

## บทที่ 2

### วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1. เทคโนโลยีที่ใช้ในการตรวจจําบรรณและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

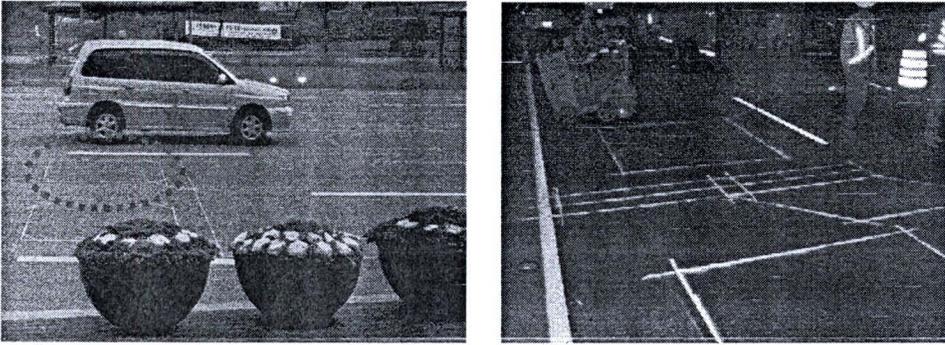
ในปัจจุบันมีหลายฝ่ายได้ตระหนักถึงความเสียหายในด้านต่างๆ เช่น ด้านเศรษฐกิจ ด้านสังคม และสิ่งแวดล้อม ที่เกิดจากปัญหาการจราจรคับคั่ง จึงพยายามแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยนําระบบขนส่งอัจฉริยะมาประยุกต์ใช้เพื่อการบริหารจัดการการจราจรดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งมีหลายหน่วยงานได้ทำการวิจัยและเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีต่างๆที่ใช้ในการตรวจจําบรรณและวิธีการวิเคราะห์ผลเพื่อนํามาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว ตัวอย่างเทคโนโลยีตรวจจําบรรณและงานวิจัย มีดังนี้

##### 1.1 เทคโนโลยีขดลวดเหนี่ยวนํา (Inductive Loop Detectors)

เทคโนโลยีขดลวดเหนี่ยวนําเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งทีพัฒนาขึ้นเพื่อใช้งานสำหรับตรวจจําหรือนับจํานวนรถซึ่งใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน มีหลักการทํางานที่สำคัญคือตรวจจําค่าสนามแม่เหล็กทีเกิดขึ้นภายในลูปเพื่อนําไปวิเคราะห์ผล การใช้งานเทคโนโลยีนี้ จะทําคัดตังโดยนําลวดไปขุดให้เป็นสี่เหลี่ยมขนาด 1.8 x 1.8 เมตร บนถนนบริเวณกลางช่องทางในแต่ละช่องทางดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยระหว่างทํางานจะปล่อยคลื่นความถี่ในช่วง 10-50 kHz เข้าไปให้ขดลวดซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นภายในขดลวดทีสร้างขึ้น และเมื่อมีรถขับผ่านขดลวดนี้จะทำให้การเหนี่ยวนําภายในลูปลดลงเป็นสาเหตุให้ความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับเกิดการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงทีเกิดขึ้นนี้สามารถนําไปใช้วิเคราะห์เพื่อตรวจจําบรรณหรือนําไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆได้ ซึ่งผลการตรวจจําบรรณของเทคโนโลยีขดลวดเหนี่ยวนํามีความแม่นยำเป็นอย่างมาก แต่กระบวนการตัดตังรวมถึงการบํารุงรักษาระบบต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญและต้องปิดถนนในช่องทางนั้น จึงทำให้การตัดตังและบํารุงรักษาทำได้ค่อนข้างยาก ส่งผลให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีชนิดอื่นขึ้นมาใช้แทนหรือใช้ควบคู่กันไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน

งานวิจัยทีใช้เทคโนโลยีขดลวดเหนี่ยวนําเป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจจําบรรณ เช่น งานวิจัย [22] แยกประเภทรถยนต์เป็น 2 ประเภท คือ รถยนต์กับรถโดยสารประจำทาง (Bus) ทดลองโดยตัดตังขดลวดเหนี่ยวนําบนพื้นผิวถนน จากนั้นนําสัญญาณทีได้มาวิเคราะห์เพื่อแยกประเภทรถยนต์ วิธีการแยกประเภทรถ คือ นําสัญญาณทีได้มาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง (Threshold) โดยลูปทีมีขนาดยาวจะทำให้ได้สัญญาณทีมีลักษณะราบเรียบและมีเฉพาะข้อมูลทีใช้เพื่อบอกความยาวของ

รถยนต์ได้เท่านั้น ส่วนรูปที่มีขนาดสั้นจะเป็นการตรวจจับโครงของรถยนต์ซึ่งสามารถนำสัญญาณนี้ไปวิเคราะห์เพื่อแยกประเภทรถยนต์ได้ ผลการทดลองของงานวิจัยนี้ คือ สามารถนำสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากรถยนต์มาเลือกพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อใช้วิเคราะห์แยกประเภทรถยนต์ได้ โดยถ้ารูปสั้นหลายๆจะสามารถตรวจจับล้อและหาระยะห่างระหว่างล้อได้ ทำให้ทราบความยาวรถซึ่งจะนำไปใช้แยกประเภทได้



ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างเทคโนโลยีขดลวดเหนี่ยวนำ [6, 33]

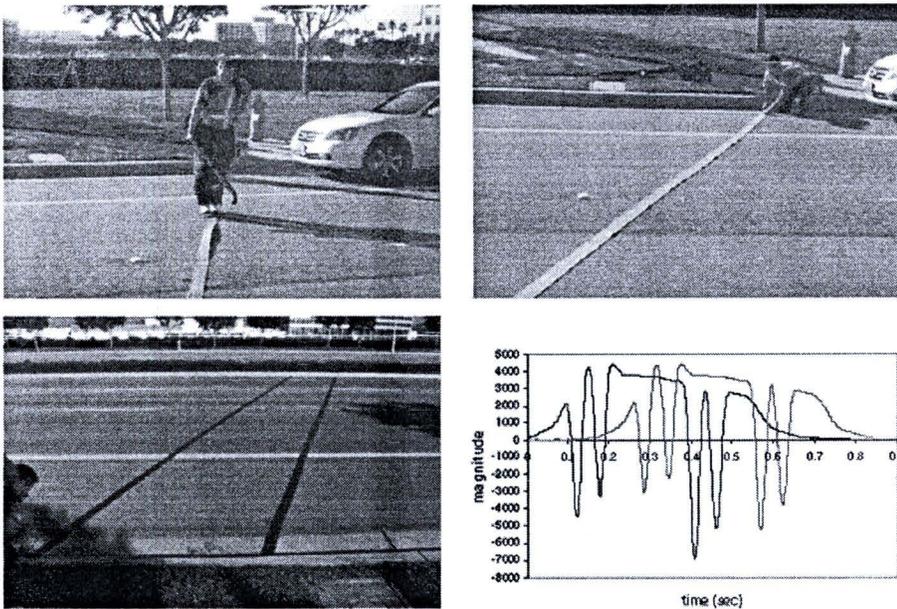
งานวิจัย [33] ทำการแยกประเภทรถออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ รถเก๋ง (Passenger Car) รถแวน (Van) รถโดยสารประจำทาง (Bus) รถบรรทุก (Truck) และรถจักรยานยนต์ (Motorcycle) ใช้อัลกอริทึม Back-propagation Neural Networks ในการแยกประเภท ทำการทดลองโดยแบ่งข้อมูลแบบสุ่มออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ใช้สอนให้รู้จำ (Training Set) มีข้อมูลรถ 433 คัน และกลุ่มที่ใช้ทดลอง (Test Set) มีข้อมูลรถ 622 คัน ได้ผลการทดลอง คือ รถเก๋งแยกได้ถูกต้องร้อยละ 92 รถแวนแยกได้ถูกต้องร้อยละ 79.4 รถโดยสารประจำทางแยกได้ถูกต้องร้อยละ 91.6 รถบรรทุกและรถจักรยานยนต์แยกได้ถูกต้องร้อยละ 100 ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลการทดลองงานวิจัย [33]

ประเภทรถ	จำนวนรถแต่ละประเภทที่แยกได้ (คัน)					
	1	2	3	4	5	ทั้งหมด
1. รถเก๋ง	163	6	2	-	-	171
2. รถแวน	12	108	2	-	-	122
3. รถโดยสารประจำทาง	-	-	121	-	-	121
4. รถบรรทุก	2	22	7	149	-	180
5. รถจักรยานยนต์	-	-	-	-	28	28

## 1.2 เทคโนโลยีเบลคเซ็นเซอร์ (Blade Sensor)

เทคโนโลยีเบลคเซ็นเซอร์ถูกพัฒนาขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์หลัก 2 อย่าง คือ 1. ต้องสามารถสร้างข้อมูลของรถแต่ละคันเพื่อใช้วิเคราะห์ตรวจจับรถได้ รวมถึงต้องสามารถวัดความเร็วและความยาวของรถได้ และ 2. การติดตั้งสามารถทำได้ง่าย รวดเร็ว และเคลื่อนย้ายได้ หรือติดตั้งเพื่อใช้ตรวจสอบสภาพจราจรแบบชั่วคราวได้ โดยอาศัยหลักการทำงานเช่นเดียวกับเทคโนโลยีชดลวดเหนี่ยวนำ หรืออาจกล่าวอีกอย่างได้ว่าเบลคเซ็นเซอร์ถูกพัฒนาขึ้นมาจากชดลวดเหนี่ยวนำนั่นเอง โดยมีหลักการทำงานเหมือนกัน แต่นำข้อเสียในเรื่องขนาด การติดตั้งและบำรุงรักษาระบบของชดลวดเหนี่ยวนำมาแก้ไข คือ ทำให้มีขนาดเล็กลงวางพาดขวางพื้นถนนในช่องทางที่ต้องการตรวจจับรถโดยไม่ต้องขุดเป็นสี่เหลี่ยม ทำให้สามารถติดตั้งได้ง่าย รวดเร็ว และเคลื่อนย้ายได้ ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้สำหรับตรวจสอบสภาพจราจรในบริเวณที่ต้องการแบบชั่วคราว ตัวอย่างการติดตั้งและสัญญาณที่ได้รับจากเบลคเซ็นเซอร์แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การติดตั้งและสัญญาณที่ได้รับจากเบลคเซ็นเซอร์ [14]

งานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีเบลคเซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์ในการตรวจจับรถ เช่น งานวิจัย [14] ทำการทดลองตรวจจับและแยกประเภทรถยนต์โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากเบลคเซ็นเซอร์ ทดลองโดยติดตั้งเบลคเซ็นเซอร์บนถนนและใช้เครื่องตรวจจับที่มีความเร็วสูงเก็บสัญญาณของรถยนต์แต่ละคัน ผลการทดลองตรวจจับรถยนต์สามารถเก็บสัญญาณได้ทั้งหมด 792 คัน แต่เป็นสัญญาณที่ถูกต้อง 658 คัน สัญญาณที่ผิดพลาดเกิดขึ้นเนื่องจากรถยนต์บางคันได้เปลี่ยนช่องทางจราจรทำให้บางส่วนไม่โดนเบลคเซ็นเซอร์ และงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งกล้องเพื่อนำรูปภาพที่ได้มาประมวลผล

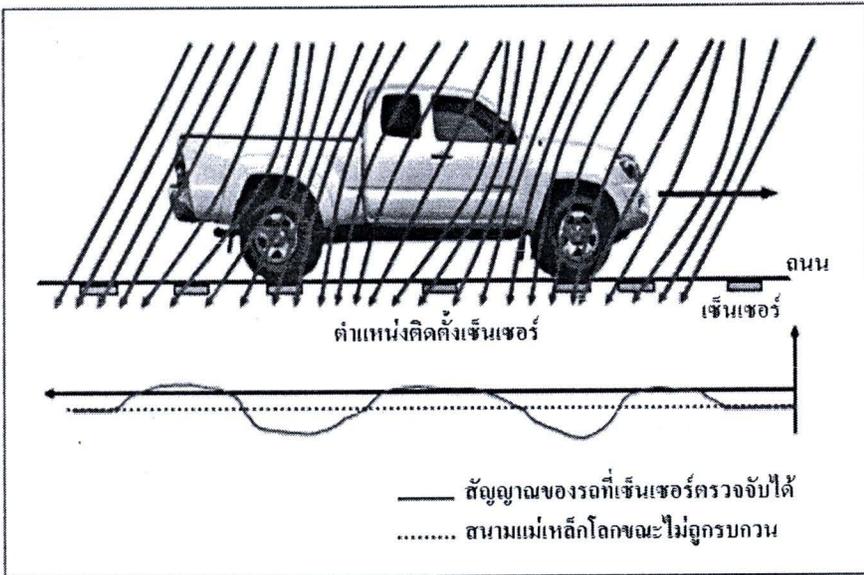
ร่วมกับสัญญาณที่เบสคเซ็นเซอร์ตรวจจับได้ โดยรูปภาพจากกล้องจะเป็นการหาลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์ของรถยนต์แต่ละประเภท และสัญญาณจากเบสคเซ็นเซอร์จะบ่งบอกถึงระยะห่างของล้อรถยนต์ การทดลองแยกประเภทรถยนต์ของงานวิจัยนี้ใช้วิธีการ Probabilistic Neural Network (PNN), Bayesian และอัลกอริทึม Heuristic Classification ซึ่งทำการแยกประเภทรถยนต์ออกเป็น 4 ประเภท คือ รถเก๋ง รถบรรทุกขนาดเล็ก (Mini-truck) รถเอสยูวี (SUV) และรถแวน ทำการทดลองโดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 5 กลุ่ม ให้ 4 กลุ่มเป็นกลุ่มที่ใช้สอนให้รู้จำและ 1 กลุ่ม เป็นกลุ่มที่ใช้ทดลอง โดยแต่ละกลุ่มมีรถยนต์ประเภทละ 12 คัน ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลการทดลองงานวิจัย [14]

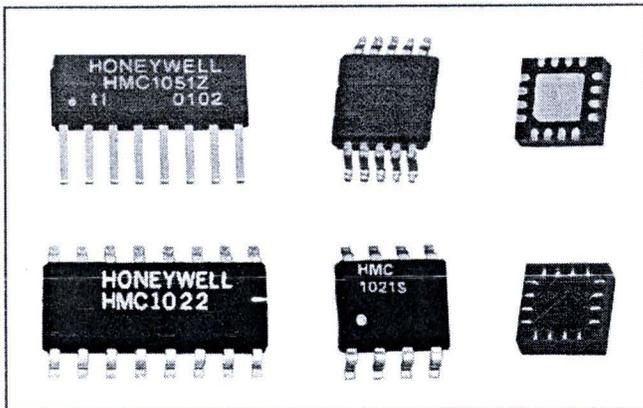
ประเภทรถ (ประเภทละ 12 คัน)	แยกประเภทได้ถูกต้อง (%)	
	PNN-CCR	Heuristic-CCR
รถเก๋ง	75.0	75.0
รถบรรทุกขนาดเล็ก	75.0	58.3
รถเอสยูวี	75.0	75.0
รถแวน	58.3	58.3
รวมทั้งหมด (%)	70.8	66.7

### 1.3 เทคโนโลยีแมกเนติกเซ็นเซอร์ (Magnetic Sensor)

เทคโนโลยีแมกเนติกเซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่ง que พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ตรวจจับรถ มีหลักการที่สำคัญ คือ ตรวจจับค่าสนามแม่เหล็กโลกในบริเวณนั้นเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล ซึ่งค่าสนามแม่เหล็กโลกที่นำไปวิเคราะห์นั้นจะอาศัยคุณสมบัติของสนามแม่เหล็ก คือ ขณะที่รถเคลื่อนที่โลหะจากรถจะทำให้ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กโลกในบริเวณนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง และแมกเนติกเซ็นเซอร์ซึ่งตรวจจับค่าสนามแม่เหล็กโลกอยู่แล้วจึงสามารถตรวจจับค่าที่เปลี่ยนแปลงนี้ได้เช่นกัน โดยเซ็นเซอร์จะอาศัยวิธีการวิทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) ในการตรวจจับ และส่งค่าที่ได้ออกมาในรูปของแรงดันทางไฟฟ้า ตัวอย่างลักษณะสนามแม่เหล็กโลกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่แสดงดังภาพที่ 2.3 บล็อกขนาดเล็กได้ถนนแสดงตำแหน่งที่สามารถติดตั้งเซ็นเซอร์ได้ และกราฟแสดงสัญญาณที่เซ็นเซอร์ตรวจจับได้ และเทคโนโลยีชนิดนี้ถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็ก ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ มีราคาถูก กระบวนการติดตั้งและบำรุงรักษาสามารถทำได้ง่าย ในปัจจุบันแมกเนติกเซ็นเซอร์ที่ผลิตขึ้นมา มีหลายรูปแบบและมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้งาน ตัวอย่างเทคโนโลยีแมกเนติกเซ็นเซอร์แสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.3 ลักษณะสนามแม่เหล็กโลกที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากรถยนต์ [18]



ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างเทคโนโลยีแมกเนติกเซ็นเซอร์ [18]

งานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีแมกเนติกเซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับรถ เช่น งานวิจัย [29] ทำการทดลองโดยติดตั้งเซ็นเซอร์โหนดในถนนบริเวณตรงกลางช่องทางจราจรในแต่ละช่องทางเพื่อตรวจจับรถที่ขับผ่าน จากนั้นส่งผลที่ได้ไปยังแอคเซสพอยต์ซึ่งติดตั้งบริเวณริมถนนเพื่อนำผลที่ตรวจจับได้มาประมวลผล โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลอง 2 อย่าง คือ นับจำนวนรถ และทดลองแยกประเภทรถยนต์ออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ รถเก๋ง รถเอสยูวี รถแวน รถโดยสารประจำทาง และรถบรรทุกขนาดเล็ก การนับจำนวนรถทำโดยใช้วิธี ATDA (Adaptive Threshold Detection Algorithm) ซึ่งเป็นการนำค่าที่เปลี่ยนแปลงไปมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง ผลการทดลองพบว่าสามารถนับจำนวนรถได้ถูกต้อง 330 คัน จากทั้งหมด 332 คัน หรือคิดเป็นร้อยละ 99 ส่วนรถ 2 คัน

ที่ตรวจนับไม่ได้คือรถจักรยานยนต์ ดังนั้นในการทดลองแยกประเภทรถจึงแยกประเภทเฉพาะรถยนต์ไม่นำรถจักรยานยนต์มาคิดรวมด้วย ใช้อัลกอริทึม Hill-Pattern ในการแยก ผลการทดลองสามารถแยกประเภทรถได้ถูกต้อง 24 คัน จากทั้งหมด 37 คัน หรือคิดเป็นร้อยละ 63 ดังแสดงในตารางที่ 2.3 แต่ในการทดลองแยกประเภทรถนี้ผู้วิจัยไม่ได้นำความยาวและความเร็วของรถยนต์มาประมวลผลด้วย จึงได้แนะนำให้นำค่าของ 2 ตัวแปรนี้มาวิเคราะห์ร่วมด้วย เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการแยกประเภทรถยนต์ และผู้วิจัยคาดว่าน่าจะแยกได้ถูกต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80

ตารางที่ 2.3 ผลการทดลองงานวิจัย [29]

ประเภทรถ	จำนวนรถในการทดลอง (คัน)	จำนวนรถแต่ละประเภทที่แยกได้ (คัน)					
		1	2	3	4	5	3, 5
1. รถเก๋ง	15	11	4	-	-	-	-
2. รถเอสยูวี	7	3	4	-	-	-	-
3. รถแวน	5	1	-	1	-	-	3
4. รถโดยสารประจำทาง	3	-	-	-	3	-	-
5. รถบรรทุกขนาดเล็ก	7	4	1	-	-	2	-
รวมทั้งหมด	37	19	9	1	3	2	3
คิดเป็นร้อยละ (%)	-	73.33	57.12	20	100	28.57	-

งานวิจัย [28] เลือกแมกเนติกเซ็นเซอร์ชนิด 3 แกน เป็นอุปกรณ์ตรวจจับรถ โดยติดตั้งเซ็นเซอร์ที่บริเวณประตูทางเข้ามหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต เพื่อแยกประเภทรถออกเป็น 5 ประเภท คือ รถจักรยานยนต์ รถเก๋ง รถกระบะ รถแวน และรถโดยสารประจำทาง โดยนำค่าสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับมาวิเคราะห์เพื่อหาค่า 3 ชนิด คือ ความยาวรถ พลังงานเฉลี่ย และจำนวนจุดสูงสุดของ Hill-pattern จากนั้นจะนำค่าทั้ง 3 ชนิดนี้ไปประมวลผลร่วมกันเพื่อแยกประเภทรถ โดยจำนวนรถที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดมี 393 คัน แบ่งเป็น รถจักรยานยนต์ 65 คัน รถเก๋ง 154 คัน รถกระบะ 98 คัน รถแวน 34 คัน และรถโดยสารประจำทาง 42 คัน ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลการทดลองงานวิจัย [28]

ประเภทรถ	จำนวนรถในการทดลอง (คัน)	แยกประเภทได้ถูกต้อง (%)
รถจักรยานยนต์	65	100
รถเก๋ง	154	77.92
รถกระบะ	98	66.33
รถแวน	34	76.47
รถโดยสารประจำทาง	42	100
รวมทั้งหมด	393	84.14

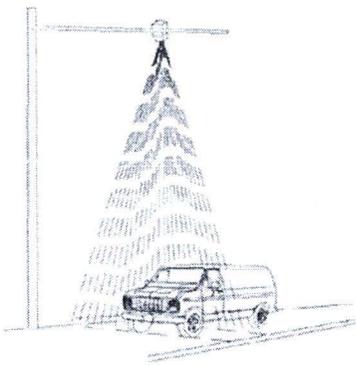
#### 1.4 เทคโนโลยีเลเซอร์เซ็นเซอร์ (Laser Sensor)

เทคโนโลยีเลเซอร์เซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่พัฒนามาใช้กับงานทางด้านจราจร การทำงานอาศัยหลักการสะท้อนกลับของเลเซอร์ที่ยิงออกไป คือ ถ้ายิงเลเซอร์ออกไปแล้วไม่มีการสะท้อนกลับมาแสดงว่าไม่มีรถอยู่ในบริเวณนั้น แต่ในทางกลับกันถ้ามีเลเซอร์สะท้อนกลับมาแสดงว่ามีรถอยู่ในบริเวณนั้น เนื่องจากเลเซอร์ที่ยิงออกไปจะไปตกกระทบกับรถแล้วสะท้อนกลับมา ข้อมูลที่ได้จากเลเซอร์เซ็นเซอร์ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ เช่น ถ้าต้องการทราบความยาวรถสามารถติดตั้งเลเซอร์เซ็นเซอร์ได้ 2 บริเวณ คือ ติดตั้งริมถนนเพื่อให้เลเซอร์สะท้อนกลับเมื่อตกกระทบกับด้านข้างของรถ หรือติดตั้งเหนือพื้นผิวถนนสูงกว่าหลังคาเพื่อให้เลเซอร์สะท้อนกลับจากหลังคา หากต้องการทราบความกว้างของรถสามารถทำได้โดยติดตั้งเหนือพื้นผิวถนนสูงกว่าหลังคาเช่นเดียวกับหาความยาวรถแต่เพิ่มเลเซอร์เซ็นเซอร์เข้าไปหลายจุดในแนวตัดขวางถนนจะทำให้ทราบความกว้างของรถ ข้อมูลเหล่านี้จะนำไปวิเคราะห์เพื่อนับจำนวน วัดความเร็ว หรือแยกประเภทรถ ข้อดีของเทคโนโลยีชนิดนี้คือ สามารถติดตั้งบริเวณริมถนนหรือด้านบนถนนได้ ซึ่งไม่ต้องยุ่งเกี่ยวกับพื้นถนน ทำให้ไม่เกิดความยากลำบากในการติดตั้งมากนัก ตัวอย่างเทคโนโลยีเลเซอร์เซ็นเซอร์แสดงดังภาพที่ 2.5

งานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีเลเซอร์เซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์ในการตรวจจับรถ เช่น งานวิจัย [32] ใช้เลเซอร์เซ็นเซอร์ร่วมกับกล้องวงจรปิดเพื่อนำข้อมูลมาแยกประเภทรถยนต์ออกเป็น 12 ประเภท ได้แก่รถขนาดเล็ก (Short vehicle) รถลากขนาดเล็ก (Short vehicle towing) รถบรรทุกหรือรถโดยสารประจำทางแบบ 2 แกนล้อ (Two axle truck or bus) รถบรรทุกหรือรถโดยสารประจำทางแบบ 3 แกนล้อ (Three axle truck or bus) รถบรรทุกแบบ 4 แกนล้อ (Four axle truck) รถบรรทุกแบบ 3 แกนล้อ (Three axle articulated) รถบรรทุกแบบ 4 แกนล้อ (Four axle articulated)



รถบรรทุกแบบ 5 แกนล้อ (Five axle articulated) รถบรรทุกแบบ 6 แกนล้อ (Six axle articulated) รถพ่วง 2 ตอนแบบ 9 แกนล้อ (B-double) รถพ่วง 2 ตอนแบบ 9, 11 หรือ 13 แกนล้อ (Double road train) และรถพ่วง 3 ตอนแบบ 18 แกนล้อ (Triple road train) โดยติดตั้งกล้องวงจรปิด 1 ตัว และเลเซอร์เซ็นเซอร์บริเวณด้านข้างถนน 2 จุด เพื่อใช้ในการตรวจจับรถยนต์และวัดความเร็วในแต่ละช่องทางจราจร และนำสัญญาณที่ได้มาประมวลผลแยกประเภทรถยนต์ตามขั้นตอนดังนี้ คือ กำจัดสัญญาณรบกวนโดยใช้ Wavelet-based noise reduction จากนั้นคำนวณหาตำแหน่งของแต่ละช่องทางจราจร เพื่อใช้วิเคราะห์รถยนต์อยู่ในช่องทางจราจรใด แล้วเลือกแกนไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงแกนที่มีช่องว่างระหว่างแกนมากกว่า 10 เมตร จึงหยุด นับเป็นการกำหนดว่าในช่วงนี้ไม่ใช่รถยนต์ ซึ่งเป็นการลดจำนวนข้อมูลที่ไม่จำเป็นออกไป จากนั้นใช้ Gradient filter เพื่อหาค่าความกว้างที่เปลี่ยนแปลงไป และใช้ Laplacian filter เพื่อหาขอบของสัญญาณเริ่มต้นโดยทำ zeros crossings จากนั้นคำนวณหาระยะห่างระหว่างแกนที่น้อยกว่า 2.1 เมตร ซึ่งแกนแรกจะเป็นล้อหน้า ทำให้สามารถวิเคราะห์หาจำนวนรถยนต์ได้ และนำระยะเวลาช่วงที่แกนแรกผ่านเซ็นเซอร์ตัวที่ 1 ไปถึงเซ็นเซอร์ตัวที่ 2 มาคำนวณหาความเร็วรถยนต์ งานวิจัยนี้ทำการทดลองทั้งหมด 57 คัน สามารถแยกประเภทได้ถูกต้อง 37 คัน



ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างเทคโนโลยีเลเซอร์เซ็นเซอร์ [23]

งานวิจัย [13] ใช้เลเซอร์เซ็นเซอร์ในการทดลองเพื่อแยกประเภทรถออกเป็น 14 ประเภท โดยแต่ละประเภทยังมีจำนวนรถที่ใช้ทดลอง ดังนี้ รถจักรยานยนต์ 5 คัน รถเก๋ง 445 คัน รถบรรทุกขนาดเล็ก 233 คัน รถแวนขนาดเล็ก 45 คัน รถแวน 67 คัน รถเอสยูวี 62 คัน รถคาร์โกแวน (Cargo van) 16 คัน รถบรรทุกส่งสินค้า (Delivery truck) 28 คัน รถหัวรถลาก (Tractor truck) 6 คัน รถบรรทุก (Tractor with trailer) 51 คัน รถเก็บขยะ (Garbage truck) 3 คัน รถบรรทุกคัมพ์ (Dump truck) 6 คัน รถโดยสารประจำทาง (Bus) 10 คัน และรถคิดแปลงเอนกประสงค์ (Recreation vehicle) 5 คัน รวมทั้งหมด 982 คัน ทำการทดลองโดยติดตั้งระบบเซ็นเซอร์ 30 จุด ไว้เหนือช่องทาง



จรรยา โดยระบบนี้จะได้อ่านค่าความหนาแน่นและระยะห่างของแต่ละพิกเซลกับเซ็นเซอร์ นำสองค่านี้มาคำนวณเพื่อหาค่าในแต่ละพิกเซล จากนั้นจะทำการแยกพิกเซลที่เป็นรถออกจากพิกเซลที่เหลือ แล้วนำค่าไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจะได้ขอบของรถนำไปคำนวณหาความสูง ความกว้าง ความยาว ความเร็ว และตัวแปรอื่นๆอีก 16 ชนิด จากนั้นนำตัวแปรทั้งหมดไปวิเคราะห์ร่วมกันเพื่อแยกประเภทรถ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.5

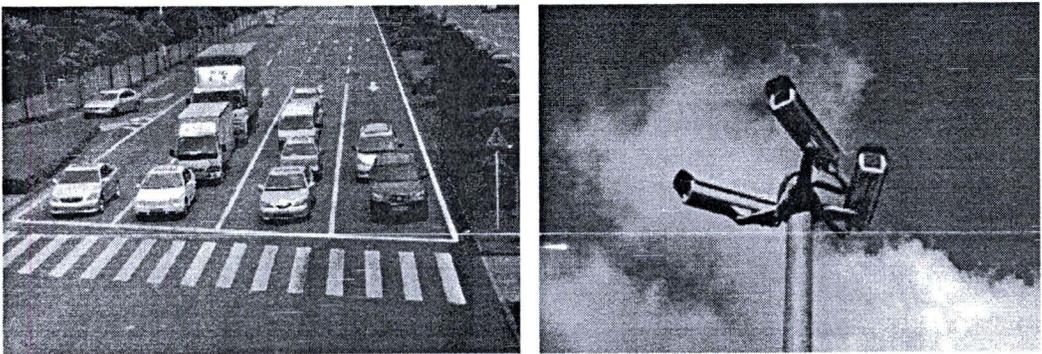
ตารางที่ 2.5 ผลการทดลองงานวิจัย [13]

ประเภทรถ	จำนวนรถในการทดลอง (คัน)	แยกประเภทได้ถูกต้อง (%)
รถจักรยานยนต์	5	100
รถเก๋ง	445	98
รถบรรทุกขนาดเล็ก	233	89
รถแวนขนาดเล็ก	45	78
รถแวน	67	92
รถเอสยูวี	62	76
รถคาร์โกแวน	16	93
รถบรรทุกส่งสินค้า	28	73
รถหัวรถลาก	6	100
รถบรรทุก	51	87
รถเก็บขยะ	3	50
รถบรรทุกคัมพ์	6	50
รถโดยสารประจำทาง	10	33
รถตัดแปลงเอนกประสงค์	5	33
รวมทั้งหมด	982	75.14

### 1.5 เทคโนโลยีกล้องวงจรปิด (Camera)

เทคโนโลยีกล้องวงจรปิดเป็นอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านจราจรกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยข้อมูลที่ได้รับจะอยู่ในลักษณะของรูปภาพซึ่งมีข้อมูลอยู่หลากหลายสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานได้หลายด้าน เช่น นับจำนวน แยกประเภท ตรวจสอบสภาพ

การจราจร ตรวจสอบทะเบียนรถ ตรวจสอบรถที่ทำผิดกฎจราจร เป็นต้น ในการวิเคราะห์ข้อมูลต้องอาศัยวิธีการทางด้านการประมวลผลภาพ (Image processing) ซึ่งมีมากมายหลายวิธีต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานและได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ ในส่วนของการติดตั้งสามารถทำได้หลายตำแหน่งขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่จะนำไปใช้และข้อมูลที่ต้องการในภาพนั้น ตัวอย่างเช่น ติดตั้งกล้องให้มองเห็นถนนในมุมมองกว้างครอบคลุมหลายช่องทางเพื่อตรวจสอบสภาพจราจรในบริเวณนั้น หรือติดตั้งบริเวณทางแยกที่ควบคุมด้วยไฟสัญญาณจราจรเพื่อทำระบบเปลี่ยนสัญญาณไฟโดยอัตโนมัติ ตัวอย่างกล้องวงจรปิดและรูปภาพที่ได้จากกล้องวงจรปิดแสดงดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างกล้องวงจรปิดและรูปภาพที่ได้จากกล้องวงจรปิด [11, 15]

งานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีกล้องวงจรปิดเป็นอุปกรณ์ในการตรวจสอบรถมีหลายงานวิจัย เช่น งานวิจัย [15] ทดลองนับจำนวนรถยนต์แบบเวลาจริง ณ บริเวณทางแยกของถนนที่ควบคุมโดยไฟสัญญาณจราจร โดยติดตั้งกล้องไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสม เมื่อกำลังตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนที่ได้จะนำภาพนั้นมาแปลงเป็นภาพไบนารี แล้วตัดภาพให้เหลือเฉพาะบริเวณที่เป็นวัตถุเคลื่อนที่ จากนั้นกรองสัญญาณรบกวนออก จากนั้นนำไปคำนวณหาความยาวรถยนต์ที่จอดครอสสัญญาณไฟเขียวในแต่ละช่องทางจราจร ผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ความยาวของรถในแต่ละช่องทางจราจรได้ ซึ่งสามารถนำข้อมูลนี้ไปเปลี่ยนไฟสัญญาณเพื่อลดการสะสมบริเวณทางแยกได้

งานวิจัย [12] เป็นการนำรูปภาพจากกล้องวงจรปิดมาแยกประเภทรถยนต์และประเมินความหนาแน่นของการจราจรโดยใช้อัลกอริทึม Neural Network การทดลองมี 3 กระบวนการหลักๆ กระบวนการแรก คือ Moving Object Detector (MOD) จะนำค่าของแต่ละเมตริกในรูปภาพที่เป็นโทนสีเทามาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงแล้วแปลงให้กลายเป็น 0 กับ 1 เพื่อทำเป็นภาพไบนารี โดยปกติบริเวณที่เป็นรถยนต์จะได้ค่าแตกต่างกับค่าที่เป็นพื้นหลัง ทำให้สามารถแยกบริเวณที่เป็นรถยนต์ออกจากพื้นหลังได้ ส่งผลให้สามารถตรวจจับรถยนต์ได้ จากนั้นเข้าสู่กระบวนการ Vehicle Identifier (VI) เพื่อแยกประเภทรถยนต์โดยใช้ Neural Network ซึ่งใช้ผลจากกระบวนการแรกที่ได้

แบ่งคุณสมบัติของรถยนต์ไว้ 14 อย่างด้วยกันให้เป็นอินพุต และเอาที่พุตเป็นประเภทของรถยนต์ มี 4 ประเภท คือ รถเก๋ง (รถยนต์ขนาดเล็ก) รถแวน (รถยนต์ขนาดกลาง) รถโดยสารประจำทาง (รถยนต์ขนาดใหญ่) และอื่นๆ จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการสุดท้าย คือ Traffic Density Calculator (TDC) เป็นการนำภาพทั้งเฟรมจากกล้องวงจรปิดมาวิเคราะห์หาความหนาแน่นของการจราจร โดยผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 2.6 และความหนาแน่นของการจราจรคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ความหนาแน่นของการจราจร} = \frac{\text{จำนวนรถยนต์ในระยะเวลาที่กำหนด}}{\text{ระยะเวลาที่กำหนด}} \quad [12]$$

ตารางที่ 2.6 ผลการทดลองงานวิจัย [12]

	จำนวนรถทั้งหมด	รถเก๋ง	รถแวน	รถโดยสารประจำทาง	อื่นๆ
จำนวนรถทั้งหมด (คัน)	68	58	9	1	0
ตรวจจับได้ (คัน)	68	48	15	1	4
ความถูกต้อง (คัน)	68	64			4
ความถูกต้อง (%)	100%	94%			6%

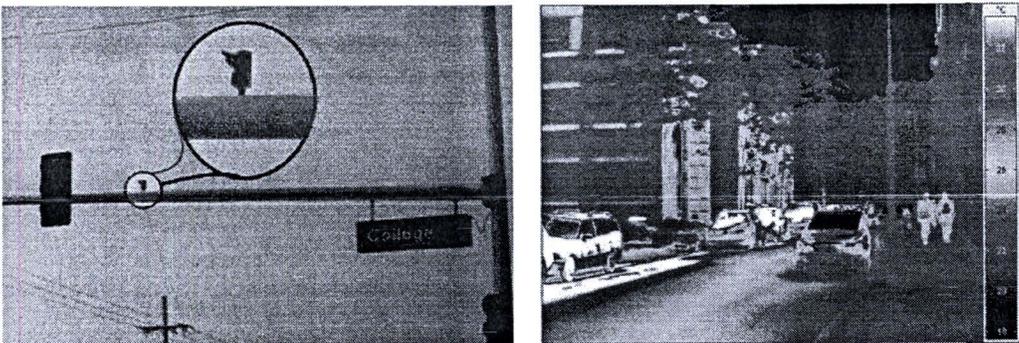
งานวิจัย [7] เป็นการใช้อัลกอริทึม Neural Network แยกประเภทรถยนต์ในรูปภาพที่ได้จากกล้องวงจรปิดหลายตัวที่ติดตั้งเป็นมุม 32.2 องศาจากแนวราบ ซึ่งอยู่ระดับต่ำกว่ารถยนต์เพื่อตรวจดูทิศทางการเคลื่อนที่ จากนั้นนำรูปภาพที่ถ่ายแต่ละส่วนของรถยนต์ไปเข้าสู่กระบวนการแยกประเภทรถยนต์ออกเป็น 4 ประเภท คือ รถโดยสารประจำทาง 2 ชั้น (Double decker bus) รถแวน เชฟโรเลต (Chevrolet van) รถซาบ 9000 (Saab 9000) และรถโอเปิลแมนตรา 400 (Opel Mantra 400) การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบความถูกต้องในการแยกประเภทของ 3 อัลกอริทึม ได้แก่ อัลกอริทึม Back-propagation (BP) อัลกอริทึม Direct Solution Method (DSM) และอัลกอริทึม DSM with Additional Neurons (DSM-AN) โดยการทดลองได้กำหนดข้อมูลของกลุ่มที่ใช้สอนให้รู้จำมีรถยนต์แต่ละประเภทจำนวน 100 คัน รวมทั้งหมด 400 คัน และข้อมูลของกลุ่มทดลอง มีรถยนต์แต่ละประเภทจำนวน 50 คัน รวมทั้งหมด 200 คัน โดยผลการทดลองแยกประเภทของทั้ง 3 อัลกอริทึมแสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลการทดลองงานวิจัย [7]

วิธีการ	แยกประเภทถูกต้อง (%)	
	กลุ่มที่ใช้สอนให้รู้จำ	กลุ่มทดลอง
Back-propagation (BP)	86	51.5
Direct Solution Method (DSM)	90	56
DSM with Additional Neurons (DSM-AN)	100	62

### 1.6 เทคโนโลยีอินฟราเรดเซ็นเซอร์ (Infrared Sensor)

เทคโนโลยีอินฟราเรดเซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการตรวจจับรถ โดยมีหลักการทำงานคือ ตรวจจับความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปในบริเวณนั้นซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของวัตถุ แต่ไม่ว่าจะเป็นมนุษย์ สัตว์ หรือวัตถุอื่นๆ ก็สามารถทำให้ความร้อนในบริเวณนั้นเปลี่ยนแปลงได้เช่นกัน ดังนั้นข้อมูลที่อินฟราเรดเซ็นเซอร์ตรวจจับได้จะไม่ได้มีเฉพาะรถเพียงอย่างเดียว จึงทำให้นำไปประยุกต์ใช้งานได้ยาก ตัวอย่างภาพความร้อนและอินฟราเรดเซ็นเซอร์แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างภาพความร้อนและอินฟราเรดเซ็นเซอร์ [19-20]

งานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีอินฟราเรดเซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์ในการตรวจจับรถ เช่น งานวิจัย [31] ทำการนับจำนวนและวัดความเร็วของรถยนต์ ทดลองโดยติดตั้งอินฟราเรดเซ็นเซอร์ไว้ 2 จุดบนเสาไฟเหนือพื้นถนนตรงกลางช่องทางที่ต้องการตรวจจับ เมื่อมีรถยนต์ขับผ่านอินฟราเรดเซ็นเซอร์จะตรวจจับความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปในบริเวณนี้ได้ จากนั้นนำการเปลี่ยนแปลงที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อนับจำนวนและวัดความเร็วรถยนต์ ผลการทดลองสามารถนับจำนวนรถยนต์ได้ดี แต่ความร้อนที่เซ็นเซอร์ตรวจจับได้ไม่ได้เกิดจากรถยนต์เพียงอย่างเดียวดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้น ในการนับจำนวนและวัดความเร็วของรถยนต์จึงจำเป็นต้องใช้อัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพมากในการแยกเฉพาะข้อมูลที่เป็นของรถออกมาและผลการทดลองต้องเชื่อถือได้

เทคโนโลยีต่างๆที่ใช้ในการตรวจจ็บบรมีประสิทธิภาพแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ วิธีการวิเคราะห์ผล รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่เหมาะสม โดยสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีต่างๆที่กล่าวมาทั้งหมดได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีต่างๆที่ใช้ในการตรวจจ็บบรม

เทคโนโลยีที่ใช้	วิธีการ	จำนวนประเภท	แยกถูกต้อง (%)
แมกเนติกเซ็นเซอร์ [28-29]	Hill-Pattern	5	63 - 73
ขดลวดเหนี่ยวนำ [22, 33]	Back-propagation Neural Networks	5	91.5
เบลดเซนเซอร์ และกล้องวงจรปิด [14]	Probabilistic Neural Network และ Heuristic	4	70.8
เลเซอร์เซนเซอร์ และกล้องวงจรปิด [13, 32]	Image Processing	12 - 14	65 - 75
กล้องวงจรปิด [7, 12, 15]	Image Processing	4	62 - 94
อินฟราเรดเซ็นเซอร์ [31]	N/A	N/A	N/A

## 2. เซ็นเซอร์ AMR (Anisotropic Magneto-Resistive Sensor) [18]

เซ็นเซอร์ AMR เป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจ็บบค่าสนามแม่เหล็กโลก โดยค่าที่ตรวจจ็บบได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านต่างๆได้ เซ็นเซอร์ AMR มีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

### 2.1 หลักการทำงานของเซ็นเซอร์ AMR

เซ็นเซอร์ AMR มีความสามารถในการตรวจจ็บบค่าสนามแม่เหล็กโลกและส่งค่าที่ได้ออกมาในรูปของแรงดันทางไฟฟ้า โดยใช้หลักการวิทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) ในการตรวจจ็บบเพื่อหาค่าความต้านทานที่ต้องการทราบ โดยเปรียบเทียบกับความต้านทานที่ทราบค่าอยู่แล้ว แผนภาพเชิงไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ AMR เป็นดังภาพที่ 2.8

หลักการทำงาน คือ เมื่อบริดจ์ได้รับค่าสนามแม่เหล็กในเชิงบวก จะส่งผลให้องค์ประกอบ  $V_b$  ถึง  $Out+$  และ  $Out-$  ถึง  $GND$  มีค่าความต้านทานลดลง ขณะที่  $V_b$  ถึง  $Out-$  และ  $Out+$  ถึง  $GND$  มีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น เซ็นเซอร์จะส่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่เป็นผลต่างระหว่าง

แรงดัน  $Out+$  และ  $Out-$  ออกไป ซึ่งแรงดันดังกล่าว คือ  $V_{out}$  ที่ได้จากเซ็นเซอร์อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ (mV) โดยมีความสัมพันธ์กับค่า Sensor sensitivity คือ

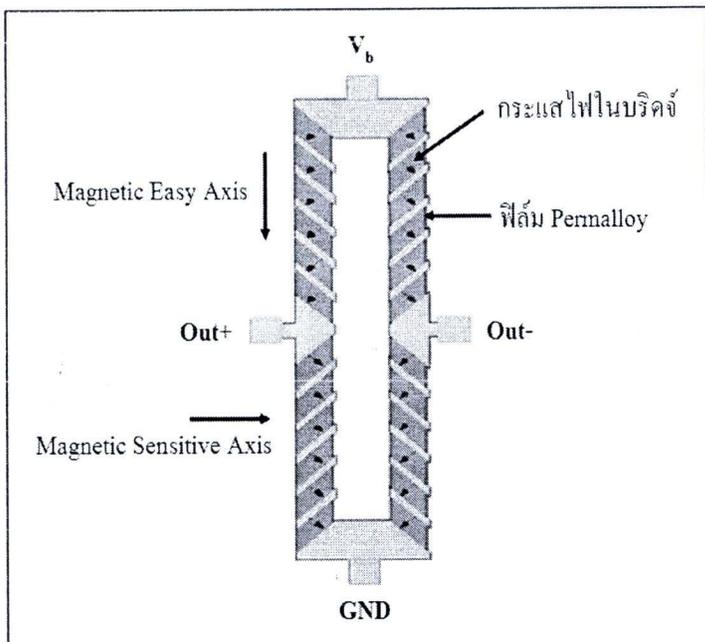
$$\begin{aligned} V_{out} &= (Out+) - (Out-) \\ &= S * V_b * B_s \end{aligned} \quad [18]$$

เมื่อ  $V_{out}$  คือ เอาต์พุตที่ได้จากเซ็นเซอร์มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์

$S$  คือ ค่า Sensitivity (ปกติคือ 1 mV/V/gauss)

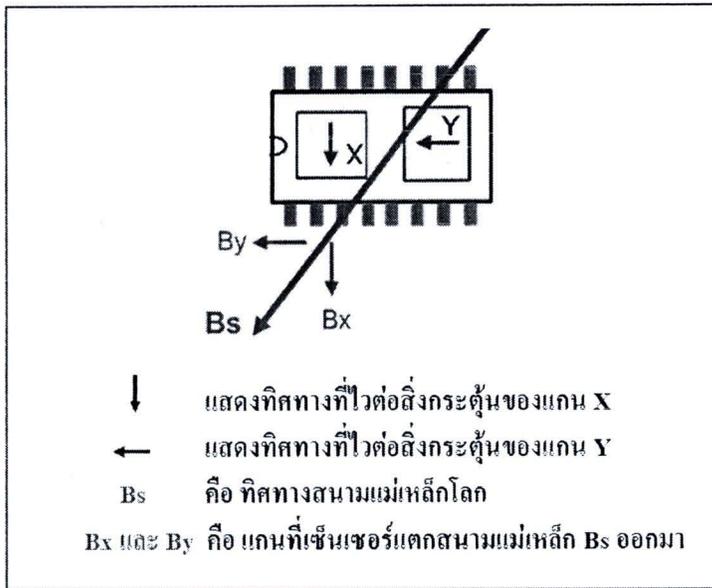
$V_b$  คือ แรงดันที่ให้กับเซ็นเซอร์ AMR

$B_s$  คือ ค่าสนามแม่เหล็กที่ให้กับเซ็นเซอร์ AMR



ภาพที่ 2.8 แผนภาพเชิงไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ AMR [18]

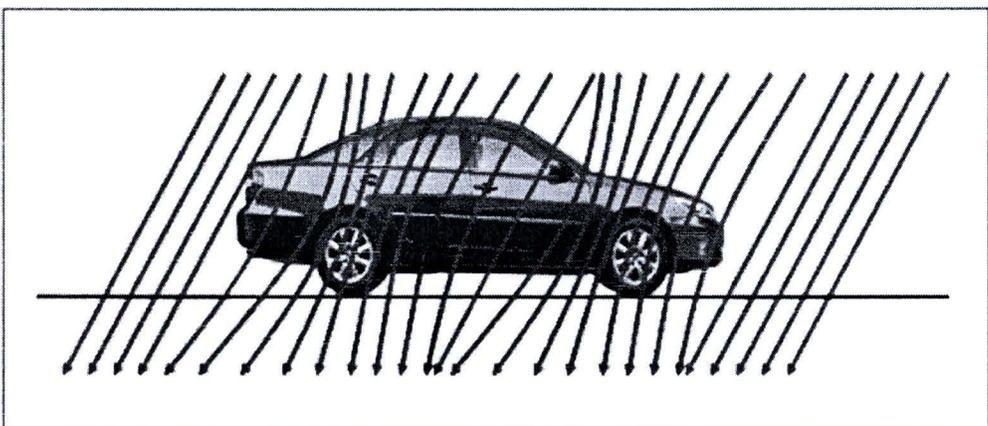
ถ้าหากนำเซ็นเซอร์ AMR สองตัวมารวมกันจะทำให้เซ็นเซอร์ตัวนั้นสามารถตรวจวัดค่าสนามแม่เหล็กโลกได้ 2 แกน โดยเมื่อนำไปติดตั้งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็กโลกเซ็นเซอร์ AMR จะแตกสนามแม่เหล็กโลกที่อยู่ในแนวขนานออกเป็นแนวแกน X กับแนวแกน Y ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 เซ็นเซอร์ AMR แบบสองแกน [18]

## 2.2 การตรวจจับبرد

จากทฤษฎีสนามแม่เหล็กโลกพบว่าในสภาวะปกติสนามแม่เหล็กโลกมีค่าประมาณ 0.5 เกาส์ (gauss) และเซ็นเซอร์ AMR มีระดับสัญญาณในช่วง -0.7 ถึง +0.7 เกาส์ ขึ้นอยู่กับความแรงสัญญาณในธรรมชาติของโลก โดยคุณสมบัติของเซ็นเซอร์สามารถตรวจจับค่าสนามแม่เหล็กได้ในช่วง -6 ถึง +6 เกาส์ ขณะที่รถเคลื่อนที่โลหะจากรถจะทำให้ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กโลกเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้สัญญาณสนามแม่เหล็กโลกที่เซ็นเซอร์ AMR ตรวจจับได้เกิดการเลื่อนระดับขึ้นลงโดยจะอยู่ในช่วง -2 ถึง +2 เกาส์ ตัวอย่างลักษณะสนามแม่เหล็กโลกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่ที่แสดงดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 สนามแม่เหล็กโลกที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถยนต์ [18]

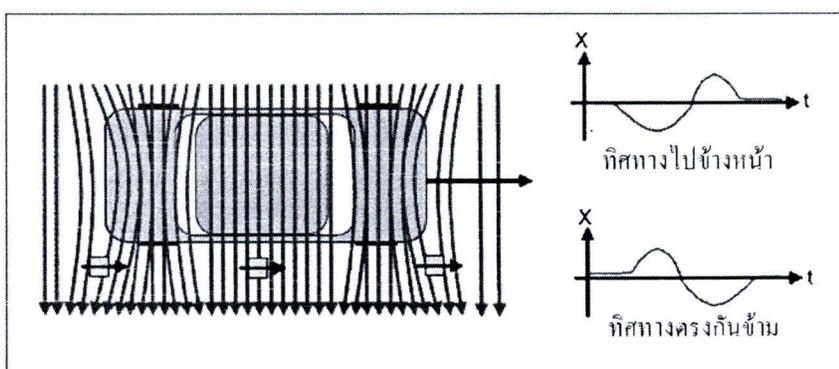
ตำแหน่งและจำนวนเซ็นเซอร์ที่จะทำการติดตั้งต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับลักษณะของงานที่จะนำไปใช้ เนื่องจากเหล็กของรถที่เซ็นเซอร์ตรวจจับได้มีรายละเอียดค่อนข้างมาก ถ้าติดตั้งในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้รายละเอียดของสัญญาณที่ได้มีน้อยลง เช่น การติดตั้งเซ็นเซอร์บนถนนบริเวณกลางช่องทางจราจรในแต่ละช่องทางจะทำให้สัญญาณที่ตรวจจับได้มีรายละเอียดมากกว่าติดตั้งเซ็นเซอร์ที่บริเวณริมถนน เนื่องจากระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์กับรถมีน้อยกว่าจึงตรวจจับได้ดีกว่า ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่เซ็นเซอร์ AMR ตรวจจับได้แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่เซ็นเซอร์ตรวจจับได้ [18]

ระยะทาง (ฟุต)	1	3	5	10	12
ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (มิลลิเกาส์)	270	75	10	2	< 1

### 2.3 การตรวจจับทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ

ทิศทางการเคลื่อนที่ของรถสามารถดูได้จากทิศทางการส่งสัญญาณของแกน X คือ ถ้าติดตั้งเซ็นเซอร์ 1 ตัว บนถนนตรงกลางช่องทาง ขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่เข้าหาเซ็นเซอร์ทิศทางของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้ารถจะเกิดการรบกวนตัวเข้าหาหน้ารถทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กในบริเวณนั้นลดน้อยลงสัญญาณที่เซ็นเซอร์ตรวจจับได้จะมีค่าลดลงต่ำกว่าค่าอ้างอิง และเมื่อรถเคลื่อนที่ออกไปจากเซ็นเซอร์ทิศทางสนามแม่เหล็กจะโค้งงอเข้าหาท้ายรถทำให้บริเวณนั้นมีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมากขึ้นสัญญาณที่ตรวจจับได้จึงมีค่ามากกว่าค่าอ้างอิง ในกรณีของรถที่ขับมาสวนทางกัน สัญญาณที่ตรวจจับได้จะเป็นไปในทิศทางตรงกันข้าม ดังแสดงในภาพที่ 2.11

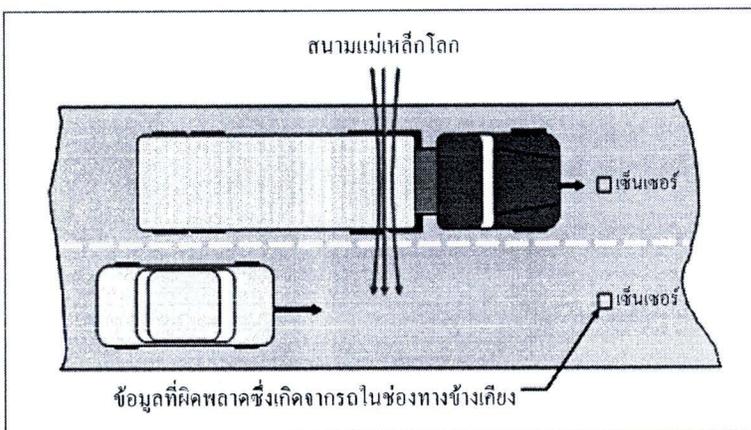


ภาพที่ 2.11 ทิศทางของสัญญาณตามแนวแกน X [18]

## 2.4 ความผิดพลาดที่เกิดจากการตรวจจับ

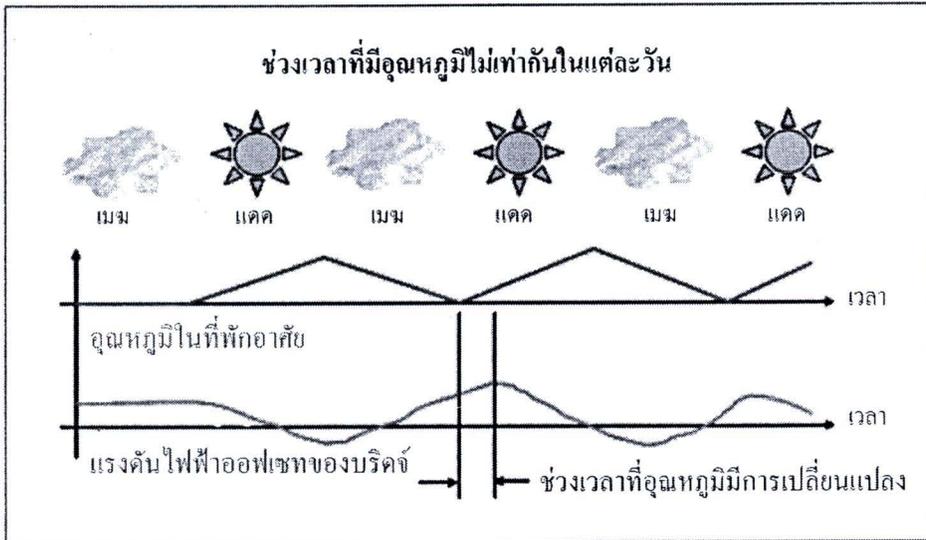
สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งทุกระบบ คือ ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลต้องเป็นข้อมูลที่มีความถูกต้องแม่นยำ และเชื่อถือได้ แต่อย่างไรก็ตามความผิดพลาดสามารถเกิดขึ้นกับข้อมูลได้ ข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ AMR ก็เช่นเดียวกัน โดยความผิดพลาดนี้เกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น จากธรรมชาติ จากเหล็กที่ไม่ใช่รถ หรือจากรถที่อยู่ในช่องทางจราจรข้างเคียง

ความผิดพลาดที่เกิดจากรถในช่องทางข้างเคียงสามารถแก้ไขได้ง่ายกว่าความผิดพลาดที่เกิดจากสาเหตุอื่น การแก้ไขทำได้โดยติดตั้งเซ็นเซอร์ในตำแหน่งอื่นที่มีความเหมาะสมกว่าเดิม โดยถ้านั้นมีความกว้างเพียง 2 ช่องทางอาจติดตั้งเซ็นเซอร์ไว้ที่บริเวณริมถนนเพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูล แต่อาจทำให้สูญเสียรายละเอียดของข้อมูลไปด้วยเช่นกัน หรือเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งแต่ยังคงอยู่บนถนน ในกรณีนี้ถ้าเงื่อนไขขอบเขตการตรวจจับมากเกินไปอาจทำให้ไม่สามารถตรวจจับรถบางคันได้ เช่น รถจักรยานยนต์ ดังนั้น ตำแหน่งที่ดีที่สุดควรติดตั้งบนถนนบริเวณกึ่งกลางช่องทางจราจรในแต่ละช่องทาง โดยที่เซ็นเซอร์ต้องไม่สามารถตรวจจับรถที่อยู่ในช่องทางข้างเคียงได้และขอบเขตในการตรวจจับต้องครอบคลุมในช่องทางของตนเอง แต่ถ้ามีรถขนาดใหญ่ เช่น รถบรรทุกขยับอยู่ในช่องทางข้างเคียงจะแก้ไขได้ยาก เนื่องจากรถบรรทุกมีขนาดใหญ่ จึงทำให้ขอบเขตของสนามแม่เหล็กที่เกิดการเปลี่ยนแปลงกว้างมากกว่ารถขนาดเล็ก เซ็นเซอร์ที่อยู่ในช่องทางข้างเคียงอาจตรวจจับการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ทำให้ข้อมูลเกิดความผิดพลาด ตัวอย่างความผิดพลาดที่เกิดจากรถในช่องทางข้างเคียงแสดงดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ความผิดพลาดที่เกิดจากรถในช่องทางจราจรข้างเคียง [18]

อุณหภูมิเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ โดยเฉพาะอุณหภูมิสูงในฤดูร้อนจะส่งผลให้ค่าออฟเซต (Offset) ของเซ็นเซอร์เปลี่ยนแปลงไปทำให้ข้อมูลที่ได้รับเกิดความผิดพลาด ดังแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ความผิดพลาดที่เกิดจากอุณหภูมิ [18]

ความผิดพลาดที่เกิดจากธรรมชาติอีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นโลก เนื่องจากพื้นโลกจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ละน้อยๆอยู่ตลอดเวลา การเปลี่ยนแปลงนี้จะปล่อยค่าสนามแม่เหล็กออกมาประมาณ 2-3 มิลลิเกาส์ ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับเกิดความผิดพลาดได้หากไม่มีการวิเคราะห์ที่ดี การแก้ไขทำได้โดยในการออกแบบซอฟต์แวร์จะต้องสามารถหาค่าอ้างอิงและปรับระดับการวัดของแต่ละแกนให้ถูกต้องตลอดเวลาโดยอัตโนมัติ หรือทางค่านฮาร์ดแวร์ควรรออกแบบวงจรให้สามารถตรวจจับเฉพาะค่าสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วโดยอัตโนมัติได้เช่นกัน

อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ข้อมูลเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ เนื่องจาก เซ็นเซอร์ได้รับค่าสนามแม่เหล็กที่มากเกินไป ซึ่งจะทำให้วงจรภายในเซ็นเซอร์ทำงานผิดปกติ ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้เซต/รีเซต (Set/Reset) จะช่วยให้เซ็นเซอร์สามารถกลับมาทำงานเป็นปกติได้

### 3. เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) [21]

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย คือ เครือข่ายที่ประกอบด้วยเซ็นเซอร์ขนาดเล็กจำนวนมากและไม่ใช้สายในการติดต่อสื่อสาร มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ตรวจวัดคุณสมบัติต่างๆของสิ่งแวดล้อมที่สนใจ และประมวลผลข้อมูลเหล่านั้นเพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมรอบตัวเรา หรือตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมรอบตัวเราได้โดยอัตโนมัติ ในปัจจุบันเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ[16] เช่น การฝังอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไว้ในรังนกที่หายากบางชนิดเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อการย้ายถิ่นของนกเหล่านั้น การติดตั้งเซ็นเซอร์ไว้ในอุปกรณ์ผสมสารเคมีขนาดใหญ่หรือในท่อส่งสารเคมีในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อใช้ตรวจจับ

การรั่วซึมของสารเคมี การใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดการสั่นไหวของอุปกรณ์หลายอย่างที่ใช้สำหรับการสร้างชีพของคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจจับความผิดปกติของเครื่องมือเหล่านั้น ทำให้สามารถเข้าไปดูแลแก้ไขก่อนที่จะเกิดการเสียหายได้ การติดตั้งเซ็นเซอร์ไว้รอบๆ สนามบินเพื่อตรวจจับการบุกรุกในบริเวณที่ห้ามเข้า การใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อศึกษาผลกระทบจากแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างของอาคาร โดยการฝังอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไว้ภายใต้กำแพงตลิ่งที่สร้างขึ้น เพื่อวัดข้อมูลที่ได้จากการจำลองแผ่นดินไหวในลักษณะต่างๆ เป็นต้น จากตัวอย่างที่กล่าวมาจะสังเกตเห็นได้ว่า นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรสามารถนำเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง

อุปกรณ์พื้นฐานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย คือ เซ็นเซอร์ที่มีขนาดเล็กมาก เรียกว่า โมท (Mote) ซึ่งได้รับการพัฒนาจากบริษัทอินเทลและมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ โมทเป็นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กสำหรับวัดอุณหภูมิความชื้นหรือสภาวะแวดล้อมอื่นๆ สามารถทำงานได้โดยใช้แบตเตอรี่ธรรมดาและสื่อสารกับโมทอื่นที่อยู่ใกล้เคียงโดยใช้เครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ (Ad hoc Wireless Network) ข้อมูลจะถูกส่งผ่านระหว่างโมทด้วยกันจนกระทั่งถึงปลายทาง ซึ่งอาจเป็นคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อื่นๆ สำหรับรวบรวมข้อมูลที่วัดได้

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายทำให้เกิดแบบจำลองในการคำนวณ (Computing Paradigm) แบบใหม่ เรียกว่า การคำนวณแบบเข้าควบคุมสถานการณ์ (Proactive Computing) คือ การคาดการณ์ถึงสภาพแวดล้อมที่มนุษย์ต้องการ และสามารถดำเนินการล่วงหน้าได้แทนมนุษย์ในกรณีที่จำเป็น การคำนวณแบบเข้าควบคุมสถานการณ์ เกิดขึ้นได้เนื่องจาก คอมพิวเตอร์สามารถรับข้อมูลจากโลกแห่งความเป็นจริงได้อย่างละเอียด และรวดเร็วจากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยไม่จำเป็นต้องใช้มนุษย์เป็นผู้ป้อนข้อมูลให้ ดังนั้น มนุษย์จึงสามารถโปรแกรมให้กับการคำนวณแบบเข้าควบคุมสถานการณ์ปฏิบัติการได้ทันทีเมื่อสภาวะแวดล้อมเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ โดยไม่ต้องรอตั้งงานให้กับคอมพิวเตอร์เหมือนในระบบการปฏิสัมพันธ์ (Interactive) ตัวอย่างการคำนวณแบบเข้าควบคุมสถานการณ์ เช่น การโปรแกรมให้เซ็นเซอร์ที่ถูกฝังอยู่ใต้ดินช่วยจัดการระบบชลประทานหรือระบบให้ปุ๋ยเพื่อการเกษตร การสั่งงานให้เครื่องตรวจจับควันไฟสามารถส่งสัญญาณขึ้นนำให้พนักงานดับเพลิงเข้าไปช่วยเหลือผู้ที่ติดอยู่ในตึกเมื่อเกิดเพลิงไหม้ และการโปรแกรมให้โมทตรวจวัดอุณหภูมิและการใช้พลังงานภายในที่อยู่อาศัยเพื่อปรับอุณหภูมิและการใช้พลังงานให้ เป็นไปตามที่ผู้ใช้ต้องการ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การทำให้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสามารถทำงานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพนั้นมีอุปสรรคหลายอย่าง เนื่องจากโมทมีขีดจำกัดในด้านความเร็วของตัวประมวลผล ความจุของแหล่งเก็บข้อมูล และช่วงความถี่ของคลื่นวิทยุในการสื่อสาร ดังนั้น อายุการใช้งานของ โมทจึงขึ้นอยู่กับการบริหารการใช้พลังงานของตนเองซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด ด้วยเหตุผลดังกล่าว ผู้พัฒนาโมทจึงต้องทำ

การออกแบบระบบฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ และระบบการสื่อสารของโมทให้ทำงานโดยใช้พลังงานน้อยที่สุด ในด้านของการใช้งาน ผู้พัฒนาเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายต้องสร้างเครื่องมือที่ทำให้ผู้ใช้ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีความรู้ขั้นสูงทางด้านวิศวกรรมคอมพิวเตอร์สามารถใช้งาน และสร้าง โปรแกรมประยุกต์สำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้ง่ายและสะดวกด้วย

เนื่องจากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายทำให้การตรวจวัดสิ่งแวดล้อมต่างๆรอบตัวเราเป็นไปอย่างทั่วถึงและมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้มนุษย์สามารถปรับตัวในการดำรงชีวิตอยู่อย่างปลอดภัยได้ และมีความสะดวกสบายมากขึ้น ในปัจจุบันได้มีการทดลองติดตั้งและใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายหลายโครงการด้วยกัน เช่น

- (1) โครงการใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อช่วยเหลือนักชีววิทยาศึกษาพฤติกรรมของนก Leach Storm Petrel บนเกาะ Great Duck Island (อินเทลและมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์)
- (2) โครงการตรวจจับการเคลื่อนไหวของทหารและยานยนต์ในทะเลทรายหรือในพื้นที่อื่นๆ ที่เข้าถึงได้ยาก (ไอไอโอ)
- (3) โครงการใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับการตรวจวัดความชื้นและสภาวะอื่นๆ ทางการเกษตรสำหรับสวนองุ่นขนาดใหญ่ใน โอเรกอน เพื่อพัฒนาระบบชลประทานและการให้น้ำ เพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร (อินเทลและคิงแฟมมิลีฟาร์ม)
- (4) โครงการสร้างบ้านอัจฉริยะสำหรับผู้สูงอายุและผู้ป่วยเป็นโรคอัลไซเมอร์ (อินเทล)
- (5) โครงการตรวจวัดลักษณะความผิดปกติใต้ดินก่อนเกิดแผ่นดินไหว (มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ลอสแอนเจลิส)
- (6) โครงการติดตั้งโมทบนต้นไม้ เพื่อช่วยนักชีววิทยาศึกษาการดำรงชีวิตและเจริญเติบโตของพืช (มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์)
- (7) โครงการติดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของสะพาน Golden Gate

การออกแบบและใช้งาน โมทนั้นขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้ แต่ไม่ว่าจะนำไปใช้งานในรูปแบบใดก็ตาม โมทยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของการใช้พลังงานซึ่งจำเป็นต้องใช้อย่างประหยัดเพื่อยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานที่สุด โดยทั่วไปแล้ว โมทควรมีอายุการใช้งานอย่างน้อย 1 ปี ต่อพลังงานจากแบตเตอรี่ขนาด AA จำนวนสองก้อน แต่สิ่งสำคัญของอายุการใช้งาน โมทขึ้นอยู่กับความถี่ในการตรวจวัดสภาพแวดล้อมและการรับส่งข้อมูลในการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ

ไมโครโปรเซสเซอร์ของโมทจะประหยัดพลังงานถ้าทำงานในโหมดเตรียมพร้อมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะถูกระงับให้ทำงานเมื่อถึงกำหนดเวลาที่ต้องตรวจวัดข้อมูล และเวลาที่ต้องส่งหรือรับข้อมูลจากโมทอื่น ไมโครโปรเซสเซอร์ใช้พลังงานน้อยมากหรือประมาณ 1 มิลลิวัตต์ ในขณะที่ทำงาน

และใช้พลังงาน 1-10 ไมโครวัตต์ ในโหมดเตรียมพร้อม อุปกรณ์เก็บข้อมูลของโมทมีความจุน้อยมากเมื่อเทียบกับคอมพิวเตอร์ทั่วไป โมทมีการเข้าถึงหน่วยความจำหลักน้อยกว่า 10 กิโลไบต์ และใช้หน่วยความจำประมาณ 100 กิโลไบต์ สำหรับเก็บซอฟต์แวร์ และประมาณ 1 เมกะไบต์ สำหรับหน่วยเก็บข้อมูลถาวร

ในส่วนของระบบเซ็นเซอร์ขนาดเล็กนั้น โมทจะใช้เทคโนโลยีหลายชนิดซึ่งมีขนาดเล็กและใช้พลังงานน้อยเช่นเดียวกับไมโครโปรเซสเซอร์ ตัวอย่างของเทคโนโลยีเหล่านี้ ได้แก่ การเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซ็นเซอร์มาเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ไมโครโปรเซสเซอร์เข้าใจ หรือใช้เทคโนโลยีเอ็มอีเอ็มเอสมาสร้างเป็นเซ็นเซอร์หลายชนิดซึ่งสามารถผลิตสัญญาณดิจิทัลให้กับหน่วยประมวลผลได้ ตัวอย่างของเซ็นเซอร์เหล่านี้ ได้แก่ เซ็นเซอร์สำหรับวัดความเร่งซึ่งใช้สำหรับสั่งให้ถุงลมนิรภัยทำงาน เซ็นเซอร์สำหรับตรวจจับความร้อนในร่างกาย และเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดสารแปลกปลอมในอากาศ นอกจากนี้บริษัทอินเทลกำลังสร้างระบบเซ็นเซอร์ที่เป็นไบโอชิพสำหรับใช้ตรวจจับสารชีวภาพหรือชีวเคมี

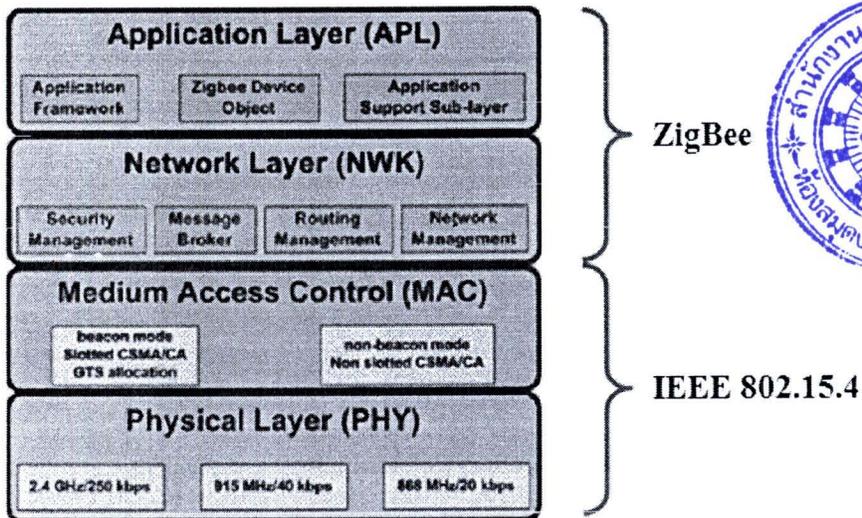
ระบบการสื่อสารของโมทใช้ระบบวิทยุสื่อสารพลังงานต่ำซึ่งเป็นการใช้เทคโนโลยีเดียวกันกับที่ใช้สร้างเครือข่ายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 และพีดีเอทีที่สามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต และโทรศัพท์มือถือได้ เนื่องจากโมทต้องประหยัดพลังงานที่ใช้ในการสื่อสาร จึงถูกออกแบบมาให้ใช้เครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจเพื่อส่งข้อมูลผ่านโมทเพื่อนบ้าน (Neighbor Mote) ที่อยู่ใกล้ โดยจะใช้วิธีส่งผ่านข้อมูลต่อกันจนถึงปลายทาง

นอกจากนี้นักวิจัยได้พัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถเดิมพลังงานให้กับโมทได้ ตัวอย่างเช่น ระบบที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า และระบบที่เปลี่ยนการสั่นไหวของสภาพแวดล้อมเป็นพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

#### 4. โพรโทคอล ZigBee [25, 34]

โพรโทคอล ZigBee ถูกกำหนดให้เป็นมาตรฐานสากลโดยสหพันธ์ ZigBee (ZigBee Alliance) มีคุณสมบัติ คือ เป็นการสื่อสารแบบไร้สายที่ใช้พลังงานต่ำ อัตราการรับส่งข้อมูลต่ำ และมีราคาถูกสาเหตุที่ถูกกำหนดให้ใช้พลังงานต่ำเพื่อให้สามารถทำเป็นระบบเครือข่ายไร้สายได้ โดยที่ระบบนี้สามารถทำงานได้ทุกสภาพแวดล้อมไม่ว่าจะอยู่ภายในหรือภายนอกอาคาร และสามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ขนาดเล็กได้นานหลายเดือน ระบบนี้จึงเหมาะสมกับการใช้ตรวจจับสิ่งที่สนใจ ในการทำงานโพรโทคอล ZigBee จะพัฒนาอยู่บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งมาตรฐาน IEEE 802.15.4 จะควบคุมการทำงานของชั้นกายภาพ (Physical Layer) และการเข้าถึงตัวกลาง (MAC Layer) ส่วน

โปรโตคอล ZigBee จะใช้ในส่วนของชั้นเครือข่าย (Network Layer) และชั้นโปรแกรมประยุกต์ (Application Layer) เท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.14



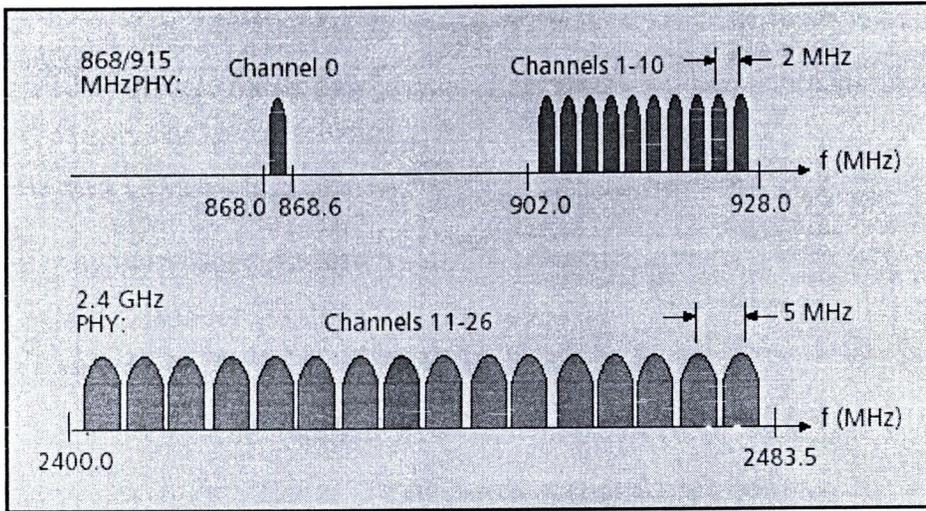
ภาพที่ 2.14 โครงสร้างลำดับชั้นของมาตรฐาน IEEE 802.15.4/ZigBee [34]

#### 4.1 ชั้นกายภาพ (Physical Layer)

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้กำหนดให้ชั้นกายภาพสามารถใช้งานได้ 3 ย่านความถี่ คือ ย่านความถี่ 868-868.6 MHz มีช่องสัญญาณ 1 ช่อง คือช่องสัญญาณ 0 มีอัตรารับส่งข้อมูล 20 kbps ย่านความถี่ 902-928 MHz มีช่องสัญญาณ 10 ช่อง คือช่องสัญญาณที่ 1-10 มีอัตรารับส่งข้อมูล 40 kbps และย่านความถี่ 2.4-2.483 GHz มีช่องสัญญาณ 16 ช่อง คือช่องสัญญาณที่ 11-26 มีอัตรารับส่งข้อมูล 250 kbps โดยย่านความถี่ 2.4 GHz สามารถใช้งานได้ทั่วโลก ส่วนย่านความถี่ 868 MHz และ 915 MHz ใช้งานในพื้นที่ของอเมริกาเหนือ ยุโรป ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ โดยมีระยะทางในการส่งข้อมูลอยู่ที่ 10-75 เมตร ขึ้นอยู่กับกำลังที่ใช้ในการส่งข้อมูลและสภาพแวดล้อมในบริเวณนั้น ย่านความถี่ที่กล่าวมาข้างต้นแสดงดังตารางที่ 2.10 และภาพที่ 2.15

ตารางที่ 2.10 กลุ่มความถี่และคุณสมบัติอื่นๆของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 [34]

ความถี่	จำนวนช่องสัญญาณ	อัตรารับส่งข้อมูล	พื้นที่ใช้งาน
868 MHz	1	20 kbps	ทวีปยุโรป
915 MHz	10	40 kbps	ประเทศอเมริกา
2.4 GHz	16	250 kbps	ทั่วโลก



ภาพที่ 2.15 ย่านความถี่ของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 [34]

## 4.2 การเข้าถึงตัวกลาง (MAC Layer)

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้กำหนดหน้าที่การทำงานของ การเข้าถึงตัวกลางไว้หลายอย่างด้วยกัน ซึ่งสรุปหน้าที่โดยรวมได้ ดังนี้

- (1) จัดสร้างซูเปอร์เฟรมเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารภายในเครือข่าย
- (2) ควบคุมการเข้าใช้ช่องสัญญาณ
- (3) รองรับการทำงาน 2 รูปแบบ คือ beacon-enabled และ non beacon-enabled
- (4) รองรับการส่งข้อมูล 3 รูปแบบ คือ 1. อุปกรณ์ปลายทาง (End Device) ส่งข้อมูลไปยังโคออร์ดิเนเตอร์ (Coordinator) 2. โคออร์ดิเนเตอร์ส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ปลายทาง และ 3. ส่งข้อมูลระหว่างเพียร์

## 4.3 ชั้นเครือข่าย (Network Layer)

ในส่วนของชั้นเครือข่ายจะเป็นการทำงานของโปรโตคอล ZigBee มีหน้าที่หลักเกี่ยวกับการกำหนดหน้าที่และคุณสมบัติของอุปกรณ์แต่ละตัว ทำการสร้างเครือข่าย ค้นหาเส้นทางภายในเครือข่าย โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 4.3.1 ส่วนประกอบในเครือข่าย

โปรโตคอล ZigBee ได้แบ่งประเภทของอุปกรณ์ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะทางกายภาพ (Physical Device) และทางตรรกะ (Logical Device) ดังนี้

- (1) แบ่งตามลักษณะทางกายภาพออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- Full Function Device (FFD) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นโคออร์ดิเนเตอร์หรือเราเตอร์ (Router) คือเป็นสื่อกลางในการรับส่งข้อมูลจากอุปกรณ์อื่นๆ สามารถทำงานได้ในทุกโครงสร้างของเครือข่าย และสามารถทำเป็นจุดที่ใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นได้

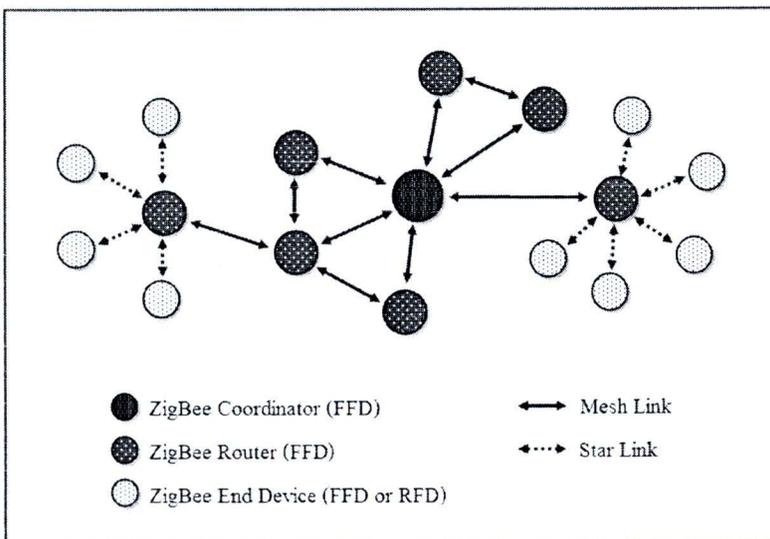
- Reduce Function Device (RFD) คือ อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับโคออร์ดิเนเตอร์หรือเราเตอร์ ตนเองสามารถเป็นต้นทางหรือปลายทางในการสื่อสารได้แต่เป็นทางผ่านในการรับส่งข้อมูลจากอุปกรณ์อื่นไม่ได้ ไม่สามารถสร้างเครือข่ายได้เอง ใช้พลังงานต่ำ อุปกรณ์นี้สามารถทำเครือข่ายแบบดาวได้ง่าย

(2) แบ่งตามลักษณะทางตรรกะออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

- ZigBee Coordinator (ZC) ทำหน้าที่สร้างเครือข่ายระหว่างโคออร์ดิเนเตอร์กับเราเตอร์ และเราเตอร์กับอุปกรณ์ปลายทาง โดยการกำหนดแอดเดรสให้กับอุปกรณ์ในเครือข่ายไม่ให้ซ้ำกัน และจัดเก็บข้อมูลภายในเครือข่าย การทำหน้าที่ดังกล่าวทำให้ ZC เป็น FFD

- ZigBee Router (ZR) ทำหน้าที่รับส่งข้อมูล โดยตนเองอาจเป็นต้นทางปลายทาง หรือทางผ่านของข้อมูล ซึ่งต้องมีการจัดการและเก็บข้อมูลเส้นทางในเครือข่าย การทำหน้าที่ดังกล่าวทำให้ ZR เป็น FFD

- ZigBee End Device (ZED) ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ปลายทาง ใช้พลังงานต่ำ ไม่สามารถสร้างเครือข่ายเองได้ ในการใช้งานเป็นโหนดที่อยู่ในส่วนของผู้ใช้งาน การทำหน้าที่ดังกล่าวทำให้ ZED เป็น RFD หรือในบางกรณีจะเป็น FFD ขึ้นอยู่กับการทำงานที่ผู้ใช้กำหนดให้ ตัวอย่างเครือข่ายที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ประเภทต่างๆแสดงได้ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างเครือข่ายของ ZigBee

### 4.3.2 โครงสร้างของเครือข่าย (Network Topology)

โปรโตคอล ZigBee สามารถรองรับโครงสร้างของเครือข่ายได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ โครงสร้างแบบดาว (Star Topology) โครงสร้างแบบเมช (Mesh Topology) และโครงสร้างแบบกลุ่มต้นไม้ (Cluster Tree Topology) โดยรายละเอียดของโครงสร้างทั้ง 3 มีดังนี้

#### (1) โครงสร้างเครือข่ายแบบดาว (Star Topology)

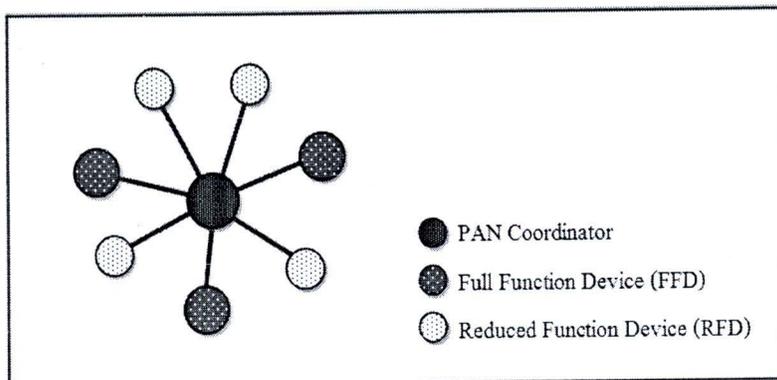
การติดต่อสื่อสารในโครงสร้างเครือข่ายแบบดาว จะมีการรับส่งข้อมูลระหว่างเราเตอร์กับโคออร์ดิเนเตอร์ หรือระหว่างอุปกรณ์ปลายทางกับโคออร์ดิเนเตอร์เท่านั้น ซึ่งก็คือโคออร์ดิเนเตอร์จะเป็นศูนย์กลางในการรับส่งข้อมูลในเครือข่าย ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากเครือข่ายแบบดาว เช่น การทำระบบบ้านอัจฉริยะ อุปกรณ์ที่ต่อกับคอมพิวเตอร์ ของเล่น หรือเกมส์ ตัวอย่างโครงสร้างเครือข่ายแบบดาวแสดงดังภาพที่ 2.17

#### (2) โครงสร้างแบบเมช (Mesh Topology)

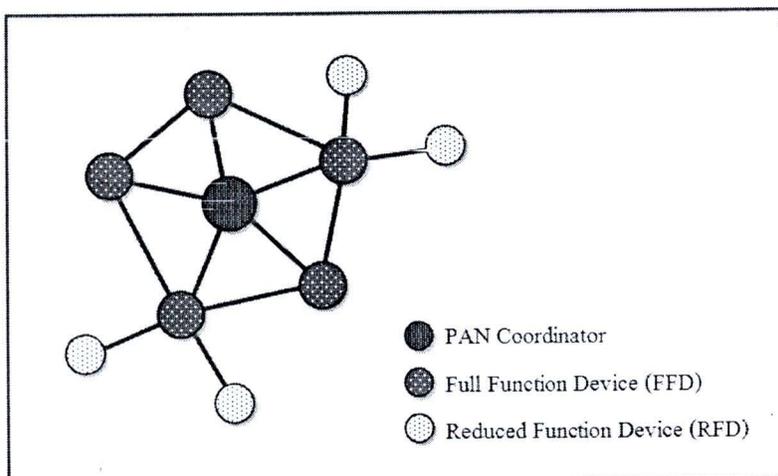
การสื่อสารในโครงสร้างแบบมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบดาว เนื่องจากทุกอุปกรณ์สามารถสื่อสารกับอุปกรณ์อื่นได้โดยตรงในระยะที่สามารถส่งข้อมูลถึงกันได้ โดยไม่ต้องส่งผ่านโคออร์ดิเนเตอร์ โครงสร้างแบบนี้เป็นได้ทั้งเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ การจัดตั้งด้วยตัวเอง (Self Organizing) และการรักษาสภาพด้วยตัวเอง (Self Healing) ตัวอย่างการนำโครงสร้างแบบนี้ไปใช้ประโยชน์ เช่น การควบคุมภายในโรงงาน และการติดตามสินค้าหรือสิ่งของ เป็นต้น ตัวอย่างโครงสร้างเครือข่ายแบบเมชแสดงดังภาพที่ 2.18

#### (3) โครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มต้นไม้ (Cluster Tree Topology)

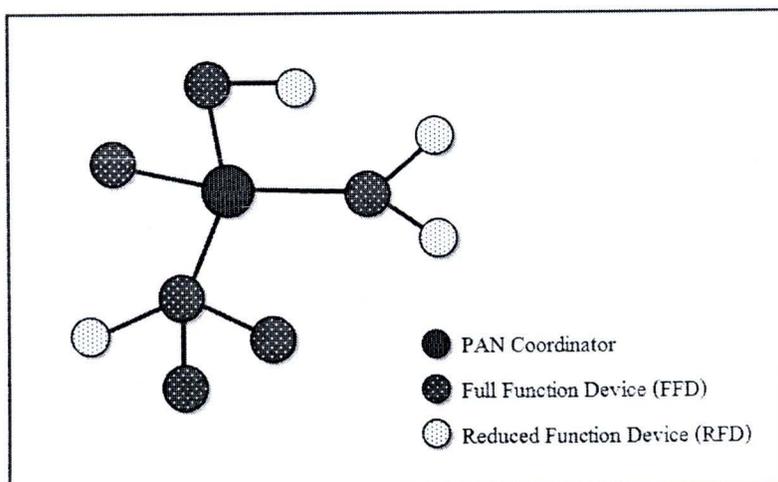
เครือข่ายแบบกลุ่มต้นไม้เป็นรูปแบบพิเศษของเครือข่ายแบบเครื่องต่อเครื่อง คือ เป็นการนำเครือข่ายหลายๆเครือข่ายมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างขวางมากขึ้น และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสาร โดยในแต่ละเครือข่ายโคออร์ดิเนเตอร์จะทำหน้าที่เป็นหัวหน้ากลุ่ม (Cluster Head หรือ CLH) และมีหมายเลขกลุ่ม (Cluster ID หรือ CID) ซึ่งเลือกมาจากหมายเลขที่ยังไม่ถูกใช้ และส่งเฟรมเบคอน (Beacon) ออกไปเป็นแบบbroadcast (Broadcast) อุปกรณ์อื่นที่ได้รับเบคอนนี้อาจจะร้องขอเข้าร่วมในเครือข่าย โดยถ้าโคออร์ดิเนเตอร์อนุญาตจะบันทึกอุปกรณ์ใหม่นั้นเป็นไชด์โหนด (Child Node) และอุปกรณ์ตัวใหม่จะบันทึก CLH เป็นแพเรนต์โหนด (Parent Node) ตัวอย่างโครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มต้นไม้แสดงดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.17 โครงสร้างเครือข่ายแบบดาว



ภาพที่ 2.18 โครงสร้างเครือข่ายแบบเมฆ



ภาพที่ 2.19 โครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มต้นไม้

#### 4.3.3 ขั้นตอนการสร้างเครือข่าย

ขั้นแรกโคออร์ดิเนตเตอร์จะเข้าใช้ช่องสัญญาณ โดยเลือกช่องที่ยังไม่ได้ถูกใช้ จากนั้นจะ broadcast เฟรมเบคอนออกไปเพื่อเริ่มต้นสร้างเครือข่าย เมื่ออุปกรณ์ตัวอื่นได้รับเฟรมเบคอนนี้จะสามารถร้องขอเข้าร่วมในเครือข่ายได้ แต่ต้องเป็นเราเตอร์หรือเป็นอุปกรณ์ปลายทางเท่านั้น โคออร์ดิเนตเตอร์จะตัดสินใจอนุญาตให้เข้าร่วมหรือไม่โดยจะส่งผลตอบรับกลับไป ถ้าอนุญาตผลตอบรับที่ส่งกลับไปจะมีแอดเดรส 16 บิต กลับไปด้วย ซึ่งเลขนี้จะเป็นแอดเดรสของอุปกรณ์ที่ขอเข้าร่วม เมื่อทำการเข้าร่วมเสร็จสิ้นอุปกรณ์ปลายทางจะสามารถร้องขอคำสั่งอื่นๆผ่านทางโคออร์ดิเนตเตอร์ได้

#### 4.3.4 การค้นหาเส้นทางของโปรโตคอล ZigBee [8]

ZigBee จะใช้โปรโตคอล AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector) ในการค้นหาเส้นทาง โดยโปรโตคอล AODV เป็นโปรโตคอลแบบ Source Initiated On-Demand Driven/Reactive คือ จะทำการค้นหาเส้นทางเมื่อมีโหนดต้องการส่งข้อมูล หรือมีการเคลื่อนที่ของโหนดเท่านั้น โดยจะหาเส้นทางตามเส้นทางที่เป็นไปได้จนกระทั่งถึงปลายทางแล้วจึงเลิกค้นหา การค้นหาเส้นทางในลักษณะนี้ทำให้ไม่เปลืองแบนด์วิดท์ในช่องสัญญาณ แต่อาจเสียเวลาในการค้นหาเส้นทางใหม่เมื่อต้องการส่งข้อมูล

โปรโตคอล AODV เป็นโปรโตคอลจัดการเส้นทางในเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ ทำให้แต่ละโหนดสามารถติดต่อกันได้ โดยที่เส้นทางอาจต้องผ่านโหนดอื่นๆอีกหลายโหนด โปรโตคอล AODV มีการทำงานเป็นแบบรีแอกทีฟ คือ กระบวนการค้นหาเส้นทางจะเกิดขึ้นเมื่อมีการร้องขอใช้เส้นทางนั้นเท่านั้น และโหนดกลางไม่จำเป็นต้องแก้ไขเส้นทางจากตนเองไปโหนดอื่นที่ยังไม่ใช้งานในขณะนั้น ถ้าเส้นทางเดิมที่ใช้ในการสื่อสารยังคงทำงานได้ โปรโตคอล AODV ก็จะไม่ทำงานใดๆเลย ข้อเด่นอย่างหนึ่งของโปรโตคอล AODV คือ มีการค้นหาและเลือกใช้เส้นทางระหว่างโหนดกลางกับโหนดปลายทางเพื่อให้การส่งข้อมูลเป็นไปอย่างถูกต้อง และมีการส่งข้อความควบคุมเป็นระยะๆเพื่อใช้กำหนดเส้นทางหรือปรับปรุงข้อมูลเส้นทาง

โปรโตคอล AODV เป็นโปรโตคอลที่เป็นแบบแผนของ routing message ระหว่างโหนดในการส่งข้อความผ่านไปยังโหนดข้างเคียงหรือโหนดเพื่อนบ้าน (Neighbor Node) เพื่อไปยังโหนดต้นทาง ในระหว่างทางที่ข้อความถูกส่งผ่านไปโปรโตคอล AODV จะทำการค้นหาเส้นทางไปด้วย โดยจะไม่เกิดการวนลูป และพยายามหาเส้นทางที่สั้นที่สุดที่สามารถเป็นไปได้อีก ทั้งสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของเส้นทาง และสร้างเส้นทางใหม่หากเกิดข้อผิดพลาดได้อีกด้วย

เนื่องจากแต่ละโหนดมีขอบเขตในการเชื่อมต่อทำให้สามารถติดต่อกับโหนดที่อยู่ถัดจากตัวเองได้เท่านั้น โหนดที่สามารถติดต่อกันได้โดยตรง เรียกว่า โหนดข้างเคียงหรือโหนดเพื่อนบ้าน (Neighbor Node) โดยโหนดจะเก็บข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้านไว้ เมื่อได้รับ HELLO message ที่แต่ละโหนด broadcast ออกมาตามช่วงเวลาที่กำหนด เมื่อมีโหนดใดที่ต้องการส่งข้อความไปยังโหนดอื่นที่ไม่ใช่เพื่อนบ้าน โหนดนั้นจะ broadcast ทักข้อความ RREQ (Route Request message) ออกไป โดยในข้อความ RREQ นี้จะประกอบไปด้วยข้อมูลต้นทาง (Source) ปลายทาง (Destination) อายุของข้อความ (Lifespan) และหมายเลขลำดับ (ID)

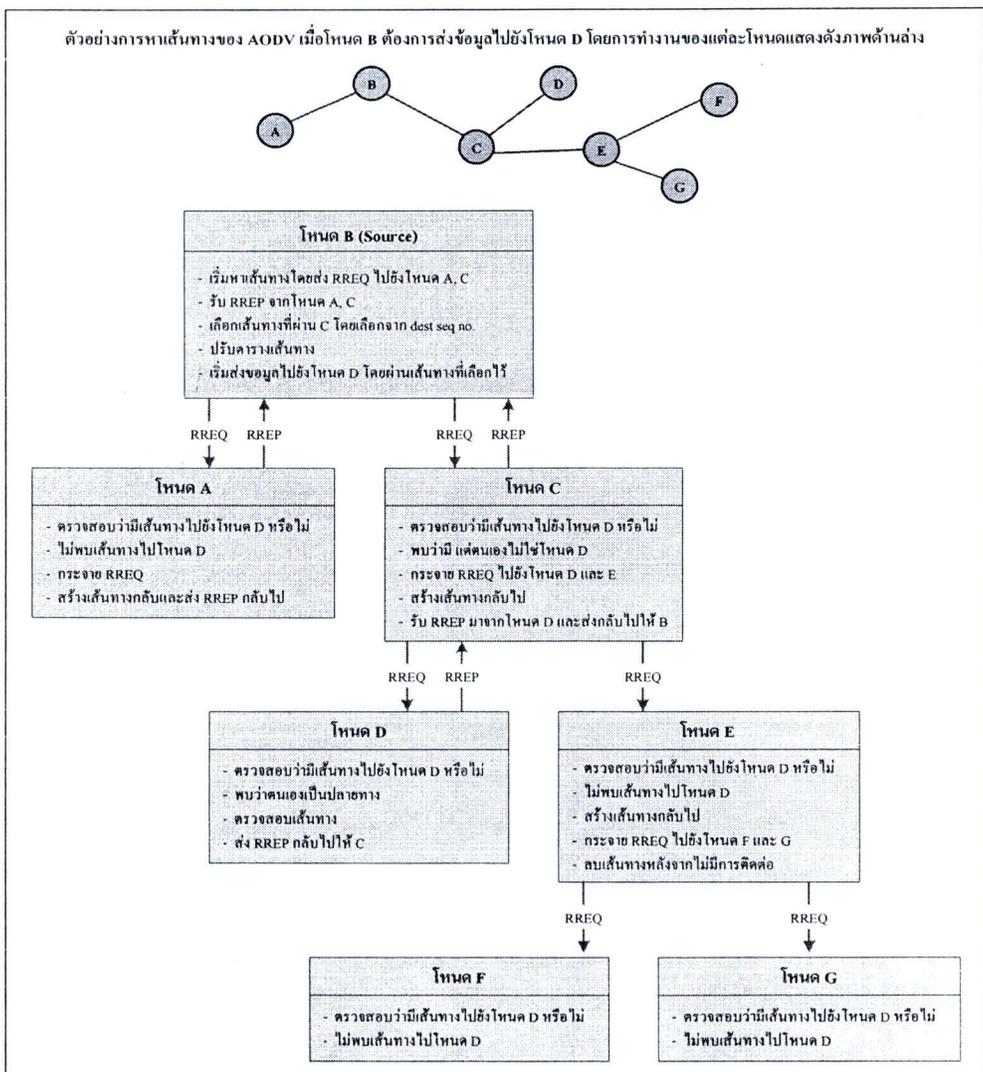
กระบวนการค้นหาเส้นทางของโปรโตคอล AODV เป็นดังนี้ เมื่อมีโหนดต้นทางต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง โหนดต้นทางจะส่งข้อความ RREQ แบบ broadcast ไปยังโหนดเพื่อนบ้าน จากนั้นโหนดเพื่อนบ้านจะส่งข้อความนี้ต่อไปยังโหนดเพื่อนบ้านของตนไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงโหนดปลายทาง และเมื่อโหนดปลายทางได้รับข้อความ RREQ แล้ว โหนดปลายทางจะส่งข้อความ RREP (Route Reply message) กลับไปยังโหนดต้นทาง โดยจะส่งไปในเส้นทางที่ข้อความ RREQ ตัวแรกมาถึง เพราะถือว่าใช้เวลาน้อยที่สุดในการส่งข้อความ RREQ จากต้นทางมายังปลายทาง ตารางเส้นทางของแต่ละโหนดใช้เก็บข้อมูลหมายเลขไอพีปลายทาง (Destination IP) หมายเลขไอพีของโหนดถัดไป (next hop IP) และหมายเลขลำดับปลายทาง (Destination Sequence Number) โดยโหนดต้นทางทุกโหนดจะเก็บเส้นทางจากต้นทางถึงปลายทางไว้ตามลำดับ เรียกว่า Precursor Nodes เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในกรณีที่เส้นทางเดิมขาดการเชื่อมต่อ โหนดจะแก้ไขอายุของข้อความในกรณีที่มีการใช้เส้นทางนั้น แต่ถ้าไม่ได้ใช้งานเส้นทางนั้นจะหมดอายุ เพราะถ้าไม่ใช้เส้นทางจะไม่มีกรเก็บรักษาเส้นทางไว้ หรือโหนดอาจจะย้ายที่อยู่ทำให้เส้นทางนั้นไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป ตัวอย่างการหาเส้นทางแสดงดังภาพที่ 2.20

#### 4.4 ชั้นโปรแกรมประยุกต์ (Application Layer)

ชั้นโปรแกรมประยุกต์เป็นชั้นที่มีการทำงานในส่วนของโปรแกรมประยุกต์ (Application Framework) โดยมีออบเจกต์ของ ZigBee (ZigBee Device Object หรือ ZDO) ทำหน้าที่ควบคุมการเข้าถึงและการใช้งานในชั้นนี้ ส่วนในชั้นสนับสนุนโปรแกรมประยุกต์นั้น ทำหน้าที่สร้างเฟรมของชั้นโปรแกรมประยุกต์และทำการรับส่งข้อมูล รวมถึงจัดการด้านต่างๆที่เกี่ยวข้องกับชั้นโปรแกรมประยุกต์

ZigBee เป็นชิพเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายขนาดเล็ก การนำมาประยุกต์ใช้งานจะใช้ในกรณีที่ต้องการอัตราการรับส่งข้อมูลต่ำ และใช้พลังงานต่ำ ตัวอย่างการนำ ZigBee ไปประยุกต์ใช้งานมีดังนี้

- (1) การควบคุมและความบันเทิงภายในบ้าน (Home Entertainment and Control) เช่น ระบบเปิด-ปิดไฟอัตโนมัติ การควบคุมอุณหภูมิ การรักษาความปลอดภัย การควบคุมการดูหนัง และฟังเพลง เป็นต้น
- (2) การรับรู้ภายในบ้าน (Home Awareness) เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับน้ำ ตรวจจับพลังงาน ตรวจจับควัน ตรวจจับไฟ และระบบเครื่องใช้อัจฉริยะ
- (3) การบริการแบบเคลื่อนที่ (Mobile Device) เช่น ระบบชำระเงิน ระบบติดตาม และควบคุม ระบบรักษาความปลอดภัย ระบบดูแลรักษาสุขภาพ
- (4) โรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Plant) เช่น การควบคุมกระบวนการต่างๆ การจัดการสิ่งของที่มีค่า การจัดการด้านสิ่งแวดล้อม การจัดการด้านพลังงาน และการควบคุมอุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรม



ภาพที่ 2.20 วิธีการค้นหาเส้นทางของโปรโตคอล AODV

#### 4.5 ตัวอย่างอุปกรณ์ไร้สายที่งานวิจัยนี้เลือกใช้

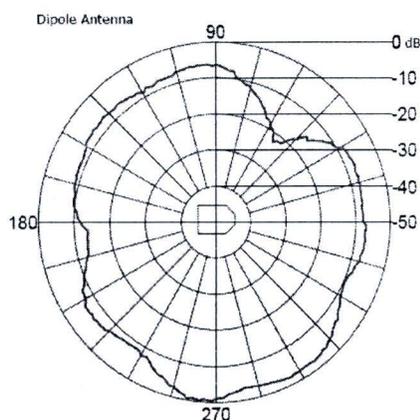
งานวิจัยนี้เลือกใช้อุปกรณ์ไร้สายของบริษัท Digi ที่ชื่อ XBee Pro เป็นอุปกรณ์ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์และเสาอากาศอยู่ใน สามารถทำงานรับหรือส่งสัญญาณสลับกันไปในเวลาเดียวกันได้ (Half Duplex) ซึ่งอุปกรณ์ XBee Pro นี้ใช้ความถี่ 2.4 GHz มีระดับการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ การติดตั้งสามารถทำได้โดยสะดวก การรับส่งข้อมูลจะเป็นการติดต่อภายในแบบการรับและส่งแบบสากลในเวลาที่แตกต่างกัน (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter หรือ UART) การควบคุมการทำงานนั้นสามารถควบคุมได้ 2 วิธี คือ ผ่านทาง AT Command หรือ API mode โดยใช้โปรแกรม X-CTU โปรแกรมไฮเปอร์เทอร์มินอล หรือใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

##### 4.5.1 ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติที่สำคัญของ XBee Pro

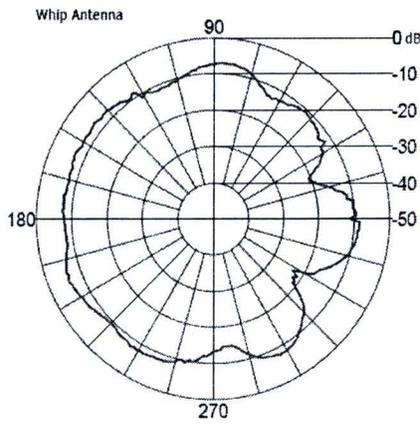
โมดูลสื่อสารข้อมูลไร้สายแต่ละยี่ห้อนั้นจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับผู้ผลิต สำหรับลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติที่สำคัญของ XBee Pro แสดงได้ดังตารางที่ 2.11

##### 4.5.2 รูปแบบการกระจายสัญญาณของเสาอากาศแบบต่างๆ [24]

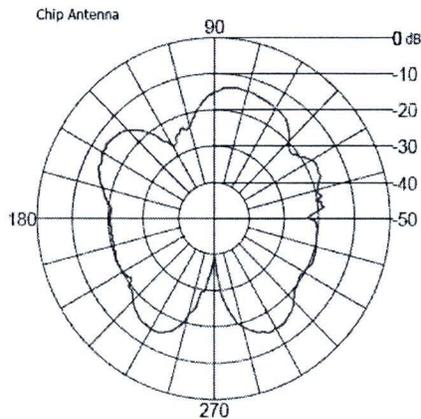
ชิฟเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแต่ละประเภทนั้นจะมีระยะการกระจายสัญญาณที่แตกต่างกันออกไปตามชนิดของเสาอากาศแต่ละประเภท โดยทั่วไปแล้วการกระจายสัญญาณคลื่นวิทยุจะเป็นแบบรูปโดนัท ชิฟเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายของ XBee Pro มีเสาอากาศ 3 ประเภท คือ เสาอากาศแบบ U.FL RF Connector (U.FL RF Connector Antenna) เสาอากาศแบบวิฟ (Whip Antenna) และเสาอากาศแบบชิฟ (Chip Antenna) การกระจายสัญญาณของเสาอากาศทั้ง 3 แบบ แสดงได้ดังภาพที่ 2.21, 2.22 และ 2.23 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.21 รูปแบบการกระจายสัญญาณของเสาอากาศแบบ U.FL RF Connector [24]



ภาพที่ 2.22 รูปแบบการกระจายสัญญาณของเสาอากาศแบบวีฟ [24]



ภาพที่ 2.23 รูปแบบการกระจายสัญญาณของเสาอากาศแบบชิพ [24]

## 5. ปัญหาที่พบในการส่งสัญญาณ [17]

ปัญหาที่เกิดจากการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ นั้น เกิดจากลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การจางหายของสัญญาณ (Fading) และการแทรกสอด (Interference) สามารถอธิบายได้ดังนี้

### 5.1 การจางหายของสัญญาณ (Fading)

การสื่อสารไร้สายจะส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณ สัญญาณวิทยุจะได้รับผลกระทบจากการใช้ช่องสัญญาณที่ผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น สิ่งก่อสร้างต่างๆ หรือสภาพแวดล้อมในขณะนั้น ทำให้สัญญาณดังกล่าวเกิดการจางหาย ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss) การถูกบดบัง (Shadowing หรือ Large-Scale Fading) และการสะท้อนหลายทิศทาง (Multipath หรือ Small-Scale Fading)

### 5.1.1 การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss)

การสูญเสียตามระยะทางเป็นการลดทอนของสัญญาณที่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างตัวส่งกับตัวรับสัญญาณ ค่าเฉลี่ยกำลังของสัญญาณจะลดลงตามกฎการสูญเสียตามระยะทาง ซึ่งเมื่อระยะทางมีค่ามากขึ้นจะทำให้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณวิทยุลดลง สำหรับสมการการสูญเสียตามระยะทางแสดงได้ดังนี้

$$P_r = \frac{P_0}{d^\alpha} \quad [17]$$

โดยที่  $P_r$  คือ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับในหน่วยวัตต์

$P_0$  คือ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับใน 1 เมตร จากตัวส่งสัญญาณในหน่วยวัตต์

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณในหน่วยเมตร

$\alpha$  คือ ค่า Distance Power Gradient (สำหรับในอาคารจะมีค่าเท่ากับ 4)

### 5.1.2 การถูกบดบัง (Shadowing หรือ Large-Scale Fading)

เกิดขึ้นจากสัญญาณบางส่วนถูกบดบังไปชั่วขณะ โดยเกิดจากสภาพแวดล้อม เช่น การส่งสัญญาณภายในอาคาร เป็นต้น ทำให้ค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ และเมื่อเคลื่อนที่ออกจากบริเวณนั้นจะทำให้ได้สัญญาณมีกำลังดีเหมือนเดิม

### 5.1.3 การสะท้อนหลายทิศทาง (Multipath หรือ Small-Scale Fading)

เกิดขึ้นเมื่อเสาอากาศของตัวรับสัญญาณอยู่ใกล้พื้นผิวมาก เช่น การส่งสัญญาณในช่องที่มีสิ่งกีดขวางมากจะทำให้เกิดการสะท้อน การเลี้ยวเบน หรือการกระเจิงของสัญญาณในหลายทิศทางได้ ส่งผลให้สัญญาณที่ได้รับมีจำนวนหลายสัญญาณที่มาจากทิศทางที่ต่างกัน และมาถึงตัวรับไม่พร้อมกัน รวมไปถึงขนาดและเฟสที่ต่างกันแปรผันตามระยะทาง ในบางระยะทางอาจมีเฟสที่ส่งผลให้สัญญาณเกิดการหักล้างกันได้ และในบางระยะทางสัญญาณจะเกิดการรวมกันหรือเสริมกัน ทำให้สัญญาณที่ได้มีแอมพลิจูดที่แตกต่างกันมาก ซึ่งส่งผลให้ระดับของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็ว โดยลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นมีหลายอย่างด้วยกัน ได้แก่

(1) การสะท้อน (Reflection) เกิดขึ้นจากคลื่นมีการเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง โดยตัวกลางที่สองต้องมีความยาวคลื่นมากกว่า เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น

ที่มากกระทบ ผลที่เกิดขึ้น คือ คลื่นจะมีการสะท้อนออกบางส่วน ส่วนที่เหลือจากการสะท้อนจะผ่านไปยังตัวกลางที่สอง สิ่งที่ทำให้เกิดการสะท้อน เช่น ศึก กำแพง หรือสิ่งก่อสร้างอื่นๆ เป็นต้น

(2) การเลี้ยวเบน (Diffraction) เกิดขึ้นเนื่องจากมีสิ่งกีดขวางอยู่ระหว่างอุปกรณ์รับกับอุปกรณ์ส่งสัญญาณ ส่งผลให้คลื่นสัญญาณจะเลี้ยวอ้อมสิ่งกีดขวาง ทำให้สามารถรับสัญญาณได้บางส่วน

(3) การกระเจิง (Scattering) เกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นเคลื่อนที่ไปตกกระทบกับสิ่งกีดขวางที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของสัญญาณ ผลที่เกิดขึ้น คือ ทำให้คลื่นสัญญาณเกิดการกระเจิงไปในทุกทิศทาง สิ่งที่ทำให้เกิดการกระเจิง ได้แก่ เสา เป็นต้น

## 5.2 การแทรกสอด (Interference)

การแทรกสอดเกิดขึ้นได้จากสัญญาณภายนอกมีมากกว่า 2 สัญญาณ และมีระดับสัญญาณใกล้เคียงกันมาแทรกสอดกัน สัญญาณที่ถูกแทรกสอดเมื่อมาถึงตัวรับจะไม่สามารถแยกข้อมูลออกจากสัญญาณได้ เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนเพิ่มเข้ามาจึงต้องทำการลดระดับของสัญญาณรบกวนลง การแทรกสอดโดยทั่วไปเกิดขึ้นกับความถี่ที่สอดคล้องกัน การเกิดการแทรกสอดมี 2 แบบ คือ

### 5.2.1 การแทรกสอดในช่องสัญญาณเดียวกัน (Co-Channel Interference)

การแทรกสอดในช่องสัญญาณเดียวกันเป็นการแทรกสอดระหว่างสัญญาณที่ใช้ในช่องสัญญาณเดียวกัน เช่น สถานีส่ง 2 สถานีใช้คลื่นความถี่เดียวกัน ทำให้ผู้รับสามารถรับสัญญาณจากทั้ง 2 แหล่งพร้อมกันได้ ผลกระทบที่เกิดขึ้น คือ เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญญาณทั้ง 2 ที่ส่งจากแต่ละสถานี โดยสัญญาณที่ได้รับจากสถานีใดมีกำลังสูงกว่าจะได้รับชัดมากกว่า แต่ถ้ามีกำลังที่ใกล้เคียงกันจะสลับสัญญาณชุดนั้นไปมา วิธีการแก้ไขสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การกรองสัญญาณ (Filtering) โดยที่เครื่องรับจะต้องมีการกรองเอาเฉพาะสัญญาณที่ต้องการผ่านมาเท่านั้น หรืออาจจะกำหนดการสื่อสารให้มีแถบความถี่ของการแทรกสอดที่เกิดจากสัญญาณเดียวกันแต่เดินทางมาถึงเครื่องรับด้วยวิธีการหรือเส้นทางที่ต่างกัน อาจใช้สายอากาศที่มีความกว้างลำคลื่น (Beam Width) ที่แคบ คือ สามารถเลือกทิศทางของลำคลื่นได้ดี (Directional Antenna) หรืออาจใช้สายอากาศที่สามารถเลือกการแผ่กระจายสัญญาณที่ต้องการรับเข้าช่วย โดยร่วมกับการใช้วิธีการกรองสัญญาณ เป็นต้น

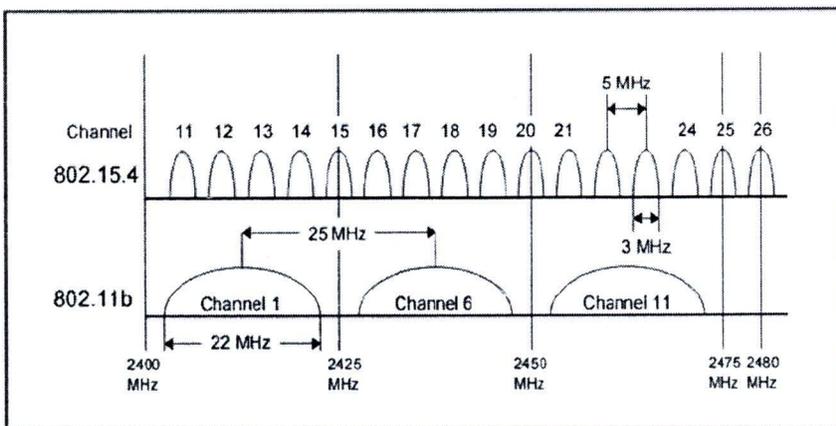
### 5.2.2 การแทรกสอดของสัญญาณที่มีความถี่ติดกัน (Adjacent Interference)

เป็นการแทรกสอดที่เกิดขึ้นระหว่างสัญญาณในช่องที่อยู่ติดกัน เกิดจากเครื่องรับได้รับสัญญาณจากช่องสัญญาณที่อยู่ติดกันเข้ามาพร้อมกับสัญญาณในช่องที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น ช่องสัญญาณที่ 12 แทรกสอดกับช่องสัญญาณที่ 13 ซึ่งการป้องกันการแทรกสอดของช่องสัญญาณที่อยู่ติดกันสามารถทำได้โดยกำหนดแถบคัม หรือแถบกัน เพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณในช่องอื่นเข้ามาแทรกสอดได้ เช่น การกระจายเสียงของระบบ FM แถบกว้าง แต่ละช่องต้องการแถบความถี่ 200 kHz ในขณะที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณเพียง 180 kHz และเป็นแถบกัน 20 kHz เพื่อป้องกันการแทรกสอดของช่องสัญญาณที่อยู่ติดกัน

### 5.3 การใช้ความถี่ร่วมกันระหว่าง ZigBee และเครือข่ายไร้สาย WiFi [27]

เนื่องจาก ZigBee และเครือข่ายไร้สาย WiFi ใช้ความถี่ในย่านเดียวกัน คือ ความถี่ 2.4 GHz ทำให้การสื่อสารอาจเกิดปัญหาขึ้นได้โดยเกิดจากการใช้ช่องสัญญาณที่รบกวนกัน แต่ปัญหานี้สามารถหลีกเลี่ยงได้ เพราะมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (ZigBee) ได้กำหนดให้ที่ความถี่ 2.4 GHz มีช่องสัญญาณ 16 ช่อง แต่ละช่องมีแบนวิธด์ 3 MHz และห่างจากช่องสัญญาณข้างเคียง 5 MHz ส่วนช่องสัญญาณของ WiFi มีหลายช่อง แต่ละช่องมีแบนวิธด์ 22 MHz และห่างจากช่องสัญญาณข้างเคียง 25 MHz ซึ่งจะเห็นว่าทั้ง 2 ระบบนี้สามารถเลือกใช้ช่องสัญญาณที่ไม่ทับซ้อนกันจะทำให้หลีกเลี่ยงปัญหาการรบกวนกันของทั้ง 2 ระบบได้ เช่น ช่องสัญญาณของ WiFi ที่นิยมใช้มี 3 ช่อง คือ ช่องสัญญาณที่ 1, 6 และ 11 ซึ่งช่องสัญญาณทั้ง 3 นี้ไม่ชนกันกับช่องสัญญาณที่ 15, 20, 25 และ 26 ของ ZigBee ดังแสดงในภาพที่ 2.24 ในการใช้งานจึงควรเลือกใช้ช่องดังกล่าวเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการรบกวนกันของสัญญาณ โดยสูตรคำนวณความถี่ในแต่ละช่องสัญญาณของ ZigBee คือ

$$\text{Center Frequency (MHz)} = 2.405 + (CH - 11) \times 5 \quad [27]$$



ภาพที่ 2.24 เปรียบเทียบช่องสัญญาณระหว่าง IEEE 802.15.4 และ IEEE 802.11 [27]

ตารางที่ 2.11 ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติที่สำคัญของ XBee Pro [24]

ลักษณะเฉพาะ	XBee Pro
<b>ประสิทธิภาพ</b>	
ระยะการส่งสัญญาณภายในอาคาร	ประมาณ 100 เมตร
ระยะการส่งสัญญาณภายนอกอาคาร	ประมาณ 1,500 เมตร
กำลังในการส่งสัญญาณเอาท์พุท	100 mW
อัตราการส่งข้อมูล	250,000 bps
อัตราการส่งข้อมูลในพอร์ตอนุกรม	1200 – 115,200 bps
ความไวในการรับสัญญาณ	-100 dBm (ความคลาดเคลื่อน 1%)
<b>ความต้องการด้านพลังงาน</b>	
การใช้แรงดันไฟฟ้า	2.8 – 3.4 V
กระแสไฟฟ้าในการรับข้อมูล	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) 195mA (3.0V) PL=4 (10dBm): 215mA (3.3V) 227mA (3.0V)
สถานะว่าง/กระแสไฟฟ้าในการส่งข้อมูล	55mA (3.3V)
กระแสไฟฟ้าเมื่อไม่มีการใช้งาน	< 10 $\mu$ A
<b>ลักษณะทั่วไป</b>	
ความถี่	ISM 2.4 GHz
ขนาด	2.438cm $\times$ 3.294cm
อุณหภูมิ	-40 to 85° C
เสาอากาศที่สามารถใช้ได้	Whip, Chip หรือ U.FL Connector
<b>การทำเครือข่ายและความปลอดภัย</b>	
การสนับสนุน โครงสร้างเครือข่าย	Point-to-point, Point-to-multipoint & Peer-to-peer
จำนวนของช่องสัญญาณ	12 Direct Sequence Channels
การเลือกแอดเดรส	PAN ID, Channel and Addresses
การรองรับอุปกรณ์	65,535 Device (0x0000 – 0xFFFF) (64 bits)



## 6. ATDA (Adaptive Threshold Detection Algorithm) [29]

ATDA เป็นอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับตรวจจับวัตถุต่างๆ หลักการทำงาน คือ เริ่มแรกจะทำการตรวจจับสัญญาณที่ต้องการอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำค่าที่ได้ไปประมวลผลหาค่าอ้างอิงในขณะนั้น และเมื่อสัญญาณที่ตรวจจับมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่าอ้างอิงจะนำค่านี้ไปวิเคราะห์หาสาเหตุเกิดจากวัตถุที่ต้องการตรวจจับหรือไม่

## 7. Hill Climbing Algorithm [1, 10]

การค้นหาแบบ Hill climbing เป็นวิธีการค้นหาข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายกับการปีนภูเขา การที่นักปีนภูเขาจะเดินทางไปถึงยอดภูเขา นักปีนเขาจะต้องมองก่อนว่ายอดเขาอยู่ที่ใด แล้วนักปีนเขาจะต้องพยายามไปจุดนั้นให้ได้ และนักปีนเขากำลังจะปีนภูเขาที่มีเส้นทางมากมายเพื่อที่จะเดินทางไปถึงยอดภูเขาโดยเร็วที่สุด นักปีนเขาจะมองไปที่ยอดเขาแล้วสังเกตว่าทิศทางใดที่เมื่อปีนแล้วจะเข้าใกล้ยอดเขา และหลีกเลี่ยงทิศทางที่เมื่อปีนไปแล้วจะทำให้ตนเองห่างจากยอดเขา นักปีนเขาจะต้องทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงยอดเขา นั่นคือ เป็นการพยายามเลือกทางเดินไปตามเส้นทางที่คาดว่าจะทำให้ไปถึงเป้าหมายได้ดีที่สุด สมมติปัจจุบันอยู่ที่โหนด  $n$  วิธีการนี้จะประเมินโหนดที่เป็นลูกของ  $n$  ทั้งหมด เพื่อดูว่าโหนดใดอยู่ใกล้โหนดเป้าหมายที่สุด และเลือกโหนดนั้นเป็นโหนดถัดไป กล่าวคือ ถ้า  $(n_1, n_2, \dots, n_n)$  เป็นลูกของโหนด  $n$  และ  $f$  เป็นฟังก์ชันฮิวริสติก จะเลือกโหนดที่ค่า  $f(n)$  มากที่สุด ซึ่งวิธีการที่จะนำฟังก์ชันฮิวริสติกมาใช้มีหลายวิธีด้วยกันขึ้นอยู่กับจะนำไปใช้ในลักษณะใด เช่น เลือกสถานะที่มีค่าฮิวริสติกดีขึ้น แล้วเดินไปยังสถานะนั้นเลย โดยไม่ต้องสนใจสถานะที่มีค่าฮิวริสติกต่ำกว่าสถานะปัจจุบัน หรืออาจจะเก็บสถานะทุกตัวไว้แม้ว่าค่าฮิวริสติกจะแย่ลงแล้วพิจารณาสถานะเหล่านี้ทีหลัง เป็นต้น แต่การค้นหาแบบ Hill climbing อาจมีปัญหาเกิดขึ้นหลายประการ เช่น การพบยอดเขาที่ไม่ใช่จุดสูงสุด การเจอหน้า หรือการเจอสันเขา

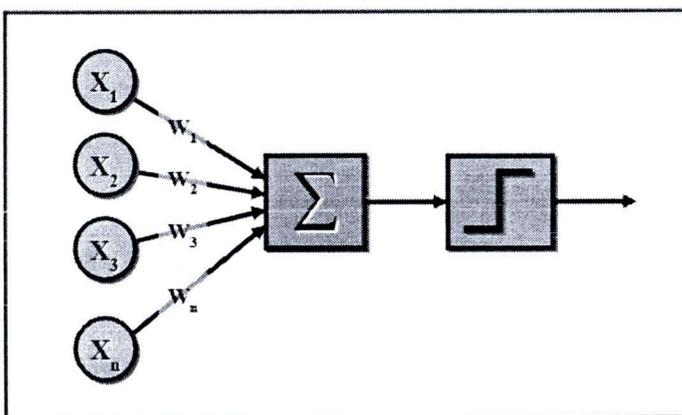
วิธีการแก้ปัญหาดังที่กล่าวข้างต้น คือ

- (1) อาจย้อนกลับไปตั้งต้นใหม่ และลองเดินทางในทิศทางที่ต่างไปจากเดิม โดยอาจเลือกเส้นทางที่ดีใกล้เคียงกับเส้นทางที่เคยเลือกไปแล้ว
- (2) ลองย้ายไปที่ตำแหน่งใหม่ที่อยู่ห่างจากจุดที่พบทางตัน เพื่อจะได้ไปค้นหาเส้นทางใหม่ที่อาจนำไปสู่คำตอบได้
- (3) ลองใช้ตัวกระทำต่อเนื่องกันหลายๆตัว แล้วค่อยประเมินสถานะ อาจนำไปสู่สถานะที่ใกล้เป้าหมายขึ้นได้

## 8. โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) [9, 26]

โครงข่ายประสาทเทียม คือ รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับประมวลผลสารสนเทศด้วยการคำนวณแบบคอนเนกชันนิสต์เพื่อจำลองการทำงานของเครือข่ายประสาทในสมองมนุษย์ ด้วยวัตถุประสงค์ที่จะสร้างเครื่องมือซึ่งมีความสามารถในการเรียนรู้ การจดจำแบบรูป และการอุปมาความรู้ เช่นเดียวกับความสามารถที่มีในสมองมนุษย์ แนวคิดเริ่มต้นของเทคนิคนี้ได้มาจากการศึกษาข่ายงานไฟฟ้าชีวภาพในสมอง ซึ่งประกอบด้วยเซลล์ประสาทหรือนิวรอน (Neurons) และจุดประสานประสาท (Synapses) แต่ละเซลล์ประสาทประกอบด้วยปลายในการรับกระแสประสาทเรียกว่า เดนไดรต์ (Dendrite) ซึ่งเป็นอินพุต และปลายในการส่งกระแสประสาท เรียกว่า แอกซอน (Axon) ซึ่งเป็นเอาต์พุตของเซลล์ เซลล์เหล่านี้ทำงานด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าภายนอกหรือกระตุ้นด้วยเซลล์ด้วยกัน กระแสประสาทจะวิ่งผ่านเดนไดรต์เข้าสู่นิวเคลียสซึ่งเป็นตัวตัดสินใจว่าต้องกระตุ้นเซลล์อื่นๆต่อไปหรือไม่ ถ้ากระแสประสาทแรงพอ นิวเคลียสจะกระตุ้นเซลล์อื่นๆต่อไปผ่านทางแอกซอนของมันตามลักษณะข้างต้นข่ายงานประสาทเกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ประสาทจนเป็นเครือข่ายที่ทำงานร่วมกัน

เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างแล้วพบว่าข่ายงานประสาทเทียมมีโครงสร้างแตกต่างจากข่ายงานในสมอง แต่ที่เหมือนกับสมอง คือ ข่ายงานประสาทเทียมเป็นการรวมกลุ่มแบบขนานของหน่วยประมวลผลย่อยๆ และการเชื่อมต่อเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดสติปัญญาของข่ายงาน และสมองมีขนาดใหญ่กว่าข่ายงานประสาทเทียมอย่างมาก รวมทั้งเซลล์ประสาทยังมีความซับซ้อนกว่าหน่วยย่อยของข่ายงาน แต่หน้าที่สำคัญของสมอง เช่น การเรียนรู้ยังคงสามารถถูกจำลองขึ้นอย่างง่ายด้วยโครงข่ายประสาทนี้ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในคอมพิวเตอร์ [9]

## 8.1 องค์ประกอบและการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

องค์ประกอบของโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย 5 ส่วน ดังต่อไปนี้

- (1) อินพุต (Input) อาจจะเป็นข้อความ รูปภาพ หรือเสียง แต่จะต้องผ่านการแปลงให้เป็นสัญลักษณ์หรือตัวเลขเพื่อให้เครื่องเข้าใจ โดยอินพุตจะถูกจำแนกตามคุณลักษณะต่อไป
- (2) น้ำหนัก (Weight) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบโครงข่ายประสาทเทียม เนื่องจากเป็นส่วนที่ใช้หาน้ำหนักของความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต คือ ใช้วิเคราะห์อินพุตใด ๆ มีความสัมพันธ์กับอินพุตอื่นในระดับใด ซึ่งจะช่วยให้สามารถเชื่อมโยงไปหาข้อสรุปได้ ด้วยการลองผิดลองถูกในความสัมพันธ์แต่ละแบบ และเก็บไว้เป็นแบบแผนหรือรูปแบบของประสบการณ์เพื่อการเรียนรู้ของโครงข่าย
- (3) ฟังก์ชันการรวม (Summation Function) ทำหน้าที่ในการรวมค่าน้ำหนักที่ได้จากโครงข่ายในชั้นอินพุตเพื่อสรุปผลความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและรอการแปลงเป็นสารสนเทศที่มีความหมายในชั้นต่อไป
- (4) ฟังก์ชันการแปลง (Transformation Function) ทำหน้าที่ประสานสารสนเทศที่ผ่านการประมวลผลจากโครงข่ายในชั้นต่างๆ แล้วทำการแปลงให้กลายเป็นสารสนเทศที่สื่อความหมาย และเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้เพื่อส่งออกไปเป็นเอาต์พุต
- (5) เอาต์พุต (Output) เอาต์พุตที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม หมายถึงแนวทางในการแก้ไขปัญหา ซึ่งใช้สัญลักษณ์แทนคำตอบทั้งหมด เอาต์พุตที่ได้จากโครงข่ายหนึ่งสามารถเป็นอินพุตของอีกโครงข่ายหนึ่งได้ เพื่อเป็นอินพุตของการตัดสินใจแก้ไขปัญหาอื่น

การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม คือ เมื่อมีอินพุตเข้ามายังโครงข่าย จะนำอินพุตมาคูณกับน้ำหนักของแต่ละขา จากนั้นนำผลที่ได้จากอินพุตของทุกขามารวมกันแล้วเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่กำหนดไว้ ถ้าผลรวมมีค่ามากกว่าค่าอ้างอิงจะส่งเอาต์พุตนั้นออกไป เพื่อไปเป็นอินพุตของประสาทอื่นๆที่เชื่อมกันในโครงข่าย แต่ถ้าค่าน้อยกว่าค่าอ้างอิงจะไม่เกิดเอาต์พุต

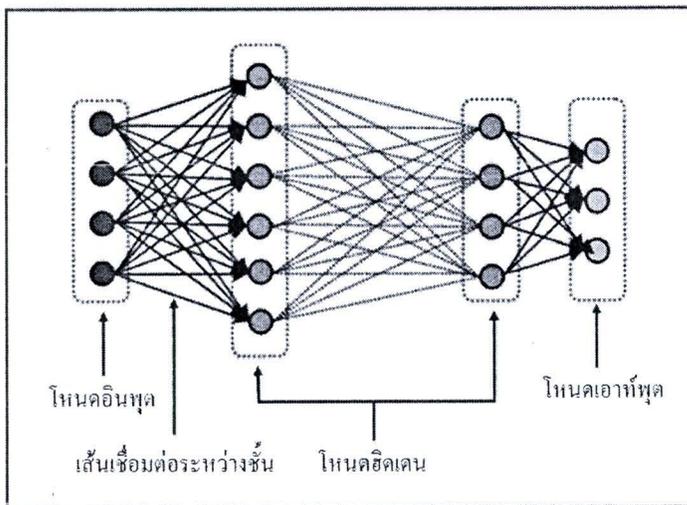
สิ่งสำคัญคือต้องทราบค่าน้ำหนักและค่าอ้างอิงสำหรับสิ่งที่เราต้องการเพื่อให้คอมพิวเตอร์รู้จัก ซึ่งเป็นค่าที่ไม่แน่นอน แต่สามารถกำหนดให้คอมพิวเตอร์ปรับค่าเหล่านั้นได้โดยการสอนให้รู้จักรูปแบบของสิ่งที่เราต้องการให้รู้จัก เรียกว่า การแพร่กระจายย้อนกลับ หรือ Back-propagation ซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับของการรู้จัก ในการฝึกโครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้า (Feed-forward Neural Networks) จะมีการใช้อัลกอริทึมการแพร่กระจายย้อนกลับเพื่อใช้ในการปรับปรุงน้ำหนักของโครงข่าย หลังจากใส่รูปแบบข้อมูลสำหรับฝึกให้แก่โครงข่ายในแต่ละครั้งแล้วค่าเอาต์พุตที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลที่คาดหวัง แล้วทำการคำนวณหาค่าความผิดพลาด ซึ่งค่าความผิดพลาดนี้จะถูกส่งกลับเข้าสู่โครงข่ายเพื่อใช้แก้ไขค่าน้ำหนักต่อไป โครงสร้าง

วงจรของโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังภาพที่ 2.26 และเอาต์พุตของแต่ละโหนดคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$y_i = f(w_i^1 x_1 + w_i^2 x_2 + w_i^3 x_3 + \dots + w_i^m x_m) \\ = f\left(\sum_j w_i^j x_j\right) \quad [9]$$

เมื่อ  $X_i$  คือ เอาต์พุตจากโหนดอื่นๆ

$W_{ij}$  คือ น้ำหนักของแต่ละขา



ภาพที่ 2.26 โครงสร้างวงจรโครงข่ายประสาทเทียม [9]

## 8.2 อัลกอริทึมการแพร่กระจายย้อนกลับ (Back-propagation Algorithm)

การแพร่กระจายย้อนกลับเป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในเพอร์เซปตรอนหลายชั้น (Multilayer Perceptron) เพื่อปรับค่าน้ำหนักในเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนดให้เหมาะสม โดยการปรับค่านี้อาจขึ้นกับความแตกต่างระหว่างค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้กับค่าเอาต์พุตที่ต้องการ

## 8.3 การเรียนรู้สำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้ได้ 2 วิธี คือ การเรียนแบบมีการสอน (Supervised Learning) และการเรียนแบบไม่มีการสอน (Unsupervised Learning) โดยรายละเอียดการเรียนรู้ของทั้ง 2 วิธี มีดังนี้

### 8.3.1 การเรียนแบบมีการสอน (Supervised Learning)

การเรียนแบบมีการสอนเป็นการเรียนแบบที่มีการตรวจคำตอบเพื่อให้วงจรโครงข่ายปรับตัว ชุดข้อมูลที่ให้สอนวงจรโครงข่ายจะมีคำตอบไว้คอยตรวจดูว่าวงจรโครงข่ายให้คำตอบที่ถูกต้องหรือไม่ ถ้าตอบไม่ถูกวงจรจะปรับตัวเองเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น

### 8.3.2 การเรียนแบบไม่มีการสอน (Unsupervised Learning)

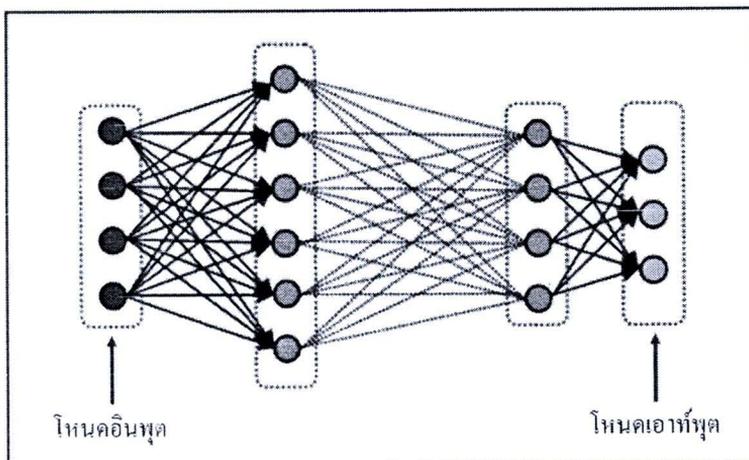
การเรียนแบบไม่มีการสอนเป็นการเรียนแบบไม่มีผู้แนะนำ ไม่มีการตรวจคำตอบว่าถูกหรือผิด วงจรโครงข่ายจะจัดเรียงโครงสร้างด้วยตัวเองตามลักษณะของข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้วงจรโครงข่ายจะสามารถจัดหมวดหมู่ของข้อมูลได้

## 8.4 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม (Network Architecture)

สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นการแบ่งตามลักษณะการทำโครงสร้างและวิธีการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมออกเป็น 4 แบบ ดังนี้

### 8.4.1 โครงข่ายการส่งข้อมูลแบบไม่ย้อนกลับ (Feed-forward Network)

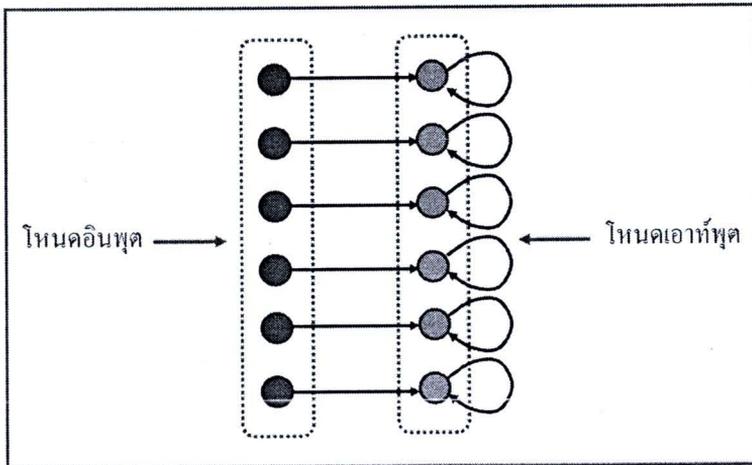
เป็นสถาปัตยกรรมที่กำหนดให้ข้อมูลที่ประมวลผลในโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกส่งไปในทิศทางเดียวจากโหนดอินพุตส่งต่อมาเรื่อยๆ จนถึงโหนดเอาต์พุตโดยไม่มีการย้อนกลับของข้อมูล หรือแม้แต่โหนดในชั้นเดียวกันก็ไม่มีการเชื่อมต่อกัน ลักษณะวงจรของโครงข่ายการส่งข้อมูลแบบไม่ย้อนกลับแสดงดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 ลักษณะวงจรโครงข่ายการส่งข้อมูลแบบไม่ย้อนกลับ [9]

#### 8.4.2 โครงข่ายการส่งข้อมูลแบบย้อนกลับ (Feedback Network)

เป็นสถาปัตยกรรมที่กำหนดให้ข้อมูลที่ประมวลผลในโครงข่ายประสาทเทียมจะมีการป้อนกลับเข้าไปยังวงจรโครงข่ายหลายครั้ง จนกระทั่งได้เอาต์พุตออกมา (อาจเรียกว่า Recurrent Network) ลักษณะวงจรโครงข่ายการส่งข้อมูลแบบย้อนกลับแสดงดังภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 ลักษณะวงจรโครงข่ายการส่งข้อมูลแบบย้อนกลับ [9]

#### 8.4.3 ระดับชั้นของโครงข่าย (Network Layer)

พื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นอินพุตยูนิท (Input Units) ที่ถูกเชื่อมต่อกับชั้นฮิดเดนยูนิท (Hidden Units) ซึ่งเชื่อมต่อกับชั้นเอาต์พุตยูนิท (Output Units)

- การทำงานของอินพุตยูนิทจะทำหน้าที่แทนส่วนของอินพุตที่ถูกป้อนเข้าสู่โครงข่าย
- การทำงานของแต่ละฮิดเดนยูนิทจะถูกกำหนดโดยการทำงานของอินพุตยูนิทและค่าน้ำหนักบนความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตยูนิทและฮิดเดนยูนิท
- พฤติกรรมการทำงานของเอาต์พุตยูนิทจะขึ้นอยู่กับการทำงานของฮิดเดนยูนิทและค่าน้ำหนักระหว่างฮิดเดนยูนิทและเอาต์พุตยูนิท

โครงข่ายนี้เราสามารถกำหนดการแทนค่าให้แก่อินพุตยูนิทได้อย่างอิสระ ค่าน้ำหนักระหว่างอินพุตยูนิทและฮิดเดนยูนิทจะถูกกำหนดเมื่อฮิดเดนยูนิทกำลังทำงาน เพราะฉะนั้นเวลาที่แก้ไขค่าน้ำหนักฮิดเดนยูนิทเราสามารถเลือกค่าที่จะเข้ามาแทนได้

สถาปัตยกรรมของชั้นจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ

(1) เพอร์เซปตรอนชั้นเดียว (Single-layer Perceptron หรือ SLP) คือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยชั้นเพียงชั้นเดียวเท่านั้น จำนวนโหนดอินพุตขึ้นอยู่กับจำนวนขาของข้อมูลอินพุตและการทำงานของฟังก์ชันขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อมูลเอาต์พุต

(2) เพอร์เซปตรอนหลายชั้น (Multi-layer Perceptron หรือ MLP) คือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยชั้นหลายชั้น โดยในแต่ละชั้นจะประกอบด้วยโหนด ค่าน้ำหนักของเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างโหนดของแต่ละชั้น (เมทริก  $W$ ) ค่าไบอัสเวกเตอร์ (Bias vector หรือ  $b$ ) และค่าเอาต์พุตเวกเตอร์ (output vector หรือ  $a$ ) โดย  $m$  เป็นตัวเลขบอกลำดับชั้นกำกับไว้ ด้านบน เมื่อ  $p$  เป็นอินพุตเวกเตอร์ (input vector) การคำนวณค่าเอาต์พุตสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมที่มี  $M$  ชั้นจะเป็นดังสมการ

$$a^{m+1} = f^{m+1}(W^{m+1} a^m + b^{m+1}) \quad [9]$$

เมื่อ  $m = 0, 2, \dots, M-1$

$$a^0 = p$$

$$a = a^m$$

$f$  คือ transfer function

#### 8.4.4 เพอร์เซปตรอน (Perceptrons)

เพอร์เซปตรอน หรือ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอย่างง่าย เป็นโครงข่ายงานประสาทเทียมประเภทหนึ่งที่ได้พัฒนาขึ้นใน ค.ศ. 1957 โดย แฟรงค์ โรเซนบลัทท์ (Frank Rosenblatt) ที่ Cornell Aeronautical Laboratory เพอร์เซปตรอนประกอบด้วยเซลล์ประสาทเทียมอย่างน้อยหนึ่งชั้น อินพุตจะถูกส่งไปยังเอาต์พุตโดยผ่านชุดค่าน้ำหนัก ด้วยเหตุนี้ จึงสามารถพิจารณาว่าเป็นโครงข่ายการส่งข้อมูลแบบไม่ย้อนกลับแบบพื้นฐานที่สุด โหนดแต่ละโหนดจะคำนวณผลรวมถ่วงน้ำหนักจากอินพุต ซึ่งก็คือผลรวมของผลคูณระหว่างค่าอินพุตกับค่าน้ำหนักของแต่ละโหนด ถ้าค่าที่ได้มากกว่าค่าอ้างอิงโหนดจะให้ค่าเอาต์พุตเท่ากับ 1 แต่ถ้าน้อยกว่าจะให้ค่าเท่ากับ -1 เพื่อความสะดวกในการคำนวณค่าอ้างอิงจะกำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักโหนดหนึ่งของอินพุตที่เป็นค่าคงที่ โดยฟังก์ชันค่าอ้างอิงจะมีศูนย์กลางอยู่ที่ 0

โดยเพอร์เซปตรอนกลายเป็นต้นแบบ MCP (McCulloch-Pitts Neurons) พร้อมกับส่วนต่อเติม เรียกว่า Association Units ทำงานเพื่อคัดเลือกสิ่งที่แตกต่างกันออกมาจากรูปภาพที่

รับเข้าไป โดยเพอร์เซปตรอนสามารถคัดลอกความคิดพื้นฐานของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ส่วนใหญ่ใช้ในรูปแบบรู้จำและสามารถขยายให้มีความสามารถสูงกว่านี้ได้

### 8.5 การประยุกต์ใช้งาน โครงข่ายประสาทเทียม

เนื่องจากความสามารถในการจำลองพฤติกรรมทางกายภาพของระบบที่มีความซับซ้อนจากอินพุตที่ป้อนให้เรียนรู้ โครงข่ายประสาทเทียมจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานได้หลายประเภท ได้แก่

- (1) งานการจดจำรูปแบบที่มีความไม่แน่นอน เช่น ลายมือ ลายเซนส์ ตัวอักษร
- (2) งานการประมาณค่าฟังก์ชันหรือการประมาณความสัมพันธ์ (มีอินพุตและเอาต์พุต แต่ไม่ทราบว่าอินพุตกับเอาต์พุตมีความสัมพันธ์กันอย่างไร)
- (3) งานที่สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้และปรับตัวเองได้
- (4) งานจัดหมวดหมู่และแยกแยะสิ่งของ
- (5) งานทำนาย เช่น พยากรณ์อากาศ พยากรณ์หุ้น
- (6) งานควบคุมกระบวนการทางเคมี โดยวิธีพยากรณ์แบบจำลอง (Model Predictive Control)
- (7) งานทำนายพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ในตัวอาคาร โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กระจายย้อนกลับ
- (8) การหาไซโครเมตริกชาร์ท งานควบคุมระบบ HVAC

### 9. การคำนวณหาความเร็ววัตถุ [2]

การคำนวณหาความเร็วของวัตถุ โดยมีความเร่งคงที่สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$V = S / (t_2 - t_1) \quad [2]$$

เมื่อ  $V$  คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ

$S$  คือ ระยะห่างระหว่างจุด 2 จุด

$t_1$  คือ เวลาที่วัตถุเคลื่อนที่ผ่านจุดแรก

$t_2$  คือ เวลาที่วัตถุเคลื่อนที่ผ่านจุดที่สอง