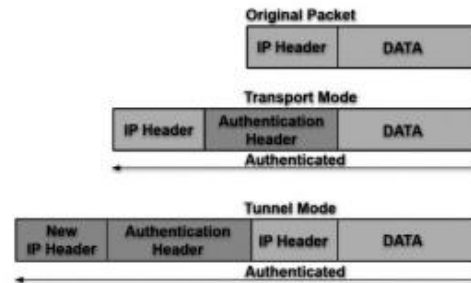


FIGURE 5. Changed packet in IPsec format

IPsec is a method of establishing a connection path between communication devices that requires receiving and sending data, which has a network traffic pattern and various parameters to prevent foreign packets from entering the tunnel [14] by tunnel will create a Security association (Sas) to defines network traffic protocols and algorithms. The Sas model is determined by the application for which will be used encapsulation security payload or authentication header (AH).

Experimental Setup

The continuous biogas display system is researched as a prototype for use with a future fiber optic biogas detector. The function of optical fiber detectors is to change their structure by coating them with a compound that absorbs biogas and affects the refraction of light within the optical fiber, such as Cryptophane for detecting methane gas, or Agentum to detect hydrogen sulfide, etc. It is to measure the intensity of light with a photodetector and send an output voltage from 0 to 3.3 V into the microcontroller board. To simulate this, we use a variable resistor (VR) with a resistance value of 100 K Ω as a simulation device instead of the fiber sensor. Therefore, the simulation data is obtained from a variable resistor. Consequently, this signal is sent to the microcontroller board and converted the analog signal into a digital signal with the ADC function [15]. The calculated data is, normally, using the following equations:

$$ADC = ((V_{in} \times a)) / V_{ref} \quad (1)$$

where:

- a is the maximum ADC value of the digital data (equivalent to 65535)
- V_{in} is the analog input
- V_{ref} is the reference voltage

The resistor adjusts the analog voltage that has been input to the analog pin of the microcontroller board between 0 - 3.3 V. Consequently, the ADC value from the microcontroller board is then converted into a digital signal with a digital range from 0 to 65535 and sends it through a communication module to the database server for data storing. The configuration of the developed system is, however, illustrated in Figure 6.

The 2nd Silpakorn International Conference on Total Art and Science 2023 (2nd SICTAS2023)
 jointly with The 3rd International Conference on Engineering and Industrial Technology 2023 (3rd ICEIT 2023)
 on November 8-10, 2023 at Dusit Thani Hua Hin, Phetchaburi, THAILAND.

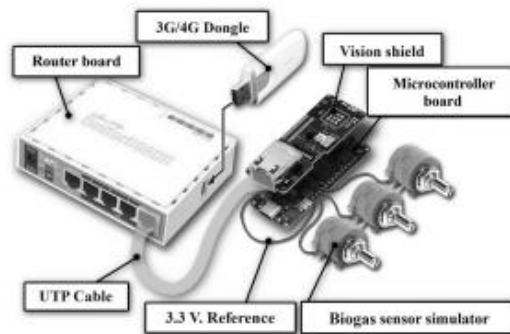


FIGURE 6. Hardware configuration of developed system for biogas monitoring

The microcontroller board was able to connect to the database server once the router board on the VPN client side had successfully established a VPN IPSec connection with the router board on the VPN server side. Consequently, the latency of data transmission has next been evaluated for the data transmission time of the system. This depends on the distance and the overall equipment of the system. Latency can be calculated by averaging the ping time from device to device. The average ping time should not exceed 100 ms. In this work, it has been calculated the average ping time from the router board on the VPN Client side reaches the database server 1,000 times. The result shows that an average time is equal to 70 ms, which is less than 100 ms, making the latency relatively low and reliable, as shown in the Figure 7.

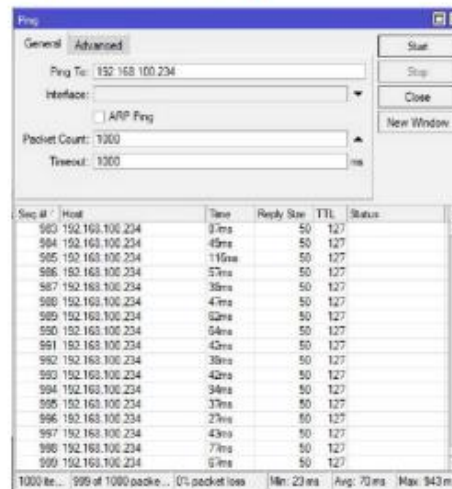


FIGURE 7. Latency or ping time between VPN Client and database server

Additionally, the router board equipment will secure data transmission and receipt using an IPsec VPN. The database server will have a variety of data-storing applications. Moreover, a web page is made allowing the client to examine measurement values using a web browser after data processing.

A digital oscilloscope will be connected to the device to test the signal's connection to the database server to continually measure the voltage coming from the biogas detector simulator, while it is linked to the database server. Board with a microcontroller to keep track of the voltage during each test. When the microcontroller board receives voltage, digital signals are transmitted by its ethernet connector to the router board [16] where they are passed into the server's database system. Before transmitting the new signal through the VPN tunnel created by the router board to access the database, configure the format of the new signal on the router board, which receives digital signals from the microcontroller board as shown in Figure 8.



FIGURE 8. Configuration of developed biogas monitoring system

Every 3 seconds, the database server must receive new data from the source measurement device via the connection module to update the temporary database. The real-time display program's algorithm will then extract new data and display it via the web browser.

When doing the test by already providing electricity to the microcontroller board on a digital oscilloscope, capture voltage values, and then compare the values. The database then discovered the voltage changes regularly. As a result, the average data that is received from a temporary database after 200 records, or roughly 10 minutes has been input into the main database. The target gas or biogas concentration display can be saved in CSV, Excel, PDF, and several image formats. The data is displayed through a web browser software in a time interval.

The measuring device will communicate the data to the database server when the entire system is interconnected, and the database server will utilize an equation to calculate the desired biogas or target gas concentration [17]. The equation can be used to calculate by

$$[\% \text{Concentration}]_{\text{biogas}} = \left[\frac{[\text{ADC}]_{\text{biogas}}}{[\text{ADC}]_{\text{reference}}} \right] \times 100 \quad (2)$$

However, when the system has been installed and configured, it is possible to build a flow chart from the point of gas measurement to the display system on the screen via a web browser, as shown in the flowchart in Figure 9.

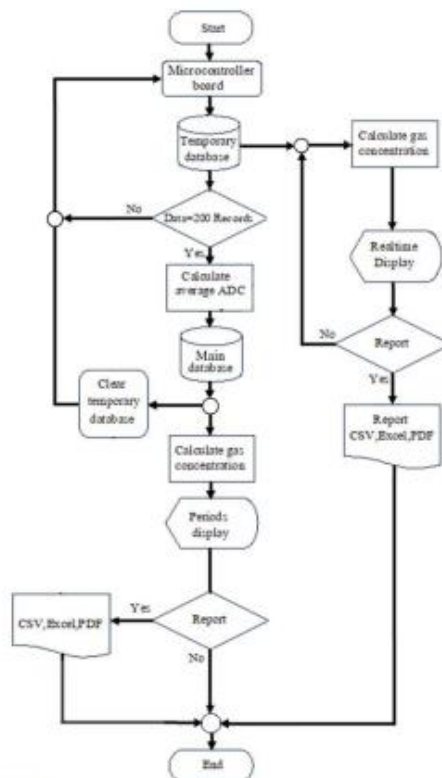


FIGURE 9. Flowchart of developed system for biogas monitoring

In addition, we are recording the resistance and voltage values from the adjustable resistors by using a digital multimeter (DMM) to measure the resistance values. Also, a digital oscilloscope has been utilized to measure the voltage and ADC values from the microcontroller board, which are next sent to the database server in a MySQL format. The setup of this configuration is shown in Figure10.

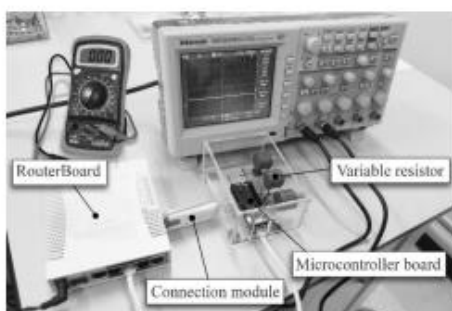


FIGURE 10. Experimental setup of developed system with communication module

RESULT AND DISCUSSION

As mentioned above, the experimental results consist of resistance, input voltage (V_{in}), output digital values (D_{out}), reference voltage (V_{ref}), and the percentage of concentration of methane gas has been summarized in Table 1.

TABLE 1 Experimental results data from experiment

Resistance (Ω)	Input voltage (V_{in})	Output digital values (D_{out})	Reference voltage (V_{ref})	CH ₄ concentration (%)
99.84	0.001	25.21	0.001	0.03
90.78	0.1	2007.08	0.101	3.038
81.25	0.2	3988.74	0.2	6.111
68.34	0.5	9932.54	0.5	15.278
30.21	1	19885.1	1.001	30.372
14.83	2	39754.85	2.001	60.8
4.83	3	59605.48	3.001	91.164

From the results, we found that the percentage concentration of the CH₄ (in simulation) is directly proportional to the voltage. Moreover, the developed system will use the discovered concentration to produce a chart on a web browser with an accuracy of 0.001V / % concentration.

However, users can get the desired gas concentration information on the display page at "http://1.0.168.17:2345". Firstly, the users need to log in with their username and password via the login page. A main menu display will appear as shown in Figure 11.

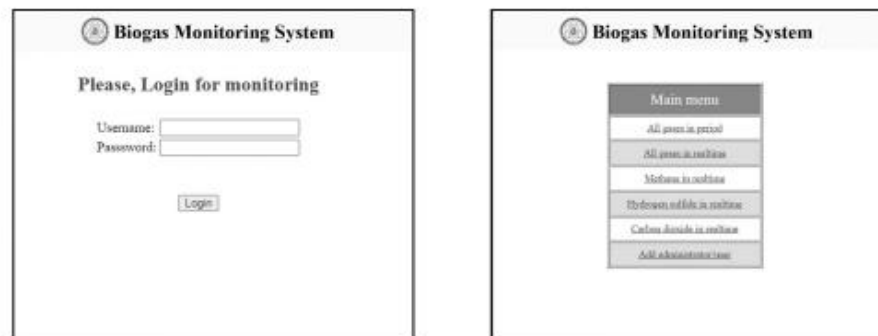


FIGURE 11. Example of user interface in login and main menu functions

From Figure 11., the system shows a menu of information. Users can select the type of information they want to access. The list will consist of a graph display by displaying graphs in real time for each step. It will require any type of gas and elements for adding users to the system who can access via the item selected, which will be utilized by either a task-limited user or a system administrator. The system administrators will have access and real-time monitoring as shown in the example in Figure 12. and Figure 13., respectively.

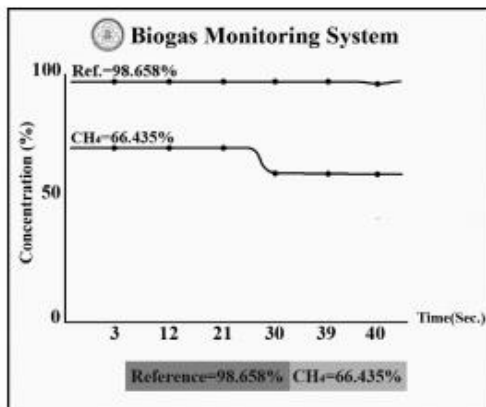


FIGURE 12. Example of real-time display of biogas concentration

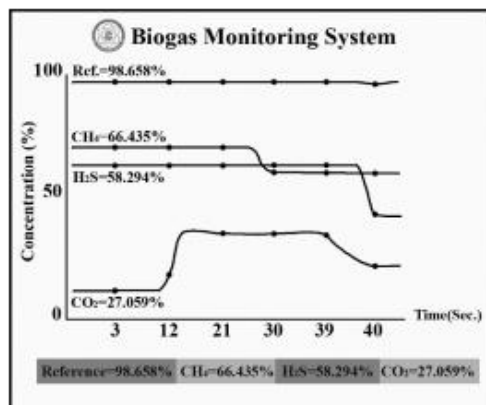


FIGURE 13. Example of a biogas monitoring system in a period

CONCLUSION

In this work, a real-time biogas display system based on the Internet of Things been developed. It consisted of hardware and software allowing real-time display. The system can create a frequency and continuity of biogas measurement results from the measurement point. In addition, the data sent to the database server is still safe due to the VPN making the data transmission point, and the database server is on the same network. Moreover, the data transmission is performed via the internet network. Therefore, there is no limit on the distance for data transmission. The developed system uses a microcontroller board as hardware to receive analog input values. Moreover, it can be used with various measurement devices for future applications. The simulation software has a function to display three difference types of gases compare with the input DC voltages. A microcontroller board at each input level there is not much of a difference between the three types of gas concentration values, it can be discovered and also ensures high measurement accuracy for the system.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research has received funding and support from the Silpakorn University Research, Innovation, and Creative Fund.

REFERENCE

- [1] N. Balagurusamy and A. K. Chandel, *Biogas Production: From Anaerobic Digestion to a Sustainable Bioenergy Industry*. Springer International Publishing, 2021.
- [2] T. Gupta, S. P. Singh, P. Rajput, and A. K. Agarwal, *Measurement, Analysis and Remediation of Environmental Pollutants*. Springer Nature Singapore, 2019.
- [3] S. D. Hafner, K. Koch, H. Carrere, S. Astals, S. Weinrich, and C. Rennuit, "Software for biogas research: Tools for measurement and prediction of methane production," *SoftwareX*, vol. 7, pp. 205-210, 2018/01/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2018.06.005>.
- [4] J. Walker, P. Karnati, D. R. Miller, M. Al-Hashem, S. A. Akbar, and P. A. Morris, "A new open-access online database for resistive-type gas sensor properties and performance," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 321, p. 128591, 2020/10/15/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128591>.
- [5] S. Yang, Y. Liu, N. Wu, Y. Zhang, S. Svoronos, and P. Pullammanappallil, "Low-cost, Arduino-based, portable device for measurement of methane composition in biogas," *Renewable Energy*, vol. 138, pp. 224-229, 2019/08/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.083>.
- [6] P. Tiwari, T. Wang, J. Indlekofer, I. El Haddad, S. Biollaz, A. S. H. Prevot, H. Lamkaddam, "Online detection of trace volatile organic sulfur compounds in a complex biogas mixture with proton-transfer-reaction mass spectrometry," *Renewable Energy*, vol. 196, pp. 1197-1203, 2022/08/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.036>.
- [7] P. Ilangovan, M. Sharmila Begum, and P. K. Srividhya, "Development of online monitoring device and performance evaluation of biogas plants using enhanced methane prediction algorithm (EMPA)," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 56, p. 103041, 2023/03/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103041>.
- [8] M. A. Iqbal, S. Hussain, H. Xing, and M. A. Imran, *Enabling the Internet of Things: Fundamentals, Design and Applications*. Wiley, 2020.
- [9] V. S. Chakravarthi, *Internet of Things and M2M Communication Technologies: Architecture and Practical Design Approach to IoT in Industry 4.0*. Springer International Publishing, 2021.
- [10] X. Xing, X. Gui, X. Zheng, and H. Feng, "A fully-digital calibration algorithm for VCO-based ADC," *Microelectronics Journal*, vol. 139, p. 105879, 2023/09/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2023.105879>.
- [11] B. Padma and S. B. Erukala, "End-to-end communication protocol in IoT-enabled ZigBee network: Investigation and performance analysis," *Internet of Things*, vol. 22, p. 100796, 2023/07/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100796>.
- [12] J. R. Cotrim and J. H. Kleinschmidt, "An analytical model for multihop LoRaWAN networks," *Internet of Things*, vol. 22, p. 100807, 2023/07/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100807>.
- [13] M. Juma, A. A. Monem, and K. Shaalan, "Hybrid End-to-End VPN Security Approach for Smart IoT Objects," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 158, p. 102598, 2020/05/15/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102598>.
- [14] Y. Xu, X. Chen, J. L. Nicolau, and P. Luo, "Trust transfer in peer-to-peer accommodation: Does booking with one host transfer to other listings by the same host?," *Annals of Tourism Research*, vol. 101, p. 103603, 2023/07/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.annals.2023.103603>.
- [15] K. Hariharan, P. Vasanthakumar, G. Varun, and V. Abhaikumar, "A Method for ADC Error Testing and its Compensation in Ratiometric Measurements," *Measurement Science Review*, vol. 10, no. 2, pp. 56-59, 2010, doi: [doi:10.2478/v10048-010-0009-3](https://doi.org/10.2478/v10048-010-0009-3).
- [16] E. R. Amalia, Nurheki, R. Saputra, C. Ramadhana, and E. H. Yossy, "Computer network design and implementation using load balancing technique with per connection classifier (PCC) method based on MikroTik router," *Procedia Computer Science*, vol. 216, pp. 103-111, 2023/01/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.116>.
- [17] S. Liu, D. E. Butman, and P. A. Raymond, "Evaluating CO₂ calculation error from organic alkalinity and pH measurement error in low ionic strength freshwaters," *Limnology and Oceanography: Methods*, vol. 18, no. 10, pp. 606-622, 2020/10/01 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/lom3.10388>.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

วีระวัฒน์ อ้นพล

วุฒิการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผลงานตีพิมพ์

Development of an Online Monitoring System for Biogas Sensing Via IoT, 2nd Silpakorn International Conference on Total Art and science 2023, 2nd SICTAS 2023, vol.2, pp.33-43 - Proceeding
Published Date: November 8-10, 2023.

