มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

ระบบควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่างผ่านเครือข่ายไร้สายอัตราต่ำ

Low Rate Wireless Network Lighting Control System

นายวณพันธ์ วัยวุฒิ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในการดำเนินงานของสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับการอุดหนุนงบประมาณในการดำเนินการ

ปี พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ สำเร็จได้ด้วยการสนับสนุนทุนการวิจัยจากงบประมาณประจำปีงบประมาณ 2555 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ นายวงศกร อิงคนันทสิทธิ์ ที่ช่วยจัดทำในส่วนโครงสร้างและข้อมูลรายงานการวิจัยของการวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนขอขอบคุณผู้ที่ให้ความร่วมมือและให้ความอนุเคราะห์ ทุก ๆ ท่าน

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการพัฒนาระบบไฟแสงสว่างที่ควบคุมผ่านเครือข่ายไร้สายอัตราต่ำใช้พลังงานต่ำ เครือข่ายไร้สายอัตราต่ำมีราคาถูกและประกอบด้วยตัวประมวลผลอัตโนมัติขนาดเล็กที่สามารถสื่อสาร และควบคุมอุปกรณระยะไกลได้ วัตถุประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้คือการพัฒนาระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างไร้สายระยะไกล โดยผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย (WNS) ระบบเครือข่ายไร้สายเป็นระบบที่มีข้อจำกัดเรื่องแหล่งจ่ายพลังงาน ระยะทางในการสื่อสารและความสามารถในการประมวลผลต่ำ แต่จะทำงานร่วมกันเป็นเครือข่ายที่ใช้ได้ในพื้นที่ที่กว้าง รับและส่งข้อมูลจากโหนด (Node)แต่ละโหนดในเครือข่าย สามารถรวบรวมและเก็บข้อมูล มีการส่งซ้ำเพื่อประมวลผลหรือการเตือน ขั้นตอนของการทดลองคือการสร้างโหนดหลักและโหนดย่อย ในพื้นที่ควบคุมแสงสว่างและการส่งข้อมูล การควบคุมภาระแสงสว่างไม่ต้องใช้สายไฟ เมื่อโหนดไร้สายไม่ได้รับหรือส่งข้อมูล โมดูลสามารถเปลี่ยนเป็นหยุดพักการทำงาน (Sleep mode), ที่มีการใช้พลังงานต่ำ ประโยชน์ที่ได้จะสามารถลดการใช้สายไฟ, ฉนวนหุ้มสายไฟ รวมทั้งวัสดุอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเดินสายและการควบคุมภาระแสงสว่าง

(นาย วณพันธ์ วัยวุฒิ)

ผู้วิจัย

Abstract

This research presents the development of a low rate and low power consumption low rate wireless network. Low rate wireless networks are cheap and comprised of a small fully autonomous processing, communication and remote control devices. The purpose of this study is to develop the system for remote wireless lighting system. They will work with wireless network system (WNS). WNS has been restricted power supply, communication distance and low computing power. But they will work with network in vast area, send and receive raw data from each network node. It has the ability to cooperatively collect data and retransmit in order to process or alert. The step of the experiment is creating main node and sub node in lighting area and transmission of control data between them with less electrical wiring. When wireless node not receiving or transmitting data, the module can be switched into the sleep mode, low power consumption mode. We can reduce the use of electrical wiring; insulated insulation material or other that related to and include energy too.

(Mr. Wanapun Waiyawut)

Researcher

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	1
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย	3
2.2 ZigBee	9
2.3 XBee	12
2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์	20
2.5 มาตรฐาน RS-232	26
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	
3.1 การทำงานของระบบ	35
3.2 การใช้งานโมดูล XBee เบื้องต้น	35

บทที่ หน้า

3.3 โครงสร้างของระบบ 42
3.4 การออกแบบวงจร 42
4 ผลการทดลอง
4.1 บทนำ 60
4.2 การทดลองการส่งข้อมูลจาก XBee มาเก็บในฐานข้อมูล 60
4.3 การทดลองการหาระยะทางในการติดตั้งตัวตรวจจับ 62
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ
5.1 บทนำ 67
5.2 สรุปผลการทดลอง 67
5.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน 67
5.4 อุปสรรคและปัญหาที่พบ 68
5.5 ข้อเสนอแนะ 68

เอกสารอ้างอิง 69

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างแบบจำลองเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย	4
2.2	ส่วนประกอบของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์	5
2.3	ระดับชั้นโปรโตคอลของเครือข่ายสื่อสารไร้สาย	7
2.4	ลักษณะการใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบซักถามและแบบแบ่งงาน	8
2.5	โทโปโลยีของเครือข่าย LR-WPAN	11
2.6	ZigBee Stack architecture	12
2.7	Star (Broadcast) Network	13
2.8	Cluster Tree (Tree) Network	13
2.9	Mesh Network	14
2.10	XBee แบบมีสายอากาศในตัว	15
2.11	XBee แบบต่อสายอากาศได้	16
2.12	แสดงโหมดการทำงานของ XBee	17
2.13	Internal Data Flow Diagram	17
2.14	แสดงการทำงานของ AODV Protocol	19
2.15	โครงสร้างหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์	21
2.16	กลุ่มของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR	21
2.17	บล็อกไดอะแกรม AVR (ATmega32)	22
2.18	ขาพอร์ต AVR (ATmega32) ตัวถังแบบ PDIP และ TQFP/MLF	23
2.19	คอนเน็กเตอร์ 9 ขาหรือแบบ DB-9 (ตัวผู้)	26
3.1	บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบ	35
3.2	วงจร voltage divider สำหรับลดแรงดันไมโครคอนโทรเลอร์ 5V	36
3.3	หน้าต่างกำหนดการเชื่อมต่อของโปรแกรม X-CTU	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.4	หน้าต่างแจ้งผลการติดต่อของโมดูล XBee	37
3.5	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ XBee	38
3.6	การเปลี่ยน Baud rate	39
3.7	การกำหนดค่าโมดูลตัวรับ	40
3.8	การเชื่อมต่อ XBee แบบ Mesh	41
3.9	โครงสร้างของระบบ	42
4.1	หน้าต่างโปรแกรมขณะยังไม่เชื่อมต่อ RS 232	60
4.2	วงจรตรวจจับอุณหภูมิที่พร้อมใช้งาน	61
4.3	วงจรควบคุมการทำงาน Data Logger ที่พร้อมใช้งาน	61
4.4	หน้าต่างแสดงผลข้อมูลอุณหภูมิในรูปแบบกราฟ	62
4.5	แสดงการทดลองหาระยะทางในการส่งข้อมูลตัวตรวจจับของ XBee	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านวงจรอิเลคทรอนิคส์ขนาดเล็กมีการพัฒนาไปมาก ทำให้มีการผลิตอุปกรณ์วงจรรวม (Integrated Circuit, IC) ขนาดเล็กออกมาเป็นจำนวนมาก อุปกรณ์ตรวจจับแบบไร้สายเป็นอปกรณ์ที่ถูกพัฒนาออกมาหลายแบบ ตัวอย่างการใช้ตัวตรวจจับไร้สาย ใช้ตัวตรวจจับ (Sensor) ตรวจจับการเกิดน้ำป่าแล้วมีการแจ้งเตือนภัย เพื่อลดความสูญเสียให้น้อยลง แต่การที่จะนำตัวตรวจจับเข้าไปติดตั้ง และส่งข้อมูลออกมาจากพื้นที่ตรวจจับ เช่นในป่าหรือตามภูเขา ทำได้ยากลำบาก ซึ่งควรจะใช้ตัวตรวจจับแบบไร้สาย ในปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีเครือข่ายตรวจจับไร้สาย (Wireless Sensor Networks: WSN) มีการพัฒนามาก มีขนาดที่เล็ก และใช้พลังงานในการทำงานต่ำ เครือข่ายตรวจจับไร้สายประกอบด้วยจุดตรวจจับ (Sensor Node: SN) ที่นำมาวางกระจายเป็นจำนวนมาก ในพื้นที่ที่ต้องการตรวจจับ (Area of Sensing Node, Node Deploy Service Area: บริเวณที่ต้องการตรวจจับที่ใช้ตัวตรวจจับตามชนิดของข้อมูลที่ต้องการวัด) แต่ละจุดตรวจจับประกอบไปด้วย ตัวตรวจจับ ส่วนประมวลผลเบื้องต้น และส่วนสื่อสาร มีหน้าที่หลักคือเฝ้าดู หรือรอเหตุการณ์ที่สนใจจะตรวจจับภายในบริเวณนั้น เพื่อรวบรวมข้อมูลที่สนใจและส่งกลับไปที่สถานีหลัก (Base Station) เพื่อประมวลผล ได้มีการพัฒนา WSN มาประยุกต์มาใช้กับงานหลายๆอย่าง เช่นการควบคุมการใช้พลังงานภายในอาคาร การตรวจจับการเกิดไฟป่า [1] ระบบรักษาความปลอดภัยในบ้านหรืออาคาร การตรวจจับศัตรูในทางทหาร และอื่นๆ ที่ต้องการตรวจจับเหตุการณ์ที่มีโอกาสเกิดหลายๆจุด โดยที่มีจุดตรวจจับ, SN แบบไร้สาย โดยที่แต่ละจุดตรวจจับจะมีขนาดเล็ก ราคาไม่สูงติดตั้งได้ง่าย (ยังอยู่ในขั้นตอนการวิจัย และยังไม่มีหน่วยงานที่นำไปใช้หรือติดตั้งอย่างจริงจัง) ไม่ต้องมีระบบรองรับพื้นฐาน (Network Infrastructure) ทำให้ในบางพื้นที่ที่ต้องการเฝ้าดูไม่จำเป็นต้องเข้าไปในพื้นที่นั้น หรือต้องกำหนดตำแหน่งของ WSN การติดตั้งทำได้โดยโปรย หรือทิ้งตัวตรวจจับอย่างสุ่มในพื้นที่นั้น ดังนั้นการควบคุมการใช้พลังงานของ SN จึงมีความสำคัญ

เพื่อที่จะทำให้ SN และเครือข่ายทำงานได้นานที่สุด ทำให้การออกแบบระบบในแต่ละชั้นของระบบ (System Layer) ต้องให้ความสำคัญของการใช้พลังงานที่น้อยที่สุด (Power-Aware) ด้วย ในงานวิจัยนี้ จะทำการออกแบบระบบเครือข่ายไร้สายอัตราต่ำเพื่อใช้ควบคุมอุปกรณ์แสงสว่าง ใช้ภายในอาคาร เพื่อลดการใช้สายไฟฟ้า (ที่ประกอบด้วยตัวนำ และฉนวนไฟฟ้า)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1 เพื่อพัฒนาและสร้างอุปกรณ์เปิดปิดไฟฟ้าแสงสว่างแบบไร้สาย

2 นำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นทำงานกับระบบเครือข่ายไร้สายอัตราต่ำ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1 นำระบบที่ได้จากการวิจัยไปใช้ควบคุมการเปิดปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่าง

2 ลดการใช้สายไฟ (ช่วยลดการใช้ตัวนำและฉนวนไฟฟ้า)

3 มีการใช้งานผ่านเครือข่ายไร้สายอัตราต่ำ (Ad-hoc Network)

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.ศึกษาและออกแบบการควบคุมระบบไฟฟ้าแสงสว่างด้วยระบบฝังตัว (Embedded System)

2.ศึกษาและออกแบบระบบเครือข่ายไร้สายอัตราต่ำ และงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

3.ทดลองใช้งานระบบเครือข่ายไร้สายอัตราต่ำควบคุมระบบไฟฟ้าแสงสว่างที่อยู่ในบริเวณเดียวกัน

4.ทดลองใช้งานระบบเมื่อผ่านผนัง และชั้นของอาคาร

5.ทดลองการทำงานแบบเครือข่ายที่อยู่ในบริเวณเดียว

6.ทดลองการทำงานแบบเครือข่าย กับสิ่งแวดล้อมในอาคาร

7.ทดลองปรับค่าของอุปกรณ์ตัวรับและส่ง

8.สรุปผล ทำรายงานการวิจัย และนำเสนอผลที่ได้จากการวิจัย

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย Wireless Sensor Network (WSN) [1] คือ การใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์เล็กๆ จำนวนมากเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติต่างๆ ของสิ่งแวดล้อมที่สนใจและประมวลผลข้อมูลเหล่านั้นเพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมรอบตัวหรือตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้โดยอัตโนมัติ

2.1.1วิวัฒนาการของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

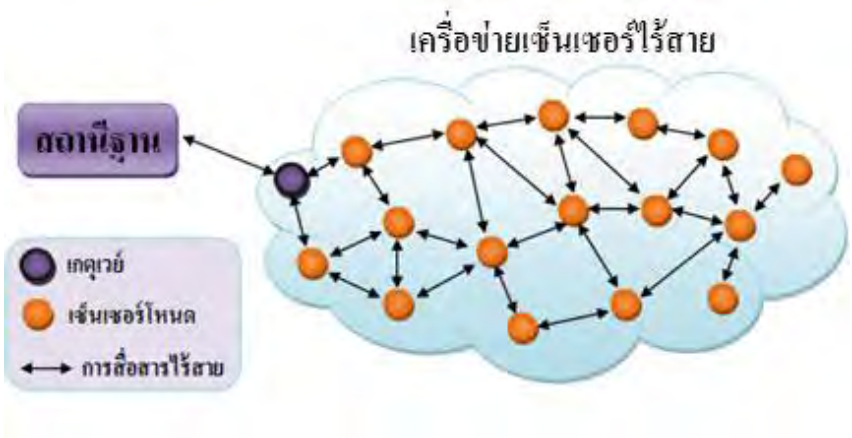
ยุคแรกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการสงคราม ในช่วงสงครามเย็น (SOSUS) ซึ่งสหรัฐใช้ในมหาสมุทรเพื่อตรวจจับเรือดำน้ำของสหภาพโซเวียต โดยใช้ระบบแถวเซ็นเซอร์ไฮโดรโฟน (hydrophone array) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเสียงเป็นพลังงานไฟฟ้าใต้น้ำ และส่งข้อมูลด้วยสายเคเบิลใต้น้ำ ในช่วงเวลาเดียวกัน ระบบเครือข่ายเรดาร์ทางอากาศ (networks of air defense radars) ได้รับการพัฒนาเพื่อป้องกันภาคพื้นสหรัฐอเมริกาและแคนาดา ในยุคแรกนี้ระบบเครือข่ายมีรูปแบบเป็นลำดับขั้น (hierarchical) การประมวลผลจะทำตามลำดับขั้นและใช้มนุษย์เป็นหลักในการประมวลผลและทำงาน

ยุคที่สองเกิดขึ้นหลังจากการพัฒนาอินเทอร์เน็ตในปี พ.ศ.2523 ซึ่งเป็นยุคของการพัฒนาเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบกระจายตัว (Distributed Sensor Network) โดยเป็นโครงการวิจัยของ Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) โดยเน้นที่การพัฒนาการประมวลผลข้อมูลแบบกระจายตัว การประมวลผลสัญญาณ (signal processing) การติดตามวัตถุ เครือข่ายใช้โปรโตคอลสื่อสารระดับสูง แต่ด้วยเทคโนโลยีในยุคนั้นทำให้หน่วยร่วมเซ็นเซอร์มีขนาดใหญ่และถูกออกแบบให้เป็นรถเซ็นเซอร์เพื่อให้เป็นหน่วยร่วมเซ็นเซอร์แบบเคลื่อนที่ได้

เครือข่ายเซ็นเซอร์ยุค ปี พ.ศ.2550 เทคโนโลยีการผลิตไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้รับการพัฒนาถึงระดับที่สามารถผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก ราคาถูก และประหยัดพลังงาน ซึ่งเหมาะสำหรับสร้างหน่วยประมวลผล และหน่วยส่งข้อมูลของเซ็นเซอร์ไร้สาย และด้วยเทคโนโลยีระบบเครื่องกลจุลภาค การสร้างเซ็นเซอร์ขนาดเล็กและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเกิดขึ้นได้จริง ทำให้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายยุคนี้ เข้าใกล้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในจินตนาการของนักวิจัยยุคก่อนอย่างไรก็ตามเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนี้ยังมีการวิจัยอย่างต่อเนื่อง

2.1.2สถาปัตยกรรมเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

สถาปัตยกรรมเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ หน่วยร่วม - เซ็นเซอร์, เกตเวย์ และสถานีฐาน (base station) ดังภาพที่ 2.1 หน่วยร่วมเซ็นเซอร์จำนวนมากฝังตัวในสภาพแวดล้อมเพื่อเก็บข้อมูล โดยแต่ละหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ติดต่อสื่อสารกันแบบไร้สายกับหน่วย ร่วมเซ็นเซอร์ข้างเคียง ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับส่งแบบไร้สาย แต่ละหน่วยร่วมเซนเซอร์ ควบคุมและจัดการงานของตัวเอง (self-organize) ทุกๆหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ที่ติดต่อถึงกันทำงานร่วมกัน (collaboration) เป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายทำให้แต่ละหน่วยร่วมเซ็นเซอร์สามารถส่งข้อมูลไปหากันได้ แม้ว่าหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ปลายทางไม่สามารถติดต่อกับหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ต้นทางได้โดยตรง โดยให้หน่วยร่วมเซ็นเซอร์ระหว่างทางช่วยส่งข้อมูลต่อๆ กันตั้งแต่ต้นทางถึงปลายทางวิธีการส่งแบบนี้เรียกว่าการส่งแบบมัลติฮอพ (multi-hop) เกตเวย์ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานและเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยเกตเวย์อาจเป็นหน่วยร่วม เซ็นเซอร์ธรรมดาหรือเป็นหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ ที่มีความสามารถพิเศษในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สถานีฐานทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่วัดได้จากหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ในเครือข่าย เซ็นเซอร์ไร้สาย ควบคุมการทำงานและติดต่อกับผู้ใช้งาน หรืออาจติดต่อกับเครือข่ายอื่นๆ เช่น อินเทอร์เน็ต



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างแบบจำลองเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เนื่องจากเป็นการทำงานแบบไร้สาย ทำให้แต่ละหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ใช้แหล่งพลังงานภายในหน่วยร่วมเซ็นเซอร์เอง หรือในบางกรณีอาจใช้แหล่งกำเนิดพลังงาน เพื่อให้หน่วยร่วมเซ็นเซอร์ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้ทำให้เครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากหน่วยร่วม เซ็นเซอร์อาจหยุดทำงานเพราะพลังงานหมดหรือกลับขึ้นมาทำงานได้อีก ครั้งเมื่อมีพลังงานเพียงพอ รวมไปถึงในบางเครือข่ายที่มีหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ที่เคลื่อนที่ได้ การ

เปลี่ยนแปลงของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์นั้นมีผลต่อโครงสร้าง (Topology) ของเครือข่าย และส่งผลถึงเส้นทางในการส่งข้อมูลของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ โดยเส้นทางในการส่งข้อมูลในแต่ละโครงสร้างนั้นขึ้นอยู่กับวิธี การหาเส้นทาง (routing algorithm) ซึ่งวิธีการค้นหาเส้นทางในแต่ละเครือข่ายนั้นจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของเครือข่ายนั้นๆ

2.1.3ลักษณะของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

1) หน่วยร่วมเซ็นเซอร์มีราคาต่ำ เพื่อการสร้างเครือข่ายที่ต้องใช้หน่วยร่วมเซ็นเซอร์จำนวนมาก และเหมาะสำหรับการนำไปใช้ครั้งเดียว

2) หน่วยร่วมเซ็นเซอร์มีขนาดเล็กเพื่อฝังตัวในสภาพแวดล้อม

3) หน่วยร่วมเซ็นเซอร์มีแหล่งพลังงานและความสามารถในการประมวลผลจำกัด

4) หน่วยร่วมเซ็นเซอร์และเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสามารถจัดการตัวเองได้โดยไม่ต้องมีมนุษย์เข้าไปควบคุมหรือช่วยเหลือ

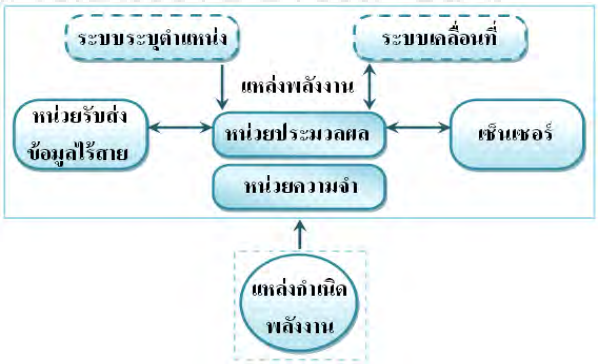
5) หน่วยร่วมเซ็นเซอร์จำนวนมาก มีการกระจายตัวครอบคลุมบริเวณทำการของเครือข่าย เซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อเก็บข้อมูล

6) เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายทนทานต่อความเสียหายเมื่อหน่วยร่วมเซ็นเซอร์บางส่วนทำงานไม่ได้

7) โครงสร้างเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเป็นโครงสร้างที่ไม่แน่นอนและปลี่ยนแปลงได้อยู่ตลอดเวลา

2.1.4หน่วยร่วมเซ็นเซอร์

การทำงานของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์คือการวัดและเก็บข้อมูลที่ได้จากสภาพแวดล้อม นำข้อ มูลไปประมวลผล สร้างเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและส่งข้อมูล ทำให้หน่วยร่วมเซ็นเซอร์มีส่วน ประกอบดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์

ส่วนประกอบของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์แบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มส่วนประกอบหลักที่จำเป็นเพื่อให้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายทำงานได้ โดยในภาพที่ 2.2 จะเป็นส่วนประกอบที่มีเส้นรอบรูปเป็นเส้นทึบและกลุ่มส่วนประกอบเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษให้กับหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ โดยในภาพที่ 2.2 จะเป็นส่วนประกอบที่มีเส้นรอบรูปเป็นเส้นประ

1) กลุ่มส่วนประกอบหลัก

- เซ็นเซอร์ (sensor) ทำหน้าที่วัดค่าต่างๆ จากสภาพแวดล้อมตามแต่ชนิดของเซ็นเซอร์ เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความเข้มแสง ควัน ความเร่ง แรงสั่นสะเทือน ความเคลื่อนไหว ความลึก ความเป็นกรดหรือด่าง เป็นต้น

- หน่วยรับส่งข้อมูลไร้สาย (transceiver unit) ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลแบบไร้สายในย่านความถี่สาธารณะ (ISM band) เพื่อรับส่งข้อมูลระหว่างหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ข้างเคียง

- หน่วยประมวลผล (processing unit) ติดต่อกับเซ็นเซอร์เพื่อสั่งงานหรือรับข้อมูลที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ เพื่อนำไปประมวลผลเป็นข้อมูล จัดเก็บลงในหน่วยความจำ รอการร้องขอข้อมูลหรืออาจส่งข้อมูลทันทีผ่านทางหน่วยรับส่งข้อมูลไร้สาย หน่วยประมวลผลกลางอาจรับข้อมูลจากระบบระบุตำแหน่งเพื่อช่วยในการประมวลผลต่างๆ หรือหน่วยประมวลผลกลางอาจทำหน้าที่ควบคุม การเคลื่อนที่ของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ผ่านทางระบบเคลื่อนที่ นอกจากนี้ หน่วยประมวลผลกลางยังทำหน้า ที่ประมวลผลเครือข่ายและหาเส้นทางในการส่งข้อมูลของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์

- แหล่งพลังงาน (power unit) เก็บสะสมพลังงานและจ่ายพลังงานให้กับทุกส่วนประกอบบนหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ แหล่งพลังงานจะรับพลังงานจากแหล่งกำเนิดพลังงาน หากหน่วยร่วมเซ็นเซอร์มีแหล่งกำเนิดพลังงาน

2) กลุ่มส่วนประกอบเพิ่มเติม

- ระบบระบุตำแหน่ง (positioning unit) เป็นหน่วยระบุตำแหน่งของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์โดยใช้ GPS เพื่อนำข้อมูลตำแหน่งไปใช้ประมวลผล เช่น หาเส้นทางเพื่อส่งข้อมูล หาตำแหน่งสำหรับการเคลื่อนที่ของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ เป็นต้น

- ระบบเคลื่อนที่ (mobilizing unit) ทำหน้าที่เคลื่อนย้ายตำแหน่งของเซ็นเซอร์เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น จัดรูปแบบโครงสร้างเครือข่าย ติดตามวัตถุ เคลื่อนที่หาสัญญาณสื่อสาร เป็นต้น

- แหล่งกำเนิดพลังงาน (power generator unit) ทำหน้าที่กำเนิดพลังงานจากสิ่งแวด ล้อม เช่น พลังงานลม ความร้อน ปฏิกิริยาเคมี การสั่นสะเทือน เป็นต้น ให้เป็นพลัง งานไฟฟ้า

เพื่อเก็บสะสมและใช้ต่อไป เพื่อชดเชยพลังงานที่ถูกใช้ไป ทำให้ตัวเซ็นเซอร์ไร้สายทำงานได้เป็นเวลานาน

2.1.5ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เนื่องจากข้อจำกัดในหลายๆด้าน จึงทำให้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีระบบเครือข่ายที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น ในระบบเตือนภัย ระบบเครือข่ายต้องการความเร็วสูงในการส่งข้อมูล และจะส่งข้อมูลเมื่อเกิดอุบัติการณ์ขึ้นเท่านั้นเพื่อประหยัดพลังงาน ในระบบวัดและควบคุมทาง การเกษตร ระบบเครือข่ายไม่ต้องการความเร็วสูงในการส่งข้อมูล แต่จะส่งข้อมูลตลอดเวลาโดย อาจมีการรวมข้อมูล (data fusion)ในระหว่างเส้นทางการเดินทางของข้อมูลเพื่อลดจำนวนครั้งของการสื่อสารและประหยัดพลังงาน ดังนั้นการเลือกชนิดและออกแบบเครือข่ายจะต้องพิจารณ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน

1) โปรโตคอลสแตก (protocol stack) หรือระดับชั้น

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้ความสำคัญกับพลังงานมาก เพราะเซ็นเซอร์ไร้สายมักมีแหล่งพลังงานที่จำกัด ทำให้พลังงานมีผลมากกับเซ็นเซอร์ไร้สายและเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในด้านการออกแบบจึงต้องปรับปรุงโปรโตคอลสแตกของ Open Systems Interconnection (OSI) model โดยแบ่งเป็นสามชั้นและหนึ่งระนาบดังภาพที่ 2.3 แต่ละชั้นจะทำหน้าที่เฉพาะของตัวเองคอยให้ความช่วยเหลือชั้นบนและขอความช่วยเหลือจากชั้นล่างที่ติดกับชั้นตัวเอง ส่วนระนาบซึ่งเชื่อมโยงกับทุกชั้น จะควบคุมบริหารจัดการในทุกๆชั้น ให้ทำงานตามวัตถุประสงค์ของระนาบนั้นๆ

ภาพที่ 2.3 ระดับชั้นโปรโตคอลของเครือข่ายสื่อสารไร้สาย

- ชั้นกายภาพ (physical layer) รับผิดชอบการรับส่งสัญญาณไร้สาย ในด้านกายภาพ เช่น ช่วงความถี่สัญญาณ การมอดูเลต (modulation) การเข้ารหัสระดับช่องสัญญาณ ชั้นกายภาพในประเทศไทยจะใช้ช่วงความถี่สาธารณะและกำลังส่งตามกฎหมายกำหนด

- ชั้นเชื่อมต่อข้อมูล (data link layer) รับผิดชอบการรับส่งข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์ข้างเคียง การเข้าใช้ช่องสัญญาณ (medium access control (MAC)) การควบคุมข้อผิดพลาด (error control) ของข้อมูล เพื่อให้การสื่อสารระหว่างหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ถูกต้องและเชื่อถือได้ ปัจจุบันการเข้าใช้ช่องสัญญาณของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์จะเป็นแบบสุ่มเข้าใช้งาน (random access) ที่เป็นเช่นนี้เพราะการใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายประกอบไปด้วยหน่วยร่วมเซ็นเซอร์อยู่เป็นจำนวนมากและไม่มีโครง สร้างที่แน่นอนทำให้การควบคุมแบบ รวมศูนย์ทำได้ยาก และการใช้ช่องสัญญาณแบบสุ่มทำให้เกิดความเท่าเทียมกันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ

- ชั้นเครือข่าย (network layer) รับผิดชอบการรับส่งข้อมูลระดับเครือข่าย เนื่องจากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายใช้การส่งข้อมูลแบบมัลติฮอพเพื่อส่งข้อมูลจากหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ไปยังสถานีฐาน การคำนวณหาเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูลเป็นหน้าที่หลักของชั้นนี้

- ระนาบพลังงาน (power plane) รับผิดชอบควบคุมการใช้พลังงานในชั้นต่างๆ ของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ และเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้มีประสิทธิภาพ โดยอาจประ สานงานข้ามชั้น (cross layer) เช่น หน่วยร่วมเซ็นเซอร์ที่เหลือพลังงานน้อย อาจจะลดพลังงานในการส่งข้อมูลในชั้นกายภาพ โดยประสานงานกับชั้นเครือข่าย เพื่อเลือกเส้นทางที่ควรจะส่งข้อมูลในกรณีที่ระยะส่งข้อมูลลดลงเนื่องการลด พลังงานในการส่งข้อมูล

2) การพิจารณาระบบเครือข่าย

- การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากหน่วยร่วมเซ็นเซอร์มีพลังงานอยู่ จำกัด ซึ่งพลังงานที่มีเก็บสะสมอยู่เป็นตัวแปรหนึ่งของอายุการใช้งานหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ และอายุของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

- ความล่าช้าของข้อมูล การใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในบางประเภทต้องการให้ได้ข้อมูลเร็วที่ สุดหรือมีระดับความล่าช้าของข้อมูลไม่เกินค่าที่กำหนดหลังจากหน่วยร่วม เซ็นเซอร์เก็บข้อมูลได้ เช่น ในงานสัญญาณเตือนภัยสึนามิ ไฟป่า หรือในงานควบคุมที่ความล่าช้าของข้อมูล (delay sensitive) มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุม เป็นต้น

- ความถูกต้องของข้อมูล เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายควรจะให้ข้อมูลที่ถูกต้องสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับความแม่นยำของเซ็นเซอร์และการประมวลผลข้อมูลในหน่วยร่วม เซ็นเซอร์หรือในเครือข่ายเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องที่สุด

- ความทนทานต่อความเสียหาย เหตุการณ์ที่หน่วยร่วมเซ็นเซอร์ไม่สามารถทำงานได้มีโอกาสเกิดขึ้นได้ ดังนั้นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อให้

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายยังคงทำงานต่อไปได้ เช่น การมีเส้นทางสำรองในการเชื่อมต่อเครือข่ายและในการส่งข้อมูล

- ความสามารถในการส่งข้อมูล แบ่งออกเป็น ความสามารถในการส่งข้อมูลของแต่ละหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ และความสามารถในการส่งข้อมูลของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในกรณีที่ส่งข้อมูลไม่พร้อมกัน ความสามารถในการส่งข้อมูลของแต่ละหน่วยร่วมเซ็นเซอร์เป็นสิ่งสำคัญ แต่ในกรณีที่ส่งข้อมูลพร้อมๆ กันจำนวนมาก ความ สามารถในการส่งข้อมูลของเครือข่ายเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งานเครือ ข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

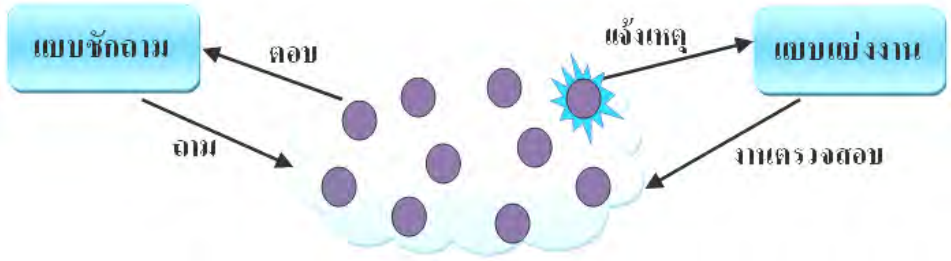
- จำนวนหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเป็นปัจจัยหลักกับค่าใช้ จ่ายและความคุ้มค่าในการเลือกใช้ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

2.1.6การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

การใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบ่งออกตามลักษณะการใช้งานได้เป็นสองประเภท คือ ประเภทซักถาม (querying) กับประเภทแบ่งงาน (tasking)

1) แบบซักถาม (querying) เมื่อเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายถูกถามหาข้อมูลหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ใดๆ ที่มีข้อมูลจะตอบกลับผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายดังภาพที่ 2.4 ตัวอย่างเช่น ในงานการเกษตร หน่วยร่วมเซ็นเซอร์จะถูกถามเมื่อโปรแกรมที่ใช้งานต้องการใช้ข้อมูลความชื้นและอุณหภูมิ หน่วยร่วมเซ็นเซอร์จะตอบด้วยข้อมูลที่ถูกเก็บบันทึกไว้ในแต่ละหน่วยร่วมเซ็นเซอร์

2) แบบแบ่งงาน (tasking) เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายคอยรับหน้าที่ในการตรวจสอบเหตุการณ์ต่างๆ เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ได้รับมอบหมายให้ตรวจสอบ หน่วยร่วมเซ็นเซอร์จะแจ้งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายกลับทันทีดังภาพที่ 2.4 ตัวอย่างเช่น ในการเตือนภัยไฟป่าเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้รับมอบหมายให้เฝ้าวัดความร้อนและควันไฟ หน่วยร่วมเซ็นเซอร์จะแจ้งข้อมูลกลับทันทีเมื่อตรวจวัดความร้อนและควันไฟได้เกินระดับที่ตั้งไว้เท่านั้น



ภาพที่ 2.4 ลักษณะการใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบซักถามและแบบแบ่งงาน

2.2 ZigBee

ZigBee เป็นมาตรฐานโปรโตคอลการสื่อสารไร้สายสำหรับเครือข่ายไม่ต้องการอัตราการรับส่งข้อมูลสูง กำหนดโดยองค์กร ZigBee Alliance [7] ซึ่งออกแบบขึ้นสำหรับการสื่อสารในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) โดย ZigBee ได้อ้างอิงตามมาตรฐานของ IEEE 802.15.4 ที่เน้นการสื่อสารแบบประหยัดพลังงาน มีอัตราการรับส่งข้อมูลต่ำ ส่วนชื่อของ ZigBee นั้นได้มาจากพฤติกรรมการสื่อสารของผึ้ง โดยผึ้งจะบินแบบซิกแซ็ก เพื่อจะให้ข้อมูลข่าวสารระหว่างผึ้งด้วยกันเกี่ยวกับทิศทางและระยะทางของอาหารที่พวกมันกำลังหาอยู่

ZigBee กำหนด ย่านความถี่ใช้งานตามมาตรฐานไว้ 3 ย่านความถี่คือ ย่าน 2.4 GHz, ย่าน 915 MHz และย่าน 868 MHz โดยแต่ละย่านจะมีช่องสัญญาณ 16 ช่อง, 10 ช่อง และ 1 ช่องตามลำดับ ส่วน อัตรารับส่งข้อมูลจะอยู่ที่ 250 Kbps, 40 Kbps, 20 Kbps ตามลำดับเช่นกัน โดยความถี่ย่าน 868 MHz จะใช้ในทวีปยุโรป ความถี่ย่าน 915 MHz ใช้ได้ในประเทศสหรัฐอเมริกาและออสเตเรีย และความถี่ 2.4 GHz สามารถใช้ได้ทั่วโลกรวมถึงประเทศไทยตามกฎกระทรวง เรื่องกำหนดให้เครื่องวิทยุคมนาคมและสถานีวิทยุคมนาคมบางประเภทได้รับยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาตพ.ศ. 2547

2.2.1IEEE 802.15.4

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 [8] เป็นมาตรฐานสำหรับเครือข่ายแบบไร้สายระยะใกล้ความเร็วต่ำโดยมีอัตราการรับส่งข้อมูลต่ำกว่าหรือเท่ากับ 250 Kbps ใช้กำลังไฟน้อย ซึ่งเทคโนโลยีที่ใช้มาตรฐานนี้ในปัจจุบันคือ ZigBee และเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายที่ถูกพัฒนาให้มีจุดเด่นกว่าเทคโนโลยีไร้สายแบบอื่นๆ ในเรื่อง ราคาต่ำ ใช้พลังงานน้อย สามารถติดตั้งไว้ได้นาน และสามารถสร้างเครือข่ายได้ ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานด้านเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับตรวจสอบตำแหน่งของวัตถุ ตรวจสภาพแวดล้อม ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายแบบต่างๆ ทำให้เห็นข้อดีข้อเสียอย่างเช่น GSM/CDMA นั้นสามารถส่งข้อมูลได้มากกว่า ZigBee และระยะทางในการส่งไกลกว่าแต่ข้อเสียคือ Battery นั้นมีอายุการใช้งานต่ำ และต้นทุนสูง ดังนั้นมาตรฐาน ZigBee จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการต้นทุนต่ำและเชื่อถือได้

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สาย

	ZigBee และ 802.15.4	**Bluetooth**	**Wi-Fi 802.11**	**GSM/CDMA**
Application Focus	Monitoring & Control	Cable Replacement	Web, Video, E-mail	WAN, Voice/DATA
System Resource	4KB-32KB	250KB+	1MB	16MB+

Battery Life (Days)	1 ปี	1 สัปดาห์	1 สัปดาห์	1 สัปดาห์

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สาย (ต่อ)

	ZigBee และ 802.15.4	**Bluetooth**	**Wi-Fi 802.11**	**GSM/CDMA**
Node Per Network	255/65k+	7	30	1,000
Bandwidth	250 Kbps	720 Kbps	Up to 54 Mbps	Up to 2 Mbps
Range	100+ เมตร	10-100 เมตร	50-100 เมตร	หลายกิโลเมตร
Key Attributes	Reliable Low Power Cost Efficient	Cost, Convenience	Speed, Flexibility	Reach, Quality

โดยมาตรฐานนี้กำหนดขึ้นสำหรับการรับส่งข้อมูลเบื้องต้น ในวงจรเครื่องรับส่งวิทยุ (Physical Layer) และการควบคุมการรับส่ง (Link Layer) ใช้การผสมสัญญาณ (modulation) แบบ Offset Quadrature Phase Shift Keying (Offset-QPSK) และใช้การแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) ที่มีอัตราการสเปรดดิ่ง 2 ล้าน chip/sec ซึ่งจะควบคุมการรับส่งข้อมูล โดยใช้โปรโตคอลแบบ Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA)

ตามมาตรฐานของ IEEE 802.15.4 [9] ได้กำหนดคุณสมบัติของเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลแบบอัตรารับส่งต่ำ LR-WPAN (Low Rate Wireless Personal Area Network) ไว้ 2 ชั้น คือ ชั้นกายภาพ (Physical Layer) และชั้นรองของแมค (Medium Access Control Sub Layers) มีการกำหนดส่วนสนับสนุน ของอุปกรณ์แบบง่าย 2 ชนิดคือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ได้เต็มที่ FFD (Full Function Device) และอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ได้บางส่วน RFD (Reduced Function Device) ตามมาตรฐาน อุปกรณ์แบบ FFD จะสนับสนุนการทำงานพื้นฐานทางกายภาพ รวม 49 อย่าง แต่อุปกรณ์แบบ RFD จะสนับสนุนแค่ 38 อย่าง การติดต่อสื่อสารของอุปกรณ์ FFD จะติดต่อกับอุปกรณ์ FFD ตัวอื่นๆ และอุปกรณ์ RFD ได้โดยอุปกรณ์ FFD จะทำงานได้ 3 ลักษณะคือ

1) ตัวประสานงานเครือข่ายส่วนบุคคล (PAN Coordinator)
2) ตัวประสานงาน (Coordinator)

3) อุปกรณ์ (Device)

อุปกรณ์แบบ RFD จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ อย่างเดียว การเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างโหนดมี 3 ลักษณะคือ

1) จากอุปกรณ์ไปตัวประสานงาน (Device to a coordinator)

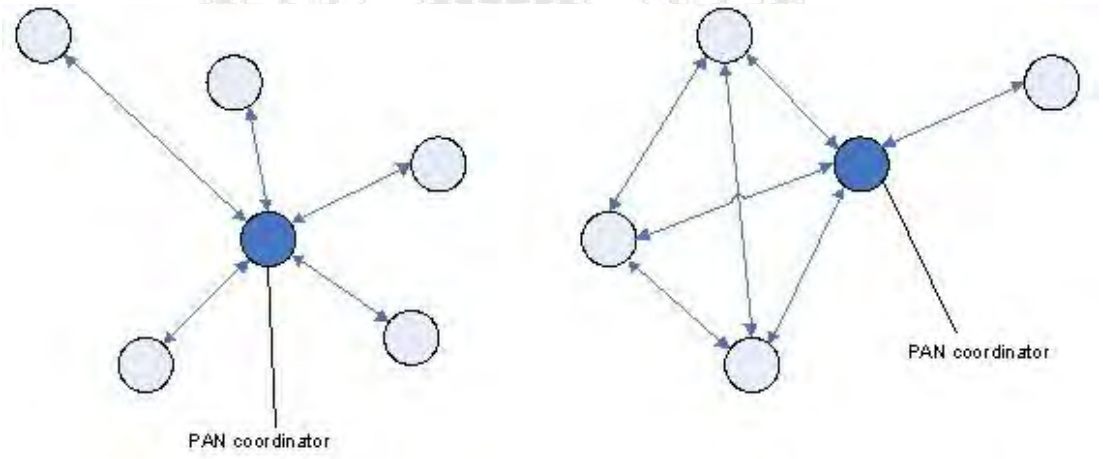
2) จากตัวประสานงานไปอุปกรณ์ (Coordinator to device)

3) ระหว่างอุปกรณ์ที่อยู่ในระดับเดียวกัน (Peer to peer)

โทโปโลยีของเครือข่าย LR-WPAN [9] (Low Rate Wireless Personal Area Network) มี 2 ลักษณะคือ

1) แบบดาว (Star Topology) และแบบระดับเดียวกัน (Peer to peer Topology) ในรูปแบบดาวจะมีการติดต่อสื่อสารระหว่าง PAN Coordinator กับอุปกรณ์ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดในเครือข่าย จะมีตำแหน่งแบบขยาย (Extended Address) และสามารถเปลี่ยนตำแหน่งเป็นแบบสั้น (Short Address) โดย PAN Coordinator ในขณะที่ทำการเชื่อมโยงความสัมพันธ์กันระหว่างอุปกรณ์ (Device Associate)

2) แบบ Peer to peer มี PAN Coordinator เหมือนแบบที่ 1 แต่อุปกรณ์แต่ละตัวสามารถติดต่อระหว่างกันได้ ในระยะการติดต่อของแต่ละอุปกรณ์ โทโปโลยีนี้สามารถนำมาสร้างเป็นเครือข่ายที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้



ภาพที่ 2.5 โทโปโลยีของเครือข่าย LR-WPAN [8]

2.2.2ZigBee Device Types

อุปกรณ์ในเครือข่ายไร้สายของ ZigBee สามารถทำงานได้ 3 แบบ คือ Coordinator End Device และ Router ซึ่งแต่ละแบบมีการทำงานดังนี้

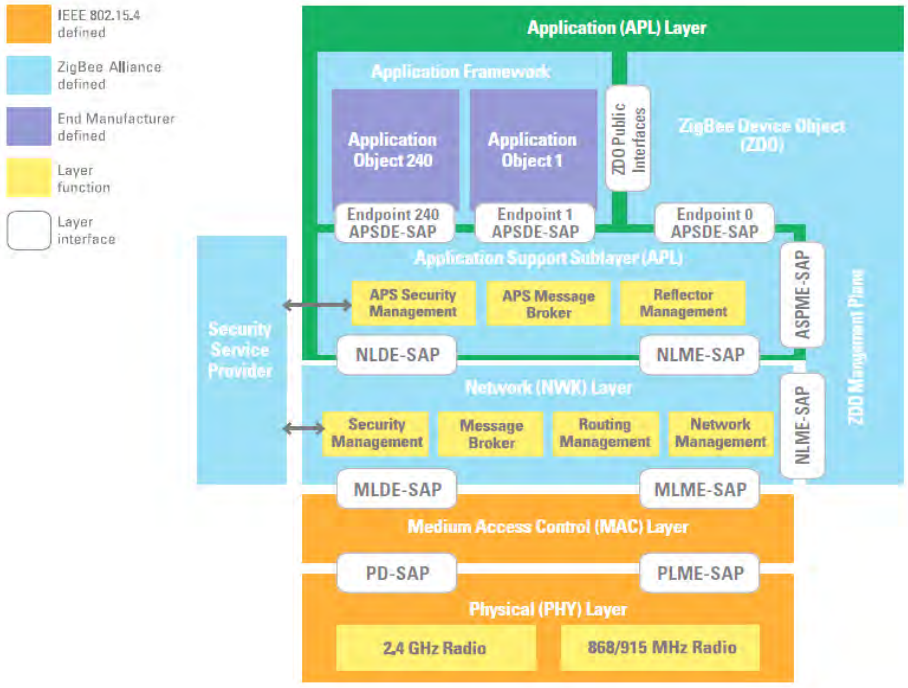
1) Coordinator เป็นอุปกรณ์ประเภท FFD (Full Function Device) มีหน้าที่สร้างการสื่อสาร เชื่อมโยงเครือข่าย ระหว่าง End Device กับ Router หรือ Coordinator กับ Coordinator ด้วยกัน หรือ Coordinator กับ Router กำหนด address ให้กับ device ที่อยู่ในวงเครือข่าย ไม่ให้ซ้ำกัน ดูแลจัดการเรื่องการ Routing เส้นทาง

2) End Device เป็นอุปกรณ์ประเภท FFD (Full Function Device) หรือ RFD (Reduced Function Device) เป็นอุปกรณ์ปลายทางสุด ซึ่งจะใช้รับสัญญาณจากเซ็นเซอร์ที่ปลายทางและควบคุมการทำงานต่างๆ

3) Router เป็นอุปกรณ์ประเภท FFD (Full Function Device) มีหน้าที่รับส่งข้อมูลในเส้นทางต่าง ๆ เพิ่มระยะทาง สามารถตรวจสอบและควบคุมการทำงานต่างๆ ได้เหมือนกับ End Device

2.2.3ZigBee Stack architecture [7]

สถาปัตยกรรมของ ZigBee stack ดังภาพที่ 2.6 จะเป็นไปตาม OSI seven-layer model โดยในชั้นของ Physical layer (PHY) และ Medium Access Control sub-layer (MAC) จะกำหนดตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ส่วนในชั้น Network layer (NWK) และ Application layer ซึ่งมี Application Framework, Application support sub-layer (APS), ZigBee device objects (ZDO) จะกำหนดตามมาตรฐานของ ZigBee ซึ่งกำหนดโดยองค์กร ZigBee Alliance แต่ในส่วนของ Application ที่อยู่ใน Application Framework โรงงานที่ผลิตจะเป็นผู้กำหนดเอง



ภาพที่ 2.6 ZigBee Stack architecture [7]

2.3 XBee

XBee คือชื่อของผลิตภัณฑ์จากบริษัท Digi ใช้สำหรับส่งข้อมูลแบบไร้สายและสามารถสร้างระบบเครือข่ายได้โดยใช้มาตรฐานของ ZigBee ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดความสับสนจะขอใช้คำว่า XBee แทนชื่ออุปกรณ์ของบริษัท Digi ที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลไร้สายตามมาตรฐาน ZigBee (IEEE 802.15.4) ไปตลอดทั้งเล่ม

XBee เป็นอุปกรณ์ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ และ RF IC อยู่ภายในตัว ทำหน้าที่เป็น อุปกรณ์ transceiver (อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ) แบบ Half Duplex ย่านความถี่ 2.4 GHz มีการจัดการโดยใช้พลังงานต่ำ ใช้งานง่าย มี interface ที่ใช้รับและส่งข้อมูลกับ XBee เป็น UART (TTL) ซึ่งสำหรับทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถนำขาที่ใช้ติดต่อสื่อสาร UART ของ XBee ต่อเข้ากับ UART ของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เลย

2.3.1XBee Topology

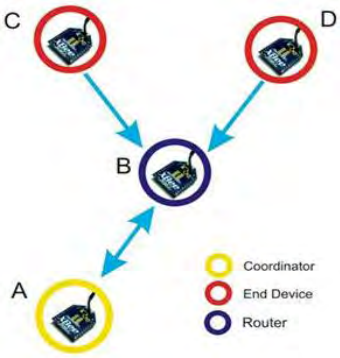
ในการสร้างโครงข่ายไร้สายของ ZigBee นั้น จะต้องประกอบด้วยโหนด จำนวนอย่างน้อยที่สุด 2 ชนิด คือ Coordinator node และ node ลูกข่าย ชนิดใดชนิดหนึ่ง (Router/End device) จึงจะสามารถสื่อสารและทำงานในรูปแบบของ PAN (Personal area network) ได้โดย ZigBee สามารถแบ่งรูปแบบ เครือข่ายได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

1) Star (Broadcast) การเชื่อต่อแบบ Star หรือ แบบ Broadcast เป็นการรับส่งข้อมูลแบบไม่เฉพาะเจาะจง จุดหมายปลายทาง หรือ XBee ทุกตัวที่อยู่ในระบบเครือข่ายเดียวกันสามารถรับข้อมูลทุกข้อมูลได้ทุกตัว ดังภาพที่ 2.7

ภาพที่ 2.7 Star (Broadcast) Network [15]

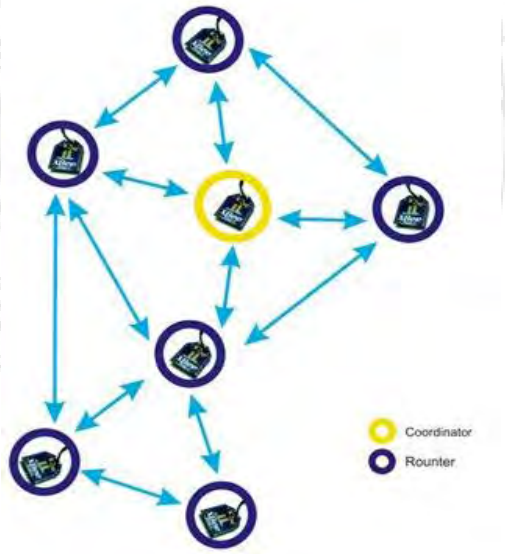
2) Cluster Tree (Tree) Network เป็นการรับส่งข้อมูลแบบส่งผ่าน เช่น A ต้องการติดต่อกับ C แต่ C อยู่ไกลจาก A จน A ไม่สามารถติดต่อกับ C ได้ แต่พอดีมี B ที่อยู่ระหว่าง A กับ C

ดังนั้น Cluster Tree จะใช้ B เป็นเหมือนตัวกลางเชื่อมการติดต่อ (Repeater) ระหว่าง A กับ C ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 Cluster Tree (Tree) Network [15]

3) Mesh การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Mesh นี้ เป็นโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจาก ข้อมูลสามารถส่งไปถึงเป้าหมายได้หลายเส้นทาง ทำให้ระบบนี้สามารถรับส่งข้อมูลไปยังจุดหมายปลายทางได้ แม้จะเกิดความเสียหายของระบบในบางส่วนก็ตาม (ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบของผู้ใช้ด้วย) ระบบนี้จึงเป็นระบบที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก แสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 Mesh Network [15]

2.3.2Feature Summary ของ XBee

1) Operating Frequency ISM Band 2.4 GHz (ISM Band หมายถึงย่านความถี่ใช้งานเพื่อการวิจัยซึ่งจะอนุญาตให้ใช้กับอุตสาหกรรม (Industrial) วิทยาศาสตร์ (Scientific) และ ทางการแพทย์ (Medical))

2) มีสายอากาศให้เลือกใช้หลายแบบ คือ แบบ Chip Antenna, Whip Antenna, U.FL connector และ SMA connector โดยแบบ U.FL connector และ SMA connector สามารถใช้กับเสาอากาศย่าน 2.4 GHz ที่เป็น connector แบบ UFL หรือ SMA ได้

3) Supply Voltage อยู่ที่ 2.8-3.4 โวลต์

4) Power Down Current < 10 uA

5) มี RF data rate อยู่ที่ 250 Kbps (เป็นส่วนของสัญญาณที่ส่งผ่านอากาศ)

6) มี Serial interface data rate อยู่ระหว่าง 1200–115200 Bps (เป็นส่วนที่ติดต่อสื่อสารกับไมโครคอนโทรเลอร์)

7) เป็น Spread Spectrum ชนิด DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

8) การกำหนด addressing มีลำดับลักษณะคือ กำหนด PAN ID สำหรับเครือข่ายหนึ่งๆ กำหนด Channel และกำหนด address ของแต่ละตัว

XBee จะมีอยู่ 2 รุ่นคือ Series 1 และ Series 2 นอกจากนั้นยังมีขนาด power ให้เลือกอีก 2 แบบ คือ แบบธรรมดา (1-2mW) และ แบบ PRO (50-60mW) ซึ่งจะมีผลเรื่องระยะทางการรับส่งข้อมูล โดยแต่ละ Series นั้นสามารถสร้างเครื่องข่ายได้หลายแบบได้แก่ Peer to peer, Point to point และ Point to multipoint แต่จะมีเพียง Series 2 เท่านั้นที่จะทำเครือข่ายแบบ mesh ได้

2.3.3แบบของสายอากาศ [16]

ระยะทางที่ Xbee รับส่งข้อมูลได้จะขึ้นกับสายอากาศ ซึ่ง XBee ที่มีขายอยู่ทั่วไปจะมีสายอากาศ 4 แบบคือ Whip, Chip U.FL และ SMA Antenna

Chip Antenna เหมาะกับการใช้งานใน โครงงานที่ต้องการขนาดเล็ก เพราะการใช้สายอากาศแบบนี้ สายอากาศไม่เกะกะ นำไปใส่กล่องได้ แต่ได้เฉพาะกล่องพลาสติก ไม่สามารถใช้กล่องเหล็กได้ เนื่องจากใส่กล่องเหล็กสัญญาณจะไม่สามารถส่งออกมานอกกล่องเหล็กได้ หากต้องใช้กล่องเหล็ก ควรเลือกใช้สายอากาศที่ต่อออกมานอกกล่องเหล็ก

Wire Antenna สามารถส่งได้ไกลกว่าแบบ Chip Antenna แต่หากนำไปประกอบใส่กล่องจะมีข้อเสียตรงที่ไม่สามารถใส่กล่องเล็กๆ ได้เพราะจะต้องเหลือที่ให้สายอากาศ และด้วยสายอากาศที่ยื่นออกมาลักษณะนี้ บางทีผู้ใช้อาจจะรู้สึกเกะกะ ทำให้ใส่กล่องที่ออกแบบมาไม่ได้

ก) Chip Antenna ข) Whip Antenna

ภาพที่ 2.10 XBee แบบมีสายอากาศในตัว [16]

UFL Antenna เหมาะสำหรับงานที่ออกแบบใส่ในกล่อง และต้องการให้สายอากาศยื่นออกมานอกกล่อง และเนื่องจากการที่ต้องต่อสาย UFL to SMA (Sub Miniature version A) ออกมาเพิ่มเติม ตรงจุดนี้จะทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณบ้าง แต่ก็จะมีการขยายสัญญาณที่สายอากาศอีกที จึงต้องไปพิจารณาอัตราขยายที่สายอากาศต่อด้วย (อัตราขยาย เรียกว่า Gain มีหน่วยเป็น dB หรือ dBi)

SMA Antenna ในการต่อการใช้งานจริงการออกแบบกล่องใส่ XBee ที่ใช้เสาอากาศแบบนี้จะต้องออกแบบให้มีตำแหน่งของ XBee อยู่ใกล้กับรูเจาะเพื่อให้สามารถต่อสายอากาศให้ออกมานอกกล่องได้ เมื่อต่อใช้งานร่วมกับสายอากาศจะมีการขยายสัญญาณที่สายอากาศอีกที

ก) U.FL Antenna ข) SMA Antenna

ภาพที่ 2.11 XBee แบบต่อสายอากาศได้ [16]

2.3.4 XBee Addressing [7]

ตัว XBee จะสามารถกำหนดค่าอ้างอิงประจำตัวของมัน (Address) ได้ 2 แบบ คือ แบบ 16 bit address และ 64 bit address ปกติแล้ว XBee ทุกตัวจะถูกกำหนดค่ามาจากโรงงานผู้ผลิต

เป็น Address 64 bit อยู่แล้ว ซึ่งจะสามารถอ่านค่าได้จาก parameter SH+SL การใช้งาน Address 64 bit สามารถทำได้โดยกำหนด parameter MY ให้มีค่า 0xFFFF หรืออ่านค่าได้จากโรงงานเป็น 0xFFFE ส่วนการกำหนด 16 bit address นั้นทำได้โดย กำหนด parameter MY ให้มีค่าระหว่าง 0 – 0xFFFE โดยจะเรียกเป็น Mode การทำงานมี 2 ประเภท คือ

1) Unicast Mode คือ การรับส่งข้อมูล โดยอาศัยหลักการ Acknowledgement คือ หากทางด้านส่งนั้นส่งข้อมูลไป แต่ไม่รับ Ack ตอบกลับจากตัวรับ ก็จะทำการส่งข้อมูลใหม่

2) Broadcast Mode คือ การส่งข้อมูลไปยังปลายทางให้ได้รับข้อมูลทุกตัว

2.3.5การทำงานของ XBee

การทำงานของ XBee แบ่งได้ออกเป็น 5 โหมด ดังภาพที่ 2.12

1) Idle Mode เป็นโหมดที่ไม่มีการรับส่งข้อมูล และถือว่าเป็นโหมดกลางที่สามารถเปลี่ยนไปยังโหมดต่างๆได้

2) Transmit Mode มีการส่งข้อมูลได้ 2 วิธี คือ

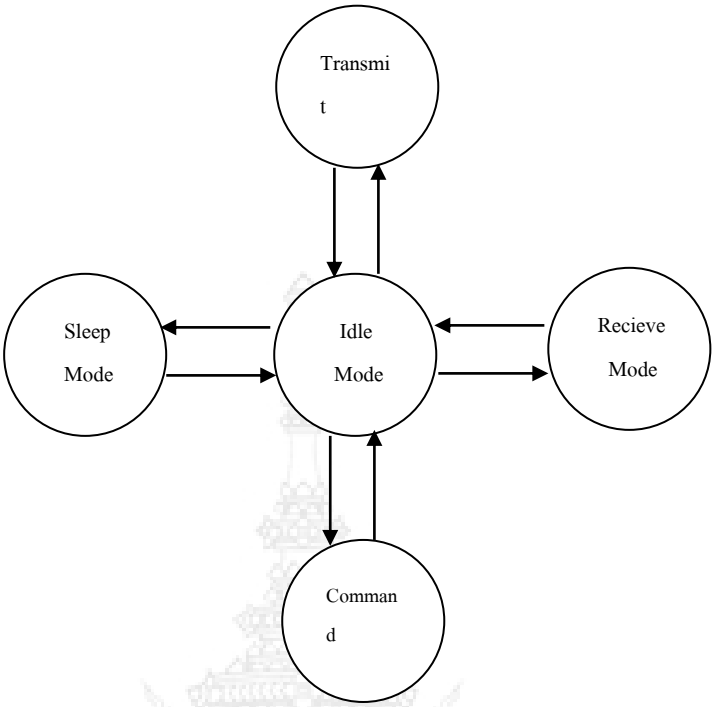
- Direct Transmission ข้อมูลจะถูกส่งไปยัง Destination Address ทันที
- Indirect Transmission packet ข้อมูลจะถูกเก็บไว้ จนกว่าจะถึงเวลาส่งเท่านั้น และจะส่งไปยังที่ที่มีการตอบรับมา (Source Address = Destination Address)

3) Receive Mode ข้อมูล RF จะถูกรับทางสายอากาศ

4) Sleep Mode จะอยู่ในสถานะที่มีการใช้กำลังไฟฟ้าต่ำหรือไม่มีการใช้ การเข้าสู่โหมดนี้ค่าของตัวแปร SM ต้องไม่เป็น 0 และต้องไม่เป็น 0 และต้องเป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้อย่างน้อยหนึ่งอย่างคือ

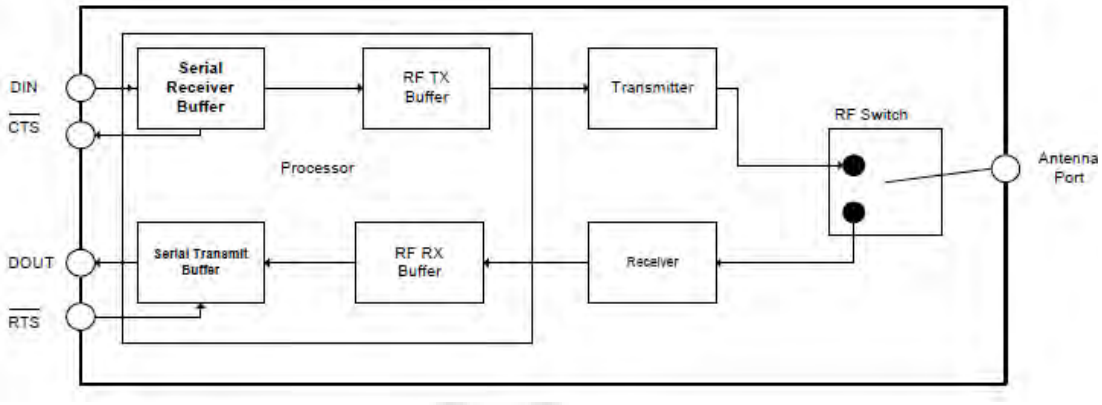
- มีการใช้งานที่ Sleep_RQ (pin 9)
- อยู่ในโหมด Idle (ไม่มีการรับส่งข้อมูล) เป็นเวลานานมากกว่าที่กำหนดไว้ที่ตัวแปร ST (Time before Sleep)

5) Command Mode เป็นโหมดคำสั่งโดยจะใช้ลำดับเป็นสำคัญ



ภาพที่ 2.12 แสดงโหมดการทำงานของ XBee [7]

2.3.6 Data Throughput ของ XBee



ภาพที่ 2.13 Internal Data Flow Diagram [10]

โดยทั่วไปการใช้งาน RF Module ควรจะกำหนดให้มี Buffer ด้วย เพื่อการปรับอัตรารับส่งข้อมูลระหว่างตอนที่รับส่งทางอากาศ กับตอนที่รับส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ได้อย่างเหมาะสม

Data ที่รับส่งระหว่าง MCU กับ XBee จะมีข้อจำกัดเรื่อง Packet อาจถูก Drop ได้ เนื่องมาจาก Data Overflow โดยสำหรับด้านการส่งข้อมูลไปที่ XBee เพื่อออกอากาศนั้น ที่ขา DI จะมี Buffer อยู่ประมาณ 202 Bytes หากส่งเกิน Buffer จะเกิดการ Drop packet ทิ้ง ซึ่งทางฝั่งรับข้อมูลที่ขา DO ก็มี Buffer อยู่เช่นกัน โดยจะมี Parameter ที่เกี่ยวข้องกับ Data Throughput คือ ROและ BD

ค่า RO คือค่า Packetization Timeout ซึ่งเป็น delay ของข้อมูลที่อยู่ใน DI Buffer ก่อนที่จะถูก encapsulate ไปที่ส่วน RF transmission เพื่อส่งข้อมูลออกอากาศ หากตั้ง RO = 0 Data ที่รับเข้ามาจาก MCU จะถูก XBee Encapsulate Packet ส่งออกอากาศทันที ดังนั้นเราจะมี Parameter RO และ BD ที่จะช่วยในการปรับ Data รับส่งให้สามารถรับส่งกันได้ทัน ไม่ให้มีการ Drop Packet ได้ ในกรณีที่ส่งข้อมูลเกิน 200 Bytes

นอกจากนี้ยังมี PIN CTS(ขา12) และ RTS(ขา16) ช่วยเตือนเราเวลาที่ Buffer ภายในใกล้จะเต็ม โดยในฝั่งส่ง DI Buffer จะส่ง Signal มาทาง CTS เมื่อ DI Buffer เหลือพื้นที่จัดเก็บอยู่อีก 17 Bytes และส่ง Clear Signal ที่ CTS เมื่อ DI Buffer เหลือพื้นที่จัดเก็บมากกว่า 34 Bytes

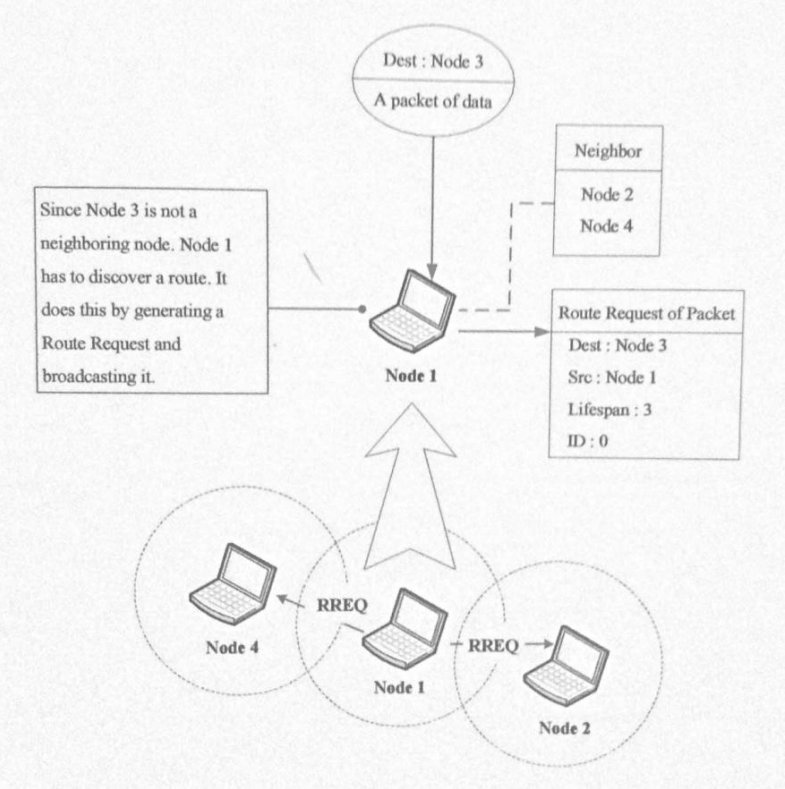
ดังนั้น สำหรับการเขียนโปรแกรม รับส่งข้อมูลกับ XBee ต้องคำนึงเรื่อง Buffer ด้วย ผแต่ในทางปฏิบัติสำหรับงาน Sensor Network ก็ไม่ได้รับส่งข้อมูล Stream Data ยาว ๆ เท่าไหร่นัก

2.3.7AODV Protocol

Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Protocol [17] เป็นโปรโตคอลที่ใช้กับโมดูล XBee ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้เหมือนเป็นเส้นทางของการส่งข้อความ (Routing Message) ระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เคลื่อนย้ายได้ (Mobile Computer) หรือโหนด (Node) ในการส่งข้อความ (Message) ผ่านไปยังโหนดข้างเคียง (Neighbor Node) เพื่อไปยังโหนดที่ต้นทางไม่สามารถติดต่อได้โดยตรง ในระหว่างทางที่ข้อความถูกส่งผ่านไปโปรโตคอล AODV ก็จะทำการค้นหาเส้นทางไปด้วย โดยเชื่อว่าจะไม่เกิดการวนลูป (Loop) และพยายามหาเส้นทางที่สั้นที่สุดเพื่อประหยัดเวลาในการส่งข้อมูล และโปรโตคอล AODV ยังสามารถที่จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงของเส้นทาง (Route) และสามารถสร้างเส้นทางใหม่หากเกิดข้อผิดพลาด

ดังภาพที่ 2.14 เป็นตัวอย่างของการรับส่งข้อมูลโดยที่โหนดหนึ่งจะต้องการส่งข้อความไปยังโหนดสาม โดยที่โหนดหนึ่งมีโหนดข้างเคียงอยู่สองโหนดคือโหนดสองและโหนดสี่ ดังนั้นโหนดหนึ่งจะไม่สามารถติดต่อกับโหนดสามได้ตรงๆจึงต้องส่งคำว่า RREQ ไปที่โหนดสอง เงื่อนไขคือถ้าโหนดเหล่านั้นรู้จักเส้นทางที่จะไปหาปลายทางหรือเป็นปลายทางเองมันก็จะสามารถส่งคำว่า Route Reply Message กลับมาที่โหนดแต่ถ้าไม่ใช่กรณีดังกล่าวก็จะต้องส่ง Rebroadcast RREQ ไปยังโหนดข้างเคียงของตน แต่ถ้าโหนดหนึ่งยังไม่ได้รับข้อความ Reply ก็จะมีการส่ง

ข้อความส่ง RREQ ออกไปใหม่โดยจะเพิ่มเวลา (Lifespan) และสร้างหมายเลข (ID) ใหม่ขึ้นมาแนบออกไปด้วยโดยโหนดทั้งหมด



ภาพที่ 2.14 แสดงการทำงานของ AODV Protocol [17]

คุณสมบัติของ AODV

- จะหาเฉพาะเส้นทางที่ต้องการเท่านั้น
- ใช้หมายเลขในการเก็บข้อมูลที่ถูกต้องที่สุด
- จะเก็บข้อมูลตัวต่อไปเรื่อยๆ

2.3.8Received Signal Strength Indication (RSSI)

Received Signal Strength Indication หรือ RSSI เป็นวิธีการวัดความแรงของสัญญาณในการส่งสัญญาณวิทยุ ตามความเป็นจริงของสัญญาณโดยทั่วไป เมื่อระยะทางไกลออกไปสัญญาณก็จะอ่อนลง ดังนั้นค่า RSSI นั้นก็จำเป็นต่อการส่งสัญญาณเช่นกัน เพราะจะได้รู้ว่าเครื่องรับสัญญาณที่ใช้งานอยู่นั้นจะมีประสิทธิภาพที่ระยะทางเท่าใด หรือกำลังในการส่งเท่าใดจึงจะเหมาะสม

สำหรับการวัดความแรงของสัญญาณ ที่แปลงค่าความแรงมาเป็นแรงดันไฟฟ้านั้น และมักจะไม่ใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง เนื่องจากมีความแปรปรวนของสัญญาณตามสภาพแวดล้อมสูงเพราะแต่ละสภาพแวดล้อมมีความแตกต่างกัน การจะทำให้ RSSI มีความน่าเชื่อถือคือจะต้องเก็บข้อมูลไว้หลาย ๆครั้ง เพื่อนำมาวิเคราะห์ภายหลัง จะทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยลง ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะมีสาเหตุมาจากสิ่งต่าง ๆ ดังนี้

- Non line of Sight (NLOS) คือ การสื่อสารแบบไม่เป็นเส้นตรง ทำให้การวัดมุมในระยะทางที่ไกลจะก่อให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้

- Multiple Access Interference คือ ปัญหาที่มักเกิดในระบบ CDMA เกิดจากเครื่องส่งที่มีกำลังส่งสูงกว่าส่งสัญญาณไปรบกวนเครื่องส่งที่มีกำลังส่งต่ำกว่า

- Fluctuation in Signal Propagation Speeds เกิดกับคลื่นเสียงที่การแพร่ถูกรบกวนจากปัจจัยภายนอก เช่น แรงลมหรืออุณหภูมิ และค่าความชื้นในอากาศ ปัจจัยเหล่านี้จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อระยะทางมากขึ้น

2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ [2] (Microcontroller) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เสมือนคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้า หรือระบบควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ ให้มีความสามารถในการทำงานมากขึ้น โดยเราสามารถเปลี่ยนแปลงลำดับการทำงานได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไขโปรแกรมภายในหน่วยความจำ ทำให้เราสามารถนำไมโครคอนโทรเลอร์มาประยุกต์ใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น ระบบอัตโนมัติของเครื่องซักผ้า หรือระบบสมองกลของรถยนต์ เป็นต้น

2.4.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์

โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น สามารถแบ่งออกมาได้เป็น 5 ส่วนใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

1) ส่วนประมวลผล (Processing Unit) คือส่วนที่ทำหน้าที่คำนวณทางคณิตศาสตร์ คือ การตัดสินใจแบบมีเงื่อนไข (Logic) ซึ่งจะมีการทำงานที่ซับซ้อน โดยลำดับในการทำงานของส่วนประมวลผลจะขึ้นอยู่กับการจัดลำดับคำสั่งในการทำงาน (Programming Code) ซึ่งจะบรรจุอยู่ภายในของส่วนพื้นที่เก็บข้อมูล

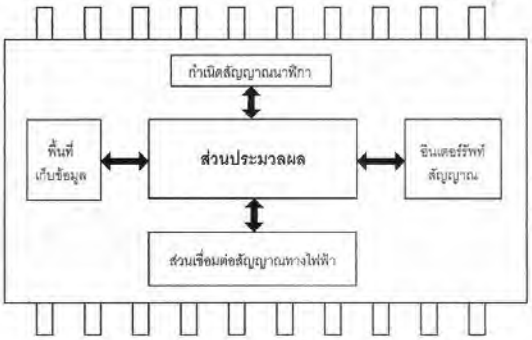
2) ส่วนพื้นที่เก็บข้อมูล (Memory Unit) คือส่วนที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูล โดยเราจะแบ่งชนิดของพื้นที่เก็บข้อมูลเป็น 2 แบบคือ แบบชั่วคราว (RAM : Random Access Memory) และแบบถึงถาวร (EPROM : Erasable Programmable Read Only Memory) ซึ่งพื้นที่เก็บข้อมูลแบบ

ชั่วคราวนี้จะเป็นข้อมูลที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อยู่ตลอดและถูกใช้เป็นข้อมูลในการเก็บค่าตัวแปรในการคำนวณ (Variable) โดยข้อมูลประเภทนี้จะสูญหายเมื่อเราหยุดจ่ายไฟเลี้ยงให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนพื้นที่เก็บข้อมูลแบบกึ่งถาวรจะเป็นข้อมูลที่ใช้เก็บโปรแกรมคำสั่งการทำงาน (Code) ซึ่งข้อมูลประเภทนี้เราสามารถเปลี่ยนแปลงได้แต่ต้องใช้กรรมวิธีพิเศษ โดยข้อมูลจะไม่สูญหายแม้ว่าเราจะหยุดจ่ายไฟให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วก็ตาม

3) ส่วนเชื่อมต่อสัญญาณทางไฟฟ้า (Interface Unit) จะทำหน้าที่ติดต่อสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ภายนอกกับไมโครคอนโทรลเลอร์ มี 2 ลักษณะ คือ อินพุตและเอาต์พุตแบบดิจิตอล (Digital I/O) โดยรับข้อมูลและส่งข้อมูลด้วยสัญญาณทางดิจิตอล (Digital Signal) และแบบอินพุตและเอาต์พุตแบบอนาล็อก (Analog I/O) จะรับและส่งสัญญาณแบบสัญญาณทางอนาล็อก (Analog Signal) ซึ่งในการรับส่งสัญญาณของอนาล็อกจะมีอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์บางรุ่นเท่านั้น

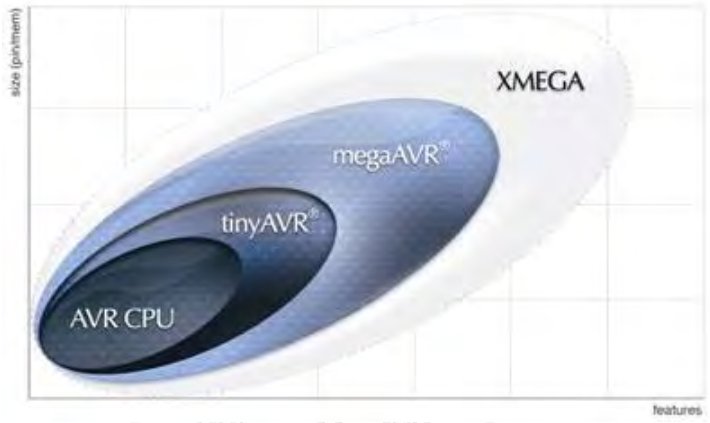
4) ส่วนกำเนิดสัญญาณนาฬิกา ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณนาฬิกา โดยใช้วงจรที่เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เรียกว่าวงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Circuit) ซึ่งมีอุปกรณ์หลักคือ คริสตอล (X-TAL) มากำหนดช่วงเวลาในการประมวลผล (Execute Time) ของส่วนประมวลผล โดยจะมีผลต่อความเร็วในการประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้สัญญาณนาฬิกา ยังสามารถใช้กำหนดความเร็วในการรับส่งข้อมูลดิจิตอลแบบอนุกรม (Digital Series Communication Signal) ที่ใช้กำหนดความถี่ในส่วนของตัวตั้งเวลา (Timer) ไมโครคอนโทรลเลอร์

5) ส่วนอินเตอร์รัพท์สัญญาณ ทำหน้าที่จัดลำดับความสำคัญในการทำงานในกรณีที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานในลักษณะหลายงานพร้อมกัน (Multitasking) ซึ่งจะอำนวยความสะดวกอย่างมากในการเขียนโปรแกรมเพื่อรองรับการทำงานลักษณะนี้



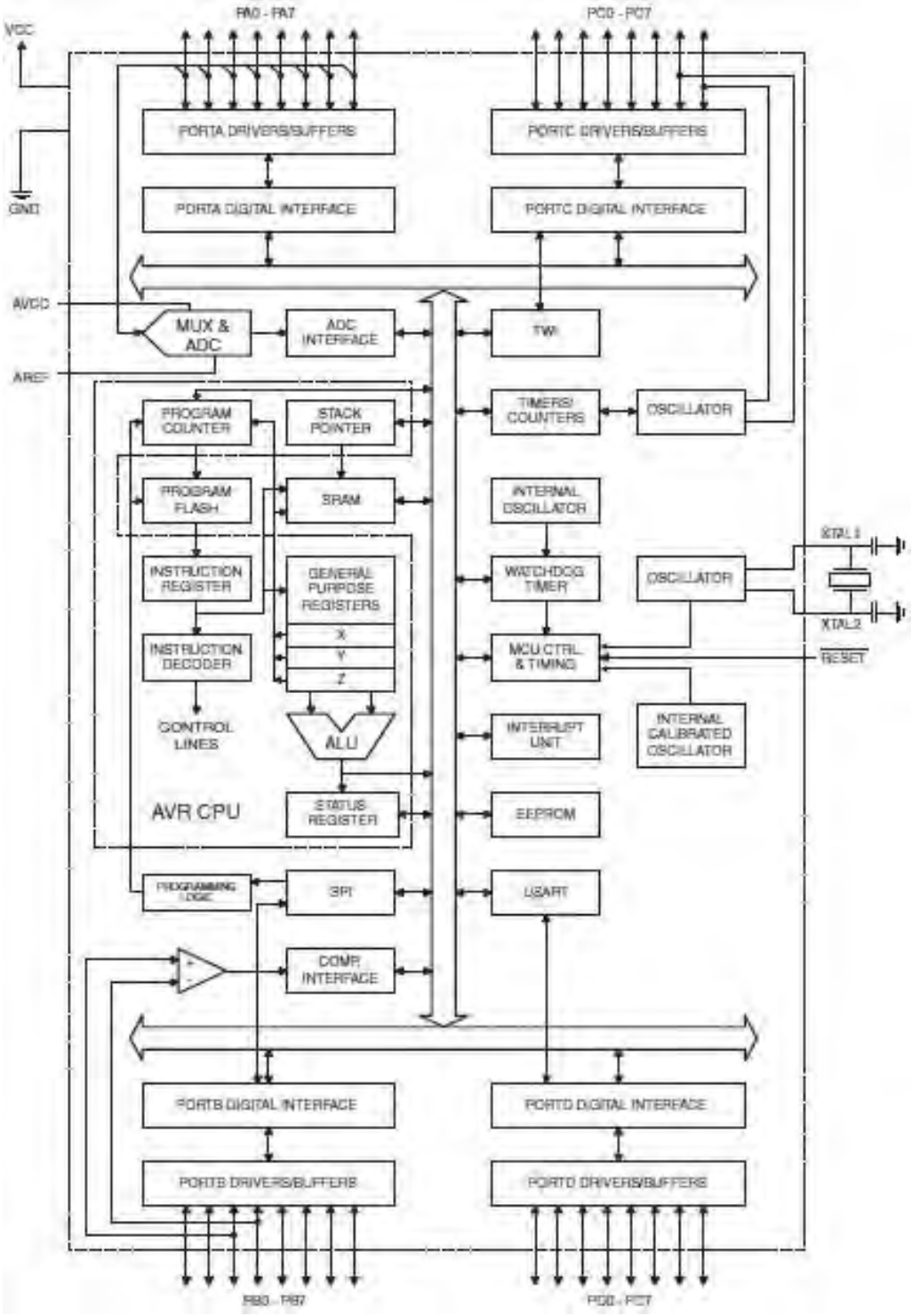
ภาพที่ 2.15 โครงสร้างหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์

สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาใช้ในโครงงานนี้คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ ATMega32 โดย AVR จัดเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลใหม่จาก ATMEL มีสถาปัตยกรรมแบบ RISC (Advanced RISC architecture) คือหนึ่งคำสั่งทำงานใช้สัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ลูก (instruction in a single clock cycle) เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพและความสามารถสูง แบ่งออกเป็นหลายอนุกรม ในแต่ละอนุกรมยังแบ่งออกเป็นหลายเบอร์ เพื่อรองรับความต้องการที่แตกต่างของผู้ใช้งาน ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 กลุ่มของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

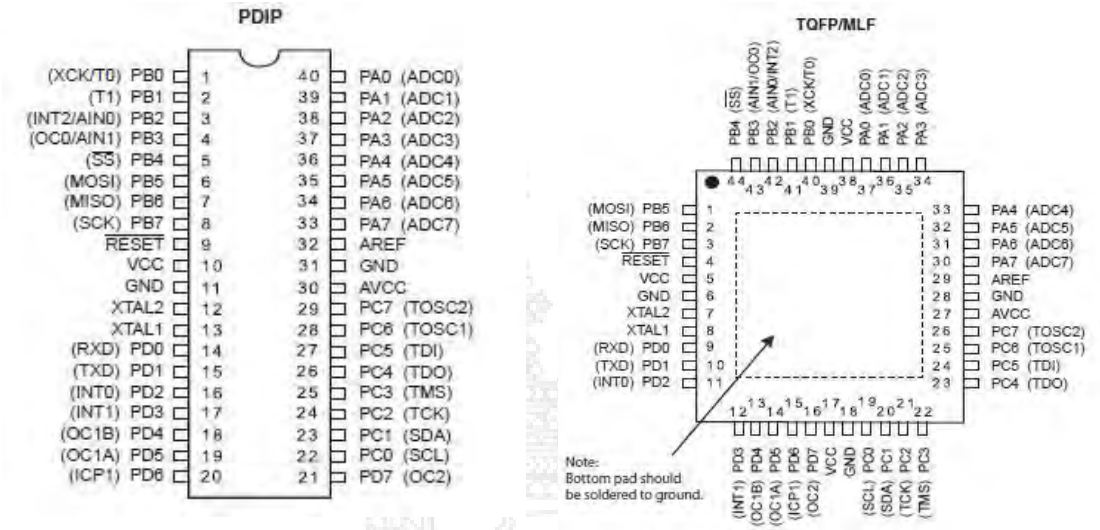
สำหรับรายละเอียดภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ ATMega32 แสดงดังไดอะแกรมภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 บล็อกไดอะแกรม AVR (ATmega32) [12]

ขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega32 ในตัวถังแบบ PDIP มีจำนวน 40 ขา ส่วนตัวถังแบบ TQFP และแบบ MLF จะมี 44 ขา โดยทั้งสองแบบจะแบ่งเป็น ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุต

อิสระ จำนวน 32 ขา เหมือนกัน โดยประกอบไปด้วย PA, PB, PC, PD และขาพอร์ตที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณอนาล็อกจำนวน 2 ขาพอร์ต คือ AREF และ AVCC รายละเอียดขาพอร์ตทั้งหมด แสดงดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ขาพอร์ต AVR (ATmega32) ตัวถังแบบ PDIP และ TQFP/MLF [12]

มีรายละเอียดในแต่ละขาพอร์ตดังนี้

- VCC ขาแรงดันไฟตรง
- GND ขากราวด์
- Port A (PA0 - PA7) ขาพอร์ตเป็นอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล กำหนดการพูลอัพภายในขาพอร์ตได้ (internal pull-up register) และสามารถกำหนดการใช้งานเป็นพอร์ตอินพุตสัญญาณอนาล็อก (A/D Converter) ได้
- Port B (PB0 - PB7) เป็นขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล กำหนดการพูลอัพภายในขาพอร์ตได้ (internal pull-up register) เป็นขาพอร์ตหน้าที่พิเศษอีกด้วย เช่น ขาสำหรับโปรแกรมชิพ ขาป้อนสัญญาณนาฬิกาภายนอก เป็นต้น
- PORT C (PC0 - PC7) เป็นขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอลที่กำหนดการพูล - อัพภายในขาพอร์ตได้ (internal pull-up register) และยังเป็นขาพอร์ตหน้าที่พิเศษ เช่น ขาเชื่อมต่อกับบักและโปรแกรมด้วยการเชื่อมต่อแบบ JTAG เป็นต้น

- PORT D (PD0 - PD7) เป็นขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล กำหนดการพูลอัพภายในขาพอร์ตได้ (internal pull-up register) และขาพอร์ตทำหน้าที่พิเศษ เช่น ขาเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรม ขาอินเตอร์รัปต์เนื่องจากสัญญาณภายนอก เป็นต้น

- RESET ขารีเซตวงจร

- XTAL1 ขาต่อคริสตอลออสซิเลเตอร์ ช่องที่ 1 ด้านอินพุต

- XTAL2 ขาต่อคริสตอลออสซิเลเตอร์ ช่องที่ 2 ด้านเอาต์พุต

- AVCC ขาแรงดันสำหรับพอร์ต A และโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล

- AREF ขาแรงดันอนาล็อกอ้างอิง มีไว้สำหรับโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ ATmega32 จะมีพอร์ตอินพุตเอาต์พุตสำหรับใช้งาน 4 พอร์ต คือ PORTA, PORTB, PORTC และ PORTD แต่ละพอร์ตมี 8 ขา แต่ละขามีขนาด 8 บิต รวมแล้วมีขาพอร์ตสำหรับใช้งานทั้งหมดเท่ากับ 32 ขา จะเห็นได้ว่าในแต่ละขาพอร์ตยังประกอบไปด้วยวงเล็บควบคู่กับขาพอร์ต เช่น (XCK/T0) PB0, (T1) PB1 อักษรที่แสดงอยู่ภายในวงเล็บเป็นการบอกว่าขาพอร์ตตัวดังกล่าวสามารถทำหน้าที่ได้มากกว่าหนึ่งหน้าที่ โดยหน้าที่เพิ่มเติมจะอ้างอิงกับคุณสมบัติของโมดูลต่างๆ ดังจะแสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 ขาพอร์ต PORTA (PA0-PA7)

ขาพอร์ต	ขาพอร์ตฟังก์ชั่นพิเศษ
PA7	ADC7 (ขาพอร์ตอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 7)
PA6	ADC6 (ขาพอร์ตอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 6)
PA5	ADC5 (ขาพอร์ตอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 5)
PA4	ADC4 (ขาพอร์ตอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 4)
PA3	ADC3 (ขาพอร์ตอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 3)
PA2	ADC2 (ขาพอร์ตอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 2)
PA1	ADC1 (ขาพอร์ตอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 1)
PA0	ADC0 (ขาพอร์ตอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 0)

ตารางที่ 2.3 ขาพอร์ต PORTB (PB0-PB7)

ขาพอร์ต	ขาพอร์ตฟังก์ชั่นพิเศษ
PB7	SCK (ขาสัญญาณนาฬิกาของระบบบัส SPI)
PB6	MISO (ขาสัญญาณอินพุตมาสเตอร์/ขาสัญญาณเอาต์พุตสเลฟ สำหรับ SPI)
PB5	MISI (ขาสัญญาณอินพุตมาสเตอร์/ขาสัญญาณเอาต์พุตสเลฟ สำหรับ SPI)
PB4	SS (ขาสัญญาณอินพุตเลือกสเลฟ สำหรับบัส SPI)
PB3	AIN1 (อินพุตสัญญาณด้านลบสำหรับโมดูลเปรียบเทียบสัญญาณอนาล็อกอินพุต) OC0 (โมดูลเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตกับไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0)

ตาราง 2.3 ขาพอร์ต PORTB (PB0-PB7) (ต่อ)

ขาพอร์ต	ขาพอร์ตฟังก์ชั่นพิเศษ
PB2	AIN0 (อินพุตสัญญาณด้านบวกสำหรับโมดูลเปรียบเทียบสัญญาณอนาล็อกอินพุต) INT2 AIN1 (อินพุตสัญญาณอินเตอร์รัปต์เนื่องจากสัญญาณภายนอกช่องที่ 2)
PB1	T1 (ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1 และอินพุตรับสัญญาณจากภายนอกในโหมดเคาน์เตอร์ 1)
PB0	T0 (ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 และอินพุตรับสัญญาณจากภายนอกในโหมดเคาน์เตอร์ 0) XCK (อินพุตเอาต์พุตสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกสำหรับโมดูล USART)

ตาราง 2.4 ขาพอร์ต PORTC (PC0-PC7)

ขาพอร์ต	ขาพอร์ตฟังก์ชั่นพิเศษ
PC7	TOSC2 (ไทเมอร์ออสซิเลเตอร์ ขา 2)
PC6	TOSC1 (ไทเมอร์ออสซิเลเตอร์ ขา 1)
PC5	TDI (ขาเชื่อมต่อการดีบักวงจรอินพุต กับการเชื่อมต่อแบบ JTAG)
PC4	TDO (ขาเชื่อมต่อการดีบักวงจรเอาต์พุต กับการเชื่อมต่อแบบ JTAG)
PC3	TMS (ขาเชื่อมต่อการดีบักวงจรกำหนดโหมด กับการเชื่อมต่อแบบ JTAG)
PC2	TCK (ขาเชื่อมต่อการดีบักวงจรสัญญาณนาฬิกา กับการเชื่อมต่อแบบ JTAG)
PC1	SDA (ขาสัญญาณข้อมูลอินพุตเอาต์พุตสำหรับบัสข้อมูลอนุกรม 2 สาย หรือ I^2C บัส)
PC0	SCL (ขาสัญญาณ ok>bdk สำหรับบัสข้อมูลอนุกรม 2 สาย หรือ I^2C บัส)

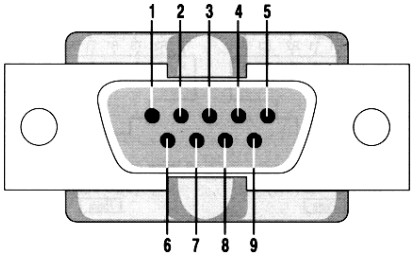
ตารางที่ 2.5 ขาพอร์ต PORTD (PD0-PD7)

ขาพอร์ต	ขาพอร์ตฟังก์ชั่นพิเศษ
PD7	OC0 (โมดูลเปรียบเทียบค่าเอาต์พุต กับไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 2)
PD6	ICP1 (โมดูลอินพุตตรวจจับสัญญาณ กับไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1)
PD5	OC1A (โมดูลเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุต A กับไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1)
PD4	OC1B (โมดูลเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุต B กับไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1)
PD3	INT1 (อินเตอร์รัปต์เนื่องจากสัญญาณภายนอกช่องที่ 1)
PD2	INT0 (อินเตอร์รัปต์เนื่องจากสัญญาณภายนอกช่องที่ 0)
PD1	TXD (ขาเอาต์พุตสัญญาณสำหรับโมดูล USART)
PD0	RXD (ขาอินพุตสัญญาณสำหรับโมดูล USART)

หมายเหตุ จากตารางแสดงหน้าที่พิเศษเพิ่มเติมในแต่ละขาพอร์ตแล้ว ทุกขาพอร์ตยังเป็นขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอลด้วย ขึ้นอยู่กับการกำหนดขาพอร์ตใช้งาน

2.5 มาตรฐาน RS-232

เพื่อที่จะทำให้อุปกรณ์จากผู้ผลิตต่างกันสามารถทำงานร่วมกันได้ มาตรฐานหลายชนิดจึงได้รับการออกแบบขึ้น มาตรฐานที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุดคือ RS-232 ซึ่งโดยปกติไมโครคอมพิวเตอร์จะมีพอร์ตที่เป็นแบบอนุกรมอยู่ในตัวแล้ว และจะทำหน้าที่รับส่งข้อมูลในแบบอนุกรมตามจุดประสงค์ของมาตรฐาน RS-232 นั้นเพื่อจะสามารถเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์รับส่งปลายทาง (Data Terminal Equipment : DTE) เช่น พอร์ตของคอมพิวเตอร์หลักหรืออุปกรณ์ปลายทางกับอุปกรณ์สื่อสาร RS-232 เป็นข้อกำหนดของการอินเตอร์เฟสมาตรฐาน และสามารถใช้เพื่อจุดประสงค์อื่นต่างกันไป เช่น การสื่อสารแบบซิงโครนัส (Synchronous communication) และรูปแบบการสื่อสารที่ต้องการสัญญาณนาฬิกา และสัญญาณกำหนดจังหวะเพิ่มเติมขึ้นมา ในความเป็นจริงแล้วเราสามารถทำให้มีการสนทนากันระหว่าง DTE และ DCE โดยการใช้สายสัญญาณเพียง 3 เส้นเท่านั้น คือ ใช้สาย TD สาย RD และสายกราวด์เท่านั้น



ภาพที่ 2.19 คอนเน็กเตอร์ 9 ขาหรือแบบ DB-9 (ตัวผู้)

ตารางที่ 2.6 รายละเอียดการต่อคอนเน็กเตอร์แบบ DB9 มาตรฐาน RS-232

หมายเลขขาสัญญาณ	ชื่อสายสัญญาณ
1	Data Carrier Detect
2	Received Data
3	Transmitted Data
4	Data Terminal Ready
5	Signal Common
6	Data Set Ready
7	Request To Send
8	Clear To Send
9	Ring Indicator

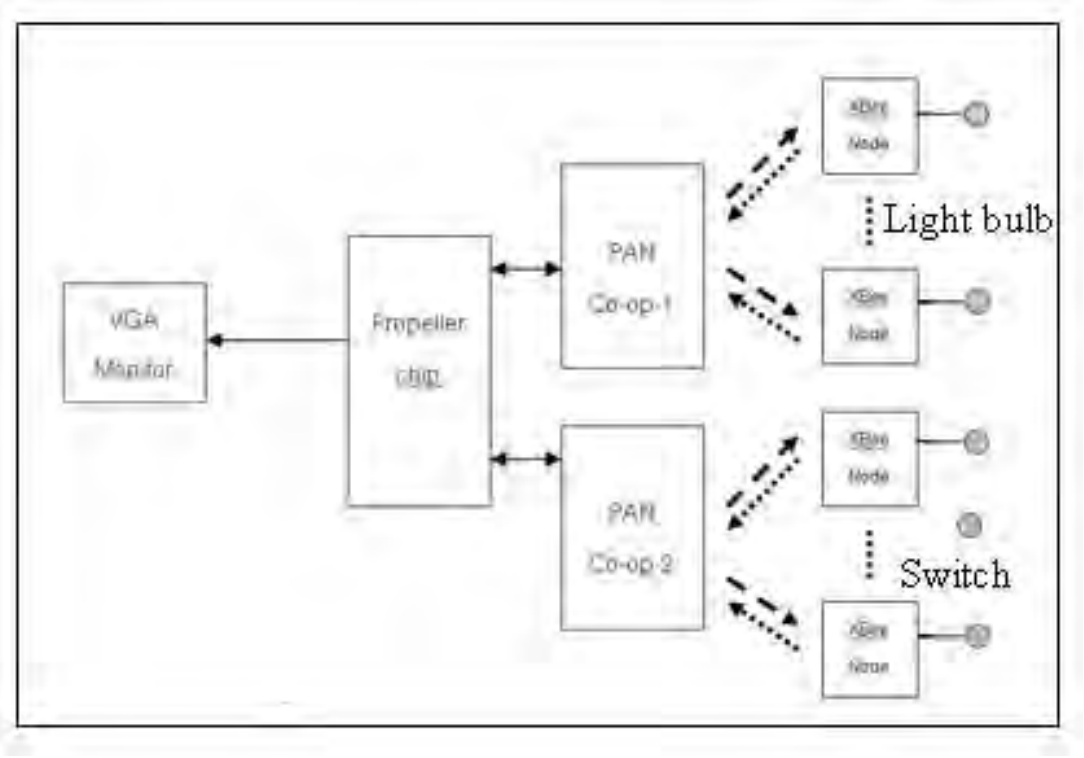
การสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรมนั้น จะต้องมี IC เช่น MAX232 ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันที่เข้ามาจาก Serial Port ไปเป็นแรงดันตามมาตรฐานของ RS-232 โดยเปลี่ยนเป็นระดับแรงดัน TTL เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ได้

ลักษณะของการส่งข้อมูลแบบอนุกรมนั้น ข้อมูลจะส่งออกมาทีละบิตจากตัวส่งไปตัวรับข้อมูล ช่องสัญญาณในการส่งข้อมูลอาจใช้เพียง 1 หรือ 2 ช่องสัญญาณเท่านั้น ทำให้ค่าใช้จ่ายในการสื่อสารจะถูกกว่าแบบขนาน แต่อัตราการรับส่ง ข้อมูลจะช้ากว่าแบบขนาน ในการส่งข้อมูลแบบอนุกรม ข้อมูลที่ต้องการส่งจะอยู่ในลักษณะเป็นไบต์จะทยอยส่งทีละบิต และทางตัวรับจะต้องรับข้อมูลเข้ามาทีละบิตแล้วมารวมกันเป็นไบต์ ซึ่งทางตัวรับต้องคอยตรวจสอบว่าบิตใดเป็นบิตเริ่มต้นหรือบิตสุดท้ายของข้อมูล การตรวจสอบนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของรหัสของบิตข้อมูลที่ใช้ ซึ่งในการรับส่งข้อมูลแบบอนุกรมระหว่างไมโครคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกนั้น จำเป็นจะต้องมีมาตรฐานในการรับส่งข้อมูล ซึ่งมาตรฐานที่นิยมมากที่สุดคือมาตรฐาน RS-232

บทที่ 3
ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การทำงานของระบบ

การทำงานของระบบควบคุมระบบไฟฟ้าแสงสว่างผ่านเครือข่ายไร้สายอัตราต่ำ ตามรูปด้านล่าง ใช้ตัวควบคุมรับข้อมูลการสั่งเปิดปิดภาระแสงสว่างจากผู้ใช้ ส่งต่อข้อมูลไปที่ระบบเครือข่ายไร้สาย ผ่านทางตัวเชื่อมต่อแบบอนุกรม (RS-232C) แล้วเปลี่ยนเป็นสัญญานคลื่นวิทยุ (RF-Radio frequency) ความถี่สูง เพื่อเข้าสู่ระบบเครือข่ายส่วนบุคคล (PAN- Personal Area Network) ก่อนที่จะส่งไปที่โหนด (Node) แบบไร้สาย ตามรูปด้านล่างใช้)XBee node บันทึกข้อมูลผ่านเครือข่ายตัวตรวจจับไร้สายจะเริ่มจากบล็อก Wireless sensor Node ซึ่งประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ LM35DZ โดย xBee Node ซึ่งจะมีตัวเชื่อมต่อกับภาระแสงสว่างผ่านทางแสงนำไปควบคุมควบคุมอุปกรณ์กำลัง เช่น Solid State Relay, Magnetic contactor หรือ Relay ลัวไปเปิดปิดวงจรกำลัง (Power circuit) ที่ตัดต่อกระแสไฟฟ้ากับอุปกรณ์แสงสว่าง

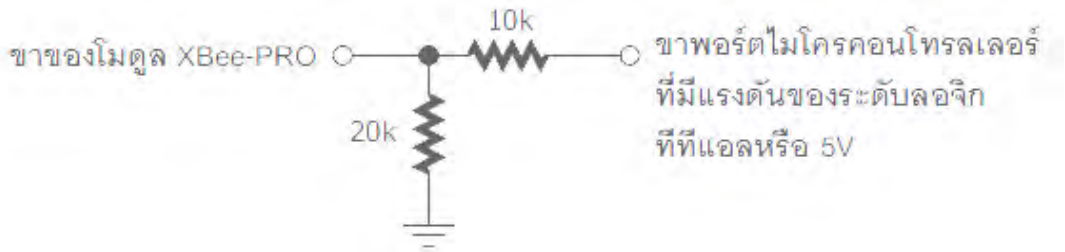


ภาพที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบ

3.2 การใช้งานโมดูล XBee เบื้องต้น [6]

ค่า Default ของโมดูล XBee ที่โรงงงานผลิตกำหนดไว้ก็คือ Baud rate 9,600 บิตต่อวินาที, Data Bits เท่ากับ 8, Parity เท่ากับ None และ Stop Bits เท่ากับ 1 ซึ่งสามารถใช้งานโดยใช้ค่า Default ได้ทันที ไม่จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่า หากต้องการกำหนดคอนฟิกูเรชั่นให้แก่โมดูล XBee ต้องใช้บอร์ด ZX-Xbee และซอฟต์แวร์ X-CTU มาช่วยในการกำหนดค่าคอนฟิกูเรชั่นการทำงานฮาร์ดแวร์

การต่อใช้งานสามารถทำได้ง่ายเพียงต่อขา TxD ของ XBee เข้ากับขา RxD ของ และต่อขา RxD ของ XBee เข้ากับขา TxD ของไมโครคอนโทรลเลอร์หรือคอมพิวเตอร์ จ่ายไฟเลี้ยง +3 โวลต์ และต่อกราวด์ ก็สามารถใช้งานได้แล้ว แต่เนื่องจาก XBee ต้องการไฟเลี้ยงในย่าน 2.8 ถึง 3.4 โวลต์ และขาสัญญาณทั้งหมดของ XBee มีการทำงานในระบบบัส 3 โวลต์ ดังนั้นหากนำไปเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์หรืออุปกรณ์ภายนอก ที่ใช้แรงดัน 5 โวลต์ จะต้องมีการปรับแรงดัน



ภาพที่ 3.2 วงจร voltage divider สำหรับลดแรงดันไมโครคอนโทรเลอร์ 5V [6]

3.2.1ความต้องการของระบบ

สำหรับคอมพิวเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการกำหนดค่าคอนฟิกูเรชั่นของ XBee นั้น ควรมีคุณสมบัติ ดังนี้

- ซีพียู ความเร็ว 500 MHz ขึ้นไป
- หน่วยความจำแรม 256 MB
- ฮาร์ดดิสก์มีเนื้อที่ว่าง 100 MB เป็นอย่างน้อย
- ติดตั้งระบบปฏิบัติการวินโดวส์ XP เซอร์วิสแพ็ก 2

- มี serial port ว่างอย่างน้อย 1 port ถ้ามีเฉพาะ port USB ต้องใช้ตัวแปลงสัญญาณ port USB เป็น serial port RS-232 แบบที่ให้สายสัญญาณครบทั้ง 9 เส้น ซึ่งหากใช้ตัวแปลงจะต้องทำการติดตั้งไดร์เวอร์ให้เรียบร้อยเสียก่อน

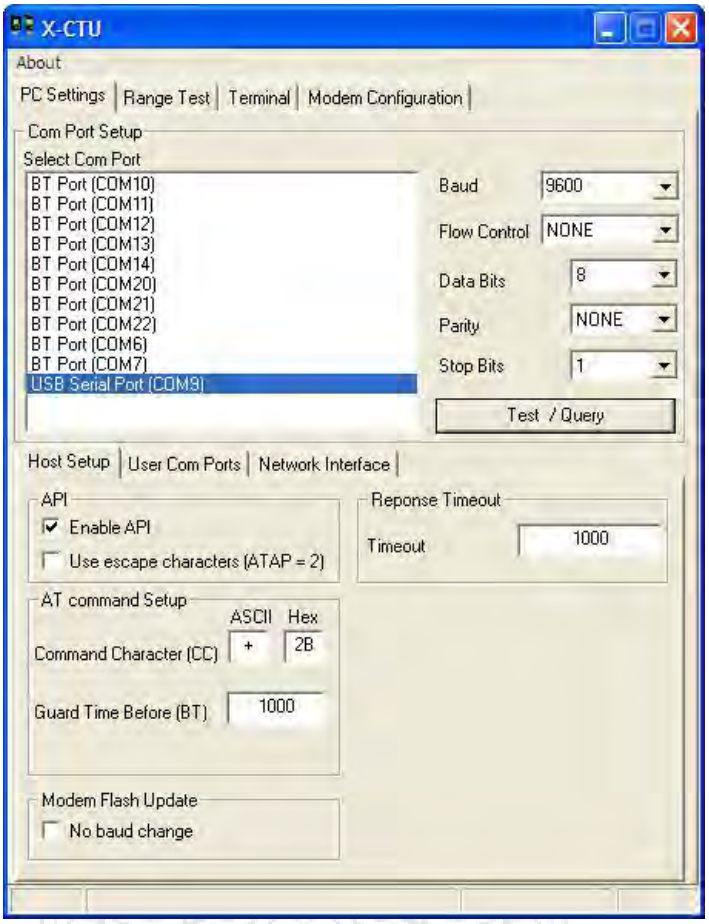
3.2.2ขั้นตอนการกำหนดค่าโมดูล XBee

- ติดตั้งโปรแกรม X-CTU เวอร์ชั่นล่าสุด โดยสามารถดาว์นโหลดได้ฟรีจากเว็บไซต์ผู้ผลิตที่ www.digi.com

- ติดตั้งโมดูล XBee ลงบนบอร์ด ZX-Xbee ต้องระวังเรื่องตำแหน่งขาและทิศทางในการติดตั้งโมดูลต้องติดตั้งให้ถูกต้อง และไม่เกิดการเหลื่อมกันเด็ดขาด เพราะหากติดตั้งผิดแล้ว เมื่อจ่ายไฟจะทำให้โมดูลเสียหายทันที

- ต่อสายเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด เข้ากับพอร์ต USB ของคอมพิวเตอร์จะเห็น LED2 ในตำแหน่ง ON ติด และ LED1 ในตำแหน่ง ASS.กระพริบ หากไม่เป็นไปตามนี้ให้รีบปิดสวิตช์ปลดไฟเลี้ยง แล้วตรวจสอบการติดตั้งโมดูล XBee ทันที รวมทั้งตรวจสอบไฟเลี้ยงที่ขา Vcc ของ XBee ว่าต้องอยู่ในช่วง +2.8 ถึง +3.3 โวลต์ โดยในการตรวจสอบนั้นต้องถอดโมดูล XBee ออกมาก่อน แล้ววัดแรงดันที่คอนเน็กเตอร์ตัวเมียที่ใช้สำหรับติดตั้งโมดูล XBee

- เปิดโปรแกรม X-CTU หน้าต่างเชื่อมต่อจะกำหนดขึ้นมาดังภาพที่ 3.3 ให้ทำการเลือกพอร์ตที่ทำการเชื่อมต่อ เลือก Baud rate เป็น 9600, Data bits 8 บิต, Parity เป็น None และ Stop bits เป็น 1 บิต แล้วเลือก Enable API

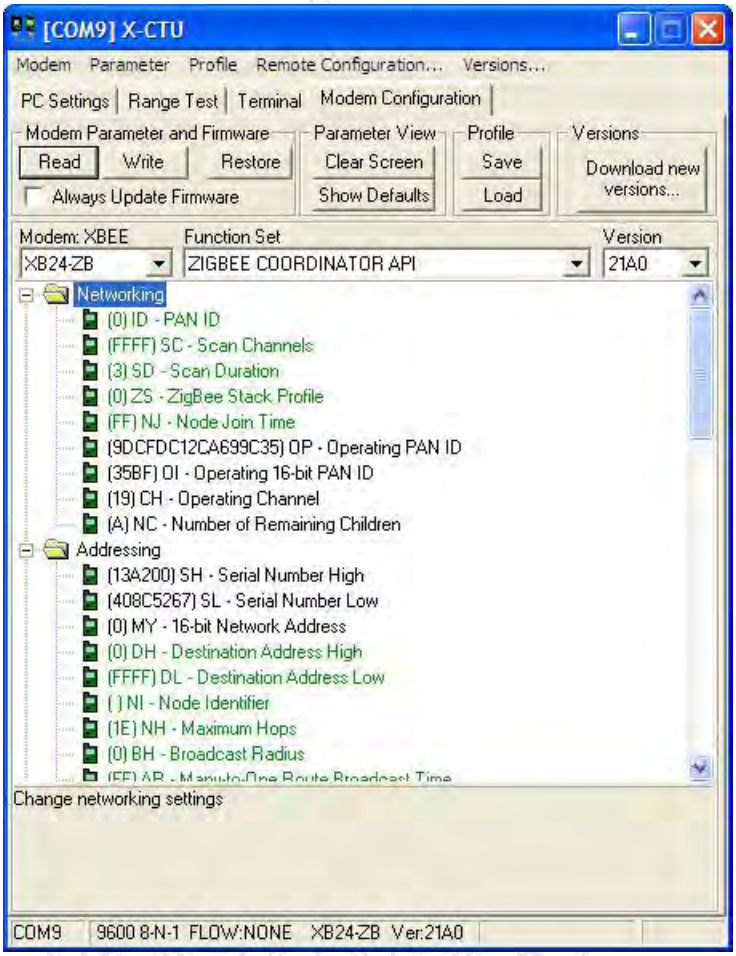


ภาพที่ 3.3 หน้าต่างกำหนดการเชื่อมต่อของโปรแกรม X-CTU

- กดปุ่ม Test เพื่อทดสอบการติดต่อระหว่าง XBee กับโปรแกรม X-CTU หากติดต่อกันได้จะปรากฏหน้าต่างแจ้งผลการติดต่อและข้อมูลทางฮาร์ดแวร์เบื้องต้นของโมดูล XBee ดังภาพที่ 3.4 หากมีการแจ้งความผิดพลาดใดๆเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้ ให้รีบปลดไฟเลี้ยง แล้วตรวจสอบการติดตั้งโมดูล XBee อีกครั้ง รวมทั้งตรวจสอบหมายเลขของพอร์ตด้วย และถ้ายังติดต่อไม่ได้ให้ทดลองเลือก Baud rate ใหม่

ภาพที่ 3.4 หน้าต่างแจ้งผลการติดต่อของโมดูล XBee

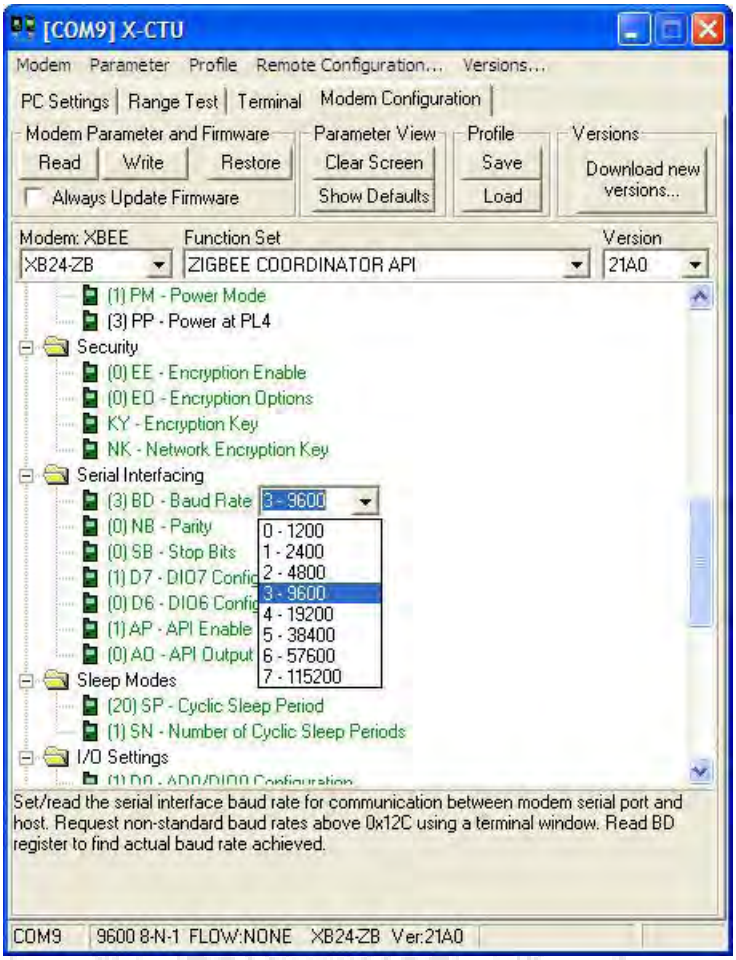
- หลังจากนั้นคลิกไปที่แท็บ Modem Configuration แล้วกดปุ่ม Read ในกรอบ Modem Parameters and Firmware จะปรากฏข้อมูลชื่อรุ่นของโมดูล XBee ชื่อฟังก์ชั่น หมายเลขเวอร์ชั่นของเฟิร์มแวร์ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ XBee

- เมื่อมาถึงขั้นตอนนี้ผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนค่าคอนฟิกูเรชั่นได้ตามต้องการ ไม่ว่าจะเป็นการเลือก Baud rate ใหม่ กำหนดรูปแบบการทำงานของพอร์ต XBee เนื่องจากพอร์ตของ XBee สามารถใช้งานเป็นอินพุตอะนาลอกเพื่อเชื่อมต่อกับตัวตรวจจับที่ให้ผลการทำงานเป็นแรงดัน ส่งไปยังวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลความละเอียด 10 บิตภายในโมดูล XBee ซึ่งผู้ใช้งานสามารถอ่านค่าออกไปได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้งาน XBee ร่วมกับตัวตรวจจับทำงานเป็นโครงข่ายตัวตรวจจับไร้สายได้

- หากต้องการเปลี่ยน Baud rate ให้ไปที่หัวข้อ Serial Interface คลิกเลือกที่บรรทัด BD-Baud Rate แล้วเลือกค่า Baud rate ซึ่งมี 8 ค่า ตั้งแต่ 1,200 ถึง 115,200 บิตต่อวินาที



ภาพที่ 3.6 การเปลี่ยน Baud rate

- หากต้องการเปลี่ยนการทำงานของพอร์ตให้เลือกไปที่หัวข้อ I/O Setting แล้วเลือกไปที่พอร์ตที่ต้องการเปลี่ยนค่า จะปรากฏช่องให้เลือกฟังก์ชั่นการทำงานซึ่งมีด้วยกัน 5 แบบ คือ

0 DISABLED หมายถึง ปิดการทำงาน

1 COMMISSIONING BUTTON หมายถึง รอรับค่าจากปุ่มกด

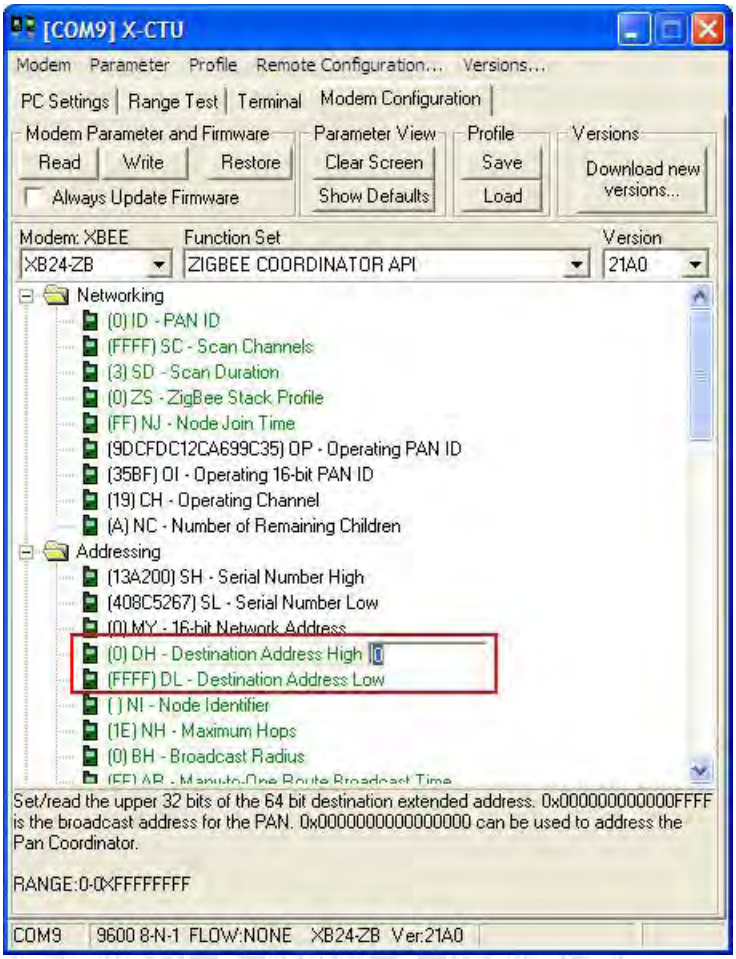
2 ADC หมายถึง ยังไม่มีการกำหนดฟังก์ชั่น หรือสำรองไว้

3 DIGITAL INPUT หมายถึง เลือกเป็นอินพุตดิจิตอล

4 DIGITAL OUT, LOW หมายถึง เลือกเป็นเอาต์พุตดิจิตอลลอจิกต่ำ

5 DIGITAL OUT, HIGH หมายถึง เลือกเป็นเอาต์พุตดิจิตอลลอจิกสูง

- หากต้องการกำหนด Address ของโมดูลตัวรับให้เลือกไปที่หัวข้อ Addressing แล้วใส่ค่าที่ช่อง DH-Destination Address High และ DL-Destination Address Low



ภาพที่ 3.7 การกำหนดค่าโมดูลตัวรับ

จากนั้นกดปุ่ม Write แล้วรอสักครู่ ให้คอยสังเกตที่ด้านล่างข้องหน้าต่าง Modem configuration จะแสดงข้อความเพื่อแจ้งสถานะการทำงาน การกำหนดค่าเสร็จสมบูรณ์

3.2.3รีจีสเตอร์ที่ควรทราบของโมดูล Xbee-PRO

การส่งข้อมูลและควบคุมระหว่างไมโครคอนโทรเลอร์หรือคอมพิวเตอร์กับโมดูล Xbee-PRO นั้น จะใช้การสื่อสารแบบอนุกรม UART ซึ่งโมดูล Xbee-PRO สามารถใช้ความเร็วในการส่งข้อมูล (Baud rate) ได้ตั้งแต่ 1,200 จนถึง 115,200 บิตต่อวินาที (bps : bit per second) โดยค่าที่กำหนดเป็นค่าเริ่มต้นคือ 9,600 บิตต่อวินาที และสามารถเปลี่ยนความเร็วในการส่งข้อมูลได้ที่รีจีสเตอร์ BD

ในการติดต่อสื่อสารระหว่างโมดูล Xbee-PRO สามารถจัดเครือข่ายได้หลายรูปแบบ โดยการแยกช่องสัญญาณและเครือข่าย รีจีสเตอร์ที่ใช้สำหรับจัดการเกี่ยวกับเครือข่าย มีดังนี้

1) รีจีสเตอร์ CH (Channel) ใช้กำหนดช่องสัญญาณ เลือกได้ตั้งแต่ช่องที่ 0x0C ถึง 0x17 แต่ละช่อไม่สามารถส่งข้อมูลข้ามช่องสัญญาณกันได้

2) รีจีสเตอร์ ID (PAN ID / Personal Area Network ID) ใช้กำหนดหมายเลขเครือข่าย เลือกค่าได้ตั้งแต่ 0x0000 จนถึง 0xFFFE โดยแต่ละเครือข่ายจะไม่สามารถส่งข้อมูลข้ามเครือข่ายได้ ยกเว้นถ้ากำหนดด้วยค่า 0xFFFF จะสามารถส่งข้อมูลไปทุกเครือข่ายได้ แต่จะไม่สามารถรับข้อมูลจากเครือข่ายอื่นได้

3) รีจีสเตอร์ MY (16-bit Source Address) ใช้กำหนดแอดเดรส 16 บิตของแต่ละโมดูล เลือกค่าได้ตั้งแต่ 0x0000 ถึง 0xFFFD และสามารถยกเลิกการใช้แอดเดรส 16 บิตนี้ได้ เพื่อไปใช้แอดเดรสขนาด 64 บิตที่รีจีสเตอร์ SH และ SL แทน เพื่อขยายให้มีจำนวนโมดูลลูกข่ายได้เพิ่มมากขึ้น โดยกำหนด MY เป็น 0xFFFE และ 0xFFFF

4) รีจีสเตอร์ SH และ SL (Serial Number High / Low) เป็นรีจีสเตอร์เก็บค่าหมายเลขเฉพาะ หรือ Serial number ของแต่ละโมดูล สามารถใช้เป็นแอดเดรส 64 บิต (SH รวมกับ SL) โดยต้องยกเลิกแอดเดรส 16 บิต ที่รีจีสเตอร์ MY ก่อน ค่าในรีจีสเตอร์ SH และ SL ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้

5) รีจีสเตอร์ DH และ DL (Destination Address High / Low) ใช้สำหรับกำหนดแอดเดรสของโมดูลตัวรับ

5.1) ถ้าโมดูลตัวรับใช้รีจีสเตอร์ MY (แอดเดรส 16 บิต) ให้กำหนดค่าของรีจีส-เตอร์ DH เป็น 0x0000 และ DL เป็นค่า MY ของโมดูลตัวรับ

5.2) ถ้าโมดูลตัวรับมีการใช้รีจีสเตอร์ SH ร่วมกับ SL (แอดเดรส 16 บิต) ให้กำหนดค่าของรีจีสเตอร์ DH เป็นค่าของ SH และค่าของรีจีสเตอร์ DL เป็นค่า SL ของโมดูลตัวรับ

การตั้งค่าของโมดูล Xbee ทำได้ 2 ทาง คือ ใช้โปรแกรม X-CTU กับบอร์ด ZX-Xbee ต่อกับคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตอนุกรม อีกทางหนึ่งคือใช้ AT Command

ก่อนการใช้โมดูล Xbee ควรจะทำการตรวจสอบ ตั้งค่าแอดเดรสต่างๆ และรูปแบบของการส่งข้อมูล ก่อนนำไปติดตั้งกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

3.2.4 การตั้งค่าการเชื่อมต่อ Mesh Topology

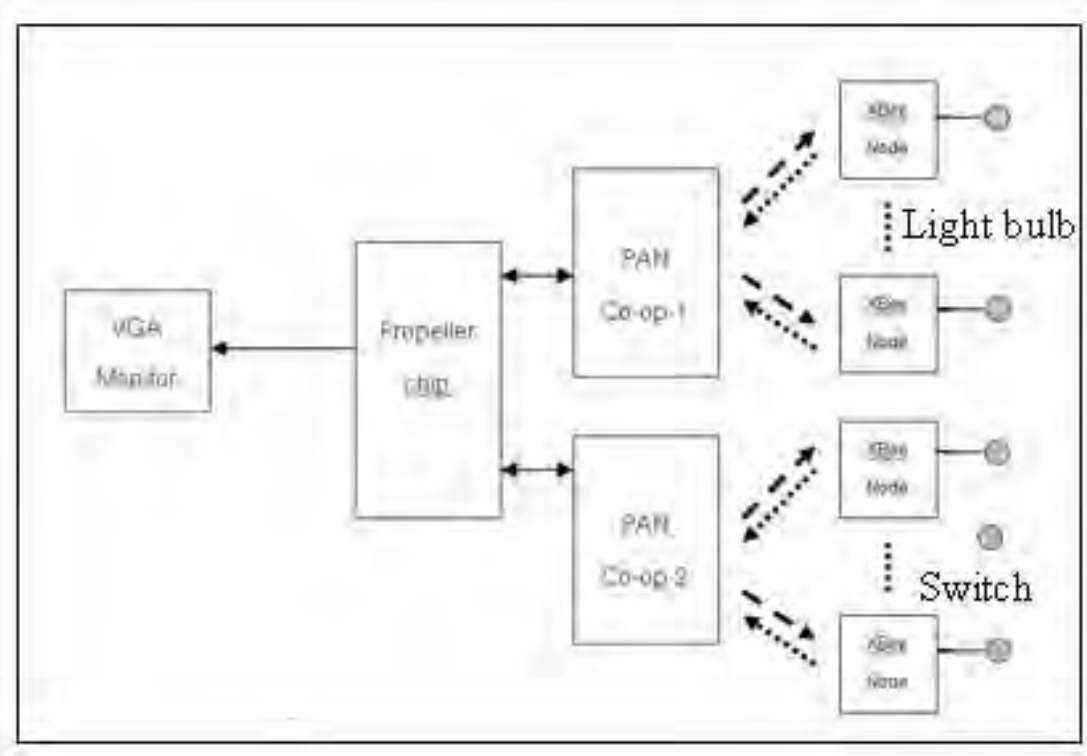
การเชื่อมต่อแบบนี้จะต้องมี XBee 1 ตัว ทำหน้าที่เป็น Coordinator และ มี XBee ทำหน้าที่เป็น Router ในโครงงานนี้กำหนดให้มี Router 2 ตัว ดังภาพที่ 3.8

ภาพที่ 3.8 การเชื่อมต่อ XBee แบบ Mesh

- XBee ตัวที่ 1 ให้เป็นตัว Coordinator โดยเลือก Function Set เป็น ZIGBEE COORDINATOR API แล้วกำหนดค่าตามพารามิเตอร์นี้ PAN ID = 0, DH = 0, DL = FFFF
- XBee ตัวที่ 2 และ 3 ให้เป็นตัว Router โดยเลือก Function Set เป็น ZIGBEE ROUTER API แล้วกำหนดค่าตามพารามิเตอร์นี้ PAN ID = 0, DH = 0, DL = 0

3.3 โครงสร้างของระบบ

ระบบประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้



ภาพที่ 3.9 โครงสร้างของระบบ

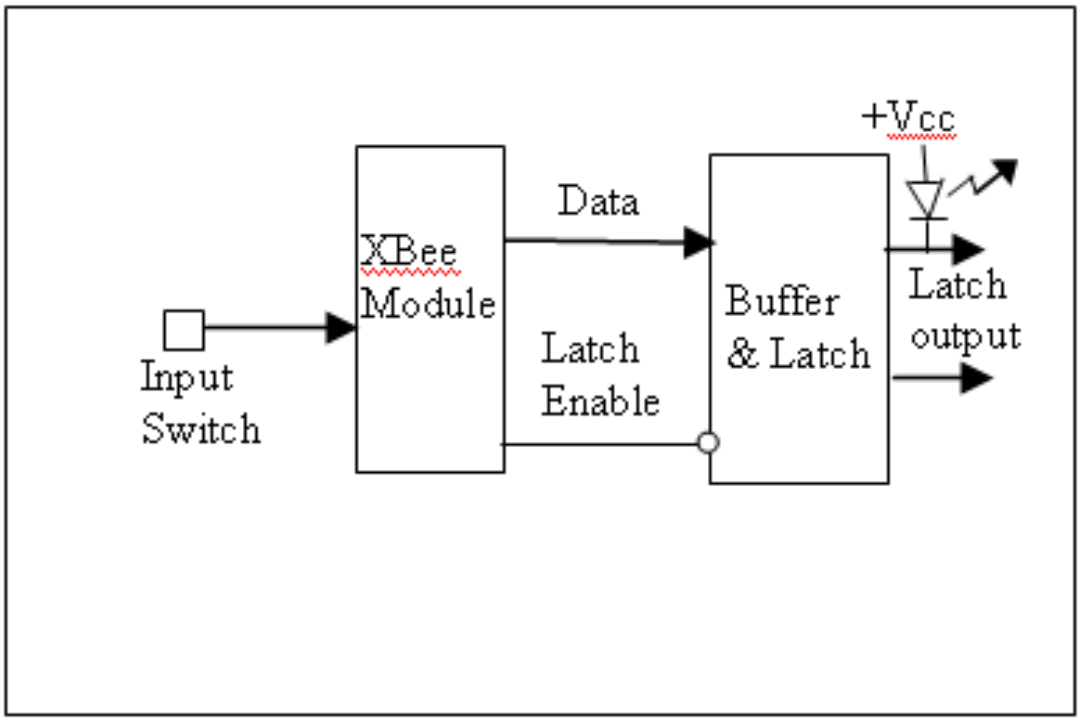
จากภาพที่ 3.9 แสดงถึงโครงสร้างของระบบ โดยวงจรนี้สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทาง RS 232 เพื่อจัดเก็บข้อมูลลงในฐานข้อมูลและแสดงผลข้อมูลผ่านทางโปรแกรมแสดงผลในคอมพิวเตอร์

3.4 การออกแบบวงจร

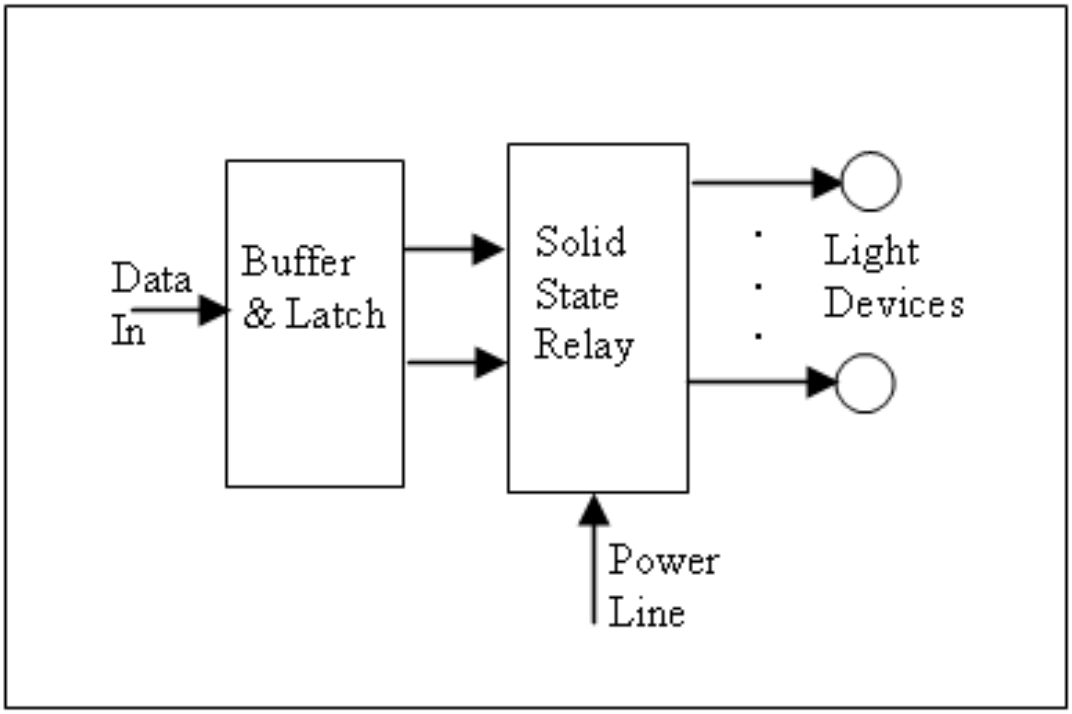
การออกแบบวงจรจะพิจารณาจากโครงสร้างของระบบโดยรวมเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ โดยมีส่วนของวงจร 2 ส่วน คือส่วนเชื่อมต่อกับภาระและส่วนควบคุม

3.4.1 วงจรส่วนเชื่อมต่อภาระแสงสว่าง

หน้าที่ของวงจรนี้ คือ วงจรนี้จะรับค่าข้อมูลควบคุม ไปยังวงจรdata logger เชื่อมต่อภาระแสงสว่างแบ่งเป็น 2 ส่วน



ภาพที่ 3.10 วงจรควบคุมภาระแสงสว่าง



ภาพที่ 3.10 วงจรควบคุมภาระแสงสว่าง (ต่อ)

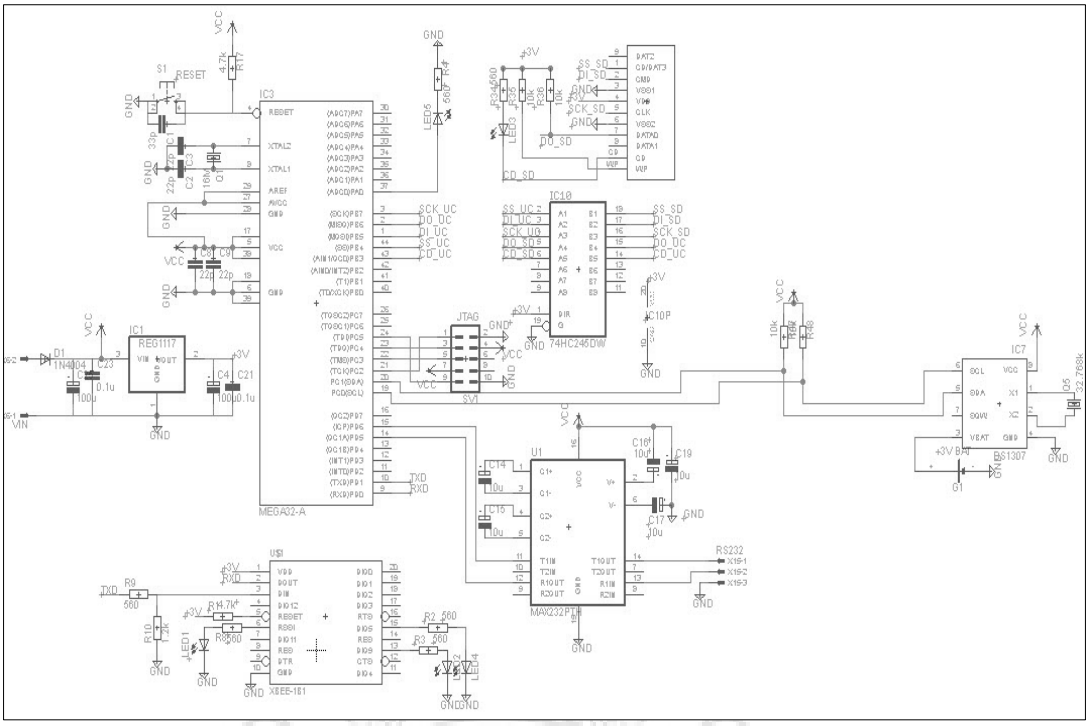
3.4.2วงจรควบคุม

หน้าที่ของวงจรนี้ คือ การรับข้อมูลและติดต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS 232

โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ ATmega32 โดยวงจรใช้ตัวกำเนิดความถี่ 16 MHz และใช้การโปรแกรมแบบ JTAG ซึ่งสามารถที่จะทำการดีบักผ่าน JTAG ได้ มีสวิตช์สำหรับรีเซตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ต่ออยู่ที่ขา 4 และใช้ขา PA0 เป็นขาเอาต์พุตดิจิตอลซึ่งต่อกับ LED เพื่อแสดงสถานะความพร้อมเมื่อไมโครคอนโทรเลอร์สามารถติดต่อกับ SD card ได้ โดยจะใช้ไอซี 74hd25dw เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 5 โวลต์ ให้เหลือ 3 โวลต์ เพื่อให้ SD card ติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้และใช้ขา PC0 กับ PC1 ติดต่อกับไอซี Real Time Clock สำหรับอ้างฐานข้อมูลเวลาในการจัดเก็บ

การติดต่อกับ XBee นั้น มีขา PD1ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เอาไว้ติดต่อกับ XBee ซึ่งใช้เป็นขา TX สำหรับส่งข้อมูลไปให้ XBee โดยที่ใช้ระดับแรงดัน 5 โวลต์แต่ XBee ใช้ระดับแรงดัน 3.3 โวลต์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีตัวต้านทานสองตัวไว้สำหรับลดระดับแรงดันลง ส่วนขา PD0 เป็นขาที่ใช้ติดต่อกับ XBee เช่นกันแต่ใช้เป็นขา RX(รับข้อมูล) ต่อไว้สำหรับรับข้อมูลที่ XBee ส่งมาให้โดยที่ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถที่จะรับสัญญาณระดับแรงดัน 3.3 โวลต์ได้ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีการต่อตัวต้านทานเพื่อลดระดับแรงดัน การเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต

อนุกรม RS 232 ใช้ไอซี MAX232 เป็นตัวแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ได้ดังภาพที่ 3.11 สามารถดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ง

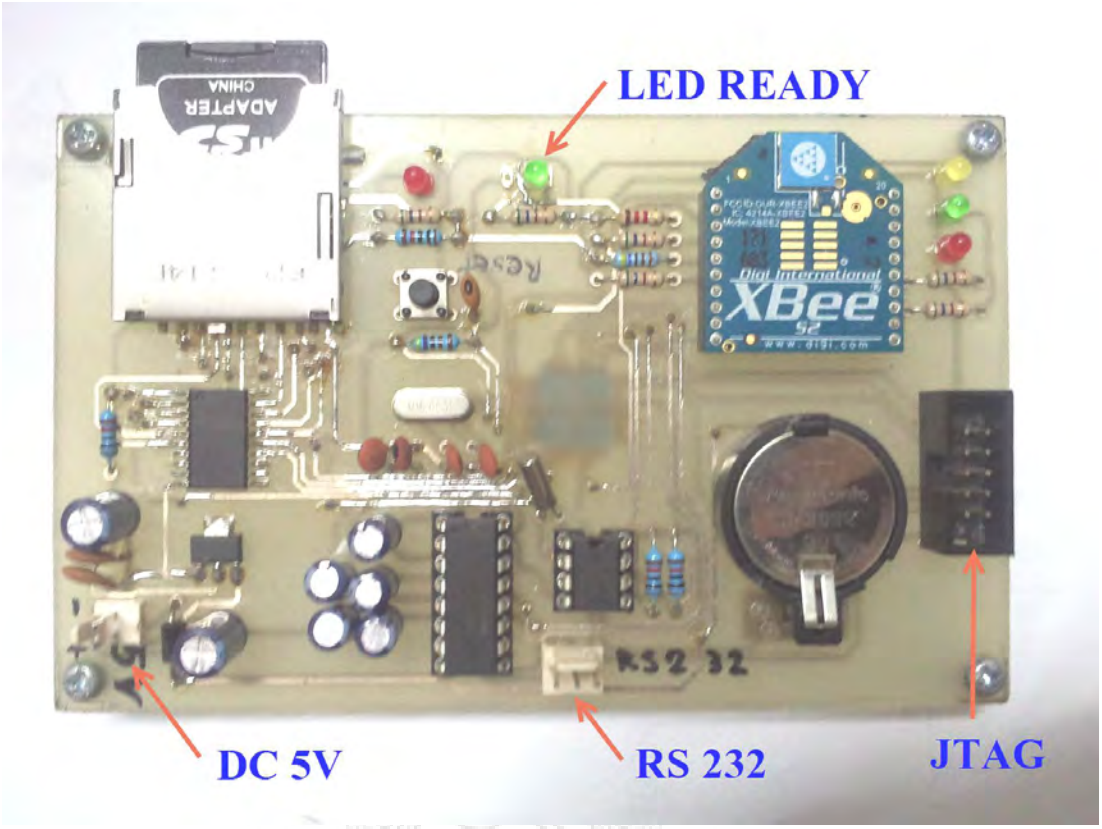


ภาพที่ 3.11 วงจรควบคุม

3.4.3วงจรที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้ว

วงจรเชื่อมต่อกับภาระแสงสว่างที่ประกอบอุปกรณ์ลงบนแผ่นวงจรเรียบร้อยแล้วจะแสดงในภาพที่ 3.12 และภาพที่ 3.13 ตามลำดับ

ภาพที่ 3.12 วงจรเชื่อมต่อกับภาระแสงสว่างเมื่อประกอบเสร็จ



ภาพที่ 3.13 วงจร ควบคุม เมื่อประกอบเสร็จ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

เริ่มต้นตรวจดูการทำงานของอุปกรณ์รับส่งและแผงวงจรควบคุม

ภาพที่ 4.1 วงจรรับส่งที่พร้อมใช้งาน

ภาพที่ 4.2 แผงวงจรควบคุมพร้อมใช้งาน

และมีการทดลองการเปิดปิดภาระแสงสว่าง และหาระยะทางในการควบคุมได้ผลการทดลอง ดังนี้

4.2 การทดลองเปิดปิดเปิดปิดหลอดไฟ

SWITCH 0 ON	LAMP 0	ON
SWITCH 1 OFF	LAMP 1	OFF
SWITCH 2 OFF	LAMP 2	OFF
SWITCH 3 ON	LAMP 3	ON

ภาพที่ 4.2 ผลการทดลองเปิดปิดหลอดไฟ

4.3 การทดลองการหาระยะทางในการติดตั้งตัวตรวจจับ

ขั้นตอนต่อไปจะทำการทดลองการหาระยะทางในการควบคุมติดตั้งตัวตรวจจับดังนี้ คือ จะทำการทดลองส่งข้อมูลจาก XBee Router (ตัวลูก) มาที่ XBee Coordinator (ตัวแม่) ในอาคารโดยเริ่มจากระยะทาง 5 เมตร และเพิ่มระยะทางในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 เมตร ไปจนครบ 20 เมตร โดยวาง XBee ไว้บนพื้นดังภาพที่ 4.5

ภาพที่ 4.5 การทดลองหาระยะทางในการส่งข้อมูลตัวตรวจจับของ XBee

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหาระยะทางในการส่งข้อมูล

ระยะทาง	**XBee Router ตัวที่ 1**	**XBee Router ตัวที่ 2**
5 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
6 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
7 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
8 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
9 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
10 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
11 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
12 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
13 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
14 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
15 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
16 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
17 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
18 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
19 เมตร	อ่านค่าได้	อ่านค่าได้
20 เมตร	อ่านค่าไม่ได้	อ่านค่าไม่ได้

ทดสอบข้อมูลที่อยู่ชั้นเดียวกันและต่างชั้นกัน

	1.0 m	1.5 m	3.0 m	5.0 m	10.0 m
Same floor	100	100	100	100	100
Floor1-floor2	-	-	100	50	10

ภาพที่ 4.6 ทดสอบข้อมูลที่อยู่ชั้นเดียวกันและต่างชั้นกัน (เป็นค่าร้อยละ)

4.4 ทดสอบข้อมูลในการรับส่ง

เป็นการตรวจสอบข้อมูลที่ใช้รับส่ง

- 7E 00 1C 83 56 78 22 00 05

  06 00 **00 00 03 FF 00 00 03**

  FF 00 00 03 FF 00 00 03

  FF 00 00 03 FF 77

ความหมายของข้อมูล

7E	Start Delimiter
00 1C	Length Bytes
83	API Identifier Byte for 16bit A/D data (82 is for 64bit A/D data)
56 78	Source Address Bytes
22	RSSI Value Bytes
00	Option Byte
05	Sample Quantity Byte
06 00	00000110 00000000 Channel Indicator *
00 00	Sample Data ADC0 (min value for A/D is 00 00)
03 FF	Sample Data ADC1 (max value for A/D is 03 FF, indicating the value of ADC1 is Vref)
7	Check Sum

ภาพที่ 4.7 ข้อมูลที่รับส่ง

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

จากการดำเนินการจัดทำและทดลอง ผลการทดลองที่ได้อยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ การทำงานโดยรวมของระบบสามารถทำได้ตามขอบเขต ทั้งในส่วนของวงจรต่างๆ และโปรแกรมควบคุม อย่างไรก็ดี ยังคงมีส่วนที่ควรได้รับการปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้นเพื่อความสมบูรณ์ของระบบ

5.2 สรุปผลการทดลอง

5.2.1จากการทดลองพบว่าสามารถส่งข้อมูลอุณหภูมิจากจุดตรวจจับทั้ง 2 จุด ไปยัง Data Logger ได้

5.2.2การส่งข้อมูลไร้สายของ XBee Coordinator กับ XBee Router N1 ได้ที่ระยะทางจริงไม่เกิน 19 เมตร

5.2.3การส่งข้อมูลไร้สายของ XBee Coordinator กับ XBee Router N2 ได้ที่ระยะทางจริงไม่เกิน 19 เมตร

5.2.4สามารถเชื่อมต่อ วงจรควบคุม กับ คอมพิวเตอร์ ผ่านพอร์ต RS 232 เพื่อการควบคุมได้

5.4 อุปสรรคและปัญหาที่พบ

5.4.1ระยะทางการส่งข้อมูลของ XBee ทำได้น้อยกว่าที่ระบุไว้ใน Data sheet สาเหตุอาจเกิดจากสภาพแวดล้อมที่ใช้ทดลองต่างกัน

5.4.2XBee ที่ใช้เป็นแบบ chip antenna จะไม่สามารถติดตั้งเสาอากาศเพิ่มเติม ทำให้มีระยะการส่งข้อมูลที่น้อยกว่าแบบที่ใช้เสา

5.4.3หากบริเวณที่ทำการทดลองมีสัญญาณ WIRELESS LAN อยู่ซึ่งเป็นช่วงความถี่เดียวกับ XBee อาจทำให้เกิดการรบกวนของสัญญาณได้

5.5 ข้อเสนอแนะ

5.5.1การติดตั้ง XBee ควรติดตั้งแบบ Line of sight ถึงจะได้ระยะทางในการส่งสูงสุด

5.5.2 ควรลดค่า Sampling rate ที่ XBee ของในส่วนของวงจร เพื่อลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของวงจรนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] **เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย :** http://www.thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach/Wireless_Sensor_Network/index.php ค้นเมื่อ 9 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

[2] ณัฏฐพล วงศ์สุนทรชัย, ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล. **เรียนรู้และปฏิบัติการไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F628**. บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด

[3] ประจิน พลังสันติกุล. **การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ด้วยภาษา C กับ WinAVR (C Compiler)**. กรุงเทพฯ : แอพซอฟต์เทค

[4] สัจจะ จรัสรุ่งรวีวร. **คู่มือ Visual Basic 2005 ฉบับสมบูรณ์.** นนทบุรี : ไอดีซีฯ, 2549

[5] พงษ์พันธ์ ศิวิลัย. **SQL Server 2005 ฉบับสมบูรณ์.** กรุงเทพฯ **:** ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2549

[6] **เอกสารประกอบการใช้งาน XBee-Pro โมดูลสื่อสารข้อมูลไร้สาย 2.4 GHz.** กรุงเทพฯ : อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์

[7] ZigBee Alliance. **ZigBee Wireless Sensor Application for Health, Wellness and Fitness**, 2009

[8] Digi Internationnal Inc. **Demystifying 802.15.4 and ZigBee**. 11001 Bren Road E.Minnetonka, MN 55343 U.S.A

[9] Sinem Coleri Ergen. **ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary**. 2004

[10] Digi International Inc. **XBee/XBee-PRO ZB RF Modules.** 11001 Bren Road East Minnetonka, 2010

[11] National Semiconductor Corporation. **LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors.** USA, 2000

[12] Atmel Corporation**. ATmega32/ATmega32L.** Orchard Parkway San Jose , USA, 2011

[13] **การใช้งาน RTC (Real Time Clock) ด้วย DS1307** : http://www.mind-tek.net/ds1307.php ค้นเมื่อ 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

[14] **Basic XBee API** : http://www.thaieasyelec.com/Embedded-Electronics-Application/Xbee-API-Mode-Tutorial-and-LAB.html
ค้นเมื่อ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

[15] **Xbee Basic Configuration in NetworkApplication :**

http://www.thaieasyelec.com/Embedded-Electronics-Application/Xbee-Basic-Configuration-in-Network-Application.html ค้นเมื่อ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

[16] **การเลือกซื้อ Xbee เพื่อความเหมาะสมของงาน** : http://www.thaieasyelec.com/Review-Product-Article/How-to-choose-Xbee-with-suitable-your-project.html ค้นเมื่อ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

[17] ประเสริฐ. **รวม MODULE RF ส่งข้อมูลไร้สายสุดฮิตกับ PIC 16F877**.

[18] Supada Laosooksathit, Vara Varavithya, and Nachol Chaiyaratana, "Ant Colony with Event Flooding in Sensor Networks: Forest Fire Detection," in the proceeding of the National Electrical Engineering Conference (EECON 28), 2005.

[19] Itziar Marin, Eduardo Arceredillo, Aitzol Zuloaga and Jagoba Arias,"Wireless Sensor Networks: A Survey on Ultra-Low Power-Aware Design", TRANSACTIONS ON ENGINEERING, COMPUTING AND TECHNOLOGY V1 DECEMBER 2004.

[20] Ioannis Chatzigiannakisyz, Athanassios Kinalis and Sotiris Nikoletseas, "Adaptive Energy Management for Incremental Deployment of Heterogeneous Wireless Sensor.", Research Academic Computer Technology Institute, P.O. Box 1122, 26110 Patras, Greece,Dept of Computer Engineering and Informatics, University of Patras, 26500, Patras, Greece.

[21] J. Zheng and Myung J. Lee, "Will IEEE 802.15.4 make ubiquitous networking a reality? : a discussion on a potential low power, low bit rate standard." IEEE Communications Magazine, June 2004.

[22] J. Zheng and Myung J. Lee, "A comprehensive performance study of IEEE 802.15.4," Sensor Network Operations, IEEE Press, Wiley Interscience, Chapter 4, pp. 218-237, 2006.

[23]"ZigBee Tutorial", http://www.ifn.et.tu -dresden.de/~marandin/ZigBee/ZigBeeTutorial.html

[24] William C. Craig "Zigbee: Wireless Control That Simply Works"; Program Manager Wireless Communications ZMD America, Inc.; www.zigbee.org/imwp/idms/popups/ pop_download.asp? contentID=5438

[25] MaxStream, Inc.,"Quick Start Guide XBee™/XBee-PRO™ OEM Development Kits",355 South, 520 West, ste. 180 Lindon, UT 84042, 2006.

[26] MaxStream, Inc.,"Product Manual XBee™/XBee-PRO™ OEM Development Kits",355 South, 520 West, ste. 180 Lindon, UT 84042, 2006.

[27] Parallax Inc., “Propeller Manual Version 1.01”, 2006. Acatay, Kazm, Eren Simsek, Mert.

[28] Douglas V. Hall, “Microprocessor and Interfacing Programming and Hardware”, 1987, McGraw-Hill.