เรื่อง

การพัฒนาสมาร์ทบอยเลอร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) กรณีศึกษา บริษัท แอสต้าโฟม แอนด์ รับเบอร์ จำกัด

โดย

นายณรงค์ บัวบาน

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ

รักษาการผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโรงงาน

บทคัดย่อ

การเตรียมความพร้อมในการเข้าสู่ดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) คือการที่โรงงานมีสินทรัพย์ (Asset) ที่เป็นดิจิทัลหรือการทำผลิตภัณฑ์หรือช่องทางการตลาดที่เป็นดิจิทัลออกมา ซึ่งต้องเปลี่ยนแปลงทั้งองค์กรตั้งแต่ผู้บริหารจนถึงพนักงานระดับปฏิบัติการในตำแหน่งล่างสุด โดยดิจิทัล ทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) นี้ สามารถที่จะเกิดขึ้นได้ในทุก ๆ ที่ในแง่ความเชื่อมโยงของ ดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) และองค์ประกอบต่าง ๆ (Elements) ซึ่งองค์กรสมัยใหม่ที่มีการปรับเปลี่ยนสู่ดิจิทัล

ปัจจุบันเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) ได้เป็นปัจจัยสำคัญอันดับหนึ่งของโรงงานที่ส่งผลต่อการพลิกผันทางเทคโนโลยี การนำ IoT มาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการประมวลผลแบบคลาวด์ผ่านกระบวนการเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) ประกอบกับข้อมูลที่มีอยู่อย่างมากมาย (Big Data) ทำให้เกิดการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) จะทำให้เกิดความฉลาดมากขึ้น จนสามารถสร้างแบบจำลองของสิ่งต่างๆ ในรูปแบบ “เสมือน” ที่เป็นดิจิทัลหรือที่เรียกว่ากัน คู่เสมือนดิจิทัล (Digital Twins) ซึ่งเหมือนกับการเป็นฝาแฝดกันกับกายภาพนั่นเอง

การพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ของ บริษัท แอสต้าโฟม แอนด์ รับเบอร์ จำกัด ใช้งบประมาณ 200,000 บาทโดยมีลักษณะและรูปแบบการใช้งาน ที่มีการควบคุมและบันทึกผลแบบต่อเนื่องเต็มรูปแบบ พัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ให้มีการเชื่อมโยงระบบ IoT กับ หม้อน้ำ เพื่อติดตามและควบคุมการทำงาน โดยติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศที่ Air Blower, Fuel Pump, น้ำป้อนและติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความดันไอน้ำขาออกและระดับน้ำที่ Boiler รวมทั้งติดตั้งเซ็นเซอร์วัด TDS ที่น้ำป้อนและ Boiler ส่วนที่ Draft Tube จะติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และ %CO_2 โดยเซ็นเซอร์ทั้งหมดจะส่งข้อมูลไปที่ Server และเมื่อทำการส่งข้อมูลต่อไปให้พนักงานที่เกี่ยวข้องแบบ Real Time มีระบบ Smart Boiler Control และ Smart Boiler Control ซึ่งอุปกรณ์หลักของตู้ควบคุมไฟฟ้า (Control Cabinet) คือ PLC (Programmable Logic Control) ซึ่งควบคุมการทำงานของหม้อน้ำ ซึ่งผู้ควบคุมหม้อน้ำสามารถสร้างรูปแบบของการควบคุมได้โดยการป้อนโปรแกรมคำสั่งที่แสดงผลผ่านทาง Touch Screen สามารถเชื่อมต่อกับ Computer เข้าสู่ระบบ SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ซึ่งเป็นระบบตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Real – Time ใช้ในการตรวจสอบสถานะ ควบคุมการทำงานของระบบหม้อน้ำได้ โดยส่งสัญญาณข้อมูลและแสดงผลไปยังศูนย์ควบคุมส่วนกลางได้ ระบบเหล่านี้จะช่วยให้หม้อน้ำ สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย มีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ช่วยให้ผู้ควบคุมหม้อน้ำ สามารถเข้าถึงข้อมูลการใช้งาน ได้ง่ายเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ปัญหา และแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็ว มีระบบที่เชื่อมต่ออุปกรณ์การวัดด้านความปลอดภัยโดยควบคุมการใช้งานเพื่อไม่ให้อยู่ในช่วงการเกิดการคืบ (Creep) ด้านพลังงาน และสิ่งแวดล้อมของหม้อน้ำทั้งหมด

คำสำคัญ: สมาร์ทบอยเลอร์,ดิจิทัลทรานฟอร์ม, เทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือน, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Abstract

Preparation for entering Digital Transformation is when the factory has digital assets or the production of digital products or marketing channels. Therefore, the entire organization has to change from executives to operators in the lowest positions. Digital Transformation can happen anywhere in terms of connectivity. Digital Transformation and Elements have been applied in modern organizations with digital transformation.

Today, Internet of Things (IoT) technology is the first factor of the factory that affects the technological transformation. IoT has been applied to cloud computing technology through Artificial Intelligence (AI) technology process. Coupled with the abundance of data (Big Data) resulting in machine learning (Machine Learning) will make it more intelligent. Even being able to create a model of things in a digital "virtual" form, also known as Digital Twins, which are identical to physical twins.

The development of a smart boiler of Asta Foam and Rubber Company Limited has paid a budget of 200,000 baht with characteristics and usage patterns with full continuous control and recording. Developing a smart boiler is able to link the IoT system with the boiler to monitor and control the operation. By installing temperature and air velocity sensors at the air blower, fuel pump, water supply and installing pressure sensors for steam output and water level at the boiler, as well as installing TDS sensors at the feed water. The boiler at the draft tube which will install temperature sensors and %CO2 by all sensors will send data to the Server and when sending the data to the relevant staff in real time with Smart boiler control and Smart boiler monitoring systems. The main equipment of the electric control cabinet (Control Cabinet) is a PLC (Programmable Logic Control) which controls the operation of the radiator.

The boiler operator can create a form of control by entering the program commands displayed via Touch Screen connected to a computer into the SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) system, which is a system for monitoring and analyzing data. Real-Time is used to check the status and can control the operation of the boiler system by transmitting data and displaying results to the central control center. These systems will support the radiator to work safely effective and environmentally friendly and to help the boiler operator who can access usage data easily for the purpose of problem analysis and solve problems quickly. Then having a system that connects the safety measuring devices by controlling the operation, the energy and environmental creep of the entire radiator is not present.

บทสรุปผู้บริหาร

ในปัจจุบันเทคโนโลยีในภาคอุตสาหกรรมมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องปรับตัวและพัฒนามากยิ่งขึ้น จึงจะสามารถแข่งขันกับคู่แข่งรายอื่น ๆ ได้ ที่ผ่านมามีโรงงานจำนวนหลายราย ได้หันมาใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ มากขึ้น เพื่อยกระดับศักยภาพและประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตหรือบริการอุตสาหกรรมให้ทันกับสภาวะการแข่งขันที่สูงขึ้น อีกทั้งในปัจจุบันยังเกิดวิกฤตการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโคโรน่า หรือโควิด 2019 ที่ส่งผลกระทบและสร้างความเสียหายให้แก่หลายประเทศทั่วโลก รวมถึงประเทศไทยที่ได้รับผลกระทบจากวิกฤตการณ์ดังกล่าวนี้ด้วยเช่นกัน ทำให้ผู้ประกอบการกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรม ต้องมีการปรับตัวให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยภาครัฐเองก็ได้มีนโยบายที่จะเสริมสร้างความเข้มแข็งให้กับผู้ประกอบภาคอุตสาหกรรม ให้สามารถปรับตัวเข้าถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลได้อย่างรวดเร็วก้าวทันกับสถานการณ์ดิจิทัลของโลก เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมในการเข้าสู่ดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) คือการที่โรงงานมีสินทรัพย์ (Asset) ที่เป็นดิจิทัลหรือการทำผลิตภัณฑ์หรือช่องทางการตลาดที่เป็นดิจิทัลออกมา ไม่ว่าจะตั้งแต่เว็บไซต์ จนถึงการบริการบนโลกออนไลน์ (Social Media) และยังหมายถึงการเปลี่ยนแปลงธุรกิจตัวเอง โดยใช้ดิจิทัลมาเป็นหัวใจในการดำเนินงานขององค์กรด้วย ซึ่งต้องเปลี่ยนแปลงทั้งองค์กรตั้งแต่ผู้บริหารจนถึงพนักงานระดับปฏิบัติการในตำแหน่งล่างสุด โดย ดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) นี้ สามารถที่จะเกิดขึ้นได้ในทุก ๆ ที่ในแง่ความเชื่อมโยงของ ดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) และองค์ประกอบต่าง ๆ (Elements) ซึ่งองค์กรสมัยใหม่ที่มีการปรับเปลี่ยนสู่ดิจิทัล

ปัจจุบันเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) ได้รับการจัดอันดับให้เป็นปัจจัยสำคัญอันดับหนึ่งที่ส่งผลต่อการพลิกผันทางเทคโนโลยี โดยจากผลสำรวจความคิดเห็น The Changing landscape of disruptive technologies โดยเคพีเอ็มจี ซึ่งได้สำรวจความเห็นของผู้นำในอุตสาหกรรมเทคโนโลยีระดับโลกกว่า 750 คน นอกจากนี้ มีการนำแนวคิด IoT ไปสร้างนวัตกรรมใหม่หรือต่อยอดนวัตกรรมเดิมเพื่อเพิ่มมูลค่าทางธุรกิจ และสร้างความได้เปรียบในการแข่งขัน กล่าวคือ นำ IoT มาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการประมวลผลแบบคลาวด์ผ่านกระบวนการเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) ประกอบกับข้อมูลที่มีอยู่อย่างมากมาย (Big Data) ทำให้เกิดการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) จะทำให้เกิดความฉลาดมากขึ้น จนสามารถสร้างแบบจำลองของสิ่งต่างๆ ในรูปแบบ “เสมือน” ที่เป็นดิจิทัลหรือที่เรียกว่ากัน คู่เสมือนดิจิทัล (Digital Twins) ซึ่งเหมือนกับการเป็นฝาแฝดกันกับกายภาพนั่นเอง

แนวคิดของอุตสาหกรรม 4.0 มีอิทธิพลในการสร้างแรงกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านนวัตกรรมเพื่อเข้าสู่ยุคแห่งการปฏิวัติอุตสาหกรรมแห่งอนาคต ซึ่งเป็นการบูรณาการการผลิตเข้ากับการเชื่อมต่อเครือข่ายอินเตอร์เน็ตในรูปแบบ “The Internet of Things (IoT)” ทำให้กระบวนการผลิตตลอดทั้งซัพพลายเชนเชื่อมต่อกันบนโลกดิจิทัลได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และในปัจจุบันก็มีการปรับใช้ในอุตสาหกรรมทั้งขนาดใหญ่และขนาดย่อมในชื่อของ Industrial Internet of Things

ภาคอุตสาหกรรมเป็นเครื่องจักรสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจไทย ภาคอุตสาหกรรมมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องปรับตัวเองด้วยอัตราเร่งให้สอดคล้องทันต่อนโยบาย Thailand 4.0 และการเปลี่ยนแปลง ของเศรษฐกิจโลก ซึ่งภาคอุตสาหกรรมในยุโรปโดยเฉพาะประเทศเยอรมันมีแนวคิดที่จะพัฒนาอุสาหกรรมโดย การปฏิวัติอุตสาหกรรมไปสู่อุตสาหกรรม 4.0 (Industry 4.0) โดยขั้นแรกได้เริ่มจากการผลิตด้วยระบบ อัตโนมัติ คนสามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอัตโนมัติหรือหุ่นยนต์ ทำให้เกิดผลิตภาพการผลิตที่สูงขึ้นมาก

สมาร์ทบอยเล่อร์ (Smart Boiler) มีลักษณะและรูปแบบการใช้งาน ที่มีการควบคุมและบันทึกผลแบบต่อเนื่องเต็มรูปแบบ ภาระการใช้งานคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ระบบควบคุมการทำงานของหัวเผาหรืออุปกรณ์การเผาไหม้เป็นแบบต่อเนื่องเต็มรูปแบบระบบควบคุมระดับน้ำในหม้อน้ำเป็นแบบต่อเนื่องเต็มรูปแบบมีการควบคุมและติดตามผลคุณภาพน้ำ และ Condensate ที่นำกลับเข้าระบบโดยผู้เชี่ยวชาญอย่างใกล้ชิด มีผลบันทึกการใช้งานของหม้อน้ำและอุปกรณ์ตลอดเวลาใช้งานมีระบบการติดตามสภาวะการใช้งานเป็นแบบอัตโนมัติทั้งแบบต่อเนื่องและแบบขณะใช้งานเต็มรูปแบบมีระบบการควบคุมและบันทึกผล การกระจายตัวของความร้อนขณะเปลี่ยนภาระที่มีประสิทธิภาพ ทุกชิ้นส่วนอุปกรณ์ ได้รับการควบคุมการใช้งานเพื่อไม่ให้อยู่ในช่วงการเกิดการคืบ (Creep)
สมาร์ทบอยเล่อร์ (Smart Boiler) มีการเชื่อมโยงระบบ IoT กับ หม้อน้ำ เพื่อติดตามและควบคุมการทำงาน โดยติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศที่ Air Blower, Fuel Pump, น้ำป้อนและติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความดันไอน้ำขาออกและระดับน้ำที่ Boiler รวมทั้งติดตั้งเซ็นเซอร์วัด TDS ที่น้ำป้อนและ Boiler ส่วนที่ Draft Tube จะติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และ $\%CO_2$ โดยเซ็นเซอร์ทั้งหมดจะส่งข้อมูลไปที่ Server และเมื่อทำการส่งข้อมูลต่อไปให้พนักงานที่เกี่ยวข้องแบบ Real Time

บริษัท แอสต้าโฟม แอนด์ รับเบอร์ จำกัด ผู้ผลิตเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ประเภทโฟมยาง (EVA foam) ทุกรูปแบบ เช่น แผ่นรองคลานสำหรับเด็ก อุปกรณ์ กีฬา ที่บรรจุภัณฑ์อะไหล่รถยนต์ สินค้า premium ต่างๆ มุ่งมั่นพัฒนาด้านคุณภาพ นวัตกรรมและ การบริการลูกค้าเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าให้ได้มากที่สุด การนำระบบ Smart Boiler มาใช้ในโรงงานก็เป็นอีกโครงการหนึ่งที่ต้องการพัฒนาโรงงานเพื่อเข้าสู่อุตสาหกรรม 4.0 ซึ่งมีระบบ Smart Boiler control และ Smart Boiler monitoring ซึ่งอุปกรณ์หลักของตู้ควบคุมไฟฟ้า (Control Cabinet) คือ PLC (Programmable Logic Control) เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของหม้อน้ำหรือหม้อน้ำมันร้อนและหัวเผา โดยภายในมี Microprocessor เป็นสมองสั่งการที่สำคัญรับสัญญาณจากอุปกรณ์ควบคุม และอุปกรณ์ความปลอดภัยต่างๆ เพื่อประมวลผล และสั่งการทำงานได้แบบอัตโนมัติ ซึ่งผู้ควบคุมสามารถสร้างรูปแบบของการควบคุมได้โดยการป้อนโปรแกรมคำสั่งที่แสดงผลผ่านทาง Touch Screen สามารถเชื่อมต่อกับ Computer เข้าสู่ระบบ SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ซึ่งเป็นระบบตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Real – Time ใช้ในการตรวจสอบสถานะ ควบคุมการทำงานของระบบหม้อน้ำ และอุปกรณ์อื่นๆ ทั้งระบบได้ โดยส่งสัญญาณข้อมูลและแสดงผลไปยังศูนย์ควบคุมส่วนกลางได้ ระบบเหล่านี้จะช่วยให้หม้อน้ำ สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อีกทั้งจะช่วยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของหม้อน้ำ สามารถเข้าถึง

ข้อมูลการใช้งาน ได้ง่ายมากขึ้น เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ปัญหา และแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็ว มีระบบที่เชื่อมต่ออุปกรณ์การวัดด้านความปลอดภัย พลังงาน และสิ่งแวดล้อมของหม้อน้ำทั้งหมด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	**ก**
Abstract	**ข**
บทสรุปผู้บริหาร	**ง**
สารบัญ	**ฉ**
สารบัญตาราง	**ซ**
สารบัญภาพ	**ฌ**
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 เป้าหมาย	3
1.4 ขอบเขตการดำเนินงานและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	**5**
2.1 Digital Transformation กับภาคอุตสาหกรรม	5
2.2 Digital Twins: คู่เสมือนดิจิทัล ในยุคแห่งนวัตกรรม	7
2.3 การทำงานของ Digital Twins	8
2.4 Digital Twins กับการสร้างมูลค่าเพิ่มทางธุรกิจ	9
2.5 การประยุกต์ใช้ Digital Twins	10
2.6 เทคโนโลยีในการสร้าง Digital Twin	11
2.7 อนาคตของ Digital Twin	12
2.8 ระบบติดตามและควบคุมการใช้งานผ่านระบบอินเตอร์เน็ต (IoT System)	13
2.9 Data: ข้อมูล	18
2.10 Smart Boiler (Boiler 4.0)	18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	**43**
3.1 การสำรวจระบบต่างๆของหม้อน้ำเดิม	43
3.2 ประเมินเซนเซอร์ที่จะนำมาติดตั้งให้กับระบบสมาร์ทบอยเลอร์	43
3.3 รายละเอียดเซนเซอร์ที่ติดตั้งเพื่อพัฒนาเป็น Smart boiler	45
3.4 โครงสร้างการทำงานของระบบ SMART Boiler Monitoring System	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 ขั้นตอนการถ่ายทอดเทคโนโลยีการพัฒนาสมาร์ทบอยเลอร์ให้แก่บุคลากรในโรงงานอุตสาหกรรม	53
บทที่ 4 การดำเนินงาน	**55**
4.1 ระบบควบคุมสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT)	55
4.2 รายละเอียดของแนวคิดต่อยอดหรือเทคโนโลยีใหม่ที่ใช้ในโครงการ	58
บทที่ 5 ผลที่ได้จากการวิจัย	**60**
5.1 ผลที่ได้จากการวิจัย	60
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	60
5.3 ผลประเมินทางเศรษฐศาสตร์	61
เอกสารอ้างอิง	**62**
ภาคผนวก	**62**
หลักสูตรอบรม พื้นฐานอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet Of Things)	64
หลักสูตร Automation System Integration and Production Line Improvement	70
หลักสูตร SCADA for Mes	73
หลักสูตร Vision and Motion for Inspection	74
บันทึกข้อความ เรื่อง การพัฒนาสมาร์ทบอยเลอร์ในโรงงานอุตสาหกรรม เลขที่ 58/64 ลงวันที่ 16 ส.ค. 64	77
บันทึกข้อความ เรื่อง การศึกษาเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมไทย เลขที่ 162 ลงวันที่ 18 พ.ค.63	78

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3-1	แสดงรายการตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	45
3-2	แสดงรายการตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน	46
3-3	แสดงรายการตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหล	47
3-4	แสดงรายการตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดระดับน้ำ	48
3-5	แสดงรายการตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมปริมาณอากาศ	49
3-6	แสดงรายการตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพน้ำแบบอัตโนมัติ	50
4-1	เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างก่อนการดำเนินการกับหลังดำเนินโครงการ	57

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	แสดงความหมายของเทคโนโลยี Digital Twins	8
2-2	แสดงแบบจำลอง Digital Twins ในกระบวนการผลิต	9
2-3	แสดงแบบจำลอง Digital Twins ในกระบวนการผลิต	12
2-4	การเชื่อมต่อคอนโทรลเลอร์กับระบบ Cloud	13
2-5	อธิบายแต่ละ Network Layers ของ Internet of Things	15
2-6	Internet of Things วาดมุมมองของระบบ Embedded	16
2-7	สถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง Internet of Things Architecture	17
2-8	Boiler 1.0 เป็นหม้อน้ำแบบใช้คนควบคุม (Manual Control)	19
2-9	Boiler 2.0 เป็นหม้อน้ำแบบควบคุมอัตโนมัติแบบเปิด-ปิด (On-Off Control)	20
2-10	Boiler 3.0 เป็นหม้อน้ำที่ควบคุมอัตโนมัติแบบต่อเนื่อง (Modulating Control)	22
2-11	สมาร์ทบอยเล่อร์ (Smart Boiler) เป็นหม้อน้ำแบบ Real Time Automatic Control by Transmitter,PLC ,Scada, Monitor & Record, Internet of Thing	24
2 -12	ภาพรวมการเชื่อมโยงหม้อน้ำกับระบบ IoT ที่เป็นแนวทางของ Smart Boiler (2)	25
2-13	โครงสร้างการทำงานของระบบ Smart Boiler Monitoring System (3)	25
2-14	Smart Boiler Control และ Smart Boiler Monitoring (3)	26
2-15	Smart Boiler ที่มีการรายงานผลได้ทุกที่ทุกเวลาและทุกคน (3)	27
2-16	ปัญหาจากการใช้หม้อน้ำธรรมดา : การเกิดตะกรันในหม้อน้ำ มีปัญหาด้านประสิทธิภาพหม้อน้ำ อุบัติเหตุและความเสียหาย (4)	28
2-17	ปัญหาจากการใช้หม้อน้ำธรรมดา : คุณภาพการเผาไหม้ไม่ดี (4)	29
2-18	ปัญหาจากการใช้หม้อน้ำธรรมดา : ไม่มีการควบคุมการเผาไหม้ (5)	29
2-19	ภาพรวมของเซนเซอร์เพื่อติดตามและควบคุมการทำงานของSmart Boiler (6)	30
2-20	ผลลัพธ์การติดตั้งเซนเซอร์เปลี่ยนให้หม้อน้ำธรรมดาเป็น Smart Boiler (5)	31
2-21	ใช้อุปกรณ์วัดปริมาณออกซิเจน (Oxygen Sensor) ที่เหลือจาก การเผาไหม้(1)	32
2-22	ตรวจวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้ตลอดระยะเวลาที่มีการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิต (3)	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2-23	การประยุกต์ใช้ Smart Boiler Monitoring Systems เพื่อประเมินการประหยัดพลังงานของหม้อน้ำ (5)	34
2-24	ตารางการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไอน้ำหลังจากนำ Smart Boiler มาควบคุมการทำงาน (5)	35
2-25	ลักษณะของปัญหาควันดำและการปรับเพิ่มปริมาณอากาศ	36
2-26	ลักษณะของปัญหาอากาศส่วนเกินสูงและการปรับลดปริมาณอากาศ	37
3-1	ภาพรวมของเซนเซอร์เพื่อติดตามและควบคุมการทำงานของ Smart Boiler	44
3-2	การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทต่างๆเข้ากับระบบหม้อน้ำ	44
3-3	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Temperature Sensors)	45
3-4	อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure Sensors)	46
3-5	อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow Meter Sensors)	47
3-6	อุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Level Sensors)	48
3-7	อุปกรณ์ควบคุมปริมาณอากาศ (Automatic Air Damper)	49
3-8	อุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพน้ำแบบอัตโนมัติ (Automatic water quality sensor)	50
3-9	ตัวอย่างการติดตั้งเซนเซอร์ทั่งหมดเข้ากับหม้อน้ำเพื่อพัฒนาสมาร์ทบอยเลอร์	51
3-10	อุปกรณ์หลักของตู้ควบคุมไฟฟ้า (Control Cabinet) PLC (Programmable Logic Control)	52
3-11	ระบบ SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)	52
3-12	โครงสร้างการทำงานของระบบ SMART Boiler Monitoring System	53
4-1	แสดงระบบ Internet of Things (loT) สำหรับควบคุมหม้อน้ำ	56
4-2	ระบบตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Real-Time ใช้ในการตรวจสอบสถานะ ควบคุมการทำงานของระบบหม้อน้ำ	58
4-3	ระบบตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Real-Time ใช้ในการตรวจสอบ สถานะ ควบคุมการทำงานของระบบหม้อน้ำ (ต่อ)	59

บทที่ 1

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีในภาคอุตสาหกรรมมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องปรับตัวและพัฒนามากยิ่งขึ้น จึงจะสามารถแข่งขันกับคู่แข่งรายอื่น ๆ ได้ ที่ผ่านมามีโรงงานจำนวนหลายราย ได้หันมาใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ มากขึ้น เพื่อยกระดับศักยภาพและประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตหรือบริการอุตสาหกรรมให้ทันกับสภาวะการแข่งขันที่สูงขึ้น อีกทั้งในปัจจุบันยังเกิดวิกฤตการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโคโรน่า หรือโควิค 2019 ที่ส่งผลกระทบและสร้างความเสียหายให้แก่หลายประเทศทั่วโลก รวมถึงประเทศไทยที่ได้รับผลกระทบจากวิกฤตการณ์ดังกล่าวนี้ด้วยเช่นกัน ทำให้ผู้ประกอบการกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรม ต้องมีการปรับตัวให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยภาครัฐเองก็ได้มีนโยบายที่จะเสริมสร้างความเข้มแข็งให้กับผู้ประกอบภาคอุตสาหกรรม ให้สามารถปรับตัวเข้าถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลได้อย่างรวดเร็วก้าวทันกับสถานการณ์ดิจิทัลของโลก เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมในการเข้าสู่ดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) คือการที่โรงงานมีสินทรัพย์ (Asset) ที่เป็นดิจิทัลหรือการทำผลิตภัณฑ์หรือช่องทางการตลาดที่เป็นดิจิทัลออกมา ไม่ว่าจะตั้งแต่เว็บไซต์ จนถึงการบริการบนโลกออนไลน์ (Social Media) และยังหมายถึงการเปลี่ยนแปลงธุรกิจตัวเอง โดยใช้ดิจิทัลมาเป็นหัวใจในการดำเนินงานขององค์กรด้วย ซึ่งต้องเปลี่ยนแปลงทั้งองค์กรตั้งแต่ผู้บริหารจนถึงพนักงานระดับปฏิบัติการในตำแหน่งล่างสุด โดย ดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) นี้ สามารถที่จะเกิดขึ้นได้ในทุก ๆ ที่ในแง่ความเชื่อมโยงของ ดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) และองค์ประกอบต่าง ๆ (Elements) ซึ่งองค์กรสมัยใหม่ที่มีการปรับเปลี่ยนสู่ดิจิทัล อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ดังนี้

- ลูกค้าจะได้รับประสบการณ์ใหม่ในทุก ๆ ด้าน
- เกิดนวัตกรรมใหม่ของสินค้าและบริการมากขึ้น
- มีผลตอบแทนที่ได้จากการลงทุนที่สูงขึ้น (ROI)
- ระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automation) จะเข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในการบริการ
- การเข้าถึงข้อมูลจะมีความแม่นยำและสะดวกมาก

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ อาจมีผลกระทบที่แตกต่างกันไปในแต่ละอุตสาหกรรม แต่ละโรงงาน เนื่องจากการดำเนินการธุรกิจในแต่ละอุตสาหกรรมนั้นมีความแตกต่างกันในหลายๆ ส่วน และจะสังเกตได้ว่าดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่นในประเทศไทยนั้นได้เริ่มมีการดำเนินการไปในหลายอุตสาหกรรมแล้ว ซึ่งหลายๆ อย่างคนไทยก็สามารถปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี รวมไปโรงงาน

ต่าง ๆ ที่มีการนำเครื่องมือดิจิทัลต่าง ๆ เข้ามาใช้งานเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มศักยภาพในการทำงานให้สูงขึ้นด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองเสมือน คือ การนำองค์ประกอบย่อยในระบบ มาจำลองการทำงานเพื่อทดลองและจำลองข้อมูลเพื่อประเมินสถานการณ์ล่วงหน้า เทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนเป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อน ดิจิทัลทรานส์ฟอร์ม เพราะเป็นเครื่องมือในการรวบรวมข้อมูลและจำลองสถานการณ์ เพื่อการตัดสินใจในทางธุรกิจด้วยข้อมูล ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีระบบแบบจำลองดิจิทัลเสมือน หรือ Digital twin ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีอุตสาหกรรมใหม่ที่กำลังเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการบริหารองค์กรของโลกอุตสาหกรรม เพื่อเตรียมความพร้อมและปรับเปลี่ยนสู่ดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) และด้วยคุณสมบัติที่น่าสนใจของ Digital twin ในการสร้างแบบจำลองเสมือนบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากข้อมูลของวัตถุต้นแบบ อย่างเครื่องจักร แขนกลอุตสาหกรรม กระบวนการทำงานของโรงงานทั้งระบบ หรือแม้แต่การขนส่ง เป็นต้น โดยที่แบบจำลองจะมีการจำลองการทำงานคู่ขนานไปกับการทำงานจริง เพื่อให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้กระบวนการทำงานปัจจุบัน และคาดคะเนความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นกับตัวเครื่องจักร หรือระบบการผลิต รวมไปถึงการวางแผนปรับปรุงเครื่องจักรและระบบการผลิต โดยให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุดได้ ทั้งนี้งานศึกษาของ Deloitte ในปี 2018 คาดการณ์ว่าการใช้เทคโนโลยี digital twin ทั่วโลกจะเติบโตสูงถึง 38% ต่อปี ในช่วงระหว่างปี 2018-2023 โดยจะมีมูลค่าสูงถึง 16,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี 2023 จากปัจจุบันที่ราว 3,200 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ซึ่งความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยี internet of things (IOT) และ machine learning (ML) ส่งผลให้เครื่องจักรและอุปกรณ์สามารถเรียนรู้พัฒนาและสื่อสารระหว่างกันได้ ถือเป็นปัจจัยสนับสนุนสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีระบบ digital twin ให้สามารถนำมาใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ

กรมโรงงานอุตสาหกรรม ได้เห็นความสำคัญของเทคโนโลยีและนวัตกรรมดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) ดังกล่าว เพื่อกระตุ้นให้โรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้หม้อน้ำ (boiler)ได้เริ่มนำเทคโนโลยี Digital twin มาประยุกต์ใช้และค่อย ๆ พัฒนาไปสู่การใช้งานแบบเต็มรูปแบบในอนาคต ซึ่งการลงทุนหรือปรับปรุงกระบวนการในรูปแบบนี้ จะช่วยลดความเสี่ยงด้านการลงทุนก้อนใหญ่เพียงครั้งเดียว และสามารถลดปัญหาการติดตั้งระบบที่หลากหลายและไม่สามารถสื่อสารระหว่างกันได้ อีกทั้งยังจะช่วยให้พนักงานที่เกี่ยวข้องค่อย ๆ เรียนรู้ พัฒนาทักษะ และปรับทัศนคติต่อการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีสู่ดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) ได้ราบรื่นขึ้นด้วย การพัฒนาอย่างเป็นระบบนี้ จะมีส่วนช่วยให้ผู้ประกอบการไทยและแรงงานสามารถปรับตัวและรับมือกับการแข่งขันในอุตสาหกรรมที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ภายใต้การเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีที่รวดเร็วได้อย่างมั่นคงและยั่งยืนต่อไป

การพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) เป็นการนำร่องยกระดับการใช้งานหม้อน้ำที่มีอยู่ในโรงงาน ซึ่งจะช่วยให้เกิดความปลอดภัย ลดความเสี่ยงแก่ผู้ควบคุมประจำหม้อน้ำ พนักงาน ช่วยลดต้นทุนการผลิต ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานได้กว่า 1,000 ล้านบาทต่อปี ทั้งนี้การพัฒนาสมาร์ท บอยเลอร์ (Smart Boiler) ยังรวมถึงการยกระดับความปลอดภัยและ

การบำรุง ถือเป็นการพัฒนาเพื่อสนับสนุนนโยบายประเทศไทย 4.0 และอุตสาหกรรม 4.0 ซึ่งปัจจุบันฐานข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่ามีการใช้งานหม้อน้ำ (Boiler) ประมาณ 7,000 โรงงาน และมีหม้อน้ำรวมประมาณ 15,000 เครื่อง การพัฒนาสมาร์ท บอยเลอร์ (Smart Boiler) จะสามารถประหยัดพลังงานไม่น้อยกว่า 1,000 ล้านบาท

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อวิจัยพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) 1 โรงงานต้นแบบ

1.2.2 เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีการพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) ให้แก่บุคลากรในโรงงานอุตสาหกรรม

1.3 เป้าหมาย

โรงงานอุตสาหกรรมต้นแบบ 1 โรงงานที่มีการใช้หม้อน้ำ (Boiler) และที่ต้องการขับเคลื่อนโรงงานแบบดิจิทัล หรือต้องการพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT)

1.4 ขอบเขตการดำเนินงานและวิธีการดำเนินงาน

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์การวิจัยพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) ต้องวางแผนการดำเนินการให้ครอบคลุมขอบเขตการดำเนินงานและวางแผนรายละเอียดวิธีการดำเนินงานโดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1.4.1 ดำเนินการเผยแพร่กิจกรรมโดยแนะนำแก่โรงงานต้นแบบที่ใช้หม้อน้ำ(boiler)ที่มีความพร้อมและมีศักยภาพที่จะพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT)

1.4.2 ประชุมจัดทำแผนการดำเนินงานและชี้แจงรายละเอียดแก่โรงงานต้นแบบ

1.4.3 จัดคณะผู้เชี่ยวชาญที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการดำเนินกิจกรรมพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT)

1.4.4 ดำเนินให้คำปรึกษาและพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) โรงงานต้นแบบ

1.4.5 เริ่มดำเนินงานพัฒนาระบบสมาร์ทบอยเล่อร์ในโรงงานต้นแบบ ซึ่งมีความพร้อมและมีศักยภาพในการปรับเปลี่ยนองค์กรสู่ พัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) ติดตั้งทั้งฮาร์ดแวร์และซอร์ฟแวร์

1.4.6 จัดทำสื่อเผยแพร่สำหรับบุคลากรในโรงงานที่มีหม้อน้ำและสนใจการพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT)

1.4.7 เผยแพร่ภาพรวมความสำเร็จจากการดำเนินงานของโครงการ เพื่อขยายผลการดำเนินงานไปยังโรงงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ

1.5 ประโยชน์

1.5.1 โรงงานที่พัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) มีความปลอดภัย ลดความเสี่ยงแก่ผู้ควบคุมประจำหม้อน้ำ พนักงาน ช่วยลดต้นทุนการผลิตประสิทธิภาพการผลิตสินค้าหรือบริการ มีมูลค่าเพิ่มขึ้น

1.5.2 บุคลากรของโรงงาน ที่ได้รับการถ่ายทอดความรู้ สามารถนำความรู้ที่ได้รับจากการอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่องพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) ไปปรับใช้ในโรงงานได้

บทที่ 2

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันเทคโนโลยีในภาคอุตสาหกรรมมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องปรับตัวและพัฒนามากยิ่งขึ้น จึงจะสามารถแข่งขันกับคู่แข่งรายอื่น ๆ ได้ ที่ผ่านมามีโรงงานจำนวนหลายราย ได้หันมาใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ มากขึ้น เพื่อยกระดับศักยภาพและประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตหรือบริการอุตสาหกรรมให้ทันกับสภาวะการแข่งขันที่สูงขึ้น อีกทั้งในปัจจุบันยังเกิดวิกฤตการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโคโรน่า หรือโควิค 2019 ที่ส่งผลกระทบและสร้างความเสียหายให้แก่หลายประเทศทั่วโลก รวมถึงประเทศไทยที่ได้รับผลกระทบจากวิกฤตการณ์ดังกล่าวนี้ด้วยเช่นกัน ทำให้ผู้ประกอบการกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรม ต้องมีการปรับตัวให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยภาครัฐเองก็ได้มีนโยบายที่จะเสริมสร้างความเข้มแข็งให้กับผู้ประกอบภาคอุตสาหกรรม ให้สามารถปรับตัวเข้าถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลได้อย่างรวดเร็วก้าวทันกับสถานการณ์ดิจิทัลของโลก เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมในการเข้าสู่ดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) คือการที่โรงงานมีสินทรัพย์ (Asset) ที่เป็นดิจิทัลหรือการทำผลิตภัณฑ์หรือช่องทางการตลาดที่เป็นดิจิทัลออกมา ไม่ว่าจะตั้งแต่เว็บไซต์ จนถึงการบริการบนโลกออนไลน์ (Social Media) และยังหมายถึงการเปลี่ยนแปลงธุรกิจตัวเอง โดยใช้ดิจิทัลมาเป็นหัวใจในการดำเนินงานขององค์กรด้วย ซึ่งต้องเปลี่ยนแปลงทั้งองค์กรตั้งแต่ผู้บริหารจนถึงพนักงานระดับปฏิบัติการในตำแหน่งล่างสุด โดย ดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) นี้ สามารถที่จะเกิดขึ้นได้ในทุก ๆ ที่ในแง่ความเชื่อมโยงของ ดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) และองค์ประกอบต่าง ๆ (Elements) ซึ่งองค์กรสมัยใหม่ที่มีการปรับเปลี่ยนสู่ดิจิทัล อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ดังนี้

- ลูกค้าจะได้รับประสบการณ์ใหม่ในทุก ๆ ด้าน
- เกิดนวัตกรรมใหม่ของสินค้าและบริการมากขึ้น
- มีผลตอบแทนที่ได้จากการลงทุนที่สูงขึ้น (ROI)
- ระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automation) จะเข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในการบริการ
- การเข้าถึงข้อมูลจะมีความแม่นยำและสะดวกมาก

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ อาจมีผลกระทบที่แตกต่างกันไปในแต่ละอุตสาหกรรม แต่ละโรงงาน เนื่องจากการดำเนินการธุรกิจในแต่ละอุตสาหกรรมนั้นมีความแตกต่างกันในหลายๆ ส่วน และจะสังเกตได้ว่าดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่นในประเทศไทยนั้นได้เริ่มมีการดำเนินการไปในหลายอุตสาหกรรมแล้ว ซึ่งหลายๆ อย่างคนไทยก็สามารถปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี รวมไปโรงงาน

ต่าง ๆ ที่มีการนำเครื่องมือดิจิทัลต่าง ๆ เข้ามาใช้งานเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มศักยภาพในการทำงานให้สูงขึ้นด้วย

เทคโนโลยีแบบจำลองเสมือน คือ การนำองค์ประกอบย่อยในระบบ มาจำลองการทำงานเพื่อทดลองและจำลองข้อมูลเพื่อประเมินสถานการณ์ล่วงหน้า เทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนเป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อน ดิจิทัลทรานส์ฟอร์ม เพราะเป็นเครื่องมือในการรวบรวมข้อมูลและจำลองสถานการณ์ เพื่อการตัดสินใจในทางธุรกิจด้วยข้อมูล ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีระบบแบบจำลองดิจิทัลเสมือน หรือ Digital twin ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีอุตสาหกรรมใหม่ที่กำลังเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการบริหารองค์กรของโลกอุตสาหกรรม เพื่อเตรียมความพร้อมและปรับเปลี่ยนสู่ดิจิทัลทรานส์ฟอร์เมชั่น (Digital Transformation) และด้วยคุณสมบัติที่น่าสนใจของ Digital twin ในการสร้างแบบจำลองเสมือนบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากข้อมูลของวัตถุต้นแบบ อย่างเครื่องจักร แขนกลอุตสาหกรรม กระบวนการทำงานของโรงงานทั้งระบบ หรือแม้แต่การขนส่ง เป็นต้น โดยที่แบบจำลองจะมีการจำลองการทำงานคู่ขนานไปกับการทำงานจริง เพื่อให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้กระบวนการทำงานปัจจุบัน และคาดคะเนความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นกับตัวเครื่องจักร หรือระบบการผลิต รวมไปถึงการวางแผนปรับปรุงเครื่องจักรและระบบการผลิต โดยให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุดได้ ทั้งนี้งานศึกษาของ Deloitte ในปี 2018 คาดการณ์ว่าการใช้เทคโนโลยี digital twin ทั่วโลกจะเติบโตสูงถึง 38% ต่อปี ในช่วงระหว่างปี 2018-2023 โดยจะมีมูลค่าสูงถึง 16,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี 2023 จากปัจจุบันที่ราว 3,200 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ซึ่งความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยี internet of things (IOT) และ machine learning (ML) ส่งผลให้เครื่องจักรและอุปกรณ์สามารถเรียนรู้พัฒนาและสื่อสารระหว่างกันได้ ถือเป็นปัจจัยสนับสนุนสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีระบบ digital twin ให้สามารถนำมาใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ

2.1 Digital Transformation กับภาคอุตสาหกรรม

คำว่า Digital Transformation คือการเปลี่ยนแปลงโดยการนำเทคโนโลยีดิจิทัล ได้แก่ คอมพิวเตอร์ เทคโนโลยีสารสนเทศ และเทคโนโลยีการสื่อสาร เข้ามาประยุกต์ใช้ในการทำงานต่างๆ เพื่อปรับเปลี่ยนหรือปรับปรุงให้ธุรกิจหรือองค์กรมีความพร้อมในโลกดิจิทัลมากขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อทุกภาคส่วนไม่ว่าจะรัฐบาล ธุรกิจ และอุตสาหกรรม สำหรับในภาคอุตสาหกรรมนั้น Digital Transformation ได้ต่อยอดสิ่งที่เกิดขึ้นในการปฏิวัติอุตสาหกรรมยุคที่ 3 เช่น การใช้คอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์ โดยได้เกิดสิ่งใหม่ๆ และคำศัพท์ใหม่ๆ อีกมากมาย เช่น Internet of Things, Big Data, Artificial Intelligence, Cloud Computing ได้เริ่มเข้ามามีบทบาทในการปฏิวัติอุตสาหกรรมยุคที่ 4 ไม่ว่าจะเรียกว่า Factory 4.0 , Smart Factory หรืออื่นๆ ก็ตาม สิ่งที่ทางอุตสาหกรรมจำเป็นจะต้องปรับตัวในการนำเทคโนโลยีชื่อยากๆ ดังกล่าวข้างต้นมาใช้งานนั้น ก็เนื่องด้วยทุกวันนี้โลกการผลิตกำลังเปลี่ยนไป การเกิด Digital Disruption หรือการหยุดชะงักเนื่องจากการเกิดของเทคโนโลยีดิจิทัล ทำให้เกิดการผลิตอัจฉริยะที่สามารถลดต้นทุน เพิ่มประสิทธิภาพ สามารถจัดการทุกอย่างได้อย่าง

Realtime และอนาคตการผลิตที่จะผู้ประกอบการต้องมองให้เป็น Tailor Made หรือ Mass Customization หรือการผลิตจำนวนมากแต่ปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการเฉพาะราย

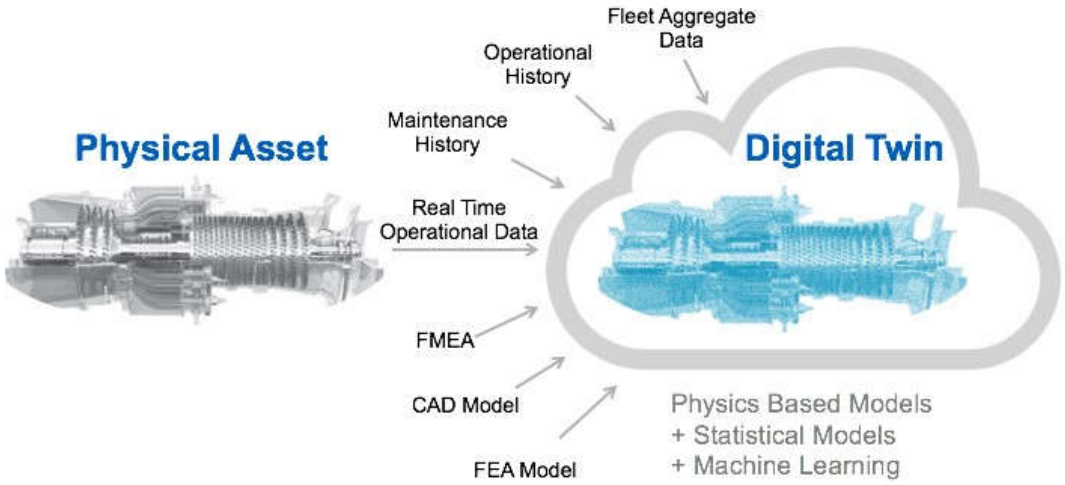
2.2 Digital Twins : คู่เสมือนดิจิทัล ในยุคแห่งนวัตกรรม

ในยุคแห่งนวัตกรรมดิจิทัลและเทคโนโลยี มีเทคโนโลยีใหม่ๆ เกิดขึ้นอย่างมากมายที่ทำให้เกิดประโยชน์ต่ออุตสาหกรรม ซึ่งหากภาคอุตสาหกรรมสามารถบูรณาการเทคโนโลยีเข้ากับระบบการผลิตได้ก็จะช่วยให้การผลิตมีความยืดหยุ่นมากขึ้น รวมไปถึงลดการใช้วัตถุดิบ ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับ การผลิตและก่อให้เกิดการประหยัดต้นทุนจนสามารถเพิ่มกำไรให้กับธุรกิจได้ ผู้ประกอบการจึงจำเป็นต้องพัฒนาศักยภาพของตัวเองอย่างต่อเนื่องและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันระดับโลกได้

ปัจจุบันเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) ได้รับการจัดอันดับให้เป็นปัจจัยสำคัญอันดับหนึ่งที่ส่งผลต่อการพลิกผันทางเทคโนโลยี โดยจากผลสำรวจความคิดเห็น The Changing landscape of disruptive technologies โดยเคพีเอ็มจี ซึ่งได้สำรวจความเห็นของผู้นำในอุตสาหกรรมเทคโนโลยีระดับโลกกว่า 750 คน นอกจากนี้ มีการนำแนวคิด IoT ไปสร้างนวัตกรรมใหม่หรือต่อยอดนวัตกรรมเดิมเพื่อเพิ่มมูลค่าทางธุรกิจ และสร้างความได้เปรียบในการแข่งขัน กล่าวคือ นำ IoT มาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการประมวลผลแบบคลาวด์ผ่านกระบวนการเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) ประกอบกับข้อมูลที่มีอยู่อย่างมากมาย (Big Data) ทำให้เกิดการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) จะทำให้เกิดความฉลาดมากขึ้น จนสามารถสร้างแบบจำลองของสิ่งต่างๆ ในรูปแบบ “เสมือน” ที่เป็นดิจิทัลหรือที่เรียกว่ากัน คู่เสมือนดิจิทัล (Digital Twins) ซึ่งเหมือนกับการเป็นฝาแฝดกันกับกายภาพนั่นเอง

แนวคิด Digital Twins นั้นไม่ใช่เรื่องใหม่และยังมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดยเปิดตัว ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2545 ณ มหาวิทยาลัยมิชิแกน โดยจัดเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่เป็นรากฐานของอุตสาหกรรม 4.0 อย่างไรก็ตามแนวคิดเริ่มต้นในเรื่องแบบจำลองเสมือนนั้นได้พัฒนามาจากองค์การนาซ่าที่จำลองรูปแบบของแคปซูลอวกาศ โดยการสร้างระบบที่ซ้ำซ้อนทางกายภาพในระดับพื้นดินเพื่อให้ตรงกับระบบในอวกาศ ด้วยแนวคิดเช่นนี้จึงทำให้เกิดการพัฒนาต่อมาจนกลายเป็นเทคโนโลยีเชิงกลยุทธ์ที่สามารถประยุกต์ใช้ในด้านธุรกิจและด้านอุตสาหกรรม โดย Digital Twins สามารถจำลองได้ทั้งวัตถุทางกายภาพ กระบวนการสายการผลิตหรือแม้แต่ระบบให้ออกมาเหมือนต้นแบบมากที่สุด ทั้งในแง่ของคุณสมบัติและพฤติกรรม หรือกล่าวได้ว่าในโลกของ Digital Twins นั้นจะมีอยู่สองรูปแบบเสมอ คือ 1. รูปแบบทางกายภาพ (Physical) ซึ่งมีตัวตนและจับต้องได้ในโลกแห่งความจริง 2. คือ คู่เสมือนดิจิทัล ซึ่งมีลักษณะเป็นซอฟต์แวร์แบบจำลองวัตถุทางกายภาพ โดยคู่เสมือนที่ถูกสร้างขึ้นมายังสามารถอัพเดทการเปลี่ยนแปลงตามคู่ของตนเองได้ตลอด เพราะมีการใช้เซ็นเซอร์ (sensor) เพื่อส่งข้อมูลตรวจสอบและรายงานผลการทำงานแบบทันที (Real Time) เพื่อให้คู่เสมือนดิจิทัลมีคุณสมบัติและพฤติกรรมที่เหมือนกันมากที่สุดจึงจำเป็นต้องอาศัยการป้อนข้อมูลของแฝดทางกายภาพ ซึ่งต้องอาศัยทั้งการประมวลผล วิเคราะห์ วางแผน และคาดการณ์สถานการณ์ล่วงหน้าจากข้อมูลที่ โดย

คุณสมบัติและการแสดงออกทุกอย่างนั้นจะเหมือนกับต้นฉบับหรือของจริง ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์และทดสอบคู่เสมือนดิจิทัลในสถานการณ์ตามที่ต้องการแทนการทดสอบกับต้นแบบทางกายภาพ ซึ่งผลลัพธ์จากการทดสอบที่เกิดขึ้นกับคู่เสมือนดิจิทัลก็จะให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกันกับคู่เสมือนทางกายภาพ



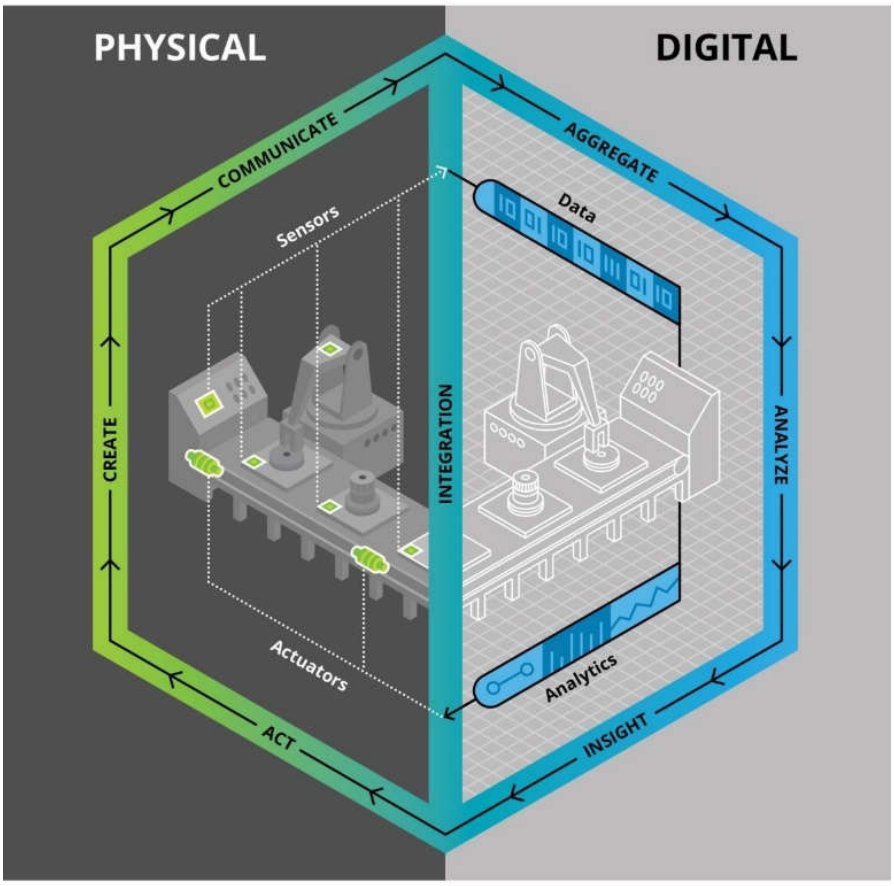
ภาพที่ 2-1 แสดงความหมายของเทคโนโลยี Digital Twins

2.3 การทำงานของ Digital Twins

ในการพัฒนา Digital Twin ขึ้นมาใช้งานนั้น จะประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์ (Sensor) ที่มีการกระจายตลอดเวลาของกระบวนการผลิตและสร้างสัญญาณถ่ายทอดไปยังคู่แฝด ทำให้สามารถจับภาพข้อมูลการดำเนินงานและข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกายภาพ
ในการผลิตมักใช้ข้อมูล (Data) สามประเภทคือ

1) ข้อมูลในอดีตเพื่อเรียนรู้เกี่ยวกับวัตถุและพฤติกรรม
2) ข้อมูลปัจจุบันเพื่อตรวจสอบกิจกรรมที่ทำอยู่แบบทันที (Real Time) และ
3) ข้อมูลการคาดการณ์ในอนาคตโดยใช้ข้อมูลจากอดีตและข้อมูลปัจจุบัน ซึ่งเก็บโดยเซ็นเซอร์

ที่มีการรวบรวม (Integration) จัดเก็บข้อมูลการทำงานหรือข้อมูลสภาพแวดล้อมการทำงานเพื่อสร้างโมเดล Digital Twins จากนั้นจะมีการวิเคราะห์ (Analytics) เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกประกอบกับการใช้ Machine Learning ในการคาดการณ์เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาในอนาคต และมีแอคทูเอเตอร์ (Actuators) รับรองกระบวนการทำงานในด้านกายภาพว่าจะมีกระบวนการทำงานที่เหมือนกันหากนำไปจำลองในโลกเสมือน เนื่องจาก Digital Twins นั้นอยู่ภายใต้การแทรกแซงของมนุษย์



ภาพที่ 2-2 แสดงภาพแบบจำลอง Digital Twins ในกระบวนการผลิต

2.4 Digital Twins กับการสร้างมูลค่าเพิ่มทางธุรกิจ

การนำ Digital Twins มาใช้อาจจะก่อให้เกิดการเพิ่มมูลค่าทางธุรกิจ ดังนี้

2.4.1 ด้านคุณภาพสินค้า จากคุณสมบัติของ Digital Twin ที่สามารถคาดการณ์ ตรวจสอบแนวโน้มความผิดพลาดและข้อบกพร่องได้ในระหว่างการผลิต ทำให้สามารถทราบถึงปัญหาและแก้ไขปัญหาได้ทันที ส่งผลให้คุณภาพของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ดีขึ้นและเป็นการลดเวลาในการผลิต

2.4.2 ด้านค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ Digital Twins ทำให้กระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ทำได้ง่ายขึ้น สามารถตอบโจทย์ลูกค้ามากขึ้น รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตสินค้า รวมทั้งลดความไม่แน่นอนในกระบวนการทำงาน เนื่องจากได้รับข้อมูลเชิงลึกของอุปกรณ์ ทำให้สามารถทำการทดสอบบนสำเนาหรือคู่เสมือนแทนอุปกรณ์จริง ซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงที่อาจเกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์จริง

2.4.3 ด้านต้นทุนค่าใช้จ่ายในการออกผลิตภัณฑ์ใหม่ Digital Twins ช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ เนื่องจากการรวบรวมข้อมูลทั้งในอดีตและปัจจุบันแล้วนำมาพัฒนาสินค้าที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้มากขึ้น

2.2.4 ด้านการรับประกันและการให้บริการ Digital Twins ทำให้เข้าใจสถานะการทำงานในปัจจุบันของอุปกรณ์เพื่อให้เกิดการบริการกับลูกค้าที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีความถูกต้องและแม่นยำในการรับประกันสินค้าซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการประกันสินค้าได้

2.5 การประยุกต์ใช้ Digital Twins

Digital Twins ไม่เพียงแต่วิเคราะห์วัตถุและการเปลี่ยนแปลงภายในระบบเท่านั้น แต่ยังใช้ในการวิเคราะห์และทำนายผลกระทบต่อธุรกิจ สถานการณ์ทางการเงินและปรับปรุงประสิทธิภาพของห่วงโซ่อุปทานได้ โดยสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมในหลายด้าน ซึ่งแบ่งออกเป็นด้านต่างๆ ดังนี้

2.5.1. ด้านอุตสาหกรรมการผลิต Digital Twins ทำให้สามารถติดตามผลิตภัณฑ์ตลอดช่วงชีวิต (Product Lifecycle) ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ การผลิต การส่งมอบ การใช้งาน และการให้บริการลูกค้า เนื่องจากมีข้อมูลทั้งในอดีตรวมถึงการใช้งานจริงในปัจจุบันแบบทันที ข้อมูลจากการคาดการณ์และสถานการณ์จำลอง ทำให้นำมาใช้วิเคราะห์เพื่อให้เกิดการปรับปรุงการทำงานและพัฒนาการให้บริการหลัง การขายให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถแก้ไขปัญหาจากฝั่งผู้ผลิตโดยไม่จำเป็นต้องเดินทางออกไปพบลูกค้า

1) ด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ Digital Twin ถูกนำมาใช้งานโดยมีบทบาทในการช่วยวิเคราะห์คำนวณความเสี่ยงเพื่อออกแบบยานยนต์ รวบรวมข้อมูลพฤติกรรมและการดำเนินงานของยานยนต์เพื่อสร้างโมเดลเสมือนจริงพร้อมทั้งประเมินความเสียหายพร้อมเสนอวิธีลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้

2) ด้านอุตสาหกรรมการแพทย์ ใช้การติดเซ็นเซอร์ให้กับคนไข้เพื่อส่งสัญญาณและรวบรวมข้อมูลด้านสภาพร่างกาย โรคและการรักษารวมไปถึงพฤติกรรมต่างๆ มาสร้างเป็นร่างกายเสมือนของผู้ป่วยซึ่งทำให้แพทย์สามารถติดตามและตรวจสอบอาการคนไข้รวมไปถึงหาวิธีรักษาโรคให้มีความเสี่ยงน้อยสุดแต่มีประสิทธิภาพมากที่สุดได้

3) ด้านอุตสาหกรรมค้าปลีก Digital Twin มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสบการณ์ลูกค้า รายย่อยด้วยการสร้างแบบจำลองแฟชั่นที่หลากหลาย นอกจากนี้ยังช่วยในการวางแผนการติดตั้งใช้งานด้านความปลอดภัยและการจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

4) ด้านโครงสร้างพื้นฐานและเมืองอัจฉริยะ (Smart City) ใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งตามจุดในบริเวณที่ต้องการศึกษามาช่วยวิเคราะห์การจัดสรรทรัพยากรและวางผังเมือง รวมไปถึงระบบการจัดการต่างๆ เช่น การบริหารน้ำเสีย เป็นต้น

อย่างที่กล่าวไปว่าเทคโนโลยี Digital Twins เป็นรากฐานของอุตสาหกรรม 4.0 ซึ่งเป็นการรวบรวมระบบอัตโนมัติการแลกเปลี่ยนข้อมูลและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่หลากหลายไม่ว่าจะเป็น Big Data Analytic, IoT, Machine Learning, Cloud, 3D Modeling และ VR/MR ทำให้เกิดความเป็นไปได้ในหลายด้านจากเดิมโดยไม่ใช่แค่การสร้างแบบจำลองเสมือนของผลิตภัณฑ์เพียงอย่างเดียว แต่ยังสามารถวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกโดยอาศัยข้อมูลของผลิตภัณฑ์ในอดีตและปัจจุบันที่ได้จากการบันทึกของเซ็นเซอร์พร้อมทั้งสามารถประเมินความเสี่ยงต่างๆ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตด้วย

ช่วยลดการใช้วัตถุดิบในการผลิตรวมไปจนถึงการวางแผนการผลิต ทั้งหมดนี้ล้วนทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตเพิ่มขึ้น ต้นทุนในการผลิตลดลงซึ่งอาจจะนำไปสู่การเพิ่มมูลค่าทางธุรกิจและช่วยในการตอบคำถามเชิงกลยุทธ์ที่สำคัญให้กับอุตสาหกรรมที่นำเทคโนโลยีไปประยุกต์ใช้ได้

ในปัจจุบันเทคโนโลยี Digital Twins กลับกลายเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจ ซึ่งอาจจะเป็นแนวโน้มใหม่ที่มีบทบาทในอีก ไม่ช้าสำหรับผู้ประกอบการ ซึ่งนับเป็นจุดเริ่มต้นที่ดีในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศโดยการนำเทคโนโลยีดิจิทัลเข้ามาใช้ แต่อย่างไรก็ตามผู้ประกอบการเองก็ต้องปรับตัวและพัฒนาให้ก้าวทันอยู่เสมอเพื่อโอกาสทางธุรกิจใหม่ๆ หรือเรียกได้ว่า “ใครปรับตัวก่อนก็ได้เปรียบกว่า" Digital Twin เป็นแนวคิดการทำสำเนาหรือแบบจำลองของสิ่งต่างๆทางกายภาพให้อยู่ในรูปแบบดิจิทัล ทว่า Digital Twin เหล่านี้ไม่เพียงเป็นภาพจำลองที่สวยงามเท่านั้น แต่ยังมีกลไกเชื่อมต่อกับวัตถุของจริงผ่านระบบเซ็นเซอร์ที่คอยเก็บข้อมูลสถานะทางกายภาพของวัตถุแบบ Real-time ทำให้แบบจำลองนั้นเป็นเสมือนการย้ายวัตถุไปไว้ในโลกดิจิทัล เมื่อมีแบบจำลองวัตถุที่สมจริง สิ่งที่ตามมาคือความสามารถในการตรวจสอบสถานะของวัตถุอย่างละเอียดโดยมีสื่อที่เป็นภาพคอยนำทาง และความสามารถในการจำลองสถานการณ์ขึ้นว่าหากสภาพแวดล้อม หรือสถานะจุดใดจุดหนึ่งภายในตัววัตถุเปลี่ยนไป จะเกิดผลกระทบอย่างไรบ้างกับวัตถุ โดยที่มากไปกว่านั้นคือ Digital Twin ของวัตถุแต่ละชิ้นนั้นเราสามารถนำมาเชื่อมต่อกันให้กลายเป็นระบบจำลองขนาดย่อมๆได้ ทำให้เราสามารถจำลองสถานการณ์และทำนายความเป็นไปได้ในภาพที่สมบูรณ์มากขึ้น สำหรับธุรกิจ ความสามารถเช่นนี้ของ Digital Twin หมายความว่าพวกเขาจะสามารถเฝ้าระวังเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำลองเหตุการณ์และวางแผนการดำเนินการ เช่น การกะเวลาที่ควรซ่อมบำรุง การสร้างสถานการณ์สมมติ การตรวจสอบการทำงานร่วมกันของเครื่องจักรหลายชิ้น เป็นต้น นอกจากนี้ Digital Twin อาจสามารถช่วยแจ้งเตือน และเริ่มดำเนินขั้นตอนในการทำงานแบบอัตโนมัติเมื่อสถานะของวัตถุบ่งบอกว่าต้องการ Action อะไรบางอย่างต่อระบบ

2.6 เทคโนโลยีในการสร้าง Digital Twin

การสร้าง Digital Twin คือการสร้างแบบจำลองวัตถุขึ้นในโลกดิจิทัล ทั้งในรูปแบบของภาพและข้อมูล แล้วจากนั้นในการใช้งานจะมีการดึงข้อมูลไปวิเคราะห์ สร้างสถานการณ์จำลอง ดังนั้นเทคโนโลยี Digital Twin จึงเป็นการผสมผสานของเทคโนโลยีหลายชนิด อันได้แก่

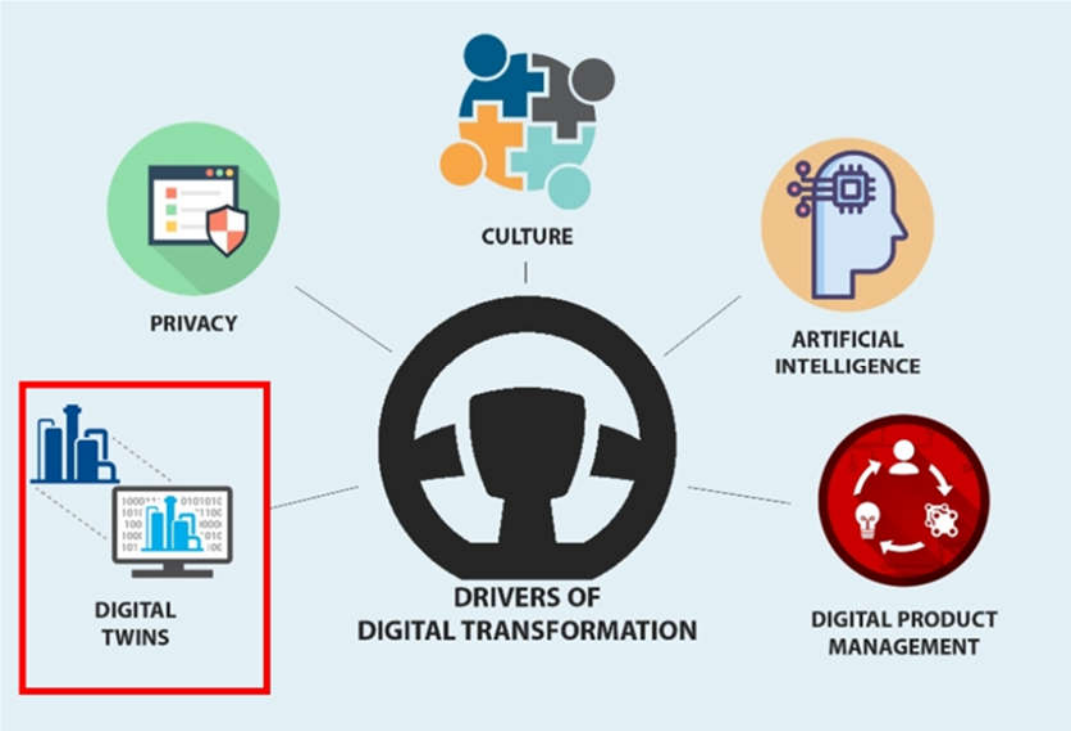
2.6.1 เทคโนโลยีผลิตภาพ 3 มิติ หรือ VR และ AR ทำหน้าที่สร้างรูปร่างของวัตถุในโลกดิจิทัล

2.6.2 เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) รับผิดชอบการเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างโลกแห่งความเป็นจริงและโลกดิจิทัล รวมทั้งการอัปเดตข้อมูลใหม่ๆเข้ามาใน Digital Twin อยู่เสมอแบบ Real-time

2.6.3 เทคโนโลยีการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งอาจประกอบไปด้วยหลายเทคโนโลยี เช่น Machine Learning เพื่อทำนายเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้น และ Software Analytics เพื่อดูแลการทำงานของซอฟต์แวร์ในระบบ

2.6.4 เทคโนโลยีสำหรับสร้างโมเดลจำลอง เช่น Artificial Intelligence และ Spatial Graph เพื่อจำลองภาพโดยรวมของระบบและจำลองเหตุการณ์ที่น่าจะเกิดขึ้น

2.6.5 เทคโนโลยีโครงสร้างพื้นฐานสำหรับสื่อสารเชื่อมต่อระบบเข้าด้วยกัน เช่น Cloud, Edge Computing, Automation, และระบบรักษาความปลอดภัย ซึ่งช่วยให้เทคโนโลยีทั้งหมดทำงานร่วมกันได้ด้วยดี



ภาพที่ 2-3 แสดงภาพแบบจำลอง Digital Twins ในโรงงานอุตสาหกรรม

2.7 อนาคตของ Digital Twin

นับตั้งแต่แนวคิด Digital Twin เริ่มได้รับความสนใจ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องนั้นมีต้นทุนที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง และความพร้อมในการเปิดรับเทคโนโลยีของธุรกิจต่างๆก็เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน ด้วยแนวโน้มดังกล่าว จึงเป็นไปได้ว่าในอนาคตเราจะได้เห็น Digital Twin ถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายในธุรกิจต่างๆ มีการประยุกต์สร้างคุณค่าในรูปแบบใหม่ๆ และอาจเข้าถึงได้ในระดับที่ผู้บริโภคเริ่มนำมาใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น Digital Twin ของรถยนต์ หรือระบบเครือข่ายเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านเลยทีเดียว

ความสามารถในการเฝ้าระวังสถานะ วิเคราะห์ข้อมูล และจำลองเหตุการณ์ของ Digital Twin นั้นเปรียบเสมือนการอัพเกรดการวิเคราะห์ข้อมูลไปอีกขั้น ที่จะช่วยให้ธุรกิจ หน่วยงาน และบุคคลทั่วไปที่ได้งานมีภาพที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นในการตัดสินใจสิ่งต่างๆด้วยข้อมูล ทำให้การตัดสินใจนั้นแม่นยำและชาญฉลาดยิ่งขึ้น Digital Twin มีประโยชน์หลากหลายและสามารถนำไปใช้ได้กับงานหลาย

รูปแบบ เป็นที่น่าติดตามต่อไปว่าเมื่อมีการใช้ Digital Twin อย่างแพร่หลายขึ้นแล้ว จะมีการต่อยอดการใช้งานอย่างไรต่อไปบ้าง

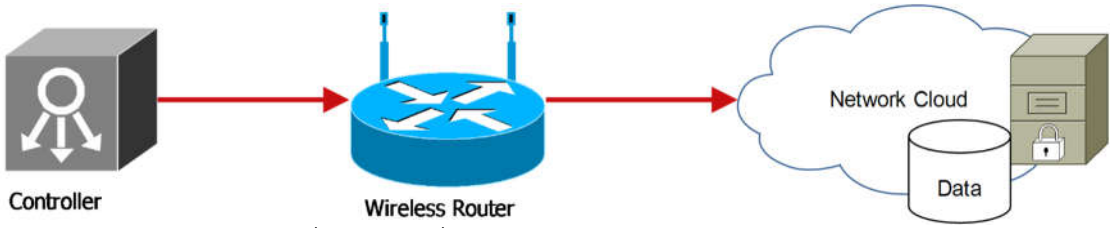
2.8 ระบบติดตามและควบคุมการใช้งานผ่านระบบอินเตอร์เน็ต (IOT System)

ในการสร้างระบบติดตามการใช้งานและควบคุมผ่านระบบอินเตอร์เน็ตจะใช้หลักการของการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ควบคุมของระบบรมควันปลาสวายและอุปกรณ์เชื่อมต่ออินเตอร์เน็ตต่างๆ ทั้งคอมพิวเตอร์ และสมาร์ทโฟน โดยใช้ระบบ Website เป็นสื่อกลางและใช้ระบบ Cloud เป็นพื้นที่สำหรับเก็บข้อมูล ซึ่งสามารถเรียกสั้นๆ ว่าระบบอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Thing)

ระบบติดตามและควบคุมการทำงานผ่านระบบอินเตอร์เน็ตที่จะออกแบบสำหรับใช้งานกับระบบต่างๆนั้น ทำโดยนำสัญญานไฟฟ้าจากอุปกรณ์ในตู้ควบคุมคือ เซนเซอร์อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ และอินเวอร์เตอร์(ใช้เพื่อปรับความเร็วลมพัดลม) เข้าสู่คอนโทรลเลอร์ที่ต้องเขียนโปรแกรมเพื่อรับส่งสัญญานการเชื่อมต่อในการสั่งการทำงานของอุปกรณ์ไปยัง Could ผ่านระบบอินเตอร์เน็ต

1) ระบบ Cloud

เป็นระบบที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูล ทางทีมจะทำการเช่าเครื่องเซิฟเวอร์จากภายนอกเพื่อใช้เก็บข้อมูลการตั้งค่าต่างๆในการเชื่อมต่อกับตัวคอนโทรเลอร์ที่ใช้ในการควบคุมตู้อบ ซึ่งสามารถอธิบายเป็นรูปภาพได้ดังนี้



ภาพที่ 2-4 การเชื่อมต่อคอนโทรเลอร์กับระบบ Cloud

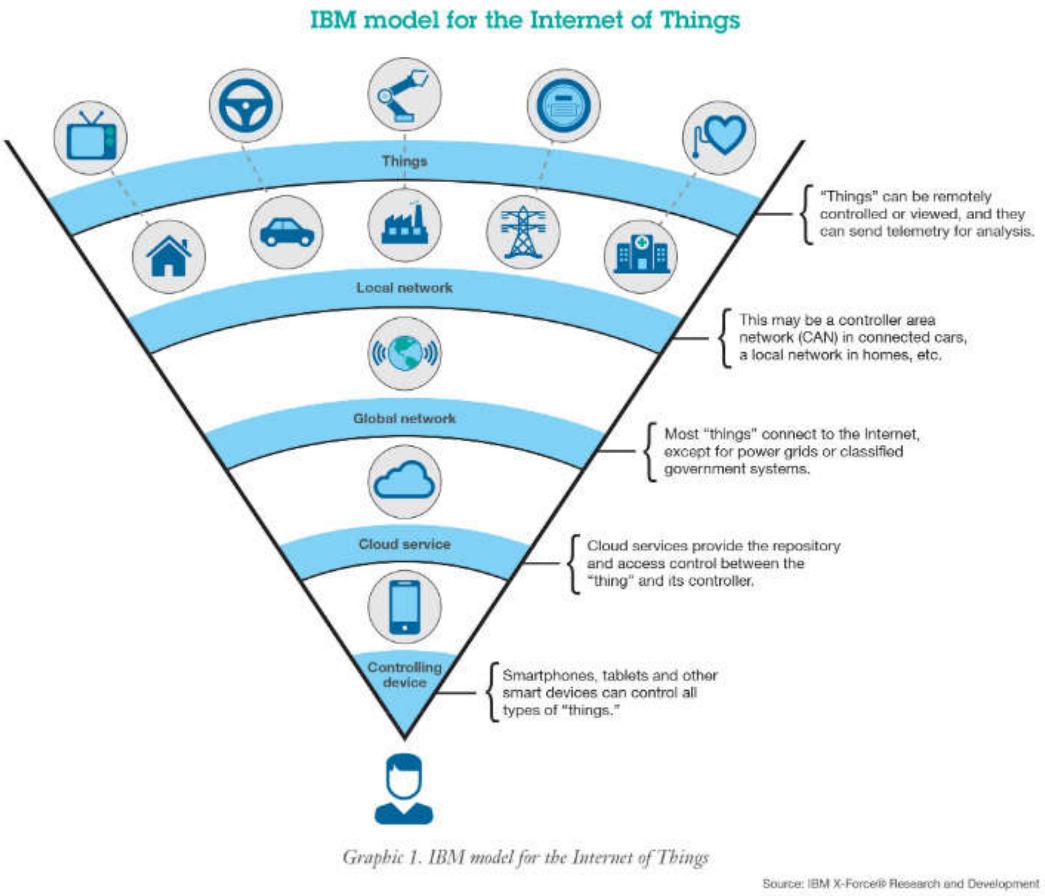
จากรูป จะเห็นได้ว่าตัวคอนโทรเลอร์จะส่งข้อมูลผ่าน Wireless ซึ่งเป็นระบบอินเตอร์เน็ตไร้สายที่ใช้เป็นตัวกลางในการส่งผ่านข้อมูลขึ้นไปเก็บไว้บน Network Cloud ส่วนของ Network Cloud จะประกอบไปด้วยแอปพลิเคชั่นเซิฟเวอร์ และตัวจัดการฐานข้อมูล (database) ซึ่งใช้สำหรับจัดการข้อมูลที่ส่งมาจากตัวคอนโทรเลอร์และใช้สำหรับทำระบบ Website นอกจากนี้ตัวระบบ Cloud ยังใช้ตัว Internet of Things (IoT) เพื่อใช้ในการจัดการและเชื่อมต่อกับอุปรณ์ต่างๆ ซึ่งสามารถอธิบายความสามารถของ IoT ได้ดั้งนี้

Internet of Things (IoT) คือ "อินเตอร์เน็ตในทุกสิ่ง" หมายถึง การที่อุปกรณ์ต่างๆ สิ่งต่างๆ ได้ถูกเชื่อมโยงทุกสิ่งทุกอย่างสู่โลกอินเตอร์เน็ต ทำให้มนุษย์สามารถสั่งการควบคุมการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ ผ่านทางเครือข่ายอินเตอร์เน็ต เช่น การเปิด-ปิด อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า (การสั่งการเปิดไฟฟ้าภายในบ้านด้วยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุม เช่น มือถือ ผ่านทางอินเตอร์เน็ต) รถยนต์ โทรศัพท์มือถือ

เครื่องมือสื่อสาร เครื่องมือทางการเกษตร อาคาร บ้านเรือน เครื่องใช้ในชีวิตประจำวันต่างๆ ผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ต เป็นต้น

แนวคิด Internet of Things นั้นถูกคิดขึ้นโดย Kevin Ashton ในปี 1999 ซึ่งเขาเริ่มต้นโครงการ Auto-ID Center ที่มหาวิทยาลัย Massachusetts Institute of Technology หรือ MIT จากเทคโนโลยี RFID ที่จะทำให้เป็นมาตรฐานระดับโลกสำหรับ RFID Sensors ต่างๆที่จะเชื่อมต่อกันได้ ต่อมาในยุคหลังปี 2000 โลกมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ออกมาเป็นจำนวนมากและมีการใช้คำว่า Smart ซึ่งในที่นี้คือ Smart Device, Smart Grid, Smart Home, Smart Network, Smart Intelligent Transportation ต่างๆเหล่านี้ล้วนมีโครงสร้างพื้นฐานที่สามารถเชื่อมต่อกับโลกอินเตอร์เน็ตได้ ซึ่งการเชื่อมต่อเหล่านั้นเองก็เลยมาเป็นแนวคิดที่ว่าอุปกรณ์เหล่านั้นก็ย่อมสามารถสื่อสารกันได้ด้วยเช่นกันโดยอาศัยตัว Sensor ในการสื่อสารถึงกัน นั่นแปลว่านอกจาก Smart Devices ต่างๆจะเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ตได้แล้วมันยังสามารถเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์ตัวอื่นได้ด้วยโดย Kevin นิยามมันไว้ตอนนั้นว่าเป็น “Internet-Like” หรือพูดง่ายๆก็คืออุปกณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถสื่อสารพูดคุยกันเองได้ ซึ่งศัพท์คำว่า “Things” ก็แทนอุปกณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่กล่าวมาก่อนหน้านี้

IoT มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า M2M ย่อมาจาก Machine to Machine คือเทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตที่เชื่อมต่ออุปกรณ์กับเครื่องมือต่างๆ เข้าไว้ด้วยกัน เทคโนโลยี IoT มีความจำเป็นต้องทำงานร่วมกับอุปกรณ์ประเภท RFID และ Sensors ซึ่งเปรียบเสมือนการเติมสมองให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ที่ขาดไปคือการเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ต เพื่อให้อุปกรณ์สามารถรับส่งข้อมูลถึงกันได้ เทคโนโลยี IoT มีประโยชน์ในหลายด้าน แต่ก็มาพร้อมกับความเสี่ยง เพราะหากระบบรักษาความปลอดภัยของอุปกรณ์ และเครือข่ายอินเตอร์เน็ตไม่ดีพอ ก็อาจทำให้มีผู้ไม่ประสงค์ดีเข้ามาขโมยข้อมูลหรือละเมิดความเป็นส่วนตัวของเราได้ ดังนั้นการพัฒนา IoT จึงจำเป็นต้องพัฒนามาตรการ และระบบรักษาความปลอดภัยไอทีควบคู่กันไปด้วย



ภาพที่ 2-5 อธิบายแต่ละ Network Layers ของ Internet of Things โดย IBM

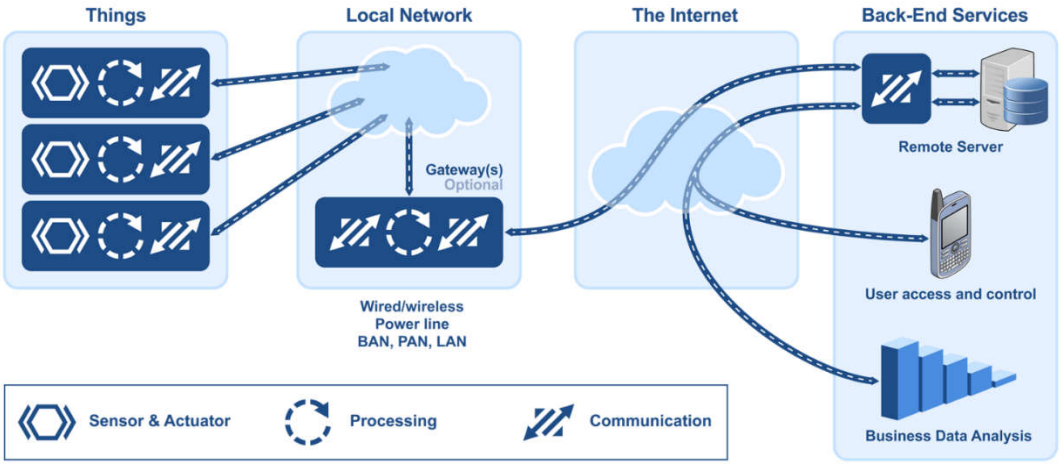
ตัวแปรสำคัญสำหรับ Internet of Things ที่ใช้ในการสื่อสารนั้นไม่เพียงแต่ Internet Network เพียงเท่านั้นแต่ยังมีตัวแปลอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องอีกนั่นคือ Sensor Node ต่างๆจำนวนมากที่ทำให้เกิด Wireless Sensor Network (WSN) ให้กับอุปกรณ์ต่างๆสามารถเชื่อมต่อเข้ามาได้ซึ่ง WSNs สามารถตรวจจับปรากฏการณ์ต่างๆ (Physical Phenomena) ในเครือข่ายได้ด้วย ยกตัวอย่างเช่น แสง อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น เพื่อส่งค่าไปยังอุปกรณ์ในระบบให้ทำงานหรือสั่งงานอื่นๆต่อไป

การพัฒนา Internet of Things นั้นนอกจากจะพัฒนาเทคโนโลยีในฝั่ง Hardware ได้แก่ Processors, Radios และ Sensors ซึ่งจะถูกรวมเข้าด้วยกันเรียกว่า a single chip หรือ System on a Chip (SoC) แล้วก็ยังพัฒนา WSN ไปพร้อมๆกันด้วย และเมื่อพูดถึงการเชื่อมต่อปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการเชื่อมต่อเข้ากับ Internet of Things หรือ Access technology มีอยู่ 3 ตัวได้แก่

- Bluetooth 4.0
- IEEE 802.15.4e
- WLAN IEEE 802.11™ (Wi-Fi) มาตรฐานการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สายโดยที่ในแต่ละ Access technology นั้นจะมีการส่งข้อมูลที่แตกต่างกันดังนี้

	IEEE 802.15.4e	Bluetooth 4.0	WLAN IEEE 802.11™ (Wi-Fi)
ความถี่	868/915 MHz 2.4 GHz	2.4 GHz	2.4, 5.8 GHz
อัตราการส่งข้อมูล	250 Kbps	723 Kbps	11 – 105 Mbps
กำลังไฟฟ้า	Very low	Low	High

เมื่อมีโครงข่าย Sensor node แล้วจำเป็นต้องมี Gateway Sensor Nodes เพื่อจะเชื่อมต่อไปยังระบบอินเตอร์เน็ตด้วย โดยที่ Gateway นี้จะทำหน้าที่เชื่อมต่อไปยังเครือข่าย Internet ให้อุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่าย Sensor Nodes ทั้งหมดส่งข้อมูลเข้าสู่อินเตอร์เน็ตได้ Gateway จะอยู่ภายใต้ Local Network ซึ่งจะมีการกำหนดกันต่อไปว่า Gateway ภายใต้ Local Network นั้นจะให้เชื่อมต่อไปยัง Internet ได้ด้วยหรือไม่ถ้าไม่ได้อุปกรณ์ที่เชื่อมเข้ามาใน Gateway ก็อาจจะสื่อสารกันได้เฉพาะภายใน Local Network เองได้เท่านั้น

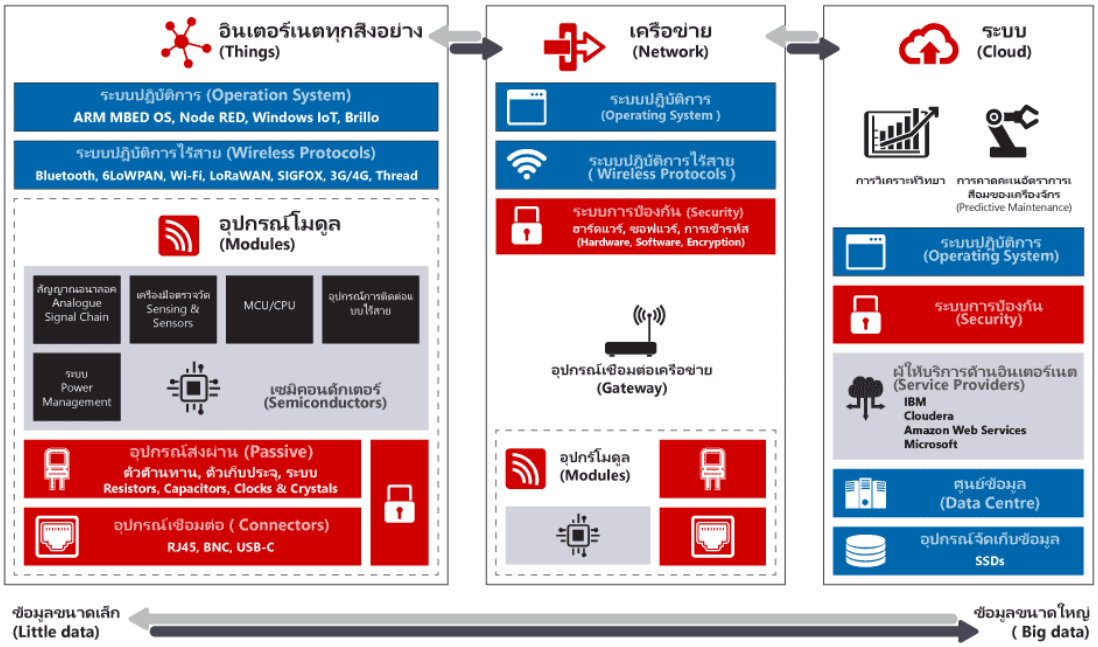


ภาพ 2-6 Internet of Things จากมุมมองระบบ Embedded

ปัจจุบันมีการแบ่งกลุ่ม Internet of Things ออกตามตลาดการใช้งานเป็น 2 กลุ่มได้แก่

1) Industrial IoT คือ แบ่งจาก Local Network ที่มีหลายเทคโนโลยีที่แตกต่างกันในโครงข่าย Sensor Nodes โดยตัวอุปกรณ์ IoT Device ในกลุ่มนี้จะเชื่อมต่อแบบ IP network เพื่อเข้าสู่อินเตอร์เน็ต

2) Commercial IoT คือ แบ่งจาก Local Communication ที่เป็น Bluetooth หรือ Ethernet (Wired or Wireless) โดยตัวอุปกรณ์ IoT Device ในกลุ่มนี้จะสื่อสารภายในกลุ่ม Sensor Nodes เดียวกันเท่านั้นหรือเป็นแบบ local devices เพียงอย่างเดียวอาจไม่ได้เชื่อมสู่อินเตอร์เน็ต



ภาพที่ 2-7 สถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง Internet of Things Architecture

- สถาปัตยกรรม IoT มีสามองค์ประกอบหลักที่โดยทั่วไปจะอ้างอิงถึงในสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง

- สิ่งต่างๆ (Things) - อุปกรณ์ที่มีวิธีการในการเชื่อมต่อ (แบบใช้สายหรือแบบไร้สาย) เพื่อเข้าสู่เครือข่ายที่กว้างขวางกว่า

- เครือข่าย (Networks) - คล้ายกับเราเตอร์ที่บ้านของคุณ ในเครือข่ายหรือเกตเวย์จะเชื่อมต่อสิ่งต่างๆ ไปยังระบบคลาวด์ (Cloud)

- ระบบคลาวด์ (Cloud) – เซิร์ฟเวอร์ระยะไกลในศูนย์ข้อมูลที่ทำหน้าที่ในการรวมและเก็บข้อมูลของคุณเอาไว้อย่างปลอดภัย

2.9 Data: ข้อมูล

การสร้างข้อมูล สิ่งต่างๆ สร้างข้อมูลจะสร้างข้อมูลทั่วไปขนาดเล็ก (จำนวนไม่กี่ไบต์) ซึ่งแสดงข้อมูลการรับรู้ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นหรือตำแหน่ง สิ่งนี้มักถูกเรียกว่า 'ข้อมูลขนาดเล็ก' ด้วยขนาดข้อมูลที่เล็ก เมื่ออุปกรณ์หลายชิ้นนี้ส่ง ข้อมูลขนาดเล็กเหล่านี้ผ่านเครือข่ายไปยังระบบคลาวด์ ข้อมูลจะถูกรวมเข้าด้วยกันและมีการติดตาม ซึ่งในระยะยาวมักจะมีขนาดใหญ่ขึ้น สิ่งนี้ในบางครั้งอาจเรียกได้ว่าเป็น 'ข้อมูลขนาดใหญ่' และในจุดนี้เองที่ IoT จะมีความชาญฉลาดอย่างแท้จริง เนื่องจากข้อมูลขนาดใหญ่จะช่วยให้คุณสามารถสืบค้นจากจุดข้อมูลนับล้านเพื่อศึกษา ทำความเข้าใจหรือควบคุมบางสิ่งได้อย่างมี ประสิทธิภาพมากขึ้น

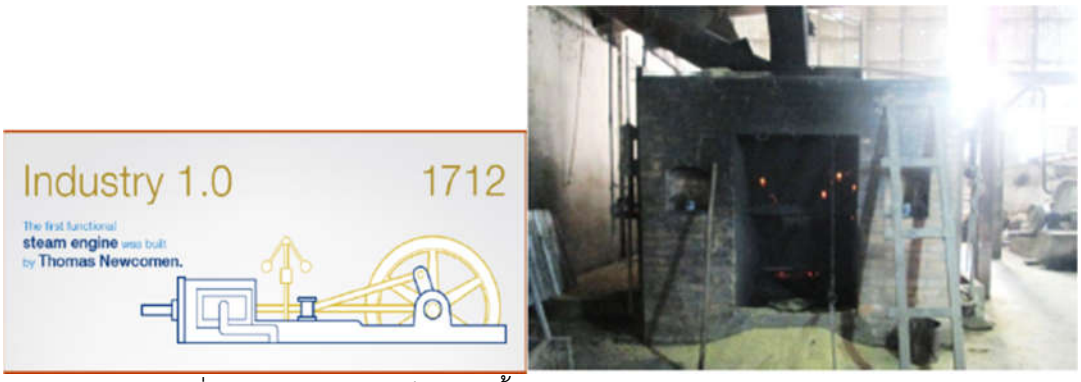
การใช้ การวิเคราะห์จากเซนเซอร์ จะช่วยในการเชื่อมโยงเหตุการณ์เข้ากับผลลัพธ์หรือการกระทำ ตัวอย่างเช่น การที่เราทราบว่าในช่วงเย็นของฤดูใบไม้ผลิจะมืดช้าลง การใช้เซนเซอร์ตรวจจับค่าแสงในบริเวณโดยรอบกับไฟถนน เราจะสามารถเปิดไฟให้ช้าลงเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน หรือเซนเซอร์ตรวจจับว่าเครื่องจักรมีการสั่นสะเทือนมากกว่าปกติ ซึ่งอาจเป็นสัญญาณ บ่งชี้ว่าการทำงานของเครื่องจักรกำลังจะล้มเหลว ช่วยให้คุณสามารถสั่งซื้อชิ้นส่วนและกำหนด การคาดการณ์การบำรุงรักษาได้

2.10 Smart Boiler (Boiler 4.0) [1]

2.10.1 พัฒนาการของหม้อน้ำ

2.10.1.1 Boiler 1.0: หม้อน้ำแบบใช้คนควบคุม (Manual Control)

เป็นหม้อน้ำแบบใช้ควบคุมแสดงดังภาพที่ 9 การควบคุมหม้อน้ำจะ ใช้คนคอยตรวจสอบความดันไอน้ำจากเกจวัดความดัน เมื่อความดันไอน้ำลดลง จะเปิดสวิตช์ให้หัวเผาทำงาน หากความดันไอน้ำสูงสวิตช์จะถูกปิด สำหรับกรณีใช้เชื้อเพลิงแข็ง เมื่อความดันไอน้ำลดต่ำลง หรือเปลวไฟอ่อนลงเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าเตาด้วยแรงงานคน ส่วนลมช่วยเผาไหม้อาจใช้ลมธรรมชาติ โดยอาศัยแรงลอยตัวจากความร้อนของก๊าซไอเสีย ดูดอากาศเข้ามาช่วยเผาไหม้หรือใช้พัดลมดูดที่ปล่องไอเสีย ในส่วนการควบคุมระดับน้ำผู้ควบคุมจะต้องคอยตรวจสอบระดับน้ำจากหลอดแก้ว เมื่อระดับน้ำในหลอดแก้วต่ำ จะเปิดสวิตช์ ให้ปั๊มน้ำทำงาน หากระดับน้ำจากหลอดแก้วสูง จะปิดสวิตช์ หยุดการทำงานของปั๊ม น้ำป้อนที่ใช้ในหม้อน้ำส่วนใหญ่จะใช้น้ำดิบที่ปล่อยให้ตกตะกอนก่อนป้อนเข้าหม้อน้ำ และมีการเปิดวาล์วระบายน้ำใต้หม้อน้ำ2-8 ชั่วโมงต่อครั้ง โดยปกติหม้อน้ำแบบนี้จะไม่มีอุปกรณ์บำบัดมลภาวะหรือใช้น้ำสเปรย์ดักฝุ่น เขม่า



ภาพที่ 2-8 Boiler 1.0 เป็นหม้อน้ำแบบใช้คนควบคุม (Manual Control)

ข้อดี/ข้อเสีย

1) ระดับน้ำในหม้อน้ำไม่แน่นอน ทำให้อุณหภูมิเหล็กที่เป็นผิวรับความร้อน เปลี่ยนแปลงมาก

1.1) คนมีโอกาสเผลอ มีความเสี่ยงสูงจากน้ำแห้ง และเกิดการ Overheat ได้ง่าย

1.2) มีความเสี่ยงเมื่อระดับน้ำสูงเกินไป ทำให้ไอน้ำเกิด Carry Over และ Water Hammer

1.3) หม้อน้ำเกิดการชำรุดง่าย อายุสั้น

1.4) มีสถิติการระเบิดของหม้อน้ำสูงมาก

1.5) มีความเสี่ยงที่จะทำให้หม้อน้ำเกิดการเสื่อมสภาพในระยะเวลาอันสั้น จากความเสียหายในรูปแบบต่างๆ

1.6) มีโอกาสเกิด Overheat จากตะกรันหนา หรือโคลนมาก

1.7) มีโอกาสเกิด การชำรุดอุดตันของอุปกรณ์ตรวจวัดและอุปกรณ์ความปลอดภัยเกิดขึ้นบ่อยครั้ง

1.8) มีโอกาสเกิด การผุกร่อน (Corrosion) ด้านสัมผัสน้ำ (Water Side) จากออกซิเจนละลายน้ำ ซึ่งอาจเกิดขึ้นทั้งแบบทั่วไปหรือเฉพาะจุด

1.9) มีโอกาสเกิด การกัดกร่อน (Erosion) จากสภาพน้ำเป็นกรด

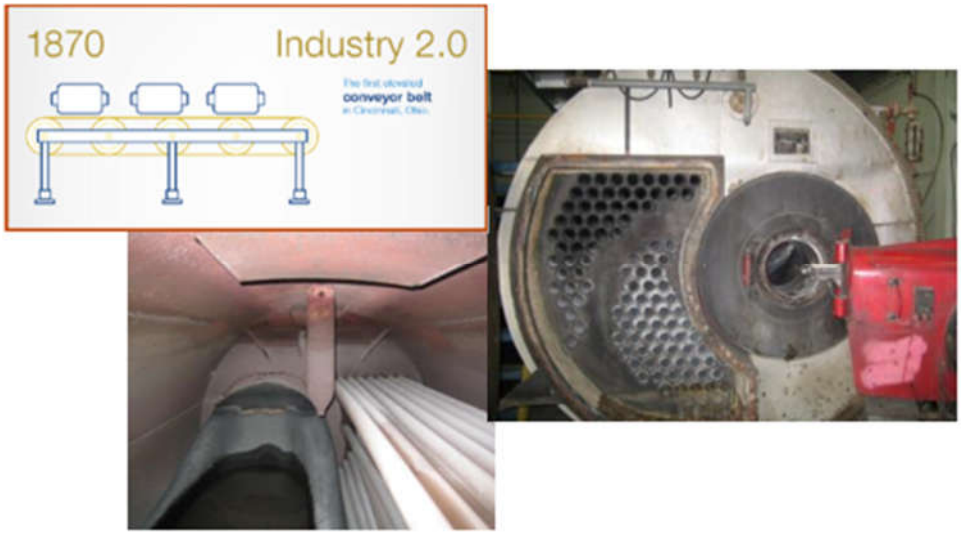
1.10) มีโอกาสเกิด การเกิดผนังบางเป็นร่อง (Grooving) จากด่างจัด

1.11) มีโอกาสเกิดมลภาวะจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์สูงมาก

2.10.1.2 Boiler 2.0: ควบคุมอัตโนมัติแบบเปิด-ปิด (On-Off Control)

จากภาพที่ 9 แสดงลักษณะ Boiler 2.0 โดยการควบคุมหม้อน้ำใช้ Pressure Switch แบบ On-Off ควบคุมการทำงานของหัวเผาหรือการป้อนเชื้อเพลิงแข็งแบบอัตโนมัติป้อนเชื้อเพลิงตามเวลาที่กำหนด หรือให้หัวเผาทำงานเมื่อความดันไอน้ำต่ำและปิดการทำงานเมื่อความดันไอน้ำสูง มีการใช้พัดลมอัดอากาศเข้าผสมกับเชื้อเพลิง และใช้พัดลมดูดอากาศที่ปล่องไอเสียเพื่อให้มีอากาศเพียงพอต่อการเผาไหม้ ส่วนการควบคุมระดับน้ำ ใช้ลูกลอยหรือแท่งอิเลคโทรด ควบคุมการเปิด-ปิด การทำงานของปั๊มน้ำ เมื่อระดับน้ำในหม้อน้ำต่ำและสูง การควบคุมคุณภาพน้ำสำหรับหม้อน้ำ มีระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ ขจัดสารแขวนลอย ขจัดความกระด้าง มีการไล่อากาศออกจากน้ำ มีการเติม

สารเคมีเพื่อป้องกันตะกรัน ปรับ pH และป้องกันสนิม มีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเฉลี่ยเดือนละครั้ง มีเปิดวาล์วระบายน้ำใต้หม้อน้ำโดยการตั้งเวลา ตามคำแนะนำของผู้จำหน่ายเคมี ในด้านของการควบคุมมลภาวะมีอุปกรณ์บำบัดมลภาวะ เน้นการป้องกันที่ปล่องไอเสียมากกว่าการลดมลภาวะที่ระบบการเผาไหม้ ส่วนการตรวจและบันทึกการใช้งาน เน้นจดบันทึกการใช้งานชั่วโมงละครั้ง เช่น ระดับน้ำในหลอดแก้ว ความดันใช้งาน



ภาพที่ 2-9 Boiler 2.0 เป็นหม้อน้ำที่ควบคุมอัตโนมัติแบบเปิด-ปิด (On-Off Control)

ข้อดี/ข้อเสีย

1) การเดินเครื่องเป็นแบบ on-off อุณหภูมิในห้องเผาไหม้มีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร

2) สามารถลดการเกิด Over Pressure ของไอน้ำลดน้อยลงได้

3) สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในขณะจุดเตาใหม่ และสูญเสียความร้อนจากการ Pre-Purge, Post Purge

4) ไอเสียมีมลภาวะสูง มีขี้เถ้าและเขม่าสะสมที่ Heating Surface เร็ว ต้องหยุดแยงเขม่าบ่อยๆ เสียโอกาสการผลิต

5) การวิเคราะห์ไอเสีย เพื่อปรับส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศให้เหมาะสมอาจทำ เพียงปีละ 1-4 ครั้ง ถ้าอุปกรณ์สกปรกหรือมีเขม่าสะสมมาก อากาศส่วนเกินอาจลดลงจนเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดต่ำลง

6) วัสดุที่สัมผัสไฟเกิดการล้าจากอุณหภูมิ (Thermal Fatigue) ที่เปลี่ยนไปมาได้ง่าย

7) มีการผลิตไอน้ำไม่สม่ำเสมอ ความดันไอน้ำที่สูงและต่ำ ส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่แน่นอน

8) ระดับน้ำในหม้อน้ำมีการเปลี่ยนแปลง สูงและต่ำ สลับไปมา

9) การเติมน้ำแต่ละครั้งมีจำนวนมาก ทำให้อุณหภูมิของน้ำในหม้อน้ำลดลง น้ำในหม้อน้ำอาจหยุดเดือดชั่วขณะ ทำให้ระดับน้ำในหม้อน้ำยุบตัวลง จนถึงจุดที่สัญญาณเตือนน้ำแห้งทำงาน และหัวเผาตัดการเผาไหม้เชื้อเพลิง และต้องรอจนกว่าระดับน้ำจะสูงขึ้นสู่ระดับปกติ จึงจะสตาร์ทหัวเผาได้

10) การใช้สัญญาณจากระดับน้ำอย่างเดียว มีความเสี่ยงสูงจากการทำงานผิดพลาดของลูกลอยหรืออิเลคโทรด ทำให้หม้อน้ำมีโอกาส Overheat จากน้ำแห้ง

11) มีความเสี่ยงจาก Carry Over , Water Hammer

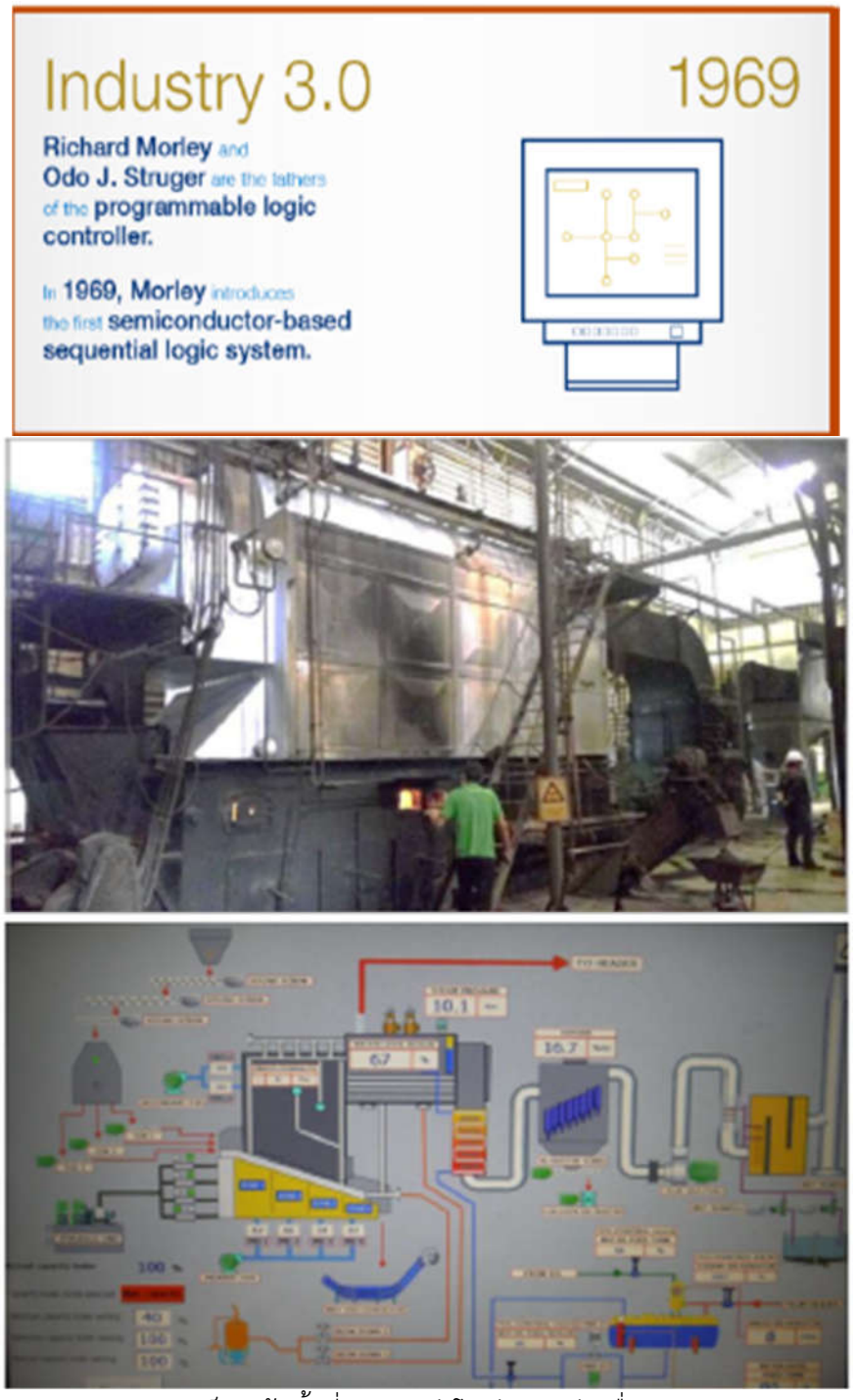
12) มีสถิติการระเบิดของหม้อน้ำค่อนข้างสูง

13) มีความเสี่ยงจากคุณภาพน้ำลดน้อยลง แต่ถ้าการดูแลระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำป้อนและน้ำในหม้อน้ำไม่ดีพอ ยังมีความเสี่ยงที่จะทำให้หม้อน้ำเกิดความเสียหายในรูปแบบต่างๆ เช่น การ Overheat จากตะกรันหนา โคลนมาก อุปกรณ์ตรวจวัดและอุปกรณ์ความปลอดภัยชำรุดอุดตัน การผุกร่อน (Corrosion) ด้านสัมผัสน้ำ (Water Side), การกัดกร่อน (Erosion)

14) ด้านการควบคุมสภาวะพบว่า สามารถควบคุมมลภาวะได้พอสมควร

2.10.1.3 Boiler 3.0: ควบคุมอัตโนมัติแบบต่อเนื่อง (Modulating Control)

จากภาพที่ 10 แสดงลักษณะ Boiler 3.0 หม้อน้ำลักษณะนี้มีการควบคุมความดันไอน้ำ และการเผาไหม้เชื้อเพลิง ใช้ Pressure Transmitter ควบคุมการทำงานของหัวเผาหรือป้อนเชื้อเพลิงแข็งแบบต่อเนื่อง โดยเร่งหรี่อัตโนมัติ เพื่อรักษาความดันไอน้ำให้คงที่ การควบคุมระดับน้ำ ใช้ Level Transmitter, Steam Flow Transmitter, Pressure Transmitter เพื่อควบคุมอัตราการป้อนน้ำแบบต่อเนื่องและรักษาระดับน้ำในหม้อน้ำให้คงที่ ส่วนการควบคุมคุณภาพน้ำสำหรับหม้อน้ำ มีระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ ขจัดสารแขวนลอย ขจัดความกระด้าง ที่มีระบบฟื้นฟูอัตโนมัติ ตามเวลาที่ตั้งไว้ มีการไล่อากาศออกจากน้ำ การเติมสารเคมีเพื่อป้องกันตะกรัน ปรับ pHและป้องกันสนิม การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทุกช่วงเวลา มีการระบายน้ำใต้หม้อน้ำอัตโนมัติ โดยการตั้งเวลาการระบายน้ำผิวน้ำอัตโนมัติ ทำงานด้วย Conductivity Sensor และมีการควบคุมและติดตามผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำโดยผู้เชี่ยวชาญ ในขณะที่มีการควบคุมมลภาวะดีขึ้น การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดมลภาวะจากการเผาไหม้ได้ดี มีอุปกรณ์บำบัดมลภาวะที่มีประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 2-10 Boiler 3.0 เป็นหม้อน้ำที่ควบคุมอัตโนมัติแบบต่อเนื่อง (Modulating Control)

ข้อดี/ข้อเสีย

1) ความดันไอน้ำและอุณหภูมิของห้องเผาไหม้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ

2) ส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง สามารถเร่ง-หรี่ ตามกันอย่างต่อเนื่องประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ในเกณฑ์ดีตลอดเวลา

3) เหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสม่ำเสมอ ถ้าคุณภาพเชื้อเพลิงไม่แน่นอน อาจเกิดสภาวะ Lean – Rich Mixture ส่งผลให้ให้เปลวไฟดับ จนอาจเกิดการระเบิดในห้องเผาไหม้หรือเกิดควันดำได้

4) ไอเสียมีมลภาวะลดลง การวิเคราะห์ไอเสียเพื่อปรับส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศให้เหมาะสมยังไม่ ต่อเนื่อง ถ้าอุปกรณ์สกปรกหรือมีเขม่ามาก อากาศส่วนเกินอาจเปลี่ยนแปลง จนเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

5) ป้องกันการล้าจากอุณหภูมิ (Thermal Fatigue) ได้ดี

6) ความดันไอน้ำที่สม่ำเสมอ คุณภาพของผลิตภัณฑ์สม่ำเสมอ

7) ป้องกันหรือลดการกัดกร่อนของเชื้อเพลิงหรือก๊าซร้อนต่อผิวสัมผัสความร้อนได้ดีขึ้น

8) ระดับน้ำในหม้อน้ำค่อนข้างคงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ

9) การเติมน้ำเข้าหม้อน้ำทำได้อย่างสม่ำเสมอ (Continuous Feed Water) ทำให้อุณหภูมิของน้ำในหม้อน้ำคงที่ เกิดไอน้ำได้สม่ำเสมอต่อเนื่อง

10) การใช้สัญญาณ 3 Element Control จากระดับน้ำ อัตราการจ่ายไอน้ำ และความ ดันไอน้ำ มาควบคุมอัตราการป้อนน้ำเข้าหม้อน้ำ ช่วยเพิ่มเสถียรภาพในการทำงาน ป้องกันการเกิด Overheat จากน้ำแห้งได้ดี

11) สามารถป้องกันการเกิด Carry Over และ Water Hammer ได้ดี

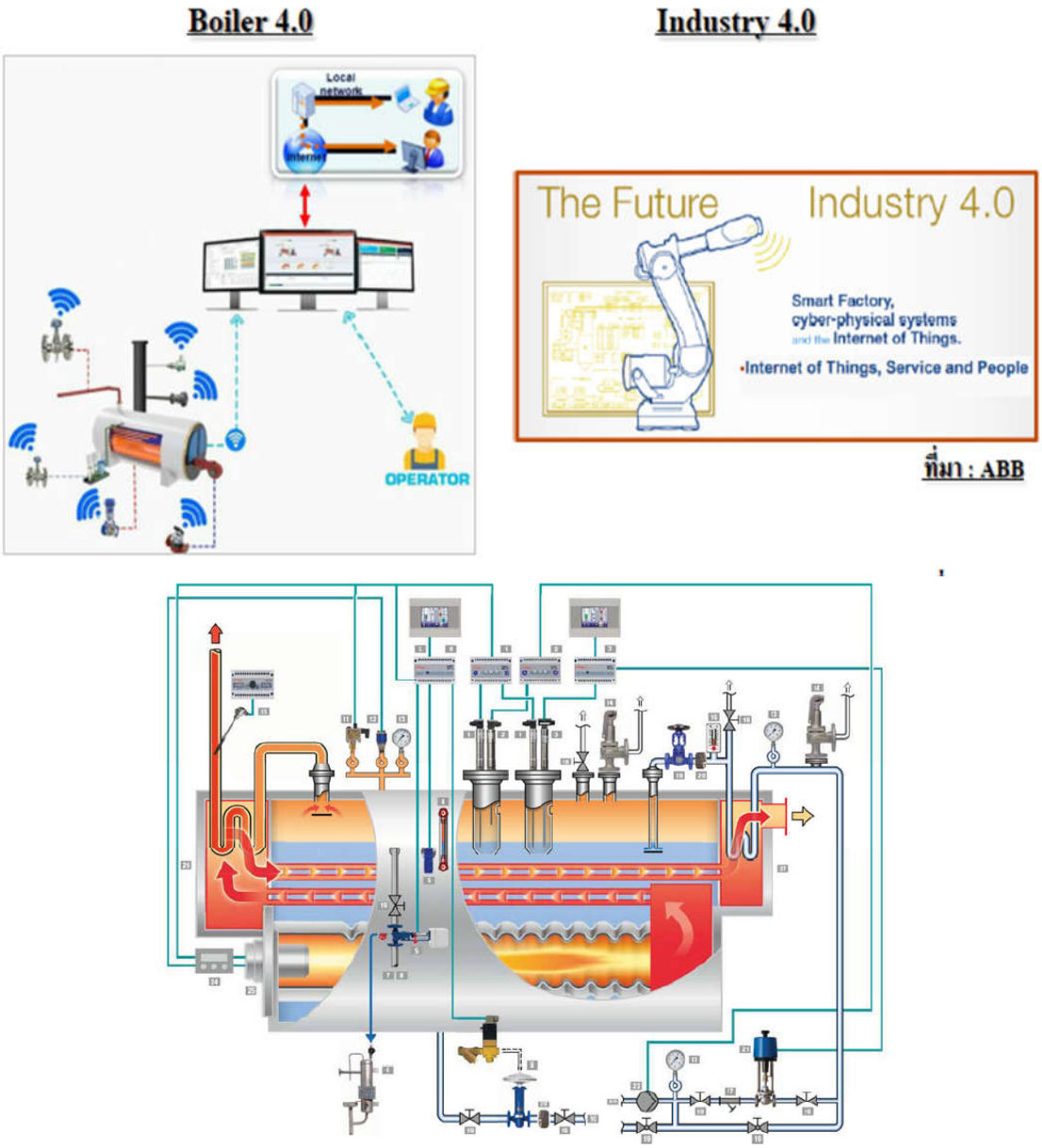
12) หม้อน้ำมีความปลอดภัยสูง

13) หากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำเสื่อมสภาพ การฟื้นฟูตามเวลาที่ตั้งไว้ อาจได้คุณภาพน้ำที่ไม่เหมาะกับหม้อน้ำ

14) ลดความเสี่ยงของหม้อน้ำ จากความเสียหายในรูปแบบต่างๆ ได้มาก

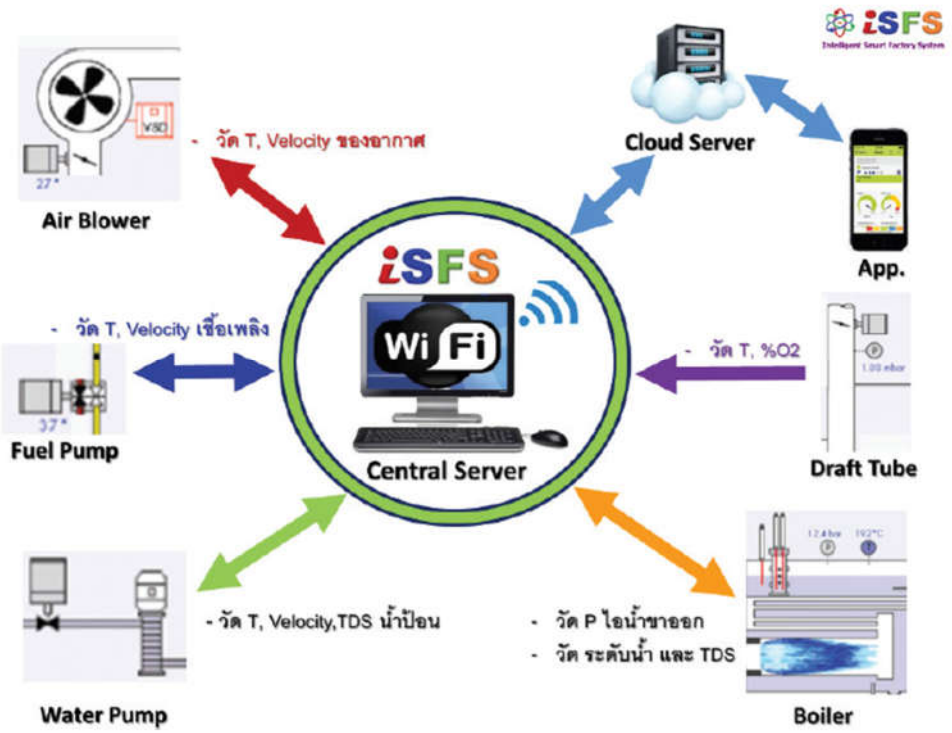
2.10.1.4 Boiler 4.0: Real Time Automatic Control by Transmitter, PLC, Scada, Monitor & Record, Internet of Thing

สมาร์ทบอยเล่อร์ (Smart Boiler) แสดงดังภาพที่ 12 มีลักษณะและรูปแบบการใช้งานที่มีการควบคุมและบันทึกผลแบบต่อเนื่องเต็มรูปแบบ ภาระการใช้งานคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ระบบควบคุมการทำงานของหัวเผาหรืออุปกรณ์การเผาไหม้เป็นแบบต่อเนื่องเต็มรูปแบบ ระบบควบคุมระดับน้ำในหม้อน้ำเป็นแบบต่อเนื่องเต็มรูปแบบมีการควบคุมและติดตามผลคุณภาพน้ำและ Condensate ที่นำกลับเข้าระบบโดยผู้เชี่ยวชาญอย่างใกล้ชิด มีผลบันทึกการใช้งานของหม้อน้ำและอุปกรณ์ตลอดเวลาใช้งานมีระบบการติดตามสภาวะการใช้งานเป็นแบบอัตโนมัติทั้งแบบต่อเนื่องและแบบขณะใช้งานเต็มรูปแบบ มีระบบการควบคุมและบันทึกผล การกระจายตัวของความร้อนขณะเปลี่ยนภาระที่มีประสิทธิภาพ ทุกชิ้นส่วนอุปกรณ์ ได้รับการควบคุมการใช้งานเพื่อไม่ให้อยู่ในช่วงการเกิดการคืบ (Creep)

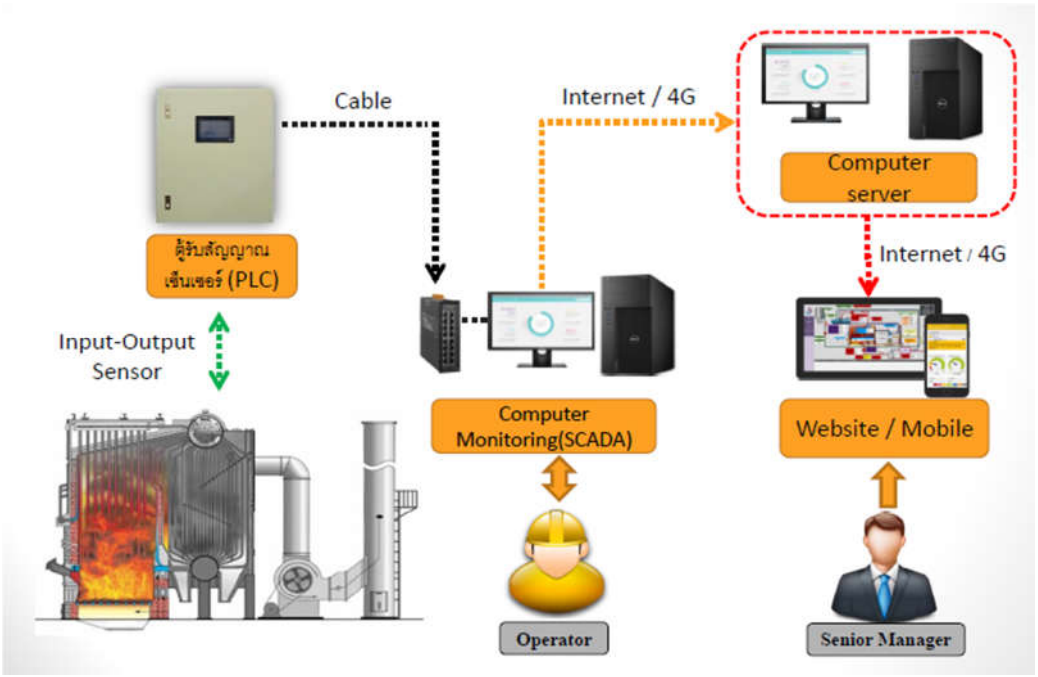


ภาพที่ 2-11 สมาร์ทบอยเล่อร์ (Smart Boiler) เป็นหม้อน้ำแบบ Real Time Automatic Control by Transmitter, PLC, Scada, Monitor & Record, Internet of Thing

Smart Boiler มีการเชื่อมโยงระบบ IoT กับ หม้อน้ำ เพื่อติดตามและควบคุมการทำงาน โดยติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศที่ Air Blower, Fuel Pump, น้ำป้อนและติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความดันไอน้ำขาออกและระดับน้ำที่ Boiler รวมทั้งติดตั้งเซ็นเซอร์วัด TDS ที่น้ำป้อนและ Boiler ส่วนที่ Draft Tube จะติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และ %CO_2 โดยเซ็นเซอร์ทั้งหมดจะส่งข้อมูลไปที่ Server และเมื่อทำการส่งข้อมูลต่อไปให้พนักงานที่เกี่ยวข้องแบบ Real Time ภาพรวมของระบบแสดงดงภาพที่ 12 และมีโครงสร้างการทำงานของระบบ Smart Boiler Monitoring System แสดงดังภาพที่ 13

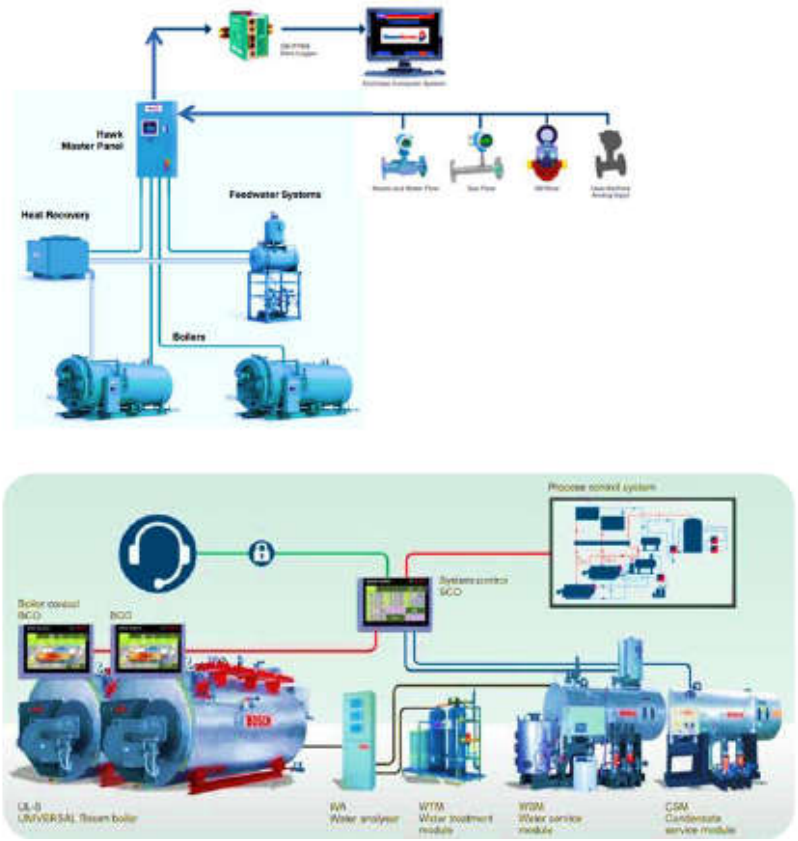


ภาพที่ 2-12 ภาพรวมการเชื่อมโยงหม้อน้ำกับระบบ IoT ที่เป็นแนวทางของ Smart Boiler [2]

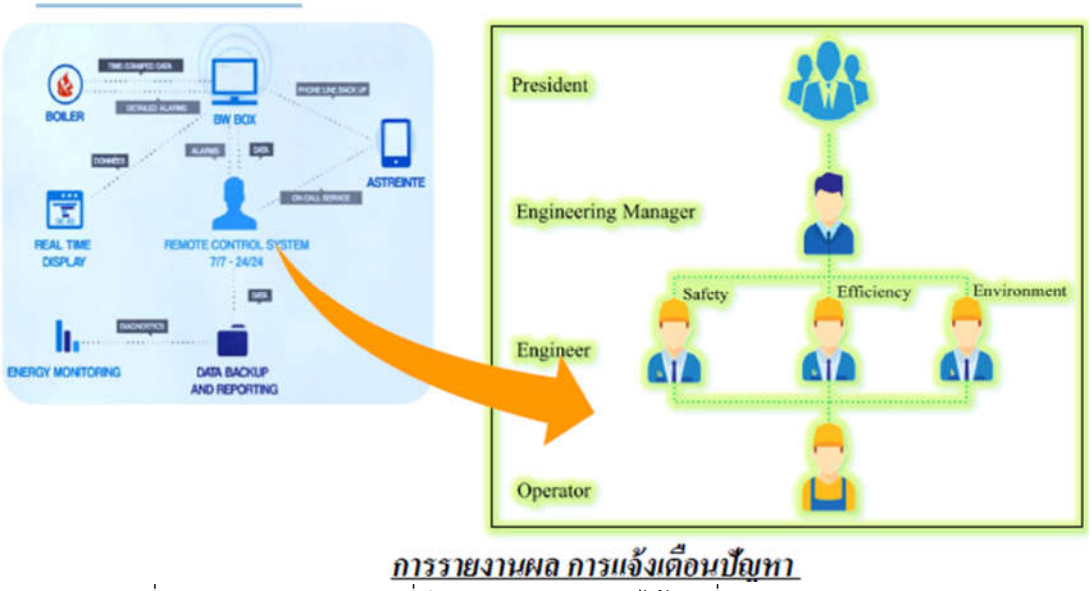


ภาพที่ 2-13 โครงสร้างการทำงานของระบบ Smart Boiler Monitoring System [3]

Smart Boiler มีระบบ Smart Boiler Control และ Smart Boiler Monitoring ซึ่งอุปกรณ์หลักของตู้ควบคุมไฟฟ้า (Control Cabinet) คือ PLC (Programmable Logic Control) เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของหม้อน้ำหรือหม้อน้ำมันร้อนและหัวเผา โดยภายในมี Microprocessor เป็นสมองสั่งการที่สำคัญรับสัญญาณจากอุปกรณ์ควบคุม และอุปกรณ์ความปลอดภัยต่างๆ เพื่อประมวลผลและสั่งการทำงานได้แบบอัตโนมัติ ซึ่งผู้ควบคุมสามารถสร้างรูปแบบของการควบคุมได้โดยการป้อนโปรแกรมคำสั่งที่แสดงผลผ่านทาง Touch Screen สามารถเชื่อมต่อกับ Computer เข้าสู่ระบบ SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ซึ่งเป็นระบบตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Real – Time ใช้ในการตรวจสอบสถานะ ควบคุมการทำงานของระบบหม้อน้ำ และอุปกรณ์อื่นๆ ทั้งระบบได้ โดยส่งสัญญาณข้อมูลและแสดงผลไปยังศูนย์ควบคุมส่วนกลางแสดงดังภาพที่ 15 ระบบเหล่านี้จะช่วยให้หม้อน้ำ สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย มีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อีก ทั้งจะช่วยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของหม้อน้ำ สามารถเข้าถึงข้อมูลการใช้งาน ได้ง่ายมากขึ้น เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ปัญหา และแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็ว มีระบบที่เชื่อมต่ออุปกรณ์การวัดด้านความปลอดภัย พลังงาน และสิ่งแวดล้อมของหม้อน้ำทั้งหมด แสดงผลข้อมูลการวัดแบบ Data Visualization จะทำให้ข้อมูลเชิงปริมาณดูน่าสนใจ เข้าใจง่าย เห็นภาพรวมได้ชัดเจน แสดงดังภาพที่ 15



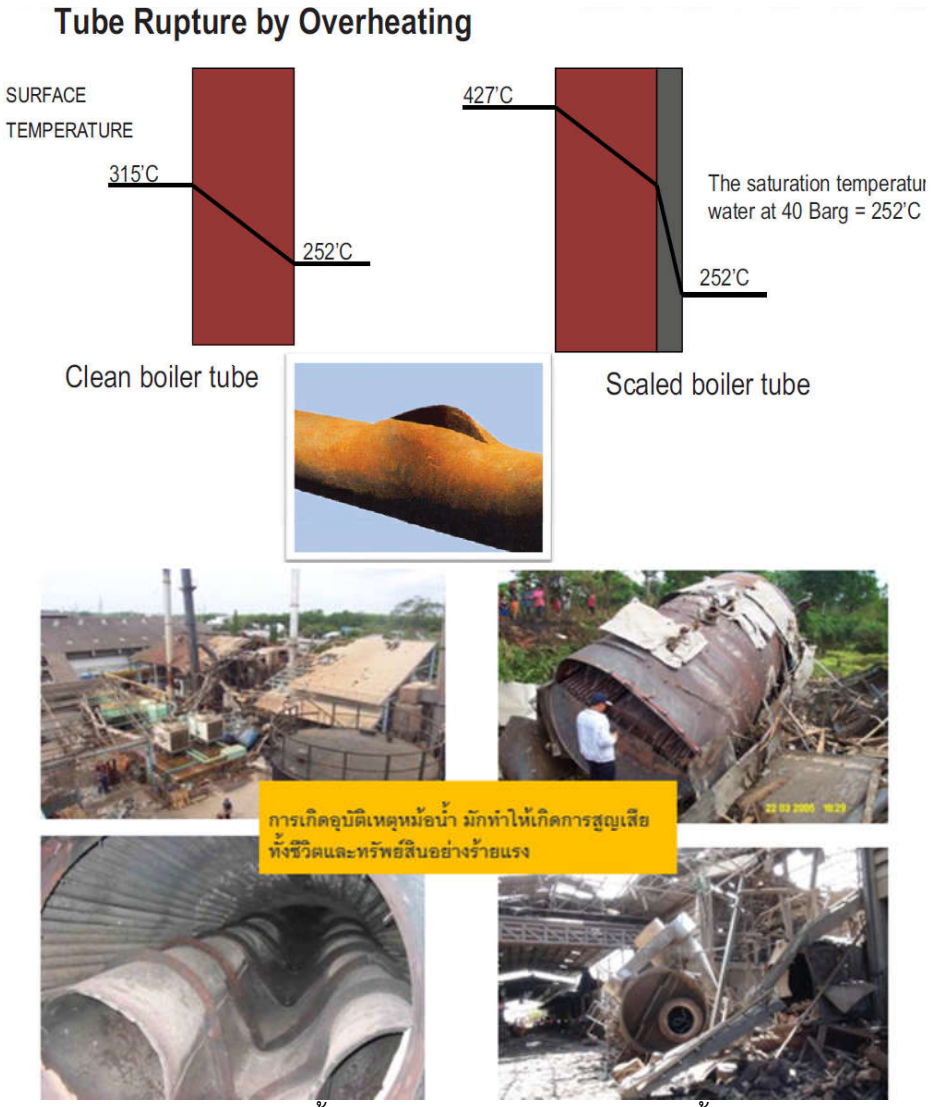
ภาพที่ 2-14 Smart Boiler Control และ Smart Boiler Monitoring [3]



ภาพที่ 2-15 Smart Boiler ที่มีการการรายงานผลได้ทุกที่ทุกเวลาและทุกคน [3]

2.10.3 ปัญหาจากการใช้หม้อน้ำธรรมดาและแนวทางแก้ไขสู่Smart Boiler

(1) ปัญหาจากการใช้หม้อน้ำธรรมดา: การเกิดตะกรันในหม้อน้ำ มีปัญหาด้านประสิทธิภาพ อุบัติเหตุและความเสียหายแสดงดังภาพที่ 16 สาเหตุเกิดจาก ความเสี่ยงจากคุณภาพน้ำไม่ดี การดูแลระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำป้อนและน้ำในหม้อน้ำไม่ดีพอ ยังมีความเสี่ยงที่จะทำให้หม้อน้ำเกิดความเสียหายในรูปแบบต่างๆ เช่น การOverheat จากตะกรันหนา โคลนมาก อุปกรณ์ตรวจวัดและอุปกรณ์ความปลอดภัยชำรุดอุดตัน การผุกร่อน (Corrosion) ด้านสัมผัสน้ำ (Water Side), การกัดกร่อน (Erosion) จนเกิดการระเบิดของหม้อน้ำ



ภาพที่ 2-16 ปัญหาจากการใช้หม้อน้ำธรรมดา: การเกิดตะกรันในหม้อน้ำ มีปัญหาด้านประสิทธิภาพหม้อน้ำ อุบัติเหตุและความเสียหาย [4]

แนวทางการตรวจวัดควบคุมปัจจัยสู่การพัฒนาสู่ Smart Boiler
- ตรวจวัดและควบคุมคุณภาพน้ำ
- ควบคุมอัตราการ BD ให้เหมาะสม
- ตรวจวัดและแจ้งเตือนอุณหภูมิก๊าซไอเสีย
- ตรวจวัดและแจ้งเตือนความหนาตะกรัน

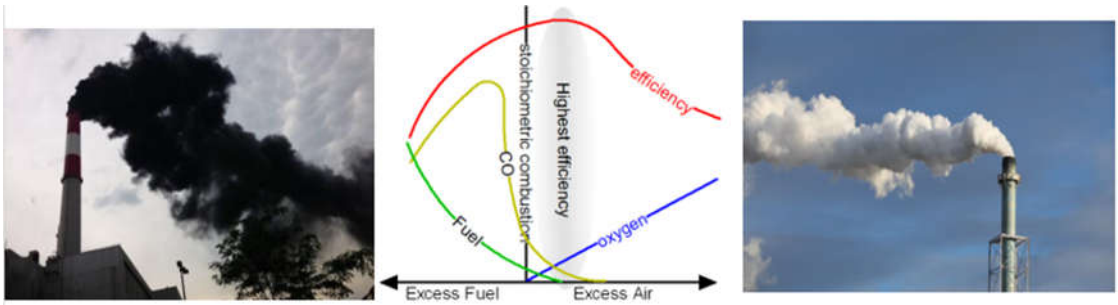
(2) ปัญหาจากการใช้หม้อน้ำธรรมดา: คุณภาพการเผาไหม้ไม่ดี แสดงดังภาพที่ 17 สาเหตุเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สัดส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ไม่เหมาะสมมีขี้เถ้าและเขม่าสะสมที่ Heating Surface เร็ว ต้องหยุดแยงเขม่าบ่อยๆ เสียโอกาสการผลิต ตรวจวัดอุณหภูมิ

ก๊าซไอเสียสูง เนื่องจากเกิดจากเขม่าและฝุ่นละอองเถ้าไปเกาะติดพื้นที่ผิวรับความร้อน ทำให้ความร้อนจากก๊าซไอเสียไม่สามารถส่งถ่ายไปยังอุปกรณ์รับความร้อนได้อย่างเต็มที่

ภาพที่ 2-17 ปัญหาจากการใช้หม้อน้ำธรรมดา: คุณภาพการเผาไหม้ไม่ดี [4]

แนวทางการตรวจวัดควบคุมปัจจัยสู่การพัฒนาสู่ Smart Boiler
- ตรวจวัดและแจ้งเตือนอุณหภูมิก๊าซไอเสีย
- ตรวจวัด O2 เพื่อปรับแต่งการเผาไหม้ให้เหมาะสม

(3) ปัญหาจากการใช้หม้อน้ำธรรมดา: ไม่มีการควบคุมการเผาไหม้ ทำให้เกิดมลพิษสูงสิ้นเปลืองต้นทุนพลังงาน แสดงดังภาพที่ 18 หม้อน้ำธรรมดาจะไม่สามารถทราบถึงปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศที่เหมาะสมอีกทั้งไม่สามารถควบคุมได้ มีการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในขณะจุดเตาใหม่ และสูญเสียความร้อนจากการ Pre-Purge, Post Purge



ภาพที่ 2-18 ปัญหาจากการใช้หม้อน้ำธรรมดา: ไม่มีการควบคุมการเผาไหม้ [5]

แนวทางการตรวจวัดควบคุมปัจจัยสู่การพัฒนาสู่ Smart Boiler

- ตรวจวัดและแจ้งเตือนอุณหภูมิก๊าซไอเสีย
- ตรวจวัด O2 เพื่อปรับแต่งการเผาไหม้ให้เหมาะสม

2.10.4 ระบบต่างของ Smart Boiler

1) ระบบป้อนเชื้อเพลิงที่สามารถควบคุมได้ตามการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนได้ตามภาระการใช้ไอน้ำ

2) ระบบปั๊มน้ำที่สามารถเปลี่ยนแปลงอัตราการการป้อนได้ตามภาระการใช้ไอน้ำ

3) ระบบควบคุมความดันที่สามารถเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนได้ตามภาระการใช้ไอน้ำ

4) อุปกรณ์วัดและควบคุมอุณหภูมิและความดันในห้องเผาไหม้ และในบริเวณที่ออกจากหม้อน้ำ

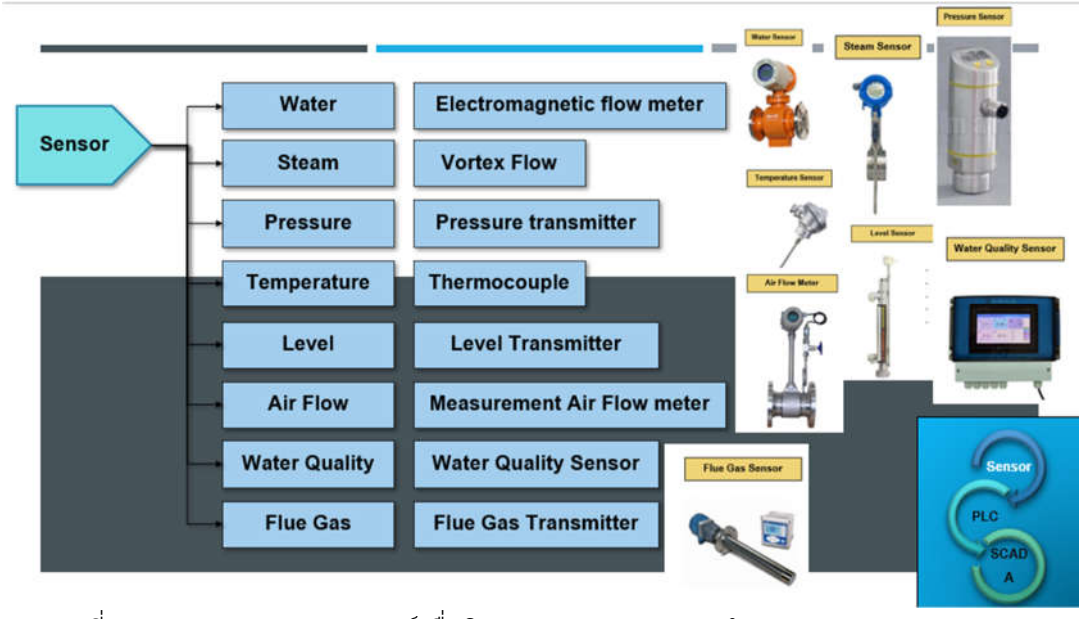
5) ระบบอากาศที่สามารถควบคุมได้ตามการเปลี่ยนแปลงอัตราการการป้อนได้ตามภาระการใช้ไอน้ำ

6) อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซไอเสียและส่งสัญญาณกลับเพื่อควบคุมการทำงานของหม้อน้ำ

7) อุปกรณ์วัดและควบคุมคุณภาพของน้ำป้อนและน้ำในหม้อน้ำ

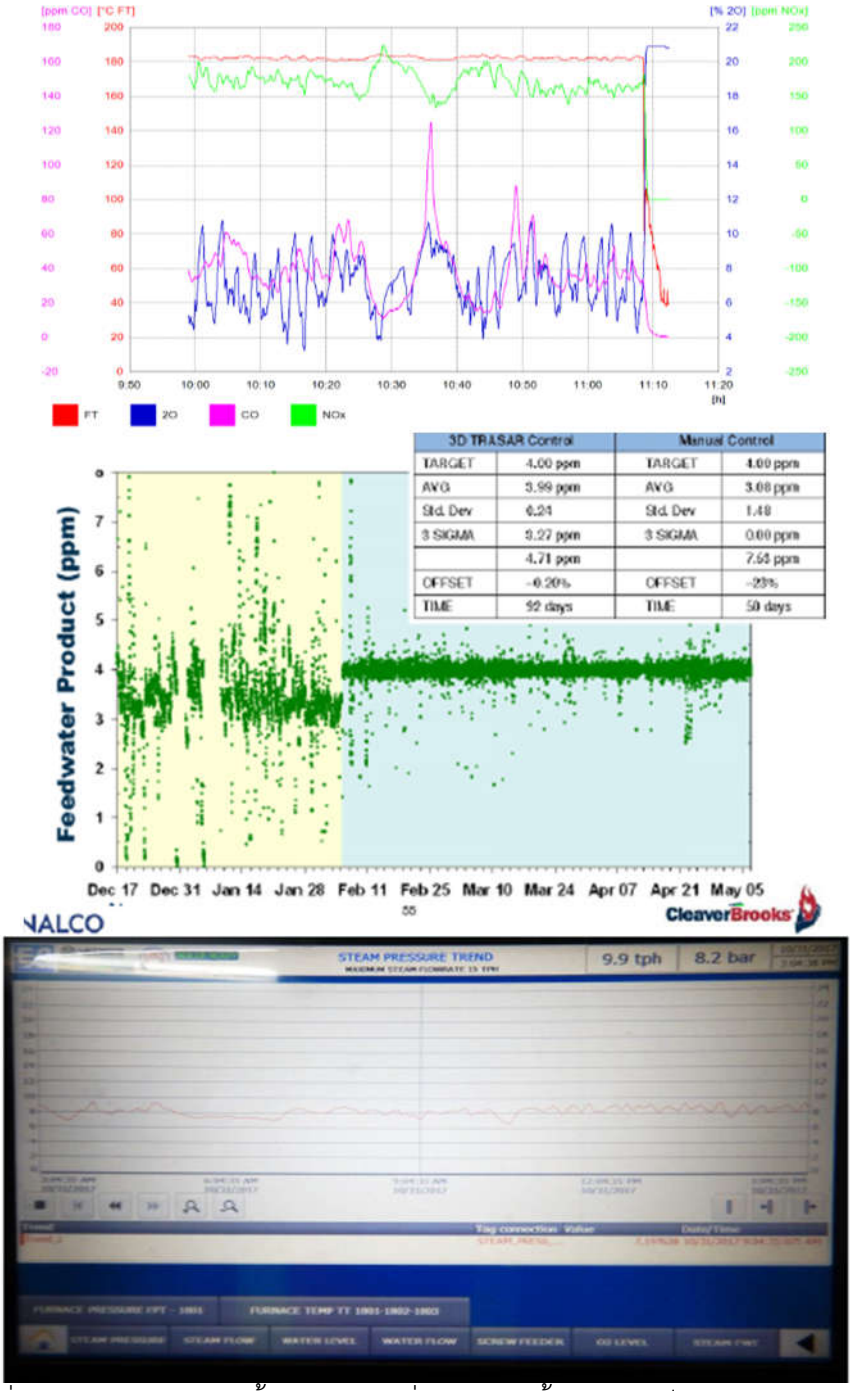
8) ระบบควบคุมการระบายน้ำโบล์วดาวน์แบบอัตโนมัติ

โดยระบบดังกล่าวต้องมีการติดตั้งเซนเซอร์เพื่อติดตามและควบคุมการทำงาน โดยติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศที่ Air Blower, Fuel Pump, น้ำป้อนและติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความดันไอน้ำขาออกและระดับน้ำที่ Boiler รวมทั้งติดตั้งเซ็นเซอร์วัด TDS ที่น้ำป้อนและ Boiler ส่วนที่ Draft Tube จะติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และ % CO_2 โดยเซ็นเซอร์ทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 19



ภาพที่ 2-19 ภาพรวมของเซนเซอร์เพื่อติดตามและควบคุมการทำงานของ Smart Boiler [6]

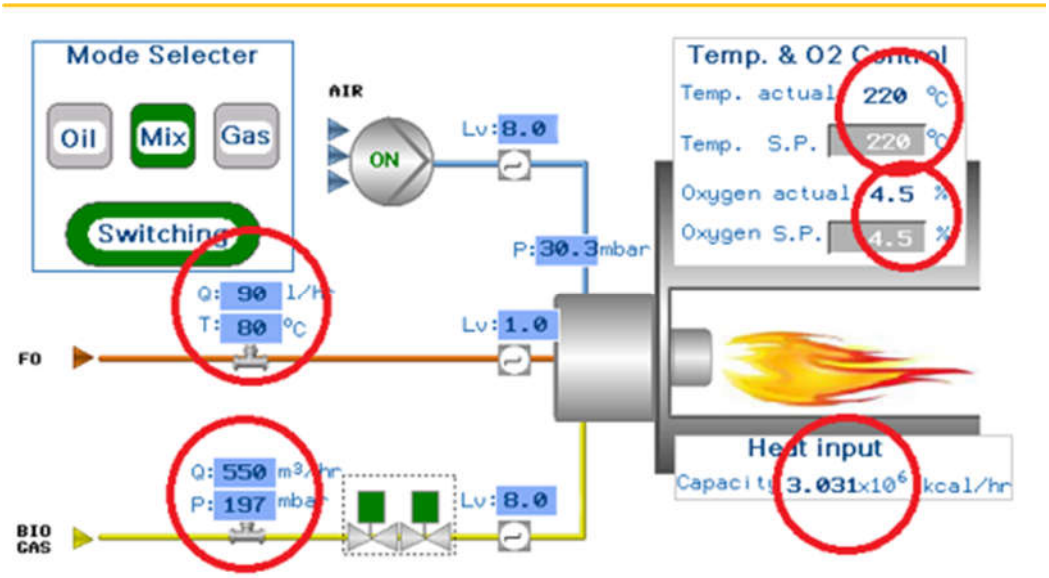
ผลลัพธ์จากการติดตั้งเซนเซอร์เปลี่ยนให้หม้อน้ำธรรมดาเป็น Smart Boiler เช่น เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มีการกระจายตัวทั่วห้องเผาไหม้ ผลิตไอน้ำได้ความดันไอน้ำสม่ำเสมอ ปริมาณเพียงพอต่อการใช้งาน มลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ต่ำ สามารถควบคุมคุณภาพน้ำในหม้อน้ำได้ ส่งให้หม้อน้ำไม่ระเบิด เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 2-20 ผลลัพธ์การติดตั้งเซนเซอร์เปลี่ยนให้หม้อน้ำธรรมดาเป็น Smart Boiler [5]

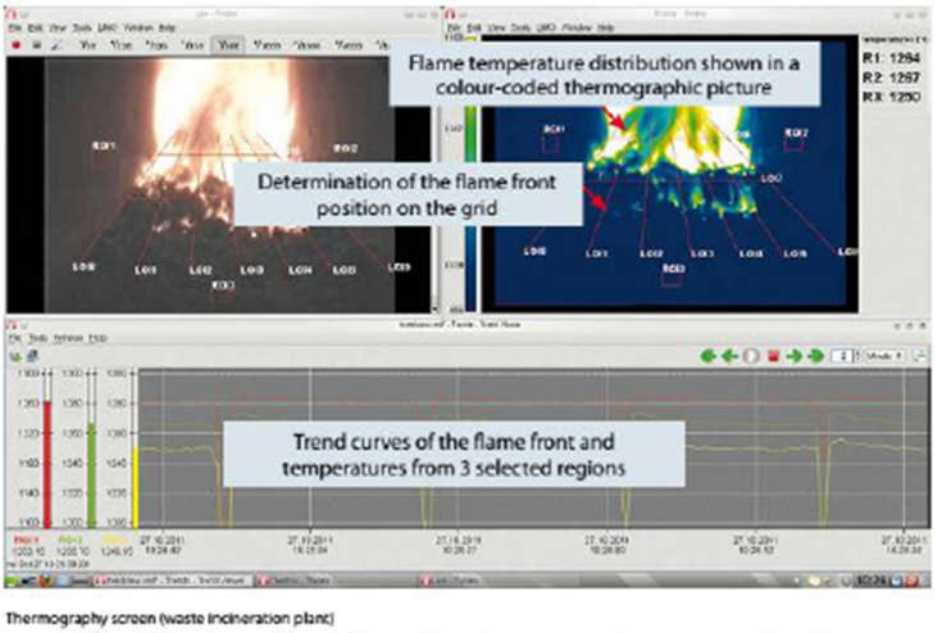
2.10.5 ตัวอย่างกรณีศึกษา Smart Boiler

1) การใช้อุปกรณ์วัดปริมาณออกซิเจน (Oxygen Sensor) ที่เหลือจากการเผาไหม้ส่งสัญญาณมาประมวลผลด้วย PLC และ ใช้ Servo Motor แยกควบคุมปริมาณน้ำมัน ก๊าซชีวภาพและอากาศแบบอัตโนมัติ เพื่อให้ได้ค่าความร้อนในการเผาไหม้ที่เหมาะสม เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ตลอดเวลา เพื่อประสิทธิภาพสูงสุด ความปลอดภัยสูงสุด และมลภาวะต่ำสุด ตลอดเวลา แสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 2-21 ใช้อุปกรณ์วัดปริมาณออกซิเจน (Oxygen Sensor) ที่เหลือจากการเผาไหม้ [1]

2) ใช้เทคโนโลยีตรวจจับภาพ (Image Processing) การตรวจวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้ตลอดระยะเวลาที่มีการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิต แสดงดังภาพที่ 22 ดังนั้นผู้ควบคุมจะสามารถควบคุมคุณภาพการเผาไหม้และการตัดต่อหม้อน้ำได้อย่างอัตโนมัติ หากความดันไอน้ำมีค่าต่ำกว่าการใช้งาน หม้อน้ำจะแสดงสภาวะการเผาไหม้ด้านในให้เห็นปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้และสามารถเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงและอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อเร่งการผลิตไอน้ำได้อย่างอัตโนมัติ



ภาพที่ 2-22 ตรวจวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้ตลอดระยะเวลาที่มีการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิต [3]

3) การประยุกต์ใช้ Smart Boiler Monitoring Systems นำมาประเมินศักยภาพในการปรับปรุงระบบการเผาไหม้และประเมินศักยภาพในการปรับปรุงประสิทธิภาพหม้อน้ำ แสดงดังภาพที่ 23 จากภาพแสดงผลการตรวจวัดก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ภายในหม้อน้ำเชื้อเพลิงแข็งก่อนการปรับปรุงเป็นหม้อน้ำแบบธรรมดาพบว่าปริมาณ O_2 และ CO มีค่าสูงเท่ากับ 13.3% และ 1,460 ppm ตามลำดับ ในขณะที่หากหม้อน้ำได้รับการปรับปรุงด้วยการตรวจวัดปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้และส่งข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ผลไปควบคุมการป้อนอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ ตามแนวทางการพัฒนาหม้อน้ำสู่ Smart Boiler หลังการปรับปรุงพบว่า ปริมาณ O2 และ CO มีค่าลดลงเท่ากับ 8.4% และ 289.37 ppm ตามลำดับ เมื่อนำไปคำนวณหาความสูญเสียตามมาตรฐาน JIS B8222 พบว่า กรณีก่อนการปรับปรุงความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซไอเสียและความร้อนสูญเสียไปกับการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มีค่าเท่ากับ 19.38 % และ 1.38 % ตามลำดับ ในขณะที่กรณีหลังการปรับปรุงความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซไอเสียและความร้อนสูญเสียไปกับการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มีค่าลดลงเหลือ 14.77 % และ 0.15 % ตามลำดับ เมื่อคำนวณเป็นประสิทธิภาพหม้อน้ำทางอ้อมกรณีก่อนการปรับปรุงมีประสิทธิภาพหม้อน้ำเท่ากับ 77.85% หลังการปรับปรุงมีประสิทธิภาพหม้อน้ำเท่ากับ 83.59% พบว่ากรณีหลังปรับปรุงประสิทธิภาพหม้อน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น 5.74 % คิดเป็นผลประหยัดได้มูลค่าเท่ากับ 1,298,826 บาท/ปี

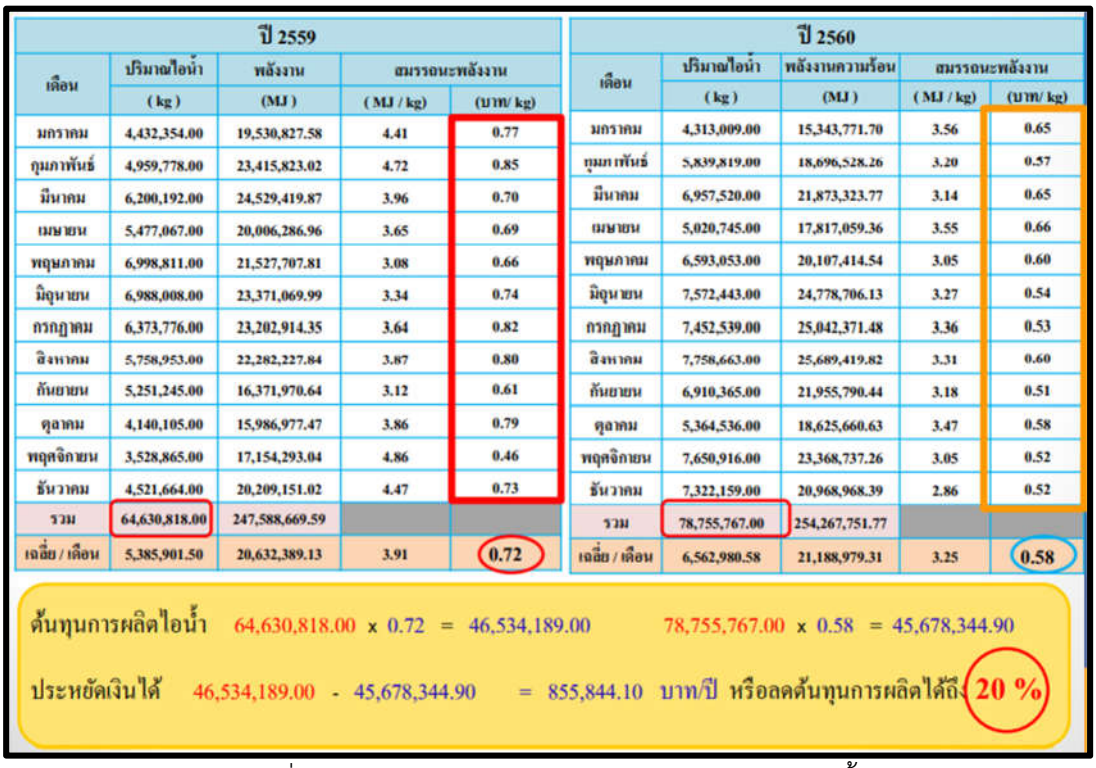
รายการคำนวณ	หน่วย	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
Excess oxygen	%	13.30	8.40
Carbon monoxide	ppm	1460	289.37
Exhaust gas Temperature	° C	161.52	164.16
Ambient Temperature	° C	39	39
Relative humidity	%	44	44

คำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ (HHV)	หน่วย	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
การสูญเสียความร้อนจากก๊าซไอเสีย (L1)	%	19.39	14.77
การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (L3)	%	1.28	0.15
การสูญเสียจากการกากคาร์บอน (L4)	%	0.05	0.05
การสูญเสียความร้อนทางพื้นผิวผนังหม้อน้ำ (L5)	%	0.25	0.25
การสูญเสียจากความชื้นเชื้อเพลิง (L7)	%	1.19	1.19
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ HHV (100 - L1 - L3 - L4 - L5 – L7)	%	77.85	83.59
ประสิทธิภาพอุปกรณ์ผลิตความร้อนเพิ่มขึ้น ($E\Pi_{b,2} - E\Pi_{b,1}$)	%	5.74	
การประหยัดพลังงาน ($(E\Pi_{b,2} - E\Pi_{b,1})/E\Pi_{b,2}$)	%	0.068	

สามารถประหยัดเป็นเงินได้ 1,298,826 บาท/ปี

ภาพที่ 2-23 การประยุกต์ใช้ Smart Boiler Monitoring Systems เพื่อประเมินการประหยัดพลังงานของหม้อน้ำ [5]

4) ตารางการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไอน้ำ หลังจากนำ Smart Boiler มาควบคุมการทำงาน แสดงดังภาพที่ 24 จากภาพเป็นการเปรียบเทียบต้นทุนไอน้ำรายเดือนของหม้อน้ำแบบธรรมดา ในปี 2559 กับต้นทุนไอน้ำรายเดือนของหม้อน้ำแบบ Smart ในปี 2560 พบว่า ทุกๆ เดือนต้นทุนไอน้ำของหม้อน้ำแบบ Smart ในปี 2560 มีค่าน้อยกว่าต้นทุนไอน้ำรายเดือนของหม้อน้ำแบบธรรมดา คิดเป็นค่าเฉลี่ยต้นทุนไอน้ำของหม้อน้ำแบบ Smart ในปี 2560 มีค่าน้อยกว่าในปี 2559 เท่ากับ 0.14 บาทต่อกิโลกรัม เมื่อคำนวณเป็นผลประหยัดพบว่าการพัฒนาหม้อน้ำเป็นแบบ Smart สามารถประหยัดต้นทุนไอน้ำได้เท่ากับ 855,844.1 บาทต่อปี หรือลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 20%



ปี 2559					ปี 2560				
เดือน	ปริมาณไอน้ำ (kg)	พลังงาน (MJ)	สมรรถนะพลังงาน (MJ / kg)	(บาท/ kg)	เดือน	ปริมาณไอน้ำ (kg)	พลังงานความร้อน (MJ)	สมรรถนะพลังงาน (MJ / kg)	(บาท/ kg)
มกราคม	4,432,354.00	19,530,827.58	4.41	0.77	มกราคม	4,313,009.00	15,343,771.70	3.56	0.65
กุมภาพันธ์	4,959,778.00	23,415,823.02	4.72	0.85	กุมภาพันธ์	5,839,819.00	18,696,528.26	3.20	0.57
มีนาคม	6,200,192.00	24,529,419.87	3.96	0.70	มีนาคม	6,957,520.00	21,873,323.77	3.14	0.65
เมษายน	5,477,067.00	20,006,286.96	3.65	0.69	เมษายน	5,020,745.00	17,817,059.36	3.55	0.66
พฤษภาคม	6,998,811.00	21,527,707.81	3.08	0.66	พฤษภาคม	6,593,053.00	20,107,414.54	3.05	0.60
มิถุนายน	6,988,008.00	23,371,069.99	3.34	0.74	มิถุนายน	7,572,443.00	24,778,706.13	3.27	0.54
กรกฎาคม	6,373,776.00	23,202,914.35	3.64	0.82	กรกฎาคม	7,452,539.00	25,042,371.48	3.36	0.53
สิงหาคม	5,758,953.00	22,282,227.84	3.87	0.80	สิงหาคม	7,758,663.00	25,689,419.82	3.31	0.60
กันยายน	5,251,245.00	16,371,970.64	3.12	0.61	กันยายน	6,910,365.00	21,955,790.44	3.18	0.51
ตุลาคม	4,140,105.00	15,986,977.47	3.86	0.79	ตุลาคม	5,364,536.00	18,625,660.63	3.47	0.58
พฤศจิกายน	3,528,865.00	17,154,293.04	4.86	0.46	พฤศจิกายน	7,650,916.00	23,368,737.26	3.05	0.52
ธันวาคม	4,521,664.00	20,209,151.02	4.47	0.73	ธันวาคม	7,322,159.00	20,968,968.39	2.86	0.52
รวม	64,630,818.00	247,588,669.59			รวม	78,755,767.00	254,267,751.77		
เฉลี่ย / เดือน	5,385,901.50	20,632,389.13	3.91	0.72	เฉลี่ย / เดือน	6,562,980.58	21,188,979.31	3.25	0.58

ภาพที่ 2-24 ตารางการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไอน้ำ
หลังจากนำ Smart Boiler มาควบคุมการทำงาน [5]

2.10.6 ตัวอย่างมาตรการทางด้านพลังงานและความปลอดภัยเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาหม้อน้ำสู่ Smart Boiler [6]

การใช้งานหม้อน้ำและดูแลหม้อน้ำอย่างเหมาะสม จะช่วยให้เกิดการใช้งานหม้อน้ำอย่างมีประสิทธิภาพลดความสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับหม้อน้ำ ส่งผลเกิดการลดต้นทุนในการผลิตไอน้ำ ประหยัดทั้งเชื้อเพลิงและประหยัดน้ำที่ใช้สำหรับหม้อน้ำ วิธีการดูแลรักษาหม้อน้ำเพื่อให้เกิดการใช้งานหม้อน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ หลีกเลี่ยงการเกิดความสูญเสีย เช่นการทำความสะอาดพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน การปรับแต่งการเผาไหม้ให้เหมาะสม การดูแลฉนวนหม้อน้ำ การควบคุมปริมาณโบล์วดาวน์และการควบคุมการปลดปล่อยก๊าซไอเสีย จากการตรวจสอบประสิทธิภาพหม้อน้ำ ทำให้ทราบถึงผลของประสิทธิภาพของหม้อน้ำที่สอดคล้องกับความสูญเสียที่ตรวจวัดได้จริงหน้างาน ผลของประสิทธิภาพหม้อน้ำดังกล่าวมีส่วนช่วยให้สามารถกำหนดแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพหม้อน้ำและกำหนดมาตรการในการประหยัดพลังงานในหม้อน้ำ นำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพหม้อน้ำและการลดต้นทุนทางด้านพลังงานในหม้อน้ำ มาตรการประหยัดพลังงานในหม้อน้ำเป็นการคำนวณหาศักยภาพในการประหยัดพลังงานในหม้อน้ำที่โรงงานสามารถดำเนินการได้ ทั้งแบบไม่ต้องลงทุนเช่น มาตรการปรับแต่งการเผาไหม้ มาตรการลดอัตราการโบล์วดาวน์ หรือมาตรการที่ทางโรงงานต้องพิจารณาการลงทุนเพื่อการดำเนินมาตรการ เช่น มาตรการอุ่นอากาศหรืออุ่นน้ำป้อนและมาตรการ

ปรับปรุงฉนวนหม้อน้ำ เป็นต้น ในที่นี้ได้ทำการยกตัวอย่างมาตรการ พร้อมแนวทางปฏิบัติ ผลลัพธ์ที่ได้ทั้งด้านพลังงานและความปลอดภัย รวมถึงกรณีศึกษาที่แสดงผลการประหยัดต้นทุนไอน้ำ ดังนี้

1) มาตรการปรับแต่งการเผาไหม้อย่างเหมาะสม

ปัญหาที่ตรวจพบ : ตรวจพบปริมาณ O_2 และ CO สูงกว่าเกณฑ์ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องกำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. 2459

การลงทุน : ไม่ต้องมีการลงทุนสามารถดำเนินการได้ทันที

แนวทางปฏิบัติ : ปรับลดปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่หม้อน้ำปรับเพิ่มสัดส่วนอากาศเหนือตะกรับให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มโอกาสในการเผาไหม้ของก๊าซไอเสียจำพวก CO กับอากาศ

ตัวแปรสำคัญในการปรับแต่งการเผาไหม้ของการเผาไหม้คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ควรปรับส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศในอัตราส่วนที่มีอากาศเป็นมากกว่าทางทฤษฎีให้เล็กน้อย ขณะทำการปรับแต่งการเผาไหม้สามารถสังเกตุได้จากสีของควันที่ปล่อยออกจากปล่องระบาย (Stack) สามารถสรุปได้ดังนี้

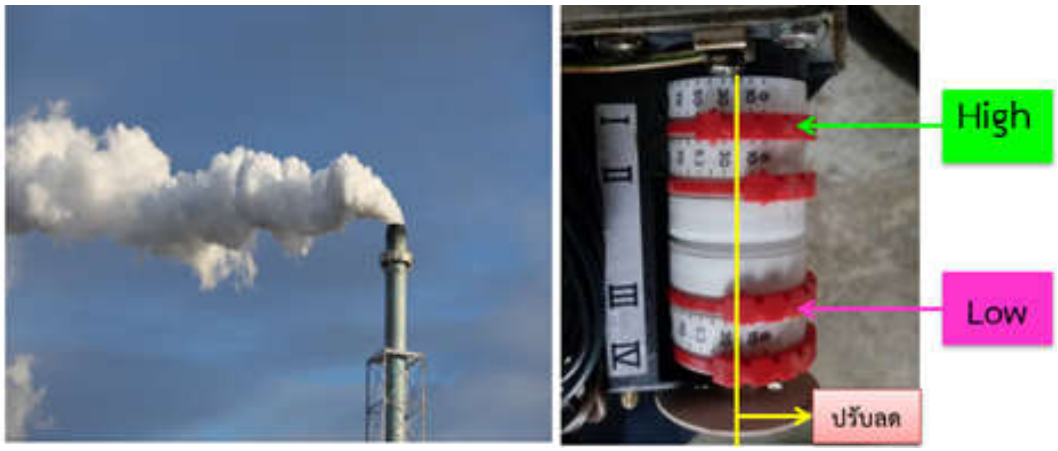
ปัญหาควันดำ เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากป้อนปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้น้อยเกินไป การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศไม่ดี ทำให้เกิด unburned hydrocarbon จะสังเกตได้ว่ามีควันดำเกิดขึ้น ค่าก๊าซ CO ในก๊าซไอเสียจะเพิ่มสูงขึ้น แสดงดังภาพที่ 25

การแก้ไข ให้ทำการปรับปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ให้เพียงพอต่อการเผาไหม้ด้วยการปรับอากาศให้มากขึ้น โดยดูจากการแปรเปลี่ยนของปริมาณ CO และ O_2 ลักษณะของปัญหาควันดำและการปรับเพิ่มปริมาณอากาศแสดงดังรูป

ภาพที่ 2-25 ลักษณะของปัญหาควันดำและการปรับเพิ่มปริมาณอากาศ

ปัญหาอากาศส่วนเกินสูง เกิดจากการปรับสัดส่วนอากาศสูงเกินพอดี ทำให้เกิดอากาศส่วนเกินที่ไม่ได้ใช้ในการเผาไหม้ พาออกไปพร้อมกับก๊าซไอเสีย สามารถทำการหาอากาศส่วนเกินได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย อ่านจากค่าเปอร์เซ็นต์ของ O2 แสดงดังภาพที่ 26

การแก้ไข ปรับลดสัดส่วนอากาศให้พอเหมาะต่อการเผาไหม้ หรืออาจจะใช้ Oxygen trim control system มาช่วยปรับปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ลักษณะของปัญหาอากาศส่วนเกินสูงและการปรับลดปริมาณอากาศแสดงดังรูป



ภาพที่ 2-26 ลักษณะของปัญหาอากาศส่วนเกินสูงและการปรับลดปริมาณอากาศ

ผลลัพธ์ที่ได้ : การประหยัดพลังงานทั้งอากาศและเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพหม้อน้ำเพิ่มสูงขึ้น

กรณีศึกษา : ตัวอย่างโรงงาน A ดำเนินการตามมาตรการการปรับแต่งการเผาไหม้อย่างเหมาะสม ทำให้ประสิทธิภาพหม้อน้ำสูงขึ้นและเกิดผลประหยัดต้นทุนไอน้ำ

รายละเอียด	ก่อนปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
ปริมาณก๊าซออกซิเจน (O_2), %	12.4	8.1
ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ppm	1,666.14	66.3
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ (HHV) %	**62.7**	**74.0**
ผลประหยัดต้นทุนไอน้ำ (บาทต่อปี)	**1,659,637***	

*คำนวณที่เงื่อนไขของหม้อน้ำ 8 hr/day, 330 day/yrs, ราคาเชื้อเพลิง 3,500 บาทต่อตัน, ค่าความร้อนทางสูง 14,000 kJ/kg และพิกัดของหม้อน้ำ 5 ton/h, 6 Barg

2) มาตรการเฝ้าระวังการสะสมของสิ่งสกปรกที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

ปัญหาที่ตรวจพบ : ตรวจพบอุณหภูมิก๊าซไอเสียมีค่าสูงเกิน โดยปกติควรมีค่ามากกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำที่ความดันไอน้ำใช้งานประมาณ 30 ถึง 40°C แสดงให้เห็นถึงการเกิดเขม่าทางด้านสัมผัสก๊าซร้อน รวมถึงเกิดตะกรันเกาะทางด้านน้ำ

การลงทุน : ต้องมีการลงทุน

แนวทางปฏิบัติ : เฝ้าระวังอุณหภูมิก๊าซไอเสียไม่ให้สูงเกิน หากสูงเกินเกณฑ์ควรทำความสะอาดตะกรันหรือเขม่าที่เกาะที่ผิวท่อ เขม่าเป็นสาเหตุให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลดลง และปรับอัตราการโบลว์ดาวน์ให้เหมาะสมกับการใช้งานหม้อน้ำ

เกณฑ์ที่เหมาะสม

สำหรับการใช้งานหม้อน้ำต้องมีการระบายน้ำในหม้อน้ำ หรือที่นิยมเรียกว่าการโบล์วดาวน์ (Blowdown) เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำในหม้อน้ำมีค่า TDS (Total Dissolved Solid) สูงเกินกว่าค่าตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ปี พ.ศ. 2549 ดังภาพที่ 27 ซึ่งค่า TDS มีผลต่อการเกิดตะกรันในหม้อน้ำ ถ้าตะกรันหนามากเกินไปจะทำให้มีความเสี่ยงต่อการระเบิดของหม้อน้ำ ดังนั้นจึงต้องมีการโบลว์ดาวน์ที่เหมาะสม ถ้ามีการโบลว์ดาวน์ในปริมาณมากเกินไป แม้ว่าจะทำให้ค่า TDS ต่ำ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากน้ำโบลว์ดาวน์เป็นน้ำที่มีพลังงานสูง (น้ำที่อยู่ในสภาวะที่พร้อมเป็นไอน้ำ) ฉะนั้นเพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากการโบล์วดาวน์ ทางผู้ควบคุมหม้อน้ำควรเพิ่มระยะเวลาในการโบลว์ดาวน์ให้นานขึ้น เพื่อให้ค่า TDS มีค่าเข้าใกล้ค่าตามที่กฎหมายกำหนด ควบคุมให้ปริมาณการโบลว์ดาวน์อยู่ในช่วงร้อยละ 2 ถึง 3

ผู้ประกอบกิจการโรงงานที่มีการใช้งานหม้อน้ำต้องปรับสภาพน้ำสำหรับหม้อน้ำ ดังนี้

๑. คุณภาพน้ำป้อนหม้อน้ำ (Boiler feed water) ให้เป็นไปตามเกณฑ์ ดังนี้

รายการ	ค่าเกณฑ์ควบคุม	หน่วย
pH value	5.8 - 9.5	-
Total Hardness	ไม่เกิน 10	ppm as $CaCO_3$

๒. คุณภาพน้ำในหม้อน้ำ (Boiler water) ให้เป็นไปตามเกณฑ์ดังนี้

รายการ	ค่าเกณฑ์ควบคุม	หน่วย
pH value	8.5 - 11.8	-
Total Dissolved Solid (TDS)	ไม่เกิน 3,500	ppm

ภาพที่ 28 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ปี พ.ศ. 2549 เรื่องคุณภาพน้ำ [7]

ผลลัพธ์ที่ได้ทางด้านพลังงาน : การประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพหม้อน้ำเพิ่มสูงขึ้น

ผลลัพธ์ที่ได้ทางด้านความปลอดภัย : เกิดความปลอดภัยในการใช้งานหม้อน้ำไม่ก่อให้เกิดการระเบิด

กรณีศึกษา : ตัวอย่างโรงงาน B ดำเนินการตามมาตรการเฝ้าระวังการสะสมของสิ่งสกปรกที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในหม้อน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพหม้อน้ำสูงขึ้นและเกิดผลประหยัดต้นทุนไอน้ำ รวมถึงเกิดความปลอดภัยในการใช้งานหม้อน้ำไม่ก่อให้เกิดการระเบิด

รายละเอียด	ก่อนปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)	270	210
ปริมาณการโบล์วดาวน์ (%)	22.78	5.3
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ (HHV) ,%	**69.2**	**75.8**
ผลประหยัดต้นทุนไอน้ำ (บาทต่อปี)	**857,437***	

*คำนวณที่เงื่อนไขของหม้อน้ำ 8 hr/day, 330 day/yrs, ราคาเชื้อเพลิง 3,500 บาทต่อตัน, ค่าความร้อนทางสูง 14,000 kJ/kg และพิกัดของหม้อน้ำ 5 ton/h, 6 Barg

3) มาตราการป้องกันความร้อนสูงเกินของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในหม้อน้ำ

ปัญหาที่ตรวจพบ : ตรวจพบอุณหภูมิก๊าซไอเสียมีค่าสูงเกิน โดยปกติควรมีค่ามากกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำที่ความดันไอน้ำใช้งานประมาณ 30 ถึง 40 °C

การลงทุน : ต้องมีการลงทุน

แนวทางปฏิบัติ : เฝ้าระวังอุณหภูมิก๊าซไอเสียไม่ให้สูงเกิน หากสูงเกินเกณฑ์ควรทำความสะอาดตะกรันหรือเขม่าที่เกาะที่ผิวท่อ เขม่าเป็นสาเหตุให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลดลง

ผลลัพธ์ที่ได้ทางด้านพลังงาน : การประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพหม้อน้ำเพิ่มสูงขึ้น

ผลลัพธ์ที่ได้ทางด้านความปลอดภัย : เกิดความปลอดภัยในการใช้งานหม้อน้ำ

การวางแผนเฝ้าระวัง (PM) : อุณหภูมิก๊าซไอเสียควรมีค่ามากกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำที่ความดันไอน้ำใช้งานประมาณ 30 ถึง 40 °C

กรณีศึกษา : ตัวอย่างโรงงาน C ดำเนินการตามมาตรการป้องกันความร้อนสูงเกินของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในหม้อน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพหม้อน้ำสูงขึ้นและเกิดผลประหยัดต้นทุนไอน้ำ

รายละเอียด	ก่อนปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)	330	223
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ (HHV) ,%	**71.33**	**78.30**
ผลประหยัดต้นทุนไอน้ำ (บาทต่อปี)	**854,438***	

*คำนวณที่เงื่อนไขของหม้อน้ำ 8 hr/day, 330 day/yrs, ราคาเชื้อเพลิง 3,500 บาทต่อตัน, ค่าความร้อนทางสูง 14,000 kJ/kg และพิกัดของหม้อน้ำ 5 ton/h, 6 Barg

4) มาตรการควบคุมก๊าซไอเสียและการปลดปล่อยมลพิษที่ออกจากหม้อน้ำ

ปัญหาที่ตรวจพบ : ตรวจพบปริมาณ O_2 และ CO สูงกว่าเกณฑ์ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องกำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. 2459 และอุณหภูมิก๊าซไอเสียมีค่าสูงเกิน โดยปกติควรมีค่ามากกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำที่ความดันไอน้ำใช้งานประมาณ 30 ถึง 40 °C

การลงทุน : ไม่ต้องลงทุนเรื่องการปรับแต่งการเผาไหม้แต่ต้องมีการลงทุนเรื่องการทำความสะอาดเขม่าหรือตะกรัน

แนวทางปฏิบัติ : ปรับแต่งการเผาไหม้ให้เหมาะสมและเฝ้าระวังอุณหภูมิก๊าซไอเสียไม่ให้สูงเกิน หากสูงเกินเกณฑ์ควรทำความสะอาดตะกรันหรือเขม่าที่เกาะที่ผิวท่อ เขม่าเป็นสาเหตุให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลดลง

ผลลัพธ์ที่ได้ทางด้านพลังงาน : การประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงและอากาศ รวมถึงประสิทธิภาพหม้อน้ำเพิ่มสูงขึ้น

ผลลัพธ์ที่ได้ทางด้านความปลอดภัย : เกิดความปลอดภัยในการใช้งานหม้อน้ำ

การวางแผนเฝ้าระวัง (PM) : อุณหภูมิก๊าซไอเสียควรมีค่ามากกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำที่ความดันไอน้ำใช้งานประมาณ 30 ถึง 40 °C รวมถึงเฝ้าระวังไม่ให้ O_2 และ CO สูงกว่าเกณฑ์ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

กรณีศึกษา : ตัวอย่างโรงงาน D ดำเนินการตามมาตรการควบคุมก๊าซไอเสียและการปลดปล่อยมลพิษที่ออกจากหม้อน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพหม้อน้ำสูงขึ้นและเกิดผลประหยัดต้นทุนไอน้ำ

รายละเอียด	ก่อนปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)	201.58	175.3
ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ppm	7,117	2,988
ปริมาณก๊าซออกซิเจน (O_2), %	9.9	8.1
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ (HHV) ,%	**71.6**	**79.5**
ผลประหยัดต้นทุนไอน้ำ (บาทต่อปี)	**945,759***	

*คำนวณที่เงื่อนไขของหม้อน้ำ 8 hr/day, 330 day/yrs, ราคาเชื้อเพลิง 3,500 บาทต่อตัน, ค่าความร้อนทางสูง 14,000 kJ/kg และพิกัดของหม้อน้ำ 5 ton/h, 6 Barg

5) มาตรการเฝ้าระวังด้านความปลอดภัยจากความร้อนสูญเสีย

ปัญหาที่ตรวจพบ : ตรวจพบอุณหภูมิผิวผนังหม้อน้ำมีค่าสูงเกิน 60 °C ส่งผลให้เกิดความร้อนสูญเสีย

การลงทุน : ต้องมีการลงทุนปรับปรุงฉนวนหม้อน้ำ

แนวทางปฏิบัติ : ปรับปรุงฉนวนหม้อน้ำที่ชำรุดหรือเสื่อมสภาพ

ผลลัพธ์ที่ได้ทางด้านพลังงาน : การประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพหม้อน้ำเพิ่มสูงขึ้น

ผลลัพธ์ที่ได้ทางด้านความปลอดภัย : เกิดความปลอดภัยในการใช้งานหม้อน้ำ

การวางแผนเฝ้าระวัง (PM) : อุณหภูมิผิวผนังหม้อน้ำมีค่าสูงเกิน 60 °C

กรณีศึกษา : ตัวอย่างโรงงาน F ดำเนินการตามมาตรการเฝ้าระวังด้านความปลอดภัยจากความร้อนสูญเสีย ทำให้ความร้อนสูญเสียลดลง ประสิทธิภาพหม้อน้ำสูงขึ้นและเกิดผลประหยัดต้นทุนไอน้ำ

รายละเอียด	ก่อนปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
ความร้อนสูญเสียที่ผนังหม้อน้ำ (kW)	8.25	1.2
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ (HHV) ,%	**83.44**	**85.76**
ผลประหยัดต้นทุนไอน้ำ (บาทต่อปี)	**219,288***	

*คำนวณที่เงื่อนไขของหม้อน้ำ 8 hr/day, 330 day/yrs, ราคาเชื้อเพลิง 3,500 บาทต่อตัน, ค่าความร้อนทางสูง 14,000 kJ/kg และพิกัดของหม้อน้ำ 5 ton/h, 6 Barg

6) มาตรการลดการสูญสียจากการโบล์วดาวน์

ปัญหาที่ตรวจพบ : ตรวจพบปริมาณโบลว์ดาวน์สูงเกินร้อยละ 2 ถึง 3

การลงทุน : ไม่ต้องมีการลงทุน

แนวทางปฏิบัติ : ปรับอัตราการโบลว์ดาวน์ให้เหมาะสมกับการใช้งานหม้อน้ำ

ผลลัพธ์ที่ได้ทางด้านพลังงาน : การประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพหม้อน้ำเพิ่มสูงขึ้น

ผลลัพธ์ที่ได้ทางด้านความปลอดภัย : เกิดความปลอดภัยในการใช้งานหม้อน้ำ

การวางแผนเฝ้าระวัง (PM) : ปรับอัตราการโบลว์ดาวน์ให้เหมาะสมปริมาณโบลว์ดาวน์ไม่เกิน 2 ถึง 3

กรณีศึกษา : ตัวอย่างโรงงาน F ดำเนินการตามมาตรการลดการสูญเสียจากการโบลว์ดาวน์ ทำให้ประสิทธิภาพหม้อน้ำสูงขึ้นและเกิดผลประหยัดต้นทุนไอน้ำ

รายละเอียด	ก่อนปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
ปริมาณการโบล์วดาวน์ (%)	27.78	6.26
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ (HHV) ,%	**70.3**	**74.5**
ผลประหยัดต้นทุนไอน้ำ (บาทต่อปี)	**546.476***	

*คำนวณที่เงื่อนไขของหม้อน้ำ 8 hr/day, 330 day/yrs, ราคาเชื้อเพลิง 3,500 บาทต่อตัน, ค่าความร้อนทางสูง 14,000 kJ/kg และพิกัดของหม้อน้ำ 5 ton/h, 6 Barg

7) มาตรการนำคอนเดนเสตกลับมาใช้ใหม่

ปัญหาที่ตรวจพบ: ตรวจพบอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำมีค่าเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศและมี ปริมาณ ความร้อนเหลือทิ้งที่สามารถนำกลับมาใช้อุ่นน้ำป้อนได้

การลงทุน : ต้องมีการลงทุน ในการออกแบบและสร้างระบบชุดอุ่นน้ำป้อนเช่น ปั๊มส่งน้ำและระบบท่อน้ำกลับ ความร้อน

แนวทางปฏิบัติ : ออกแบบและสร้างระบบชุดอุ่นน้ำป้อน

ผลลัพธ์ที่ได้ทางด้านพลังงาน : การประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง

กรณีศึกษา : ตัวอย่างโรงงาน G ดำเนินการตามมาตรการนำคอนเดตเสทกลับมาใช้ใหม่ ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงและเกิดผลประหยัดต้นทุนไอน้ำ

รายละเอียด	**ก่อนปรับปรุง**	**หลังปรับปรุง**
อุณหภูมิน้ำป้อน, °C	33	85
การประหยัดเชื้อเพลิง (kg/yrs)	4,173	
ผลประหยัดต้นทุนไอน้ำ (บาทต่อปี)	**86,752***	

*คำนวณที่เงื่อนไขของหม้อน้ำ 8 hr/day, 330 day/yrs, ราคาเชื้อเพลิง 3,500 บาทต่อตัน, ค่าความร้อนทางสูง 14,000 kJ/kgและพิกัดของหม้อน้ำ 5 ton/h, 6 Barg

บทที่ 3

เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยพัฒนาสมาร์ทบอยเลอร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ งานวิจัยนี้สามารถแบ่งวิธีการดำเนินงานของงาน ในการพัฒนาหม้อน้ำธรรมดาให้เป็นสมาร์ทบอยเลอร์ มีขั้นตอนดังนี้

3.1 การสำรวจระบบต่างๆของ หม้อน้ำเดิม

เพื่อประเมินและรับรู้ถึงสภาวะการทำงานปัจจุบันของหม้อน้ำ การสำรวจระบบต่างๆ ประกอบด้วย

1) ประเภทและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้
2) ลักษณะของการป้อนเชื้อเพลิง
3) สภาพของการป้อนอากาศและการดูดก๊าซ
4) สภาพของห้องเผาไหม้
5) สภาพของหม้อน้ำ
6) ระบบน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำและควบคุมระดับน้ำ
7) ระบบควบคุมความดันไอน้ำ
8) ระบบการระบายก้นหม้อน้ำ
9) ระบบการทิ้งไอเสียและการกำจัดมลภาวะ

3.2 ประเมินเซนเซอร์ที่จะนำมาติดตั้งให้กับระบบสมาร์ทบอยเลอร์

โดยการประเมินจะมีขอบเขตแบ่งตามระบบต่างๆของ Smart boiler โดยระบบดังกล่าวต้องมีการติดตั้งเซนเซอร์เพื่อติดตามและควบคุมการทำงาน โดยติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศที่ Air Blower, Fuel Pump, น้ำป้อนและติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความดันไอน้ำขาออกและระดับน้ำที่ Boiler รวมทั้งติดตั้งเซ็นเซอร์วัด TDS ที่น้ำป้อนและ Boiler ส่วนที่ Draft Tube จะติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และ %CO2 โดยเซ็นเซอร์ทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 1 และ 2 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทต่างๆ เข้ากับระบบหม้อน้ำ เพื่อตรวจสอบการทำงานของหม้อน้ำ และการส่งสัญญาณออกมาเข้าสู่ตู้รับสัญญาณ เพื่อทำการประมวลผลแสดงออกมาเป็นข้อมูลการทำงานของหม้อน้ำ ซึ่งเป้าหมายของการควบคุมระบบดังกล่าว สามารถแบ่งแยกได้ดังนี้

1) ระบบป้อนเชื้อเพลิงที่สามารถควบคุมได้ตามการเปลี่ยนแปลงอัตราการการป้อนได้ตามภาระการใช้ไอน้ำ

2) ระบบปั๊มน้ำที่สามารถเปลี่ยนแปลงอัตราการการป้อนได้ตามภาระการใช้ไอน้ำ

3) ระบบควบคุมความดันที่สามารถเปลี่ยนแปลงอัตราการการป้อนได้ตามภาระการใช้ไอน้ำ

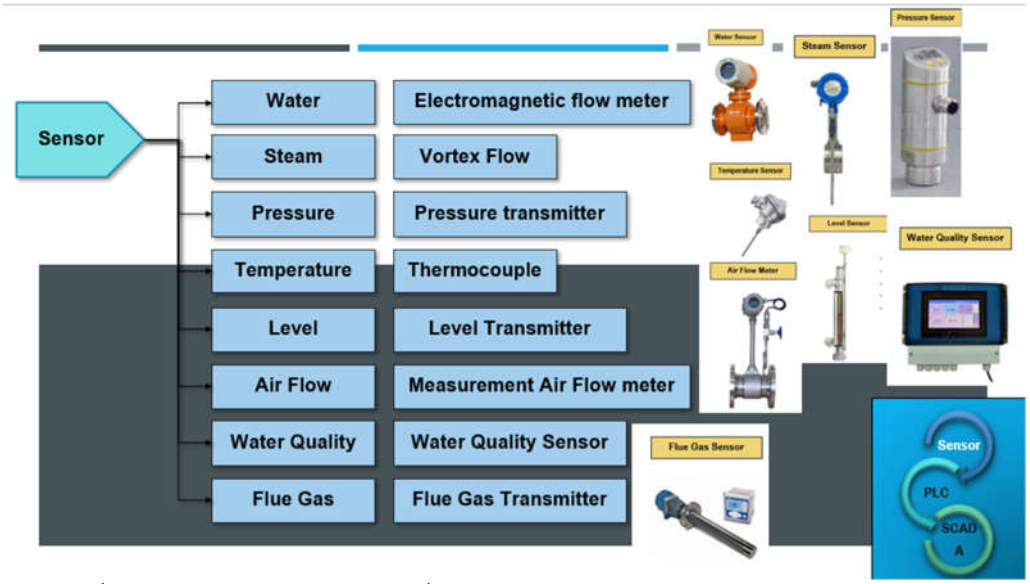
4) อุปกรณ์วัดและควบคุมอุณหภูมิและความดันในห้องเผาไหม้ และในบริเวณที่ออกจากหม้อน้ำ

5) ระบบอากาศที่สามารถควบคุมได้ตามการเปลี่ยนแปลงอัตราการการป้อนได้ตามภาระการใช้ไอน้ำ

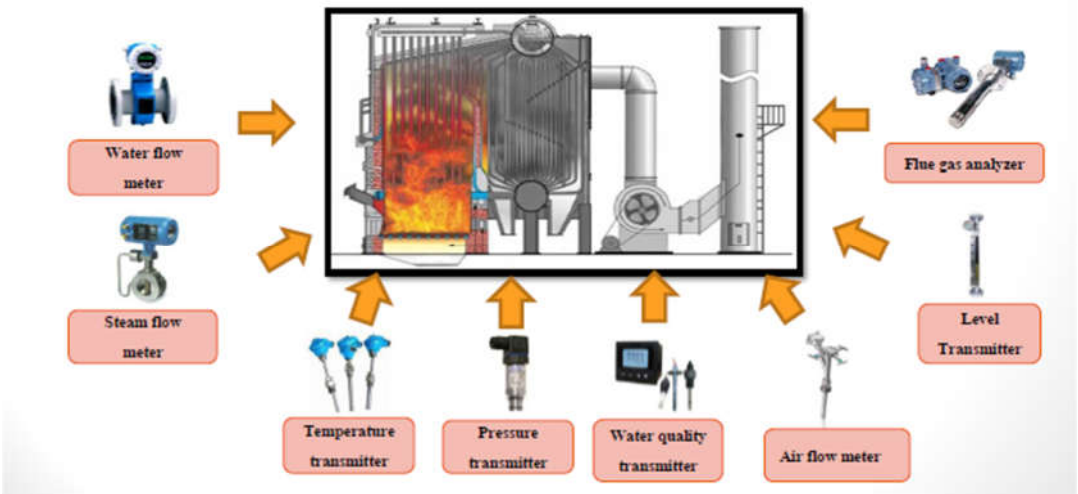
6) อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซไอเสียและส่งสัญญาณกลับเพื่อควบคุมการทำงานของหม้อน้ำ

7) อุปกรณ์วัดและควบคุมคุณภาพของน้ำป้อนและน้ำในหม้อน้ำ

8) ระบบควบคุมการระบายน้ำโบล์วดาวน์แบบอัตโนมัติ



ภาพที่ 3-1 ภาพรวมของเซนเซอร์เพื่อติดตามและควบคุมการทำงานของ Smart Boiler



ภาพที่ 3-2 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทต่างๆ เข้ากับระบบหม้อน้ำ

3.3 รายละเอียดเซนเซอร์ที่ติดตั้งเพื่อพัฒนาเป็น Smart Boiler

3.3.1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Temperature Sensors)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ RTD เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ โดย RTD เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโลหะซึ่งค่าความต้านทานดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น นิยมนำไปใช้ในการวัดอุณหภูมิในช่วง-270 - 850°C RTD ทำจากแพลทินัมเป็นแบบที่นิยมใช้มากที่สุด นั่นคือPT-100, PT-1000 มีความแม่นยำ เที่ยงตรงสูง ซึ่งมีทั้งแบบ3สาย (Standard) และ4สายจะมีค่า100 โอห์ม ที่ 0oC แสดงดังภาพ 3

ภาพที่ 3-3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Temperature Sensors)

ตำแหน่งที่จะทำการติดตั้ง RTD วัดอุณหภูมิ ได้มีการกำหนดไว้เบื้องต้นแสดงตามตารางที่ 1

ตารางที่ 3-1 แสดงรายการตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย
1	Temp. combustion chamber 1	1	ตัว
2	Temp. combustion chamber 2	1	ตัว
3	Temp. combustion chamber 3	1	ตัว
4	Temp. combustion chamber 4	1	ตัว
5	Temp. water wall tube 1	1	ตัว
6	Temp. water wall tube 2	1	ตัว
7	Temp. water wall tube 3	1	ตัว
8	Temp Steam drum upper shell	1	ตัว
9	Temp Steam drum lower shell	1	ตัว
10	Temp. superheated steam	1	ตัว
11	Temp. exhaust turbine	1	ตัว
12	Temp. Steam after PRV	1	ตัว
13	Temp. water make up	1	ตัว
14	Temp. Deaerator	1	ตัว
15	Temp. feed water	1	ตัว
16	Temp. after economizer	1	ตัว
17	Temp. flue gas before economizer	1	ตัว
18	Temp. flue gas after economizer	1	ตัว
19	Temp. flue gas after air economizer	1	ตัว
20	Temp. ambient air	1	ตัว
21	Temp. air after air preheater	1	ตัว
22	Temp. air after dryer	1	ตัว

3.3.2 อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure Sensors)

Pressure sensor คืออุปกรณ์วัดความดัน เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความดันของ ของเหลว, ก๊าซ ลักษณะการทำงานคือ เซ็นเซอร์จะส่งสัญญาณทางไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับความดัน ทำงานโดยเปลี่ยนความดันทางกลผ่านชุด Transducer (ชนิด Strain Gauge) ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าในรูปแบบของอนาล็อก เช่น 0-20mA, 4-20mA , Voltage 0-5 Vdc, 0-10 Vdc เป็นต้น และ Pressure Transmitter สามารถนำมาต่อใช้งานร่วมกับอุปกรณ์แสดงผลหรือควบคุมอื่น เช่น คอนโทรลเลอร์ (Controller), มิเตอร์ (Meter), หรือพีแอลซี (PLC) เป็นต้น เพื่อแสดงค่าแรงดันในการนำไปควบคุมในระบบได้ แสดงดังภาพ 4

ภาพที่ 3-4 อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure Sensors)

ตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน ได้มีการกำหนดไว้เบื้องต้นแสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 3-2 แสดงรายการตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย
1	Pressure steam drum	1	ตัว
2	Pressure superheated steam	1	ตัว
3	Pressure exhaust steam	1	ตัว
4	Pressure steam after PRV.	1	ตัว
5	Pressure deaerator	1	ตัว
6	Pressure boiler feed pump inlet	1	ตัว
7	Pressure boiler feed pump outlet	1	ตัว
8	Pressure speeder air	1	ตัว
9	Pressure primary air header	1	ตัว
10	Pressure secondary air 1	1	ตัว
11	Pressure secondary air 2	1	ตัว
12	Pressure the gas before economizer	1	ตัว
13	Pressure the gas after economizer	1	ตัว
14	Pressure the gas after air preheater	1	ตัว
15	Pressure combustion chamber 1	1	ตัว
16	Pressure combustion chamber 2	1	ตัว
17	Pressure combustion chamber 3	1	ตัว

3.3.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow Meter Sensors)

เครื่องมือวัดอัตราการไหล หรือที่เรียกกันว่า Flow meter นั้น จะทำหน้าที่ในการวัดปริมาตรปริมาณ หรือ อัตราการเคลื่อนที่ของไหล (Fluid) ผ่านภาชนะ เช่น ท่อ หรือ ราง โดยใช้เทียบกับว่าเวลาที่ของไหลนั้นไหลผ่านมาได้ สามารถแบ่งได้ตามชนิดของของไหล เช่น Water Flowmeter, Air Flowmeter, Gas Flow meter และ steam flow ในงานวิจัยนี้ใช้การวัดอัตราการไหลแบบทางอ้อม โดยใช้การคำนวนปริมาตรจากภาชนะที่ถูกลำเรียงเป็นหลัก หากทำการวัดไอน้ำ ช่วงการวัด ไอน้ำ 13.12 ถึง 229.6 ft./min (4 – 70 m/s) ช่วงอุณหภูมิ -40 ถึง 270 °C หากทำการวัดอากาศ ใช้ที่ความดัน 0 ถึง 2.5 MPa อุณหภูมิ-40 ถึง 150 °C แสดงดังภาพ 5

ภาพที่ 3-5 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow Meter Sensors)

ตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหล ได้มีการกำหนดไว้เบื้องต้นแสดงตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3-3 แสดงรายการตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหล

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย
1	Steam flow to steam turbine	1	ตัว
2	Steam flow to PRV	1	ตัว
3	make up water flow	1	ตัว
4	feed water flow	1	ตัว
5	Spreader air flow	1	ตัว
6	Secondary air flow	1	ตัว
7	Primary air flow	1	ตัว

3.3.4 อุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Level Sensors)

เป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับระดับของเหลว (Liquid) เช่น วัดระดับความสูงของน้ำ น้ำมันในถัง หรือวัดระดับน้ำในแทงค์เก็บน้ำ เป็นต้น เพื่อจะทราบถึงตำแหน่งและระดับของเหลวนั้นและใช้ในการควบคุมระดับน้ำให้ได้ตามที่ต้องการ โดยต่อร่วมกับตัวควบคุมระดับน้ำ (Level Control) ตัวแสดงผลของระดับน้ำ (Level Indicator) เป็นต้น เพื่อแสดงค่าหรือควบคุมระดับของเหลว และนำค่าต่าง ๆ นี้ไปใช้ในกระบวนการการผลิตต่อไป โดยทำงานที่ย่านอุณหภูมิ อุณหภูมิ -40 ถึง 250 °C แสดงดังภาพ 6

ภาพที่ 3-6 อุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Level Sensors)

ตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดระดับน้ำ ได้มีการกำหนดไว้เบื้องต้นแสดงตามตารางที่ 4

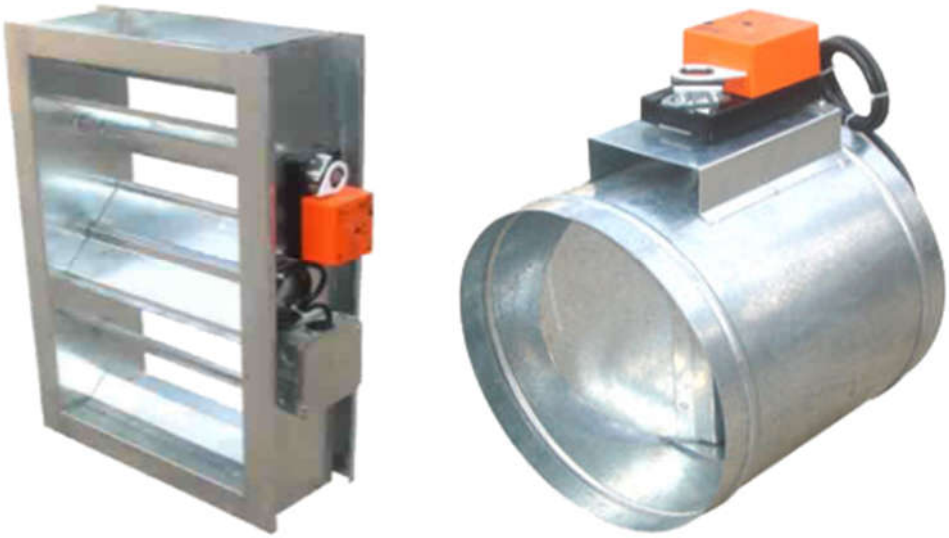
ตารางที่ 3-4 แสดงรายการตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดระดับน้ำ

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย
1	water level in steam drum	1	ตัว
2	water level in steam deaerator	1	ตัว

3.3.5 อุปกรณ์ควบคุมปริมาณอากาศ (Automatic air damper)

เป็นวาล์วหรือแผ่นปรับปริมาณลมในระบบท่อลมต่างๆ เพื่อทำหน้าที่ปิดกั้นอากาศในระบบปรับอากาศไม่ให้ไปยังบริเวณที่ไม่มีการใช้งาน หรือเพื่อปรับปริมาณลมให้มีอุณหภูมิและความชื้นเหมาะสมตามห้องต่างๆ อาจปรับตั้งด้วยคนหรือด้วยระบบอัตโนมัติแผ่นปรับลมที่ไม่ใช่ระบบอัตโนมัติ

สามารถปรับตั้งการเปิด-ปิดของวาล์วได้จากภายในท่อ แต่แผ่นปรับลมระบบอัตโนมัติจะใช้ระบบไฟฟ้าหรือลมอัดในการควบคุมมอเตอร์ที่ควบคุมวาล์วเพื่อทำให้ปริมาณอากาศไหลผ่านตามปริมาณที่ต้องการ แสดงดังภาพ 7



ภาพที่ 3-7 อุปกรณ์ควบคุมปริมาณอากาศ (Automatic Air Damper)

ตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมปริมาณอากาศ ได้มีการกำหนดไว้เบื้องต้นแสดงตามตารางที่ 5

ตารางที่ 3-5 แสดงรายการตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมปริมาณอากาศ

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย
1	Spreader air damper	1	ตัว
2	Air dryer damper	1	ตัว
3	Secondary air fan damper	1	ตัว
4	Secondary air fan damper 1	1	ตัว
5	Secondary air fan damper 2	1	ตัว
6	Primary air damper 1	1	ตัว
7	Primary air damper 2	1	ตัว
8	Induce draft fan damper	1	ตัว

3.3.6 อุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพน้ำแบบอัตโนมัติ (Automatic Water Quality Sensor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดคุณภาพน้ำและสามารถส่งสัญญาณเพื่อไปควบคุมการทำงานของวาล์วต่างๆเช่น วาล์วโบล์วดาวน์ เป็น ค่าที่ทำการตรวจวัดประกอบด้วย pH , TDS และ Conductivity สามารถวัดในย่านอุณหภูมิ -10 ถึง 150 °C แสดงดังภาพ 8

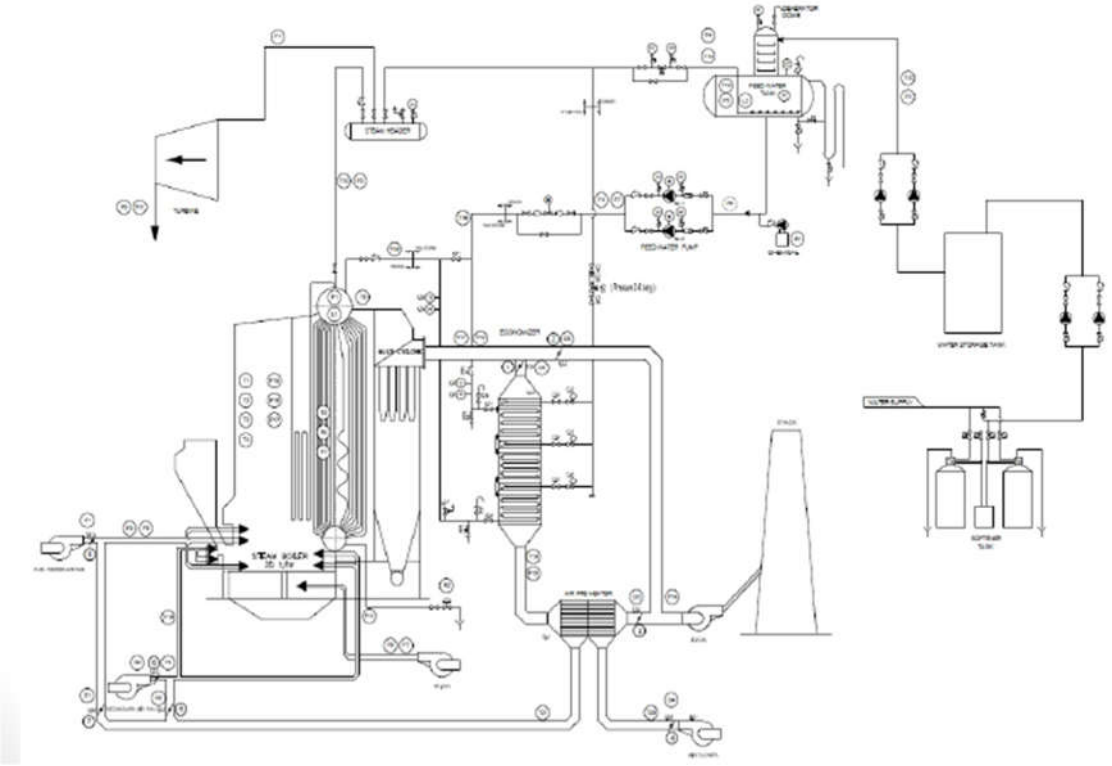
ภาพที่ 3-8 อุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพน้ำแบบอัตโนมัติ (Automatic water quality sensor)

ตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพน้ำแบบอัตโนมัติ ได้มีการกำหนดไว้เบื้องต้นแสดงตามตารางที่ 6

ตารางที่ 3-6 แสดงรายการตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพน้ำแบบอัตโนมัติ

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย
1	Automatic online monitoring and dosing chemical for boiler (รวมอุปกรณ์ตรวจวัด conductivity & pH monitoring water in deaerator)	1	ชุด
2	Automatic Blowdown control (รวมอุปกรณ์ตรวจวัด conductivity & pH monitoring water in boiler)	1	ชุด

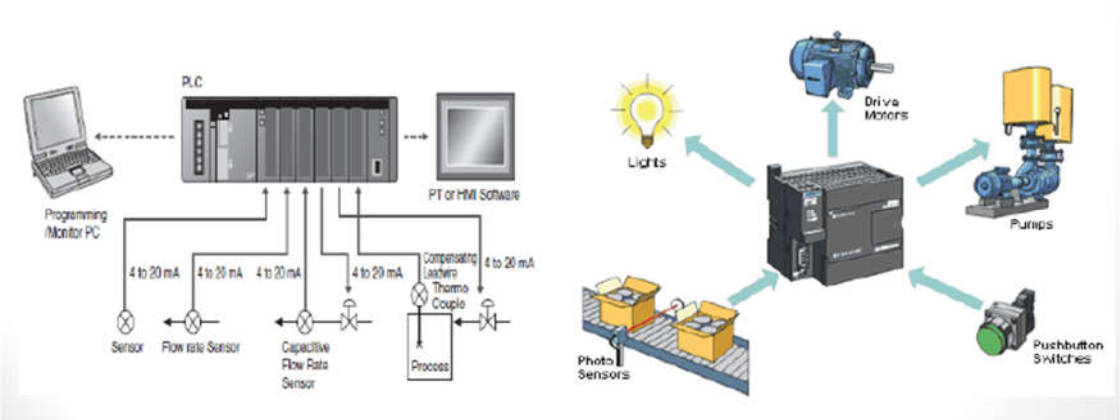
ตัวอย่างแสดงการติดตั้งเซนเซอร์ทั้งหมดเข้ากับหม้อน้ำเพื่อพัฒนาสมาร์ทบอยเลอร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT)



ภาพที่ 3-9 ตัวอย่างการติดตั้งเซนเซอร์ทั้งหมดเข้ากับหม้อน้ำเพื่อพัฒนาสมาร์ทบอยเลอร์

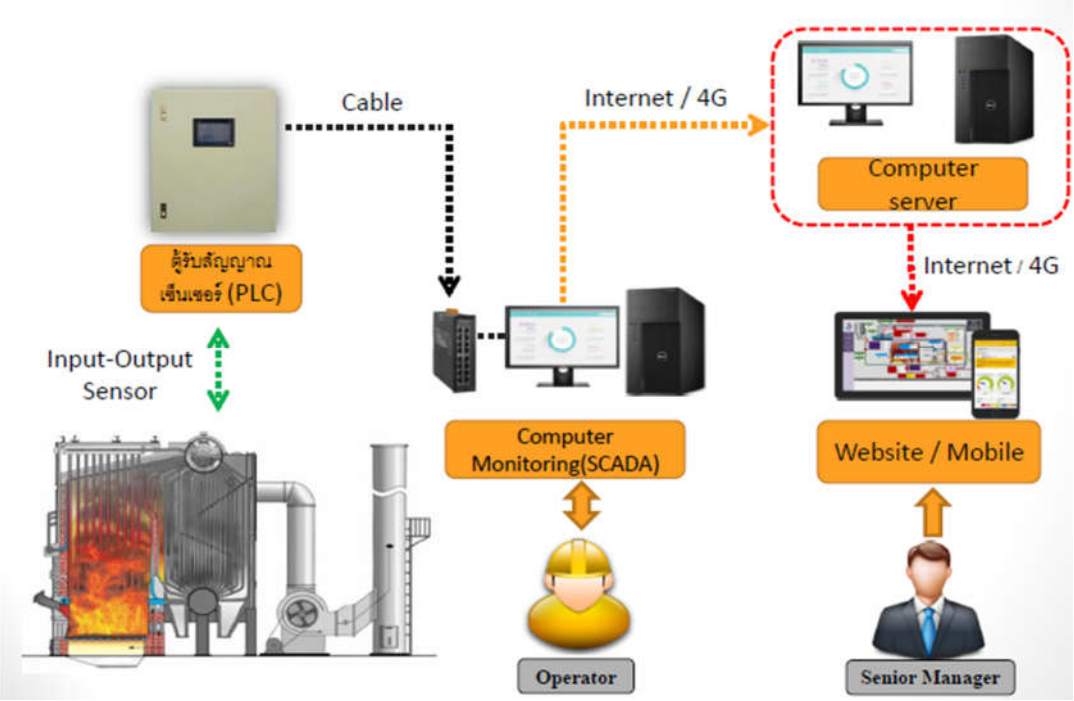
3.4 โครงสร้างการทำงานของระบบ SMART Boiler Monitoring System

อุปกรณ์หลักของตู้ควบคุมไฟฟ้า (Control Cabinet) คือ PLC (Programmable Logic Control) แสดงดังภาพที่ 10 เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของหม้อน้ำและหัวเผา โดยภายในมี Microprocessor เป็นสมองสั่งการที่สำคัญรับสัญญาณจากอุปกรณ์ควบคุม และอุปกรณ์ความปลอดภัยต่างๆ เพื่อประมวลผล และสั่งการทำงานได้แบบอัตโนมัติ ซึ่งผู้ควบคุมสามารถสร้างรูปแบบของการควบคุมได้โดยการป้อนโปรแกรมคำสั่งที่แสดงผลผ่านทาง Touch Screen สามารถเชื่อมต่อกับ Computer เข้าสู่ระบบ SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) แสดงดังภาพที่ 11 ซึ่งเป็นระบบตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Real – Time ใช้ในการตรวจสอบสถานะ ควบคุมการทำงานของระบบหม้อน้ำ หรือหม้อน้ำมันร้อน และอุปกรณ์อื่นๆ ทั้งระบบได้ โดยส่งสัญญาณข้อมูลและแสดงผลไปยังศูนย์ควบคุมส่วนกลาง ระบบเหล่านี้จะช่วยให้หม้อน้ำ สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย มีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อีก ทั้งจะช่วยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของหม้อน้ำสามารถเข้าถึงข้อมูลการใช้งาน ได้ง่ายมากขึ้น เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ปัญหา และแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็ว มีระบบที่เชื่อมต่ออุปกรณ์การวัดด้านความปลอดภัย พลังงาน และสิ่งแวดล้อมของหม้อน้ำทั้งหมด แสดงผลข้อมูลการวัดแบบ Data Visualization จะทำให้ข้อมูลเชิงปริมาณดูน่าสนใจ เข้าใจง่าย เห็นภาพรวมได้ชัดเจน โดยโครงสร้างการทำงานของระบบ SMART Boiler Monitoring System แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 3-10 อุปกรณ์หลักของตู้ควบคุมไฟฟ้า (Control Cabinet)
PLC (Programmable Logic Control)

ภาพที่ 3-11 ระบบ SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)



ภาพที่ 3-12 โครงสร้างการทำงานของระบบ SMART Boiler Monitoring System

3.5 ขั้นตอนการถ่ายทอดเทคโนโลยีการพัฒนาสมาร์ทบอยเลอร์ให้แก่บุคลากรในโรงงานอุตสาหกรรม

อีกหนึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือการ ถ่ายทอดเทคโนโลยีการพัฒนาสมาร์ทบอยเลอร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT)ให้แก่บุคลากรในโรงงานอุตสาหกรรม วิธีการดำเนินงานในวัตถุประสงค์ข้อนี้สามารถแบ่งส่วนต่างๆ ดังนี้

ส่วนที่ 1 จัดทำหลักสูตรการอบรมเชิงปฏิบัติการ (Workshop) การพัฒนาสมาร์ทบอยเลอร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) ในรูปแบบที่เหมาะสม สำหรับบุคลากรภายในโรงงานที่เข้าร่วมกิจกรรมฝึกอบรม เพื่อนำไปถ่ายทอดความรู้แก่โรงงานต้นแบบ

ส่วนที่ 2 ดำเนินการฝึกอบรมในรูปแบบที่เหมาะสม ให้แก่บุคลากรบุคลากรภายในโรงงานต้นแบบเพื่อสร้างความรับรู้ ความตระหนัก และความเข้าใจในการพัฒนาสมาร์ทบอยเลอร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT)

ส่วนที่ 3 ถ่ายทอดองค์ความรู้หรือให้คำปรึกษา สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมต้นแบบที่เข้าร่วมกิจกรรมพัฒนาสมาร์ทบอยเลอร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT)

จากความเข้าใจของโครงการฯ กล่าวมาข้างต้น ทางที่คณะดำเนินงานได้เขียนเป็นแผนผังวิธีการทำงานโครงการฯ เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจดังนี้

วัตถุประสงค์ของหลักสูตรคือ การประยุกต์ใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยี 4.0 ผ่านแนวคิด SMART-Boiler System เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy 4.0) สำหรับหม้อน้ำ ประกอบด้วยการประเมินประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ การตรวจวัดการใช้พลังงานแบบออนไลน์ของหม้อน้ำ การวิเคราะห์ด้านการเงินและประเมินความคุ้มค่าในการใช้พลังงานของหม้อไอน้ำ การควบคุมการทำงานของหม้อน้ำและการบำรุงรักษา หม้อน้ำ การประยุกต์ใช้ IoT กับระบบหม้อน้ำ มุ่งหวังในการพัฒนาบุคลากรภายในโรงงานที่เข้าร่วมกิจกรรมฝึกอบรม เพื่อนำไปถ่ายทอดความรู้แก่โรงงานต้นแบบในการการพัฒนาสมาร์ทบอยเลอร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) โดยเน้นการกระตุ้นให้ผู้เข้าอบรมเห็นถึงความสำคัญของนวัตกรรมและ เทคโนโลยี 4.0 และรับรู้แนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy 4.0) สำหรับระบบหม้อไอน้ำด้วยเทคโนโลยี 4.0 เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการใช้งานการอนุรักษ์พลังงาน และ ลดการปล่อยมลพิษสู่สภาวะแวดล้อม

เป้าหมายของการอบรม ประกอบด้วย

1) เข้าใจโครงสร้างพื้นฐานของหม้อน้ำและระบบไอน้ำ

2) เข้าใจหลักการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของหม้อน้ำ

3) สามารถประยุกต์ใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยี 4.0 ผ่านแนวคิด SMART-Boiler System เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของหม้อไอน้ำ

4) สามารถตรวจวัดและใช้โปรแกรมเพื่อช่วยคำนวณการใช้พลังงานและการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของหม้อน้ำได้

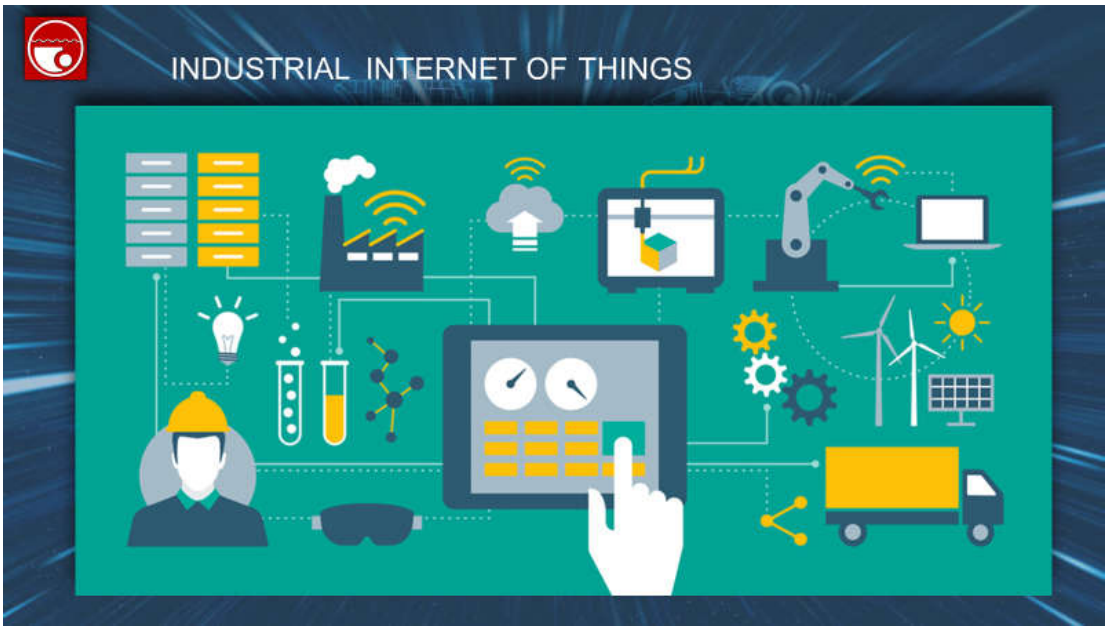
5) สามารถนำเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของ หม้อน้ำได้

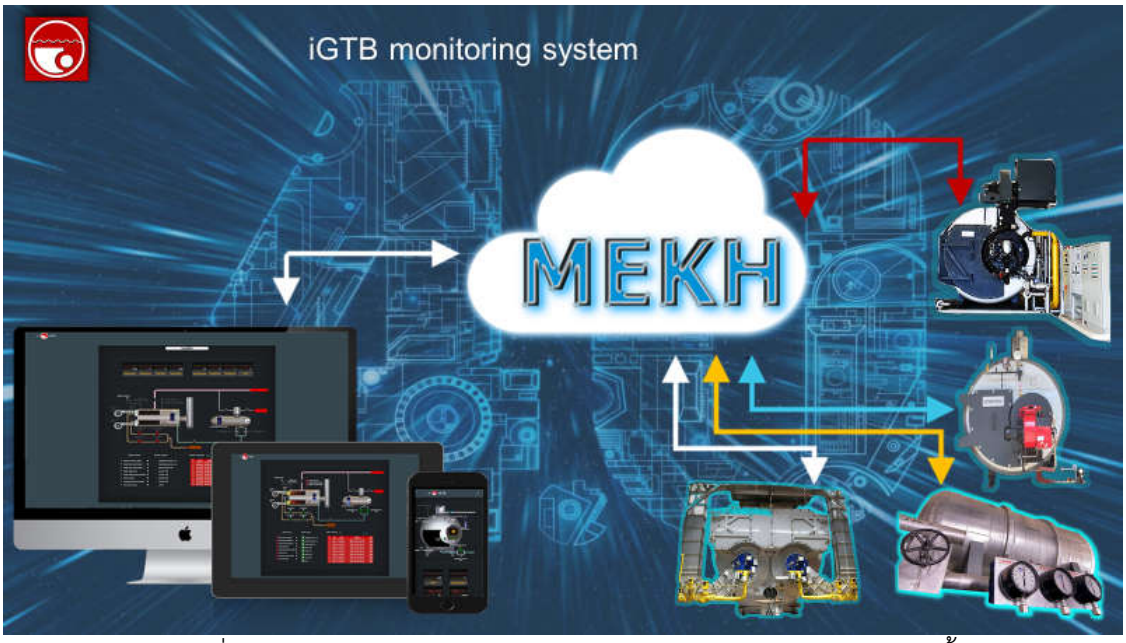
บทที่ 4 การดำเนินงาน

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย เพื่อพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) 1 โรงงานต้นแบบและเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีการพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT)ให้แก่บุคลากรในโรงงานอุตสาหกรรม ในบทนี้นำเสนอผลการดำเนินการของงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ระบบควบคุมสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT)

ภาพที่ 4-1 แสดงระบบควบคุมที่ให้คำปรึกษาและถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับโรงงานต้นแบบใช้ระบบ PLC และ IoT มาเป็นหลักในการพัฒนา สมาร์ทบอยเลอร์ เป็นระบบอัจฉริยะ (Intelligent Automation System) สามารถติดต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลกับระบบควบคุมอื่นได้โดยง่าย รวมถึงง่ายต่อการทำระบบสำรอง (Redundancy System) ที่สามารถสับเปลี่ยนกันได้โดยไม่ต้องหยุดเครื่องในระหว่างซ่อมบำรุงอุปกรณ์ในระบบควบคุม ดังนั้นเพื่อเพิ่มช่องทางการให้บริการที่ครบวงจรมากขึ้น เราจึงมีแนวคิดในการสร้างระบบการตรวจติดตามการทำงานของหม้อน้ำ(Boiler) สามารถเชื่อมต่อเข้ากับอินเตอร์เน็ต ผู้ควบคุมหม้อน้ำสามารถตรวจติดตามการทำงานของเครื่องกำเนิดไอน้ำได้ทันที ทุกที่ ทุกเวลา พร้อมข้อความแจ้งเตือนในกรณีที่เกิดเหตุฉุกเฉินและยังสามารถนำข้อมูล มาวิเคราะห์การใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวางแผนการทำงานและซ่อมบำรุงได้ นอกจากนี้ยังเป็นการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากมีการใช้เครื่องกำเนิดไอน้ำอย่างมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัย





ภาพที่ 4-1 แสดงระบบ Internet of Things (IoT) สำหรับควบคุมหม้อน้ำ
ที่มา: บริษัท เจตาแบค จำกัด (มหาชน) : iGTB

ทั้งนี้จากผลการดำเนินงานการพัฒนาบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างก่อนดำเนินการกับหลังดำเนินโครงการ แสดงดังตารางที่ 1

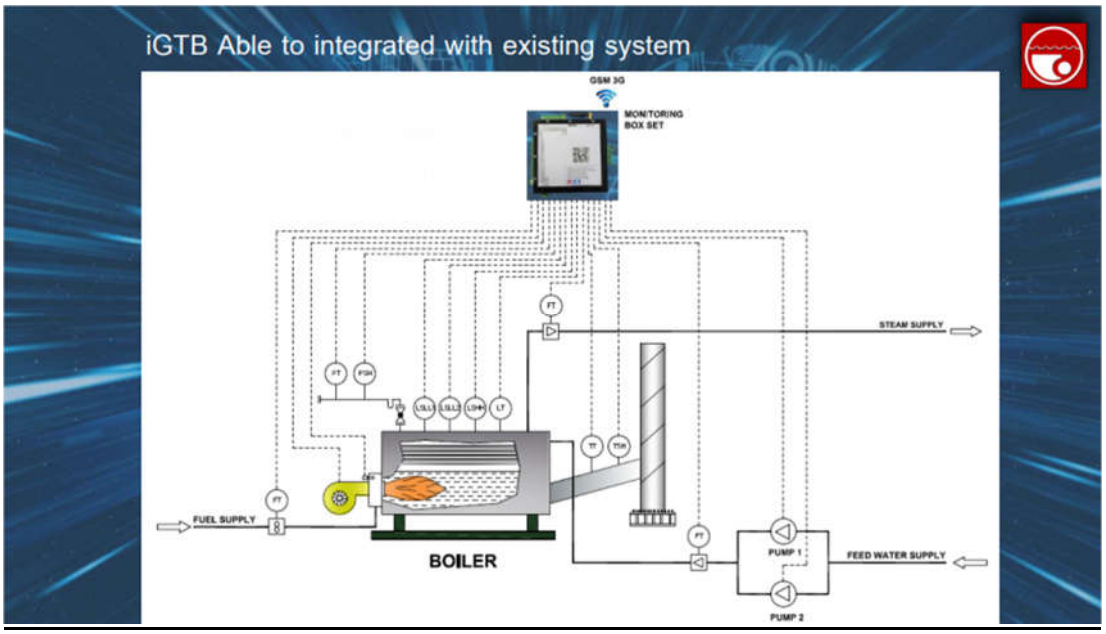
ตารางที่ 4-1 เปรียบเทียบ ความแตกต่างระหว่างก่อนดำเนินการกับหลังดำเนินโครงการ

ลำดับ	รายการ	ก่อนเข้าร่วมโครงการ	พัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรม
1	การแสดงสถานะการทำงานของบอยเลอร์	ระบบควบคุมแบบธรรมดา (Relay Contactor) แสดงผลผ่านหน้าจอที่ห้องควบคุมเครื่องกำเนิดไอน้ำของโรงงาน ระบบ PLC แสดงผลผ่านหน้าจอที่ห้องควบคุมเครื่องกำเนิดไอน้ำของโรงงาน	สมาร์ทบอยเล่อร์แสดงสถานะการทำงานของบอยเลอร์เชื่อมต่อกับอินเตอร์เน็ตสามารถแสดงผลได้ที่หน้าจอโทรศัพท์มือถือและที่ห้องควบคุมของผู้เชี่ยวชาญ
2	ระบบการแจ้งเตือน	แจ้งเตือนโดย ผู้ควบคุม ผ่านหน้าจอที่ห้องควบคุมที่โรงงานเท่านั้น	สมาร์ทบอยเล่อร์แจ้งเตือนบนโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้ทันที ทุกที่ทุกเวลา และที่ห้องควบคุมระบบรวมพร้อม monitoring โดยวิศกรผู้เชี่ยวชาญตลอด 24 ชั่วโมง
3	ระยะเวลาในการเข้าบำรุงรักษา	โทรแจ้ง ฝ่าย Maintenance เพื่อเข้าไปตรวจสอบปัญหาซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 - 2 วัน	สมาร์ทบอยเล่อร์โทรแจ้งฝ่าย Maintenanceทันทีที่มีความผิดปกติของระบบพร้อมส่งทีมงานเข้าซ่อมบำรุงอย่างรวดเร็ว
4	การวิเคราะห์หาสาเหตุ	ฝ่าย Maintenance เข้าไปตรวจสอบหน้างาน	สมาร์ทบอยเล่อร์ แจ้งได้ทันทีว่าสิ่งใดผิดปกติ พร้อมบริการแจ้งเตือนล่วงหน้า
5	การบำรุงรักษา	เสียแล้วถึงซ่อม	สมาร์ทบอยเล่อร์แจ้งล่วงหน้าก่อนเสีย
6	ค่าใช้จ่าย	สูญเสียรายได้ตามระยะเวลาที่ใช้ซ่อม	สมาร์ทบอยเล่อร์ช่วยลดระยะเวลาในการซ่อม
7	การรายงานผล	Manual	สมาร์ทบอยเล่อร์ Summary Data
8	Reliability	ขึ้นอยู่กับผู้บันทึกข้อมูล	100%
9	Spare Part	รอสั่งซื้อใช้ระยะเวลานาน	แจ้งให้เปลี่ยนล่วงหน้าก่อนสามารถมีใช้ได้ทันที
10	ประสิทธิภาพของ Boiler	ขึ้นอยู่กับการ Operate ของลูกค้า	แนะนำวิธีการที่สามารถใช้ Boiler ให้เกิด ประสิทธิภาพสูงสุดได้

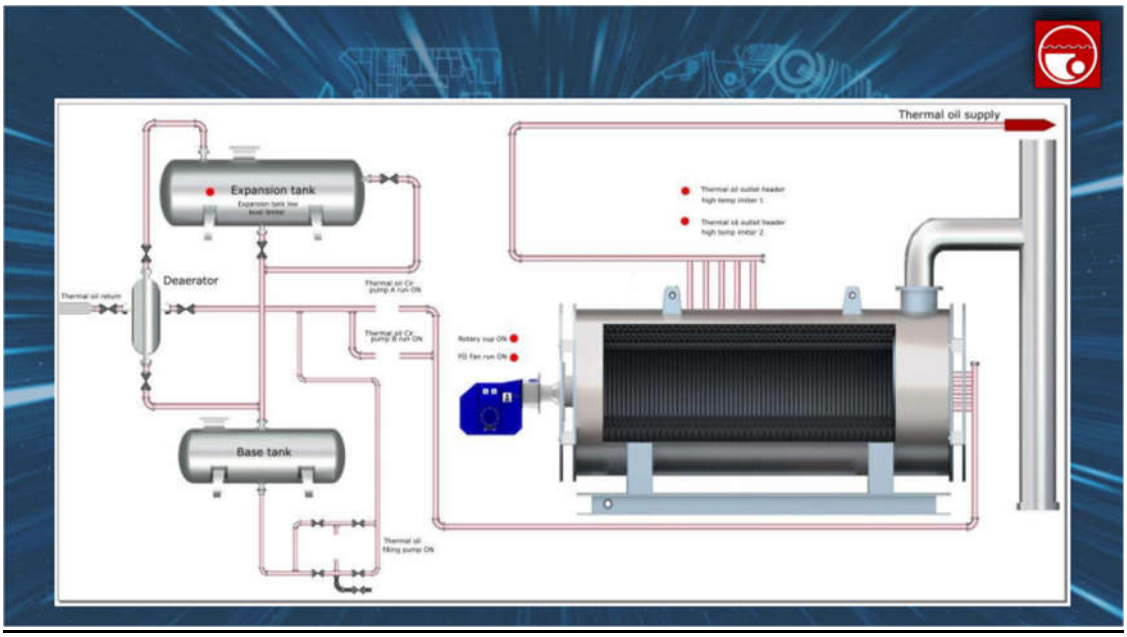
4.2 รายละเอียดของแนวคิดต่อยอดหรือเทคโนโลยีใหม่ที่ใช้ในโครงการ (อธิบายขยายความจากตารางและภาพด้านบน)

ควรควบคุมพร้อมด้วยแพลตฟอร์มควบคุมและติดตามการทำงานพร้อมแสดงสถานะการทำงานของบอยเลอร์ทุกเครื่องในประเทศไทยโดยเชื่อมต่อกับอินเตอร์เน็ตและยังสามารถแสดงผลได้ที่หน้าจอโทรศัพท์มือถือได้อีกด้วยระบบแพลตฟอร์มสามารถแจ้งเตือนระบบการทำงานของหม้อน้ำบนโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้ทันที ทุกที่ ทุกเวลา และระบบแพลตฟอร์ม สามารถ Monitoringโดยผู้เชี่ยวชาญจากกรมโรงงานตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งสามารถแจ้งโรงงานอุตสาหกรรมเจ้าของหม้อน้ำได้ทันทีที่มีความผิดปกติของหม้อน้ำ นอกจากนี้ด้านการวิเคราะห์หาสาเหตุ สมาร์ทบอยเล่อร์สามารถแจ้งได้ทันทีว่าสิ่งใดผิดปกติ พร้อมแจ้งเตือนล่วงหน้าหรือการแจ้งล่วงหน้าก่อนเสีย ช่วยให้ลดระยะเวลาในการซ่อมลงได้ อีกทั้งยังสามารถแนะนำวิธีการที่สามารถใช้ boiler ให้เกิด ประสิทธิภาพสูงสุดได้

การติดตั้งเซนเซอร์ทั้งหมดเข้ากับหม้อน้ำเพื่อพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) โดยสั่งการทำงานได้แบบอัตโนมัติ ซึ่งผู้ควบคุมสามารถสร้างรูปแบบของการควบคุมได้โดยการป้อนโปรแกรมคำสั่งที่แสดงผลผ่านทาง Touch Screen สามารถเชื่อมต่อกับ Computer เข้าสู่ระบบ SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) แสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งเป็นระบบตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Real – Time ใช้ในการตรวจสอบสถานะ ควบคุมการทำงานของระบบหม้อน้ำ



ภาพที่ 4-2 ระบบตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Real – Time ใช้ในการตรวจสอบสถานะ ควบคุมการทำงานของระบบหม้อน้ำ



ภาพที่ 4-3 ระบบตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Real – Time
ใช้ในการตรวจสอบสถานะ ควบคุมการทำงานของระบบหม้อน้ำ (ต่อ)

บทที่ 5

5.1 ผลที่ได้จากการวิจัย

ได้ต้นแบบในการพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) ซึ่งมีความพร้อมและมีศักยภาพในการปรับเปลี่ยนองค์กรสู่ พัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT) พร้อมทั้งได้พัฒนาบุคลากร เพื่อเตรียมความพร้อมสู่ การพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things (IoT)ให้แก่โรงงานอื่นๆ ในกลุ่มอุตสาหกรรมหม้อน้ำที่สนใจ ซึ่งระบบที่พัฒนาขึ้นมาจะช่วยให้บุคลากรที่ได้รับการฝึกอบรมจะมีความรู้ความเข้าใจในการของระบบสมาร์ทบอยเล่อเพื่อให้หม้อน้ำทำงานได้อย่างปลอดภัย มีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ช่วยให้ผู้ควบคุมหม้อน้ำ สามารถเข้าถึงข้อมูลการใช้งาน ได้ง่ายเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ปัญหาและแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็ว มีระบบที่เชื่อมต่ออุปกรณ์การวัดด้านความปลอดภัยโดยควบคุมการใช้งานเพื่อไม่ให้อยู่ในช่วงการเกิดการคืบ (Creep), ด้านพลังงาน และสิ่งแวดล้อมของหม้อน้ำทั้งหมด

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

เชิงพานิชย์เป็นระบบใหม่ที่โรงงานสามารถขยายผลภายในโรงงานเองหากมีหม้อน้ำเพิ่มขึ้นไม่ว่าจะเป็นหม้อน้ำใช้แล้วหรือหม้อน้ำใหม่เนื่องจากบุคลากรมีความรู้มีทักษะในการพัฒนาระบบได้เองหรือโรงงานอื่นๆที่บุคลาการได้รับการพัฒนา ฝึกอบรมก็สามารถพัฒนาระบบสมาร์ทบอยเล่อร์ในโรงงานตนเองได้

เชิงวิชาการและสาธารณะประโยชน์ เกิดนวัตกรรมใหม่จากการพัฒนาสมาร์ทบอยเล่อร์ด้วยดิจิทัลทรานฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแบบจำลองดิจิทัลเสมือนแบบเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และ Internet of Things เป็นการพลิกผันทางเทคโนโลยีโดยการนำ IoT มาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการประมวลผลแบบคลาวด์ผ่านกระบวนการเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) ประกอบกับข้อมูลที่มีอยู่อย่างมากมาย (Big Data) ทำให้เกิดการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) จะทำให้เกิดความฉลาดมากขึ้น จนสามารถสร้างแบบจำลองของสิ่งต่างๆ ในรูปแบบ “เสมือน” ที่เป็นดิจิทัลหรือที่เรียกว่ากัน คู่เสมือนดิจิทัล (Digital Twins)

5.3 ผลประเมินทางเศรษฐศาสตร์

ระบบสมาร์ทบอยเล่อที่พัฒนาขึ้น สามารถให้ข้อมูลการดำเนินงาน แบบ Real Time ให้ข้อมูลเชิงตัวเลขที่แม่นยำสูง นำไปสู่การวิเคราะห์ การวิเคราะห์ปัญหา และแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็ว มีระบบที่เชื่อมต่ออุปกรณ์การวัดด้านความปลอดภัย พลังงาน และสิ่งแวดล้อมของหม้อน้ำทั้งหมดได้

เอกสารอ้างอิง

[1] ศุภวัฒน์ ธาดาจารุมงคล. (2561). เอกสารประกอบการบรรยายเรื่องพัฒนาการหม้อน้ำการก้าวสู่ Smart Boiler. กรมโรงงานอุตสาหกรรม.

[2] http://www.atrobt.com/p/understanding-analog-sensor.html

[3] http://www.enervision.co.th/

[4] *คู่มือการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบไอน้ำ.* (2559). กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

[5] *คู่มือในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอุปกรณ์หม้อน้ำ.* (2563). กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

[6] http://www.blueener.com

[7] กฎกระทรวง “กำหนดมาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับหม้อน้ำ หม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อนและภาชนะรับแรงดันในโรงงาน พ.ศ. ๒๕๔๙”.