

# การสำรวจอัลกอริทึมสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

## ที่มีการแบ่งกลุ่มของโหนด

ชาญฤทธิ์ ด้านรัชดากร และ โชติพัชร ภรณ์วลัย

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Emails: mzungdecalock@hotmail.com, chotipat@it.kmitl.ac.th

### บทคัดย่อ

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์จำนวนมากที่มีพลังงานจำกัดที่สามารถตรวจจับข้อมูลแวดล้อมต่างๆ เช่น อุณหภูมิ, ความชื้น, ความเคลื่อนไหวโดยรอบ ซึ่งการแบ่งกลุ่มของโหนดเป็นวิธีการที่ทำให้โหนดภายในเครือข่ายใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สามารถยืดระยะเวลาความคงอยู่ของเครือข่ายได้ยาวนานขึ้น แต่ละกลุ่มจะมีโหนดหัวหน้ากลุ่มคอยส่งต่อข้อมูลของสมาชิกภายในกลุ่มไปยังสถานีฐาน บทความนี้อธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โพรโทคอลการสร้างกลุ่มของโหนดของงานวิจัยต่างๆ ที่ถูกนำเสนอไว้ รวมถึงตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแต่ละโพรโทคอล และความท้าทายในการพัฒนาโพรโทคอลสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

**คำสำคัญ** – เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย; การแบ่งกลุ่มของโหนด; ความคงอยู่ของเครือข่าย; หัวหน้ากลุ่ม; สถานีฐาน

### Abstract

Wireless sensor networks contain many sensors of which the battery is limited. Sensors can detect data such as temperature, humidity and motion within their sensing range. Clustering is a famous method which makes the network use energy efficiently. It also leads the network has more lifetime. Each cluster has their own cluster head which collects data from members and forwards to a base station. This Paper presents theories of wireless sensor networks, proposed clustering protocols in the past and factors used to compare efficient among protocols.

**Keywords** – Wireless sensor network; Clustering; Network Lifetime; Cluster Head; Base Station

## 1. บทนำ

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Networks) ประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์จำนวนมาก คอยทำหน้าที่ตรวจจับข้อมูลตามวัตถุประสงค์ของเครือข่ายนั้นๆ เช่น เครือข่ายที่ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในป่า เครือข่ายที่ตรวจจับผู้บุกรุกซึ่งมักถูกใช้ในทางการทหาร และเครือข่ายที่ถูกนำไปใช้ในการแพทย์ เป็นต้น [1], [2] แต่ละเซ็นเซอร์โหนดจะทำการตรวจจับข้อมูลภายในรัศมีการตรวจจับ (Sensing Range) ของตัวเองและทำการส่งข้อมูล (Sensing Data) ต่อไปยังสถานีฐาน (Base Station) เพื่อที่จะนำข้อมูลดิบ (Data) ดังกล่าวไปวิเคราะห์และเข้าสู่กระบวนการต่างๆที่ทำให้ได้ข้อมูลสารสนเทศ (Information) ไปใช้งานต่อไป

ปัญหาหลักในงานวิจัยของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย คือ ควรมีอัลกอริทึมในการติดต่อสื่อสารอย่างไรที่จะทำให้ความคงอยู่ของเครือข่าย (Network Lifetime) ยืนยาวให้ได้นานที่สุด ซึ่งการแบ่งกลุ่มของโหนดภายในเครือข่าย (Clustering) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการตอบโต้ข้อข้างต้น เนื่องจากช่วยลดการใช้พลังงานโดยรวมของโหนดภายในเครือข่ายได้ โดยโหนดภายในเครือข่ายจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มจะมีหัวหน้ากลุ่ม (Cluster Head) อยู่หนึ่งโหนด โหนดอื่นๆภายในกลุ่มจะถูกเรียกว่าสมาชิกกลุ่ม (Member Node) สมาชิกภายในกลุ่มจะส่งข้อมูลที่ตรวจจับได้ (Sensing Data) ไปยังหัวหน้ากลุ่ม จากนั้นหัวหน้ากลุ่มจะบีบรวมข้อมูล (Data Aggregation) ของทุกสมาชิกและส่งต่อข้อมูลดังกล่าวไปยังสถานีฐานต่อไป ดังรูปที่ 1.

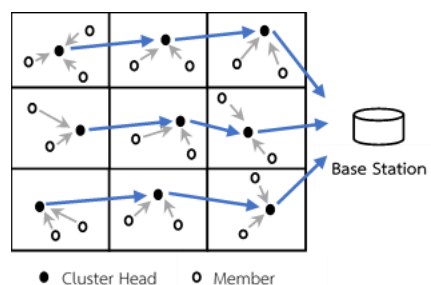
ตัวอย่างการบีบรวมข้อมูลได้แก่ เครือข่ายเซ็นเซอร์ที่มีหน้าที่คอยวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในป่า หลังจากที่มีสมาชิกแต่ละโหนดภายในกลุ่มทำการส่งข้อมูลที่ตรวจจับได้ไปยังหัวหน้ากลุ่ม เมื่อหัวหน้ากลุ่มได้ข้อมูลของทุกโหนดสมาชิกแล้ว แทนที่จะส่งต่อข้อมูลที่มีขนาดเท่ากับ  $(\text{จำนวนสมาชิกภายในกลุ่ม} + 1) \times \text{Data Size}$  ออกไป ก็

จะทำการหาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้นแทน และส่งต่อไปยังสถานีฐานด้วยข้อมูลที่มีขนาดเท่ากับ  $T \times \text{Data Size}$  ( $T$  คือจำนวนข้อมูลที่ถูกรีบอัดแล้ว)

นอกจากนี้อัลกอริทึมที่นำเทคนิคการแบ่งกลุ่มของโหนดมาใช้งานโหนดที่เป็นสมาชิกภายในกลุ่มจะใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่อยู่ในเกณฑ์ต่ำ เนื่องจากมีระยะใกล้กับหัวหน้ากลุ่ม แทนที่จะส่งไปยังสถานีฐานโดยตรงซึ่งมีระยะไกล จากข้อดีที่ผู้เขียนได้ยกตัวอย่างไว้ข้างต้น ทำให้การแบ่งกลุ่มโหนดเป็นเทคนิคที่นิยมถูกนำไปใช้ในอัลกอริทึมการติดต่อสื่อสารสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในปัจจุบัน

ในขณะที่ยานวิจัยที่คิดค้นอัลกอริทึมในการติดต่อสื่อสารแบบกลุ่มสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Clustering Algorithm) ถูกนำเสนอและตีพิมพ์ออกมาอย่างแพร่หลายนั้น ส่วนใหญ่จะมีวัตถุประสงค์หลักคือทำให้เครือข่ายมีความคงอยู่นานมากที่สุด อย่างไรก็ตามยังมีประเด็นและปัจจัยที่ส่งผลถึงคุณภาพของเครือข่ายว่าดีหรือไม่อีกหลายอย่าง ซึ่งผู้เขียนจะกล่าวถึงต่อไป

ในหัวข้อถัดไปประกอบไปด้วยหัวข้อต่างๆดังนี้ ส่วนที่ 2 อธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ส่วนที่ 3 อธิบายถึงกระบวนการของอัลกอริทึมต่างๆที่ใช้เทคนิคการแบ่งกลุ่มของโหนดมาเป็นส่วนประกอบ ส่วนที่ 4 อธิบายถึงปัจจัยที่ใช้ชี้วัดประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ความท้าทายในการพัฒนาอัลกอริทึมและบทสรุปจะอยู่ในส่วนที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 1. การส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานผ่านหัวหน้ากลุ่ม

## 2. ทฤษฎีพื้นฐาน

งานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย มีการอ้างอิงถึงทฤษฎีต่าง ๆ มากมาย ในบทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ประกอบไปด้วยรูปแบบการสื่อสารและการวางของโหนดเซ็นเซอร์, การควบคุมเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย และโมเดลจำลองการใช้พลังงาน

### 2.1 รูปแบบการสื่อสารของโหนดเซ็นเซอร์

การสื่อสารระหว่างโหนดแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบหลักๆ คือ

#### .1.21. Single-Hop

การสื่อสารไร้สายในรูปแบบนี้ เป็นการสื่อสารกันระหว่างต้นทางถึงปลายทางโดยตรง โดยไม่มีการส่งข้อมูลผ่านไปยังโหนดอื่นก่อน

#### 2.1.2. Multi-Hop

การสื่อสารไร้สายในรูปแบบนี้ การส่งข้อมูลจากต้นทางไปถึงปลายทางนั้น จะมีการส่งผ่านโหนดอื่นที่อยู่ในเส้นทาง ซึ่งโหนดระหว่างทางนั้นจะทำการส่งต่อ (Forward) ข้อมูลดังกล่าวไปเรื่อยๆ จนถึงโหนดปลายทาง

สังเกตได้ว่าถ้าโหนดต้นทางและปลายทางมีระยะที่ห่างกันมาก หากโหนดใช้รูปแบบการติดต่อสื่อสารแบบ Single-Hop จะทำให้โหนดนั้น ๆ สิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก ต่างจากแบบ Multi-Hop ซึ่งจะส่งข้อมูลฝากต่อไปยังโหนดใกล้เคียง ทำให้พลังงานที่ใช้โดยรวมนั้นลดน้อยลง

### 2.2 การวางของโหนดเซ็นเซอร์

ก่อนที่เครือข่ายจะเริ่มทำงานได้ จะต้องทำการวางโหนดเซ็นเซอร์ลงไปในพื้นที่ก่อน ซึ่งมีอยู่ 2 รูปแบบคือ

#### .2.21. การวางโหนดแบบ Uniform Distribution

เป็นการวางตัวโหนดเซ็นเซอร์ให้มีความหนาแน่นที่เท่า ๆ กันในแต่ละโซน

#### .2.2.2 การวางโหนดแบบ Non-Uniform Distribution

เป็นการวางตัวโหนดเซ็นเซอร์ในรูปแบบการกระจายที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน กล่าวคือบางโซนในเครือข่ายอาจจะมีความหนาแน่นของโหนดที่สูงมาก แต่บางโซนมีความหนาแน่นที่น้อย

### 2.3 การควบคุมเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะต้องมีอัลกอริทึมซึ่งคอยควบคุมการทำงานระหว่างโหนดให้ทำงานได้อย่างเป็นระบบ การที่โหนดจะรู้ได้ว่า ณ เวลาใด ๆ ควรทำหน้าที่อะไร จะมีอัลกอริทึมควบคุมอยู่ 2 รูปแบบคือ

#### .3.21. แบบจุดรวมศูนย์ (Centralized)

เครือข่ายจะมีจุดศูนย์กลางการควบคุม เช่น สถานีฐาน โดยแต่ละโหนดภายในเครือข่ายต้องส่งสถานะปัจจุบันของตนเอง เช่น ค่าพลังงานคงเหลือ ไปยังจุดศูนย์กลางควบคุม เพื่อให้จุดศูนย์กลางทำหน้าที่ตัดสินใจและสั่งการงาน (Task) ให้แก่โหนดต่อไป

#### 2.2.3. แบบกระจาย (Distributed)

แต่ละเซ็นเซอร์โหนดภายในเครือข่ายสามารถระบุขั้นตอนการทำงาน สามารถปรับเปลี่ยนเส้นทางการส่งข้อมูล หรือสถานะของตนเองได้เอง โดยไม่ต้องมีการควบคุมจากโหนดภายนอก ซึ่งอัลกอริทึมในรูปแบบนี้อาจจะใช้ข้อมูลในการตัดสินใจจากสภาพแวดล้อม หรือข้อมูลจากเซ็นเซอร์โหนดรอบข้าง

อย่างไรก็ตาม การที่อัลกอริทึมแบบจุดรวมศูนย์ (Centralized) ต้องให้ทุก ๆ โหนดส่งข้อมูลของตนเองไปยังจุดศูนย์กลางควบคุม ส่งผลให้การใช้พลังงานในการควบคุม (Overhead Energy Consumption) ของโหนดอยู่ในเกณฑ์สูง แต่โหนดจะใช้พลังงานในการประมวลผล

(Processing Energy) ที่ต่ำ ตรงกันข้ามการควบคุมแบบกระจาย (Distributed) โหนดจะใช้ค่าพลังงานในการควบคุมในเกณฑ์ที่ต่ำ และใช้พลังงานในการประมวลผลสูงขึ้นแทน

โดยสรุป การควบคุมแบบกระจายเหมาะกับเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ (Large-Scale Networks) และต้องการความสามารถในการรองรับการเพิ่มขยายได้ในอนาคต (Scalability)

## 2.4 โมเดลจำลองการใช้พลังงาน

โมเดลจำลองการใช้พลังงานถูกแบ่งออกเป็น 2 โมเดล ได้แก่ Free Space Model และ Two-Ray Ground Propagation Model พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจำนวน  $l$  Bit จากเครื่องส่งสัญญาณ (Transmitter) ไปยังเครื่องรับสัญญาณ (Receiver) ด้วยระยะห่าง  $d$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$E_{Tx}(l,d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

ตัวแปร  $E_{elec}$  คือพลังงานไฟฟ้ากระแส ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเข้ารหัสข้อมูล,  $\epsilon_{fs}$  และ  $\epsilon_{mp}$  คือพลังงานในการขยายสัญญาณที่ฝั่งส่ง และ  $d_0$  คือระยะห่างระหว่างโหนดรับ-ส่ง ที่จะต้องเลือกใช้โมเดลแบบใดแบบหนึ่ง

## 3. โพรโทคอลการแบ่งกลุ่มของโหนด

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ออกแบบอัลกอริทึมในการจัดการเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยนำเทคนิคการแบ่งกลุ่มของโหนด (Clustering) มาใช้ ถูกตีพิมพ์ออกมาอย่างมากมาย ผู้เขียนขอยกอัลกอริทึมที่เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางและมักถูกอ้างอิงถึง ดังนี้

### 3.1 Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) [3]

โพรโทคอล LEACH มีรูปแบบการควบคุมภายในเครือข่ายเป็นแบบกระจาย (Distributed) และมีลักษณะการติดต่อสื่อสารแบบ Single-Hop โดยคุณสมบัติเด่นของโพรโทคอลนี้คือการกระจายภาระการเป็นหัวหน้ากลุ่มด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากัน ส่งผลให้สามารถรักษาความสมดุลในด้านการใช้พลังงานของโหนดภายในเครือข่ายได้ โดยกระบวนการทำงานถูกแบ่งออกเป็นรอบ (Round) และแต่ละรอบจะมีกระบวนการ 2 ช่วงคือ ช่วงกระบวนการเลือกหัวหน้ากลุ่ม (Cluster Head Election) และกระบวนการส่งข้อมูล (Data Communication)

ในช่วงกระบวนการเลือกหัวหน้ากลุ่ม แต่ละโหนดจะต้องหาค่าความน่าจะเป็นในการเป็นหัวหน้ากลุ่มจากสมการที่ (2) โดยที่ค่า  $r$  คือจำนวนรอบทั้งหมดที่ทำงานมาแล้ว, ค่า  $C_i(t)$  จะมีค่า 0 ก็ต่อเมื่อโหนด  $i$  เคยเป็นหัวหน้ากลุ่มมาแล้ว ซึ่งจะทำให้มีแต่โหนดที่ไม่เคยเป็นเท่านั้นที่จะมีโอกาสเป็นหัวหน้ากลุ่มในรอบถัดไป, ค่า  $k$  เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนโหนดทั้งหมดภายในเครือข่ายต่อจำนวนโหนดหัวหน้ากลุ่ม ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ต้องกำหนดไว้ล่วงหน้า

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{N - k \cdot (r \bmod \frac{N}{k})} & : C_i(t) = 1 \\ 0 & : C_i(t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

หลังจากที่ได้หัวหน้ากลุ่มแล้ว โหนดที่ไม่ชนะการเป็นหัวหน้ากลุ่ม (Ordinary Node) จะทำการเข้าร่วม (Join) กับโหนดหัวหน้ากลุ่มที่มีระยะห่างใกล้ที่สุด เท่านั้นก็จะเสร็จสิ้นช่วงของการสร้างกลุ่ม (Cluster Forming) จากนั้นเครือข่ายจะเข้าสู่ช่วงกระบวนการการส่งข้อมูล (Data Communication) ซึ่งหัวหน้ากลุ่มจะส่งต่อข้อมูลของสมาชิกไปยังสถานีฐานโดยตรงต่อไป

### 3.2 Low-Energy Adaptive Clustering

#### Hierarchy Centralized (LEACH-C) [4]

โพรโตคอล LEACH-C ถูกปรับเปลี่ยนและพัฒนาต่อจากโพรโตคอล LEACH ซึ่งจะแตกต่างกันตรงที่โพรโตคอล LEACH-C มีรูปแบบการควบคุมแบบจตุรรวมศูนย์ (Centralized) ถึงแม้ว่าโพรโตคอล LEACH จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นแบบกระจาย แต่ LEACH ซึ่งใช้เกณฑ์ในการเลือกหัวหน้ากลุ่มจากค่าความน่าจะเป็น ส่งผลให้มีความแน่นอนในเรื่องของขนาดกลุ่ม จำนวนกลุ่ม และจำนวนหัวหน้ากลุ่มภายในเครือข่าย ทำให้การใช้พลังงานของแต่ละโหนดไม่มีความสมดุลกัน

อัลกอริทึมของ LEACH-C ในช่วงกระบวนการสร้างกลุ่ม (Cluster Forming Phase) แต่ละโหนดจะส่งข้อมูลพิกัดและค่าพลังงานคงเหลือของตนเองไปยังสถานีฐาน จากนั้นสถานีฐานจะนำค่าพลังงานคงเหลือของทุกโหนดมาหาค่าเฉลี่ย โหนดใดก็ตามที่มีค่าพลังงานคงเหลือน้อยกว่าค่าเฉลี่ยจะไม่มีสิทธิ์เป็นหัวหน้ากลุ่มในรอบการทำงานนั้น ๆ ในทางกลับกันโหนดที่เหลือจะมีโอกาสได้เป็นหัวหน้ากลุ่ม โดยสถานีฐานจะสร้างกลุ่มขึ้นมาซึ่งใช้อัลกอริทึมการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm) ในการคำนวณว่าควรมีโหนดใดเป็นหัวหน้ากลุ่มบ้าง เพื่อให้โหนดสมาชิกกลุ่มส่งข้อมูลของตนเองไปยังหัวหน้ากลุ่มด้วยการบริโภคพลังงานที่น้อยที่สุด กล่าวคือหัวหน้ากลุ่มจะต้องเป็นโหนดที่อยู่ใกล้กับสมาชิกภายในกลุ่มโดยเฉลี่ยให้มากที่สุด

หลังจากสถานีฐานตัดสินใจแล้วว่าโหนดใดบ้างจะเป็นหัวหน้ากลุ่ม ก็จะมีการบอตรดแสดออกไปเพื่อประกาศให้แต่ละโหนดภายในเครือข่ายทราบว่าโหนดตนเองต้องเป็นหัวหน้ากลุ่ม หรือต้องเข้าร่วมกลุ่มของโหนดใด

### 3.3 An Unequal Cluster-Based Routing

#### Protocol (UCR) [5]

โพรโตคอล UCR มีรูปแบบการควบคุมแบบกระจาย (Distributed) เช่นเดียวกับ LEACH แต่สิ่งที่เป็นลักษณะ

เด่นของอัลกอริทึมนี้มีอยู่ 2 อย่าง คือ มีการสร้างกลุ่มของโหนดที่มีขนาดที่ไม่เท่ากัน (Unequal Clustering) และมีการส่งต่อข้อมูลจากหัวหน้ากลุ่มไปยังสถานีฐานในรูปแบบ Multi-Hop

ขั้นตอนในแต่ละรอบการทำงาน แต่ละโหนดภายในเครือข่ายจะสุ่มตัวเองขึ้นเป็นหัวหน้ากลุ่มชั่วคราว (Tentative Cluster Head) ด้วยความน่าจะเป็น  $T$  ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดไว้ล่วงหน้า

หลังจากนั้นแต่ละหัวหน้ากลุ่มชั่วคราวจะทำการคำนวณหารัศมีการแข่งขัน (Competition Range) โดยที่ภายในรัศมิดังกล่าวนี้อาจมีหัวหน้ากลุ่มสุดท้าย (Final Cluster Head) ได้เพียงโหนดเดียว

จากสมการที่ (3) เป็นสมการที่ใช้คำนวณรัศมีการแข่งขัน ซึ่งเป็นสมการที่สำคัญที่ทำให้ขนาดของกลุ่มภายในเครือข่ายมีขนาดที่ไม่เท่ากัน โดยที่  $d_{max}$  และ  $d_{min}$  คือระยะทางระหว่างโหนดที่อยู่ไกลที่สุดและใกล้ที่สุดกับสถานีฐานตามลำดับ ค่า  $R_0$  คือรัศมีการแข่งขันที่เป็นไปได้มากที่สุดซึ่งเป็นค่าที่กำหนดไว้ล่วงหน้า และ  $d(s_i, BS)$  คือระยะทางระหว่างโหนดนั้น ๆ กับสถานีฐาน ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการทำให้อัลกอริทึมของโหนดมีขนาดที่ไม่เท่ากัน โหนดหัวหน้ากลุ่มชั่วคราวที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานจะมีขนาดของกลุ่มที่เล็ก และโหนดที่อยู่ห่างออกไปจากสถานีฐานก็จะมีขนาดของกลุ่มที่ใหญ่ขึ้นตามลำดับ

$$R_i = \left( 1 + c \frac{d_{max} - d(s_i, BS)}{d_{max} - d_{min}} \right) R_0 \quad (3)$$

จากนั้น แต่ละหัวหน้ากลุ่มชั่วคราวจะทำการแลกเปลี่ยนค่าพลังงานคงเหลือกับโหนดหัวหน้ากลุ่มชั่วคราวอื่นที่อยู่ภายในรัศมีการแข่งขัน และโหนดที่มีค่าพลังงานคงเหลือมากที่สุดก็จะได้เป็นหัวหน้ากลุ่มสุดท้าย (Final Cluster Head) จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการเข้าร่วมกลุ่ม (Joining) ซึ่งมีกระบวนการเหมือนกับโพรโตคอล LEACH และกระบวนการส่งข้อมูลซึ่งแต่ละหัวหน้ากลุ่มจะต้องส่งเป็นแบบ Multi-Hop ไปยังสถานีฐาน โดยแต่ละ

หัวหน้ากลุ่มจะมีกลไกในการเลือกโหนดหัวหน้ากลุ่มส่งต่อ (Next Hop Cluster Head) ด้วยการเลือกโหนดหัวหน้ากลุ่มที่มีระยะใกล้กับสถานีฐานมากที่สุดที่อยู่ในรัศมีการแข่งขันของตนเองมาจำนวน K โหนด (ค่าที่กำหนดไว้ล่วงหน้า) จากนั้นก็จะเลือกโหนดที่มีค่าพลังงานคงเหลือมากที่สุดจากโหนดจำนวน K โหนด ที่ได้เลือกไว้

การที่โปรโตคอล UCR กำหนดให้กลุ่มมีขนาดที่ไม่เท่ากันนั้น เพื่อลดภาระของโหนดที่อยู่ใกล้กับสถานีฐาน เนื่องจากโดยปกติแล้วโหนดหัวหน้ากลุ่มที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานต้องรับภาระหนักทั้งการรวบรวมข้อมูลจากสมาชิกภายในกลุ่ม และส่งต่อข้อมูลที่ได้รับจากหัวหน้ากลุ่มที่อยู่ไกลออกไปต่อไปยังสถานีฐาน ทำให้หัวหน้ากลุ่มในโซนดังกล่าวต้องทำงานหนักและทำให้พลังงานหมดอย่างรวดเร็ว เมื่อขนาดกลุ่มที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานมีขนาดเล็ก ทำให้หัวหน้ากลุ่มมีภาระในการติดต่อสื่อสารภายในกลุ่ม (Intra Communication) ที่น้อยลง เพื่อเก็บพลังงานไว้ใช้ในกระบวนการรับส่งข้อมูลระหว่างหัวหน้ากลุ่ม (Inter Communication) แทน ส่งผลให้การใช้พลังงานของโหนดที่อยู่ในโซนใกล้กับสถานีฐานมีความสมดุลกับพื้นที่โซนอื่นมากขึ้น

### 3.4 UCR with DSA [6]

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรโตคอล UCR ให้มีความคงอยู่ของเครือข่าย (Network Lifetime) รวมถึงพื้นที่การตรวจจับ (Coverage Area) ให้มีระยะยาวนานขึ้น โดยในอัลกอริทึมจะมีตัวแปรของโหนดเพิ่มขึ้นมาคือ Density-Sensing Area (DSA) เป็นตัวบ่งบอกถึงความหนาแน่นภายในรัศมีการตรวจจับของโหนดนั้นๆ โหนดที่มีค่า DSA สูงแสดงให้เห็นว่ามีจำนวนโหนดรอบข้างมาก ซึ่งโหนดดังกล่าวจะมีโอกาสเป็นหัวหน้ากลุ่มที่มากขึ้นตามไปด้วย

โดยกระบวนการส่วนใหญ่ยังคงรูปแบบเดิมของโปรโตคอล UCR ไว้ ส่วนที่เปลี่ยนแปลงที่สำคัญคือช่วงการเลือกหัวหน้ากลุ่มสุดท้าย (Final Cluster Head) ซึ่ง

จะใช้ค่า DSA เป็นเกณฑ์หลักในการเลือกแทนค่าพลังงานคงเหลือของโหนด (Residual Energy) แต่ในกรณีที่ค่า DSA ของโหนดที่เข้าร่วมแข่งขันมีค่าเท่ากัน ก็จะกลับไปเปรียบเทียบกับค่าพลังงานคงเหลือดั้งเดิม นอกจากนี้ในส่วนของการสื่อสาร Multi-Hop ระหว่างหัวหน้ากลุ่มด้วยกัน โหนดหัวหน้ากลุ่มจะเลือกโหนดที่ใช้ส่งข้อมูลตัวต่อไป (Next Hop) ด้วยการเลือกโหนดที่มีค่า DSA สูงที่สุดแทนค่าพลังงานคงเหลือ ในกรณีที่โหนดมีค่า DSA เท่ากันก็จะกลับไปใช้เปรียบเทียบกับค่าพลังงานคงเหลือดั้งเดิม

### 3.5 Clustering Algorithm based on Social Insect Colonies [7]

ในอัลกอริทึมนี้ ได้นำรูปแบบการติดต่อสื่อสารของมดมาดัดแปลงให้สามารถใช้ได้กับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย พญามด (Queens) เปรียบเสมือนกับโหนดหัวหน้ากลุ่ม (Cluster Head) และมดงาน (Workers) เปรียบเสมือนโหนดสมาชิกภายในกลุ่ม (Member Node)

โปรโตคอลนี้ มีรูปแบบการควบคุมแบบกระจาย (Distributed) และมีการติดต่อสื่อสารทั้งภายในกลุ่ม (Intra Communication) และระหว่างกลุ่ม (Inter Communication) เป็นแบบ Multi-Hop ทั้งหมด

$$T_i = T_{\max} \left(1 - t_r \frac{E_{\text{res},i}}{E_{\max}}\right) \quad (4)$$

ในช่วงการเลือกหัวหน้ากลุ่มของโปรโตคอลนี้ แต่ละโหนดจะคำนวณเวลา Back-off Time ขึ้นมาจากการที่ (4) โดยที่  $T_{\max}$  คือค่า Maximum Back-off Duration ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดไว้ล่วงหน้า,  $t_r$  เป็นตัวเลขสุ่มที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1,  $E_{\text{res},i}$  และ  $E_{\max}$  คือค่าพลังงานคงเหลือและค่าพลังงานเริ่มต้นของโหนดเซ็นเซอร์ตามลำดับ

โหนดใดที่ถึงรอรอบเวลา Back-off Time ที่คำนวณไว้แล้ว จะประกาศตัวเองเป็นหัวหน้ากลุ่มออกไปภายในรัศมีขนาดของกลุ่ม (Cluster Radius) ซึ่งต้องกำหนดไว้

ล่วงหน้า โหนดที่ได้รับข้อความการประกาศดังกล่าวจะ เลิกรอเวลา Back-off และทำการเข้าร่วมกลุ่มกับโหนดผู้ ประกาศข้อความ

หลังจากที่การสร้างกลุ่มแล้ว อัลกอริทึมจะมีกลไกใน การสร้างเส้นทางการติดต่อสื่อสารเพื่อใช้ส่งข้อมูลไปยัง สถานีฐาน โดยนำเทคนิคการปล่อยฟีโรโมน (Pheromone) ของมด มาปรับใช้เพื่อให้ได้เส้นทางที่สั้น (ใช้พลังงานในการส่ง) น้อยที่สุด

การเลือกหัวหน้ากลุ่มใหม่ (Cluster Head Election) สำหรับอัลกอริทึมนี้จะแตกต่างจากอัลกอริทึมอื่น ๆ ที่จะ เปลี่ยนใหม่ในรอบการทำงาน แนวคิดของอัลกอริทึมนี้ นำเสนอว่าแต่ละโหนดหัวหน้ากลุ่มต้องคำนวณระยะเวลา ความคงอยู่ (Lifetime) เป็นระยะ ซึ่งทำให้สามารถ ประมาณเวลาได้ว่าจะทำงานได้อีกเท่าไร เมื่อเวลา ดังกล่าวเหลือน้อย หัวหน้ากลุ่มจะทำการบรอดแคสต์เพื่อ ประกาศให้สมาชิกภายในกลุ่มของตนทุกโหนดเข้าสู่ช่วง กระบวนการเลือกหัวหน้ากลุ่มใหม่ ซึ่งจะไม่กระทบกับ กลุ่มของโหนดอื่นที่กำลังทำงานอยู่ในสถานะคงตัว (Steady State)

### 3.6 TABU-RCC [8]

โพรโทคอล TABU-RCC มีลักษณะการควบคุมแบบจตุรรวม ศูนย์ (Centralized) และมีการนำเทคนิค Tabu Search [9], [10] มาใช้ในการค้นหาสถานะ (State) ที่เหมาะสม ของแต่ละโหนด ซึ่งสถานะถูกแบ่งออกเป็น 3 โหมดคือ ทำงาน (Active) หลับ (Sleep) และหัวหน้ากลุ่ม (Cluster Head) ทุกโหนดภายในเครือข่ายต้องส่งค่าพลังงาน คงเหลือ (Residual Energy) ของตนเองไปให้สถานีฐาน เป็นระยะ เพื่อให้ปลายทางมีข้อมูลที่จะหาสถานะ เหมาะสมของแต่ละโหนดให้

ในแต่ละรอบการทำงาน สถานีฐานจะทำการค้นหา และเปลี่ยนแปลงค่าสถานะ (Search Movement) ของ

ทุกๆโหนดภายในเครือข่ายด้วยเทคนิค Tabu Search ภายในข้อจำกัด (Constraints) ทั้งหมดที่อัลกอริทึมได้ กำหนดไว้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ทำให้เครือข่ายมีการ ครอบคลุมเต็มพื้นที่ (Full-Covering) , แต่ละโหนดมีกลุ่ม ที่สามารถเข้าร่วมได้ และแต่ละหัวหน้ากลุ่มมีเส้นทาง (Path) เพื่อใช้ส่งข้อมูลไปถึงสถานีฐานได้

การค้นหาและเปลี่ยนแปลงค่าสถานะจะถูกทำต่อไปเรื่อยๆตามจำนวนรอบ (Iterations) ที่กำหนดไว้ เพื่อหา ค่าคะแนนที่น้อยที่สุด (Minimized Score Function) ซึ่ง คำนวณจากสมการ (5) โดยที่  $X_i$  จะเท่ากับ 1 ก็ต่อเมื่อ โหนด  $i$  มีสถานะเป็น Active,  $Y_i$  จะเท่ากับ 1 ก็ต่อเมื่อ โหนด  $i$  มีสถานะเป็น Cluster Head,  $E_{CH}$  และ  $E_{Active}$  คือ ค่าพลังงานโดยเฉลี่ยของโหนดที่มีสถานะเป็น Cluster Head และ Active ตามลำดับ ตัวแปร  $E_i$  คือค่าพลังงาน คงเหลือของโหนดนั้น ๆ

$$\sum_{i=1}^{|S|} Y_i \cdot \log\left(1 + \frac{E_{CH}}{E_i}\right) + (X_i - Y_i) \cdot \log\left(1 + \frac{E_{Active}}{E_i}\right) \quad (5)$$

เมื่อเสร็จสิ้นการค้นหาและเปลี่ยนแปลงค่าสถานะแล้ว สถานีฐานจะได้สถานะที่เหมาะสมของทุกโหนดภายใน เครือข่าย และทำการประกาศออกไปให้แต่ละโหนดทราบ ถึงสถานะในรอบต่อไปของตนเอง

## 4. ปัจจัยในการชี้วัดประสิทธิภาพของ อัลกอริทึม

วิธีการที่จะสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ อัลกอริทึมแต่ละแบบได้ มีปัจจัยต่างๆที่ควรพิจารณาถึง ดังนี้

### 4.1 ความคงอยู่ของเครือข่าย (Network Lifetime)

ความคงอยู่ของเครือข่ายมักถูกคำนวณออกมาในรูปแบบ ของรอบการทำงาน (Round) บางงานวิจัยมีมุมมองถึง

ความคงอยู่ของเครือข่ายว่าจะสิ้นสุดลงเมื่อมีโหนดเซ็นเซอร์พลังงานหมดลงอย่างน้อยหนึ่งโหนด แต่บางงานวิจัยกำหนดไว้ตรงกันข้ามกัน กล่าวคือความคงอยู่ของเครือข่ายจะมีอยู่จนกระทั่งทุกโหนดภายในเครือข่ายพลังงานหมดลง

## 4.2 จำนวนโหนดที่ยังมีชีวิตอยู่ (Alive Node)

เนื่องจากเซ็นเซอร์โหนดมีพลังงานอยู่อย่างจำกัด การรักษาความคงอยู่ของโหนดจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะชี้วัดว่าอัลกอริทึมมีกระบวนการทำงานที่มีประสิทธิภาพหรือไม่

## 4.3 พื้นที่ครอบคลุม (Coverage Area)

พื้นที่ครอบคลุมภายในเครือข่ายเป็นตัวชี้วัดถึงความสำเร็จของข้อมูลที่ตรวจจับได้โดยรวม แม้ว่าเครือข่ายจะมีจำนวนโหนดที่มีพลังงานเหลืออยู่ (Alive Node) เป็นจำนวนมาก แต่ถ้าโหนดทั้งหมดนั้นครอบคลุมพื้นที่ในเครือข่ายเพียงบางจุด ก็ถือว่าอัลกอริทึมดังกล่าวยังมีประสิทธิภาพในการบรรลุวัตถุประสงค์เครือข่ายไม่ดีพอ

## 4.4 การบริโภคพลังงาน (Energy Consumption)

การบริโภคพลังงานของโหนด สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

### 4.4.1 พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่ตรวจจับได้ (Energy for Data Communication)

พลังงานในส่วนนี้จะมีปริมาณที่มากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของข้อมูลที่ตรวจจับได้ (Sensing Data) ที่ถูกส่งออกไป รวมถึงระยะห่างระหว่างผู้รับ-ผู้ส่ง (Transmission Range)

### 4.4.2 พลังงานที่ใช้ในการควบคุม (Energy for Overhead)

พลังงานในส่วนนี้เกิดขึ้นจากการควบคุมของแต่ละโหนดภายในเครือข่ายให้สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างราบรื่น

อัลกอริทึมโดยส่วนใหญ่มีความแตกต่างในการบริโภคพลังงานในประเภทนี้เป็นหลัก ซึ่งอัลกอริทึมที่บริโภคพลังงานการควบคุม (Overhead Energy) ต่ำนั้น แสดงให้เห็นถึงการใช้พลังงานของแต่ละโหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 4.5 ความสามารถในการรองรับการเพิ่มขยายได้นอนาคต (Network Scalability)

อัลกอริทึมที่ดีต้องสามารถรองรับการปรับขยายขนาดของเครือข่ายในอนาคตได้ กล่าวคือไม่ว่าเครือข่ายจะมีขนาดหรือจำนวนโหนดเซ็นเซอร์เท่าใด ก็ยังสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพภายใต้อัลกอริทึมเดิม

## 5. ความท้าทายในการพัฒนาอัลกอริทึมของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่มุ่งพัฒนาและแก้ไขปัญหาในเรื่องของความคงอยู่ (Network Lifetime) รวมถึงด้านพื้นที่การครอบคลุม (Coverage Area) ถูกนำเสนอออกมาอย่างมากมาย อย่างไรก็ตาม ผู้เขียนมีความคิดเห็นว่ายังมีประเด็นในการวิจัยเกี่ยวกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายอีกมากมายที่ยังเป็นที่ถูกสนใจไม่มากเท่าที่ควร อีกทั้งยังมีปัญหาอีกมากมายที่ต้องการพัฒนาแก้ไข ผู้เขียนขอแบ่งประเด็นต่าง ๆ ออกเป็นข้อ ดังนี้

### 5.1 การวางสถานีฐานให้เหมาะสม (Optimal Sink Placement)

ตำแหน่งของสถานีฐานมีผลกระทบเกี่ยวกับการใช้พลังงานของโหนดภายในเครือข่ายเป็นอย่างมาก โหนดที่อยู่ระยะไกลจากสถานีฐานจะต้องใช้พลังงานในการส่งสูง ดังนั้นการหาตำแหน่งที่เหมาะสมให้กับสถานีฐานย่อมเป็นสิ่งช่วยให้เครือข่ายมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

มีงานวิจัยออกมาหลายงานได้แนะนำเกี่ยวกับการวางสถานีฐานให้เหมาะสม ทั้งการวางสถานีฐานหลายจุด



(Multiple-Sink Placement) [13], [14] และการวางเพียงหนึ่งสถานีฐาน (Single-Sink Placement) [15]

## 5.2 การวางโหนดอย่างเหมาะสม

### (Optimal Node Deployment)

ประเด็นการวางโหนดอย่างเหมาะสม ได้มีงานวิจัยหลายงานนำเสนออัลกอริทึมต่างๆ [16], [17], [18] มุมมองของประเด็นนี้มีอยู่หลากหลายมุมมองเช่น ควรวางโหนดอย่างไรให้พื้นที่ในแต่ละจุดมีโหนดครอบคลุมถึง จำนวน  $k$  โหนด (K-Coverage) [19], ควรวางโหนดอย่างไรให้ครอบคลุมเต็มพื้นที่ของเครือข่าย โดยใช้จำนวนโหนดน้อยที่สุด [20], ควรวางโหนดอย่างไรให้แต่ละโหนดมีการเชื่อมต่อถึงกัน (Connectivity) หรือจะต้องวางโหนดในแต่ละโซนอย่างไรให้มีปริมาณที่สอดคล้องกับภาระที่เกิดขึ้น

## 5.3 การจำลองอัลกอริทึม

### (Algorithm Simulation)

งานวิจัยในเรื่องเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายส่วนใหญ่ มีการทดสอบประสิทธิภาพอัลกอริทึมของตนเองด้วยวิธีจำลองเสมือนจริงผ่านคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation) ซึ่งจะไม่สามารถทดสอบกับสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้น หากอัลกอริทึมถูกนำไปใช้ในโลกความเป็นจริงได้

นอกจากนี้ โมเดลการตรวจจับ (Sensing Model) ซึ่งมักใช้โมเดล Binary Disc กล่าวคือพื้นที่ใดๆ จะถูกเซ็นเซอร์ตรวจจับได้ 100% หรือไม่ตรวจจับเลย (ค่า 0 และ 1) ซึ่งในความเป็นจริง การตรวจจับของเซ็นเซอร์ไร้สายย่อมมีประสิทธิภาพการตรวจจับที่ไม่เท่ากันในแต่ละระยะ

ด้วยเหตุนี้ การจำลองอัลกอริทึมในพื้นที่จริงจะทำให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการจำลองผ่านระบบคอมพิวเตอร์

## 5.4 การตรวจจับและซ่อมแซมพื้นที่ครอบคลุมที่เป็นช่องโหว่ (Coverage hole's detection and reparation)

เนื่องจากปัญหาด้านพื้นที่ครอบคลุม (Coverage Area) เป็นประเด็นที่ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง การตรวจจับและซ่อมแซมพื้นที่ครอบคลุมก็เป็นอีกหนึ่งประเด็นที่น่าสนใจ เพื่อให้เครือข่ายมีพื้นที่ครอบคลุมมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

แนวคิดที่จะแก้ปัญหาการเกิดช่องโหว่ของพื้นที่ตรวจจับถูกนำเสนอออกมาหลายวิธีการเช่น การกำหนดให้โหนดสามารถปรับเพิ่ม-ลดรัศมีการตรวจจับเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ในส่วนที่ขาดหายไป [21]-[23] หรือให้โหนดสามารถเคลื่อนย้าย (Mobility) เพื่อไปยังจุดที่ขาดการครอบคลุมได้ [24], [25]

## 5.5 พื้นที่ครอบคลุมแบบสามมิติ

### (Three-dimensional Coverage)

การทดลองส่วนใหญ่ในงานวิจัยปัจจุบัน เซ็นเซอร์ยังมีความสามารถในการตรวจจับด้วยมุมมองสองมิติ (2D Coverage) ซึ่งในความเป็นจริง มีโปรเจกต์บางส่วนที่จำเป็นต้องใช้งานเซ็นเซอร์ที่สามารถตรวจจับได้ในรูปแบบสามมิติ (3D Coverage) ทำให้งานวิจัยในปัจจุบันยังตอบโจทย์ของโปรเจกต์ด้านนี้ไม่ได้เท่าที่ควร มีงานวิจัยเช่น [26], [27] ได้นำเสนออัลกอริทึมของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ซึ่งใช้การคำนวณการตรวจจับของโหนดเป็นแบบสามมิติ

## 6. บทสรุป

การแบ่งกลุ่มของโหนดซึ่งเป็นเทคนิคที่สำคัญในการทำให้โหนดภายในเครือข่ายใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีอัลกอริทึมมากมายที่นำเสนอกลไกการติดต่อสื่อสารโดยใช้เทคนิคดังกล่าวร่วมด้วย การแบ่งกลุ่มของโหนดมีประเด็นรวมถึงมุมมองอยู่หลากหลาย กระบวนการในแต่ละ

ละอัลกอริทึมส่วนใหญ่ มักแตกต่างกันในส่วนของการเลือกหัวหน้ากลุ่ม และการกำหนดขนาดของกลุ่ม

อย่างไรก็ตาม ผู้เขียนได้อธิบายถึงมุมมองในการแบ่งกลุ่มรูปแบบต่างๆ ว่ามีผลกระทบที่จับต้องได้และไม่ได้อย่างไร และอธิบายถึงวัตถุประสงค์ในการพัฒนาอัลกอริทึมของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ซึ่งนอกจากการรักษาความคงอยู่ของเครือข่ายแล้ว ยังมีประเด็นปัญหาอีกหลายอย่างที่ต้องคำนึงถึงด้วย โดยสามารถสรุปประสิทธิภาพของแต่ละโปรโตคอลได้ดังนี้

**ตารางที่ 1.** ประสิทธิภาพของแต่ละโปรโตคอล

|           | Full-Covering | Energy Consumption | Scalability |
|-----------|---------------|--------------------|-------------|
| LEACH     | No            | Medium             | Yes         |
| LEACH-C   | No            | High               | No          |
| UCR       | No            | Medium             | Yes         |
| UCR (DSA) | No            | Low                | Yes         |
| SIC       | No            | High               | Yes         |
| TABU-RCC  | Yes           | High               | No          |

ผู้เขียนหวังว่าสิ่งที่นำเสนอมาทั้งหมดนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษา ค้นคว้า และวิจัยในหัวข้อเกี่ยวกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย รวมถึงเป็นตัวช่วยให้เกิดงานวิจัยใหม่ในอนาคตได้

## เอกสารอ้างอิง

[1] I.F. Akyildiz et al., “Wireless Sensor Networks: A survey”, Elsevier Sci. Computer Network, vol. 38, pp. 393-422, 2002.

[2] G. Fan et al., “Coverage- guaranteed Sensor Node Deployment Strategies for Wireless Sensor Networks”, Sensors, vol. 10, pp. 2064-2087, Mar. 2010

[3] W.B. Heinzelman. “Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks”, Ph. D. Thesis of Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2000.

[4] W. Heinzelman et al., “Energy- efficient communication protocols for wireless microsensor network”, Proceedings of the 33rd Hawaiian International Conference on Systems Science, Jan. 2000.

[5] G. Chen, “An Unequal Cluster-based Routing Protocol in Wireless Sensor Networks”, Wireless Networks, vol. 15, pp. 193-207, Feb. 2009.

[6] ชานฤฤทธิ์ ด่านรัชดากร, ปิยะณัฐ พิงษ์อ้วน และ โชติพัชร วรรณวลัย. “การเลือกหัวหน้ากลุ่มสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อเพิ่มคุณภาพการบริการ”. การประชุมวิชาการระดับประเทศด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ, หน้า 218-223, 2556.

[7] C.T. Cheng et al. “A Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks Based on Social Insect Colonies”, IEEE Sensors Journal, vol. 11, no. 3, pp. 711-721, March. 2011.

[8] A. Chamum and S. Pierre, “On the Planning of Wireless Sensor Networks: Energy- Efficient Clustering under the Joint Routing and Coverage Constraint”, IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 8, pp. 1077-1086, 2009.

[9] F. Glover, “Tabu Search Part I”, ORSA Journal on Computing, pp. 190-206, 1989.

[10] F. Glover, “Tabu Search Part II”, ORSA Journal on Computing, pp. 4-32, 1990.

[11] S. Hee Choi et al., “A Weight-Based Unequal Clustering Routing Protocol in Wireless Sensor Network”, Information and Communication Technology for the Muslim World ( ICT4M), pp. D7-D12, Dec. 2010.

- [12] M. M. Afsar and M. Younis, "An Energy- And Proximity-based Unequal Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks", 39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, Edmonton, Canada, pp. 262-269, 2014.
- [13] R. D. Deepak and P. R. Deshmukh, "Energy Balancing Multiple Sink Optimal Deployment in Multi-Hop Wireless Sensor Networks", the 3rd IEEE International Advance Computing Conference, pp. 408-412, 2013.
- [14] D. Debasree et al., "Multiple-Sink Placement Strategies in Wireless Sensor Networks", The 5th on Communication Systems and Networks, pp. 1-7, Jan. 2013.
- [15] C. Fengchao and L. Ronglin, "Single Sink Node Placement strategy in Wireless Sensor Networks", Electric Information and Control Engineering, pp. 1700-1703, Mar. 2011.
- [16] J. Harada et al., "Path coverage property of randomly deployed sensor networks with finite communication ranges". In: IEEE international conference on communications, ICC' 08; pp. 2221-2227, 2008.
- [17] S. Kumar et al. "Barrier coverage with wireless sensors". Wireless Networks, pp. 817-834. 2007.
- [18] S. Ram et al., "On the path coverage properties of random sensor networks", IEEE Transactions on Mobile Computing, pp. 494-506, 2007.
- [19] C-F. Huang and Y-C. Tseng, "The Coverage Problem in a Wireless Sensor Network", Mobile Networks and Application, pp. 519-528, 2005.
- [20] Y. Yourim and K. Yong-Hyuk "An Efficient Genetic Algorithm for Maximum Coverage Deployment in Wireless Sensor Networks", IEEE Transactions on Cybernetics, pp. 1-11, 2013.
- [21] W. Cheng et al. "Sweep coverage with mobile sensors", IEEE international symposium on parallel and distributed processing, pp. 1-9, IPDPS 2008.
- [22] B. Lui et al., "Mobility improves coverage of sensor networks", In: Proceedings of the 6th ACM international symposium on mobile ad hoc networking and computing, ser. MobiHoc' 05. Net York, NY, USA: ACM; pp. 300-308. 2005.
- [23] C. Jian et al., "Coverage-Enhancing Algorithm Based on Overlap- Sense Ratio in Wireless Multimedia Sensor Networks", IEEE Sensors Journal, vol. 13, no. 6, pp. 2077-2083, Jun. 2013.
- [24] M. Cardei et al., "Energy- efficient target coverage in wireless sensor networks. " In: INFOCOM 24th annual joint conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE, vol. 3, pp. 1976-1984, Mar. 2005.
- [25] M. Cardei et al. "Maximum network lifetime in wireless sensor networks with adjustable sensing ranges. " In: IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communication, vol. 3, pp. 438-445, Aug. 2005.
- [26] W. Yun et al. "Partial Sensing Coverage in 3D Wireless Lattice Sensor Networks", IEEE ICC Ad- hoc and Sensor Networking Symposium, pp. 1-6, 2014.
- [27] O. Sema et al., "3D Coverage Analysis under Heterogeneous Deployment Strategies in Wireless Sensor Networks", The 4th Advance International Conference on Telecommunications, pp. 199-204, 2008.