สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

# ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับบ้านอัตโนมัติโดยใช้ ZigBee

# ZIGBEE BASED WIRELESS SENSOR NETWORK FOR HOME AUTOMATION

T103073

โดย

นายสุรเดช พานิช

นางสาวหทัยทิพย์ พรหมมาศ

นางสาวอภิญญา ช้างน้อย

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 103073
วัน,เดือน,ปี 27 ส.ค. 2552

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ZIGBEE BASED WIRELESS SENSOR NETWORK FOR HOME AUTOMATION


**BY**

**Mr. SURADEJ PANICH**

**MS. HATHAITIP PROMMAS**

**Ms. APINYA CHANGNOI**


**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF**

**THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF**

**BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2008**


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ใบเสนอปริญญานิพนธ์

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **หัวข้อปริญญานิพนธ์** | ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับบ้านอัตโนมัติโดยใช้ ZigBee | | | |
| | ZigBee Based Wireless Sensor Network for Home Automation | | | |
| **ชื่อนักศึกษา** | นายสุรเดช | พานิช | รหัสประจำตัว | 48011018 |
| | นางสาวหทัยทิพย์ | พรหมมาศ | รหัสประจำตัว | 48011033 |
| | นางสาวอภิญญา | ช้างน้อย | รหัสประจำตัว | 48011062 |
| **อาจารย์ที่ปรึกษา** | ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนต์ชัย แช่มช้อย | | | |
| **ระดับการศึกษา** | ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต | | | |
| | สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ | | | |
| **ภาควิชา** | วิศวกรรมสารสนเทศ | | | |
| **ปีการศึกษา** | 2551 | | | |

---

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

(ผศ. มนต์ชัย แช่มช้อย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **หัวข้อปริญญานิพนธ์** | ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับบ้านอัตโนมัติโดยใช้ ZigBee | | | |
| **ชื่อนักศึกษา** | นายสุรเดช | พานิช | รหัสประจำตัว | 48011018 |
| | นางสาวหทัยทิพย์ | พรหมมาศ | รหัสประจำตัว | 48011033 |
| | นางสาวอภิญญา | ช้างน้อย | รหัสประจำตัว | 48011062 |
| **อาจารย์ที่ปรึกษา** | ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนต์ชัย แช่มช้อย | | | |
| **ระดับการศึกษา** | ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต | | | |
| | สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ | | | |
| **ภาควิชา** | วิศวกรรมสารสนเทศ | | | |
| **ปีการศึกษา** | 2551 | | | |


**บทคัดย่อ**

ระบบเครือข่ายของเซนเซอร์แบบไร้สาย สามารถพบได้ในหลายๆ ระบบ เช่น การรักษาความปลอดภัยภายในบ้าน การควบคุมและดูแลรักษาอุปกรณ์ต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น โดย Zigbee เป็นอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สายระยะใกล้ โดยอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งมีความน่าเชื่อถือสูงในการส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย ราคาถูก และใช้พลังงานต่ำ จึงเป็นผลให้ในปัจจุบันมีการนำ ZigBee มาใช้งานอย่างแพร่หลาย ดังนั้นในโครงงานนี้จึงได้นำ ZigBee มาช่วยในการอำนวยความสะดวกภายในบ้าน เพื่อเพิ่มระบบความปลอดภัย และความสะดวกสบายภายในบ้านให้มากขึ้น เช่น การตรวจจับและป้องกันการบุกรุกเข้ามาภายในบ้าน การตรวจสอบควบคุมและแจ้งเตือนเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมภายในบ้าน อาทิเช่น การตรวจสอบอุณหภูมิภายในบ้าน และตรวจจับความเคลื่อนไหว เป็นต้น ในโครงงานนี้จะใช้เซนเซอร์ 2 ชนิดคือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและเซนเซอร์แม่เหล็กตรวจจับการผ่านเข้าออกของบ้าน และได้ออกแบบวงจรเพื่อเชื่อมต่อเซนเซอร์เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการไหลของข้อมูล ซึ่งเชื่อมต่อกับโมดูล ZigBee ในการส่งข้อมูลแบบไร้สาย จากการทำการทดลอง พบว่า ระบบที่ได้นำเสนอนี้สามารถรายงานสถานะของเซนเซอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Project Topic** | ZigBee Based Wireless Sensor Network for Home Automation | | | |
| **Student** | Suradej | Panich | student ID | 48011018 |
| | Hathaitip | Prommas | student ID | 48011033 |
| | Apinya | Changnoi | student ID | 48011062 |
| **Advisor** | Asst. Prof. Monchai Chamchoy | | | |
| **Graduate Level** | Bachelor of Engineering | | | |
| **Department** | Information Engineering | | | |
| **Academic Year** | 2008 | | | |


**Abstract**

A smart sensor network is the infrastructure of home automation and control systems, as the proposed functions such as home security, industrial environment monitor, etc., The ZigBee standard is one of the Wireless Technology with short distance communication under the IEEE 802.15.4 standard. ZigBee is considered as an advanced and low cost solution to other technologies and their connections also have reliability with low power consumption. So many organizations decided to use ZigBee solution to build the ubiquitous environment. This project used ZigBee in Home automation to accomplish the goal, where the security and comfort of a home is an important issue. Such that take care of home intrusion detection and avoidance, while it controls other home environment factors such as temperature. In this project used 2 sensors (temperature and magnetic). After connected between sensor and microcontroller to control the data flow in the circuit and the send the data wirelessly via ZigBee module. The result at the receiver we can monitor data from the sensors with precisely and efficiency.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ ถ้าไม่ได้รับการช่วยเหลือจากบุคคลต่างๆมากมาย โดยขอขอบคุณ ผศ.มนต์ชัย แช่มช้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานที่ให้โอกาสในการทำโครงงานนี้กับคณะผู้จัดทำโครงงาน และช่วยให้คำปรึกษาแนะนำในการทำงานอย่างเป็นระบบ และวางแนวทางในการหาข้อมูลประกอบโครงงาน และการจัดรูปแบบรายงานที่ถูกต้องเหมาะสม เป็นระเบียบและมีความสวยงาม

ทั้งนี้ทางคณะผู้จัดทำ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ และคณาจารย์ในภาควิชาทุกท่าน ที่ให้โอกาสและความรู้กับทางคณะผู้จัดทำมาจนถึงปัจจุบันนี้ได้ ด้วยความทุ่มเทในการทำการสอนของคณาจารย์ทุกๆท่าน

นอกจากนี้แล้วคณะผู้จัดทำ ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือที่ดี ในการทำโครงงานนี้ให้ผ่านให้ไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในคณะผู้จัดทำทั้ง 3 คนในการทำงานให้โครงงานนี้ผ่านมาได้ตามจุดประสงค์ของโครงงานที่ได้วางแผนไว้ได้

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ


| เรื่อง | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย) | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญรูป | ช |
| สารบัญตาราง | ฌ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงงาน | 2 |
| 1.4 ขั้นตอนการทำงาน | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและเทคโนโลยี ZigBee | 3 |
| 2.1 เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายระยะสั้นด้วยคลื่นวิทยุ | 3 |
| 2.2 หลักการพื้นฐานของ ZigBee | 3 |
| 2.3 มาตรฐาน IEEE 802.15.4 | 5 |
| 2.3.1 IEEE 802.15.4 Physical Layer | 6 |
| 2.3.2 IEEE 802.15.4 MAC Layer | 7 |
| 2.3.3 IEEE 802.15.4 Piconets | 8 |
| 2.3.4 การตั้งค่าเครือข่าย | 12 |
| 2.3.4.1 เครือข่ายแบบสตาร์ (Star Network) | 12 |
| 2.3.4.2 เครือข่ายแบบต้นไม้ (Cluster Tree) | 13 |
| 2.3.4.3 เครือข่ายแบบเมช (Mesh Network) | 13 |
| 2.4 โปรไฟล์โปรโตคอล ZigBee | 15 |
| 2.5 ZigBee โปรโตคอลสแตก | 16 |
| 2.5.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรโตคอลของ ZigBee | 17 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

**เรื่อง** **หน้า**


2.5.1.1 ขั้นตอนการทำงานของ ZigBee coordinator 17

2.5.1.2 ขั้นตอนการทำงานของ ZigBee end-device 17

2.5.2 การรักษาความปลอดภัย 18

2.6 การประยุกต์ใช้ ZigBee 18

2.7 XBee 19

2.7.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของ XBee-PRO (XBee-PRO Specification) 20

2.7.2 ลักษณะทางกายภาพของโมดูล XBee-PRO 21

2.7.3 การกำหนด pin ของโมดูล XBee-PRO 21

2.7.4 การติดต่อสื่อสารของ ZigBee ผ่านทางพอร์ตอนุกรม 23

2.7.4.1 UART การไหลของข้อมูล 23

2.7.5 แผนภาพการส่งข้อมูลภายใน XBee 24

2.7.6 การส่งข้อมูลของ XBee 24

2.7.7 การเชื่อมต่อเครือข่ายของ XBee/XBee-PRO (XBee/XBee-PRO Networks) 25

2.7.7.1 NonBeacon 25

2.7.7.2 NonBeacon (w/Coordinator) 25

2.7.7.3 Association 26

2.7.7.4 Coordinator Power-up 27

2.7.7.5 End Device Power-up 28

2.7.8 การทำงานของโมดูล XBee 30

บทที่ 3 การออกแบบโครงงาน 31

3.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์ 31

3.1.1 วงจรตรวจสอบอุณหภูมิ 31

3.1.2 วงจรการตรวจสอบการผ่านเข้าออกบ้านด้วยเซนเซอร์แม่เหล็ก 34

3.2 การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ 36

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง 37

4.1 การทดลอง 37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)


| เรื่อง | หน้า |
|---|---|
| 4.1.1 แผงวงจรเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ | 37 |
| 4.1.2 แผงวงจรเซนเซอร์แม่เหล็ก | 38 |
| 4.1.3 แผงวงจรภาครับ | 39 |
| 4.1.4 ส่วนแสดงผลภาครับ | 39 |
| 4.2 ผลการทดลอง | 40 |
| 4.2.1 ผลการทดลองแผงวงจรภาคส่งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ | 40 |
| 4.2.2 ผลการทดลองแผงวงจรภาคส่งวงจรเซนเซอร์แม่เหล็ก | 42 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง | 45 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 45 |
| 5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบระหว่างการดำเนินโครงงาน | 45 |
| 5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อในอนาคต | 45 |
| บรรณานุกรม | 46 |
| ภาคผนวก ก. Manual XBee/XBee-PRO OEM RF Modules | 49 |
| ภาคผนวก ข. ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F4550 | 71 |
| ภาคผนวก ค. โครงสร้างภาษา C ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน | 81 |
| ภาคผนวก ง. รายละเอียดวงจร | 86 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

**เรื่อง** **หน้า**


**รูปที่ 1.1** ตัวอย่างการนำ ZigBee และเซนเซอร์ไปใช้ภายในบ้าน 1

**รูปที่ 2.1** รูปแบบโปรโตคอลของ ZigBee 5

**รูปที่ 2.2** IEEE 802.15.4 Data Frame Format (รูปแบบเฟรมข้อมูล) 6

**รูปที่ 2.3** เปรียบเทียบช่วงความถี่ของมาตรฐานต่างๆ 8

**รูปที่ 2.4** IEEE 802.15.4 LR-WPAN star topology (เครือข่ายแบบสตาร์) 9

**รูปที่ 2.5** IEEE 802.15.4 peer-to-peer network topology (การเชื่อมต่อแบบ peer-to-peer) 10

**รูปที่ 2.6** IEEE 802.15.4 cluster-tree network topology (การเชื่อมแบบโครงสร้างต้นไม้) 11

**รูปที่ 2.7**โครงสร้างแบบ Superframe ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 11

**รูปที่ 2.8** เครือข่ายแบบสตาร์ 12

**รูปที่ 2.9** เครือข่ายแบบต้นไม้ 13

**รูปที่ 2.10** เครือข่ายแบบเมช 14

**รูปที่ 2.11** โครงสร้างสถาปัตยกรรมของ สแตกโปรโตคอล ZigBee 17

**รูปที่ 2.12** โมดูลอุปกรณ์ ZigBee-PRO 19

**รูปที่ 2.13** ลักษณะทางกายภาพของโมดูล XBee-PRO 21

**รูปที่ 2.14** ขนาดและการจัดขาของโมดูล XBee-PRO 21

**รูปที่ 2.15** ระบบ Data Flow Diagram ในอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ UART 23

**รูปที่ 2.16** แพ็กเกตข้อมูล UART 0x1F (31 ในเลขฐาน 10) ถูกส่งผ่านโมดูล RF 23

**รูปที่ 2.17** แผนภาพการส่งข้อมูลภายใน XBee 24

**รูปที่ 2.18** โหมดต่างๆของการทำงานของ XBee 30

**รูปที่ 3.2** วงจรแหล่งจ่ายไฟ 31

**รูปที่ 3.2** วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ และจอแสดงผล LCD 32

**รูปที่ 3.3** วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และโมดูล ZigBee 33

**รูปที่ 3.4** วงจรสมบูรณ์ของวงจรเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ 33

**รูปที่ 3.5** บล็อกไดอะแกรม ของการส่งผ่านข้อมูล 34

**รูปที่ 3.6** วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์แม่เหล็ก 35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป (ต่อ)

**เรื่อง** **หน้า**


**รูปที่ 3.7** วงจรสมบูรณ์ของวงจรเซนเซอร์แม่เหล็ก 35

**รูปที่ 4.1** แผงวงจรส่วนภาคส่งและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ 37

**รูปที่ 4.2** แผงวงจรส่วนภาคส่งและเซนเซอร์แม่เหล็ก 38

**รูปที่ 4.3** แผงวงจรของส่วนวงจรภาครับ 39

**รูปที่ 4.4** โปรแกรม Xbee Console 40

**รูปที่ 4.5** ผลการทดลองแผงวงจรภาคส่งและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ 41

**รูปที่ 4.6** ผลการทดลองรับค่าอุณหภูมิที่ฝั่งภาครับ 42

**รูปที่ 4.7** แผงวงจรเซนเซอร์แม่เหล็กขณะทำการส่งข้อมูล 43

**รูปที่ 4.8** ผลการทดลองรับค่าสถานะจากเซนเซอร์แม่เหล็ก 43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

**เรื่อง** **หน้า**


**ตารางที่ 1.1** แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินโครงงาน 2

**ตารางที่ 2.1** IEEE 802.15.4 frequency bands and data transfer rates 7

**ตารางที่ 2.2** การเปรียบเทียบมาตรฐานการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย 15

**ตารางที่ 2.3** คุณสมบัติของ XBee-PRO 20

**ตารางที่ 2.4** ตารางการกำหนดขาของ XBee-PRO 22

**ตารางที่ 2.5** Terms and Definition 25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบัน มนุษย์เริ่มหันมาสนใจความเป็นอยู่ที่สะดวกสบายมากยิ่งขึ้น ต้องการความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น อุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายก็เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่ง ที่เรานิยมนำมาใช้ในการเพิ่มความสะดวกสบายและความปลอดภัยภายในที่พักอาศัย แต่ในปัจจุบัน อุปกรณ์ประเภทนี้ยังมีราคาแพง และใช้พลังงานสูง โครงงานนี้จึงจะทำการพัฒนาอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายภายในบ้านโดยใช้ ZigBee ซึ่งเป็นอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่ใช้พลังงานต่ำ ราคาถูก เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในการเพิ่มความสะดวกสบายและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

**รูปที่ 1.1** ตัวอย่างการนำ ZigBee และเซนเซอร์ไปใช้ภายในบ้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษา วิเคราะห์และออกแบบการรับส่งข้อมูลด้วยโปรโตคอลของ ZigBee โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์บนบอร์ดทดลองได้

1.2.2 เพื่อศึกษาการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ สแตกโปรโตคอลของ ZigBee ได้

1.2.3 เพื่อพัฒนาระบบรักษาความปลอดภัยภายในบ้านโดยใช้อุปกรณ์ไร้สาย ที่ใช้พลังงานต่ำ และประหยัดค่าใช้จ่าย

1.2.4 เพื่อเพิ่มความสะดวกสบายในการควบคุมอุปกรณ์ภายในบ้าน

## 1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 สามารถวิเคราะห์และออกแบบระบบที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ ZigBee

1.3.2 สามารถออกแบบบอร์ดที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับโมดูล ZigBee ได้

1.3.3 สามารถทำการเชื่อมต่อและรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ ZigBee ได้

1.3.4 ระบบสามารถทำงานได้จริงภายในบ้าน ตรวจสอบอุณหภูมิ และควบคุมการผ่านเข้าออกโดยใช้เซนเซอร์ไร้สายร่วมกับโมดูล ZigBee ได้

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

**ตารางที่ 1.1** แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินโครงงาน

| ID | ขั้นตอนการดำเนินงาน | 2008 | | | | | | | 2009 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Feb |
| 1 | กำหนดขอบเขตและปัญหา | | | | | | | | | |
| 2 | ศึกษา วิเคราะห์ และ ออกแบบชิ้นงาน | | | | | | | | | |
| 3 | เชื่อมต่อเซนเซอร์และอุปกรณ์ ZigBee | | | | | | | | | |
| 4 | ทดสอบและแก้ไขข้อบกพร่อง | | | | | | | | | |
| 5 | จัดทำเอกสารและนำเสนอโครงงาน 1 | | | | | | | | | |
| 6 | เชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมดเป็นเครือข่าย | | | | | | | | | |
| 7 | ทดสอบการรับส่งข้อมูล | | | | | | | | | |
| 8 | ติดตั้งและทดลองใช้จริงภายในบ้าน | | | | | | | | | |
| 9 | จัดทำเอกสารและนำเสนอโครงงาน 2 | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# ทฤษฎีและเทคโนโลยี ZigBee

## 2.1 เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายระยะสั้นด้วยคลื่นวิทยุ

เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ต้องการกำลังส่งไม่สูงมากนัก อุปกรณ์มีขนาดเล็กกะทัดรัด สะดวกในการติดตั้งและใช้งาน สามารถใช้งานได้ในบริเวณที่มีคลื่นความถี่วิทยุหนาแน่น ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การเพิ่มขนาดของเครือข่ายทำได้โดยสะดวก ลงทุนต่ำกว่าการสื่อสารแบบใช้สาย แต่มีข้อจำกัดคือโพรโตคอลที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารต้องมีระบบการจัดการที่ดีเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาความซับซ้อนของระบบเครือข่าย ระยะทางที่สามารถรับส่งได้มีจำกัด ถ้าจะส่งข้อมูลในระยะไกลก็ต้องใช้อุปกรณ์เพิ่มเติมเป็นจำนวนมากเพื่อให้ข้อมูลไปถึงปลายทางได้อย่างถูกต้อง

เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุระยะสั้นนี้สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน เช่น ด้านสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างคือ ระบบการตรวจสอบการเกิดไฟป่า ระบบตรวจสอบสภาพดิน ด้านสุขภาพ ตัวอย่างคือ การตรวจสอบอัตราการเต้นของหัวใจ ด้านการค้าอุตสาหกรรม ตัวอย่างคือ การตรวจสอบการทำงานของเครื่องจักร การสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุในระยะสั้นนี้เมื่อแบ่งตามความเร็วในการส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย (Throughput) จะแบ่งได้เป็นสามประเภทคือ Low , Medium และ High , Low Throughput มีความเร็ว 20-40, 250 Kbit/s ใช้งานในด้านการตรวจจับ (sensing) การติดตาม (tracking) และการเฝ้าดู (monitoring) ตัวอย่างเช่น Wireless Sensor Network ซึ่งอยู่บนมาตรฐาน IEEE802.15.4 ส่วน Medium throughput มีความเร็วในการส่งข้อมูล 1-11 Mbit/s ได้แก่ เทคโนโลยี Bluetooth, IEEE802.11b WLAN, Home RF, Personal Area Network (PAN) สำหรับ High throughput มีความเร็วในการส่งข้อมูล 50-100 Mbit/s ได้แก่เทคโนโลยี IEEE802.11a

## 2.2 หลักการพื้นฐานของ ZigBee

ZigBee เป็นเทคโนโลยีไร้สายที่ร่วมกันสื่อสารข้อมูลผ่านเซ็นเซอร์ขนาดเล็กจิ๋ว จำนวนเป็นพันๆ หมื่นๆชิ้นที่ฝังอยู่ตามส่วนต่างๆ ในอาคาร สำนักงาน โรงงาน หรือแม้แต่ในบ้าน ชื่อ ZigBee ได้มาจากพฤติกรรมการสื่อสารของผึ้ง โดยผึ้งจะบินแบบซิกแซ็ก และจะให้ข้อมูลข่าวสารระหว่างผึ้งด้วยกัน ที่เกี่ยวกับ ตำแหน่งระยะทาง และทิศทางของอาหารที่พวกมันกำลังหาอยู่ ZigBee ถูกสร้างขึ้นในการทำระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล(WPAN) อยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมาตรฐานนี้ใช้งานสำหรับการสื่อสารความเร็วต่ำและมีช่วงการใช้งานจากแบตเตอรี่ หลายเดือน หรือหลายปีและมีความซับซ้อนน้อยมาก

การทำงานของ ZigBee จะเป็นการรับ-ส่งคลื่นสัญญาณข้อมูล ผ่านชิปเล็กจิ๋วนี้จุดต่อจุดไปเรื่อยๆจนถึงปลายทางที่ต้องการดาวน์โหลดข้อมูลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ข้อมูลที่ได้อาจจะเป็นการวัดอุณหภูมิ การเคลื่อนไหวของสิ่งมีชีวิต จับปริมาณมลพิษในอากาศ ปริมาณน้ำ ท่อแก๊สโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์หรือแบตเตอรี่ขนาดเล็กที่กินไฟน้อยมาก

ลักษณะของ ZigBee คือมีทางเข้าช่องสัญญาณโดยการใช้ Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA - CA) หรือมีทางเข้าช่องสัญญาณหลายๆ ทางเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกัน ระยะทางโดยทั่วไปประมาณ 50 เมตร มี topology แบบ star , peer-to-peer, mesh มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่ถูกกำหนดไว้ใน ชั้น Physical layer มีอยู่ 3 ความถี่คือ 2.4-2.4835 GHz bit rate 250 kb/s มีอยู่ 16 ช่องสัญญาณ คือช่องสัญญาณที่ 11-26 , 868-870 MHz bit rate 20 kb/s มีอยู่ 1 ช่องสัญญาณ คือช่องสัญญาณที่ 0 และ 902-928 MHz bit rate 40 kb/s มีอยู่ 10 ช่องสัญญาณ คือ ช่องสัญญาณที่ 1-10 โดยความถี่ 2.4-2.4835 GHz สามารถใช้งานได้ทั่วโลก และความถี่ 868-870 MHz และ 902-928 MHz ใช้งานได้ในพื้นที่ของอเมริกาเหนือ , ยุโรป , ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์

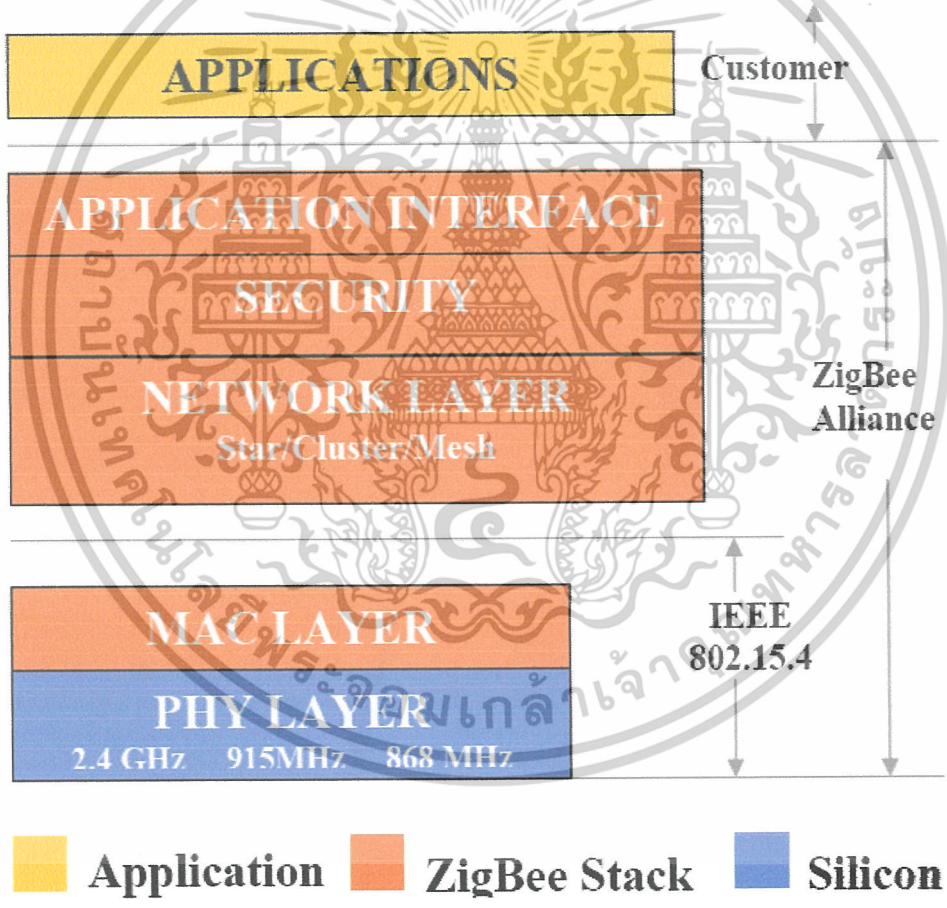
ชนิดอุปกรณ์ของ ZigBee มีอยู่ 2 ชนิดคือ แบบ Physical Device และ Logical Device แบบ Physical Device มี 2 ประเภท คือ Full Function Device : FFD เป็นเราเตอร์ที่เป็นสื่อกลางในการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์อื่นๆ ใช้พลังงานจาก power line ทำงานได้ในทุก Topology และสามารถทำเป็นจุดเชื่อมต่อกันได้และ Reduced Function Device : RFD เหมาะแก่การเชื่อมต่อภายในเครือข่าย ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ไม่สามารถถ่ายทอดข้อมูลจากอุปกรณ์อื่นๆ ได้ ทำได้ง่ายในเครือข่ายที่เป็นแบบ star แบบ Logical Device มี 3 ประเภท คือ ZigBee Coordinators เป็นจุดที่ประสานเชื่อมต่อกัน ทำหน้าที่ในการจัดเก็บข้อมูลในเครือข่าย ZigBee Routers ทำหน้าที่จัดการเส้นทางของข้อความที่ส่งผ่านภายในโครงข่ายระหว่างคู่ของโนดใด ๆ และZigBee End Devices เป็นโนดที่อยู่ในส่วนของผู้ใช้งาน โดยสามารถเป็นได้ทั้งแบบ RFD และ FFD

การประยุกต์ใช้งาน ZigBee นั้นจะแบ่งแยกตามประเภทของข้อมูลข่าวสาร ที่มีอยู่ 3 แบบ คือ ข้อมูลแบบ Periodic ข้อมูลเป็นช่วงเวลา โปรแกรมสามารถควบคุมอัตราการส่ง และตัวตรวจจับสัญญาณกระตุ้นเช็คข้อมูลและทำให้ข้อมูลไม่เคลื่อนไหว ใช้สำหรับ เซนเซอร์ และ มิเตอร์ ข้อมูลแบบ intermittent เป็นลักษณะที่มีการส่งผ่านข้อมูลเมื่อมีการใช้งาน เช่น สวิตซ์ไฟ และข้อมูลแบบ Repetitive low latency ใช้ในงานที่ต้องการ latency น้อย ๆ โดยการสื่อสารจะใช้วิธีจัดสรรช่องเวลาและสามารถใช้กลไกแบบ GTS เพื่อรับประกันคุณภาพของการบริการ นำไปใช้ในงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

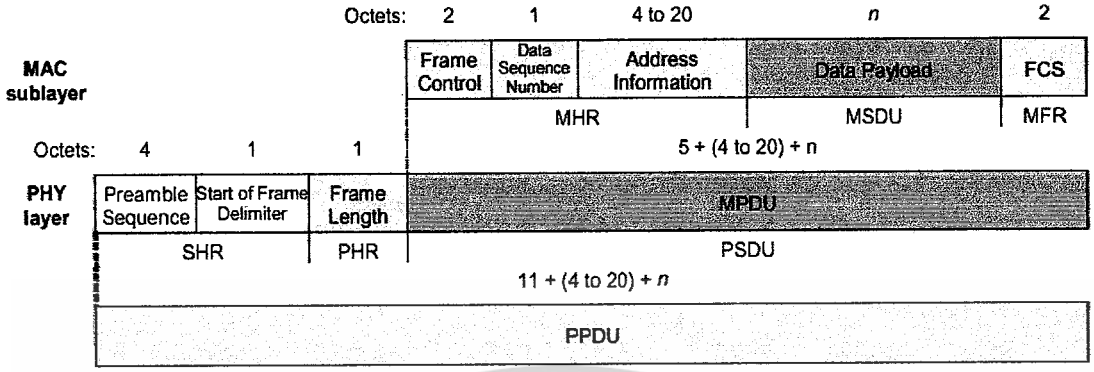
## 2.3 มาตรฐาน IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 เป็นมาตรฐานของระดับชั้น Physical (PHY) และ Media Access Control (MAC) สำหรับอุปกรณ์ส่งข้อมูลไร้สายที่ต้องการความเร็วในการส่งข้อมูลต่ำ ออกแบบมาเพื่อให้ใช้พลังงานน้อย สำหรับอุปกรณ์ที่มีราคาไม่สูง การส่งข้อมูลมีความเชื่อถือได้เพราะมีความถูกต้องสูง และสามารถใช้ได้ทั้งในเครือข่ายแบบ star และ peer-to-peer มีระยะทางที่สามารถส่งข้อมูลได้ประมาณ 10 - 75 เมตร ขึ้นอยู่กับกำลังที่ใช้ในการส่งข้อมูลและสภาพแวดล้อมตอนที่ส่งและสามารถเลือกความถี่ที่ใช้ได้สามช่วงเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน มีการเข้ารหัสข้อมูลเพื่อความปลอดภัยของข้อมูลที่จะส่งโดยใช้ระบบ Advance Encryption system (AES)




**รูปที่ 2.1** รูปแบบโปรโตคอลของ ZigBee [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.2** IEEE 802.15.4 Data Frame Format (รูปแบบเฟรมข้อมูล) [26]

### 2.3.1 IEEE 802.15.4 Physical Layer

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่ถูกกำหนดไว้ใน ชั้น Physical layer มีอยู่ 3 ความถี่คือ 2.4-2.4835 GHz bit rate 250 kb/s มีอยู่ 16 ช่องสัญญาณ คือช่องสัญญาณที่ 11-26 , 868-870 MHz bit rate 20 kb/s มีอยู่ 1 ช่องสัญญาณ คือช่องสัญญาณที่ 0 และ 902-928 MHz bit rate 40 kb/s มีอยู่ 10 ช่องสัญญาณ คือ ช่องสัญญาณที่ 1-10 โดยความถี่ 2.4-2.4835 GHz สามารถใช้งานได้ทั่วโลก และความถี่ 868-870 MHz และ 902-928 MHz ใช้งานได้ในพื้นที่ของอเมริกาเหนือ , ยุโรป , ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ ระยะทางในการส่งขอมูลอยู่ที่ 10 ถึง 75 เมตร ขึ้นอยู่กับกำลังงานและสิ่งแวดล้อม ในชั้นนี้จะใช้วิธี *Direct Sequence Spread spectrum (DSSS)* โดยย่านความถี่ 2.4 GHz โดยใช้การมอดูเลชั่นแบบ O-QPSK ความกว้างของช่องสัญญาณ 2-5 MHz ส่วนย่านความถี่ 868-900 MHz ใช้การมอดูเลชั่นแบบ BPSK กลไกในการเข้าถึงช่องสัญญาณทั้งสองอยู่ในมาตรฐาน 802.15.4 สำหรับเครือข่าย non-beacon ซึ่งเป็นมาตรฐาน ALOHA CSMA-CA เป็นการสื่อสารที่มีการแจ้งเมื่อได้รับข้อมูล ในเครือข่าย beacon-enable โครงสร้างของ super frame ใช้สำหรับควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ ซึ่งตั้งขึ้นโดย network coordinator เพื่อใช้ในการส่ง beacon ในช่วงเวลาที่กำหนด และมี 16 time slots ระหว่าง beacon เพื่อใช้ในการช่วงชิงในการเข้าถึงช่องสัญญาณในแต่ละ time slot อย่างไรก็ตาม network coordinator สามารถ บอกได้มากถึง 7 time slots ในแต่ละช่วงเวลาของ beacon เพื่อคุณภาพของการให้บริการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.1** IEEE 802.15.4 frequency bands and data transfer rates

| Band (MHz) | Frequency Band | Bit Rate (Kbps) | Symbol Rate (Kbps) | DSS Spreading Parameter | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Modulation Technique | Chip Rate |
| 868 | 868.0 - 868.6 MHz | 20 | 20 | BPSK | 300 kcps |
| 915 | 902.0 – 928.0 MHz | 40 | 40 | BPSK | 200 kcps |
| 2400 | 2400 – 2483.5 MHz | 250 | 62.5 | O-QPSK | 2 mcps |

**2.3.2 IEEE 802.15.4 MAC Layer**

ในชั้นของ MAC สามารถรองรับขนาดแพกเก็จได้สูงสุด 128 ไบต์ ภายในประกอบด้วย payload ขนาด 104 ไบต์ไว้ และมี address ของแต่ละ Node ที่มีความยาว 64 บิต และ16 บิต (รองรับได้ 65,000 nodes) ทั้งนี้ในชั้น MAC จะมีทั้งส่วนที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายและไม่เกี่ยวข้องกับโครงข่าย ที่มี beacons ในโครงสร้างของ super frame สำหรับการซิงโครไนซ์ และยังมีกลไกแบบ GTS (Guaranteed Time Slot) สำหรับการสื่อสารที่มีความสำคัญสูง ส่วนการเข้าใช้ช่องสัญญาณจะใช้วิธี *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA-CA)*

ใน MAC sub layer จะทำหน้าที่ 2 อย่างคือ MAC data service และ MAC management service โดยมีคุณสมบัติต่างๆดังนี้

- Beacon management
- Channel access
- GTS management
- Frame validation
- Acknowledgement frame delivery
- Association and Disassociation

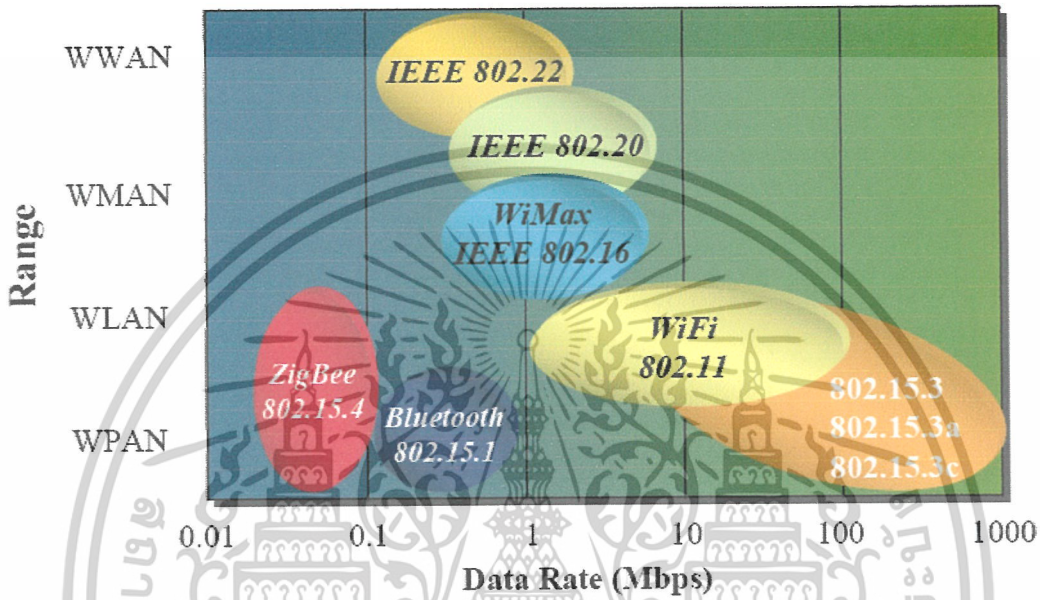
ระบบเนตเวิร์กแบบ LR-WPAN สามารถที่จะเลือกใช้ Super Frame Structure ได้โดย รูปแบบของ Super Frame จะถูกกำหนดโดย PAN Coordinator

**Super Frame** จะถูกแบ่งออกเป็น 16 slot ซึ่งในการส่ง Beacon จะส่งไปกับเฟรมแรกของ Super Frame นี้ และหาก Coordinator ไม่ต้องการใช้ Super Frame Structure Coordinator จะไม่ทำการส่ง Beacon มากับเฟรมแรก

**Beacon** จะใช้ในการ Synchronize กับอุปกรณ์อื่นๆ ใช้ในการระบุ PAN และ ใช้อธิบายโครงสร้างของ Super Frame การทำงานโดยใช้ Super Frame นั้นจะมีสองสถานะคือ Active และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Inactive ในการทำงานแบบ Inactive นั้น Coordinator จะไม่ติดต่อกับ PAN และจะปรับตัวเองเข้าสู่ Low-Power mode ส่วนในสถานะ Active นั้นจะถูกแบ่งออกเป็นสองช่วงเวลา คือ Contention Access Period (CAP) และ Contention Free Period (CFP)



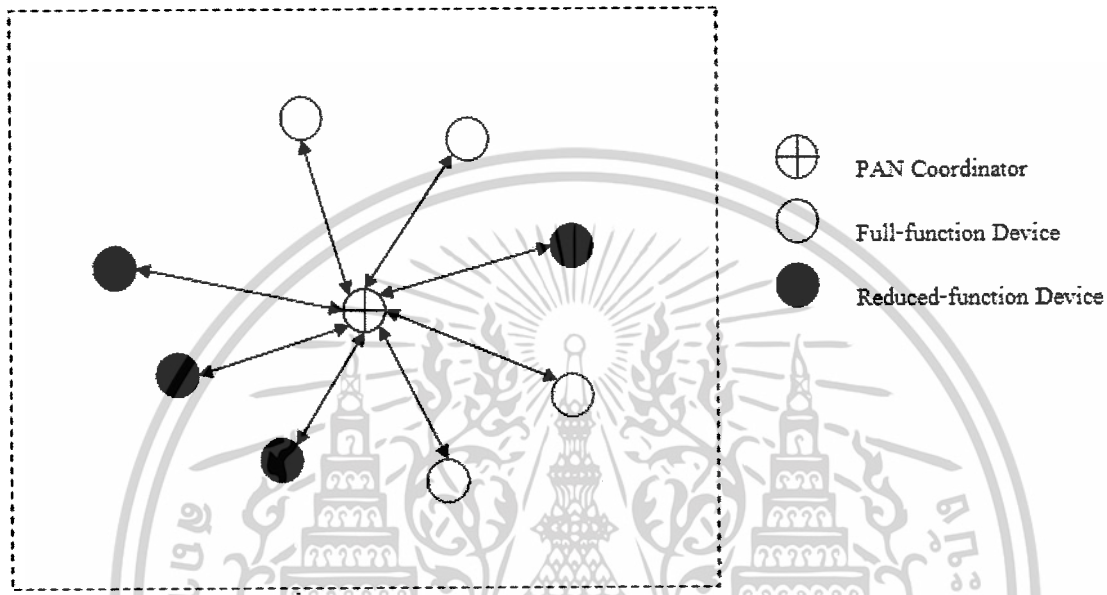

**รูปที่ 2.3** เปรียบเทียบช่วงความถี่ของมาตรฐานต่างๆ [25]

**2.3.3 IEEE 802.15.4 Piconets**

ชั้น MAC Layer มาตรฐาน IEEE 802.15.4 จัดเตรียมการเพื่อ support ระหว่างสอง wireless network topology เช่น การเชื่อมต่อแบบ star และ peer-to-peer โดยสำหรับการใช้งานในบ้านนั้นจะเป็นแบบ star และในทางอุตสาหกรรมและธุรกิจจะใช้การเชื่อมต่อแบบ peer-to-peer สำหรับโครงสร้างแบบ star การเชื่อมต่อภายในเครือข่าย(network) จะถูกควบคุมด้วย PAN coordinator เพียงอันเดียว โดย PAN coordinator นี้จะทำหน้าที่เป็นเหมือนผู้ดูแลเครือข่าย (network master) ทำหน้าที่ initialize เครือข่าย จัดการ node ในเครือข่ายและเก็บข่าวสารของ node ในเครือข่าย เพียงอุปกรณ์แบบ *FFD (full-function device)* สามารถส่ง beacon frame ก็อาจกลายเป็น PAN coordinator ได้ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์แบบ *RFDs (Reduced-function device)* อาจมีส่วนร่วมในเครือข่ายแบบ star ได้ ยิ่งกว่านั้น เครือข่ายแบบ star จะทำงาน independent กับเครือข่ายอื่นๆใน IEEE 802.15.4 FFD อาจจะสร้าง เครือข่าย star หลังจากทำ scan channel ถ้า FFD ไม่สามารถตรวจพบการส่ง beacon frame และเริ่มต้นทำหน้าที่ PAN coordinator โดยการส่ง beacon frame ที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

unique network identifier หรือ ID ทุกอุปกรณ์ที่มีส่วนร่วมอยู่ใน LR-WPANs ต่างใช้ IEEE 64-bit Address ที่ unique เมื่อมีอุปกรณ์ตัวหนึ่งเริ่มทำการส่ง beacon frame อุปกรณ์อื่นก็อาจจะมีการติดต่อเข้าเพื่อขอมีส่วนร่วมโดยส่ง association message เข้ามาที่ ad hoc network




**รูปที่ 2.4** IEEE 802.15.4 LR-WPAN star topology (เครือข่ายแบบสตาร์) [26]

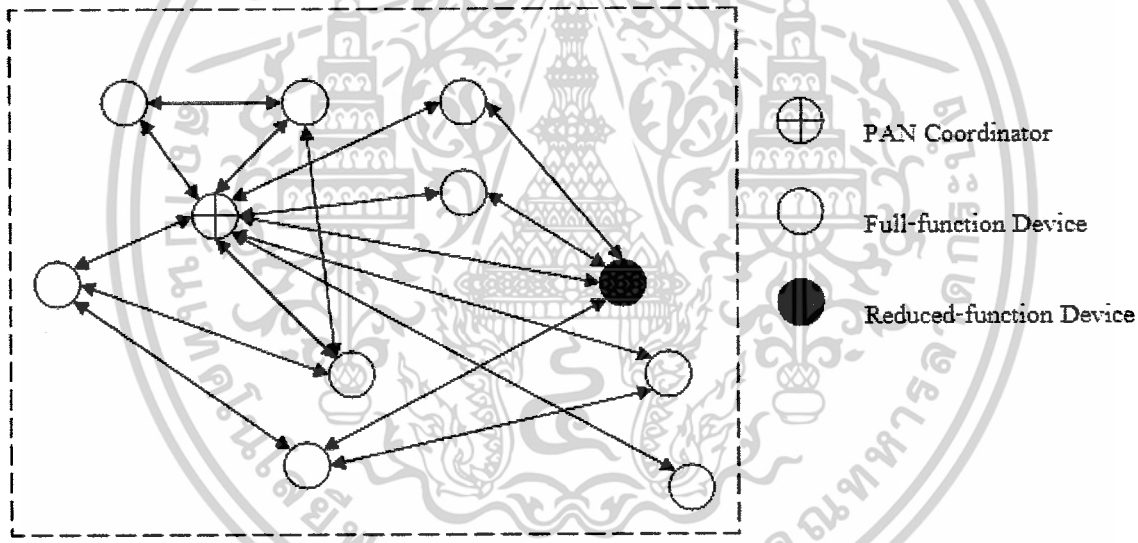
เครือข่ายแบบ Peer-to-peer ซึ่งเป็นการส่งผ่านข้อมูลในเครือข่ายอุปกรณ์ จะอนุญาตให้อุปกรณ์ FFD ติดต่อกับ FFD อื่นที่อยู่ภายในอาณาเขตของตัวมันเองและส่ง message ไปยัง FFD ที่อยู่นอกเขตอีกด้วย ซึ่งเครือข่ายแบบ peer-to-peer นี้สามารถทำให้ ad hoc wireless network ซับซ้อนขึ้นด้วยการเพิ่มการครอบคลุมพื้นที่เนื่องจาก multihop และ mesh network จะกำหนดคุณสมบัติที่อนุญาตในการส่ง message ส่วน RFDs อาจจะสามารถเข้ามาร่วมในเครือข่าย peer-to-peer แต่จะไม่สามารถทำ relay ได้

อีกหนึ่งชนิดของเครือข่ายแบบ peer-to-peer เครือข่าย cluster-tree ซึ่งจะเป็นการรวมกันของแบบ Star และ Mesh เพื่อที่จะได้ประโยชน์จากทั้งสองแบบสามารถรองรับจำนวนของ node และสามารถใช้งานจากแบตเตอรี่ได้นาน โดยเครือข่ายชนิดนี้จำนวนของอุปกรณ์เครือข่ายจะอยู่บนหลักการ "*cluster heads*" โครงสร้างนี้จะจัดหา path ให้กับอุปกรณ์เครือข่ายชนิดต่างๆและสามารถมีการขยายเครือข่ายออกไปให้กว้างขึ้น ในหลายๆกรณีเครือข่ายแบบ peer-to-peer จะเลือกอุปกรณ์ตัวหนึ่งให้ทำหน้าที่ PAN coordinator ระหว่างการสร้าง เครือข่ายแบบ peer-to-peer จะต้องมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

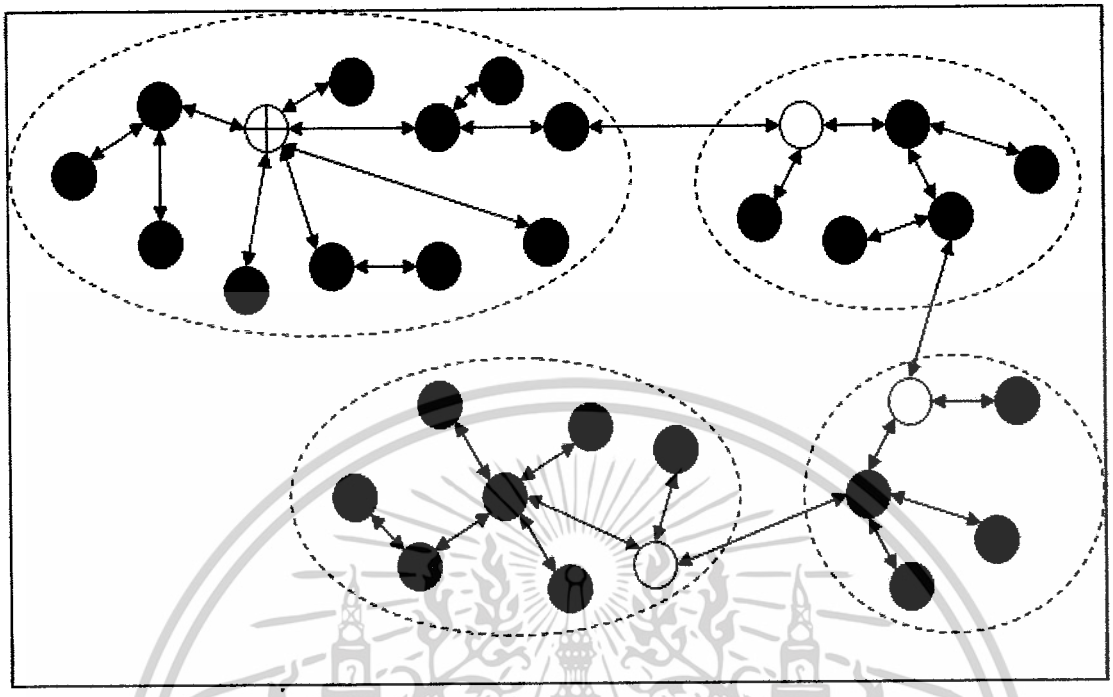
ตรวจสอบแล้วว่าการทำงานต่างๆนั้นรองรับการทำงานและ service ของอุปกรณ์เครือข่ายทำให้สามารถทำงานได้

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 รองรับโครงสร้าง superframe ที่ดูแลจัดการโดย PAN coordinator รูปแบบของ superframe โดย superframe เริ่มจากการส่ง beacon frame ที่ใช้โดยอุปกรณ์เพื่อ synchronize เครือข่าย , จัดหา network ID , และข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของ superframe สำหรับ superframe นี้จะแบ่งออกเป็น 16 timeslots เพื่อจัดเตรียมไว้สำหรับ *contention access period (CAP)* การใช้ CSMA/CA , อุปกรณ์เครือข่ายพยายามที่จะเชื่อมต่อกันด้วย PAN coordinator ระหว่างคาบเวลานี้ ผู้ประสานงานเครือข่าย (network coordinator) สามารถที่จะใช้ส่วนแบ่งของ superframe เพื่อทำการ request อุปกรณ์เครือข่ายได้ และ *guaranteed timeslots (GTS)* จะอยู่ส่วนท้ายของ superframe และจาก CAP

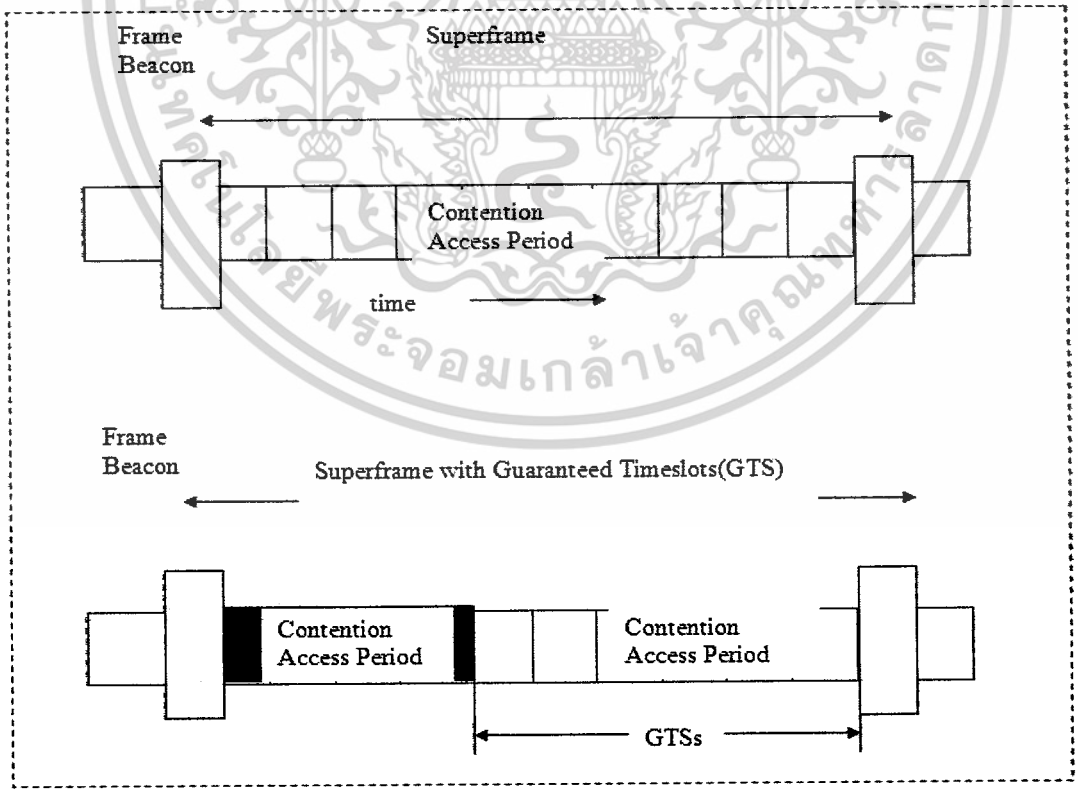



**รูปที่ 2.5** IEEE 802.15.4 peer-to-peer network topology (การเชื่อมต่อแบบ peer-to-peer) [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.6** IEEE 802.15.4 cluster-tree network topology (การเชื่อมแบบโครงสร้างต้นไม้) [26]




**รูปที่ 2.7** โครงสร้างแบบ Superframe ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

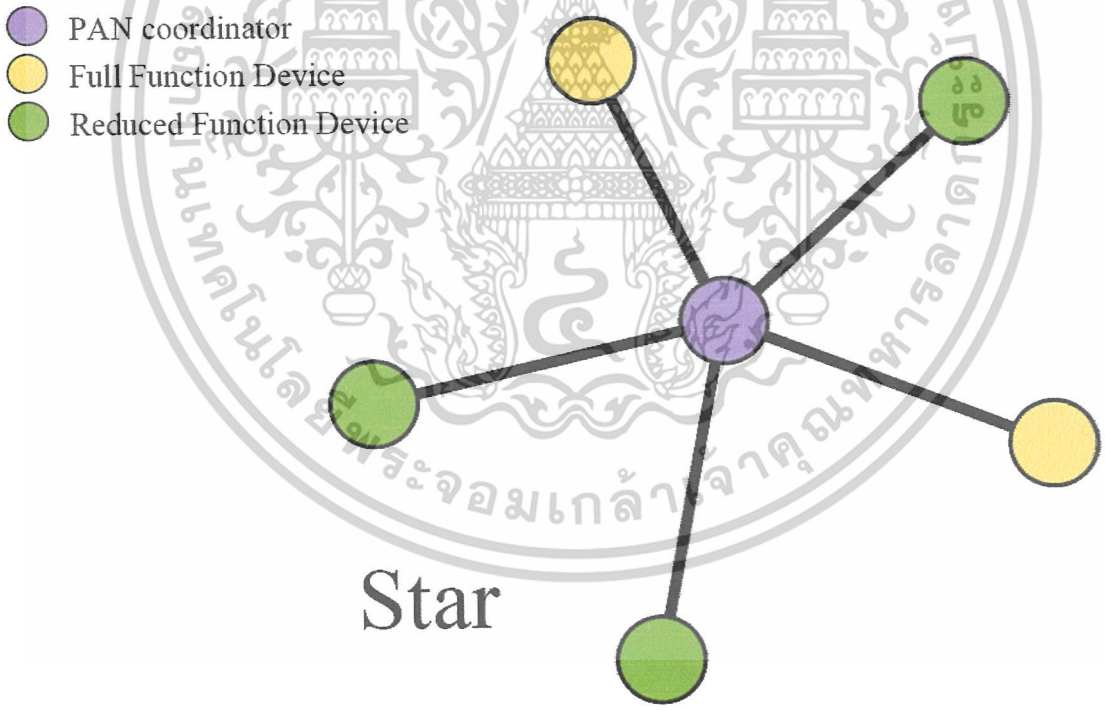
**2.3.4 การตั้งค่าเครือข่าย**

เครือข่ายไร้สายโดยใช้โปรโตคอล ZigBee สามารถตั้งค่าได้หลายแบบ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นหมวดใหญ่ ๆ ได้ 2 แบบ คือ จุดเชื่อมต่อและอุปกรณ์ปลายทาง

อุปกรณ์เชื่อมต่อของโปรโตคอล ZigBee เป็นอุปกรณ์ประเภท FFD ที่รวมการทำงานของโปรโตคอล ZigBee ไว้เป็นจำนวนมาก ส่วนอุปกรณ์ปลายทางสามารถเป็นได้ทั้ง FFD และ RFD ซึ่ง RFD เป็นอุปกรณ์ที่เล็กและง่ายที่สุดของโปรโตคอล ZigBee ที่มีการทำงานของโปรโตคอล ZigBee น้อยมาก

**2.3.4.1 เครือข่ายแบบสตาร์ (Star Network)**

ประกอบด้วยจุดเชื่อมต่อโปรโตคอล ZigBee 1 จุด และอุปกรณ์ปลายทางหลาย ๆ ชิ้นในเครือข่ายแบบสตาร์ อุปกรณ์ปลายทางทั้งหมดจะสื่อสารกับอุปกรณ์เชื่อมต่อเท่านั้น ถ้าอุปกรณ์ปลายทางหนึ่งต้องการสื่อสารกับอุปกรณ์ปลายทางอื่น ๆ ต้องส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อเท่านั้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ อุปกรณ์เชื่อมต่อทำหน้าที่ส่งข้อมูลไปยังผู้รับ

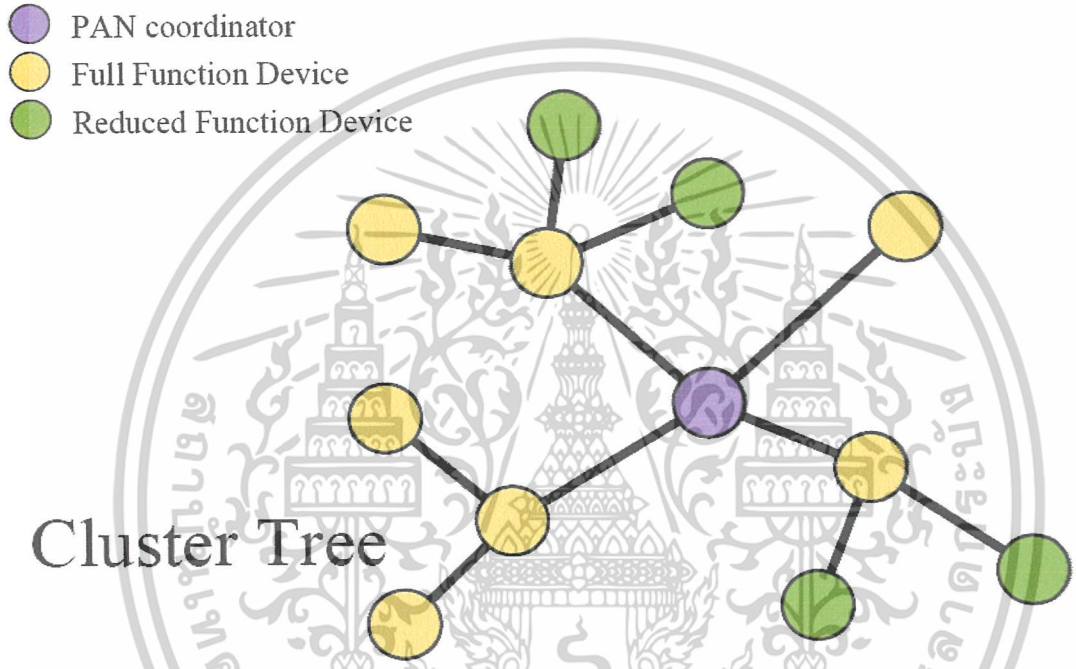



**รูปที่ 2.8** เครือข่ายแบบสตาร์ [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.3.4.2 เครือข่ายแบบต้นไม้ (Cluster Tree)**

ในเครือข่ายนี้อุปกรณ์ปลายทางจะสามารถเชื่อมต่อได้กับอุปกรณ์เชื่อมต่อหรือ ZigBee โปรโตคอลเราเตอร์ เราเตอร์ทำหน้าที่ 2 ประเภท คือ เพิ่มจำนวนโนดที่สามารถเชื่อมต่ออยู่บนเครือข่ายและขยายขนาดของเครือข่าย เนื่องจากเราเตอร์จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลไปยังจุดต่างๆของเครือข่ายได้โดยที่ อุปกรณ์ปลายทางไม่จำเป็นต้องอยู่ในระยะการส่งสัญญาณวิทยุ

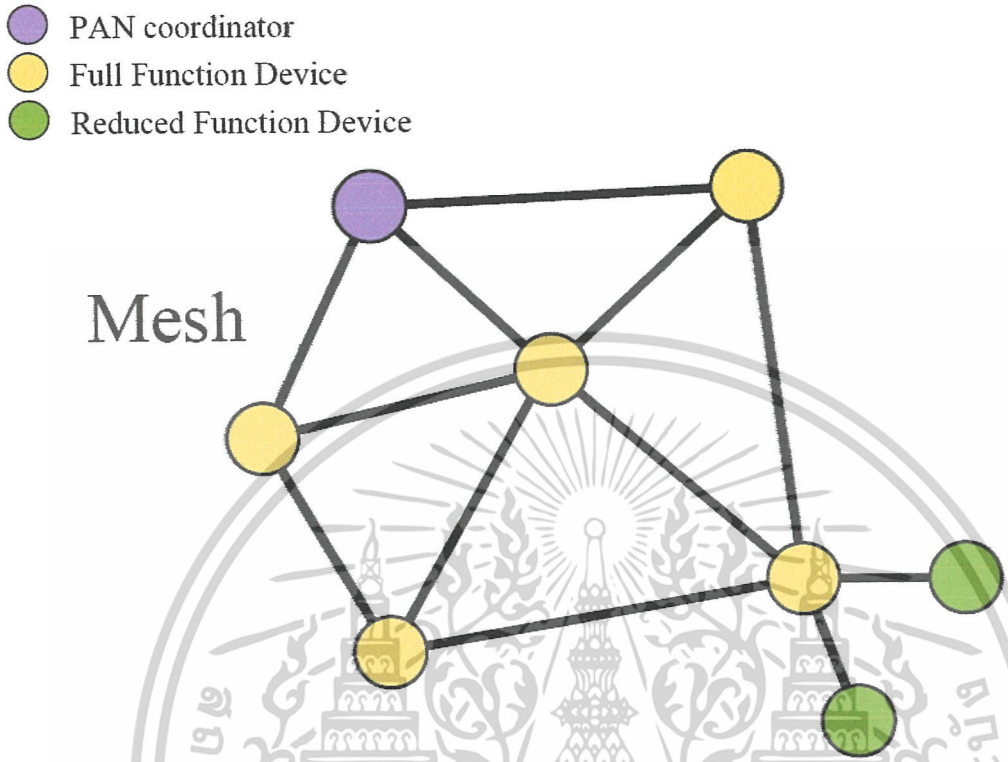



**รูปที่ 2.9** เครือข่ายแบบต้นไม้ [26]

**2.3.4.3 เครือข่ายแบบเมช (Mesh Network)**

เครือข่ายแบบเมชใช้กับเครือข่ายแบบต้นไม้ยกเว้นอุปกรณ์ FFD สามารถส่งข้อมูลไปยัง FFD อื่นได้โดยตรง ไม่ต้องผ่านโครงสร้างต้นไม้ ข้อมูลที่ส่งไปยัง RFD จะต้องผ่านอุปกรณ์ RFD ก่อนหน้า ข้อดีของการเชื่อมต่อแบบนี้คือ ช่วยลดอัตราความล่าช้าของการส่งและเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.10** เครือข่ายแบบเมช [26]

เครือข่ายแบบต้นไม้และเครือข่ายแบบเมชมีอีกชื่อว่า เครือข่ายหลายจุด (Multi-hop) ขณะที่เครือข่ายแบบสตาร์เป็น เครือข่ายจุดเดียว (single-hop) เครือข่ายโปรโตคอล ZigBee เป็นเครือข่ายแบบเชื่อมต่อได้หลายอุปกรณ์พร้อมกัน ซึ่งหมายความว่า จุดเชื่อมต่อในเครือข่ายทุกจุดมีสิทธิในการเข้าถึงตัวกลางที่ใช้ในการสื่อสารเท่า ๆ กัน

มีวิธีการเชื่อมต่อแบบหลายอุปกรณ์พร้อมกัน 2 วิธี ได้แก่ *beacon* และ *non-beacon* การเชื่อมต่อแบบ non-beacon ทุกจุดเชื่อมต่อในเครือข่ายส่งข้อมูลได้ตลอดเวลาที่ช่องสัญญาณว่างอยู่ ในเครือข่ายแบบ beacon จุดเชื่อมต่อจะสามารถส่งข้อมูลได้ในช่วงเวลาที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.2** การเปรียบเทียบมาตรฐานการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย

| มาตรฐาน | ZigBee® 802.15.4 | Wi-Fi™ 802.11b | Bluetooth™ 802.15.1 |
|---|---|---|---|
| **ช่วงการส่ง(เมตร)** | 1-100 | 1-100 | 1-10 |
| **อายุการใช้งาน(วัน)** | 100-1000 | 0.5-5 | 1-7 |
| **ขนาดเครือข่าย(ต่อโนด)** | >64,000 | 32 | 7 |
| **แอพพลิเคชั่น** | Monitoring&Control | Web,Email,Video | Cable Replacement |
| **ขนาด สแตก (Kbyte)** | 4-32 | 1000 | 250 |
| **Throughput (Kb/s)** | 20-250 | 11,000 | 720 |

## 2.4 โปรไฟล์โปรโตคอล ZigBee

โปรไฟล์โปรโตคอล ZigBee เป็นคำอธิบายขององค์ประกอบทางตรรกะของอุปกรณ์และส่วนติดต่อ ไม่ต้องมีรหัสในการสร้างโปรไฟล์ ข้อมูลโปรไฟล์แต่ละส่วนจะสามารถส่งผ่านระหว่างอุปกรณ์ได้คล้ายกับสถานะของสวิตซ์ ถูกเรียกว่าแอททริบิวต์ (attribute) แต่ละแอททริบิวต์จะมีเอกลักษณ์เฉพาะตัว และแอททริบิวต์เหล่านี้จะถูกจัดกลุ่มอยู่ใน คลัสเตอร์ (cluster) และแต่ละคลัสเตอร์ก็จะมีเอกลักษณ์เฉพาะตัว โดยส่วนติดต่อจะถูกกำหนดในระดับคลัสเตอร์ ไม่ใช่ที่ระดับแอททริบิวต์

โปรไฟล์จะกำหนดค่าหมายเลขของแอททริบิวต์ และหมายเลขคลัสเตอร์ นอกจากนี้ยังมีรูปแบบในแต่ละแอททริบิวต์ ตัวอย่างเช่น ในการควบคุมภายในบ้าน โปรไฟล์การส่องสว่าง คลัสเตอร์ *"OnOffDRC"* ของอุปกรณ์รีโมทควบคุมค่าความต้านทาน (Dimmer Remote Control) จะมีแอททริบิวต์ *"OnOff"* จะต้องมีค่าเป็นสัญญาณ 8 บิต ซึ่งค่า 0xFF หมายถึง "เปิด" ค่า 0x00 หมายถึง "ปิด" และค่า 0xF0 หมายถึงสลับค่าเอาท์พุต

โปรไฟล์ยังกำหนดคลัสเตอร์ที่จำเป็นและที่เป็นตัวเลือกสำหรับแต่ละอุปกรณ์ นอกจากนี้ เพิ่มโปรไฟล์อาจนิยามตัวเลือกบางโปรโตคอล ZigBee บริการแมนดาทอรี่

ผู้ใช้สามารถนำคำนิยามและเขียนรหัสใช้มันได้ มันสามารถเขียนรหัสได้หลายแบบ หลายกลุ่มฟังก์ชันที่สนับสนุนแมนดาทอรี่ คลัสเตอร์ และการบริการและใช้แอททริบิวต์ที่อยู่ในโปรไฟล์ ในทางนี้หนึ่งสวิตซ์จะทำงานกับโหลดคอนโทรลเลอร์ที่สร้างขึ้น

ตัวอย่างเช่น การควบคุมภายในบ้าน โปรไฟล์การส่องสว่าง 6 อุปกรณ์พิเศษ สำหรับ ZigBee โปรโตคอลให้การสนับสนุนสำหรับค่าโปรไฟล์ หัวไฟล์กับข้อมูลตามนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Profile ID
- อุปกรณ์ IDs และ Version
- Cluster IDs
- แอททริบิวต์ IDs
- ชนิดข้อมูลแอททริบิวต์

แต่ละกลุ่มฟังก์ชันของรหัส การสนับสนุนหนึ่งคลัสเตอร์หรือมากกว่านั้น ถูกเรียกว่า Endpoint การสื่อสารอุปกรณ์ที่ต่างกันมี endpoint และคลัสเตอร์ที่สนับสนุนต่างกัน

## 2.5 ZigBee โปรโตคอลสแตก

ชั้นสแตก ZigBee ประกอบด้วย ชั้นเครือข่าย ชั้นแอปพลิเคชั่น และการให้บริการรักษาความปลอดภัย (SSP) อุปกรณ์แต่ละตัวของ ZigBee ควรมีลักษณะพิเศษที่สามารถใช้งานได้ทั้งแบบสาธารณะและส่วนตัว ซึ่งรูปแบบนั้นจะถูกนิยามตามสภาพแวดล้อมของแอปพลิเคชั่นชนิดของอุปกรณ์ คลัสเตอร์ถูกใช้สำหรับการติดต่อสื่อสาร รูปแบบการติดต่อแบบสาธารณะรับรองการให้บริการที่ต่างกันของผู้ให้บริการสำหรับที่ว่างแอปพลิเคชั่นเดียวกัน

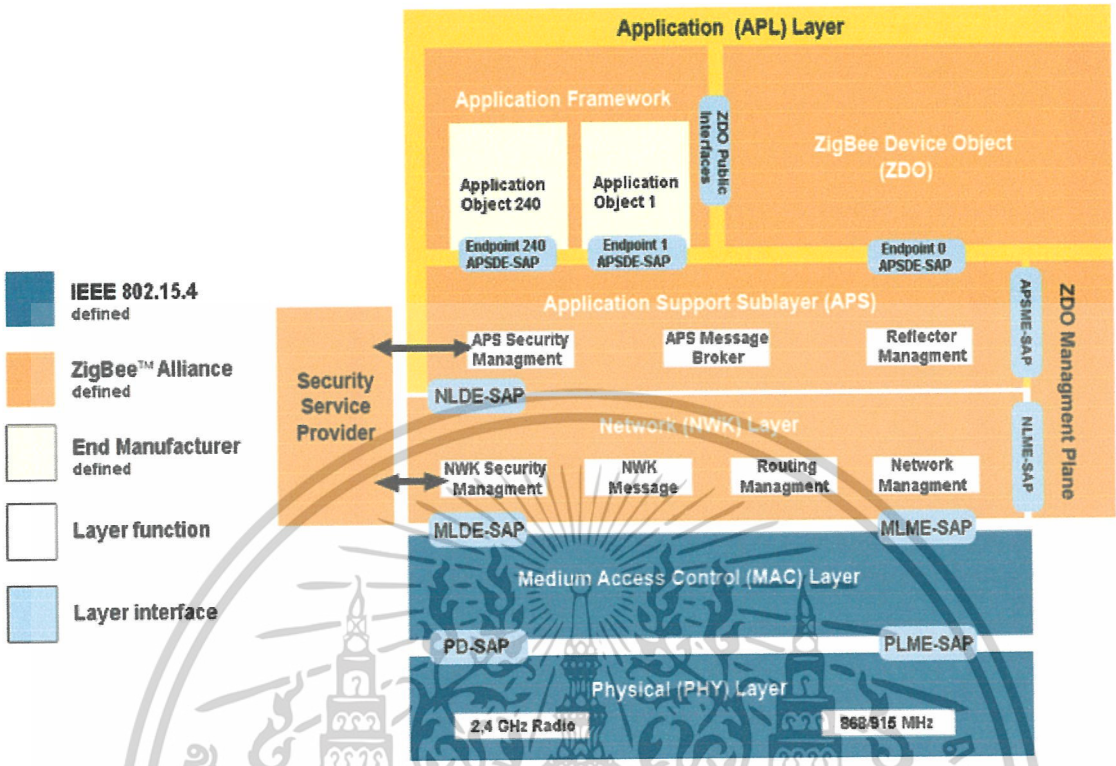
อุปกรณ์ถูกนิยามโดยรูปแบบและถูกประกอบด้วยวัตถุแอปพลิเคชั่นต่าง ๆ แต่ละวัตถุแอปพลิเคชั่นถูกติดต่อกับส่วนพักของ สแตก ZigBee โดย endpoint ซึ่งมีที่อยู่องค์ประกอบในอุปกรณ์ การติดต่อสื่อสารถูกสร้างจาก endpoint ไปยัง endpoint และส่งผ่านโครงสร้างข้อมูลที่ถูกเรียกโดย คลัสเตอร์ คลัสเตอร์จะมีกลุ่มของแอททริบิวต์ที่จำเป็นสำหรับการใช้ข้อมูลร่วมกันระหว่างวัตถุแอปพลิเคชั่น คลัสเตอร์ถูกใช้ในแอปพลิเคชั่นพิเศษ ซึ่งถูกนิยามลงในรูปแบบของตัวมันเอง แต่ละอินเตอร์เฟสสามารถส่งหรือรับข้อมูลในรูปแบบของคลัสเตอร์ได้

0 และ 255 เป็น endpoint พิเศษถูกใช้สำหรับการตั้งค่าและการจัดการของการเข้าถึงอุปกรณ์ ZigBee แอปพลิเคชั่นสามารถติดต่อสื่อสารกับชั้นอื่น ๆ ของ สแตก ZigBee ที่ติดตั้ง และตั้งค่าไว้แล้วได้ การเพิ่ม endpoint 0 เป็นวัตถุของอุปกรณ์ ZigBee (ZigBee Device Object) endpoint 255 ถูกใช้เพื่อส่งไปยังทุก ๆ endpoint ขณะที่ endpoint 241-254 ถูกจองไว้ แอปพลิเคชั่นที่สนับสนุนชั้นที่ต่ำกว่าที่ติดต่อกับ endpoint กับชั้นเครือข่าย และ SSP เป็นตัวช่วยให้ endpoint ทั้งหมดกับการส่งข้อมูล การรักษาความปลอดภัย และการ Binding (การ Binding เป็นความสามารถในการจับความแตกต่างแต่ละอุปกรณ์เข้าด้วยกัน เช่น สวิตซ์)

ชั้นเครือข่ายใช้อุปกรณ์ในการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์อื่นๆ ในการหาเส้นทางของข้อความ และการค้นหาเครือข่าย การสนับสนุนแอปพลิเคชั่นในชั้นที่ต่ำกว่าถูกให้บริการในชั้นนี้ แอปพลิเคชั่นสามารถคอนฟิกและส่งผ่านค่าพารามิเตอร์ของชั้นเครือข่ายผ่านทาง ZDO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง




รูปที่ 2.11 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของ สแตกโปรโตคอล ZigBee [26]

### 2.5.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรโตคอลของ ZigBee

#### 2.5.1.1 ขั้นตอนการทำงานของ ZigBee coordinator

ZigBee coordinator จะเริ่มต้นเครือข่าย โดยการตรวจสอบการใช้ช่องสัญญาณวิทยุภายในบริเวณรอบๆ ถ้ามีช่องสัญญาณที่ไม่ถูกใช้โดย coordinator ตัวอื่น ก็สามารถเริ่มต้นเครือข่ายได้ หลังจากนั้น coordinator ก็จะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของเครือข่าย รองรับการเข้าร่วมเครือข่ายของ ZigBee end-device และรองรับการร้องขออื่นๆ ตามมาตรฐานด้วยเช่นกัน ในโครงงานนี้ coordinator รองรับการเข้าร่วมเครือข่าย การออกจากเครือข่าย และการร้องขอการ Binding เท่านั้น

#### 2.5.1.2 ขั้นตอนการทำงานของ ZigBee end-device

ZigBee end-device จะเริ่มต้นการทำงาน โดยการร้องขอการเข้าร่วมเครือข่ายไปยัง coordinator ประจำเครือข่ายนั้นๆ โดยการตรวจสอบผ่านช่องสัญญาณต่างๆ ว่า coordinator ใช้ช่องสัญญาณใดอยู่เมื่อเข้าร่วมเครือข่ายแล้ว end-device จึงสามารถทำการร้องขอคำสั่งอื่นๆ ผ่านทาง coordinator ได้ เช่น การส่งข้อความทั่วไป (Message), การร้องขอการ binding (Binding request), การขอออกจากเครือข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
103073

### 2.5.2 การรักษาความปลอดภัย

SSP เป็นตัวรักษาความปลอดภัย อย่างไรก็ตาม การรักษาความปลอดภัยของระบบถูกนิยามที่รูปแบบระดับของโปรไฟล์ ซึ่งการนิยามชนิดขององค์ประกอบ การรักษาความปลอดภัยในเครือข่ายพิเศษ แต่ละชั้น MAC เครือข่าย และชั้นแอปพลิเคชั่น สามารถรักษาความปลอดภัย และใช้กุญแจรักษาความปลอดภัยร่วมกันได้เพื่อเป็นการลดการเก็บความต้องการ SSP ถูกติดตั้งและคอนฟิกผ่านทาง ZDO และต้องการองค์ประกอบพิเศษ

การถอดรหัสพื้นฐาน ZigBee พิเศษนิยามให้การใช้ *"trust center"* หรือ การไว้ใจศูนย์กลาง เหมือนกับเป็นอุปกรณ์ในเครือข่ายที่ใช้กระจายกุญแจรักษาความปลอดภัย

## 2.6 การประยุกต์ใช้ ZigBee

ZigBee สามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์พื้นฐานที่หลากหลายในชีวิตประจำวัน ถ้าเรานำมาตรฐานเครือข่ายแบบไร้สาย IEEE 802.15.4 มาประยุกต์ใช้แบบยูบิควิตัส โดยเป็นการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์กับอุปกรณ์ หรือ อุปกรณ์กับมนุษย์ ที่ผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย ทั้งนี้ประโยชน์ที่ได้รับมีดังนี้

- ระบบการควบคุมอัตโนมัติที่บ้าน โรงงาน และโกดังเก็บสินค้า เป็นต้น
- ระบบการติดตามสำหรับความปลอดภัย ชีวะอนามัย และสิ่งแวดล้อม เป็นต้น
- การตรวจหาตำแหน่งที่นำไปใช้ในการปฏิบัติการทางทหาร การทำงานของนักผจญเพลิง และบริษัทที่ต้องการการตรวจหาตำแหน่งแบบเวลาจริง
- ให้ความบันเทิง เช่น เกมฝึกทักษะ และของเล่นแบบ interactive

มาตรฐาน 802.15.4 หรือ ZigBee ถ้ามีการใช้งานเกิดขึ้นจริงนั้นจะมีผลต่อการใช้ชีวิตประจำวันอย่างมาก เช่น ในทางชีวะอนามัย นอกจากนี้ระบบ 802.15.4 จะช่วยเตือนภัยจากสิ่งแวดล้อม รวมถึงอุบัติภัยต่างๆ เช่น ไฟไหม้ น้ำท่วม แผ่นดินไหว เป็นต้น ทั้งนี้ระบบเตือนภัยในปัจจุบันไม่ได้เชื่อมต่อกันเป็นระบบเครือข่าย และตัวอุปกรณ์มีช่วงการใช้งานจากแบตเตอรี่สั้น นอกจากนี้ยังมีราคาสูง แต่ในระบบ 802.15.4 สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์พื้นฐานเช่น เซนเซอร์ และ Actuators ที่มีราคาต่ำ ทำให้สามารถติดตามเหตุการณ์ต่างๆ และอุปกรณ์จะทำงานอย่างอัตโนมัติ

สำหรับการประยุกต์ระบบ 802.15.4 มาใช้ภายในบ้านจะสามารถทำให้อุปกรณ์ และเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มาจากหลากหลายผู้ผลิต สื่อสารระหว่างกันเป็นระบบเครือข่ายได้ เช่น เมื่อมีสายโทรศัพท์เข้ามา โทรทัศน์จะลดเสียงลงอัตโนมัติ ทั้งนี้ไม่จำเป็นต้องเซตค่าต่างๆให้กับอุปกรณ์ แต่อุปกรณ์จะเรียนรู้เองจากพฤติกรรมของเราภายในบ้าน โดยแต่ละอุปกรณ์จะตรวจจับค่าต่างๆ

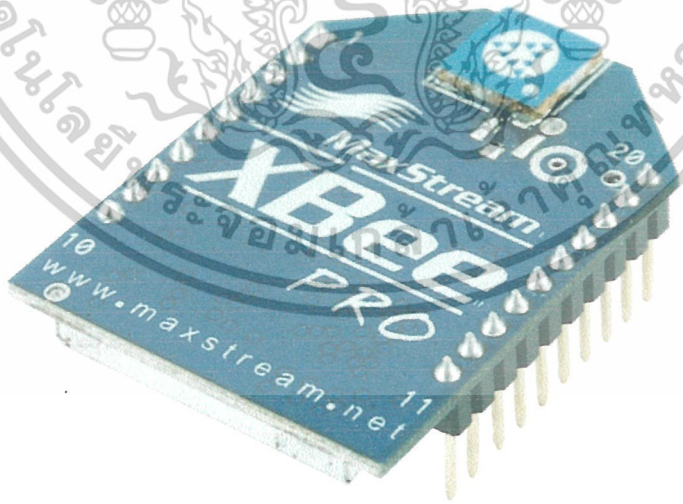
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่างๆ เช่น ความเข้มแสงหลอดไฟ อุณหภูมิ เพลง ช่องโทรทัศน์ และ Web Site โดยแต่ละอุปกรณ์จะเรียนรู้รสนิยมของแต่ละคนและบันทึกไว้

นอกจากนี้เราสามารถนำระบบ 802.15.4 มาประยุกต์ใช้ในการคมนาคม กับอุปกรณ์พื้นฐานต่างๆที่อยู่ตามท้องถนนทางด่วน และที่อื่น ๆ ทั้งนี้อุปกรณ์ต่างๆจะสื่อสารกันเองเป็นระบบเครือข่าย ในระหว่างการเดินทางของรถบนท้องถนน อุปกรณ์ที่อยู่ข้างทางจะส่งข้อมูลที่จำเป็นในการเดินทางสำหรับถนนที่รถวิ่งอยู่ เช่น ความเร็วสูงสุดที่วิ่งได้ เส้นทางเป็นรถเดินทางเดียวหรือสองทาง สภาพการจราจร ข้อมูลอุบัติเหตุ เป็นต้น นอกจากนี้อุปกรณ์ต่างๆที่อยู่ข้างถนนจะมีการทำงานแบบอัตโนมัติด้วยเช่น ไฟส่องทางจะลดความเข้มลงเมื่อไม่มีรถวิ่งผ่านมา และระบบควบคุมการจราจร เป็นต้น ประโยชน์อีกอย่างหนึ่งคือ สามารถตรวจหาตำแหน่งของรถได้ ซึ่งจะคล้ายกับระบบ GPS แต่ระบบ GPS นี้ไม่สามารถตรวจหาตำแหน่งในบางสถานที่ได้ เช่น ในอุโมงค์ ภายในอาคาร เป็นต้น และระบบ GPS ยังมีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งมากกว่า

## 2.7 XBee

บริษัท Maxstream ได้ผลิต XBee ซึ่งอยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ให้รองรับกับอุปกรณ์ wireless sensor networks ที่มีราคาถูก ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ และสามารถ ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ได้อย่างถูกต้องครบถ้วน เป็นโมดูลสื่อสารข้อมูลอนุกรมไร้สายที่ใช้คลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz




**รูปที่ 2.12** โมดูลอุปกรณ์ ZigBee-PRO [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

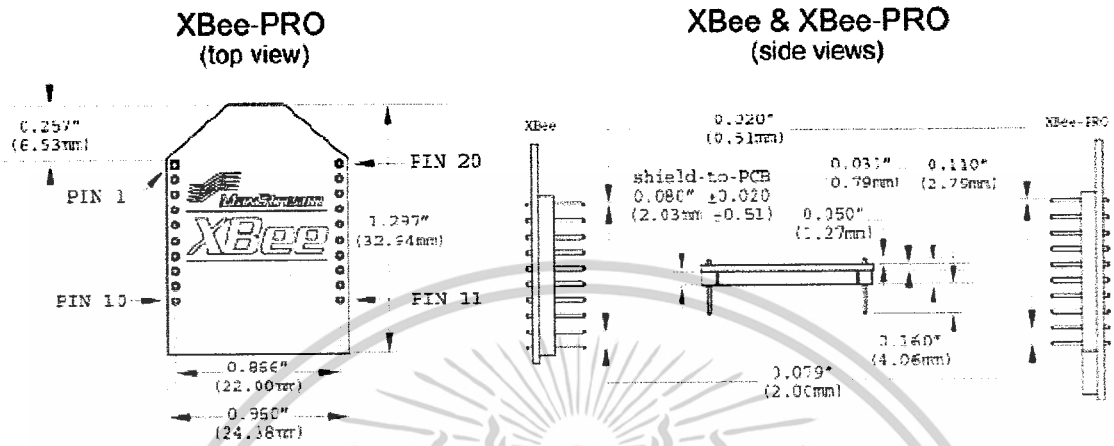
### 2.7.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของ XBee-PRO (XBee-PRO Specification)

**ตารางที่ 2.3** คุณสมบัติของ XBee-PRO

| คุณสมบัติของ XBee-PRO | |
|---|---|
| Performance | |
| Indoor / urban range | Up to 100 meter |
| Outdoor RF line-of-sight Range | Up to 1500 meter |
| Transmit power output | 60 mW (18 dBm) ,100 mW (20 dBm) EIRP |
| RF Data Rate | 250,000 bps |
| Serial Interface Data Rate | 1,200 – 115,200 bps (non standard baud rate also support) |
| Receiver Sensitivity | -100 dBm (1% packet error rate) |
| Power Requirements | |
| Supply Voltage | 2.8-3.4 V |
| Transmit current (typical) | If PL=0 (10dBm):137mA(@3.3V),139mA(@3.0V)<br>PL=1 (12dBm):155mA(@3.3V),153mA(@3.0V)<br>PL=2 (14dBm):170mA(@3.3V),171mA(@3.0V)<br>PL=3 (16dBm):188mA(@3.3V),195mA(@3.0V)<br>PL=1 (18dBm):215mA(@3.3V),227mA(@3.0V) |
| Idle / Receive Current (typical) | 55mA (@ 3.3V) |
| Power-down Current | < 10 µA |
| General | |
| Operating Frequency | ISM 2.4 GHz |
| Dimensions | 0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm) |
| Operating Temperature | -40° - 85° C (industrial) |
| Antenna Options | Integrated Whip, Chip or U.HL Connector |
| Networking & Security | |
| Supported Network Topologies | Point-to-point , Point-to-multipoint & peer-to-peer |
| Number of Channels | 12 Direct Sequence Channels |
| Addressing Options | PAN ID , Channel & Addresses |

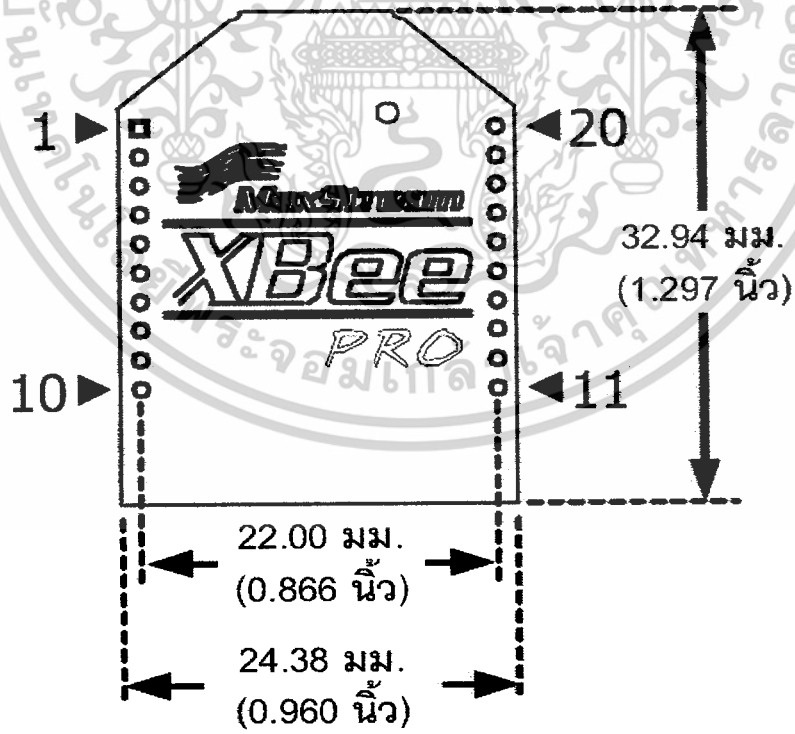
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.2 ลักษณะทางกายภาพของโมดูล XBee-PRO




**รูปที่ 2.13** ลักษณะทางกายภาพของโมดูล XBee-PRO [4]

### 2.7.3 การกำหนด pin ของโมดูล XBee PRO




**รูปที่ 2.14** ขนาดและการจัดขาของโมดูล XBee-PRO [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.4** ตารางการกำหนดขาของ XBee-PRO

| ขาที่ | ชื่อขา | ทิศทาง | การทำงาน |
|---|---|---|---|
| 1 | VCC | - | ขาต่อไฟเลี้ยง 3.3V |
| 2 | DOUT | Output | ส่งข้อมูลอนุกรม (UART Data Out) |
| 3 | DIN/CONFIG | Input | รับข้อมูลอนุกรม (UART Data IN) |
| 4 | DO8 | Output | Digital Output 8 |
| 5 | RESET | Input | ขารีเซตหลักของโมดูล |
| 6 | PWM0/RSSI | Output | PWM เอาท์พุต 0 / วัดความแรงของสัญญาณภาครับ |
| 7 | PWM1 | Output | PWM เอาท์พุต 1 |
| 8 | Reserved | - | - |
| 9 | DTR/SLEEP_RQ/DI8 | Input | ควบคุมโหมด SLEEP / Digital Output 8 |
| 10 | GND | - | กราวด์ |
| 11 | AD4/DIO4 | Either | อนาล็อกอินพุต 4 / ดิจิตอล I/O 4 |
| 12 | CTS/DIO7 | Either | Clear-to-send / ดิจิตอล I/O 7 |
| 13 | ON/SLEEP | Output | ตรวจสอบสถานะของโมดูล |
| 14 | VREF | Input | ความต่างศักย์อ้างอิงสำหรับ A/D อินพุต |
| 15 | Associated/AD5/DIO5 | Either | อนาล็อกอินพุต 5 / ดิจิตอล I/O 5 |
| 16 | RTS/AD6/DIO6 | Either | Request-to-send /อนาล็อกอินพุต 6/ดิจิตอล I/O 6 |
| 17 | AD3/DIO3 | Either | อนาล็อกอินพุต 3 / ดิจิตอล I/O 3 |
| 18 | AD2/DIO2 | Either | อนาล็อกอินพุต 2 / ดิจิตอล I/O 2 |
| 19 | AD1/DIO1 | Either | อนาล็อกอินพุต 1 / ดิจิตอล I/O 1 |
| 20 | AD0/DIO0 | Either | อนาล็อกอินพุต 0 / ดิจิตอล I/O 0 |

- การเชื่อมต่ออย่างน้อยต้องมีพิน VCC, GND, DOUT และ DIN
- การเชื่อมต่อสำหรับอัพเดทเฟิร์มแวร์ VCC, GND, DIN, DOUT, RTS และ DTR
- โมดูลจะต้องต่อตัวต้านทาน 50KΩ ที่ขา RESET

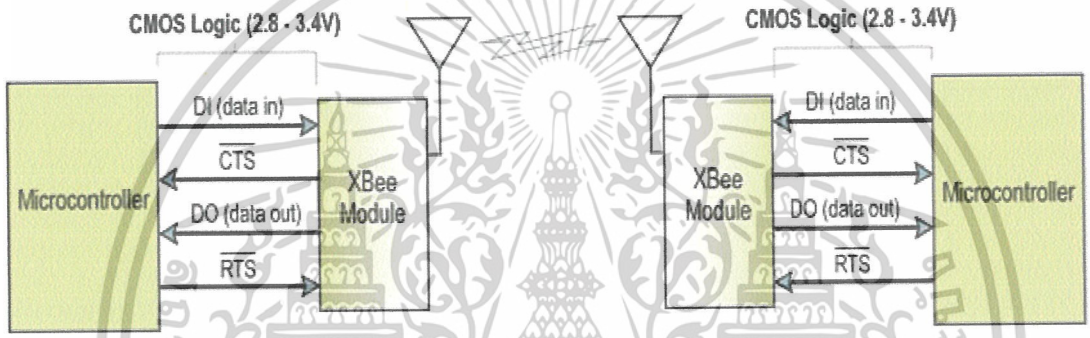
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.4 การติดต่อสื่อสารของ ZigBee ผ่านทางพอร์ตอนุกรม

ZigBee อินเตอร์เฟสกับอุปกรณ์ผู้ใช้ (Host) ผ่านทางพอร์ตอนุกรม อะซิงโครนัสระดับตรรกะ ส่งผ่านโมดูลทางพอร์ตอนุกรม โมดูลสามารถติดต่อสื่อสารกับตรรกะต่างๆเข้ากับ UART หรือระดับตัวแปรกับอุปกรณ์อนุกรมต่างๆ

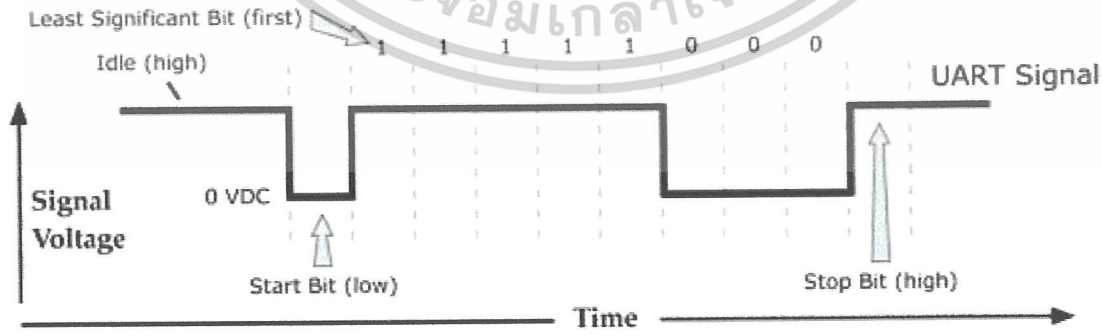
#### 2.7.4.1 UART การไหลของข้อมูล

อุปกรณ์มีอินเตอร์เฟส UART สามารถติดต่อโดยตรงกับพินของ RF โมดูล ดังรูปที่ 2.15




**รูปที่ 2.15** ระบบ Data Flow Diagram ในอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ UART [4]

ข้อมูลส่งขาเข้า UART โมดูล ผ่านขา Data In (ขา 3) ด้วยสัญญาณอนุกรมอะซิงโครนัสสัญญาณจะว่างเมื่อไม่มีข้อมูลถูกส่ง แต่ละข้อมูลไบต์ประกอบด้วย บิตเริ่มต้น (บิตต่ำ) 8 ข้อมูลบิต และบิตหยุด (บิตสูง) ตามรูปที่ 2.16 อธิบายแผนบิตอนุกรมของการผ่านข้อมูลของโมดูล




**รูปที่ 2.16** แพ็กเกตข้อมูล UART 0x1F (31 ในเลขฐาน 10) ถูกส่งผ่านโมดูลRF [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

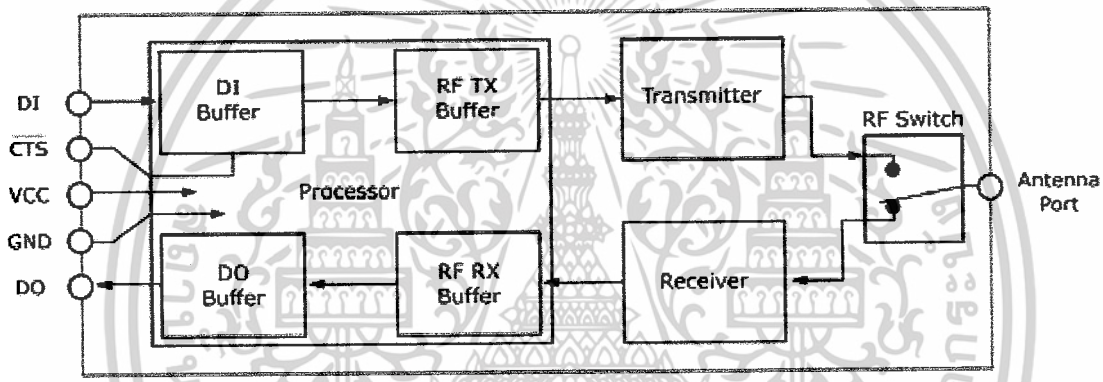
รูปแบบงานโมดูล UART ดังนั้นเวลาและพาริตี้ตรวจสอบต้องการข้อมูลติดต่อสื่อสาร การสื่อสารอนุกรมขึ้นอยู่กับ 2 UARTS ถูกจัดโครงสร้างกับการจัดตั้ง (อัตราบอด, พาริตี้, บิตเริ่มต้น, บิตหยุด, บิตข้อมูล)

### 2.7.5 แผนภาพการส่งข้อมูลภายใน XBee

DI: Data IN

DO: Data Out

Antenna: สายอากาศ




**รูปที่ 2.17** แผนภาพการส่งข้อมูลภายใน XBee [4]

### 2.7.6 การส่งข้อมูลของ XBee

การส่งข้อมูลแบบ RF ของแต่ละแพ็กเกจในส่วนของ header จะประกอบไปด้วย Source Address และDestination Address โดยที่ IEEE 802.15.4 จะมีโครงสร้าง 2 แบบ นั่นคือแบบ *short 16-bit addresses* และแบบ *long 64-bit addresses* ซึ่ง64-bit จะสามารถอ่านคำสั่ง SL (Serial Number Low) และ SH (Serial Number High) และการส่งข้อมูลแบบ RF จะส่งได้ 2 โหมด คือ Unicast Mode และ Broadcast Mode

- การส่งแพ็คเกจโดยใช้โครงสร้าง *16-bit addressing* ให้ตั้งค่า ตัวแปร DL (Destination Address Low) ให้เท่ากับ ตัวแปร MY และตั้งค่าตัวแปร DH (Destination Address High) เป็น '0'
- การส่งแพ็คเกจโดยใช้โครงสร้าง *64-bit addressing* ให้ตั้งค่า Destination Address (DL + DH) ให้เข้ากับ Source Address (SL + SH) ของปลายทางที่เราจะส่งแพ็คเกจไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.7 การเชื่อมต่อเครือข่ายของ XBee/XBee-PRO (XBee/XBee-PRO Networks)

**XBee/XBee-PRO Networks** จากมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ชนิดของ network ที่รองรับโดย XBee/XBee-PRO RF modules ได้แก่

- NonBeacon
- NonBeacon (w/ Coordinator)

**ตารางที่ 2.5** Terms and Definition

| Term | Definition |
|---|---|
| PAN | Personal Area Network - ระบบเครือข่ายการเชื่อมต่อข้อมูลที่ประกอบด้วย End Devices ที่อาจจะมีมากกว่าหนึ่ง และ Coordinator |
| Coordinator | A Full-function device(FFD) that provides network synchronization by polling nodes [NonBeacon (w/ Coordinator) networks only] |
| End Device | *When in the same network as a Coordinator* - RF modules that rely on a Coordinator for synchronization and can be put into states of sleep for low-power applications. |
| Association | The establishment of membership between End Devices and a Coordinator. Association is only applicable in NonBeacon (w/Coordinator) networks. |

#### 2.7.7.1 NonBeacon

โดยปกติแล้ว XBee/XBee-PRO RF Modules สามารถตั้งค่าให้รองรับ NonBeacon communications ได้ ระบบ NonBeacon ทำงานภายในเครือข่ายแบบ Peer-to-Peer network topology ดังนั้นจึงไม่ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่าง Master/Slave หมายความว่า modules จะ synchronized โดยไม่ต้องตั้งค่า master/server แต่ละ module ในเครือข่ายจะแชร์ roles of master and slave โครงสร้าง peer-to-peer มีลักษณะเด่น คือ synchronization times and cold start times ได้รวดเร็ว เครือข่ายแบบ peer-to-peer สามารถตั้งได้โดยการตั้งค่าแต่ละ module ให้ทำงานเป็น End Device (CE = 0), disabling End Device Association ในทุก modules (A1 = 0) และตั้งค่าพารามิเตอร์ ID และ CH ให้ identical across the network

#### 2.7.7.2 NonBeacon (w/Coordinator)

อุปกรณ์ที่กำหนดให้เป็น Coordinator โดยการ set พารามิเตอร์ CE (Coordinator Enable) เป็น "1" Coordinator power-up จะควบคุมโดยพารามิเตอร์ A2 (Coordinator Association)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในระบบ NonBeacon (w/ Coordinator), Coordinator สามารถตั้งได้ว่าจะให้ทำการส่งข้อมูลแบบ direct หรือ indirect transmissions ถ้าพารามิเตอร์ SP (Cyclic Sleep Period) ถูก set ให้เป็น "0" Coordinator จะส่งข้อมูลทันที ในทางตรงกันข้าม SP จะกำหนดระยะเวลาที่ Coordinator จะค้างข้อมูลไว้ก่อนที่จะทิ้งไป โดยทั่วไป พารามิเตอร์ SP (Cyclic Sleep Period) และ ST (Time before Sleep) ควรจะตั้งค่าให้สอดคล้องกับการตั้งค่า SP และ ST ของ End Devices

**2.7.7.3 Association**

Association คือ การก่อตั้งระหว่าง End Devices และ Coordinator และจะใช้ได้ในเครือข่าย NonBeacon (w/ Coordinator) เท่านั้น การก่อตั้งของสมาชิกนี้จะเป็นประโยชน์ในกรณีที่ต้องการ central unit (Coordinator) เพื่อจะถ่ายทอด messages หรือเก็บรวบรวมข้อมูลจากหลาย remote units (End Devices) กำหนด channels หรือ PAN IDs โดย RF data network นี้ประกอบด้วย Coordinator 1 จุดและ End Devices หนึ่งจุดหรือมากกว่าหนึ่ง จาก PAN (Personal Area Network) โดยแต่ละ device ใน PAN จะมี PAN Identifier [พารามิเตอร์ ID (PAN ID) ] PAN IDs จะต้องเป็นแบบหนึ่งเดียว(unique) เพื่อป้องกันการเกิด miscommunication ระหว่าง PANs ในส่วนของ Coordinator PAN ID จะเซตโดยใช้ commands สำหรับ ID (PAN ID) และ A2 (Coordinator Association) End Device สามารถ associate to a Coordinator โดยไม่จำเป็นต้องรู้ address, PAN ID หรือ channel ของCoordinator พารามิเตอร์ A1 (End Device Association) bit fields ใช้กำหนดความยืดหยุ่นให้กับ End Device ในระหว่าง association พารามิเตอร์ A1 สามารถใช้สำหรับ End Device to dynamically set its destination address, PAN ID and/or channel.

**- Coordinator / End Device Setup and Operation**

การตั้งค่า module ให้ทำงานเป็น Coordinator ทำได้โดยเซตพารามิเตอร์ CE (Coordinator Enable) เป็น "1" จากนั้นเซตพารามิเตอร์ CE ของ End Devices เป็น "0" (default)

**- NonBeacon (w/ Coordinator) Systems**

ในระบบ NonBeacon (w/ Coordinator) Coordinator สามารถตั้งค่าได้ว่าจะให้ทำการ ส่งข้อมูลแบบ direct หรือ indirect transmissions ถ้าพารามิเตอร์ SP (Cyclic Sleep Period) ถูกเซตเป็น "0" Coordinator จะทำการ send data โดยทันที ในทางตรงข้าม พารามิเตอร์ SP จะเป็นตัวกำหนดระยะเวลาที่ Coordinator จะยังคงค้าง data ก่อนจะทำ การทิ้งไปโดยทั่วไป พารามิเตอร์ SP (Cyclic Sleep Period) และ ST (Time before Sleep) ควรจะตั้งค่าให้สอดคล้องกับการตั้งค่า SP และ ST ของ End Devices

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.7.7.4 Coordinator Power-up**

**1. Check A2 parameter - Reassign_PANID Flag**

**Set (bit 0 = 1)** Coordinator ทำการ Active Scan โดยการทำงานของ Active Scan คือ จะเลือก 1 channel และทำการส่ง *BeaconRequest command* เป็น *broadcast address (0xFFFF)* และ *broadcast PAN ID* (0xFFFF) ออกไป และรอรับฟังที่ channel นั้นเพื่อรับ beacons จาก Coordinator ต่างๆที่ทำงานบน channel นี้ ระยะเวลาที่ใช้ในการรอแต่ละ channel กำหนดโดยพารามิเตอร์ SD (Scan Duration) เมื่อหมดเวลาใน channel นั้น Active Scan จะทำการเลือก channel อื่นและส่ง *BeaconRequest command* อีกครั้ง กระบวนการจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนกระทั่ง scan ครบทุก channel หรือจนกระทั่งพบ 5 PANs เมื่อ Active Scan ทำงานเสร็จสมบูรณ์ ผลลัพธ์ที่ได้จะประกอบด้วย list ของ PAN IDs และ Channels ที่ถูกใช้โดย PANs อื่นๆ สำหรับ list ที่ได้มานี้จะใช้ในการ assign unique PAN ID ให้กับ Coordinator ใหม่ๆ พารามิเตอร์ ID จะถูกเก็บไว้ถ้ามันไม่พบในผลลัพธ์ของ Active Scan

**Not Set (bit 0 = 0)** Coordinator จะทำการเก็บ ID ของมันที่มีการเซตไว้ และจะไม่มีการใช้งาน Active Scan

**2. Check A2 parameter – Reassign_Channel Flag (bit 1)**

**Set (bit 1 = 1)** Coordinator จะทำการ Energy Scan ซึ่ง Energy Scan นี้จะเลือก 1 channel และ scans for energy ที่ channel นั้น ตลอดเวลาที่ทำการ scan จะระบุรายละเอียดได้โดยพารามิเตอร์ SD (Scan Duration) เมื่อทำการ scan ที่ channel นั้นเสร็จเรียบร้อยแล้ว Energy Scan จะทำการเลือก channel ถัดไป และเริ่มทำการ scan ที่ channel นั้น กระบวนการนี้จะกระทำอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งทุก channel ได้ถูก scan เรียบร้อยแล้ว

เมื่อทำการ Energy Scan เสร็จแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้รวมถึงค่า maximal energy ที่ตรวจพบในแต่ละ channel ค่า energy ที่ได้นี้จะนำไปใช้หา channel ที่มีค่า energy น้อยที่สุด ถ้า Active Scan ถูกปฏิบัติแล้ว (Reassign_PANID Flag set) จะเลือกใช้ channel ที่ถูกตรวจพบ PANs ดังนั้นผลลัพธ์ของการทำ Energy Scan และ Active Scan นำมาใช้หา channel ที่ดีที่สุด (channel ที่ใช้ energy น้อยที่สุดและยังไม่ถูกใช้งาน) เมื่อ channel ที่ดีที่สุดได้ถูกเลือกแล้ว ค่าของพารามิเตอร์ CH(Channel) จะเปลี่ยนไปตาม channel นั้น

**Not Set (bit 1 = 0)** Coordinator จะรักษา CH ที่เราเซตไว้ เพราะฉะนั้น Energy Scan จะไม่ทำงาน

**3. Start Coordinator** Coordinator Start ที่ channel (CH parameter) และ PAN ID (ID parameter) ที่ได้ถูกเลือกไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

***Note*** Channel และ PAN ID อาจเลือกจากขั้นตอนที่ 1 และ/หรือ 2 ตามข้างบน Coordinator จะอนุญาตให้ End Devices เข้าร่วมกับ Coordinator ถ้าเซตพารามิเตอร์ A2 เป็น flag *"AllowAssociation"* เมื่อ Coordinator ทำการ Start เรียบร้อยแล้ว LED จะกระพริบ 1 ครั้งต่อวินาที (LED ไม่กระพริบ ถ้า Coordinator ไม่ Start)

**4. Coordinator Modifications** เมื่อ Coordinator ได้ Start เรียบร้อยแล้ว:

การเปลี่ยนแปลงของ A2 (Reassign_Channel or Reassign_PANID bits), ID, CH or MY parameters เป็นสาเหตุของการ reset ค่า MAC ของ Coordinator (The Coordinator RF module (รวมถึง volatile RAM) จะไม่ถูก reset) การเปลี่ยนแปลง A2 AllowAssociation จะไม่ reset ค่า MAC ของ Coordinator ในระบบ non-beaconing End Devices ที่เข้าร่วมกับ Coordinator prior to a MAC reset จะทราบค่าใหม่ๆ ที่เซตให้กับ Coordinator ดังนั้น ถ้า Coordinator เปลี่ยนค่า ID, CH or MY End Devices จะสามารถติดต่อกับ non-beacon Coordinator ได้ไม่นานนัก เพราะฉะนั้น เมื่อ Coordinator ได้ Start เรียบร้อยแล้วค่า ID, CH MY or A2 (Reassign_Channel or Reassign_PANID bits) จึงไม่ควรถูกเปลี่ยนแปลง

**2.7.7.5 End Device Power-up**

End Device จะสามารถ Power-up ได้ ขึ้นอยู่กับคำสั่งใน A1 เมื่อ power-up End Device จะทำตามคำสั่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

**1. Check A1 parameter – AutoAssociate Bit**

**Set (bit 2=1)** End Device จะพยายามเข้าร่วมกับ Coordinator

**Not Set (bit 2=0)** End Device จะไม่เข้าร่วมกับ Coordinator โดยที่ End Device จะทำงานตามค่า ID, CH and MY parameters ที่ได้กำหนดไว้ เมื่อสามารถทำการเข้าร่วมได้สำเร็จ LED จะกระพริบ 5 ครั้งต่อวินาที เมื่อ *AutoAssociate bit* ไม่ได้ถูกเซต จะไม่มีการทำงานตามขั้นตอนที่ 2-3

**2. Discover Coordinator (if Auto-Associate Bit Set)** End Device จะทำการ Active Scan ซึ่ง Active Scan นี้เลือก 1 channel และส่งต่อ *BeaconRequest command* ไปยัง broadcast address (0xFFFF) และ broadcast PAN ID (0xFFFF) และจะคอยฟัง beacons ที่ channel นั้น จาก Coordinator ตัวใดๆ ที่ทำงานอยู่ใน channel นั้น เวลาที่ใช้ในการฟังแต่ละ channel ขึ้นอยู่กับค่า SD parameter

เมื่อเวลาที่ Channel นั้นหมดแล้ว Active Scan จะทำการเลือก channel อื่นๆ และทำการส่ง *BeaconRequest command* เหมือนเดิมอีกครั้ง กระบวนการนี้จะทำอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งทุก channel ได้ถูก Scan เรียบร้อยแล้ว หรือจนกระทั่ง 5 PANs ได้ถูกค้นพบ เมื่อ Active

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Scan เรียบร้อยแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้รวมถึง list ของ PAN IDs และ Channel จะถูกนำมาใช้ตรวจหา PANs End Device จะเลือก Coordinator ที่จะเข้าร่วม ขึ้นอยู่กับค่า A1 parameter *"Reassign_PANID"* and *"Reassign_Channel"* flages:

**Reassign_PANID Bit Set (bit 0=1)** End Device จะสามารถเข้าร่วมใน PAN ที่มีค่า ID ใดๆ ได้

**Reassign_PANID Bit Not Set (bit 0=0)** End Device จะสามารถเข้าร่วมใน PAN เฉพาะที่มีค่า ID ตรงกับค่า ID ของ End Device

**Reassign_Channel Bit Set (bit 1=1)** End Device จะสามารถเข้าร่วมใน PAN ที่มีค่า CH ใดๆ ได้

**Reassign_Channel Bit Not Set (bit 1=0)** End Device จะสามารถเข้าร่วมใน PAN เฉพาะที่มีค่า CH ตรงกับค่า CH ของ End Device

หลังจากใช้ Filter นี้กับ Coordinator ที่ค้นพบแล้ว ถ้ามีหลาย PANs ปรากฏขึ้น End Device จะเลือก PAN ที่มีคุณภาพในการส่งผ่านข้อมูลได้ดีที่สุด ถ้าไม่มีการค้นพบ Coordinator End Device จะ sleep (ตามที่กำหนดใน SM (Sleep Mode) parameter) หรือทำการเข้าร่วมอีกครั้ง

***Note*** End Device จะไม่เข้าร่วมกับ Coordinate ถ้า Coordinate ไม่อนุญาตให้เข้าร่วม (A2-AllowAssociation) หรือกรณีที่ Coordinate ใช้ non-beacon scheme ไม่เหมือนกับ End Device

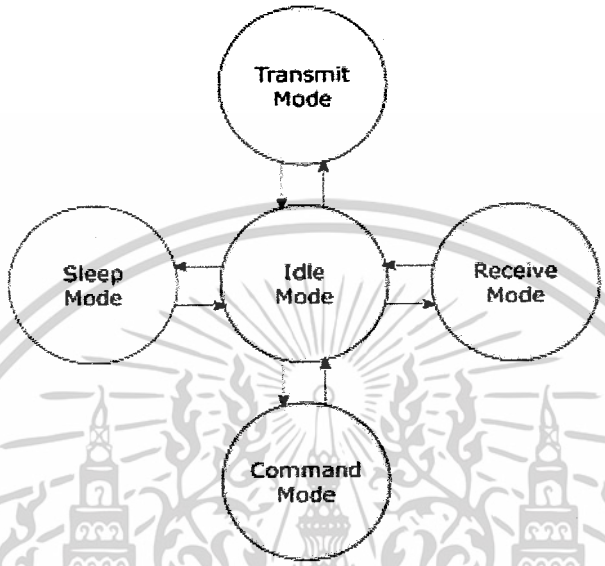
**3. Associate to Valid Coordinator** เมื่อค้นพบ Coordinate แล้ว End Device จะส่ง *AssociationRequest message* ไปยัง Coordinate จากนั้นจะคอย *AssociationConfirmation* ที่จะส่งมาจาก Coordinate เมื่อได้รับ AssociationConfirmation แล้ว End Device จะสามารถเข้าร่วมได้แล้ว LED จะกระพริบ 2 ครั้งต่อวินาที LED จะไม่กระพริบ ถ้า End Device ไม่สามารถเข้าร่วมได้

**4. End Device Changes once an End Device has associated** การเปลี่ยน A1, ID or CH parameter จะเป็นสาเหตุที่ทำให้ End Device ไม่สามารถเข้าร่วม และ restart การเข้าร่วมได้ ถ้า End Device ไม่สามารถเข้าร่วมได้ คำสั่ง A1 จะแสดงสาเหตุของการล้มเหลวให้ทราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.8 การทำงานของโมดูล XBee

การทำงานของ XBee แบ่งได้ออกเป็น 5 โหมด ดังรูปที่ 2.18 ต่อไปนี้




**รูปที่ 2.18** โหมดต่างๆของการทำงานของ XBee [4]

- *Idle Mode* เป็นโหมดที่ไม่มีการรับส่งข้อมูล และเป็นโหมดกลางที่สามารถเปลี่ยนไปยังโหมดต่างๆได้
- *Transmit Mode* มีการส่งข้อมูลได้สองวิธี
  - Direct Transmission – ข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งไปยัง Destination Address ทันที
  - Indirect Transmission – packetจะถูกเก็บไว้จนกว่าจะถึงเวลาส่งเท่านั้น และจะส่งไปยังที่มีการตอบรับมา(Source Address = Destination Address)
- *Receive Mode* ข้อมูล RF จะถูกรับทางสายอากาศ
- *Sleep Mode RF* อยู่ในสถานะที่มีการใช้กำลังไฟฟ้าต่ำหรือไม่มีการใช้ การเข้ามาอยู่ในโหมดนี้นั้นจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้อย่างน้อยหนึ่งอย่าง (ค่าของตัวแปรSMต้องไม่เป็น0)
  - มีการใช้งานที่ Sleep_RQ (pin 9)
  - อยู่โหมด idle (ไม่มีการรับส่งข้อมูล) เป็นเวลานานมากกว่าที่กำหนดไว้ที่ตัวแปร ST (Time before Sleep)
- *Command Mode* เป็นโหมดคำสั่งโดยจะใช้ลำดับเป็นสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3
# การออกแบบโครงงาน

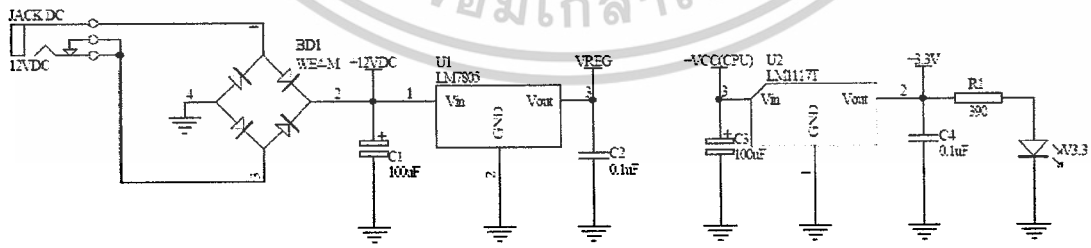
## 3.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์

ในส่วนของการออกแบบฮาร์ดแวร์นั้น ออกแบบในส่วนของวงจรภาคส่งซึ่ง ประกอบด้วยวงจรวัดอุณหภูมิภายในบ้านด้วยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ และวงจรการตรวจสอบการผ่านเข้าออกบ้านด้วยเซนเซอร์แม่เหล็ก

### 3.1.1 วงจรตรวจสอบอุณหภูมิ

ในการออกแบบส่วนของภาคส่ง ใช้การออกแบบอย่างง่าย กล่าวคือ ในภาคส่งจะทำการอ่านค่าอุณหภูมิ จากนั้นก็แสดงผลที่ จอแสดงผล LCD และ ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4550 จะติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม USART ไปยังโมดูล ZigBee แล้วจากนั้น โมดูล ZigBee ก็จะส่งข้อมูลแบบไร้สายไปที่ส่วนภาครับที่ต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์

การทำงานของวงจรจะเริ่มจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 9 ถึง 12 โวลต์ เข้าทาง JACK DC จากนั้นจะผ่านไอซีเรกูเลเตอร์ เพื่อลดระดับแรงดันให้เหลือ 5 โวลต์ เพื่อจ่ายให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4550 จอแสดงผล LCD และ ไอซีวัดอุณหภูมิ DS1820 เนื่องจากโมดูล ZigBee ต้องการแรงดันขนาด 3.3 โวลต์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ ไอซีเรกูเลเตอร์ LM1117T-3.3 เพื่อลดแรงดันจาก 5 โวลต์เหลือ 3.3 โวลต์ เพื่อป้อนให้กับโมดูล ZigBee ซึ่งแรงดันจะถูกตัวเก็บประจุ C3 และ C4 กรองให้เรียบยิ่งขึ้นเพื่อให้เหมาะกับไอซี




**รูปที่ 3.2** วงจรแหล่งจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F4550 กับ LCD โดย LCD จะถูกกำหนดการทำงานดังนี้

ขาที่ 1: สำหรับต่อขา ground ของวงจร

ขาที่ 2: +Vcc ต่อกับไฟเลี้ยง +5V

ขาที่ 3: Vo สำหรับปรับความสว่างของหน้าจอแสดงผล LCD

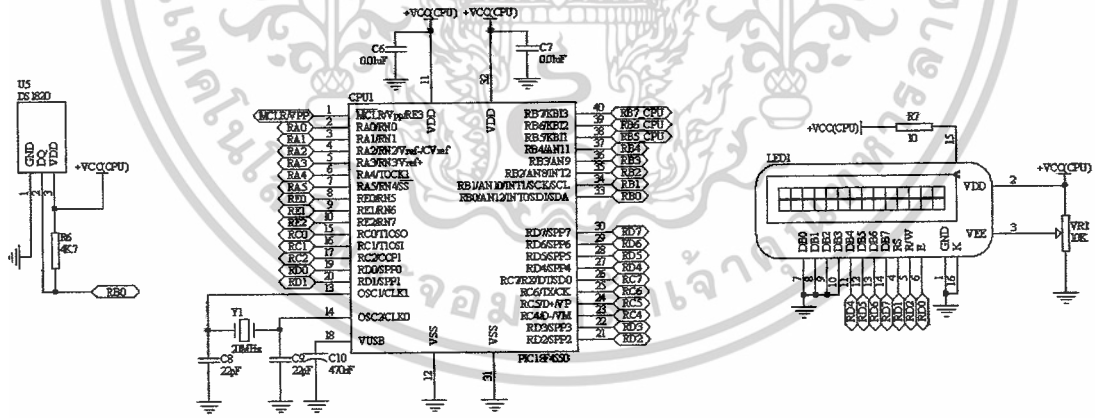
ขาที่ 4: RS (Register Select) ขาเลือกการติดต่อกับ รีจิสเตอร์คำสั่งหรือข้อมูล โดย “0” จะติดต่อคำสั่ง และ “1” จะติดต่อข้อมูล

ขาที่ 5: R/W (Read/Write control) ขาอ่านหรือเขียนข้อมูลกับจอแสดงผล LCD

ขาที่ 6: E (Enable) ขาป้อนสัญญาณพัลส์ Enable ให้โมดูล LCD เริ่มทำงาน

ขาที่ 7 ถึง 14: D0-D7 (DATA) เป็นขาข้อมูล ซึ่งการทดลองนี้จะเลือกใช้เพียง 4 ขาเท่านั้น คือ ขาที่ 11 ถึง 14 ซึ่งต่อกับขาที่ 27 ถึง 30 ของไมโครคอนโทรลเลอร์

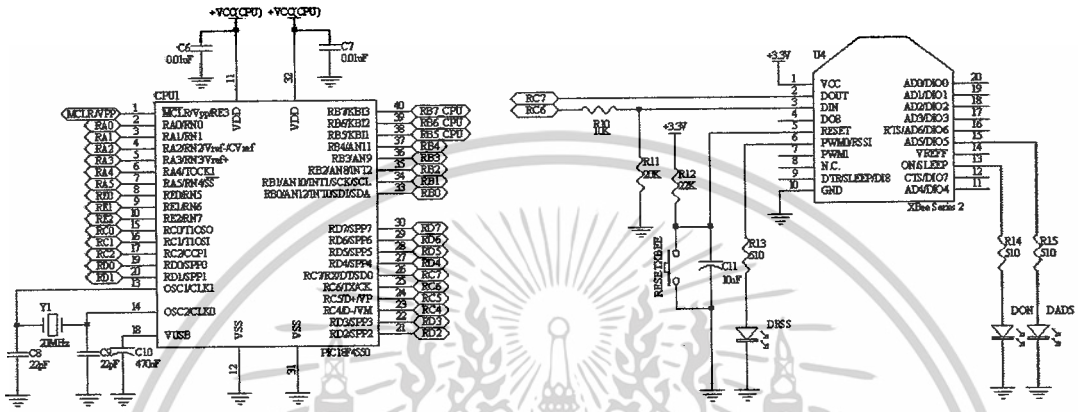
สรุปการทำงาน คือ ภาคส่งจะทำการอ่านค่าอุณหภูมิ แล้วส่งค่าอุณหภูมิที่ได้นี้ไปยัง PIC18F4550 จากนั้น PIC 18F4550 จะทำการส่งค่าที่ได้ไปที่ โมดูล ZigBee แล้ว โมดูล ZigBee จะทำการส่งค่าอุณหภูมินี้ไป จนกระทั่งถึงภาครับ แล้วภาครับจะทำการส่งค่าอุณหภูมิที่ได้รับนี้ไปแสดงผลที่คอมพิวเตอร์



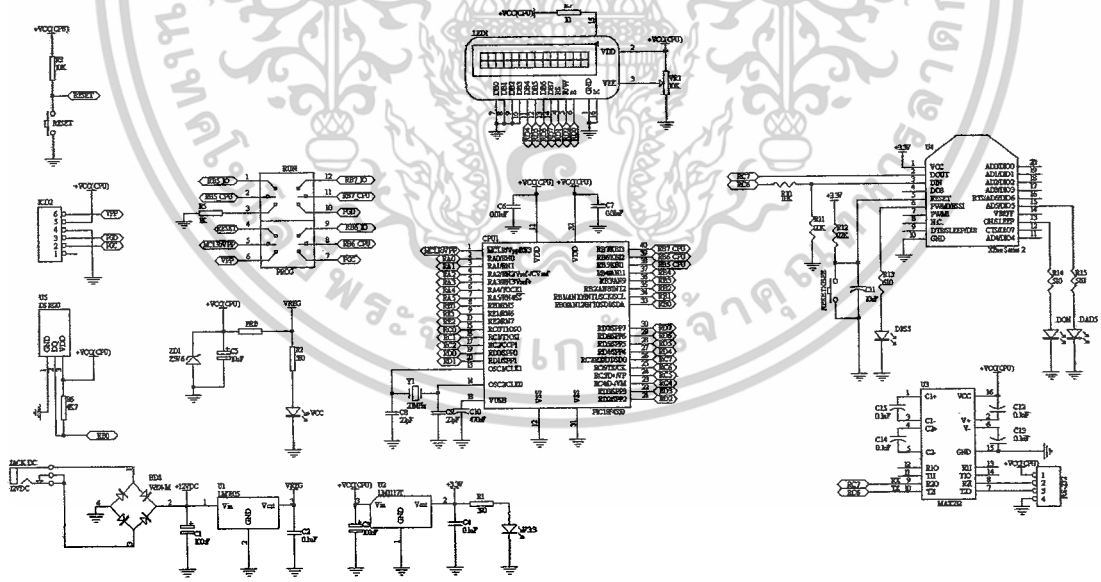

**รูปที่ 3.2** วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ และจอแสดงผล LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การส่งข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยังโมดูล ZigBee นั้นจะทำการติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม USART ของโมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F4550



**รูปที่ 3.3** วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และโมดูล ZigBee

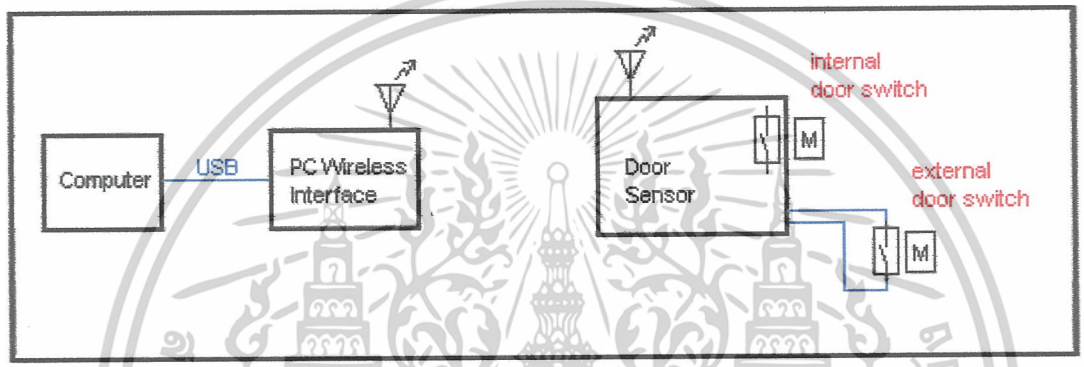


**รูปที่ 3.4** วงจรสมบูรณ์ของวงจรเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (รูปขนาดใหญ่ภาคผนวก ง.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 วงจรการตรวจสอบการผ่านเข้าออกบ้านด้วยเซนเซอร์แม่เหล็ก

ระบบตรวจสอบการผ่านเข้าออกบ้านด้วยเซนเซอร์แม่เหล็ก เป็นระบบรักษาความปลอดภัยแบบง่าย ที่สามารถตรวจสอบการผ่านเข้าออกทางประตูบ้านได้ โดยจะใช้สวิตซ์แม่เหล็กตรวจจับสถานะของประตู และทำการส่งสถานะที่ตรวจพบได้ไปยังโมดูล ZigBee ที่เป็นส่วนส่งข้อมูลไร้สายไปยังคอมพิวเตอร์




**รูปที่ 3.5** บล็อกไดอะแกรม ของการส่งผ่านข้อมูล

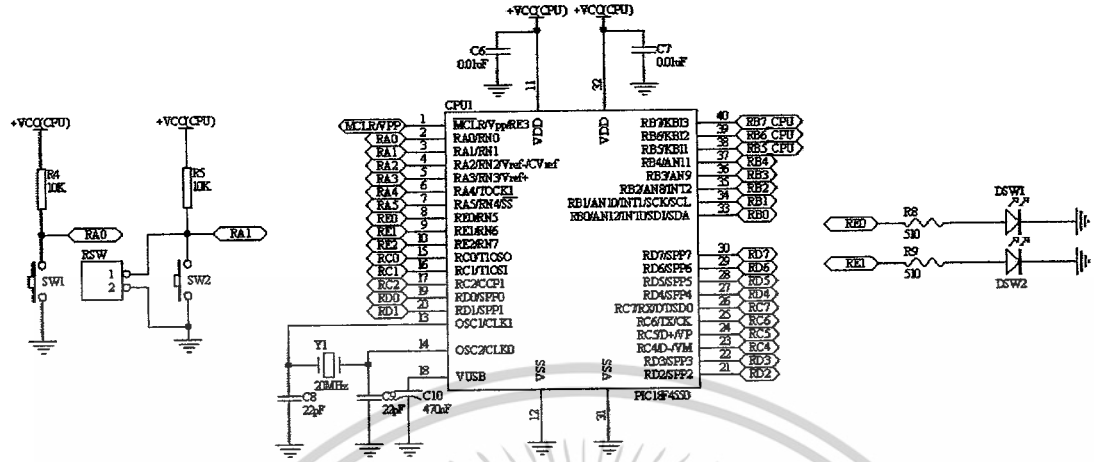
วงจรเซนเซอร์แม่เหล็ก ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ส่วนหลักๆ ดังนี้ คือ

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F4550
- โมดูล ZigBee
- สวิตซ์แม่เหล็ก

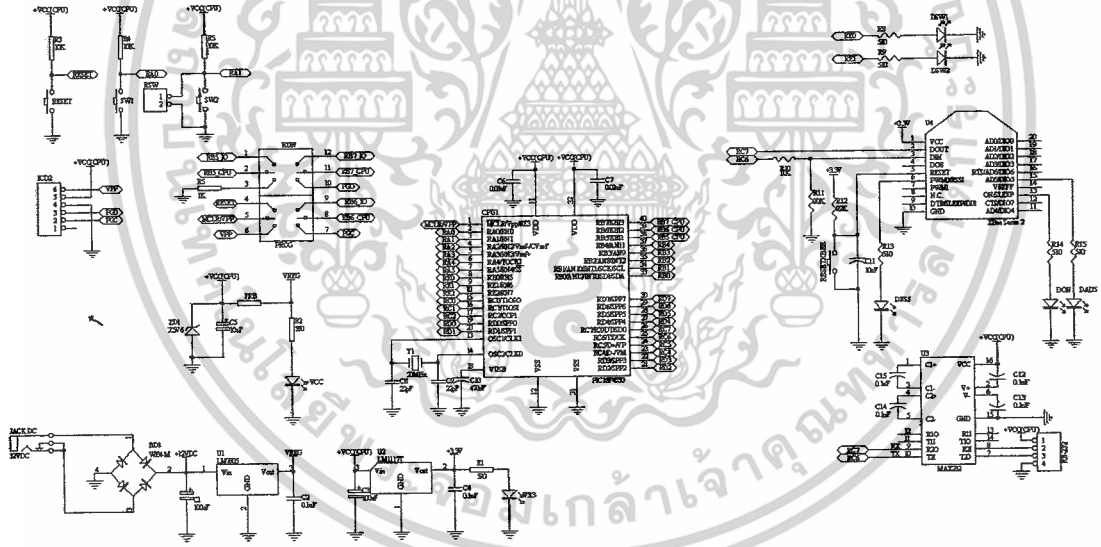
วงจรเซนเซอร์แม่เหล็กจะใช้แหล่งจ่ายไฟแบบเดียวกับวงจรเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ และไมโครคอนโทรลเลอร์เชื่อมต่อไปยังโมดูล ZigBee แบบเดียวกัน

การทำงานของวงจรเซนเซอร์แม่เหล็ก ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F4550 จะตรวจสอบสถานะของสวิตซ์แม่เหล็ก ซึ่งวงจรนี้ได้ออกแบบให้สามารถติดตั้งสวิตซ์แม่เหล็กได้ 2 ตัว ซึ่งสถานะที่ตรวจสอบนั้นมี 2 สถานะ คือ เปิด และ ปิด โดยข้อมูลสถานะที่ตรวจสอบได้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4550 จะติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม USART ไปยังโมดูล ZigBee แล้วจากนั้น โมดูล ZigBee ก็จะส่งข้อมูลแบบไร้สายไปที่ส่วนของภาครับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.6** วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์แม่เหล็ก



**รูปที่ 3.7** วงจรสมบูรณ์ของวงจรเซนเซอร์แม่เหล็ก (รูปขนาดใหญ่ภาคผนวก ง.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ของ วงจรตรวจสอบอุณหภูมิ และ วงจรการตรวจสอบการผ่านเข้าออกบ้านด้วยเซนเซอร์แม่เหล็กนั้น ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ซึ่งใช้ภาษา C ในการเขียนโปรแกรม และใช้โปรแกรม CCS C compiler เป็นคอมไพเลอร์ รวมทั้งสร้างไฟล์ .hex เพื่อใช้เขียนเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งโปรแกรม CCS C compiler นั้นเป็นที่นิยมใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

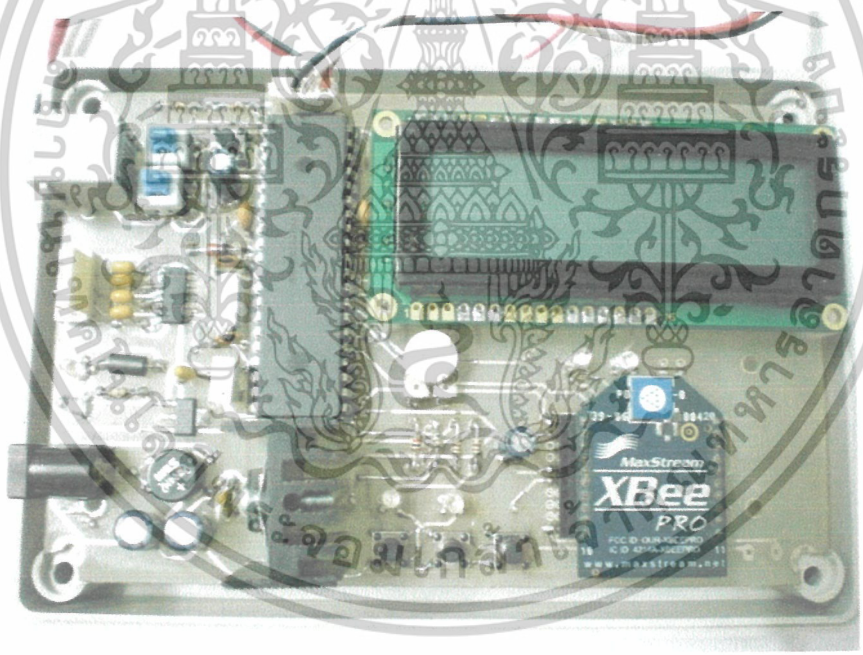
# บทที่ 4

# การทดลองและผลการทดลอง

## 4.1 การทดลอง

ในส่วนการทดลอง ได้มีการทดลองสร้างแผงวงจรภาคส่งของวงจร 2 วงจรด้วยกัน กล่าวคือ มีการสร้างวงจรภาคส่งของวงจรเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ และภาคส่งของวงจรเซนเซอร์แม่เหล็กสำหรับการตรวจสอบการเข้าออกภายในบ้าน ส่วนวงจรภาครับเป็นวงจรสำเร็จรูป สามารถเชื่อมต่อเข้ากับส่วนของเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ผ่านพอร์ต USB

### 4.1.1 แผงวงจรเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ



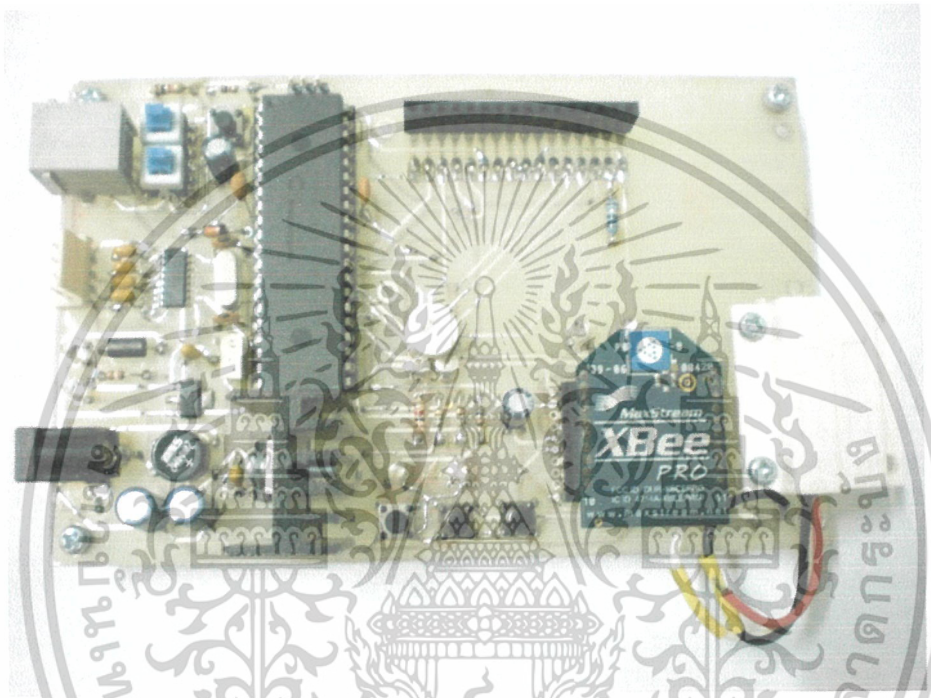

**รูปที่ 4.1** แผงวงจรส่วนภาคส่งและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

ในส่วนของการสร้างวงจรเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ได้ทำการเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4550 ดังที่ได้กล่าวไว้ในส่วนการออกแบบวงจรในบทที่ 3 แล้ว โดยเมื่อเขียนโปรแกรมภาษา C โดยใช้ editor PIC C compiler ในการเขียนโปรแกรมเพื่อติดต่อระหว่าง DS18B20 ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ หลังจากนั้น เป็นส่วนเชื่อมต่อเข้ากับโมดูล LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อแสดงผลในส่วนภาคส่งรวมทั้งส่งข้อมูลเข้าสู่โมดูล ZigBee เพื่อดำเนินการส่งไปยังภาครับ ณ ส่วนแสดงผลกลางต่อไป

### 4.1.2 แผงวงจรเซนเซอร์แม่เหล็ก




**รูปที่ 4.2** แผงวงจรส่วนภาคส่งและเซนเซอร์แม่เหล็ก

ในการสร้างวงจรส่วนภาคส่งวงจรเซนเซอร์แม่เหล็ก สำหรับการตรวจสอบการเข้าออกบ้าน ได้ทำการเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4550 ในการสร้างวงจรได้มีการออกแบบลายวงจรด้วยโปรแกรม Protel วงจรเซนเซอร์แม่เหล็กนี้มีหลักการทำงานอย่างง่าย กล่าวคือ ใช้เซนเซอร์แม่เหล็กเสมือนสวิตซ์ธรรมดา เมื่อชิ้นส่วนทั้งสองประกบเข้าด้วยกันสนิทพอดี ก็จะทำให้ครบวงจรจะได้ข้อมูลออกมารูปแบบหนึ่ง ในทางกลับกัน ถ้าเกิดการแยกออกจากกันของชิ้นส่วนทั้ง 2 ก็จะได้ข้อมูลในอีกลักษณะหนึ่ง ซึ่งได้ส่งเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมและส่งต่อให้กับโมดูล ZigBee

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.1.3 แผงวงจรภาครับ**

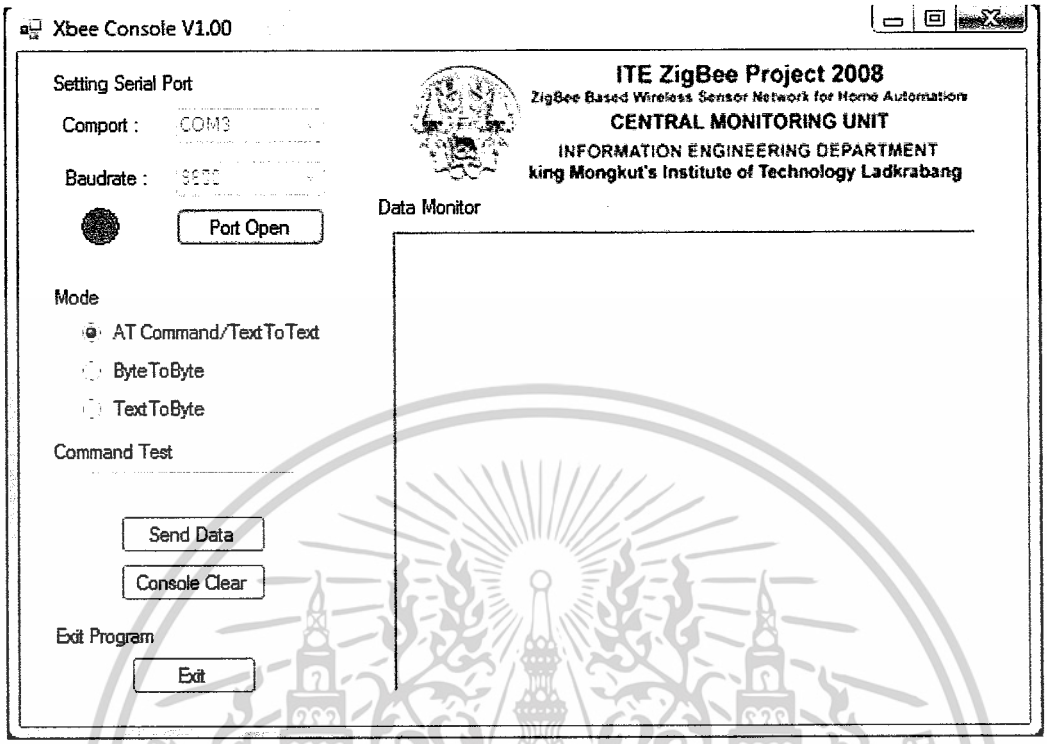
ในส่วนภาครับจะมีเพียงวงจรเดียวเท่านั้น ซึ่งในโครงงานนี้เลือกใช้เป็นโมดูลสำเร็จรูป เพื่อทำหน้ารับข้อมูลจากโมดูล ZigBee ทางภาคส่งมายังโมดูล ZigBee ในภาครับและเชื่อมต่อเข้าสู่คอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต RS-232 โดยมีการใช้ IC FT232RL ในการแปลงพอร์ตจาก RS-232 มาเป็น USB Port เสมือน โดยการส่งข้อมูลยังคงเป็นแบบอนุกรมเช่นเดิม ซึ่งได้นำมาใช้ในการตรวจสอบและวัดข้อมูลที่ได้จากเซนเซนเซอร์ต่อไป

**รูปที่ 4.3** แผงวงจรของส่วนวงจรภาครับ

**4.1.4 ส่วนแสดงผลภาครับ**

เป็นการเขียนโปรแกรมภาษา c# ด้วยโปรแกรม Visual Studio .NET เพื่อเป็นส่วนแสดงผลในการรับค่าที่รับได้จาก ZigBee เพื่อแสดงผลผ่านจอคอมพิวเตอร์ โดยในการใช้งานนั้น จะต้องเชื่อมต่อ แผงวงจรภาครับดังรูปที่ 4.3 เข้ากับคอมพิวเตอร์ก่อน หลังจากนั้น จึงเปิดโปรแกรมนี้ แล้วเลือกพอร์ตที่เชื่อมต่อแผงวงจรดังกล่าวในด้านซ้ายของโปรแกรม และเลือก baud rate ที่ 9600 ก็จะสามารถรับข้อมูลและแสดงผลได้ ดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



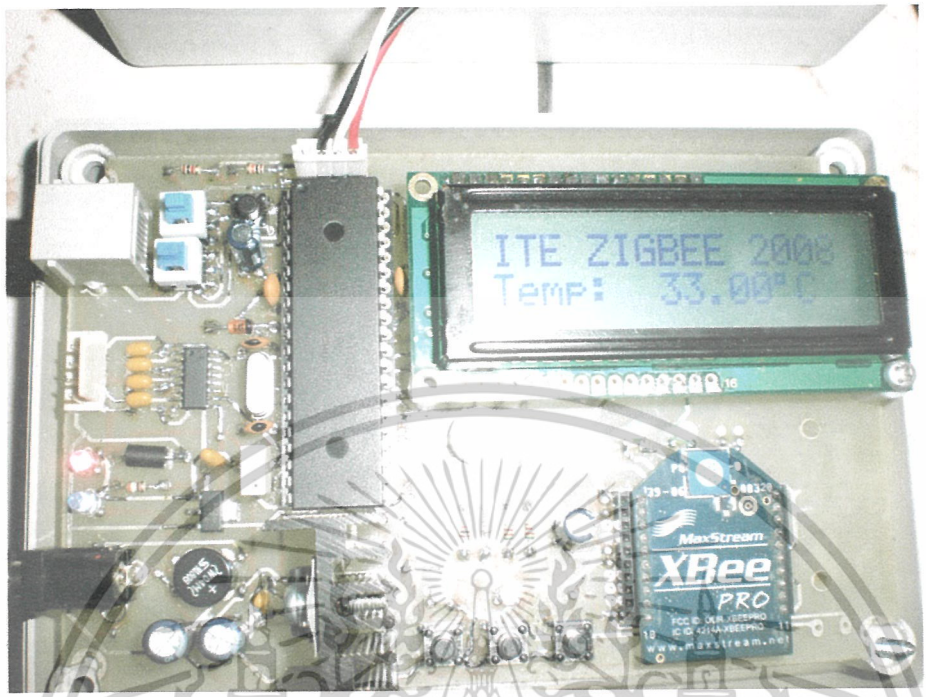

**รูปที่ 4.4** โปรแกรม Xbee Console

## 4.2 ผลการทดลอง

### 4.2.1 ผลการทดลองแผงวงจรภาคส่งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

ทำการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซีและคอมไพล์ผ่านโปรแกรม CCS C Compiler หลังได้ไฟล์ .hex แล้ว สามารถโหลดลงสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4550 แล้วทดสอบการทำงานได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

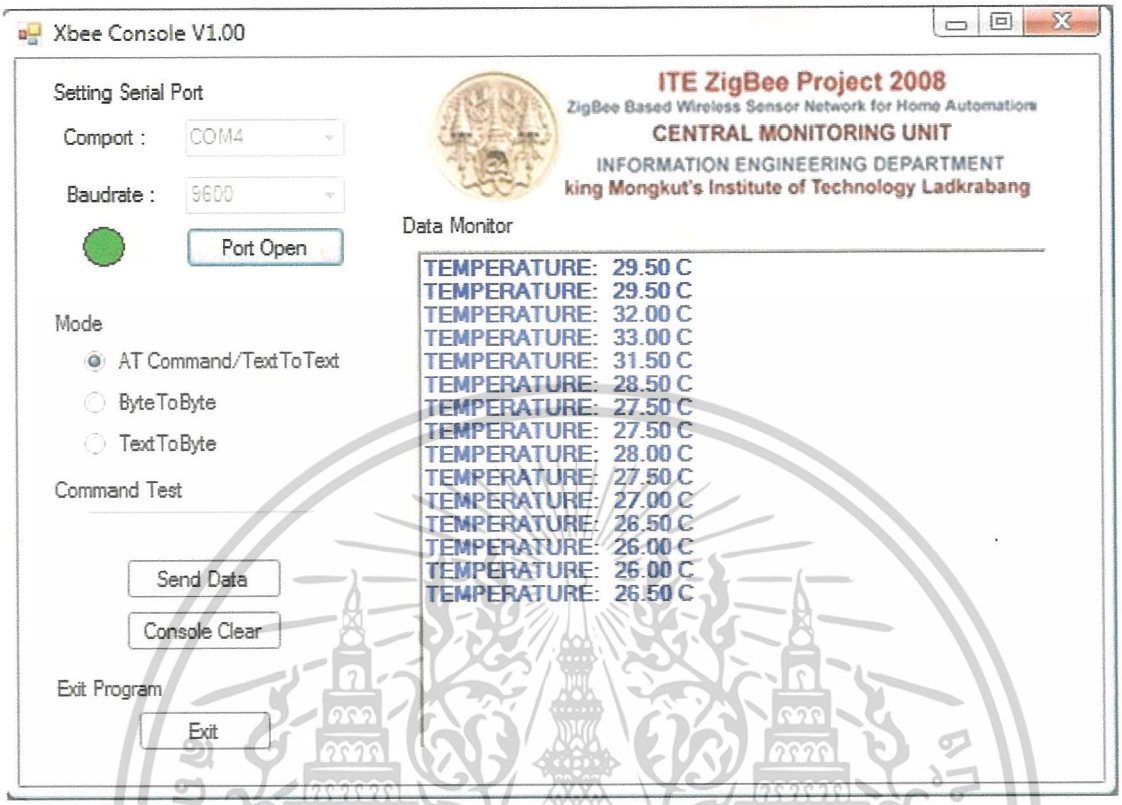



**รูปที่ 4.5** ผลการทดลองแผงวงจรภาคส่งและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าสามารถรับค่าอุณหภูมิจากตัวเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DS18B20 ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์และสามารถแสดงผลผ่านโมดูล LCD ได้

สำหรับในส่วนภาครับทำการแสดงผลผ่านโปรแกรม Xbee Console ดังรูปที่ 4.4 โดย ZigBee จากทางภาคส่งจะทำการส่งข้อมูลแบบไร้สายมายังโมดูล ZigBee ที่ฝั่งภาครับ โดยในการส่งข้อมูลจะทำการส่งข้อมูลแบบต่อเนื่อง เป็นระยะเวลาคงที่ตลอดเวลา เพื่อแสดงผลอุณหภูมิ ที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างสม่ำเสมอ ดังผลการทดลองดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

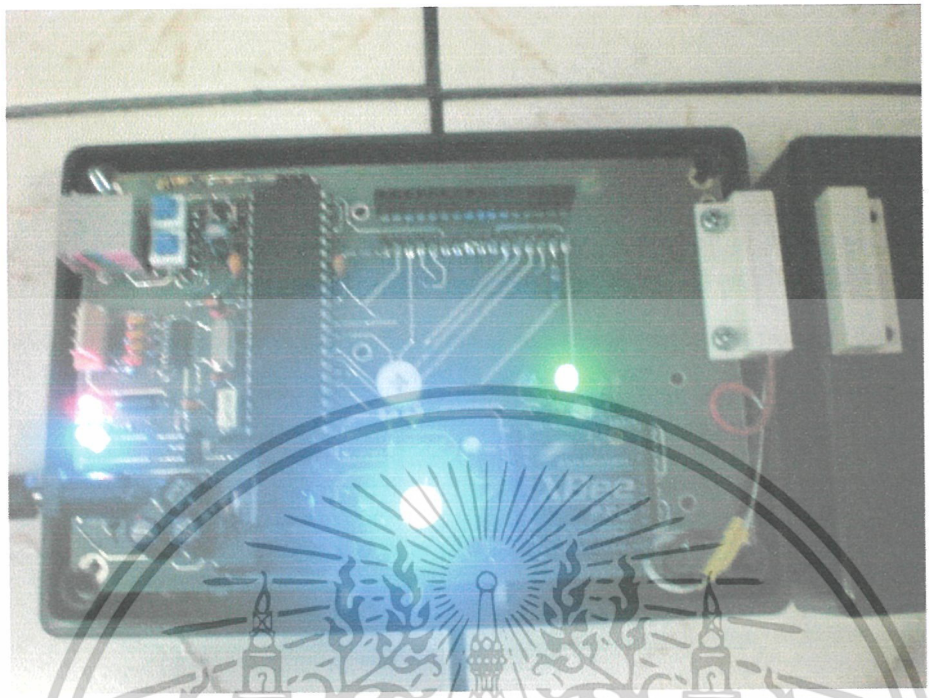



**รูปที่ 4.6** ผลการทดลองรับค่าอุณหภูมิที่ฝั่งภาครับ

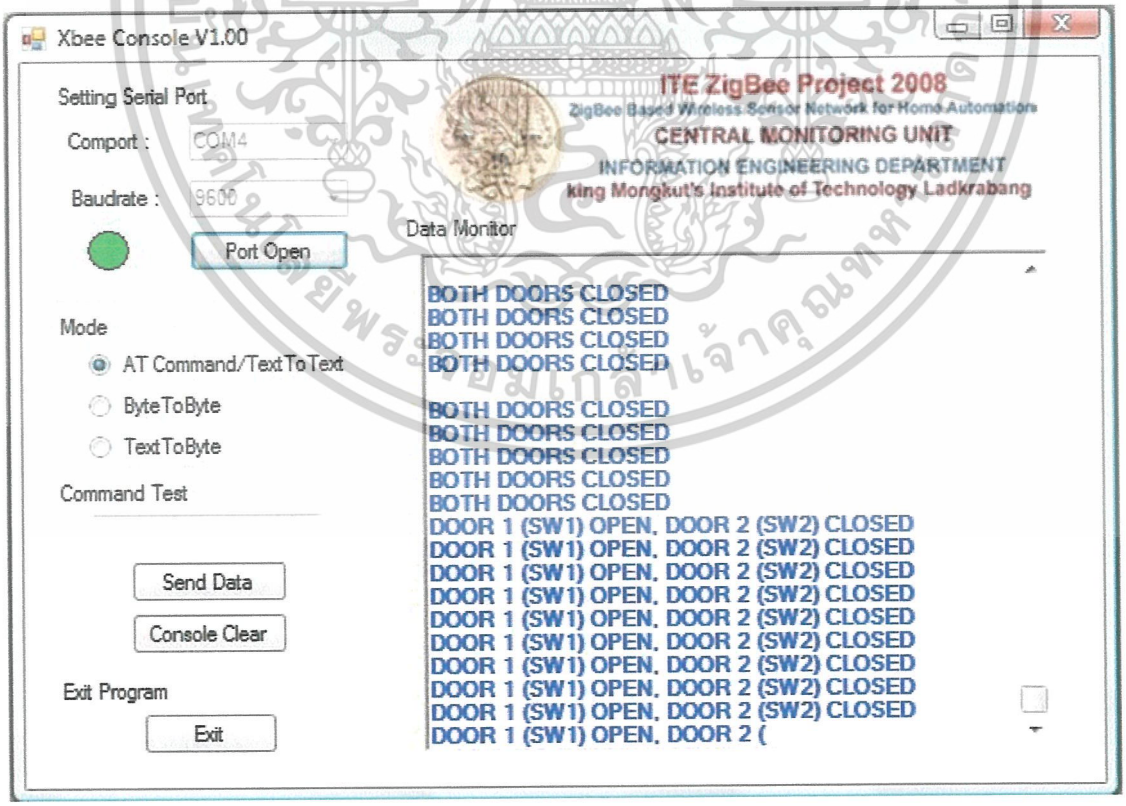
**4.2.2 ผลการทดลองภาคส่งวงจรการตรวจสอบการผ่านเข้าออกบ้านด้วยเซนเซอร์แม่เหล็ก**

ในส่วนวงจรการตรวจสอบการผ่านเข้าออกบ้านด้วยเซนเซอร์แม่เหล็ก ทำการเขียนโปรแกรมภาษาซีเช่นเดียวกับวงจรเซนเซอร์อุณหภูมิ หลังจากดำเนินการโปรแกรมไฟล์ .hex แล้ว ทำการเขียนลงใน ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4550 ได้สำเร็จ จากนั้นได้ทำการทดลองส่งข้อมูลผ่านโมดูล ZigBee ไปยังภาครับได้ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากโปรแกรม Xbee Console เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.7** แผงวงจรเซนเซอร์แม่เหล็กขณะทำการส่งข้อมูล




**รูปที่ 4.8** ผลการทดลองรับค่าสถานะจากเซนเซอร์แม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าสามารถรับค่าสถานะของเซนเซอร์แม่เหล็ก ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 แล้วว่ามีการทำงานเสมือนสวิตซ์ ซึ่งได้ออกแบบไว้จำนวน 2 เซนเซอร์ด้วยกัน โดยโปรแกรม Xbee Console สามารถรับค่าสถานะของประตู (เซนเซอร์แม่เหล็กหรือสวิตซ์) มาแสดงผลได้ ซึ่งจะประกอบด้วย 4 สถานะ คือ

- ประตูทั้งสองปิด (Both doors closed)
- ประตูทั้งสองเปิด (Both doors open)
- ประตูที่ 1 เปิด , ประตูที่ 2 ปิด (Door1(SW1) open, Door2(SW2) closed)
- ประตูที่ 1 ปิด , ประตูที่ 2 เปิด (Door1(SW1) closed, Door2(SW2) open)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5
# สรุปผลการทดลอง

## 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. สามารถออกแบบและควบคุมเซนเซอร์โดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้
2. สามารถทำการออกแบบวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และ ZigBee ให้ทำงานร่วมกันได้
3. สามารถออกแบบ Protocol ในการเชื่อมต่อระหว่าง ZigBee ภาคส่งกับ ZigBee ที่ฝั่งภาครับได้
4. สามารถส่งข้อมูลจากเซนเซอร์ จากแผงวงจรทดลองภาคส่ง ไปยังหน่วยควบคุมกลางที่ภาครับได้
5. สามารถตรวจสอบข้อมูลจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและเซนเซอร์แม่เหล็กที่หน่วยประมวลผลกลางได้

## 5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบระหว่างการดำเนินโครงงาน

1. ความรู้ของผู้ทำโครงงานมีจำกัด จึงทำให้ต้องใช้เวลาในการศึกษา ค้นคว้า และรวบรวมข้อมูลเป็นระยะเวลานาน
2. การเขียนโปรแกรมและออกแบบการทดลอง เกิดข้อผิดพลาดขึ้นส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการดำเนินโครงงาน
3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินโครงงาน ยังไม่แพร่หลายในประเทศไทย จึงทำให้ต้องเสียเวลาในการสั่งซื้อเป็นระยะเวลานาน

## 5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อในอนาคต

1. ทดสอบความถูกต้องและแม่นยำของข้อมูลที่ตรวจสอบได้ของระบบ
2. ติดตั้งและทดลองใช้จริงภายในบ้าน
3. พัฒนาเพิ่มจำนวนโหนดเซนเซอร์ให้มีความหลากหลายมากขึ้น
4. พัฒนาเพิ่มปริมาณของเซนเซอร์ให้คลอบคลุมตามความต้องการใช้งาน
5. พัฒนาส่วนเชื่อมต่อโดยการนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บรรณานุกรม


[1] อารัมภีย์ จันทร์ใย. 2550. **โครงงาน ส่งข้อมูลไร้สายด้วยโมดูล ZigBee นิตยสารเซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ ฉบับที่ 299**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีเอ็ด.

[2] Mikhail Galeev. **Home networking with Zigbee.** Internet,http://www.embedded.com/showArticle.jhtml?articleID=18902431. 2004.

[3] California Energy Commission, **"2008 Building Energy Efficiency Standards for California"**.Internet, http://www.energy.ca.gov/title24/2008standards/index.html

[4] XBee / XBee-Pro OEM RF Modules, **Product Manual v1.0**,MaxStream, 2005.

[5] IEEE Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), **IEEE Standard 802.15.4-2003**, 2003.

[6] E. Callaway, P. Gorday, L. Hester, J. A. Gutierrez, M. Naeve, B. Heile, and V. Bahl, **"Home Networking with IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks,"** *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 70–77, August 2002.

[7] J. Zheng and M. 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*, vol. 27, no. 6, pp. 23–29,2004.

[8] ZigBee Specification. v1.0. **ZigBee Alliance**. Internet, http://www.zigbee.org. 2004.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[9] A. Koubaa, M. Alves, and E. Tovar, **"IEEE 802.15.4: a Federating Communication Protocol for Time-Sensitive Wireless Sensor Networks"**, Sensor Networks and Configurations: Fundamentals, Techniques, Platforms, and Experiments, Springer-Verlag, Germany, pp. 19-49, 2007.

[10] Open-ZB. **Open-source Toolset for IEEE 802.15.4 and ZigBee**. http://www.open-zb.net.

[11] Khanh Tuan Le, **Designing a ZigBee-ready IEEE 802.15.4-compliant radio transceiver**, RF Design Bulletin, November 2004.

[12] Z. Bradac, P. Fiedler and O. Hyncica, **"Design of ZigBee Device,"** in Proceedings of WSEAS ACMOS 2005, Prague.

[13] **Bluetooth Special Interest Group** (SIG). Internet,http://www.bluetooth.org.

[14] X. Chen, H. Zhai, J. Wang, and Y. Fang. **TCP Performance over Mobile Ad Hoc Networks**. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 29(1/2), 2002.

[15] A. Fuggetta, G. P. Picco, and G. Vigna. **Understanding Code Mobility**.IEEE Transactions on Software Engineering, 24(5):342–361, 1998.

[16] M. Kirchhof and S. Linz. **Component-based development of web-enabled ehome services.** Personal Ubiquitous Computer., 9(5):323–332, 2005.

[17] K. H. Mortensen, K. R. Schougaard, and U. P. Schultz. **Distance-Based Access Modifiers Applied to Safety in Home Networks**. In Proceedings of the Second European Symposium on Ambient Intelligence (EUSAI'2004).Springer, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[18] D. D. Spinellis. **The information furnace: consolidated home control.**Personal and Ubiquitous Computing, 7:53–69, 2003.

[19] D. Valtchev and I. Frankov. **Service gateway architecture for a smart home.** IEEE Communications Magazine, 40(4):126–132, 2002.

[20] Tian Zhe, **Development and application of embedded system ,** Beijing University of Aeronautics and Astronautics press, 2005.

[21] Sun Liming, Li Jianzhong, **Wireless sensor network ,**Beijing tsinghua university press, 2005.

[22] Cheng Xingguang, Lu Yiqing, Lv Jing, **An approach to wireless home gateway based on OSGi Standard and Zigbee Protocol,**, Microcomputer applications Vo22, No9-2, 2006.

[23] P. Bhagwat, C. Bisdikian, I. Korpeoglu, A. Krishna, M. Naghshin **"System Design Issues for Low-Power, Low-Cost Short Range Wireless Networking"** IEEE 1999.

[24] P. Popovski T. Kozlova L. Gavrilovska R. Prasad, **"Device Discovery in Short-Range Wireless Ad Hoc Networks,"** IEEE Computer society, 2002.

[25] David G. Leeper, **"Ultrawideband - The Next Step in Short-Range Wireless"**,Intel Corporation, Chandler, Arizona 85226, USA.

[26] Patrice Oehen, **"ZigBee An Overview of upcoming standard"**, Distributed Computing Seminar – ZigBee, California, USA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ก.

# Manual XBee/XBee-PRO OEM RF Modules

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 1. XBee®/XBee-PRO OEM RF Modules

The XBee and XBee-PRO OEM RF Modules were engineered to meet IEEE 802.15.4 standards and support the unique needs of low-cost, low-power wireless sensor networks. The modules require minimal power and provide reliable delivery of data between devices.

The modules operate within the ISM 2.4 GHz frequency band and are pin-for-pin compatible with each other.

## Key Features

### Long Range Data Integrity

**XBee**

- Indoor/Urban: up to 100' (30 m)
- Outdoor line-of-sight: up to 300' (90 m)
- Transmit Power: 1 mW (0 dBm)
- Receiver Sensitivity: -92 dBm

**XBee-PRO**

- Indoor/Urban: up to 300' (90 m), 200' (60 m) for International variant
- Outdoor line-of-sight: up to 1 mile (1600 m), 2500' (750 m) for International variant
- Transmit Power: 63mW (18dBm), 10mW (10dBm) for International variant
- Receiver Sensitivity: -100 dBm

RF Data Rate: 250,000 bps

### Advanced Networking & Security

Retries and Acknowledgements

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

Each direct sequence channels has over 65,000 unique network addresses available

Source/Destination Addressing

Unicast & Broadcast Communications

Point-to-point, point-to-multipoint and peer-to-peer topologies supported

### Low Power

**XBee**

- TX Peak Current: 45 mA (@3.3 V)
- RX Current: 50 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10 µA

**XBee-PRO**

- TX Peak Current: 250mA (150mA for international variant)
- TX Peak Current (RPSMA module only): 340mA (180mA for international variant
- RX Current: 55 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10 µA

### ADC and I/O line support

Analog-to-digital conversion, Digital I/O

I/O Line Passing

### Easy-to-Use

No configuration necessary for out-of box RF communications

Free X-CTU Software (Testing and configuration software)

AT and API Command Modes for configuring module parameters

Extensive command set

Small form factor

## Worldwide Acceptance

**FCC Approval** (USA) Refer to Appendix A [p63] for FCC Requirements. Systems that contain XBee®/XBee-PRO RF Modules inherit Digi Certifications.

ISM (Industrial, Scientific & Medical) **2.4 GHz frequency band**

Manufactured under **ISO 9001:2000** registered standards

XBee®/XBee-PRO RF Modules aare optimized for use in the United States, Canada, Australia, Israel, Japan, and Europe. Contact Digi for complete list of government agency approvals.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
© 2008 Digi International Inc.

# Specifications

**Table 1-01. Specifications of the XBee®/XBee-PRO OEM RF Modules**

| | | |
|---|---|---|
| **Performance** | | |
| Indoor/Urban Range | Up to 100 ft (30 m) | Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft (60 m) International variant |
| Outdoor RF line-of-sight Range | Up to 300 ft (90 m) | Up to 1 mile (1600 m), up to 2500 ft (750 m) international variant |
| Transmit Power Output (software selectable) | 1mW (0 dBm) | 63mW (18dBm)*<br>10mW (10 dBm) for International variant |
| RF Data Rate | 250,000 bps | 250,000 bps |
| Serial Interface Data Rate (software selectable) | 1200 bps - 250 kbps (non-standard baud rates also supported) | 1200 bps - 250 kbps (non-standard baud rates also supported) |
| Receiver Sensitivity | -92 dBm (1% packet error rate) | -100 dBm (1% packet error rate) |
| **Power Requirements** | | |
| Supply Voltage | 2.8 – 3.4 V | 2.8 – 3.4 V |
| Transmit Current (typical) | 45mA (@ 3.3 V) | 250mA (@3.3 V) (150mA for international variant)<br>RPSMA module only: 340mA (@3.3 V) (180mA for international variant) |
| Idle / Receive Current (typical) | 50mA (@ 3.3 V) | 55mA (@ 3.3 V) |
| Power-down Current | < 10 µA | < 10 µA |
| **General** | | |
| Operating Frequency | ISM 2.4 GHz | ISM 2.4 GHz |
| Dimensions | 0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm) | 0.960" x 1.297" (2.438cm x 3.294cm) |
| Operating Temperature | -40 to 85° C (industrial) | -40 to 85° C (industrial) |
| Antenna Options | Integrated Whip, Chip or U.FL Connector, RPSMA Connector | Integrated Whip, Chip or U.FL Connector, RPSMA Connector |
| **Networking & Security** | | |
| Supported Network Topologies | Point-to-point, Point-to-multipoint & Peer-to-peer | |
| Number of Channels (software selectable) | 16 Direct Sequence Channels | 12 Direct Sequence Channels |
| Addressing Options | PAN ID, Channel and Addresses | PAN ID, Channel and Addresses |
| **Agency Approvals** | | |
| United States (FCC Part 15.247) | OUR-XBEE | OUR-XBEEPRO |
| Industry Canada (IC) | 4214A XBEE | 4214A XBEEPRO |
| Europe (CE) | ETSI | ETSI (Max. 10 dBm transmit power output)* |
| Japan | R201WW07215214 | R201WW08215111* (Max. 10 dBm transmit power output)** |
| Austraila | C-Tick | C-Tick |

* When operating in Europe, XBee-PRO 802.15.4 modules must operate at or below a transmit power output level of 10dBm. Customers have two choices for transmitting at or below 10dBm:

a. Order the standard XBee-PRO module and change the PL command to "0" (10dBm),

b. Order the International variant of the XBee-PRO module, which has a maximum transmit output power of 10dBm (@ PL=4).

Additionally, European regulations stipulate an EIRP power maximum of 12.86 dBm (19 mW) for the XBee-PRO and 12.11 dBm for the XBee when integrating antennas.

** When operating in Japan, only the International variant of the XBee-PRO 802.15.4 module is approved for use.

Antenna Options: The ranges specified are typical when using the integrated Whip (1.5 dBi) and Dipole (2.1 dBi) antennas. The Chip antenna option provides advantages in its form factor; however, it typically yields shorter range than the

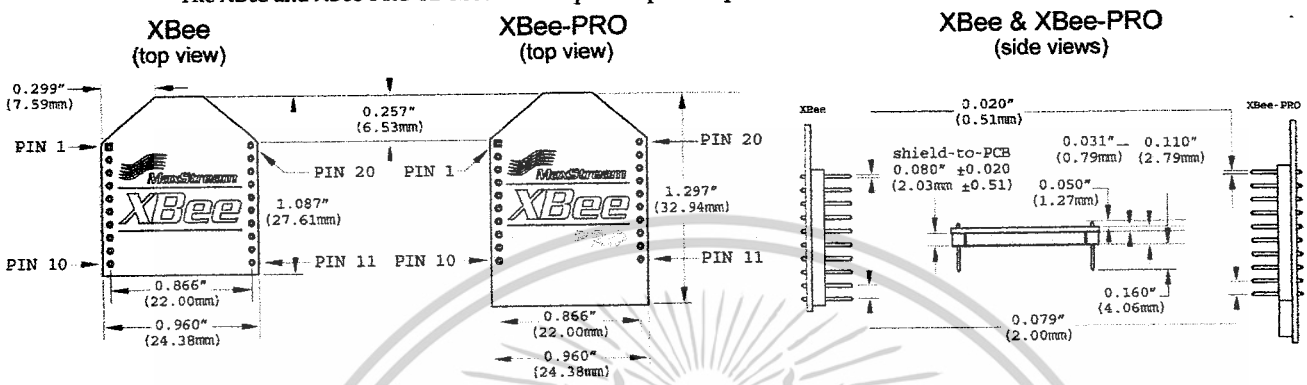
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© 2008 Digi International, Inc.

Whip and Dipole antenna options when transmitting outdoors.For more information, refer to the "XBee Antennas" Knowledgebase Article located on Digi's Support Web site

## Mechanical Drawings

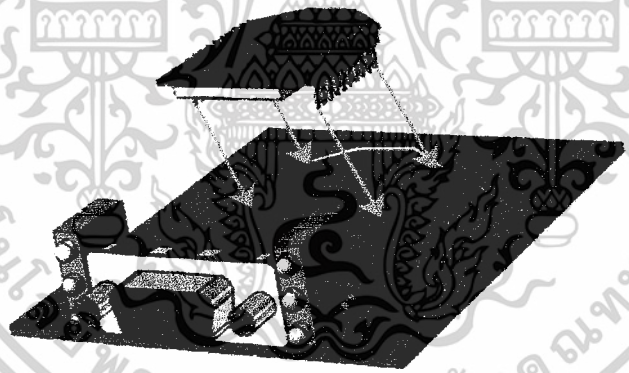
**Figure 1-01. Mechanical drawings of the XBee®/XBee-PRO OEM RF Modules (antenna options not shown)**
The XBee and XBee-PRO RF Modules are pin-for-pin compatible.




## Mounting Considerations

The XBee®/XBee-PRO RF Module was designed to mount into a receptacle (socket) and therefore does not require any soldering when mounting it to a board. The XBee Development Kits contain RS-232 and USB interface boards which use two 20-pin receptacles to receive modules.

**Figure 1-02. XBee Module Mounting to an RS-232 Interface Board.**



The receptacles used on Digi development boards are manufactured by Century Interconnect. Several other manufacturers provide comparable mounting solutions; however, Digi currently uses the following receptacles:

- Through-hole single-row receptacles -
  Samtec P/N: MMS-110-01-L-SV (or equivalent)
- Surface-mount double-row receptacles -
  Century Interconnect P/N: CPRMSL20-D-0-1 (or equivalent)
- Surface-mount single-row receptacles -
  Samtec P/N: SMM-110-02-SM-S

Digi also recommends printing an outline of the module on the board to indicate the orientation the module should be mounted.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
© 2008 Digi International, Inc.

## Pin Signals

**Figure 1-03. XBee®/XBee-PRO RF Module Pin Numbers**

(top sides shown - shields on bottom)

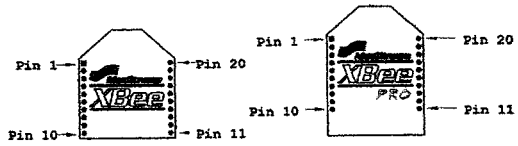



**Table 1-02. Pin Assignments for the XBee and XBee-PRO Modules**
(Low-asserted signals are distinguished with a horizontal line above signal name.)

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | VCC | - | Power supply |
| 2 | DOUT | Output | UART Data Out |
| 3 | DIN / $\overline{\text{CONFIG}}$ | Input | UART Data In |
| 4 | DO8* | Output | Digital Output 8 |
| 5 | $\overline{\text{RESET}}$ | Input | Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns) |
| 6 | PWM0 / RSSI | Output | PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator |
| 7 | PWM1 | Output | PWM Output 1 |
| 8 | [reserved] | - | Do not connect |
| 9 | $\overline{\text{DTR}}$ / SLEEP_RQ / DI8 | Input | Pin Sleep Control Line or Digital Input 8 |
| 10 | GND | - | Ground |
| 11 | AD4 / DIO4 | Either | Analog Input 4 or Digital I/O 4 |
| 12 | $\overline{\text{CTS}}$ / DIO7 | Either | Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7 |
| 13 | ON / $\overline{\text{SLEEP}}$ | Output | Module Status Indicator |
| 14 | VREF | Input | Voltage Reference for A/D Inputs |
| 15 | Associate / AD5 / DIO5 | Either | Associated Indicator, Analog Input 5 or Digital I/O 5 |
| 16 | $\overline{\text{RTS}}$ / AD6 / DIO6 | Either | Request-to-Send Flow Control, Analog Input 6 or Digital I/O 6 |
| 17 | AD3 / DIO3 | Either | Analog Input 3 or Digital I/O 3 |
| 18 | AD2 / DIO2 | Either | Analog Input 2 or Digital I/O 2 |
| 19 | AD1 / DIO1 | Either | Analog Input 1 or Digital I/O 1 |
| 20 | AD0 / DIO0 | Either | Analog Input 0 or Digital I/O 0 |

* Function is not supported at the time of this release

**Design Notes:**

- Minimum connections: VCC, GND, DOUT & DIN
- Minimum connections for updating firmware: VCC, GND, DIN, DOUT, RTS & DTR
- Signal Direction is specified with respect to the module
- Module includes a 50k Ω pull-up resistor attached to $\overline{\text{RESET}}$
- Several of the input pull-ups can be configured using the PR command
- Unused pins should be left disconnected

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© 2008 Digi International, Inc.

# Electrical Characteristics

**Table 1-03. DC Characteristics (VCC = 2.8 - 3.4 VDC)**

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $V_{IL}$ | Input Low Voltage | All Digital Inputs | - | - | 0.35 * VCC | V |
| $V_{IH}$ | Input High Voltage | All Digital Inputs | 0.7 * VCC | - | - | V |
| $V_{OL}$ | Output Low Voltage | $I_{OL}$ = 2 mA, VCC >= 2.7 V | - | - | 0.5 | V |
| $V_{OH}$ | Output High Voltage | $I_{OH}$ = -2 mA, VCC >= 2.7 V | VCC - 0.5 | - | - | V |
| $I_{IN}$ | Input Leakage Current | $V_{IN}$ = VCC or GND, all inputs, per pin | - | 0.025 | 1 | µA |
| $I_{OZ}$ | High Impedance Leakage Current | $V_{IN}$ = VCC or GND, all I/O High-Z, per pin | - | 0.025 | 1 | µA |
| TX | Transmit Current | VCC = 3.3 V | - | 45 (XBee) | 215, 140 (PRO, Int) | - | mA |
| RX | Receive Current | VCC = 3.3 V | - | 50 (XBee) | 55 (PRO) | - | mA |
| PWR-DWN | Power-down Current | SM parameter = 1 | - | < 10 | | - | µA |

**Table 1-04. ADC Characteristics (Operating)**

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $V_{REFH}$ | VREF - Analog-to-Digital converter reference range | | 2.08 | - | $V_{DDAD}$ | V |
| $I_{REF}$ | VREF - Reference Supply Current | Enabled | - | 200 | - | µA |
| | | Disabled or Sleep Mode | - | < 0.01 | 0.02 | µA |
| $V_{INDC}$ | Analog Input Voltage[1] | | $V_{SSAD}$ - 0.3 | - | $V_{DDAD}$ + 0.3 | V |

1. Maximum electrical operating range, not valid conversion range.

**Table 1-05. ADC Timing/Performance Characteristics[1]**

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $R_{AS}$ | Source Impedance at Input[2] | | - | - | 10 | kΩ |
| $V_{AIN}$ | Analog Input Voltage[3] | | $V_{REFL}$ | | $V_{REFH}$ | V |
| RES | Ideal Resolution (1 LSB)[4] | 2.08V ≤ $V_{DDAD}$ ≤ 3.6V | 2.031 | - | 3.516 | mV |
| DNL | Differential Non-linearity[5] | | - | ±0.5 | ±1.0 | LSB |
| INL | Integral Non-linearity[6] | | - | ±0.5 | ±1.0 | LSB |
| $E_{ZS}$ | Zero-scale Error[7] | | - | ±0.4 | ±1.0 | LSB |
| $F_{FS}$ | Full-scale Error[8] | | - | ±0.4 | ±1.0 | LSB |
| $E_{IL}$ | Input Leakage Error[9] | | - | ±0.05 | ±5.0 | LSB |
| $E_{TU}$ | Total Unadjusted Error[10] | | - | ±1.1 | ±2.5 | LSB |

1. All ACCURACY numbers are based on processor and system being in WAIT state (very little activity and no IO switching) and that adequate low-pass filtering is present on analog input pins (filter with 0.01 µF to 0.1 µF capacitor between analog input and VREFL). Failure to observe these guidelines may result in system or microcontroller noise causing accuracy errors which will vary based on board layout and the type and magnitude of the activity.
Data transmission and reception during data conversion may cause some degradation of these specifications, depending on the number and timing of packets. It is advisable to test the ADCs in your installation if best accuracy is required.
2. $R_{AS}$ is the real portion of the impedance of the network driving the analog input pin. Values greater than this amount may not fully charge the input circuitry of the ATD resulting in accuracy error.
3. Analog input must be between $V_{REFL}$ and $V_{REFH}$ for valid conversion. Values greater than $V_{REFH}$ will convert to $3FF.
4. The resolution is the ideal step size or 1LSB = $(V_{REFH}-V_{REFL})/1024$
5. Differential non-linearity is the difference between the current code width and the ideal code width (1LSB). The current code width is the difference in the transition voltages to and from the current code.
6. Integral non-linearity is the difference between the transition voltage to the current code and the adjusted ideal transition voltage for the current code. The adjusted ideal transition voltage is $(Current\ Code-1/2)*(1/((V_{REFH}+E_{FS})-(V_{REFL}+E_{ZS})))$.
7. Zero-scale error is the difference between the transition to the first valid code and the ideal transition to that code. The Ideal transition voltage to a given code is $(Code-1/2)*(1/(V_{REFH}-V_{REFL}))$.
8. Full-scale error is the difference between the transition to the last valid code and the ideal transition to that code. The ideal transition voltage to a given code is $(Code-1/2)*(1/(V_{REFH}-V_{REFL}))$.
9. Input leakage error is error due to input leakage across the real portion of the impedance of the network driving the analog pin. Reducing the impedance of the network reduces this error.
10. Total unadjusted error is the difference between the transition voltage to the current code and the ideal straight-line transfer function. This measure of error includes inherent quantization error (1/2LSB) and circuit error (differential, integral, zero-scale, and full-scale) error. The specified value of $E_{TU}$ assumes zero $E_{IL}$ (no leakage or zero real source impedance).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© 2008 Digi International, Inc.

# 2. RF Module Operation

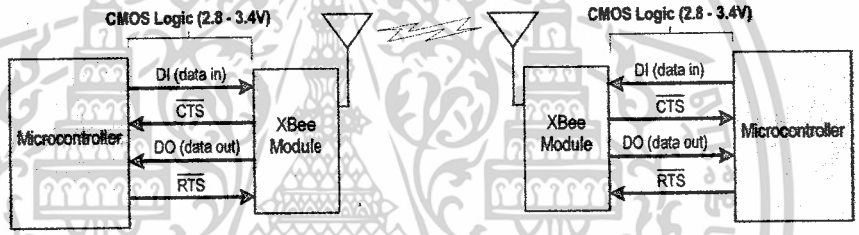
## Serial Communications

The XBee®/XBee-PRO OEM RF Modules interface to a host device through a logic-level asynchronous serial port. Through its serial port, the module can communicate with any logic and voltage compatible UART; or through a level translator to any serial device (For example: Through a Digi proprietary RS-232 or USB interface board).

### UART Data Flow

Devices that have a UART interface can connect directly to the pins of the RF module as shown in the figure below.

**Figure 2-01. System Data Flow Diagram in a UART-interfaced environment**
(Low-asserted signals distinguished with horizontal line over signal name.)

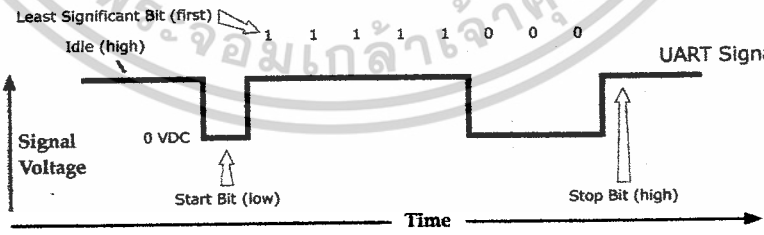



#### Serial Data

Data enters the module UART through the DI pin (pin 3) as an asynchronous serial signal. The signal should idle high when no data is being transmitted.

Each data byte consists of a start bit (low), 8 data bits (least significant bit first) and a stop bit (high). The following figure illustrates the serial bit pattern of data passing through the module.

**Figure 2-02. UART data packet 0x1F (decimal number "31") as transmitted through the RF module**
Example Data Format is 8-N-1 (bits - parity - # of stop bits)




The module UART performs tasks, such as timing and parity checking, that are needed for data communications. Serial communications depend on the two UARTs to be configured with compatible settings (baud rate, parity, start bits, stop bits, data bits).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
© 2008 Digi International Inc.

## Transparent Operation

By default, XBee®/XBee-PRO RF Modules operate in Transparent Mode. When operating in this mode, the modules act as a serial line replacement - all UART data received through the DI pin is queued up for RF transmission. When RF data is received, the data is sent out the DO pin.

### Serial-to-RF Packetization

Data is buffered in the DI buffer until one of the following causes the data to be packetized and transmitted:

1. No serial characters are received for the amount of time determined by the RO (Packetization Timeout) parameter. If RO = 0, packetization begins when a character is received.
2. The maximum number of characters that will fit in an RF packet (100) is received.
3. The Command Mode Sequence (GT + CC + GT) is received. Any character buffered in the DI buffer before the sequence is transmitted.

If the module cannot immediately transmit (for instance, if it is already receiving RF data), the serial data is stored in the DI Buffer. The data is packetized and sent at any RO timeout or when 100 bytes (maximum packet size) are received.

If the DI buffer becomes full, hardware or software flow control must be implemented in order to prevent overflow (loss of data between the host and module).

## API Operation

API (Application Programming Interface) Operation is an alternative to the default Transparent Operation. The frame-based API extends the level to which a host application can interact with the networking capabilities of the module.

When in API mode, all data entering and leaving the module is contained in frames that define operations or events within the module.

Transmit Data Frames (received through the DI pin (pin 3)) include:

- RF Transmit Data Frame
- Command Frame (equivalent to AT commands)

Receive Data Frames (sent out the DO pin (pin 2)) include:

- RF-received data frame
- Command response
- Event notifications such as reset, associate, disassociate, etc.

The API provides alternative means of configuring modules and routing data at the host application layer. A host application can send data frames to the module that contain address and payload information instead of using command mode to modify addresses. The module will send data frames to the application containing status packets; as well as source, RSSI and payload information from received data packets.

The API operation option facilitates many operations such as the examples cited below:

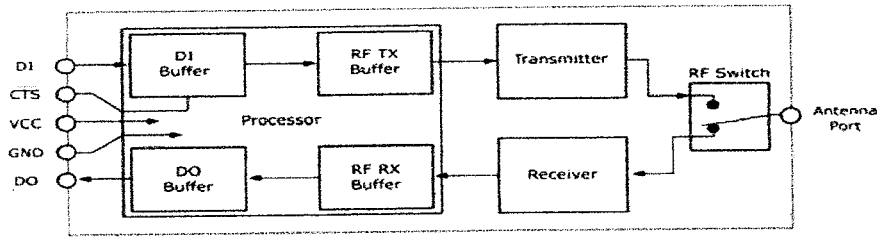
-> Transmitting data to multiple destinations without entering Command Mode
-> Receive success/failure status of each transmitted RF packet
-> Identify the source address of each received packet

To implement API operations, refer to API sections [p56].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
© 2008 Digi International, Inc.

## Flow Control

**Figure 2-03. Internal Data Flow Diagram**




### DI (Data In) Buffer

When serial data enters the RF module through the DI pin (pin 3), the data is stored in the DI Buffer until it can be processed.

**Hardware Flow Control ($\overline{\text{CTS}}$).** When the DI buffer is 17 bytes away from being full; by default, the module de-asserts $\overline{\text{CTS}}$ (high) to signal to the host device to stop sending data [refer to D7 (DIO7 Configuration) parameter]. $\overline{\text{CTS}}$ is re-asserted after the DI Buffer has 34 bytes of memory available.

**How to eliminate the need for flow control:**

1. Send messages that are smaller than the DI buffer size (202 bytes).
2. Interface at a lower baud rate [BD (Interface Data Rate) parameter] than the throughput data rate.

**Case in which the DI Buffer may become full and possibly overflow:**

If the module is receiving a continuous stream of RF data, any serial data that arrives on the DI pin is placed in the DI Buffer. The data in the DI buffer will be transmitted over-the-air when the module is no longer receiving RF data in the network.

Refer to the RO (Packetization Timeout), BD (Interface Data Rate) and D7 (DIO7 Configuration) command descriptions for more information.

### DO (Data Out) Buffer

When RF data is received, the data enters the DO buffer and is sent out the serial port to a host device. Once the DO Buffer reaches capacity, any additional incoming RF data is lost.

**Hardware Flow Control ($\overline{\text{RTS}}$).** If $\overline{\text{RTS}}$ is enabled for flow control (D6 (DIO6 Configuration) Parameter = 1), data will not be sent out the DO Buffer as long as $\overline{\text{RTS}}$ (pin 16) is de-asserted.

**Two cases in which the DO Buffer may become full and possibly overflow:**

1. If the RF data rate is set higher than the interface data rate of the module, the module will receive data from the transmitting module faster than it can send the data to the host.
2. If the host does not allow the module to transmit data out from the DO buffer because of being held off by hardware or software flow control.

Refer to the D6 (DIO6 Configuration) command description for more information.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© 2008 Digi International, Inc.

# ADC and Digital I/O Line Support

The XBee®/XBee-PRO RF Modules support ADC (Analog-to-digital conversion) and digital I/O line passing. The following pins support multiple functions:

**Table 2-01. Pin functions and their associated pin numbers and commands**
AD = Analog-to-Digital Converter, DIO = Digital Input/Output
Pin functions not applicable to this section are denoted within (parenthesis).

| | | |
|---|---|---|
| AD0 / DIO0 | 20 | D0 |
| AD1 / DIO1 | 19 | D1 |
| AD2 / DIO2 | 18 | D2 |
| AD3 / DIO3 / (COORD_SEL) | 17 | D3 |
| AD4 / DIO4 | 11 | D4 |
| AD5 / DIO5 / (ASSOCIATE) | 15 | D5 |
| DIO6 / (RTS) | 16 | D6 |
| DIO7 / (CTS) | 12 | D7 |
| DI8 / (DTR) / (Sleep_RQ) | 9 | D8 |

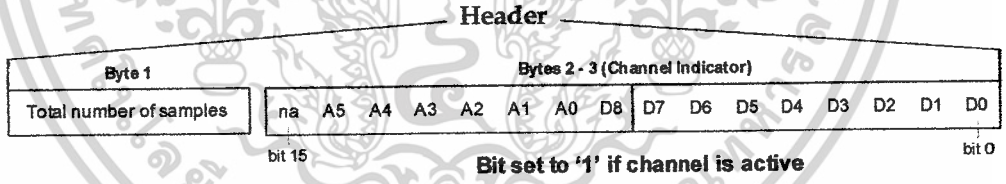
To enable ADC and DIO pin functions:

| | |
|---|---|
| For ADC Support: | Set ATDn = 2 |
| For Digital Input support: | Set ATDn = 3 |
| For Digital Output Low support: | Set ATDn = 4 |
| For Digital Output High support: | Set ATDn = 5 |

## I/O Data Format

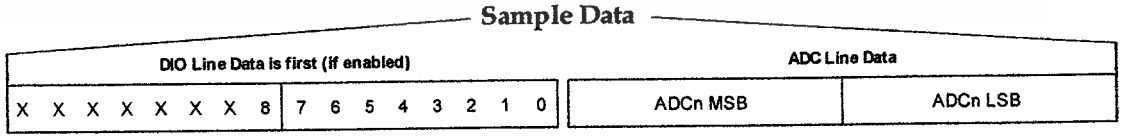
I/O data begins with a header. The first byte of the header defines the number of samples forthcoming. The last 2 bytes of the header (Channel Indicator) define which inputs are active. Each bit represents either a DIO line or ADC channel.

**Figure 2-04. Header**




Sample data follows the header and the channel indicator frame is used to determine how to read the sample data. If any of the DIO lines are enabled, the first 2 bytes are the DIO sample. The ADC data follows. ADC channel data is represented as an unsigned 10-bit value right-justified on a 16- bit boundary.

**Figure 2-05. Sample Data**




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
© 2008 Digi International, Inc.

## API Support

I/O data is sent out the UART using an API frame. All other data can be sent and received using Transparent Operation [refer to p10] or API framing if API mode is enabled (AP > 0).

API Operations support two RX (Receive) frame identifiers for I/O data (set 16-bit address to 0xFFFE and the module will do 64-bit addressing):

- 0x82 for RX (Receive) Packet: 64-bit address I/O
- 0x83 for RX (Receive) Packet: 16-bit address I/O

The API command header is the same as shown in the "RX (Receive) Packet: 64-bit Address" and "RX (Receive) Packet: 64-bit Address" API types [refer to p62]. RX data follows the format described in the I/O Data Format section [p12].

**Applicable Commands:** AP (API Enable)

## Sleep Support

Automatic wakeup sampling can be suppressed by setting SO bit 1.When an RF module wakes, it will always do a sample based on any active ADC or DIO lines. This allows sampling based on the sleep cycle whether it be Cyclic Sleep (SM parameter = 4 or 5) or Pin Sleep (SM = 1 or 2). To gather more samples when awake, set the IR (Sample Rate) parameter.

For Cyclic Sleep modes: If the IR parameter is set, the module will stay awake until the IT (Samples before TX) parameter is met. The module will stay awake for ST (Time before Sleep) time.

**Applicable Commands:** IR (Sample Rate), IT (Samples before TX), SM (Sleep Mode), IC (DIO Change Detect), SO (Sleep Options)

## DIO Pin Change Detect

When "DIO Change Detect" is enabled (using the IC command), DIO lines 0-7 are monitored. When a change is detected on a DIO line, the following will occur:

1. An RF packet is sent with the updated DIO pin levels. This packet will not contain any ADC samples.
2. Any queued samples are transmitted before the change detect data. This may result in receiving a packet with less than IT (Samples before TX) samples.

Note: Change detect will not affect Pin Sleep wake-up. The D8 pin (DTR/Sleep_RQ/DI8) is the only line that will wake a module from Pin Sleep. If not all samples are collected, the module will still enter Sleep Mode after a change detect packet is sent.

**Applicable Commands**: IC (DIO Change Detect), IT (Samples before TX)

NOTE: Change detect is only supported when the Dx (DIOx Configuration) parameter equals 3,4 or 5.

## Sample Rate (Interval)

The Sample Rate (Interval) feature allows enabled ADC and DIO pins to be read periodically on modules that are not configured to operate in Sleep Mode. When one of the Sleep Modes is enabled and the IR (Sample Rate) parameter is set, the module will stay awake until IT (Samples before TX) samples have been collected.

Once a particular pin is enabled, the appropriate sample rate must be chosen. The maximum sample rate that can be achieved while using one A/D line is 1 sample/ms or 1 KHz (Note that the modem will not be able to keep up with transmission when IR & IT are equal to "1" and that configuring the modem to sample at rates greater than once every 20ms is not recommended).

**Applicable Commands**: IR (Sample Rate), IT (Samples before TX), SM (Sleep Mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## I/O Line Passing

Virtual wires can be set up between XBee®/XBee-PRO Modules. When an RF data packet is received that contains I/O data, the receiving module can be setup to update any enabled outputs (PWM and DIO) based on the data it receives.

Note that I/O lines are mapped in pairs. For example: AD0 can only update PWM0 and DI5 can only update DO5. The default setup is for outputs not to be updated, which results in the I/O data being sent out the UART (refer to the IU (Enable I/O Output) command). To enable the outputs to be updated, the IA (I/O Input Address) parameter must be setup with the address of the module that has the appropriate inputs enabled. This effectively binds the outputs to a particular module's input. This does not affect the ability of the module to receive I/O line data from other modules - only its ability to update enabled outputs. The IA parameter can also be setup to accept I/O data for output changes from any module by setting the IA parameter to 0xFFFF.

When outputs are changed from their non-active state, the module can be setup to return the output level to it non-active state. The timers are set using the Tn (Dn Output Timer) and PT (PWM Output Timeout) commands. The timers are reset every time a valid I/O packet (passed IA check) is received. The IC (Change Detect) and IR (Sample Rate) parameters can be setup to keep the output set to their active output if the system needs more time than the timers can handle.

Note: DI8 cannot be used for I/O line passing.

**Applicable Commands:** IA (I/O Input Address), Tn (Dn Output Timeout), P0 (PWM0 Configuration), P1 (PWM1 Configuration), M0 (PWM0 Output Level), M1 (PWM1 Output Level), PT (PWM Output Timeout), RP (RSSSI PWM Timer)

## Configuration Example

As an example for a simple A/D link, a pair of RF modules could be set as follows:

| Remote Configuration | Base Configuration |
|---|---|
| DL = 0x1234 | DL = 0x5678 |
| MY = 0x5678 | MY = 0x1234 |
| D0 = 2 | P0 = 2 |
| D1 = 2 | P1 = 2 |
| IR = 0x14 | IU = 1 |
| IT = 5 | IA = 0x5678 (or 0xFFFF) |

These settings configure the remote module to sample AD0 and AD1 once each every 20 ms. It then buffers 5 samples each before sending them back to the base module. The base should then receive a 32-Byte transmission (20 Bytes data and 12 Bytes framing) every 100 ms.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© 2008 Digi International, Inc.

# XBee®/XBee-PRO Networks

The following terms will be used to explicate the network operations:

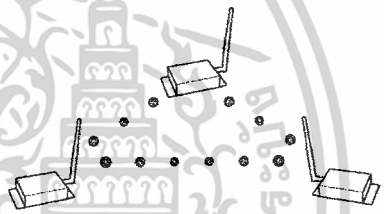
**Table 2-02. Terms and definitions**

| | |
|---|---|
| PAN | Personal Area Network - A data communication network that includes one or more End Devices and optionally a Coordinator. |
| Coordinator | A Full-function device (FFD) that provides network synchronization by polling nodes [NonBeacon (w/ Coordinator) networks only] |
| End Device | *When in the same network as a Coordinator* - RF modules that rely on a Coordinator for synchronization and can be put into states of sleep for low-power applications. |
| Association | The establishment of membership between End Devices and a Coordinator. Association is only applicable in NonBeacon (w/Coordinator) networks. |

## Peer-to-Peer

By default, XBee®/XBee-PRO RF Modules are configured to operate within a Peer-to-Peer network topology and therefore are not dependent upon Master/Slave relationships.NonBeacon systems operate within a Peer-to-Peer network topology and therefore are not dependent upon Master/Slave relationships. This means that modules remain synchronized without use of master/server configurations and each module in the network shares both roles of master and slave. Digi's peer-to-peer architecture features fast synchronization times and fast cold start times. This default configuration accommodates a wide range of RF data applications.

**Figure 2-06. Peer-to-Peer Architecture**



A peer-to-peer network can be established by configuring each module to operate as an End Device (CE = 0), disabling End Device Association on all modules (A1 = 0) and setting ID and CH parameters to be identical across the network.

## NonBeacon (w/ Coordinator)

A device is configured as a Coordinator by setting the CE (Coordinator Enable) parameter to "1". Coordinator power-up is governed by the A2 (Coordinator Association) parameter.

In a Coordinator system, the Coordinator can be configured to use direct or indirect transmissions. If the SP (Cyclic Sleep Period) parameter is set to "0", the Coordinator will send data immediately. Otherwise, the SP parameter determines the length of time the Coordinator will retain the data before discarding it. Generally, SP (Cyclic Sleep Period) and ST (Time before Sleep) parameters should be set to match the SP and ST settings of the End Devices.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
© 2008 Digi International, Inc.

## Association

Association is the establishment of membership between End Devices and a Coordinator. The establishment of membership is useful in scenarios that require a central unit (Coordinator) to relay messages to or gather data from several remote units (End Devices), assign channels or assign PAN IDs.

An RF data network that consists of one Coordinator and one or more End Devices forms a PAN (Personal Area Network). Each device in a PAN has a PAN Identifier [ID (PAN ID) parameter]. PAN IDs must be unique to prevent miscommunication between PANs. The Coordinator PAN ID is set using the ID (PAN ID) and A2 (Coordinator Association) commands.

An End Device can associate to a Coordinator without knowing the address, PAN ID or channel of the Coordinator. The A1 (End Device Association) parameter bit fields determine the flexibility of an End Device during association. The A1 parameter can be used for an End Device to dynamically set its destination address, PAN ID and/or channel.

**For example**: If the PAN ID of a Coordinator is known, but the operating channel is not; the A1 command on the End Device should be set to enable the 'Auto_Associate' and 'Reassign_Channel' bits. Additionally, the ID parameter should be set to match the PAN ID of the associated Coordinator.

### Coordinator / End Device Setup and Operation

To configure a module to operate as a Coordinator, set the CE (Coordinator Enable) parameter to '1'. Set the CE parameter of End Devices to '0' (default). Coordinator and End Devices should contain matching firmware versions.

#### NonBeacon (w/ Coordinator) Systems

The Coordinator can be configured to use direct or indirect transmissions. If the SP (Cyclic Sleep Period) parameter is set to '0', the Coordinator will send data immediately. Otherwise, the SP parameter determines the length of time the Coordinator will retain the data before discarding it. Generally, SP (Cyclic Sleep Period) and ST (Time before Sleep) parameters should be set to match the SP and ST settings of the End Devices.

### Coordinator Start-up

Coordinator power-up is governed by the A2 (Coordinator Association) command. On power-up, the Coordinator undergoes the following sequence of events:

1. **Check A2 parameter- Reassign_PANID Flag**

   **Set (bit 0 = 1)** - The Coordinator issues an Active Scan. The Active Scan selects one channel and transmits a request to the broadcast address (0xFFFF) and broadcast PAN ID (0xFFFF). It then listens on that channel for beacons from any Coordinator operating on that channel. The listen time on each channel is determined by the SD (Scan Duration) parameter value.

   Once the time expires on that channel, the Active Scan selects another channel and again transmits the BeaconRequest as before. This process continues until all channels have been scanned, or until 5 PANs have been discovered. When the Active Scan is complete, the results include a list of PAN IDs and Channels that are being used by other PANs. This list is used to assign an unique PAN ID to the new Coordinator. The ID parameter will be retained if it is not found in the Active Scan results. Otherwise, the ID (PAN ID) parameter setting will be updated to a PAN ID that was not detected.

   **Not Set (bit 0 = 0)** - The Coordinator retains its ID setting. No Active Scan is performed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
© 2008 Digi International, Inc.

**2. Check A2 parameter - Reassign_Channel Flag (bit 1)**

**Set (bit 1 = 1)** - The Coordinator issues an Energy Scan. The Energy Scan selects one channel and scans for energy on that channel. The duration of the scan is specified by the SD (Scan Duration) parameter. Once the scan is completed on a channel, the Energy Scan selects the next channel and begins a new scan on that channel. This process continues until all channels have been scanned.

When the Energy Scan is complete, the results include the maximal energy values detected on each channel. This list is used to determine a channel where the least energy was detected. If an Active Scan was performed (Reassign_PANID Flag set), the channels used by the detected PANs are eliminated as possible channels. Thus, the results of the Energy Scan and the Active Scan (if performed) are used to find the best channel (channel with the least energy that is not used by any detected PAN). Once the best channel has been selected, the CH (Channel) parameter value is updated to that channel.

**Not Set (bit 1 = 0)** - The Coordinator retains its CH setting. An Energy Scan is not performed.

**3. Start Coordinator**

The Coordinator starts on the specified channel (CH parameter) and PAN ID (ID parameter). Note, these may be selected in steps 1 and/or 2 above. The Coordinator will only allow End Devices to associate to it if the A2 parameter "AllowAssociation" flag is set. Once the Coordinator has successfully started, the Associate LED will blink 1 time per second. (The LED is solid if the Coordinator has not started.)

**4. Coordinator Modifications**

Once a Coordinator has started:
Modifying the A2 (Reassign_Channel or Reassign_PANID bits), ID, CH or MY parameters will cause the Coordinator's MAC to reset (The Coordinator RF module (including volatile RAM) is not reset). Changing the A2 AllowAssociation bit will not reset the Coordinator's MAC. In a non-beaconing system, End Devices that associated to the Coordinator prior to a MAC reset will have knowledge of the new settings on the Coordinator. Thus, if the Coordinator were to change its ID, CH or MY settings, the End Devices would no longer be able to communicate with the non-beacon Coordinator. Once a Coordinator has started, the ID, CH, MY or A2 (Reassign_Channel or Reassign_PANID bits) should not be changed.

## End Device Start-up

End Device power-up is governed by the A1 (End Device Association) command. On power-up, the End Device undergoes the following sequence of events:

**1. Check A1 parameter - AutoAssociate Bit**

**Set (bit 2 = 1)** - End Device will attempt to associate to a Coordinator. (refer to steps 2-3).

**Not Set (bit 2 = 0)** - End Device will not attempt to associate to a Coordinator. The End Device will operate as specified by its ID, CH and MY parameters. Association is considered complete and the Associate LED will blink quickly (5 times per second). When the AutoAssociate bit is not set, the remaining steps (2-3) do not apply.

**2. Discover Coordinator (if Auto-Associate Bit Set)**

The End Device issues an Active Scan. The Active Scan selects one channel and transmits a BeaconRequest command to the broadcast address (0xFFFF) and broadcast PAN ID (0xFFFF). It then listens on that channel for beacons from any Coordinator operating on that channel. The listen time on each channel is determined by the SD parameter.

Once the time expires on that channel, the Active Scan selects another channel and again transmits the BeaconRequest command as before. This process continues until all channels have been scanned, or until 5 PANs have been discovered. When the Active Scan is complete, the results include a list of PAN IDs and Channels that are being used by detected PANs.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The End Device selects a Coordinator to associate with according to the A1 parameter "Reassign_PANID" and "Reassign_Channel" flags:

**Reassign_PANID Bit Set (bit 0 = 1)**- End Device can associate with a PAN with any ID value.

**Reassign_PANID Bit Not Set (bit 0 = 0)** - End Device will only associate with a PAN whose ID setting matches the ID setting of the End Device.

**Reassign_Channel Bit Set (bit 1 = 1)** - End Device can associate with a PAN with any CH value.

**Reassign_Channel Bit Not Set (bit 1 = 0)**- End Device will only associate with a PAN whose CH setting matches the CH setting of the End Device.

After applying these filters to the discovered Coordinators, if multiple candidate PANs exist, the End Device will select the PAN whose transmission link quality is the strongest. If no valid Coordinator is found, the End Device will either go to sleep (as dictated by its SM (Sleep Mode) parameter) or retry Association.

Note - An End Device will also disqualify Coordinators if they are not allowing association (A2 - AllowAssociation bit); or, if the Coordinator is not using the same NonBeacon scheme as the End Device. (They must both be programmed with NonBeacon code.)

**3. Associate to Valid Coordinator**

Once a valid Coordinator is found (step 2), the End Device sends an AssociationRequest message to the Coordinator. It then waits for an AssociationConfirmation to be sent from the Coordinator. Once the Confirmation is received, the End Device is Associated and the Associate LED will blink rapidly (2 times per second). The LED is solid if the End Device has not associated.

**4. End Device Changes once an End Device has associated**

Changing A1, ID or CH parameters will cause the End Device to disassociate and restart the Association procedure.

If the End Device fails to associate, the AI command can give some indication of the failure.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# XBee®/XBee-PRO Addressing

Every RF data packet sent over-the-air contains a Source Address and Destination Address field in its header. The RF module conforms to the 802.15.4 specification and supports both short 16-bit addresses and long 64-bit addresses. A unique 64-bit IEEE source address is assigned at the factory and can be read with the SL (Serial Number Low) and SH (Serial Number High) commands. Short addressing must be configured manually. A module will use its unique 64-bit address as its Source Address if its MY (16-bit Source Address) value is "0xFFFF" or "0xFFFE".

To send a packet to a specific module using 64-bit addressing: Set the Destination Address (DL + DH) of the sender to match the Source Address (SL + SH) of the intended destination module.

To send a packet to a specific module using 16-bit addressing: Set DL (Destination Address Low) parameter to equal the MY parameter of the intended destination module and set the DH (Destination Address High) parameter to '0'.

## Unicast Mode

By default, the RF module operates in Unicast Mode. Unicast Mode is the only mode that supports retries. While in this mode, receiving modules send an ACK (acknowledgement) of RF packet reception to the transmitter. If the transmitting module does not receive the ACK, it will re-send the packet up to three times or until the ACK is received.

**Short 16-bit addresses**. The module can be configured to use short 16-bit addresses as the Source Address by setting (MY < 0xFFFE). Setting the DH parameter (DH = 0) will configure the Destination Address to be a short 16-bit address (if DL < 0xFFFE). For two modules to communicate using short addressing, the Destination Address of the transmitter module must match the MY parameter of the receiver.

The following table shows a sample network configuration that would enable Unicast Mode communications using short 16-bit addresses.

**Table 2-03. Sample Unicast Network Configuration (using 16-bit addressing)**

| | | |
|---|---|---|
| MY (Source Address) | 0x01 | 0x02 |
| DH (Destination Address High) | 0 | 0 |
| DL (Destination Address Low) | 0x02 | 0x01 |

**Long 64-bit addresses**. The RF module's serial number (SL parameter concatenated to the SH parameter) can be used as a 64-bit source address when the MY (16-bit Source Address) parameter is disabled. When the MY parameter is disabled (MY = 0xFFFF or 0xFFFE), the module's source address is set to the 64-bit IEEE address stored in the SH and SL parameters.

When an End Device associates to a Coordinator, its MY parameter is set to 0xFFFE to enable 64-bit addressing. The 64-bit address of the module is stored as SH and SL parameters. To send a packet to a specific module, the Destination Address (DL + DH) on the sender must match the Source Address (SL + SH) of the desired receiver.

## Broadcast Mode

Any RF module within range will accept a packet that contains a broadcast address. When configured to operate in Broadcast Mode, receiving modules do not send ACKs (Acknowledgements) and transmitting modules do not automatically re-send packets as is the case in Unicast Mode.

To send a broadcast packet to all modules regardless of 16-bit or 64-bit addressing, set the destination addresses of all the modules as shown below.

Sample Network Configuration (All modules in the network):

- DL (Destination Low Address) = 0x0000FFFF
- DH (Destination High Address) = 0x00000000 (default value)

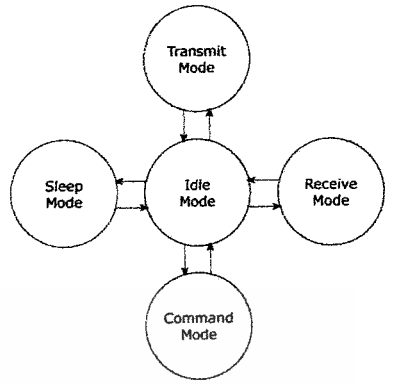
NOTE: When programming the module, parameters are entered in hexadecimal notation (without the "0x" prefix). Leading zeros may be omitted.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
© 2008 Digi International, Inc.

# Modes of Operation

XBee®/XBee-PRO RF Modules operate in five modes.

**Figure 2-07. Modes of Operation**




## Idle Mode

When not receiving or transmitting data, the RF module is in Idle Mode. The module shifts into the other modes of operation under the following conditions:

- Transmit Mode (Serial data is received in the DI Buffer)
- Receive Mode (Valid RF data is received through the antenna)
- Sleep Mode (Sleep Mode condition is met)
- Command Mode (Command Mode Sequence is issued)

## Transmit/Receive Modes

### RF Data Packets

Each transmitted data packet contains a Source Address and Destination Address field. The Source Address matches the address of the transmitting module as specified by the MY (Source Address) parameter (if MY >= 0xFFFE), the SH (Serial Number High) parameter or the SL (Serial Number Low) parameter. The <Destination Address> field is created from the DH (Destination Address High) and DL (Destination Address Low) parameter values. The Source Address and/or Destination Address fields will either contain a 16-bit short or long 64-bit long address.

The RF data packet structure follows the 802.15.4 specification.

[Refer to the XBee/XBee-PRO Addressing section for more information]

### Direct and Indirect Transmission

There are two methods to transmit data:

- Direct Transmission - data is transmitted immediately to the Destination Address
- Indirect Transmission - A packet is retained for a period of time and is only transmitted after the destination module (Source Address = Destination Address) requests the data.

Indirect Transmissions can only occur on a Coordinator. Thus, if all nodes in a network are End Devices, only Direct Transmissions will occur. Indirect Transmissions are useful to ensure packet delivery to a sleeping node. The Coordinator currently is able to retain up to 2 indirect messages.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© 2008 Digi International, Inc.

**Direct Transmission**

A Coordinator can be configured to use only Direct Transmission by setting the SP (Cyclic Sleep Period) parameter to "0". Also, a Coordinator using indirect transmissions will revert to direct transmission if it knows the destination module is awake.

To enable this behavior, the ST (Time before Sleep) value of the Coordinator must be set to match the ST value of the End Device. Once the End Device either transmits data to the Coordinator or polls the Coordinator for data, the Coordinator will use direct transmission for all subsequent data transmissions to that module address until ST time occurs with no activity (at which point it will revert to using indirect transmissions for that module address). "No activity" means no transmission or reception of messages with a specific address. Global messages will not reset the ST timer.

**Indirect Transmission**

To configure Indirect Transmissions in a PAN (Personal Area Network), the SP (Cyclic Sleep Period) parameter value on the Coordinator must be set to match the longest sleep value of any End Device. The sleep period value on the Coordinator determines how long (time or number of beacons) the Coordinator will retain an indirect message before discarding it.

An End Device must poll the Coordinator once it wakes from Sleep to determine if the Coordinator has an indirect message for it. For Cyclic Sleep Modes, this is done automatically every time the module wakes (after SP time). For Pin Sleep Modes, the A1 (End Device Association) parameter value must be set to enable Coordinator polling on pin wake-up. Alternatively, an End Device can use the FP (Force Poll) command to poll the Coordinator as needed.

## CCA (Clear Channel Assessment)

Prior to transmitting a packet, a CCA (Clear Channel Assessment) is performed on the channel to determine if the channel is available for transmission. The detected energy on the channel is compared with the CA (Clear Channel Assessment) parameter value. If the detected energy exceeds the CA parameter value, the packet is not transmitted.

Also, a delay is inserted before a transmission takes place. This delay is settable using the RN (Backoff Exponent) parameter. If RN is set to "0", then there is no delay before the first CCA is performed. The RN parameter value is the equivalent of the "minBE" parameter in the 802.15.4 specification. The transmit sequence follows the 802.15.4 specification.

By default, the MM (MAC Mode) parameter = 0. On a CCA failure, the module will attempt to resend the packet up to two additional times.

When in Unicast packets with RR (Retries) = 0, the module will execute two CCA retries. Broadcast packets always get two CCA retries.

## Acknowledgement

If the transmission is not a broadcast message, the module will expect to receive an acknowledgement from the destination node. If an acknowledgement is not received, the packet will be resent up to 3 more times. If the acknowledgement is not received after all transmissions, an ACK failure is recorded.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Sleep Mode

Sleep Modes enable the RF module to enter states of low-power consumption when not in use. In order to enter Sleep Mode, one of the following conditions must be met (in addition to the module having a non-zero SM parameter value):

- Sleep_RQ (pin 9) is asserted and the module is in a pin sleep mode (SM = 1, 2, or 5)
- The module is idle (no data transmission or reception) for the amount of time defined by the ST (Time before Sleep) parameter. [NOTE: ST is only active when SM = 4-5.]

**Table 2-04. Sleep Mode Configurations**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Pin Hibernate (SM = 1) | Assert (high) Sleep_RQ (pin 9) | De-assert (low) Sleep_RQ | Pin/Host-controlled / NonBeacon systems only / Lowest Power | (SM) | < 10 µA (@3.0 VCC) |
| Pin Doze (SM = 2) | Assert (high) Sleep_RQ (pin 9) | De-assert (low) Sleep_RQ | Pin/Host-controlled / NonBeacon systems only / Fastest wake-up | (SM) | < 50 µA |
| Cyclic Sleep (SM = 4) | Automatic transition to Sleep Mode as defined by the SM (Sleep Mode) and ST (Time before Sleep) parameters. | Transition occurs after the cyclic sleep time interval elapses. The time interval is defined by the SP (Cyclic Sleep Period) parameter. | RF module wakes in pre-determined time intervals to detect if RF data is present / When SM = 5 | (SM), SP, ST | < 50 µA when sleeping |
| Cyclic Sleep (SM = 5) | Automatic transition to Sleep Mode as defined by the SM (Sleep Mode) and ST (Time before Sleep) parameters or or on a falling edge transition of the SLEEP_RQ pin. | Transition occurs after the cyclic sleep time interval elapses. The time interval is defined by the SP (Cyclic Sleep Period) parameter. | RF module wakes in pre-determined time intervals to detect if RF data is present. Module also wakes on a falling edge of SLEEP_RQ | (SM), SP, ST | < 50 µA when sleeping |

The SM command is central to setting Sleep Mode configurations. By default, Sleep Modes are disabled (SM = 0) and the module remains in Idle/Receive Mode. When in this state, the module is constantly ready to respond to serial or RF activity.

### Pin/Host-controlled Sleep Modes

The transient current when waking from pin sleep (SM = 1 or 2) does not exceed the idle current of the module. The current ramps up exponentially to its idle current.

**Pin Hibernate (SM = 1)**

- Pin/Host-controlled
- Typical power-down current: < 10 µA (@3.0 VCC)
- Wake-up time: 13.2 msec

Pin Hibernate Mode minimizes quiescent power (power consumed when in a state of rest or inactivity). This mode is voltage level-activated; when Sleep_RQ (pin 9) is asserted, the module will finish any transmit, receive or association activities, enter Idle Mode, and then enter a state of sleep. The module will not respond to either serial or RF activity while in pin sleep.

To wake a sleeping module operating in Pin Hibernate Mode, de-assert Sleep_RQ (pin 9). The module will wake when Sleep_RQ is de-asserted and is ready to transmit or receive when the CTS line is low. When waking the module, the pin must be de-asserted at least two 'byte times' after CTS goes low. This assures that there is time for the data to enter the DI buffer.

**Pin Doze (SM = 2)**

- Pin/Host-controlled
- Typical power-down current: < 50 µA
- Wake-up time: 2 msec

Pin Doze Mode functions as does Pin Hibernate Mode; however, Pin Doze features faster wake-up time and higher power consumption.

To wake a sleeping module operating in Pin Doze Mode, de-assert Sleep_RQ (pin 9). The module will wake when Sleep_RQ is de-asserted and is ready to transmit or receive when the CTS line is

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© 2008 Digi International, Inc.

low. When waking the module, the pin must be de-asserted at least two 'byte times' after CTS goes low. This assures that there is time for the data to enter the DI buffer.

## Cyclic Sleep Modes

**Cyclic Sleep Remote (SM = 4)**

- Typical Power-down Current: < 50 µA (when asleep)
- Wake-up time: 2 msec

The Cyclic Sleep Modes allow modules to periodically check for RF data. When the SM parameter is set to '4', the module is configured to sleep, then wakes once a cycle to check for data from a module configured as a Cyclic Sleep Coordinator (SM = 0, CE = 1). The Cyclic Sleep Remote sends a poll request to the coordinator at a specific interval set by the SP (Cyclic Sleep Period) parameter. The coordinator will transmit any queued data addressed to that specific remote upon receiving the poll request.

If no data is queued for the remote, the coordinator will not transmit and the remote will return to sleep for another cycle. If queued data is transmitted back to the remote, it will stay awake to allow for back and forth communication until the ST (Time before Sleep) timer expires.

Also note that $\overline{CTS}$ will go low each time the remote wakes, allowing for communication initiated by the remote host if desired.

**Cyclic Sleep Remote with Pin Wake-up (SM = 5)**

Use this mode to wake a sleeping remote module through either the RF interface or by the de-assertion of Sleep_RQ for event-driven communications. The cyclic sleep mode works as described above (Cyclic Sleep Remote) with the addition of a pin-controlled wake-up at the remote module. The Sleep_RQ pin is edge-triggered, not level-triggered. The module will wake when a low is detected then set $\overline{CTS}$ low as soon as it is ready to transmit or receive.

Any activity will reset the ST (Time before Sleep) timer so the module will go back to sleep only after there is no activity for the duration of the timer. Once the module wakes (pin-controlled), further pin activity is ignored. The module transitions back into sleep according to the ST time regardless of the state of the pin.

**[Cyclic Sleep Coordinator (SM = 6)]**

- Typical current = Receive current
- Always awake

NOTE: The SM=6 parameter value exists solely for backwards compatibility with firmware version 1.x60. If backwards compatibility with the older firmware version is not required, always use the CE (Coordinator Enable) command to configure a module as a Coordinator.

This mode configures a module to wake cyclic sleeping remotes through RF interfacing. The Coordinator will accept a message addressed to a specific remote 16 or 64-bit address and hold it in a buffer until the remote wakes and sends a poll request. Messages not sent directly (buffered and requested) are called "Indirect messages". The Coordinator only queues one indirect message at a time. The Coordinator will hold the indirect message for a period 2.5 times the sleeping period indicated by the SP (Cyclic Sleep Period) parameter. The Coordinator's SP parameter should be set to match the value used by the remotes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© 2008 Digi International, Inc.

## Command Mode

To modify or read RF Module parameters, the module must first enter into Command Mode - a state in which incoming characters are interpreted as commands. Two Command Mode options are supported: AT Command Mode [refer to section below] and API Command Mode [p56].

### AT Command Mode

**To Enter AT Command Mode:**

Send the 3-character command sequence "+++" and observe guard times before and after the command characters. [Refer to the "Default AT Command Mode Sequence" below.]

Default AT Command Mode Sequence (for transition to Command Mode):

- No characters sent for one second [GT (Guard Times) parameter = 0x3E8]
- Input three plus characters ("+++") within one second [CC (Command Sequence Character) parameter = 0x2B.]
- No characters sent for one second [GT (Guard Times) parameter = 0x3E8]

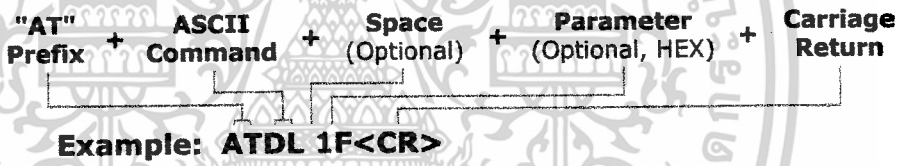
All of the parameter values in the sequence can be modified to reflect user preferences.

NOTE: Failure to enter AT Command Mode is most commonly due to baud rate mismatch. Ensure the 'Baud' setting on the "PC Settings" tab matches the interface data rate of the RF module. By default, the BD parameter = 3 (9600 bps).

**To Send AT Commands:**

Send AT commands and parameters using the syntax shown below.

**Figure 2-08. Syntax for sending AT Commands**




To read a parameter value stored in the RF module's register, omit the parameter field.

The preceding example would change the RF module Destination Address (Low) to "0x1F". To store the new value to non-volatile (long term) memory, subsequently send the WR (Write) command.

For modified parameter values to persist in the module's registry after a reset, changes must be saved to non-volatile memory using the WR (Write) Command. Otherwise, parameters are restored to previously saved values after the module is reset.

**System Response.** When a command is sent to the module, the module will parse and execute the command. Upon successful execution of a command, the module returns an "OK" message. If execution of a command results in an error, the module returns an "ERROR" message.

**To Exit AT Command Mode:**

1. Send the ATCN (Exit Command Mode) command (followed by a carriage return).
   [OR]
2. If no valid AT Commands are received within the time specified by CT (Command Mode Timeout) Command, the RF module automatically returns to Idle Mode.

For an example of programming the RF module using AT Commands and descriptions of each configurable parameter, refer to the RF Module Configuration chapter [p25].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© 2008 Digi International, Inc.

# ภาคผนวก ข.
# ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F4550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

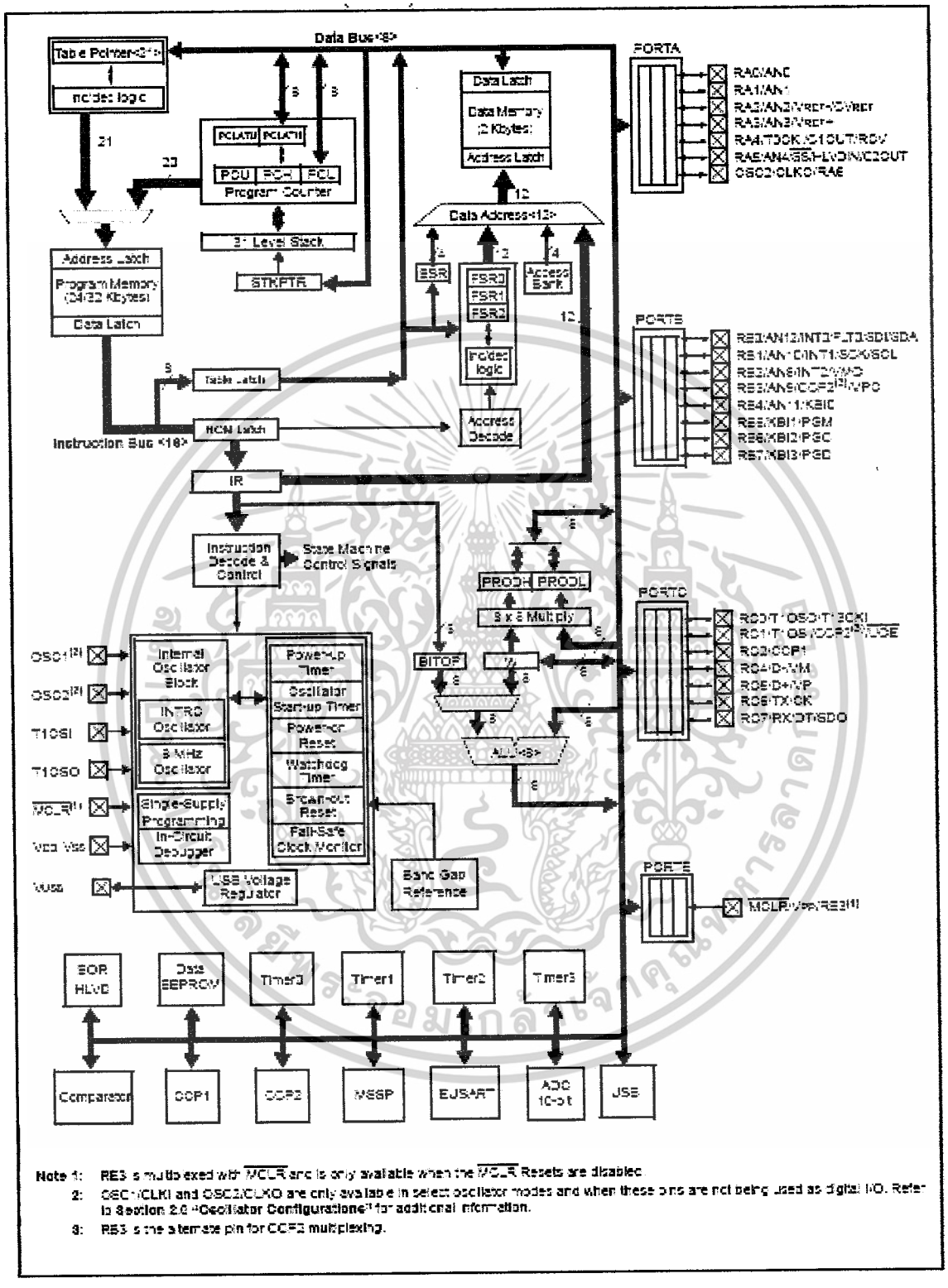
## ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F4550

PIC18F4550 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ของบริษัท Microchip โดยได้นำเอาไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC18F4553 มาพัฒนาเป็นบอร์ดใช้งานรับข้อมูล ซึ่งคุณสมบัติเด่นของ PIC18F4550 ก็คือ โมดูลการสื่อสารแบบ USB (Universal Serial Bus) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีของการสื่อสารที่แพร่หลายในปัจจุบัน ทั้งในเรื่องของความเร็วในการสื่อสารข้อมูล และ ความสะดวกในการเชื่อมต่อใช้งาน ซึ่งปฏิเสธไม่ได้เลยว่า เครื่องคอมพิวเตอร์ ณ ปัจจุบัน แทบ จะไม่มีพอร์ตสื่อสารแบบ RS-232 หรือ LPT Port ให้ใช้กันแล้ว อุปกรณ์เชื่อมต่อต่างๆ ส่วนใหญ่ก็ถูกออกแบบให้มีการเชื่อมต่อแบบ USB ส่วนที่แตกต่างจาก PIC18F4550 ก็คือ PIC18F4550 จะมี A/D ความละเอียดถึง 12 บิต ดังนั้น PIC USB/4550 จึงเหมาะอย่างยิ่งที่จะนำมาพัฒนา หรือ เรียนรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีการเชื่อมต่อสื่อสารแบบ USB และ การใช้งาน A/D ที่ความละเอียดสูงๆ

## คุณสมบัติ PIC 18F4550

1. ปฏิบัติงานที่ความถี่ 48 MHz
2. หน่วยความจำโปรแกรม 32768 ไบต์
3. หน่วยความจำข้อมูล 2048 ไบต์
4. หน่วยความจำ EEPROM 256 ไบต์
5. แหล่งสัญญาณอินเตอร์รัปต์ 20 แหล่ง
6. พอร์ตอินพุตเอาต์พุต พอร์ต A, B, C, D, E
7. ไทม์เมอร์ 4 แหล่ง
8. โมดูล Capture/ Compare/ PWM 1 แหล่ง
9. โมดูล Enhanced Capture/Compare/PWM 1 แหล่ง
10. โมดูล Universal Serial Bus (USB) 1 แหล่ง
11. การสื่อสารแบบอนุกรม MSSP, Enhanced USART
12. รองรับการสื่อสาร Streaming Parallel Port (SPP)
13. โมดูล A/D ขนาด 10 บิต 13 ช่องสัญญาณ
14. วงจรรีเซต และ วงจรห่วงเวลา POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT
15. วงจรตรวจสอบความต่างศักย์แบบ สูง และ ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



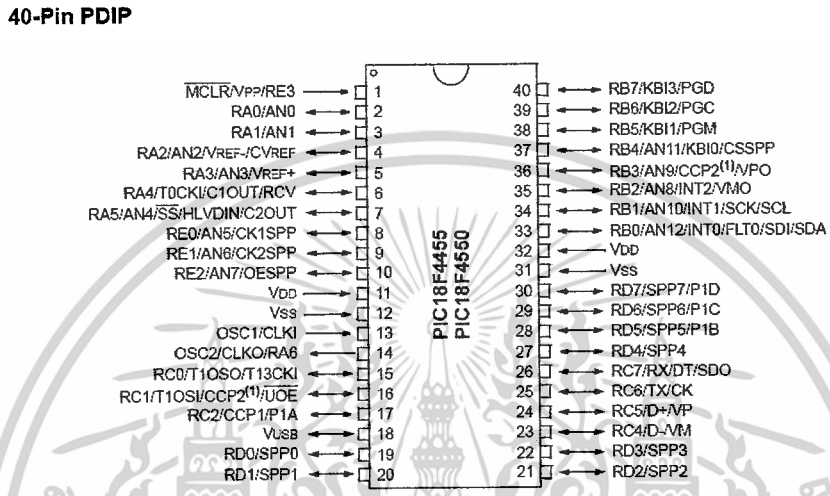

Note 1: RE3 is multiplexed with MCLR and is only available when the MCLR Resets are disabled.
2: OSC1/CLKI and OSC2/CLKO are only available in select oscillator modes and when these pins are not being used as digital I/O. Refer to Section 2.0 "Oscillator Configurations" for additional information.
3: RB3 is the alternate pin for CCP2 multiplexing.

**รูปที่ ข.1** โครงสร้างไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F4550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อินพุต/เอาต์พุต PIC18F4550

PIC18F4550 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ตระกูล PIC ในตัวถังแบบ 40 PIN PDIP การจัดตำแหน่งขาพอร์ตแสดงดังรูป




**รูปที่ ข.2** รายละเอียดขา PIC 18F4550

**พอร์ต A และรีจิสเตอร์ TRISA**

พอร์ต A มีทั้งหมด 6 bit โดยที่สามารถทำหน้าที่ในการรับและส่งข้อมูล โดยการกำหนดทิศทางใน รีจิสเตอร์ TRISA ว่าจะให้ทำหน้าที่ในการส่งหรือรับข้อมูล โดยที่ขา RA4 นั้นจะถูก Multiplex กับ clock ของ Timer0 ส่วนขาอื่นนั้นจะถูก Multiplex กับการรับสัญญาณอนาลอค และแรงดันอ้างอิง

**พอร์ต B และรีจิสเตอร์ TRISB**

พอร์ต B มีทั้งหมด 8 bit สามารถติดต่อได้ 2 ทางซึ่งการกำหนดการรับและส่งข้อมูล ในแต่ละขาโดยการกำหนดทิศทางใน รีจิสเตอร์ TRISB เมื่ออยู่ในลักษณะการรับข้อมูลขานั้นจะมีความอิมพิแดนซ์สูง โดยที่ขา RB7-RB4 สามารถทำหน้าที่ในการ interrupt การทำงานได้

**พอร์ต C และรีจิสเตอร์ TRISC**

พอร์ต C มีทั้งหมด 8 bit สามารถติดต่อได้ 2 ทาง ซึ่งการกำหนดการรับและส่งข้อมูล ในแต่ละขาโดยการกำหนดทิศทางใน รีจิสเตอร์ TRISC และ พอร์ต C ยังมีความสามารถในการทำงานอีกหลายอย่าง เช่น เป็นขาที่ใช้ในการรับสัญญาณ Clock ของ Timer1, ตัวเปรียบเทียบค่าแรงดัน, ทำการส่ง-รับข้อมูลแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**พอร์ต D และรีจิสเตอร์ TRISD**

พอร์ต D มีทั้งหมด 8 bit สามารถติดต่อได้ 2 ทางซึ่งการกำหนดการรับและส่งข้อมูล ในแต่ละขาโดยการกำหนดทิศทางใน รีจิสเตอร์ TRISD และ พอร์ต D ยังมีความสามารถในการทำงานเพื่อสามารถขยายความสามารถให้สามารถเชื่อมต่อกับ Microprocessor คือทำงานในลักษณะ parallel slave port ซึ่งทำงานร่วมกับ Port E

**พอร์ต E และรีจิสเตอร์ TRISE**

พอร์ต E มีทั้งหมด 3 bit สามารถติดต่อได้ 2 ทางซึ่งการกำหนดการรับและส่งข้อมูล ในแต่ละขาโดยการกำหนดทิศทางใน รีจิสเตอร์ TRISE และ Port E ยังมีความสามารถในการทำงานเป็นขา Control เพื่อใช้ในการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก และยังสามารถรับข้อมูลอนาลอค

## การจัดการกับการอินพุตและเอาท์พุต

วงจรสำหรับบิตบิตหนึ่งของพอร์ต อินพุต/เอาต์พุต สามารถกำหนดได้ว่าพอร์ตไหนจะเป็นอินพุตหรือเอาต์พุต การใช้งานเป็นพอร์ตอินพุต สัญญาณจะไม่ถูกแลตซ์เอาไว้ การป้อนสัญญาณอินพุต ต้องคงค่าจนกระทั่งทำการอ่านโดยคำสั่งอินพุตจนครบ (เช่น MOVF PORTB, W) แต่สำหรับการใช้งานเป็นพอร์ตเอาต์พุตนั้นข้อมูลจะถูกแลตซ์เอาไว้ และจะไม่มีการเปลี่ยนค่าจนกว่าจะมีการเขียนข้อมูลใหม่ส่งมาอีกครั้ง การกำหนดพอร์ต ในตำแหน่งขาต่างๆ ให้เป็นเอาต์พุตจะต้องสั่งให้บิต ควบคุมทิศทาง (TRISA, TRISB, TRISC, TRISD, TRISE) มีค่าเป็น "0" แต่ถ้าต้องการให้เป็นขาอินพุตจะต้องกำหนดบิต ควบคุมให้มีค่าเป็น "1"

## การทำงานในโหมด Parallel Slave Port ของ Port D และ Port E

การที่ Port D จะทำหน้าที่เป็น 8-bit Parallel Slave Port นั้น จะต้องมีการกำหนดค่าที่ control bit ของรีจิสเตอร์ TRISE ที่ตำแหน่งบิตที่ 4 ให้มีค่าเป็น 1 ซึ่งสามารถทำให้ไมโครโปรเซสเซอร์สามารถควบคุมการอ่านและเขียนกับตัวไมโครคอนโทลเลอร์ได้โดยผ่านขา RD และ ขา WR โดยผ่านขา RE0 และ RE1 ตามลำดับ และยังมีขาช่วยอีกขาคือ CS ซึ่งจะอยู่ตรงขา RE2

การทำงานในลักษณะนี้จะช่วยให้สามารถเชื่อมต่อกับไมโครโปรเซสเซอร์ 8-bit ทางด้าน Data bus ได้โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รีจิสเตอร์ควบคุมพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต

การกำหนดลักษณะการทำงานจะต้องเป็นการป้อนค่าเข้าไปเก็บไว้ที่แต่ละตำแหน่งของรีจิสเตอร์กำหนดทิศทาง ( เช่น รีจิสเตอร์ TRISA) โดยค่า "1" ที่ใส่ในรีจิสเตอร์ควบคุมจะทำให้ขาอินพุต/เอาต์พุต อยู่ในสถานะความต้านทานสูงทำหน้าที่เป็นขา อินพุต และค่า "0" ที่ใส่ในรีจิสเตอร์ควบคุมจะทำให้ขาอินพุต/เอาต์พุตที่ถูกเลือกของพอร์ตนั้นมีสถานะเป็นขาเอาต์พุต

## รีจิสเตอร์ใช้งานพิเศษ

**W** - (working register) เก็บค่าโอเปอแรนด์ ที่สองในคำสั่งที่มี 2 โอเปอแรนด์ (และ/หรือ สนับ สนุนการเคลื่อนย้ายข้อมูลภายใน)

**TRISA** - ควบคุมอินพุต/เอาต์พุต สำหรับพอร์ต A บิต 0 ถึง 5 เท่านั้นที่ใช้ได้ ใช้เพื่อให้สอดคล้องกับพอร์ต อินพุต/เอาต์พุต ที่มีแค่ 6 บิต

**TRISB** - ควบคุมอินพุต/เอาต์พุต สำหรับพอร์ต B

**TRISC** - ควบคุมอินพุต/เอาต์พุต สำหรับพอร์ต C

**TRISD** - ควบคุมอินพุต/เอาต์พุต สำหรับพอร์ต D

**TRISE** - ควบคุมอินพุต/เอาต์พุต สำหรับพอร์ต E และการกำหนดโหมดการทำงานของพอร์ต D ให้อยู่ใน Parallel Slave Port

**ADRES** – ใช้เก็บค่าผลลัพธ์การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

**ADCON0** – ใช้กำหนดลักษณะขั้นตอนการทำงานของการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล เช่น ความถี่ที่ใช้ในการแปลง A/D ช่องสัญญาณที่ใช้ในการรับข้อมูล เป็นต้น

**ADCON1** – กำหนดลักษณะการรับข้อมูลเป็น อนาลอก/ดิจิตอล รวมถึงแรงดันอ้างอิงของแต่ละบิตของพอร์ต RA5:RA0 และ RE2:RE0

## ขั้นตอนในการแปลง A/D

1. กำหนดลักษณะการทำงานของ A/D
   - กำหนดค่าขาอินพุต / แรงดันอ้างอิง / ขาอินพุต –เอาท์พุต แบบดิจิตอล โดยกำหนดที่ รีจิสเตอร์ ADCON1
   - ทำการเลือกขาสำหรับรับสัญญาณอนาลอก โดยกำหนดที่รีจิสเตอร์ ADCON0
   - ทำการกำหนด Clock ในการแปลงสัญญาณ A/D ที่รีจิสเตอร์ ADCON0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดให้สามารถมีการแปลงสัญญาณ A/D ได้ที่รีจิสเตอร์ ADCON0

2. กำหนดการ interrupt ของ A/D
   - กำหนดค่า ADIF bit ให้มีค่าเป็น "0" ( ทำการลบค่าใน A/D interrupt flag bit )
   - กำหนดค่า ADIE bit ให้มีค่าเป็น "1" (กำหนดให้อุปกรณ์สามารถทำการ interrupt ได้)
   - กำหนดค่า GIF bit ให้มีค่าเป็น "1" (กำหนดให้สามารถทำการ interrupt ได้)
3. ทำการแปลงข้อมูล
   - กำหนดค่าที่บิต 2 ของรีจิสเตอร์ ADCON0 ให้มีค่าเป็น "1"
4. รอให้การแปลงข้อมูลเสร็จโดย
   - ทำการตรวจสอบบิต 2 ของรีจิสเตอร์ ADCON0 ว่ามีค่าเป็น "0" หรือไม่ หรือ
   - ทำการรอสัญญาณ interrupt ของ A/D
5. ทำการอ่านค่าผลลัพธ์ที่ได้จาก รีจิสเตอร์ ADRES และทำการกำหนดค่า ADIF ให้เป็น "0"

## วงจรออสซิลเลเตอร์

ชิพตระกูล PIC18F4550 ร่วมกับ ออสซิลเลเตอร์ต่าง ๆ ได้ 4 แบบ ถ้าชิพนั้นมี EPROM อยู่ภายในตัวเอง การเลือกใช้วงจรออสซิลเลเตอร์จะขึ้นกับ อีพรอมนั้นว่าต้องการออสซิลเลเตอร์แบบใด ถ้าเป็นชิพแบบ OTP และ QTP โรงงานจะเป็นผู้กำหนดออสซิลเลเตอร์ที่จะใช้งานได้มาให้ การเลือกใช้ตัวเก็บประจุ (C1, C2) สำหรับวงจร Resonator แบบเซรามิก จะคำนึงถึงความถี่ต่างๆที่ใช้ดังแสดงในตาราง

| ออสซิลเลเตอร์แบบ | ความถี่ Resonator | ช่วงของค่าตัวเก็บประจุ (C1) (pF) | ช่วงของค่าตัวเก็บประจุ (C2) (pF) |
|---|---|---|---|
| XT | 445 kHz | 68 - 100 | 150 - 330 |
| | 2.0 MHz | 15 - 68 | 20 - 330 |
| | 4.0 MHz | 15 – 68 | 20 - 330 |
| HS | 8.0 MHz | 10 - 68 | 20 - 200 |

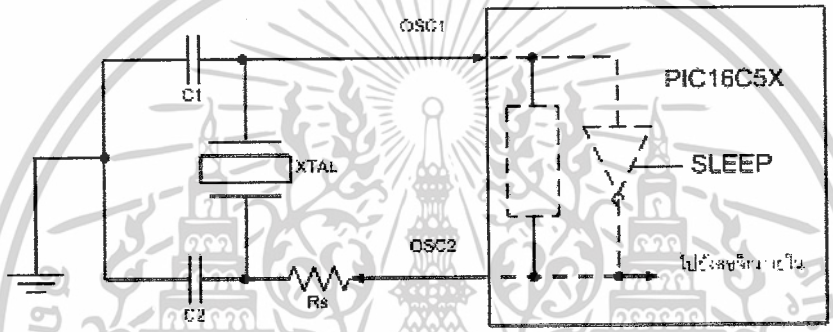
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิพแบบ XT เป็นออสซิลเลเตอร์คริสตอลแบบมาตรฐาน ซึ่งอาจต้องการคริสตอลแบบสตริปคัต AT (AT strip-cut) เพื่อหลีกเลี่ยงการโอเวอร์ไดรฟ์

ส่วนชิพแบบ HS เป็นออสซิลเลเตอร์คริสตอลชนิดความเร็วสูง ซึ่งอาจจะต้องใช้ตัวต้านทานต่อเชื่อมด้วยในกรณีที่ต้องการให้เกิดความถี่ออสซิลเลชั่น ที่น้อยกว่า 20 เมกกะเฮิร์ตซ์

**ออสซิลเลเตอร์แบบคริสตอล**

PIC18F4550 แบบ XT,HS หรือ LP จะต้องใช้วงจรรีโซเนเตอร์ แบบเซรามิกหรือคริสตอลต่อเข้าที่ขา OSC1 และ OSC2 เพื่อทำให้เกิดสัญญาณนาฬิกาดังรูป




Rs อาจจะต้องใช้ในโหมด HS และ XT สำหรับคริสตอลแบบสตริปคัต AT เพื่อหลีกเลี่ยงการโอเวอร์ไดรฟ์

**รูปที่ ข.3** วงจรรีโซเนเตอร์แบบเซรามิกหรือคริสตอล

การเลือกใช้ตัวเก็บประจุ (C1,C2) สำหรับวงจรรีโซเนเตอร์แบบเซรามิก จะคำนึงถึงความถี่ต่างๆที่ใช้ ดังแสดงในตาราง

| ออสซิลเลเตอร์ | ความถี่รีโซเนเตอร์ | ช่วงของค่าตัวเก็บประจุ (pF) |
|---|---|---|
| XT | 445 kHz | 150-330 |
| | 2.0 MHz | 20-330 |
| | 4.0 MHz | 20-330 |
| HS | 8.0 MHz | 20-200 |

ชิพแบบ XT เป็นออสซิลเลเตอร์คริสตอลแบบมาตรฐาน ซึ่งอาจต้องการคริสตอลแบบสตริปคัต AT (AT strip-cut) เพื่อหลีกเลี่ยงการโอเวอร์ไดรฟ์ (overdrive)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนชิพแบบ HS เป็นออสซิลเลเตอร์คริสตอลชนิดความเร็วสูง ซึ่งอาจจะต้องใช้ตัวต้านทานต่อเชื่อมด้วยใ นกรณีที่ต้องการให้เกิดความถี่ออสซิลเลชั่น ที่น้อยกว่า 20 MHz

การเลือกตัวเก็บประจุสำหรับออสซิลเลเตอร์ชนิดคริสตอล สามารถพิจารณาได้ดังตาราง

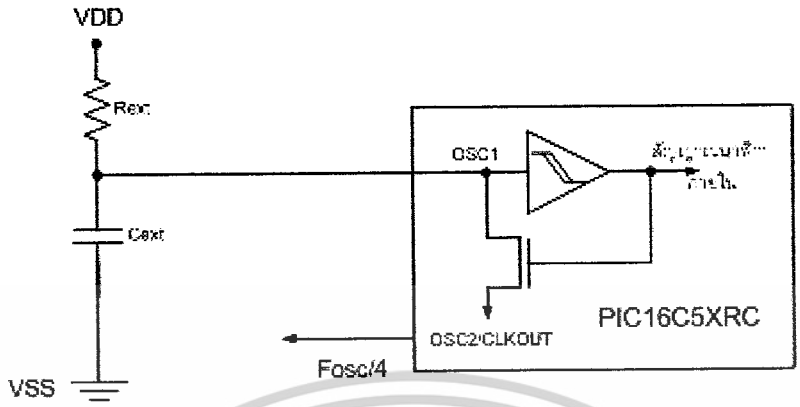
| ออสซิลเลเตอร์ | ความถี่ | C1 | C2 |
|---|---|---|---|
| LP | 32 kHz | 15 pF | 15 pF |
| XT | 100 kHz | 15-30 pF | 200-300 pF |
| | 200 kHz | 15-30 pF | 100-200 pF |
| | 455 kHz | 15-30 pF | 15-100 pF |
| | 1 MHz | 15-30pF | 15-30 pF |
| | 2 MHz | 15 pF | 15 pF |
| | 4 MHz | 15 pF | 15 pF |
| HS | 4 MHz | 15 pF | 15 pF |
| | 8 MHz | 15 pF | 15 pF |
| | 20 MHz | 15pF | 15 pF |

**ออสซิลเลเตอร์แบบ RC**

เหมาะกับงานที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงมากนัก อีกทั้งราคาก็ถูกกว่าแบบอื่น โดยความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์แบบ RC จะขึ้นอยู่ กับ

- ความดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ
- ตัวต้านทาน (Rext)
- ค่าตัวเก็บประจุ (Cext)
- อุณหภูมิที่ใช้งาน
- อุปกรณ์ต่างๆ
- ความกว้างของขอบตัวนำระหว่างชิพของตัวเก็บประจุชนิดนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ ข.4** วงจรออสซิลเลเตอร์แบบ RC

จากรูปแสดงถึงวิธีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ RC เข้ากับ PIC16C7X สำหรับค่า Rext ที่น้อยกว่า 2.2 กิโลโอห์ม สัญญาณออสซิลเลเตอร์ ที่ได้อาจจะไม่คงที่หรือหยุดนิ่งสำหรับค่า Rext ที่มีค่าสูงมากๆ (เช่น 1 เมกะโอห์ม) ออสซิลเตอร์ จะมีความไวต่อสัญญาณรบกวนความชื้นและสภาวะแวดล้อมภายนอก ดังนั้น ควรจะใช้ค่า Rext ให้มีค่าอยู่ในช่วง 5 กิโลโอห์ม ถึง 100 กิโลโอห์ม

ถึงแม้ว่าออสซิลเลเตอร์ จะทำงานได้โดยไม่ต้องต่อตัวเก็บประจุภายนอก (Cext=0 พิโกฟารัด) แต่ควรใส่ค่าตัวเก็บประจุที่มากกว่า 20 pF เพื่อลดสัญญาณรบกวนและให้สัญญาณมีความคงที่ ถ้าไม่มีตัวเก็บประจุหรือตัวเก็บประจุภายนอกมีค่าน้อยเกินไป จะทำให้ความถี่ออสซิลเลเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่ตัวเก็บประจุภายนอก เช่น ที่แผ่นวงจรพิมพ์บริเวณตัวเก็บประจุหรือตัวนำของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ค.
# โครงสร้างภาษา C ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โครงสร้างภาษา C ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน

**การเข้าถึงพอร์ตในระดับบิตด้วย output_high(); และ output_low();**

- output_high(); เป็นฟังก์ชั่นเข้าถึงข้อมูลในระดับบิต สั่งให้บิตนั้นมีลอจิกเป็น 1 คือ 5 โวลต์
- output_low(); เป็นฟังก์ชั่นเข้าถึงข้อมูลในระดับบิต สั่งให้บิตนั้นมีลอจิกเป็น 0 คือ 0 โวลต์

**การใช้งานฟังก์ชั่น input ();**

- ฟังก์ชั่น input(); เป็นฟังก์ชั่นอ่านข้อมูลขนาด 1 ไบต์(8 บิต)จากพอร์ตอินพุต ข้อมูลจากพอร์ตที่กำหนดการใช้งานจะขึ้นอยู่กับไดเร็กทีฟ #use*_io เช่น #use fast_io , #use fixed_io และ #use standard_io ค่าปกติเป็น standard I/O

## การติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม USART ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4550

พอร์ตอนุกรม (Serial port) จัดเป็นพอร์ตสื่อสารข้อมูลที่นิยมนำมาใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ได้เตรียมโมดูลการเชื่อมต่ออนุกรมไว้แล้วที่เรียกว่าUSART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) โดยมีคุณสมบัติเป็นทั้งตัวรับและตัวส่งข้อมูลในแบบอะซิงโครนัสหรือซิงโครนัส นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดความเร็วในการรับส่งข้อมูลได้ด้วย

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะไม่ลงไปในรายละเอียดทางด้านรีจีสเตอร์ที่เกี่ยวกับ USART เนื่องจากมีความซับซ้อนและในการเขียนโปรแกรมติดต่อกับโมดูล USART นั้น CCS C คอมไพเลอร์ได้เตรียมฟังก์ชั่นพร้อมใช้งานไว้ให้แล้ว ทั้งการติดต่อแบบโพลลิ่ง (Polling) เป็นการวนลูปตรวจสอบการรับส่งข้อมูลอนุกรม และในรูปแบบอินเตอร์รัปต์ (interrupt) เป็นการติดต่อแบบการกระตุ้นด้วยฮาร์ดแวร์

**ไดเร็กทีฟสำหรับพอร์ตอนุกรม**

ก่อนการใช้งานฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับ USART นั้น ต้องประกาศใช้งานไดเร็กทีฟ #use delay() ก่อนแล้วตามด้วยการประกาศใช้งานไดเร็กทีฟ #use rs232() เมื่อประกาศใช้งานไดเร็กทีฟทั้งสองแล้วก็สามารถที่จะเรียกใช้งานฟังก์ที่เกี่ยวกับ RS232I/O ได้ทันที การใช้งานไดเร็กทีฟทำได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ไดเร็กทีฟ #USE DELAY**

กำหนดใช้งานความถี่ของสัญญาณนาฬิกาและเปิดการใช้งานฟังก์ชั่น delay_ms()และ delay_us()

รูปแบบการใช้งาน: #use delay(clock=speed)

หรือ

#use delay(clock=speed, restart_wdt)

**ไดเร็กทีฟ #USE RS232**

กำหนดบอดเรตและขาพอร์ตใช้งาน Serial I/O ก่อนเรียกใช้งานไดเร็กทีฟนี้ต้องกำหนดไดเร็กทีฟ #delay ก่อน เมื่อไดเร็กทีฟ #use rs232 มีการใช้งานแล้วจะทำให้ฟังก์ชั่น GETC, PUTC และ PRINTF สามารถเรียกใช้งานได้

รูปแบบการใช้งาน: #use rs232(options)

**การใช้งานฟังก์ชั่นที่เกี่ยวข้องกับพอร์ตอนุกรม**

ฟังก์ชั่นที่เกี่ยวข้องกับพอร์ตอนุกรมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ฟังก์ชั่นรับส่งข้อมูลและฟังก์ชั่นการใช้งาน RS232I/O

**ฟังก์ชั่นอินพุตพอร์ตอนุกรม**

ฟังก์ชั่นที่เกี่ยวข้องกับการรับข้อมูลผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS232 (Standard Input) ประกอบไปด้วยฟังก์ชันดังต่อไปนี้

**ฟังก์ชั่น GET(), GETCH(), GETCHAR(), FGETC()**

ฟังก์ชั่นรับข้อมูลอักขระขนาด 8 บิต

รูปแบบการใช้งาน: value = getc();

value = fgetc(stream);

value = getch();

value = getchar():

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ฟังก์ชั่น GETS(), FGETS()**

**ฟังก์ชั่นรับข้อมูลสตริง**

รูปแบบการใช้งาน: gets(string);

fgets(string, stream);

**ฟังก์ชั่น KBHIT()**

ตรวจสอบการกดคีย์

รูปแบบการใช้งาน: value = kbhit();

**ฟังก์ชั่นเอาต์พุตพอร์ตอนุกรม**

ฟังก์ชั่นส่งข้อมูลไปที่ Standard Output (RS232 I/O) ฟังก์ชั่นที่เกี่ยวข้องกับการส่งข้อมูลผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS232 ประกอบไปด้วยฟังก์ชั่นดังต่อไปนี้

**ฟังก์ชั่น PUTC(), PUTCHAR(), FPUTC()**

ฟังก์ชั่นส่งข้อมูลอักขระขนาด 8 บิต

รูปแบบการใช้งาน: putc(cdata);

putchar(cdata);

fputc(cdata, stream);

**ฟังก์ชั่น PUTS(), FPUTS()**

ฟังก์ชั่นส่งข้อมูลสตริง

รูปแบบการใช้งาน: puts(string);

fputs(string, stream);

**ฟังก์ชั่นPRINTF (), FPRINTF ()**

**ฟังก์ชั่นส่งข้อมูลสตริงหรืออะเรย์ของอักขระ และสามารถที่จะกำหนดใช้รหัสควบคุมการพิมพ์ได้**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบการใช้งาน: printf(string);
fprintf(cstring, values…);
fprintf(stream, cstring, values…)

**ฟังก์ชั่น SET_UART_SPEED()**

ฟังก์ชั่น set_uart_speed()ใช้ในการเปลี่ยนแปลงบอดเรตของ rs 232 ขณะที่โปรแกรมกำลังทำงานอยู่ (run-time)

รูปแบบการใช้งาน: set_uart_speed(baud);

## ไฟล์INPUT.C

ไฟล์ input.c เป็นไฟล์ที่ประกอบไปด้วยฟังก์ชั่นที่เกี่ยวข้องกับการรับข้อมูลผ่าน Standard I/O (RS232I/O) ใน CCS C จะไม่มีฟังก์ชั่น scanf() ในการรับข้อมูลแบบภาษา C มาตรฐาน (ANSI C) แต่จะให้ฟังก์ชั่นที่อยู่ภายในไฟล์ input.c แทนการใช้ฟังก์ชั่น scanf() ซึ่งประกอบไปด้วยฟังก์ชั่นดังต่อไปนี้

- ฟังก์ชั่นgethex1(), gethex() รับข้อมูลเลขฐานสิบหก
- ฟังก์ชั่น get_string() รับข้อมูลสตริง
- ฟังก์ชั่น get_int(), get_lont() รับข้อมูลจำนวนเต็ม
- ฟังก์ชั่น get_float() รับข้อมูลจำนวนทศนิยม

## การใช้งานโมดูล A/D ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4550

การใช้งานโมดูล A/D นั้นต้องกำหนดให้พอร์ต A ทำหน้าที่เป็น การรับข้อมูลทางพอร์ตในรูปแบบ อนาลอกโดยใช้ฟังก์ชั่น

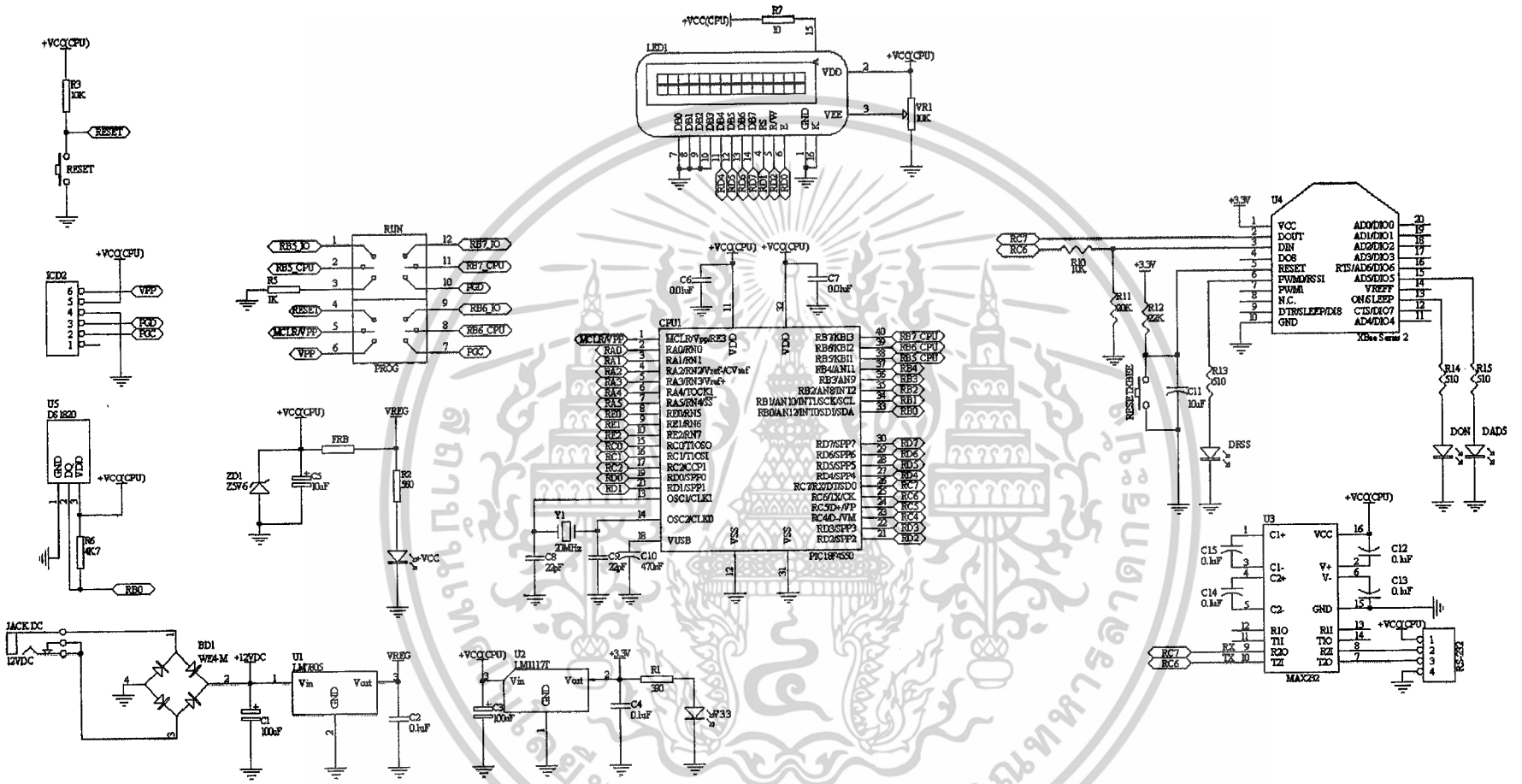
- set_tris_a(0Bxxxxxxxx); กำหนดให้พอร์ต A ทำหน้าที่เป็นอินพุต
- setup_adc_ports(ANx); เซตพอร์ต A บิต x ทำหน้าที่เป็นขารับข้อมูลอนาลอก
- setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL); เซตสัญญาณนาฬิกาภายในสำหรับสัญญาณอนาลอก
- set_adc_channel(x); เซตให้รับสัญญาณอนาลอกช่องที่ x
- read_adc(); อ่านความต่างศักย์ที่รับมาจากขา RAx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

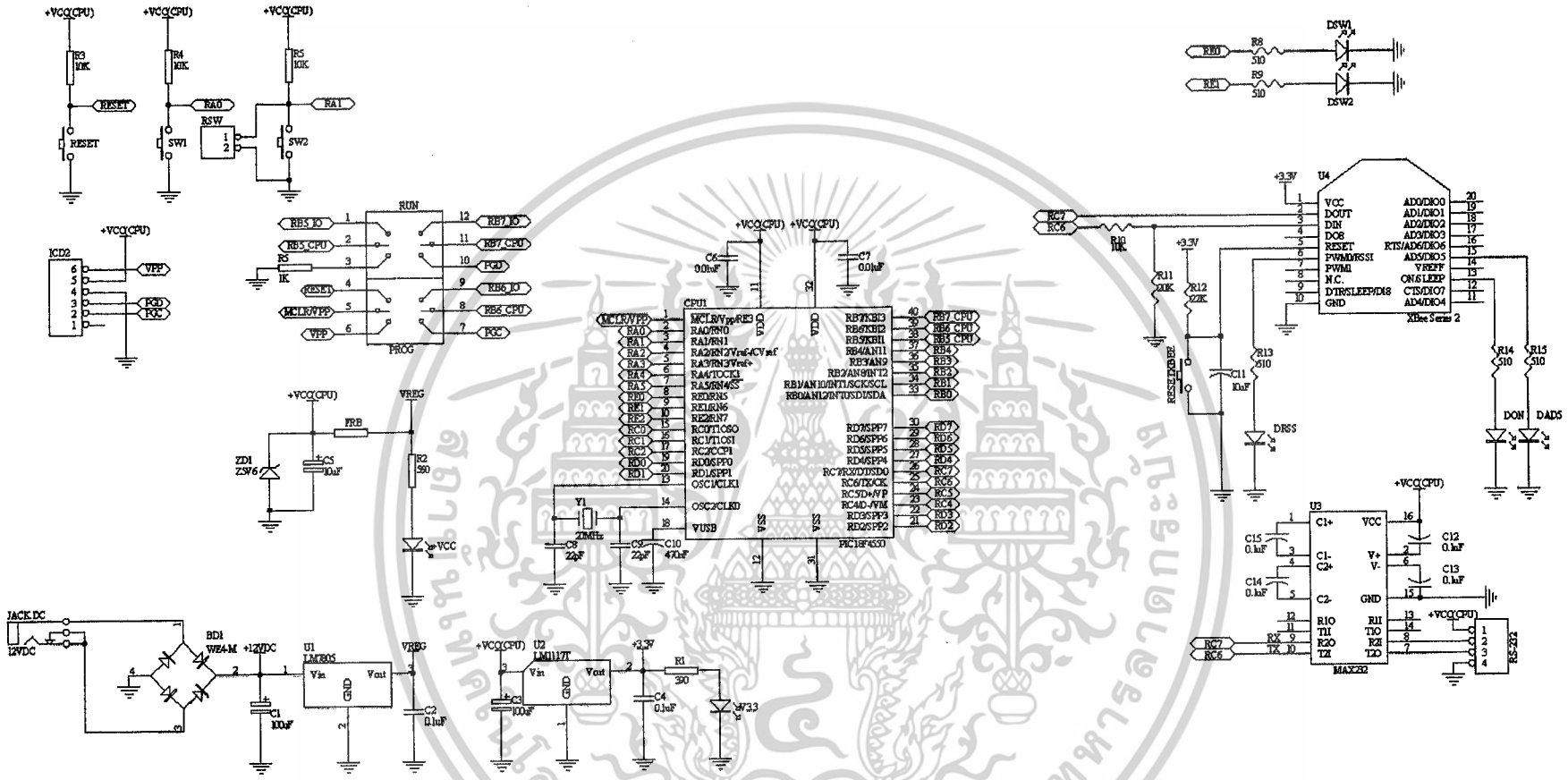
# ภาคผนวก ง.

# รายละเอียดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ ง.1 วงจรภาคส่ง ของวงจรตรวจสอบอุณหภูมิ**




**รูปที่ ง.2** วงจรภาคส่ง ของวงจรเซนเซอร์แม่เหล็ก