

สำนักหอสมุดหลวง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจัดสรรและออกแบบระบบจ่ายน้ำสำหรับพื้นที่เชิงเขาด้วยระบบไอทีไร้สาย
**WATER FEEDING MANAGEMENT AND DESIGNING FOR FOOT HILL
AREAS WITH WIRELESS INFORMATION TECHNOLOGY**



โดย
นายกิตติพงษ์ ภู่วัด
นายชาติชาย ชาฟูย์
นายณรงค์ชัย คำบุญเรือง
นายนพรัตน์ กิตนอก

มท.
ก6747
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 83247
วัน, เดือน, ปี..... 11 ส.ค. 2551

b.11467820
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**WATER FEEDING MANAGEMENT AND DESIGNING FOR FOOT HILL
AREAS WITH WIRELESS INFORMATION TECHNOLOGY**



**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**

2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบเสนอปริญญาบัตร

หัวข้อปริญญาบัตร

การจัดสรรและออกแบบระบบจ่ายน้ำสำหรับพื้นที่เชิงเขาด้วยระบบ
ไอทีไร้สาย

TITLE

WATER FEEDING MANAGEMENT AND DESIGNING FOR
FOOT HILL AREAS WITH WIRELESS INFORMATION
TECHNOLOGY

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาบัตร

ผศ. คล้าย สุขเจริญผล

ภาควิชา

วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา

2550

ปริญญาบัตรฉบับนี้ ได้รับการอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง



(ผศ. คล้าย สุขเจริญผล)

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การจัดสรรและออกแบบระบบจ่ายน้ำสำหรับพื้นที่เชิงเขาด้วยระบบไอทีไร้สาย	
ชื่อนักศึกษา	นายกิตติพงษ์ ภู่วัด	รหัสนักศึกษา 48015568
	นายชาติชาย ชาพูย์	รหัสนักศึกษา 48015573
	นายณรงค์ชัย คำบุญเรือง	รหัสนักศึกษา 48015575
	นายพนรัตน์ ถินนอก	รหัสนักศึกษา 48015582
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. คลชัย สุขเจริญผล	
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
	สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ	
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ	
ปีการศึกษา	2550	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้กล่าวถึงการออกแบบ, การสร้างระบบควบคุม และการแสดงผลด้วยการเชื่อมต่อผู้ใช้ด้วยกราฟฟิก (GUI) สำหรับระบบจัดสรรทรัพยากรน้ำในสวนเกษตรให้มีประสิทธิภาพการใช้น้ำสูง โดยเฉพาะในฤดูแล้ง ด้วยวิธีวัดค่าเฉลี่ยความชื้นของดินจากเซ็นเซอร์แต่ละโนดที่วางกระจายอยู่ในแต่ละพื้นที่ย่อย (Zones) และใช้การวัดระดับน้ำในแทงก์ (บ่อรวม) นำมาประมวลผลและตัดสินใจในการใช้น้ำในแต่ละโซน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในการควบคุมวาล์วในโหมคอัตโนมัติ โดยข้อมูลทั้งหมดถูกส่งผ่านระบบสื่อสารไร้สาย (Wireless Sensor Network) และระบบควบคุมถูกสร้างขึ้นบน Microcontroller PIC18F877A นอกจากนี้ระบบสามารถควบคุมอัตราการให้น้ำในแต่ละพื้นที่ย่อยได้จากคอมพิวเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็กด้วยการติดต่อแบบกราฟฟิก (GUI) ในโหมคแมนนวล ซึ่งระบบนี้ออกแบบมาเพื่อควบคุมการจ่ายน้ำให้สัมพันธ์กับความต้องการน้ำของพืชในแต่ละพื้นที่ และนอกจากนี้ระบบยังถูกออกแบบให้ผู้ควบคุมสามารถโปรแกรมตารางเวลาได้ตามลักษณะการใช้งานจริง

Thesis Title	Water Feeding Management and Designing for Foot Hill Areas with Wireless Information Technology		
Student	Mr. Kittipong Phuwat	ID.	48015568
	Mr. Chatchai Sapuy	ID.	48015573
	Mr. Narongchai Kambunraung	ID.	48015575
	Mr. Nopparat Kidnok	ID.	48015582
Advisor	Asst. Prof. Dolchai Sookcharoenphol		
Graduate Level	Bachelor Degree of Information Engineering		
Department	Information Engineering		
Academic Year	2550		

Abstract

This thesis is designing and implementation Water Feeding Management and Designing for Foot Hill Areas with Wireless Information Technology which consists of controller, display, soil moisture sensors and GUI to obtain a high efficient of water feeder in longan farm especially useful in summer.

In automatic operation, a soil moisture value of each node which lie distributed in subzones is measured and averaged using microcomputer. For cover large area, however, data transmission via transmission lines make a high cost due to long transmission lines, long time to installation and need both RF amplifier and equalizer for ISI free. To avoid those problems a wireless communication is useful in the project.

A user can control and monitoring (both automatic or manual operations) the system via GUI to provide a water rate which related to soil moisture in each subzones. In additional, the system is designed to a user can preprogram the time-tables that corresponsse to real applicatons.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้จัดทำขึ้นจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทั้งนี้ทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดลชัย สุขเจริญผล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ พี่เจตน์ ออสวัสดิ์ และ พี่ดี เป็นอย่างสูง ที่คอยให้คำปรึกษา ให้ความรู้ และให้คำแนะนำ ในส่วนของวงจรการทำงาน โปรแกรม ที่ใช้ในการทดลอง เอกสารอ้างอิง รวมถึงความช่วยเหลือในส่วนของเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ

ที่สำคัญที่สุดขอขอบพระคุณบิดา มารดาผู้ให้กำเนิด ที่ช่วยสั่งสอน อุปการะเลี้ยงดู และให้ โอกาสทางการศึกษาเป็นอย่างยิ่ง ขอบขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยเป็นกำลังใจมาโดยตลอด จึงทำให้ทาง คณะผู้จัดทำนั้นตั้งใจ และร่วมมือกันทำงานอย่างเต็มความสามารถ เพื่อให้งานออกมามีคุณภาพ หาก มีข้อผิดพลาดประการใดทางคณะผู้จัดทำต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดสิทธิ์อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 วิธีการดำเนินโครงการ	2
1.5 หลักการทำงานของระบบ	2
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 กำหนดเวลาและขั้นตอนในการดำเนินงาน	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความสำคัญของน้ำต่อการเพาะปลูกพืช	6
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างดิน น้ำ และพืช	6
2.3 คุณสมบัติของน้ำที่เกี่ยวข้องกับความต้องการน้ำของพืช	10
2.4 การตรวจสอบความชื้นในดิน	14
2.5 ลักษณะการดูดซึมน้ำของดินและอัตราการซึมน้ำของดิน	16
2.6 คุณสมบัติของพืชที่เกี่ยวข้องกับความต้องการน้ำของพืช	18
2.7 การออกแบบระบบให้น้ำแบบประหยัดแก่พืช	20
2.8 Zigbee	26
2.9 RF Module Operation	29
2.10 ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A	31
2.11 คอนโทรล MSComm	34

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและหลักการทำงาน	
3.1 การออกแบบโครงการ	41
3.2 การออกแบบทางด้านฮาร์ดแวร์	41
3.3 การออกแบบซอฟต์แวร์	46
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลอง	50
บทที่ 5 สรุปการพัฒนาโครงการ	
5.1 สรุปการพัฒนาโครงการ	59
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น	59
5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ	59
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

ภาพและคำอธิบาย	หน้า
รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการเชื่อมต่อระบบควบคุม, ระบบสื่อสารไร้สาย และตัวประมวลผลสั่งดำเนินการ	3
รูปที่ 1.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงภาครับ-ส่งของคอมพิวเตอร์	3
รูปที่ 1.3 บล็อกไดอะแกรมของ Multi Node Sensor	4
รูปที่ 1.4 ผังของระบบจัดการให้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ	4
รูปที่ 2.1 สามเหลี่ยมมาตรฐานเพื่อการจำแนกประเภทเนื้อดิน	8
รูปที่ 2.2 น้ำในดินและระดับความชื้นของดินที่จุดต่างๆ	12
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินกับการกำหนดให้น้ำแก่พืช	14
รูปที่ 2.4 ลักษณะการซึมซับน้ำของดิน	16
รูปที่ 2.5 ลักษณะการเปียกน้ำของดินเนื้อละเอียด (ดินร่วนเหนียว) กับดินเนื้อหยาบ (ดินทราย)	17
รูปที่ 2.6 ลักษณะการเปียกน้ำของดินที่ชั้นดินบนและดินล่างต่างกัน (ดินเหนียวกับดินทราย)	17
รูปที่ 2.7 ปริมาณการใช้น้ำของพืช	18
รูปที่ 2.8 การดูน้ำจากดินในชั้นต่างๆของพืช	20
รูปที่ 2.9 การแบ่งพื้นที่ในการให้น้ำแก่พืช	23
รูปที่ 2.10 รูปแบบการวางผังการเดินท่อ	24
รูปที่ 2.11 รูปแบบโครงข่าย IEEE 802.15.4	27
รูปที่ 2.12 การแบ่งช่องสัญญาณในชั้น Physical ของ ZigBee	28
รูปที่ 2.13 โครงสร้างโพรโทคอลของ ZigBee	28
รูปที่ 2.14 ไดอะแกรมการเชื่อมต่อพอร์ต UART	29
รูปที่ 2.15 แสดงรูปแบบของข้อมูลอนุกรมแบบซิงโครนัส	30
รูปที่ 2.16 ไดอะแกรมการควบคุมข้อมูล	31
รูปที่ 2.17 ขาสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877	31
รูปที่ 2.18 วงจรการเชื่อมต่อ PIC กับวงจรถ่ายสัญญาณนาฬิกาและการรีเซต	32
รูปที่ 2.19 การจัดการพื้นที่หน่วยความจำของ PIC16F877	33
รูปที่ 3.1 Block Diagram การออกแบบโครงงาน	41
รูปที่ 3.2 การเชื่อมต่อRS-232 เข้ากับ ZigBee	42
รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่อ ZigBee เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพและคำอธิบาย	หน้า
รูปที่ 3.4 วงจรวัดระดับน้ำ	43
รูปที่ 3.5 วงจรวัดความชื้นดิน	43
รูปที่ 3.6 วงจรขับมอเตอร์	44
รูปที่ 3.7 วงจรปรับ Zero – Span ของ Potentiometer	44
รูปที่ 3.8 ชุดควบคุมวาล์ว	45
รูปที่ 3.9 แนวการวางท่อและสปริงเกอร์	46
รูปที่ 3.10 แผนผังการทำงานโปรแกรม VB ส่วนของระบบอัตโนมัติ	47
รูปที่ 3.11 แผนผังการทำงานโปรแกรม VB ส่วนของระบบแมนนวล	48
รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์	49
รูปที่ 4.1 การทำงานแบบแมนนวล	50
รูปที่ 4.2 แสดงสถานะกำลังเปิดวาล์ว ZONE A	51
รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งที่วาล์วปิด	51
รูปที่ 4.4 ตำแหน่งเปิดวาล์วอยู่ที่ 10 %	52
รูปที่ 4.5 แสดงสถานะที่วาล์วเปิดสุด 100 %และทำงานที่ 1 นาที	52
รูปที่ 4.6 แสดงสถานะกำลังปิดวาล์วที่ 60 %	52
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งของวาล์วที่เปิดสุด	53
รูปที่ 4.8 การกระจายน้ำเมื่อเปิดวาล์ว (1)	53
รูปที่ 4.9 การกระจายน้ำเมื่อเปิดวาล์ว (2)	54
รูปที่ 4.10 การกระจายน้ำเมื่อเปิดวาล์ว (3)	54
รูปที่ 4.11 การแบ่งโซนการให้น้ำ	55
รูปที่ 4.12 การทำงานแบบอัตโนมัติ	56
รูปที่ 4.13 การทำงานของ ZONE B เมื่อความชื้นลดต่ำลง	56
รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะอุปกรณ์ทดสอบความชื้นในดินที่สร้างขึ้น	57
รูปที่ 4.15 แสดงการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความชื้นดิน	57
รูปที่ 4.16 หัวสปริงเกอร์ที่ให้น้ำ 200 ลิตร/ชม.	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางและคำอธิบาย	หน้า
ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน	2
ตารางที่ 1.2 เวลาและขั้นตอนการดำเนินงาน	5
ตารางที่ 2.1 การแบ่งกลุ่มอนุภาคปฐมภูมิของดิน	7
ตารางที่ 2.2 ประเภทของเนื้อดิน ข้อดีและข้อเสียของเนื้อดินแต่ละกลุ่ม	9
ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการอุ้มน้ำของดินทั้งหมดส่วนที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ และใช้ไม่ได้ ของดินชนิดต่าง ๆ	13
ตารางที่ 2.4 ลักษณะการทำงานของเครื่องมือในการตรวจสอบความชื้นในดินในแบบต่างๆ	15
ตารางที่ 2.5 ลักษณะการดูดซึมของน้ำ	16
ตารางที่ 2.6 อัตราการซึมของน้ำผ่านผิวดิน	17
ตารางที่ 2.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการใช้ น้ำของพืชภายใต้ลักษณะภูมิอากาศต่างๆ	19
ตารางที่ 2.8 อัตราการไหลสูงสุดในท่อความเร็ว 1.5 ม. / วินาที ความยาวน้อยกว่า 1,000 ม.	26
ตารางที่ 2.9 CommEvent เกี่ยวกับการเกิดสถานะเมื่อเกิดการผิดพลาดในการสื่อสาร	36
ตารางที่ 2.10 CommEvent เกี่ยวกับเกิดสถานการณ์เมื่อมีการสื่อสาร	37
ตารางที่ 2.11 Handshake Property	37
ตารางที่ 2.12 Input Mode Property	38
ตารางที่ 2.13 รายละเอียดที่บ่งชี้ถึงความผิดพลาดในการใช้ MS Comm Control	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทรัพยากรน้ำเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญต่อการดำรงชีวิต การนำเอาน้ำมาใช้จึงต้องคำนึงถึงประโยชน์สูงสุดในการทำเกษตรกรรม ซึ่งต้องใช้ น้ำเป็นปัจจัยสำคัญจึงต้องพิจารณาถึงวิธีการใช้น้ำที่เหมาะสม การนำเอาเทคโนโลยีการให้น้ำพืชมาใช้น้ำจะช่วยประหยัดเวลา และทำให้เกษตรกรรมมีความสะดวก

การที่จะให้พืชเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และให้ผลผลิตสูงนั้นจะต้องคอยควบคุมปริมาณความชื้นในดินให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมอยู่เสมอ เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อผลผลิตของพืช

ดังนั้น โครงการนี้จะเป็น ระบบจัดการให้น้ำสำหรับสวนผลไม้ในพื้นที่บริเวณเชิงเขาสูงให้เกิดประสิทธิภาพสูงในการใช้ทรัพยากรน้ำสำหรับการเกษตรกรรมในฤดูแล้ง โดยอาศัยระบบเซนเซอร์ความชื้นในดินที่ส่งข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลต่อเชื่อมโยงเป็น โครงข่ายไร้สายหลายจุดมาประมวลผลโดยการเก็บ, ประมวลผลข้อมูลและแสดงผลเชื่อมโยงกับผู้ใช้ด้วยระบบ GUI และทำงานร่วมกับตัวควบคุมแรงดันน้ำซึ่งเชื่อมต่ออยู่เป็นลักษณะ โครงข่ายไร้สาย โดย โดยโครงการนี้ได้นำเอา Fuzzy Control มาช่วยในการตัดสินใจในการเปิดปิดวาล์วน้ำ ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกใช้ได้ 2 ลักษณะ คือ การควบคุมแบบอัตโนมัติ และการควบคุมผู้ใช้กำหนดค่าตัวแปรได้เอง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสร้างระบบควบคุมการไหลของน้ำในระบบปิดร่วมกับเซนเซอร์ความชื้นในดินแบบหลายจุด

1.2.2 เพื่อสร้างระบบเซนเซอร์เป็น โครงข่ายไร้สายร่วมกับ ZigBee สำหรับการควบคุมทั้งแบบอัตโนมัติและแบบแมนนวล

1.2.3 เพื่อศึกษาหาเทคนิคในการแก้ปัญหาหรือลดผลกระทบของเซนเซอร์ไร้สาย

1.2.4 เขียนโปรแกรมซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุม, การวัดผลและการแสดงผลด้วยกราฟฟิกจากชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่ผลิตขึ้นได้เองภายในประเทศและสามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ดำเนินการออกแบบและสร้างระบบเซนเซอร์ผ่าน โครงข่ายไร้สายแบบหลายจุดสามารถ ติดต่อสื่อสารถึงกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 ตัวควบคุมวาล์วจ่ายน้ำ และระบบกักเก็บน้ำ โดยผลิตขึ้นจากชิ้นส่วน และอุปกรณ์ที่ผลิตขึ้นได้เองภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่ และใช้ร่วมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลในการจัดเก็บ

1.3.3 วิเคราะห์และคำนวณปริมาณการให้น้ำ รวมถึงการใช้น้ำและค่าใช้จ่ายได้ชัดเจน

1.4 วิธีการดำเนินโครงการ

วิธีการดำเนินงานโครงการดูได้จากตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินโครงการ

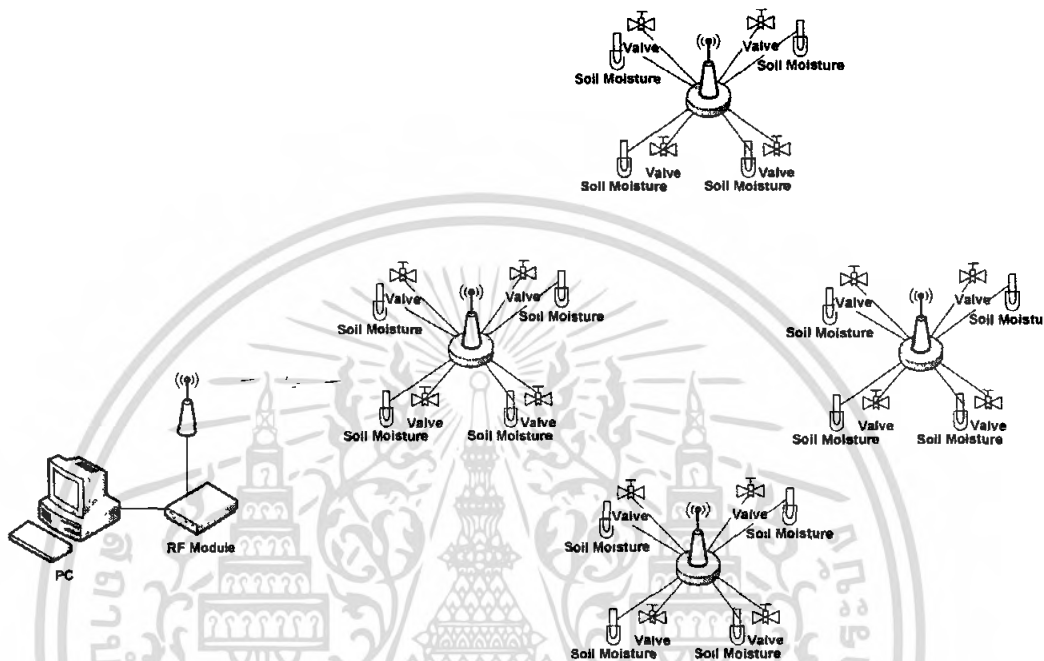
ลำดับที่	วิธีการดำเนินโครงการ
1.	ศึกษารายละเอียด และกำหนดคุณสมบัติต่างๆ ของระบบเซ็นเซอร์ อุปกรณ์ควบคุมการจ่ายน้ำ
2.	ศึกษาการทำงานของ Fuzzy Control ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A และชุดอุปกรณ์การสื่อสาร (ZigBee)
3.	ทำการออกแบบระบบ และสำรวจหาอุปกรณ์ที่ซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด
4.	เก็บข้อมูลเกี่ยวกับการใช้น้ำและความชื้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบ
5.	ทดสอบเซ็นเซอร์โครงข่ายไร้สาย และชุดอุปกรณ์ควบคุมการจ่ายน้ำการติดต่อสื่อสารแบบโครงข่ายเข้ากับหน่วยประมวลผลและเก็บข้อมูล
6.	ติดตั้งระบบเซ็นเซอร์โครงข่ายไร้สาย ทดลองการทำงานของส่วนต่างๆ และออกแบบโปรแกรมควบคุม
7.	สรุปผลการทดลอง และรายงานผล

1.5 หลักการทำงานของระบบ

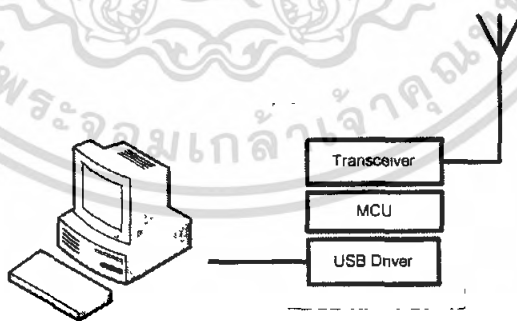
การทำงานของระบบใช้วิธีการติดต่อสื่อสารแบบโครงข่ายไร้สาย (Wireless Sensor Networks) ซึ่งเป็นการใช้เซ็นเซอร์จำนวนเล็กๆจำนวนมากมาทำการตรวจวัดสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่ต้องการศึกษาและนำเอาข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์เพื่อใช้ในการปรับปรุงหรือควบคุมการจ่ายน้ำให้กับระบบสวนผลไม้ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับความต้องการของผลไม้แต่ละชนิด เช่นลำไย และผลไม้เมืองหนาว โดยโครงสร้างของระบบแบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่ชุด โครงข่ายเซ็นเซอร์ความชื้นไร้สาย (Multi Moisture Wireless Sensor Networks) และระบบเชื่อมต่อกับระบบประมวลผลกลางแบบไร้สายเพื่อเก็บข้อมูล, แสดงผลในรูปแบบกราฟิก (GUI) และวิเคราะห์ข้อมูล จากนั้นตัวประมวลผลส่งคำสั่งควบคุมกลับไปยังแต่ละ Node Sensor เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมการจ่ายน้ำให้สัมพันธ์กับความต้องการปริมาณน้ำในพื้นที่แต่ละส่วนบริเวณที่ราบเชิงเขา ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ส่วนรูปที่ 1.2 และ 1.3 แสดงการทำงานของชุดเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และ Node Sensor ตามลำดับ



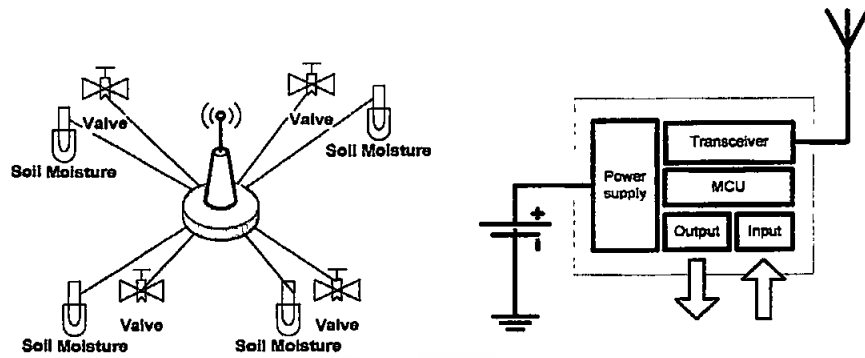
รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการเชื่อมต่อระบบควบคุม, ระบบสื่อสารไร้สาย และตัวประมวลผลสั่งดำเนินการ



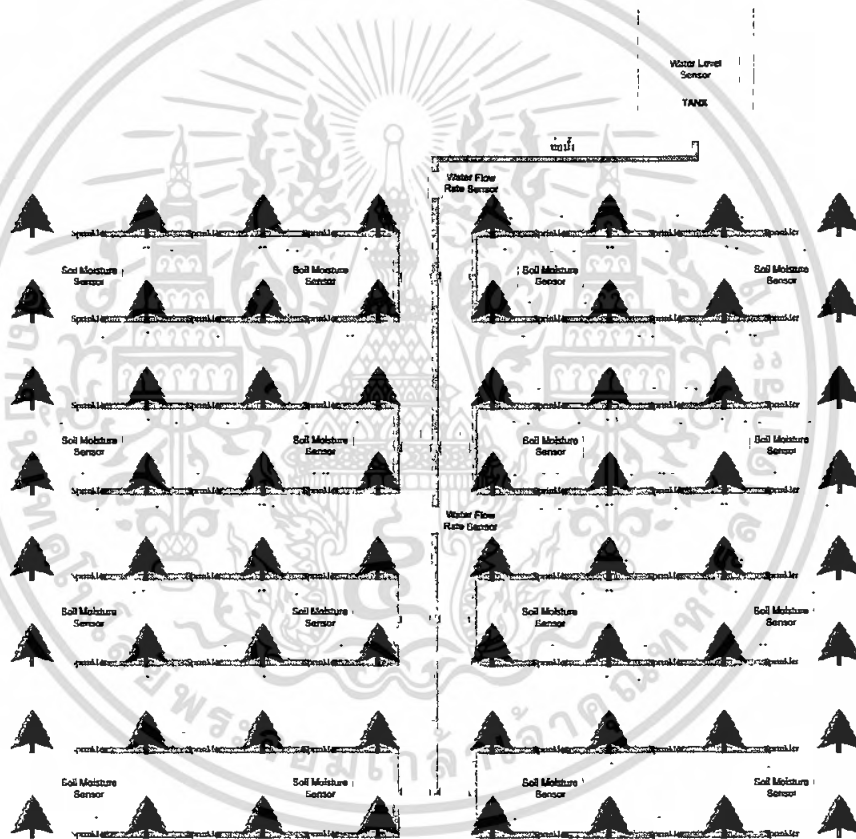
รูปที่ 1.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงภาครับ-ส่งของคอมพิวเตอร์

ซึ่งในการติดตั้งแต่ละ Node Sensor point จะทำการติดตั้งรอบพื้นที่สวนผลไม้เพื่อใช้ในการสุ่มวัดความชื้นและควบคุมการทำงานของระบบฉีดน้ำอัตโนมัติโดยให้ Node Sensor point ที่อยู่ติดกันสามารถติดต่อสื่อสารถึงกันได้โดยแสดงตัวอย่างการติดตั้งดังรูปที่ 1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 บล็อกไดอะแกรมของ Multi Node Sensors



รูปที่ 1.4 ผังของระบบจัดการให้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เพื่อลดความเสียหายของผลไม้ในฤดูแล้ง

1.6.2 ระบบสามารถควบคุมการเจริญเติบโตของพืชได้ดี ทำให้พืชเติบโตอย่างมีประสิทธิภาพ

1.6.3 ระบบสามารถเปลี่ยนแปลงกระบวนการควบคุมค่าต่าง ๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 กำหนดเวลาและขั้นตอนในการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.2 เวลาและขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ช่วงระยะเวลา (เดือน)				
	พ.ค.- มิ.ย.	ก.ค.- ส.ค.	ก.ย.- ต.ค.	พ.ย.- ธ.ค.	ม.ค.- ก.พ.
1. ศึกษารายละเอียดและคุณสมบัติต่างๆ ของระบบ เซ็นเซอร์วัดความชื้นดิน อุปกรณ์ควบคุมการจ่ายน้ำ	←→				
2. ศึกษาการทำงานของระบบ Fuzzy Control ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A และชุด อุปกรณ์การสื่อสาร (ZigBee)	←→				
3. ออกแบบระบบ และสำรวจหาอุปกรณ์ที่ซื้อได้ง่าย ตามท้องตลาด		←→			
4. เก็บข้อมูลเกี่ยวกับการจ่ายน้ำและความชื้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบ		←→			
5. ทำการออกแบบชุดควบคุมตรวจวัดความชื้น และวิเคราะห์การทำงาน			←→		
6. ทดสอบการทำงานแบบ โครงข่ายไร้สาย ชุด ควบคุมการทำงานแบบ Manual				←→	
7. ติดตั้งระบบเซ็นเซอร์โครงข่ายไร้สาย ทดลองการทำงานของแต่ละส่วน และทดสอบระบบควบคุมอัตโนมัติ				←→	←→
8. สรุปผลการทดลอง และรายงานผล					←→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญของน้ำต่อการเพาะปลูกพืช

น้ำมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยเป็นปัจจัยสำคัญในด้านการสร้างพลังงานของพืช เช่น การสังเคราะห์แสง โดยที่น้ำเป็นวัตถุดิบอย่างหนึ่งในการสังเคราะห์แสงของพืช, การจัดหาอาหารในพืช อันได้แก่ การดูดน้ำ และธาตุอาหารและการลำเลียงภายในพืช

นอกจากนี้ยังมีบทบาทที่สำคัญต่อการจัดการผลิตพืชให้ได้ในเวลา ปริมาณและคุณภาพตามที่ต้องการ เช่น ในการปลูกพืชนั้นหากมีการจัดการเรื่องน้ำที่ดีจะสามารถควบคุมหรือชักนำการออกดอกออกผลทั้งในและนอกฤดูการเพาะปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการปลูกไม้ผลต่างๆ เช่น มะม่วง, มะนาว, ส้ม, น้อยหน่า และ ลำไย เป็นต้น

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างดิน น้ำ และพืช

เนื่องจากเราทำการปลูกพืชบนดินและทำการให้น้ำเพื่อให้พืชได้เจริญเติบโต ดังนั้นจึงจำเป็นที่ควรทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ดิน น้ำ และพืชในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบให้น้ำที่นี้จะขอกล่าวถึง คือ

2.2.1 คุณสมบัติของดินที่เกี่ยวข้องกับความต้องการน้ำของพืช

เนื่องจากดินเปรียบเสมือนถังน้ำหรือที่เก็บกักน้ำโดยธรรมชาติให้แก่พืชนำไปใช้ โดยรากของพืชจะดูดเอาความชื้นในดินไปใช้อีกทอดหนึ่งน้ำที่เก็บให้พืชนำไปใช้นี้จะอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่เป็นของแข็ง ซึ่งช่องว่างเหล่านี้ถ้าไม่มีน้ำบรรจุอยู่ก็จะมีอากาศเข้าไปแทนที่ คุณสมบัติที่สำคัญของดินที่เกี่ยวกับความต้องการน้ำของพืชที่สำคัญ คือ

2.2.1.1 องค์ประกอบของดิน

ดินมีองค์ประกอบ 4 ส่วน อนินทรีย์วัตถุ อินทรีย์วัตถุ น้ำ และ อากาศ องค์ประกอบของดินแต่ละส่วนมีประโยชน์ต่อการผลิตพืช ดังนี้

อนินทรีย์วัตถุ เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของดิน เกิดจากการสลายของหินและแร่ต่างๆ ออกเป็นชิ้นเล็กๆ ที่มีขนาดต่างๆกัน ดินแต่ละแห่งจะมีขนาดของอนินทรีย์วัตถุและชนิดของแร่ธาตุต่างๆ กัน ขึ้นกับการย่อยสลายที่เกิดขึ้นแต่ละชนิดของดินและแร่ธาตุต้นกำเนิดดิน

อินทรีย์วัตถุ ในดินประกอบด้วยเศษซากพืชซากสัตว์ที่เน่าเปื่อยแล้ว ที่กำลังถูกย่อยสลาย สารที่หลงเหลือจากการย่อยสลายนี้นี้เรียกว่า สารที่ได้จากการสังเคราะห์จุลินทรีย์ดิน

สารต่างๆ เหล่านี้เรียกว่า ฮิวมัส เป็นสารแขวนลอยสีดำหรือน้ำตาล มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ และธาตุอาหารพืชได้สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับสารอนินทรีย์ อินทรีย์วัตถุทำให้ดินร่วนโปร่ง เป็นที่มาของธาตุอาหารพืชหลายชนิด เช่น ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และการย่อยสลายซากพืชซากสัตว์ ทำให้ได้ฮิวมัสเพิ่มขึ้นอีก

น้ำ เป็นส่วนประกอบสำคัญของพืช น้ำในดินนอกจากจะเป็นแหล่งที่รากพืชดูดขึ้นมาหล่อเลี้ยงต้นพืชแล้ว ยังช่วยในการละลายแร่ธาตุอาหารในดินให้อยู่ในสภาพที่พืชสามารถนำไปใช้ได้

อากาศ ช่องว่างระหว่างเม็ดดินส่วนที่ไม่มีน้ำอยู่จะเป็นที่อยู่ของอากาศ รากพืชใช้ออกซิเจนในการหายใจเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานที่ใช้ในการดูดน้ำและแร่ธาตุ โดยทั่วไปแล้วอากาศในดินมีออกซิเจนน้อยกว่าอากาศบนดิน ดังนั้นการถ่ายเทอากาศของดินจึงมีความจำเป็น ดินที่มีการถ่ายเทอากาศน้อยจะมีปริมาณคาร์บอน ไดออกไซด์สูง ถ้ามีปริมาณคาร์บอน ไดออกไซด์สูงถึงร้อยละ 10 จะทำให้การทำงานของรากพืชถูกจำกัด นอกจากออกซิเจนยังมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ดินด้วย

2.2.1.2 เนื้อดิน

เนื้อดินเป็นคุณสมบัติของดินที่บ่งบอกถึงความหยาบหรือความละเอียดของดิน เนื้อดินหมายถึงสัดส่วนของอนุภาคอินทรีย์วัตถุของดิน หรือคุณสมบัติของดินที่เกี่ยวกับเม็ดดิน 3 ชนิด ได้แก่ เม็ดทราย (Sand) เม็ดซิลท์หรือทรายแป้ง (Silt) และเม็ดดินเหนียว (Clay) ในอัตราส่วนต่างๆ กัน

ดินที่มีอนุภาคของทรายเป็นส่วนประกอบมากกว่าเรียกว่า ดินเนื้อหยาบ และดินที่มีอนุภาคดินเหนียวเป็นส่วนประกอบมากกว่าเรียกว่าดินเนื้อละเอียด จะมีความสามารถอุ้มน้ำได้ดีกว่าดินทรายซึ่งมีคุณสมบัติให้น้ำซึมผ่านได้ง่าย มีการระบายน้ำแต่อุ้มน้ำไว้ได้น้อย ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มได้ตามตารางที่ 2.1

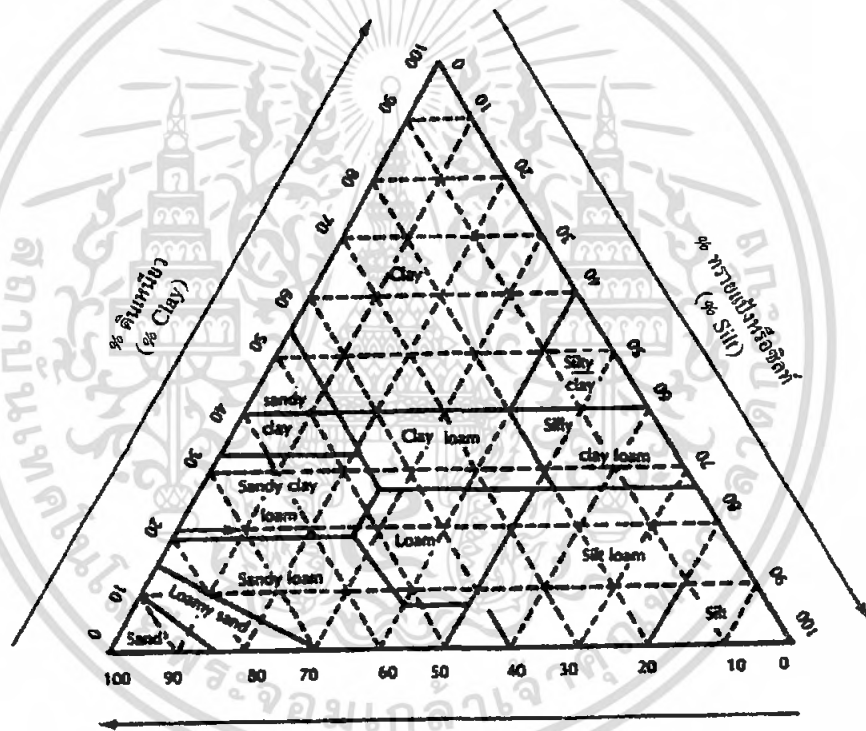
ตารางที่ 2.1 การแบ่งกลุ่มอนุภาคปฐมภูมิของดิน

ระบบของกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา		ระบบสากล	
ชื่อกลุ่ม	เส้นผ่านศูนย์กลาง สมมูล(มม.)	ชื่อกลุ่ม	เส้นผ่านศูนย์กลาง สมมูล(มม.)
ทรายหยาบ	1.0-0.5	ทรายหยาบ	2.0-0.2
ทรายหยาบมาก	2.0-1.0	ทรายละเอียด	0.20-0.02
ทรายปานกลาง	0.5-0.25	ทรายแป้ง	0.02-0.002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) การแบ่งกลุ่มอนุภาคปฐมภูมิของดิน

ระบบของกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา		ระบบสากล	
ชื่อกลุ่ม	เส้นผ่านศูนย์กลาง สมมูล(มม.)	ชื่อกลุ่ม	เส้นผ่านศูนย์กลาง สมมูล(มม.)
ทรายละเอียด	0.25-0.10	ดินเหนียว	เล็กกว่า 0.002
ทรายละเอียดมาก	0.10-0.05		
ทรายแป้ง	0.05-0.002		
ดินเหนียว	เล็กกว่า 0.002		



รูปที่ 2.1 สามเหลี่ยมมาตรฐานเพื่อการจำแนกประเภทเนื้อดิน

ตัวอย่างเช่น จากผลการวิเคราะห์ดินพบว่าดินนั้นประกอบด้วยทราย (Sand) ร้อยละ 30 ทรายแป้ง (Silt) ร้อยละ 40 และดินเหนียว (Clay) ร้อยละ 30 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสามเหลี่ยมมาตรฐาน จะพบว่าดินชนิดนี้เป็นดินประเภท Clay loam หรือดินร่วนเหนียว หรือดินร่วนปนดินเหนียว จากประเภทของดินในสามเหลี่ยมมาตรฐานซึ่งมี 12 ชนิดนั้นสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ ดินเนื้อหยาบ และดินเนื้อละเอียด ซึ่งแต่ละกลุ่มมีข้อดีข้อเสียของเนื้อดินแต่ละและการจัดการน้ำแตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ประเภทของเนื้อดิน ข้อดีและข้อเสียของเนื้อดินแต่ละกลุ่ม

กลุ่มของเนื้อดิน	ประเภทของเนื้อดิน		ข้อดีและข้อเสียของเนื้อดินแต่ละกลุ่ม	
	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย	ข้อดี	ข้อเสีย
1. ดินเนื้อหยาบ	1. Sand	ดินทราย	ไถพรวนง่าย	1. อุ้มน้ำและธาตุอาหารได้น้อย 2. ระบายน้ำได้เร็วเกินไป 3. ธาตุอาหารถูกชะล้างได้ง่าย
	2. Loamy sand	ดินทรายร่วนหรือดินทรายปนดินร่วน		
	3. Sand loam	ดินร่วนปนทราย		
2. ดินร่วน	4. Loam	ดินร่วน	1. ไถพรวนง่าย 2. อุ้มน้ำและธาตุอาหารได้มาก พอสสมควร 3. ระบายน้ำและอากาศดีพอควร 4. เหมาะแก่การปลูกพืช	ความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำ
	5. Silt loam	ดินร่วนปนซิลต์หรือดินร่วนปนตะกอนหรือดินร่วนปนทรายแป้ง		
	6. Silt	ทรายแป้งหรือซิลต์หรือดินตะกอน		
	7. Sandy clay loam	ดินร่วนเหนียวปนทราย		
	8. Clay loam	ดินร่วนเหนียวหรือดินร่วนปนดินเหนียว		
	9. Silty clay loam	ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง หรือดินร่วนเหนียวปนซิลต์หรือดินร่วนเหนียวปนตะกอน		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) ประเภทของเนื้อดิน ข้อดีและข้อเสียของเนื้อดินแต่ละกลุ่ม

กลุ่มของเนื้อดิน	ประเภทของเนื้อดิน		ข้อดีและข้อเสียของเนื้อดินแต่ละกลุ่ม	
	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย	ข้อดี	ข้อเสีย
3. ดินเนื้อละเอียด	10. Sandy clay	ดินเหนียวปนทราย	1. อุ้มน้ำและธาตุอาหารได้มาก	1. ระบายน้ำและอากาศไม่ดี
	11. Silty clay	ดินเหนียวปนทรายแป้งหรือดินเหนียวปนซิลต์หรือดินเหนียวปนตะกอน		
	12. Clay	ดินเหนียว		2. ไถพรวนยาก

2.3 คุณสมบัติของน้ำที่เกี่ยวข้องกับความต้องการน้ำของพืช

2.3.1 ลักษณะของน้ำในดิน

ปกติแล้วน้ำอยู่ในดินได้เพราะคุณสมบัติของโมเลกุลของน้ำสามารถยึดติดกันเองได้ และสามารถเกาะติดกับผิวของสารอื่น ได้ดีถ้าประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจน และสร้างพันธะให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลของน้ำและผิววัตถุเนื่องจากการที่ผิวของอนุภาคของดินมีอะตอมของออกซิเจนเรียงรายอยู่โดยรอบนอก

แรงดึงดูดความชื้นของดินมีความสัมพันธ์กับจำนวนความชื้นในดินที่พืชจะนำไปใช้ได้ กล่าวคือถ้าหากดินแห้งจะมีแรงดึงดูดความชื้นสูงมาก นั่นคือพืชจะต้องใช้แรงดึงมากเพื่อที่จะนำเอาความชื้นจากดินไป แต่ถ้าดินเปียกก็จะมีแรงดึงดูดความชื้นน้อยซึ่งพืชสามารถดูดเอาความชื้นนี้ไปใช้ได้ง่าย

2.3.2 ชนิดของน้ำในดิน

น้ำที่อยู่ในช่องว่างนั้นทั้งหมดจะเป็นปริมาณน้ำสูงสุดที่ดินจะเก็บกักเอาไว้ได้ถ้าไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำเราสามารถแบ่งชนิดของน้ำตามความสามารถของดินที่ยึดน้ำไว้ได้ 3 ชนิด คือ

2.3.2.1 น้ำอิสระ (Gravitational water หรือ free water)

สสารทุกอย่างที่อยู่บนผิวโลกจะถูกแรงดึงดูดของโลกกระทำอยู่ตลอดเวลา รวมทั้งน้ำที่ยังอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วย ในช่องว่างที่มีขนาดใหญ่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ขังอยู่ตรงกลางของช่องว่างกับเม็ดดิน จะน้อยกว่าในช่องว่างที่มีขนาดเล็กถ้าผลรวมของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างน้ำต่อน้ำและน้ำต่อดินน้อยกว่าแรงดึงดูดของโลก น้ำก็จะไหลสู่ที่ต่ำกว่าน้ำที่ไหลด้วยสาเหตุดังกล่าวนี้เรียกว่า “น้ำอิสระ”

2.3.2.2 น้ำซัพ (Capillary water)

เป็นน้ำที่เกิดขึ้นในสภาพที่เมื่อฝนหยุดตกหรือหยุดให้น้ำแก่พืช น้ำถูกระบายสู่ส่วนล่างซึ่งใช้เวลาประมาณ 24-48 ชั่วโมง ในลักษณะนี้ความหนาแน่นของน้ำที่เกาะยึดอนุภาคดินจะถูกยึดด้วยดินเต็มแต่เพียงช่องว่างขนาดเล็กด้วยแรงดูดซัพที่สูงมากพอที่จะต่อต้านแรงดูดของแรงดึงดูดของโลกกระทำได้ออกซิเจนซึ่งความชื้นของน้ำซัพนี้อนุภาคของดินมีแรงดึงต่อน้ำประมาณ 1/3 บาร์ และเรียกความชื้นในขณะนี้อาจจะเรียกความชื้นชลประทานหรือความจุความชื้นในสนาม (field capacity)

2.3.2.3 น้ำเยื่อ (Hygroscopic water)

เป็นน้ำที่เกาะติดหรือชิดกับอนุภาคของผิวดินและปรากฏในชั้นที่บางมากที่สุดที่พืชไม่สามารถนำมาใช้ได้

2.3.3 ระดับความชื้นที่สำคัญของดิน

จากชนิดของน้ำในดินดังกล่าวสามารถนำมาพิจารณาในระดับความชื้นที่สำคัญภายในดินตามลักษณะของน้ำหรือความชื้นที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน เพื่อประโยชน์ในการกำหนดหรือคำนวณหาปริมาณน้ำในดินที่ระดับความชื้นต่างๆ คือ

2.3.3.1 จุดความชื้นอิ่มน้ำหรือจุดความชื้นเมื่อดินอิ่มน้ำ (Water Saturated)

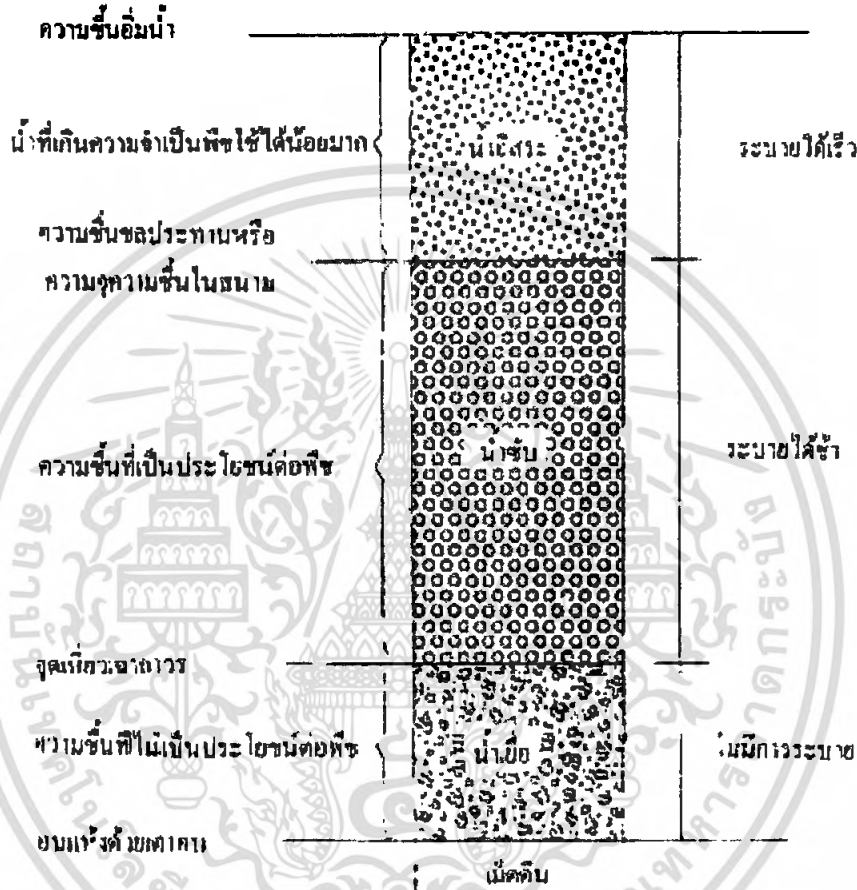
เป็นชั้นของน้ำในดินที่เกิดขึ้นเมื่อปริมาณช่องว่างระหว่างเม็ดดินทั้งหมดถูกแทนที่ด้วยน้ำ อาจจะมีอากาศอยู่บ้างในช่องว่างขนาดเล็กๆ แต่ก็ยังเป็นปริมาณน้อยมาก ถ้าดินมีความสามารถระบายน้ำได้ดีแล้วปริมาณน้ำที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่ก็จะเคลื่อนที่ลงไปข้างล่างเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกภายในเวลาไม่นานนัก

2.3.3.2 ความชื้นชลประทาน (Field Capacity)

ความชื้นของดินที่เหลือในดินหลังจากที่น้ำเคลื่อนไหวอิสระได้ถูกระบายออกไปจากช่องว่างขนาดใหญ่หมดแล้วหรือเป็นปริมาณน้ำสูงสุดที่ดินสามารถอุ้มความต้านทานแรงดึงดูดของโลก ในสภาพเช่นนี้ช่องว่างขนาดเล็กจะมีน้ำอยู่เต็มแต่มีอากาศอยู่เต็มช่องว่างขนาดใหญ่ เช่น ปริมาณความชื้นหลังจากที่ฝนตกหนักหรือหยุดให้น้ำแล้ว 2-3 วันเป็นความชื้นชลประทานหรือที่ความจุความชื้นในสนามระดับความชื้นชลประทานนี้ถือว่าเป็นระดับสูงสุดของความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช

2.3.3.3 จุดเหี่ยวเฉาถาวร (Permanent Wilting Point)

ความชื้นในดินเมื่อพืชไม่สามารถดูดมาใช้ให้เพียงพอสำหรับการคายน้ำและพืชเริ่มมีการเหี่ยวเฉาอย่างถาวรเรียกว่าความชื้นที่ “จุดเหี่ยวเฉาถาวร” ระดับความชื้นที่จุดเหี่ยวเฉาถาวรนี้ถือว่าเป็นพิกัดล่างสุดของความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช



รูปที่ 2.2 น้ำในดินและระดับความชื้นของดินที่จุดต่างๆ

2.3.3.4 ความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน

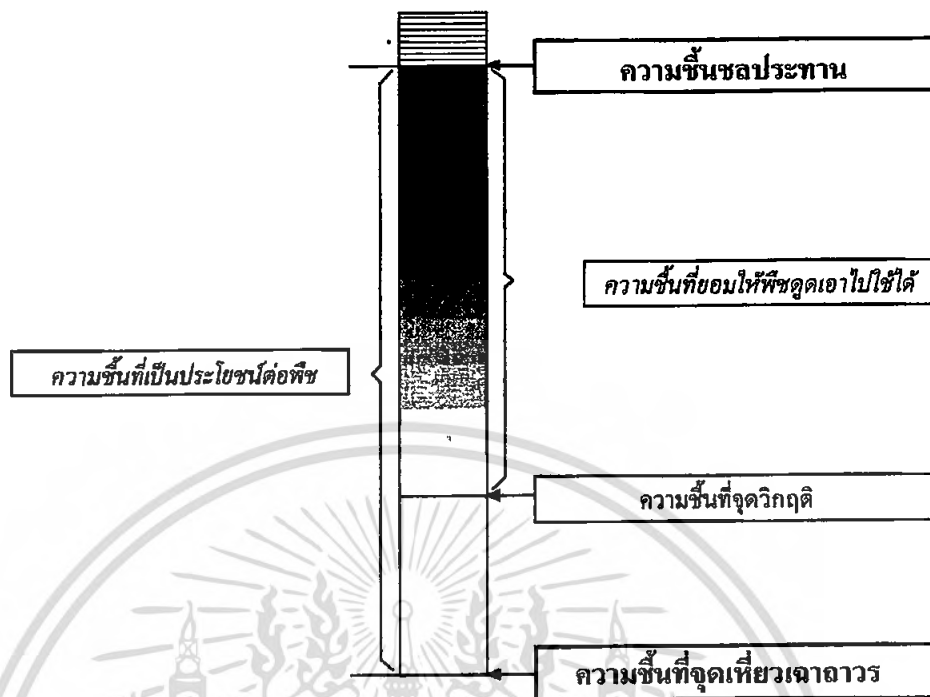
ความสามารถที่ดินสามารถเก็บน้ำหรืออุ้มน้ำไว้ให้แก่พืชดูดกินคือน้ำหรือความชื้นที่อยู่ระหว่างระดับความชื้นในดินที่ความชื้นชลประทานกับจุดเหี่ยวเฉาถาวร เป็นความชื้นที่เป็นประโยชน์ในปริมาณสูงสุดของความชื้นที่ดินชนิดหนึ่งๆสามารถดูดยึดไว้เป็นประโยชน์ต่อพืช

ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการอุ้มน้ำของดินทั้งหมดส่วนที่พืชสามารถนำไปใช้ได้และใช้ไม่ได้
ของดินชนิดต่าง ๆ

เนื้อดิน	ความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน (มม. น้ำ / ชม. ดิน)		
	รวมทั้งหมด	พืชนำเอาไปใช้ได้	พืชใช้ไม่ได้
(1)	(2)	(3)	(4)
ดินทราย	0.65 – 1.50	0.35 – 0.85	0.30 – 0.65
ดินร่วนปนทราย	1.50 – 2.30	0.75 – 1.15	0.75 – 1.00
ดินร่วน	2.30 – 3.40	1.15 – 1.70	1.15 – 1.50
ดินร่วนปนตะกอนทราย	3.40 – 4.00	1.70 – 2.00	1.70 – 2.00
ดินร่วนปนดินเหนียวปนตะกอนทราย	3.60 – 4.15	1.50 – 1.80	2.10 – 2.35
ดินเหนียว	3.80 – 4.15	1.50 – 1.60	2.30 – 2.55

พืชไม่สามารถใช้ความชื้นที่ดินอุ้มน้ำได้นี้ทั้งหมดเพราะเมื่อระดับความชื้นในดินถูกพืชใช้จนเหลือความชื้นน้อยมากจนใกล้ถึงจุดเหี่ยวเฉาถาวรแล้วพืชอาจได้รับความเสียหายได้ เพราะความชื้นในช่วงนี้จะถูกดินดูดยึดเอาไว้มากจนรากพืชไม่สามารถดูดมาใช้ได้

ดังนั้นจึงต้องทำการให้น้ำเมื่อความชื้นในดินลดลงใกล้ถึงจุดเหี่ยวเฉาถาวรซึ่งเรื่องนี้เป็นเรื่องที่สำคัญต่อการตัดสินใจในการกำหนดในการให้น้ำแก่พืชมาก ซึ่งโดยทั่วไป จะยอมให้ความชื้นในดินลดลงประมาณ 40 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ของความชื้นที่พืชดูดเอาไปใช้ได้ซึ่งความชื้นในดินที่ยอมให้ลดลงก่อนทำการให้น้ำครั้งต่อไปเรียกว่า “ความชื้นที่ยอมให้พืชดูดไปใช้ได้” ส่วนความชื้นที่เหลือในดินหลังจากที่พืชดูดเอาความชื้นที่ยอมให้ดูดไปใช้ได้หมดแล้วคือ “ความชื้นที่จุดวิกฤติ” ซึ่งคำอธิบายดังกล่าวนี้สามารถแสดงให้เข้าใจง่ายดังภาพที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินกับการกำหนดให้น้ำแก่พืช

2.4 การตรวจสอบความชื้นในดิน

หลักการประเมินหาระดับความชื้นในเขตรากพืชสามารถกระทำได้ 3 วิธี คือ การวัดความชื้นในดิน โดยการชั่งน้ำหนัก การวัดความชื้นในดินโดยใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์และการวัดความชื้นในดิน โดยคุณลักษณะและความรู้สึกสัมผัส

2.4.1 การวัดความชื้นในดินโดยการชั่งน้ำหนัก

การตรวจวัดความชื้นของดิน โดยการชั่งน้ำหนัก เป็นวิธีหนึ่งที่จะหาว่าความชื้นของดินในขณะนั้นลดลงจนถึงจุดที่ต้องการให้น้ำแล้วหรือยังการตรวจวัดทำโดยเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึกต่างๆ ในเขตรากและที่จุดต่างๆ ในพื้นที่เพาะปลูกมาชั่งแล้วอบให้แห้งในเตาอบซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักของดินนั้นไม่ลดลงอีก แล้วนำมาชั่งอีกครั้งน้ำหนักของดินในการชั่งที่หายไปทั้งสองครั้งจะเป็นน้ำหนักของน้ำที่อยู่ในขณะที่เก็บตัวอย่าง

การวัดความชื้นของดินวิธีนี้เป็นการวัดโดยตรงและเป็นวิธีที่ให้ค่าถูกต้องที่สุด แต่มีข้อเสียตรงที่ต้องใช้เวลาแรงงานและเครื่องมือที่เก็บตัวอย่างด้วยเหตุนี้จึงนิยมปฏิบัติกันแต่เฉพาะในงานที่ต้องการความละเอียดถูกต้องจริงๆ เช่น ในงานทดลองหรืองานวิจัยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การวัดความชื้นในดินโดยใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์

เครื่องมือเหล่านี้มีหลายแบบซึ่งอาจแบ่งออกตามคุณสมบัติของดินที่ทำการวัดหรือวิธีการวัดดังแสดงในตารางที่ 2.4

2.4.2.1 แบบวัดแรงดึงความชื้นของดิน (Tensiometer)

โดยให้แรงดึงความชื้นของดินนี้อยู่ในสภาวะสมดุลกับน้ำที่บรรจุอยู่ในกระเปาะพูนซึ่งเมื่อรู้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงความชื้นของดินและจำนวนความชื้นในดินตรงบริเวณจุดที่ติดตั้งเครื่องมือก็จะทราบค่าจำนวนความชื้นในดิน ณ จุดนั้นได้ เครื่องมือชนิดนี้ เรียกว่า เครื่องมือแรงดึงความชื้นของดินหรือเทนซิโอมิเตอร์

2.4.2.2 แบบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแท่งวัดความชื้น (Moisture Block)

ซึ่งมีความชื้นอยู่ในสภาวะสมดุลกับดินบริเวณรอบๆจุดที่ฝังอยู่ คุณสมบัติไฟฟ้าที่วัดส่วนมากเป็นความต้านทาน ดังนั้นจึงต้องมีเครื่องมือวัดความต้านทานประกอบด้วยอุปกรณ์ทั้งหมดรวมเรียกว่าเครื่องวัดความชื้นด้วยไฟฟ้า ส่วนตัววัสดุพูนเรียกว่าก้อนความต้านทาน ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วแล้วหุ้มด้วยปูนปลาสเตอร์ โนลอนหรือไฟเบอร์กลาส

ตารางที่ 2.4 ลักษณะการทำงานของเครื่องมือในการตรวจสอบความชื้นในดินในแบบต่างๆ

เครื่องมือ	หลักการตรวจวัดที่เกี่ยวข้อง
1. การใช้เทนซิโอมิเตอร์ (Tensiometer)	แรงดึงความชื้นในดิน
2. การใช้แท่งวัดความชื้น (Moisture Block)	แรงต้านความชื้นในดิน
3. การวัดการกระจายของนิวตรอน (Neutron Moisture Meter)	การเคลื่อนไหวของนิวตรอน

การใช้เครื่องมือวัดแบบนี้จะมีความเหมาะสมกับดินที่มีความชื้นค่อนข้างต่ำ แต่ไม่ต่ำเกินไปจนความชื้นในดินไม่พอที่จะเกิดความต่อเนื่องทางไฟฟ้าในแท่งวัสดุพูน

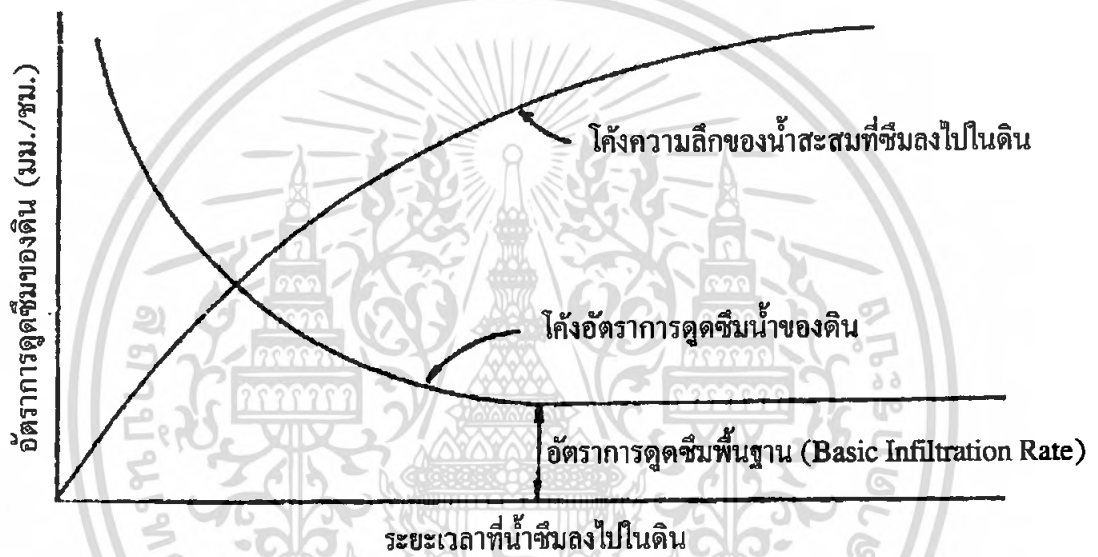
2.4.2.3 ความชื้นในดินกับค่า Resistance ของดิน

น้ำในดินจะเป็นน้ำที่ไม่บริสุทธิ์ ซึ่งจะมีไอออนต่างๆที่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ ดังนั้นในดินที่มีความชื้นมากหรือมีปริมาณน้ำในดินมาก จะสามารถนำไฟฟ้าได้ดี หรืออาจกล่าวได้ว่ามีค่า (Conductivity) สูง แต่มีค่า (Resistance) ต่ำ และในทางตรงกันข้ามกับดินที่มีความชื้นน้อยจะมีค่า (Conductivity) ต่ำ และมีค่า (Resistance) สูง ดังนั้นจึงได้นำหลักการนี้มาสร้างเครื่องทดสอบความชื้นในดินโดยใช้แท่งตัวนำไฟฟ้า ซึ่งในโครงการนี้ใช้สแตนเลสนำไปวัดความต้านทานไฟฟ้า

2.5 ลักษณะการดูดซึมน้ำของดินและอัตราการซึมน้ำของดิน

การดูดซึมน้ำของดิน (Infiltration) คือการเคลื่อนที่ของน้ำจากผิวดินเข้าไปในดินตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วยแรงดึงดูดของโลก ส่วนอัตราการซึมของน้ำผ่านผิวดินต่อหนึ่งหน่วยเวลาเรียกว่า อัตราการซึมของน้ำผ่านผิวดิน (Intake rate หรือ Infiltration rate)

การซึมซับน้ำของดินเป็นข้อมูลที่สำคัญใน การให้น้ำแก่พืช เพราะไม่ควรให้น้ำในอัตราที่เกินกว่าอัตราการซึมของน้ำผ่านผิวดินเพราะจะทำให้เกิดการชะล้าง การไหลบ่าไปบนผิวดิน หรือการพังทลายของดิน



รูปที่ 2.4 ลักษณะการซึมซับน้ำของดิน

ตารางที่ 2.5 ลักษณะการดูดซึมของน้ำ

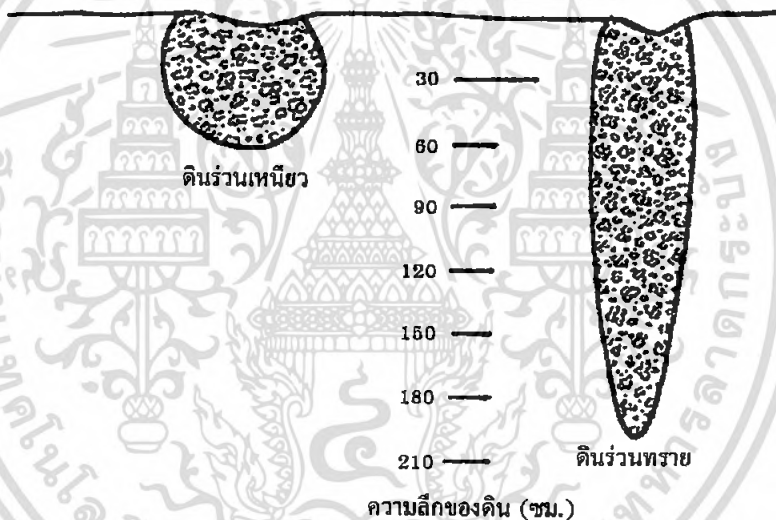
ชั้นของการซึมซาบของดิน	นิ้ว/ชม.
ช้ามาก	น้อยกว่า 0.05
ช้า	0.06 – 0.20
ค่อนข้างช้า	0.20 – 0.60
ปานกลาง	0.60 – 2.00
ค่อนข้างเร็ว	2.00 – 6.30
เร็ว	6.30 – 20.00
เร็วมาก	มากกว่า 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

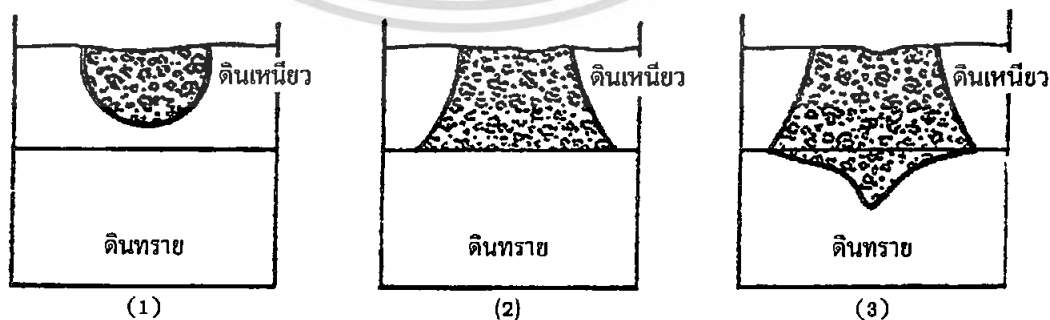
ตารางที่ 2.6 อัตราการซึมของน้ำผ่านผิวดิน

เนื้อดิน	อัตราการซึมของน้ำ(มม. / ชม.)
ดินทราย	สูงกว่า 20
ดินร่วนปนทราย	10 – 20
ดินร่วน	5 – 10
ดินเหนียว	1 - 5

ในการออกแบบระบบให้น้ำถือว่าเป็นการเติมน้ำให้แก่ดินบริเวณเขตรากพืชโดยจะใช้หลักการที่ว่าน้ำที่ให้นั้นจะต้องไหลลงไปใบบริเวณรากพืชเพื่อให้รากพืชได้ดูดเอาไปใช้ในอัตราที่ไม่เกินกว่าอัตราการซึมน้ำผ่านผิวดินที่แสดงในตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะการเปียกน้ำของดินเนื้อละเอียด (ดินร่วนเหนียว) กับดินเนื้อหยาบ (ดินทราย)



(1) เมื่อดินเริ่มเปียกน้ำ (2) น้ำซึมมาถึงรอยต่อ (3) การซึมของน้ำในดินชั้นล่างที่เป็นทราย

รูปที่ 2.6 ลักษณะการเปียกน้ำของดินที่ชั้นดินบนและดินล่างต่างกัน (ดินเหนียวกับดินทราย)

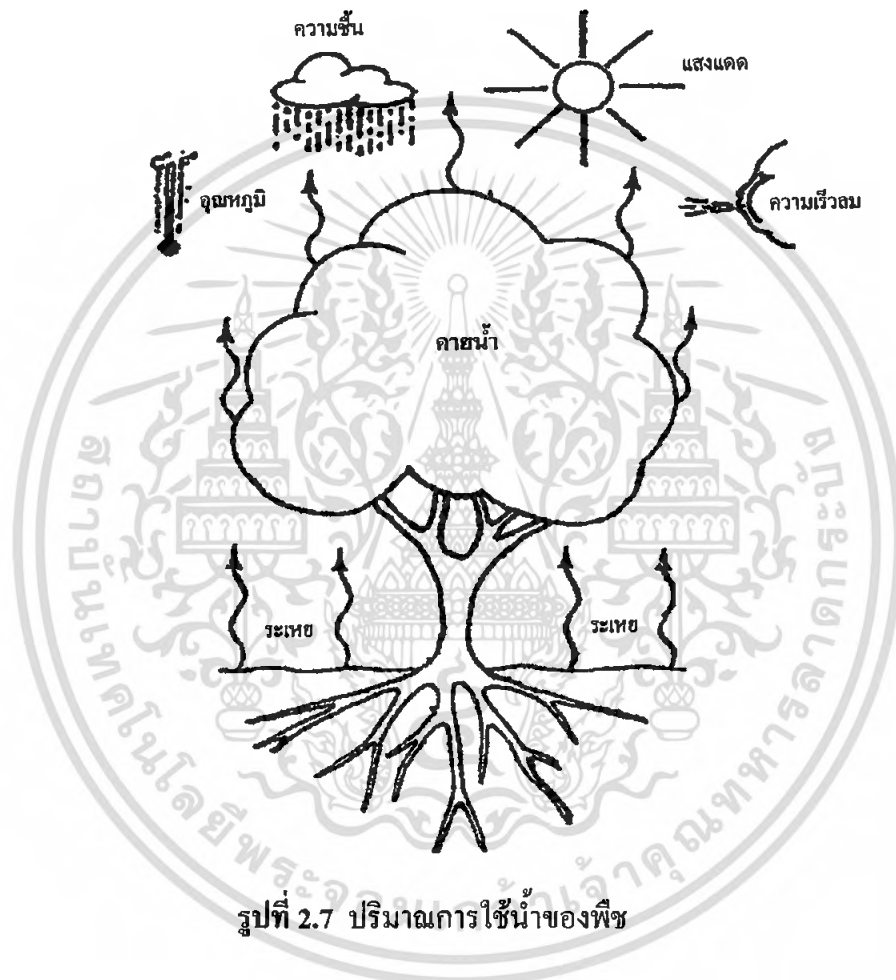
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 คุณสมบัติของพืชที่เกี่ยวข้องกับความต้งการน้ำของพืช

2.6.1 ปริมาณการใช้น้ำของพืช (Evapotranspiration)

ปริมาณน้ำทั้งหมดที่สูญเสียบนจากพื้นที่เพาะปลูกสู่บรรยากาศในรูปของไอน้ำซึ่งปริมาณน้ำดังกล่าวประกอบด้วย รูปที่ 2.7

ปริมาณการใช้น้ำของพืช = การระเหย + การคายน้ำ



รูปที่ 2.7 ปริมาณการใช้น้ำของพืช

2.6.1.1 การระเหย (Evaporation, E)

คือปริมาณน้ำที่ระเหยจากผิวดินบริเวณรอบๆ ต้นพืช จากผิวน้ำในขณะที่ให้น้ำหรือขณะที่มีน้ำขังอยู่และจากน้ำที่เกาะอยู่ตามใบพืช เนื่องจากการให้น้ำหรือจากฝนที่ตก

2.6.1.2 การคายน้ำ (Transpiration)

คือปริมาณน้ำที่พืชนำไปใช้จริงๆ โดยการดูดไปจากดินเพื่อนำไปใช้หล่อเลี้ยงลำต้นและส่วนต่างๆ ของพืช รวมทั้งการละลายแร่ธาตุอาหารในดินขึ้นไปบำรุงส่วนต่างๆ ของพืช แล้วคายออกทางใบสู่บรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการใช้น้ำของพืช

ปริมาณการใช้น้ำของพืชจะมีปริมาณมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสภาพดิน พืช สภาพภูมิอากาศรอบๆต้นพืช และการจัดการเพาะปลูก เป็นต้น

สภาพดิน เช่นดินทรายมีความสามารถในการเก็บกักน้ำไว้ให้พืชใช้ได้น้อยกว่าดินเหนียว

พืช เช่น พืชต่างชนิด อายุ ระยะการเจริญเติบโต ย่อมต้องการใช้น้ำต่างกัน

สภาพภูมิอากาศรอบๆต้นพืช สภาพภูมิอากาศรอบๆต้นพืชที่สำคัญ เช่นรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และลม เป็นต้นตัวแปรที่มีอิทธิพลทำให้การใช้น้ำของพืชต่างกัน

การจัดการเพาะปลูก เช่น การเขตกรรมต่างๆ มีอิทธิพลทำให้การใช้น้ำของพืชต่างกันด้วย

ตารางที่ 2.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการใช้น้ำของพืชภายใต้ลักษณะภูมิอากาศต่างๆ

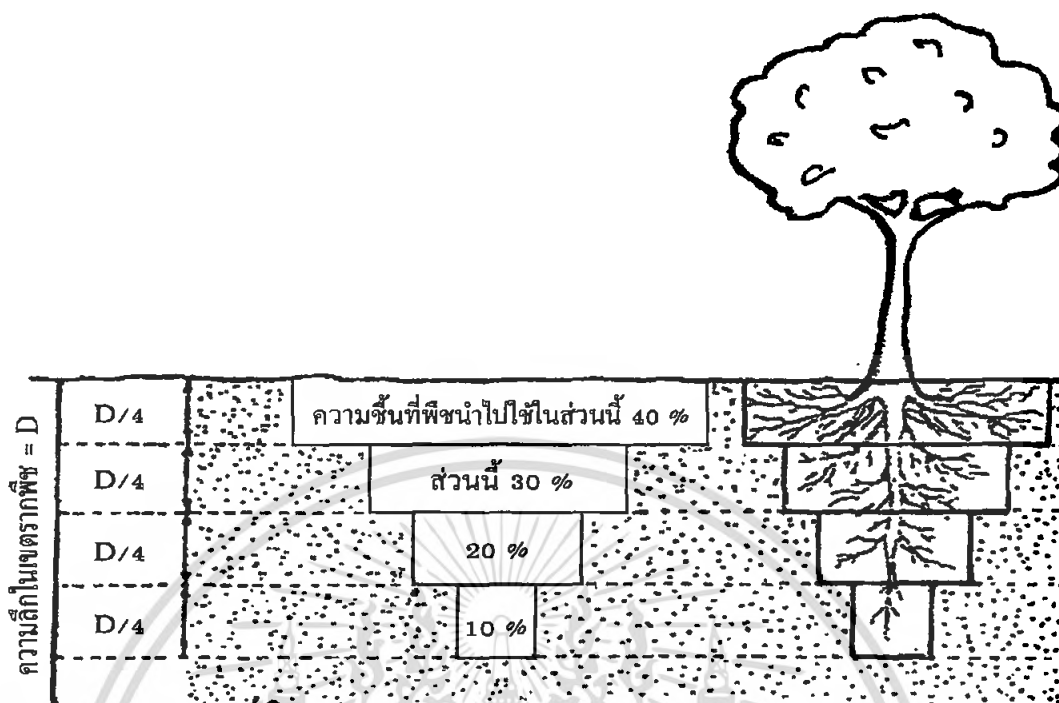
ภูมิอากาศ	ลักษณะการใช้น้ำของพืชต่อวัน	
	มาก	น้อย
แสงแดด	แดดร้อน	ครึ้ม
อุณหภูมิ	ร้อน	เย็น
ความชื้นในอากาศ	ต่ำ (แห้ง)	สูง (ชื้น)
ลม	แรง	เอื่อย

2.6.3 ปริมาณการให้น้ำสูงสุดของพืชแต่ละวัน

เป็นปริมาณการให้น้ำสูงสุดของพืชเฉลี่ยต่อวันในระยะเวลาของการให้น้ำในฤดูการเจริญเติบโตของพืชปกติจะอยู่ในช่วงที่พืชเริ่มมีผลผลิตและในเวลาที่มียุณหภูมิสูง ข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการออกแบบและการวางแผนการส่งน้ำ

2.6.4 การดูน้ำจากดินของพืช

พืชจะมีน้ำที่ดูน้ำจากดินเป็นจำนวนมากในบริเวณใกล้ๆ กับปลายราก คือ ประมาณ 4-5 เซนติเมตรนับจากปลายรากขึ้นมาจะมีรากขนอ่อนเป็นรากเส้นเล็กละเอียดเกิดขึ้นทั่วไป ทำหน้าที่ดูน้ำ ธาตุอาหารและยึดลำต้นรากเหล่านี้แทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินเพื่อดูน้ำที่เกาะรอบๆ เม็ดดินหรือในช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วยแรงออสโมซิส



รูปที่ 2.8 การดูน้ำจากดินในชั้นต่างๆ ของพืช

2.7 การออกแบบระบบให้น้ำแบบประหยัดแก่พืช

หลักการออกแบบระบบให้น้ำไม่ว่าจะเป็นระบบน้ำหยดน้ำฉีดฝอยหรือน้ำเหวี่ยงใช้หลักการเดียวกันหมด จะแตกต่างกันเฉพาะที่ % พื้นที่เขตรากที่ครอบคลุมหรือพื้นที่วงเปียกและรัศมีตามที่ได้กำหนดไว้โดยจะออกแบบระบบให้น้ำให้เพียงพอกับช่วงที่พืชต้องการใช้น้ำสูงสุด (Maximum Water Requirement) ของพืชที่เจริญเติบโตเต็มที่แล้ว

2.7.1 ขั้นตอนการออกแบบระบบให้น้ำแก่พืช

2.7.1.1 การคำนวณหาความต้องการใช้น้ำของพืชในช่วงวิกฤติที่สุด

ข้อมูล จาก Epan ได้ค่าสูงสุดในช่วงฤดูแล้งจากข้อมูลพืช ได้ค่า K_c ในช่วงเวลาเดียวกับ Epan

ตัวอย่าง เช่น จาก Epan ได้ค่า 5 มม./วัน จากพืชได้ค่า $K_c = 0.85$ ความต้องการใช้น้ำของพืช (ETc)

$$\begin{aligned}
 (ETc) &= Epan \times Kpan \times Kc & (2.1) \\
 &= 5 \times 0.85 \times 0.85 \\
 &= 3.6 \text{ มม./วัน}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1.2 การคำนวณหารอบเวลาของการให้น้ำ (Irrigation Interval)

น้ำในดินชั้นเขตรากของมังคุดลึก 25 ซม. ที่ยอมให้มังคุดใช้ได้ = 9.5 มม.
อัตราการใช้น้ำของมังคุดในช่วงวิกฤติสูงสุด (1) = 3.6 มม./วัน รอบเวลาของการให้น้ำ = น้ำที่ยอมให้
ใช้ได้/อัตราการใช้น้ำในแต่ละวันเท่ากับสมการ (2) / สมการ (1) = 9.5 / 3.6 = 2.64 วัน (ปัดเป็น 3
วัน) นั่นคือต้องให้น้ำแก่มังคุดทุก 3 วัน

2.7.1.3 การเลือกระบบให้น้ำ

จากข้อมูลดินได้ค่าอัตราการซึมซับน้ำของดิน (Infiltration Rate) มาเป็น
ตัวกำหนดอัตราการให้น้ำ (Application Rate) ของระบบที่เลือก โดยที่อัตราการให้น้ำ (Application
Rate) ไม่ควรจะสูงกว่าอัตราการซึมซับของดิน (Infiltration Rate) เพื่อไม่ให้เกิดการขังนองเพราะ
น้ำซึมไม่ทัน จากขนาดทรงพุ่มและระบบปลูกมากำหนดรัศมีการกระจายน้ำ (Throw Radius) ของ
ระบบให้น้ำพร้อมกับตรวจเช็คพื้นที่วงเปียก (Wetted Area) ว่าได้กี่ % ของเขตราก อัตราและรัศมี
การกระจายน้ำของอุปกรณ์กระจายน้ำของระบบจะรู้แรงดันใช้งาน

2.7.1.4 กำหนดหาปริมาณน้ำในแต่ละรอบเวลา และเลือกแบบหัวจ่ายน้ำ (Emitter)

รอบเวลาให้น้ำ 3 วันครั้ง อัตราการใช้น้ำของมังคุด 3.6 มม./วัน ใน 1 รอบเวลา
มังคุดใช้น้ำไป $3 \times 3.6 = 10.8$ มม. ประสิทธิภาพของระบบให้น้ำ 80% ต้องให้น้ำในแต่ละรอบเวลา
(คิดเป็นความลึกของน้ำ) = $10.8 \times (100/80) = 13.5$ มม. ถ้าระยะปลูกมังคุด 10×10 ม. พื้นที่วงเปียก
ของระบบน้ำ 80%

$$\text{พื้นที่วงเปียก} = \pi r^2 \times 0.8 \quad (2.2)$$

เมื่อ $r = (\text{ระยะระหว่างต้น}/2 = 10/2 = 5 \text{ มม.}) = 22/7 \times 25 \times 0.8 = 62.86$ ปริมาณ
น้ำที่ต้องให้ต่อรอบเวลา = พื้นที่วงเปียก \times ความลึกของน้ำปริมาณน้ำที่ต้องการให้ต่อรอบเวลา =
 $(62.86 \times 13.5) / (1000 \times 1000) = 848$ ลิตร รัศมีวงเปียก 80%

$$\begin{aligned} \pi r^2 &= 62.86 \\ r &= \sqrt{\frac{62.86}{\pi}} \\ &= 4.47 \text{ ม.} \approx 4.5 \text{ ม.} \end{aligned}$$

จากแคตตาล็อก มินิสปริงเกอร์เลือกให้จ่ายน้ำที่มีอัตราการกระจายน้ำ 170,
180, 200 ลิตรต่อชั่วโมง ที่มีรัศมีวงเปียก 4.5 ม. มีแรงดันใช้งานที่ 1-1.5 บรรยากาศ

ถ้าเลือก 170 ลิตร/ชม. จะต้องใช้เวลาในการให้น้ำ (Irrigation Duration) เท่ากับ $848/170 \approx 5$ ชม.

ถ้าเลือก 180 ลิตร/ชม. จะต้องใช้เวลาในการให้น้ำเท่ากับ $848/180 \approx 4.7$ ชม.

ถ้าเลือก 200 ลิตร/ชม. จะต้องใช้เวลาในการให้น้ำเท่ากับ $848/200 \approx 4.24$ ชม.

ในกรณีเช่นนี้

ถ้าเลือก 170 ลิตร/ชม. ใช้เวลาให้น้ำนาน 5 ชม. เท่ากับน้ำ 850 ลิตร เกิน 2 ลิตร

ถ้าเลือก 180 ลิตร/ชม. ใช้เวลาให้น้ำนาน 4.5 ชม. เท่ากับน้ำ 810 ลิตรขาด 38 ลิตร

ถ้าเลือก 200 ลิตร/ชม. ใช้เวลาให้น้ำนาน 4 ชม. เท่ากับน้ำ 800 ลิตร ขาด 48 ลิตร

ถึงแม้ว่า 170 ลิตร/ชม. จะให้น้ำได้ใกล้เคียงกับความต้องการมากที่สุด แต่ยังไม่ตัดสินใจในระดับนี้เพราะจะต้องคำนึงถึงการแบ่ง โชนและเวลาในการจัดการว่ามีพอหรือไม่ ถ้ามีเวลาในการให้น้ำมากอาจจะพิจารณาเพิ่ม 120 ลิตร/ชม. เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง

ถ้าเลือก 120 ลิตร/ชม. ใช้เวลาให้น้ำนาน 7 ชม. เท่ากับน้ำ 840 ลิตร ขาด 8 ลิตร ที่เสนอเพิ่ม 120 ลิตร/ชม. เนื่องจากจะสามารถลดขนาดท่อและเครื่องสูบน้ำลงได้ทำให้ระบบที่ออกแบบโดยรวมมีราคาถูกลง

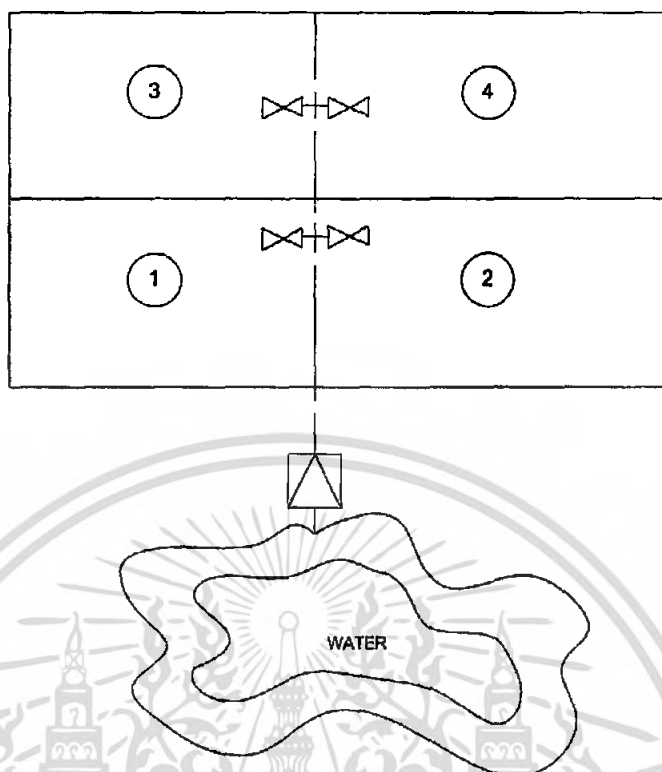
2.7.1.5 การแบ่งโชนของการให้น้ำ

การให้น้ำพร้อมกันที่เดียวเต็มพื้นที่เหมาะสำหรับที่เล็กๆเท่านั้น แต่ถ้าสามารถแบ่งพื้นที่ออกเป็น โชนให้แต่ละ โชนมีพื้นที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันแล้วให้น้ำทีละ โชนจะลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนติดตั้งระบบให้น้ำได้มากเนื่องจากขนาดท่อและอุปกรณ์ต่างๆ จะเล็กลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนโชน เช่นถ้าแบ่งได้ 4 โชน ขนาดของระบบจะเล็กลง 4 เท่าของโชนเดียว กล่าวคือ ยิ่งแบ่งได้มากโชนยิ่งดี แต่ทั้งนี้ข้อจำกัดในการแบ่ง โชนอยู่ที่รอบเวรของการให้น้ำ ระยะเวลาของการให้น้ำ จำนวนชั่วโมงในการให้น้ำแต่ละวัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\text{ชั่วโมงในการให้น้ำแต่ละวัน/ระยะเวลาของการให้น้ำ} = \text{จำนวนคาบการให้น้ำต่อวัน}$$

$$\text{จำนวนคาบการให้น้ำต่อวัน} \times \text{รอบเวรของการให้น้ำ} = \text{จำนวน โชนที่จะแบ่งได้}$$

การแบ่ง โชนเมื่อรู้จำนวน โชนมากที่สุดที่จะแบ่งได้แล้ว จะต้องพิจารณาถึงลำดับการให้น้ำไล่เรียงไป ตามโชนที่แบ่ง โดยให้คำนึงถึงขั้นตอนที่ปฏิบัติงาน เช่นว่าลั่วควบคุม โชนที่เรียงลำดับกันอยู่ติดกัน ทำให้สามารถเปิดปิดได้โดยง่าย ไม่ต้องเสียเวลาเดินไปอีกไกล นอกจากนี้สภาพพื้นที่จะเป็นตัวช่วยในการกำหนดขอบเขตของโชน การแบ่งโชนจะพยายามแบ่งให้เป็นรูปสมมาตร(Symmetry) เพื่อความสะดวกในการเดินท่อ และการติดตั้งอุปกรณ์ และการใช้งาน



รูปที่ 2.9 การแบ่งพื้นที่ในการให้น้ำแก่พืช

2.7.1.6 การคำนวณหาความต้องการน้ำใช้พื้นที่

วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบว่าระบบน้ำที่เลือกมาใช้งานมีความเหมาะสมกับปริมาณน้ำที่เก็บกักไว้ได้หรือไม่เพียงพอจะต้องหาเพิ่มอีกเท่าไรและจะหามาจากแหล่งใดได้หรือควรจะเปลี่ยนระบบให้น้ำที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นหรือลดพื้นที่ให้น้ำลง ให้สัมพันธ์กับปริมาณน้ำต้นทุนที่มีอยู่

วิธีคำนวณ สมมติว่าปลูกมังคุดในพื้นที่ 10 ไร่ใช้ระยะปลูก 10×10 ม. หรือ $(1,600/10 \times 10) = 16$ ต้นต่อไร่ ช่วงฤดูแล้งนาน 4 เดือน ที่ต้องมีการให้น้ำรอบเวรของการให้น้ำ 3 วันครั้ง ถ้าเลือกใช้หัวมินิสปริงเกลอร์ 170 ลิตร/ชม. ที่ให้น้ำนานครั้งละ 5 ชม.

จำนวนต้นมังคุด	=	16 ต้น \times 10 ไร่
	=	160 ต้น
จำนวนครั้งการให้น้ำตลอกฤดูแล้ง	=	4 เดือน \times 30 วัน/3 วันต่อครั้ง
	=	40 ครั้ง
ให้น้ำครั้งละ	=	170 ลิตรต่อชั่วโมง 5 ชม.
	=	850 ลิตร/ต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

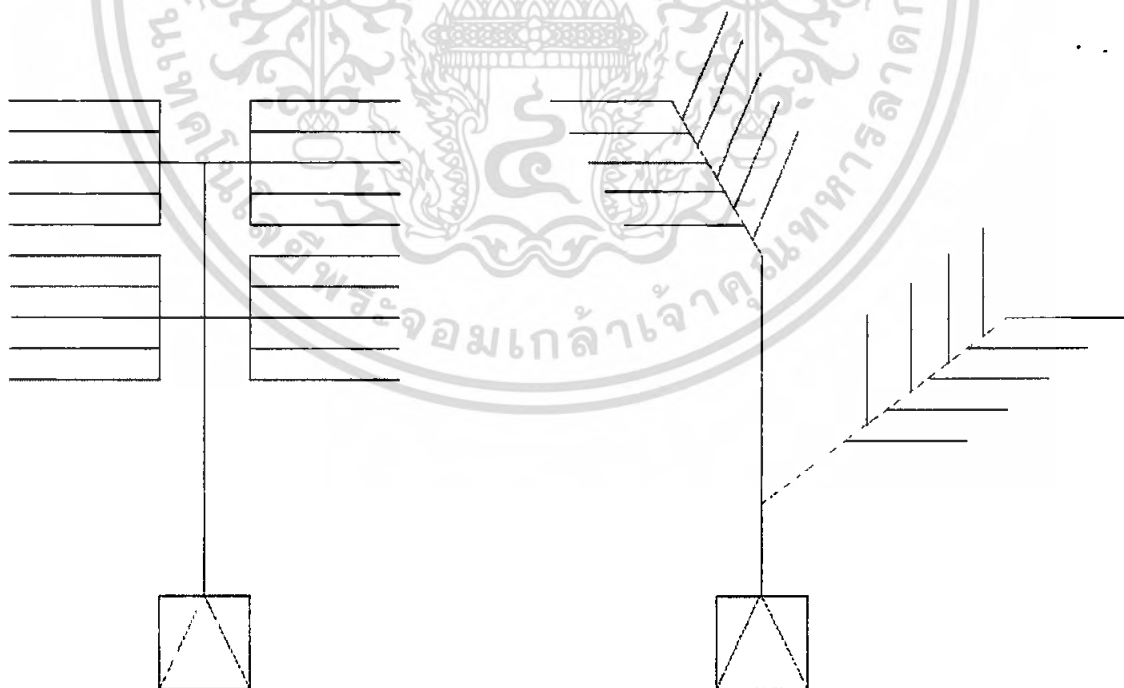
$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณน้ำที่ต้องการสำรอง} &= 850 \times 160 \times 40 \\
 &= 5,440 \text{ ลบ.ม.}
 \end{aligned}$$

ถ้าแหล่งน้ำมีน้ำต้นทุนที่จะสามารถนำมาใช้ให้แก่สวนมังคุดในพื้นที่ 10 ไร่ ได้แล้วไม่ถึง 5,440 ลบ.ม. ให้กลับไปเริ่มต้นที่ข้อที่ 16.5 ใหม่โดยอาจเปลี่ยนระบบหรือเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำหรือลดพื้นที่วงเปียก ซึ่งการกระทำเช่นนี้จะช่วยให้รู้แต่เนิ่นๆ ว่าจะขาดน้ำประมาณเท่าไรเพื่อที่จะได้เตรียมการจัดหาน้ำต้นทุนมาไว้ล่วงหน้า

2.7.1.7 การวางผังการเดินท่อ

จากแผนผังการแบ่ง โซนเมื่อนำมาใช้วางผังการเดินท่อโดยเริ่มต้นจากแหล่งน้ำวางแนวท่อประธานเข้าไปโซนต่างๆทุกโซน โดยพยายามจัดวางท่อประธานไว้กึ่งกลางระหว่างโซนเพื่อให้สามารถจัดวางวาล์วควบคุม โซนของทั้ง 2 ฝั่งอยู่จุดเดียวกันเพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงาน ประหยัดท่อซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งด้วยในภาพที่ 2.10 แสดงให้เห็นตัวอย่างการเดินท่อ

- ก) แบบขนาน เหมาะสำหรับพื้นที่ราบและพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม
- ข) แบบก้างปลา เหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีความลาดชัน หรือมีรูปพื้นที่เป็นสามเหลี่ยม เป็นต้น



(ก) แบบขนาน

(ข) แบบก้างปลา

รูปที่ 2.10 รูปแบบการวางผังการเดินท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่โชนอยู่กระจัดกระจายไม่เป็นแถวเป็นแนว ให้จัดวางท่อประชนในแนวตรงและสั้นที่สุดแต่ให้ผ่านโชนมากที่สุด โชนที่อยู่นอกแนวให้เดินท่อรองประชนแยกออกจากท่อประชนไปอีกที่หนึ่งเช่นเดียวกันพยายามวางแนวท่อรองประชนให้สาารถควบคุมโชนให้มากที่สุดใแนวที่วางท่อไป ซึ่งอาจจะเรียกว่าแนวท่อติดตั้งวาล์ว (Valve Line) ก็ได้และท่อแขนง (Lateral) ในแต่ละโชน

แต่ไม่ว่าแนวท่อประชนและท่ออื่นๆจะวางอย่างไร สำหรับท่อแขนงจะต้องวางขนานไปกับแนวระดับเส้นชั้นความสูง (Contour) ไม่ควรวางท่อแขนงในแนวตั้งฉากกับเส้นชั้นความสูง เพราะจะเกิดความแตกต่างของแรงดันสูงเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดได้ง่าย ทำให้ไม่สามารถปรับปริมาตรน้ำในหัวจ่ายให้ใกล้เคียงกันตามเกณฑ์ที่กำหนดได้ นอกจากนี้ท่อแขนงไม่ควรยาวเกิน 200 เมตรเพื่อความสะดวกในการตรวจตราในอนาคต และเพื่อไม่ให้เกิดความแตกต่างของแรงดันระหว่างหัวกระจายน้ำตัวแรกกับตัวสุดท้ายบนท่อแขนงเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

2.7.1.8 การคำนวณหาขนาดท่อและการสูญเสียแรงดันในท่อ

จากผังวางแนวท่อนำมาคำนวณหาขนาดท่อที่เหมาะสมในแต่ละช่วงท่อพร้อมกับการสูญเสียแรงดันในท่อช่วงต่างๆ โดยมีหลักเกณฑ์ว่าภายในแต่ละโชนควรมีความแตกต่างของแรงดันไม่เกิน 20% เพื่อที่อัตราการกระจายของน้ำจะแตกต่างกันไม่เกิน 10 % ของอัตราเฉลี่ยของหัวกระจายน้ำและถ้าจะให้เกิดความสม่ำเสมอทั่วทั้งแปลง ความแตกต่างระหว่างโชนควรใช้เกณฑ์ 20% และ 10% เช่นกัน

ท่อที่ใช้ในการส่งน้ำ เปรียบเหมือนถนน 4 ช่องการจราจรย่อยระบายรถได้ในอัตราที่มากกว่าถนน 2 ช่องการจราจร ท่อ $\varnothing 4$ ” ย่อมมีอัตราส่งน้ำมากกว่า $\varnothing 2$ ” อัตราสูงสุดที่ส่งได้ในท่อแต่ละขนาดมีขีดจำกัด คำนวณได้จากสมการ

สมการที่คำนวณหาอัตราการไหลของน้ำในท่อ (Flow Rate) คือ

$$Q = \frac{VD^2}{354} \quad (2.3)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลของน้ำในท่อ (ลบ.เมตร/ชั่วโมง)

V = ความเร็วของน้ำในท่อ (เมตร/วินาที)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (มม.)

ตารางที่ 2.8 อัตราการไหลสูงสุดในท่อความเร็ว 1.5 ม. / วินาที ความยาวน้อยกว่า 1,000 ม.

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	อัตราการไหลสูงสุด (ลิตร/ชม.)	อัตราการไหลสูงสุดโดย ปริมาณ (ลบ.ม./ชม.)
16	1,084	1
20	1,695	1.7
25	2,648	2.6
32	4,338	4.3
40	6,779	6.7
50	10,593	10.6
63	16,817	16.8
75	23,800	23.8
100	42,372	42.3

2.8 ZigBee

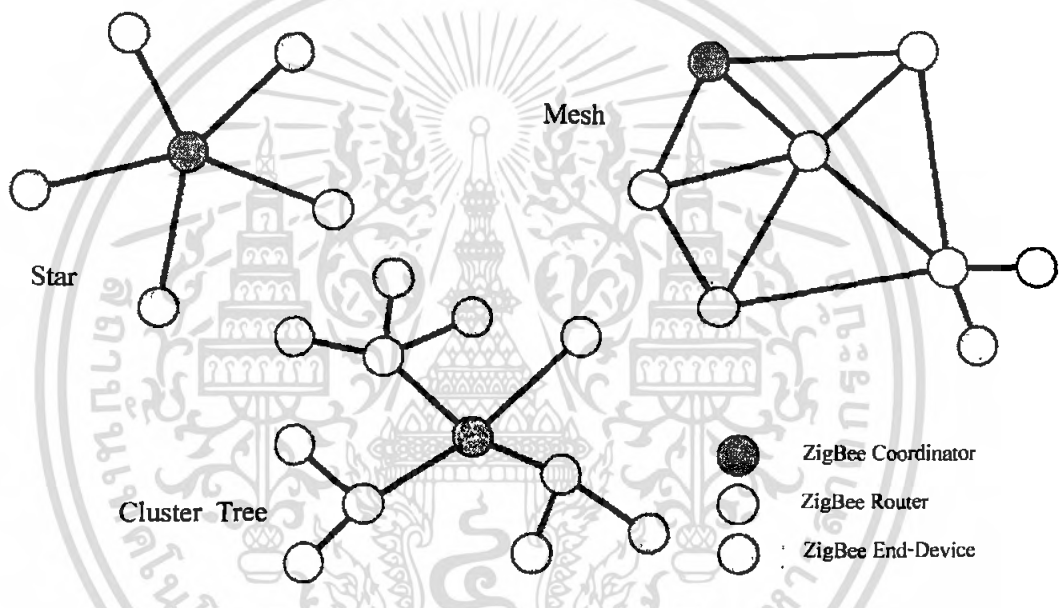
ZigBee เป็นเทคโนโลยีไร้สายที่ร่วมกันสื่อสารข้อมูลผ่านเซ็นเซอร์ขนาดเล็กจำนวนมากจำนวนเป็นพันๆ หมื่นๆ ชิ้นที่ฝังอยู่ตามส่วนต่างๆ ในอาคาร สำนักงาน โรงงาน หรือแม้แต่ในบ้าน ซึ่ง ZigBee ได้มาจากพฤติกรรมสื่อสารของผึ้ง โดยผึ้งจะบินแบบซิกแซก และจะให้ข้อมูลข่าวสารระหว่างผึ้งด้วยกัน ที่เกี่ยวกับ ตำแหน่งระยะทาง และทิศทางของอาหารที่พวกมันกำลังหาอยู่ ZigBee ถูกสร้างขึ้นในการทำระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล Wireless Personal Area Network (WPANs) อยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE802.15.4 โดยมาตรฐานนี้ใช้งานสำหรับการสื่อสารความเร็วต่ำ และมีช่วงการใช้งานจากแบตเตอรี่ หลายเดือนหรือหลายปีและมีความซับซ้อนน้อยมาก

การทำงานของ ZigBee จะเป็นการรับ-ส่งคลื่นสัญญาณข้อมูล ผ่านชิพเล็กจิ๋วนี้จุดต่อจุดไปเรื่อยๆ จนถึงปลายทางที่ต้องการควาน้ไหลลดข้อมูลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ข้อมูลที่ได้ อาจจะเป็นการวัดอุณหภูมิ ความชื้นของดินและการเคลื่อนไหวของสิ่งมีชีวิต จับปริมาณมลพิษในอากาศ ปริมาณน้ำ เป็นต้น โดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์หรือแบตเตอรี่ขนาดเล็กที่กินไฟน้อยมาก ลักษณะของ ZigBee คือมีทางเข้าช่องสัญญาณ โดยการใช้ Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA - CA) หรือมีทางเข้าช่องสัญญาณหลายๆ ทาง เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล ระยะทางโดยทั่วไปประมาณ 50 เมตร แล้วแต่รุ่นของ ZigBee

2.8.1 มาตรฐาน IEEE 802.15.4

โพรโทคอล ZigBee ถูกออกแบบมาเฉพาะในส่วนของ Application layer, Application support layer และ Network layer เท่านั้น แต่ใช้ MAC layer และ Physical layer ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4

รูปแบบเครือข่ายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 แบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบดาว และแบบตาข่ายร่างแห มีตัวอย่างการสร้างเครือข่ายดังรูปที่ 2.23 โดยในแต่ละเครือข่าย จะต้องมี FFD 1 (Full Function Device) ตัวทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของเครือข่าย เรียกว่า PAN coordinator และ RFD (Reduced Function Device) จะเข้าร่วมเครือข่ายกับ PAN coordinator ประจำเครือข่ายนั้นๆ



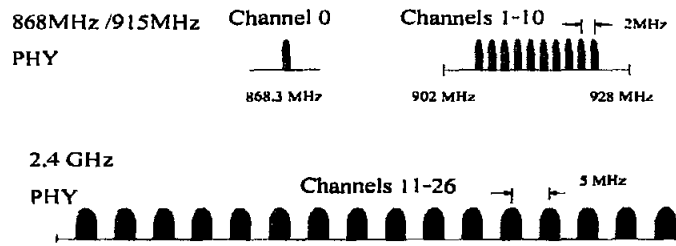
รูปที่ 2.11 รูปแบบโครงข่าย IEEE 802.15.4

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้แบ่งย่านความถี่วิทยุออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วง 868 MHz มี 1 ช่องสัญญาณ จะสามารถรับส่งข้อมูลได้สูงสุด 20 Kbps ช่วง 915 MHz มี 10 ช่องสัญญาณ สามารถรับส่งข้อมูลได้สูงสุด 40Kbps และ ช่วง 2.4GHz มี 16 ช่องสัญญาณ สามารถรับส่งข้อมูลได้สูงสุด 250 Kbps โดยในโครงงานนี้ใช้ย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งมีความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณย่อยตามสมการที่ (2.4)

$$F_k = 2405 + 5(k - 11) \quad (2.4)$$

สำหรับ $k = 11, 12, \dots, 26$ เมื่อ k คือ หมายเลขของช่องสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 การแบ่งช่องสัญญาณในชั้น Physical ของ ZigBee

2.8.2 โครงสร้างของโพรโทคอล ZigBee

2.8.2.1 Application layer

เป็นชั้นที่มีส่วนของ Endpoint อยู่ เรียกว่า Application framework โดยมี ZigBee Device Object (ZDO) ทำหน้าที่ในการจัดการในการเข้าถึงและใช้งาน Application layer

2.8.2.2 Application support sub-layer

ทำหน้าที่ในการสร้างเฟรมของ Application layer และทำหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลรวมถึงการจัดการด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ Application layer

2.8.2.3 Network layer

ทำหน้าที่ใช้ในการ Routing ข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางที่อาจอยู่ภายในเครือข่ายเดียวกันหรือต่างเครือข่ายกัน

Application layer	ZDO	ZigBee define
Application support sub-layer		
Network layer		
MAC layer		IEEE
Physical layer		802.15.4

รูปที่ 2.13 โครงสร้างโพรโทคอลของ ZigBee

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 เหมาะแก่การเชื่อมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

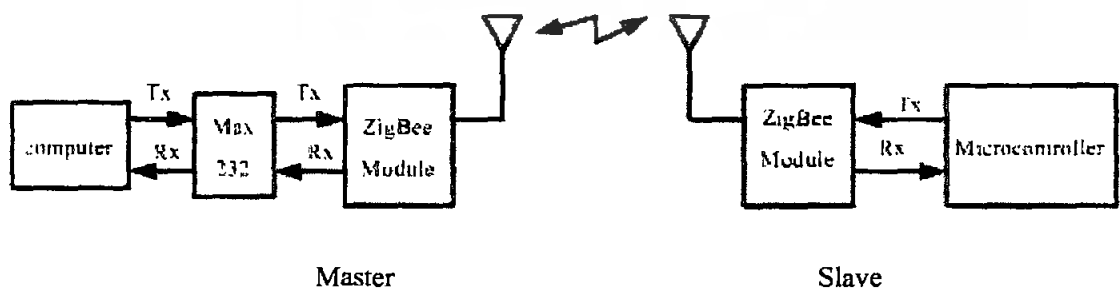
ภายในเครือข่ายที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ไม่สามารถถ่ายทอดข้อมูลจากอุปกรณ์อื่นๆ ได้ ทำได้ง่ายในเครือข่ายที่เป็นแบบ Star แบบ Logical Device มี 3 ประเภท คือ ZigBee Coordinators เป็นจุดที่ประสานเชื่อมต่อกัน ทำหน้าที่ในการจัดเก็บข้อมูลในเครือข่าย, ZigBee Routers ทำหน้าที่จัดการเส้นทางของข้อความที่ส่งผ่านภายในโครงข่ายระหว่างคู่ของโหนดใด ๆ และ ZigBee End Devices เป็นโหนดที่อยู่ในส่วนของผู้ใช้งาน โดยสามารถเป็นได้ทั้งแบบ RFD และ FFD

การประยุกต์ใช้งาน ZigBee นั้นจะแบ่งแยกตามประเภทของข้อมูลข่าวสาร ที่มีอยู่ 3 แบบคือ ข้อมูลแบบ Periodic ข้อมูลเป็นช่วงเวลา โปรแกรมสามารถควบคุมอัตราการส่ง และ ตัวตรวจจับสัญญาณกระตุ้น เช็คข้อมูลและทำให้ข้อมูลไม่เคลื่อนไหว ใช้สำหรับเซนเซอร์ และ มิเตอร์ ข้อมูลแบบ Intermittent เป็นลักษณะที่มีการส่งผ่านข้อมูลเมื่อมีการใช้งาน เช่น สวิตซ์ไฟ และข้อมูลแบบ Repetitive low latency ใช้ในงานที่ต้องการ latency น้อยๆ โดยการสื่อสารจะใช้วิธี จัดสรรช่วงเวลา และสามารถใช้กลไกแบบ GTS เพื่อรับประกันคุณภาพ

2.9 RF Module Operation

2.9.1 การเชื่อมต่อ ZigBee

การสื่อสารแบบอนุกรมแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบซิงโครนัสและแบบอะซิงโครนัส แบบซิงโครนัสจะมีสัญญาณนาฬิกา ร่วมอยู่กับการรับส่งสัญญาณด้วย ดังนั้นการติดต่อสื่อสารแบบซิงโครนัสนี้ จะต้องใช้สายในการเชื่อมต่ออย่างน้อย 3 เส้น คือ สัญญาณนาฬิกา, ข้อมูล และ กราวด์ ส่วนแบบอะซิงโครนัสการรับและส่งสัญญาณไม่จำเป็นต้องมีสายสัญญาณนาฬิกาแต่จะทำการกำหนด ค่าอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลให้มีค่าเท่ากัน ซึ่งเรียกอัตรารเร็วนี้ว่า อัตราบรอด (Baud Rate) มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที (Bit per second : bps) การสื่อสารข้อมูลของ ZigBee จะเป็นแบบอะซิงโครนัส ซึ่งสามารถเชื่อมต่อ ZigBee เข้ากับเข้ากับพอร์ต UART ของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ เลย ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ถ้าต่อคอมพิวเตอร์จำเป็นจะต้องมีวงจรเปลี่ยนระดับแรงดันของ RS232 มาเป็นระดับแรงดันของ TTL (0-5 V)



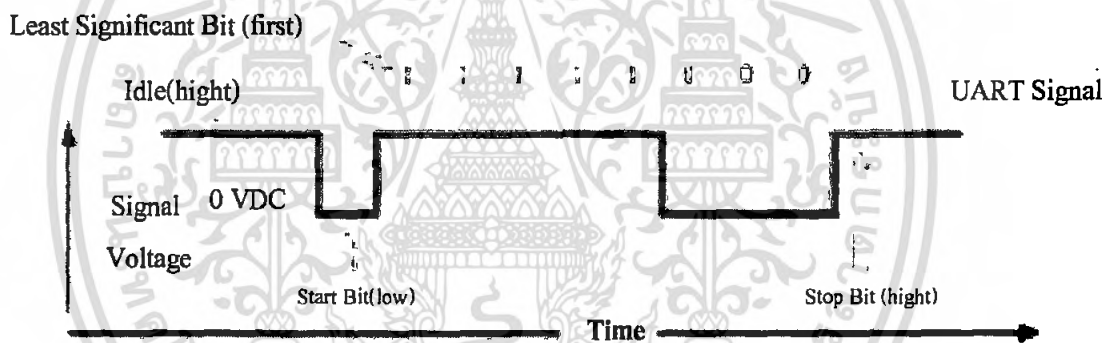
รูปที่ 2.14 โดอะแกรมการเชื่อมต่อ ZigBee กับ Microcontroller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปของข้อมูลที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลของ ZigBee แบบซิงโครนัสประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกัน คือ

1. บิตเริ่มต้น (Start bit)
2. บิตข้อมูลแบบอนุกรม
3. บิตตรวจสอบแบบพาริตี (Parity bit)
4. บิตปิดท้ายหรือบิตหยุด (Stop bit)

เมื่อข้อมูลส่งเข้ามา DI (ขา 3) จะมีสถานะลอจิก “1” เรียกสถานะนี้ว่าสถานะหยุดรอ (waiting stage) การเริ่มส่งข้อมูลจะเริ่มจากการให้ขา DI มีลอจิก “0” ด้วยช่วงเวลา 1 บิตเริ่มต้น จากนั้นบิตข้อมูลจะถูกส่งออกไปโดยเริ่มจากบิตที่มีความสำคัญต่ำสุด หรือ บิต LSB ก่อนจากนั้นตามด้วยบิตพาริตีบิตสุดท้ายที่จะส่งคือบิตปิดท้ายข้อมูล โดยจะทำให้ขา DI มีสถานะลอจิก “1” อีกครั้งด้วยระยะเวลา 1 บิต , 1.5 บิต หรือ 2 บิต เพื่อเป็นการแสดงว่าสิ้นสุดข้อมูลแล้ว



รูปที่ 2.15 แสดงรูปแบบของข้อมูลอนุกรมแบบซิงโครนัส

2.9.2 การจัดการข้อมูล

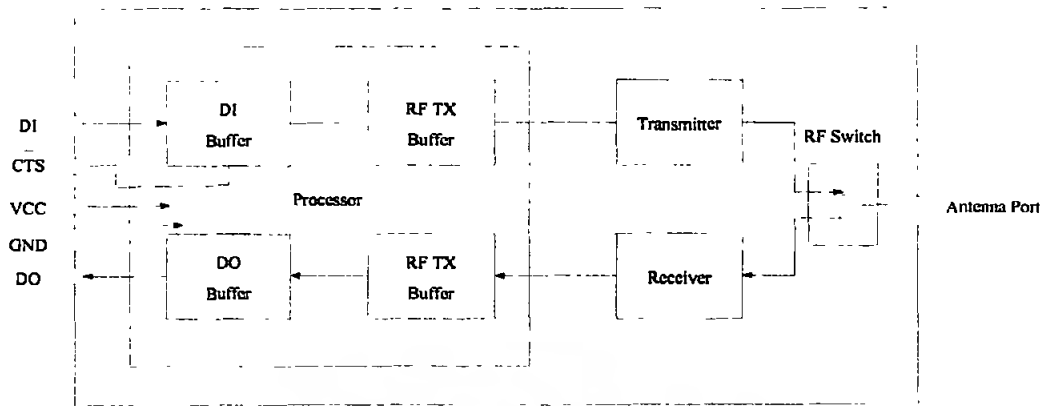
2.9.2.1 DI (Data In) Buffer

ข้อมูลที่ส่งเข้าไปใน ZigBee โดยผ่านทางขา DI (ขา 3) ข้อมูลจะถูกเก็บไว้ใน DI Buffer จนกระทั่งทำการประมวลผลเสร็จ DI Buffer จะเก็บข้อมูลได้ 17 ไบต์ โดยประมาณ แล้วสัญญาณที่ขา \overline{CTS} จะเป็นลอจิก “1” เป็นการหยุดส่งข้อมูล

2.9.2.2 DO (Data Out) Buffer

เมื่อ ZigBee เป็นด้านรับข้อมูล ข้อมูลจะถูกเก็บใน DO Buffer และจะข้อมูลออกไปที่พอร์ตอนุกรมเพื่อส่งไปยังตัวคอนโทรลเลอร์ รูปที่ 6 จะเป็นการแสดงไดอะแกรมการควบคุมข้อมูล

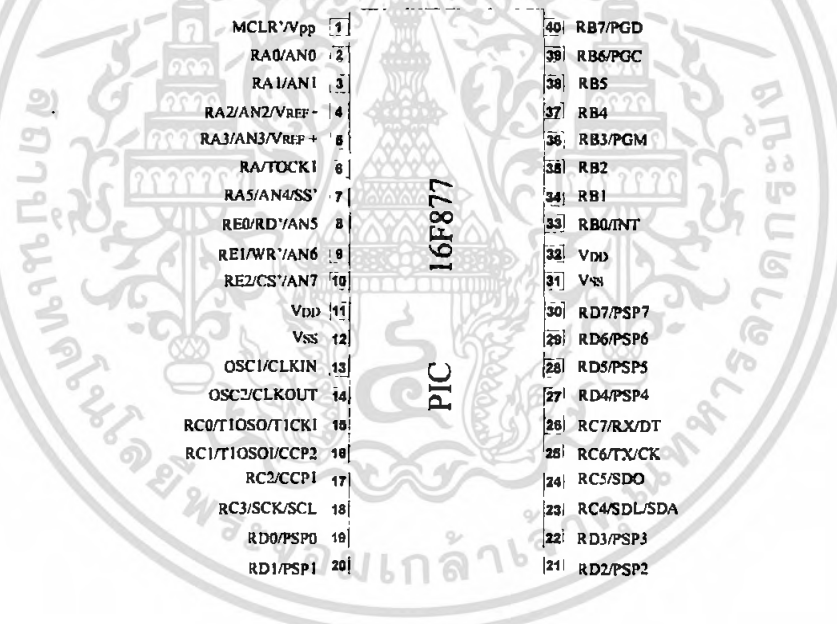
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ไดอะแกรมการควบคุมข้อมูล

2.10 ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A

2.10.1 โครงสร้างขาสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877



รูปที่ 2.17 ขาสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

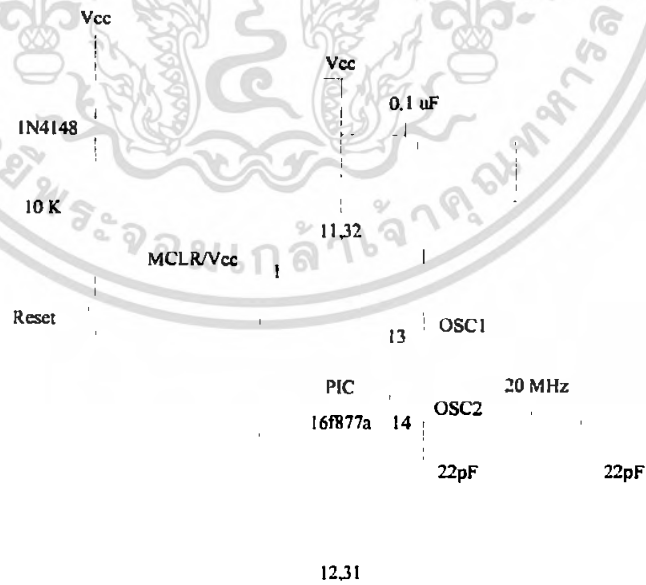
ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ PIC16F877 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 40 ขา มีขาสัญญาณต่างๆ ดังนี้

1. MCLR/Vpp : Master Clear (Reset) Input / Programming Voltage Input ทำหน้าที่เป็นขาสัญญาณรีเซ็ต (Reset) เมื่อขานี้ได้รับลอจิก 0 ไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกรีเซ็ต และทำหน้าที่เป็นขาสัญญาณรับแรงดัน ขณะทำการบันทึกโปรแกรมลงหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. VDD : Positive Supply (+2.00 V ถึง +5.5 V) ทำหน้าที่เป็นขาไฟเลี้ยงของไมโครคอนโทรลเลอร์
3. VSS : Ground ทำหน้าที่เป็นขากาวาน์
4. OSC1/CLKIN : Oscillator Crystal Input / External Clock Source Input
5. OSC2/CLKOUT : Oscillator Crystal Output / External Clock Source Output
6. RA0 – RA5 : พอร์ต A มีจำนวน 6 ขา เป็นพอร์ตแบบสองทิศทาง (Bi – directional I/O Port) เป็นได้ทั้งพอร์ตอินพุตและพอร์ตเอาต์พุตใช้ในการส่งและรับข้อมูล
7. RB0 – RB7 : พอร์ต B มีจำนวน 8 ขา ขนาด 8 บิต เป็นพอร์ตแบบสองทิศทาง ใช้ในการส่งและรับข้อมูล นอกจากนี้บางขายังทำหน้าที่รับสัญญาณอินพุตจากการอินเทอร์รัปต์ (Interrupt) จากภายนอกด้วย
8. RC0 – RC7 : พอร์ต C มีจำนวน 8 ขา เป็นพอร์ตแบบสองทิศทาง ใช้ในการส่งและรับข้อมูล
9. RD0 – RD7 : พอร์ต D มีจำนวน 8 ขา ขนาด 8 บิต เป็นพอร์ตแบบสองทิศทาง ใช้ในการส่งและรับข้อมูล
10. RE0 – RE7 : พอร์ต E มีจำนวน 3 ขา เป็นพอร์ตแบบสองทิศทาง ใช้ในการส่งและรับข้อมูล

2.10.2 การเชื่อมต่อ PIC16F877 กับวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา



รูปที่ 2.18 วงจรการเชื่อมต่อ PIC กับวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาและการรีเซ็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.18 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย จะเป็นการใช้ตัวคริสตอลต่อกับตัวเก็บประจุลงกราวด์ทั้งสองขา และทั้ง 2 ขาของคริสตอลต่อเข้ากับขา OSC1/CLKIN และ OSC2/CLKOUT ของ PIC สำหรับการเลือกใช้ความถี่ของคริสตอลจะมีผลต่อโหมดของสัญญาณนาฬิกาในการเขียนโปรแกรม โดยมีโหมดต่าง ๆ ดังนี้

โหมด LP (Low Power Crystal) ทำงานที่ความถี่ตั้งแต่ 32 KHz ถึง 20 MHz

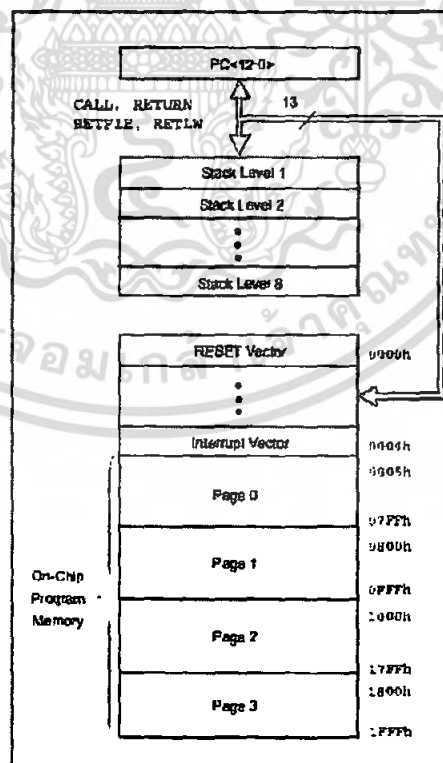
โหมด XT (Crystal/Resonator) ทำงานที่ความถี่ตั้งแต่ 100 KHz ถึง 4 MHz

โหมด HS (High Speed Crystal/Resonator) ทำงานที่ความถี่ 4 MHz ถึง 20 MHz

โหมด RC (External Resistor/Capacitor) มี 2 โหมด สามารถกำหนดความถี่ได้จากตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ

2.10.3 การจัดการหน่วยความจำของ PIC16F877

ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ซึ่งใช้สำหรับเก็บโปรแกรมควบคุมการทำงานของ PIC มีหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory RAM) ขนาด 368 ไบต์ หน่วยความจำข้อมูลแบบอีอีพรอม (Data Memory EEPROM) ขนาด 256 ไบต์ และได้มีการจัดการหน่วยความจำของ PIC ออกเป็นแบงค์ต่าง ๆ ได้ทั้งหมด 4 แบงค์ คือ Bank 0 – Bank 3 และแต่ละแบงค์ก็มีขนาด 128 ไบต์ ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การจัดการพื้นที่หน่วยความจำของ PIC16F877

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบงก์ 0 และแบงก์ 1 จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเหมือนกันคือ ส่วนที่ 1 ขนาด 32 ไบต์ เป็นพื้นที่ของรีจิสเตอร์ไฟล์ที่เรียกว่า SFR (Special Function Register) ซึ่งใช้สำหรับกำหนดเงื่อนไขการทำงานและบันทึกสถานะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนขาที่ 2 ขนาด 96 ไบต์เป็นพื้นที่หน่วยความจำสำหรับใช้งานทั่วไป ซึ่งใช้สำหรับเก็บผลลัพธ์และเงื่อนไขต่าง ๆ ของโปรแกรม

แบงก์ 2 และแบงก์ 3 จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน แต่มีขนาดแตกต่างกับแบงก์ 0 และแบงก์ 1 คือ ส่วนที่ 1 ขนาด 16 ไบต์ เป็นพื้นที่ของรีจิสเตอร์ไฟล์ ส่วนที่ 2 ขนาด 112 ไบต์ เป็นพื้นที่หน่วยความจำสำหรับใช้งานทั่วไป

2.10.4 กระบวนการรีเซ็ต

การรีเซ็ต (Reset) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ การทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เริ่มต้นทำงานใหม่ ซึ่งเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกรีเซ็ต จะกระโดดไปทำโปรแกรมที่ตำแหน่ง 0000H ดังนั้นตำแหน่งของโปรแกรมจะต้องเก็บไว้ที่ตำแหน่งเริ่มต้นคือ 0000H การรีเซ็ตจะช่วยแก้ปัญหาและข้อผิดพลาดของโปรแกรม ซึ่งการรีเซ็ตของ PIC16F877 สามารถเกิดขึ้นได้ 6 กรณี ได้แก่

1. เพาเวอร์ออนรีเซ็ต (Power On Reset)
2. การรีเซ็ตที่ขา MCLR ในโหมดปกติ
3. การรีเซ็ตที่ขา MCLR ในโหมดประหยัดพลังงาน
4. การรีเซ็ตจากวอตช์ด็อกไทมเมอร์ ในโหมดปกติ
5. การรีเซ็ตจากวอตช์ด็อกไทมเมอร์ ในโหมดประหยัดพลังงาน
6. การรีเซ็ตเนื่องจากไม่มีไฟเลี้ยงหรือไฟเลี้ยงลดต่ำลง

2.11 คอนโทรล MSComm

สำหรับการใช้งาน Visual BASIC ตั้งแต่เวอร์ชัน 2 เป็นต้นมา ใน Visual BASIC จะมี code คำสั่งที่ใช้คอนโทรลสำหรับการสื่อสารอนุกรมผ่านทางพอร์ทอนุกรมของคอมพิวเตอร์มาให้ โดยใน Visual BASIC เวอร์ชัน 2 และเวอร์ชัน 3 จะใช้ชื่อว่า MSCOMM.VBX ส่วนเวอร์ชัน 4 ใช้ชื่อว่า MSCOMM16.OCX สำหรับการงานกับระบบปฏิบัติการ 16 บิต และ MSCOMM3232.OCX สำหรับการงานกับระบบปฏิบัติการ 32 บิต สำหรับใน Visual BASIC เวอร์ชัน 5 จะมีเพียง MSCOMM3232.OCX เท่านั้น เพราะถูกออกแบบมาให้ใช้งานกับระบบปฏิบัติการ 32 บิต

MSComm จัดเตรียมทางเลือกไว้ 2 ทางเพื่อความสะดวกในการสื่อสารข้อมูล ทางแรก คือ การสื่อสารกระตุ้นด้วยเหตุการณ์ (even-driven communication) เป็นรูปแบบการใช้งานที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพมากสำหรับการตอบสนองแบบทันทีทันใด เช่น เมื่อตัวอักษรถูกส่งมาที่พอร์ตอนุกรม หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขา Data Carrier Detect(DCT) หรือขา Request To Sent(RTS) เหตุการณ์ OnComm ของ MComm จะสามารถตรวจจับสัญญาณนั้น ได้ทันที ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดในหัวข้อคุณสมบัติ CommEven ต่อไปส่วนทางเลือกที่สองเป็นการคอยการตรวจสอบค่าเหตุการณ์ และความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ด้วยการดูค่าที่เปลี่ยนแปลงภายในคุณสมบัติ CommEven หลังจากให้โปรแกรมทำงานในฟังก์ชันต่างๆ ไปเรียบร้อยแล้ว ซึ่งวิธีนี้ใช้งานได้ดีในกรณีที่โปรแกรมมีขนาดเล็ก

คอนโทรล MComm 1 ตัวสามารถควบคุมการทำงานของพอร์ตอนุกรมได้ 1 พอร์ต ถ้าในโปรแกรมที่ใช้งานต้องการติดต่อกับพอร์ตอนุกรมมากกว่า 1 พอร์ต จะต้องใช้คอนโทรล MComm มากกว่า 1 ตัวเพื่อควบคุมพอร์ตอนุกรมในแต่ละพอร์ต แอคเตสของพอร์ตอนุกรมและแอคเตสของการเกิดอินเตอร์รัปต์สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการแก้ไขค่าที่ MComm

ถึงแม้ว่า คอนโทรล MComm จะมีคุณสมบัติ (Property) มากมาย แต่สามารถทำความเข้าใจได้ไม่ยาก

2.11.1 พรีอเพอร์ตีที่สำคัญในการใช้งาน MComm

- CommPort ใช้ในการกำหนดหมายเลขของพอร์ตอนุกรมที่เราต้องการจะติดต่อ โดยมีรูปแบบของการทำงานดังนี้

Object.CommPort[= value]

- Setting ใช้ในการกำหนดอัตราบอด (Baud Rate) หรือความเร็วในการส่งข้อมูล มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที, พาริตี, จำนวนของบิตข้อมูล และจำนวนของบิตปิดท้าย โดยมีรูปแบบของการทำงานดังนี้

object.Setting[= value]

- PortOpen ใช้สำหรับเปิดและปิดการใช้งานพอร์ตอนุกรม โดยมีรูปแบบของการทำงานดังนี้

object.PortOpen[= value]

- InBufferSize[= value] เป็นการกำหนดขนาดของ Buffer ในการส่งข้อมูลเข้ามา โดยมีรูปแบบการทำงานดังนี้

Object.InBufferSize[= value]

- OutBufferSize เป็นการกำหนดขนาดของ Buffer ในการส่งข้อมูลออกไป โดยมีรูปแบบการกำหนดค่าดังนี้

Object.OutBufferSize[= value]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- InputLen เป็นการกำหนดค่าของข้อมูลที่อ่านจาก Buffer ภาครับ โดยมีรูปแบบการกำหนดค่าดังนี้

```
Object.InputLen[ = valve]
```

- InputMode เป็นการกำหนดค่าชนิดของข้อมูลที่รับเข้ามา โดยมีรูปแบบการกำหนดค่าดังนี้

```
Object.InputMode[ = valve]
```

โดยที่เราสามารถเลือกชนิดของข้อมูลได้ 2 ประเภท คือ

- comInputModeText ข้อมูลที่รับเข้ามาเป็นข้อความปกติเราสามารถตั้งค่าให้อยู่ในโหมดนี้ได้โดยการกำหนด valve ให้เป็น 1

- Input ใช้ในการอ่านค่าข้อมูลจากพอร์ตอนุกรม โดยมีรูปแบบการอ่านค่าดังนี้

```
Object.Input
```

- Output ใช้ในการส่งข้อมูลออกไปจากพอร์ตอนุกรม โดยมีรูปแบบของการเขียน

ดังนี้

```
Object.Output[ = valve]
```

- EOFEnable เป็นการบอกว่าสิ้นสุดของไฟล์ End of File [EOF] โดยมีรูปแบบการใช้งานดังนี้

```
Object.EOFEnable[= valve]
```

ตารางที่ 2.9 CommEvent เกี่ยวกับการเกิดสถานะเมื่อเกิดการผิดพลาดในการสื่อสาร

ชื่อ Property	คำอธิบาย
ComEventBreak	การได้รับสัญญาณเบรก
ComEventCDTO	เมื่อเกิดไทม์เอาต์ ขณะที่กำลังคอยสัญญาณ CD(Carrier Detect)
ComEventCTSTO	เมื่อเกิดไทม์เอาต์ ขณะที่กำลังคอยสัญญาณ CTS (Carrier To Send)
ComEventDSRTO	เมื่อเกิดไทม์เอาต์ ขณะที่กำลังคอยสัญญาณ DSR (Data Set Ready)
ComEventFrame	การที่เกิดความผิดพลาดทางเฟรม เป็นลักษณะที่ไม่พบบิตจบตามที่ควรจะเป็น
ComEventOverrun	การที่เกิดความผิดพลาด โอเวอร์รัน เป็นลักษณะที่รับข้อมูลไม่ทันในการประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 (ต่อ) CommEvent เกี่ยวกับการเกิดสถานะเมื่อเกิดการผิดพลาดในการสื่อสาร

ชื่อ Property	คำอธิบาย
ComEventRxOver	บัฟเฟอร์ที่รับข้อมูลเกิด โอเวอร์โฟลล์ ก็คือรับตัวอักษรหลังจากการรับ EOF Char
ComEventRxParity	การที่เกิดความผิดพลาดทางพาริตี เป็นลักษณะที่ตัวอักษรที่รับได้มีพาริตีไม่ถูกต้อง
ComEventBreakTxFull	ตัวบัฟเฟอร์ที่ส่งข้อมูลเต็ม
ComEventBreakDCB	การที่เกิดความผิดพลาดขึ้น โดยไม่ได้คาดถึง

ตารางที่ 2.10 CommEvent เกี่ยวกับการเกิดสถานการณ์เมื่อมีการสื่อสาร

ชื่อ Property	คำอธิบาย
ComEvCD	CD(Carriert Detect) เมื่อเปลี่ยนซึ่งคือสายของสัญญาณ Receive Line Signal Detect(RLSD)
ComEvCTS	RCTS(Carrier To Send)เมื่อมีการเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้น
ComEvDSR	DSR(Data Set Ready) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะเกิดขึ้น
ComEvRing	เมื่อตรวจจับสัญญาณ Ring Indicator ได้
ComEvReceive	เมื่อได้รับข้อมูลเก็บลงใน InputBuffer
ComEvSend	เมื่อส่งข้อมูลออกจาก OutputBuffer
ComEvEof	เมื่อพบอักขระ EOF(End Of File)

ตารางที่ 2.11 Handshake Property

ชื่อ Property	คำอธิบาย
ComNone	ไม่ใช่ให้ตรวจสอบแฮนเช็ก
ComXonZXoff	ให้มีการตรวจสอบแฮนเช็ก ในแบบ Xon/Xoff
ComRTS	ให้มีการตรวจสอบแฮนเช็ก ผ่านขา RTS และ CTS
ComRTSXOnXoff	กำหนดให้มีการตรวจทั้ง 2 แบบคือ RTS-CTS และ XOn/Xo

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.12 Input Mode Property

ชื่อ Property	คำอธิบาย
ComInputModeText	คุณสมบัติในการรับข้อมูลมาเป็นแบบข้อความ ปกติจะเป็นค่านี้อยู่แล้ว
ComInputModeBinary	คุณสมบัติในการรับข้อมูลมาเป็นแบบไบนารีหรือเลขฐานสองนั่นเอง
Break	ในการที่เรากำหนดหรือเคลียร์สัญญาณเบรก
CDHoldIng	ตรวจสอบสัญญาณ Carrier Detect(CD)ดูว่ายังคงมีสถานะอยู่หรือเปล่า
CDTImeout	การกำหนดค่าหรือว่าให้ค่าของเวลา(หน่วย mmSec)ที่รอสัญญาณ Carrier Detect
CommEvent	จะให้ผลของการเกิด Event ของ Communication
CommID	จะให้ผลของการเซดเคิลของ Communication ที่เปิดใช้อยู่
CommPort	การกำหนดหรือว่าอ้างอิงของหมายเลขคอมพอร์ต ที่เปิดใช้อยู่ เช่น Com1=1,Com2=2
CTSHolding	เป็นการตรวจสอบสัญญาณของ Clear To Send ว่ายังคงมีสถานะอยู่หรือหรือเปล่า
CTSTImeout	การกำหนดค่าหรือว่าให้ค่าของเวลา(หน่วย mmSec)ที่รอสัญญาณ Data Set Ready
DSRHolding	เป็นการตรวจสอบสัญญาณของ Data Set Ready ว่ายังคงมีสถานะอยู่หรือเปล่า
DSRTIMEout	การกำหนดค่าหรือว่าให้ค่าของเวลา(หน่วย mmSec) ที่รอสัญญาณ Clear To Send
DTREnable	ให้อินาเบิ้ล สายของสัญญาณ Data Terminal Ready(DTR)
HandshakIng	กำหนดการแฮนเช็คทางฮาร์ดแวร์ เพื่อที่คอยตรวจสอบการรับส่งข้อมูล
InBufferCount	ให้ค่าของจำนวนข้อมูลที่อยู่ภายในบัฟเฟอร์รับข้อมูล
InBufferSize	กำหนดหรือว่าให้ค่าของขนาดในบัฟเฟอร์รับข้อมูล
Input	เป็นการให้ค่าหรือว่าเคลื่อนย้ายข้อมูลจากบัฟเฟอร์รับข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.12 (ต่อ) Input Mode Property

ชื่อ Property	คำอธิบาย
InputLen	การกำหนดหรือว่าให้ของจำนวนข้อมูลที่นำมาจากบัฟเฟอร์รับข้อมูล
Interval	เป็นการกำหนดอัตราความเร็วของการใช้งานในโหมดโพลลิง
NullIDiscard	เป็นการกำหนดให้มีการรับ Null Character เก็บลงในบัฟเฟอร์รับข้อมูล
OutBufferCount	เป็นจำนวนข้อมูลที่คอยอยู่ในบัฟเฟอร์ส่งข้อมูล
OutBufferSize	การกำหนดหรือว่าให้ค่าขนาดของบัฟเฟอร์ส่งข้อมูล
Output	เป็นการส่งข้อมูลให้กับบัฟเฟอร์ส่งข้อมูลเพื่อทำการส่งข้อมูลออก
ParityReplace	เป็นการกำหนดให้ส่งอักขระที่กำหนดนี้แทนหากเกิดการผิดพลาดในข้อมูล
PortOpen	เป็นการกำหนดหรือว่าให้ค่าของสถานะพอร์ตว่าเปิดหรือปิดอยู่
Rthreshold	การกำหนดหรือว่าให้ค่าของจำนวนข้อมูลที่เก็บลงในบัฟเฟอร์รับข้อมูลก่อนการเกิด CommEvent ในการรับข้อมูล
RTSEnable	ให้อินาเบิล สัญญาณ Request To Send(RTS)
SettIng	เป็นการกำหนดอัตราบอด พาริตี ข้อมูล บิตหยุด
Sthreshold	การกำหนดหรือว่าให้ผลของจำนวนข้อมูลที่เก็บลงในของบัฟเฟอร์ส่งข้อมูลก่อนการเกิด CommEvent ในการที่ส่งข้อมูล

ตารางที่ 2.13 รายละเอียดที่บ่งชี้ถึงความผิดพลาดในการใช้ MS Comm Control

ชื่อ Property	ค่าตัวเลข	คำอธิบาย
ComInvalidPrpperty Value	380	ตั้งค่าไม่ถูกต้อง
ComSetNotSupported	383	กำหนดค่าที่ตั้งไว้สามารถอ่านได้อย่างเดียว เขียนหรือเปลี่ยนข้อมูลไม่ได้
ComGetNotSupported	394	กำหนดค่าที่รับไว้สามารถอ่านได้อย่างเดียว เขียนหรือเปลี่ยนข้อมูลไม่ได้
ComPortOpen	8000	จะอ่านค่าไม่ได้ในขณะที่ Port นั้นยังถูกเปิดใช้อยู่
ComPortOpen	8001	ค่าของเวลาที่หาออกมาได้ต้องมีค่ามากกว่าศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.13 (ต่อ) รายละเอียดที่บ่งชี้ถึงความผิดพลาดในการใช้ MS Comm Control

ชื่อ Property	ค่าตัวเลข	คำอธิบาย
ComPortOpen	8004	Port นั้นจะสามารถอ่านค่าได้ในขณะที่มีการทำงานเท่านั้น
ComPortOpen	8002	กำหนดหมายเลข Port ไม่ถูกต้อง
ComPortOpen	8003	ผลลัพธ์ของข้อมูลจะเกิดในขณะที่มีการทำงาน
ComPortAlreadyOpen	8005	Port ได้ถูกเปิดไว้เรียบร้อยแล้ว
ComPortAlreadyOpen	8006	อุปกรณ์เกิดความผิดพลาดหรือไม่สามารถรองรับค่าได้
ComPortAlreadyOpen	8007	อุปกรณ์ไม่ยอมรับค่าที่ Baud Rate ถูกตั้งเอาไว้
ComPortAlreadyOpen	8008	ขนาดของข้อมูลผิดพลาด
ComPortAlreadyOpen	8009	ค่าของตัวแปรที่แสดงอยู่ผิดพลาด
ComPortAlreadyOpen	8010	อุปกรณ์ภายนอก (Hardware) ยังไม่พร้อมที่จะทำงาน
ComPortAlreadyOpen	8011	ฟังก์ชันไม่สามารถกำหนดแถวข้อมูลได้
ComNoOpen	8012	Com Port ยังไม่พร้อมที่จะถูกเปิดใช้งาน
ComNoOpen	8013	Com Port พร้อมที่จะถูกเปิดใช้งาน
ComNoOpen	8014	Com Port ไม่สามารถทำงานได้
ComSetCommStateFailed	8015	ไม่สามารถตั้งค่าสถานะของ Port ได้
ComSetCommStateFailed	8016	ไม่สามารถ Set Port ตามเหตุการณ์ที่กำหนดให้ไว้ได้
ComPortNotOpen	8018	จะสามารถหาผลลัพธ์ของข้อมูล ได้ก็ต่อเมื่อ Port มีการทำงานแล้วเท่านั้น
ComPortNotOpen	8019	Port ไม่มีที่ว่างมีข้อมูลเต็มใน Port
ComReadError	8020	เกิดความผิดพลาดขึ้นขณะที่อ่าน
ComDCBError	8021	เกิดความผิดพลาดภายในต้องไปแก้ไขที่ตัวควบคุม Port

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

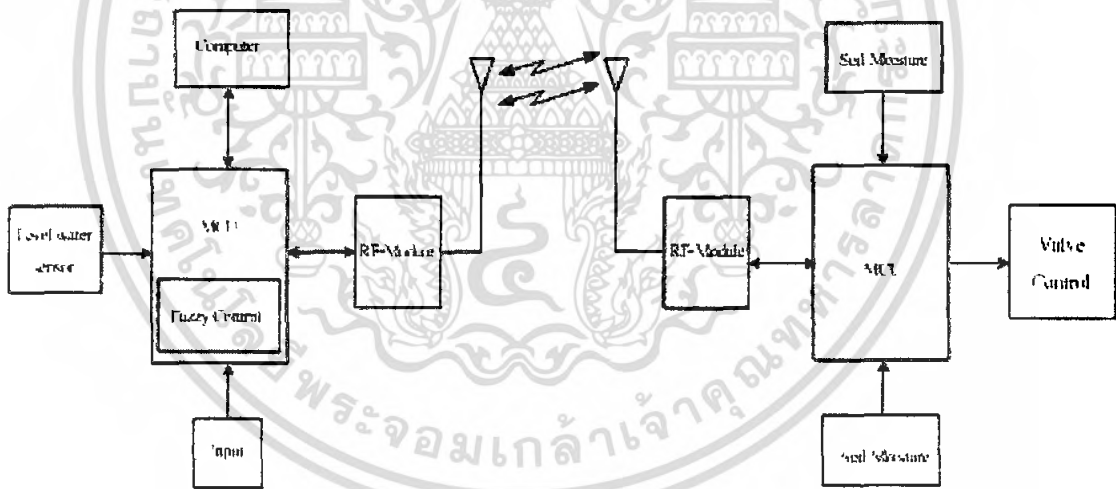
บทที่ 3

การออกแบบและหลักการงาน

3.1 การออกแบบโครงงาน

การออกแบบของระบบได้ออกแบบให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ได้ 2 ลักษณะ คือ การควบคุมแบบอัตโนมัติ และการควบคุมผู้ใช้กำหนดค่าตัวแปรได้เอง

ซึ่งในการทำงานแบบอัตโนมัติจะรับค่าจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินเข้ามาหาค่าเฉลี่ยในไมโครคอนโทรลเลอร์ฝั่งตัวรอง (Slave) แล้วส่งค่าไปยังตัวหลัก (Master) เพื่อที่ประมวลผลร่วมกับระดับน้ำในแท็งก์น้ำเพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำโดยใช้ Fuzzy control ประมวลผล ระดับในการเปิดวาล์วน้ำและวาล์วที่เปิดสามารถเปิดได้กี่ตัวและแสดงผลที่คอมพิวเตอร์ การควบคุมผู้ใช้กำหนดค่าตัวแปรได้เอง เป็นการรับค่าระยะเวลาที่ต้องการในการเปิดวาล์วรดน้ำหรือจะสามารถเลือกเปิดจากคอมพิวเตอร์ แสดงผลในรูปกราฟิก GUI (Graphic User Interface)



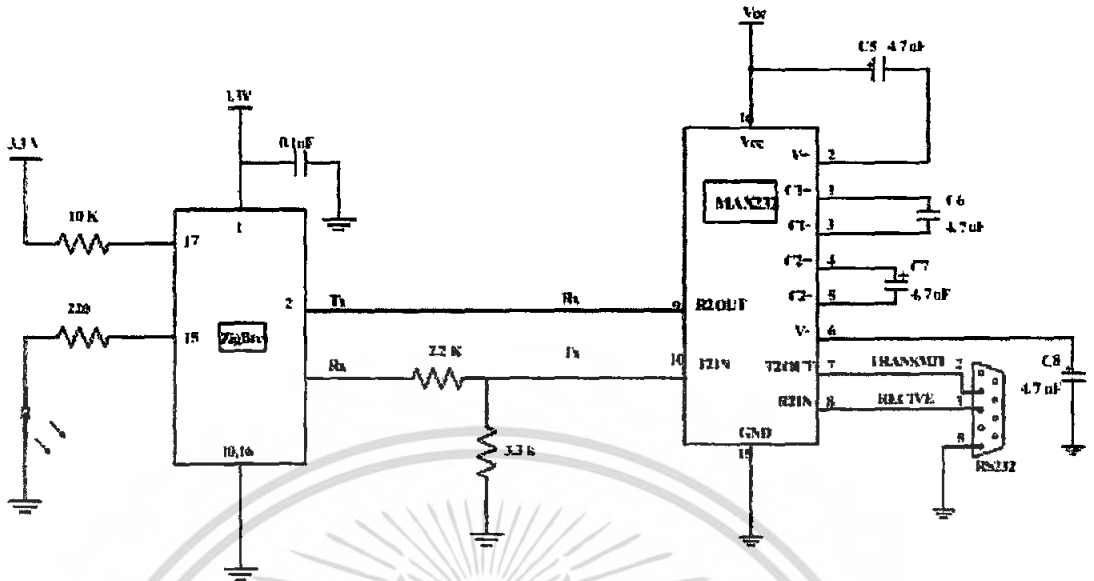
รูปที่ 3.1 Block Diagram การออกแบบ โครงงาน

3.2 การออกแบบทางด้านฮาร์ดแวร์

3.2.1 การออกแบบการเชื่อมต่อ RS 232 เข้ากับ ZigBee

ในระบบการทำงานนี้จะต้องมีการติดต่อสื่อสารระหว่าง คอมพิวเตอร์ด้วยจึงได้เลือกการสื่อสารผ่าน RS-232 เข้ามาใช้

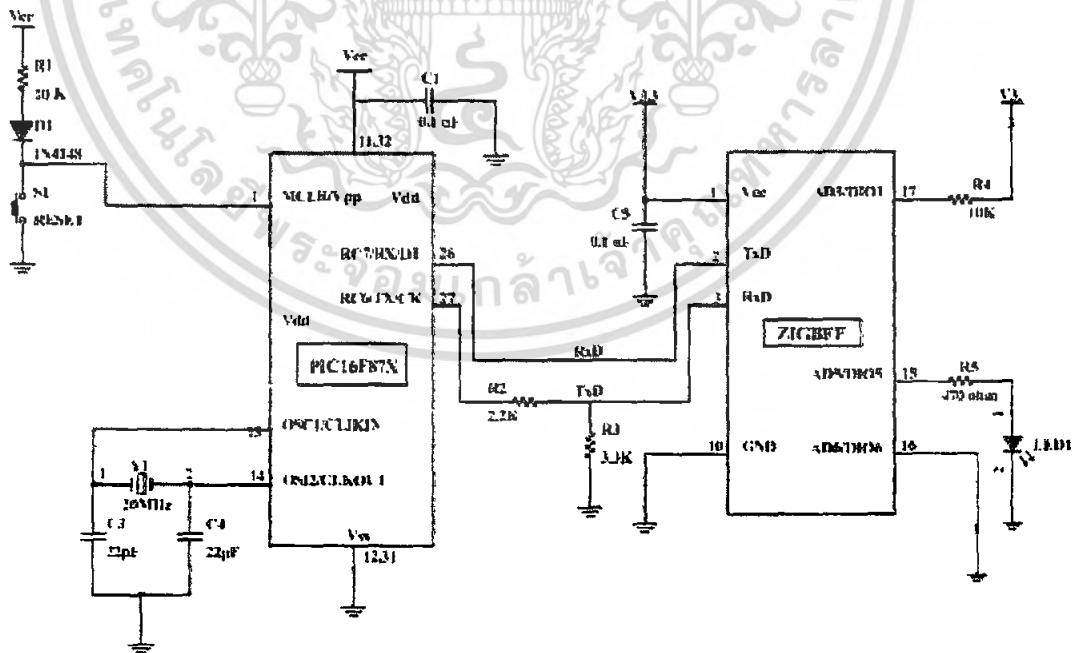
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การเชื่อมต่อRS-232 เข้ากับ ZigBee

3.2.2 ชุดเชื่อมต่อ ZigBee เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์

เพื่อให้สะดวกในการแสดงผลค่าจึงได้ทำการต่อโมดูล LCDเข้ามาเพื่ออำนวยความสะดวกในส่วนนี้

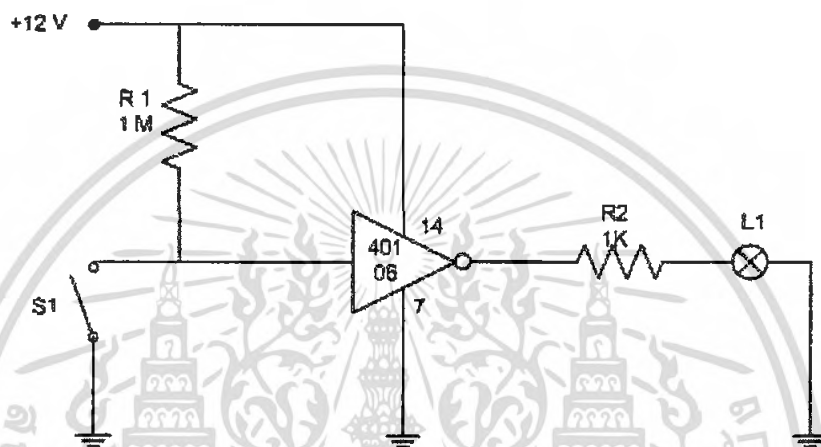


รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่อ ZigBee เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 วงจรเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ

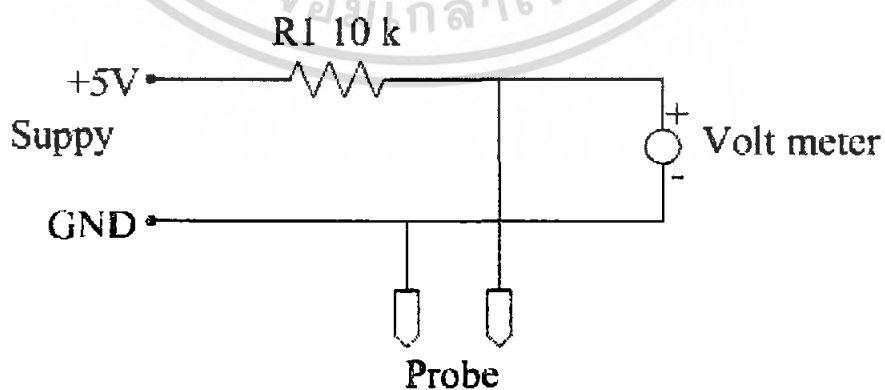
ส่วนการควบคุมการทำงานหลักใช้ไอซีมอสเบอร์ CD40106 ซึ่งภายในมีนอตเกตหรืออินเวอร์เตอร์เกตอยู่ 6 เกต เป็นไอซีแบบขมิตต์ทริกเกอร์ ซึ่งให้คุณสมบัติของสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมทางเอาต์พุต มีสถานะเสถียรกว่านอตเกต การทำงานของวงจร S1 จะเป็นตัววัดระดับน้ำ คือเมื่อระดับน้ำถึง S1 จะเป็นการป้อนสถานะลอจิก 0 ให้กับ วงจร ซึ่งจะทำให้ L1 ติด



รูปที่ 3.4 วงจรวัดระดับน้ำ

3.2.4 วงจรเซนเซอร์ความชื้นของดิน

วงจรวัดความชื้นดินจะใช้หลักการวัดความต้านทานของดิน ดินที่มีน้ำมากจะมีค่าความต้านทานน้อยซึ่งจะทำให้กระแสไหลผ่านไปได้แต่ถ้าดินที่น้ำน้อยจะมีความต้านทานมากเช่นกัน



รูปที่ 3.5 วงจรวัดความชื้นดิน

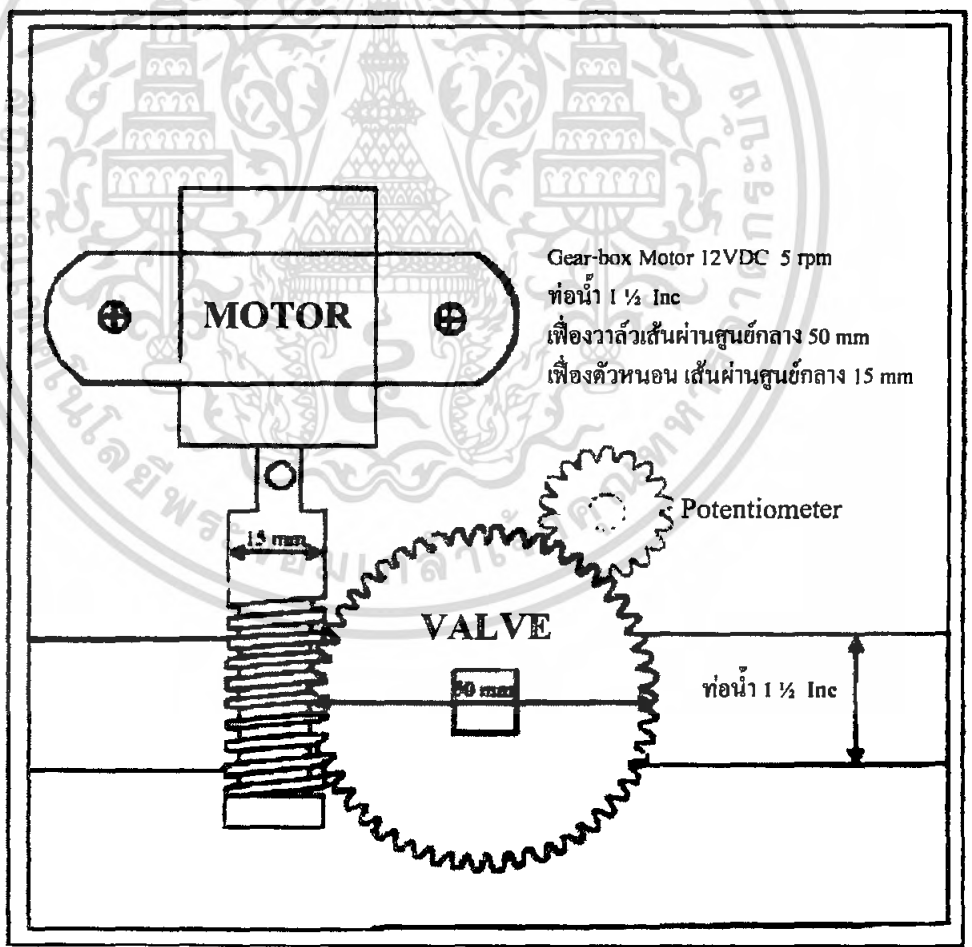
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 ระบบการจ่ายน้ำ

ระบบการจ่ายน้ำจะใช้มอเตอร์ในการควบคุมการเปิดปิดของวาล์วน้ำ ซึ่งทิศทางการหมุนของวาล์วน้ำนั้น Controller จะเป็นตัวกำหนดทิศทางการหมุนเพื่อปล่อยน้ำในปริมาณที่เหมาะสมกับความชื้นของดินและอัตราการไหลของน้ำในสวน

3.2.7.1 การออกแบบเฟือง

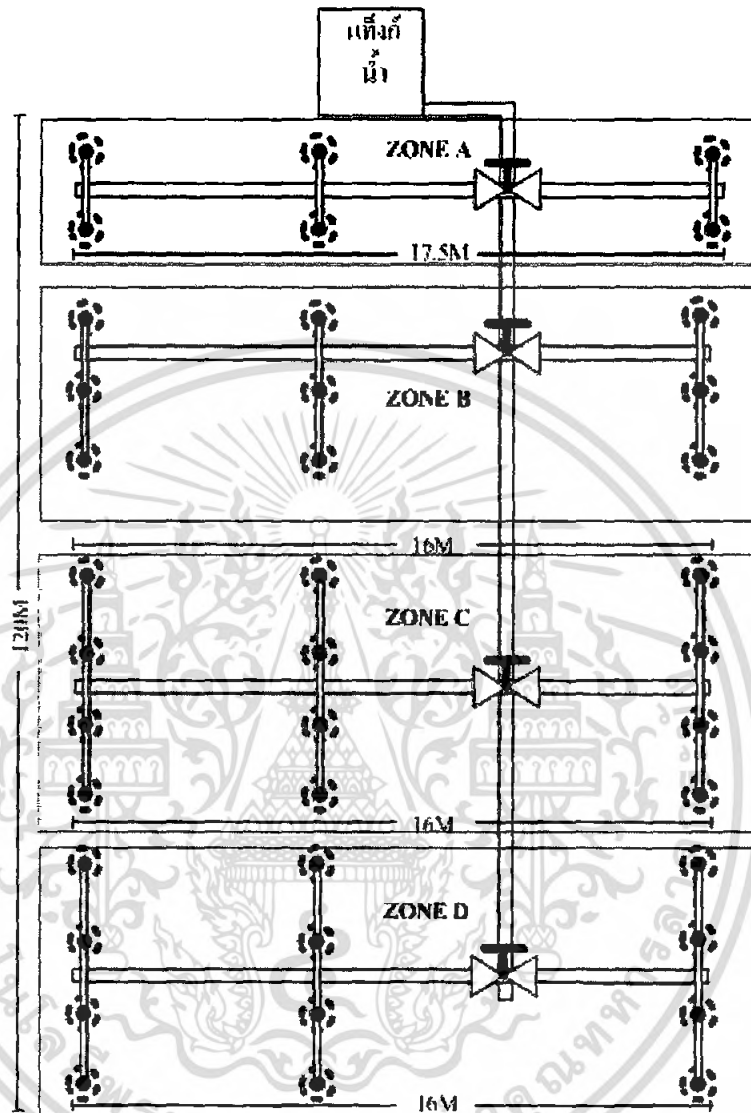
การส่งกำลังจากเฟืองตัวขับ ไปยังเฟืองตัวตามนั้น ต้องมีการขบกันของเฟือง ส่วนอัตราเร็วของเฟืองจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนฟันเฟืองของเฟือง ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และการเคลื่อนที่ของเฟืองตัวขับ จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ นอกจากนี้ยังมีชุดเฟืองหนอน ซึ่งเป็นเฟืองที่มีอัตราทดสูง จะประกอบด้วยเกลิยวหนอน หรือเฟืองตัวหนอนเป็นตัวขับและเฟืองล้อเป็นเฟืองตัวตามเฟืองตัวหนอนอาจจะมีจำนวนเกลิยวแบบเกลิยวหนึ่งปากหรือมีจำนวนเกลิยวสองปากหรือมากกว่า



รูปที่ 3.8 ชุดควบคุมวาล์ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7.2 การวางแนวท่อ



รูปที่ 3.9 แนวการวางท่อและสปริงเกอร์

3.3 การออกแบบซอฟต์แวร์

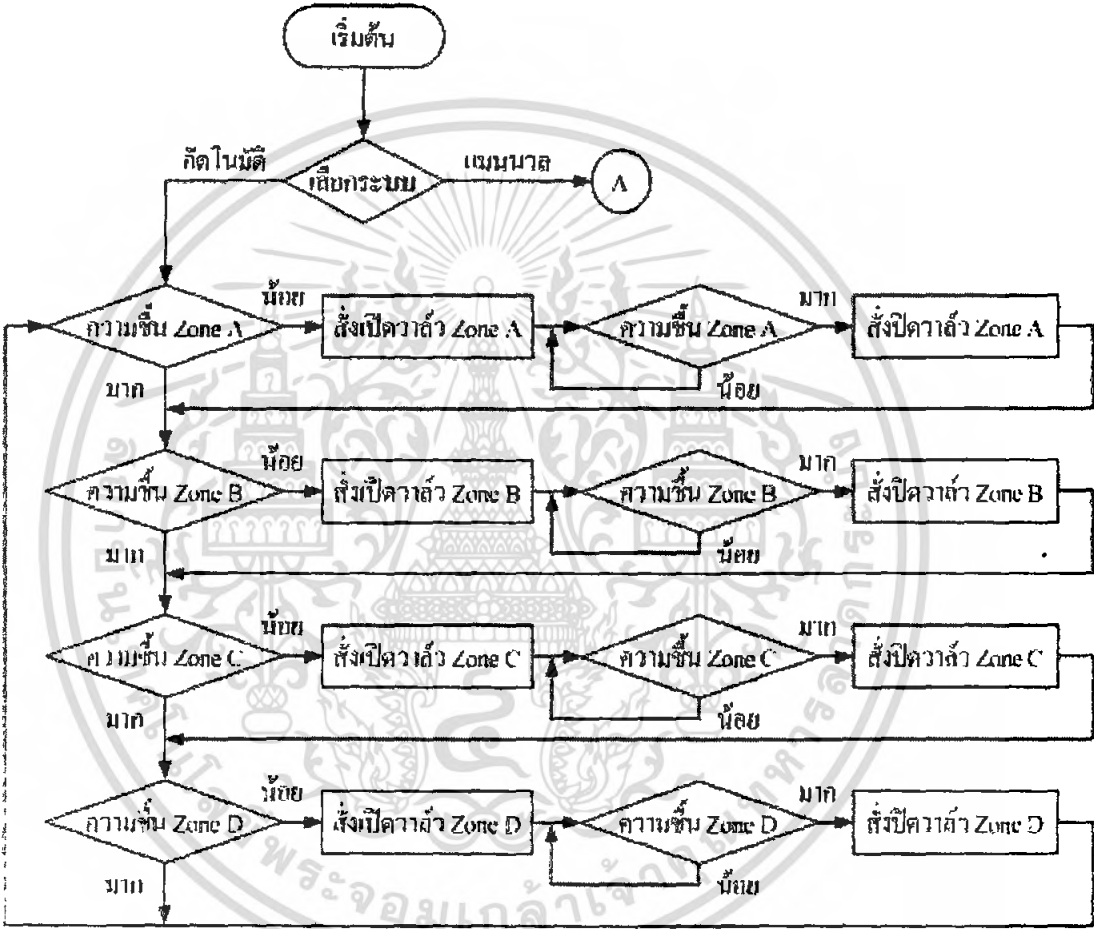
3.3.1 การทำงานของโปรแกรม Visual Basic (VB)

3.3.1.1 ระบบอัตโนมัติ

เริ่มด้วยการตรวจสอบค่าความชื้นในดินของโซนเอที่ได้รับมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ว่ามีความชื้นในดินมากหรือน้อย ถ้ามากก็จะไปตรวจสอบค่าความชื้นในโซนถัดไป แต่ถ้าหากค่าความชื้นในดินน้อยก็จะสั่งให้มอเตอร์ที่ควบคุมวาล์วในโซนเอเริ่มทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปิดวาล์ว โดยจะสั่งงานผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ของโซนคที่หนึ่ง หลังจากนั้นก็จะตรวจสอบค่าความชื้นในดินของโซนเอไปเรื่อยๆ จนกว่าจะมีค่าความชื้นในดินของโซนเอมีค่ามาก และเมื่อตรวจสอบได้ว่าความชื้นในดินของโซนเอมีค่ามาก โปรแกรมก็จะสั่งให้มอเตอร์ที่ควบคุมวาล์วในโซนเอ ทำการปิดวาล์ว หลังจากนั้นก็จะตรวจสอบค่าความชื้นในดินของโซนถัดไป ซึ่งโปรแกรมจะทำงานในลักษณะเช่นนี้ จนกว่าจะทำการปิดโปรแกรม

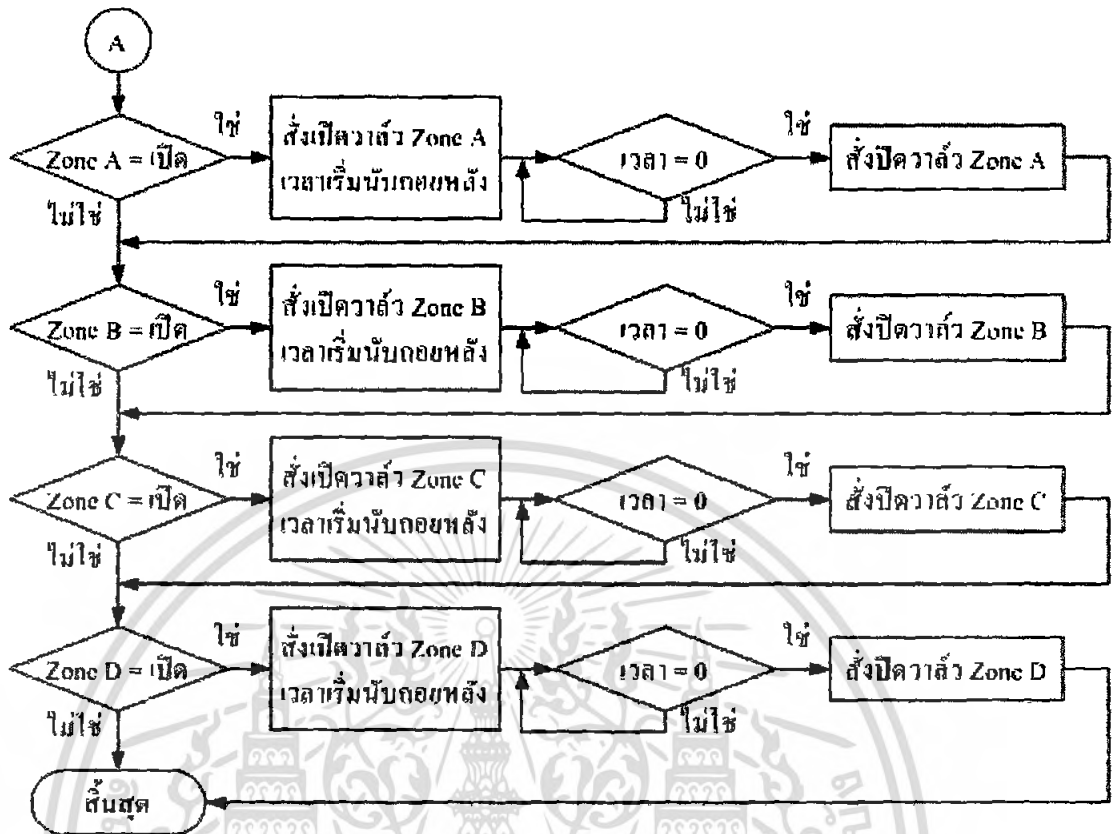


รูปที่ 3.10 แผนผังการทำงาน โปรแกรม VB ส่วนของระบบอัตโนมัติ

3.3.1.2 ระบบแมนนวล

เริ่มด้วยการสั่งเปิดวาล์วและกำหนดเวลาในการทำงานจากนั้นก็ให้แต่ละโซนทำงานตามลำดับ โดยจะเริ่มจากโซนเอทำงานโดยสั่งให้มอเตอร์ที่ควบคุมวาล์วในโซนเอทำการเปิดวาล์วจนเมื่อเวลาที่ตั้งไว้หมด ก็จะสั่งให้มอเตอร์ที่ควบคุมวาล์วในโซนเอทำการปิดวาล์ว จากนั้น โซนถัดไปจึงจะเริ่มทำงานในลักษณะเดียวกัน จนเมื่อทุกโซนทำงานเสร็จก็เป็นการจบโปรแกรม

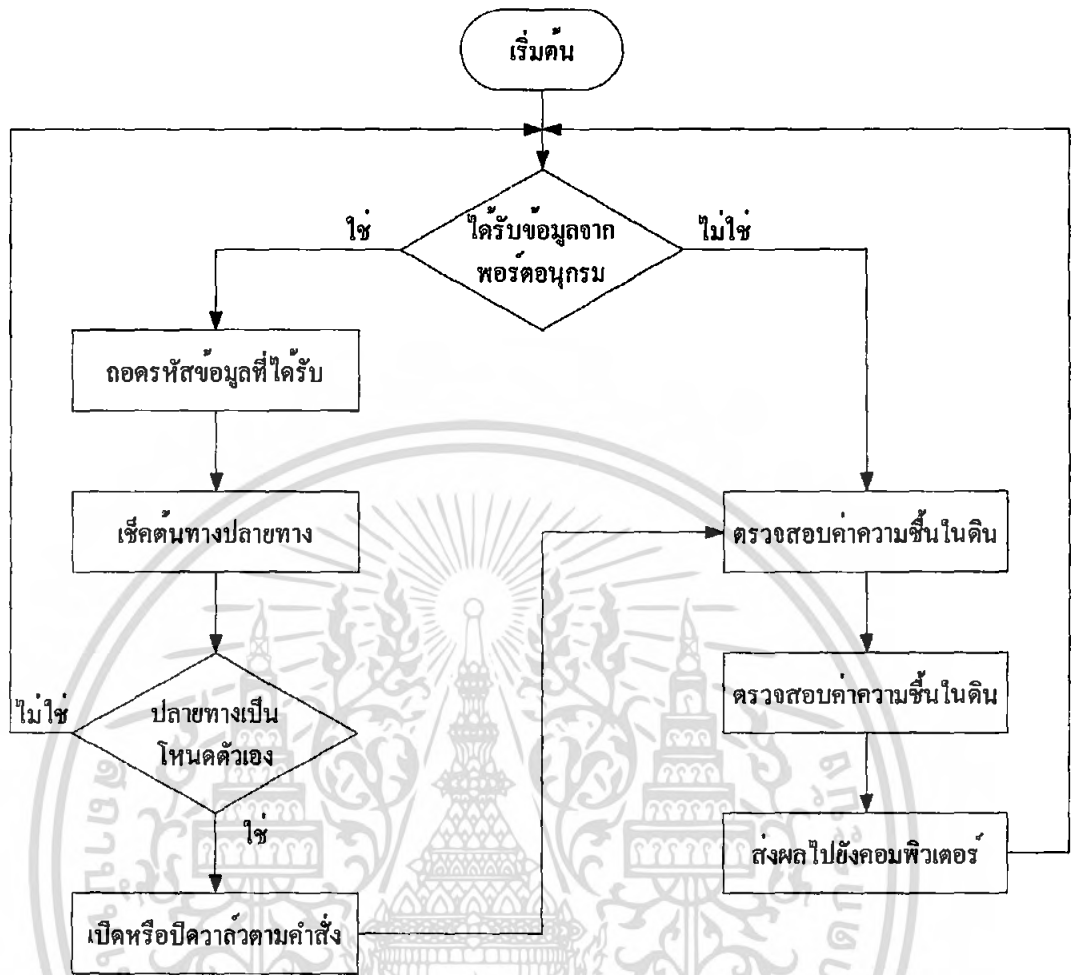
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แผนผังการทำงานโปรแกรม VB ส่วนของระบบเมนูนวล

3.3.2 การออกแบบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

เริ่มทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเช็คการเข้ามาของข้อมูลทางพอร์ตอนุกรม ถ้าไม่ได้รับข้อมูล ไมโครคอนโทรลเลอร์จะไปทำงานในส่วนของวงจรระดับความชื้นในดิน และส่งค่าไปยังคอมพิวเตอร์ เมื่อโปรแกรมทำงานในระบบอัตโนมัติ คอมพิวเตอร์จะนำค่าที่ได้ไปประมวลผลและควบคุมการเปิด-ปิดวาล์ว แต่หากว่าได้รับข้อมูลทางพอร์ตอนุกรมซึ่งจะเป็นข้อมูลคำสั่งในการควบคุมวาล์ว ก็จะนำข้อมูลดังกล่าวไปตรวจสอบว่าข้อมูลดังกล่าวสั่งให้ทำอะไร และทำตามคำสั่งที่ได้รับมา



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

ในการทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบแมนนวลและแบบอัตโนมัติซึ่งในแบบแมนนวลจะเป็นการรับค่าจากผู้ใช้ซึ่งสามารถกำหนดเวลาในการให้น้ำในแต่ละโซนโดยอิสระต่อกันในส่วนของอัตโนมัติจะเป็นการให้น้ำตามค่าความชื้นที่ได้ตั้งไว้ในโปรแกรม ขั้นตอนแรกในการใช้โปรแกรมจะต้องเลือกระบบก่อนว่าต้องการจะใช้งานแบบใด

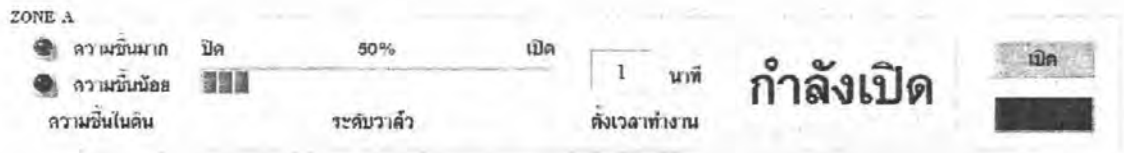
4.1.1 การทำงานแบบแมนนวล



รูปที่ 4.1 การทำงานแบบแมนนวล

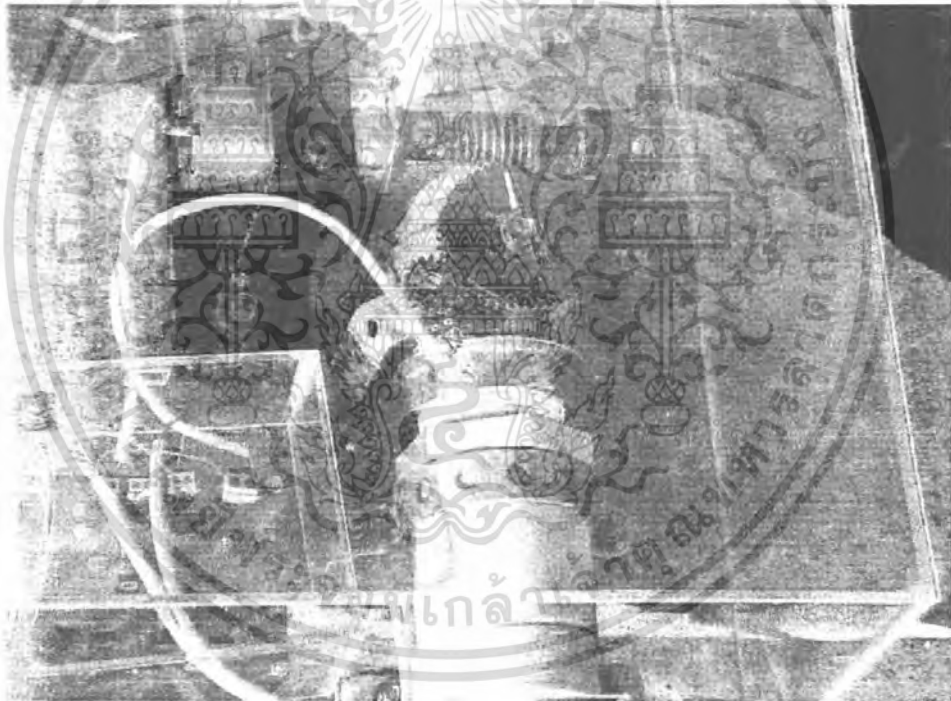
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานของโปรแกรมในแต่ละโซนจะมีลักษณะคล้ายกันคือการตั้งค่าเวลาในการจ่ายน้ำให้ในแต่ละโซนเมื่อ ZONE A ทำงานเสร็จก็จะไปทำงานที่ ZONE B, C และ D ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 แสดงสถานะกำลังเปิดวาล์ว ZONE A

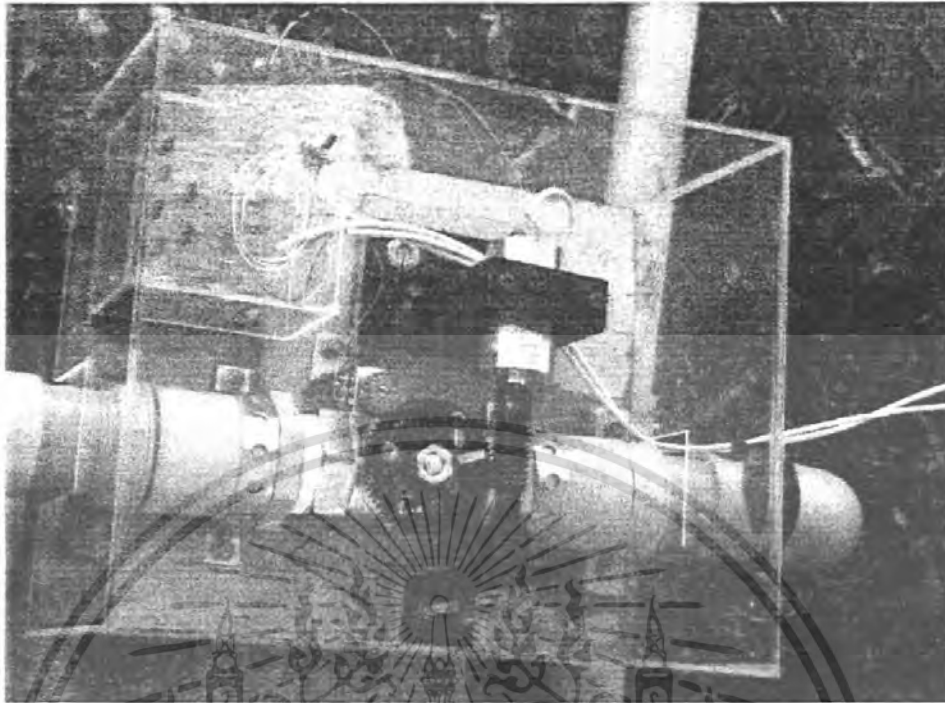
จากรูปที่ 4.2 เป็นการแสดงการเปิดวาล์วใน ZONE A และมีแถบแสดงตำแหน่งของวาล์วที่กำลังเปิดอยู่ (Progress Bar) เพื่อบอกสถานะของวาล์วซึ่งในรูปวาล์วกำลังเปิดอยู่ที่ 10 %



รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งที่วาล์วปิด

ตำแหน่งของวาล์วที่ ปิดอยู่แถบเส้นขาวบนเฟืองตรงจะต้องตั้งฉากกับเฟืองตัวหนอนในการเปิดปิดวาล์วเฟืองตรงจะหมุนเพียง 1/4 ของตัวเฟืองเท่านั้น และตำแหน่งที่วาล์วเปิดสุดแถบเส้นขาวจะต้องขนานไปกับเฟืองตัวหนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

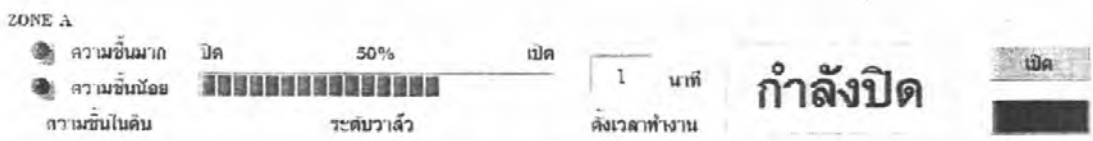


รูปที่ 4.4 ตำแหน่งเปิดวาล์วอยู่ที่ 10 %



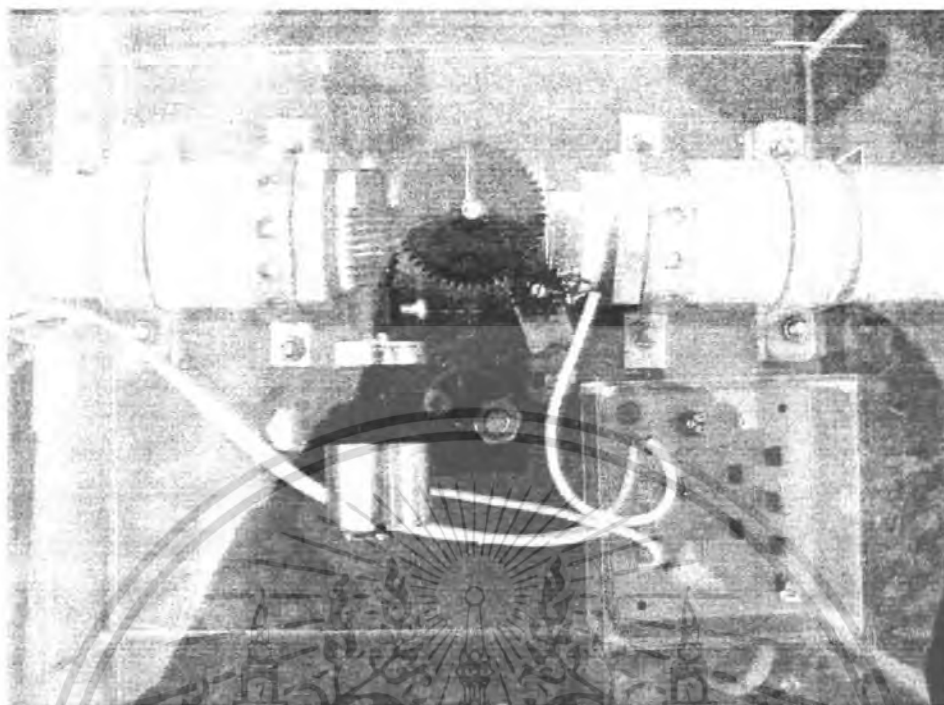
รูปที่ 4.5 แสดงสถานะที่วาล์วเปิดสุด 100 %และทำงานที่ 1 นาที

เมื่อวาล์วเปิดสุดตัวเคอร์เตอร์ก็จะเริ่มนับเวลาตามที่ได้ตั้งไว้ซึ่งใน รูปที่ 4.5 ตั้งไว้ที่ 1 นาทีนั้น หมายความว่าใน ZONE A ก็จะรดน้ำเป็นเวลา 1 นาที และเมื่อถึงเวลาที่กำหนดวาล์วใน ZONE A ก็ เริ่มปิดดังแสดงในรูปที่ 4.6 และเมื่อวาล์วปิดสุดอยู่ที่ตำแหน่ง 0 จะส่งให้ ZONE B ทำงานต่อไป



รูปที่ 4.6 แสดงสถานะกำลังปิดวาล์ว ที่ 60 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งของวาล์วที่เปิดชุด



รูปที่ 4.8 การกระจายน้ำเมื่อเปิดวาล์ว (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

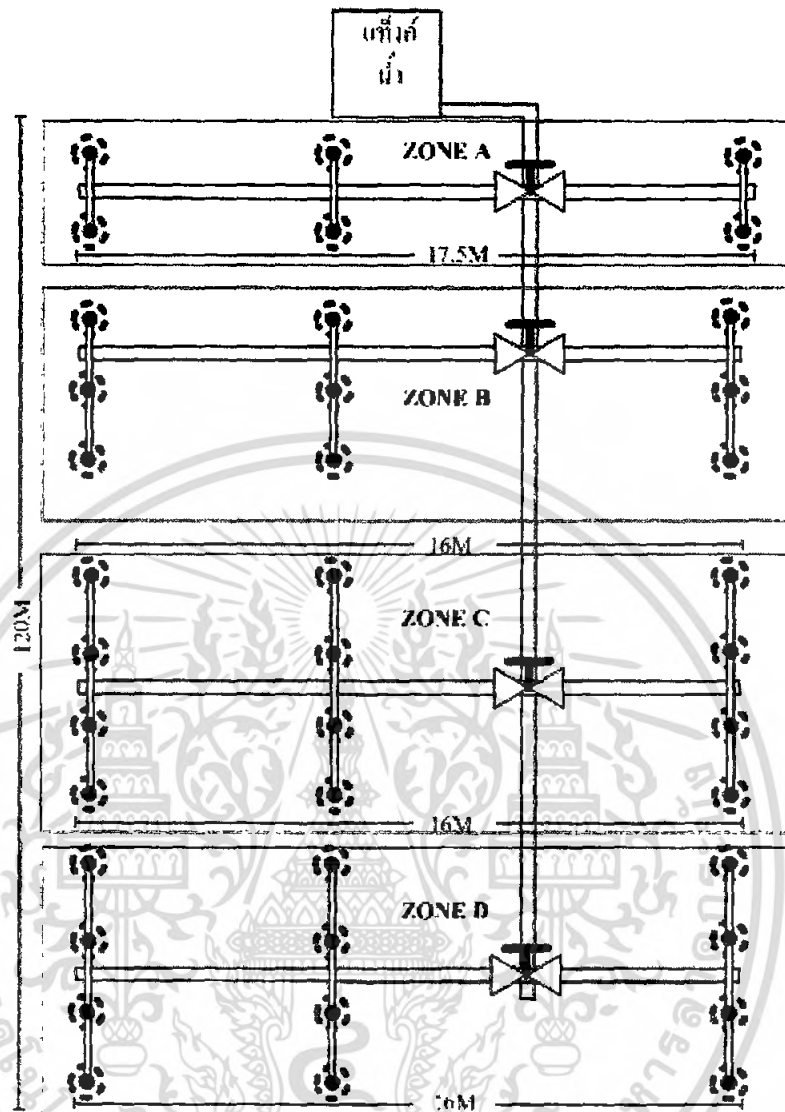


รูปที่ 4.9 การกระจายน้ำเมื่อเปิดวาล์ว (2)



รูปที่ 4.10 การกระจายน้ำเมื่อเปิดวาล์ว (3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 การแบ่งโซนการให้น้ำ

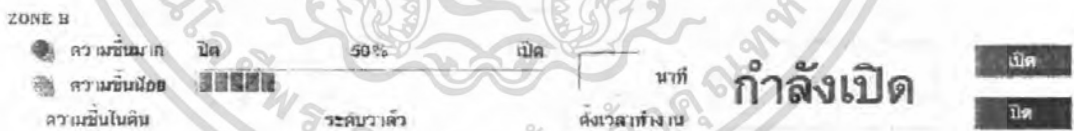
4.1.2 การทำงานแบบอัตโนมัติ

ในการทำงานแบบอัตโนมัติจะเป็นการตรวจวัดค่าความชื้นในดินในแต่ละโซน เพื่อที่จะรดน้ำในพื้นที่นั้นจะไม่สามารถเลือกเวลาการทำงานได้ ซึ่งจะมี LED แสดงสถานะค่าความชื้นในแต่ละโซนถ้าความชื้นน้อยขาล้วในโซนนั้นก็จะเป็นเปิดเพื่อทำการรดน้ำ ซึ่งค่าความชื้นที่ได้จะอยู่ในรูปของแรงดันและนำค่าแรงดันที่ได้แปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล (A DC) เพื่อเป็นค่าที่ใช้ในการตั้งค่าเซ็นเซอร์ การที่จะกำหนดให้น้ำรดตามปริมาณความชื้นต้องขึ้นกับฤดูเนื่องจากในแต่ละฤดูพืชต้องการน้ำที่ไม่เท่ากัน ซึ่งในการทดลองได้ทดลองในช่วงฤดูหนาว ได้กำหนดให้ค่าความชื้นที่จะรดอยู่ที่ 5 % และจะหยุดที่ 40 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



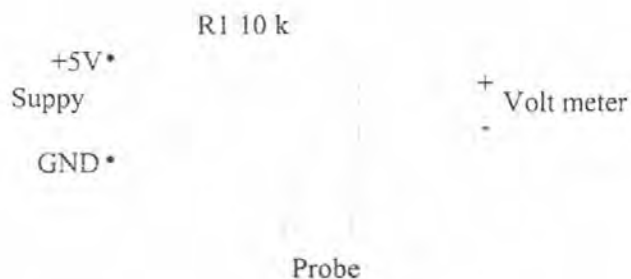
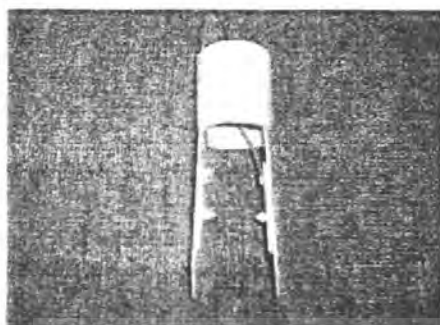
รูปที่ 4.12 การทำงานแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 4.13 การทำงานของ ZONE B เมื่อความชื้นลดต่ำลง

เมื่อ ZONE B ทำงานเสร็จค่าความชื้นถึงค่าที่ตั้งไว้ก็จะย้ายมาทำงานที่ ZONE C ส่วนที่เหลือจะยังไม่ทำงานเพราะดินในส่วนนั้นยังมีความชื้นอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะอุปกรณ์ทดสอบความชื้นในดินที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.15 แสดงการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความชื้นดิน

หัวสปริงเกลอร์ที่เลือกใช้ในการทดลองที่มีอัตราการให้น้ำ 200 ลิตร/ชม. เนื่องจากเวลาในการรดน้ำใช้เวลาน้อยแต่ต้องการให้น้ำกับพืชที่เพียงพอ ในการทดลองใช้เวลาในการรดเพียง 5 นาที จะทำให้ได้น้ำเป็นปริมาณ 16.6 ลิตร และการวางสปริงเกลอร์จะวาง 2 หัวต่อ 1 ต้น ซึ่งจะทำให้ได้น้ำที่เพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 หัวสปริงเกอร์ที่ให้น้ำ 200 ลิตร/ชม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปการพัฒนาโครงการ

5.1 สรุปการพัฒนาโครงการ

ระบบที่นำมาใช้มีการออกแบบใช้สามารถใช้งานได้กับหลายพื้นที่ ไม่เจาะจงเพราะในพื้นที่เชิงเขาเท่านั้น และมีความยืดหยุ่นสามารถปรับเปลี่ยนการใช้งานกับพืชได้หลายชนิด ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- 5.1.1 สามารถควบคุมความชื้นของดินได้ตามความต้องการของผู้ใช้ได้
- 5.1.2 สามารถเลือกเปิดวาล์วน้ำในแต่ละโซนได้ตามความต้องการโดยอิสระต่อกัน
- 5.1.3 สามารถนำไปใช้ได้กับพืชหลายชนิดที่ต้องการปริมาณน้ำอย่างเพียงพอ เช่น ลำไย ทุเรียน และกล้วยไม้ เป็นต้น

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

- 5.2.1 การควบคุมตำแหน่งเปิด ปิดมอเตอร์ที่ต้องการแรงดันในการควบคุมที่แม่นยำ
- 5.2.2 แรงดันน้ำที่ใช้ในการทดลองมีแรงดันน้อยเนื่องจากเป็นการปล่อยให้น้ำไหลจากแท็งก์ตามแรงโน้มถ่วง
- 5.2.3 ขาดเครื่องมือที่ใช้วัดเทียบกับเซนเซอร์ที่ทำงานและชุดวัดอัตราการไหลของน้ำ

5.3 แนวทางการพัฒนาต่อ

การจัดสรรและออกแบบระบบจ่ายน้ำสำหรับพื้นที่เชิงเขาด้วยระบบไอทีไร้สายนี้ได้ทำการทดลองกับสวนลำไยเท่านั้นซึ่งการทำงานจะเป็นการให้ผู้ใช้ป้อนค่าในเวลาและเลือกโซนได้ตามต้องการโดยผ่าน โปรแกรมแสดงผลแบบ(GUI) ซึ่งต่อไปที่จะพัฒนาให้สามารถทำการสั่งการเปิดปิดระบบ โดยผ่านระบบอินเทอร์เน็ต (Internet) เพื่อให้เกิดความสะดวกต่อการใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

กรวุฒิ เฉลิมมีกุล และกฤษณะ พุทธิจักร. 2548. การออกแบบและสร้างชุดทดลองการควบคุมระดับน้ำและอัตราการไหล. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

คอนสัน ปงผาน และทิพวัลย์ คำน้ำนอง. 2550. ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC และการประยุกต์ใช้งาน. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

ดิเรก ทองอร่าม, วิทยา ตั้งก่อสกุล, นาวิ จิระชีวี และอิทธิสุนทร นันทกิจ. การออกแบบและเทคโนโลยีการให้น้ำแก่พืช. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : บริษัท ฐานการพิมพ์ จำกัด.

ประจัน พลังสันติกุล. 2521. เรียนรู้และใช้งาน CCS C คอมไพเลอร์. กรุงเทพฯ : บริษัท อินโนเวทีฟ เอกเพอริเมนต์ จำกัด.

ประจัน พลังสันติกุล. 2537. PIC Works Examples and C Source Code. กรุงเทพฯ : บริษัท แอพซอฟต์แวร์ จำกัด.

สัจจะ จรัสรุ่งรวีวร. 2548. คู่มือการเขียนโปรแกรม Visual Basic 6 ฉบับผู้เริ่มต้น. นนทบุรี : บริษัท ไอดีซี อินโฟ ดิสทริบิวเตอร์ เซ็นเตอร์ จำกัด.

Holger karl. 2005. Protocols and architectures for wireless sensor networks. Andreas Willig Chichester : John Wiley.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

รายละเอียดของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

```
#include <16F877A.h>
#device ADC=10

#fuses HS,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP
#use delay(clock=20000000)
#use rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7, bits=8)

float po1,po2;
int16 value0,value1,value2;
char datain,sdin[4],ch;
int i=0,scale=0,data1,data2,sensor1,sensor2,sensor3,sensor4;

void main(void){

setup_adc_ports(ALL_ANALOG);
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);

while (TRUE){

if(kbhit()){
    datain=getc();
    sdin[i]=datain;
    i++;
}
else{
    set_adc_channel(1);
    delay_us(10);
    value0 = read_adc();
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

delay_us(10);
sensor1 = 100 - (value0 * (5.0/1024)*26.5);

set_adc_channel(2);
delay_us(10);
value0 = read_adc();
delay_us(10);
sensor2 = 100 - (value0 * (5.0/1024)*26.5);

set_adc_channel(4);
delay_us(10);
value0 = read_adc();
delay_us(10);
sensor3 = 100 - (value0 * (5.0/1024)*26.5);

set_adc_channel(5);
delay_us(10);
value0 = read_adc();
delay_us(10);
sensor4 = 100 - (value0 * (5.0/1024)*26.5);
Data1 = (sensor1+sensor2)/2;
if(0<=Data1 && Data1<=10){
    ch = 'A';
    putc(ch);
}
if(80<=Data1 && Data1<=100){
    ch = 'B';
    putc(ch); }
Data2 = (sensor3+sensor4)/2;
if(0<=Data2 && Data2<=10){

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    ch = 'C';
    putc(ch);
}
if(80<=Data2 && Data2<=100){
    ch = 'D';
    putc(ch);
}
}
if(sdin[0]!=0){
    i=0;
}
if(i==4){
    if(sdin[1]==1){
        if(sdin[2]==1){
            if(sdin[3]==1){
                set_adc_channel(6);
                delay_ms(10);
                value1 = read_adc();
                po1 = value1 * (5.0/1024);
                scale = 22 - ((2.9 - po1)*9.7);
                printf("%d",scale);
                delay_ms(500);
                if(po1>0.64){
                    while(po1>0.64){
                        output_high(PIN_D1);
                        output_low(PIN_D0);
                        set_adc_channel(6);
                        delay_ms(10);
                        value1 = read_adc();
                        delay_ms(10);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    po1 = value1 * (5.0/1024);
    scale = 22 - ((2.9 - po1)*9.7);
    printf("%d",scale);
    delay_ms(2000);
}
output_low(PIN_D1);
}

sdin[0] = 0; sdin[1] = 0; sdin[2] = 0; sdin[3] = 0;
i=0;
printf("N");
}
if(sdin[3]==2){
set_adc_channel(6);
delay_ms(10);
value1 = read_adc();
delay_ms(10);
po1 = value1 * (5.0/1024);
scale = 22 - ((2.9 - po1)*9.7);
printf("%d",scale);
delay_ms(500);
if(po1<2.9){
while(po1<2.9){
output_low(PIN_D1);
output_high(PIN_D0);
set_adc_channel(6);
delay_ms(10);
value1 = read_adc();
delay_ms(10);
po1 = value1 * (5.0/1024);
scale = 22 - ((2.9 - po1)*9.7);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

        delay_ms(2000);
    }
    output_low(PIN_D3);
}

sdin[0] = 0; sdin[1] = 0; sdin[2] = 0; sdin[3] = 0;

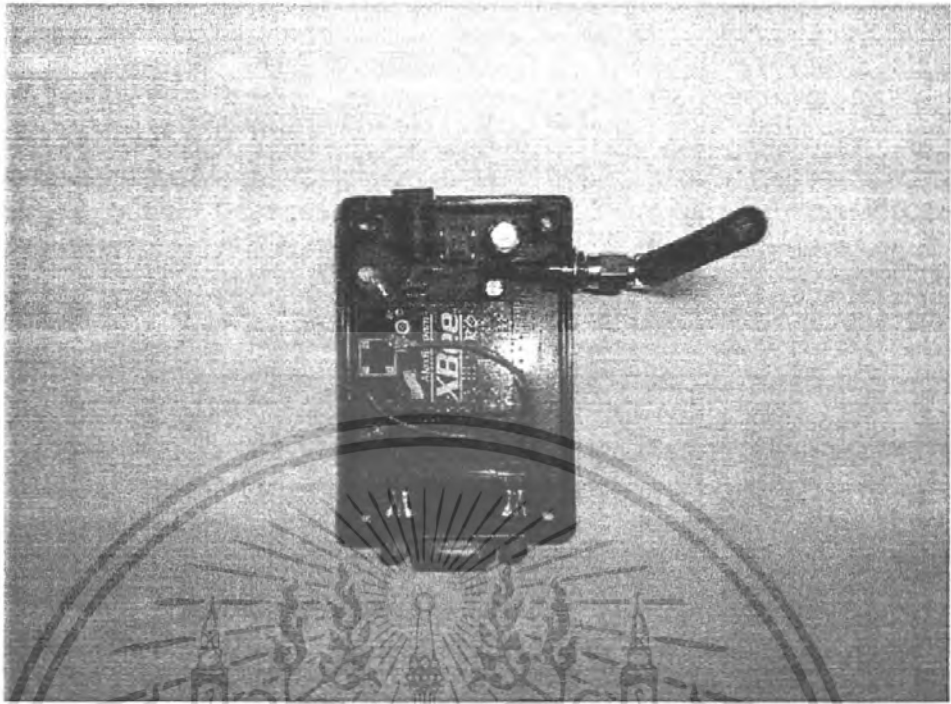
i=0;
printf("N");
}
if(sdin[3]==2){
    set_adc_channel(7);
    delay_ms(10);
    value2 = read_adc();
    delay_ms(10);
    po2 = value2 * (5.0/1024);
    scale = 22 - ((2.9 - po2)*9.7);
    printf("%d",scale);
    delay_ms(500);
    if(po2<2.9){
        while(po2<2.9){
            output_low(PIN_D3);
            output_high(PIN_D2);
            set_adc_channel(7);
            delay_ms(10);
            value2 = read_adc();
            delay_ms(10);
            po2 = value2 * (5.0/1024);
            scale = 22 - ((2.9 - po2)*9.7);
            printf("%d",scale);
            delay_ms(2000);
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

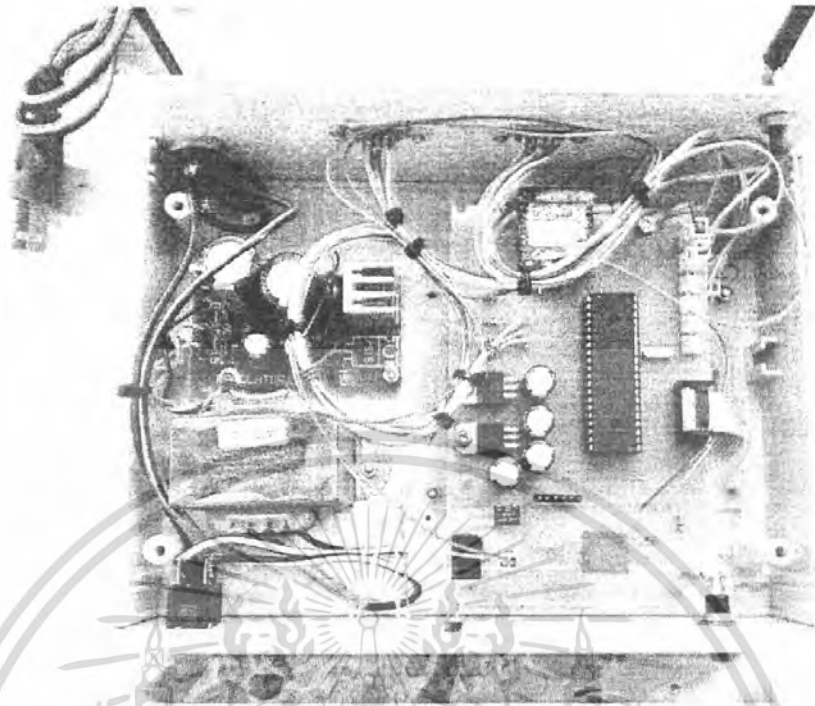


รูปที่ ข-1 ภาพถ่ายภายในเครื่องส่ง

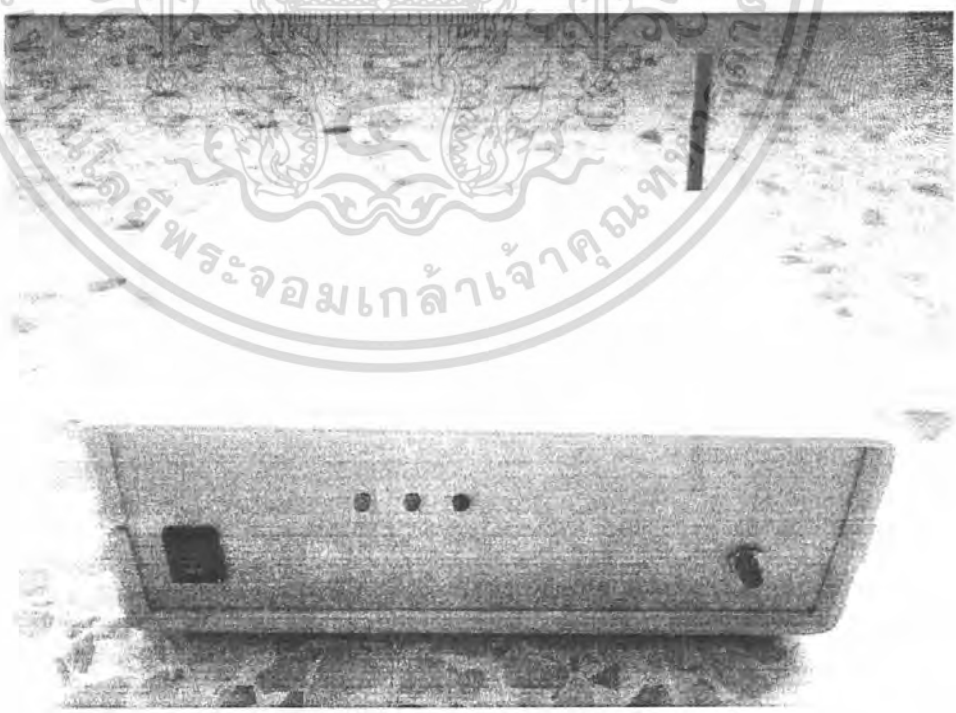


รูปที่ ข-2 ภาพถ่ายภายนอกเครื่องส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

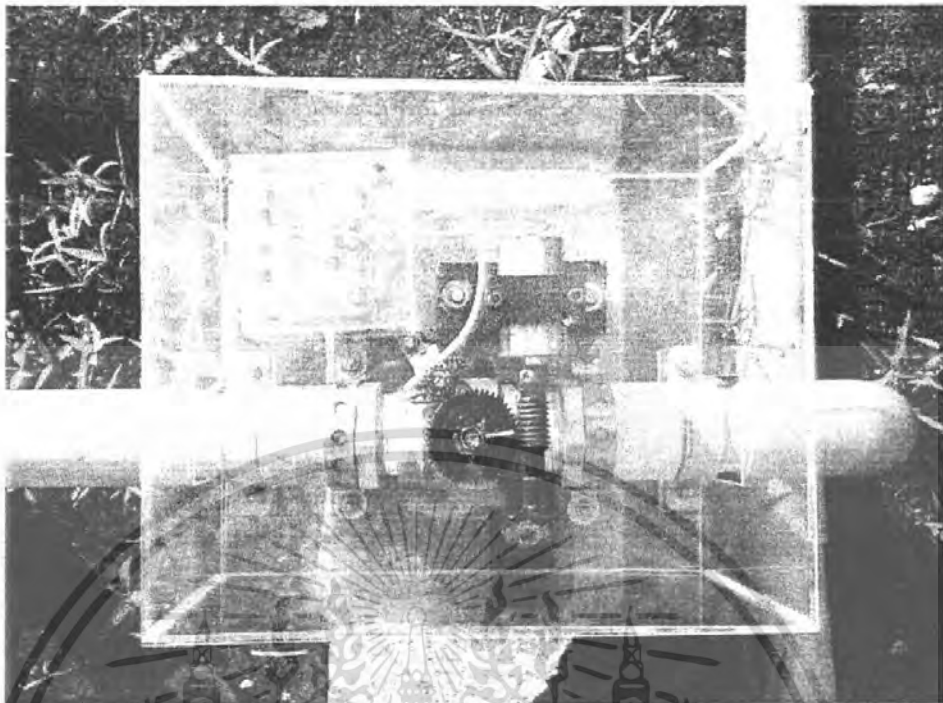


รูปที่ ข-3 ภาพถ่ายภายในเครื่องรับ

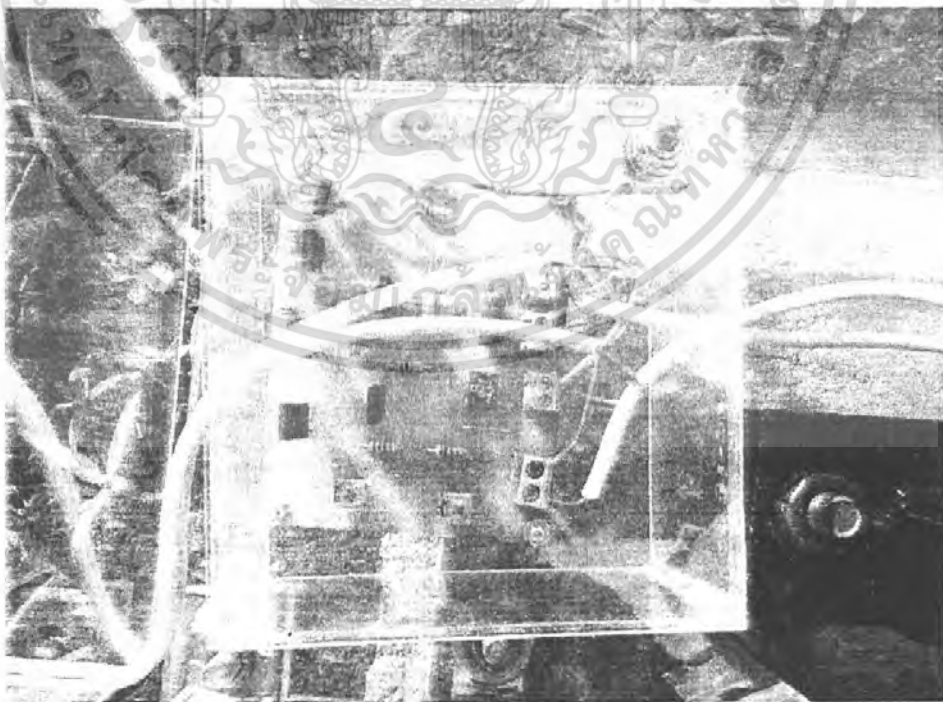


รูปที่ ข-4 ภาพถ่ายภายนอกเครื่องส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-5 ชุดควบคุมวาล์ว



รูปที่ ข-6 วงจรขับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XBee™/XBee-PRO™ OEM RF Modules

XBee/XBee-PRO OEM RF Modules
RF Module Operation
RF Module Configuration
Appendices



Product Manual v1.xAx - 802.15.4 Protocol

For OEM RF Module Part Numbers: XB24-...-001, XBP24-...-001

IEEE® 802.15.4 OEM RF Modules by MaxStream, Inc.



MaxStream

355 South 520 West, Suite 180

Lindon, UT 84042

Phone: (801) 765-9885

Fax: (801) 765-9895

rf-xperts@maxstream.net

www.MaxStream.net (live chat support)

M100232

2006.10.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© 2006 MaxStream, Inc. All rights reserved

The contents of this manual may not be transmitted or reproduced in any form or by any means without the written permission of MaxStream, Inc.

XBee™ and XBee-PRO™ are trademarks of MaxStream, Inc.

Technical Support:

Phone: (801) 765-9885

Live Chat: www.maxstream.net

E-mail: rf-xperts@maxstream.net



Contents

1. XBee/XBee-PRO OEM RF Modules	4	Appendix A: Agency Certifications	57
1.1. Key Features	4	United States (FCC)	57
1.1.1. Worldwide Acceptance	4	OEM Labeling Requirements	57
1.2. Specifications	5	FCC Notices	57
1.3. Mechanical Drawings	6	FCC-Approved Antennas (2.4 GHz)	58
1.4. Mounting Considerations	6	Europe (ETSI)	59
1.5. Pin Signals	7	OEM Labeling Requirements	59
1.6. Electrical Characteristics	8	Restrictions	59
2. RF Module Operation	9	Declarations of Conformity	59
2.1. Serial Communications	9	Approved Antennas	60
2.1.1. UART Data Flow	9	Canada (IC)	60
2.1.2. Transparent Operation	10	Labeling Requirements	60
2.1.3. API Operation	10	Japan	60
2.1.4. Flow Control	11	Labeling Requirements	60
2.2. ADC and Digital I/O Line Support	12	Appendix B: Development Guide	61
2.2.1. I/O Data Format	12	Development Kit Contents	61
2.2.2. API Support	13	Interfacing Options	61
2.2.3. Sleep Support	13	RS-232 Development Board	62
2.2.4. DIO Pin Change Detect	13	External Interface	62
2.2.5. Sample Rate (Interval)	13	RS-232 Pin Signals	63
2.2.6. I/O Line Passing	14	Wiring Diagrams	64
2.2.7. Configuration Example	14	Adapters	65
2.3. XBee/XBee-PRO Networks	15	USB Development Board	66
2.3.1. NonBeacon	15	External Interface	66
2.3.2. NonBeacon (w/ Coordinator)	15	USB Pin Signals	66
2.3.3. Association	16	X-CTU Software	67
2.4. XBee/XBee-PRO Addressing	19	Installation	67
2.4.1. Unicast Mode	19	Serial Communications Software	67
2.4.2. Broadcast Mode	19	Appendix C: Additional Information	68
2.5. Modes of Operation	20	1-Year Warranty	68
2.5.1. Idle Mode	20	Ordering Information	68
2.5.2. Transmit/Receive Modes	20	Contact MaxStream	69
2.5.3. Sleep Mode	22		
2.5.4. Command Mode	24		
3. RF Module Configuration	25		
3.1. Programming the RF Module	25		
3.1.1. Programming Examples	25		
3.2. Command Reference Tables	26		
3.3. Command Descriptions	33		
3.4. API Operation	52		
3.4.1. API Frame Specifications	52		
3.4.2. API Types	53		



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.



1.1. Key Features

Long Range Data Integrity

XBee

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

XBee-PRO

- Indoor/Urban: up to 300' (100 m)
- Outdoor line-of-sight: up to 1 mile (1500 m)
- Transmit Power: 100 mW (20 dBm) EIRP
- 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
- Coordinator/End Device operations

Low Power

XBee

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

XBee-PRO

- TX Current: 215 mA (@3.3 V)
- RX Current: 55 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10 μ A

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
- Free & Unlimited RF-XPert Support**

1.1.1. Worldwide Acceptance

FCC Approval (USA) Refer to Appendix A [p57] for FCC Requirements. Systems that contain XBee/XBee-PRO RF Modules inherit MaxStream Certifications.

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

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

XBee/XBee-PRO RF Modules are optimized for use in the **United States, Canada, Australia, Israel and Europe**. Contact MaxStream for complete list of government agency approvals.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2. Specifications

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

Specification	XBee	XBee-PRO
Performance		
Indoor/Urban Range	up to 100 ft. (30 m)	Up to 300' (100 m)
Outdoor RF line-of-sight Range	up to 300 ft. (100 m)	Up to 1 mile (1500 m)
Transmit Power Output (software selectable)	1mW (0 dBm)	60 mW (18 dBm) conducted, 100 mW (20 dBm) EIRP*
RF Data Rate	250,000 bps	250,000 bps
Serial Interface Data Rate (software selectable)	1200 - 115200 bps (non-standard baud rates also supported)	1200 - 115200 bps (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)	If PL=0 (10dBm): 137mA(@3.3V), 139mA(@3.0V) PL=1 (12dBm): 155mA (@3.3V), 153mA(@3.0V) PL=2 (14dBm): 170mA (@3.3V), 171mA(@3.0V) PL=3 (16dBm): 188mA (@3.3V), 185mA(@3.0V) PL=4 (18dBm): 215mA (@3.3V), 227mA(@3.0V)
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	Integrated Whip, Chip or U.FL 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	
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	n/a	005NYCA0378 (Max. 10 dBm transmit power output)**

* When operating in Europe: XBee-PRO RF Modules must be configured to operate at a maximum transmit power output level of 10 dBm. The power output level is set using the PL command. The PL parameter must equal "0" (10 dBm).

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 high-gain antennas.

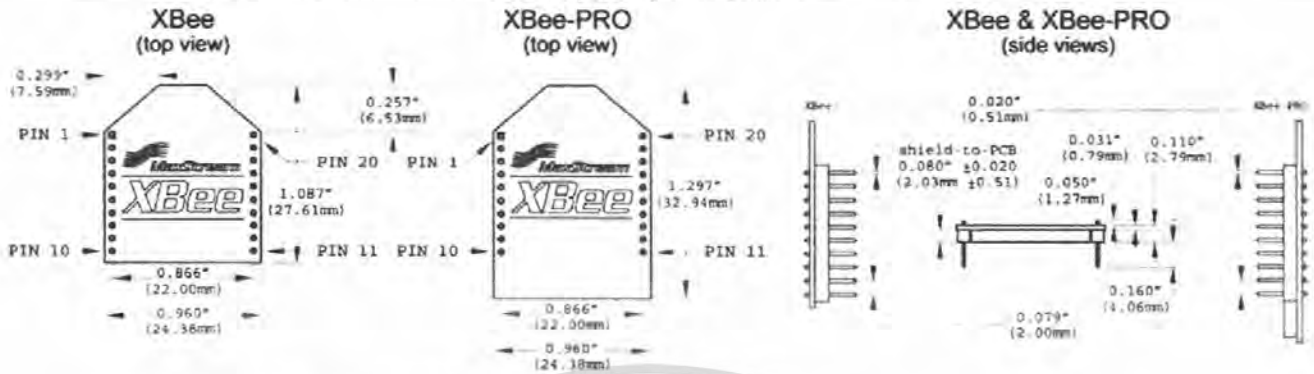
** When operating in Japan: Transmit power output is limited to 10 dBm. A special part number is required when ordering modules approved for use in Japan. Contact MaxStream for more information [call 1-801-765-9885 or send e-mails to sales@maxstream.net].

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 Whip and Dipole antenna options when transmitting outdoors. For more information, refer to the "XBee Antenna" application note located on MaxStream's web site (<http://www.maxstream.net/support/knowledgebase/article.php?kb=153>).



1.3. Mechanical Drawings

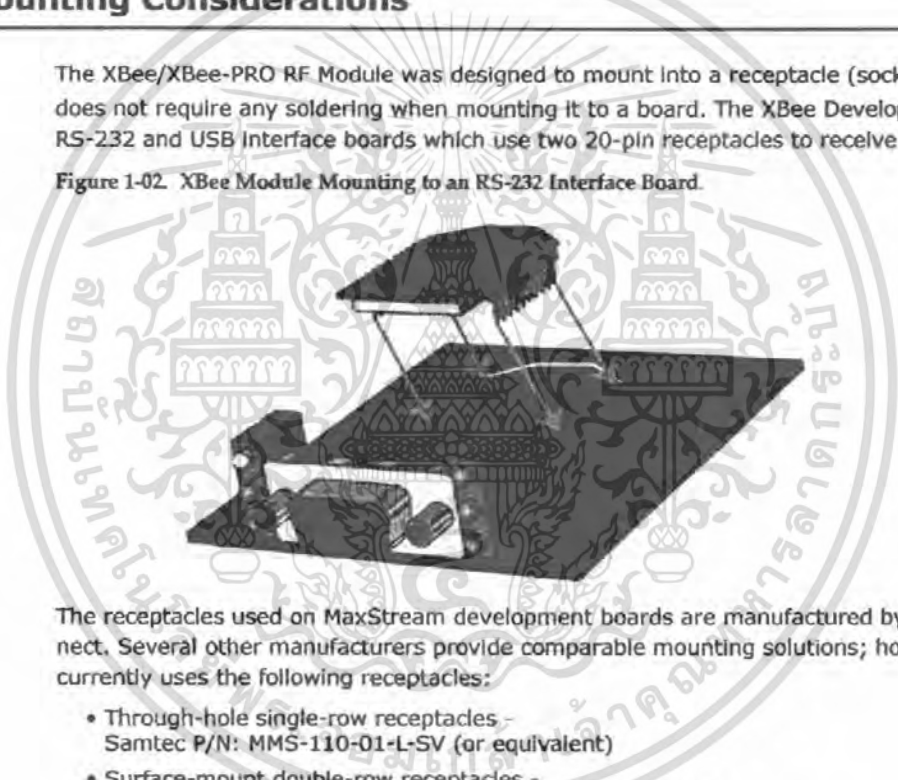
Figure 1-01. Mechanical drawings of the XBee/XBee-PRO OEM RF Modules (antenna options not shown)
The XBee and XBee-PRO RF Modules are pin-for-pin compatible.



1.4. 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 MaxStream development boards are manufactured by Century Interconnect. Several other manufacturers provide comparable mounting solutions; however, MaxStream 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

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

1.5. Pin Signals

Figure 1-03. XBee/XBee-PRO RF Module Pin Numbers
(top sides shown - shields on bottom)

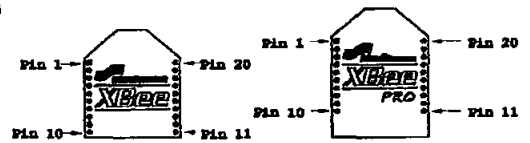


Table 1-02. Pin Assignments for the XBee and XBee-PRO Modules
(Low-asserted signals are distinguished with a horizontal line above signal name.)

Pin #	Name	Direction	Description
1	VCC	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DO8*	Output	Digital Output 8
5	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	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	CTS / DIO7	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / 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	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 RESET
- Several of the input pull-ups can be configured using the PR command
- Unused pins should be left disconnected

1.6. Electrical Characteristics

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

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
V _{IL}	Input Low Voltage	All Digital Inputs	-	-	0.36 * 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 (PRO)	-	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)

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
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 Characteristics¹

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
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).

2. RF Module Operation

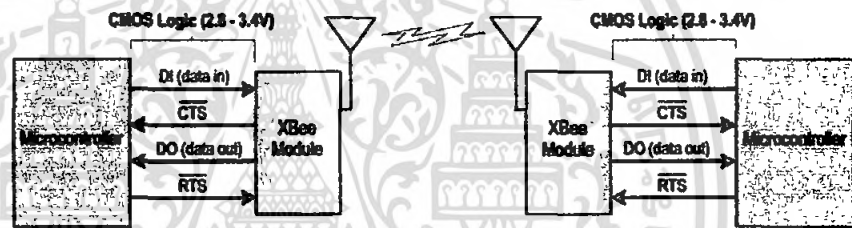
2.1. Serial Communications

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 MaxStream proprietary RS-232 or USB interface board).

2.1.1. 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.)

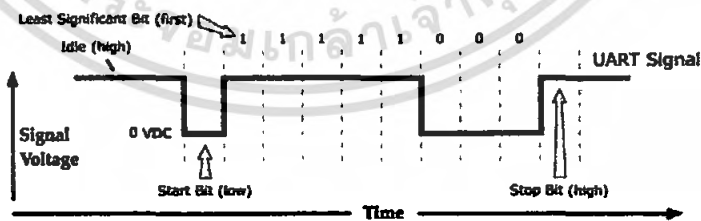


Serial Data

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).

2.1.2. 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).

2.1.3. 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.

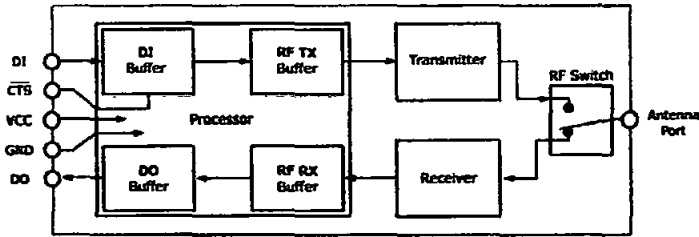
The API operation option facilitates many operations such as the examples cited below:

- > 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 [p52].

2.1.4. 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.
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.

2.2. 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).

Pin Function	Pin#	AT Command
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
DIO8 / (DTR) / (Sleep_RO)	9	D8

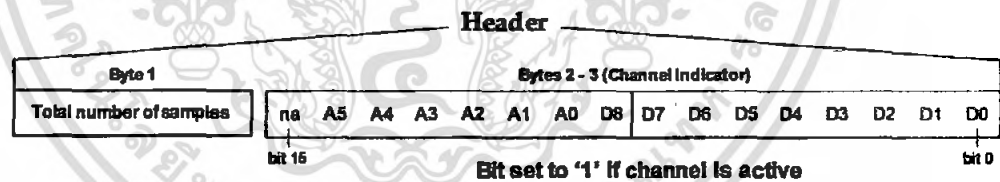
To enable ADC and DIO pin functions:

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

2.2.1. I/O Data Format

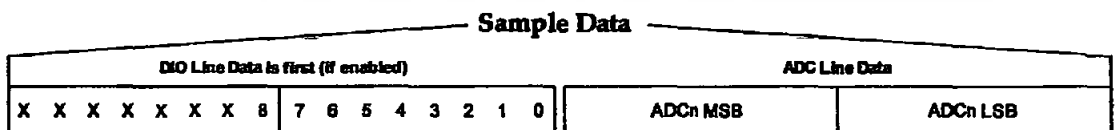
I/O data begins with a header. The first byte of the header defines the number of samples forthcoming. A sample is comprised of input data and the inputs can contain either DIO or ADC. The last 2 bytes of the header (Channel Indicator) define which inputs are active. Each bit represents either a DIO 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 data and the ADC data follows. ADC channel data is stored as an unsigned 10-bit value right-justified on a 16-bit boundary.

Figure 2-05. Sample Data



2.2.2. 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:

- 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: 16-bit Address" API types [refer to p56]. RX data follows the format described in the I/O Data Format section [p12].

Applicable Commands: AP (API Enable)

2.2.3. Sleep Support

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)

2.2.4. 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.

2.2.5. 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 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").

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

2.2.6. 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 its 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 can not 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)

2.2.7. 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.



2.3. XBee/XBee-PRO Networks

The following IEEE 802.15.4 network types are supported by the XBee/XBee-PRO RF modules:

- NonBeacon
- NonBeacon (w/ Coordinator)

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

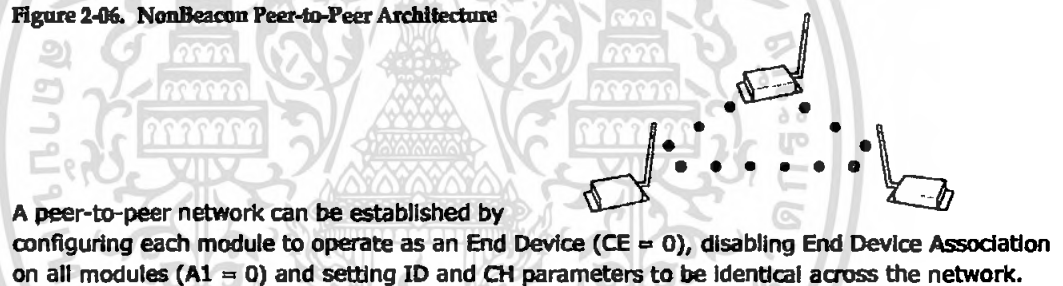
Table 2-02. Terms and definitions

Term	Definition
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.

2.3.1. NonBeacon

By default, XBee/XBee-PRO RF Modules are configured to support NonBeacon communications. 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. MaxStream'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. NonBeacon Peer-to-Peer Architecture



2.3.2. 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 NonBeacon (w/ 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.

Association plays a critical role in the implementation of a NonBeacon (w/ Coordinator) system. Refer to the Association section [next page] for more information.

2.3.3. Association

Association is the establishment of membership between End Devices and a Coordinator and is only applicable in NonBeacon (w/ Coordinator) networks. 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

In a NonBeacon (w/ 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.

Coordinator Power-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 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 (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.



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 Power-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.

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.

2.4. 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 Destination Address (DL + DH) 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 and set the DH (Destination Address High) parameter to '0'.

2.4.1. 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)

Parameter	RF Module 1	RF Module 2
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 (set 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 one module must match the Source Address (SL + SH) of the other.

2.4.2. 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)

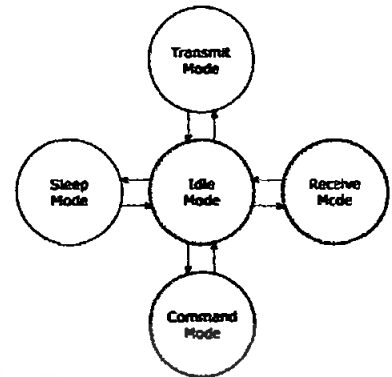
NOTE: When programming the module, parameters are entered in hexadecimal notation (without the "0x" prefix). Leading zeros may be omitted.



2.5. Modes of Operation

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

Figure 2-07. Modes of Operation



2.5.1. 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)

2.5.2. 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 \geq 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.



Direct Transmission

A NonBeaconing Coordinator can be configured to use only Direct Transmission by setting the SP (Cyclic Sleep Period) parameter to "0". Also, a NonBeaconing 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 (or number of beacons) 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 SP parameter represents time in NonBeacon systems and beacons in Beacon-enabled systems. 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.

In NonBeacon networks, 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 re-send 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.



2.5.3. 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.
- 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

Sleep Mode Setting	Transition Into Sleep Mode	Transition out of Sleep Mode (wake)	Characteristics	Related Commands	Power Consumption
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 μ A (@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 μ A
Cyclic Sleep (SM = 4 - 5)	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, NonBeacon systems only	(SM), SP, ST	< 50 μ A 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.

Higher Voltages. Sleep Mode current consumption is highly sensitive to voltage. Voltages above 3.0V will cause much higher current consumption.

Table 2-05. Sample Sleep Mode Currents

Vcc (V)	XBee			XBee-PRO		
	SM=1	SM=2	SM=4,5	SM=1	SM=2	SM=4,5
2.8-3.0	<3 μ A	<35 μ A	<34 μ A	<4 μ A	<34 μ A	<34 μ A
3.1	8 μ A	37 μ A	36 μ A	12 μ A	39 μ A	37 μ A
3.2	32 μ A	48 μ A	49 μ A	45 μ A	60 μ A	55 μ A
3.3	101 μ A	83 μ A	100 μ A	130 μ A	115 μ A	120 μ A
3.4	255 μ A	170 μ A	240 μ A	310 μ A	260 μ A	290 μ A

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 μ A (@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 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 $\overline{\text{CTS}}$ line is low. When waking the module, the pin must be de-asserted at least two 'byte times' after $\overline{\text{CTS}}$ 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 μ A
- 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 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 μ A (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 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 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.



2.5.4. 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 [p52].

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]

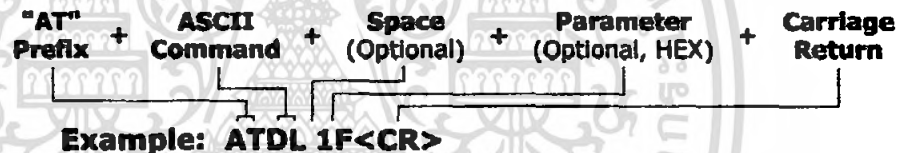
All of the parameter values in the sequence can be modified to reflect user preferences.

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].



3. RF Module Configuration

3.1. Programming the RF Module

Refer to the Command Mode section [p24] for more information about entering Command Mode, sending AT commands and exiting Command Mode. For information regarding module programming using API Mode, refer to the API Operation sections [p52].

3.1.1. Programming Examples

Refer to the 'X-CTU' section of the Development Guide [Appendix B] for more information regarding the X-CTU configuration software.

Setup

The programming examples in this section require the installation of MaxStream's X-CTU Software and a serial connection to a PC. (MaxStream stocks RS-232 and USB boards to facilitate interfacing with a PC.)

1. Install MaxStream's X-CTU Software to a PC by double-clicking the "setup_X-CTU.exe" file. (The file is located on the MaxStream CD and under the 'Software' section of the following web page: www.maxstream.net/support/downloads.php)
2. Mount the RF module to an interface board, then connect the module assembly to a PC.
3. Launch the X-CTU Software and select the 'PC Settings' tab. Verify the baud and parity settings of the Com Port match those of the RF module.

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 (which corresponds to 9600 bps).

Sample Configuration: Modify RF Module Destination Address

Example: Utilize the X-CTU "Terminal" tab to change the RF module's DL (Destination Address Low) parameter and save the new address to non-volatile memory.

After establishing a serial connection between the RF module and a PC [refer to the 'Setup' section above], select the "Terminal" tab of the X-CTU Software and enter the following command lines ('CR' stands for carriage return):

Method 1 (One line per command)

Send AT Command	System Response
+++	OK <CR> (Enter Into Command Mode)
ATDL <Enter>	{current value} <CR> (Read Destination Address Low)
ATDL1A0D <Enter>	OK <CR> (Modify Destination Address Low)
ATWR <Enter>	OK <CR> (Write to non-volatile memory)
ATCN <Enter>	OK <CR> (Exit Command Mode)

Method 2 (Multiple commands on one line)

Send AT Command	System Response
+++	OK <CR> (Enter into Command Mode)
ATDL <Enter>	{current value} <CR> (Read Destination Address Low)
ATDL1A0D,WR,CN <Enter>	OK, OK, OK <CR> (Command execution is triggered upon each instance of the comma)

Sample Configuration: Restore RF Module Defaults

Example: Utilize the X-CTU "Modem Configuration" tab to restore default parameter values.

After establishing a connection between the module and a PC [refer to the 'Setup' section above], select the "Modem Configuration" tab of the X-CTU Software.

1. Select the 'Read' button.
2. Select the 'Restore' button.



3.2. Command Reference Tables

XBee/XBee-PRO RF Modules expect numerical values in hexadecimal. Hexadecimal values are designated by a "0x" prefix. Decimal equivalents are designated by a "d" suffix. Commands are contained within the following command categories (listed in the order that their tables appear):

- Special
- Networking & Security
- RF Interfacing
- Sleep (Low Power)
- Serial Interfacing
- I/O Settings
- Diagnostics
- AT Command Options

All modules within a PAN should operate using the same firmware version.

Special

Table 3-01. XBee-PRO Commands - Special

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
WR	Special	Write. Write parameter values to non-volatile memory so that parameter modifications persist through subsequent power-up or reset. Note: Once WR is issued, no additional characters should be sent to the module until after the response "OK" is received.	-	-
RE	Special	Restore Defaults. Restore module parameters to factory defaults.	-	-
FR (v1.x80*)	Special	Software Reset. Responds immediately with an OK then performs a hard reset ~100ms later.	-	-

* Firmware version in which the command was first introduced (firmware versions are numbered in hexadecimal notation.)

Networking & Security

Table 3-02. XBee/XBee-PRO Commands - Networking & Security (Sub-categories designated within [brackets])

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
CH	Networking (Addressing)	Channel. Set/Read the channel number used for transmitting and receiving data between RF modules (uses 802.15.4 protocol channel numbers).	0x0B - 0x1A (XBee) 0x0C - 0x17 (XBee-PRO)	0x0C (12d)
ID	Networking (Addressing)	PAN ID. Set/Read the PAN (Personal Area Network) ID. Use 0xFFFF to broadcast messages to all PANs.	0 - 0xFFFF	0x3332 (13106d)
DH	Networking (Addressing)	Destination Address High. Set/Read the upper 32 bits of the 64-bit destination address. When combined with DL, it defines the destination address used for transmission. To transmit using a 16-bit address, set DH parameter to zero and DL less than 0xFFFF. 0x000000000000FFFF is the broadcast address for the PAN.	0 - 0xFFFFFFFF	0
DL	Networking (Addressing)	Destination Address Low. Set/Read the lower 32 bits of the 64-bit destination address. When combined with DH, DL defines the destination address used for transmission. To transmit using a 16-bit address, set DH parameter to zero and DL less than 0xFFFF. 0x000000000000FFFF is the broadcast address for the PAN.	0 - 0xFFFFFFFF	0
MY	Networking (Addressing)	16-bit Source Address. Set/Read the RF module 16-bit source address. Set MY = 0xFFFF to disable reception of packets with 16-bit addresses. 64-bit source address (serial number) and broadcast address (0x000000000000FFFF) is always enabled.	0 - 0xFFFF	0
SH	Networking (Addressing)	Serial Number High. Read high 32 bits of the RF module's unique IEEE 64-bit address. 64-bit source address is always enabled.	0 - 0xFFFFFFFF [read-only]	Factory-set
SL	Networking (Addressing)	Serial Number Low. Read low 32 bits of the RF module's unique IEEE 64-bit address. 64-bit source address is always enabled.	0 - 0xFFFFFFFF [read-only]	Factory-set
RR (v1.xA0*)	Networking (Addressing)	XBee Retries. Set/Read the maximum number of retries the module will execute in addition to the 3 retries provided by the 802.15.4 MAC. For each XBee retry, the 802.15.4 MAC can execute up to 3 retries.	0 - 6	0
RN	Networking (Addressing)	Random Delay Slots. Set/Read the minimum value of the back-off exponent in the CSMA-CA algorithm that is used for collision avoidance. If RN = 0, collision avoidance is disabled during the first iteration of the algorithm (802.15.4 - macMinBE).	0 - 3 [exponent]	0
MM (v1.x80*)	Networking (Addressing)	MAC Mode. Set/Read MAC Mode value. MAC Mode enables/disables the use of a MaxStream header in the 802.15.4 RF packet. When Mode 0 is enabled (MM=0), duplicate packet detection is enabled as well as certain AT commands. Modes 1 and 2 are strict 802.15.4 modes.	0 - 2 0 = MaxStream Mode 1 = 802.15.4 (no ACKs) 2 = 802.15.4 (with ACKs)	0

Table 3-02. XBee/XBee-PRO Commands - Networking & Security (Sub-categories designated within [brackets])

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
NI (v1.x80*)	Networking (Identification)	Node Identifier. Stores a string identifier. The register only accepts printable ASCII data. A string can not start with a space. Carriage return ends command. Command will automatically end when maximum bytes for the string have been entered. This string is returned as part of the ND (Node Discover) command. This identifier is also used with the DN (Destination Node) command.	20-character ASCII string	-
ND (v1.x80*)	Networking (Identification)	Node Discover. Discovers and reports all RF modules found. The following information is reported for each module discovered (the example cites use of Transparent operation (AT command format) - refer to the long ND command description regarding differences between Transparent and API operation). MY<CR> SH<CR> SL<CR> DB<CR> NI<CR><CR> The amount of time the module allows for responses is determined by the NT parameter. In Transparent operation, command completion is designated by a <CR> (carriage return). ND also accepts a Node Identifier as a parameter. In this case, only a module matching the supplied identifier will respond.	optional 20-character NI value	
NT (v1.xA0*)	Networking (Identification)	Node Discover Time. Set/Read the amount of time a node will wait for responses from other nodes when using the ND (Node Discover) command.	0x01 - 0xFC	0x19
DN (v1.x80*)	Networking (Identification)	Destination Node. Resolves an NI (Node Identifier) string to a physical address. The following events occur upon successful command execution: 1. DL and DH are set to the address of the module with the matching Node Identifier. 2. "OK" is returned. 3. RF module automatically exits AT Command Mode If there is no response from a module within 200 msec or a parameter is not specified (left blank), the command is terminated and an "ERROR" message is returned.	20-character ASCII string	-
CE (v1.x80*)	Networking (Association)	Coordinator Enable. Set/Read the coordinator setting.	0 - 1 0 = End Device 1 = Coordinator	0
SC (v1.x80*)	Networking (Association)	Scan Channels. Set/Read list of channels to scan for all Active and Energy Scans as a bitfield. This affects scans initiated in command mode (AS, ED) and during End Device Association and Coordinator startup: bit 0 - 0x0B bit 4 - 0x0F bit 8 - 0x13 bit 12 - 0x17 bit 1 - 0x0C bit 5 - 0x10 bit 9 - 0x14 bit 13 - 0x18 bit 2 - 0x0D bit 6 - 0x11 bit 10 - 0x15 bit 14 - 0x19 bit 3 - 0x0E bit 7 - 0x12 bit 11 - 0x16 bit 15 - 0x1A	0 - 0xFFFF [bitfield] (bits 0, 14, 15 not allowed on the XBee-PRO)	0x1FFE (all XBee-PRO Channels)
SD (v1.x80*)	Networking (Association)	Scan Duration. Set/Read the scan duration exponent. End Device - Duration of Active Scan during Association. On beacon system, set SD = BE of coordinator. SD must be set at least to the highest BE parameter of any Beaconsing Coordinator with which an End Device or Coordinator wish to discover. Coordinator - If 'ReassignPANID' option is set on Coordinator [refer to A2 parameter], SD determines the length of time the Coordinator will scan channels to locate existing PANs. If 'ReassignChannel' option is set, SD determines how long the Coordinator will perform an Energy Scan to determine which channel it will operate on. *Scan Time* is measured as (# of channels to scan) * (2 ^ SD) * 15.36ms). The number of channels to scan is set by the SC command. The XBee can scan up to 16 channels (SC = 0xFFFF). The XBee PRO can scan up to 13 channels (SC = 0x3FFE). Example: The values below show results for a 13 channel scan: If SD = 0, time = 0.18 sec SD = 8, time = 47.19 sec SD = 2, time = 0.74 sec SD = 10, time = 3.15 min SD = 4, time = 2.95 sec SD = 12, time = 12.68 min SD = 6, time = 11.80 sec SD = 14, time = 50.33 min	0-0x0F [exponent]	4
A1 (v1.x80*)	Networking (Association)	End Device Association. Set/Read End Device association options. bit 0 - ReassignPanID 0 - Will only associate with Coordinator operating on PAN ID that matches module ID 1 - May associate with Coordinator operating on any PAN ID bit 1 - ReassignChannel 0 - Will only associate with Coordinator operating on matching CH Channel setting 1 - May associate with Coordinator operating on any Channel bit 2 - AutoAssociate 0 - Device will not attempt Association 1 - Device attempts Association until success Note: This bit is used only for Non-Beacon systems. End Devices in Beacon-enabled system must always associate to a Coordinator bit 3 - PollCoordOnPinWake 0 - Pin Wake will not poll the Coordinator for indirect (pending) data 1 - Pin Wake will send Poll Request to Coordinator to extract any pending data bits 4 - 7 are reserved	0 - 0x0F [bitfield]	0

Table 3-02. XBee/XBee-PRO Commands - Networking & Security (Sub-categories designated within (brackets))

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
A2 (v1.x80*)	Networking (Association)	<p>Coordinator Association. Set/Read Coordinator association options.</p> <p>bit 0 - ReassignPanID 0 - Coordinator will not perform Active Scan to locate available PAN ID. It will operate on ID (PAN ID). 1 - Coordinator will perform Active Scan to determine an available ID (PAN ID). If a PAN ID conflict is found, the ID parameter will change.</p> <p>bit 1 - ReassignChannel - 0 - Coordinator will not perform Energy Scan to determine free channel. It will operate on the channel determined by the CH parameter. 1 - Coordinator will perform Energy Scan to find a free channel, then operate on that channel.</p> <p>bit 2 - AllowAssociation - 0 - Coordinator will not allow any devices to associate to it. 1 - Coordinator will allow devices to associate to it.</p> <p>bits 3 - 7 are reserved</p>	0 - 7 [bitfield]	0
AI (v1.x80*)	Networking (Association)	<p>Association Indication. Read errors with the last association request:</p> <p>0x00 - Successful Completion - Coordinator successfully started or End Device association complete 0x01 - Active Scan Timeout 0x02 - Active Scan found no PANs 0x03 - Active Scan found PAN, but the CoordinatorAllowAssociation bit is not set 0x04 - Active Scan found PAN, but Coordinator and End Device are not configured to support beacons 0x05 - Active Scan found PAN, but the Coordinator ID parameter does not match the ID parameter of the End Device 0x06 - Active Scan found PAN, but the Coordinator CH parameter does not match the CH parameter of the End Device 0x07 - Energy Scan Timeout 0x08 - Coordinator start request failed 0x09 - Coordinator could not start due to invalid parameter 0x0A - Coordinator Realignment is in progress 0x0B - Association Request not sent 0x0C - Association Request timed out - no reply was received 0x0D - Association Request had an Invalid Parameter 0x0E - Association Request Channel Access Failure. Request was not transmitted - CCA failure 0x0F - Remote Coordinator did not send an ACK after Association Request was sent 0x10 - Remote Coordinator did not reply to the Association Request, but an ACK was received after sending the request 0x11 - [reserved] 0x12 - Sync-Loss - Lost synchronization with a Beaconing Coordinator 0x13 - Disassociated - No longer associated to Coordinator</p>	0 - 0x13 [read-only]	-
DA (v1.x80*)	Networking (Association)	<p>Force Disassociation. End Device will immediately disassociate from a Coordinator (if associated) and reattempt to associate.</p>	-	-
FP (v1.x80*)	Networking (Association)	<p>Force Poll. Request indirect messages being held by a coordinator.</p>	-	-

Table 3-02. XBee/XBee-PRO Commands - Networking & Security (Sub-categories designated within [brackets])

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
AS (v1.x80*)	Networking (Association)	<p>Active Scan. Send Beacon Request to Broadcast Address (0xFFFF) and Broadcast PAN (0xFFFF) on every channel. The parameter determines the time the radio will listen for Beacons on each channel. A PanDescriptor is created and returned for every Beacon received from the scan. Each PanDescriptor contains the following information: CoordAddress (SH, SL)<CR> CoordPanID (ID)<CR> CoordAddrMode <CR> 0x02 = 16-bit Short Address 0x03 = 64-bit Long Address Channel (CH parameter) <CR> SecurityUse<CR> ACLEntry<CR> SecurityFailure<CR> SuperFrameSpec<CR> (2 bytes): bit 15 - Association Permitted (MSB) bit 14 - PAN Coordinator bit 13 - Reserved bit 12 - Battery Life Extension bits 8-11 - Final CAP Slot bits 4-7 - Superframe Order bits 0-3 - Beacon Order GtsPermit<CR> RSSI<CR> (RSSI is returned as -dBm) TimeStamp<CR> (3 bytes) <CR></p> <p>A carriage return <CR> is sent at the end of the AS command. The Active Scan is capable of returning up to 5 PanDescriptors in a scan. The actual scan time on each channel is measured as Time = [(2 *SD PARAM) * 15.36] ms. Note the total scan time is this time multiplied by the number of channels to be scanned (16 for the XBee and 13 for the XBee-PRO). Also refer to SD command description.</p>	0-6	-
ED (v1.x80*)	Networking (Association)	<p>Energy Scan. Send an Energy Detect Scan. This parameter determines the length of scan on each channel. The maximal energy on each channel is returned & each value is followed by a carriage return. An additional carriage return is sent at the end of the command. The values returned represent the detected energy level in units of -dBm. The actual scan time on each channel is measured as Time = [(2 *ED) * 15.36] ms. Note the total scan time is this time multiplied by the number of channels to be scanned (refer to SD parameter).</p>	0-8	-
EE (v1.xA0*)	Networking (Security)	<p>AES Encryption Enable. Disable/Enable 128-bit AES encryption support. Use in conjunction with the KY command.</p>	0-1	0 (disabled)
KY (v1.xA0*)	Networking (Security)	<p>AES Encryption Key. Set the 128-bit AES (Advanced Encryption Standard) key for encrypting/decrypting data. The KY register cannot be read.</p>	0 - (any 16-Byte value)	-

* Firmware version in which the command was first introduced (firmware versions are numbered in hexadecimal notation.)

RF Interfacing

Table 3-03. XBee/XBee-PRO Commands - RF Interfacing

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
PL	RF Interfacing	<p>Power Level. Select/Read the power level at which the RF module transmits conducted power. NOTE: XBee-PRO RF Modules optimized for use in Japan contain firmware that limits transmit power output to 10 dBm. If PL=4 (default), the maximum power output level is fixed at 10 dBm.</p>	0-4 (XBee / XBee-PRO) 0 = -10 / 10 dBm 1 = -6 / 12 dBm 2 = -4 / 14 dBm 3 = -2 / 16 dBm 4 = 0 / 18 dBm	4
CA (v1.x80*)	RF Interfacing	<p>CCA Threshold. Set/read the CCA (Clear Channel Assessment) threshold. Prior to transmitting a packet, a CCA is performed to detect energy on the channel. If the detected energy is above the CCA Threshold, the module will not transmit the packet.</p>	0-0x50 [-dBm]	0x2C (-44d dBm)

* Firmware version in which the command was first introduced (firmware versions are numbered in hexadecimal notation.)

Sleep (Low Power)

Table 3-04. XBee/XBee-PRO Commands - Sleep (Low Power)

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
SM	Sleep (Low Power)	Sleep Mode. <NonBeacon firmware> Set/Read Sleep Mode configurations.	0 - 5 0 = No Sleep 1 = Pin Hibernate 2 = Pin Doze 3 = Reserved 4 = Cyclic sleep remote 5 = Cyclic sleep remote w/ pin wake-up 6 = [Sleep Coordinator] for backwards compatibility w/ v1.x6 only; otherwise, use CE command.	0
ST	Sleep (Low Power)	Time before Sleep. <NonBeacon firmware> Set/Read time period of inactivity (no serial or RF data is sent or received) before activating Sleep Mode. ST parameter is only valid with Cyclic Sleep settings (SM = 4 - 5). Coordinator and End Device ST values must be equal. Also note, the GT parameter value must always be less than the ST value. (If GT > ST, the configuration will render the module unable to enter into command mode.) If the ST parameter is modified, also modify the GT parameter accordingly.	1 - 0xFFFF [x 1 ms]	0x1388 (5000d)
SP	Sleep (Low Power)	Cyclic Sleep Period. <NonBeacon firmware> Set/Read sleep period for cyclic sleeping remotes. Coordinator and End Device SP values should always be equal. To send Direct Messages, set SP = 0. End Device - SP determines the sleep period for cyclic sleeping remotes. Maximum sleep period is 268 seconds (0x68B0). Coordinator - If non-zero, SP determines the time to hold an indirect message before discarding it. A Coordinator will discard indirect messages after a period of (2.5 * SP).	0 - 0x68B0 [x 10 ms]	0
DP (v1.x80*)	Sleep (Low Power)	Disassociated Cyclic Sleep Period. <NonBeacon firmware> End Device - Set/Read time period of sleep for cyclic sleeping remotes that are configured for Association but are not associated to a Coordinator. (I.e. If a device is configured to associate, configured as a Cyclic Sleep remote, but does not find a Coordinator, it will sleep for DP time before reattempting association.) Maximum sleep period is 268 seconds (0x68B0). DP should be > 0 for NonBeacon systems.	1 - 0x68B0 [x 10 ms]	0x3E8 (1000d)

* Firmware version in which the command was first introduced (firmware versions are numbered in hexadecimal notation.)

Serial Interfacing

Table 3-05. XBee-PRO Commands - Serial Interfacing

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
BD	Serial Interfacing	Interface Data Rate. Set/Read the serial interface data rate for communications between the RF module serial port and host. Request non-standard baud rates with values above 0x80 using a terminal window. Read the BD register to find actual baud rate achieved.	0 - 7 (standard baud rates) 0 = 1200 bps 1 = 2400 2 = 4800 3 = 9600 4 = 19200 5 = 38400 6 = 57600 7 = 115200 0x80 - 0x1C200 (non-standard baud rates)	3
RO	Serial Interfacing	Packetization Timeout. Set/Read number of character times of inter-character delay required before transmission. Set to zero to transmit characters as they arrive instead of buffering them into one RF packet.	0 - 0xFF [x character times]	3
AP (v1.x80*)	Serial Interfacing	API Enable. Disable/Enable API Mode.	0 - 2 0 = Disabled 1 = API enabled 2 = API enabled (w/escaped control characters)	0
PR (v1.x80*)	Serial Interfacing	Pull-up Resistor Enable. Set/Read bitfield to configure internal pull-up resistor status for I/O lines Bitfield Map: bit 0 - AD4/DIO4 (pin11) bit 1 - AD3 / DIO3 (pin17) bit 2 - AD2/DIO2 (pin18) bit 3 - AD1/DIO1 (pin19) bit 4 - AD0 / DIO0 (pin20) bit 5 - RTS / AD6 / DIO6 (pin16) bit 6 - DTR / SLEEP_RQ / DI8 (pin8) bit 7 - DIN/CONFIG (pin3) Bit set to "1" specifies pull-up enabled; "0" specifies no pull-up	0 - 0xFF	0xFF

* Firmware version in which the command was first introduced (firmware versions are numbered in hexadecimal notation.)

I/O Settings

Table 3-06. XBee-PRO Commands - I/O Settings (sub-category designated within [brackets])

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
D8	I/O Settings	D18 Configuration. Select/Read options for the D18 line (pin 9) of the RF module.	0 - 1 0 = Disabled 3 = DI (1,2,4 & 5 n/a)	0
D7 (v1.x80*)	I/O Settings	D107 Configuration. Select/Read settings for the D107 line (pin 12) of the RF module. Options include CTS flow control and I/O line settings.	0 - 1 0 = Disabled 1 = CTS Flow Control 2 = (n/a) 3 = DI 4 = DO low 5 = DO high	1
D6 (v1.x80*)	I/O Settings	D106 Configuration. Select/Read settings for the D106 line (pin 16) of the RF module. Options include RTS flow control and I/O line settings.	0 - 1 0 = Disabled 1 = RTS flow control 2 = (n/a) 3 = DI 4 = DO low 5 = DO high	0
D5 (v1.x80*)	I/O Settings	D105 Configuration. Configure settings for the D105 line (pin 15) of the RF module. Options include Associated LED indicator (blinks when associated) and I/O line settings.	0 - 1 0 = Disabled 1 = Associated indicator 2 = ADC 3 = DI 4 = DO low 5 = DO high	1
D0 - D4 (v1.xA0*)	I/O Settings	(D104 - D104) Configuration. Select/Read settings for the following lines: AD0/DIO0 (pin 20), AD1/DIO1 (pin 19), AD2/DIO2 (pin 18), AD3/DIO3 (pin 17), AD4/DIO4 (pin 11). Options include: Analog-to-digital converter, Digital Input and Digital Output.	0 - 1 0 = Disabled 1 = (n/a) 2 = ADC 3 = DI 4 = DO low 5 = DO high	0
IU (v1.xA0*)	I/O Settings	I/O Output Enable. Disables/Enables I/O data received to be sent out UART. The data is sent using an API frame regardless of the current AP parameter value.	0 - 1 0 = Disabled 1 = Enabled	1
IT (v1.xA0*)	I/O Settings	Samples before TX. Set/Read the number of samples to collect before transmitting data. Maximum number of samples is dependent upon the number of enabled inputs.	1 - 0xFF	1
IS (v1.xA0*)	I/O Settings	Force Sample. Force a read of all enabled inputs (DI or ADC). Data is returned through the UART. If no inputs are defined (DI or ADC), this command will return error.	8-bit bitmap (each bit represents the level of an I/O line setup as an output)	-
IO (v1.xA0*)	I/O Settings	Digital Output Level. Set digital output level to allow DIO lines that are setup as outputs to be changed through Command Mode.	-	-
IC (v1.xA0*)	I/O Settings	DIO Change Detect. Enables/Disables the monitoring of the change detect feature on DIO lines 0-7. If a change is detected, data is transmitted with DIO data only. Any samples queued and waiting for transmission will be sent first.	0 - 0xFF [bitfield]	0 (disabled)
IR (v1.xA0*)	I/O Settings	Sample Rate. Set/Read sample rate. When set, this parameter causes the module to sample all enabled inputs at a specified interval.	0 - 0xFFFF [x 1 msec]	0
AV (v1.xA0*)	I/O Settings	ADC Voltage Reference. <XBee-PRO only> Set/Read ADC reference voltage switch.	0 - 1 0 = VREF pin 1 = Internal	0
IA (v1.xA0*)	I/O Settings [I/O Line Passing]	I/O Input Address. Set/Read addresses of module to which outputs are bound. Setting all bytes to 0xFF will not allow any received I/O packet to change outputs. Setting address to 0xFFFF will allow any received I/O packet to change outputs.	0 - 0xFFFFFFFFFFFFFFFF	0xFFFFFFFFFFFFFFFF
T0 - T7 (v1.xA0*)	I/O Settings [I/O Line Passing]	(D0 - D7) Output Timeout. Set/Read Output timeout values for lines that correspond with the D0 - D7 parameters. When output is set (due to I/O line passing) to a non-default level, a timer is started which when expired will set the output to its default level. The timer is reset when a valid I/O packet is received.	0 - 0xFF [x 100 ms]	0xFF
P0	I/O Settings [I/O Line Passing]	PWM0 Configuration. Select/Read function for PWM0 pin.	0 - 2 0 = Disabled 1 = RSSI 2 = PWM Output	1
P1 (v1.xA0*)	I/O Settings [I/O Line Passing]	PWM1 Configuration. Select/Read function for PWM1 pin.	0 - 2 0 = Disabled 1 = RSSI 2 = PWM Output	0
M0 (v1.xA0*)	I/O Settings [I/O Line Passing]	PWM0 Output Level. Set/Read the PWM0 output level.	0 - 0x03FF	-

Table 3-06. XBee-PRO Commands - I/O Settings (sub-category designated within [brackets])

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
M1 (v1.xA0*)	I/O Settings (I/O Line Passing)	PWM1 Output Level. Set/Read the PWM0 output level.	0 - 0x03FF	-
PT (v1.xA0*)	I/O Settings (I/O Line Passing)	PWM Output Timeout. Set/Read output timeout value for both PWM outputs. When PWM is set to a non-zero value: Due to I/O line passing, a time is started which when expired will set the PWM output to zero. The timer is reset when a valid I/O packet is received.]	0 - 0xFF [x 100 ms]	0xFF
RP	I/O Settings (I/O Line Passing)	RSSI PWM Timer. Set/Read PWM timer register. Set the duration of PWM (pulse width modulation) signal output on the RSSI pin. The signal duty cycle is updated with each received packet and is shut off when the timer expires.]	0 - 0xFF [x 100 ms]	0x28 (40d)

* Firmware version in which the command was first introduced (firmware versions are numbered in hexadecimal notation.)

Diagnostics

Table 3-07. XBee/XBee-PRO Commands - Diagnostics

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
VR	Diagnostics	Firmware Version. Read firmware version of the RF module.	0 - 0xFFFF [read-only]	Factory-set
VL (v1.x80*)	Diagnostics	Firmware Version - Verbose. Read detailed version information (including application build date, MAC, PHY and bootloader versions).	-	-
HV (v1.x80*)	Diagnostics	Hardware Version. Read hardware version of the RF module.	0 - 0xFFFF [read-only]	Factory-set
DB	Diagnostics	Received Signal Strength. Read signal level [in dB] of last good packet received (RSSI). Absolute value is reported. (For example: 0x58 = -88 dBm) Reported value is accurate between -40 dBm and RX sensitivity.	0 - 0x64 [read-only]	-
EC (v1.x80*)	Diagnostics	CCA Failures. Reset/Read count of CCA (Clear Channel Assessment) failures. This parameter value increments when the module does not transmit a packet because it detected energy above the CCA threshold level set with CA command. This count saturates at its maximum value. Set count to "0" to reset count.	0 - 0xFFFF	-
EA (v1.x80*)	Diagnostics	ACK Failures. Reset/Read count of acknowledgment failures. This parameter value increments when the module expires its transmission retries without receiving an ACK on a packet transmission. This count saturates at its maximum value. Set the parameter to "0" to reset count.	0 - 0xFFFF	-
ED (v1.x80*)	Diagnostics	Energy Scan. Send 'Energy Detect Scan'. ED parameter determines the length of scan on each channel. The maximal energy on each channel is returned and each value is followed by a carriage return. Values returned represent detected energy levels in units of -dBm. Actual scan time on each channel is measured as Time = [(2 * SD) * 15.36] ms. Total scan time is this time multiplied by the number of channels to be scanned.	0 - 6	-

* Firmware version in which the command was first introduced (firmware versions are numbered in hexadecimal notation.)

AT Command Options

Table 3-08. XBee/XBee-PRO Commands - AT Command Options

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
CT	AT Command Mode Options	Command Mode Timeout. Set/Read the period of inactivity (no valid commands received) after which the RF module automatically exits AT Command Mode and returns to Idle Mode.	2 - 0xFFFF [x 100 ms]	0x64 (100d)
CN	AT Command Mode Options	Exit Command Mode. Explicitly exit the module from AT Command Mode.	-	-
AC (v1.xA0*)	AT Command Mode Options	Apply Changes. Explicitly apply changes to queued parameter value(s) and re-initialize module.	-	-
GT	AT Command Mode Options	Guard Times. Set required period of silence before and after the Command Sequence Characters of the AT Command Mode Sequence (GT+CC+GT). The period of silence is used to prevent inadvertent entrance into AT Command Mode.	2 - 0x0CE4 [x 1 ms]	0x3E8 (1000d)
CC	AT Command Mode Options	Command Sequence Character. Set/Read the ASCII character value to be used between Guard Times of the AT Command Mode Sequence (GT+CC+GT). The AT Command Mode Sequence enters the RF module into AT Command Mode.	0 - 0xFF	0x2B ('+' ASCII)

* Firmware version in which the command was first introduced (firmware versions are numbered in hexadecimal notation.)

3.3. Command Descriptions

Command descriptions in this section are listed alphabetically. Command categories are designated within "< >" symbols that follow each command title. XBee/XBee-PRO RF Modules expect parameter values in hexadecimal (designated by the "0x" prefix).

All modules operating within the same network should contain the same firmware version.

A1 (End Device Association) Command

<Networking {Association}> The A1 command is used to set and read association options for an End Device.

Use the table below to determine End Device behavior in relation to the A1 parameter.

AT Command: ATA1

Parameter Range: 0 - 0x0F [bitfield]

Default Parameter Value: 0

Related Commands: ID (PAN ID), NI (Node Identifier), CH (Channel), CE (Coordinator Enable), A2 (Coordinator Association)

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

Bit number	End Device Association Option
0 - ReassignPanID	0 - Will only associate with Coordinator operating on PAN ID that matches Node Identifier 1 - May associate with Coordinator operating on any PAN ID
1 - ReassignChannel	0 - Will only associate with Coordinator operating on Channel that matches CH setting 1 - May associate with Coordinator operating on any Channel
2 - AutoAssociate	0 - Device will not attempt Association 1 - Device attempts Association until success Note: This bit is used only for Non-Beacon systems. End Devices in a Beaconing system must always associate to a Coordinator
3 - PollCoordOnPinWake	0 - Pin Wake will not poll the Coordinator for pending (indirect) Data 1 - Pin Wake will send Poll Request to Coordinator to extract any pending data
4 - 7	[reserved]

A2 (Coordinator Association) Command

<Networking {Association}> The A2 command is used to set and read association options of the Coordinator.

Use the table below to determine Coordinator behavior in relation to the A2 parameter.

AT Command: ATA2

Parameter Range: 0 - 7 [bitfield]

Default Parameter Value: 0

Related Commands: ID (PAN ID), NI (Node Identifier), CH (Channel), CE (Coordinator Enable), A1 (End Device Association), AS (Active Scan), ED (Energy Scan)

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

Bit number	End Device Association Option
0 - ReassignPanID	0 - Coordinator will not perform Active Scan to locate available PAN ID. It will operate on ID (PAN ID). 1 - Coordinator will perform Active Scan to determine an available ID (PAN ID). If a PAN ID conflict is found, the ID parameter will change.
1 - ReassignChannel	0 - Coordinator will not perform Energy Scan to determine free channel. It will operate on the channel determined by the CH parameter. 1 - Coordinator will perform Energy Scan to find a free channel, then operate on that channel.
2 - AllowAssociate	0 - Coordinator will not allow any devices to associate to it. 1 - Coordinator will allow devices to associate to it.
3 - 7	[reserved]

The binary equivalent of the default value (0x06) is 00000110. *Bit 0 is the last digit of the sequence.

AC (Apply Changes) Command

<AT Command Mode Options> The AC command is used to explicitly apply changes to module parameter values. 'Applying changes' means that the module is re-initialized based on changes made to its parameter values. Once changes are applied, the module immediately operates according to the new parameter values.

AT Command: ATAC

Minimum Firmware Version Required: v1.xA0

This behavior is in contrast to issuing the WR (Write) command. The WR command saves parameter values to non-volatile memory, but the module still operates according to previously saved values until the module is re-booted or the CN (Exit AT Command Mode) command is issued.

Refer to the "AT Command - Queue Parameter Value" API type for more information.

AI (Association Indication) Command

<Networking {Association}> The AI command is used to indicate occurrences of errors during the last association request.

AT Command: ATAI

Parameter Range: 0 - 0x13 [read-only]

Use the table below to determine meaning of the returned values.

Related Commands: AS (Active Scan), ID (PAN ID), CH (Channel), ED (Energy Scan), A1 (End Device Association), A2 (Coordinator Association), CE (Coordinator Enable)

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

Returned Value (Hex)	Association Indication
0x00	Successful Completion - Coordinator successfully started or End Device association complete
0x01	Active Scan Timeout
0x02	Active Scan found no PANs
0x03	Active Scan found PAN, but the Coordinator Allow Association bit is not set
0x04	Active Scan found PAN, but Coordinator and End Device are not configured to support beacons
0x05	Active Scan found PAN, but Coordinator ID (PAN ID) value does not match the ID of the End Device
0x06	Active Scan found PAN, but Coordinator CH (Channel) value does not match the CH of the End Device
0x07	Energy Scan Timeout
0x08	Coordinator start request failed
0x09	Coordinator could not start due to invalid Parameter
0x0A	Coordinator Realignment is in progress
0x0B	Association Request not sent
0x0C	Association Request timed out - no reply was received
0x0D	Association Request had an invalid Parameter
0x0E	Association Request Channel Access Failure - Request was not transmitted - CCA failure
0x0F	Remote Coordinator did not send an ACK after Association Request was sent
0x10	Remote Coordinator did not reply to the Association Request, but an ACK was received after sending the request
0x11	[reserved]
0x12	Syno-Loss - Lost synchronization with a Beaconing Coordinator
0x13	Disassociated - No longer associated to Coordinator

AP (API Enable) Command

<Serial Interfacing> The AP command is used to enable the RF module to operate using a frame-based API instead of using the default Transparent (UART) mode.

AT Command: ATAP

Parameter Range: 0 - 2

Parameter	Configuration
0	Disabled (Transparent operation)
1	API enabled
2	API enabled (with escaped characters)

Default Parameter Value: 0

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

Refer to the API Operation section when API operation is enabled (AP = 1 or 2).

AS (Active Scan) Command

<AT Command Mode Options> The AS command is used to send a Beacon Request to a Broadcast Address (0xFFFF) and Broadcast PAN (0xFFFF) on every channel. The parameter determines the amount of time the RF module will listen for Beacons on each channel. A 'PanDescriptor' is created and returned for every Beacon received from the scan. Each PanDescriptor contains the following information:

AT Command: ATAS

Parameter Range: 0 - 6

Related Command: SD (Scan Duration), DL (Destination Low Address), DH (Destination High Address), ID (PAN ID), CH (Channel)

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

CoordAddress (SH + SL parameters) <CR>

CoordPanID (ID parameter) <CR>

CoordAddrMode <CR>

0x02 = 16-bit Short Address

0x03 = 64-bit Long Address

Channel (CH parameter) <CR>

SecurityUse <CR>

ACLEntry <CR>

SecurityFailure <CR>

SuperFrameSpec <CR> (2 bytes):

bit 15 - Association Permitted (MSB)

bit 14 - PAN Coordinator

bit 13 - Reserved

bit 12 - Battery Life Extension

bits 8-11 - Final CAP Slot

bits 4-7 - Superframe Order

bits 0-3 - Beacon Order

GtsPermit <CR>

RSSI <CR> (- RSSI is returned as -dBm)

TimeStamp <CR> (3 bytes)

<CR> (A carriage return <CR> is sent at the end of the AS command.

The Active Scan is capable of returning up to 5 PanDescriptors in a scan. The actual scan time on each channel is measured as $Time = [(2 \wedge (SD \text{ Parameter})) * 15.36] \text{ ms}$. Total scan time is this time multiplied by the number of channels to be scanned (16 for the XBee, 12 for the XBee-PRO).

NOTE: Refer the scan table in the SD description to determine scan times. If using API Mode, no <CR>'s are returned in the response. Refer to the API Mode Operation section.



AV (ADC Voltage Reference) Command

<Serial Interfacing> The AV command is used to set/read the ADC reference voltage switch. The XBee-PRO has an ADC voltage reference switch which allows the module to select between an on-board voltage reference or to use the VREF pin on the connector.

This command only applies to XBee-PRO RF Modules and will return error on an XBee RF Module.

AT Command: ATAV

Parameter Range: 0 - 1

Parameter	Configuration
0	VREF Pin
1	Internal (on-board reference - VCC)

Default Parameter Value: 0

Minimum Firmware Version Required: v1.xA0

BD (Interface Data Rate) Command

<Serial Interfacing> The BD command is used to set and read the serial interface data rate used between the RF module and host. This parameter determines the rate at which serial data is sent to the module from the host. Modified interface data rates do not take effect until the CN (Exit AT Command Mode) command is issued and the system returns the 'OK' response.

When parameters 0-7 are sent to the module, the respective interface data rates are used (as shown in the table on the right).

The RF data rate is not affected by the BD parameter. If the interface data rate is set higher than the RF data rate, a flow control configuration may need to be implemented.

AT Command: ATBD

Parameter Range: 0 - 7 (standard rates)
0x80-0x1C200 (non-standard rates)

Parameter	Configuration (bps)
0	1200
1	2400
2	4800
3	9600
4	19200
5	38400
6	57600
7	115200

Default Parameter Value: 3

Non-standard Interface Data Rates:

Any value above 0x07 will be interpreted as an actual baud rate. When a value above 0x07 is sent, the closest interface data rate represented by the number is stored in the BD register. For example, a rate of 19200 bps can be set by sending the following command line "ATBD4800". NOTE: When using MaxStream's X-CTU Software, non-standard interface data rates can only be set and read using the X-CTU 'Terminal' tab. Non-standard rates are not accessible through the 'Modem Configuration' tab.

When the BD command is sent with a non-standard interface data rate, the UART will adjust to accommodate the requested interface rate. In most cases, the clock resolution will cause the stored BD parameter to vary from the parameter that was sent (refer to the table below). Reading the BD command (send "ATBD" command without an associated parameter value) will return the value actually stored in the module's BD register.

Parameters Sent Versus Parameters Stored

BD Parameter Sent (HEX)	Interface Data Rate (bps)	BD Parameter Stored (HEX)
0	1200	0
4	19,200	4
7	115,200	7
12C	300	12B
1C200	115,200	1B207

CA (CCA Threshold) Command

<RF Interfacing> CA command is used to set and read CCA (Clear Channel Assessment) thresholds.

Prior to transmitting a packet, a CCA is performed to detect energy on the transmit channel. If the detected energy is above the CCA Threshold, the RF module will not transmit the packet.

AT Command: ATCA

Parameter Range: 0 - 0x50 [-dBm]

Default Parameter Value: 0x2C
(-44 decimil dBm)

Minimum Firmware Version Required: v1.x80



CC (Command Sequence Character) Command

<AT Command Mode Options> The CC command is used to set and read the ASCII character used between guard times of the AT Command Mode Sequence (GT + CC + GT). This sequence enters the RF module into AT Command Mode so that data entering the module from the host is recognized as commands instead of payload.

The AT Command Sequence is explained further in the AT Command Mode section.

AT Command: ATCC

Parameter Range: 0 - 0xFF

Default Parameter Value: 0x2B (ASCII "+")

Related Command: GT (Guard Times)

CE (Coordinator Enable) Command

<Serial Interfacing> The CE command is used to set and read the behavior (End Device vs. Coordinator) of the RF module.

AT Command: ATCE

Parameter Range: 0 - 1

Parameter	Configuration
0	End Device
1	Coordinator

Default Parameter Value: 0

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

CH (Channel) Command

<Networking {Addressing}> The CH command is used to set/read the operating channel on which RF connections are made between RF modules. The channel is one of three addressing options available to the module. The other options are the PAN ID (ID command) and destination addresses (DL & DH commands).

In order for modules to communicate with each other, the modules must share the same channel number. Different channels can be used to prevent modules in one network from listening to transmissions of another. Adjacent channel rejection is 23 dB.

The module uses channel numbers of the 802.15.4 standard.

$$\text{Center Frequency} = 2.405 + (\text{CH} - 11d) * 5 \text{ MHz} \quad (d = \text{decimal})$$

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

AT Command: ATCH

Parameter Range: 0x0B - 0x1A (XBee)

0x0C - 0x17 (XBee-PRO)

Default Parameter Value: 0x0C (12 decimal)

Related Commands: ID (PAN ID), DL (Destination Address Low, DH (Destination Address High)

CN (Exit Command Mode) Command

<AT Command Mode Options> The CN command is used to explicitly exit the RF module from AT Command Mode.

AT Command: ATCN

CT (Command Mode Timeout) Command

<AT Command Mode Options> The CT command is used to set and read the amount of inactive time that elapses before the RF module automatically exits from AT Command Mode and returns to Idle Mode.

Use the CN (Exit Command Mode) command to exit AT Command Mode manually.

AT Command: ATCT

Parameter Range: 2 - 0xFFFF
[x 100 milliseconds]

Default Parameter Value: 0x64 (100 decimal (which equals 10 decimal seconds))

Number of bytes returned: 2

Related Command: CN (Exit Command Mode)

D0 - D4 (DIO Configuration) Commands

<I/O Settings> The D0, D1, D2, D3 and D4 commands are used to select/read the behavior of their respective AD/DIO lines (pins 20, 19, 18, 17 and 11 respectively).

Options include:

- Analog-to-digital converter
- Digital input
- Digital output

AT Commands:
ATD0, ATD1, ATD2, ATD3, ATD4

Parameter Range: 0 - 5

Parameter	Configuration
0	Disabled
1	n/a
2	ADC
3	DI
4	DO low
5	DO high

Default Parameter Value: 0

Minimum Firmware Version Required: 1.xA0

D5 (DIO5 Configuration) Command

<I/O Settings> The D5 command is used to select/read the behavior of the DIO5 line (pin 15).

Options include:

- Associated Indicator (LED blinks when the module is associated)
- Analog-to-digital converter
- Digital Input
- Digital output

AT Command: ATD5

Parameter Range: 0 - 5

Parameter	Configuration
0	Disabled
1	Associated Indicator
2	ADC
3	DI
4	DO low
5	DO high

Default Parameter Value: 1

Parameters 2-5 supported as of firmware version 1.xA0

D6 (DIO6 Configuration) Command

<I/O Settings> The D6 command is used to select/read the behavior of the DIO6 line (pin 16).

Options include:

- RTS flow control
- Analog-to-digital converter
- Digital Input
- Digital output

AT Command: ATD6

Parameter Range: 0 - 5

Parameter	Configuration
0	Disabled
1	RTS Flow Control
2	n/a
3	DI
4	DO low
5	DO high

Default Parameter Value: 0

Parameters 3-5 supported as of firmware version 1.xA0



D7 (DIO7 Configuration) Command

<I/O Settings> The D7 command is used to select/read the behavior of the DIO7 line (pin 12).
Options Include:

- CTS flow control
- Analog-to-digital converter
- Digital input
- Digital output

AT Command: ATD7

Parameter Range: 0 – 5

Parameter	Configuration
0	Disabled
1	CTS Flow Control
2	n/a
3	DI
4	DO low
5	DO high

Default Parameter Value: 1

Parameters 3-5 supported as of firmware version 1.x.A0

D8 (DI8 Configuration) Command

<I/O Settings> The D8 command is used to select/read the behavior of the DI8 line (pin 9). This command enables configuring the pin to function as a digital input. This line is also used with Pin Sleep.

AT Command: ATD8

Parameter Range: 0 – 5

(1, 2, 4 & 5 n/a)

Parameter	Configuration
0	Disabled
3	DI

Default Parameter Value: 0

Minimum Firmware Version Required: 1.x.A0

DA (Force Disassociation) Command

<(Special)> The DA command is used to immediately disassociate an End Device from a Coordinator and reattempt to associate.

AT Command: ATDA

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

DB (Received Signal Strength) Command

<Diagnostics> DB parameter is used to read the received signal strength (in dBm) of the last RF packet received. Reported values are accurate between -40 dBm and the RF module's receiver sensitivity.

AT Command: ATDB

Parameter Range: 0 – 0x64 [read-only]

Absolute values are reported. For example: 0x58 = -88 dBm (decimal). If no packets have been received (since last reset, power cycle or sleep event), "0" will be reported.

DH (Destination Address High) Command

<Networking {Addressing}> The DH command is used to set and read the upper 32 bits of the RF module's 64-bit destination address. When combined with the DL (Destination Address Low) parameter, it defines the destination address used for transmission.

AT Command: ATDH

Parameter Range: 0 – 0xFFFFFFFF

Default Parameter Value: 0

Related Commands: DL (Destination Address Low), CH (Channel), ID (PAN VID), MY (Source Address)

An module will only communicate with other modules having the same channel (CH parameter), PAN ID (ID parameter) and destination address (DH + DL parameters).

To transmit using a 16-bit address, set the DH parameter to zero and the DL parameter less than 0xFFFF. 0x000000000000FFFF (DL concatenated to DH) is the broadcast address for the PAN.

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

DL (Destination Address Low) Command

<Networking {Addressing}> The DL command is used to set and read the lower 32 bits of the RF module's 64-bit destination address. When combined with the DH (Destination Address High) parameter, it defines the destination address used for transmission.

A module will only communicate with other modules having the same channel (CH parameter), PAN ID (ID parameter) and destination address (DH + DL parameters).

To transmit using a 16-bit address, set the DH parameter to zero and the DL parameter less than 0xFFFF. 0x000000000000FFFF (DL concatenated to DH) is the broadcast address for the PAN.

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

AT Command: ATDL

Parameter Range: 0 - 0xFFFFFFFF

Default Parameter Value: 0

Related Commands: DH (Destination Address High), CH (Channel), ID (PAN VID), MY (Source Address)

DN (Destination Node) Command

<Networking {Identification}> The DN command is used to resolve a NI (Node Identifier) string to a physical address. The following events occur upon successful command execution:

1. DL and DH are set to the address of the module with the matching NI (Node Identifier).
2. 'OK' is returned.
3. RF module automatically exits AT Command Mode.

If there is no response from a modem within 200 msec or a parameter is not specified (left blank), the command is terminated and an 'ERROR' message is returned.

AT Command: ATDN

Parameter Range: 20-character ASCII String

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

DP (Disassociation Cyclic Sleep Period) Command

<Sleep Mode (Low Power)>

NonBeacon Firmware

End Device - The DP command is used to set and read the time period of sleep for cyclic sleeping remotes that are configured for Association but are not associated to a Coordinator. (I.e. If a device is configured to associate, configured as a Cyclic Sleep remote, but does not find a Coordinator; it will sleep for DP time before reattempting association.) Maximum sleep period is 268 seconds (0x68B0). DP should be > 0 for NonBeacon systems.

AT Command: ATDP

Parameter Range: 1 - 0x68B0
[x 10 milliseconds]

Default Parameter Value: 0x3E8
(1000 decimal)

Related Commands: SM (Sleep Mode), SP (Cyclic Sleep Period), ST (Time before Sleep)

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

EA (ACK Failures) Command

<Diagnostics> The EA command is used to reset and read the count of ACK (acknowledgement) failures. This parameter value increments when the module expires its transmission retries without receiving an ACK on a packet transmission. This count saturates at its maximum value.

Set the parameter to "0" to reset count.

AT Command: ATEA

Parameter Range: 0 - 0xFFFF

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

EC (CCA Failures) Command

<Diagnostics> The EC command is used to read and reset the count of CCA (Clear Channel Assessment) failures. This parameter value increments when the RF module does not transmit a packet due to the detection of energy that is above the CCA threshold level (set with CA command). This count saturates at its maximum value.

Set the EC parameter to "0" to reset count.

AT Command: ATEC

Parameter Range: 0 - 0xFFFF

Related Command: CA (CCA Threshold)

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

ED (Energy Scan) Command

<Networking {Association}> The ED command is used to send an "Energy Detect Scan". This parameter determines the length of scan on each channel. The maximal energy on each channel is returned and each value is followed by a carriage return. An additional carriage return is sent at the end of the command.

The values returned represent the detected energy level in units of -dBm. The actual scan time on each channel is measured as $\text{Time} = [(2 \wedge \text{ED PARAM}) * 15.36] \text{ ms}$.

AT Command: ATED

Parameter Range: 0 - 6

Related Command: SD (Scan Duration), SC (Scan Channel)

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

Note: Total scan time is this time multiplied by the number of channels to be scanned. Also refer to the SD (Scan Duration) table. Use the SC (Scan Channel) command to choose which channels to scan.

EE (AES Encryption Enable) Command

<Networking {Security}> The EE command is used to set/read the parameter that disables/enables 128-bit AES encryption.

The XBee/XBee-PRO firmware uses the 802.15.4 Default Security protocol and uses AES encryption with a 128-bit key. AES encryption dictates that all modules in the network use the same key and the maximum RF packet size is 95 Bytes.

When encryption is enabled, the module will always use its 64-bit long address as the source address for RF packets. This does not affect how the MY (Source Address), DH (Destination Address High) and DL (Destination Address Low) parameters work

If MM (MAC Mode) > 0 and AP (API Enable) parameter > 0:

With encryption enabled and a 16-bit short address set, receiving modules will only be able to issue RX (Receive) 64-bit indicators. This is not an issue when MM = 0.

AT Command: ATEE

Parameter Range: 0 - 1

Parameter	Configuration
0	Disabled
1	Enabled

Default Parameter Value: 0

Related Commands: KY (Encryption Key), AP (API Enable), MM (MAC Mode)

Minimum Firmware Version Required: v1.xA0

If a module with a non-matching key detects RF data, but has an incorrect key: When encryption is enabled, non-encrypted RF packets received will be rejected and will not be sent out the UART.

Transparent Operation --> All RF packets are sent encrypted if the key is set.

API Operation --> Receive frames use an option bit to indicate that the packet was encrypted.

FP (Force Poll) Command

<Networking {Association}> The FP command is used to request indirect messages being held by a Coordinator.

AT Command: ATEP

Minimum Firmware Version Required: v1.x80



FR (Software Reset) Command

<Special> The FR command is used to force a software reset on the RF module. The reset simulates powering off and then on again the module.

AT Command: ATFR

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

GT (Guard Times) Command

<AT Command Mode Options> GT Command is used to set the DI (data in from host) time-of-silence that surrounds the AT command sequence character (CC Command) of the AT Command Mode sequence (GT + CC + GT).

AT Command: ATGT

Parameter Range: 2 - 0x0CE4
[x 1 millisecond]

Default Parameter Value: 0x3E8
(1000 decimal)

The DI time-of-silence is used to prevent inadvertent entrance into AT Command Mode.

Related Command: CC (Command Sequence Character)

Refer to the Command Mode section for more information regarding the AT Command Mode Sequence.

HV (Hardware Version) Command

<Diagnostics> The HV command is used to read the hardware version of the RF module.

AT Command: ATHV

Parameter Range: 0 - 0xFFFF [Read-only]

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

IA (I/O Input Address) Command

<I/O Settings {I/O Line Passing}> The IA command is used to bind a module output to a specific address. Outputs will only change if received from this address. The IA command can be used to set/read both 16 and 64-bit addresses.

AT Command: ATIA

Parameter Range: 0 - 0xFFFFFFFFFFFF

Default Parameter Value: 0xFFFFFFFFFFFF
(will not allow any received I/O packet to change outputs)

Setting all bytes to 0xFF will not allow the reception of any I/O packet to change outputs. Setting the IA address to 0xFFFF will cause the module to accept all I/O packets.

Minimum Firmware Version Required: v1.xA0

IC (DIO Change Detect) Command

<I/O Settings> The IC command is used to enable the monitoring of the change detect feature on DIO lines 0-7. If a change is detected, data is transmitted with DIO data only. Any samples queued and waiting for transmission are sent first.

AT Command: ATIC

Parameter Range: 0 - 0xFF [bitfield]

Default Parameter Value: 0 (disabled)

Minimum Firmware Version Required: v1.xA0

Refer to the "ADC and Digital I/O Line Support" sections of the "RF Module Operations" chapter for more information.

ID (Pan ID) Command

<Networking {Addressing}> The ID command is used to set and read the PAN (Personal Area Network) ID of the RF module. Only modules with matching PAN IDs can communicate with each other. Unique PAN IDs enable control of which RF packets are received by a module.

AT Command: ATID

Parameter Range: 0 - 0xFFFF

Default Parameter Value: 0x3332
(13106 decimal)

Setting the ID parameter to 0xFFFF indicates a global transmission for all PANs. It does not indicate a global receive.

IO (Digital Output Level) Command

<I/O Settings> The IO command is used to set digital output levels. This allows DIO lines setup as outputs to be changed through Command Mode.

AT Command: ATIO

Parameter Range: 8-bit bitmap (where each bit represents the level of an I/O line that is setup as an output.)

Minimum Firmware Version Required: v1.xA0

IR (Sample Rate) Command

<I/O Settings> The IR command is used to set/read the sample rate. When set, the module will sample all enabled DIO/ADC lines at a specified interval. This command allows periodic reads of the ADC and DIO lines in a non-Sleep Mode setup.

Example: When IR = 0x0A, the sample rate is 10 ms (or 100 Hz).

AT Command: ATIR

Parameter Range: 0 - 0xFFFF [x 1 msec] (cannot guarantee 1 ms timing when IT=1)

Default Parameter Value:0

Related Command: IT (Samples before TX)

Minimum Firmware Version Required: v1.xA0

IS (Force Sample) Command

<I/O Settings> The IS command is used to force a read of all enabled DIO/ADC lines. The data is returned through the UART.

When operating in Transparent Mode (AP=0), the data is returned in the following format:

All bytes are converted to ASCII:

number of samples<CR>

channel mask<CR>

DIO data<CR> (if DIO lines are enabled<CR>

ADC channel Data<cr> <-This will repeat for every enabled ADC channel<CR>

<CR> (end of data noted by extra <CR>)

AT Command: ATIS

Parameter Range: 1 - 0xFF

Default Parameter Value:1

Minimum Firmware Version Required: v1.xA0

When operating in API mode (AP > 0), the command will immediately return an 'OK' response. The data will follow in the normal API format for DIO data.

IT (Samples before TX) Command

<I/O Settings> The IT command is used to set/read the number of DIO and ADC samples to collect before transmitting data.

One ADC sample is considered complete when all enabled ADC channels have been read. The module can buffer up to 93 Bytes of sample data.

Since the module uses a 10-bit A/D converter, each sample uses two Bytes. This leads to a maximum buffer size of 46 samples or IT=0x2E.

When Sleep Modes are enabled and IR (Sample Rate) is set, the module will remain awake until IT samples have been collected.

AT Command: ATIT

Parameter Range: 1 - 0xFF

Default Parameter Value:1

Minimum Firmware Version Required: v1.xA0



IU (I/O Output Enable) Command

<I/O Settings> The IU command is used to disable/enable I/O UART output. When enabled (IU = 1), received I/O line data packets are sent out the UART. The data is sent using an API frame regardless of the current AP parameter value.

AT Command: ATIU

Parameter Range: 0 - 1

Parameter	Configuration
0	Disabled - Received I/O line data packets will NOT sent out UART.
1	Enabled - Received I/O line data will be sent out UART

Default Parameter Value: 1

Minimum Firmware Version Required: 1.xA0

KY (AES Encryption Key) Command

<Networking {Security}> The KY command is used to set the 128-bit AES (Advanced Encryption Standard) key for encrypting/decrypting data. Once set, the key cannot be read out of the module by any means.

The entire payload of the packet is encrypted using the key and the CRC is computed across the ciphertext. When encryption is enabled, each packet carries an additional 16 Bytes to convey the random CBC Initialization Vector (IV) to the receiver(s). The KY value may be "0" or any 128-bit value. Any other value, including entering ATKY by itself with no parameters, will cause an error. A module with the wrong key (or no key) will receive encrypted data, but the data driven out the serial port will be meaningless. Likewise, a module with a key will receive unencrypted data sent from a module without a key, but the output will be meaningless. Because CBC mode is utilized, repetitive data appears differently in different transmissions due to the randomly-generated IV.

When queried, the system will return an 'OK' message and the value of the key will not be returned.

AT Command: ATKY

Parameter Range: 0 - (any 16-Byte value)

Default Parameter Value: 0

Related Command: EE (Encryption Enable)

Minimum Firmware Version Required: v1.xA0

M0 (PWM0 Output Level) Command

<I/O Settings> The M0 command is used to set/read the output level of the PWM0 line (pin 6).

Before setting the line as an output:

1. Enable PWM0 output (P0 = 2)
2. Apply settings (use CN or AC)

The PWM period is 64 μ sec and there are 0x03FF (1023 decimal) steps within this period. When M0 = 0 (0% PWM), 0x01FF (50% PWM), 0x03FF (100% PWM), etc.

AT Command: ATM0

Parameter Range: 0 - 0x03FF [steps]

Default Parameter Value: 0

Related Commands: P0 (PWM0 Enable), AC (Apply Changes), CN (Exit Command Mode)

Minimum Firmware Version Required: v1.xA0

M1 (PWM1 Output Level) Command

<I/O Settings> The M1 command is used to set/read the output level of the PWM1 line (pin 7).

Before setting the line as an output:

1. Enable PWM1 output (P1 = 2)
2. Apply settings (use CN or AC)

AT Command: ATM1

Parameter Range: 0 - 0x03FF

Default Parameter Value: 0

Related Commands: P1 (PWM1 Enable), AC (Apply Changes), CN (Exit Command Mode)

Minimum Firmware Version Required: v1.xA0



MM (MAC Mode) Command

<Networking {Addressing}> The MM command is used to set and read the MAC Mode value. The MM command disables/enables the use of a MaxStream header contained in the 802.15.4 RF packet. By default (MM = 0), MaxStream Mode is enabled and the module adds an extra header to the data portion of the 802.15.4 packet. This enables the following features:

- ND and DN command support
- Duplicate packet detection when using ACKs

The MM command allows users to turn off the use of the extra header. Modes 1 and 2 are strict 802.15.4 modes. If the MaxStream header is disabled, ND and DN parameters are also disabled.

Note: When MM > 0, application and CCA failure retries are not supported.

AT Command: ATMM

Parameter Range: 0 - 2

Parameter	Configuration
0	MaxStream Mode (802.15.4 + MaxStream header)
1	802.15.4 (no ACKs)
2	802.15.4 (with ACKs)

Default Parameter Value: 0

Related Commands: ND (Node Discover), DN (Destination Node)

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

MY (16-bit Source Address) Command

<Networking {Addressing}> The MY command is used to set and read the 16-bit source address of the RF module.

By setting MY to 0xFFFF, the reception of RF packets having a 16-bit address is disabled. The 64-bit address is the module's serial number and is always enabled.

AT Command: ATMY

Parameter Range: 0 - 0xFFFF

Default Parameter Value: 0

Related Commands: DH (Destination Address High), DL (Destination Address Low), CH (Channel), ID (PAN ID)

ND (Node Discover) Command

<Networking {Identification}> The ND command is used to discover and report all modules on its current operating channel (CH parameter) and PAN ID (ID parameter). ND also accepts an NI (Node Identifier) value as a parameter. In this case, only a module matching the supplied Identifier will respond.

ND uses a 64-bit long address when sending and responding to an ND request. The ND command causes a module to transmit a globally addressed ND command packet. The amount of time allowed for responses is determined by the NT (Node Discover Time) parameter.

AT Command: ATND

Range: optional 20-character NI value

Related Commands: CH (Channel), ID (Pan ID), MY (Source Address), SH (Serial Number High), SL (Serial Number Low), NI (Node Identifier), NT (Node Discover Time)

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

In AT Command mode, command completion is designated by a carriage return (0x0D). Since two carriage returns end a command response, the application will receive three carriage returns at the end of the command. If no responses are received, the application should only receive one carriage return. When in API mode, the application should receive a frame (with no data) and status (set to 'OK') at the end of the command. When the ND command packet is received, the remote sets up a random time delay (up to 2.2 sec) before replying as follows:

Node Discover Response (AT command mode format - Transparent operation):

- MY (Source Address) value<CR>
- SH (Serial Number High) value<CR>
- SL (Serial Number Low) value<CR>
- DB (Received Signal Strength) value<CR>
- NI (Node Identifier) value<CR>
- <CR> (This is part of the response and not the end of command indicator.)

Node Discover Response (API format - data is binary (except for NI)):

- 2 bytes for MY (Source Address) value
- 4 bytes for SH (Serial Number High) value
- 4 bytes for SL (Serial Number Low) value
- 1 byte for DB (Received Signal Strength) value
- NULL-terminated string for NI (Node Identifier) value (max 20 bytes w/out NULL terminator)



NI (Node Identifier) Command

<Networking {Identification}> The NI command is used to set and read a string for identifying a particular node.

Rules:

- Register only accepts printable ASCII data.
- A string can not start with a space.
- A carriage return ends command
- Command will automatically end when maximum bytes for the string have been entered.

This string is returned as part of the ND (Node Discover) command. This identifier is also used with the DN (Destination Node) command.

AT Command: ATNI

Parameter Range: 20-character ASCII string

Related Commands: ND (Node Discover), DN (Destination Node)

Minimum Firmware Version Required: v1.xA0

NT (Node Discover Time) Command

<Networking {Identification}> The NT command is used to set the amount of time a base node will wait for responses from other nodes when using the ND (Node Discover) command. The NT value is transmitted with the ND command.

Remote nodes will set up a random hold-off time based on this time. The remotes will adjust this time down by 250 ms to give each node the ability to respond before the base ends the command. Once the ND command has ended, any response received on the base would be discarded.

AT Command: ATNT

Parameter Range: 0x01 – 0xFC
[x 100 msec]

Default: 0x19 (2.5 decimal seconds)

Related Commands: ND (Node Discover)

Minimum Firmware Version Required: 1.xA0

P0 (PWM0 Configuration) Command

<I/O Setting {I/O Line Passing}> The P0 command is used to select/read the function for PWM0 (Pulse Width Modulation output 0). This command enables the option of translating incoming data to a PWM so that the output can be translated back into analog form.

With the IA (I/O Input Address) parameter correctly set, AD0 values can automatically be passed to PWM0.

AT Command: ATP0

The second character in the command is the number zero ("0"), not the letter "O".

Parameter Range: 0 - 2

Parameter	Configuration
0	Disabled
1	RSSI
2	PWM0 Output

Default Parameter Value: 1

P1 (PWM1 Configuration) Command

<I/O Setting {I/O Line Passing}> The P1 command is used to select/read the function for PWM1 (Pulse Width Modulation output 1). This command enables the option of translating incoming data to a PWM so that the output can be translated back into analog form.

With the IA (I/O Input Address) parameter correctly set, AD1 values can automatically be passed to PWM1.

AT Command: ATP1

Parameter Range: 0 - 2

Parameter	Configuration
0	Disabled
1	RSSI
2	PWM1 Output

Default Parameter Value: 0

Minimum Firmware Version Required: v1.xA0



PL (Power Level) Command

<RF Interfacing> The PL command is used to select and read the power level at which the RF module transmits conducted power.

WHEN OPERATING IN EUROPE:

XBee-PRO RF Modules must be configured to operate at a maximum transmit power output level of 10 dBm. The PL parameter must equal "0" (10 dBm).

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 high-gain antennas.

WHEN OPERATING IN JAPAN:

XBee-PRO RF Modules optimized for use in Japan contain firmware that limits transmit power output to 10 dBm. If PL=4 (default), the maximum power output level is 10 dBm. For a list of module part numbers approved for use in Japan, contact MaxStream [call 1-801-765-9885 or send e-mail to sales@maxstream.net].

AT Command: ATPL

Parameter Range: 0 - 4

Parameter	XBee	XBee-PRO
0	-10 dBm	10 dBm
1	-6 dBm	12 dBm
2	-4 dBm	14 dBm
3	-2 dBm	16 dBm
4	0 dBm	18 dBm

Default Parameter Value: 4

PR (Pull-up Resistor Enable) Command

<Serial Interfacing> The PR command is used to set and read the bit field that is used to configure internal the pull-up resistor status for I/O lines. "1" specifies the pull-up resistor is enabled. "0" specifies no pull up.

- bit 0 - AD4/DIO4 (pin 11)
- bit 1 - AD3/DIO3 (pin 17)
- bit 2 - AD2/DIO2 (pin 18)
- bit 3 - AD1/DIO1 (pin 19)
- bit 4 - AD0/DIO0 (pin 20)
- bit 5 - AD6/DIO6 (pin 16)
- bit 6 - DI8 (pin 9)
- bit 7 - DIN/CONFIG (pin 3)

For example: Sending the command "ATPR 6F" will turn bits 0, 1, 2, 3, 5 and 6 ON; and bits 4 & 7 will be turned OFF. (The binary equivalent of "0x6F" is "01101111". Note that 'bit 0' is the last digit in the bitfield.

AT Command: ATPR

Parameter Range: 0 - 0xFF

Default Parameter Value: 0xFF
(all pull-up resistors are enabled)

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

PT (PWM Output Timeout) Command

<I/O Settings {I/O Line Passing}> The PT command is used to set/read the output timeout value for both PWM outputs.

When PWM is set to a non-zero value: Due to I/O line passing, a time is started which when expired will set the PWM output to zero. The timer is reset when a valid I/O packet is received.

AT Command: ATPT

Parameter Range: 0 - 0xFF [x 100 msec]

Default Parameter Value: 0xFF

Minimum Firmware Version Required: 1.xA0

RE (Restore Defaults) Command

<(Special)> The RE command is used to restore all configurable parameters to their factory default settings. The RE command does not write restored values to non-volatile (persistent) memory. Issue the WR (Write) command subsequent to issuing the RE command to save restored parameter values to non-volatile memory.

AT Command: ATRE



RN (Random Delay Slots) Command

<Networking & Security> The RN command is used to set and read the minimum value of the back-off exponent in the CSMA-CA algorithm. The CSMA-CA algorithm was engineered for collision avoidance (random delays are inserted to prevent data loss caused by data collisions).

AT Command: ATRN
 Parameter Range: 0 - 3 [exponent]
 Default Parameter Value: 0

If RN = 0, collision avoidance is disabled during the first iteration of the algorithm (802.15.4 - macMinBE).

CSMA-CA stands for "Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance". Unlike CSMA-CD (reacts to network transmissions after collisions have been detected), CSMA-CA acts to prevent data collisions before they occur. As soon as a module receives a packet that is to be transmitted, it checks if the channel is clear (no other module is transmitting). If the channel is clear, the packet is sent over-the-air. If the channel is not clear, the module waits for a randomly selected period of time, then checks again to see if the channel is clear. After a time, the process ends and the data is lost.

RO (Packetization Timeout) Command

<Serial Interfacing> RO command is used to set and read the number of character times of inter-character delay required before transmission.

AT Command: ATR0
 Parameter Range: 0 - 0xFF
 [x character times]
 Default Parameter Value: 3

RF transmission commences when data is detected in the DI (data in from host) buffer and RO character times of silence are detected on the UART receive lines (after receiving at least 1 byte).

RF transmission will also commence after 100 Bytes (maximum packet size) are received in the DI buffer.

Set the RO parameter to '0' to transmit characters as they arrive instead of buffering them into one RF packet.

RP (RSSI PWM Timer) Command

<I/O Settings {I/O Line Passing}> The RP command is used to enable PWM (Pulse Width Modulation) output on the RF module. The output is calibrated to show the level a received RF signal is above the sensitivity level of the module. The PWM pulses vary from 24 to 100%. Zero percent means PWM output is inactive. One to 24% percent means the received RF signal is at or below the published sensitivity level of the module. The following table shows levels above sensitivity and PWM values.

AT Command: ATRP
 Parameter Range: 0 - 0xFF
 [x 100 msec]
 Default Parameter Value: 0x28 (40 decimal)

The total period of the PWM output is 64 μ s. Because there are 445 steps in the PWM output, the minimum step size is 144 ns.

PWM Percentages

dB above Sensitivity	PWM percentage (high period / total period)
10	41%
20	58%
30	75%

A non-zero value defines the time that the PWM output will be active with the RSSI value of the last received RF packet. After the set time when no RF packets are received, the PWM output will be set low (0 percent PWM) until another RF packet is received. The PWM output will also be set low at power-up until the first RF packet is received. A parameter value of 0xFF permanently enables the PWM output and it will always reflect the value of the last received RF packet.



RR (XBee Retries) Command

<Networking {Addressing}> The RR command is used set/read the maximum number of retries the module will execute in addition to the 3 retries provided by the 802.15.4 MAC. For each XBee retry, the 802.15.4 MAC can execute up to 3 retries.

This values does not need to be set on all modules for retries to work. If retries are enabled, the transmitting module will set a bit in the Maxstream RF Packet header which requests the receiving module to send an ACK (acknowledgement). If the transmitting module does not receive an ACK within 200 msec, it will re-send the packet within a random period up to 48 msec. Each XBee retry can potentially result in the MAC sending the packet 4 times (1 try plus 3 retries). Note that retries are not attempted for packets that are purged when transmitting with a Cyclic Sleep Coordinator.

AT Command: ATRR

Parameter Range: 0 - 6

Default: 0

Minimum Firmware Version Required: 1.xA0

SC (Scan Channels) Command

<Networking {Association}> The SC command is used to set and read the list of channels to scan for all Active and Energy Scans as a bit field.

This affects scans initiated in command mode [AS (Active Scan) and ED (Energy Scan) commands] and during End Device Association and Coordinator startup.

AT Command: ATSC

Parameter Range: 0 - 0xFFFF [Bitfield] (bits 0, 14, 15 are not allowed when using the XBee-PRO)

Default Parameter Value: 0x1FFE (all XBee-PRO channels)

Related Commands: ED (Energy Scan), SD (Scan Duration)

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

bit 0 - 0x0B	bit 4 - 0x0F	bit 8 - 0x13	bit 12 - 0x17
bit 1 - 0x0C	bit 5 - 0x10	bit 9 - 0x14	bit 13 - 0x18
bit 2 - 0x0D	bit 6 - 0x11	bit 10 - 0x15	bit 14 - 0x19
bit 3 - 0x0E	bit 7 - 0x12	bit 11 - 0x16	bit 15 - 0x1A

SD (Scan Duration) Command

<Networking {Association}> The SD command is used to set and read the exponent value that determines the duration (in time) of a scan.

End Device (Duration of Active Scan during Association) - In a Beacon system, set SD = BE of the Coordinator. SD must be set at least to the highest BE parameter of any Beaconsing Coordinator with which an End Device or Coordinator wish to discover.

Coordinator - If the 'ReassignPANID' option is set on the Coordinator [refer to A2 parameter], the SD parameter determines the length of time the Coordinator will scan channels to locate existing PANs. If the 'ReassignChannel' option is set, SD determines how long the Coordinator will perform an Energy Scan to determine which channel it will operate on.

Scan Time is measured as ((# of Channels to Scan) * (2 ^ SD) * 15.36ms). The number of channels to scan is set by the SC command. The XBee RF Module can scan up to 16 channels (SC = 0xFFFF). The XBee PRO RF Module can scan up to 12 channels (SC = 0x1FFE).

Examples: Values below show results for a 12-channel scan

If SD = 0, time = 0.18 sec	SD = 8, time = 47.19 sec
SD = 2, time = 0.74 sec	SD = 10, time = 3.15 min
SD = 4, time = 2.85 sec	SD = 12, time = 12.58 min
SD = 6, time = 11.60 sec	SD = 14, time = 50.33 min

AT Command: ATSD

Parameter Range: 0 - 0x0F

Default Parameter Value: 4

Related Commands: ED (Energy Scan), SC (Scan Channel)

Minimum Firmware Version Required: v1.x80

SH (Serial Number High) Command

<Diagnostics> The SH command is used to read the high 32 bits of the RF module's unique IEEE 64-bit address.

The module serial number is set at the factory and is read-only.

AT Command: ATSH

Parameter Range: 0 - 0xFFFFFFFF [read-only]

Related Commands: SL (Serial Number Low), MY (Source Address)

SL (Serial Number Low) Command

<Diagnostics> The SL command is used to read the low 32 bits of the RF module's unique IEEE 64-bit address.

The module serial number is set at the factory and is read-only.

AT Command: ATSL

Parameter Range: 0 - 0xFFFFFFFF [read-only]

Related Commands: SH (Serial Number High), MY (Source Address)

SM (Sleep Mode) Command

<Sleep Mode (Low Power)> The SM command is used to set and read Sleep Mode settings. By default, Sleep Modes are disabled (SM = 0) and the RF module remains in Idle/Receive Mode. When in this state, the module is constantly ready to respond to either serial or RF activity.

SM command options vary according to the networking system type. By default, the module is configured to operate in a NonBeacon system.

* The Sleep Coordinator option (SM=6) only exists for backwards compatibility with firmware version 1.x06 only. In all other cases, use the CE command to enable a Coordinator.

AT Command: ATSM

Parameter Range: 0 - 6

Parameter	Configuration
0	Disabled
1	Pin Hibernate
2	Pin Doze
3	(reserved)
4	Cyclic Sleep Remote
5	Cyclic Sleep Remote (with Pin Wake-up)
6	Sleep Coordinator*

Default Parameter Value: 0

Related Commands: SP (Cyclic Sleep Period), ST (Time before Sleep)

SP (Cyclic Sleep Period) Command

<Sleep Mode (Low Power)> The SP command is used to set and read the duration of time in which a remote RF module sleeps. After the cyclic sleep period is over, the module wakes and checks for data. If data is not present, the module goes back to sleep. The maximum sleep period is 268 seconds (SP = 0x68B0).

The SP parameter is only valid if the module is configured to operate in Cyclic Sleep (SM = 4-6). Coordinator and End Device SP values should always be equal.

To send Direct Messages, set SP = 0.

NonBeacon Firmware

End Device - SP determines the sleep period for cyclic sleeping remotes. Maximum sleep period is 268 seconds (0x68B0).

Coordinator - If non-zero, SP determines the time to hold an indirect message before discarding it. A Coordinator will discard indirect messages after a period of (2.5 * SP).

AT Command: ATSP

Parameter Range: NonBeacon Firmware: 1 - 0x68B0 [x 10 milliseconds]

Default Parameter Value: NonBeacon Firmware: 0

Related Commands: SM (Sleep Mode), ST (Time before Sleep), DP (Disassociation Cyclic Sleep Period), BE (Beacon Order)



ST (Time before Sleep) Command

<Sleep Mode (Low Power)> The ST command is used to set and read the period of inactivity (no serial or RF data is sent or received) before activating Sleep Mode.

NonBeacon Firmware

Set/Read time period of inactivity (no serial or RF data is sent or received) before activating Sleep Mode. ST parameter is only valid with Cyclic Sleep settings (SM = 4 - 5).

Coordinator and End Device ST values must be equal.

AT Command: ATST

Parameter Range:	NonBeacon Firmware: 1 - 0xFFFF [x 1 millisecond]
Default Parameter Value:	NonBeacon Firmware: 0x1388 (5000 decimal)
Related Commands: SM (Sleep Mode), ST (Time before Sleep)	

T0 - T7 ((D0-D7) Output Timeout) Command

<I/O Settings {I/O Line Passing}> The T0, T1, T2, T3, T4, T5, T6 and T7 commands are used to set/read output timeout values for the lines that correspond with the D0 - D7 parameters. When output is set (due to I/O line passing) to a non-default level, a timer is started which when expired, will set the output to its default level. The timer is reset when a valid I/O packet is received. The Tn parameter defines the permissible amount of time to stay in a non-default (active) state. If Tn = 0, Output Timeout is disabled (output levels are held indefinitely).

AT Commands: ATT0 - ATT7

Parameter Range:	0 - 0xFF [x 100 msec]
Default Parameter Value:	0xFF
Minimum Firmware Version Required: v1.xA0	

VL (Firmware Version - Verbose)

<Diagnostics> The VL command is used to read detailed version information about the RF module. The information includes: application build date; MAC, PHY and bootloader versions; and build dates.

AT Command: ATVL

Parameter Range:	0 - 0xFF [x 100 milliseconds]
Default Parameter Value:	0x28 (40 decimal)
Minimum Firmware Version Required: v1.x80	

VR (Firmware Version) Command

<Diagnostics> The VR command is used to read which firmware version is stored in the module.

XBee version numbers will have four significant digits. The reported number will show three or four numbers and is stated in hexadecimal notation. A version can be reported as "ABC" or "ABCD". Digits ABC are the main release number and D is the revision number from the main release. "D" is not required and if it is not present, a zero is assumed for D. "B" is a variant designator. The following variants exist:

- "0" = Non-Beacon Enabled 802.15.4 Code
- "1" = Beacon Enabled 802.15.4 Code

AT Command: ATVR

Parameter Range:	0 - 0xFFFF [read only]
------------------	------------------------

WR (Write) Command

<(Special)> The WR command is used to write configurable parameters to the RF module's non-volatile memory. Parameter values remain in the module's memory until overwritten by subsequent use of the WR Command.

AT Command: ATWR

If changes are made without writing them to non-volatile memory, the module reverts back to previously saved parameters the next time the module is powered-on.

NOTE: Once the WR command is sent to the module, no additional characters should be sent until after the "OK/r" response is received.



3.4. API Operation

By default, XBee/XBee-PRO RF Modules act as a serial line replacement (Transparent Operation) - all UART data received through the DI pin is queued up for RF transmission. When the module receives an RF packet, the data is sent out the DO pin with no additional information.

Inherent to Transparent Operation are the following behaviors:

- If module parameter registers are to be set or queried, a special operation is required for transitioning the module into Command Mode.
- In point-to-multipoint systems, the application must send extra information so that the receiving module(s) can distinguish between data coming from different remotes.

As an alternative to the default Transparent Operation, API (Application Programming Interface) Operations are available. API operation requires that communication with the module be done through a structured interface (data is communicated in frames in a defined order). The API specifies how commands, command responses and module status messages are sent and received from the module using a UART Data Frame.

3.4.1. API Frame Specifications

Two API modes are supported and both can be enabled using the AP (API Enable) command. Use the following AP parameter values to configure the module to operate in a particular mode:

- AP = 0 (default): Transparent Operation (UART Serial line replacement) API modes are disabled.
- AP = 1: API Operation
- AP = 2: API Operation (with escaped characters)

Any data received prior to the start delimiter is silently discarded. If the frame is not received correctly or if the checksum fails, the data is silently discarded.

API Operation (AP parameter = 1)

When this API mode is enabled (AP = 1), the UART data frame structure is defined as follows:

Figure 3-01. UART Data Frame Structure:

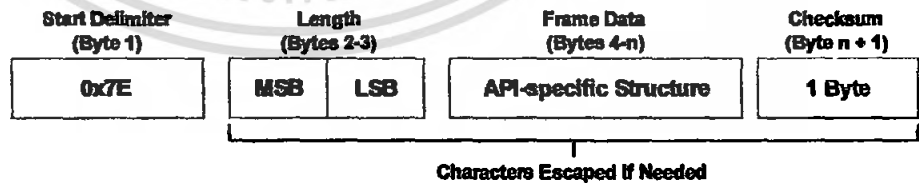


MSB = Most Significant Byte, LSB = Least Significant Byte.

API Operation - with Escape Characters (AP parameter = 2)

When this API mode is enabled (AP = 2), the UART data frame structure is defined as follows:

Figure 3-02. UART Data Frame Structure - with escape control characters:



MSB = Most Significant Byte, LSB = Least Significant Byte

Escape characters. When sending or receiving a UART data frame, specific data values must be escaped (flagged) so they do not interfere with the UART or UART data frame operation. To escape an interfering data byte, insert 0x7D and follow it with the byte to be escaped XOR'd with 0x20.



Data bytes that need to be escaped:

- 0x7E – Frame Delimiter
- 0x7D – Escape
- 0x11 – XON
- 0x13 – XOFF

Example - Raw UART Data Frame (before escaping interfering bytes):
 0x7E 0x00 0x02 0x23 0x11 0xCB

0x11 needs to be escaped which results in the following frame:
 0x7E 0x00 0x02 0x23 0x7D 0x31 0xCB

Note: In the above example, the length of the raw data (excluding the checksum) is 0x0002 and the checksum of the non-escaped data (excluding frame delimiter and length) is calculated as: $0xFF - (0x23 + 0x11) = (0xFF - 0x34) = 0xCB$.

Checksum

To test data integrity, a checksum is calculated and verified on non-escaped data.

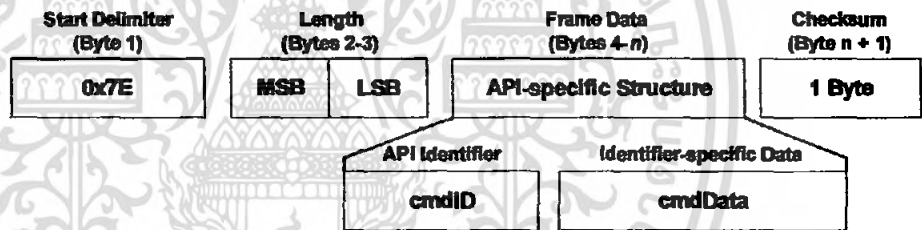
To calculate: Not including frame delimiters and length, add all bytes keeping only the lowest 8 bits of the result and subtract from 0xFF.

To verify: Add all bytes (Include checksum, but not the delimiter and length). If the checksum is correct, the sum will equal 0xFF.

3.4.2. API Types

Frame data of the UART data frame forms an API-specific structure as follows:

Figure 3-03. UART Data Frame & API-specific Structure:



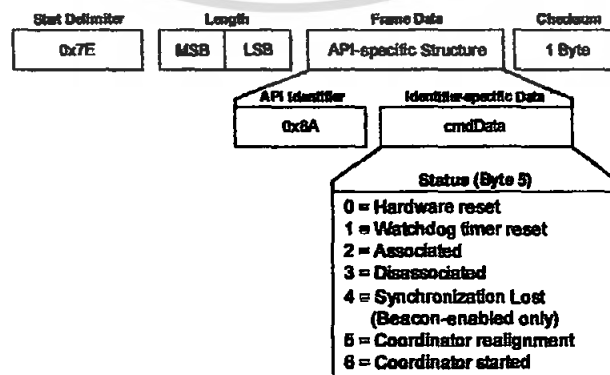
The cmdID frame (API-identifier) indicates which API messages will be contained in the cmdData frame (Identifier-specific data). Refer to the sections that follow for more information regarding the supported API types. Note that multi-byte values are sent big endian.

Modem Status

API Identifier: 0x8A

RF module status messages are sent from the module in response to specific conditions.

Figure 3-04. Modem Status Frames



AT Command

API Identifier Value: 0x08

The "AT Command" API type allows for module parameters to be queried or set. When using this command ID, new parameter values are applied immediately. This includes any register set with the "AT Command - Queue Parameter Value" (0x09) API type.

Figure 3-05. AT Command Frames

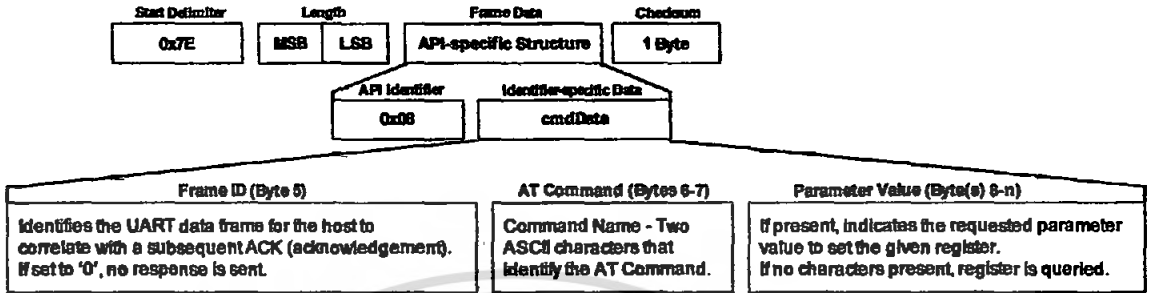
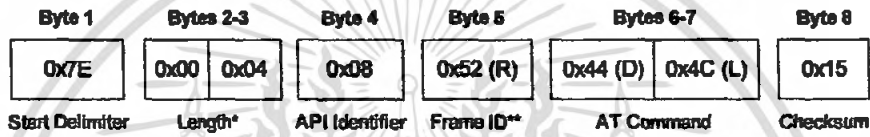
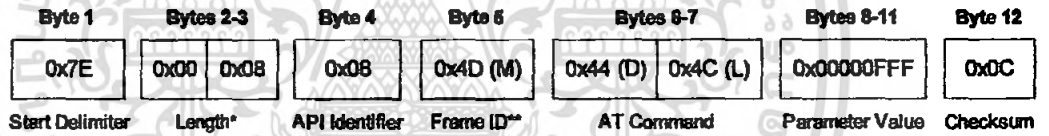


Figure 3-06. Example: API frames when reading the DL parameter value of the module.



* Length [Bytes] = API Identifier + Frame ID + AT Command
 ** "R" value was arbitrarily selected.

Figure 3-07. Example: API frames when modifying the DL parameter value of the module.



* Length [Bytes] = API Identifier + Frame ID + AT Command + Parameter Value
 ** "M" value was arbitrarily selected.

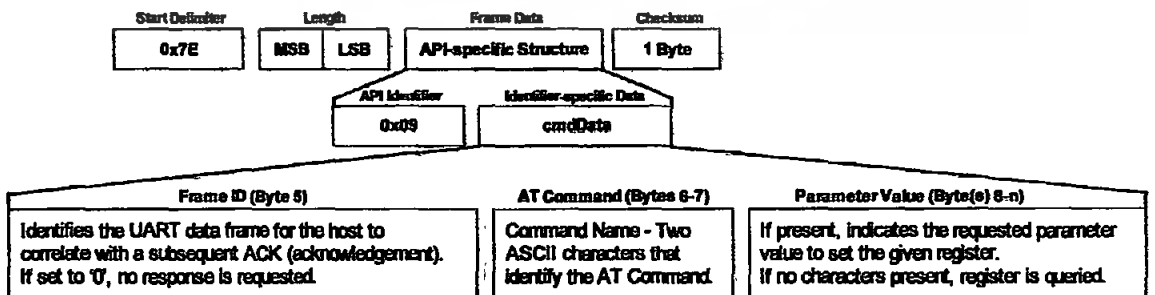
AT Command - Queue Parameter Value

API Identifier Value: 0x09

This API type allows module parameters to be queried or set. In contrast to the "AT Command" API type, new parameter values are queued and not applied until either the "AT Command" (0x08) API type or the AC (Apply Changes) command is issued. Register queries (reading parameter values) are returned immediately.

Figure 3-08. AT Command Frames

(Note that frames are identical to the "AT Command" API type except for the API identifier.)

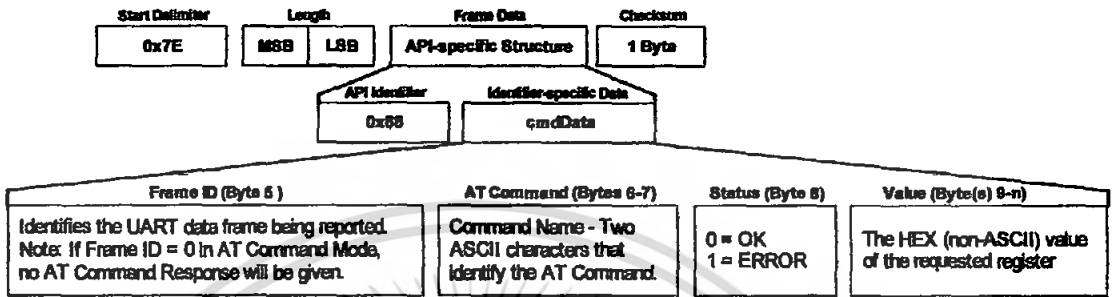


AT Command Response

API Identifier Value: 0x88
 Response to previous command.

In response to an AT Command message, the module will send an AT Command Response message. Some commands will send back multiple frames (for example, the ND (Node Discover) and AS (Active Scan) commands). These commands will end by sending a frame with a status of ATCMD_OK and no cmdData.

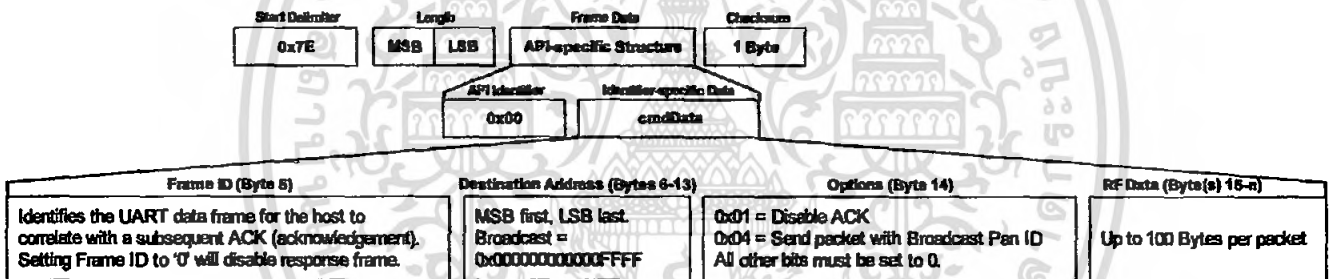
Figure 3-09. AT Command Response Frames.



TX (Transmit) Request: 64-bit address

API Identifier Value: 0x00
 A TX Request message will cause the module to send RF Data as an RF Packet.

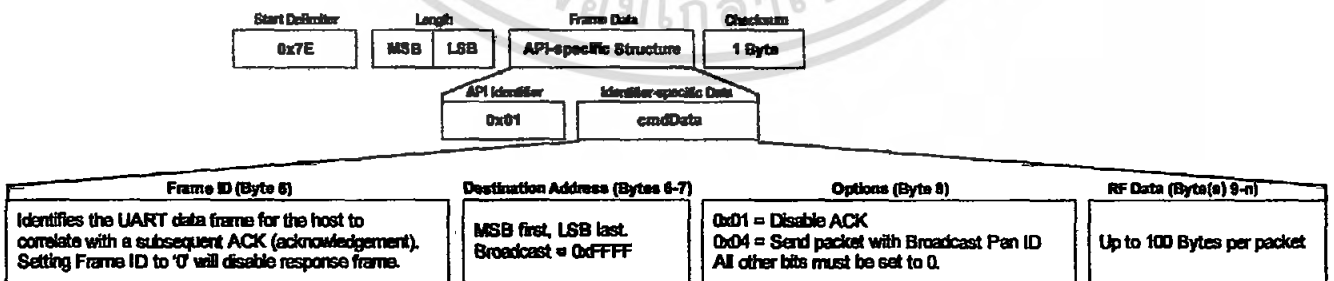
Figure 3-10. TX Packet (64-bit address) Frames



TX (Transmit) Request: 16-bit address

API Identifier Value: 0x01
 A TX Request message will cause the module to send RF Data as an RF Packet.

Figure 3-11. TX Packet (16-bit address) Frames

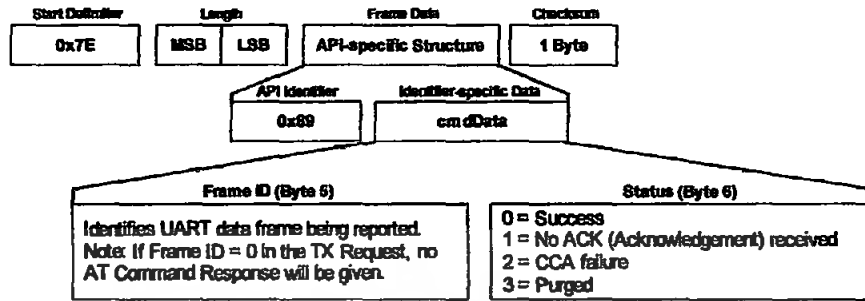


TX (Transmit) Status

API Identifier Value: 0x89

When a TX Request is completed, the module sends a TX Status message. This message will indicate if the packet was transmitted successfully or if there was a failure.

Figure 3-12. TX Status Frames



NOTES:

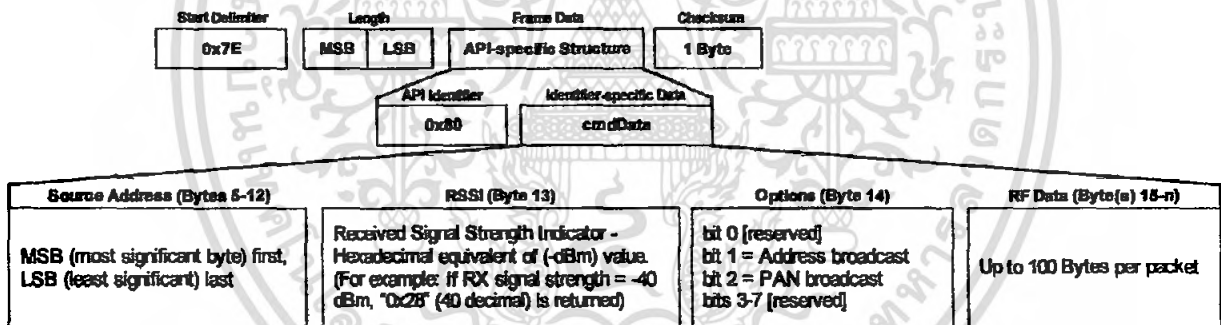
- "STATUS = 1" occurs when all retries are expired and no ACK is received.
- If transmitter broadcasts (destination address = 0x000000000000FFFF), only "STATUS = 0 or 2" will be returned.
- "STATUS = 3" occurs when Coordinator times out of an indirect transmission. Timeout is defined as (2.5 x SP (Cyclic Sleep Period) parameter value).

RX (Receive) Packet: 64-bit Address

API Identifier Value: 0x80

When the module receives an RF packet, it is sent out the UART using this message type.

Figure 3-13. RX Packet (64-bit address) Frames

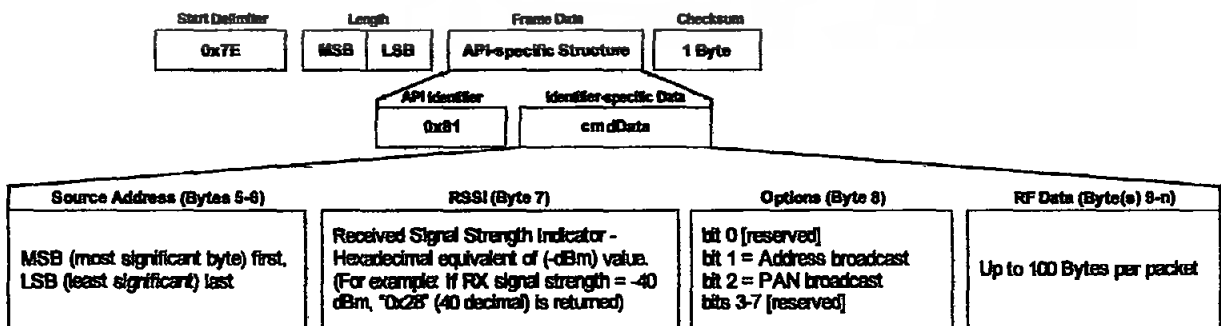


RX (Receive) Packet: 16-bit Address

API Identifier Value: 0x81

When the module receives an RF packet, it is sent out the UART using this message type.

Figure 3-14. RX Packet (16-bit address) Frames



Appendix A: Agency Certifications

United States (FCC)

XBee/XBee-PRO RF Modules comply with Part 15 of the FCC rules and regulations. Compliance with the labeling requirements, FCC notices and antenna usage guidelines is required.

To fulfill FCC Certification requirements, the OEM must comply with the following regulations:

1. The system Integrator must ensure that the text on the external label provided with this device is placed on the outside of the final product [Figure A-01].
2. XBee/XBee-PRO RF Modules may only be used with antennas that have been tested and approved for use with this module [refer to the antenna tables in this section].

OEM Labeling Requirements



WARNING: The Original Equipment Manufacturer (OEM) must ensure that FCC labeling requirements are met. This includes a clearly visible label on the outside of the final product enclosure that displays the contents shown in the figure below.

Figure A-01. Required FCC Label for OEM products containing the XBee/XBee-PRO RF Module

Contains FCC ID: OUR-XBEE/OUR-XBEEPRO*

The enclosed device complies with Part 15 of the FCC Rules. Operation is subject to the following two conditions: (i) this device may not cause harmful interference and (ii) this device must accept any interference received, including interference that may cause undesired operation.

* The FCC ID for the XBee is "OUR-XBEE". The FCC ID for the XBee-PRO is "OUR-XBEEPRO".

FCC Notices

IMPORTANT: The XBee/XBee-PRO OEM RF Module has been certified by the FCC for use with other products without any further certification (as per FCC section 2.1091). Modifications not expressly approved by MaxStream could void the user's authority to operate the equipment.

IMPORTANT: OEMs must test final product to comply with unintentional radiators (FCC section 15.107 & 15.109) before declaring compliance of their final product to Part 15 of the FCC Rules.

IMPORTANT: The RF module has been certified for remote and base radio applications. If the module will be used for portable applications, the device must undergo SAR testing.

This equipment has been tested and found to comply with the limits for a Class B digital device, pursuant to Part 15 of the FCC Rules. These limits are designed to provide reasonable protection against harmful interference in a residential installation. This equipment generates, uses and can radiate radio frequency energy and, if not installed and used in accordance with the instructions, may cause harmful interference to radio communications. However, there is no guarantee that interference will not occur in a particular installation.

If this equipment does cause harmful interference to radio or television reception, which can be determined by turning the equipment off and on, the user is encouraged to try to correct the interference by one or more of the following measures: Re-orient or relocate the receiving antenna, Increase the separation between the equipment and receiver, Connect equipment and receiver to outlets on different circuits, or Consult the dealer or an experienced radio/TV technician for help.



FCC-Approved Antennas (2.4 GHz)

XBee/XBee-PRO RF Modules can be installed using antennas and cables constructed with standard connectors (Type-N, SMA, TNC, etc.) if the installation is performed professionally and according to FCC guidelines. For installations not performed by a professional, non-standard connectors (RPSMA, RPTNC, etc) must be used.

The modules are FCC-approved for fixed base station and mobile applications on channels 0x0B - 0x1A (XBee) and 0x0C - 0x17 (XBee-PRO). If the antenna is mounted at least 20cm (8 in.) from nearby persons, the application is considered a mobile application. Antennas not listed in the table must be tested to comply with FCC Section 15.203 (Unique Antenna Connectors) and Section 15.247 (Emissions).

XBee OEM RF Modules (1 mW): XBee Modules have been tested and approved for use with all of the antennas listed in the tables below (Cable-loss IS NOT required).

XBee-PRO OEM RF Modules (60 mW): XBee-PRO Modules have been tested and approved for use with the antennas listed in the tables below (Cable-loss IS required when using antennas listed in Table A-02).

Table A-01. Antennas approved for use with the XBee/XBee-PRO RF Modules (Cable-loss is not required.)

Part Number	Type (Description)	Gain	Application*	Min. Separation
A24-HSM-450	Dipole (Half-wave articulated RPSMA - 4.5")	2.1 dBi	Fixed/Mobile	20 cm
A24-HABSM	Dipole (Articulated RPSMA)	2.1 dBi	Fixed	20 cm
A24-HABUF-P5I	Dipole (Half-wave articulated bulkhead mount U.F.L. w/ 5" pigtail)	2.1 dBi	Fixed	20 cm
A24-QI	Monopole (Integrated whip)	1.5 dBi	Fixed	20 cm

Table A-02. Antennas approved for use with the XBee/XBee-PRO RF Modules (Cable-loss is required)

Part Number	Type (Description)	Gain	Application*	Min. Separation	Required Cable-loss
A24-C1	Surface Mount	-1.5 dBi	Fixed/Mobile	20 cm	-
A24-Y4NF	Yagi (4-element)	6.0 dBi	Fixed	2 m	8.1 dB
A24-Y6NF	Yagi (6-element)	8.8 dBi	Fixed	2 m	10.9 dB
A24-Y7NF	Yagi (7-element)	9.0 dBi	Fixed	2 m	11.1 dB
A24-Y9NF	Yagi (9-element)	10.0 dBi	Fixed	2 m	12.1 dB
A24-Y10NF	Yagi (10-element)	11.0 dBi	Fixed	2 m	13.1 dB
A24-Y12NF	Yagi (12-element)	12.0 dBi	Fixed	2 m	14.1 dB
A24-Y13NF	Yagi (13-element)	12.0 dBi	Fixed	2 m	14.1 dB
A24-Y15NF	Yagi (15-element)	12.5 dBi	Fixed	2 m	14.6 dB
A24-Y16NF	Yagi (16-element)	13.5 dBi	Fixed	2 m	15.6 dB
A24-Y16RSM	Yagi (16-element, RPSMA connector)	13.5 dBi	Fixed	2 m	15.6 dB
A24-Y18NF	Yagi (18-element)	15.0 dBi	Fixed	2 m	17.1 dB
A24-F2NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	2.1 dBi	Fixed/Mobile	20 cm	4.2 dB
A24-F3NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	3.0 dBi	Fixed/Mobile	20 cm	5.1 dB
A24-F5NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	5.0 dBi	Fixed/Mobile	20 cm	7.1 dB
A24-F6NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	8.0 dBi	Fixed	2 m	10.1 dB
A24-F8NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	9.5 dBi	Fixed	2 m	11.6 dB
A24-F10NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	10.0 dBi	Fixed	2 m	12.1 dB
A24-F12NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	12.0 dBi	Fixed	2 m	14.1 dB
A24-F15NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	15.0 dBi	Fixed	2 m	17.1 dB
A24-W7NF	Omni-directional (Base station)	7.2 dBi	Fixed	2 m	9.3 dB
A24-M7NF	Omni-directional (Mag-mount base station)	7.2 dBi	Fixed	2 m	9.3 dB
A24-P8SF	Flat Panel	8.5 dBi	Fixed	2 m	8.6 dB
A24-P8NF	Flat Panel	8.5 dBi	Fixed	2 m	8.6 dB
A24-P13NF	Flat Panel	13.0 dBi	Fixed	2 m	13.1 dB
A24-P14NF	Flat Panel	14.0 dBi	Fixed	2 m	14.1 dB
A24-P15NF	Flat Panel	15.0 dBi	Fixed	2 m	15.1 dB
A24-P16NF	Flat Panel	16.0 dBi	Fixed	2 m	16.1 dB
A24-P18NF	Flat Panel	18.0 dBi	Fixed	2 m	18.1 dB

* If using the RF module in a portable application (For example - If the module is used in a handheld device and the antenna is less than 20cm from the human body when the device is operation): The integrator is responsible for passing additional SAR (Specific Absorption Rate) testing based on FCC rules 2.1091 and FCC Guidelines for Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, OET Bulletin and Supplement C. The testing results will be submitted to the FCC for approval prior to selling the integrated unit. The required SAR testing measures emissions from the module and how they affect the person.

RF Exposure



WARNING: To satisfy FCC RF exposure requirements for mobile transmitting devices, a separation distance of 20 cm or more should be maintained between the antenna of this device and persons during device operation. To ensure compliance, operations at closer than this distance is not recommended. The antenna used for this transmitter must not be co-located in conjunction with any other antenna or transmitter.

The preceding statement must be included as a CAUTION statement in OEM product manuals in order to alert users of FCC RF Exposure compliance.



Europe (ETSI)

The XBee/XBee-PRO RF Module has been certified for use in several European countries. For a complete list, refer to www.maxstream.net.

If the XBee/XBee-PRO RF Modules are incorporated into a product, the manufacturer must ensure compliance of the final product to the European harmonized EMC and low-voltage/safety standards. A Declaration of Conformity must be issued for each of these standards and kept on file as described in Annex II of the R&TTE Directive.

Furthermore, the manufacturer must maintain a copy of the XBee/XBee-PRO user manual documentation and ensure the final product does not exceed the specified power ratings, antenna specifications, and/or installation requirements as specified in the user manual. If any of these specifications are exceeded in the final product, a submission must be made to a notified body for compliance testing to all required standards.

OEM Labeling Requirements

The 'CE' marking must be affixed to a visible location on the OEM product.

Figure A-02. CE Labeling Requirements



The CE mark shall consist of the initials "CE" taking the following form:

- If the CE marking is reduced or enlarged, the proportions given in the above graduated drawing must be respected.
- The CE marking must have a height of at least 5mm except where this is not possible on account of the nature of the apparatus.
- The CE marking must be affixed visibly, legibly, and indelibly.

Restrictions

Power Output: The power output of the XBee-PRO RF Modules must not exceed 10 dBm. The power level is set using the PL command and the PL parameter must equal "0" (10 dBm).

France: France imposes restrictions on the 2.4 GHz band. Go to www.art-telecom.fr or contact MaxStream for more information.

Norway: Norway prohibits operation near Ny-Alesund in Svalbard. More information can be found at the Norway Posts and Telecommunications site (www.npt.no).

Declarations of Conformity

MaxStream has issued Declarations of Conformity for the XBee/XBee-PRO RF Modules concerning emissions, EMC and safety. Files are located in the 'documentation' folder of the MaxStream CD.

Important Note

MaxStream does not list the entire set of standards that must be met for each country. MaxStream customers assume full responsibility for learning and meeting the required guidelines for each country in their distribution market. For more information relating to European compliance of an OEM product incorporating the XBee/XBee-PRO RF Module, contact MaxStream, or refer to the following web sites:

CEPT ERC 70-03E - Technical Requirements, European restrictions and general requirements: Available at www.ero.dk/.

R&TTE Directive - Equipment requirements, placement on market: Available at www.ero.dk/.

Approved Antennas

When integrating high-gain antennas, European regulations stipulate EIRP power maximums. Use the following guidelines to determine which antennas to design into an application.

XBee OEM RF Module

The following antenna types have been tested and approved for use with the XBee Module:

Antenna Type: Yagi

RF module was tested and approved with 15 dBi antenna gain with 1 dB cable-loss (EIRP Maximum of 14 dBm). Any Yagi type antenna with 14 dBi gain or less can be used with no cable-loss.

Antenna Type: Omni-directional

RF module was tested and approved with 15 dBi antenna gain with 1 dB cable-loss (EIRP Maximum of 14 dBm). Any Omni-directional type antenna with 14 dBi gain or less can be used with no cable-loss.

Antenna Type: Flat Panel

RF module was tested and approved with 19 dBi antenna gain with 4.8 dB cable-loss (EIRP Maximum of 14.2 dBm). Any Flat Panel type antenna with 14.2 dBi gain or less can be used with no cable-loss.

XBee-PRO OEM RF Module (@ 10 dBm Transmit Power, PL parameter value must equal 0)

The following antennas have been tested and approved for use with the embedded XBee-PRO RF Module:

- Dipole (2.1 dBi, Omni-directional, Articulated RPSMA, MaxStream part number A24-HABSM)
- Chip Antenna (-1.5 dBi)
- Attached Monopole Whip (1.5 dBi)

The RF modem encasement was designed to accommodate the RPSMA antenna option.

Canada (IC)

Labeling Requirements

Labeling requirements for Industry Canada are similar to those of the FCC. A clearly visible label on the outside of the final product enclosure must display the following text:

Contains Model XBee Radio, IC: 4214A-XBEE

Contains Model XBee-PRO Radio, IC: 4214A-XBEEPRO

The Integrator is responsible for its product to comply with IC ICES-003 & FCC Part 15, Sub. B - Unintentional Radiators. ICES-003 is the same as FCC Part 15 Sub. B and Industry Canada accepts FCC test report or CISPR 22 test report for compliance with ICES-003.

Japan

In order to gain approval for use in Japan, the XBee-PRO RF Module must contain firmware that limits its transmit power output to 10 dBm.

For a list of module part numbers approved for use in Japan, contact MaxStream [call 1-801-765-9885 or send e-mail to sales@maxstream.net].

Labeling Requirements

A clearly visible label on the outside of the final product enclosure must display the following text:

ID: 005NYCA0378



Appendix B: Development Guide

Development Kit Contents

The XBee Professional Development Kit includes the hardware and software needed to rapidly create long range wireless data links between devices (XBee and XBee-PRO Starter Kits, that contain fewer modules and accessories, are also available).

Table B-01. Items Included in the Development Kit (Professional)

Item	Qty.	Description	Part #
XBee-PRO Module	2	(1) OEM RF Module w/ U.FL antenna connector (1) OEM RF Module w/ attached wire antenna	XBFP24-AUI-001 XBFP24-AWI-001
XBee Module	3	(1) OEM RF Module w/ U.FL antenna connector (1) OEM RF Module w/ attached whip antenna (1) OEM RF Module w/ chip antenna	XB24-AUI-001 XB24-AWI-001 XB24-ACI-001
RS-232 Development Board	4	Board for interfacing between modules and RS-232 devices (Converts signal levels, displays diagnostic info, & more)	XBIB-R
USB Development Board	1	Board for interfacing between modules & USB devices (Converts signal levels, displays diagnostic info, & more)	XBIB-U
RS-232 Cable (6', straight-through)	1	Cable for connecting RS-232 interface board with DTE devices (devices that have a male serial DB-9 port - such as most PCs)	JD2D3-CDS-6F
USB Cable (6')	1	Cable for connecting USB interface board to USB devices	JU1U2-CSB-6F
Serial Loopback Adapter	1	[Red] Adapter for configuring the module assembly (module + RS-232 interface board) to function as a repeater for range testing	JD2D3-CDL-A
NULL Modem Adapter (male-to-male)	1	[Black] Adapter for connecting the module assembly (module + RS-232 interface board) to other DCE (female DB-9) devices	JD2D2-CDN-A
NULL Modem Adapter (female-to-female)	1	[Gray] Adapter for connecting serial devices. It allows users to bypass the radios to verify serial cabling is functioning properly.	JD3D3-CDN-A
Power Adapter (9VDC, 1 A)	1	Adapter for powering the RS-232 development board	JP5P2-9V11-6F
Battery Clip (9V)	1	Clip for remotely powering the RS-232 board w/ a 9V battery	JP2P3-C2C-4I
RPSMA Antenna	2	RPSMA, half-wave dipole antenna (2.4 GHz, 2.1 dB)	A24-HASM-450
RF Cable Assembly	2	Adapter for connecting RPSMA antenna to U.FL connector	JF1R6-CR3-4I
CD	1	Documentation and Software	MD0030
Quick Start Guide	1	Step-by-step instruction on how to create wireless links & test range capabilities of the modules	MD0026

Interfacing Options

The development kit includes an RS-232 and a USB interface board. Both boards provide a direct connection to many serial devices and therefore provide access to the RF module registries. Parameters stored in the registry allow OEMs and Integrators to customize the modules to suite the needs of their data radio systems.

The following sections illustrate how to use the interface boards for development purposes. The MaxStream Interface board provides means for connecting the module to any node that has an available RS-232 or USB connector. Since the module requires signals to enter at TTL voltages, one of the main functions of the interface board is to convert signals between TTL levels and RS-232 and USB levels.

Note: In the following sections, an OEM RF Module mounted to an interface board will be referred to as a "Module Assembly".