

การพัฒนาระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงานของระบบเผาไหม้
เชื้อเพลิงชีวมวลบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

DEVELOPMENT OF PERFORMANCE ASSESSMENT TOOL FOR
BIOMASS COMBUSTION SYSTEM VIA INTERNET NETWORK



ปัญญารัตน์ อัครวิริยะกิจ
พศิน กังวานธนโชติ
พิชญ์พรธ บุญมั่น

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงานของระบบเผาไหม้
เชื้อเพลิงชีวมวลบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

DEVELOPMENT OF PERFORMANCE ASSESSMENT TOOL FOR
BIOMASS COMBUSTION SYSTEM VIA INTERNET NETWORK



ปัญญารัตน์ อัครวิริยะกิจ
พศิน กังวานธนโชติ
พิชญ์พรธ บุญมั่น

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF PERFORMANCE ASSESSMENT TOOL FOR
BIOMASS COMBUSTION SYSTEM VIA INTERNET NETWORK



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2564

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงานของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียดผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

Development of Performance Assessment Tool for Biomass Combustion System via internet network

ผู้จัดทำ

1. นางสาว ปัญจรัตน์ อัครวิริยะกิจ รหัสประจำตัว 61010641
2. นาย พศิน กังวานธนโชติ รหัสประจำตัว 61010708
3. นาย พิชญ์พรธ บุนนัณ รหัสประจำตัว 61010733



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาาระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงานของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียดผ่าน
เครือข่ายอินเทอร์เน็ต

นางสาวปัญจรัตน์ อัครวิริยะกิจ	61010641
นายพศิน กังวานธนโชติ	61010708
นายพิชญ์พรธ บุญม้น	61010733
รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2564

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันที่โลกเป็น Big Data เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) เข้ามามีบทบาทอย่างมากในด้านของอุตสาหกรรม ในเรื่องของการเก็บและแลกเปลี่ยนข้อมูลในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วิทยานิพนธ์นี้เกิดขึ้นจากการพัฒนาต่อยอดจากงานวิจัยเรื่องการประยุกต์ใช้ PLC ในการควบคุมหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง โดยพัฒนาาระบบประมวลผลข้อมูลของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียด เพื่อการรับส่งข้อมูลด้านพลังงานแบบเรียลไทม์ (Real-Time) ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยใช้อุปกรณ์ V-BOX เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อกับระบบเพื่อรับสัญญาณจาก PLC เข้าสู่ระบบอินเทอร์เน็ต และทำการทดสอบระบบโดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งคือการทดสอบการควบคุมระบบผ่านหน้าเว็บ Cloud SCADA พบว่าสามารถควบคุมได้ ส่วนที่สองคือการทดสอบด้านการบันทึกข้อมูลของระบบ พบว่าสามารถบันทึกข้อมูลได้ถูกต้อง ส่วนที่สามคือการทดสอบระบบสัญญาณเตือนพบว่าจะสามารถ แจ้งเตือนเมื่อค่าที่ตั้งไว้เกินกว่าเงื่อนไขที่ผู้ใช้ได้กำหนด และส่วนที่สี่คือการทดสอบระบบประมวลผลข้อมูลด้าน พลังงานพบว่าจะสามารถประมวลผลได้อย่างถูกต้องและสามารถแสดงผลได้แบบเรียลไทม์

Development of Performance Assessment Tool for Biomass Combustion System
via internet network

Panjarat Assawawiriyakit 61010641

Pasin Kangwanthanachot 61010708

Pitchapat Boonmun 61010733

Assoc.Prof.Dr. Jaruwat Charoensuk Advisor

Year 2021

Abstract

Nowadays is big data Internet of Things (IoT) have played an important role in the industry in terms of storing and exchanging data on electronic devices. This thesis is a continuation of the research on the development of control and combustion monitoring systems for pulverized biomass combustion. A performance assessment tool for biomass combustion systems for real-time energy data transmission over the Internet was developed using the V-BOX device as a device connected to the system to receive the signal from the PLC and Transfer to the Internet. The system was tested in 4 parts: The first part is the control function via the Cloud SCADA web page, it was found that the unit can be controlled via internet; the second part is the test of recording the system. found that data can be recorded correctly. The third part is to test the alarm system and find that it can alert when the set value exceeds the user-defined conditions. and the fourth part is to test the data processing system. The energy was found to be properly processed and could be displayed in real time.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีต้องขอขอบพระคุณความกรุณา ศาสตราจารย์ ดร.จาร์วัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ คำสั่งสอน คำชี้แนะและให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ สักรียา ชิตวงศ์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำที่ดี ทำให้งานวิจัยดำเนินต่อไปได้อย่างราบรื่น

ขอขอบคุณ นายไพโรจน์ แซ่ตั้ง ผู้ให้คำปรึกษา ที่ให้คำแนะนำ คำสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์ ตลอดจนชี้แนะแนวทางแก้ไข ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณคณะผู้ทำวิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย ให้คำปรึกษาที่ดี อีกทั้งยังให้ความร่วมมือในการดำเนินงานวิจัยตลอดมา

นางสาวปัญจรัตน์	อัครวิริยะกิจ
นายพศิน	กัฏวานธน์โชติ
นายพิชญ์พรธ	บุญมัน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	vii
สารบัญรูป.....	viii
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	xi
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การพัฒนาระบบ.....	3
2.1.1 ระบบอากาศ.....	3
2.1.2 ระบบควบคุมการจุดหัวเผาเชื้อเพลิงแก๊ส LPG.....	5
2.2 การอ้างอิงถึงข้อมูลตามขนาดของข้อมูล	6
2.2.1 การเข้าถึงข้อมูล ในแบบ Bit	6
2.2.2 การเข้าถึงข้อมูล ในแบบ Byte.....	6
2.2.3 การเข้าถึงข้อมูลในแบบ Word	6
2.2.4 การเข้าถึงข้อมูลในแบบ Double Word	7
2.3 อุปกรณ์ต่าง ๆในระบบ	7
2.3.1 ระบบการเผาไหม้.....	7
2.3.2 ระบบบดและลำเลียงเชื้อเพลิง	8
2.3.3 ระบบกำจัดฝุ่นแบบเปียก	9
2.3.4 ระบบป้อนอากาศ	9
2.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าและดึงออกมาเป็นสัญญาณ.....	9
2.3.6 ชุดอุปกรณ์ควบคุม.....	10
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1	Internet of Things (IoT)	11
3.1.1	การทำงานพื้นฐานของ Internet of Things	11
3.1.2	เซิร์ฟเวอร์ของ Internet of Things	11
3.1.3	โปรโตคอลสำหรับการสื่อสาร	12
3.2	การเผาไหม้ (Combustion).....	12
3.2.1	การเผาไหม้สามารถแยกออกได้เป็น 2 ประเภทนั้นคือ	12
3.2.2	การเผาไหม้ตามปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric Combustion).....	12
3.2.3	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating value)	14
3.2.4	การวิเคราะห์ระบบเผาไหม้โดยกฎเทอร์โมเคมีที่หนึ่งในระบบการไหลคงตัว.....	14
3.3	การพาความร้อน Convection	15
3.3.1	พื้นฐานการพาความร้อน.....	15
3.3.2	การพาความร้อนแบบบังคับ.....	15
3.3.3	การพาความร้อนตามธรรมชาติ.....	15
3.4	Lua script.....	18
3.4.1	ชนิดข้อมูลพื้นฐานในภาษา Lua.....	18
3.4.2	การสร้างตารางแบบ Associative Arrays.....	18
บทที่ 4	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	20
4.1	แนวคิดในการพัฒนาระบบ	20
4.1.1	ส่วนประกอบของ V-BOX.....	20
4.1.2	การทำงานของ V-BOX.....	22
4.2	Address ของสัญญาณ.....	23
4.2.1	การอ้างอิง Address จากโปรแกรม Simatic WinCC Explorer.....	23
4.2.2	การดูข้อมูล Address จากโปรแกรม TIA Portal V13.....	25
4.3	การติดตั้งและตั้งค่า V-BOX.....	27
4.3.1	การติดตั้ง V-BOX	27
4.3.2	การตั้งค่า V-BOX.....	27
4.3.3	การดึงสัญญาณเข้าสู่ V-BOX	29
4.3.4	การตั้งค่าเพื่อบันทึกข้อมูลแบบเรียลไทม์.....	30
4.3.5	การตั้งค่าระบบสัญญาณเตือน.....	32
4.4	การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์กับ สถานะการทำงานของระบบ	34
4.4.1	เงื่อนไขและวิธีการทดลอง.....	34

4.4.2	ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์กับอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง	34
4.4.3	การคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการทำงานของระบบกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์บนถ่ายเชื้อเพลิง	35
4.5	การคำนวณหาคูณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์	36
4.5.1	องค์ประกอบธาตุทางเคมีของเชื้อเพลิง.....	36
4.5.2	สมการการเผาไหม้ถ่านหิน	36
4.6	การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิว.....	44
4.6.1	การพาความร้อนที่หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล	44
4.6.2	การพาความร้อนที่เตาเผา	46
4.6.3	การพาความร้อนที่ท่อเชื่อมระหว่างเตาเผาและเครื่องกำจัดฝุ่นแบบเปียก.....	48
4.7	การเขียนโปรแกรม	50
4.7.1	การสร้าง Script และชนิดของ Script	50
4.7.2	แนวคิดการเขียน Script	51
4.7.3	การเขียน Script การ Interpolate	52
4.7.4	การเขียน Script การคำนวณ	54
4.8	วิธีเขียนหน้าเว็บบน Cloud SCADA ในซอฟต์แวร์ V-NET	57
บทที่ 5	ผลการทดสอบ.....	64
5.1	การทดสอบ	64
5.2	ผลการทดสอบ.....	64
5.2.1	การทดสอบการควบคุมระบบผ่านหน้าเว็บ Cloud SCADA.....	64
5.2.2	การทดสอบด้านการบันทึกข้อมูล	67
5.2.3	การทดสอบระบบสัญญาณเตือน	68
5.2.4	การทดสอบระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงาน	68
5.3	การวิจารณ์และอภิปรายผล	70
บทที่ 6	บทสรุป.....	71
6.1	บทสรุป.....	71
6.2	ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารอ้างอิง	73
ภาคผนวก ก	74

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 สมการสหพันธ์สำหรับเลขนัสเซลล์เฉลี่ยของการพาความร้อนตามธรรมชาติบนพื้นผิว	17
ตารางที่ 4.1 แสดง Address ของสัญญาณที่ต้องการ.....	25
ตารางที่ 4.2 แสดงความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ สำหรับ อัตราทดเฟือง 1 : 50	35
ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบธาตุทางเคมีของเชื้อเพลิง.....	36
ตารางที่ 4.4 แสดงน้ำหนักของธาตุและจำนวนโมลของธาตุในเชื้อเพลิงถ่านหิน.....	37
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเอนทัลปีก่อเกิดของ O ₂ และ N ₂	40
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าอัตราส่วนของสารองค์ประกอบไอเสียในไอเสีย 1 kmol.....	42
ตารางที่ 4.7 อัตราส่วนมวลของสารองค์ประกอบไอเสียใน 0.1368 kg/s	43
ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลอุณหภูมิทั้ง 7 จุดจากโปรแกรม WinCC และโปรแกรม V-NET ที่เวลา 13:36:30.....	67
ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลอุณหภูมิทั้ง 7 จุดจากโปรแกรม WinCC และโปรแกรม V-NET ที่เวลา 13:53:29.....	67
ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงค่าที่ต้องการเปรียบเทียบจากการคำนวณด้านพลังงานในหัวข้อที่ 4.5.2.4 และ 4.6.....	69

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบอากาศทั้งสามส่วน	4
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงการควบคุมวาล์วปีกผีเสื้อ	5
รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงระบบควบคุมการจุดหัวเผาเชื้อเพลิงแก๊ส LPG	5
รูปที่ 2.4 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-chamber)	7
รูปที่ 2.5 ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง (Furnace).....	8
รูปที่ 2.6 ถังเก็บเชื้อเพลิงชนิดผง	8
รูปที่ 2.7 ถังเก็บเชื้อเพลิงชนิดอัดแท่ง.....	8
รูปที่ 2.8 เครื่องกำจัดฝุ่นแบบเปียก (Wet scrubber)	9
รูปที่ 2.9 แสดงหลักการเปลี่ยนแปลงความร้อนให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า.....	10
รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างการใช้ Associative Arrays.....	19
รูปที่ 4.1 Interfaces ของ V-BOX S-00	21
รูปที่ 4.2 หลักการทำงานของ V-BOX	22
รูปที่ 4.3 แสดงหน้าต่างเมนูของโปรแกรม Simatic WinCC Explorer	23
รูปที่ 4.4 หน้า Graphics Designer ของโปรแกรม Simatic WinCC Explorer	23
รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างชื่อของสัญญาณที่ต้องการ	24
รูปที่ 4.6 แสดงหน้า Tag Management ของโปรแกรม Simatic WinCC Explorer.....	24
รูปที่ 4.7 แสดงขั้นตอนการดู Name Tag ในโปรแกรม Tia Portal V13.....	25
รูปที่ 4.8 หน้าต่างของโปรแกรม V-NET	28
รูปที่ 4.9 การกำหนดค่าเครือข่ายของอุปกรณ์.....	28
รูปที่ 4.10 แสดงสถานการณ์ตั้งค่า Config Network สำเร็จ.....	29
รูปที่ 4.11 แสดงขั้นตอนการเพิ่ม Address ของสัญญาณในโปรแกรม V-NET.....	29
รูปที่ 4.12 แสดงขั้นตอนการเปิดหน้าต่างสำหรับการสร้างกลุ่มเพื่อกำหนดระยะเวลาในการบันทึกค่า	30
รูปที่ 4.13 แสดงหน้าต่างสำหรับการสร้างกลุ่มเพื่อกำหนดระยะเวลาในการบันทึกค่า	31
รูปที่ 4.14 แสดงขั้นตอนการเปิดหน้าต่างสำหรับการเพิ่ม Tag เพื่อกำหนดระยะเวลาในการบันทึกค่า	31
รูปที่ 4.15 แสดงหน้าต่างสำหรับการสร้างกลุ่มเพื่อกำหนดระยะเวลาในการบันทึกค่า	32
รูปที่ 4.16 แสดงขั้นตอนการเปิดหน้าต่างสำหรับการเพิ่ม Tag เพื่อสร้างระบบสัญญาณเตือน	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.17 แสดงหน้าต่างสำหรับการกำหนดค่าสัญญาณที่ต้องการทำระบบสัญญาณเตือน.....	33
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้า(Hz) กับอัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (kg/s).....	34
รูปที่ 4.19 แสดงรูปการวิเคราะห์ด้านพลังงานอย่างง่าย	39
รูปที่ 4.20 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล	44
รูปที่ 4.21 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเตาเผา.....	46
รูปที่ 4.22 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของที่ท่อเชื่อมระหว่างเตาเผาและเครื่องกำจัดฝุ่นแบบเปียก.....	48
รูปที่ 4.23 แสดงหน้าต่างแถบ Lua Script ในโปรแกรม V-NET	50
รูปที่ 4.24 แสดงหน้าต่างการตั้งชื่อและชนิดของ Script ในโปรแกรม V-NET	50
รูปที่ 4.25 แสดงหน้าต่างที่ให้เลือกชนิดของ Script	51
รูปที่ 4.26 แสดง Flowchart ของ script	52
รูปที่ 4.27 แสดงภาพส่วนที่หนึ่งของโปรแกรม Interpolate	53
รูปที่ 4.28 แสดงภาพส่วนที่สองของโปรแกรม Interpolate.....	53
รูปที่ 4.29 แสดงภาพส่วนที่สามของโปรแกรม Interpolate	53
รูปที่ 4.30 แสดงภาพของ Script โปรแกรม Interpolate ในในส่วนของการทำงานอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ	54
รูปที่ 4.31 แสดงภาพของ Script คำนวณสมการการเผาไหม้ mole และ mass fraction	54
รูปที่ 4.32 แสดงโปรแกรม Interpolate สำหรับหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ในการคำนวณการพา ความร้อน.....	55
รูปที่ 4.33 แสดง Script ส่วนการคำนวณหาอัตราการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการพาความร้อน บนพื้นผิว	55
รูปที่ 4.34 แสดงการตั้งค่าเพิ่ม Tag เพื่อเก็บข้อมูลที่ได้จากการเขียน Lua script	56
รูปที่ 4.35 วิธีเข้าสู่หน้า Web Cloud Configuration เพื่อใช้งาน Cloud SCADA.....	57
รูปที่ 4.36 การสร้างกลุ่ม Project และการสร้าง Project ใหม่.....	57
รูปที่ 4.37 การสร้าง Project ใหม่ สามารถตั้งชื่อ กำหนด Resolution ความกว้างยาวได้	58
รูปที่ 4.38 คลิก Configuration Design เพื่อแก้ไขหรือออกแบบหน้า SCADA.....	58
รูปที่ 4.39 หมวดเครื่องมือสำหรับจัดการหน้า Page ต่าง ๆ.....	59
รูปที่ 4.40 หมวดเครื่องมือพื้นฐานใช้แทรกข้อความ รูปภาพ และรูปเรขาคณิต	59

รูปที่ 4.41 หมวดเครื่องมือทั่วไป ให้นำ Tag สัญญาณประเภทต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์บน Cloud SCADA	60
รูปที่ 4.42 หมวดเครื่องมืออื่น ๆ ที่มีประโยชน์ต่อการออกแบบ Cloud SCADA.....	61
รูปที่ 4.43 ตัวอย่างรูปภาพ Template ที่นำมาใช้เป็น Background ของ Home Page.....	61
รูปที่ 4.44 HOME Page ใช้ดูค่าต่างๆที่ถูกวัดจากเครื่องเผาไหม้และสามารถสั่งการอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้	62
รูปที่ 4.45 FUEL Page ใช้ดูค่าต่างๆที่มาจากระบบประมวลผลที่คำนวณค่าที่เกี่ยวกับเชื้อเพลิง แบบ Real-Time	63
รูปที่ 4.46 DATA Page ใช้แสดงข้อมูล Record data และ Alarm	63
รูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างหน้าเว็บ Cloud SCADA และหน้าโปรแกรม WinCC เมื่อสั่งเปิด Auto PID	64
รูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างหน้าเว็บ Cloud SCADA และหน้าโปรแกรม WinCC เมื่อสั่งเปิดอากาศส่วนที่สอง	65
รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างหน้าเว็บ Cloud SCADA และหน้าโปรแกรม WinCC เมื่อสั่งปิดอากาศส่วนที่สอง.....	65
รูปที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างหน้าเว็บ Cloud SCADA และหน้าโปรแกรม WinCC เมื่อสั่งปิด Auto PID	66
รูปที่ 5.5 แสดงตารางของระบบสัญญาณเตือนเมื่อค่าเกินเงื่อนไขที่กำหนด	68
รูปที่ 5.6 แสดงภาพหน้าจอ Scada ที่เงื่อนไขการคำนวณตามหัวข้อที่ 4.5.2.4 และ 4.6.....	69

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ชื่อ	หน่วย
(A/F)	Air-fuel ratio	kg air/kg fuel
(A/F) _{stoic}	Stoichiometric air-fuel ratio	kg air/kg fuel
(F/A)	Fuel-air ratio	kg fuel/kg air
(F/A) _{stoic}	Stoichiometric fuel-air ratio	kg fuel/kg air
MW _{air}	Molar mass of air	kg/kmol
MW _{fuel}	Molar mass of fuel	kg/kmol
∅	Equivalence ratio	-
%Stoichiometry Air	Percent stoichiometric	%
m _{air}	Mass of air	kg
m _{fuel}	Mass of fuel	kg
\dot{m}_a	Mass flow rate of air	kg/s
(\dot{m}_a) _{stoic}	Stoichiometric mass flow rate of Air	kg/s
HHV	Higher heating value	kJ/kg
LHV	Lower heating value	kJ/kg
E _{in}	Inlet energy	kJ
E _{out}	Outlet energy	kJ
ΔE _{system}	Energy changes in a system	kJ
\dot{E}_{in}	Rate of inlet energy	kJ/s
\dot{E}_{out}	Rate of outlet energy	kJ/s
\dot{H}_{in}	Rate of inlet enthalpy	kJ/s
\dot{H}_{out}	Rate of outlet enthalpy	kJ/s
\dot{Q}_{loss}	Rate of heat loss	kJ/s
E _{system}	Energy in a system	kJ
$\dot{Q}_{accumulate}$	Rate of heat accumulates	kJ/s
\dot{Q}_{conv}	Rate of convective heat	kJ/s
h	Specific enthalpy	kJ/kg
A _s	Surface area	M ²
T _s	Surface temperature	°C
T _∞	Fluid temperature	°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	ชื่อ	หน่วย
$\beta_{\text{ideal-gas}}$	Volume expansion coefficient	-
T	Temperature	°C
Nu	Nusselt number	-
Ra _L	Rayleigh number	-
Gr _L	Grashof number	-
Pr	Prandtl number	-
\dot{Q}	Heat transfer	kJ
P _{v,air}	Pressure of water vapor in air	kPa
ϕ	Relative humidity	%
P _{sat}	Saturated pressure	kPa
P _{total}	Total pressure	kPa
N _{v,air}	Mole number	kmol
N _{total}	Mole number	kmol
a	Mole number of dry air	kmol
a _{th}	Mole number of air	kmol
$\dot{Q}_{\text{Transfer}}$	Rate of heat transfer	kJ/s
Δh_s	Sensible specific enthalpy changes	kJ/kg
h _f	Specific enthalpy of formation	kJ/kg
HV	Heating value	kJ/kg
ρ	Density of air	kg/m ³
\dot{V}	Volume flow rate	m ³ /s
(A/F) _{ac}	Actual air-fuel ratio	kg air/kg fuel
(A/F) _{th}	Theoretical air-fuel ratio	kg air/kg fuel
a _{ac}	Actual mole number of air	kmol
$\dot{m}_{\text{flue gas}}$	Mass flow rate of flue gas	kg/s
η	Efficiency	-
π	Pi	-
\dot{m}_{CO_2}	Mass flow rate of carbon dioxide	kg/s
$(\Delta h_s)_{\text{CO}_2}$	Sensible specific enthalpy changes of carbon dioxide	kJ/kg
\dot{m}_{O_2}	Mass flow rate of oxygen dioxide	kg/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	ชื่อ	หน่วย
$(\Delta h_s)_{O_2}$	Sensible specific enthalpy changes of oxygen dioxide	kJ/kg
\dot{m}_{H_2O}	Mass flow rate of water	kg/s
$(\Delta h_s)_{H_2O}$	Sensible specific enthalpy changes of water	kJ/kg
\dot{m}_{SO_2}	Mass flow rate of sulfur dioxide	kg/s
$(\Delta h_s)_{SO_2}$	Sensible specific enthalpy changes of sulfur dioxide	kJ/kg
\dot{m}_{N_2}	Mass flow rate of nitrogen dioxide	kg/s
$(\Delta h_s)_{N_2}$	Sensible specific enthalpy changes of nitrogen dioxide	kJ/kg
$(h_f)_{fuel}$	Specific enthalpy of formation	kJ/kg
$(h_f)_{CO_2}$	Specific enthalpy of formation of carbon dioxide	kJ/kg
$(h_f)_{H_2O}$	Specific enthalpy of formation of water	kJ/kg
$(h_f)_{SO_2}$	Specific enthalpy of formation of sulfur dioxide	kJ/kg
$(h_f)_{N_2}$	Specific enthalpy of formation of nitrogen dioxide	kJ/kg
$(h_f)_{O_2}$	Specific enthalpy of formation of oxygen dioxide	kJ/kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตมีบทบาทในการทำให้อุปกรณ์ทุกอย่างสามารถเชื่อมโยงกันได้ ทำให้มนุษย์สามารถสื่อสารกันได้ทุกที่ทุกเวลา จึงทำให้แนวโน้มในการที่จะเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อให้สามารถสื่อสารกันได้ในระยะไกลมีเพิ่มมากขึ้นในอนาคต ดังนั้น Internet of Things (IoT) จึงเป็นเทคโนโลยีที่มีความสำคัญในด้านการเปลี่ยนแปลงให้เป็นระบบที่ทันสมัย

การก้าวเข้าสู่อุตสาหกรรม 4.0 ถือเป็นครั้งที่สี่ในการปฏิวัติอุตสาหกรรม โดยเน้นเรื่องการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกัน ระบบอัตโนมัติ และข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Real-Time) ซึ่งการทราบข้อมูลแบบเรียลไทม์ เช่น ข้อมูลประสิทธิภาพการทำงานของระบบ เป็นต้น จะทำให้สามารถนำมาตรวจสอบ รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์เพื่อให้ทราบถึงความเสียหายหรือความขัดข้องของระบบ เพื่อลดความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบ และนอกจากนี้ยังสามารถนำมาปรับปรุงระบบเพื่อให้มีประสิทธิภาพและการดำเนินงานที่ดีอีกด้วย

วิทยานิพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาระบบประมวลผลข้อมูลของระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียดให้สามารถแสดงข้อมูลการทำงานของระบบและข้อมูลคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์แบบเรียลไทม์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต และเพื่อเป็นกรณีศึกษาการใช้งานระบบ IoT ร่วมกับภาคอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อแสดงข้อมูลของระบบและข้อมูลที่ประมวลผลได้ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบเรียลไทม์
- 1.2.2 สามารถควบคุมการทำงานของระบบผ่านหน้าเว็บ Cloud SCADA ได้
- 1.2.3 เพื่อแจ้งเตือนค่าสัญญาณที่ต้องการควบคุมให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 เข้าใจหลักการทำงานของระบบ Internet of Things ในภาคอุตสาหกรรม
- 1.3.2 สามารถแสดงวิธีการคำนวณการหาค่าคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์และนำมาออกแบบโปรแกรมเพื่อแสดงผลแบบเรียลไทม์ได้
- 1.3.3 สามารถแสดงผลค่าสัญญาณการปิด-เปิด, อุณหภูมิ และความดันของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1.4.1 ใช้ V-box เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณภายนอกเชื่อมต่อเข้ากับ PLC เพื่อให้สามารถนำสัญญาณการควบคุมส่งผ่านระบบอินเทอร์เน็ตได้
- 1.4.2 พิจารณาให้การเผาไหม้ของระบบเป็นการเผาไหม้แบบสมบูรณ์เท่านั้น
- 1.4.3 ไม่คำนึงถึงข้อจำกัดในการคำนวณ A/F ratio

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ศึกษากระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียด
- 1.5.2 ศึกษาการติดตั้งและตั้งค่าอุปกรณ์ V-BOX
- 1.5.3 ศึกษาการคำนวณคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์และพลังงานที่สูญเสียไปของระบบ
- 1.5.4 ศึกษาการเขียนภาษา LUA Script และสร้างโปรแกรมเพื่อคำนวณหาข้อมูลในข้อที่ 3
- 1.5.5 ออกแบบหน้าเว็บเพื่อแสดงผลข้อมูล ด้วย Cloud SCADA ของ V-NET
- 1.5.6 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม LUA Script
- 1.5.7 วิเคราะห์และสรุปผล

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่พัฒนาระบบต่อจากงานวิจัยเรื่องการประยุกต์ใช้ PLC ในการควบคุมหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง ให้เป็นระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงานของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียดผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต และมีการใช้ข้อมูลการสอบเทียบค่าความถี่ของ screw feeder กับอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงจากงานวิจัยการศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์มในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงผงสำหรับหม้อไอน้ำในภาคอุตสาหกรรมเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงหลักการทำงานของระบบเผาไหม้ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง การอ้างอิงถึงข้อมูลตามขนาดของข้อมูล และอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

2.1 การพัฒนาระบบ

ในการพัฒนาระบบจะอธิบายถึงหลักการทำงานของระบบและการใช้ PLC ในการควบคุมระบบ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบดังนี้

2.1.1 ระบบอากาศ

2.1.1.1 อากาศส่วนที่หนึ่ง (Primary Air)

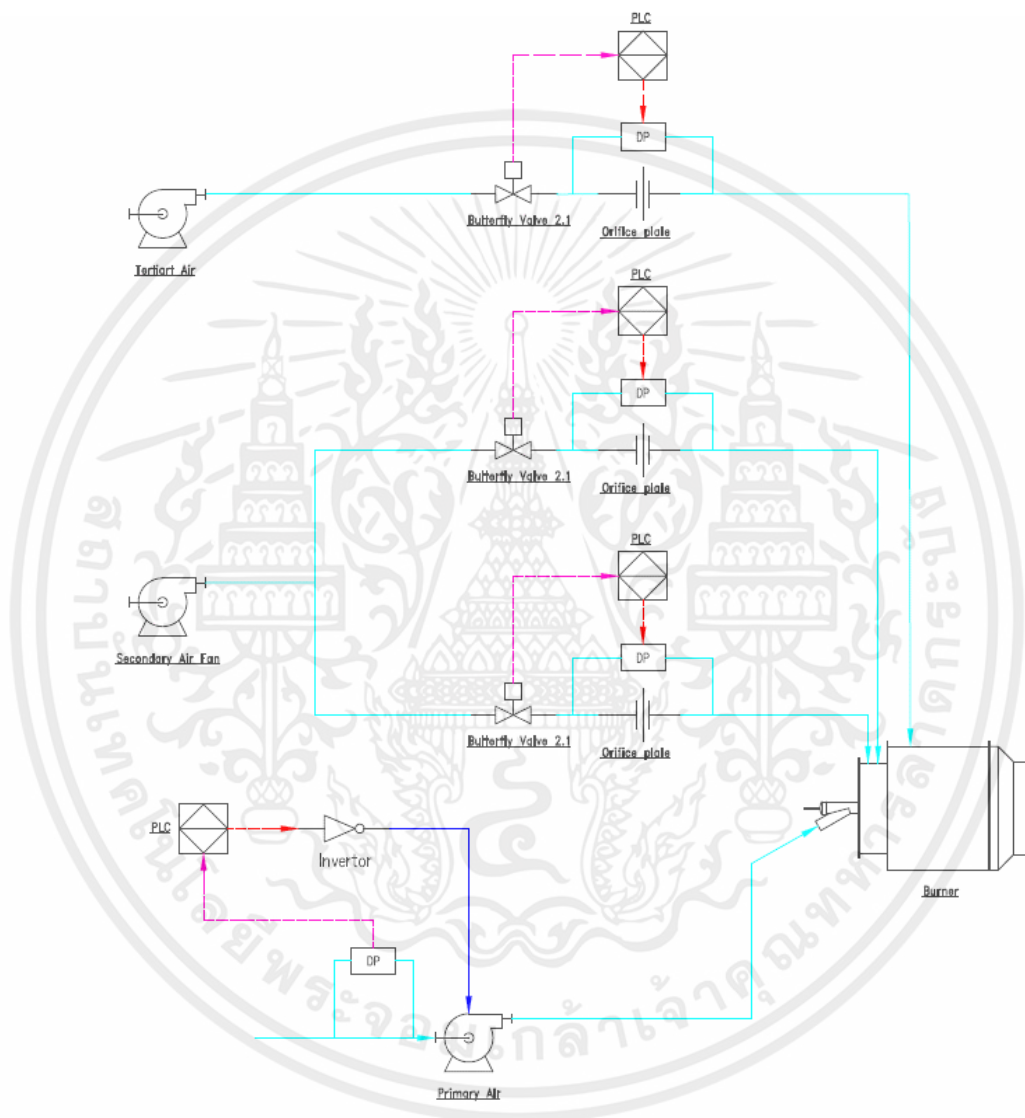
อากาศส่วนที่หนึ่งจะทำหน้าที่เป่าลมเพื่อลำเลียงเชื้อเพลิงลงมาเข้าสู่ห้องเผาไหม้ โดยจะมี Differential Pressure Transmitter วัดความดันตกคร่อมระหว่างท่อทางเข้าของอากาศส่วนที่หนึ่งกับบรรยากาศ จากนั้นค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จะถูกส่งไปยัง PLC เพื่อประมวลผล โดยจะคำนวณจากสมการ Bernoulli เพื่อหาความเร็วของอากาศ นำไปคูณกับพื้นที่หน้าตัดของท่อและความหนาแน่นของอากาศจะได้อัตราการไหลเชิงมวล จากนั้นทำการเปลี่ยนหน่วยเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตร และเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลที่สามารถคำนวณได้จาก Differential Pressure Transmitter กับค่าอัตราการไหลที่ป้อนเข้าไปในระบบ หากเครื่องเป่าลมยังไม่ได้ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรตามที่ Set Point ไว้ PLC จะทำการสั่งให้เครื่องเป่าลมนั้นให้ขับไปถึงค่าที่ Set Point ไว้

2.1.1.2 อากาศส่วนที่สอง (Secondary Air)

อากาศส่วนที่สองเป็นอากาศหลักสำหรับการเผาไหม้ โดยอากาศส่วนนี้จะแยกท่อออกเป็น 2 ทาง เนื่องจากตอนระบบทำงานที่อัตราการไหลสูง ๆ ไม่สามารถทำปริมาณลมได้เพียงพอ เพราะทำให้เกิดแรงเสียดทานภายในท่อ แล้วส่งผลทำให้ระบบเกิดการสูญเสียพลังงาน จึงทำการแยกอากาศส่วนนี้ออกเป็น 2 ทาง โดยอากาศในส่วนสองจะมีการควบคุมต่างไปจากอากาศส่วนที่หนึ่ง เนื่องจากอากาศส่วนที่สอง จะควบคุมผ่านการเปิด-ปิดของ Butterfly Valve มี Differential Pressure Transmitter วัดคร่อม Orifice อยู่ในเส้นท่อ และหลักการที่ใช้ PLC ในการประมวลผลนั้นเป็นเช่นเดียวกันกับอากาศส่วนที่หนึ่ง

2.1.1.3 อากาศส่วนที่สาม (Tertiary Air)

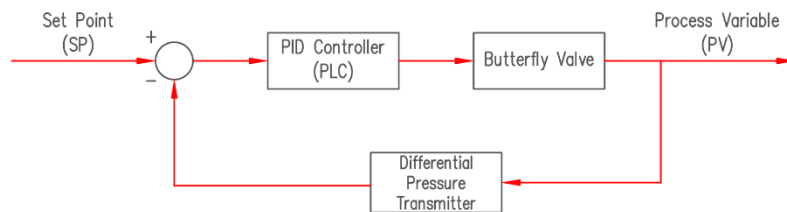
อากาศส่วนที่สาม เป็นอากาศสำหรับการเผาไหม้ส่วนที่เหลือ จะมีการควบคุมผ่านการเปิด-ปิดของ Butterfly Valve มี Differential Pressure Transmitter วัดความดันตกคร่อม Orifice อยู่ในเส้นท่อและมีหลักการที่ใช้ PLC ในการประมวลผลเช่นเดียวกันกับอากาศส่วนที่หนึ่ง



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบอากาศทั้งสามส่วน

2.1.1.4 การควบคุมวาล์วปีกผีเสื้อ

อากาศส่วนที่สองและอากาศส่วนที่สามจะถูกควบคุมโดยการเปิด-ปิดของวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly Valve) โดยนำฟังก์ชันการควบคุม PID Controller มาใช้การควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2.2

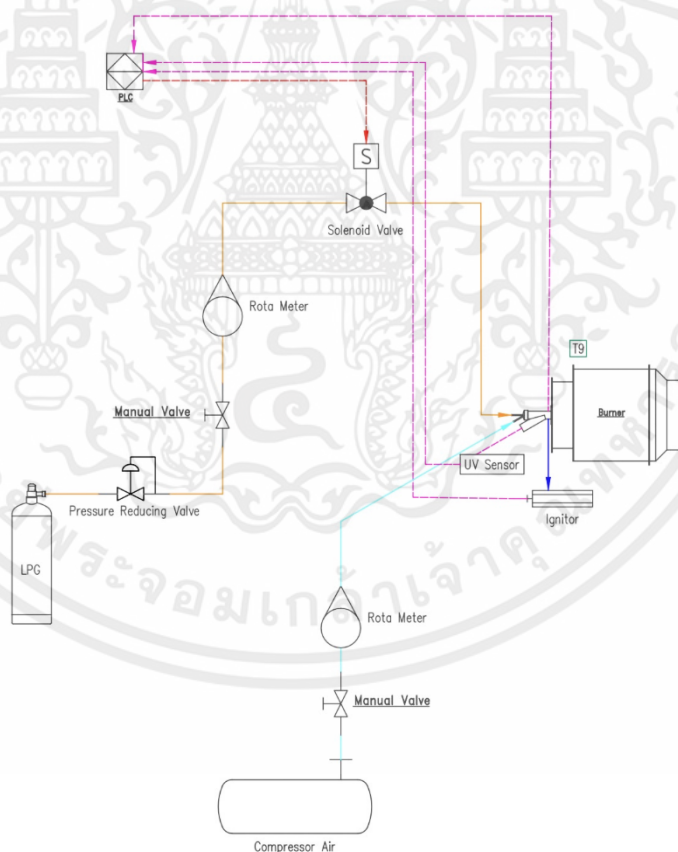


รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงการควบคุมวาล์วปีกผีเสื้อ

ผู้ใช้งานจะต้องทำการกำหนดค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Set Point) จากนั้นจะถูกส่งไปประมวลผลที่ PID Controller และทำการเปรียบเทียบกับค่าความดันที่อ่านได้จาก Differential Pressure Transmitter เพื่อควบคุมเปอร์เซ็นต์การเปิด-ปิดวาล์วปีกผีเสื้อ

2.1.2 ระบบควบคุมการจุดหัวเผาเชื้อเพลิงแก๊ส LPG

ในการจุดหัวเผาจะสามารถควบคุมผ่านส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานของโปรแกรม Simatic WinCC Explorer โดยจะมีลักษณะการควบคุมหัวเผาเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงระบบควบคุมการจุดหัวเผาเชื้อเพลิงแก๊ส LPG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อผู้ใช้งานทำการสั่ง Auto Ignite จะมี UV sensor ทำหน้าที่ตรวจสอบเปลวไฟ จากนั้นจะส่งสัญญาณไปที่ PLC หากไม่มีการตรวจพบเปลวไฟ ระบบจะทำการปิด Solenoid Valve เพื่อหยุดการปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบ [1]

2.2 การอ้างอิงถึงข้อมูลตามขนาดของข้อมูล

2.2.1 การเข้าถึงข้อมูล ในแบบ Bit

การเข้าถึงข้อมูลในแบบ Bit เป็นการเข้าถึงข้อมูลที่มีขนาดเล็กที่สุดและมีความสำคัญมาก เพราะเป็นขนาดของข้อมูลที่ทุกข้อมูลต้องมี การเข้าถึงข้อมูลแบบนี้จะมีการกินพื้นที่ขนาดของข้อมูลไป 1 Bit และจะต้องอ้างอิงถึงชนิดของข้อมูลตามด้วย Byte ของข้อมูล ที่มีการเข้าถึงข้อมูลแบบ Bit นั้น ๆ การเข้าถึงข้อมูล ในแบบ Bit จะลักษณะดังนี้ คือ

I 9.0 คือ ข้อมูลของ Input ที่มีขนาด 1 Bit ณ ตำแหน่งของข้อมูล Byte ที่ 9 และ Bit ที่ 0

Q 5.7 คือ ข้อมูลของ Output ที่มีขนาด 1 Bit ณ ตำแหน่งของข้อมูล Byte ที่ 5 และ Bit ที่ 7

M 8.1 คือ ข้อมูลของ Memory ที่มีขนาด 1 Bit ณ ตำแหน่งของข้อมูล Byte ที่ 8 และ Bit ที่ 1

2.2.2 การเข้าถึงข้อมูล ในแบบ Byte

รูปแบบขนาดของข้อมูล 1 Byte จะประกอบไปด้วยข้อมูลทั้งหมด 8 Bits การเข้าถึงข้อมูลในลักษณะนี้จะต้องอ้างอิงถึงชนิดของข้อมูลตามด้วยตัวอักษร การเข้าถึงข้อมูลในแบบ Byte จะมีลักษณะดังนี้

IB 9 คือ ข้อมูลของ Input ที่มีขนาด 1 Byte หรือ รวมทั้งหมด 8 Bits ณ ตำแหน่ง ของข้อมูล Byte ที่ 9 ที่รวมทั้งหมด ตั้งแต่ Bit ที่ 0 ถึง Bit ที่ 7

QB 5 คือ ข้อมูลของ Output ที่มีขนาด 1 Byte หรือ รวมทั้งหมด 8 Bits ณ ตำแหน่งของข้อมูล Byte ที่ 5 ที่รวมทั้งหมด ตั้งแต่ Bit ที่ 0 ถึง Bit ที่ 7

MB 8 คือ ข้อมูลของ Memory ที่มีขนาด 1 Byte หรือ รวมทั้งหมด 8 Bis ณ ตำแหน่งของข้อมูล Byte ที่ 8 ที่รวมทั้งหมด ตั้งแต่ Bit ที่ 0 ถึง Bit ที่ 7

2.2.3 การเข้าถึงข้อมูลในแบบ Word

การเข้าถึงข้อมูล Word จะกินพื้นที่ขนาดของข้อมูลไป 2 Bytes หรือรวมทั้งหมด 16 Bits และการเข้าถึงข้อมูลในลักษณะนี้จะต้องอ้างอิงถึงชนิดของข้อมูลตามด้วยตัวอักษรที่บ่งบอกถึงขนาดของข้อมูลแบบ Word (W) จะมีลักษณะดังนี้

IW 8 คือข้อมูลของ Input ณ ตำแหน่งของข้อมูล Word ที่ 8 บริเวณพื้นที่ Byte ที่ 8 และ Byte ที่ 9

QW 4 คือข้อมูลของ Output ณ ตำแหน่งของข้อมูล Word ที่ 4 บริเวณพื้นที่ Byte ที่ 4 และ Byte ที่ 5

MW 2 คือข้อมูลของ Memory ณ ตำแหน่งของข้อมูล Word ที่ 2 บริเวณพื้นที่ Byte ที่ 2 และ Byte ที่ 3

2.2.4. การเข้าถึงข้อมูลในแบบ Double Word

รูปแบบขนาดของข้อมูล 1 Double Word จะประกอบไปด้วยข้อมูลทั้งหมด 32 Bits ด้วยกัน หรือก็คือขนาดข้อมูลทั้งหมด 4 Byte จะใช้ตัวย่อ D (ย่อมาจาก Double Word) จะมีลักษณะดังนี้

ID 8 คือข้อมูลของ Input ณ ตำแหน่งของข้อมูล Double Word ที่ 8 บริเวณพื้นที่ Word ที่ 8 และ Word ที่ 10 หรือก็คือ บริเวณพื้นที่ Byte ที่ 8 ถึง Byte ที่ 11

QD 4 คือข้อมูลของ Output ณ ตำแหน่งของข้อมูล Double Word ที่ 4 บริเวณพื้นที่ Word ที่ 4 และ Word ที่ 6 หรือก็คือ บริเวณพื้นที่ Byte ที่ 4 ถึง Byte ที่ 7

MD 2 คือข้อมูลของ Memory ณ ตำแหน่งของข้อมูล Double Word ที่ 2 บริเวณพื้นที่ Word ที่ 2 และ Word ที่ 4 หรือก็คือ บริเวณพื้นที่ Byte ที่ 2 ถึง Byte ที่ 5

2.3 อุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ

2.3.1 ระบบการเผาไหม้

หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-chamber) ห้องเผาไหม้ช่วยจะเป็นห้องที่ใช้สำหรับรักษาเสถียรภาพในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียด



รูปที่ 2.4 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-chamber)

ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง (Furnace) ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ห้องเผาไหม้ ที่มีหน้าที่เป็นจุดเผาไหม้เชื้อเพลิง ชุดสกรูระบายเถ้าหนัก ใช้สำหรับการระบายเถ้าออกจากห้องเผาไหม้ ถึงพักเถ้าหนัก ใช้พักเถ้าหนักที่ระบายออกจากห้องเผาไหม้



รูปที่ 2.5 ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง (Furnace)

2.3.2 ระบบบดและลำเลียงเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงชนิดอัดแท่งจะถูกเก็บไว้ในถังเก็บเชื้อเพลิงชนิดอัดแท่ง จากนั้นจะถูกลำเลียงด้วยสกรูลำเลียงเชื้อเพลิงเพื่อเข้าสู่เครื่องบดชนิดค้อนเหวี่ยง เมื่อเชื้อเพลิงถูกบดเป็นผงแล้วจะถูกลำเลียงมาเก็บไว้ในถังเก็บเชื้อเพลิงชนิดผงก่อนจะถูกป้อนเข้าสู่หัวเผาไหม้ช่วย (Pre-chamber) ด้วยสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิง (Screw feeder)



รูปที่ 2.7 ถังเก็บเชื้อเพลิงชนิดอัดแท่ง



รูปที่ 2.6 ถังเก็บเชื้อเพลิงชนิดผง

2.3.3 ระบบกำจัดฝุ่นแบบเปียก

สำหรับระบบบำบัดไอเสียในห้องทดลองจะเป็นการทำงานควบคู่กันระหว่างระบบลดอุณหภูมิไอเสีย (Evaporative cooling) กับระบบกำจัดฝุ่นแบบเปียก (Wet scrubber)

เครื่องกำจัดฝุ่นแบบเปียก (Wet scrubber) จะทำงานใช้หลักการที่ไอเสียหรือไอกรดผ่านมาน้ำจะทำให้มวลสาร ตะกอนฝุ่น สารปนเปื้อนต่าง ๆ กับน้ำจับตัวกัน ส่วนอากาศที่ถูกบำบัดแล้วจะถูกดูดด้วยพัดลมดูดไอเสียส่งไปยังปล่องเพื่อปล่อยสู่บรรยากาศต่อไป



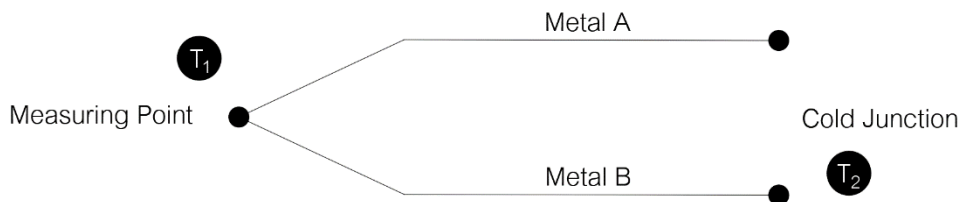
รูปที่ 2.8 เครื่องกำจัดฝุ่นแบบเปียก (Wet scrubber)

2.3.4 ระบบป้อนอากาศ

ระบบป้อนอากาศในห้องทดลองจะประกอบไปด้วย Blower 2 เครื่องในการป้อนอากาศทั้ง 3 ส่วน และในระบบอากาศส่วนที่สองและสามจะติดตั้งวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly Valve) เพื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศ

2.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าและดึงออกมาเป็นสัญญาณ

Thermocouple ใช้ตรวจวัดอุณหภูมิทั้งหมด 9 จุด บริเวณหัวเผาเชื้อเพลิง 1 จุด ห้องเผาเชื้อเพลิง 5 จุด เตาเผา 1 จุด ทางช่องทางออกแก๊สไอเสีย 1 จุด และบริเวณปล่องไอเสีย 1 จุด โดยจะถูกดึงเป็นสัญญาณเข้าสู่ PLC โดยมีหลักการทำงานอุปกรณ์หรือเซ็นเซอร์ที่ใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความร้อนหรืออุณหภูมิให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า ประกอบด้วยลวดโลหะตัวนำ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน นำมาเชื่อมปลายทั้ง 2 เข้าด้วยกัน ปลายด้านหนึ่งเรียกว่า Measuring point หรือ Hot junction เป็นจุดที่ใช้วัดอุณหภูมิ และปลายอีกด้านหนึ่งของลวดโลหะปล่อยว่างเรียกว่า Cold junction ดังรูปที่ 2.9 โดยจุดนี้จะทำหน้าที่เป็นจุดอ้างอิง มักเก็บไว้ในอุณหภูมิที่ทราบโดยปกติคือ 0 °C แต่ในทางปฏิบัติจะถูกปล่อยไว้ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.9 แสดงหลักการเปลี่ยนแปลงความร้อนให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า

เทอร์โมคัปเปิลทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะ 2 ชนิด คือ เมื่ออุณหภูมิที่ปลายลวดด้านที่เชื่อมกัน แตกต่างกับปลายลวดด้านที่เหลือ จะเกิดความต่างศักย์ สามารถแปลงค่าได้โดยอ้างอิงจากตารางที่เหมาะสม โดยในการทดลองได้ใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิล Type K ซึ่งประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิดที่ไม่เหมือนกัน ได้แก่ Nickel Chromium และ Nickel Alumel เป็นเทอร์โมคัปเปิลที่ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิกว้าง อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส

Differential Pressure Transmitter มีหน้าที่สำหรับวัดค่าผลต่างของความดันระหว่าง 2 ตำแหน่ง โดยค่าที่วัดได้จะถูกส่งออกมาในรูปของสัญญาณ อุปกรณ์นี้จะถูกใช้ในการวัดค่าความดันตกคร่อมที่ Orifice Plate ของ Secondary Air และ Tertiary Air จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกดึงเข้าสู่ PLC และถูกคำนวณเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตร เพื่อไปควบคุม Butterfly Valve ในส่วนของ Primary Air นั้น Differential Pressure Transmitter จะใช้วัดค่าความดันบริเวณก่อนเข้า Blower ของ Primary Air สัญญาณที่ได้จะถูกดึงเข้าสู่ PLC แต่สัญญาณที่จะถูกส่งไป Inverter เพื่อควบคุมการทำงานของ Blower ของ Primary Air โดยตรง นอกจากในส่วนของระบบอากาศแล้ว Differential Pressure Transmitter ยังถูกใช้วัดค่าของความดันที่ Wet Scrubber อีกด้วย

UV Sensor ใช้ตรวจวัดความเข้มของแสง โดยนำมาเป็นตัวชี้วัดว่าไฟติดหรือดับภายในห้องเผาเชื้อเพลิง และส่งสัญญาณไปยัง PLC ถ้าไฟไม่ติดหลังจากจุดหัวเผา จะส่งสัญญาณให้ PLC สั่งปิด Solenoid Valve เพื่อหยุดการป้อนเชื้อเพลิงและแก๊ส LPG และถ้าผู้ทดลองจุดไฟติดแล้ว มีการป้อนเชื้อเพลิงและแก๊ส LPG จนทำให้ไฟดับก็จะส่งสัญญาณให้ PLC สั่งปิด Solenoid Valve เพื่อหยุดการป้อนเชื้อเพลิงและแก๊ส LPG เช่นกัน

2.3.6 ชุดอุปกรณ์ควบคุม

PLC (Programmable logic Control) เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรหรือกระบวนการทำงานต่าง ๆ โดยภายในมี Microprocessor เป็นมันสมองสั่งการ PLC จะมีส่วนที่เป็นอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถต่อเข้าอุปกรณ์ต่าง ๆ ตัวตรวจวัดหรือสวิตช์ต่าง ๆ จะต่อเข้ากับอินพุต ส่วนเอาต์พุตจะใช้ต่อออกไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่เป็นเป้าหมายคล้ายกับ PLC เป็นสื่อกลางระหว่าง 2 อุปกรณ์ ในที่นี้ภายในห้องทดลองจะใช้ PLC เป็นสื่อกลางระหว่างเครื่องมือวัดต่าง ๆ กับ PC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้จะเสนอถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับการพัฒนาระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงานของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียดผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งประกอบไปด้วยทฤษฎีเกี่ยวกับ Internet of Things การเผาไหม้ การพาความร้อนและภาษา Lua

3.1 Internet of Things (IoT)

Internet of things (IoT) คือเครือข่ายที่เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ผ่านทั้งการเชื่อมต่อแบบไร้สายและแบบมีสาย ที่สามารถทำให้อุปกรณ์เหล่านั้นสามารถบันทึกข้อมูล สื่อสาร และควบคุมผ่านระยะไกลได้

Things ในความหมายของ IoT หมายถึงอุปกรณ์ที่มีเซ็นเซอร์ในตัว สามารถตรวจวัดและจัดเก็บข้อมูล และส่งต่อข้อมูลไปยังอุปกรณ์อื่น ๆ ได้

3.1.1 การทำงานพื้นฐานของ Internet of Things

Internet of Things มีวัตถุประสงค์เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้ โดยการสื่อสารเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลจะมีเซิร์ฟเวอร์หลักและอุปกรณ์เชื่อมต่อเป็นองค์ประกอบของระบบ แบ่งอุปกรณ์เชื่อมต่อออกเป็น 4 ประเภทหลักๆ ได้แก่

- **Sensor** คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจจับสภาพแวดล้อมและถ่ายโอนข้อมูลไปยังเซิร์ฟเวอร์
- **Actuator** คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานของระบบ
- **Hybrid** คืออุปกรณ์ที่มีทั้ง Sensor และ Actuator ทำหน้าที่สื่อสารกับเซิร์ฟเวอร์ในการรับส่งข้อมูล และทำงานตามคำสั่งจากอุปกรณ์ตรวจสอบ
- **Monitoring** คืออุปกรณ์ที่อาจจะเป็นสมาร์ทโฟน มีหน้าที่ควบคุม Actuator ตรวจสอบการอ่าน Sensor โดยส่งคำสั่งรับและประมวลผลข้อมูล Sensor

3.1.2 เซิร์ฟเวอร์ของ Internet of Things

เซิร์ฟเวอร์ของ Internet of Things เป็นระบบหลักที่ช่วยให้สื่อสาร ตรวจสอบ และแสดงผลข้อมูลของอุปกรณ์ได้ หากอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อเป็น Sensor เซิร์ฟเวอร์จะทำหน้าที่รับข้อมูลและส่งไปยังอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบและควบคุม หากอุปกรณ์เป็น Actuator เซิร์ฟเวอร์จะทำหน้าที่รับคำสั่งจาก Monitor และส่งกลับไปยัง Actuator หากเป็นแบบ Hybrid ระบบจะทำงานระหว่าง Sensor และ Actuator ร่วมกัน

3.1.3 โพรโตคอลสำหรับการสื่อสาร

เซิร์ฟเวอร์หลักมีหน้าที่ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ของระบบเพื่อทำงาน อุปกรณ์ทั้งหมด จะทำการเชื่อมต่อกับโปรโตคอลของการควบคุมการส่งกับเซิร์ฟเวอร์หลักและระบุไปยังระบบโดยส่ง ข้อมูลไปยังเซิร์ฟเวอร์หลักที่รอการตอบรับจากเซิร์ฟเวอร์ [2]

3.2 การเผาไหม้ (Combustion)

การเผาไหม้ (Combustion) คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งเกิดขึ้นระหว่างเชื้อเพลิงและตัว ออกซิไดซ์นั้นคือออกซิเจน เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนประกอบเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน เป็นต้น

3.2.1 การเผาไหม้สามารถแยกออกได้เป็น 2 ประเภทนั้นคือ

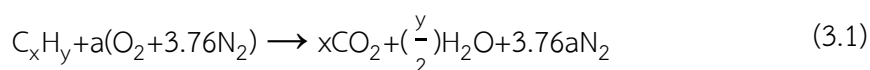
3.2.1.1 การเผาไหม้สมบูรณ์ (Complete combustion) เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของ สารไฮโดรคาร์บอน ที่ผลิตภัณฑ์จะเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเท่านั้น การเผาไหม้สมบูรณ์นี้จะ เกิดขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนมีมากพอที่จะเผาไฮโดรคาร์บอนจนหมด

3.2.1.2 การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Incomplete combustion) เป็นปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้น เมื่อคุณภาพ ปริมาณของออกซิเจนไม่มากพอ จึงทำให้สารไฮโดรคาร์บอนไม่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำได้หมด

3.2.2 การเผาไหม้ตามปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric Combustion)

การเผาไหม้ตามปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric Combustion) คือ กระบวนการเผาไหม้ ที่ใช้ปริมาณออกซิเจนพอดีที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ (Complete combustion) เรียก ปริมาณออกซิเจนนี้ว่า ปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) หรือ ปริมาณอากาศทางทฤษฎี (Theoretical Air) ดังนั้นถ้าออกซิเจนมีปริมาณเกินกว่าค่าปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) มี ผลทำให้ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น ส่วนผสมบาง (Fuel Lean) แต่หากปริมาณ ออกซิเจนน้อยกว่าค่าปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) เรียกว่า ส่วนผสมหนา (fuel rich) การ หาปริมาณสารสัมพันธ์ ทำได้โดยการเขียนสมการเผาไหม้

สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่มีสูตร (C_xH_y) จะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ตามทฤษฎีได้ ดังนี้



เมื่อ

$$a = x + \frac{y}{4} \quad (3.2)$$

สัดส่วนที่นิยมใช้พิจารณาให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เป็นอากาศแห้งประกอบไปด้วยออกซิเจน 21% และไนโตรเจน 79% โดยปริมาตร เพื่อความสะดวกในการคำนวณเมื่อมี O_2 อยู่ 1 โมลจะมี N_2 อยู่ 3.76 โมล

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามปริมาณสารสัมพันธ์ หรือ ตามทฤษฎี (Stoichiometric หรือ Theoretical Air-Fuel ratio) ถูกนิยามไว้ดังนี้

$$(A/F)_{\text{stoic}} = \left(\frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}} \right)_{\text{stoic}} = \frac{4.76a \text{ MW}_{\text{air}}}{1 \text{ MW}_{\text{fuel}}} \quad (3.3)$$

เมื่อ MW_{air} และ MW_{fuel} คือ น้ำหนักโมเลกุลอากาศและเชื้อเพลิงตามลำดับ

อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, ϕ) เป็นค่าที่บ่งบอกว่าส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นส่วนผสมแบบหนาหรือส่วนผสมแบบบาง หรือตามปริมาณสารสัมพันธ์ มีนิยามว่าดังนี้

$$\phi = \frac{(A/F)_{\text{stoic}}}{(A/F)} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{\text{stoic}}} \quad (3.4)$$

จากนิยามจะเห็นว่า สำหรับส่วนผสมหนา (Fuel Rich) จะมีค่าอัตราส่วนสมมูลมากกว่า 1 ส่วนผสมบาง (Fuel Lean) จะมีอัตราส่วนสมมูลน้อยกว่า 1 และสำหรับอัตราส่วนสมมูลที่มีค่าเท่ากับ 1 คือส่วนผสมเชื้อเพลิงเป็นไปตามปริมาณสารสัมพันธ์ ซึ่งอัตราส่วนสมมูลนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่มีประโยชน์มากในการบ่งบอกสมรรถนะของพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้แก่ เปอร์เซ็นต์อากาศตามปริมาณสารสัมพันธ์ หรือเปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎี (Percent Stoichiometric หรือ Theoretical Air) ซึ่งนิยามว่า คือร้อยละของอากาศที่ใช้จริงเทียบกับปริมาณอากาศทางทฤษฎี มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนสมมูลดังนี้

$$\% \text{Stoichiometry Air} = \frac{\dot{m}_a}{(\dot{m}_a)_{\text{stoic}}} \times 100\% = \frac{100\%}{\phi} \quad (3.5)$$

และเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (%Excess Air) คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินที่เปอร์เซ็นต์โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีเท่ากับ 100 ดังความสัมพันธ์

$$\% \text{Excess air} = \frac{(1 - \phi)}{\phi} \times 100\% \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating value)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง คือ ค่าปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิงใน 1 หน่วยมวล โดยเริ่มต้นที่สถานะที่ 25 °C และได้ผลิตภัณฑ์ที่เย็นตัวลงจนอุณหภูมิที่ 25 °C ประเภทของค่าความร้อนของเชื้อเพลิง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท [4] คือ

3.2.3.1 ค่าความร้อนทางสูง (Higher heating value ,HHV) คือ ค่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น โดยรวมค่าความร้อนที่ไอน้ำกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ

3.2.3.2 ค่าความร้อนทางต่ำ (Lower heating value ,LHV) คือ ค่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นโดยไม่คำนึงถึงการกลั่นตัวของไอน้ำ

3.2.4 การวิเคราะห์ระบบเผาไหม้โดยกฎเทอร์โมข้อที่หนึ่งในระบบการไหลคงตัว

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์เป็นกฎที่ใช้แสดงหลักการอนุรักษ์พลังงาน หรือสมดุลของพลังงาน สำหรับระบบใด ๆ ในกระบวนการใด ๆ โดยสามารถเขียนเป็นรูปสมการดังต่อไปนี้

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system} \quad (3.7)$$

สามารถเขียนในรูปอัตราได้ดังนี้

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{system}}{dt} \quad (3.8)$$

โดยเมื่อแจกแจงพจน์ตามเงื่อนไขของระบบเผาไหม้จะได้สมการดังนี้

$$\dot{H}_{in} = \dot{H}_{out} + \dot{Q}_{transfer} + \frac{dE_{system}}{dt} \quad (3.9)$$

โดยพจน์ $\frac{dE_{system}}{dt}$ คือ พจน์ของความร้อนที่สะสมในระบบที่ในช่วงแรกของการเผาไหม้ พลังงานความร้อนที่สะสมจะมีค่าไม่คงที่

โดยสามารถแจกแจงพจน์ตามเงื่อนไขของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงได้โดยมีเงื่อนไขสำหรับการการงานในระยะเวลายาวนานดังนี้

$$\dot{H}_{in} = \dot{H}_{out} + \dot{Q}_{transfer} + \dot{Q}_{accumulate} \quad (3.10)$$

โดย $\dot{Q}_{accumulate}$ คือ พจน์ของความร้อนที่สะสมในระบบ

3.3 การพาความร้อน Convection

การพาความร้อนเป็นรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของแข็งที่มีตัวกลางที่เกิดการเคลื่อนที่ โดยพฤติกรรมการพาความร้อนสามารถแบ่งตามลักษณะพื้นที่ของการไหลการพาความร้อน ประกอบด้วย การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) และการพาความร้อนอิสระ (Free Convection) หรือการพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural Convection)

3.3.1 พื้นฐานการพาความร้อน

การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน สามารถทำได้โดยใช้กฎของนิวตันสำหรับการทำความเย็น (Newton's law of cooling)

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (3.11)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

A_s คือ พื้นที่ผิวในการพาความร้อน

T_s คือ อุณหภูมิที่ผิว

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหล

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของพื้นผิว พฤติกรรมของของไหลตามธรรมชาติ คุณสมบัติของของไหล ความเร็วของของไหล ค่าการแปรเปลี่ยนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

3.3.2 การพาความร้อนแบบบังคับ

การพาความร้อนแบบบังคับจะเกิดโดยการอาศัยแรงจากภายนอกเข้ามากระทำกับระบบ เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อน เช่น มีแรงลมจากพัดลมมาเป่าพื้นผิวความร้อนส่งผลให้ของไหลซึ่งเป็นตัวกลางในการพาความร้อนเกิดการเคลื่อนที่

3.3.3 การพาความร้อนตามธรรมชาติ

การพาความร้อนตามธรรมชาติหรือการพาความร้อนอิสระ เกิดขึ้นเนื่องจากแรงลอยตัว (buoyancy force) ของของไหลเป็นผลมาจากความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลง โดยทิศทางของการหมุนวนของของไหลจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับว่าพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นพื้นผิวเย็นหรือพื้นผิวร้อน โดยตัวแปรที่สำคัญที่ต้องวิเคราะห์ เช่น ความหนาแน่น ตัวแปรดังกล่าวจะอธิบายในรูปของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของปริมาตร (Volume expansion coefficient) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

expansion coefficient, β) โดยนิยามของตัวแปรดังกล่าวคือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของของไหล เมื่อมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงที่ค่าความดันคงที่ สำหรับแก๊สอุดมคติหรือแก๊สจริงที่ประพฤติตัวเสมือนแก๊สอุดมคติ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรจะมีค่าเท่ากับ

$$\beta_{\text{ideal-gas}} = \frac{1}{T} \quad (3.12)$$

สำหรับการพาความร้อนอิสระ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลและพื้นผิวที่มีค่ามากจะส่งผลให้ค่าแรงลอยตัวและการพาความร้อนมีความรุนแรงมากขึ้น นั่นหมายถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

3.3.3.1 การพาความร้อนตามธรรมชาติบนพื้นผิว (Natural Convection over surfaces)

การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนตามธรรมชาติบนพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของพื้นผิว, การจัดวาง, การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามพื้นผิวและคุณสมบัติของของไหล ค่าตัวเลขนัสเซิลต์ (Nusselt number) สำหรับการพาความร้อนตามธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับค่ากราสโฮฟและค่าเลขพรันด์เทิล

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = C(Gr_L Pr)^n = CRa_L^n \quad (3.13)$$

ค่าเลขกราสโฮฟและค่าเลขพรันด์เทิลเป็นตัวแปรไร้มิติ สามารถเขียนรวมกันได้เป็นตัวแปรไร้มิติอีกตัวหนึ่ง เรียกว่า เลขเรย์ลี แทนด้วยสัญลักษณ์ Ra_L

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu\alpha} \quad (3.14)$$

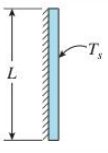
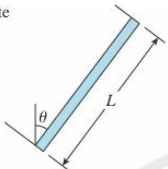


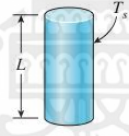


ค่า C และ n จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของพื้นผิวและลักษณะการไหล โดยปกติค่า $n = 1/4$ สำหรับการไหลราบเรียบและเท่ากับ $1/3$ สำหรับการไหลปั่นป่วน โดยที่ค่าคุณสมบัติของของไหลได้จากอุณหภูมิมวลที่ที่สามารถคำนวณได้จาก

$$T_f = \frac{(T_s - T_\infty)}{2} \quad (3.15)$$

การให้ความร้อนกับพื้นผิวสำหรับการพาความร้อนตามธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะได้แก่ การให้ความร้อนแบบพลาซึ่มความร้อนคงที่และการให้ความร้อนแบบอุณหภูมิที่ผิวคงที่ การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนกรณีอุณหภูมิมวลที่ผิวคงที่ในรูปของเลขนัสเซิลต์ สำหรับพื้นผิวในลักษณะต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สมการสหพันธ์สำหรับเลขนัสเซลต์เฉลี่ยของการพาความร้อนตามธรรมชาติบนพื้นผิว

Geometry	Characteristic length L_c	Range of Ra	Nu
Vertical plate 	L	10^4-10^9 $10^{10}-10^{13}$ Entire range	$Nu = 0.59Ra_L^{1/4}$ (9-19) $Nu = 0.1Ra_L^{1/3}$ (9-20) $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$ (9-21) (complex but more accurate)
Inclined plate 	L		Use vertical plate equations for the upper surface of a cold plate and the lower surface of a hot plate Replace g by $g \cos\theta$ for $0 < \theta < 60^\circ$
Horizontal plate (Surface area A and perimeter p) (a) Upper surface of a hot plate (or lower surface of a cold plate)  (b) Lower surface of a hot plate (or upper surface of a cold plate) 	A_s/p	10^4-10^7 10^7-10^{11} 10^5-10^{11}	$Nu = 0.59Ra_L^{1/4}$ (9-22) $Nu = 0.1Ra_L^{1/3}$ (9-23) $Nu = 0.27Ra_L^{1/4}$ (9-24)
Vertical cylinder 	L		A vertical cylinder can be treated as a vertical plate when $D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}}$
Horizontal cylinder 	D	$Ra_D \leq 10^{12}$	$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$ (9-25)
Sphere 	D	$Ra_D \leq 10^{11}$ $(Pr \geq 0.7)$	$Nu = 2 + \frac{0.589Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.469/Pr)^{9/16}]^{4/9}}$ (9-26)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 Lua script

ภาษา Lua คือ ภาษาทางคอมพิวเตอร์ชนิดหนึ่ง เป็นภาษาประเภท script คือจะทำการ interpreted ไปที่ละบรรทัดเป็นลำดับขั้น โดยสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้จะอยู่ในรูปแบบของโค้ดคำสั่ง (Source code) จุดเด่นของภาษา Lua นั้นก็คือการประมวลผลข้ามแพลตฟอร์มเช่น คอมพิวเตอร์และ โทรศัพท์มือถือโดยไม่จำเป็นต้องแก้ไขโค้ดภายในมาก เป็นภาษาที่มีการประมวลผลเร็ว และเรียนรู้ได้ง่ายจึงเป็นภาษาที่นิยมใช้ในการเขียนแอปพลิเคชันต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย

3.4.1 ชนิดข้อมูลพื้นฐานในภาษา Lua

ในภาษา Lua นั้นมีประเภทของข้อมูลอยู่ทั้งหมด 8 ประเภทคือ nil, Boolean, number, string, function, userdata, thread และ table โดยประเภทที่เป็นพื้นฐานที่ควรรู้คือ

Number (ตัวเลข) คือประเภทข้อมูลสำหรับเก็บค่าที่เป็นตัวเลข ที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณได้ การเก็บค่าของตัวแปรประเภทนี้จำเป็นต้องระบุประเภทของตัวเลข การระบุประเภทของตัวเลขเช่น จำนวนเต็ม (integers) เป็นได้ทั้งบวก และลบ หรือเลขทศนิยม (float)

Boolean คือเป็นประเภทข้อมูลที่ใช้สำหรับเก็บค่าความจริงที่มีค่าอยู่เพียงสองค่า คือ true และ false สามารถใช้สองค่านี้เพื่อบ่งบอกความหมายของสิ่งต่าง ๆ ที่สามารถมีได้เพียงสองสถานะ

String (ข้อความ) คือประเภทข้อมูลประเภทข้อความหรือการนำตัวอักษรหลายๆ ตัวมาต่อกันหรือเรียกว่าอาร์เรย์ของตัวอักษร โดยความยาวของ String นั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามค่าที่กำหนดให้กับตัวแปร

Function คือกลุ่มของประโยคคำสั่งที่ใช้สำหรับทำงานใดงานหนึ่งในโปรแกรม

Nil คือประเภทข้อมูลแบบพิเศษ ที่มีความหมายถึงการไม่มีค่ามันอยู่ ค่าว่างเปล่า

Table คือประเภทข้อมูลแบบตารางหรือ array สามารถเก็บข้อมูลที่เหมือนหรือต่างชนิดกันก็ได้

3.4.2 การสร้างตารางแบบ Associative Arrays

Associative Arrays คือการเก็บข้อมูลเป็นคู่ระหว่าง key และ value เมื่อต้องการดึงข้อมูล value จะจำเป็นต้องใช้ key ในการดึงค่าออกมาดังรูปที่ 3.1

```

h_bar[0] = {N2=0, O2=0, CO2=0, H2O=0}
h_bar[220] = {N2=6391, O2=6404, CO2=6601, H2O=7295}
h_bar[240] = {N2=6975, O2=6984, CO2=7280, H2O=7961}
h_bar[260] = {N2=7558, O2=7566, CO2=7979, H2O=8627}
h_bar[280] = {N2=8141, O2=8150, CO2=8697, H2O=9296}
h_bar[298] = {N2=8669, O2=8682, CO2=9364, H2O=9904}
h_bar[300] = {N2=8723, O2=8736, CO2=9431, H2O=9966}
h_bar[320] = {N2=9306, O2=9325, CO2=10186, H2O=10639}
h_bar[340] = {N2=9888, O2=9916, CO2=10959, H2O=11314}
h_bar[360] = {N2=10471, O2=10511, CO2=11748, H2O=11992}
h_bar[380] = {N2=11055, O2=11109, CO2=12552, H2O=12672}
h_bar[400] = {N2=11640, O2=11711, CO2=13372, H2O=13356}
h_bar[420] = {N2=12225, O2=12314, CO2=14206, H2O=14043}
h_bar[440] = {N2=12811, O2=12923, CO2=14628, H2O=14734}
h_bar[460] = {N2=13399, O2=13525, CO2=15054, H2O=15428}
h_bar[480] = {N2=13988, O2=14151, CO2=15916, H2O=16126}
h_bar[500] = {N2=14581, O2=14770, CO2=16791, H2O=16828}
h_bar[520] = {N2=15172, O2=15395, CO2=17678, H2O=17534}
h_bar[540] = {N2=15766, O2=16022, CO2=18576, H2O=18245}
h_bar[560] = {N2=16363, O2=16654, CO2=19485, H2O=18959}
h_bar[580] = {N2=16962, O2=17290, CO2=20407, H2O=19678}
h_bar[600] = {N2=17563, O2=17929, CO2=21337, H2O=20402}
h_bar[620] = {N2=18166, O2=18572, CO2=23231, H2O=21130}
h_bar[640] = {N2=18772, O2=19219, CO2=24190, H2O=21862}
h_bar[660] = {N2=19380, O2=19870, CO2=25160, H2O=22600}

```

รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างการใช้ Associative Arrays

ในรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าประเภทที่ของข้อมูลในส่วนของ Key เป็นข้อมูลประเภท String (ข้อความ) และในส่วนของ value ข้อมูลเป็นประเภท number (ตัวเลข) ซึ่งเก็บข้อมูลได้โดยไม่คำนึงถึงชนิดตัวแปรที่ต่างกันตามที่กล่าวไว้ข้างต้น

บทที่ 4

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะนำเสนอถึงแนวคิดในการพัฒนาระบบ การติดตั้งและตั้งค่าอุปกรณ์ การสร้างโปรแกรมเพื่อคำนวณข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ และการออกแบบหน้าเว็บเพื่อแสดงผลสัญญาณ การควบคุมให้สามารถตรวจสอบได้แบบเรียลไทม์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

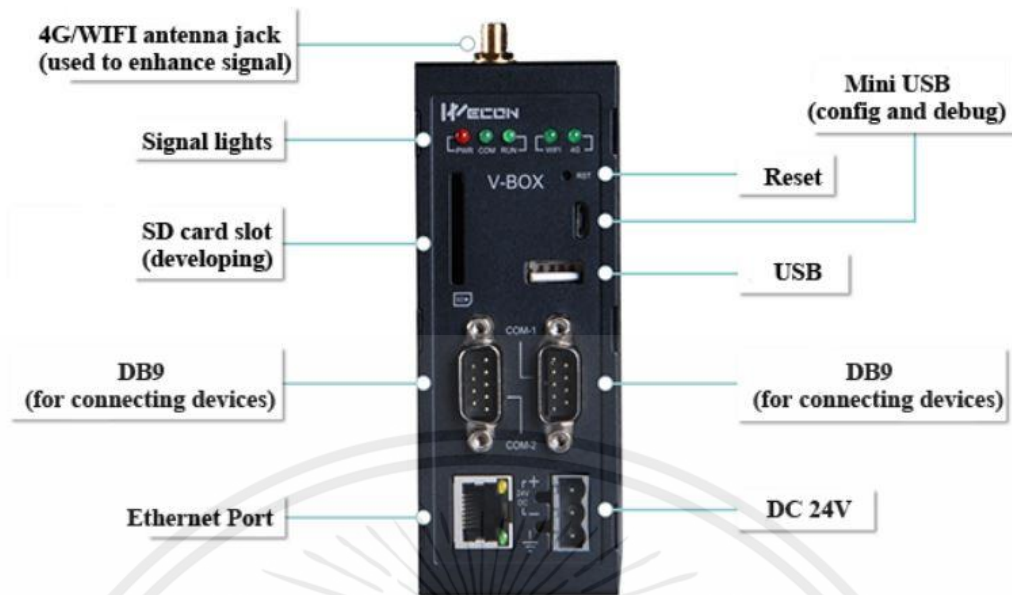
4.1 แนวคิดในการพัฒนาระบบ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบโดยจะต้องเชื่อมต่ออุปกรณ์รับสัญญาณภายนอกกับ PLC เพื่อนำสัญญาณการควบคุมส่งผ่านระบบอินเทอร์เน็ต คำนวณข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์และแสดงผลผ่านอุปกรณ์แสดงผล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการนำอุปกรณ์ V-BOX มาเชื่อมต่อกับระบบเพื่อมารับสัญญาณจาก PLC เข้าสู่ระบบอินเทอร์เน็ต โดยสามารถอธิบายรายละเอียดของอุปกรณ์ได้ดังนี้

4.1.1 ส่วนประกอบของ V-BOX

V-Box เป็นอุปกรณ์รับส่งข้อมูลต่าง ๆ จากเครื่องมือวัดและชุดควบคุม PLC ไปยัง V-NET บน Cloud หรือผ่านระบบอินเทอร์เน็ต สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลแบบ Real-time data และแบบ Historical data ไว้เป็นฐานข้อมูล โดยโปรแกรม V-NET ทำหน้าที่เหมือนโปรแกรม SCADA สามารถสร้างหน้าจอมอนิเตอร์หรือกราฟฟิกแสดงผล สามารถดูผ่านเว็บเบราว์เซอร์และ Application บน Smartphone สามารถสร้างการแจ้งเตือน (Alarm) และยังสามารถสร้างปุ่มเปิด-ปิดเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อได้อีกด้วย

V-Box Hardware Interfaces คำนี้มีความหมายว่าจุดที่ใช้เชื่อมต่อกันระหว่าง 2 สิ่ง ซึ่งสำหรับตัว V-Box แล้วมันคือช่องพอร์ต (Port) สำหรับเชื่อมต่อ Ethernet LAN หรือ WAN ช่อง DC24V สำหรับต่อกับไฟฟ้า 24 Volt ที่มีช่องบวก ลบ และช่องกราวด์ เป็นต้น โดยจำนวนและชนิดจะแตกต่างกันไปในแต่ละรุ่น (Series)

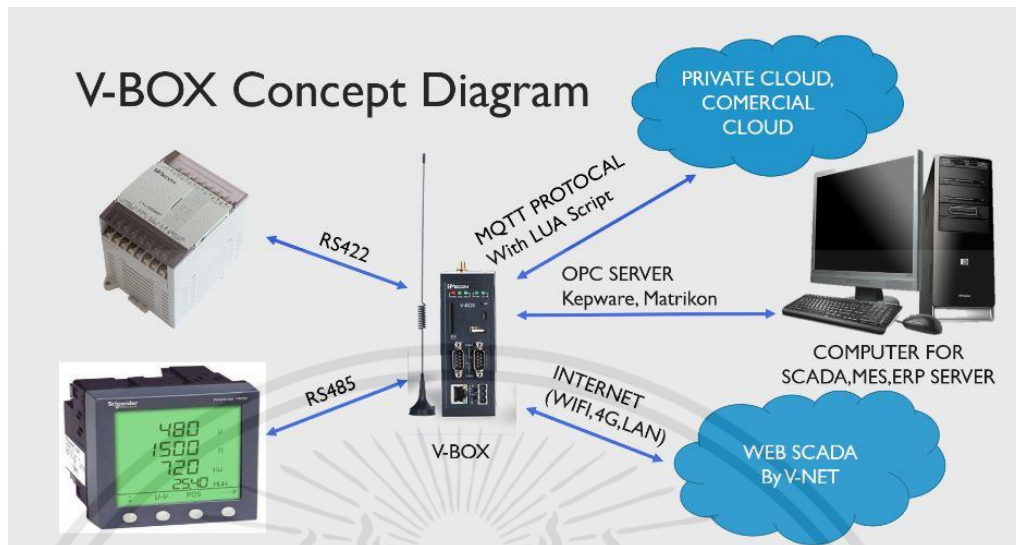


รูปที่ 4.1 Interfaces ของ V-BOX S-00

สำหรับรุ่น S-series1 ที่ใช้ในห้องทดลองจะมี Interfaces ดังนี้

1. Ethernet Port ช่องเสียบสายอีเทอร์เน็ต มีจุดประสงค์คือการเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์กับระบบเครือข่ายใช้สายแบบ LAN (Local Area Network) หรือ WAN (Wide Area Network)
2. DC24V ช่องสำหรับต่อกับสายไฟกระแสตรง 24 โวลต์ จะมี 3 ช่อง สำหรับขั้วบวก ลบ และกราวด์
3. 4G/WIFI antenna jack ใช้ต่อกับเสาสัญญาณที่นำมาพร้อมกับตัวเครื่อง
4. USB และ Mini USB ใช้เชื่อมต่อกัน ระหว่าง PC และ V-Box เพื่อทำ Network Configuration
5. SD Card slot (developing)
6. DB9 หรือ 9-pin COM Port ใช้ในการสื่อสารกับ PLC, Servo, Single-chip Microcomputer, เครื่องมือวัดและไมโครต่าง ๆ โดยจะรองรับ RS232, RS422 และ RS485
7. Signal lights แสดงไฟกระพริบหรือสีไฟที่บ่งบอกสถานะการทำงานหรือการเชื่อมต่อของ V-Box
8. Reset ใช้สำหรับรีเซ็ตเครื่อง V-Box

4.1.2 การทำงานของ V-BOX



รูปที่ 4.2 หลักการทำงานของ V-BOX

หลักการทำงานของ V-Box เราจะแบ่งการทำงานเป็น 2 ส่วน คือในส่วนของเครื่อง V-Box และซอฟต์แวร์ V-Net

V-BOX คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูลจากชุดอุปกรณ์ควบคุม PLC ผ่านการเชื่อมต่อแบบมาตรฐานทั้งในรูปแบบ Serial Port เช่น RS232, RS422 หรือ RS485 และในรูปแบบ Ethernet/WIFI โดยจะส่งข้อมูลไปยัง Cloud

V-NET คือโปรแกรมที่ใช้สำหรับจัดการข้อมูลที่ V-Box รับมาจากชุดอุปกรณ์ควบคุม อย่างเช่น PLC โดยสามารถดึงข้อมูลมาขึ้นบน Cloud แบบ Real-Time Data หรือแบบ Historical Data และยังสามารถนำตัวแปรเหล่านี้มาตัดแปลงหรือคำนวณผ่าน LUA Script เพื่อเก็บเป็นตัวแปรตัวใหม่ นอกจากนี้ยังสามารถสร้างกราฟฟิกแสดงผลคล้ายโปรแกรม SCADA สร้าง ALARM สำหรับแจ้งเตือนเมื่อถึงเงื่อนไขที่ตั้งค่าไว้ สร้างปุ่มเปิดปิดเพื่อควบคุมอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อไว้ สามารถทำ Report ข้อมูลบน Cloud ออกมาเป็นไฟล์ ทั้งหมดนี้สามารถทำได้ผ่าน Web Browser มาตรฐานจึงสะดวกต่อการใช้งานอย่างมาก

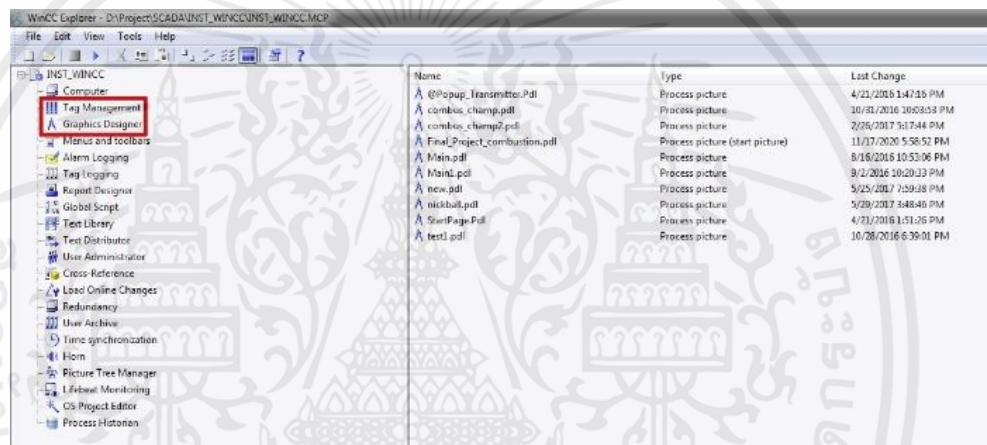
4.2 Address ของสัญญาณ

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนในการอ้างอิง Address ที่ต้องการจากโปรแกรม Simatic WinCC Explorer เพื่อนำ Address ของสัญญาณไปบันทึกไว้ในตัวซอฟต์แวร์ของ V-NET เพื่อให้สามารถนำขึ้นเว็บคลาวด์ได้ โดยมีขั้นตอนในการอ้างอิง Address ของสัญญาณต่าง ๆ จากโปรแกรม Simatic WinCC Explorer และ TIA Portal V13 ดังนี้

4.2.1 การอ้างอิง Address จากโปรแกรม Simatic WinCC Explorer

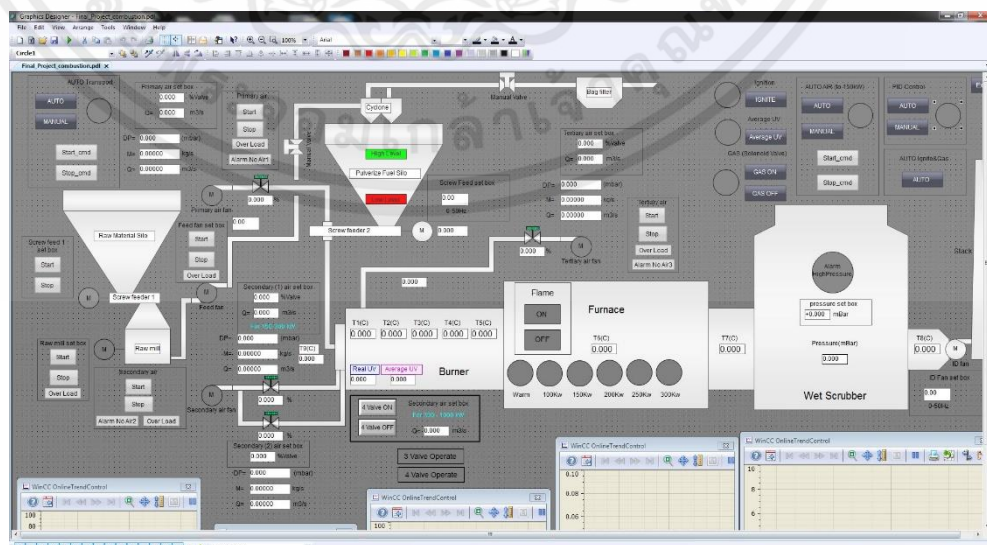
การอ้างอิง Address จากโปรแกรม Simatic WinCC Explorer มีขั้นตอนดังนี้

1. เปิดโปรแกรม Simatic WinCC Explorer จะแสดงหน้าโปรแกรมดังรูปที่ 4.3 จากนั้นให้ทำการคลิกไปที่ Graphics Designer



รูปที่ 4.3 แสดงหน้าต่างเมนูของโปรแกรม Simatic WinCC Explorer

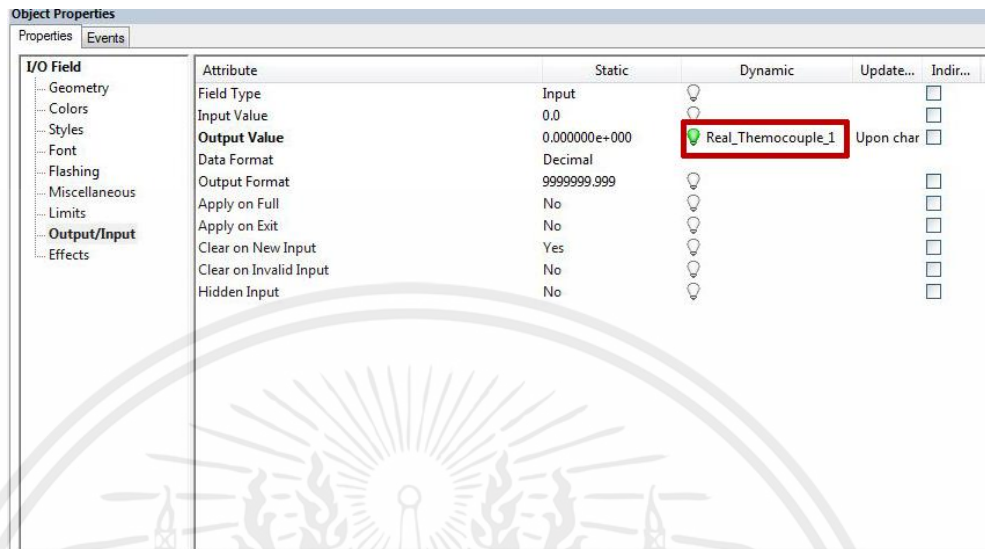
2. เมื่อคลิกไปที่ Graphics Designer จะแสดงภาพส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานและบันทึกผลของระบบควบคุมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียด ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 หน้า Graphics Designer ของโปรแกรม Simatic WinCC Explorer

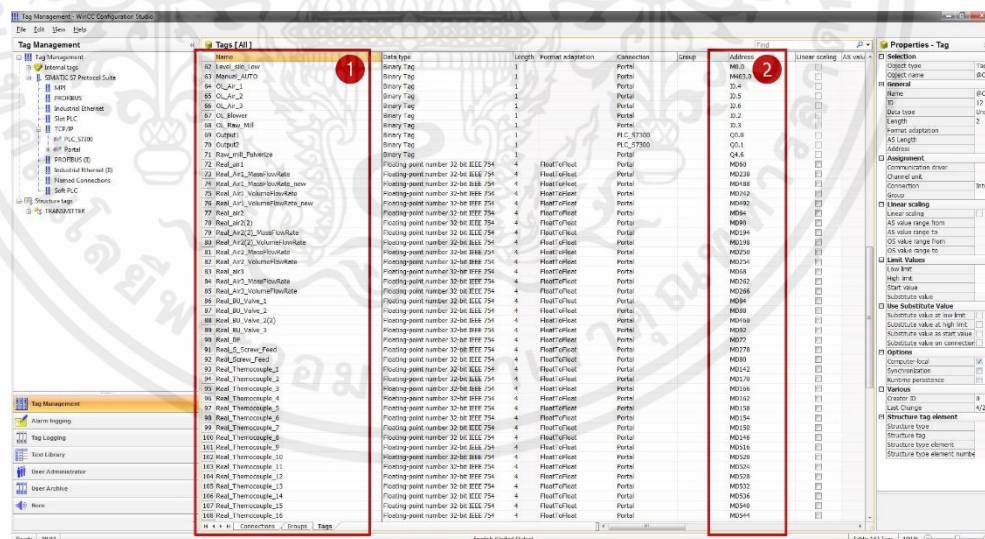
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คลิกซ้ายที่กล่องข้อมูลของสัญญาณที่ต้องการ ไปที่ Properties > Tag Management จะปรากฏ Name Tag ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างชื่อของสัญญาณที่ต้องการ

4. เมื่อทราบ Name Tag ให้ไปที่หน้าต่างดังรูปที่ 4.3 เลือก Tag Management จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 4.6 ไปที่ Name Tag (หมายเลข 1) ที่ต้องการทราบ Address (หมายเลข 2)



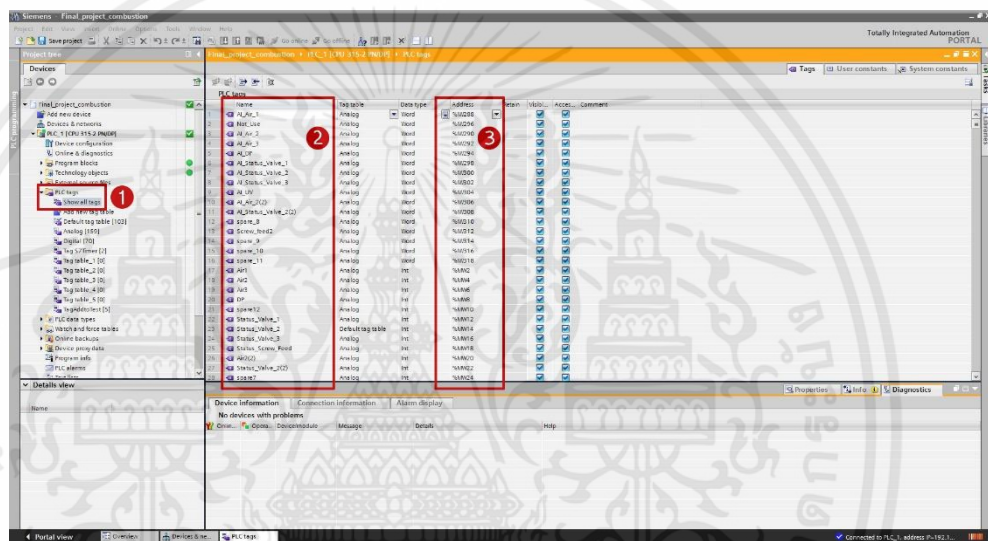
รูปที่ 4.6 แสดงหน้า Tag Management ของโปรแกรม Simatic WinCC Explorer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การดูข้อมูล Address จากโปรแกรม TIA Portal V13

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการอ้างอิง Address จากโปรแกรม TIA Portal V13 เช่นเดียวกับการอ้างอิง Address จากโปรแกรม Simatic WinCC Explorer แต่เนื่องจากระบบมีสัญญาณเป็นจำนวนมากและชื่อของสัญญาณจากโปรแกรมไม่ตรงกันในบางกรณี จึงต้องทำการตรวจสอบ Address ของสัญญาณเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เปิดโปรแกรม TIA Portal V13 จะแสดงหน้าจอโปรแกรมดังรูปที่ 4.7 จากนั้นให้ไปที่ PLC Tag > Show All Tag (หมายเลข 1) เมื่อคลิกไปที่ Show All Tag จะปรากฏ Name Tag จากนั้นให้ไปที่ Name Tag (หมายเลข 2) ที่ต้องการทราบ Address (หมายเลข 3)



รูปที่ 4.7 แสดงขั้นตอนการดู Name Tag ในโปรแกรม Tia Portal V13

2. ทำการตรวจสอบ Address นั้นว่าตรงกับที่อ้างอิงจากโปรแกรม Simatic WinCC Explorer หรือไม่

จากการอ้างอิง Address จากทั้งสองโปรแกรม สามารถสรุป Address ของสัญญาณต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดง Address ของสัญญาณที่ต้องการ

อุปกรณ์	Name tag	Address
อากาศส่วนที่หนึ่ง	Differential Pressure Transmitter	MD60
	Mass Flow Rate	MD488
	Volume Flow Rate	MD492
	Volume Flow Rate Input	MD176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดง Address ของสัญญาณที่ต้องการ (ต่อ)

อากาศส่วนที่สอง	Differential Pressure Transmitter 2.1	MD64
	Mass Flow Rate 2.1	MD250
	Volume Flow Rate 2.1	MD254
	%Valve 2.1	MD218
	Volume Flow Rate Input 2.1	MD270
	Differential Pressure Transmitter 2.2	MD98
	Mass Flow Rate 2.2	MD194
	Volume Flow Rate 2.2	MD198
	%Valve 2.2	MD134
	Volume Flow Rate Input 2.2	MD290
อากาศส่วนที่สาม	Differential Pressure Transmitter	MD68
	Mass Flow Rate	MD262
	Volume Flow Rate	MD266
	%Valve	MD222
	Volume Flow Rate Input	MD274
Screw Feed	Frequency	MD80
Burner	Temperature 1	MD142
	Temperature 2	MD170
	Temperature 3	MD166
	Temperature 4	MD162
	Temperature 5	MD158
Furnace	Temperature 6	MD154
Inlet Wet Scrubber	Temperature 7	MD150
ID Fan	Temperature 8	MD146
	Frequency	MD182
Ignite	Temperature 9	MD516

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดง Address ของสัญญาณที่ต้องการ (ต่อ)

ปั๊มควบคุม	4_Valve_ON_OFF	M1.2
	Ignite_ONOFF_M	M600.4
	Manual_AUTO	M403.0
	LPG Gas On_Off	M600.0
	Start_Air_1	M130.5
	Start_Air_2	M130.6
	Start_Air_3	M130.7
	Stop_Air_1	M130.0
	Stop_Air_2	M130.1
	Stop_Air_3	M130.2

4.3 การติดตั้งและตั้งค่า V-BOX

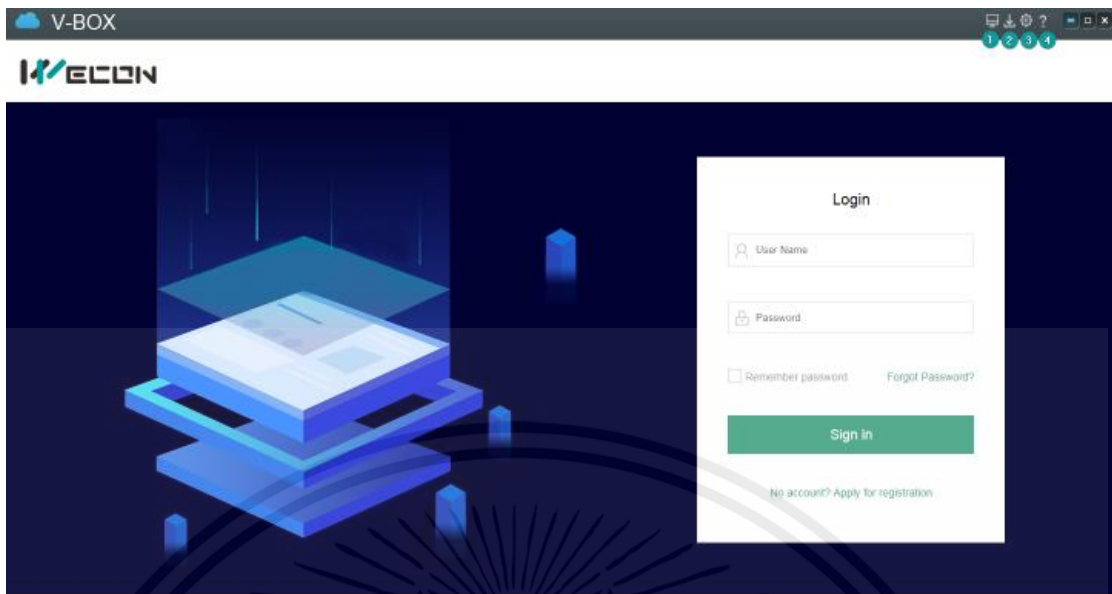
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการติดตั้งและตั้งค่า V-BOX เพื่อให้รู้จักกับ PLC การตั้งค่าให้ V-BOX บันทึกค่าและสามารถตรวจสอบได้แบบเรียลไทม์ โดยจะแบ่งขั้นตอนออกเป็นดังนี้

4.3.1 การติดตั้ง V-BOX

การติดตั้ง V-BOX เป็นขั้นตอนการต่อกระแสไฟฟ้า 24 V DC จาก PLC เข้ากับตัว V-BOX โดยจะต้องนำมิเตอร์ไฟฟ้ามาวัดที่ตำแหน่ง Terminals for 24 V DC Output Voltage ของ PLC เพื่อตรวจสอบกระแสไฟฟ้า จากนั้นทำการต่อสายไฟจาก PLC เข้ากับตัว V-BOX และทำการเปิดสวิตช์

4.3.2 การตั้งค่า V-BOX

ทำการดาวน์โหลดซอฟต์แวร์จากเว็บไซต์ทางการของ Wecon (<https://www.wecon.com.cn/en/>) โดยทำการติดตั้ง เลือกสถานที่เป็น ASEAN และเมื่อเปิดซอฟต์แวร์ V-NET [3] จะแสดงดังรูปที่ 4.8



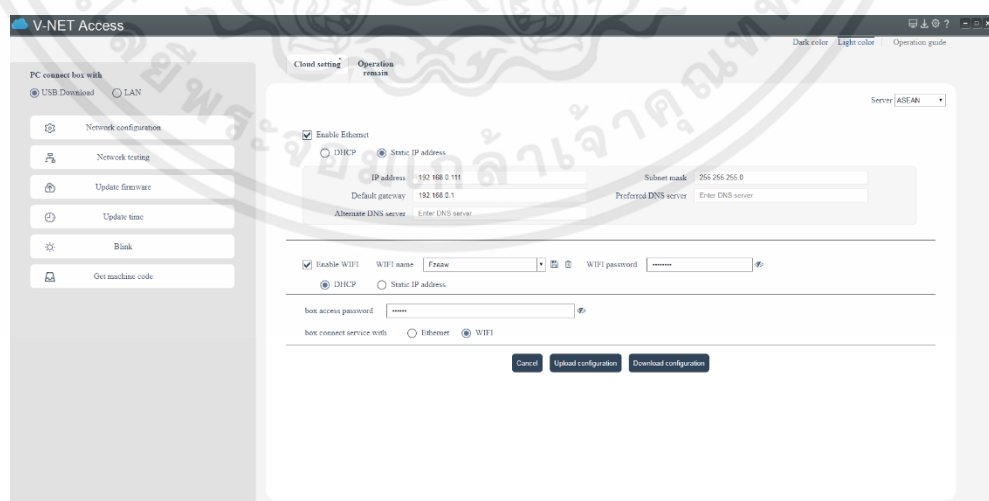
รูปที่ 4.8 หน้าต่างของโปรแกรม V-NET

เมื่อดาวนโหลดซอฟต์แวร์ V-NET เรียบร้อยแล้ว จะดำเนินการ Configuration V-BOX เพื่อให้รู้จักกับ PLC โดยจะมีขั้นตอนในการ Configuration ดังนี้

4.3.2.1 การกำหนดค่า V-BOX (Configuration V-BOX)

ในการกำหนดค่า V-BOX จะต้องต่อสาย Lan จาก PLC เข้ากับตัว V-BOX และต่อสาย Micro USB เข้ากับ PC เพื่อทำการเชื่อมต่อ V-BOX กับ PC และจะมีขั้นตอนในการกำหนดค่าดังต่อไปนี้

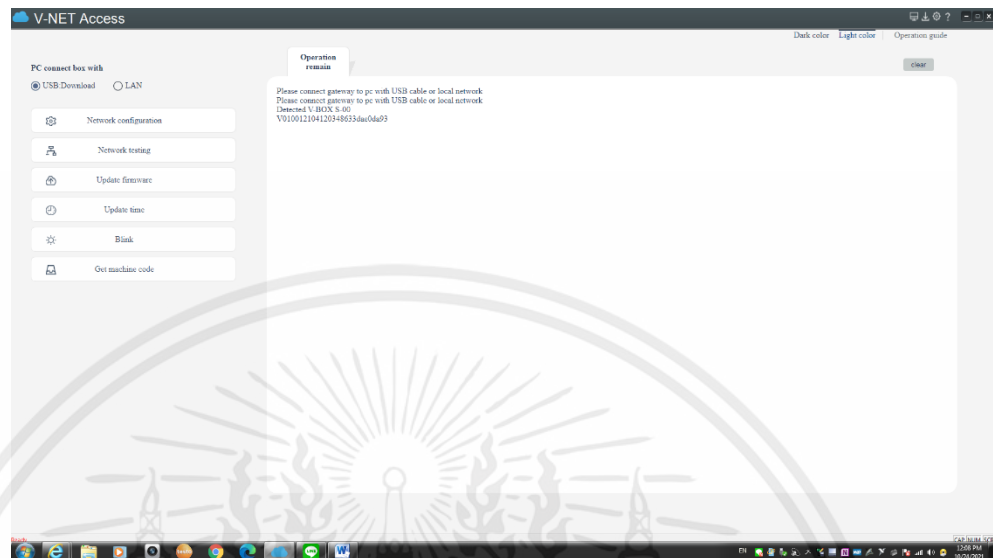
1.  คลิกที่แถบเมนู Configuration download
2. ไปที่ Config network จะแสดงหน้าต่างกำหนดค่าเครือข่ายอุปกรณ์ ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การกำหนดค่าเครือข่ายของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อทำการกำหนดค่าเครือข่ายเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้คลิกที่ Download configuration จะปรากฏสถานการณ์เชื่อมต่อดังรูปที่ 4.10 และสัญญาณไฟที่ตัว V-BOX จะติด

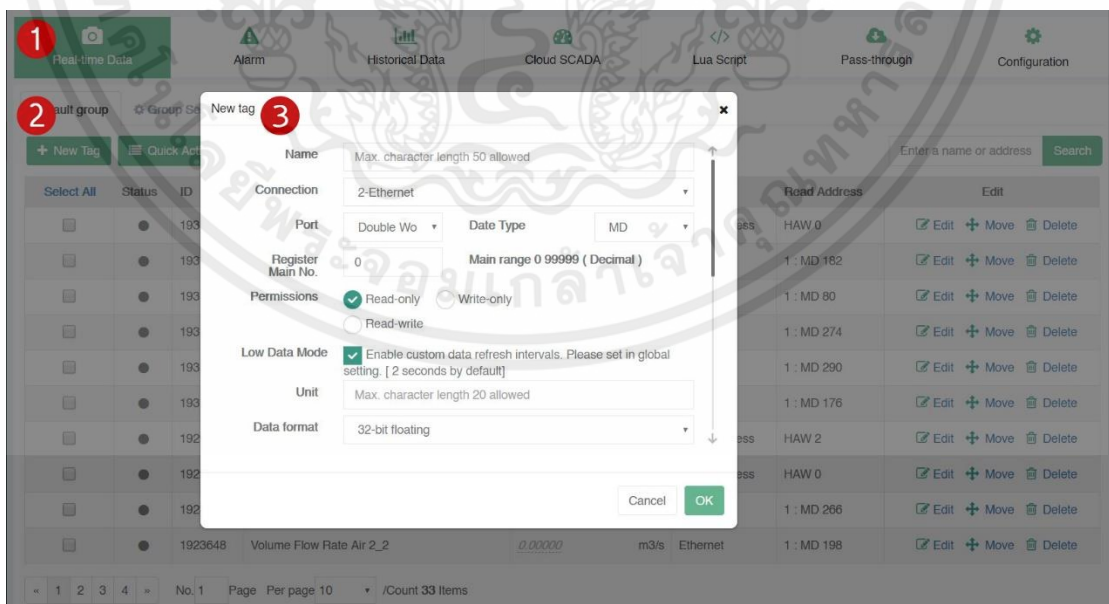


รูปที่ 4.10 แสดงสถานการณ์ตั้งค่า Config Network สำเร็จ

4.3.3 การตั้งสัญญาณเข้าสู่ V-BOX

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำ Address ของสัญญาณที่ได้ตั้งตารางที่ 4.1 นำมาเข้าสู่ซอฟต์แวร์ V-NET โดยมีขั้นตอนดังนี้

- เลือก Real Time Data (หมายเลข 1) > New Tag (หมายเลข 2) ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงขั้นตอนการเพิ่ม Address ของสัญญาณในโปรแกรม V-NET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จากรูปที่ 4.11 (หมายเลข 3) ใส่ชื่อแท็กที่ต้องการจะเพิ่ม, เลือกการเชื่อมต่อ และเลือกประเภท Address
3. กำหนดให้แสดงข้อมูลของสัญญาณได้อย่างเดียว
4. กำหนดหน่วย กำหนดตัวเลขจำนวนเต็มและทศนิยม โดยต้องกำหนดให้มีความสัมพันธ์กัน คือจำนวนหลักรวมกันต้องเท่ากับ 7 เช่น กำหนดจำนวนเต็มเป็น 2 หลัก ทศนิยมต้องเป็น 5 หลัก เป็นต้น
5. เนื่องจากอุปกรณ์ PLC เป็นรุ่น Siemens S7-300 จึงกำหนด Byte order เป็น 1234
6. คลิก OK เพื่อเป็นการบันทึก

4.3.4 การตั้งค่าเพื่อบันทึกข้อมูลแบบเรียลไทม์

ในการบันทึกข้อมูลแบบเรียลไทม์จะต้องทำการสร้างกลุ่มเพื่อกำหนดระยะเวลาในการบันทึกค่า และนำข้อมูลที่ต้องการเพิ่มเข้าไปในกลุ่ม โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

4.3.4.1 การตั้งค่ากลุ่มเพื่อกำหนดเงื่อนไขในการบันทึกข้อมูล

1. เลือก Historical Data (หมายเลข 1) > Historical data registration (หมายเลข 2) > Group setting (หมายเลข 3) ดังรูปที่ 4.12

ID	Name	Connection	Data Type	Read Address	Group	Edit
1923662	Volume Flow Rate Air 3	Ethernet	32-bit floating	1.MD266	Record 30 Sec	<input checked="" type="checkbox"/> Edit <input checked="" type="checkbox"/> Delete
1923661	Volume Flow Rate Air 2_2	Ethernet	32-bit floating	1.MD198	Record 30 Sec	<input checked="" type="checkbox"/> Edit <input checked="" type="checkbox"/> Delete
1923660	Volume Flow Rate Air 2_1	Ethernet	32-bit floating	1.MD254	Record 30 Sec	<input checked="" type="checkbox"/> Edit <input checked="" type="checkbox"/> Delete
1923659	Volume Flow Rate Air 1	Ethernet	32-bit floating	1.MD492	Record 30 Sec	<input checked="" type="checkbox"/> Edit <input checked="" type="checkbox"/> Delete
1923658	Temp 1 Burner	Ethernet	32-bit floating	1.MD142	Record 30 Sec	<input checked="" type="checkbox"/> Edit <input checked="" type="checkbox"/> Delete
1923657	Temp 9 Ignite	Ethernet	32-bit floating	1.MD516	Record 30 Sec	<input checked="" type="checkbox"/> Edit <input checked="" type="checkbox"/> Delete
1923656	Temp 6 ID Fan	Ethernet	32-bit floating	1.MD146	Record 30 Sec	<input checked="" type="checkbox"/> Edit <input checked="" type="checkbox"/> Delete
1923655	Temp 7 inlet Wet Scrubber	Ethernet	32-bit floating	1.MD150	Record 30 Sec	<input checked="" type="checkbox"/> Edit <input checked="" type="checkbox"/> Delete
1923654	Temp 6 Furnace	Ethernet	32-bit floating	1.MD154	Record 30 Sec	<input checked="" type="checkbox"/> Edit <input checked="" type="checkbox"/> Delete
1923653	Temp 5 Burner	Ethernet	32-bit floating	1.MD158	Record 30 Sec	<input checked="" type="checkbox"/> Edit <input checked="" type="checkbox"/> Delete

รูปที่ 4.12 แสดงขั้นตอนการเปิดหน้าต่างสำหรับการสร้างกลุ่มเพื่อกำหนดระยะเวลาในการบันทึกค่า

- กำหนดเวลาที่ต้องการบันทึกข้อมูลในหน้าต่าง ดังรูปที่ 4.13 โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเวลาในการบันทึกข้อมูลเป็น 2 กลุ่ม คือ บันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที และ 30 วินาที

รูปที่ 4.13 แสดงหน้าต่างสำหรับการสร้างกลุ่มเพื่อกำหนดระยะเวลาในการบันทึกค่า

- คลิก OK เพื่อทำการบันทึก

4.3.4.2 การเพิ่มแท็กเพื่อเก็บข้อมูลตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้

- คลิก Historical Data (หมายเลข 1) > Historical Tag (หมายเลข 2) > Historical Tag (หมายเลข 3) เพื่อเปิดหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 4.14

ID	Name	Connection	Data Type	Read Address	Group	Edit
1923662	Volume Flow Rate Air 3	Ethernet	32-bit floating	1.MD266	Record 30 Sec	Edit Delete
1923661	Volume Flow Rate Air 2_2	Ethernet	32-bit floating	1.MD198	Record 30 Sec	Edit Delete
1923660	Volume Flow Rate Air 2_1	Ethernet	32-bit floating	1.MD254	Record 30 Sec	Edit Delete
1923659	Volume Flow Rate Air 1	Ethernet	32-bit floating	1.MD492	Record 30 Sec	Edit Delete
1923658	Temp 1 Burner	Ethernet	32-bit floating	1.MD142	Record 30 Sec	Edit Delete
1923657	Temp 9 Ignite	Ethernet	32-bit floating	1.MD516	Record 30 Sec	Edit Delete
1923656	Temp 6 ID Fan	Ethernet	32-bit floating	1.MD146	Record 30 Sec	Edit Delete
1923655	Temp 7 inlet Wet Scrubber	Ethernet	32-bit floating	1.MD150	Record 30 Sec	Edit Delete
1923654	Temp 6 Furnace	Ethernet	32-bit floating	1.MD154	Record 30 Sec	Edit Delete
1923653	Temp 5 Burner	Ethernet	32-bit floating	1.MD158	Record 30 Sec	Edit Delete

รูปที่ 4.14 แสดงขั้นตอนการเปิดหน้าต่างสำหรับการเพิ่ม Tag เพื่อกำหนดระยะเวลาในการบันทึกค่า

- กำหนดชื่อแท็ก เงื่อนไขเวลาที่ในการบันทึก Address ของสัญญาณ กำหนดเลขจำนวนเต็มและทศนิยมในหน้าต่างดังรูปที่ 4.15
- คลิก OK เพื่อทำการบันทึก

รูปที่ 4.15 แสดงหน้าต่างสำหรับการสร้างกลุ่มเพื่อกำหนดระยะเวลาในการบันทึกค่า

4.3.5 การตั้งค่าระบบสัญญาณเตือน

1. คลิก Alarm (หมายเลข 1) > Alarm Tag (หมายเลข 2) > Alarm Tag (หมายเลข 3) เพื่อเปิดหน้าจอการตั้งค่าระบบสัญญาณเตือน ดังรูปที่ 4.16

ID	Name	Condition	Message	Level	Port	Read Address	Group	Edit
22048	DP Wet Scrubber	Value > 0		Major	Ethernet	1.MD72	Combustion Lab	Edit Delete
22047	Volume Flow Rate Air 2.1	Value >= 0.04		Major	Ethernet	1.MD254	Combustion Lab	Edit Delete

รูปที่ 4.16 แสดงขั้นตอนการเปิดหน้าต่างสำหรับการเพิ่ม Tag เพื่อสร้างระบบสัญญาณเตือน

- ทำการกำหนดค่าที่ต้องการทำระบบสัญญาณเตือน ในหน้าต่าง ดังรูปที่ 4.17 โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้แจ้งเตือนเมื่อค่าความดันที่เครื่องกำจัดฝุ่นมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ และกำหนดให้ระดับความรุนแรงเป็น Major

New Alarm Tag ✕

Name	Max. character length 50 allowed	
Group	Default group ▼	
Connection	2-Ethernet ▼	
Level	Minor ▼	
Port	Double Wt ▼	Date Type MD ▼
Register Main No.	0	Main range 0 99999 (Decimal)
Data format	32-bit floating ▼	
Integer	7 ▼	Decimal digits 0 ▼
Data range	-9999999-9999999	
Cancel		OK

รูปที่ 4.17 แสดงหน้าต่างสำหรับการกำหนดค่าสัญญาณที่ต้องการทำระบบสัญญาณเตือน

- คลิก OK เพื่อทำการบันทึก

4.4 การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์กับสภาวะการทำงานของระบบ

ในการพัฒนาระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงานของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียดผ่านเครื่องถ่ายอินเทอร์เนต จำเป็นต้องทราบถึงค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์และออกแบบโปรแกรมการคำนวณ

4.4.1 เงื่อนไขและวิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ขนถ่ายเชื้อเพลิง โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังต่อไปนี้

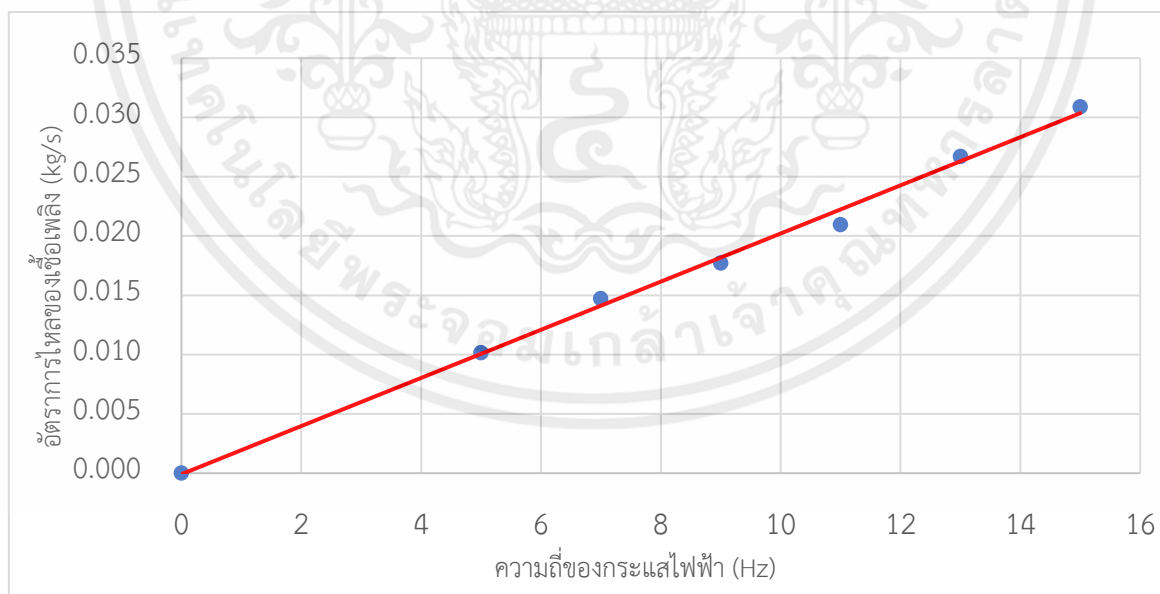
ตัวแปรต้น : ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz)

ตัวแปรตาม : น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าสู่ภาชนะบรรจุ (kg)

ตัวแปรควบคุม : เวลาที่ใช้ในการขนถ่ายเชื้อเพลิง 5 นาที

4.4.2 ผลการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์กับอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง

จากการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์กับอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้า(Hz) กับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/s)

จากผลการทดลอง ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์กับอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงดังนี้

$$y = 0.002x - 0.00009 \quad (4.1)$$

เมื่อ x คือความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz)

y คืออัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (kg/s)

4.4.3 การคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการทำงานของระบบกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์บนถ่ายเชื้อเพลิง

เมื่อทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์กับอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงแล้ว ยังจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของระบบกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์และออกแบบโปรแกรมการคำนวณ โดยจะทำการคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศได้จากสมการที่ 4.2

$$\dot{m}_{\text{fuel}} = \frac{\dot{Q}}{\text{LHV}} \quad (4.2)$$

เมื่อ LHV คือค่าความร้อนต่ำ (kcal/kg) ที่ได้จากรายที่ 4.2 โดยกำหนดให้ 1 kcal = 4.2 kJ และค่า \dot{Q} คือค่าสภาวะการทำงานของระบบ (kW)

เมื่อคำนวณหา \dot{m}_{fuel} ได้แล้ว จากนั้นจะทำการคำนวณหาความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ สามารถทำการคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ สำหรับอัตราทดเฟือง 1 : 50

สภาวะการทำงาน (kW)	อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (kg/s)	ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz)
100	0.0046	2.253
200	0.0092	4.551
300	0.0138	6.850
400	0.0184	9.148
500	0.0230	11.446

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ สำหรับอัตราทดเฟือง 1 : 50 (ต่อ)

สภาวะการทำงาน (kW)	อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (kg/s)	ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz)
600	0.0276	13.744
700	0.0322	16.043
800	0.0368	18.341
900	0.0414	20.639
1000	0.0460	22.937

4.5 การคำนวณหาคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์

4.5.1 องค์ประกอบธาตุทางเคมีของเชื้อเพลิง

ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบธาตุทางเคมีของเชื้อเพลิง

คุณสมบัติ	สภาพนำส่ง	สภาพน้ำหนักแห้ง
ความชื้น, %	17.32	-
เถ้า, %	3.65	4.41
ไฮโดรเจน, %	5.93	4.84
คาร์บอน, %	57.10	69.06
ไนโตรเจน, %	1.18	1.43
ออกซิเจน, %	31.71	19.74
ซัลเฟอร์, %	0.43	0.52
ค่าความร้อนสูง, กิโลแคลอรี/กก.	5480	6630
ค่าความร้อนต่ำ, กิโลแคลอรี/กก.	5180	6270

ที่มา: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

4.5.2 สมการการเผาไหม้ถ่านหิน

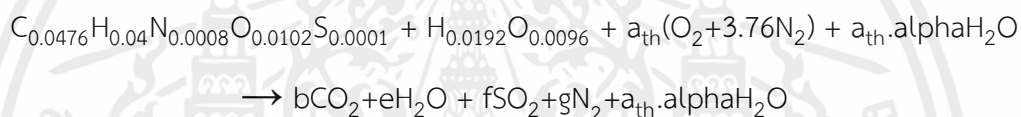
จากการทดสอบและวิเคราะห์เชื้อเพลิงถ่านหิน พิจารณาถ่านหินที่สภาพน้ำหนักแห้งสามารถหาน้ำหนักของธาตุและจำนวนโมลของธาตุได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงน้ำหนักของธาตุและจำนวนโมลของธาตุในเชื้อเพลิงถ่านหิน

ธาตุ	ถ่านหิน (% โดยมวล)	มวล / kgfuel (as fired)	kmole / kgfuel
Carbon	69.06	0.5710	0.0476
Hydrogen	4.84	0.0400	0.0400
Nitrogen	1.43	0.0118	0.0008
oxygen	19.74	0.1632	0.0102
sulfer	0.52	0.0043	0.0001

4.5.2.1 สมการการเผาไหม้ตามทฤษฎี

จากตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาถ่านหินที่สภาวะ Stoichiometry สามารถนำมาเขียนเป็นสมการการเผาไหม้ได้ดังนี้



เพื่อหามวลโมเลกุลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ตามปริมาณสัมพันธ์ตามทฤษฎี สามารถหาสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าของสมการข้างต้นได้โดยการดุลมวลของธาตุแต่ละชนิดดังนี้

$$C : 0.0476 = b$$

$$H : 0.04 + 0.0192 = 2e \\ e = 0.0296$$

$$S : 0.0001 = f$$

$$O : 0.0102 + 0.0096 + 2a_{th} = 2b + e + 2f$$

แทนค่า b, e และ f จะได้

$$a_{th} = 0.0526$$

$$N : 0.0008 + (a_{th} \times 2 \times 3.76) = 2g$$

แทนค่า a_{th} เท่ากับ 0.0526 จะได้

$$g = 0.1979$$

4.5.2.2 การพิจารณาความชื้นในอากาศ

ในอากาศประกอบด้วยอากาศแห้ง (dry air) และความชื้น (moisture) เมื่อใช้อากาศที่มีความชื้นอยู่ทำให้จำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงจำนวนโมลของน้ำที่เพิ่มขึ้นจากความชื้นนั้นด้วย โดยที่นี้จะแสดงการคำนวณกำหนดให้ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) มีค่าเท่ากับ 40% อุณหภูมิโดยรอบเท่ากับ 30°C และสมมติให้อากาศประพฤติตัวเหมือนแก๊สอุดมคติ

จาก

$$P_{v,air} = \phi P_{sat@30^\circ C}$$

ที่อุณหภูมิ 30°C มีค่า $P_{sat} = 4.75925$ kPa ดังนั้น

$$P_{v,air} = 0.4(4.75925) = 1.9037 \text{ kPa}$$

และวัดค่าความดันบรรยากาศ (P_{total}) ได้ 100.32 kPa

จากความสัมพันธ์

$$\frac{N_{v,air}}{N_{total}} = \frac{P_{v,air}}{P_{total}}$$

และ

$$N_{total} = (4.76a + N_v)$$

เมื่อ $N_{v,air}$, N_{total} , $P_{v,air}$, P_{total} , a คือ จำนวนโมลของน้ำในอากาศ จำนวนโมลทั้งหมด ความดันย่อยของน้ำในอากาศ ความดันบรรยากาศ และจำนวนโมลของอากาศแห้งตามลำดับ

จัดรูปใหม่และแทนค่า N_{total} ได้ความสัมพันธ์

$$N_{v,air} = \frac{4.76a \left(\frac{P_{v,air}}{P_{total}} \right)}{1 - \left(\frac{P_{v,air}}{P_{total}} \right)}$$

หารด้วยจำนวนโมลของอากาศแห้งทั้งสมการและให้มีค่าเท่ากับ alpha

$$\alpha = \frac{N_{v,air}}{a} = \frac{4.76 \left(\frac{P_{v,air}}{P_{total}} \right)}{1 - \left(\frac{P_{v,air}}{P_{total}} \right)}$$

แทนค่าความดันย่อยของน้ำในอากาศ และความดันบรรยากาศได้

$$\alpha = 0.0922$$

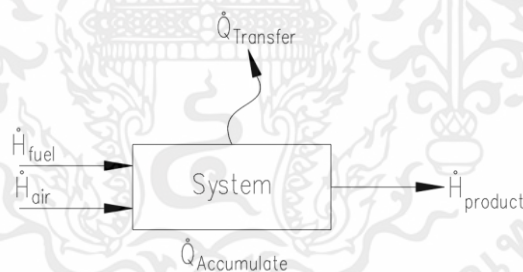
$$\text{จำนวนโมลของอากาศ } (a_{th}) = 0.0526$$

$$\text{มวลของอากาศ} = 0.0526[32 + (3.76 \times 28) + (0.0922 \times 18)] \text{ kg}_{air}$$

$$\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี } (A/F)_{th} = 7.308 \text{ kg}_{air} / \text{kg}_{fuel}$$

4.5.2.3 การวิเคราะห์ระบบเผาไหม้โดยกฎเทอร์โมข้อที่หนึ่งในระบบการไหลคงตัว

จากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ในนิยามของ Kelvin-Planck ได้กล่าวเอาไว้ว่า “ไม่มีจักรความร้อน (Heat engine) ใด ๆ สามารถทำงานเป็นวัฏจักรและสามารถสร้างงานออกมาได้เมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนเพียงแหล่งเดียว” ดังนั้นเมื่อเรามองระบบเผาไหม้เป็นระบบจึงสามารถแสดงรูปของการถ่ายเทพลังงานได้ดังนี้



รูปที่ 4.19 แสดงรูปการวิเคราะห์ด้านพลังงานอย่างง่าย

จากกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ข้อที่หนึ่งในระบบไหลคงตัวจากสมการที่ 3.10 สามารถแทนพลังงานของธาตุองค์ประกอบจะได้สมการ

$$\begin{aligned} \dot{m}_{fuel}(h_f + \Delta h_s)_{fuel} + \dot{m}_{air}(h_f + \Delta h_s)_{air} &= \dot{m}_{CO_2}(h_f + \Delta h_s)_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O}(h_f + \Delta h_s)_{H_2O} \\ &+ \dot{m}_{SO_2}(h_f + \Delta h_s)_{SO_2} + \dot{m}_{N_2}(h_f + \Delta h_s)_{N_2} \quad (4.3) \\ &+ \dot{m}_{O_2}(h_f + \Delta h_s)_{O_2} + \dot{Q}_{Transfer} + \dot{Q}_{Accumulate} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเอนทัลปีก่อเกิดของ O_2 และ N_2

สาร	เอนทัลปีก่อเกิด h_f (kJ/kmol)
O_2	0
N_2	0

เมื่อพิจารณา ตารางที่ 4.5 และสมการที่ 4.3 ภายใต้เงื่อนไขที่ผลิตภัณฑ์มีสภาวะกลับสู่สภาวะเดิมเหมือนสารตั้งต้น (Standard condition) เราทราบว่าความร้อนที่ถ่ายเทออกมาภายใต้เงื่อนไขนี้คือ ค่าความร้อน (heating Value) จะแทนด้วยสัญลักษณ์ HV สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\dot{m}_{\text{fuel}}(h_f)_{\text{fuel}} - \dot{m}_{\text{CO}_2}(h_f)_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}(h_f)_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{m}_{\text{SO}_2}(h_f)_{\text{SO}_2} = \text{HV}$$

ในการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบเผาไหม้ อ้างอิงจากสภาวะการทำงานในสภาวะการทำงานใดๆ สามารถเขียนสมการได้โดยใช้สมการที่ 3.10 และ 4.3 ได้

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{fuel}} \text{HV} + \dot{m}_{\text{air}}(h_f + \Delta h_s)_{\text{air}} = & \dot{m}_{\text{CO}_2}(\Delta h_s)_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}(\Delta h_s)_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{m}_{\text{SO}_2}(\Delta h_s)_{\text{SO}_2} \\ & + \dot{m}_{\text{N}_2}(h_f + \Delta h_s)_{\text{N}_2} + \dot{m}_{\text{O}_2}(h_f + \Delta h_s)_{\text{O}_2} + \dot{Q}_{\text{Loss}} \end{aligned} \quad (4.4)$$

โดยกำหนดให้ $\dot{m}_{\text{fuel}} \text{HV}$ คือ ค่าพลังงานที่สภาวะการทำงานใดๆ (kW)

และ \dot{Q}_{Loss} คือ $\dot{Q}_{\text{Transfer}} + \dot{Q}_{\text{Accumulate}}$

4.5.2.4 สมการการเผาไหม้จริง

หลังจากทำการทดลองการเผาไหม้ที่สภาวะการทำงานจริงที่ 300 kW สามารถเก็บค่าการทดลองได้ดังนี้

- อุณหภูมิเตาเผาไหม้ 845.15 °C เท่ากับ 1118.15 K
- อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 30 °C เท่ากับ 303 K

เมื่อพิจารณาสภาวะการทำงานที่ 300 kW ใช้ตารางที่ 4.2 เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่วัดได้จริง โดยค่าของอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (\dot{m}_{fuel}) เท่ากับ 0.0138 kg/s และค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศมีค่าเท่ากับ 0.103 m³/s

คำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศได้โดยใช้สมการ

$$\rho = \frac{\dot{m}}{\dot{V}}$$

เมื่อ ρ คือค่าความหนาแน่นของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.2 kg/m^3

\dot{V} คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s)

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ (\dot{m}_{air}) เท่ากับ 0.1236 kg/s

คำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงได้จากสมการที่ 3.3

$$(A/F)_{ac} = \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{\dot{m}_{\text{fuel}}}$$

$$(A/F)_{ac} = 8.957$$

คำนวณหาอัตราส่วนสมมูล (Equivalent ratio) จากสมการที่ 3.4

$$\phi = \frac{(A/F)_{th}}{(A/F)_{ac}}$$

$$\phi = \frac{7.311}{8.957}$$

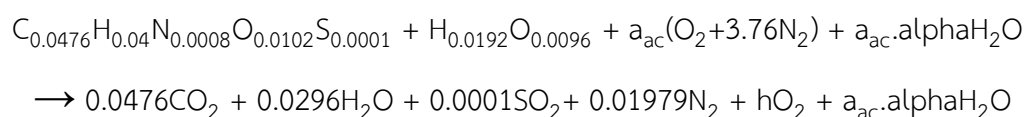
จะได้อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.816

คำนวณหาอากาศส่วนเกิน (Excess air) จากสมการที่ 3.6

$$\% \text{Excess air} = \frac{(1 - \phi)}{\phi} \times 100\%$$

จะได้เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินเท่ากับ 22.51%

จากเปอร์เซ็นต์อากาศเกินทำให้ทราบว่าเมื่ออากาศส่วนเกินอยู่ 1.225 เท่าของอากาศที่หาได้ทางทฤษฎี (a_{th}) สามารถนำมาเขียนเป็นสมการการเผาไหม้จริงได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อหามวลโมเลกุลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง สามารถหาสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าของสมการข้างต้นได้โดยการดุลมวลของธาตุแต่ละชนิดดังนี้

$$a_{ac} = 1.225 (a_{th})$$

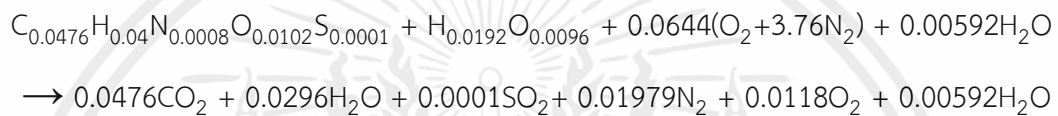
แทนค่า $a_{th} = 0.0526$ จะได้

$$a_{ac} = 0.0644$$

$$O : 0.0102 + 0.0096 + 2(0.0644) = 2(0.0476) + 0.0296 + 2(0.0001) + 2h$$

$$h = 0.0118$$

ดังนั้นสมการการเผาไหม้จริงคือ



หาค่า Mole fraction และ Mass fraction โดยนำค่าอัตราส่วนของสารองค์ประกอบไอเสียใน 1 kmol ไอเสีย คูณด้วยมวลอะตอมของสารองค์ประกอบไอเสียแต่ละสารเพื่อหามวลของสารองค์ประกอบไอเสีย จากนั้นทำการหาอัตราส่วนมวลของสารองค์ประกอบไอเสียจะสามารถแสดงค่าอัตราส่วนโมลและอัตราส่วนมวลของสารองค์ประกอบไอเสียได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าอัตราส่วนของสารองค์ประกอบไอเสียในไอเสีย 1 kmol

สารองค์ประกอบไอเสีย	อัตราส่วนโมลของสารองค์ประกอบไอเสียใน 1 kmol ไอเสีย (kmol)	มวลของสารองค์ประกอบไอเสียใน 1 kmol (kg/kmol)	อัตราส่วนมวลของสารองค์ประกอบไอเสียใน 1 kg ไอเสีย (kg)
CO ₂	0.1408	6.195	0.2110
H ₂ O	0.1052	1.894	0.0645
SO ₂	0.0003	0.025	0.00086
O ₂	0.0350	1.122	0.03821
N ₂	0.7138	20.118	0.6853

เราทราบว่าที่สภาวะการทำงาน 300 kW ระบบมีอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.0138 kg/s และ 0.1236 kg/s ตามลำดับ ทำให้สามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของไอเสียได้จากสมดุลมวลจากสมการดังต่อไปนี้

$$\dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air} = \dot{m}_{fuel\ gas} + \dot{m}_{ash}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในส่วนของกำหนัดคำนวณ \dot{m}_{ash} สามารถคำนวณได้โดยอิงจากตารางที่ 4.3
 คำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของไอเสีย

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{flue gas}} &= 0.0138 + 0.1236 - 0.00552 \\ \dot{m}_{\text{flue gas}} &= 0.1368 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

จากตารางที่ 4.6 เราทราบแล้วว่าอัตราส่วนมวลของสารองค์ประกอบไอเสียใน 1 kg/s
 แต่เราต้องการอัตราส่วนมวลของสารองค์ประกอบไอเสียใน 0.1368 kg/s สามารถสร้างตาราง
 ได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 อัตราส่วนมวลของสารองค์ประกอบไอเสียใน 0.1368 kg/s

สารองค์ประกอบไอเสีย	อัตราส่วนมวลของสารองค์ประกอบไอเสียใน 0.1368 kg ไอเสีย(kg/s)
CO ₂	0.02888
H ₂ O	0.00883
SO ₂	0.00001
O ₂	0.00522
N ₂	0.09373

คำนวณหาพลังงานถ่ายเทของระบบจากสมการที่ 4.4

$$\begin{aligned}& \dot{m}_{\text{fuel}}HV + \dot{m}_{\text{air}}(h_f + \Delta h_s)_{\text{air}} \\ &= \dot{m}_{\text{CO}_2}(\Delta h_s)_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}(\Delta h_s)_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{m}_{\text{SO}_2}(\Delta h_s)_{\text{SO}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2}(h_f + \Delta h_s)_{\text{N}_2} + \dot{m}_{\text{O}_2}(h_f + \Delta h_s)_{\text{O}_2} + \dot{Q}_{\text{Loss}}\end{aligned}$$

เนื่องจากค่าของพจน์ SO₂ มีค่าน้อยมาก

สามารถแทนค่าได้

$$\begin{aligned}300 + 0.1236(303.21 - 298.18) &= 0.02888(1117.35 - 212.82) + 0.00883(2264.74 - \\ &550.22) + 0.00522(1108.6 - 309.61) + 0.09373(1213.17 - 271.312) + \dot{Q}_{\text{Loss}}\end{aligned}$$

ดังนั้นสามารถหาค่าของพลังงานที่ถ่ายเทออกจากระบบได้เท่ากับ

$$\dot{Q}_{\text{Loss}} = 170.23 \text{ kW}$$

ค่าประสิทธิภาพหาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{\dot{H}_{\text{output}}}{\dot{H}_{\text{input}}}$$

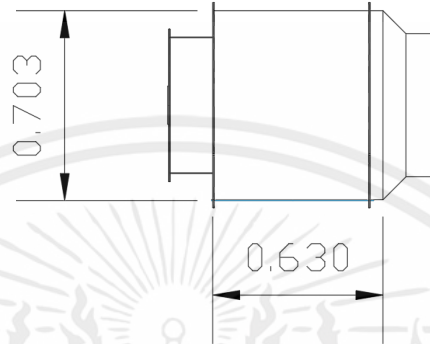
สามารถหาค่าประสิทธิภาพได้เท่ากับ 0.437 หรือ 43.7%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิว

หาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวของอุปกรณ์ทั้ง 3 ตัว ได้แก่ หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล เตาเผา และท่อเชื่อมระหว่างเตาเผาและเครื่องกำจัดฝุ่นแบบเปียก

4.6.1 การพาความร้อนที่หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล



รูปที่ 4.20 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล โดยสมมติให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขสถานะคงตัว อากาศมีพฤติกรรมเป็นก๊าซอุดมคติ คุณสมบัติเชิงความร้อนมีค่าคงที่ ไม่คิดค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี อุณหภูมิที่ผิวมีค่าประมาณ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีค่าเท่ากับ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

กำหนดให้ คุณสมบัติของอากาศคิดที่อุณหภูมิฟิล์มจากสมการที่ 3.16 จะได้

$$T_f = \frac{(T_s - T_{\infty})}{2} = \frac{60+30}{2} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$$

จากตารางคุณสมบัติของอากาศที่ 1 atm จะได้

$$k = 0.02699\text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$Pr = 0.7241$$

$$\nu = 1.750 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$$

$$\beta = 3.145 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$$

คำนวณค่า Ra ที่ $L_c = D$ ได้จากสมการที่ 3.15 จะได้

$$\begin{aligned} Ra_L &= \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} Pr \\ &= \frac{(9.81)(3.145 \times 10^{-3})(30)(0.703)^3}{(1.750 \times 10^{-5})^2} (0.7241) \\ &= 7.505 \times 10^8 \end{aligned}$$

ค่าเลขนัสเซลสำหรับการพาความร้อนตามธรรมชาติผ่านทรงกระบอกแนวนอน สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการในตารางที่ 3.1 จะได้

$$\begin{aligned} Nu &= \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\ &= \left\{ 0.6 + \frac{0.387(7.505 \times 10^8)^{1/6}}{[1 + (0.559/0.7241)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\ &= 106.1 \end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.14 จะได้

$$\begin{aligned} h &= \frac{k}{D} Nu \\ &= \frac{0.02699}{0.703} (106.1) \\ &= 4.09 \text{ W/m} \cdot \text{C} \end{aligned}$$

ค่าพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน

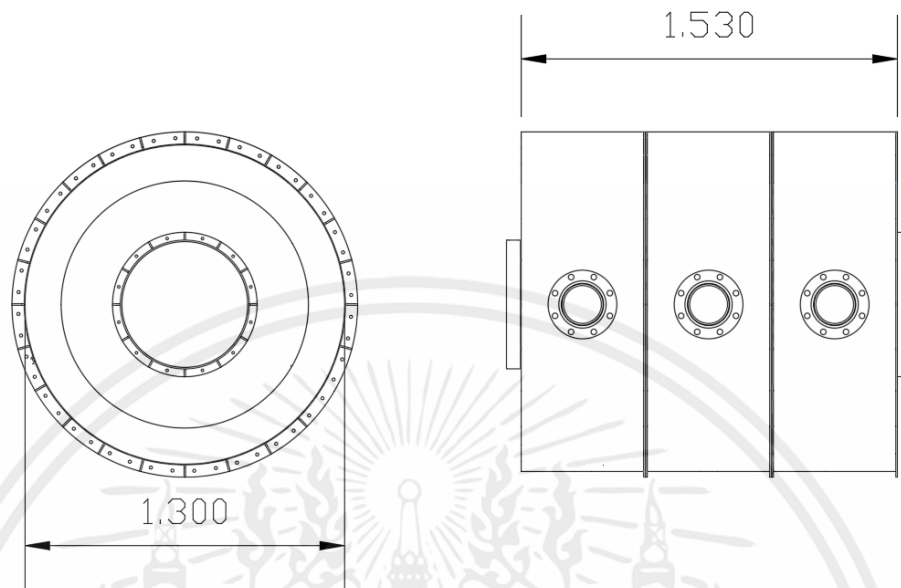
$$\begin{aligned} A_s &= \pi DL \\ &= \pi(0.703)(0.630) \\ &= 1.391 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

ค่าความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อน จากสมการที่ 3.12 จะได้

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= hA_s(T_s - T_\infty) \\ &= (4.09)(1.391)(30) \\ &= 169.92 \text{ W} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 การพาความร้อนที่เตาเผา



รูปที่ 4.21 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเตาเผา

การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวของเตาเผา โดยสมมติให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขสถานะคงตัว อากาศมีพฤติกรรมเป็นก๊าซอุดมคติ คุณสมบัติเชิงความร้อนมีค่าคงที่ไม่คิดค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี อุณหภูมิที่ผิวมีค่าประมาณ 90°C และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีค่าเท่ากับ 30°C

กำหนดให้ คุณสมบัติของอากาศคิดที่อุณหภูมิฟิล์ม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.16 จะได้

$$T_f = \frac{(T_s - T_{\infty})}{2} = \frac{90+30}{2} = 60^{\circ}\text{C}$$

จากตารางคุณสมบัติของอากาศที่ 1 atm จะได้

$$k = 0.02808 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$Pr = 0.7228$$

$$\nu = 1.896 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\beta = 3.003 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

คำนวณค่า Ra ที่ $L_c = D$ ได้จากสมการที่ 3.15 จะได้

$$\begin{aligned} Ra_L &= \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} Pr \\ &= \frac{(9.81)(3.003 \times 10^{-3})(60)(1.300)^3}{(1.896 \times 10^{-5})^2} (0.7202) \\ &= 7.78 \times 10^9 \end{aligned}$$

ค่าเลขนัสเซลสำหรับการพาความร้อนตามธรรมชาติผ่านทรงกระบอกแนวนอน สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการในตารางที่ 3.1 จะได้

$$\begin{aligned} Nu &= \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\ &= \left\{ 0.6 + \frac{0.387(7.78 \times 10^9)^{1/6}}{[1 + (0.559/0.7202)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\ &= 222.52 \end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.14 จะได้

$$\begin{aligned} h &= \frac{k}{D} Nu \\ &= \frac{0.02808}{1.300} (222.52) \\ &= 4.81 \text{ W/m} \cdot \text{C} \end{aligned}$$

ค่าพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน

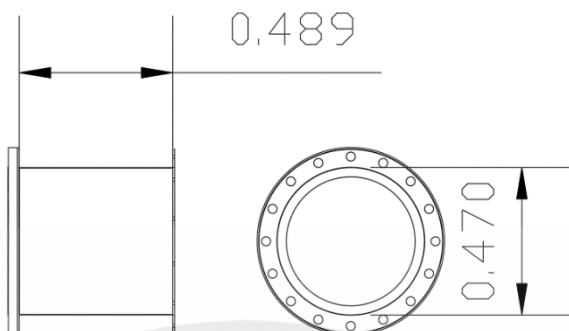
$$\begin{aligned} A_s &= \pi DL \\ &= \pi(1.300)(1.530) \\ &= 6.245 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

ค่าความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อน จากสมการที่ 3.12 จะได้

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= hA_s(T_s - T_\infty) \\ &= (4.81)(6.245)(60) \\ &= 1802.31 \text{ W} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 การพาความร้อนที่ท่อเชื่อมระหว่างเตาเผาและเครื่องกำจัดฝุ่นแบบเปียก



รูปที่ 4.22 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของท่อเชื่อมระหว่างเตาเผาและเครื่องกำจัดฝุ่นแบบเปียก

การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวของท่อที่เชื่อมระหว่างเตาเผาและเครื่องกำจัดฝุ่นแบบเปียก โดยสมมติให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขสภาวะคงตัว อากาศมีพฤติกรรมเป็นก๊าซอุดมคติ คุณสมบัติเชิงความร้อนมีค่าคงที่ ไม่คิดค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี อุณหภูมิที่ผิวมีค่าประมาณ $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีค่าเท่ากับ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

กำหนดให้ คุณสมบัติของอากาศคิดที่อุณหภูมิฟิล์มจากสมการที่ 3.16 จะได้

$$T_f = \frac{(T_s - T_{\infty})}{2} = \frac{110 + 30}{2} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$$

จากตารางคุณสมบัติของอากาศที่ 1 atm จะได้

$$k = 0.02881\text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$\text{Pr} = 0.7177$$

$$\nu = 1.995 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{B} = 2.915 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$$

คำนวณค่า Ra ที่ $L_c = D$ ได้จากสมการที่ 3.15 จะได้

$$\begin{aligned} Ra_L &= \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} Pr \\ &= \frac{(9.81)(2.915 \times 10^{-3})(80)(0.470)^3}{(1.995 \times 10^{-5})^2} (0.7177) \\ &= 4.283 \times 10^8 \end{aligned}$$

ค่าเลขนัสเซลสำหรับการพาความร้อนตามธรรมชาติผ่านทรงกระบอกแนวนอน สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการในตารางที่ 3.1 จะได้

$$\begin{aligned} Nu &= \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\ &= \left\{ 0.6 + \frac{0.387(4.283 \times 10^8)^{1/4}}{[1 + (0.559/0.7177)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\ &= 88.89 \end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.14 จะได้

$$\begin{aligned} h &= \frac{k}{D} Nu \\ &= \frac{0.02881}{0.470} (88.89) \\ &= 5.448 \text{ W/m}^2\text{C} \end{aligned}$$

ค่าพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการวิเคราะห์เส้นสุดที่จุดกึ่งกลางของท่อเชื่อมทำให้ต้องใช้ความยาวเพียงครั้งเดียว

$$\begin{aligned} A_s &= \pi DL \\ &= \pi(0.703)(0.630) \\ &= 0.361 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

ค่าความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อน จากสมการที่ 3.12 จะได้

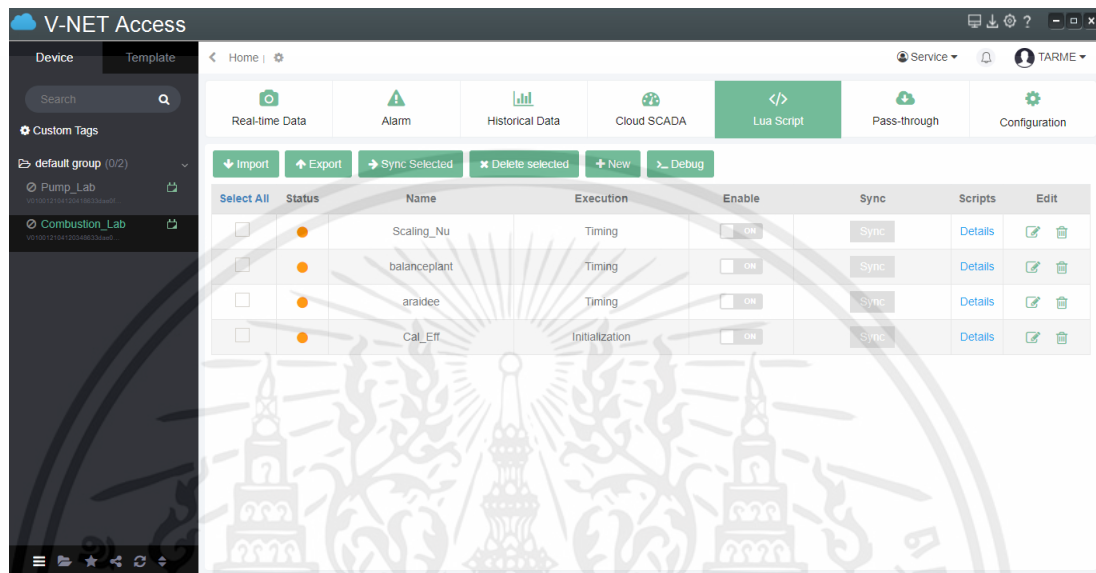
$$\begin{aligned} \dot{Q} &= hA_s(T_s - T_\infty) \\ &= (5.448)(0.361)(80) \\ &= 157.29 \text{ W} \end{aligned}$$

สามารถคำนวณอัตราการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการพาความร้อนบนพื้นผิวทั้งได้โดยรวมอัตราการสูญเสียพลังงานทั้ง 3 อุปกรณ์เข้าด้วยกันสามารถคำนวณได้เท่ากับ 2128 W หรือ 2.128 kW

4.7 การเขียนโปรแกรม

4.7.1 การสร้าง Script และชนิดของ Script

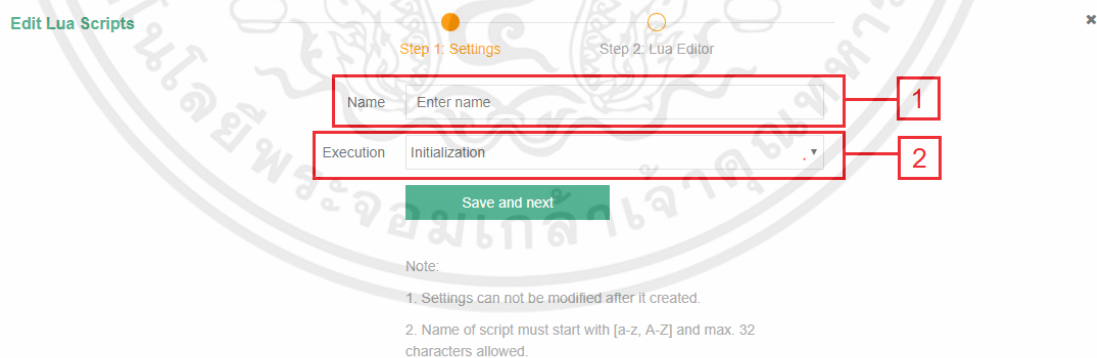
ในซอฟต์แวร์ V-NET นั้นมีส่วนที่สามารถเขียนโค้ดหรือ script ลงในซอฟต์แวร์ได้โดยการเข้าไปที่แถบ Lua Script เมื่อคลิกแล้วจะแสดงตามรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แสดงหน้าต่างแถบ Lua Script ในโปรแกรม V-NET

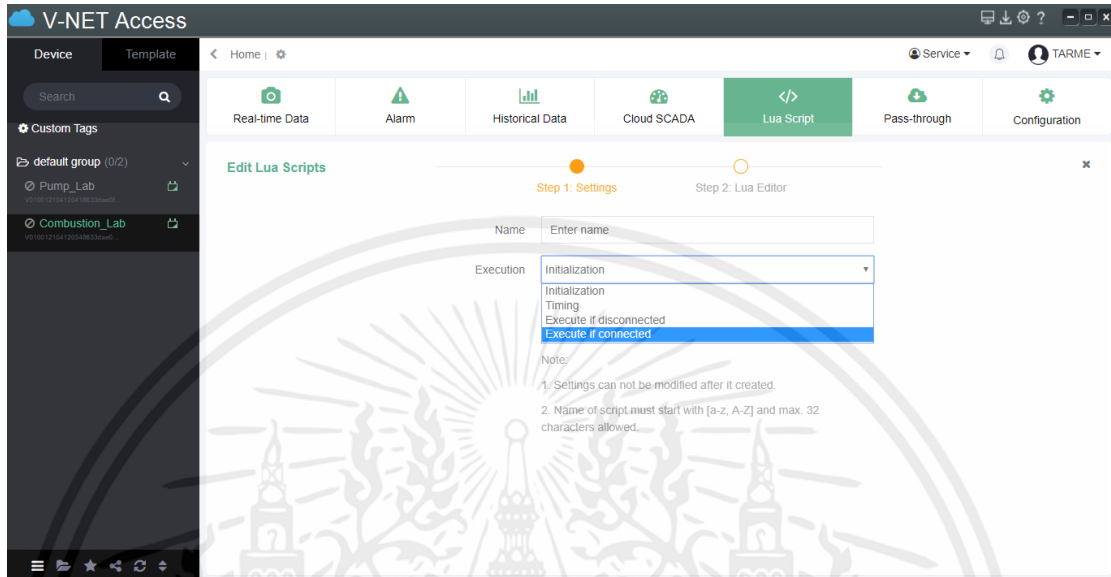
โดยขั้นตอนการสร้าง script ในซอฟต์แวร์ V-NET มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. คลิกคำสั่ง New เมื่อคลิกแล้วโปรแกรมจะเข้าหน้าต่าง Edit Lua script ดังรูป



รูปที่ 4.24 แสดงหน้าต่างการตั้งชื่อและชนิดของ Script ในโปรแกรม V-NET

2. ในแถบหมายเลข 1 ตั้งชื่อของ script ตามที่ต้องการ ในแถบหมายเลข 2 เป็นแถบเลือกชนิดของ script เมื่อคลิกแล้วจะต้องทำการเลือกชนิดของ script โดยชนิดของ script ในซอฟต์แวร์ V-NET มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.25 แสดงหน้าต่างที่ให้เลือกชนิดของ Script

- ชนิด Initialization เป็น script ที่จะทำงานทันทีเมื่อเปิดเครื่องและทำเพียงครั้งเดียว
- ชนิด Timing เป็น script ที่จะทำงานทุก ๆ เวลาที่ตั้งค่าไว้ เช่นทำงานทุก 1000 ms หรือ 1 วินาที
- ชนิด Execution if disconnected เป็น script ที่จะทำงานเมื่อโปรแกรมถูกตัดการเชื่อมต่อและทำเพียงครั้งเดียว
- ชนิด Execution if connected เป็น script ที่จะทำงานเมื่อโปรแกรมกลับมาเชื่อมต่อและทำเพียงครั้งเดียว

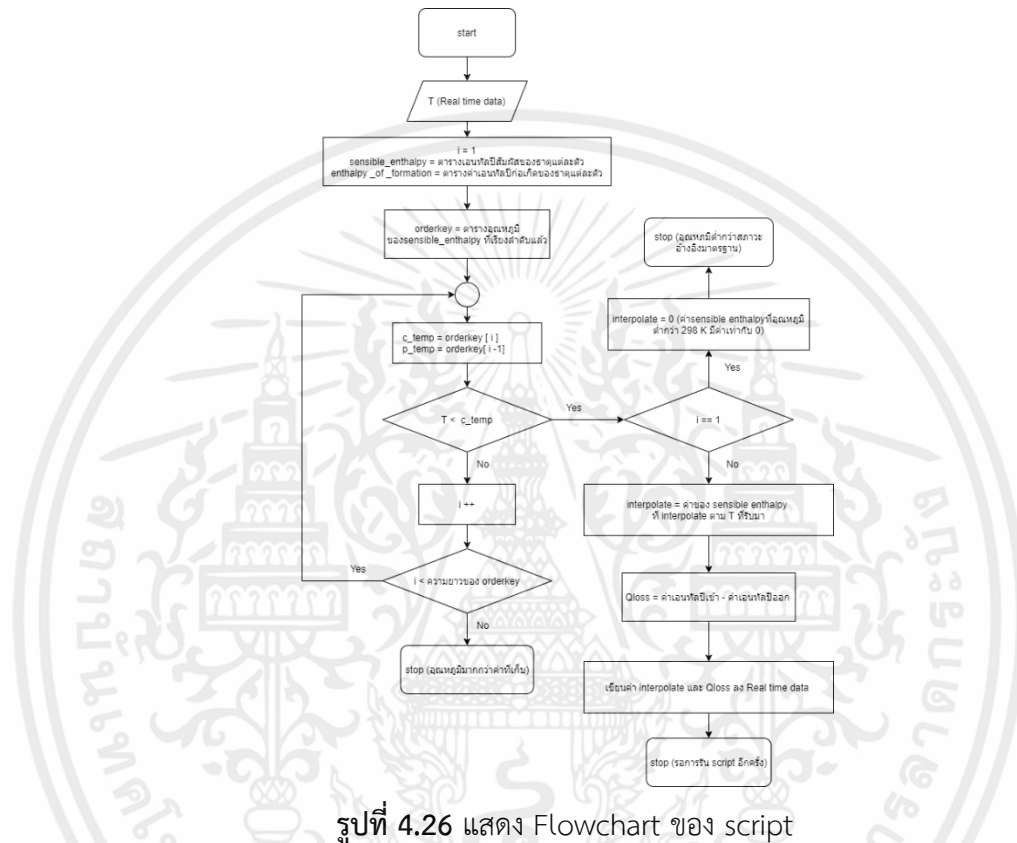
4.7.2 แนวคิดการเขียน Script

4.7.2.1 การนำคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์มาใช้ในซอฟต์แวร์

สิ่งที่เราต้องการจากการเขียน script อย่างหนึ่งคือการนำคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์มาใช้ในซอฟต์แวร์ V-NET เพื่อให้โปรแกรมดึงค่าจากมาใช้ในการคำนวณต่อไป การเก็บข้อมูลในส่วนนี้จะใช้ความรู้จาก Associative Arrays โดยจะใส่ key เป็นอุณหภูมิในช่วงต่าง ๆ และ value เป็นค่าเอนทัลปีของธาตุแต่ละตัว

4.7.2.2 แนวคิดการเขียน Script การ Interpolation ของตาราง

หลังจากการเก็บคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ในรูปแบบของ Associative Arrays แล้ว ในส่วนต่อไปจะพูดถึงแนวคิดการเขียน script ในการคำนวณ interpolation เพื่อหาค่าเอนทัลปีตาม อุณหภูมิเรียลไทม์ ที่ PLC เก็บไว้ และคำนวณหาค่า Loss ของระบบสามารถแสดงเป็น Flowchart ได้ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 แสดง Flowchart ของ script

เมื่อ ค่า T คือค่าอุณหภูมิที่ดึงจาก PLC แบบเรียลไทม์เพื่อใช้ในการคำนวณ interpolate เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ เช่น เอนทัลปีสัมผัส เป็นต้น

4.7.3 การเขียน Script การ Interpolate

จากหัวข้อ 4.7.2.2 เราได้ทราบถึงแนวคิดการเขียนโปรแกรม Interpolate และจุดประสงค์ของโปรแกรมไปแล้ว ในหัวข้อนี้จะพูดถึงการเขียน Script การใช้ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในโปรแกรม Interpolate โดยโปรแกรม Interpolate จะมีอยู่ทั้งหมด 3 ส่วน ในส่วนแรกจะเป็นการเก็บข้อมูลในรูปแบบของตาราง หรือ Associative Arrays ดังรูปที่ 4.27

```

local h_bar = {}
local input_temp = addr_getfloat("@Temp 6 Furnace")+273
h_bar[0] = {N2=0, O2=0, CO2=0, H2O=0}
h_bar[220] = {N2=6391, O2=6404, CO2=6601, H2O=7295}
h_bar[240] = {N2=6975, O2=6984, CO2=7280, H2O=7961}
h_bar[260] = {N2=7558, O2=7566, CO2=7979, H2O=8627}
h_bar[280] = {N2=8141, O2=8150, CO2=8697, H2O=9296}
h_bar[298] = {N2=8669, O2=8682, CO2=9364, H2O=9904}
h_bar[300] = {N2=8723, O2=8736, CO2=9431, H2O=9966}
h_bar[320] = {N2=9306, O2=9325, CO2=10186, H2O=10639}
h_bar[340] = {N2=9888, O2=9916, CO2=10959, H2O=11314}
h_bar[360] = {N2=10471, O2=10511, CO2=11748, H2O=11992}
h_bar[380] = {N2=11055, O2=11109, CO2=12552, H2O=12672}
h_bar[400] = {N2=11640, O2=11711, CO2=13372, H2O=13356}
h_bar[420] = {N2=12225, O2=12314, CO2=14206, H2O=14043}
h_bar[440] = {N2=12811, O2=12923, CO2=15054, H2O=14734}
h_bar[460] = {N2=13399, O2=13525, CO2=15916, H2O=15428}
h_bar[480] = {N2=13988, O2=14151, CO2=16791, H2O=16126}
h_bar[500] = {N2=14581, O2=14770, CO2=17678, H2O=16828}
h_bar[520] = {N2=15172, O2=15395, CO2=18576, H2O=17534}
h_bar[540] = {N2=15766, O2=16022, CO2=19485, H2O=18245}
h_bar[560] = {N2=16363, O2=16654, CO2=20407, H2O=18959}
h_bar[580] = {N2=16962, O2=17290, CO2=21337, H2O=19678}
h_bar[600] = {N2=17563, O2=17929, CO2=22277, H2O=20402}
h_bar[620] = {N2=18166, O2=18572, CO2=23231, H2O=21130}
h_bar[640] = {N2=18772, O2=19219, CO2=24190, H2O=21862}
h_bar[660] = {N2=19380, O2=19870, CO2=25160, H2O=22600}

```

รูปที่ 4.27 แสดงภาพส่วนที่หนึ่งของโปรแกรม Interpolate

ส่วนที่สอง คือการเขียนลำดับข้อมูลโดยการใช้ฟังก์ชันในหมวดหมู่ของ Table เพื่อให้ข้อมูลเรียงลำดับตามอุณหภูมิที่เราป้อนเข้าไปดังรูปที่ 4.28

```

local ordered_keys_h = {}
for k in pairs(h_bar) do
    table.insert(ordered_keys_h, k)
end
table.sort(ordered_keys_h)
local h_inter = {}

```

รูปที่ 4.28 แสดงภาพส่วนที่สองของโปรแกรม Interpolate

และส่วนสุดท้ายส่วนที่ 3 เป็นส่วนการของการคำนวณ Interpolate โดยใช้ฟังก์ชัน `addr_getfloat()` ในการดึงค่าอุณหภูมิแบบเรียลไทม์จาก PLC ดังรูปที่ 4.29

```

local h_inter = {}
for i = 1, #ordered_keys_h do
    local current_temp = ordered_keys_h[i]
    local previous_temp = ordered_keys_h[i-1]
    if input_temp < current_temp then
        local c_enthalpy = h_bar[current_temp]
        local p_enthalpy = h_bar[previous_temp]
        local inter_temp = (input_temp - previous_temp)/(current_temp - previous_temp)
        h_inter.N2 = inter_temp*(c_enthalpy.N2 - p_enthalpy.N2) + p_enthalpy.N2
        h_inter.O2 = inter_temp*(c_enthalpy.O2 - p_enthalpy.O2) + p_enthalpy.O2
        h_inter.CO2 = inter_temp*(c_enthalpy.CO2 - p_enthalpy.CO2) + p_enthalpy.CO2
        h_inter.H2O = inter_temp*(c_enthalpy.H2O - p_enthalpy.H2O) + p_enthalpy.H2O
        break
    end
end
end

```

รูปที่ 4.29 แสดงภาพส่วนที่สามของโปรแกรม Interpolate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.4 การเขียน Script การคำนวณ

การคำนวณมีอยู่ทั้งหมดสองส่วน ส่วนแรกคือการเขียน Script สำหรับการคำนวณด้านพลังงานการเผาไหม้โดยในหัวข้อที่ 4.5.2.4 เป็นการแสดงตัวอย่างการคำนวณด้านพลังงานการเผาไหม้โดยมีเงื่อนไขอุณหภูมิเตาเผาไหม้ 845.15 C เท่ากับ 1118.15 K อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 30 C เท่ากับ 303 K และสภาวะการทำงานที่ 300 kW ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงการเขียน Script ในเงื่อนไขเดียวกับหัวข้อที่ 4.5.2.4

เราจะเห็นโค้ดบางส่วนแล้วในหัวข้อที่ผ่านมาคือโปรแกรม interpolate แต่ในการคำนวณการถ่ายเทของพลังงานนั้นโปรแกรม Interpolate จะต้องใช้ถึงสองส่วน ส่วนแรกคือไว้หาค่าระหว่างของค่าเอนทัลปีของธาตุและส่วนที่สองหาค่าระหว่างของสภาวะการทำงานหรือก็คือหาค่าอัตราการผลิตเชิงมวลของเชื้อเพลิง

```

local summass_flow_rate = addr_getfloat("@Mass Flow Rate Air 1") + addr_getfloat("@Mass Flow Rate Air 2_1") + addr_getfloat("@Mass Flow Rate Air 2_2")
--local summass_flow_rate = (0.025+0.068+0.010)*1.2
local input_Hz = addr_getfloat("@Frequency of Screw Feeder")--2.562
local Hz_s = {}
Hz_s[0] = {mf_fuel = 0, mf_air = 0, work_s = 0}
Hz_s[0.89] = {mf_fuel = 0.0046, work_s = 100}
Hz_s[1.726] = {mf_fuel = 0.0092, work_s = 200}
Hz_s[2.562] = {mf_fuel = 0.0138, work_s = 300}
Hz_s[3.397] = {mf_fuel = 0.0184, work_s = 400}
Hz_s[4.2331] = {mf_fuel = 0.0230, work_s = 500}
Hz_s[5.068] = {mf_fuel = 0.0276, work_s = 600}
Hz_s[5.904] = {mf_fuel = 0.0322, work_s = 700}
Hz_s[6.7403] = {mf_fuel = 0.0368, work_s = 800}
Hz_s[7.576] = {mf_fuel = 0.0414, work_s = 900}
Hz_s[8.412] = {mf_fuel = 0.0460, work_s = 1000}
local ordered_keys_ws = {}
for s in pairs(Hz_s) do
  table.insert(ordered_keys_ws, s)
end
table.sort(ordered_keys_ws)
local massflow_inter = {}
for i = 1, #ordered_keys_ws do
  local current_state = ordered_keys_ws[i]
  local previous_state = ordered_keys_ws[i-1]
  if input_Hz < current_state then
    local c_state = Hz_s[current_state]
    local p_state = Hz_s[previous_state]
    local inter_state = (input_Hz - previous_state)/(current_state - previous_state)
    massflow_inter.mf_fuel = inter_state*(c_state.mf_fuel - p_state.mf_fuel) + p_state.mf_fuel
    massflow_inter.work_s = inter_state*(c_state.work_s - p_state.work_s) + p_state.work_s
    break
  end
end
end

```

รูปที่ 4.30 แสดงภาพของ Script โปรแกรม Interpolate ในในส่วนของการหาอัตราการผลิตเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ

ในลำดับถัดไปจะเป็นการวิเคราะห์และคำนวณเหมือนในหัวข้อที่ 4.5.2.4 ทั้งการหาอุปสมการการเผาไหม้ จนถึงการทำค่า mole และ mass fraction สามารถดูได้จากรูปที่ 4.31

```

local AF_stoi = 7.3108 --in stoi condition
local AF_ac = summass_flow_rate/massflow_inter.mf_fuel
local eq_ratio = AF_stoi/AF_ac
local excess_air = (1 - eq_ratio)*100/eq_ratio
addr_setfloat("@W_0#HAM100", AF_ac)
addr_setfloat("@W_0#HAM200", eq_ratio)
addr_setfloat("@W_0#HAM220", excess_air)
--ultimate analysis
local UA = {C=0.0475823, H=0.040017, N=0.00084452, O=0.0102006, S=0.000134355, m_H=0.019244, m_O=0.0096222}--kmole/per1k
local balance_stoi = {O=0.0526206, H=0.0296308, N=0.19827591}
local airmole_ac = balance_stoi.O*(excess_air+100)/100
--balance equation in actual condition
local balance_O = (UA.O + UA.m_O + 2*airmole_ac - 2*UA.C - balance_stoi.H - 2*UA.S)/2
local balance_N = 3.76*airmole_ac + UA.N/2
local moisture = airmole_ac*0.0919362
local balance_ac = {C=0.0475823, H=0.0296308+moisture, S=0.000134355, O=balance_O, N=balance_N}
addr_setfloat("@W_0#HAM240", balance_ac.O)
addr_setfloat("@W_0#HAM260", balance_ac.N)
addr_setfloat("@W_0#HAM360", balance_ac.H)
addr_setfloat("@W_0#HAM380", balance_ac.H)
addr_setfloat("@W_0#HAM400", balance_ac.S)
--molefraction
local summole = balance_ac.C+balance_ac.H+balance_ac.S+balance_ac.O+balance_ac.N
for v, k in pairs(balance_ac) do
  balance_ac[v] = k/summole
end
--mass for each element in 1 kgmole
balance_ac.C = balance_ac.C * 44
balance_ac.H = balance_ac.H * 18
balance_ac.S = balance_ac.S * 64
balance_ac.O = balance_ac.O * 32
balance_ac.N = balance_ac.N * 28
local summass = balance_ac.C+balance_ac.H+balance_ac.S+balance_ac.O+balance_ac.N
--massfraction

```

รูปที่ 4.31 แสดงภาพของ Script คำนวณสมการการเผาไหม้ mole และ mass fraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากหาค่า mole และ mass fraction ได้แล้วก็จะสามารถหาค่าของพลังงานที่ถ่ายเทออกจากระบบได้ ส่วนในการคำนวณส่วนที่สอง คือการเขียน Script คำนวณการสูญเสียจากการพาความร้อนบนพื้นผิวโดยจะมีส่วนของโปรแกรม Interpolate เช่นกันเพื่อหาค่าคุณสมบัติต่างๆในแต่ละอุณหภูมิ โดยแสดงได้ดังรูปที่ 4.32

```

local Tf_table = {}
Tf_table[25] = {k=0.02551, v=1.562*10^(-5), Pr=0.7296}
Tf_table[30] = {k=0.02588, v=1.608*10^(-5), Pr=0.7282}
Tf_table[35] = {k=0.02625, v=1.655*10^(-5), Pr=0.7268}
Tf_table[40] = {k=0.02662, v=1.702*10^(-5), Pr=0.7255}
Tf_table[45] = {k=0.02699, v=1.750*10^(-5), Pr=0.7241}
Tf_table[50] = {k=0.02735, v=1.798*10^(-5), Pr=0.7228}
Tf_table[60] = {k=0.02808, v=1.896*10^(-5), Pr=0.7202}
Tf_table[70] = {k=0.02881, v=1.995*10^(-5), Pr=0.7177}
Tf_table[80] = {k=0.02953, v=2.097*10^(-5), Pr=0.7154}
Tf_table[90] = {k=0.03024, v=2.201*10^(-5), Pr=0.7132}
Tf_table[100] = {k=0.03095, v=2.306*10^(-5), Pr=0.7111}
Tf_table[120] = {k=0.03235, v=2.522*10^(-5), Pr=0.7073}
Tf_table[140] = {k=0.03374, v=2.745*10^(-5), Pr=0.7041}
Tf_table[160] = {k=0.03511, v=2.975*10^(-5), Pr=0.7014}
local ordered_keys_Tf = {}
for s in pairs(Tf_table) do
    table.insert(ordered_keys_Tf, s)
end
table.sort(ordered_keys_Tf)
--Heat transfer from tube flue gas
local T_surface_tube = 110
local T_amb_tube = 32
local Tf_inter_tube = {}
local Tf_tube = (T_surface_tube+T_amb_tube)/2
for i = 1, #ordered_keys_Tf do
    local current_state = ordered_keys_Tf[i]
    local previous_state = ordered_keys_Tf[i-1]
    if Tf_tube < current_state then
        local c_state = Tf_table[current_state]
        local p_state = Tf_table[previous_state]
        local inter_state = (Tf_tube - previous_state)/(current_state - previous_state)
        Tf_inter_tube.k = inter_state*(c_state.k - p_state.k) + p_state.k
        Tf_inter_tube.v = inter_state*(c_state.v - p_state.v) + p_state.v
        Tf_inter_tube.Pr = inter_state*(c_state.Pr - p_state.Pr) + p_state.Pr
        break
    end
end
end

```

รูปที่ 4.32 แสดงโปรแกรม Interpolate สำหรับหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ในการคำนวณการพาความร้อน

หลังจากที่ได้ค่าคุณสมบัติที่อุณหภูมิที่พิจารณาแล้ว จึงสามารถหาอัตราการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการพาความร้อนบนพื้นผิวได้ โดยเขียน Script ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.33

```

local B_tube = 1/(Tf_tube+273)
local Ra_tube = (9.81*B_tube*Tf_inter_tube.Pr)*(T_surface_tube - T_amb_tube)*(0.47^3)/(Tf_inter_tube.v^2)
local Nu_tube = (0.6+(0.387*Ra_tube^(1/6)))/(1+(0.559/Tf_inter_tube.Pr)^(9.0/16.0))^(8.0/27.0)^2
local h_tube = Tf_inter_tube.k/0.47*Nu_tube
local As_tube = 3.14*0.47*0.2445
local Qtransfer_tube = h_tube*As_tube*(T_surface_tube - T_amb_tube)

```

รูปที่ 4.33 แสดง Script ส่วนการคำนวณหาอัตราการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการพาความร้อนบนพื้นผิว

และเมื่อคำนวณค่าคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ทั้งหมดและอัตราการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการพาความร้อนบนพื้นผิวได้แล้วนั้น ต่อไปจะเป็นการเก็บค่า บันทึกเป็น Tag เพื่อให้สามารถนำค่าที่คำนวณได้ไปแสดงใน Cloud SCADA ได้อย่างเรียลไทม์

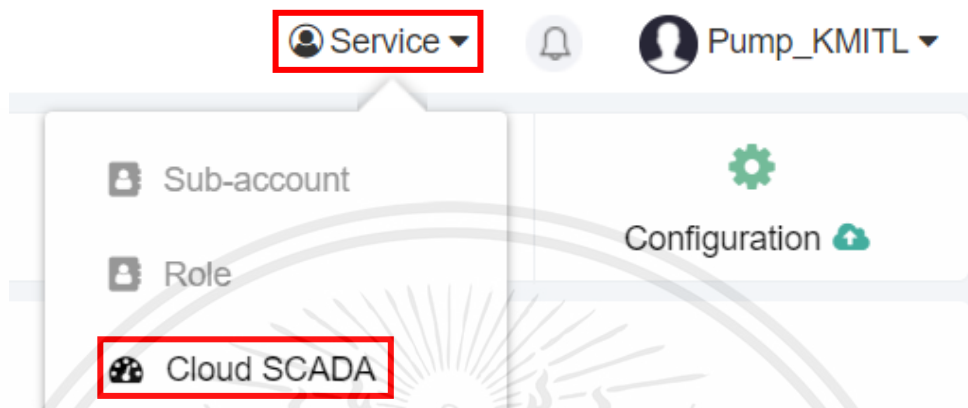
4.7.2.5 การเก็บค่าและบันทึกไปเป็น Tag

ในโปรแกรม V-NET เราสามารถนำค่าที่ได้จากการเขียน Lua script ไปเก็บเป็น Tag ใน address ที่เรากำหนดได้ โดยใช้ฟังก์ชัน `addr_setfloat()` โดยเราจำเป็นต้องมี Tag หรือ address ที่เราจะจัดเก็บข้อมูลโดยมีการตั้งค่าดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.34 แสดงการตั้งค่าเพิ่ม Tag เพื่อเก็บข้อมูลที่ได้จากการเขียน Lua script

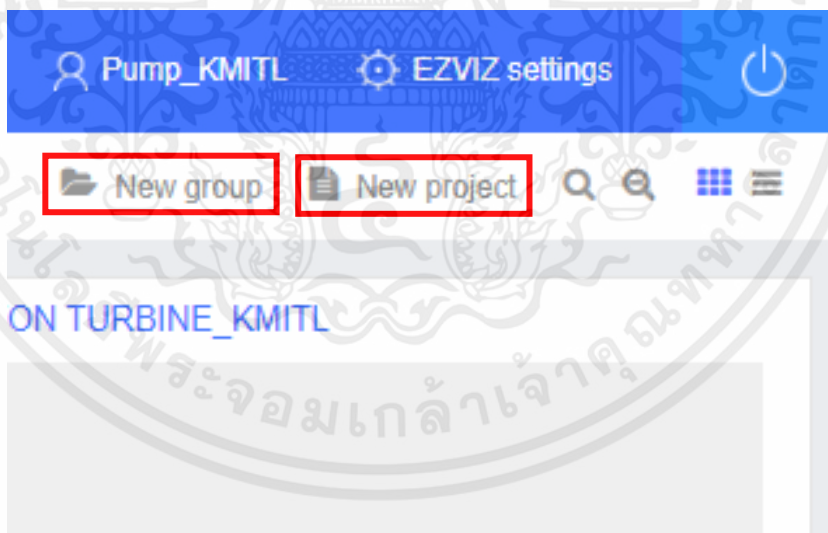
4.8 วิธีเขียนหน้าเว็บบน Cloud SCADA ในซอฟต์แวร์ V-NET

1. เปิดโปรแกรม V-NET Access บน PC แล้วล็อกอินด้วย Admin account จากนั้นคลิกที่ Service แล้วเลือกที่ Cloud SCADA จะเข้าสู่หน้า Web Cloud Configuration



รูปที่ 4.35 วิธีเข้าสู่หน้า Web Cloud Configuration เพื่อใช้งาน Cloud SCADA

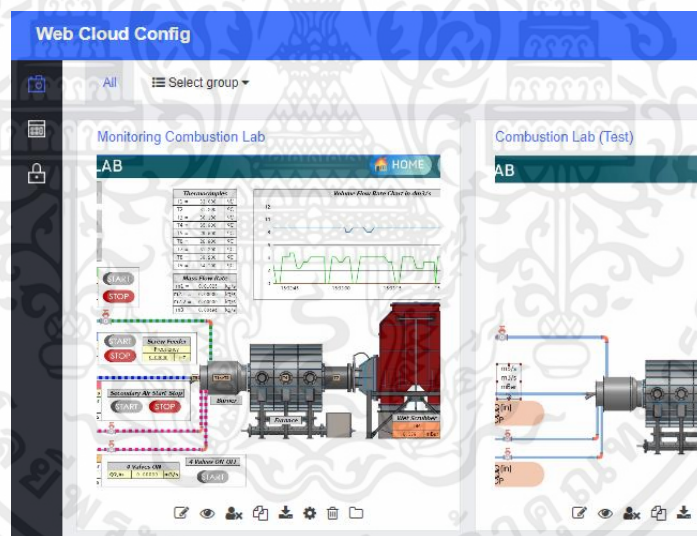
2. เลือกตัวเลือก New group บริเวณมุมขวาบนเพื่อสร้างกลุ่มและตั้งชื่อกลุ่มโครงการ หรือเลือกตัวเลือก New project บริเวณมุมขวาบนเพื่อสร้างหน้าเว็บโครงการใหม่ สามารถตั้งชื่อ กำหนด Resolution และเลือกThumbnailของหน้าเว็บโครงการ



รูปที่ 4.36 การสร้างกลุ่ม Project และการสร้าง Project ใหม่

รูปที่ 4.37 การสร้าง Project ใหม่ สามารถตั้งชื่อ กำหนด Resolution ความกว้างยาวได้

3. คลิกที่ตัวเลือก Configuration Design ที่ Project เพื่อเข้าไปแก้ไขหรือออกแบบหน้า Cloud SCADA



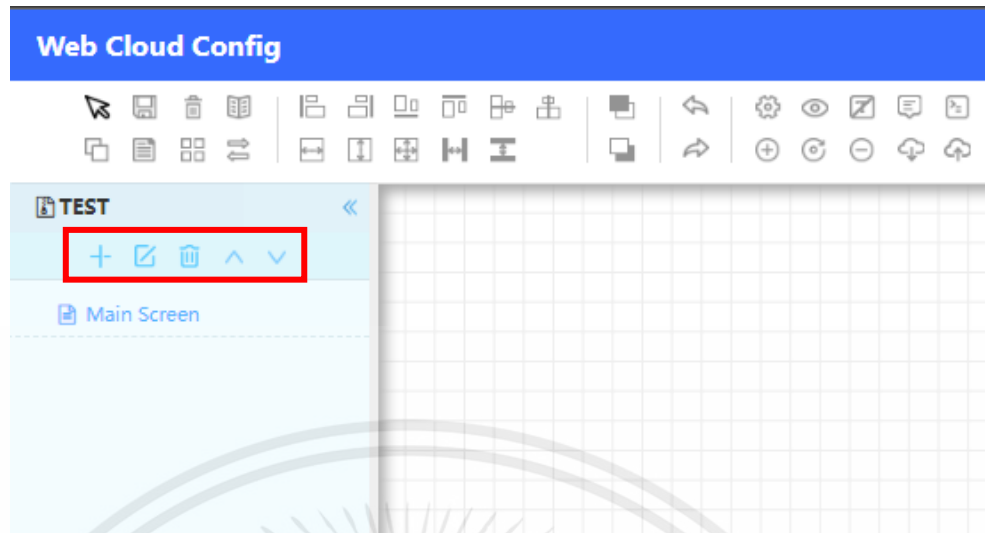
รูปที่ 4.38 คลิก Configuration Design เพื่อแก้ไขหรือออกแบบหน้า SCADA

4. หลังจากสร้างหน้าเว็บโครงการใหม่แล้ว ภายในจะมีเครื่องมือจำนวนมากที่ใช้สำหรับสร้างหน้า Cloud SCADA ให้สมบูรณ์ เครื่องมือหลักจะแบ่งเป็น 4 หมวด ดังต่อไปนี้

หมวดเครื่องมือสำหรับแก้ไขหน้า Page ต่างๆ เครื่องมือหลักที่สำคัญ เช่น

- Add New Page ใช้เพิ่มหน้า Page บน Web Cloud SCADA
- Modify This Page ใช้แก้ไข Size, Resolution และใส่ Background Page
- Delete This Page ใช้ลบหน้า Page นั้นๆ

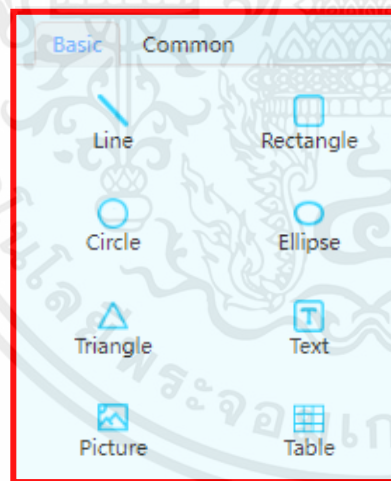
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 หมวดเครื่องมือสำหรับจัดการหน้า Page ต่าง ๆ

หมวดเครื่องมือ Basic ใช้สำหรับแทรกเรขาคณิต กล้องข้อความและใส่รูปภาพ เครื่องมือที่สำคัญ เช่น

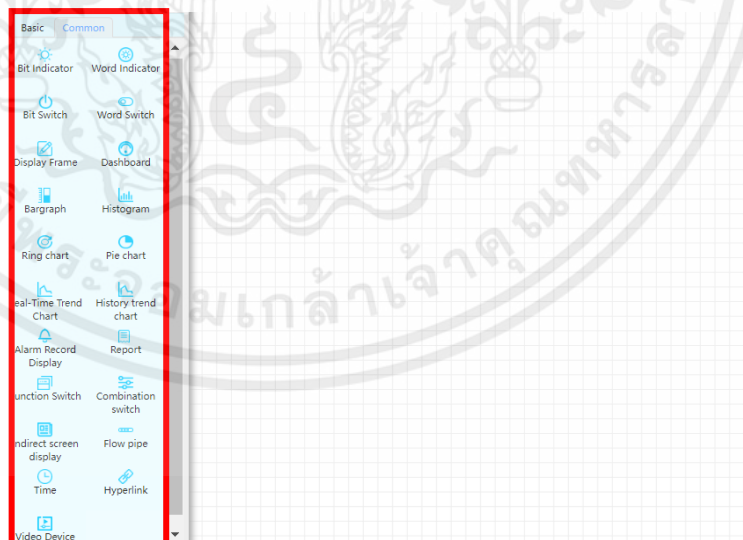
- Text ใช้สร้างกล้องข้อความ
- Picture ใช้ใส่รูปภาพที่ต้องการแสดงลงบน Cloud SCADA



รูปที่ 4.40 หมวดเครื่องมือพื้นฐานใช้แทรกข้อความ รูปภาพ และรูปเรขาคณิต

หมวดเครื่องมือ Common ใช้นำสัญญาณจาก PLC ที่ถูกบันทึกเป็น Tag สัญญาณบน Cloud ทุกประเภทไม่ว่าจะเป็น Real-Time Data, Historical Data และ Alarm มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ รวมถึงปุ่มสั่งการทำงาน เครื่องมือที่สำคัญ เช่น

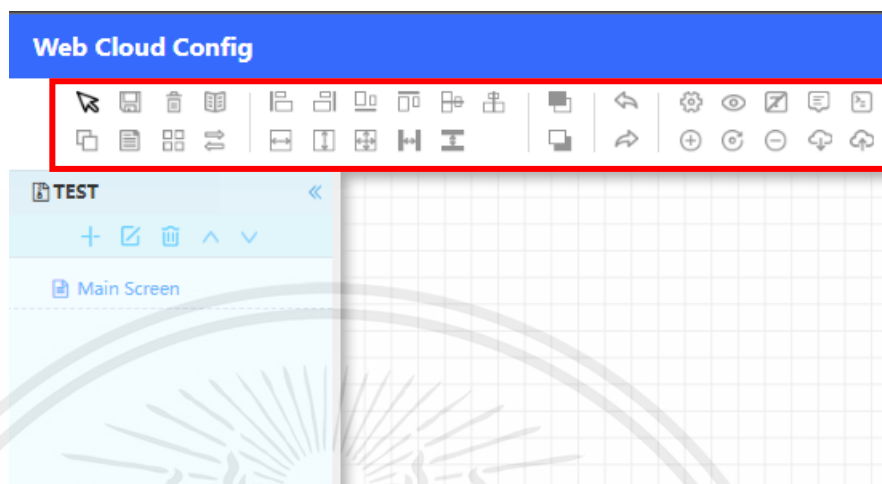
- Bit Indicator และ Word Indicator ใช้แสดงสถานะของสัญญาณจาก PLC ในรูปแบบสัญญาณไฟ
- Bit Switch และ Word Switch ใช้สร้างปุ่มสัญญาณสั่งการทำงานเปิด-ปิด ไปยัง PLC เพื่อควบคุมอุปกรณ์
- Display Frame ใช้แสดงค่าของ Tag สัญญาณในรูปแบบของตัวเลข
- Real-Time Trend Chart และ History Trend Chart ใช้นำค่าของสัญญาณต่าง ๆ มาแสดงในรูปแบบกราฟ
- Dashboard, Bargraph และ Ring Chart ใช้สร้างวงจ็ทแสดงปริมาณหรือระดับค่าจากสัญญาณในรูปแบบเกจวัดหรือแถบวัด
- Function Switch ใช้สำหรับสร้างปุ่มไปยังหน้า Page ต่าง ๆ ของ Cloud SCADA
- Report ใช้แสดงค่าจาก Historical Tag ทุกๆเวลาที่กำหนดให้ Record
- Alarm Record Display แสดงประวัติและเวลาการเกิด Alarm จากค่าสัญญาณที่เกินกำหนดเงื่อนไขที่ตั้งไว้
- Flow pipe แสดงสถานะของการไหลภายในท่อ โดยการตั้งเงื่อนไข เช่นเมื่อค่าจากสัญญาณปริมาณการไหลของลมมากกว่า $1 \text{ m}^3/\text{s}$ จะแสดงการไหลในรูปแบบทิศทางเครื่องเหวบน Cloud SCADA



รูปที่ 4.41 หมวดเครื่องมือทั่วไป ใช้นำ Tag สัญญาณประเภทต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์บน Cloud SCADA

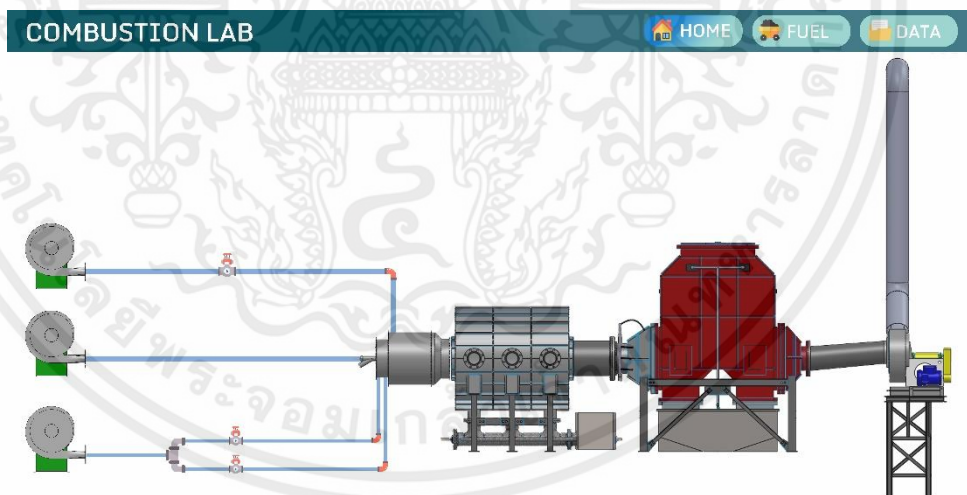
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมวดเครื่องมืออื่นๆ เครื่องมือที่สำคัญ เช่น Save ใช้บันทึกงานหลังจากแก้ไขหน้า Cloud SCADA



รูปที่ 4.42 หมวดเครื่องมืออื่นๆ ที่มีประโยชน์ต่อการออกแบบ Cloud SCADA

5. ใช้คำสั่ง Add New Page สร้าง Page ทั้งหมด 3 Page และใช้คำสั่ง Modify This Page ตั้งชื่อเป็น HOME, FUEL และ DATA Page รวมถึงใส่ Background ในแต่ละ Page ด้วย Background Template ที่เตรียมไว้



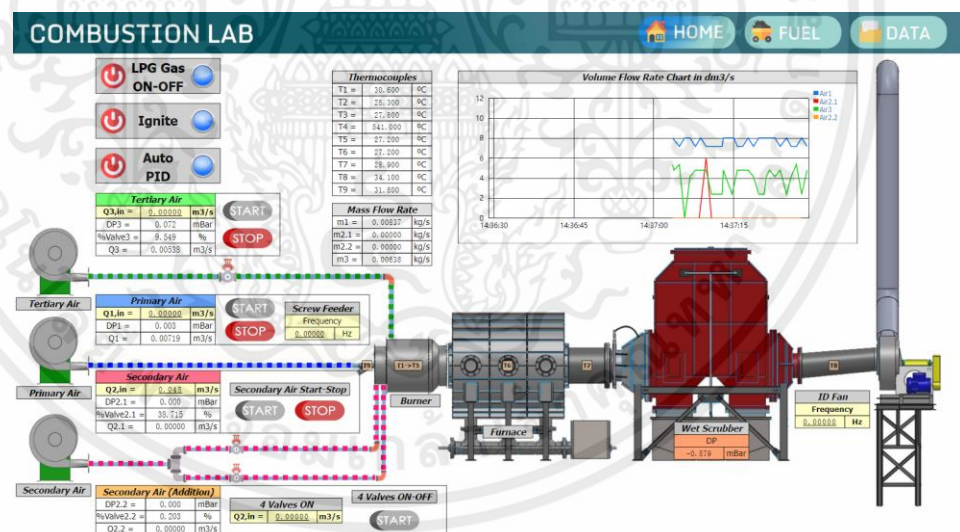
รูปที่ 4.43 ตัวอย่างรูปภาพ Template ที่นำมาใช้เป็น Background ของ Home Page

6. สำหรับข้อมูลตัวเลขบนหน้า HOME Page ใช้คำสั่ง Display Frame นำ Tag สัญญาณที่ใช้วัดค่าต่าง ๆ ของอุปกรณ์ มาแสดงค่าที่เกี่ยวข้องกับระบบลมที่หนึ่ง ระบบลมที่สอง และระบบลมที่สาม ได้แก่ Volume flow rate, Mass flow rate, Differential pressure, %Valves และ Volume flow rate (input) รวมถึงอุณหภูมิทั้ง 9 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Differential pressure ของ Wet scrubber และอัตราการป้อน Screw feeder (Frequency) โดยตั้งค่า Frequency ของ Screw feeder และ Volume flow rate (input) ของแต่ละระบบเป็น Read and write เพื่อให้สามารถ Input ค่าเข้าไปถึงการอุปกรณ์ได้

7. สำหรับปุ่มสั่งการหรือสวิตช์บนหน้า HOME Page ใช้คำสั่ง Bit Switch สร้างปุ่มคำสั่ง LPG Gas ON-OFF, Ignite, Auto PID รวมถึงปุ่มสั่งการ Start-Stop ระบบทั้งหมด และปุ่ม 4 Valves ON-OFF
8. ใช้คำสั่ง Function Switch เพื่อสร้างปุ่มที่ใช้ลิงก์จากหน้า HOME Page ไปยังหน้า FUEL Page และ DATA Page
9. สำหรับไฟสัญญาณหรือการแสดงผลสถานะของอุปกรณ์บนหน้า HOME Page ใช้คำสั่ง Bit Indicator สร้างไฟสัญญาณแสดงผลสถานะ LPG Gas, Ignite และ Auto PID ใช้คำสั่ง Pipe Line เพื่อสร้างสัญญาณแสดงการเคลื่อนไหวอากาศของระบบ
10. สำหรับข้อมูลกราฟบนหน้า HOME Page ใช้คำสั่ง Real-Time Trend Chart แสดงค่าจากสัญญาณ Volume flow rate ของระบบทั้งหมด เพื่อใช้สังเกตภาพรวมของระบบทั้ง 3 ส่วน

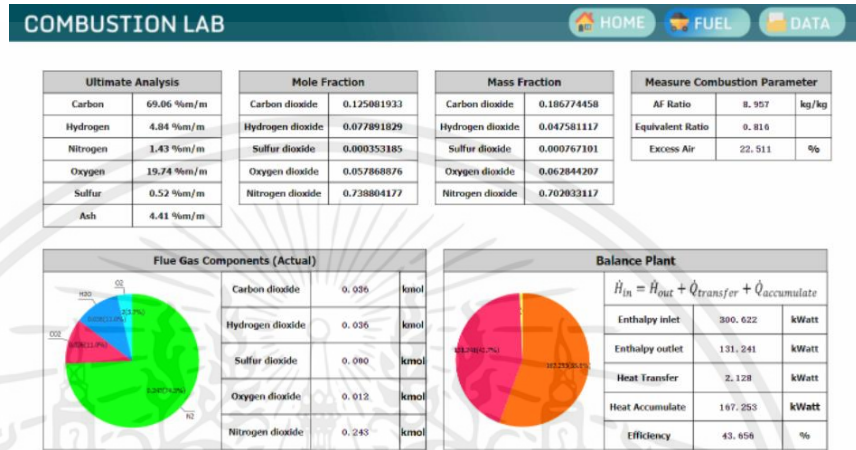


รูปที่ 4.44 HOME Page ใช้ค่าต่างๆที่ถูกรวบรวมจากเครื่องเผาไหม้และสามารถสั่งการอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้

11. สำหรับข้อมูลเชิงตัวเลขบนหน้า FUEL Page ใช้คำสั่ง Display Frame แสดงค่าต่าง ๆ ได้แก่ ค่า AF Ratio, Equivalent Ratio, Excess Air, Heat Transfer, Heat Accumulate, Efficiency รวมถึงค่า Actual ของ Flue Gas Components เช่น CO_2 , O_2 , SO_2 , H_2O และ N_2 ในหน่วย kmol

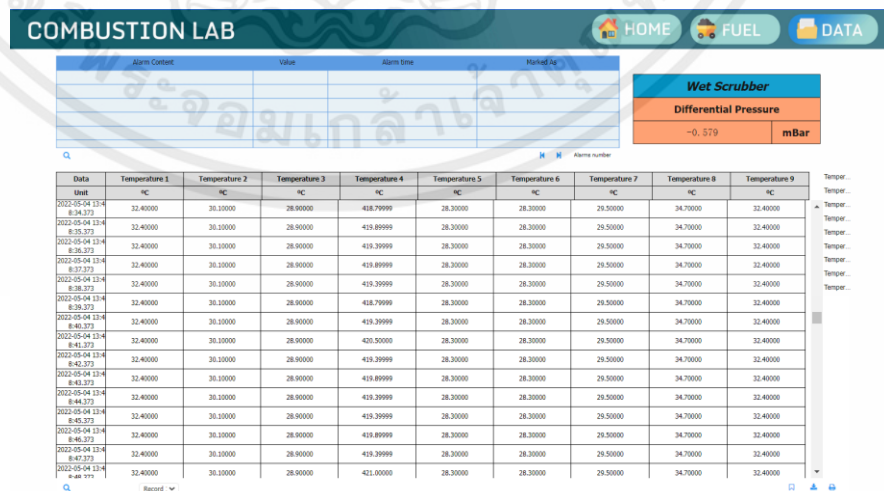
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สำหรับข้อมูลรูปแบบอื่นบนหน้า FUEL Page ใช้คำสั่ง Pie Chart สร้างแผนภูมิวงกลมของค่า Actual ของ Flue Gas Components ทั้งหมดเพื่อให้สามารถสังเกตภาพรวมของไอเสียทั้งหมดได้ง่าย
- ใช้คำสั่ง Function Switch เพื่อสร้างปุ่มที่ใช้ลิงจจากหน้า FUEL Page ไปยังหน้า HOME Page และ DATA Page



รูปที่ 4.45 FUEL Page ใช้ดูค่าต่างๆที่มาจากระบบประมวลผลที่คำนวณค่าที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงแบบ Real-Time

- สำหรับข้อมูลบนหน้า DATA Page จะแสดงการ Record data ของอุณหภูมิทั้ง 9 จุด ทุกๆ 1 วินาที ด้วยคำสั่ง Report รวมถึงข้อมูลในส่วนของ Alarm ที่จะแจ้งเตือนเมื่อ Differential pressure ของ Wet scrubber มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์
- ใช้คำสั่ง Function Switch เพื่อสร้างปุ่มที่ใช้ลิงจจากหน้า DATA Page ไปยังหน้า HOME Page และ FUEL Page



รูปที่ 4.46 DATA Page ใช้แสดงข้อมูล Record data และ Alarm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

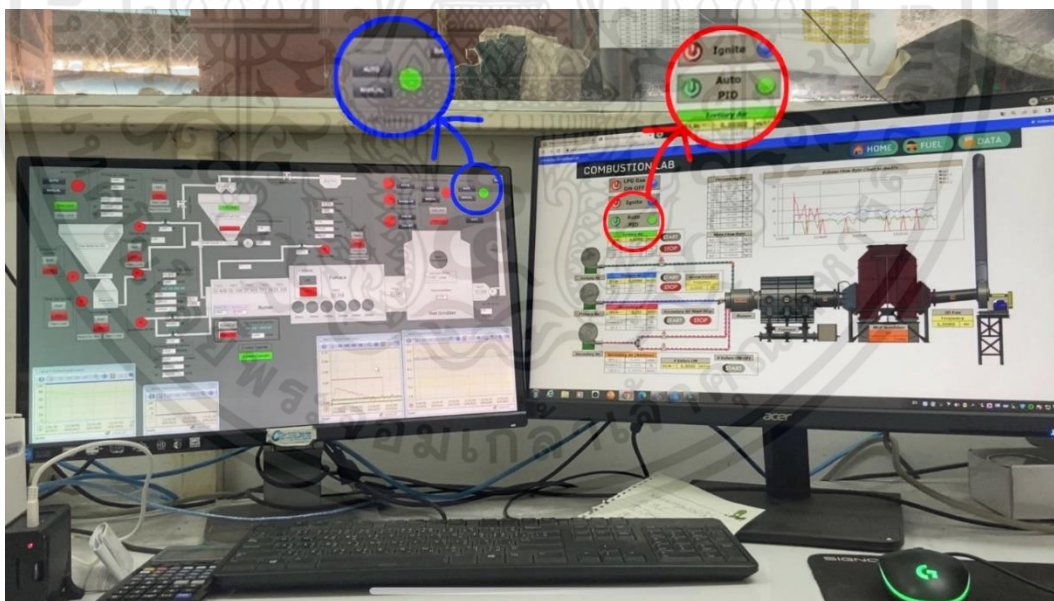
5.1 การทดสอบ

การทดสอบระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงานของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียดผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ทางผู้จัดทำได้ทำการแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การทดสอบการควบคุมระบบผ่านหน้าเว็บ Cloud SCADA การทดสอบด้านการบันทึกข้อมูล การทดสอบระบบสัญญาณเตือนและการทดสอบระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงาน

5.2 ผลการทดสอบ

5.2.1 การทดสอบการควบคุมระบบผ่านหน้าเว็บ Cloud SCADA

การทดสอบการควบคุมผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ผู้จัดทำได้ทำการทดสอบโดยการสั่งเปิด-ปิด Auto PID, เปิด-ปิดอากาศส่วนที่สองและป้อนอากาศส่วนที่สองผ่านหน้า Cloud SCADA และตรวจสอบโดยการสังเกตการทำงานผ่านระบบจริงและตรวจสอบผ่านโปรแกรม WinCC โดยจากการทดสอบการควบคุมการเปิด-ปิดของระบบลม ดังรูปที่ 5.1, 5.2, 5.3 และรูปที่ X.XX

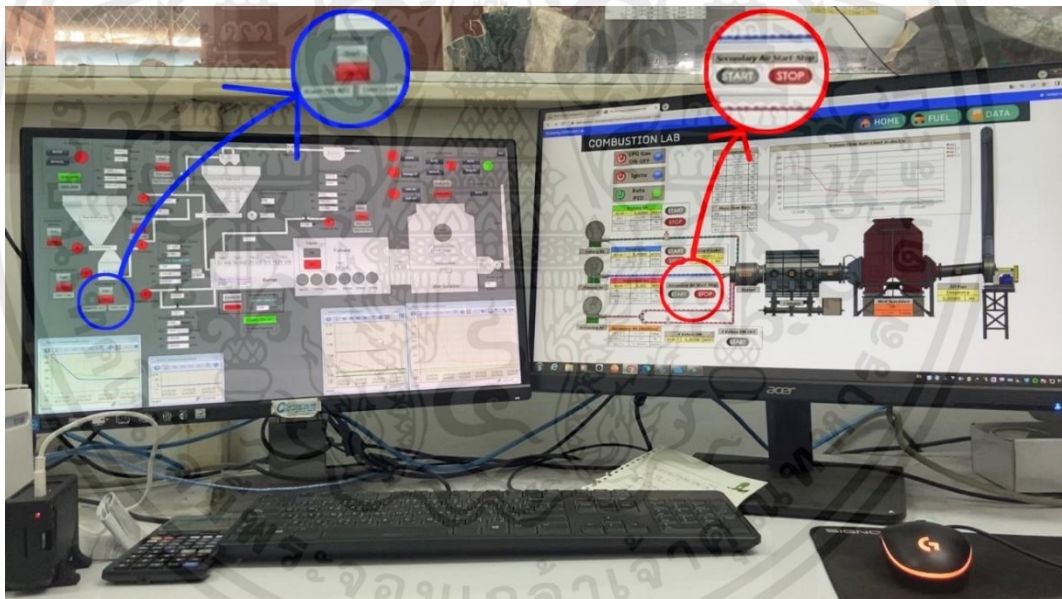


รูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างหน้าเว็บ Cloud SCADA และหน้าโปรแกรม WinCC เมื่อสั่งเปิด Auto PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

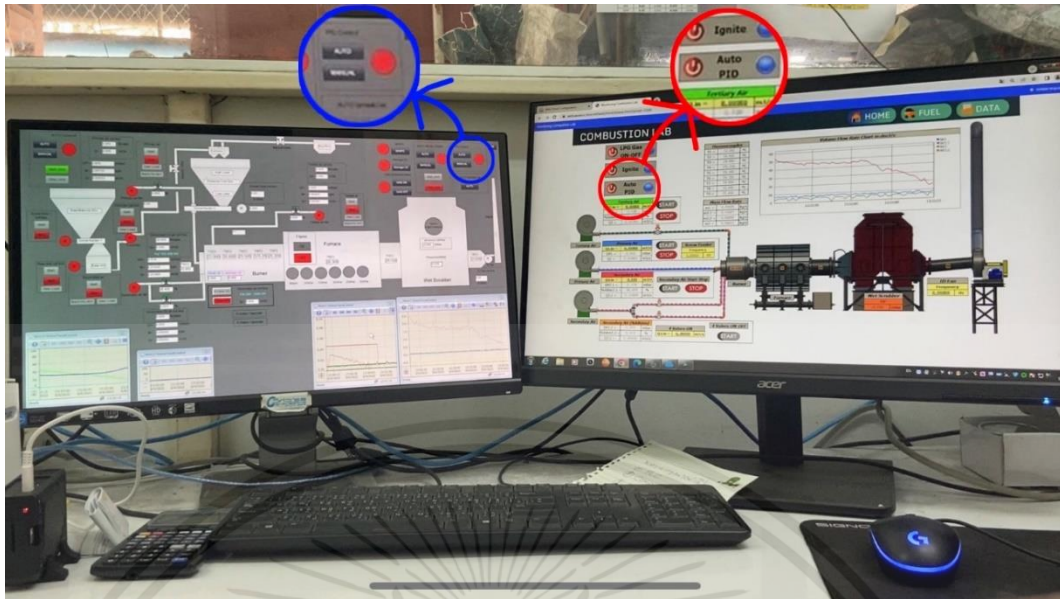


รูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างหน้าเว็บ Cloud SCADA และหน้าโปรแกรม WinCC เมื่อสั่งเปิดอากาศส่วนที่สอง



รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างหน้าเว็บ Cloud SCADA และหน้าโปรแกรม WinCC เมื่อสั่งปิดอากาศส่วนที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างหน้าเว็บ Cloud SCADA และหน้าโปรแกรม WinCC เมื่อสั่งปิด Auto PID

จากการทดสอบจะทำการสั่งเปิด Auto PID ผ่านหน้าเว็บ Cloud SCADA ดังรูปที่ 5.1 จะสังเกตว่าเมื่อสั่งเปิดไฟสีเขียวซึ่งเป็นสัญญาณไฟที่แสดงถึงการเปิดการทำงานของระบบ Auto PID โดยไฟสีเขียวจะขึ้นในหน้าโปรแกรม WinCC ก่อนและหลังจากนั้น 0.10 วินาที ไฟสีเขียวจะขึ้นในหน้าเว็บ Cloud SCADA จากนั้นทำการป้อนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สองที่ $0.045 \text{ m}^3/\text{s}$ พบว่าสามารถป้อนค่าอินพุตและสามารถสั่งเปิดอากาศส่วนที่สองผ่านหน้าเว็บ Cloud SCADA โดยการตรวจสอบสามารถสังเกตได้จากการทำงานของโบลเวอร์และสามารถสั่งเปิดไฟสีเขียวจากหน้าโปรแกรม WinCC โดยจากการทดสอบพบว่าไฟสีเขียวจะขึ้นที่หน้าโปรแกรม WinCC ก่อนและหลังจากนั้น 0.09 วินาที ไฟสีเขียวจะขึ้นในหน้าเว็บ Cloud SCADA ดังรูปที่ 5.2 และจากนั้นได้ทำการทดสอบการสั่งปิดโดยเริ่มจากการสั่งปิดการทำงานของอากาศส่วนที่สองและจากนั้นทำการสั่งปิด Auto PID พบว่าเมื่อทำการสั่งปิดอากาศส่วนที่สอง ในหน้าเว็บ Cloud SCADA ไฟสีเขียวจะดับลงก่อน หลังจากนั้น 0.22 วินาที ไฟสีเขียวในหน้าโปรแกรม WinCC จะดับลง ดังรูปที่ 5.3 และจากนั้นทำการสั่งปิด Auto PID พบว่าไฟสีเขียวในหน้าโปรแกรม WinCC จะดับลงก่อนและหลังจากนั้น 0.12 วินาที ไฟสีเขียวในหน้าเว็บ Cloud SCADA จะดับลงดังรูปที่ 5.4

5.2.2 การทดสอบด้านการบันทึกข้อมูล

การทดสอบด้านการบันทึกข้อมูล ทำการทดสอบโดยการบันทึกค่าข้อมูลอุณหภูมิทั้ง 9 จุดที่ได้จากโปรแกรม V-NET และทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการบันทึกข้อมูลของโปรแกรม WinCC โดยค่าที่ได้จากการบันทึกค่าจากโปรแกรม WinCC ได้ออกแบบให้มีการบันทึกค่าทุก ๆ 1 วินาที ดังนั้นจึงได้ออกแบบให้อุณหภูมิทั้ง 9 จุดที่ได้จากการบันทึกโดย V-NET บันทึกทุก ๆ 1 วินาที เช่นเดียวกัน เพื่อตรวจสอบว่าการบันทึกข้อมูลของโปรแกรมที่เวลาเดียวกันนั้นสามารถบันทึกข้อมูลได้ถูกต้องตรงกัน โดยผลที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิจากโปรแกรม WinCC และ V-NET จะแสดงดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลอุณหภูมิทั้ง 7 จุดจากโปรแกรม WinCC และโปรแกรม V-NET ที่เวลา 13:36:30

อุณหภูมิ	โปรแกรม WinCC	โปรแกรม V-NET
จุดที่ 1	33.5	33.50000
จุดที่ 2	31.2000007629395	31.20000
จุดที่ 3	29.5	29.50000
จุดที่ 4	369.6000006103516	469.60000
จุดที่ 5	28.8999996185303	28.90000
จุดที่ 6	28.2999992370605	28.30000
จุดที่ 7	29.5	29.50000

ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลอุณหภูมิทั้ง 7 จุดจากโปรแกรม WinCC และโปรแกรม V-NET ที่เวลา 13:53:29

อุณหภูมิ	โปรแกรม WinCC	โปรแกรม V-NET
จุดที่ 1	31.7999992370605	31.80000
จุดที่ 2	30.1000003814567	30.10000
จุดที่ 3	28.8999996185303	28.90000
จุดที่ 4	443.399993896484	443.40000
จุดที่ 5	27.7999992370605	27.80000
จุดที่ 6	27.7999992370605	27.80000
จุดที่ 7	29.5	29.50000

เนื่องจากข้อมูลของอุณหภูมิจากโปรแกรม WinCC ที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบ พบว่าโปรแกรมได้ถูกออกแบบให้บันทึกข้อมูลไว้แค่ 7 จุด ดังนั้นผู้จัดทำจึงนำข้อมูลของอุณหภูมิที่ได้จากการบันทึกโดยโปรแกรม V-NET เพียง 7 จุดมาเปรียบเทียบ และผลที่ได้จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ได้จากการบันทึกโดยโปรแกรม V-NET สามารถบันทึกได้ถูกต้องตรงกับค่าบันทึกได้ในโปรแกรม WinCC แต่ค่าแตกต่างกันเนื่องจากการกำหนดจุดทศนิยมของข้อมูลที่บันทึกได้นั้นแตกต่างกัน

5.2.3 การทดสอบระบบสัญญาณเตือน

การทดสอบระบบสัญญาณเตือน ผู้จัดทำได้ทำการตั้งค่าสัญญาณเตือนสำหรับความดันที่เครื่องกำจัดฝุ่นแบบเปียก โดยกำหนดเงื่อนไขให้ระบบทำการแจ้งเตือนเมื่อค่าความดันมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ แต่ในการทดลองไม่สามารถทำได้เนื่องจากระบบต้องควบคุมให้ความดันมีค่าเป็นลบเพื่อไม่ให้เกิดอันตราย ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงได้ทำการทดสอบโดยการตั้งค่าระบบให้ทำการแจ้งเตือนเมื่อค่าอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สองมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $0.040 \text{ m}^3/\text{s}$ เพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบ โดยจากการทดสอบพบว่าระบบได้ทำการแจ้งเตือนเมื่อค่าอัตราการไหลมีค่าเกิน $0.040 \text{ m}^3/\text{s}$ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และในระบบสัญญาณเตือนจะมีเสียงแจ้งเตือน ผู้ควบคุมระบบจะต้องการกดปุ่ม Confirm เพื่อยืนยัน เมื่อกดยืนยันแล้วระบบจะทำการบันทึกประวัติการแจ้งเตือนทำให้สามารถย้อนดูประวัติการแจ้งเตือนในภายหลังได้

Alarm Content	Value	Alarm time	Marked As
	0.04011	2022-08-24 12:31:04	Confirm

รูปที่ 5.5 แสดงตารางของระบบสัญญาณเตือนเมื่อค่าเกินเงื่อนไขที่กำหนด

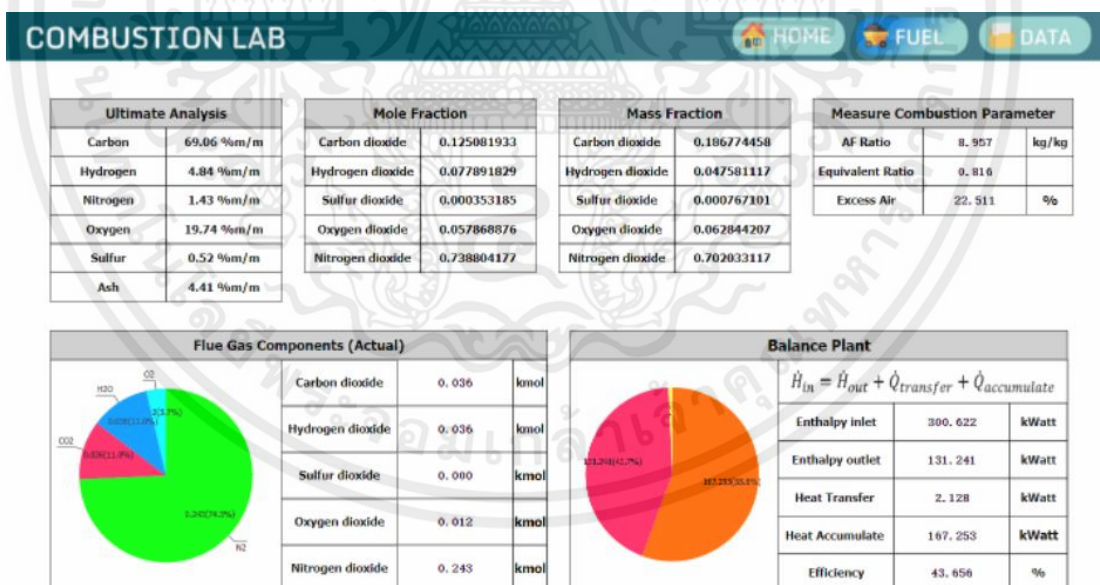
5.2.4 การทดสอบระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงาน

การทดสอบระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงาน ผู้จัดทำได้ทำการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณโดยอ้างอิงจากการคำนวณด้านพลังงานในหัวข้อที่ 4.5.2.4 และการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการพาความร้อนบนพื้นผิวในหัวข้อที่ 4.6 กับค่าที่ได้สามารถอ่านได้จากโปรแกรมแบบ real time ที่ได้ออกแบบ พบว่ามีค่าเท่ากันกับการคำนวณในหัวข้อที่ 4.5.2.4 และ 4.6 โดยมีรายละเอียดค่าที่จะใช้ในการเปรียบเทียบดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงค่าที่ต้องการเปรียบเทียบจากการคำนวณด้านพลังงานในหัวข้อที่ 4.5.2.4 และ 4.6

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง(A/F) _{ac}	8.957
อัตราส่วนสมมูล (Equivalent ratio)	0.816
อากาศส่วนเกิน (Excess air)	22.51 %
อัตราการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการพาความร้อนบนพื้นผิวของทั้งระบบ	2.128 kW
อัตราการสะสมพลังงานในระบบ	167.253 kW
ประสิทธิภาพของระบบ	0.437

โดยจะทำการเปรียบเทียบกับค่าที่อ่านได้แบบ real time ที่แสดงบน Scada โดยอยู่ในเงื่อนไขเดียวกับการคำนวณด้านพลังงานในหัวข้อ 4.5.2.4 และการคำนวณอัตราการสูญเสียพลังงานจากการพาความร้อนบนพื้นผิวในหัวข้อ 4.6 คือสภาวะการทำงานที่ 300 kW อุณหภูมิเตาเผาใหม่เท่ากับ 845.15 °C และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 30 °C สามารถแสดงรูปหน้าจอ Scada ณ เงื่อนไขข้างต้นได้ดังรูป



รูปที่ 5.6 แสดงภาพหน้าจอ Scada ที่เงื่อนไขการคำนวณตามหัวข้อที่ 4.5.2.4 และ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การวิจารณ์และอภิปรายผล

จากการทดสอบการควบคุมระบบผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยเริ่มจากการทดสอบด้านการบันทึกข้อมูลพบว่าการควบคุมผ่านหน้าเว็บ Cloud SCADA สามารถป้องกันค่าอินพุตของอากาศส่วนที่สองได้และสามารถสั่งเปิด-ปิด Auto PID และอากาศส่วนที่สองได้ โดยมีความล่าช้าไม่เกิน 1 วินาที

การทดสอบด้านการบันทึกข้อมูลพบว่าระบบสามารถบันทึกข้อมูลได้ถูกต้องตรงกับค่าที่ได้จากการบันทึกโดยโปรแกรม WinCC แต่ถ้าต้องการเก็บค่าทุกวันจะต้องทำการส่งไฟล์ข้อมูลที่บันทึกค่าที่ได้จากโปรแกรม V-NET ลงคอมพิวเตอร์ เนื่องจากโปรแกรมจะลบข้อมูลเก่าอัตโนมัติหากข้อมูลมีมากเกินไปที่โปรแกรมสามารถบันทึกได้ (โปรแกรมสามารถบันทึกค่าได้ 50 ข้อมูล โดยแต่ละข้อมูลสามารถบันทึกได้สูงสุด 1,000,000 ค่า หากเก็บค่าทุก ๆ 1 วินาที จะต้องทำการบันทึกไฟล์เก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ทุก ๆ 11 วัน)

จากการทดสอบระบบสัญญาณเตือนพบว่าระบบแจ้งเตือนเมื่อมีค่าที่ตั้งไว้เกินเงื่อนไขที่กำหนด แต่การแจ้งเตือนของระบบจะไม่สามารถทราบได้หากไม่ได้เข้าไปตรวจสอบในหน้าเว็บที่ได้ทำการสร้างตารางสำหรับการแจ้งเตือนไว้

และจากการทดสอบระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงาน พบว่าการพัฒนาโปรแกรมคำนวณโดยใช้ Lua script สามารถคำนวณและเก็บบันทึกค่าถูกต้องและแสดงผลได้แบบเรียลไทม์เมื่อเทียบกับการคำนวณในหัวข้อที่ 4.5.2.4 และ 4.6

บทที่ 6

บทสรุป

6.1 บทสรุป

จากการพัฒนาระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงานของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล บดละเอียดผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อแสดงผลข้อมูลและสามารถควบคุมระบบผ่านหน้าเว็บ Cloud SCADA ได้ เมื่อพบความผิดปกติจากการทำงานของเครื่องจักรสามารถดำเนินการแก้ไขก่อนที่จะเกิดความเสียหายได้ทันที และเพื่อพัฒนาระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงานของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียดและแสดงข้อมูลที่ประมวลผลได้ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบเรียลไทม์ โดยเครื่องที่นำมาติดตั้งเพื่อพัฒนาระบบนั้นคือ V-BOX ซึ่งเป็นอุปกรณ์รับส่งข้อมูลต่าง ๆ จากเครื่องมือวัดและชุดควบคุม PLC ไปยัง Cloud SCADA หรือแสดงผลข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ต และสามารถเก็บรวบรวมข้อมูลได้ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีการใช้งานที่ง่าย ต้นทุนต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับซอฟต์แวร์ที่มีให้ ได้แก่ ซอฟต์แวร์ V-NET, แอปพลิเคชัน V-NET และหน้าเว็บ Cloud SCADA โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเช่าคลาวด์เซิร์ฟเวอร์เพื่อเก็บข้อมูล ซึ่งขั้นตอนในการพัฒนาระบบเริ่มจากการติดตั้งเครื่อง V-BOX และอ้างอิง Address ที่ต้องการไปบันทึกไว้ในตัวซอฟต์แวร์ของ V-NET เพื่อให้สามารถนำขึ้นเว็บคลาวด์ได้ จากนั้นทำการออกแบบโปรแกรมในการประมวลผลข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ออกแบบหน้าเว็บ Cloud SCADA เพื่อแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ และทำการทดสอบระบบโดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งคือการทดสอบการควบคุมระบบผ่านหน้าเว็บ Cloud SCADA พบว่าสามารถควบคุมได้ ส่วนที่สองคือการทดสอบด้านการบันทึกข้อมูลของระบบ พบว่าสามารถบันทึกข้อมูลได้ถูกต้อง ส่วนที่สามคือการทดสอบระบบสัญญาณเตือนพบว่าสามารถแจ้งเตือนเมื่อค่าที่ตั้งไว้เกินกว่าเงื่อนไขที่ผู้ใช้ได้กำหนด และส่วนที่สี่คือการทดสอบระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงานพบว่าสามารถประมวลผลได้อย่างถูกต้องและสามารถแสดงผลได้แบบเรียลไทม์

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ส่วนประกอบของเชื้อเพลิงเป็นข้อมูลที่สำคัญที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณด้านพลังงาน ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงการคำนวณก็จะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในวิจัยนี้ใช้เชื้อเพลิงเพียงชนิดเดียว และเมื่อต้องเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงจึงจำเป็นต้องเขียน script ใหม่เพื่อให้ตรงตามค่าที่เปลี่ยนแปลงไป จึงเสนอให้มีโปรแกรมในการเก็บค่าเชื้อเพลิง และสามารถเลือกชนิดเชื้อเพลิงได้

6.2.2 จากระบบสัญญาณเตือนในงานวิจัยนี้ สามารถทำได้แค่แจ้งเตือนเมื่อค่าความดันที่เครื่องกำจัดฝุ่นแบบเปียกมีค่าเกินเงื่อนไขที่กำหนด ดังนั้นควรพัฒนาระบบสัญญาณเตือนให้สามารถควบคุมระบบหรือสั่งปิดระบบก่อนที่ระบบจะเกิดความเสียหาย



เอกสารอ้างอิง

- [1] จันคง นันทพล. 2560. การประยุกต์ใช้ PLC ในการควบคุมหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง.
- [2] Ahmed, M. S. 2021. **Designing of internet of things for real time system**. Retrieved from Elsevie: <https://www.materialstoday.com/proceedings>
- [3] Jason. 2021. **Configuration**. Retrieved from Wecon: <http://docs.wecon.com.cn/wiki/vbox/view/HMI/01.V-NET%20configuration/>
- [4] Yunus A. Cengel, and Michael A. Bloes. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. Boston:McGraw-Hil, 2001
- [5] Yunus A. Cengel, and Michael A. Bloes, **เทอร์โมไดนามิกส์**, แปลโดย สมชัย อัครทิวา และ ขวัญจิต วงษ์ชารี (กรุงเทพมหานคร: แมคกรอ-ฮิล อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล เอ็นเตอร์ไพรส์ แอลแอลซี, 2554)
- [6] วิฑาดา เจษฎารัตนชัย, **การถ่ายเทความร้อน**, พิมพ์ครั้งที่ 1 (กรุงเทพมหานคร: งานเทคโนโลยีการศึกษาและประชาสัมพันธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559)
- [7] Yunus A. Cengel, and Afshin J.GHAJAR. **Heat and mass transfer: Fundamental and application**. 5th ed.,McGraw-Hil Companies, New York 2015



ภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1.ก คุณสมบัติแก๊สอุดมคติของอากาศ

TABLE A-17
Ideal-gas properties of air

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg-K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg-K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	554.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

รูปที่ 2.ก คุณสมบัติแก๊สอุดมคติของอากาศ (ต่อ)

TABLE A-17
Ideal-gas properties of air (Concluded)

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg-K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg-K
1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638	1600	1757.57	791.2	1298.30	5.804	3.52364
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510	1620	1782.00	834.1	1316.96	5.574	3.53879
1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345	1640	1806.46	878.9	1335.72	5.355	3.55381
1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160	1660	1830.96	925.6	1354.48	5.147	3.56867
1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959	1680	1855.50	974.2	1373.24	4.949	3.58335
1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.5979
1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474	1750	1941.6	1161	1439.8	4.328	3.6336
1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200	1800	2003.3	1310	1487.2	3.994	3.6684
1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901	1850	2065.3	1475	1534.9	3.601	3.7023
1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586	1900	2127.4	1655	1582.6	3.295	3.7354
1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247	1950	2189.7	1852	1630.6	3.022	3.7677
1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892	2000	2252.1	2068	1678.7	2.776	3.7994
1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44516	2050	2314.6	2303	1726.8	2.555	3.8303
1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120	2100	2377.7	2559	1775.3	2.356	3.8605
1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712	2150	2440.3	2837	1823.8	2.175	3.8901
1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276	2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829	2250	2566.4	3464	1921.3	1.864	3.9474

Note: The properties P_r (relative pressure) and v_r (relative specific volume) are dimensionless quantities used in the analysis of isentropic processes, and should not be confused with the properties pressure and specific volume.

Source of Data: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1983), pp. 785–86, table A–5. Originally published in J. H. Keenan and J. Kaye, *Gas Tables* (New York: John Wiley & Sons, 1948).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.ก คุณสมบัติแก๊สอุดมคติของไนโตรเจน

TABLE A-18							
Ideal-gas properties of nitrogen, N ₂							
T	\bar{h}	\bar{u}	\bar{s}°	T	\bar{h}	\bar{u}	\bar{s}°
K	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kmol-K	K	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kmol-K
0	0	0	0	600	17,563	12,574	212.066
220	6,391	4,562	182.639	610	17,864	12,792	212.564
230	6,683	4,770	183.938	620	18,166	13,011	213.055
240	6,975	4,979	185.180	630	18,468	13,230	213.541
250	7,266	5,188	186.370	640	18,772	13,450	214.018
260	7,558	5,396	187.514	650	19,075	13,671	214.489
270	7,849	5,604	188.614	660	19,380	13,892	214.954
280	8,141	5,813	189.673	670	19,685	14,114	215.413
290	8,432	6,021	190.695	680	19,991	14,337	215.866
298	8,669	6,190	191.502	690	20,297	14,560	216.314
300	8,723	6,229	191.682	700	20,604	14,784	216.756
310	9,014	6,437	192.638	710	20,912	15,008	217.192
320	9,306	6,645	193.562	720	21,220	15,234	217.624
330	9,597	6,853	194.459	730	21,529	15,460	218.059
340	9,888	7,061	195.328	740	21,839	15,686	218.472
350	10,180	7,270	196.173	750	22,149	15,913	218.889
360	10,471	7,478	196.995	760	22,460	16,141	219.301
370	10,763	7,687	197.794	770	22,772	16,370	219.709
380	11,055	7,895	198.572	780	23,085	16,599	220.113
390	11,347	8,104	199.331	790	23,398	16,830	220.512
400	11,640	8,314	200.071	800	23,714	17,061	220.907
410	11,932	8,523	200.794	810	24,027	17,292	221.298
420	12,225	8,733	201.499	820	24,342	17,524	221.684
430	12,518	8,943	202.189	830	24,658	17,757	222.067
440	12,811	9,153	202.863	840	24,974	17,990	222.447
450	13,105	9,363	203.523	850	25,292	18,224	222.822
460	13,399	9,574	204.170	860	25,610	18,459	223.194
470	13,693	9,786	204.803	870	25,928	18,695	223.562
480	13,988	9,997	205.424	880	26,248	18,931	223.927
490	14,285	10,210	206.033	890	26,568	19,168	224.288
500	14,581	10,423	206.630	900	26,890	19,407	224.647
510	14,876	10,635	207.216	910	27,210	19,644	225.002
520	15,172	10,848	207.792	920	27,532	19,883	225.353
530	15,469	11,062	208.358	930	27,854	20,122	225.701
540	15,766	11,277	208.914	940	28,178	20,362	226.047
550	16,064	11,492	209.461	950	28,501	20,603	226.389
560	16,363	11,707	209.999	960	28,826	20,844	226.728
570	16,662	11,923	210.528	970	29,151	21,086	227.064
580	16,962	12,139	211.049	980	29,476	21,328	227.398
590	17,262	12,356	211.562	990	29,803	21,571	227.728

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.ก คุณสมบัติแก๊สอุดมคติของไนโตรเจน (ต่อ)

TABLE A-18							
Ideal-gas properties of nitrogen, N ₂ (Concluded)							
T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol·K	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol·K
1000	30,129	21,815	228.057	1760	56,227	41,594	247.396
1020	30,784	22,304	228.706	1780	56,938	42,139	247.798
1040	31,442	22,795	229.344	1800	57,651	42,685	248.195
1060	32,101	23,288	229.973	1820	58,363	43,231	248.589
1080	32,762	23,782	230.591	1840	59,075	43,777	248.979
1100	33,426	24,280	231.199	1860	59,790	44,324	249.365
1120	34,092	24,780	231.799	1880	60,504	44,873	249.748
1140	34,760	25,282	232.391	1900	61,220	45,423	250.128
1160	35,430	25,786	232.973	1920	61,936	45,973	250.502
1180	36,104	26,291	233.549	1940	62,654	46,524	250.874
1200	36,777	26,799	234.115	1960	63,381	47,075	251.242
1220	37,452	27,308	234.673	1980	64,090	47,627	251.607
1240	38,129	27,819	235.223	2000	64,810	48,181	251.969
1260	38,807	28,331	235.766	2050	66,612	49,567	252.858
1280	39,488	28,845	236.302	2100	68,417	50,957	253.726
1300	40,170	29,361	236.831	2150	70,226	52,351	254.578
1320	40,853	29,378	237.353	2200	72,040	53,749	255.412
1340	41,539	30,398	237.867	2250	73,856	55,149	256.227
1360	42,227	30,919	238.376	2300	75,676	56,553	257.027
1380	42,915	31,441	238.878	2350	77,496	57,958	257.810
1400	43,605	31,964	239.375	2400	79,320	59,366	258.580
1420	44,295	32,489	239.865	2450	81,149	60,779	259.332
1440	44,988	33,014	240.350	2500	82,981	62,195	260.073
1460	45,682	33,543	240.827	2550	84,814	63,613	260.799
1480	46,377	34,071	241.301	2600	86,650	65,033	261.512
1500	47,073	34,601	241.768	2650	88,488	66,455	262.213
1520	47,771	35,133	242.228	2700	90,328	67,880	262.902
1540	48,470	35,665	242.685	2750	92,171	69,306	263.577
1560	49,168	36,197	243.137	2800	94,014	70,734	264.241
1580	49,869	36,732	243.585	2850	95,859	72,163	264.895
1600	50,571	37,268	244.028	2900	97,705	73,593	265.538
1620	51,275	37,806	244.464	2950	99,556	75,028	266.170
1640	51,980	38,344	244.896	3000	101,407	76,464	266.793
1660	52,686	38,884	245.324	3050	103,260	77,902	267.404
1680	53,393	39,424	245.747	3100	105,115	79,341	268.007
1700	54,099	39,965	246.166	3150	106,972	80,782	268.601
1720	54,807	40,507	246.580	3200	108,830	82,224	269.186
1740	55,516	41,049	246.990	3250	110,690	83,668	269.763

Source of Data: Tables A-18 through A-25 are adapted from Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1983), pp. 787-98. Originally published in JANAF, *Thermochemical Tables*, NSRDS-NBS-37, 1971.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.ก คุณสมบัติแก๊สอุดมคติของออกซิเจน

TABLE A-19
Ideal-gas properties of oxygen, O₂

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol-K	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol-K
0	0	0	0	600	17,929	12,940	226.346
220	6,404	4,575	196.171	610	18,250	13,178	226.877
230	6,694	4,782	197.461	620	18,572	13,417	227.400
240	6,984	4,989	198.696	630	18,895	13,657	227.918
250	7,275	5,197	199.885	640	19,219	13,898	228.429
260	7,566	5,405	201.027	650	19,544	14,140	228.932
270	7,858	5,613	202.128	660	19,870	14,383	229.430
280	8,150	5,822	203.191	670	20,197	14,626	229.920
290	8,443	6,032	204.218	680	20,524	14,871	230.405
298	8,682	6,203	205.033	690	20,854	15,116	230.885
300	8,736	6,242	205.213	700	21,184	15,364	231.358
310	9,030	6,453	206.177	710	21,514	15,611	231.827
320	9,325	6,664	207.112	720	21,845	15,859	232.291
330	9,620	6,877	208.020	730	22,177	16,107	232.748
340	9,916	7,090	208.904	740	22,510	16,357	233.201
350	10,213	7,303	209.765	750	22,844	16,607	233.649
360	10,511	7,518	210.604	760	23,178	16,859	234.091
370	10,809	7,733	211.423	770	23,513	17,111	234.528
380	11,109	7,949	212.222	780	23,850	17,364	234.960
390	11,409	8,166	213.002	790	24,186	17,618	235.387
400	11,711	8,384	213.765	800	24,523	17,872	235.810
410	12,012	8,603	214.510	810	24,861	18,126	236.230
420	12,314	8,822	215.241	820	25,199	18,382	236.644
430	12,618	9,043	215.955	830	25,537	18,637	237.055
440	12,923	9,264	216.656	840	25,877	18,893	237.462
450	13,228	9,487	217.342	850	26,218	19,150	237.864
460	13,525	9,710	218.016	860	26,559	19,408	238.264
470	13,842	9,935	218.676	870	26,899	19,666	238.660
480	14,151	10,160	219.326	880	27,242	19,925	239.051
490	14,460	10,386	219.963	890	27,584	20,185	239.439
500	14,770	10,614	220.589	900	27,928	20,445	239.823
510	15,082	10,842	221.206	910	28,272	20,706	240.203
520	15,395	11,071	221.812	920	28,616	20,967	240.580
530	15,708	11,301	222.409	930	28,960	21,228	240.953
540	16,022	11,533	222.997	940	29,306	21,491	241.323
550	16,338	11,765	223.576	950	29,652	21,754	241.689
560	16,654	11,998	224.146	960	29,999	22,017	242.052
570	16,971	12,232	224.708	970	30,345	22,280	242.411
580	17,290	12,467	225.262	980	30,692	22,544	242.768
590	17,609	12,703	225.808	990	31,041	22,809	242.120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.ก คุณสมบัติแก๊สอุดมคติของออกซิเจน (ต่อ)

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol-K	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol-K
1000	31,389	23,075	243.471	1760	58,880	44,247	263.861
1020	32,088	23,607	244.164	1780	59,624	44,825	264.283
1040	32,789	24,142	244.844	1800	60,371	45,405	264.701
1060	33,490	24,677	245.513	1820	61,118	45,986	265.113
1080	34,194	25,214	246.171	1840	61,866	46,568	265.521
1100	34,899	25,753	246.818	1860	62,616	47,151	265.925
1120	35,606	26,294	247.454	1880	63,365	47,734	266.326
1140	36,314	26,836	248.081	1900	64,116	48,319	266.722
1160	37,023	27,379	248.698	1920	64,868	48,904	267.115
1180	37,734	27,923	249.307	1940	65,620	49,490	267.505
1200	38,447	28,469	249.906	1960	66,374	50,078	267.891
1220	39,162	29,018	250.497	1980	67,127	50,665	268.275
1240	39,877	29,568	251.079	2000	67,881	51,253	268.655
1260	40,594	30,118	251.653	2050	69,772	52,727	269.588
1280	41,312	30,670	252.219	2100	71,668	54,208	270.504
1300	42,033	31,224	252.776	2150	73,573	55,697	271.399
1320	42,753	31,778	253.325	2200	75,484	57,192	272.278
1340	43,475	32,334	253.868	2250	77,397	58,690	273.136
1360	44,198	32,891	254.404	2300	79,316	60,193	273.981
1380	44,923	33,449	254.932	2350	81,243	61,704	274.809
1400	45,648	34,008	255.454	2400	83,174	63,219	275.625
1420	46,374	34,567	255.968	2450	85,112	64,742	276.424
1440	47,102	35,129	256.475	2500	87,057	66,271	277.207
1460	47,831	35,692	256.978	2550	89,004	67,802	277.979
1480	48,561	36,256	257.474	2600	90,956	69,339	278.738
1500	49,292	36,821	257.965	2650	92,916	70,883	279.485
1520	50,024	37,387	258.450	2700	94,881	72,433	280.219
1540	50,756	37,952	258.928	2750	96,852	73,987	280.942
1560	51,490	38,520	259.402	2800	98,826	75,546	281.654
1580	52,224	39,088	259.870	2850	100,808	77,112	282.357
1600	52,961	39,658	260.333	2900	102,793	78,682	283.048
1620	53,696	40,227	260.791	2950	104,785	80,258	283.728
1640	54,434	40,799	261.242	3000	106,780	81,837	284.399
1660	55,172	41,370	261.690	3050	108,778	83,419	285.060
1680	55,912	41,944	262.132	3100	110,784	85,009	285.713
1700	56,652	42,517	262.571	3150	112,795	86,601	286.355
1720	57,394	43,093	263.005	3200	114,809	88,203	286.989
1740	58,136	43,669	263.435	3250	116,827	89,804	287.614

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.ก คุณสมบัติแก๊สอุดมคติของคาร์บอนไดออกไซด์

TABLE A-20
Ideal-gas properties of carbon dioxide, CO₂

<i>T</i> K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol-K	<i>T</i> K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol-K
0	0	0	0	600	22,280	17,291	243.199
220	6,601	4,772	202.966	610	22,754	17,683	243.983
230	6,938	5,026	204.464	620	23,231	18,076	244.758
240	7,280	5,285	205.920	630	23,709	18,471	245.524
250	7,627	5,548	207.337	640	24,190	18,869	246.282
260	7,979	5,817	208.717	650	24,674	19,270	247.032
270	8,335	6,091	210.062	660	25,160	19,672	247.773
280	8,697	6,369	211.376	670	25,648	20,078	248.507
290	9,063	6,651	212.660	680	26,138	20,484	249.233
298	9,364	6,885	213.685	690	26,631	20,894	249.952
300	9,431	6,939	213.915	700	27,125	21,305	250.663
310	9,807	7,230	215.146	710	27,622	21,719	251.368
320	10,186	7,526	216.351	720	28,121	22,134	252.065
330	10,570	7,826	217.534	730	28,622	22,552	252.755
340	10,959	8,131	218.694	740	29,124	22,972	253.439
350	11,351	8,439	219.831	750	29,629	23,393	254.117
360	11,748	8,752	220.948	760	30,135	23,817	254.787
370	12,148	9,068	222.044	770	30,644	24,242	255.452
380	12,552	9,392	223.122	780	31,154	24,669	256.110
390	12,960	9,718	224.182	790	31,665	25,097	256.762
400	13,372	10,046	225.225	800	32,179	25,527	257.408
410	13,787	10,378	226.250	810	32,694	25,959	258.048
420	14,206	10,714	227.258	820	33,212	26,394	258.682
430	14,628	11,053	228.252	830	33,730	26,829	259.311
440	15,054	11,393	229.230	840	34,251	27,267	259.934
450	15,483	11,742	230.194	850	34,773	27,706	260.551
460	15,916	12,091	231.144	860	35,296	28,125	261.164
470	16,351	12,444	232.080	870	35,821	28,588	261.770
480	16,791	12,800	233.004	880	36,347	29,031	262.371
490	17,232	13,158	233.916	890	36,876	29,476	262.968
500	17,678	13,521	234.814	900	37,405	29,922	263.559
510	18,126	13,885	235.700	910	37,935	30,369	264.146
520	18,576	14,253	236.575	920	38,467	30,818	264.728
530	19,029	14,622	237.439	930	39,000	31,268	265.304
540	19,485	14,996	238.292	940	39,535	31,719	265.877
550	19,945	15,372	239.135	950	40,070	32,171	266.444
560	20,407	15,751	239.962	960	40,607	32,625	267.007
570	20,870	16,131	240.789	970	41,145	33,081	267.566
580	21,337	16,515	241.602	980	41,685	33,537	268.119
590	21,807	16,902	242.405	990	42,226	33,995	268.670

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 8.ก คุณสมบัติแก๊สอุดมคติของคาร์บอนไดออกไซด์ (ต่อ)

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol·K	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol·K
1000	42,769	34,455	269.215	1760	86,420	71,787	301.543
1020	43,859	35,378	270.293	1780	87,612	72,812	302.217
1040	44,953	36,306	271.354	1800	88,806	73,840	302.884
1060	46,051	37,238	272.400	1820	90,000	74,868	303.544
1080	47,153	38,174	273.430	1840	91,196	75,897	304.198
1100	48,258	39,112	274.445	1860	92,394	76,929	304.845
1120	49,369	40,057	275.444	1880	93,593	77,962	305.487
1140	50,484	41,006	276.430	1900	94,793	78,996	306.122
1160	51,602	41,957	277.403	1920	95,995	80,031	306.751
1180	52,724	42,913	278.361	1940	97,197	81,067	307.374
1200	53,848	43,871	297.307	1960	98,401	82,105	307.992
1220	54,977	44,834	280.238	1980	99,606	83,144	308.604
1240	56,108	45,799	281.158	2000	100,804	84,185	309.210
1260	57,244	46,768	282.066	2050	103,835	86,791	310.701
1280	58,381	47,739	282.962	2100	106,864	89,404	312.160
1300	59,522	48,713	283.847	2150	109,898	92,023	313.589
1320	60,666	49,691	284.722	2200	112,939	94,648	314.988
1340	61,813	50,672	285.586	2250	115,984	97,277	316.356
1360	62,963	51,656	286.439	2300	119,035	99,912	317.695
1380	64,116	52,643	287.283	2350	122,091	102,552	319.011
1400	65,271	53,631	288.106	2400	125,152	105,197	320.302
1420	66,427	54,621	288.934	2450	128,219	107,849	321.566
1440	67,586	55,614	289.743	2500	131,290	110,504	322.808
1460	68,748	56,609	290.542	2550	134,368	113,166	324.026
1480	66,911	57,606	291.333	2600	137,449	115,832	325.222
1500	71,078	58,606	292.114	2650	140,533	118,500	326.396
1520	72,246	59,609	292.888	2700	143,620	121,172	327.549
1540	73,417	60,613	292.654	2750	146,713	123,849	328.684
1560	74,590	61,620	294.411	2800	149,808	126,528	329.800
1580	76,767	62,630	295.161	2850	152,908	129,212	330.896
1600	76,944	63,741	295.901	2900	156,009	131,898	331.975
1620	78,123	64,653	296.632	2950	159,117	134,589	333.037
1640	79,303	65,668	297.356	3000	162,226	137,283	334.084
1660	80,486	66,592	298.072	3050	165,341	139,982	335.114
1680	81,670	67,702	298.781	3100	168,456	142,681	336.126
1700	82,856	68,721	299.482	3150	171,576	145,385	337.124
1720	84,043	69,742	300.177	3200	174,695	148,089	338.109
1740	85,231	70,764	300.863	3250	177,822	150,801	339.069

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 9.ก คุณสมบัติแก๊สอุดมคติของน้ำ

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol·K	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol·K
0	0	0	0	600	20,402	15,413	212.920
220	7,295	5,466	178.576	610	20,765	15,693	213.529
230	7,628	5,715	180.054	620	21,130	15,975	214.122
240	7,961	5,965	181.471	630	21,495	16,257	214.707
250	8,294	6,215	182.831	640	21,862	16,541	215.285
260	8,627	6,466	184.139	650	22,230	16,826	215.856
270	8,961	6,716	185.399	660	22,600	17,112	216.419
280	9,296	6,968	186.616	670	22,970	17,399	216.976
290	9,631	7,219	187.791	680	23,342	17,688	217.527
298	9,904	7,425	188.720	690	23,714	17,978	218.071
300	9,966	7,472	188.928	700	24,088	18,268	218.610
310	10,302	7,725	190.030	710	24,464	18,561	219.142
320	10,639	7,978	191.098	720	24,840	18,854	219.668
330	10,976	8,232	192.136	730	25,218	19,148	220.189
340	11,314	8,487	193.144	740	25,597	19,444	220.707
350	11,652	8,742	194.125	750	25,977	19,741	221.215
360	11,992	8,998	195.081	760	26,358	20,039	221.720
370	12,331	9,255	196.012	770	26,741	20,339	222.221
380	12,672	9,513	196.920	780	27,125	20,639	222.717
390	13,014	9,771	197.807	790	27,510	20,941	223.207
400	13,356	10,030	198.673	800	27,896	21,245	223.693
410	13,699	10,290	199.521	810	28,284	21,549	224.174
420	14,043	10,551	200.350	820	28,672	21,855	224.651
430	14,388	10,813	201.160	830	29,062	22,162	225.123
440	14,734	11,075	201.955	840	29,454	22,470	225.592
450	15,080	11,339	202.734	850	29,846	22,779	226.057
460	15,428	11,603	203.497	860	30,240	23,090	226.517
470	15,777	11,869	204.247	870	30,635	23,402	226.973
480	16,126	12,135	204.982	880	31,032	23,715	227.426
490	16,477	12,403	205.705	890	31,429	24,029	227.875
500	16,828	12,671	206.413	900	31,828	24,345	228.321
510	17,181	12,940	207.112	910	32,228	24,662	228.763
520	17,534	13,211	207.799	920	32,629	24,980	229.202
530	17,889	13,482	208.475	930	33,032	25,300	229.637
540	18,245	13,755	209.139	940	33,436	25,621	230.070
550	18,601	14,028	209.795	950	33,841	25,943	230.499
560	18,959	14,303	210.440	960	34,247	26,265	230.924
570	19,318	14,579	211.075	970	34,653	26,588	231.347
580	19,678	14,856	211.702	980	35,061	26,913	231.767
590	20,039	15,134	212.320	990	35,472	27,240	232.184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 10.ก คุณสมบัติแก๊สอุดมคติของน้ำ (ต่อ)

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol-K	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol-K
1000	35,882	27,568	232.597	1760	70,535	55,902	258.151
1020	36,709	28,228	233.415	1780	71,523	56,723	258.708
1040	37,542	28,895	234.223	1800	72,513	57,547	259.262
1060	38,380	29,567	235.020	1820	73,507	58,375	259.811
1080	39,223	30,243	235.806	1840	74,506	59,207	260.357
1100	40,071	30,925	236.584	1860	75,506	60,042	260.898
1120	40,923	31,611	237.352	1880	76,511	60,880	261.436
1140	41,780	32,301	238.110	1900	77,517	61,720	261.969
1160	42,642	32,997	238.859	1920	78,527	62,564	262.497
1180	43,509	33,698	239.600	1940	79,540	63,411	263.022
1200	44,380	34,403	240.333	1960	80,555	64,259	263.542
1220	45,256	35,112	241.057	1980	81,573	65,111	264.059
1240	46,137	35,827	241.773	2000	82,593	65,965	264.571
1260	47,022	36,546	242.482	2050	85,156	68,111	265.838
1280	47,912	37,270	243.183	2100	87,735	70,275	267.081
1300	48,807	38,000	243.877	2150	90,330	72,454	268.301
1320	49,707	38,732	244.564	2200	92,940	74,649	269.500
1340	50,612	39,470	245.243	2250	95,562	76,855	270.679
1360	51,521	40,213	245.915	2300	98,199	79,076	271.839
1380	52,434	40,960	246.582	2350	100,846	81,308	272.978
1400	53,351	41,711	247.241	2400	103,508	83,553	274.098
1420	54,273	42,466	247.895	2450	106,183	85,811	275.201
1440	55,198	43,226	248.543	2500	108,868	88,082	276.286
1460	56,128	43,989	249.185	2550	111,565	90,364	277.354
1480	57,062	44,756	249.820	2600	114,273	92,656	278.407
1500	57,999	45,528	250.450	2650	116,991	94,958	279.441
1520	58,942	46,304	251.074	2700	119,717	97,269	280.462
1540	59,888	47,084	251.693	2750	122,453	99,588	281.464
1560	60,838	47,868	252.305	2800	125,198	101,917	282.453
1580	61,792	48,655	252.912	2850	127,952	104,256	283.429
1600	62,748	49,445	253.513	2900	130,717	106,605	284.390
1620	63,709	50,240	254.111	2950	133,486	108,959	285.338
1640	64,675	51,039	254.703	3000	136,264	111,321	286.273
1660	65,643	51,841	255.290	3050	139,051	113,692	287.194
1680	66,614	52,646	255.873	3100	141,846	116,072	288.102
1700	67,589	53,455	256.450	3150	144,648	118,458	288.999
1720	68,567	54,267	257.022	3200	147,457	120,851	289.884
1740	69,550	55,083	257.589	3250	150,272	123,250	290.756

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 11.ก คุณสมบัติอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ

TABLE A-15

Properties of air at 1 atm pressure

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$	Specific Heat $c_p, \text{J/kg}\cdot\text{K}$	Thermal Conductivity $k, \text{W/m}\cdot\text{K}$	Thermal Diffusivity $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m}\cdot\text{s}$	Kinematic Viscosity $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Note: For ideal gases, the properties c_p , k , μ , and Pr are independent of pressure. The properties ρ , ν , and α at a pressure P (in atm) other than 1 atm are determined by multiplying the values of ρ at the given temperature by P and by dividing ν and α by P .

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Original sources: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, and P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้