

A world map composed of white dots on a red background. The dots are arranged in a grid pattern, with the density of the dots varying to create the shape of the continents. The map is centered on the Atlantic Ocean.

บทความวิจัย/วิชาการ



# เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย สำหรับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

รศ.ดร.ปรีชา กอเจริญ<sup>\*</sup> ผศ.เพชร นันทิวัฒนา

เต็มพงษ์ ศรีเทศ และ รศ.ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

## บทคัดย่อ

การสื่อสารเป็นปัจจัยสำคัญของอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หรือไอโอที โดยการสื่อสารที่ถูกนำมาใช้ มีเทคโนโลยีและมาตรฐานที่หลากหลาย การเชื่อมต่อเข้าด้วยกันจำเป็นต้องอยู่บนเครือข่ายที่มีมาตรฐาน และสามารถส่งผ่านข้อมูลระหว่างกันของอุปกรณ์ไอโอทีและเครือข่ายที่แตกต่างกันได้ เทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ที่มีความแตกต่างกันนั้นมีข้อดีและข้อด้อย การเลือกใช้ให้เหมาะสมกับแอปพลิเคชันจึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจพื้นฐานของเทคโนโลยีและข้อจำกัด บทความนี้นำเสนอพื้นฐานของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายสำหรับไอโอที ข้อจำกัดของเทคโนโลยี และการเลือกใช้ให้เหมาะสม

**คำสำคัญ :** การสื่อสารไร้สาย อินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง ไอโอที

## Abstract

Communication is a key factor of the Internet of Things (IoT). Variety of technologies and standards of communication protocol have been used in IoT. Connecting IoT devices need networking to pass information between devices in different networks. There are pros and cons for each technology that were introduced. Choosing the technology or standard that suit to the application, it is necessary to have a basic understanding of the technology and their limitations. This article presents the fundamentals of wireless communication technology for IoT, the limits of the technology, and the recommendation.

**Keywords :** Wireless Communication, Internet of Things, IoT

## ความเป็นมา

อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หรือไอโอที (Internet of Things, IoT) มีความต้องการในการใช้งานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยจะมีความแตกต่างจากการสื่อสารไร้สายที่ได้รับความนิยม เช่น ไวไฟ บนมาตรฐาน IEEE 802.11 มาตรฐานการสื่อสารไร้สายสำหรับเครือข่ายส่วนบุคคล กำกับดูแลโดยสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE) ปัจจุบันสามารถให้บริการที่ความเร็วการส่งผ่านข้อมูลสูงสุดมากกว่า 600 Mbps หรือมาตรฐาน IEEE 802.15.1 ที่เรียกกันทั่วไปว่าบลูทูธ (Bluetooth™) เพื่อเชื่อมต่อการสื่อสารไร้สายระหว่างอุปกรณ์ส่วนบุคคลต่างๆ เช่น เชื่อมต่อระหว่างหูฟังกับสมาร์ทโฟน หรือระหว่างคีย์บอร์ดกับสมาร์ตทีวี เป็นต้น มาตรฐานการเชื่อมต่อดังกล่าวส่วนใหญ่ใช้กับการส่งผ่านข้อมูลที่มีการติดต่อสื่อสาร ส่งข้อมูลและมีการโต้ตอบระหว่างอุปกรณ์ตลอดเวลา แต่ในการใช้งานไอโอที อุปกรณ์สื่อสารมีความต้องการในการส่งผ่านข้อมูลในปริมาณน้อย และทำการส่งข้อมูลเป็นช่วงเวลาสั้นๆ ก่อนอุปกรณ์สื่อสารจะหลับเพื่อประหยัดพลังงาน เช่น ระบบควบคุมอาคารหรือบ้านอัจฉริยะ ระบบการควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ในบ้านหรือที่ทำงานที่สามารถควบคุมการเปิดปิดระบบไฟฟ้าต่างๆ ได้อัตโนมัติ ระบบเกษตรอัจฉริยะที่ทำการประมวลผลความชื้นและอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อควบคุมการให้น้ำ ความร้อนหรือความชื้นในโรงเพาะหรือโรงเรือน การวัดและควบคุมในงานอุตสาหกรรม รวมถึงระบบการตรวจวัดสุขภาพส่วนบุคคล ซึ่งงานในลักษณะที่มีการตรวจวัดมีปริมาณการส่งผ่านข้อมูลไม่มาก ส่งข้อมูลความเร็วต่ำนี้ใช้การเชื่อมโยงการสื่อสารในระยะใกล้ และมีความต้องการในการใช้งานได้เป็นระยะเวลานาน (Li, Da Xu, & Zhao, 2015) และ (Kurakova, 2013) ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานไอโอทีในรูปแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 1 มีดังนี้

การวัดและควบคุมในงานอุตสาหกรรม	ระบบควบคุมอาคารอัจฉริยะ	เมืองอัจฉริยะ	การจัดการพลังงาน	อุปกรณ์สวมใส่อัจฉริยะ	การสื่อสารระหว่างรถยนต์
<ul style="list-style-type: none"> <li>- เครื่องจักรอัจฉริยะ</li> <li>- โรงงานอัตโนมัติ</li> <li>- การติดตามครุภัณฑ์</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ระบบความปลอดภัย</li> <li>- ระบบทำความเย็น</li> <li>- การจัดการพลังงาน</li> <li>- การควบคุมระยะไกล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การจัดการการจราจร</li> <li>- ระบบส่องสว่าง</li> <li>- ตรวจสอบสภาพแวดล้อม</li> <li>- การจัดการน้ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การผลิตไฟฟ้า/ส่งจ่าย</li> <li>- มิเตอร์</li> <li>- สมาร์ตกริด</li> <li>- การจัดการพลังงานทางเลือก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ตรวจวัดสุขภาพ</li> <li>- การออกกำลังกาย</li> <li>- ชุดสวมใส่อัจฉริยะ</li> <li>- นาฬิกาอัจฉริยะ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ควบคุมการจราจร</li> <li>- ติดตามรถยนต์</li> <li>- ขับเคลื่อนอัตโนมัติ</li> <li>- การบำรุงรักษา</li> </ul>

รูปที่ 1 ตัวอย่างการประยุกต์ไอโอทีในงานประเภทต่างๆ

ในการจัดการงานอุตสาหกรรมซึ่งมีการใช้เครื่องจักรสมัยใหม่ มีการใช้สัญญาณจากเครื่องมือวัดและสัญญาณเพื่อควบคุมอุปกรณ์กลไกต่างๆ ของเครื่องจักรจากอุปกรณ์เซนเซอร์ (Sensors) หรืออุปกรณ์ตัวกระตุ้น (Actuators) หรืออุปกรณ์ต่างๆ ในโรงงานจะถูกส่งเข้าสู่ห้องควบคุม เพื่อให้การควบคุมเครื่องจักรสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลักษณะของสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์เซนเซอร์หรือส่งไปยังอุปกรณ์ตัวกระตุ้นมีความต้องการความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลไม่สูงนัก แต่ต้องการความถูกต้องและน่าเชื่อถือของการส่งผ่านข้อมูลในเครือข่ายการสื่อสาร ตัวอย่างของอุตสาหกรรมที่อาจใช้การควบคุมหรือตรวจวัดด้วยไอโอทีมีดังนี้ การประยุกต์เพื่อตรวจวัดสัญญาณด้านความปลอดภัยในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัตถุหรือสารเคมีอันตราย ในกรณีที่สารเคมีหรือวัตถุอันตรายรั่วไหลอาจก่อให้เกิดการระเบิดหรือเพลิงไหม้เกิดขึ้น จุดที่เกิดความเสียหายอาจส่งผลกระทบต่อสายตัวนำสัญญาณ และอาจทำให้ระบบการแจ้งเตือนภัยไม่สามารถทำได้ อย่างมีประสิทธิภาพ แต่สำหรับไอโอทีที่ใช้เครือข่ายไร้สายที่ออกแบบให้ใช้ระเบียบวิธีการหาเส้นทางแบบกระจาย ที่มีเส้นทางส่งผ่านข้อมูลได้หลายเส้นทางเนื่องจากติดตั้งโนดไว้จำนวนมาก จะสามารถทำการฟื้นฟูเส้นทางส่งผ่านข้อมูลได้ด้วยตนเองหลังอุปกรณ์สื่อสารบางส่วนเสียหายจากเพลิงไหม้ ซึ่งจะช่วยให้ส่งผ่านสัญญาณข้อมูลเตือนภัยในสถานะวิกฤตได้ ในสถานประกอบการ เช่น คลังสินค้า หรือโรงพยาบาล การติดตามวัตถุเพื่อประสิทธิภาพของการจัดการเป็นสิ่งจำเป็น เช่น การระบุตำแหน่งสินค้าภายในคลังสินค้า หรือการติดตามเครื่องมือทางการแพทย์บางชนิดที่มีราคาสูง และจำเป็นต้องการช่วยชีวิตคนไข้ โรงพยาบาลอาจไม่สามารถมีเครื่องมือดังกล่าวได้จำนวนมาก จำเป็นต้องจัดการการใช้งานและติดตามตำแหน่งที่อยู่ของเครื่องมือดังกล่าวได้ตลอดเวลา นอกจากนี้การจัดการห่วงโซ่อุปทาน เช่น การติดตามตู้คอนเทนเนอร์สินค้า อาจใช้ระบบ ไอโอทีที่ร่วมกับระบบจีพีเอส (Global Positioning System, GPS) เพื่อตรวจติดตามตำแหน่งของสินค้าได้

ระบบทำความเย็นในอาคารนั้นโดยทั่วไปมีการติดตั้งการตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น เพื่อควบคุมการทำความเย็นในจุดต่างๆ แยกจากกัน โดยไม่ได้ทำการควบคุมจากส่วนกลาง การตรวจสอบและประเมินประสิทธิภาพไม่สามารถทำได้โดยง่าย เมื่อเกิดปัญหาขึ้นอาจต้องใช้เวลาในการซ่อมแซมระยะหนึ่ง และจะกระทบกับผู้ใช้งาน นอกจากนี้ภาระทางความร้อนของแต่ละบริเวณอาจมีค่าไม่เท่ากัน โดยเฉพาะภาระทางความร้อนที่เกิดจากร่างกายมนุษย์เมื่อมีผู้คนเข้าหรือออกในบริเวณใดๆ มากหรือน้อยไม่เท่ากัน ภาระทางความร้อนจะมีค่าแตกต่างกัน โดยหากไม่มีการควบคุมการทำงานของระบบปรับอากาศที่ดีจากส่วนกลาง การใช้พลังงานจะสิ้นเปลืองไปอย่างไม่เหมาะสม ดังนั้น หากติดตั้งอุปกรณ์ไอโอทีในกลุ่มเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดความเย็น ค่าความเร็วลมของระบบไหลเวียนอากาศที่จุดต่างๆ และส่งผ่านข้อมูลมายังส่วนควบคุมกลาง จะสามารถปรับระบบควบคุมความเย็นให้เหมาะสมได้ รวมถึงการตรวจวัดค่าการเปลี่ยนแปลงที่เริ่มผิดปกติของอุปกรณ์ในระบบทำความเย็นได้ก่อนจะเสียหาย ทำให้สามารถจัดการซ่อมแซมแก้ไขได้ในช่วงนอกเวลาทำการก่อนที่ระบบจะเกิดการขัดข้องได้ นอกจากนี้ในอาคารสำนักงานหรือบ้านพักอาศัยที่ต้องการติดตั้งระบบตรวจจับการบุกรุกและรักษาความปลอดภัย สามารถติดตั้งอุปกรณ์ไอโอทีชนิดเซนเซอร์แม่เหล็กที่ประตู หน้าต่าง เพื่อตรวจจับการเปิดหรือปิด อุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจจับการเคลื่อนไหวด้วยคลื่นอินฟราเรด อุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจจับการทุบกระชก หรืออุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจจับควันหรืออุณหภูมิกรณีเกิดเพลิงไหม้ อุปกรณ์ควบคุมและแสดงผลสามารถทำได้ทั้งการตรวจจับการบุกรุก หรือการตรวจสอบสถานะ เช่น ประตูปิดหรือเปิดอยู่ อุปกรณ์ตรวจจับต่างๆ อยู่ในสถานะพร้อมใช้งานหรือไม่ ซึ่งช่วยให้เกิดความมั่นใจต่อระบบรักษาความปลอดภัยได้มากยิ่งขึ้น

สำหรับระบบเกษตรอัจฉริยะ การให้ปริมาณน้ำ ยาปราบศัตรูพืช และปุ๋ย เป็นสิ่งจำเป็นและส่งผลต่อปริมาณผลผลิตและประสิทธิภาพการผลิตต่อพื้นที่ โดยพื้นที่เกษตรกรรมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การจัดการให้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมจะลดต้นทุนการผลิตได้ โดยหากใช้ไอโอทีเพื่อตรวจวัดความชื้นในดินจะสามารถกำหนดปริมาณการให้น้ำได้เหมาะสม โดยหากพื้นที่บริเวณใดมีฝนตกมาแล้วพื้นดินชุ่มชื้นอยู่ก็ไม่จำเป็นต้องเสียพลังงานในการให้น้ำแก่พื้นที่ดังกล่าว ส่วนพื้นที่ใดพื้นดินแห้งแล้ง ก็จะต้องให้น้ำในพื้นที่การเกษตรนั้น การตรวจสอบระดับน้ำจากแหล่งชลประทานเพื่อเตรียมประเมินความสามารถในการผลิตในพื้นที่จะช่วยในการตัดสินใจเพิ่มหรือลดจำนวนการผลิตให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับไอโอทีเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิ สภาพดิน หรือความจำเป็นในการใช้ปุ๋ยหรือสารเคมี ซึ่งจะสามารถช่วยให้มีการใช้ปุ๋ยหรือสารเคมีได้ในปริมาณที่เหมาะสม หรือการใช้งานในฟาร์มกลไกหรือโรงเรือนในการตรวจวัดอุณหภูมิความชื้นในโรงเรือน เพื่อทำการปรับค่าต่างๆ ให้เหมาะสมกับงานกลไกนั้นๆ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้กับระบบตรวจจับสถานะแวดล้อมทั้งปริมาณน้ำฝน ความเร็วลม ความชื้นในอากาศ ปริมาณฝุ่นละอองในเมือง หรือปริมาณสารพิษในอากาศต่างๆ เพื่อแจ้งเตือนภัยให้แก่ประชาชนได้ทันทั่วทั้ง ในส่วนเมืองอัจฉริยะยังสามารถประยุกต์ไอโอทีกับการควบคุมการจราจร การจัดการด้านขยะในเมือง ระบบการรักษาความปลอดภัย การควบคุมการส่องสว่างในพื้นที่สาธารณะ รวมทั้งการจัดการด้านการจอดรถยนต์ได้ด้วย

ด้านการจัดการพลังงานเป็นส่วนหนึ่งที่ไอโอทีสามารถนำมาใช้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพของการจัดการที่ดีขึ้นได้ เช่น การผลิตและจัดจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกที่มีผู้ผลิตรายย่อยจำนวนมาก การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า การวัดการใช้งานพลังงานไฟฟ้า มิเตอร์อัจฉริยะ และการจัดการการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในอาคารบ้านเรือน (Energy Storage) เป็นต้น

อุปกรณ์สวมใส่อัจฉริยะสามารถนำมาใช้เพื่อตรวจวัดสุขภาพส่วนบุคคล สามารถเพิ่มความสะดวกสบายแก่ผู้ใช้งาน โดยตรวจวัดค่าสัญญาณชีพที่สำคัญด้วยอุปกรณ์ไอโอทีชนิดสวมใส่ เพื่อตรวจวัดค่าอัตราการเต้นของหัวใจ อัตราการหายใจ ปริมาณออกซิเจนในเลือด การเคลื่อนไหว หรือระยะเวลาการนอนพักผ่อน ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดถูกส่งผ่านเครือข่ายไร้สายมายังอุปกรณ์ประมวลผลกลาง เพื่อให้แพทย์ผู้เชี่ยวชาญสามารถวินิจฉัย หรือหากมีสัญญาณชีพใดที่อยู่ในข่ายอันตรายก็จะสามารถแจ้งเตือนผู้เกี่ยวข้องให้เข้ามาช่วยเหลือได้ทันทั่วทั้ง นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ไอโอทีเพื่อช่วยในการตรวจวัดการออกกำลังกาย นาฬิกาอัจฉริยะ แว่นตาอัจฉริยะ หรือเสื้อผ้าอัจฉริยะที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ไอโอทีลงบนเสื้อผ้าอีกด้วย

## คุณลักษณะของอุปกรณ์และเครือข่ายไอโอที

การนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับงานต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น อุปกรณ์ไอโอทีจะต้องมีการเชื่อมต่อการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เข้าสู่ระบบด้วยการเชื่อมต่อสัญญาณแบบไร้สาย การออกแบบจำเป็นต้องให้คุณลักษณะพิเศษต่างๆ ดังต่อไปนี้



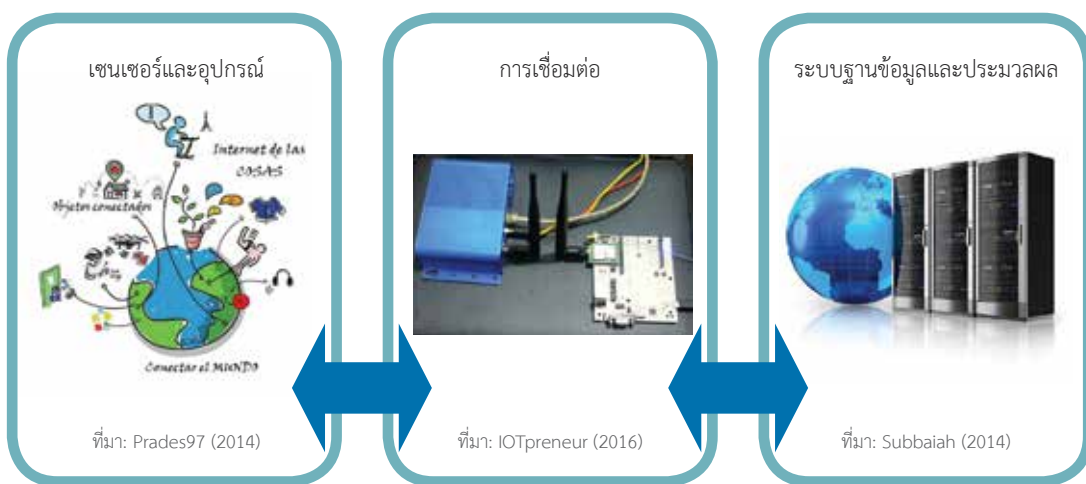
อุปกรณ์ไอโอที่ต้องการทำการเชื่อมต่อแบบไร้สาย ซึ่งจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ต่างๆ ที่มีการใช้พลังงานต่ำ โดยจะใช้พลังงานต่ำกว่าการสื่อสารไร้สายในมาตรฐานอื่นๆ เช่น อุปกรณ์ในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือ อุปกรณ์ในเครือข่ายส่วนบุคคลไร้สาย โดยหากใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานเพียงอย่างเดียว อุปกรณ์ไอโอที่ก็ต้องสามารถใช้ได้เป็นระยะเวลาหลายเดือน สำหรับงานบางประเภทในอุตสาหกรรมอาจใช้ขนาดแบตเตอรี่ที่มากขึ้น เพื่อให้มีระยะเวลาใช้งานได้นานมากพอสำหรับรอบการบำรุงรักษาของโรงงานที่กำหนดไว้โดยไม่จำเป็นต้องหยุดเครื่องจักร นอกจากนี้ในการใช้งานบางลักษณะที่ต้องการการวางโนดจำนวนมาก และครอบคลุมพื้นที่บริเวณกว้าง การเข้าบำรุงรักษาและเปลี่ยนแบตเตอรี่อาจทำได้ไม่สะดวกนัก เช่น การตรวจจับสถานะแวดล้อม อุปกรณ์ไอโอที่มีการใช้พลังงานต่ำจึงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญ นอกจากนี้หากอุปกรณ์มีการใช้พลังงานต่ำ การออกแบบแหล่งพลังงานสามารถนำพลังงานจากสถานะแวดล้อมรอบๆ (Energy Harvesting) เพื่อเป็นแหล่งพลังงานหลักของอุปกรณ์ไอโอที่ได้ เช่น การใช้เพียโซอิเล็กทริกฟิล์ม (Piezoelectric film) ที่สามารถให้พลังงานได้จากการกดทับ โดยนำไปติดตั้งบริเวณพื้นรองเท้า ทุกครั้งที่ก้าวเดินและมีการเหยียบกดบนเพียโซอิเล็กทริกฟิล์มจะเป็นการสร้างพลังงานให้กับอุปกรณ์ไอโอที่ได้

ส่วนประกอบของอุปกรณ์ไอโอที่ประกอบด้วยหน่วยประมวลผล หน่วยความจำ เช่น เซอร์ วจรรีบ และส่งคลื่นวิทยุ และแหล่งจ่ายพลังงาน หน่วยประมวลผลและหน่วยความจำจะทำหน้าที่รับข้อมูลข่าวสารที่ได้จากเซนเซอร์ ข้อมูลที่ได้มาจากเซนเซอร์จะถูกส่งมาในรูปแบบของเฟรมข้อมูล แฟล็กแสดงผล หรือ แฟล็กคำสั่ง (flag) โดยหากมีการควบคุมและประมวลผลที่ซับซ้อนขึ้น เฟรมข้อมูลจะมีรูปแบบโปรโทคอลที่ซับซ้อนมากขึ้นตามไปด้วย และอุปกรณ์ไอโอที่จะมีจำนวนมากในเครือข่ายหนึ่งๆ ดังนั้นราคาของอุปกรณ์ไอโอที่จึงต้องมีราคาถูก เพื่อให้ระบบโดยรวมมีราคาไม่สูงนัก การออกแบบโปรโทคอล (Protocol) และการออกแบบเครือข่ายจึงต้องหลีกเลี่ยงการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนและมีราคาแพง โดยเลือกที่จะกำหนดโปรโทคอลที่มีความซับซ้อนต่ำ ใช้การประมวลผลและหน่วยความจำน้อย นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและดูแลระบบ โดยในบางลักษณะงานที่มีความต้องการเสถียรภาพของการส่งสัญญาณ อาจต้องทำการออกแบบในลักษณะที่มีความยืดหยุ่น ให้สามารถกำหนดค่าติดตั้งเริ่มต้นได้ด้วยตนเอง (Self-configuration) เมื่ออุปกรณ์ถูกป้อนพลังงานเพื่อเริ่มเข้าร่วมเครือข่ายจากการเปิดเครื่องครั้งแรก และสามารถปรับเส้นทางการส่งข้อมูลจากปัญหาการเสียหายของอุปกรณ์บางส่วนในระบบที่เป็นอุปกรณ์ส่งต่อข้อมูลภายในเครือข่าย หากสามารถออกแบบให้เครือข่ายไอโอที่มีคุณสมบัติดังกล่าวได้ จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและดูแลได้ แต่ต้องใช้ทรัพยากรในการประมวลผลมากขึ้น การเลือกใช้อุปกรณ์ไอโอที่มีใช้แพร่หลายและเป็นไปตามมาตรฐานสากลที่กำหนด ก็เป็นทางหนึ่งในการลดต้นทุนของอุปกรณ์ลงได้ เนื่องจากอุปกรณ์ที่เป็นไปตามมาตรฐานจะมีผู้ผลิตจำนวนมากและมีใช้แพร่หลาย ราคาจะถูกกว่า

ทอพอโลยีเครือข่ายที่ใช้ในไอโอในรูปแบบเครือข่ายสตาร์ (Star Network) ถูกออกแบบให้มีโนดแม่ข่ายเพียงตัวเดียวสื่อสารกับโนดที่เป็นลูกข่ายหลายตัว ลักษณะการส่งข้อมูลการตรวจวัดทำโดยการส่งผ่านข้อมูลจากโนดลูกข่ายมายังโนดแม่ข่ายเพียงทอดเดียว รัศมีการสื่อสารจึงอยู่ในระยะทางจำกัด โดยหากระยะทางการสื่อสารระหว่างโนดลูกข่ายไปยังโนดแม่ข่ายมีระยะทางมาก การส่งสัญญาณจำเป็นต้องเพิ่มกำลังการส่งให้มากขึ้น และส่งผลต่อการใช้พลังงานในการส่งให้ใช้พลังงานมากขึ้นด้วย อีกทางเลือกหนึ่งคือการใช้ทอพอโลยี



เครือข่ายแบบเมช (Mesh Network) หรือคลัสเตอร์ (Cluster) ที่ทำการส่งข้อมูลต่อกันจากโหนดลูกข่ายหนึ่งผ่านโหนดลูกข่ายอื่นๆ ไปยังโหนดแม่ข่ายในลักษณะมัลติฮอป (Multi-hop) ซึ่งการจัดเครือข่ายจะมีความซับซ้อนมากขึ้น ส่งผลต่อการใช้หน่วยความจำที่มากขึ้น โดยจะต้องมีการประมวลผลการหาเส้นทาง การเก็บตารางเส้นทางเพิ่มขึ้นด้วย อีกประเด็นหนึ่งของเครือข่ายไอโอทีคือไม่รองรับการสื่อสารซิงโครนัส (Synchronous Communication) และไม่รองรับการสื่อสารด้วยเวลาจริง (Real-time Communication) เนื่องจากอุปกรณ์ไอโอทีจะต้องหลับเกือบตลอดเวลาเพื่อการประหยัดพลังงาน ข้อมูลที่ได้จากการวัดของโหนดลูกข่ายที่ถูกส่งผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจึงอาจมีการหน่วงเวลาในการส่งข้อมูลเป็นระยะเวลาหลายวินาทีถึงหลายนาทีเดียว



รูปที่ 2 ลักษณะของระบบไอโอที

## การเชื่อมต่ออุปกรณ์ไอโอทีกับเครือข่ายไร้สาย

การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในไอโอทีมีหัวใจสำคัญคือ การเชื่อมต่อการสื่อสารด้วยระบบไร้สาย เทคโนโลยีเครือข่ายเป็นส่วนช่วยในการเชื่อมโยงอุปกรณ์เข้าด้วยกัน โดยอุปกรณ์จะส่งข้อมูลเข้าสู่เครือข่ายแบบไร้สาย เพื่อให้ทำการประมวลผลแอปพลิเคชันและบริการ (Applications and Services) บนคลาวด์ (Cloud) ได้ อินเทอร์เน็ตเป็นส่วนหลักในการประสานอุปกรณ์ทุกตัวให้สามารถสื่อสารระหว่างกันได้บนโพรโทคอลมาตรฐาน แม้จะมีการเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายที่แตกต่างกัน ลักษณะของระบบไอโอทีแสดงดังรูปที่ 2 โดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไอโอทีบนเครือข่ายสามารถพิจารณาชั้นการเชื่อมต่ออย่างง่ายได้สามชั้น คือ 1) ชั้นกายภาพและเครือข่าย (Physical and Network Access Layer) 2) ชั้นอินเทอร์เน็ต (Internet Layer) และ 3) ชั้นแอปพลิเคชัน (Application Layer) ซึ่งแต่ละชั้นจะมีเทคโนโลยีและมาตรฐาน รวมถึงผู้ผลิตที่หลากหลาย ที่สามารถนำมาใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไอโอทีเข้ากับเครือข่ายได้ รายละเอียดของแต่ละชั้นแสดงดังต่อไปนี้

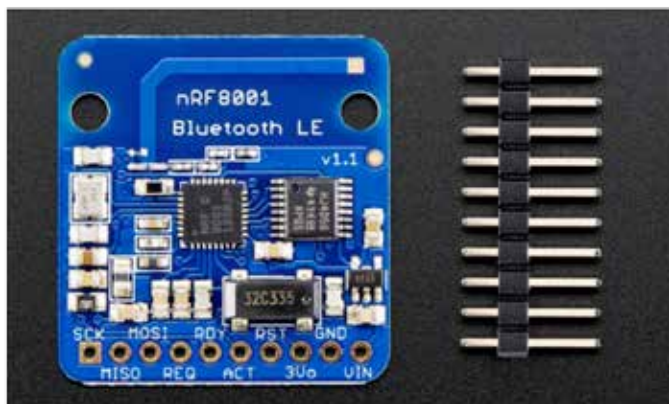
## 1. ชั้นกายภาพและเครือข่าย

ชั้นกายภาพและเครือข่ายเป็นชั้นที่อยู่ล่างสุดของเครือข่ายไอโอที จะเป็นชั้นที่กำหนดกระบวนการสื่อสารในระดับบิตของข้อมูล เทคนิคการมอดูเลต คลื่นความถี่และแบนด์วิดท์ที่ใช้ รวมถึงการจัดรูปแบบของเฟรมข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์และเครือข่าย เทคโนโลยีและมาตรฐานที่รองรับการเชื่อมต่อในชั้นกายภาพมีจำนวนมาก แต่ละเทคโนโลยีมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไป เช่น บริษัท Texas Instrument สร้างชิปแฉวงจรรวมในตระกูล CC2500 พร้อมชุดพัฒนาขึ้นตามมาตรฐานการสื่อสาร IEEE 802.15.4 หรือบริษัท Maxstream ได้สร้างอุปกรณ์ XBee และ XBee PRO พร้อมชุดพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของ Zigbee ในส่วนอุปกรณ์บลูทูธได้มีการพัฒนามาตรฐานใหม่ที่มีการใช้พลังงานต่ำกว่าเดิมมาก คือมาตรฐานบลูทูธพลังงานต่ำหรือบีแอลอี (Bluetooth Low Energy, BLE) อุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่ใช้พลังงานต่ำส่วนมากจะมีระยะทางการสื่อสารไม่ไกลนัก เนื่องจากมีค่าความไวในการรับในระดับที่จำกัด แต่มีการพัฒนาการมอดูเลตที่ใช้การกระจายสเปกตรัมให้เป็นแถบกว้าง ซึ่งจะสามารถขยายระยะทางการสื่อสารให้มากขึ้นที่เรียกว่า ลอรา (LoRa) โดยสามารถเชื่อมต่อสื่อสารในระยะทางมากกว่า 500 เมตรได้ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนามาตรฐานการสื่อสารไร้สายเพื่อใช้กับระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เดิม ที่สามารถนำแถบความถี่ช่วงแถบความถี่คูมาใช้ คือมาตรฐาน NB-IoT อีกด้วย ในบทความนี้จะยกตัวอย่างเทคโนโลยีและมาตรฐานที่เป็นที่นิยมจำนวนหนึ่งดังนี้

### 1.1 บลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth Low Energy, BLE)

บลูทูธพลังงานต่ำหรือเรียกว่าบีแอลอี ทำงานบนความถี่ย่าน ISM 2.4 GHz ถูกออกแบบให้ใช้งานการสื่อสารในระยะใกล้ในลักษณะเครือข่ายส่วนบุคคล (Personal Area Network, PAN) มีความเร็วในการสื่อสาร 260 kbps โดยมักจะนำมาใช้กับอุปกรณ์สวมใส่เพื่องานด้านสุขภาพ ฟิตเนส และการออกกำลังกาย รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในด้าน การระบุตำแหน่งวัตถุ ตัวอย่างบอร์ดบลูทูธพลังงานต่ำแสดงดังรูปที่ 3 ทอพอโลยีการเชื่อมต่อจะใช้การเชื่อมต่อแบบสตาร์ มีอุปกรณ์หลักหนึ่งตัวที่สามารถควบคุมอุปกรณ์ที่ต่อพ่วงอยู่ได้จำนวนหลายตัว ซึ่งเพิ่มความสามารถในการเชื่อมต่อจากเดิมที่สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ได้เพียง 8 ชิ้น เป็นสามารถเชื่อมต่อได้ไม่จำกัด แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะเหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในจำนวน 10-20 ชิ้นต่อหนึ่งอุปกรณ์หลักเท่านั้น (Gerber, 2017) นอกจากการกำหนดมาตรฐานในชั้นกายภาพและชั้นเส้นทางเชื่อมโยงข้อมูล (Data Link Layer) แล้ว บีแอลอียังมีการกำหนดโพรไฟล์การใช้งาน (Application Profiles) เพื่อสำหรับการใช้งานแอปพลิเคชันเฉพาะด้านขึ้นมามากขึ้นด้วย เช่น โพรไฟล์ AVRCP (Audio/Video Remote Control Profile) ที่กำหนดการเชื่อมต่อของรีโมตคอนโทรลบลูทูธ เพื่อใช้สั่งการอุปกรณ์เครื่องเสียง และวีดิทัศน์ในลักษณะคำสั่งการเล่น การหยุด หรือการหยุดชั่วคราว เป็นต้น การกำกับโพรไฟล์ในลักษณะนี้ทำให้อุปกรณ์บลูทูธจากหลากหลายผู้ผลิตสามารถทำงานร่วมกันได้ ซึ่งเป็นผลดีทำให้การเลือกซื้ออุปกรณ์ของผู้บริโภคทำได้อย่างมั่นใจมากยิ่งขึ้นว่าจะสามารถใช้งานอุปกรณ์บลูทูธที่ซื้อใหม่ร่วมกันกับอุปกรณ์บลูทูธเดิมที่มีอยู่ได้แม้จะมาจากต่างผู้ผลิตกันก็ตาม ในด้านการนำบลูทูธมาใช้งานไอโอที สามารถทำในลักษณะให้อุปกรณ์สวมใส่บลูทูธต่างๆ เชื่อมต่อกับสมาร์ทโฟน โดยส่งค่าจากเซนเซอร์ต่างๆ รวมเข้ามา และสมาร์ทโฟน

จะทำหน้าที่เป็นแนวเกตเวย์ที่เชื่อมการส่งผ่านข้อมูลไปยังอินเทอร์เน็ต เช่น การส่งผ่านสัญญาณจากอุปกรณ์ไอโอทีที่ใช้ตัวต่อรายการเดินของหัวใจและสัญญาณชีพไปยังเซิร์ฟเวอร์บนคลาวด์ผ่านสมาร์ตโฟน หรือการส่งสถานะของการเปิดปิดประตู หรือเซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหวในบ้านไปยังเซิร์ฟเวอร์บนคลาวด์ ผู้ใช้งานจะสามารถตรวจสอบและดูรายงานความปลอดภัยในบ้านได้จากการเรียกดูข้อมูลจากคลาวด์มายังสมาร์ตโฟนได้



รูปที่ 3 บลูทูทพลังงานต่ำ

ที่มา: Adafruit Industries (2014)

## 1.2 ซิกบี (Zigbee)

ซิกบีถูกสร้างขึ้นบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในชั้นกายภาพและชั้นเส้นทางเชื่อมโยงข้อมูล สื่อสารด้วยแถบความถี่ย่าน ISM 2.4 GHz, 915 MHz และ 868 MHz มีความเร็วในการสื่อสารใกล้เคียงกับบีแอลอีคืออยู่ที่ 250 kbps ทอพอโลยีการเชื่อมต่อหากใช้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่มีการระบุในชั้นกายภาพและเส้นทางเชื่อมโยงข้อมูลเท่านั้นจะเป็นการเชื่อมต่อในลักษณะเครือข่ายสตาร์ มีอุปกรณ์ควบคุมที่ส่วนกลางเรียกว่า โคออร์ดิเนเตอร์ (Coordinator) และมีอุปกรณ์ปลายทางที่ส่งข้อมูลจากเซนเซอร์เรียกว่า เอนด์ดีไวซ์ (End Device) การส่งข้อมูลระหว่างเอนด์ดีไวซ์มายังโคออร์ดิเนเตอร์ต้องมีการชิงกัวเวลาระหว่างกัน เนื่องจากซิกบีถูกออกแบบให้อยู่ในสภาวะหลับเป็นระยะเวลานานได้ และจะตื่นขึ้นมาเพื่อส่งหรือรับข้อมูลเพื่อประหยัดพลังงาน โดยสามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลานานมากกว่าหนึ่งปีด้วยแบตเตอรี่เพียงก้อนเดียว ในทอพอโลยีการเชื่อมต่อที่เพิ่มเติมนอกเหนือจากที่กำหนดไว้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 กำหนดโดยซิกบีอัลไลอันซ์ (Zigbee Alliance) โดยมีการกำหนดโปรโทคอลบนชั้นเน็ตเวิร์ก (Network Layer) ด้วย ซึ่งอุปกรณ์ที่ตรงตามข้อกำหนดของซิกบีอัลไลอันซ์จะได้รับเครื่องหมายโลโก้ซิกบีเซอร์ติฟายด์ (Zigbee Certified Logo) โดยจะมีการกำหนดการทำงานในชั้นเน็ตเวิร์กให้สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ และจัดเส้นทางการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์เอนด์ดีไวซ์ในทอพอโลยีเมช (Mesh Topology) ได้ด้วย (Salman & Jain, 2015) ซึ่งจะมีอุปกรณ์ในเครือข่ายเพิ่มเติมขึ้นมาอีกชนิดหนึ่ง คืออุปกรณ์เราเตอร์ (Router Device) อุปกรณ์เราเตอร์จะทำหน้าที่กำหนดเส้นทาง

ของข้อมูลจากอุปกรณ์เอนด์ไวด์ไปยังอุปกรณ์โคออร์ดิเนเตอร์ ข้อดีของการใช้ทอพอโลยีเมชคือการสร้างเครือข่ายการส่งข้อมูลที่ครอบคลุมพื้นที่และระยะทางได้มากขึ้นกว่าการใช้ทอพอโลยีสตาร์ เนื่องจากมีอุปกรณ์เราเตอร์ทำหน้าที่รีเลย์ข้อมูลจากอุปกรณ์เอนด์ไวด์ต่อเป็นทอดๆ ได้ ในส่วนของความหนาแน่นของเครือข่ายในกรณีเกิดเหตุสุดวิสัย โครงข่ายแบบเมชจะมีความหนาแน่นมากกว่า เนื่องจากหากอุปกรณ์เราเตอร์ตัวใดเสียหาย ข้อมูลจากอุปกรณ์เอนด์ไวด์จะสามารถเลือกส่งไปยังเส้นทางอื่นได้ ในการนำชิปไปใช้ในไอโอทีจำเป็นต้องเพิ่มเติมอุปกรณ์เกตเวย์ในชั้น TCP/IP เพื่อเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต และส่งต่อข้อมูลไปยังแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ต่อไป

### 1.3 อาร์เอฟไอดี (RFID)

อาร์เอฟไอดี (Radio Frequency Identification, RFID) เก็บข้อมูลระบุตัวตนและข้อมูลอื่นๆ ไว้ในป้ายหรือแท็ก (RFID Tags) ซึ่งอาร์เอฟไอดีแท็กมีสองชนิด คือ ชนิดพาสซีฟ (Passive RFID Tag) และชนิดแอคทีฟ (Active RFID Tag) ตัวอย่างบอร์ดอาร์เอฟไอดีชนิดแอคทีฟแสดงดังรูปที่ 4 โดยชนิดพาสซีฟแท็กจะมีระยะทางการสื่อสารต่ำกว่าหนึ่งเมตร ไม่มีแบตเตอรี่อยู่ภายในแท็ก สามารถอ่านข้อมูลจากแท็กด้วยตัวอ่านอาร์เอฟไอดี (RFID Reader) ส่วนชนิดแอคทีฟจะมีระยะทางการสื่อสารที่มากกว่า และมีการส่งข้อมูลของแท็กเป็นระยะๆ การนำอาร์เอฟไอดีไปใช้ในไอโอทีสามารถทำได้โดยการใช้ร่วมกับโปรโตคอลการสื่อสารแดชเจ็ด (Dash7) ตามมาตรฐาน ISO/IEC 18000-7 (Reiter, 2014) ที่กำหนดการสื่อสารผ่านอากาศของอาร์เอฟไอดีที่ความถี่ย่าน 433 MHz รองรับการส่งข้อมูลระหว่างอาร์เอฟไอดีแท็กที่ความเร็วในการสื่อสาร 55-200 kbps มีการกำหนดอุปกรณ์อาร์เอฟไอดีสี่ลักษณะ คือ 1) บลิงเกอร์ (blinker) ที่ใช้อาร์เอฟไอดีชนิดพาสซีฟส่งข้อมูลอย่างเดียวเมื่ออยู่ในระยะของตัวอ่านอาร์เอฟไอดี 2) เอนด์ไวด์ (End Device) ใช้อาร์เอฟไอดีชนิดแอคทีฟสามารถตื่นและหลับเพื่อประหยัดพลังงาน โดยจะตื่นขึ้นมาเพื่อส่งข้อมูลเป็นระยะๆ 3) ซับคอนโทรลเลอร์ (Subcontroller) และ 4) เกตเวย์ (Gateway) ทำหน้าที่ในชั้นเน็ตเวิร์กเพื่อส่งต่อข้อมูลไปยังอินเทอร์เน็ต ข้อดีของอาร์เอฟไอดีบนแดชเจ็ดคือ จะมีการใช้พลังงานที่ต่ำมาก ต่ำกว่าชิป และมีการส่งข้อมูลที่มากกว่าจากการใช้ความถี่ต่ำย่าน 433 MHz



รูปที่ 4 บอร์ดอาร์เอฟไอดีชนิดแอคทีฟ

ที่มา: Mike (2007)

## 1.4 ไอวไฟ (Wi-Fi)

ไวไฟเป็นเครือข่ายการสื่อสารไร้สายระดับท้องถิ่น (Wireless Local Area Network, WLAN) บนมาตรฐาน IEEE 802.11a/b/g/n ไวไฟได้รับความนิยมสำหรับการสื่อสารภายในบ้านเรือนหรือสำนักงาน มีความเร็วในการสื่อสารสูง มีอุปกรณ์รองรับจำนวนมาก ถือเป็นอุปกรณ์การสื่อสารไร้สายที่ได้รับความนิยมสูงสุด ทอพอโลยีการเชื่อมต่อเป็นแบบสตาร์ ส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ไวไฟต่างๆ ไปยังอุปกรณ์แอ็กเซสพอยต์ (Access Point) ที่ทำหน้าที่อินเทอร์เน็ทเกตเวย์ได้ด้วย แถบความถี่ที่ใช้คือย่าน ISM 2.4 GHz และ 5 GHz โดย 802.11n เป็นที่นิยมแพร่หลายในปัจจุบัน มีความเร็วในการสื่อสารระดับ 600 Mbps ขณะที่ 802.11b/g มีความเร็วในการสื่อสารต่ำกว่า แต่มากเพียงพอสำหรับการใช้งานไอโอที ข้อจำกัดหลักของไวไฟสำหรับงานไอโอทีคือการใช้พลังงาน และการประมวลผลโพรโทคอลที่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับอุปกรณ์การสื่อสารชนิดอื่นๆ อุปกรณ์ไวไฟที่เหมาะสมสำหรับไอโอทีจึงต้องมีการพัฒนาในส่วนโปรแกรมการจัดการอุปกรณ์ให้สามารถตื่นขึ้นมาเพื่อส่งข้อมูลและเปลี่ยนสถานะกลับไปหลับเพื่อประหยัดพลังงานอย่างรวดเร็ว รวมถึงการลดความเร็วของการสื่อสารให้ต่ำลงให้เหมาะสมสำหรับงานด้านไอโอที นั่นคือ IEEE 802.11ah (Bello, Zeadally, & Badra, 2017).

## 1.5 ลอรา (LoRa)

ลอราเป็นชื่อที่เรียกย่อมาจาก Long Range Low Power Wireless Platform โดยนำสองตัวอักษรด้านหน้าของสองคำแรกมาใช้ ลักษณะเฉพาะของลอราคือ การมอดูเลตด้วยเทคนิคเชิร์ปสเปกตรัม (Chirp Spread Spectrum Modulation) โดยใช้สัญญาณเชิร์ปความถี่คงที่ (Constant Ramp Chirp Signal) ในการเพิ่มประสิทธิภาพการรับสัญญาณให้มีค่าความไว (Sensitivity) ที่ดีขึ้นกว่ากระบวนการมอดูเลตชนิดอื่นๆ โดยความแตกต่างของความถี่ระหว่างตัวรับและตัวส่งของสัญญาณเชิร์ปความถี่คงที่มีลักษณะคล้ายกับความแตกต่างของเวลา ซึ่งง่ายต่อการจัดการ และส่งผลให้วงจรรับและวงจรส่งสามารถใช้อุปกรณ์กำเนิดความถี่ที่มีราคาไม่สูงได้ ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์กำเนิดความถี่ที่มีความแม่นยำสูง (Augustin, Yi, Clausen, & Townsley, 2016) ซึ่งค่าความถี่ที่ต่างกันของตัวรับและตัวส่งอาจมีความแตกต่างมากถึง 20% ได้ โดยค่าความไวของการรับจากการมอดูเลตชนิดนี้สามารถทำให้รับได้ที่ระดับสัญญาณต่ำกว่า -140 dBm ซึ่งถือว่าต่ำมากเมื่อเทียบกับการมอดูเลตชนิดอื่นๆ ที่ใช้อยู่ในซิกบีและไวไฟ ที่อยู่ในระดับ -100 dBm ถึง -110 dBm เท่านั้น อีกหนึ่งประสิทธิภาพที่โดดเด่นของลอราคือ ความสามารถในการตีมอดูเลตหลายสัญญาณที่ถูกส่งมาพร้อมกันที่ความถี่เดียวกันได้ โดยสัญญาณที่ถูกส่งมาพร้อมกันจะต้องมีอัตราเชิร์ปที่แตกต่างกัน โดยใช้คาสเปกตรัมแพกเตอร์ที่แตกต่างกัน ผลของการตีมอดูเลตหลายสัญญาณพร้อมกันที่ความถี่เดียว ทำให้ลอราสามารถรองรับจำนวนอุปกรณ์ไอโอทีได้จำนวนมาก จากที่กล่าวมา ลอราเป็นกระบวนการในชั้นกายภาพ และมีการจัดเฟรมข้อมูลด้วยรูปแบบเฉพาะในชั้นเส้นทางเชื่อมโยงข้อมูล การนำลอรามาใช้งานไอโอทีจำเป็นต้องส่งต่อข้อมูลจากอุปกรณ์ลอราเข้าสู่อินเทอร์เน็ทผ่านลอราเกตเวย์ (LoRa Gateway) ไปยังลอราแวน (LoRaWAN) ซึ่งมีโพรโทคอลในการส่งผ่านข้อมูลเข้าสู่อินเทอร์เน็ทได้ ตัวอย่างบอร์ดลอราแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 บอร์ดลอรา

ที่มา: Musskopf (2017)

## 1.6 เอ็นบีไอโอที

เอ็นบีไอโอที (Narrow Band Internet of Things, NB-IoT) ถูกนำเสนอโดย 3GPP ผู้กำกับดูแลมาตรฐานด้านการสื่อสารบนโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยถูกออกแบบให้ใช้กำลังงานต่ำ ความเร็วในการสื่อสารและความถี่ในการส่งข้อมูลต่ำ อุปกรณ์เอ็นบีไอโอทีทำงานบนย่านความถี่เดียวกันกับที่ GSM, 3G หรือ LTE (Wang et. al, 2016) ซึ่งเป็นย่านความถี่ Licensed Band ที่ต้องได้รับการอนุญาตใช้งานจากหน่วยงานที่กำกับดูแลทอพอโลยี การเชื่อมต่อใช้ทอพอโลยีสตาร์ ส่งและรับข้อมูลจากสถานีฐานของโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ให้บริการ เอ็นบีไอโอทีใช้แถบความถี่อย่างน้อย 180 kHz ซึ่งสามารถทำได้สามลักษณะคือ ให้อยู่บนคลื่นความถี่หนึ่งของ GSM ให้อยู่บนแถบความถี่ของ LTE หรือให้อยู่บนคลื่นความถี่เดียวกันกับ LTE โดยให้ใช้บนแถบความถี่หนึ่งช่อง มีความเร็วในการสื่อสาร 250 kbps และมีความไวการรับสัญญาณได้ในระดับมากกว่า -150 dBm จึงมีระยะทางการสื่อสารที่ไกลมาก โดยมีความไวของการรับสัญญาณดีกว่า GSM และ LTE ที่ให้อยู่เดิมประมาณ 20 dB ด้วย การที่ผู้ให้บริการโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นผู้ดำเนินการสื่อสารข้อมูลกับอุปกรณ์เอ็นบีไอโอทีจึงไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์อินเทอร์เน็ตเกตเวย์ ข้อมูลจะถูกส่งจากอุปกรณ์เอ็นบีไอโอทีผ่านโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ได้โดยตรง

นอกจากนี้ในชั้นกายภาพยังต้องพิจารณาถึงแถบความถี่ที่จะใช้งานในการส่งสัญญาณแบบไร้สายด้วย โดยแบ่งแถบความถี่ออกเป็นสองประเภท คือ 1) Unlicensed Band และ 2) Licensed Band ซึ่งถูกกำหนดการใช้งานในประเทศไทยโดยคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ หรือ กสทช. แถบความถี่ย่าน Unlicensed Band ในประเทศไทยมีการกำหนดให้สามารถใช้งานได้ โดยมีกำลังส่งสูงสุดไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1 นอกจากนี้ที่ประชุม กสทช. มีมติเห็นชอบให้ใช้คลื่นความถี่ย่าน 920-925 MHz เพื่อรองรับเทคโนโลยีไอโอที ตาม (ร่าง) ประกาศ กสทช. เรื่อง มาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องโทรคมนาคมและอุปกรณ์สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ไม่ใช่ประเภท Radio Frequency Identification: RFID ซึ่งใช้คลื่นความถี่ย่าน 920-925 MHz



ในส่วนของ Licensed Band จะดำเนินการโดยผู้ให้บริการด้านเครือข่ายโทรคมนาคมที่ได้รับใบอนุญาตในการใช้คลื่นความถี่ย่านนั้นๆ เช่น คลื่นความถี่ย่าน 3G หรือย่านที่ให้บริการ LTE โดยสามารถใช้ได้ทั้งความถี่ในช่วงแถบความถี่คุม (Guard Band) หรือใช้ในแบนด์ความถี่เดียวกันกับที่ให้บริการ LTE เลยก็ได้ (In Band)

**ตารางที่ 1** แถบความถี่ที่ได้รับการยกเว้นใบอนุญาต (Unlicensed Band)\*\*

แถบความถี่	กำลังส่งสูงสุด (E.I.R.P.)
13.553 - 13.567 MHz	10 mW
26.965 - 27.405 MHz	100 mW
30 - 50 MHz	10 mW
54 - 74 MHz	10 mW
300 - 500 MHz	10 mW
2400 - 2500 MHz	100 mW
5150 - 5300 MHz	200 mW
5470 - 5850 MHz	1 W

\*\*ประกาศ กสทช. เรื่อง เครื่องวิทยุคมนาคมและสถานวิทยุคมนาคมที่ได้รับยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาต พ.ศ. 2550

## 2. ชั้นอินเทอร์เน็ต (Internet Layer)

อุปกรณ์ไอโอทีที่เป็นอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบให้ส่งผ่านข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายอินเทอร์เน็ต อุปกรณ์ไอโอทีที่สามารถส่งข้อมูลตรงเข้าอินเทอร์เน็ตได้จำเป็นจะต้องมีรูปแบบข้อมูลตามโพรโทคอลไอพี เพื่อให้สามารถสื่อสารระหว่างเซิร์ฟเวอร์ที่อยู่บนอินเทอร์เน็ตได้ ในส่วนอุปกรณ์ไอโอทีที่มีการกำหนดโพรโทคอลในชั้นกายภาพและเครือข่ายเท่านั้นจะมีความสามารถในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ หรือระหว่างอุปกรณ์และเกตเวย์ ในลักษณะโลคัล ไม่สามารถส่งข้อมูลเข้าสู่อินเทอร์เน็ตได้ เนื่องจากรูปแบบของข้อมูลมีลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละวิธีการ ไม่ได้ถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบโพรโทคอลอินเทอร์เน็ตที่มีความซับซ้อนกว่า ดังนั้นอุปกรณ์ไอโอทีจึงจำเป็นต้องส่งต่อข้อมูลต่อไปยังชั้นอินเทอร์เน็ต ซึ่งเป็นชั้นที่รับข้อมูลต่อจากชั้นกายภาพและเครือข่าย ชั้นอินเทอร์เน็ตจะทำหน้าที่ระบุและจัดการเส้นทางของแพ็กเกจข้อมูล ทั้งยังทำหน้าที่แปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบโพรโทคอลมาตรฐานที่สามารถสื่อสารในโครงข่ายอินเทอร์เน็ตได้ ในชั้นนี้อุปกรณ์โดยรวมอาจเรียกว่า



เป็นแวนเกตเวย์ (Wide Area Network Gateway, WAN Gateway) ที่รับข้อมูลมาจากอุปกรณ์ไอโอทีโดยตรง หรือรับมาจากไอโอทีเกตเวย์ที่รวบรวมข้อมูลจากอุปกรณ์ไอโอทีหลายๆ ตัวรวมกันมาก็ได้ ตัวอย่างโปรโตคอล ที่นิยมนำมาใช้งานไอโอทีคือ โปรโตคอลซิกซ์โลแพน (6LoWPAN) เป็นโปรโตคอลที่จัดการเฮดเดอร์ของ ไอพีวีซิกซ์ (IPv6) ที่มีความยาวมากกว่าบนเครือข่ายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่มีขนาดแพ็กเกจเล็กกว่าได้ ปกติขนาดแพ็กเกจของ 802.15.4 มีความยาว 128 ไบต์ โปรโตคอลซิกซ์โลแพนมีการกำหนดแอดเดรสที่มีความยาวแตกต่างกัน แบนด์วิดท์ใช้งานน้อย รองรับทอพอโลยีทั้งแบบสตาร์และเมช มีการจัดการพลังงานที่ดี สามารถใช้งานบนเครือข่ายที่อุปกรณ์โนตมีการเคลื่อนที่ และรองรับการหลับของอุปกรณ์ที่มีระยะเวลานานได้ โปรโตคอลซิกซ์โลแพนจะทำการบีบอัดเฮดเดอร์ของเฟรมข้อมูลเพื่อลดปริมาณข้อมูลโอเวอร์เฮด (Overhead) ของเฟรมข้อมูล ทั้งยังมีกระบวนการแบ่งเฟรม (Fragmentation) เพื่อให้สามารถใส่ในเฟรมข้อมูลขนาด 128 ไบต์ได้ และรองรับการส่งข้อมูลแบบมัลติฮอป (Multi-hop) การจัดการเฟรมของซิกซ์โลแพนแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ แตกต่างกันไปที่เฮดเดอร์ คือ 1) ไม่มีซิกซ์โลแพนเฮดเดอร์ สำหรับการส่งเฟรมข้อมูลที่ไม่เป็นไปตามโปรโตคอลซิกซ์โลแพนจะถูกตัดทิ้งไป 2) ดิสแพตช์เฮดเดอร์ สำหรับการส่งแบบมัลติคาสต์ มีการบีบอัดเฮดเดอร์ 3) เมชเฮดเดอร์ สำหรับการส่งแบบบรอดคาสต์ และ 4) แฟรกเมนต์เฮดเดอร์ สำหรับการส่งเฟรมข้อมูลที่มีความยาวและถูกแบ่งเฟรม นอกเหนือจากโปรโตคอลซิกซ์โลแพนยังมีโปรโตคอลอื่นๆ ที่รองรับการสื่อสารข้อมูลในชั้นกายภาพและเครือข่ายที่แตกต่างกัน เช่น 6TiSCH รองรับมาตรฐาน IEEE 802.15.4e หรือ 6Lo ที่รองรับไอพีวีซิกซ์บน IEEE485 มาสเตอร์-สเลฟ/โทเคนพาส ไอพีวีซิกซ์บน IEEE 802.11ah หรือไอพีวีซิกซ์บนเอ็นเอฟซี เป็นต้น ส่วนไอพีวีซิกซ์บนบีแอลอีมีลักษณะคล้ายกับโปรโตคอลซิกซ์โลแพน ต่างกันเพียงจะไม่มีการแบ่งเฟรม เนื่องจากตามโปรโตคอลของบีแอลอีจะมีการแบ่งเฟรมให้มีขนาดเล็กอยู่แล้ว ให้มีขนาด 27 ไบต์ และตัดความสามารถในการส่งข้อมูลแบบมัลติฮอปออกไป

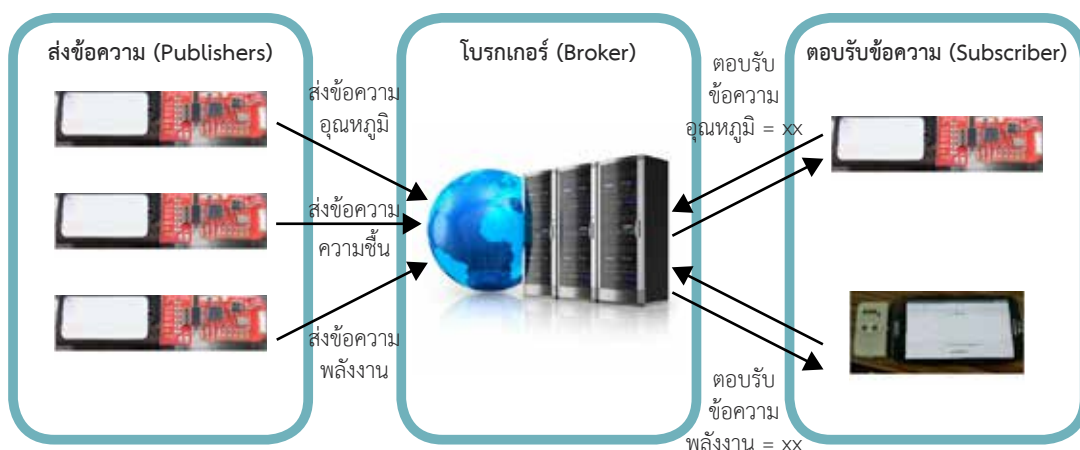
ในส่วนของลอราบนชั้นอินเทอร์เน็ตจะอยู่ในสถาปัตยกรรมเครือข่ายแบบลอราแวน (LoRa Alliance, 2015) ที่ใช้ทอพอโลยีแบบสตาร์ มีการใช้งานเกตเวย์ในการรีเลย์ข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ไอโอทีที่กระจายทางมายังเซิร์ฟเวอร์ในเครือข่ายอินเทอร์เน็ต อุปกรณ์ลอรามีการส่งคลื่นที่แถบความถี่และสเปกตรัมแพกเตอร์ที่แตกต่างกันได้ ลอราเกตเวย์จำเป็นต้องรองรับการส่งสัญญาณในลักษณะดังกล่าว และจากการที่ใช้ค่าสเปกตรัมแพกเตอร์ (Spread Factor) ที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถมีปริมาณจำนวนอุปกรณ์ไอโอทีในเครือข่ายลอราได้จำนวนมากบนความเร็วของการสื่อสารที่แตกต่างกันระหว่าง 0.3-50 kbps แปรผันตามค่าสเปกตรัมแพกเตอร์ที่ใช้ในการมอดูเลต ลอราแวนมีกระบวนการในการจัดการพลังงานของอุปกรณ์ลอราแต่ละตัวให้มีระยะเวลาการใช้งานได้นานที่สุดด้วยการปรับค่าอัตราความเร็วของการสื่อสารและค่ากำลังส่งแบบอัตโนมัติ (Adaptive Data Rate, ADR) ลักษณะของการสื่อสารระหว่างลอราแวนและอุปกรณ์ลอรา มี 3 ลักษณะ คือ 1) คลาสเอ (Class A) เป็นการสื่อสารสองทางที่มีการกำหนดเวลาการรับส่งโดยแบ่งช่วงเวลา มีรูปแบบคือ ช่วงเวลาอัปลิงก์และตามด้วยช่วงเวลาดาวน์ลิงก์สองช่วง รูปแบบการสื่อสารนี้จะใช้พลังงานต่ำสุด เนื่องจากอุปกรณ์ลอราปลายทางจะหลับตลอดเวลา และจะตื่นมาเพื่อส่งข้อมูลเท่านั้น หากลอราแวนจะทำการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ปลายทางต้องรอจังหวะการตื่นของอุปกรณ์ลอราปลายทางก่อนเสมอ 2) คลาสบี (Class B) เป็นการสื่อสารสองทางคล้ายกับคลาสเอ ที่เพิ่มช่องทางการรับด้วยการส่งเบคอนเพื่อให้ลอราแวนทราบถึงจังหวะเวลาที่อุปกรณ์ลอราปลายทางจะตื่นเพื่อรับข้อมูล และ 3) คลาสซี (Class C) เป็นการสื่อสารสองทาง มีการเพิ่มช่องทาง

การรับมากที่สุด โดยให้จังหวะการรับเกือบตลอดเวลา มีเพียงจังหวะที่ทำการส่งข้อมูลเท่านั้นที่ไม่รับสัญญาณ เมื่อลอราแวนได้รับสัญญาณข้อมูลจากลอราเกตเวย์ จะทำการจัดรูปแบบของข้อมูลใหม่ให้เหมาะสมกับโปรโตคอลการสื่อสารอินเทอร์เน็ต และส่งต่อข้อมูลไปยังแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ต่อไป

### 3. ชั้นแอปพลิเคชัน (Application Layer)

ชั้นแอปพลิเคชันจะรับข้อมูลมาจากชั้นอินเทอร์เน็ต หรือในลักษณะอุปกรณ์จะเป็นแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ (Application Server) เพื่อทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลจากอุปกรณ์ไอโอทีต่างๆ ที่ส่งเข้ามาผ่านแวนเกตเวย์ และรองรับการร้องขอและดูข้อมูลจากผู้ใช้หรือจากอุปกรณ์ไอโอทีตัวอื่นๆ โดยทั่วไปบนอินเทอร์เน็ตจะใช้ http ซึ่งสามารถนำมาใช้กับไอโอทีได้ โดยหากตัดทอนให้เหมาะสมกับไอโอทีที่มีความต้องการการใช้พลังงานต่ำและมีจำนวนข้อมูลที่ถูกประมวลผลน้อย โปรโตคอลที่มีความเหมาะสมมากกว่าสำหรับไอโอทีจึงพัฒนาเป็นโปรโตคอลดังเช่นโปรโตคอลเอ็มคิวทีที

เอ็มคิวทีที (Message Queue Telemetry Transport, MQTT) เป็นโปรโตคอลที่ถูกออกแบบให้เหมาะกับการใช้งานที่มีแบนด์วิธที่น้อย จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้กับงานไอโอที ลักษณะคือเป็นโปรโตคอลที่เชื่อมระหว่างแอปพลิเคชันการทำงานกับเครือข่ายการสื่อสาร สถาปัตยกรรมมีลักษณะแบบส่งข้อความ (Publish) และตอบรับข้อความ (Subscribe) ผ่านโบรกเกอร์ (Broker) การส่งข้อความจะส่งจากอุปกรณ์ไปยังเอ็มคิวทีทีโบรกเกอร์ ซึ่งเป็นเซิร์ฟเวอร์ลักษณะหนึ่ง โบรกเกอร์จะทำหน้าที่กระจายข้อความอีกต่อหนึ่งโดยระบุช่องทางหรือหัวข้อ (Topic) สำหรับข้อความเหล่านั้น โบรกเกอร์จะส่งข้อความต่อไปยังอุปกรณ์ที่ต้องการรับข้อความที่สมัคร หรือตอบรับข้อความจากเอ็มคิวทีทีโบรกเกอร์ตามหัวข้อที่ระบุไว้ ดังแสดงสถาปัตยกรรมเอ็มคิวทีทีในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ลักษณะของระบบไอโอที

สำหรับงานไอโอที อุปกรณ์ส่งข้อความจะมีลักษณะเป็นอุปกรณ์ที่ส่งข้อมูลด้วยความเร็วต่ำ มีแบนด์วิดท์น้อย เป็นเซนเซอร์ที่ตรวจจับและส่งข้อมูลสั้นๆ ทำหน้าที่ส่งข้อความหรือข้อมูลไปยังโพรกเกอร์แล้วกลับไปสภาวะหลับเพื่อประหยัดพลังงาน โพรกเกอร์จะทำหน้าที่เก็บข้อความเหล่านั้นไว้ในระยะเวลาหนึ่ง เมื่อมีผู้ตอบรับข้อความที่แจ้งความประสงค์จะรับข้อความในหัวข้อหรือระบุช่องทางที่จะรับข้อความไว้ตรงกับที่โพรกเกอร์มี โพรกเกอร์จะทำการส่งต่อข้อความที่มีไปให้กับผู้ตอบรับข้อความนั้นๆ

นอกเหนือจากโพรโทคอลเอ็มคิวทีทีแล้วยังมีโพรโทคอลอื่นๆ ที่มีศักยภาพในการประยุกต์สำหรับงานด้านไอโอทีอีกเช่นกัน เช่น MQTT, AMQP หรือ XMPP เป็นต้น

## บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ไอโอทีและโครงข่ายมีข้อคำนึงในการพิจารณาหลากหลาย อุปกรณ์ใดๆ หรือโครงข่ายใดๆ อาจไม่เหมาะสมในทุกๆ สภาวะ หรืออาจไม่เหมาะสมในทุกๆ รูปแบบ การพิจารณาจึงต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ ให้เหมาะสม หากพิจารณาในระยะทางการสื่อสารที่ใช้งานเป็นข้อจำกัดหลัก อุปกรณ์ไอโอทีกลุ่มไวไฟ อาร์เอฟไอดี หรือบีแอลอีอาจไม่เหมาะสม เนื่องจากมีระยะทางการสื่อสารต่ำกว่าอุปกรณ์ไอโอทีกลุ่มลอรา หรือเอ็นบีไอโอที เป็นต้น เนื่องจากกลุ่มหลังจะมีค่าความไวของการรับที่ดีกว่า เนื่องจากใช้เทคนิคการมอดูเลตที่ดีกว่า ในส่วนของการใช้กำลังงานก็เป็นส่วนสำคัญในการเลือกใช้ หากอุปกรณ์ไอโอทีที่นำไปติดตั้งมีโอกาสเข้าไปบำรุงรักษาได้ยาก การเลือกใช้อุปกรณ์กลุ่มที่มีอัตราการใช้พลังงานต่ำกว่าจะเหมาะสมกว่า นอกจากนี้ในการบำรุงรักษาเมื่อต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่จะมีค่าใช้จ่ายด้านแบตเตอรี่และแรงงานที่ต้องนำมาพิจารณาด้วย อุปกรณ์ที่ประหยัดพลังงานมากกว่าในระยะยาวจะเสียค่าใช้จ่ายด้านนี้ต่ำกว่า การเลือกใช้ทอพอโลยีการเชื่อมต่อก็มีผลต่อการใช้พลังงาน โดยทอพอโลยีแบบสตาร์จะประหยัดพลังงานมากกว่าทอพอโลยีแบบเมช เนื่องจากอุปกรณ์ไอโอทีในเครือข่ายทำหน้าที่เพียงส่งและรับข้อมูลของตนเองเท่านั้น ไม่จำเป็นต้องรับและส่งข้อมูลของอุปกรณ์ตัวอื่นๆ จึงสามารถตื่นเพื่อรับและส่งข้อมูลในช่วงเวลาเพียงสั้นๆ และหลับต่อเพื่อประหยัดพลังงาน การตื่นเพียงระยะเวลาสั้นกว่าจะทำให้ค่าเฉลี่ยของการใช้พลังงานต่ำกว่าด้วยนั่นเอง นอกจากนี้อุปกรณ์ไอโอทีบางส่วนถูกออกแบบให้มีรูปแบบเฟรมข้อมูลและแอดเดรสของอุปกรณ์ในลักษณะเฉพาะ เพื่อการจัดการด้านพลังงานและความซับซ้อนของการประมวลผลที่ดีกว่า แต่อุปกรณ์ไอโอทีดังกล่าวจะไม่สามารถส่งข้อมูลเข้าสู่อินเทอร์เน็ตได้โดยตรง เนื่องจากรูปแบบเฟรมข้อมูลและการอ้างถึงแอดเดรสไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่ใช้ในอินเทอร์เน็ต อุปกรณ์ไอโอทีเหล่านี้จะต้องส่งข้อมูลผ่านเกตเวย์ที่ถูกสร้างเฉพาะสำหรับแต่ละระบบ เกตเวย์นี้จะทำหน้าที่รับข้อมูลจากอุปกรณ์ไอโอทีที่ท้องถิ่น และแปลงเฟรมข้อมูลและแอดเดรสให้เป็นไปตามมาตรฐานที่ใช้ในอินเทอร์เน็ต โดยเรียกอุปกรณ์เกตเวย์นี้ว่า อินเทอร์เน็ตเกตเวย์ ในด้านการทำงานร่วมกันกับอุปกรณ์ชนิดอื่น การเลือกใช้อุปกรณ์ไอโอทีที่มีมาตรฐานสากลสนับสนุนจะมีความเหมาะสมร่วมกันกับอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ ในอนาคตได้สูงกว่า เช่น หากผู้ให้บริการด้านเครือข่ายโทรคมนาคมให้การสนับสนุนอุปกรณ์ชนิดใดเป็นพิเศษ โอกาสที่จะใช้งานอุปกรณ์ชนิดนั้นๆ ในพื้นที่ครอบคลุมย่อมมีสูงมากกว่า เนื่องจากเครือข่ายการให้บริการของผู้ให้บริการด้านเครือข่ายโทรคมนาคมมีให้บริการครอบคลุมพื้นที่

เกือบทั่วประเทศแล้ว แต่หากเราต้องสร้างเครือข่ายเองจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายไอโอทีเฉพาะพื้นที่ขึ้นมาเพิ่มเติม ยกตัวอย่างเช่นหากมีความต้องการจะวัดค่าสัญญาณการใช้พลังงานของบริษัทหนึ่งที่มีสาขากระจายทั่วประเทศอยู่ 20 แห่ง การเลือกใช้บริการของผู้ให้บริการโทรคมนาคมโดยตรงอาจมีต้นทุนต่ำกว่าการสร้างเครือข่ายไอโอทีขึ้นมาเอง ต่างจากกรณีที่มีฟาร์มเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดสระบุรี มีจำนวนวัวในฟาร์ม 500 ตัว และต้องการติดตามข้อมูลของวัวเหล่านั้น การเลือกตั้งเกตเวย์ของอุปกรณ์ไอโอทีขึ้นมาเพื่อรับข้อมูลจากวัวทั้ง 500 ตัว ก่อนส่งต่อไปยังอินเทอร์เน็ตผ่านอินเทอร์เน็ตเกตเวย์อาจมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าได้ เป็นต้น

## บรรณานุกรม

- Adafruit Industries. (2014, July 14). Bluefruit LE - Bluetooth Low Energy (BLE 4.0) - nRF8001 Breakout [Digital image]. Retrieved from <https://www.flickr.com/photos/adafruit/14497847309>
- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, 16(9), 1466.
- Bello, O., Zeadally, S., & Badra, M. (2017). Network layer inter-operation of device-to-device communication technologies in internet of things (IoT). *Ad Hoc Networks*, 57, 52-62.
- Gerber, A. (2017, May 23). *Connecting all the things in the internet of things* [Online article]. Retrieved from <https://www.ibm.com/developerworks/library/iot-lp101-connectivity-network-protocols/index.html>
- IOTpreneur. (2016, January 29). Multitech-Conduit-y-mDot.jpg [Digital image]. Retrieved from <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Multitech-Conduit-y-mDot.jpg>
- Kurakova, T. (2013). Overview of internet of things. In *Proc. of the INTHITEN (INternet of THings and ITs ENablers) conference* (pp. 1-13). Saint Petersburg, Russia: n.p.
- Li, S., Da Xu, L., & Zhao, S. (2015). The internet of things: A survey. *Inf Syst Front*, 17, 243-259.
- LoRa Alliance. (2015). *LoRaWAN specification V1.0*. Retrieved from <https://www.lora-alliance.org/portals/0/specs/LoRaWAN%20Specification%201R0.pdf>
- Mike. (2007, August 12). "Sputnik" RFID Tag [Digital image]. Retrieved from <https://www.flickr.com/photos/mlcastle/1092147682/>
- Musskopf. (2017, July 28). WhisperNode LoRa.jpg [Digital image]. Retrieved from [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WhisperNode\\_LoRa.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WhisperNode_LoRa.jpg)
- Prades97. (2014, May 12). Internet de las Cosas.jpg [Digital image]. Retrieved from [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Internet\\_de\\_las\\_Cosas.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Internet_de_las_Cosas.jpg)
- Reiter, G. (2014). *Wireless connectivity for the internet of things. Europe*, 433, 868MHz. n.p.

- Salman, T., & Jain, R. (2015). Networking protocols and standards for internet of things. In *Internet of Things and Data Analytics Handbook* (pp. 215-238). n.p.
- Subbaiah, S. (2014, November 20). Earth with server.jpg [Digital image]. Retrieved from [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth\\_with\\_server.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth_with_server.jpg)
- Thubert, P., Pelov, A., & Krishnan, S. (2017). Low-power wide-area networks at the IETF. *IEEE Communications Standards*, 1(1), 76-79.
- Wang, Y. P. E., Lin, X., Adhikary, A., Grövlén, A., Sui, Y., Blankenship, Y., & Razaghi, H. S. (2016). *A primer on 3gpp narrowband internet of things (NB-IoT)*. arXiv preprint arXiv:1606.04171.