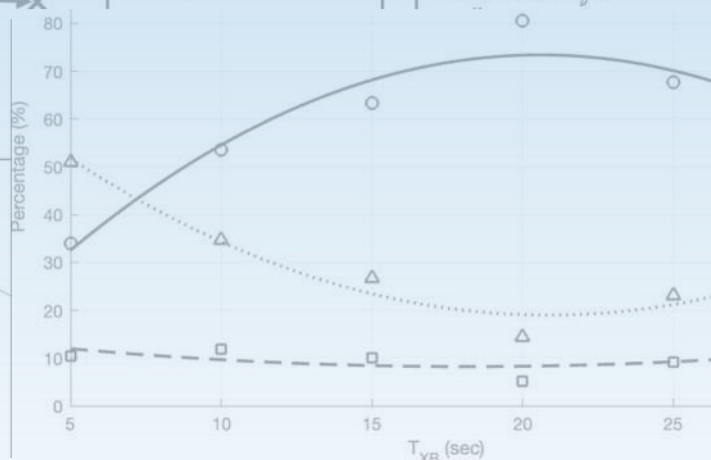
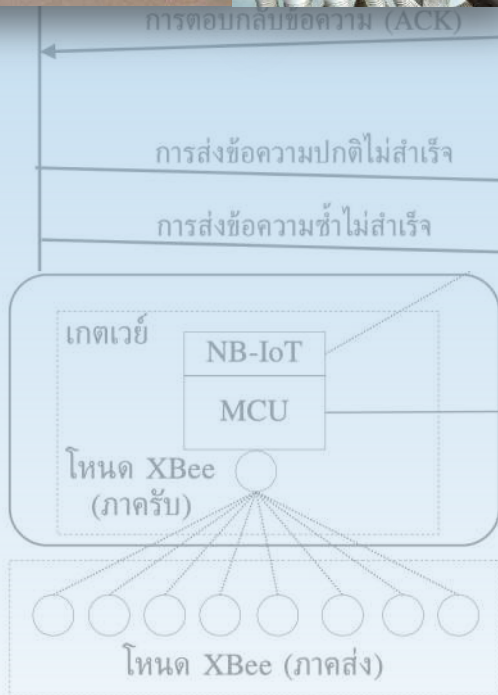




การออกแบบและการวิเคราะห์ โครงข่ายตัวรับรู้ไร้สาย และ อินเทอร์เน็ตประสาณสรรพสิ่ง

Design and Analysis of Wireless Sensor Networks
and Internet of Things



ผู้ช่วยศาสตราจารย์นกร อินทสุทร

หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย



การออกแบบและการวิเคราะห์โครงข่ายตัวรับรู้ไร้สาย และอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนากร อินทสุทธิ

หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

การออกแบบและการวิเคราะห์โครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายและอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่ง
Design and Analysis of Wireless Sensor Networks and Internet of Things

ISBN (e-book) : 978-616-637-188-8

จัดทำโดย : ธนกร อินทสุทธิ

ราคา : 100 บาท

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์

คำนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสาทรสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) เป็นเทคโนโลยีสำคัญที่ใช้ในการเชื่อมต่อตัวรับรู้ (sensor) เข้ากับแพลตฟอร์มคลาวด์ (cloud platform) ผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต (Internet) เพื่อรองรับการจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลแบบเวลาจริง (real-time) นอกจากนี้ IoT ยังสามารถทำงานแบบอัตโนมัติและสนับสนุนการตัดสินใจ ทำให้สามารถตอบสนองต่อการบริหารจัดการในภาคส่วนต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้ในระบบอัจฉริยะ เช่น ระบบบริหารจัดการพลังงาน ระบบเกษตรแม่นยำ และระบบแจ้งเตือนมลพิษทางอากาศ

หนังสือเล่มนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมองค์ความรู้ ผลงานวิจัย และประสบการณ์ของผู้เขียน พร้อมทั้งอธิบายแนวคิดและหลักการทำงานของระบบ IoT ตั้งแต่การพัฒนาสถาปัตยกรรมเทคโนโลยีการสื่อสาร การออกแบบระบบ การประเมินสมรรถนะ และการประยุกต์ใช้งานจริง พร้อมตัวอย่างกรณีศึกษาจากงานวิจัย โดยเลือกใช้โปรแกรมที่เข้าถึงได้ง่าย เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ (micro-controller) และแพลตฟอร์มคลาวด์แบบเปิด เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเรียนรู้ และพัฒนาระบบ IoT ได้ด้วยตนเอง โดยโครงสร้างเนื้อหาของหนังสือเล่มนี้ประกอบด้วย 7 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำอินเทอร์เน็ตประสาทรสรรพสิ่ง ได้อธิบายแนวคิดพื้นฐานของ IoT โครงสร้างสถาปัตยกรรม และภาพรวมของระบบ

บทที่ 2 ตัวรับรู้และการประมวลผล ได้เสนอการออกแบบพร้อมตัวอย่างของระบบวัดด้วยตัวรับรู้ไมโครคอนโทรลเลอร์ และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

บทที่ 3 การสื่อสารไร้สายสำหรับระบบ IoT ได้อธิบายตั้งแต่พื้นฐานการสื่อสาร การวิเคราะห์ระบบด้วยตัวชี้วัดสมรรถนะของระบบการสื่อสารไร้สาย และตัวอย่างกรณีศึกษา

บทที่ 4 การพัฒนาเกตเวย์ในระบบ IoT ได้อธิบายหลักการทำงานของเกตเวย์ การรวมข้อมูล การเชื่อมโยงระหว่างโครงข่าย และตัวอย่างการทดลองภาคปฏิบัติ

บทที่ 5 การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงเวลา ได้เสนอแนวคิดด้านการวิเคราะห์เชิงเวลาและพฤติกรรมเชิงเวลาของระบบสื่อสาร และตัวอย่างการทดลองจริงในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย

บทที่ 6 การวิเคราะห์อัตราการส่งกลุ่มข้อมูล ได้อธิบายตัวชี้วัดอัตราการส่งกลุ่มข้อมูล และตัวอย่างการวัดสมรรถนะการสื่อสารระบบจริง

บทที่ 7 การประยุกต์ใช้งาน ได้นำเสนอกรณีศึกษาจริงของการพัฒนาระบบ IoT สำหรับตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์ในระบบกวนน้ำยาพาราโนในงาน พร้อมการรายงานและการวิเคราะห์ความผิดปกติของข้อมูล

ในแต่ละบทผู้เขียนได้สอดแทรกผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ทั้งในรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการและวารสารทั้งระดับชาติและนานาชาติของผู้เขียน ที่ผู้เขียนได้มีโอกาสมีส่วนร่วมใน

โครงการวิจัยหลายโครงการ เช่น ระบบบริหารการจัดการพลังงานในอาคารจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระบบตรวจวัดมลพิษทางอากาศในเขตเทศบาลนครสงขลา ระบบเฝ้าติดตามความผิดปกติอุณหภูมิและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ในโรงงาน และประสบการณ์การทำงานวิจัยร่วมกับนักศึกษาในกลุ่มวิทยานิพนธ์นวัตกรรมไร้สายและโครงข่าย (Wireless Innovation and Networking: WIN) หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย โดยเริ่มดำเนินงานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 เป็นต้นมา ซึ่งได้ร่วมบุกเบิกกับอาจารย์กฤษณะ สุริยะ ลูกศิษย์ปริญญาโท ระดับปริญญาตรี และอาจารย์ประจำสาขาวิชาโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน คณะเทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อธุรกิจอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง จักรใจ วิทยาการและผู้ทรงคุณวุฒิจากโครงการพัฒนาจัดทำหนังสือ-ตำราทางวิชาการ รองศาสตราจารย์สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกมหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำและช่วยตรวจทานเนื้อหาหนังสือเล่มนี้อย่างละเอียด

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาจากสถาบันการศึกษาที่ผู้เขียนได้เรียนจบมา โดยได้รับคำแนะนำการพัฒนางานวิจัยทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมจาก รองศาสตราจารย์ ดร.วิภา แสงพิสธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ระดับปริญญาตรี และอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้วางรากฐานแนวคิดด้านการสร้างสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรม และรองศาสตราจารย์ ดร.เชาว์นิต อัครกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท และหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยอาจารย์เป็นผู้เปิดโอกาสและเป็นต้นแบบในการทำงานวิจัยทั้งระดับชาติและระดับนานาชาติ และเป็นแรงบันดาลใจให้แก่ผู้เขียนในการพัฒนางานวิจัยอย่างต่อเนื่อง

สุดท้ายผู้เขียนขอขอบพระคุณบิดามารดา ครูบาอาจารย์ เพื่อนร่วมงาน นักวิจัย และนักศึกษาทุกท่านที่มีส่วนสนับสนุน และให้กำลังใจในการสร้างองค์ความรู้และพัฒนางานวิจัยมาโดยตลอด

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ทั้งในเชิงวิชาการและการประยุกต์ใช้จริง และยินดีรับข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนาหนังสือให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นในอนาคต

ธนากร อินทสุทธิ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
กรกฎาคม พ.ศ. 2569

สารบัญ

หน้า

1	บทนำอินเทอร์เน็ตประสาสมัครพลัง.....	1
1.1	แนวคิดพื้นฐาน	1
1.2	นิยามและความหมาย	2
1.3	ที่มาและพัฒนนาการของศาสตร์	4
1.4	สถาปัตยกรรมระบบ IoT	4
1.4.1	ชั้นการรับรู้	4
1.4.2	ชั้นโครงข่าย	5
1.4.3	ชั้นประยุกต์	5
1.5	ตัวอย่างภาพเหตุการณ์ในระบบ IoT	6
1.5.1	ภาพเหตุการณ์ที่ 1: การเฝ้าสังเกตและควบคุมแบบอัตโนมัติ	6
1.5.2	ภาพเหตุการณ์ที่ 2: การควบคุมระยะไกล	7
1.6	ข้อจำกัดของระบบ IoT	8
1.6.1	ความเข้ากันได้และการทำให้เป็นมาตรฐาน	8
1.6.2	ด้านพลังงาน	9
1.6.3	การสื่อสาร	9
1.6.4	หน่วยเก็บข้อมูล	10
1.6.5	ความมั่นคงและภาวะส่วนตัว	10
1.7	มาตรฐานของระบบ IoT	10
1.8	โพรโทคอลชั้นประยุกต์ในระบบ IoT	12
1.8.1	โพรโทคอล HTTP	12
1.8.2	โพรโทคอล MQTT	14
1.8.3	โพรโทคอล CoAP	16
1.9	บทสรุป	19
1.10	แบบฝึกหัด	20

2	ตัวรับรู้และการประมวลผล.....	21
2.1	ตัวรับรู้ในระบบ IoT	21
2.1.1	ตัวรับรู้แอนะล็อก	21
2.1.2	ตัวรับรู้ดิจิทัล.....	25
2.2	การประมวลผลข้อมูลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	25
2.2.1	โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์	27
2.2.2	การเชื่อมต่อและประมวลผลข้อมูลจากตัวรับรู้.....	30
2.3	การวิเคราะห์สถิติข้อมูลการวัด	37
2.3.1	ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	38
2.3.2	ความคลาดเคลื่อนและการประเมินความแม่นยำของระบบ	38
2.4	สมการการถดถอยสำหรับงาน IoT.....	43
2.4.1	การถดถอยเชิงเส้น	44
2.4.2	การถดถอยไม่เชิงเส้น	44
2.4.3	สัมประสิทธิ์การกำหนด.....	47
2.5	บทสรุป.....	53
2.6	แบบฝึกหัด	54
3	การสื่อสารไร้สายสำหรับระบบ IoT.....	57
3.1	พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย	57
3.2	ย่านความถี่	58
3.3	การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ	60
3.4	ตัวชี้วัดสมรรถนะระบบสื่อสารไร้สาย.....	62
3.4.1	แบบจำลองความสูญเสียเชิงวิถี	62
3.4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียเชิงวิถีกับค่าความแรงสัญญาณที่รับได้	65
3.4.3	การประมาณค่าความสูญเสียเชิงวิถี	68
3.4.4	อัตราการส่งกลุ่มข้อมูล	72
3.5	โครงข่ายทอพอโลยีไร้สาย	73
3.6	การพัฒนาชุดตัวรับรู้ไร้สาย	78
3.6.1	ชุดตัวรับรู้ไร้สายแบบทำงานเดี่ยว	78
3.6.2	ชุดตัวรับรู้ไร้สายแบบทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์.....	79
3.6.3	ภาครับสัญญาณ.....	80

3.6.4	ตัวอย่างการพัฒนาเครื่องวัดแบบสื่อสารไร้สาย	83
3.7	บทสรุป.....	89
3.8	แบบฝึกหัด	89
4	การพัฒนาเกตเวย์ในระบบ IoT.....	91
4.1	สถาปัตยกรรมเกตเวย์	91
4.1.1	ส่วนการสื่อสารขาเข้า.....	91
4.1.2	หน่วยประมวลผล.....	92
4.1.3	ส่วนการสื่อสารขาออก	92
4.1.4	ตัวอย่างภาพเหตุการณ์ของการทำงานเกตเวย์ในระบบ IoT	92
4.2	การออกแบบฮาร์ดแวร์เกตเวย์	93
4.3	การออกแบบซอฟต์แวร์เกตเวย์	94
4.4	ตัวอย่างการพัฒนาเกตเวย์สำหรับระบบวัดแบบไร้สาย	95
4.4.1	คลังโปรแกรมและส่วนประกอบของโปรแกรม	98
4.4.2	การกำหนดค่าพื้นฐานของระบบ.....	98
4.4.3	ตัวแปรส่วนกลางและโครงสร้างข้อมูล	99
4.4.4	การแปลงที่อยู่ IP เป็นข้อความ	99
4.4.5	การกำหนดตำแหน่งของชุดตัวรับรู้.....	100
4.4.6	การสร้างรหัสข้อมูลของระบบ.....	100
4.4.7	การส่งข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 1888	101
4.4.8	การวิเคราะห์กลุ่มข้อมูลจากอุปกรณ์ XBee	101
4.4.9	การประสานเวลาของระบบ.....	102
4.4.10	การเริ่มต้นระบบเกตเวย์	102
4.4.11	กระบวนการทำงานหลักของเกตเวย์.....	102
4.4.12	การทดสอบระบบการส่งข้อมูล.....	103
4.5	บทสรุป.....	106
4.6	แบบฝึกหัด	107
5	การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงเวลา	109
5.1	แนวทางการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงเวลาในระบบ IoT	109
5.1.1	ปัญหาช่วงเวลานิ่งในการสื่อสาร	109
5.1.2	การวิเคราะห์ปัญหาทางเวลาในระบบ IoT	110

5.1.3	เวลาไป-กลับของการสื่อสาร	111
5.2	การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงเวลาในระบบตัวรับรู้ไร้สายผ่าน NB-IoT	114
5.2.1	สถาปัตยกรรมของระบบทดสอบ	114
5.2.2	ลำดับการสื่อสารในระบบทดสอบ	115
5.2.3	ตัวอย่างลำดับเหตุการณ์ในการสื่อสารข้อมูลผ่านโครงข่าย NB-IoT	117
5.2.4	การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	121
5.3	การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงเวลาในการเชื่อมโยงข้ามแพลตฟอร์ม	122
5.3.1	สถาปัตยกรรมของระบบทดสอบ	123
5.3.2	ลำดับการสื่อสารในระบบทดสอบ	124
5.3.3	ผลกระทบจากระยะทางการสื่อสารในระบบทดสอบ	125
5.3.4	ผลกระทบจากการใช้งานแพลตฟอร์ม IoT ต่างกัน	127
5.3.5	ผลการวิเคราะห์เชิงเวลาในระบบ IoT	128
5.4	บทสรุป.....	133
5.5	แบบฝึกหัด	133
6	การวิเคราะห์อัตราการส่งกลุ่มข้อมูล.....	135
6.1	นิยามตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์อัตราการส่งกลุ่มข้อมูล.....	135
6.2	ตัวชี้วัดด้านอัตรากลุ่มข้อมูล	137
6.2.1	การประมาณจำนวนกลุ่มข้อมูลที่คาดหวัง.....	139
6.2.2	การประมาณจำนวนกลุ่มข้อมูลที่คาดว่าจะส่งได้ในระบบหลายโหนด.....	141
6.3	การเปรียบเทียบผลกระทบปริมาณการส่งข้อมูลของโหนด ZigBee	142
6.3.1	ทอพอโลยีที่ใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะ	142
6.3.2	การทดสอบกรณีการทดลองทอพอโลยีแบบจุดถึงจุด	143
6.3.3	การทดสอบกรณีการทดลองทอพอโลยีแบบหลายจุดถึงจุด	144
6.4	อัตราการส่งกลุ่มข้อมูลด้วย NB-IoT	147
6.4.1	สถาปัตยกรรมของระบบทดสอบ	147
6.4.2	การวิเคราะห์พฤติกรรมระบบสื่อสาร	147
6.4.3	การตั้งค่าช่วงเวลาหนึ่งในระบบทดสอบ	149
6.4.4	ผลการวิเคราะห์อัตราการส่งกลุ่มข้อมูลของโหนด NB-IoT.....	150
6.5	อัตราการส่งกลุ่มข้อมูลในระบบ ZigBee ร่วมกับ NB-IoT	153
6.5.1	สถาปัตยกรรมระบบทดสอบ	153

6.5.2	ลำดับการสื่อสารในโครงข่าย	153
6.5.3	เงื่อนไขในระบบทดสอบ	155
6.5.4	ผลการวิเคราะห์ดัชนีความแรงสัญญาณที่ได้รับ	155
6.5.5	ผลการวิเคราะห์อัตราการส่งกลุ่มข้อมูล	158
6.6	บทสรุป.....	163
6.7	แบบฝึกหัด	163
7	การประยุกต์ใช้งาน	167
7.1	ปัญหามอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบผลิตน้ำยางพารา.....	167
7.1.1	ปัญหาภาวะไหลตสูงและความร้อนสะสมจากการเกิดก้อนยาง	168
7.1.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิของมอเตอร์.....	169
7.2	สถาปัตยกรรมระบบการตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์	172
7.2.1	ชั้นตรวจวัด	173
7.2.2	ชั้นสื่อสารและประมวลผล	175
7.2.3	ชั้นคลาวด์และการประยุกต์.....	176
7.3	การวิเคราะห์ข้อมูลระบบ	177
7.3.1	การเตรียมข้อมูลและการวิเคราะห์สถานะของระบบ	178
7.3.2	การอนุมานสถานะจากข้อมูล	178
7.3.3	การวิเคราะห์ลักษณะข้อมูลตามสถานะการทำงาน	179
7.3.4	การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก	179
7.3.5	การจัดกลุ่มข้อมูลด้วยวิธี K-Means	180
7.3.6	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลา.....	181
7.4	บทสรุป.....	184
7.5	แบบฝึกหัด	184
	บรรณานุกรม	186
	ดัชนี.....	193

บทนำอินเทอร์เน็ตประสาณสรพลิ่ง

ในปัจจุบันระบบอินเทอร์เน็ต (Internet) ได้ครอบคลุมหลายพื้นที่ทั่วโลก ส่งผลให้อุตสาหกรรมใหม่เกิดขึ้น รวมถึงการพัฒนาาระบบอินเทอร์เน็ตประสาณสรพลิ่ง (Internet of Things: IoT) ที่พร้อมรองรับการเชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์วัดแบบอัจฉริยะต่าง ๆ เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกให้กับผู้ใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น ระบบบ้านอัจฉริยะ โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ และเกษตรแม่นยำ เป็นต้น อาชีพอีกแขนงหนึ่งที่เริ่มมีบทบาทมากขึ้น ได้แก่ นักพัฒนาระบบ IoT นักพัฒนาระบบสมองกลฝังตัว หรือวิศวกรที่นำระบบ IoT ไปแก้ปัญหาในสาขาของตนเอง โดยการนำองค์ความรู้ด้าน IoT ไปประยุกต์ใช้ในศาสตร์ต่าง ๆ หากผู้ออกแบบเข้าใจพื้นฐานในระบบ IoT ได้เป็นอย่างดีแล้ว จะทำให้ระบบที่นำไปใช้งานนั้นเกิดประสิทธิภาพสูงสุด บทนี้มุ่งเน้นปูความรู้พื้นฐานทั่วไป ได้แก่ สถาปัตยกรรม IoT รูปแบบการสื่อสาร และข้อจำกัดต่าง ๆ เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจความรู้พื้นฐานก่อนนำไปใช้ในบทถัดไปได้

1.1 แนวคิดพื้นฐาน

ระบบอินเทอร์เน็ตประสาณสรพลิ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลายส่วน ตั้งแต่ตัวรับรู้ (sensor) ที่ใช้ตรวจวัดข้อมูลจากสภาพแวดล้อม หน่วยประมวลผลสำหรับจัดการข้อมูล ระบบสื่อสารสำหรับรับส่งข้อมูล ไปจนถึงระบบจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลบนอินเทอร์เน็ต องค์ประกอบเหล่านี้ทำงานร่วมกันเพื่อสร้างระบบอัจฉริยะที่สามารถติดตาม ตรวจสอบ และควบคุมการทำงานจากระยะไกลได้ [1] นอกจากนี้ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) ทำให้การพัฒนาาระบบ IoT สามารถดำเนินการได้ง่ายขึ้น โดยเฉพาะการใช้งานแพลตฟอร์ม (platform) สำหรับการพัฒนาาระบบสมองกลฝังตัว (embedded system) เช่น Arduino, ESP8266 และ ESP32 ซึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายทั้งในด้านการศึกษา การวิจัย และการพัฒนาต้นแบบระบบ IoT [2,3]

ในทางปฏิบัติระบบ IoT ประกอบด้วยองค์ประกอบหลายส่วนที่ทำงานร่วมกัน ได้แก่ การตรวจวัดข้อมูลจากสภาพแวดล้อม การสื่อสารข้อมูล และการประมวลผลข้อมูลผ่านระบบโครงข่าย โดยการเลือกใช้เทคโนโลยีสื่อสารขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ระยะทางการสื่อสาร อัตราการส่งข้อมูล และข้อจำกัดด้านพลังงานของระบบ [1] อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของระบบ IoT ไม่ได้ขึ้นอยู่กับตัวรับรู้เพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบสื่อสารข้อมูล ซึ่งส่งผลต่อความถูกต้อง ความรวดเร็ว และความเชื่อถือได้ ของข้อมูลที่รับส่งผ่านระบบ โดยปัจจัยต่าง ๆ เช่น ระยะทาง สิ่งกีดขวาง สัญญาณรบกวน และสภาพแวดล้อมในการติดตั้ง ล้วนมีผลต่อคุณภาพของการสื่อสาร ดังนั้นการทำความเข้าใจพื้นฐานของการวัด การสื่อสาร และการประเมินสมรรถนะของโครงข่ายสื่อสาร จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบและพัฒนาระบบ IoT ให้มีประสิทธิภาพตามต้องการ [4]

ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้โครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายในการพัฒนาระบบ IoT คือการพัฒนาระบบวัดพลังงานไฟฟ้ารองรับการสื่อสารไร้สายเพื่อสนับสนุนระบบบริหารจัดการพลังงานภายในอาคาร ระบบดังกล่าวสามารถรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากจุดตรวจวัดต่าง ๆ และส่งต่อข้อมูลเข้าสู่ระบบประมวลผลผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ทำให้ผู้ใช้งานสามารถติดตาม วิเคราะห์ และบริหารจัดการการใช้พลังงานได้จากกระยะไกล ซึ่งเป็นตัวอย่างของการบูรณาการเทคโนโลยีการตรวจวัด การสื่อสาร และการประมวลผลข้อมูลเข้าด้วยกันตามแนวคิดของอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง [5–9]

หนังสือเล่มนี้นำเสนอองค์ความรู้พื้นฐานและตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานระบบอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง โดยเริ่มจากแนวคิดพื้นฐานและพัฒนาการของศาสตร์ในบทที่ 1 จากนั้นอธิบายหลัก การตรวจวัดและการประมวลผลข้อมูลในบทที่ 2 หลักการสื่อสารไร้สายในบทที่ 3 และการพัฒนาเกตเวย์ในบทที่ 4 ส่วนบทที่ 5 และบทที่ 6 มุ่งเน้นการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบสื่อสารในด้านเวลาและอัตราการส่งกลุ่มข้อมูล (packet) ตามลำดับ สำหรับบทที่ 7 กล่าวถึงกรณีศึกษาการประยุกต์ใช้ งานระบบ IoT ในภาคอุตสาหกรรม เพื่อแสดงแนวทางการนำองค์ความรู้ที่ได้ไปใช้ในการออกแบบและ พัฒนาระบบจริง

1.2 นิยามและความหมาย

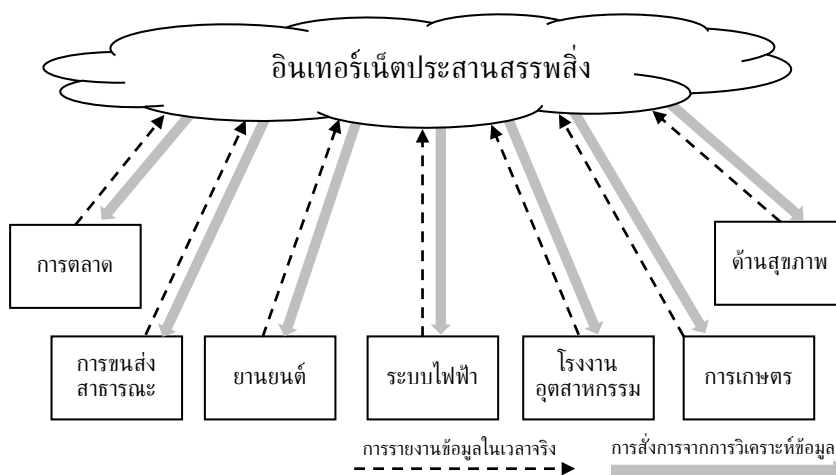
คำว่า **อินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง** เป็นศัพท์บัญญัติที่เสนอโดยสำนักงานราชบัณฑิตยสภาจาก คำว่า **Internet of Things** โดยในภาษาไทยตามคำบัญญัตินี้ประกอบด้วย

- 1) **อินเทอร์เน็ต** หมายถึง โครงข่ายที่เชื่อมโยงอุปกรณ์และผู้ใช้งานทั่วโลกเข้าด้วยกัน ทำให้สามารถสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลได้ทุกที่ทุกเวลา
- 2) **ประสาน** หมายถึง การเชื่อมโยงและการทำงานร่วมกันอย่างเป็นระบบ
- 3) **สรรพสิ่ง** หมายถึง สิ่งต่าง ๆ รอบตัว ทั้งที่เป็นวัตถุ สิ่งมีชีวิต และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ดังนั้นอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่งจึงหมายถึงแนวคิดในการเชื่อมโยงสิ่งต่าง ๆ ผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อให้สามารถรับรู้ การสื่อสาร การแลกเปลี่ยนข้อมูล และทำงานร่วมกันได้โดยอัตโนมัติ นอกจากนี้บทความวิจัยในวารสารชั้นนำ [10–12] ได้กล่าวถึงความหมายของ IoT โดยสรุปว่าเป็นระบบโครงข่ายของอุปกรณ์จำนวนมากที่สามารถตรวจจับข้อมูล เชื่อมต่อ และแลกเปลี่ยนข้อมูลได้โดยอัตโนมัติผ่านการสื่อสารระหว่างเครื่องจักรกับเครื่องจักร (machine-to-machine: M2M) อุปกรณ์ในระบบดังกล่าวประกอบด้วยตัวรับรู้ หน่วยประมวลผล และระบบสื่อสาร ซึ่งสามารถส่งต่อข้อมูลเข้าสู่ระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อจัดเก็บ วิเคราะห์ และประมวลผลข้อมูลต่อไป

จากรูปที่ 1.1 แสดงภาพรวมโครงสร้างพื้นฐานของ IoT ที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงระบบจากหลากหลายภาคส่วน เช่น การตลาด การขนส่ง ยานยนต์ ระบบไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม การเกษตร และด้านสุขภาพ อุปกรณ์แต่ละประเภทจะรายงานข้อมูลเข้าสู่ระบบคลาวด์เพื่อการวิเคราะห์ และเมื่อได้ผลลัพธ์ระบบสามารถส่งการกลับไปยังอุปกรณ์เพื่อปรับปรุงกระบวนการทำงาน เช่น การควบคุมพลังงานไฟฟ้า การตรวจสอบสุขภาพจากระยะไกล หรือการรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติ ซึ่งช่วยให้เกิดความสะดวกและความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นระบบ IoT มีจุดประสงค์เพื่อเปลี่ยนวัตถุทั่วไปให้เป็น “วัตถุอัจฉริยะ” ที่สามารถรับรู้ ตอบสนอง และสื่อสารข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ระบบดังกล่าวทำหน้าที่เชื่อมโยงในลักษณะของโลกไซเบอร์-กายภาพ (cyber-physical world) เพื่อก่อให้เกิดการบริการทางข้อมูลอย่าง



รูปที่ 1.1 การเชื่อมโยงภาคส่วนระบบต่าง ๆ เข้ากับอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่ง
(ที่มา: จัดทำโดย ธนากร อินทสุทธิ์)

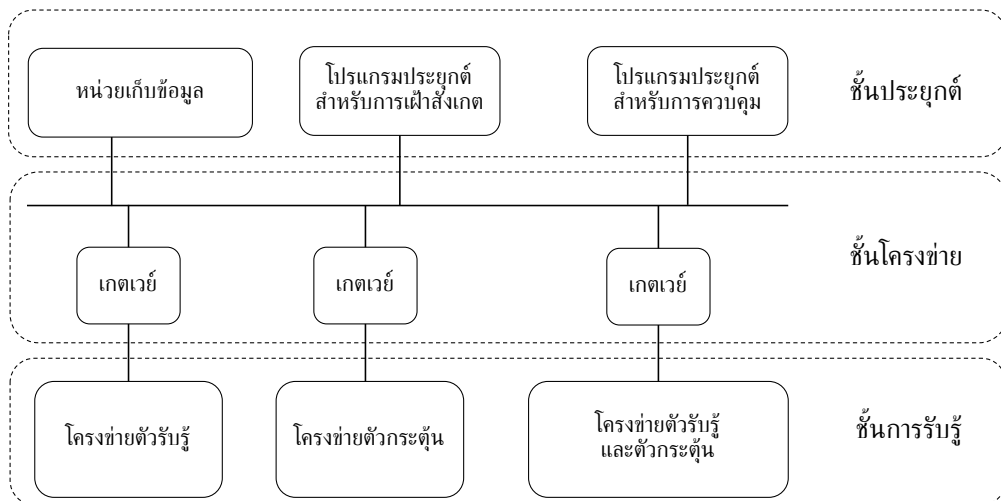
เสถียรภาพ นอกจากนี้ระบบ IoT ยังรองรับการบูรณาการเทคโนโลยีเกิดใหม่ เช่น ข้อมูลขนาดใหญ่ (big data) การคำนวณแบบคลาวด์ (cloud computing) และการวิเคราะห์ข้อมูลเวลาจริง (real-time data analysis) เพื่อเชื่อมโยงข้อมูลจากหลายโดเมน (domain) และช่วยในการตัดสินใจแบบอัตโนมัติ ดังนั้นอินเทอร์เน็ตประสาทรพจึงเป็นพื้นฐานสำคัญของสังคมอัจฉริยะ (smart society) ที่เชื่อมโยงเทคโนโลยีเข้ากับการใช้ชีวิตประจำวัน ทำให้ผู้ใช้งานสามารถติดตาม ควบคุม และจัดการข้อมูลได้ทุกที่ทุกเวลา ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและลดต้นทุนการดำเนินงาน อีกทั้งยังเป็นรากฐานสำคัญของการพัฒนาในภาคส่วนต่าง ๆ โดยอาศัยเทคโนโลยีสารสนเทศและดิจิทัลเพื่อสนับสนุนการพัฒนาอย่างยั่งยืน

1.3 ที่มาและการพัฒนาการของศาสตร์

อินเทอร์เน็ตประสาทรพ [13] ได้กล่าวครั้งแรกในปีคริสต์ศักราช 1999 โดยเจวิน แอชตัน จากศูนย์การระบุเอกลักษณ์อัตโนมัติ (Automatic Identification Center: Auto-ID) สถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology: MIT) เพื่ออธิบายระบบที่วัตถุทางกายภาพสามารถเชื่อมต่อกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตได้ แนวคิดดังกล่าวมุ่งเน้นการนำเทคโนโลยีการระบุด้วยความถี่วิทยุ (radio frequency identification: RFID) มาใช้ร่วมกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตเพื่อให้สามารถนับและติดตามวัตถุได้โดยอัตโนมัติและลดการพึ่งพาการดำเนินการโดยมนุษย์ แม้คำว่าอินเทอร์เน็ตประสาทรพจะเป็นศัพท์ที่บัญญัติในยุคหลัง แต่แนวคิดของการใช้คอมพิวเตอร์และโครงข่ายสื่อสารเพื่อการวัดและการควบคุมอุปกรณ์ระยะไกลได้มีพัฒนาการอย่างต่อเนื่องหลายทศวรรษ เช่น ระบบตรวจสอบมิเตอร์พลังงานไฟฟ้าผ่านสายโทรศัพท์ในช่วงปลายคริสต์ทศวรรษ 1970 และระบบสื่อสารแบบ M2M ในภาคอุตสาหกรรมช่วงคริสต์ทศวรรษ 1990 อย่างไรก็ตามระบบยุคแรกยังใช้โครงข่ายเฉพาะกิจ (ad-hoc network) และมาตรฐานเฉพาะของผู้ผลิต โดยยังไม่ได้อาศัยโปรโตคอลอินเทอร์เน็ต (Internet Protocol: IP) เป็นหลักเช่นในปัจจุบัน

1.4 สถาปัตยกรรมระบบ IoT

สถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตประสาทรพเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการทำงานร่วมกันระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ ทั้งฮาร์ดแวร์ (hardware) และซอฟต์แวร์ (software) เพื่อรวบรวมข้อมูลและการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต [14] โดยสถาปัตยกรรมระบบแสดงการเชื่อมโยงส่วนประกอบต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 1.2 โดยแบ่งออกเป็น 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นการรับรู้ (perception layer) ชั้นโครงข่าย (network layer) และชั้นประยุกต์ (application layer)



รูปที่ 1.2 สถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง

Adapted from [14], reproduced with permission from IEEE. License No. 6220550888030. © IEEE 2019.

1.4.1 ชั้นการรับรู้

ชั้นการรับรู้ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากสภาพแวดล้อมผ่านตัวรับรู้ต่าง ๆ เช่น ตัวรับรู้อุณหภูมิ ตัวรับรู้ความชื้น ตัวรับรู้แสงสว่าง และตัวรับรู้การเคลื่อนไหว เป็นต้น อุปกรณ์ในชั้นนี้อาจประกอบด้วยโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สาย (wireless sensor networks: WSN) อุปกรณ์ตรวจจับภาพ และอุปกรณ์เก็บข้อมูลอื่น ๆ ซึ่งทำหน้าที่ส่งข้อมูลต่อไปยังชั้นโครงข่าย นอกจากนี้ในชั้นการรับรู้นี้อาจทำงานร่วมกับโครงข่ายตัวกระตุ้นไร้สายเพื่อรับคำสั่งจากระบบและดำเนินการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมตามที่กำหนด

1.4.2 ชั้นโครงข่าย

ชั้นโครงข่ายมีอุปกรณ์เกตเวย์ (gateway) ทำหน้าที่เชื่อมโยงการทำงานระหว่างชั้นการรับรู้และชั้นประยุกต์ โดยเกตเวย์ทำหน้าที่รับข้อมูลจากชั้นการรับรู้และส่งต่อผ่านระบบสื่อสารทั้งแบบมีสายและแบบไร้สาย เช่น อีเทอร์เน็ต (Ethernet) หรือ Wi-Fi เพื่อเชื่อมต่อข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดเข้าสู่โครงข่ายอินเทอร์เน็ต ในทางกลับกันเกตเวย์ยังสามารถรับข้อมูลหรือคำสั่งจากหน่วยเก็บข้อมูลเพื่อนำไปควบคุมตัวกระตุ้นและสั่งการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้

1.4.3 ชั้นประยุกต์

ชั้นประยุกต์เป็นส่วนที่ผู้ใช้หรือระบบงานต่าง ๆ นำข้อมูลจากชั้นโครงข่ายไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบของการจัดเก็บข้อมูลผ่านหน่วยเก็บข้อมูล (data storage) การเฝ้าสังเกต (monitoring) และการควบคุม (control) ผ่านโปรแกรมประยุกต์ (application) เช่น โปรแกรมประยุกต์สำหรับการบริหารจัดการพลังงานในอาคาร และโปรแกรมประยุกต์สำหรับการติดตามคุณภาพอากาศ

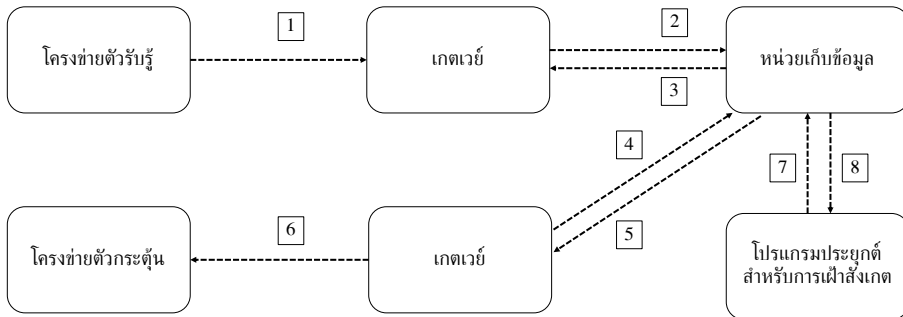
1.5 ตัวอย่างภาพเหตุการณ์ในระบบ IoT

จากหัวข้อที่ 1.4 ที่ผ่านมามีอธิบายเกี่ยวกับความหมายและส่วนประกอบของสถาปัตยกรรม IoT ในเบื้องต้นแล้ว ในหัวข้อนี้นำเสนอตัวอย่างการทำงานเพื่อให้ผู้อ่านทำความเข้าใจหลักการทำงานของ IoT ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น โดยแสดงภาพเหตุการณ์ (scenario) ของการสื่อสารข้อมูลจำนวน 2 รูปแบบ ซึ่งแสดงลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่างตัวรับรู้ ตัวกระตุ้น เกล็ดเว่ย หน่วยเก็บข้อมูล และโปรแกรมประยุกต์ โดยภาพเหตุการณ์ที่ 1 แสดงการเฝ้าสังเกตและการควบคุมแบบอัตโนมัติ และภาพเหตุการณ์ที่ 2 แสดงการควบคุมระยะไกล โดยตัวอย่างภาพเหตุการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 1.3 และ 1.4 ตามลำดับ

1.5.1 ภาพเหตุการณ์ที่ 1: การเฝ้าสังเกตและควบคุมแบบอัตโนมัติ

จากการพิจารณาหมายเลขกำกับในรูปที่ 1.3 สามารถอธิบายลำดับการไหลของข้อมูลและการทำงานขององค์ประกอบต่าง ๆ ภายในระบบ IoT ให้สอดคล้องกับหมายเลขในรูปได้ดังนี้

- 1) ลำดับที่ 1 โครงข่ายตัวรับรู้ส่งข้อมูลไปยังเกตเว่ย โดยข้อมูลจากตัวรับรู้ถูกส่งเข้าสู่เกตเว่ยเพื่อรวบรวมและแปลงรูปแบบข้อมูลให้เหมาะสม
- 2) ลำดับที่ 2-3 เกตเว่ยส่งข้อมูลไปยังหน่วยเก็บข้อมูลผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต จากนั้นหน่วยเก็บข้อมูลส่งสถานะการตอบรับ (acknowledgement: ACK) มายังเกตเว่ยเพื่อยืนยันว่าการจัดเก็บข้อมูลสำเร็จ
- 3) ลำดับที่ 4-5 เกตเว่ยฝั่งการควบคุมร้องขอข้อมูลล่าสุดจากหน่วยเก็บข้อมูล เพื่อนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง จากนั้นหน่วยเก็บข้อมูลจึงส่งข้อมูลดังกล่าวกลับมายังเกตเว่ย
- 4) ลำดับที่ 6 เกตเว่ยฝั่งการควบคุมส่งคำสั่งไปยังโครงข่ายตัวกระตุ้นเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์โดยอัตโนมัติ
- 5) ลำดับที่ 7-8 โปรแกรมประยุกต์สำหรับการเฝ้าสังเกตร้องขอข้อมูลจากหน่วยเก็บข้อมูล และหน่วยเก็บข้อมูลส่งข้อมูลกลับเพื่อแสดงผลแก่ผู้ใช้งานในรูปแบบกราฟหรือตาราง



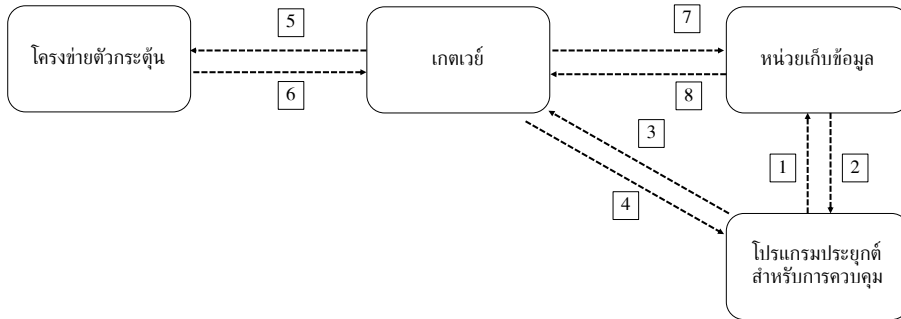
รูปที่ 1.3 ตัวอย่างภาพเหตุการณ์ที่ 1 การเฝ้าสังเกตและการควบคุมแบบอัตโนมัติ
(ที่มา: จัดทำโดย ธนากร อินทสุทธิ)

ลำดับดังกล่าวแสดงเส้นทางหลักของข้อมูลเริ่มต้นจากลำดับที่ 1 และ 2 เพื่อการจัดเก็บข้อมูล ขณะที่ลำดับที่ 3, 5 และ 8 เป็นสถานะการตอบรับเพื่อยืนยันการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ ส่วนการควบคุมอัตโนมัติเกี่ยวข้องกับลำดับที่ 4-6 และการแสดงผลข้อมูลแก่ผู้ใช้งานอยู่ในลำดับที่ 7-8

1.5.2 ภาพเหตุการณ์ที่ 2: การควบคุมระยะไกล

ภาพเหตุการณ์ที่ 2 แสดงกระบวนการควบคุมระยะไกล ซึ่งมีจุดเริ่มต้นจากฝั่งผู้ใช้งานผ่านโปรแกรมประยุกต์สำหรับการควบคุม โดยคำสั่งควบคุมจะถูกส่งผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตไปยังเกตเวย์และส่งต่อไปยังโครงข่ายตัวกระตุ้นเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ปลายทาง จากการพิจารณาหมายเลขกำกับในรูปที่ 1.4 สามารถอธิบายลำดับการทำงานได้ดังนี้

- 1) ลำดับที่ 1-2 โปรแกรมประยุกต์สำหรับการควบคุมร้องขอข้อมูลจากหน่วยเก็บข้อมูล และได้รับสถานะการตอบรับเพื่อแสดงสถานะปัจจุบันของระบบให้ผู้ใช้งานตรวจสอบก่อนดำเนินการสั่งงาน
- 2) ลำดับที่ 3-4 ผู้ใช้งานส่งคำสั่งควบคุมผ่านโปรแกรมประยุกต์ไปยังเกตเวย์ผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ปลายทาง
- 3) ลำดับที่ 5-6 เมื่อเกตเวย์ได้รับคำสั่งจากโปรแกรมประยุกต์จะส่งคำสั่งไปยังโครงข่ายตัวกระตุ้นและรับสถานะการตอบรับจากอุปกรณ์เพื่อยืนยันผลการทำงาน
- 4) ลำดับที่ 7-8 เกตเวย์รายงานผลการควบคุมไปยังหน่วยเก็บข้อมูลเพื่อบันทึกเหตุการณ์และปรับปรุงสถานะล่าสุดของระบบ จากนั้นหน่วยเก็บข้อมูลจึงส่งสถานะการตอบรับมายังเกตเวย์เพื่อยืนยันการจัดเก็บข้อมูล

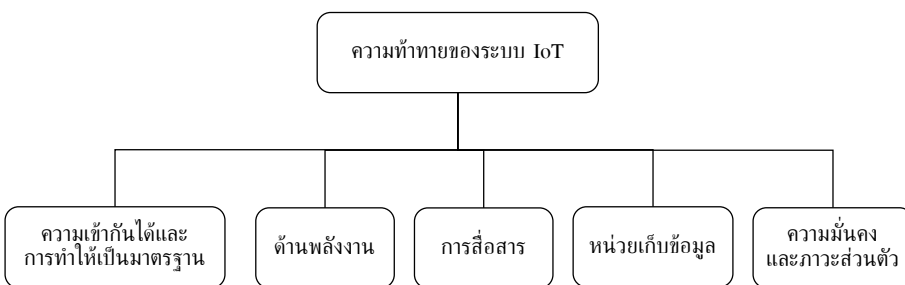


รูปที่ 1.4 ตัวอย่างภาพเหตุการณ์ที่ 2 การควบคุมระยะไกล
(ที่มา: จัดทำโดย ธนากร อินทสุทธิ)

ลักษณะการสื่อสารของภาพเหตุการณ์ที่ 2 เป็นการไหลของข้อมูลมีจุดเริ่มต้นจากฝั่งผู้ใช้งานเหมาะสำหรับระบบควบคุมระยะไกล เช่น การควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้าในอาคาร การควบคุมวาล์ว (valve) ในงานเกษตรอัจฉริยะ และการควบคุมเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งต้องการตอบสนองแบบทันทีและการยืนยันผลการสั่งงานอย่างชัดเจน

1.6 ข้อจำกัดของระบบ IoT

การประยุกต์ใช้งาน IoT ในระบบจริงยังมีข้อจำกัดหลายประการ ซึ่งต้องอาศัยการพัฒนาทั้งด้านฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ และมาตรฐานเพื่อแก้ไขข้อจำกัด [15] โดยข้อจำกัดในระบบสามารถสรุปประเด็นได้ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 ความท้าทายของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสาทรพัส่ง

Adapted from [15] under the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1.6.1 ความเข้ากันได้และการทำให้เป็นมาตรฐาน

ความเข้ากันได้และการทำให้เป็นมาตรฐาน (compatibility and standardization) มีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหาความหลากหลายของอุปกรณ์ ผู้ผลิต และแพลตฟอร์ม ทำให้การทำงานร่วมกันระหว่างระบบเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง การขาดมาตรฐานอาจส่งผลให้ระบบที่พัฒนาขึ้นไม่สามารถสื่อสารหรือทำงานร่วมกันได้ ทั้งในระดับโปรโตคอล (protocol) รูปแบบข้อมูล และความหมายของข้อมูล [15]

ในเชิงเทคนิคการทำให้เป็นมาตรฐาน หมายถึง การกำหนดหลักเกณฑ์หรือข้อกำหนดร่วมกันสำหรับการสื่อสารและการจัดการข้อมูล เพื่อให้ระบบต่าง ๆ ใช้แนวทางเดียวกัน ดังนั้นการพัฒนาระบบ IoT จึงควรคำนึงถึงความเข้ากันได้และการใช้มาตรฐานร่วมกัน เพื่อให้การแลกเปลี่ยนข้อมูลเป็นไปอย่างถูกต้อง ลดความสับสนและข้อผิดพลาดในการสื่อสาร รวมทั้งทำให้อุปกรณ์จากผู้ผลิตหลายรายสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างราบรื่น

1.6.2 ด้านพลังงาน

ด้านพลังงาน (energy) นับเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญของระบบอินเทอร์เน็ตประสาทรพลัง [15] เนื่องจากอุปกรณ์จำนวนมากถูกติดตั้งในพื้นที่ที่ไม่เอื้อต่อการบำรุงรักษา การเปลี่ยนแบตเตอรี่หรือการชาร์จพลังงานอย่างสม่ำเสมอ หากระบบพลังงานขาดเสถียรภาพย่อมส่งผลกระทบต่อความถูกต้อง และความต่อเนื่องของการสื่อสาร เช่น การเกิดความผิดพลาดของข้อมูล [16] หรือการสูญเสียการเชื่อมต่อของระบบ [17]

ดังนั้นแนวทางการพัฒนาระบบจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงข้อจำกัดด้านพลังงานตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ ทั้งในส่วนของสถาปัตยกรรมระบบ วงจรจัดการพลังงาน และกลไกการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ การลดการใช้พลังงานให้อยู่ในระดับต่ำที่สุดจึงเป็นเป้าหมายสำคัญ เนื่องจากมีผลโดยตรงต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์ นอกจากนี้การเลือกใช้เทคโนโลยีการสื่อสารที่ใช้พลังงานต่ำยังช่วยยกระดับประสิทธิภาพและความยั่งยืนของระบบโดยรวมได้อย่างมีนัยสำคัญ

1.6.3 การสื่อสาร

การสื่อสาร (communication) ในระบบอินเทอร์เน็ตประสาทรพลังมีเทคโนโลยีให้เลือกใช้อย่างหลากหลาย ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดทางวิศวกรรมของแต่ละระบบ ทั้งในด้านระยะทางการสื่อสาร เช่น การสื่อสารระยะใกล้และการสื่อสารระยะไกล รวมถึงอัตราการส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน เช่น ระบบที่ต้องการอัตราบิตต่ำ หรือระบบที่ต้องรองรับการส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะงานและปริมาณข้อมูลที่ต้องรับ-ส่ง ดังนั้นการเลือกใช้เทคโนโลยีการสื่อสารจึงต้องพิจารณาปัจจัยหลายประการ

ร่วมกัน ได้แก่ การใช้พลังงาน ยานความถี่ และสภาพแวดล้อมของการติดตั้งใช้งาน [15]

ในทางปฏิบัติเทคโนโลยีการสื่อสารให้เลือกใช้อย่างหลากหลาย เช่น โครงข่ายระยะไกลพลังงานต่ำ ตลอดจนระบบสื่อสารสำหรับงานเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมที่ออกแบบมาเพื่อให้มีความเชื่อถือได้สูง โดยส่วนใหญ่ใช้การส่งสัญญาณด้วยเครื่องส่งวิทยุ อย่างไรก็ตามยังมีแนวทางการสื่อสารอีกประเภทหนึ่งที่อาศัยการสะท้อนคลื่นวิทยุแทนการสร้างสัญญาณใหม่ จึงไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องส่งสัญญาณที่ทำงานตลอดเวลา แนวทางดังกล่าวได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในระบบการระบุด้วยคลื่นความถี่วิทยุ และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านเทคนิคการมอดูเลชันขั้นสูง (advanced modulation) อุปกรณ์ไร้ชิป (chipless device) การประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรโตคอลเชิงพาณิชย์ และการควบคุมสัญญาณแบบดิจิทัล ส่งผลให้มีศักยภาพในการขยายขอบเขตการใช้งานในอนาคต โดยเฉพาะระบบที่ต้องการประหยัดพลังงานและรองรับอุปกรณ์จำนวนมากภายในโครงข่ายเดียวกัน [15]

1.6.4 หน่วยเก็บข้อมูล

หน่วยเก็บข้อมูล (data storage) เป็นองค์ประกอบสำคัญในการบันทึกข้อมูลจากตัวรับรู้ อย่างไรก็ตามเมื่อมีการขยายระบบ จำนวนอุปกรณ์ที่ส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบย่อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรองรับของระบบจัดเก็บข้อมูลอาจไม่เพียงพอ หากโครงสร้างหน่วยเก็บข้อมูลเดิมไม่ได้รับการออกแบบให้รองรับทั้งความหลากหลายของอุปกรณ์และปริมาณข้อมูลจำนวนมาก ดังนั้นผู้ออกแบบระบบจึงจำเป็นต้องพัฒนากลไกการจัดการข้อมูลให้มีประสิทธิภาพและเพียงพอต่อการใช้งาน [15]

1.6.5 ความมั่นคงและความเป็นส่วนตัว

ความมั่นคงและความเป็นส่วนตัว (security and privacy) เป็นประเด็นสำคัญในการออกแบบระบบอินเทอร์เน็ตประสาทรพpling เนื่องจากอุปกรณ์จำนวนมากมีข้อจำกัดด้านทรัพยากร ทั้งหน่วยความจำ หน่วยประมวลผล และพลังงาน ข้อจำกัดดังกล่าวอาจส่งผลให้การประยุกต์ใช้กลไกการเข้ารหัสข้อมูล การพิสูจน์ตัวตน และการควบคุมสิทธิ์การเข้าถึงไม่สามารถดำเนินการได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ปัญหานี้มักเกี่ยวข้องกับการเข้ารหัสระหว่างการส่งข้อมูล มาตรการป้องกันซอฟต์แวร์ที่ไม่เพียงพอ และกระบวนการกำหนดสิทธิ์ที่ไม่รัดกุม

ประเด็นดังกล่าวส่งผลกระทบโดยตรงต่อความเป็นส่วนตัวของข้อมูล โดยเฉพาะในระบบที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลอ่อนไหว เช่น ระบบอุปกรณ์ทางการแพทย์ ระบบติดตามสุขภาพ และระบบตอบสนองเหตุฉุกเฉิน ดังนั้นการออกแบบสถาปัตยกรรมด้านความมั่นคงและความเป็นส่วนตัวให้เหมาะสมกับข้อจำกัดของอุปกรณ์จึงเป็นประเด็นสำคัญของการวิจัยและการพัฒนาในปัจจุบัน [15]