



Development and Performance Evaluation of a Smart Fire Alarm System via LoRa Long-Range Communication Technology

Sonexay SOMOULA¹, Khamphong KHONGSOMBOON², Xaysamone DITTAPHONG³,
Phutsavanh THONGPHANH⁴, Souksamai INSANKEOVILAY⁵
and Tick SENGTHIPPHANY⁶

¹⁻⁶Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, National
University of Laos.

Abstract

¹**Correspondence:** Sonexay
SOMOULA, Department of
Electronics and Telecommunication
Engineering, Faculty of Engineering,
National University of Laos., Email:
aiyktis2211@gmail.com

Article Info:
Submitted: April 20, 2026
Revised: June 08, 2026
Accepted: June 26, 2026

In this Research is focused on Evaluation of performance and development of the Intelligent Fire Alarm System by Using LoRa Long-Range Communication Technology, the Indoor fires are serious disasters causing significant loss of life and property. The traditional wired fire alarm systems have limitations due to high installation and maintenance costs. Especially in the large buildings. While traditional wireless systems often suffer from signal attenuation due to thick building walls. This system aims to design and develop the intelligent fire alarm system by using LoRa (long-range) communication technology. And the research is focused on the low power consumption and long-range transmission, and the system is developed by using an Arduino microcontroller connected to an MQ-2 smoke sensor and a flame sensor, and real-time transmitted data via to a gateway and mobile application. The methodology is evaluated the received signal strength Indicator (RSSI) and response time in two different environments such us: at indoor environment with the obstructions and an open outdoor area.

The Experimental results are shown the high system stability with an average RSSI for indoor environment is -78.52 dBm and in the outdoor area is -66.43 dBm, and the packet loss is 0%. Furthermore, the average time response is measured at 39.07 milliseconds. The LoRa technology is suitable for building safety systems. The system can be provided a practical alternative to traditional wired infrastructure, reducing installation costs and accelerating emergency response.

Keywords: Fire Alarm System, LoRa Technology, Wireless Sensor Networks, RSSI, Response Time.

1. ພາກສະໜີ

ອັກຄີໄຟເປັນໄພພິບັດທີ່ສ້າງຄວາມເສຍຫາຍຢ່າງຫຼວງຫຼາຍຕໍ່ຊີວິດ ແລະ ຊັບສິນ ເຊິ່ງມັກເກີດຂຶ້ນໂດຍບໍ່ຄາດຄິດ ແລະ ລູກລາມຢ່າງວ່ອງໄວ (Bayoumi et al., 2013). ໃນປັດຈຸບັນ, ລະບົບແຈ້ງເຕືອນໄພອັກຄີໄຟສ່ວນໃຫຍ່ຍັງອາໄສການເຊື່ອມຕໍ່ແບບມີສາຍ ເຊິ່ງມີຂໍ້ຈຳກັດດ້ານຄ່າໃຊ້ຈ່າຍໃນການຕິດຕັ້ງທີ່ສູງ ແລະ ຄວາມຍຸ້ງຍາກໃນການບຳລຸງຮັກສາ, ໂດຍສະເພາະໃນອາຄານເກົ່າ ຫຼື ພື້ນທີ່ກວ້າງຂວາງ (ສະຖາບັນຄົ້ນຄວ້າ, 2022). ເຖິງວ່າຈະມີການນຳໃຊ້ລະບົບບໍ່ມີສາຍແບບ Wi-Fi ຫຼື Bluetooth, ແຕ່ເຕັກໂນໂລຊີເຫຼົ່ານີ້ຍັງປະສົບບັນຫາດ້ານໄລຍະທາງການສົ່ງສັນຍານທີ່ໄກ, ມີຄວາມອ່ອນໄຫວຕໍ່ສິ່ງກົດຂວາງ ແລະ ທີ່ສຳຄັນແມ່ນການສົ່ງເບື້ອງຜະລັງງານສູງ ເຊິ່ງບໍ່ຕອບໂຈດສຳລັບອຸປະກອນເຊັ່ນເຊີທີ່ຕ້ອງເຮັດວຽກດ້ວຍແບັດເຕີຣີເປັນເວລາດົນ (Jones, 2019; Lee & Su, 2017).

ເພື່ອແກ້ໄຂບັນຫາດັ່ງກ່າວ, ເຕັກໂນໂລຊີ LoRa (Long Range) ຈຶ່ງໄດ້ກາຍມາເປັນທາງເລືອກໃໝ່ທີ່ມີປະສິດທິພາບສູງ (Semtech Corporation, 2019). LoRa ແມ່ນເຕັກໂນໂລຊີການສື່ສານແບບບໍ່ມີສາຍໃນຍ່ານຄວາມຖີ່ຕ່ຳ ທີ່ເຮັດວຽກພາຍໃຕ້ໂຄງສ້າງ LPWAN (Low Power Wide Area Network) ເຊິ່ງມີຄຸນສົມບັດເດັ່ນໃນການສົ່ງຂໍ້ມູນໄດ້ໄລຍະໄກຫຼາຍກິໂລແມັດ ແລະ ມີຄວາມສາມາດໃນການທະລຸທະລົງສິ່ງກົດຂວາງໄດ້ດີກວ່າເຕັກໂນໂລຊີອື່ນ (Mekonnen et al., 2021; Paul, 2020). ດ້ວຍການໃຊ້ຜະລັງງານທີ່ຕ່ຳຫຼາຍ, ມັນຈຶ່ງເໝາະສົມຢ່າງຍິ່ງສຳລັບການນຳໃຊ້ໃນລະບົບ IoT ທີ່ຕ້ອງການຄວາມສະຖຽນ ແລະ ຄວາມທົນທານຂອງອຸປະກອນ (Kumar et al., 2018; Parmanee et al., 2024).

ການຄົ້ນຄວ້ານີ້ຈຶ່ງມີຄວາມສຳຄັນໃນການພັດທະນາລະບົບເຕັກໂນໂລຊີອັກຄີໄຟ ທີ່ນຳໃຊ້ເຊັ່ນເຊີກວດຈັບຄວັນໄຟ ແລະ ຄວາມອ່ອນ (Ding et al., 2014). ລະບົບທີ່ພັດທະນາຂຶ້ນຈະຊ່ວຍເພີ່ມຄວາມໄວ

ໃນການຕອບໂຕ້ເຫດການໄພພິບັດ ໂດຍການສົມທົບລະບົບກວດຈັບເຂົ້າກັບໂຄງສ້າງເຄືອຂ່າຍ LoRa ທີ່ສາມາດສົ່ງສັນຍານເຕືອນໄພໄດ້ທັນທີ ໂດຍຜ່ານການທົດສອບ ແລະ ວິເຄາະປະສິດທິພາບຂອງຊ່ອງສັນຍານໃນສະພາບແວດລ້ອມຈິງທີ່ມີສິ່ງກົດຂວາງຊັບຊ້ອນ (Hidayat, 2018; Chun-yuan, 2011; Li et al., 2020).

ດັ່ງນັ້ນ, ການສຶກສານີ້ຈຶ່ງມີຈຸດປະສົງຫຼັກທີ່ກຳນົດໄວ້ຢ່າງຊັດເຈນ 3 ປະການ ດັ່ງນີ້: 1) ເພື່ອອອກແບບ ແລະ ພັດທະນາລະບົບແຈ້ງເຕືອນໄພອັກຄີໄຟອັດສະລິຍະ ບົນພື້ນຖານເຄືອຂ່າຍການສື່ສານໄຮ້ສາຍ LoRa ທີ່ຮ່ວມກັບລະບົບເຊັນເຊີກວດຈັບແບບ Logic. 2) ເພື່ອທົດສອບ ແລະ ວິເຄາະປະສິດທິພາບການຮັບ-ສົ່ງສັນຍານ (RSSI) ຂອງເຕັກໂນໂລຊີ LoRa ໃນສະພາບແວດລ້ອມພາຍໃນ ແລະ ພາຍນອກອາຄານທີ່ມີສິ່ງກົດຂວາງ ແລະ 3) ເພື່ອປະເມີນໄລຍະເວລາການຕອບສະໜອງ ແລະ ຄວາມໜ້າເຊື່ອຖື ຂອງລະບົບໃນການສົ່ງຂໍ້ມູນແຈ້ງເຕືອນແບບ Real-time ເພື່ອເປັນແນວທາງໃນການຍົກລະດັບມາດຕະຖານຄວາມປອດໄພໃນອາຄານ.

2. ອຸປະກອນ ແລະ ວິທີການ

2.1 ອຸປະກອນທີ່ນຳໃຊ້

ໃນການວິໄຈ ແລະ ພັດທະນາລະບົບແຈ້ງເຕືອນໄພອັກຄີໄຟອັດສະລິຍະໃນຄັ້ງນີ້, ໄດ້ແຍກໂຄງສ້າງອຸປະກອນອອກເປັນ 2 ພາກສ່ວນຫຼັກ ເພື່ອໃຫ້ເຫັນຄວາມແຕກຕ່າງລະຫວ່າງ "ອຸປະກອນທີ່ພັດທະນາຂຶ້ນໃໝ່" ແລະ "ເຄື່ອງມືທີ່ໃຊ້ໃນການວິໄຈວັດແທກຜົນ" ດັ່ງນີ້:

1. ອຸປະກອນຊຸດຕົ້ນແບບທີ່ພັດທະນາຂຶ້ນໃໝ່: ແມ່ນຊຸດອຸປະກອນຮາດແວທີ່ໄດ້ທຳການອອກແບບ, ປະກອບ ແລະ ເຊື່ອມຕໍ່ວົງຈອນຂຶ້ນມາເອງເພື່ອເປັນນະວັດຕະກຳຕົ້ນແບບ. ອຸປະກອນຫຼັກປະກອບມີ ບອດປະມວນຜົນ Arduino Mega 2560 (Arduino, 2015) ເຊິ່ງເຮັດໜ້າທີ່ເປັນສູນກາງໃນການຮັບ-ສົ່ງຂໍ້ມູນ ແລະ ຄວບຄຸມການເຮັດວຽກຂອງຊຸດເຊັນເຊີກວດຈັບແບບປະສົມປະສານ ທີ່ປະກອບຂຶ້ນຈາກເຊັນເຊີ MQ-2 ສຳລັບກວດຈັບຄວັນໄຟ ແລະ ເຊັນເຊີ Flame Sensor ສຳລັບກວດຈັບແປວໄຟ (Ding et al., 2014). ສຳລັບລະບົບການສື່ສານ, ໄດ້ນຳໃຊ້ໂມດູນ LoRa Shield ທີ່ເຮັດວຽກໃນຢ່ານຄວາມຖີ່ 433 MHz (Dragino, 2020) ມາຕິດຕັ້ງຮ່ວມກັບບອດປະມວນຜົນເພື່ອສ້າງເປັນບລັອກອຸປະກອນປາຍທາງ ແລະ ບລັອກຮັບສັນຍານສູນກາງ ທີ່ເຮັດວຽກຮ່ວມກັນຜ່ານ Logic ທີ່ຂຽນຂຶ້ນໃໝ່ດ້ວຍຊອບແວ Arduino IDE. ລາຍລະອຽດ ແລະ ຄຸນລັກສະນະທາງເຕັກນິກຂອງອຸປະກອນຕົ້ນແບບທັງໝົດ ແມ່ນໄດ້ສະແດງໄວ້ໃນ ຕາຕະລາງທີ 1.

2. ເຄື່ອງມືທີ່ໃຊ້ໃນການວິໄຈ ແລະ ວັດແທກປະສິດທິພາບ: ແມ່ນສ່ວນຂອງເຄື່ອງມືມາດຕະຖານທີ່ນຳໃຊ້ເຂົ້າໃນຂະບວນການວິໄຈເພື່ອເກັບກຳຂໍ້ມູນ ແລະ ພິສູດຜົນການທົດລອງ. ນຳໃຊ້ ໂປຣແກຣມ QMeter ເຊິ່ງເປັນຊອບແວວິເຄາະເຄືອຂ່າຍໃນການວັດແທກ ແລະ ວິເຄາະຄຸນນະພາບຂອງສັນຍານໃນເຄືອຂ່າຍໂທລະຄົມມະນາຄົມ (Aburas & K.-M., 2011) ເພື່ອດຶງຄ່າຕົວປ່ຽນທາງສະຖິຕິ ເປັນຕົ້ນ ແມ່ນ ຄ່າຄວາມແຮງສັນຍານ, ຄ່າສັນຍານລົບກວນ (SNR) ແລະ

ອັດຕາການສູນເສຍຊຸດຂໍ້ມູນ ມາທຳການວິໄຈຫາຂີດຈຳກັດຂອງລະບົບຕົ້ນແບບທີ່ສ້າງຂຶ້ນ.

2.2 ການອອກແບບລະບົບ

ການອອກແບບໂຄງສ້າງຂອງລະບົບແຈ້ງເຕືອນໄພອັກຄີໄຟອັດສະລິຍະນີ້ ແມ່ນອີງໃສ່ຫຼັກການຂອງເຄືອຂ່າຍເຊັນເຊີໄຮ້ສາຍ (Wireless Sensor Networks: WSN) ທີ່ເນັ້ນການເຮັດວຽກແບບປະສານງານກັນລະຫວ່າງອຸປະກອນປາຍທາງ ແລະ ສູນກາງຮັບ-ສົ່ງຂໍ້ມູນ. ລະບົບຖືກແບ່ງອອກເປັນ 2 ພາກສ່ວນຫຼັກ ຄື:

1. ພາກສ່ວນ Node ສົ່ງສັນຍານ: ໃນສ່ວນນີ້ເຮັດໜ້າທີ່ເປັນ "ໜ່ວຍເຝົ້າລະວັງ" ທີ່ຕິດຕັ້ງໄວ້ຕາມຈຸດຕ່າງໆພາຍໃນອາຄານ. ອົງປະກອບຫຼັກປະກອບດ້ວຍ ເຊັນເຊີ MQ-2 ສຳລັບກວດຈັບອະນຸພາກຂອງຄວັນໄຟ ແລະ ເຊັນເຊີ Infrared ສຳລັບກວດຈັບລັງສີຄວາມຮ້ອນຈາກແປວໄຟ. ຂໍ້ມູນຈາກເຊັນເຊີທັງສອງຈະຖືກປະມວນຜົນເບື້ອງຕົ້ນດ້ວຍໂມໂຄຣຄອນໂທຣເລີ ເພື່ອຄັດກອງສັນຍານລົບກວນ. ເມື່ອພົບເງື່ອນໄຂທີ່ກົງກັບສະພາວະການເກີດອັກຄີໄຟ ຂໍ້ມູນຈະຖືກເຂົ້າລະຫັດ ແລະ ສົ່ງອອກຜ່ານຄື້ນວິທະຍຸ LoRa ໃນຢ່ານຄວາມຖີ່ 433 MHz ເຊິ່ງມີຈຸດເດັ່ນໃນການສົ່ງສັນຍານໄດ້ໄລຍະໄກ ແລະ ສາມາດທະລຸທະລ່ວງສິ່ງກົດຂວາງໄດ້ດີກວ່າເຕັກໂນໂລຊີໄຮ້ສາຍອື່ນໆ (Li et al., 2020). ລາຍລະອຽດແຜນຜັງໂຄງສ້າງການເຊື່ອມຕໍ່ທັງໝົດແມ່ນໄດ້ສະແດງໄວ້ໃນ ຮູບທີ 1.

2. ພາກສ່ວນຮັບສັນຍານ ແລະ ແຈ້ງເຕືອນ: ເຮັດໜ້າທີ່ເປັນ "ສູນກາງການຈັດການ" ທີ່ລໍຮັບຂໍ້ມູນຈາກ End Node ຫຼາຍໆຈຸດ. ເມື່ອ Gateway ໄດ້ຮັບຂໍ້ມູນ, ມັນຈະທຳການຖອດລະຫັດ ແລະ ກວດສອບຄວາມຖືກຕ້ອງຂອງຂໍ້ມູນ. ຈາກນັ້ນ, ລະບົບຈະເຮັດການຕັດສິນໃຈຜ່ານເງື່ອນໄຂທາງເຕັກນິກສາດ ທີ່ໄດ້ກຳນົດໄວ້ ເຊັ່ນ: ການກວດສອບຄ່າ Threshold ຂອງຄວັນໄຟ ແລະ ແປວໄຟໄປພ້ອມໆກັນ ເພື່ອຫຼຸດຜ່ອນບັນຫາການແຈ້ງເຕືອນຜິດພາດ ທີ່ອາດເກີດຈາກຄວັນຢາສູບຫຼື ແສງສະຫວ່າງລົບກວນ. ຜົນການຕັດສິນໃຈຈະຖືກແຈ້ງເຕືອນຜ່ານ 2 ຊ່ອງທາງຄື: ສັນຍານສຽງ ຢູ່ສະຖານທີ່ຈິງ ແລະ ການແຈ້ງເຕືອນຜ່ານລະບົບຄລາວ ໄປຍັງແອັບພລິເຄຊັນເທິງມືຖື ເພື່ອໃຫ້ຜູ້ຮັບຜິດຊອບສາມາດຕິດຕາມສະຖານະໄດ້ຕະຫຼອດ 24 ຊົ່ວໂມງ. ຜັງການໄຫຼຂອງຂໍ້ມູນ ແລະ ຂະບວນການຕັດສິນໃຈຂອງຊອບແວ ແມ່ນໄດ້ລະບຸໄວ້ໃນ ຮູບທີ 2.

2.3 ວິທີການດຳເນີນງານ

ໃນການສຶກສາຄັ້ງນີ້, ວິທີການດຳເນີນງານໄດ້ເນັ້ນໃສ່ການທົດສອບຄຸນນະພາບຂອງຊ່ອງສັນຍານ ໂດຍໃຊ້ເຕັກນິກການແຜ່ກະຈາຍສັນຍານແບບ Spread Spectrum ຂອງ LoRa. ເພື່ອວິເຄາະຫາຄ່າການສູນເສຍສັນຍານໃນໄລຍະທາງຕ່າງໆ, ໄດ້ນຳໃຊ້ສົມຜົນການແຜ່ກະຈາຍສັນຍານໃນພື້ນທີ່ວ່າງ ດັ່ງນີ້:

$$L = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) \quad (1)$$

ໂດຍທີ່:

- L ແມ່ນ ຄ່າການສູນເສຍສັນຍານໃນພື້ນທີ່ວາງ (dB).
- d ແມ່ນ ໄລຍະທາງລະຫວ່າງຕົວສົ່ງ ແລະ ຕົວຮັບ (m).
- f ແມ່ນ ຄວາມຖີ່ຂອງສັນຍານທີ່ນຳໃຊ້ (433 MHz).
- c ແມ່ນ ຄວາມໄວຂອງຄື້ນເອເລັກໂຕຣແມັກເນຕິກ ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

ຂັ້ນຕອນການທົດລອງໄດ້ເລີ່ມຈາກການກຳນົດຈຸດຕິດຕັ້ງ

Gateway ໄວ້ຄົງທີ່ ແລະ ເຄື່ອນຍ້າຍ End Node ໄປຕາມໄລຍະທາງ ແລະ ຈຸດຕ່າງໆທີ່ກຳນົດໄວ້ ເພື່ອວັດແທກຄ່າຄວາມແຮງສັນຍານ ແລະ ອັດຕາການສົ່ງຂໍ້ມູນສຳເລັດ (Mekonnen et al., 2021).

2.4 ການເກັບກຳຂໍ້ມູນ

ຂະບວນການເກັບກຳຂໍ້ມູນໄດ້ຖືກດຳເນີນໃນສອງຮູບແບບ ສະພາບແວດລ້ອມເພື່ອໃຫ້ເຫັນເຖິງຄວາມແຕກຕ່າງຂອງການແຜ່ກະຈາຍສັນຍານ. ການທົດສອບຄັ້ງທຳອິດແມ່ນຈັດຂຶ້ນໃນພື້ນທີ່ປິດຜາໃນອາຄານທີ່ມີສິ່ງກົດຂວາງເປັນຜາຄອນກຣີດ ແລະ ເສົາອາຄານ, ສ່ວນການທົດສອບຄັ້ງທີສອງແມ່ນຈັດຂຶ້ນໃນພື້ນທີ່ເປີດ ເພື່ອວັດແທກໄລຍະທາງສູງສຸດທີ່ສັນຍານສາມາດສົ່ງເຖິງໄດ້ (Mekonnen et al., 2021). ລາຍລະອຽດຂອງສະພາບແວດລ້ອມ ແລະ ຕົວປ່ຽນທີ່ໃຊ້ໃນການວັດແທກແມ່ນໄດ້ລະບຸໄວ້ໃນ ຕາຕະລາງທີ 2.

ນອກຈາກນີ້, ແຜນຜັງຈຸດຕິດຕັ້ງອຸປະກອນ ແລະ ໄລຍະທາງຂອງການວັດແທກໃນສະຖານທີ່ຈິງ ໄດ້ສະແດງໄວ້ໃນ ຮູບທີ 3, ເພື່ອໃຫ້ເຫັນພາບລວມຂອງການທົດລອງ.

2.5 ການວິເຄາະຂໍ້ມູນ

ຂໍ້ມູນທີ່ໄດ້ຈາກການເກັບກຳທັງໝົດຈະຖືກນຳມາປະມວນຜົນ ແລະ ວິເຄາະຕາມແຕ່ລະຈຸດປະສົງຂອງການສຶກສາ ໂດຍນຳໃຊ້ວິທີການທາງສະຖິຕິ ແລະ ເຄື່ອງມືວິເຄາະເຄືອຂ່າຍດັ່ງນີ້:

1. ການວິເຄາະຄວາມແຮງສັນຍານ: ຂໍ້ມູນຄ່າ RSSI ທີ່ເກັບໄດ້ຈາກແຕ່ລະໄລຍະທາງ ຈະຖືກນຳມາຫາຄ່າສະເລ່ຍ ເພື່ອປຽບທຽບກັບຄ່າທົດສະດີຈາກສົມຜົນ Free Space Path Loss ເພື່ອເບິ່ງອັດຕາການຫຼຸດລົງຂອງສັນຍານເມື່ອມີສິ່ງກົດຂວາງທີ່ແຕກຕ່າງກັນ. ນຳໃຊ້ການຫາຄ່າສະເລ່ຍຂອງ RSSI ເພື່ອຫາຄວາມສະຖຽນຂອງສັນຍານໃນແຕ່ລະຈຸດ, ໂດຍມີສູດຄິດໄລ່ຄ່າສະເລ່ຍເລກຄະນິດ ($\bar{x}$) ດັ່ງນີ້:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2)$$

ໂດຍທີ່

- x_i ແມ່ນຄ່າ RSSI ທີ່ວັດແທກໄດ້ໃນແຕ່ລະຄັ້ງ
 - n ແມ່ນຈຳນວນຄັ້ງທີ່ທົດສອບ.
2. ການວິເຄາະຄວາມສະຖຽນຂອງເຄືອຂ່າຍ: ວິເຄາະຄ່າ Packet Loss Rate ໂດຍຄິດໄລ່ເປັນເປີເຊັນ (%) ຂອງຈຳນວນຊຸດຂໍ້ມູນທີ່ຮັບໄດ້ຕົວຈິງ ທຽບກັບຈຳນວນຊຸດຂໍ້ມູນທີ່ສົ່ງອອກທັງໝົດ ເພື່ອປະເມີນຄວາມເຊື່ອໝັ້ນຂອງລະບົບໃນການແຈ້ງເຕືອນໄພ. ໂດຍໃຊ້ສົມຜົນ:

$$\text{PacketLoss}(\%) = \left(\frac{P_{\text{sent}} - P_{\text{received}}}{P_{\text{sent}}} \right) \times 100 \quad (3)$$

ໂດຍທີ່

- P_{sent} ແມ່ນຈຳນວນຊຸດຂໍ້ມູນທີ່ສົ່ງອອກ
- P_{received} ແມ່ນຈຳນວນຊຸດຂໍ້ມູນທີ່ Gateway ຮັບໄດ້ຕົວຈິງ.

3. ການວິເຄາະໄລຍະເວລາການຕອບສະໜອງ: ນຳເອົາຄ່າ Response Time ທີ່ວັດແທກໄດ້ຈາກການກວດຈັບຂອງເຊັ່ນເຊີ ຈົນເຖິງການສະແດງຜົນຢູ່ Gateway ມາຫາຄ່າຜ່ານປ່ຽນມາດຕະຖານ ເພື່ອຍັງຢືນຄວາມສະຖຽນຂອງເວລາໃນການແຈ້ງເຕືອນແບບ Real-time.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4)$$

- ຄ່າ SD ທີ່ຕ່ຳ ຈະບົ່ງບອກເຖິງຄວາມສະຖຽນຂອງລະບົບໃນການຕອບສະໜອງແບບ Real-time.

ຜົນການວິເຄາະທັງໝົດຈະຖືກນຳສະເໜີໃນຮູບແບບຂອງ

ຕາຕະລາງປຽບທຽບ ແລະ ກອບ. ລາຍລະອຽດຂອງຕົວປ່ຽນ ແລະ ສູດການຄິດໄລ່ສະຖິຕິພື້ນຖານ ແມ່ນໄດ້ລະບຸໄວ້ໃນ ຕາຕະລາງທີ 3.

3. ຜົນໄດ້ຮັບ

3.1 ຜົນການພັດທະນາລະບົບ ແລະ ການທົດສອບເບື້ອງຕົ້ນ

ຈາກການອອກແບບ ແລະ ຕິດຕັ້ງລະບົບແຈ້ງເຕືອນໄພອັກຄີໄຟອັດສະລິຍະ ພົບວ່າລະບົບສາມາດກວດຈັບຄວັນໄຟ ແລະ ແປວໄຟໄດ້ຢ່າງຊັດເຈນ. ເມື່ອເຊັ່ນເຊີ MQ-2 ຫຼື Flame Sensor ກວດພົບຄວາມຜິດປົກກະຕິ, ບອດ Arduino ຈະປະມວນຜົນ ແລະ ສົ່ງຄຳສັ່ງຜ່ານ LoRa Shield ໄປຍັງ Gateway ເພື່ອແຈ້ງເຕືອນຜ່ານລະບົບສຽງ ແລະ ແອັບພລິເຄຊັນ Blynk ໄດ້ຢ່າງມີປະສິດທິພາບ. ລັກສະນະການຕິດຕັ້ງອຸປະກອນ ແລະ ສ່ວນຕິດຕໍ່ຜູ້ໃຊ້ ແມ່ນໄດ້ສະແດງໃນ ຮູບທີ 4.

3.2 ຜົນການທົດສອບປະສິດທິພາບການຮັບ-ສົ່ງສັນຍານ

ຜົນການວັດແທກຄວາມແຮງສັນຍານ ໃນສອງສະພາບແວດລ້ອມທີ່ແຕກຕ່າງກັນ ພົບວ່າ LoRa ມີຄວາມສາມາດໃນການທະລຸທະລ່ວງສິ່ງກົດຂວາງໄດ້ດີ, ເຊິ່ງຜົນການທົດສອບສະເລ່ຍໄດ້ສະແດງໄວ້ໃນຕາຕະລາງທີ 4. ຈາກການວິເຄາະພົບວ່າ:

1. ພື້ນທີ່ປິດ: ໃນເນື້ອທີ່ $1,032 \text{ m}^2$ ທີ່ມີຜາຄອນກຣີດກົດຂວາງ, ຄ່າ RSSI ສະເລ່ຍແມ່ນ -78.52 dBm . ເຖິງວ່າສັນຍານຈະມີການຫຼຸດລົງຕາມໄລຍະທາງ ແລະ ສິ່ງກົດຂວາງ, ແຕ່ລະບົບຍັງສາມາດສົ່ງຂໍ້ມູນແຈ້ງເຕືອນໄດ້ 100% ໂດຍບໍ່ມີການສູນເສຍຊຸດຂໍ້ມູນ.

2. ພື້ນທີ່ເປີດ: ໃນເນື້ອທີ່ $2,500 \text{ m}^2$, ຄ່າ RSSI ສະເລ່ຍແມ່ນ -66.43 dBm ເຊິ່ງສະແດງໃຫ້ເຫັນເຖິງຄວາມແຮງສັນຍານທີ່ສູງກວ່າເນື່ອງຈາກບໍ່ມີສິ່ງກົດຂວາງທີ່ໜ້າແໜ້ນ.

3.3 ຜົນການວິເຄາະໄລຍະເວລາການຕອບສະໜອງ

ໄລຍະເວລາໃນການຕອບສະໜອງ ຫຼື ຄ່າຄວາມໜ່ວງ ຖືເປັນ ປັດໄຈຊີ້ວັດທີ່ສໍາຄັນທີ່ສຸດໃນການອອກແບບລະບົບແຈ້ງເຕືອນໄພອັກຄີ ໄຟ ເພາະທຸກວິນາທີມີຜົນຕໍ່ການຮັກສາຊີວິດ ແລະ ຊັບສິນ. ຈາກການ ທົດລອງສິ່ງສັນຍານແຈ້ງເຕືອນຈໍານວນ 100 ຄັ້ງ ພາຍໃຕ້ສະພາບແວດ ລ້ອມທີ່ມີສິ່ງກົດຂວາງ, ຜົບວ່າໄລຍະເວລາສະເລ່ຍທີ່ Gateway ສາມາດ ຮັບສັນຍານໄດ້ແມ່ນ 39.07 ms. ເມື່ອວິເຄາະລົງເລິກໃນແຕ່ລະຊ່ວງ ການທົດສອບ ຜົບວ່າ:

1. ຄວາມສະຖຽນຂອງເວລາ: ຄ່າ Response Time ມີ ຄວາມຜັນຜວນຕໍ່າຫຼາຍ ເຊິ່ງໝາຍຄວາມວ່າລະບົບສາມາດຮັກສາຄວາມ ໄວໃນການສົ່ງຂໍ້ມູນໄດ້ຢ່າງຄົງທີ່ ບໍ່ວ່າຈະຢູ່ໃນໄລຍະທາງໃກ້ ຫຼື ໄກ (ພາຍໃນຂອບເຂດການທົດສອບ).

2. ປະສິດທິພາບການປະມວນຜົນ: ເວລາ 39.07 ms ນີ້ ແມ່ນລວມເອົາທັງຂະບວນການອ່ານຄ່າຈາກເຊັນເຊີ, ການແປງສັນຍານ ໂດຍ Arduino, ການເຂົ້າລະຫັດຂໍ້ມູນຂອງ LoRa, ແລະ ການຖອດ ລະຫັດຂໍ້ມູນຢູ່ຝັ່ງ Gateway.

3. ການປຽບທຽບກັບມາດຕະຖານ: ໄລຍະເວລາດັ່ງກ່າວຖືວ່າ ຢູ່ໃນເກນ "ດີເລີດ" ສໍາລັບລະບົບແຈ້ງເຕືອນໄພໄຮ້ສາຍ ເພາະມັນໄວ ກວ່າການຕອບສະໜອງຂອງມະນຸດ ແລະ ໄວກວ່າເກນມາດຕະຖານທົ່ວ ໄປຂອງລະບົບ IoT ທີ່ອະນຸຍາດໃຫ້ມີຄວາມໜ່ວງໄດ້ເຖິງ 1,000 ms.

ຜົນໄດ້ຮັບນີ້ຍັງຢືນຢັນວ່າ ໂຄງສ້າງເຄືອຂ່າຍ LoRa ທີ່ໄດ້ ພັດທະນາຂຶ້ນ ສາມາດຕອບໂຈດດ້ານຄວາມໄວໃນການແຈ້ງເຕືອນ ໄດ້ ຢ່າງມີປະສິດທິພາບ, ເຮັດໃຫ້ເຈົ້າຂອງອາຄານ ຫຼື ເຈົ້າໜ້າທີ່ກູ້ໄພ ສາມາດຮັບຮູ້ເຫດການໄດ້ທັນທີ ກ່ອນທີ່ໄຟຈະລຸກລາມເປັນວົງ ກວ້າງ. ລາຍລະອຽດການກະຈາຍຕົວຂອງເວລາໃນການທົດສອບທັງ 100 ຄັ້ງ ແມ່ນໄດ້ສະແດງໃນ ຮູບທີ 5 ແລະ ຮູບທີ 6.

3.4 ຜົນການວິເຄາະປຽບທຽບປະສິດທິພາບ ແລະ ຕົ້ນທຶນ

ເພື່ອໃຫ້ເຫັນເຖິງຄວາມໂດດເດັ່ນ ແລະ ຄຸນຄ່າທາງດ້ານ ວິສະວະກຳຂອງລະບົບຕົ້ນແບບ LoRa ທີ່ໄດ້ມີການພັດທະນາຂຶ້ນໃໝ່, ໄດ້ທຳການວິເຄາະປຽບທຽບຮ່ວມກັບລະບົບແຈ້ງເຕືອນໄພອັກຄີໄຟທີ່ມີ ການນຳໃຊ້ໃນປັດຈຸບັນ 2 ຮູບແບບ ຄື: ລະບົບເຊື່ອມຕໍ່ແບບມີສາຍ ແລະ ລະບົບໄຮ້ສາຍມາດຕະຖານ Wi-Fi. ຜົນການວິເຄາະສົມທຽບສາມາດ ສະຫຼຸບໄດ້ດັ່ງນີ້:

1. ດ້ານປະສິດທິພາບການຮັບ-ສົ່ງສັນຍານ ແລະ ໄລຍະທາງ: ລະບົບ Wi-Fi ແບບເດີມ ມັກປະສົບບັນຫາສັນຍານຫຼຸດລົງຢ່າງວ່ອງໄວ ແລະ ເກີດຈຸດບອດ ເມື່ອຕ້ອງທະລຸຜາຄອນກຣິດໜາພາຍໃນອາຄານ, ເຊິ່ງອັດຕາ Packet Loss ຈະສູງຂຶ້ນເມື່ອໄລຍະທາງເກີນ 50 ແມັດ. ລະບົບ LoRa 433 MHz ທີ່ພັດທະນາຂຶ້ນ ສາມາດຮັກສາສະຖຽນລະ ພາບການສື່ສານໄດ້ 100% (Packet Loss 0%) ຄຸ້ມຄອງພື້ນທີ່ປົກຄຸມ ເຖິງ 1,032 m² ໂດຍມີຄ່າ RSSI ສະເລ່ຍຢູ່ທີ່ -78.52 dBm ເຊິ່ງເປັນ ລະດັບສັນຍານທີ່ມີຄວາມໜ້າເຊື່ອຖືສູງ ແລະ ເໝືອກວ່າລະບົບ Wi-Fi ຢ່າງຈະແຈ້ງ.

2. ດ້ານໄລຍະເວລາການຕອບສະໜອງ: ລະບົບແບບມີສາຍ ທົ່ວໄປມີຄວາມໄວສູງ, ແຕ່ລະບົບໄຮ້ສາຍ Wi-Fi ມັກຈະມີຄວາມໜ່ວງ ຜັນຜວນຕາມຄວາມໜ້າແໜ້ນຂອງຜູ້ໃຊ້ງານເຄືອຂ່າຍ. ລະບົບຕົ້ນແບບ LoRa ໃຫ້ຄ່າຄວາມໄວສະເລ່ຍໃນການຕອບສະໜອງຄົງທີ່ຢູ່ທີ່ 39.07 ms ເຊິ່ງໄວກວ່າເກນມາດຕະຖານຂອງລະບົບຄວາມປອດໄພ IoT ທົ່ວ ໄປ ທີ່ກຳນົດໄວ້ບໍ່ໃຫ້ເກີນ 1,000 ms.

3. ດ້ານຕົ້ນທຶນ ແລະ ຄ່າໃຊ້ຈ່າຍ: ລະບົບແບບມີສາຍ ມີຕົ້ນ ທຶນການຕິດຕັ້ງສູງຫຼາຍ ເນື່ອງຈາກຕ້ອງເສຍຄ່າສາຍສັນຍານ ແລະ ຄ່າ ແຮງງານໃນການວາງລະບົບທີ່ຮ້ອຍສາຍທົ່ວອາຄານ, ລວມທັງມີຄວາມ ຍຸ່ງຍາກໃນການບຳລຸງຮັກສາ. ລະບົບຕົ້ນແບບ LoRa ທີ່ສ້າງຂຶ້ນນີ້ ຊ່ວຍ ຫຼຸດຜ່ອນຕົ້ນທຶນດ້ານອຸປະກອນ ແລະ ການຕິດຕັ້ງໄດ້ຫຼາຍກວ່າ 50% ເພາະເປັນລະບົບໄຮ້ສາຍທີ່ບໍ່ຕ້ອງວາງໂຄງສ້າງສາຍສົ່ງ, ຕົວ Node ມີຂະ ໜາດນ້ອຍ, ສາມາດເຄື່ອນຍ້າຍໄດ້ງ່າຍ ແລະ ໃຊ້ພະລັງງານຕໍ່າຫຼາຍ ເຊິ່ງ ຊ່ວຍປະຢັດງົບປະມານໃນການບຳລຸງຮັກສາໄລຍະຍາວ. ລາຍລະອຽດ ການປຽບທຽບຕົວປ່ຽນດ້ານເຕັກນິກ ແລະ ຕົ້ນທຶນທັງໝົດໄດ້ຖືກ ສະຫຼຸບໄວ້ໃນ ຕາຕະລາງທີ 5.

4. ວິພາກຜົນ

ຜົນການສຶກສາສະແດງໃຫ້ເຫັນວ່າ ເຕັກໂນໂລຊີ LoRa ມີ ຄວາມເໝາະສົມຢ່າງຍິ່ງສໍາລັບການປະຍຸກໃຊ້ໃນລະບົບແຈ້ງເຕືອນໄພ ອັກຄີໄຟອັດສະລິຍະ. ເມື່ອພິຈາລະນາດ້ານຄວາມສະຖຽນຂອງສັນຍານ, ຄ່າ RSSI ສະເລ່ຍທີ່ -78.52 dBm ໃນພື້ນທີ່ປິດ ແລະ -66.43 dBm ໃນພື້ນທີ່ເປີດ ຖືວ່າຢູ່ໃນເກນ "ດີຫຼາຍ" ສໍາລັບການສື່ສານແບບບໍ່ມີ ສາຍ, ເຊິ່ງສອດຄ່ອງກັບທົດສະດີຂອງ Li et al. (2020) ທີ່ຍັງຢືນຢັນວ່າ LoRa ສາມາດຮັກສາຄຸນນະພາບສັນຍານໄດ້ດີເຖິງແມ່ນວ່າຈະມີສິ່ງ ກົດຂວາງທີ່ໜ້າແໜ້ນກໍຕາມ.

ເມື່ອສົມທຽບກັບເຕັກໂນໂລຊີໄລຍະໃກ້ ເຊັ່ນ Wi-Fi ຫຼື ZigBee, ເຕັກໂນໂລຊີ LoRa ໃນຢ້ານຄວາມຖີ່ 433 MHz ທີ່ນຳໃຊ້ ໃນການວິໄຈນີ້ ມີຄວາມສາມາດໃນການທະລຸທະລ່ວງ (Penetration Power) ທີ່ເໝືອກວ່າ. ສິ່ງນີ້ເຫັນໄດ້ຊັດເຈນຈາກອັດຕາການສູນເສຍຂໍ້ ມູນ ທີ່ເປັນ 0% ໃນພື້ນທີ່ອາຄານ 1,032 m² ເຊິ່ງຖ້າເປັນ Wi-Fi ອາດ ຈະເກີດຈຸດບອດ ຍ້ອນສັນຍານຖືກດູດຊຶມໂດຍຜາຄອນກຣິດ (Jones, 2019). ນອກຈາກນັ້ນ, ໄລຍະເວລາການຕອບສະໜອງ ສະເລ່ຍທີ່ 39.07 ms ຖືວ່າວ່ອງໄວຫຼາຍເມື່ອທຽບກັບມາດຕະຖານຄວາມປອດໄພ, ເພາະ ໃນລະບົບແຈ້ງເຕືອນໄພອັກຄີໄຟ, ວິນາທີແຫ່ງການຕັດສິນໃຈມີຄວາມ ສໍາຄັນຕໍ່ການຫຼຸດຜ່ອນຄວາມເສຍຫາຍ (Bayoumi et al., 2013).

ອີກປະເດັນໜຶ່ງທີ່ສໍາຄັນຄືດ້ານການປະຢັດພະລັງງານ, ການທີ່ ລະບົບສາມາດສົ່ງສັນຍານໄດ້ໄກໂດຍໃຊ້ກຳລັງສິ່ງຕໍ່າ ໝາຍຄວາມວ່າ Node ເຊັ່ນເຊີທີ່ຕິດຕັ້ງຕາມຈຸດຕ່າງໆ ສາມາດເຮັດວຽກຜ່ານແບັດເຕີຣີ ໄດ້ເປັນໄລຍະເວລາດົນ. ສິ່ງນີ້ບໍ່ພຽງແຕ່ຊ່ວຍຫຼຸດຜ່ອນຕົ້ນທຶນໃນການ ວາງສາຍສົ່ງສັນຍານ ແລະ ຄ່າໄຟຟ້າເທົ່ານັ້ນ, ແຕ່ຍັງເພີ່ມຄວາມຄ່ອງຕົວ ໃນການຂະຫຍາຍລະບົບ ໃນອາຄານຂະໜາດໃຫຍ່ ຫຼື ໂຮງງານ ອຸດສາຫະກຳ ໂດຍບໍ່ຈຳເປັນຕ້ອງມີອຸປະກອນທວນສັນຍານຈໍານວນ ຫຼາຍຄືກັບເຕັກໂນໂລຊີອື່ນ (Mekonnen et al., 2021).

5. ສະຫຼຸບ

ການວິໄຈໃນຄັ້ງນີ້ໄດ້ບັນລຸຕາມຈຸດປະສົງໃນການພັດທະນາ ແລະ ທົດສອບປະສິດທິພາບລະບົບແຈ້ງເຕືອນໄພອັກຄີໄຟອັດສະລິຍະ ໂດຍນຳໃຊ້ເຕັກໂນໂລຊີ LoRa.

ການສຶກສານີ້ໄດ້ເຂົ້າມາແກ້ໄຂບັນຫາຫຼັກ 3 ປະການ ຂອງ ລະບົບເຕືອນໄພໃນປັດຈຸບັນ ຄື: 1) ແກ້ໄຂຂໍ້ຈຳກັດດ້ານຕົ້ນທຶນການ ວາງສາຍສົ່ງສັນຍານທີ່ສູງ ແລະ ຍຸ້ງຍາກໃນອາຄານເກົ່າ ດ້ວຍການປ່ຽນ ມາໃຊ້ເຄືອຂ່າຍໄຮ້ສາຍ LoRa, 2) ແກ້ໄຂບັນຫາສັນຍານຫຼຸດຫາຍ ແລະ ຈຸດບອດຂອງລະບົບ Wi-Fi ໂດຍການນຳໃຊ້ຄື້ນວິທະຍຸ LoRa 433 MHz ທີ່ມີຄວາມສາມາດທະລຸທະລ່ວງຝາຄອນກຣິດໜ້າໄດ້ດີ ແລະ 3) ແກ້ໄຂບັນຫາການແຈ້ງເຕືອນຜິດພາດ ໂດຍການພັດທະນາ Logic ການຕັດສິນໃຈແບບສອງຂັ້ນຕອນ ລະຫວ່າງຄວັນໄຟ ແລະ ແປວໄຟ. ຜົນການທົດສອບຍັງຢືນຢັນວ່າ ລະບົບມີຄວາມສະຖຽນສູງດ້ວຍ ຄ່າ RSSI ສະເລ່ຍ -78.52 dBm (Packet Loss 0%) ແລະ ມີໄລຍະ ເວລາການຕອບສະໜອງທີ່ວ່ອງໄວແບບ Real-time ເຖິງ 39.07 ms.

ນະວັດຕະກຳທີ່ໂດດເດັ່ນຂອງງານວິໄຈນີ້ຄື ການສ້າງ "ໂຄງສ້າງ ການແຈ້ງເຕືອນໄພແບບປະສົມປະສານ" ທີ່ບໍ່ພຽງແຕ່ກວດຈັບໄດ້ໄວ ແຕ່ຍັງຖືກອອກແບບໃຫ້ສາມາດກະຈາຍສັນຍານແຈ້ງເຕືອນໄປຫາ ບຸກຄົນ ແລະ ເຈົ້າໜ້າທີ່ຫຼັກທີ່ກ່ຽວຂ້ອງໃນການກູ້ໄພໄດ້ຢ່າງຖືກຕ້ອງ ດັ່ງນີ້: 1) ບຸກຄົນ ແລະ ຜູ້ອາໄສໃນພື້ນທີ່ເກີດເຫດ: ຈະໄດ້ຮັບການແຈ້ງ ເຕືອນທັນທີຜ່ານສັນຍານສຽງ ຢູ່ສະຖານທີ່ຈິງ ເພື່ອໃຫ້ສາມາດອົບ ພະຍົບອອກຈາກອາຄານໄດ້ທັນທີ. 2) ຜູ້ຮັບຜິດຊອບ ແລະ ເຈົ້າ ຂອງອາຄານ: ຈະໄດ້ຮັບຂໍ້ຄວາມແຈ້ງເຕືອນ ພ້ອມລະບຸພິກັດ ຫຼື ເລກໝາຍ Node ທີ່ເກີດເຫດຜ່ານແອັບພລິເຄຊັນ Blynk ເທິງມືຖື ເພື່ອເຂົ້າ ກວດສອບສະຖານະການເບື້ອງຕົ້ນ ແລະ 3) ເຈົ້າໜ້າທີ່ກູ້ໄພ ຫຼື ເຈົ້າໜ້າ ທີ່ດັບເຝີງ: ລະບົບໄດ້ຖືກອອກແບບໃຫ້ສາມາດເຊື່ອມໂຍງຂໍ້ມູນຜ່ານ ລະບົບຄລາວ ເພື່ອສົ່ງສັນຍານເຕືອນໄພໄປຍັງແອັບພລິເຄຊັນ ຫຼື ຈໍ ສະແດງຜິວຢູ່ສູນຄວບຄຸມສ່ວນກາງ ຂອງເຈົ້າໜ້າທີ່ດັບເຝີງ/ຕຳຫຼວດ ໄດ້ໂດຍກົງ. ເຊິ່ງຈາກການທົດສອບຍັງຢືນຢັນວ່າ ສັນຍານເຕືອນໄພໄດ້ຖືກ ສົ່ງໄປຫາບຸກຄົນ ແລະ ເຈົ້າໜ້າທີ່ເຫຼົ່ານັ້ນແທ້ ຜ່ານເຄືອຂ່າຍອິນເຕີເນັດ ໂດຍໃຊ້ເວລາພຽງບໍ່ກວ້າງຫຼາຍຈາກເຊັ່ນເຊີກວດພົບເຫດ.

ເຖິງວ່າລະບົບຈະເຮັດວຽກໄດ້ຢ່າງມີປະສິດທິພາບ, ແຕ່ຍັງມີຂໍ້ ຈຳກັດບາງປະການ ຄື: ການທົດສອບໃນຄັ້ງນີ້ແມ່ນເນັ້ນໜັກໃສ່ພື້ນທີ່ ອາຄານໃນຂອບເຂດ 1,032 m², ເຊິ່ງຍັງບໍ່ທັນໄດ້ທົດສອບໃນສະພາບ ແວດລ້ອມທີ່ມີສັນຍານລົບກວນຈາກຄື້ນວິທະຍຸອຸດສາຫະກຳ ທີ່ໜ້າແ ໜ້ນ. ລະບົບຍັງອາໄສຜະລິດງານຈາກແຫຼ່ງຈ່າຍໄຟຄົງທີ່ເປັນຫຼັກ, ຍັງບໍ່ ທັນໄດ້ທົດສອບການນຳໃຊ້ຜະລິດງານຈາກແບັດເຕີຣີໃນໄລຍະຍາວ. ເພື່ອເຮັດໃຫ້ລະບົບມີຄວາມສົມບູນແບບຫຼາຍຂຶ້ນ, ການຄົ້ນຄວ້າໃນ ອະນາຄົດຄວນສຶກສາໃນດ້ານຕ່າງໆດັ່ງນີ້: ຄວນເພີ່ມເຊັ່ນເຊີກວດຈັບ ອຸນຫະພູມ (DHT22) ແລະ ເຊັ່ນເຊີກວດຈັບກົາຊ CO ເພື່ອໃຫ້ການ ວິເຄາະຕົ້ນເຫດຂອງໄຟໄໝ້ມີຄວາມລະອຽດຂຶ້ນ. ຄວນນຳໃຊ້ລະບົບ ປັນຍາປະດິດ ມາຊ່ວຍໃນການວິເຄາະແນວໂນ້ມການເກີດໄຟໄໝ້. ຄວນ ທົດສອບການເຊື່ອມຕໍ່ແບບ Mesh Network ລະຫວ່າງຫຼາຍໆ

Gateway ເພື່ອໃຫ້ສາມາດຄຸ້ມຄອງພື້ນທີ່ລະດັບກຸ່ມອາຄານ ຫຼື ຕົວ ເມືອງອັດສະລິຍະ (Smart City) ໄດ້.

6. ຂໍ້ຂັດແຍ່ງ

ຂໍ້ຍັງຢືນຢັນວ່າ ບໍ່ມີຂໍ້ຂັດແຍ່ງທາງດ້ານຜົນປະໂຫຍດໃດໆໃນການ ດຳເນີນການຄົ້ນຄວ້າ, ການວິເຄາະຂໍ້ມູນ ແລະ ການນຳສະເໜີຜົນການ ວິໄຈ

7. ເອກະສານອ້າງອີງ

- Aburas, A., & Al-Mashouq, K. (2011). QMeter: A software for network performance and signal quality measurement. *Journal of Telecommunication Systems*, 12(2), 145–152.
- Arduino. (2015). *Arduino Mega 2560 hardware specification*. <https://www.arduino.cc>
- Bayoumi, A., El-Gizawy, M., & Hassan, M. (2013). Impact of early fire detection on life safety. *Journal of Fire Safety*, 15(3), 205–215.
- Chun-yuan, L. (2011). LoRa technology for long-range communication. *Journal of Telecommunication Engineering*, 7(1), 45–50.
- Ding, Q., Wang, L., Zhang, Y., & Liu, X.. (2014). Development of an IoT-based fire alarm system. *Sensors Journal*, 14(9), 16215–16228.
- Dragino. (2020). *LoRa Shield (433MHz) documentation and user manual*. Dragino Technology Co., Ltd.
- Hidayat, R., Purwanto, E., & Suryono, S. (2018). Wireless sensor network for fire detection using LoRa technology. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4), 234–240.
- Jones, D. (2019). Challenges of traditional wireless communication in indoor fire alarm systems. *IEEE Transactions on Wireless*, 21(4), 550–558.
- Hidayat, R., Purwanto, E., & Suryono, S. (2018). The role of IoT in modern smart buildings and safety systems. *Journal of Applied IoT*, 6(2), 89–102.
- Lee, S., & Su, H. (2017). Energy-efficient wireless sensor networks for environmental monitoring. *Environmental Technology Review*, 12(1), 35–42.
- Li, X., Li, W., Liu, J., & Wang, Z. (2020). Performance analysis of LoRaWAN-based fire alarm systems in complex environments. *International Journal of Communication*, 25(1), 11–20.
- Mekonnen, A., Welte, R., & Grossmann, M. (2021). LoRa: A low-power wide-area technology for IoT applications: A survey. *Sensors and Actuators Journal*, 32(5), 450–465.
- Parmanee, T., Khongsomboun, K., Thongphanh, P., Dittaphong, X., & Outhailutsadee, A. (2024). The station system measures the water level and amount of rain that can save the data and online through web server. *Souphanouvong University Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 10(3), 163–171. <https://doi.org/10.69692/SUJMRD100163>
- Paul, B. (2020). A novel energy-efficient routing scheme for LoRa networks in industrial buildings. *IEEE Sensors Journal*, 20(1), 1–10.
- Semtech Corporation. (2019). *LoRa and LoRaWAN: A technical overview* (Semtech White Paper). Semtech Corporation.

ສະຖາບັນຄົ້ນຄວ້າວິທະຍາສາດ. (2022). ບົດລາຍງານການຄົ້ນຄວ້າ
ກ່ຽວກັບຄ່າໃຊ້ຈ່າຍຂອງລະບົບແຈ້ງເຕືອນໄຟອັກຄີໄຟທີ່ໃຊ້

ເຄືອຂ່າຍໂທລະຄົມມະນາຄົມ. ນະຄອນຫຼວງວຽງຈັນ: ສະຖາ
ບັນຄົ້ນຄວ້າວິທະຍາສາດ.

ຕາຕະລາງທີ 1: ລາຍລະອຽດຄຸນລັກສະນະຂອງອຸປະກອນຫຼັກ

ລຳດັບ	ອຸປະກອນ	ລາຍລະອຽດ/ຄຸນລັກສະນະ
1	Arduino Mega 2560	ຄວາມຈໍາ Flash 256 KB, 54 Digital I/O pins
2	LoRa Shield	ຄວາມຖີ່ 433 MHz, ໄລຍະການສົ່ງສັນຍານ > 1 km
3	Smoke Sensor MQ-2	ໄລຍະການກວດຈັບຄວັນໄຟ ແລະ ກ້າຊຸ LPG, Propane
4	Flame Sensor	ຢ້ານຄວາມຍາວຄືນ IR 760 nm – 1100 nm
5	QMeter Software	ໃຊ້ວັດແທກຄ່າ RSSI, SNR ແລະ Packet Loss

ຕາຕະລາງທີ 2: ສະພາບແວດລ້ອມ ແລະ ເງື່ອນໄຂຂອງການທົດສອບ

ລຳດັບ	ຮູບແບບການທົດສອບ	ພື້ນທີ່ (m^2)	ລັກສະນະສິ່ງກົດຂວາງ	ຕົວປ່ຽນທີ່ວັດແທກ
1	ພາຍໃນອາຄານ (Indoor)	1,032	ຝາຜະໜັງ, ເສົາ, ປະຕູ	RSSI, Response Time
2	ພາຍນອກອາຄານ (Outdoor)	2,500	ຕົ້ນໄມ້, ລົດ, ອາຄານໃກ້ຄຽງ	RSSI, Packet Loss

ຕາຕະລາງທີ 3: ຕົວປ່ຽນ ແລະ ເກນການວິເຄາະຂໍ້ມູນ

ລຳດັບ	ຕົວປ່ຽນ	ໜ່ວຍວັດແທກ	ເກນການປະເມີນປະສິດທິພາບ
1	RSSI	dBm	ຍິ່ງມີຄ່າໃກ້ 0 ຍິ່ງດີ (ຕົວຢ່າງ: -60 dBm ດີກວ່າ -90 dBm)
2	Packet Loss	Percentage (%)	ຕ້ອງຕໍ່າກວ່າ 1% ສໍາລັບການສົ່ງຂໍ້ມູນເຕືອນໄຟທີ່ສໍາຄັນ
3	Response Time	Millisecond (ms)	ຕ້ອງມີຄວາມໄວພຽງພໍທີ່ຈະແຈ້ງເຕືອນກ່ອນໄຟຈະລຸກລາມ

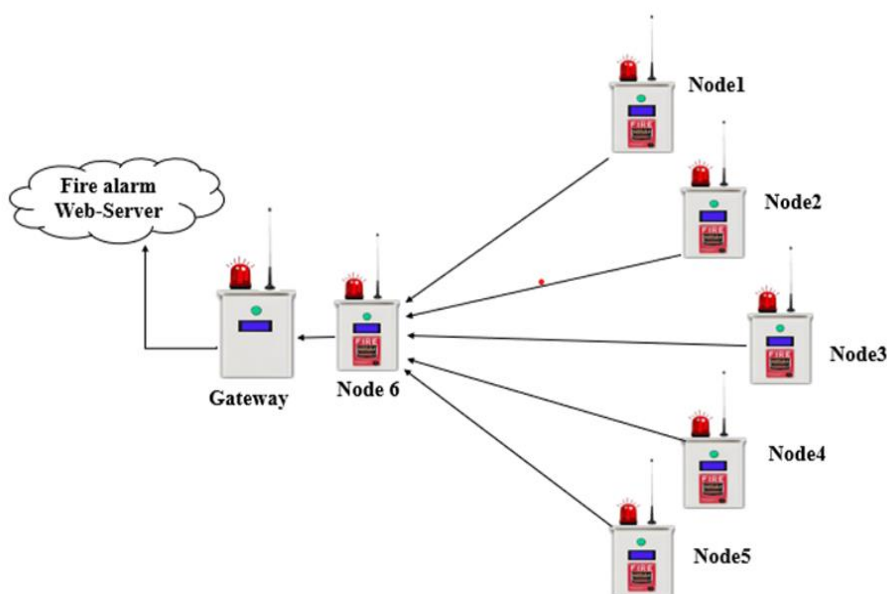
ຕາຕະລາງທີ 4: ຜົນສະເລ່ຍຂອງຄ່າ RSSI ແລະ ໄລຍະເວລາການຕອບສະໜອງ

ລຳດັບ	ສະຖານທີ່ທົດສອບ	ຄ່າ RSSI ສະເລ່ຍ (dBm)	Response Time (ms)	Packet Loss (%)
1	ພາຍໃນອາຄານ (Indoor)	-78.52	39.07	0%
2	ພາຍນອກອາຄານ (Outdoor)	-66.43	36.12	0%

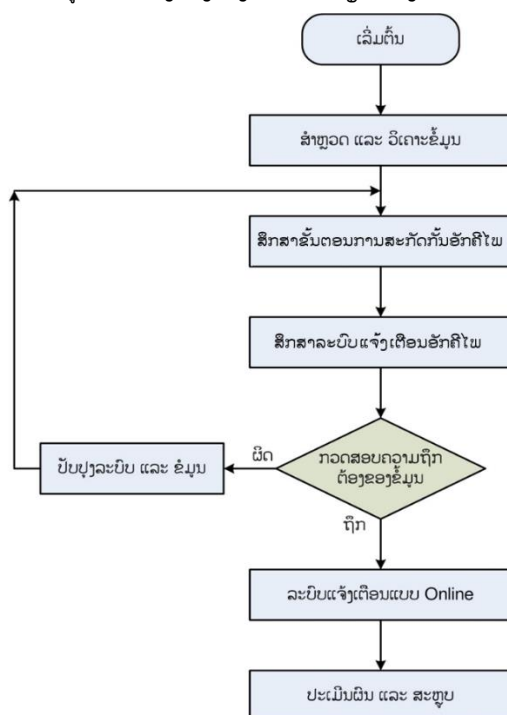
ຕາຕະລາງທີ 5: ການປຽບທຽບຄຸນລັກສະນະທາງເຕັກນິກ ແລະ ຕົ້ນທຶນລະຫວ່າງລະບົບຕ່າງໆ

ຕົວປ່ຽນ/ຄຸນລັກສະນະ	ລະບົບແຈ້ງເຕືອນແບບມີສາຍ	ລະບົບໄຮ້ສາຍມາດຕະຖານ Wi-Fi	ລະບົບຕົ້ນແບບ LoRa
1. ໄລຍະທາງ/ການຄຸ້ມຄອງພື້ນທີ່	ໄກ (ຂຶ້ນກັບຄວາມຍາວສາຍ) ແຕ່ມີຄ່າໃຊ້ຈ່າຍສາຍສູງ	ໃກ້ (30–50 ແມັດ) ມັກມີຈຸດບອດໃນອາຄານ	ໄກຫຼາຍ (>1 ກິໂລແມັດ) ຄຸ້ມຄອງພື້ນທີ່ປົກໄດ້ດີ
2. ການທະລຸທະລ່ວງສິ່ງກົດຂວາງ	ບໍ່ມີບັນຫາ (ເພາະສິ່ງຕາມສາຍ)	ຕໍ່າ ຖືກກົດຂວາງງ່າຍຈາກຝາຄອນກຣີດ	ສູງຫຼາຍ ສັນຍານມີສະຖຽນລະພາບດີໃນພື້ນທີ່ປິດ

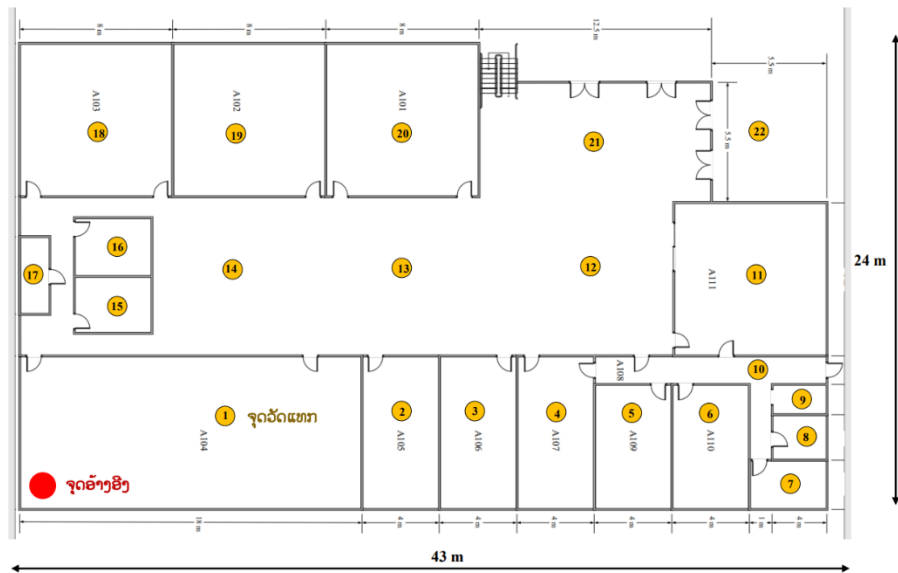
3. Packet Loss Rate (%)	0%	5% – 15% (ຂຶ້ນກັບຄວາມໜາແໜ້ນສັນຍານ)	0% (ຈາກຜົນການທົດລອງໃນພື້ນທີ່ 1,032 m ²)
4. Response Time (ms)	< 10 ms (ໄວຫຼາຍ)	100 ms – 500 ms (ຜັນຜວນຕາມເນັດ)	39.07 ms (ໄວຄົງທີ່ ແລະ ເປັນແບບ Real-time)
5. ການບໍລິໂພກພະລັງງານ	ສູງ (ຕ້ອງຈ່າຍໄຟໃຫ້ລະບົບຕະຫຼອດ)	ສູງ (ອຸປະກອນ Wi-Fi ກິນໄຟຫຼາຍ)	ຕໍ່າຫຼາຍ (Low Power ເໝາະກັບແບັດເຕີຣີ)
6. ຄວາມຍາກງ່າຍໃນການຕິດຕັ້ງ	ຍາກຫຼາຍ (ຕ້ອງເຈາະຝາ, ເດີນທໍາຮ້ອຍສາຍ)	ປານກາງ (ຕ້ອງມີ Access Point ທົ່ວອາຄານ)	ງ່າຍດາຍ (ເປັນ Plug & Play, ຍ້າຍຈຸດໄດ້ງ່າຍ)
7. ຕົ້ນທຶນອຸປະກອນ ແລະ ການຕິດຕັ້ງ	ສູງຫຼາຍ (ຄ່າສາຍສັນຍານ + ຄ່າແຮງງານ)	ປານກາງ (ຄ່າອຸປະກອນ Router/Access Point)	ຕໍ່າທີ່ສຸດ (ຫຼຸດລົງຫຼາຍກວ່າ 50% ຈາກລະບົບມີສາຍ)



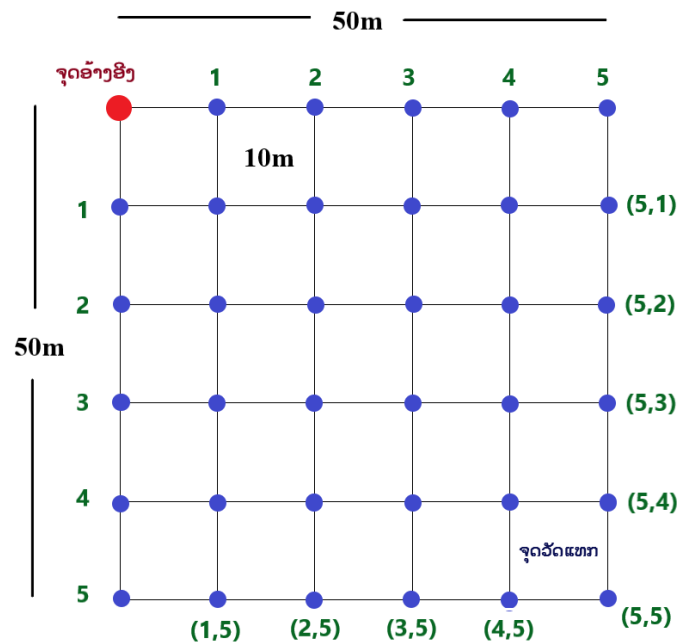
ຮູບທີ 1: ຜັງໂຄງສ້າງການເຮັດວຽກຂອງລະບົບ



ຮູບທີ 2: ຜັງການເຮັດວຽກຂອງຊອບແວ

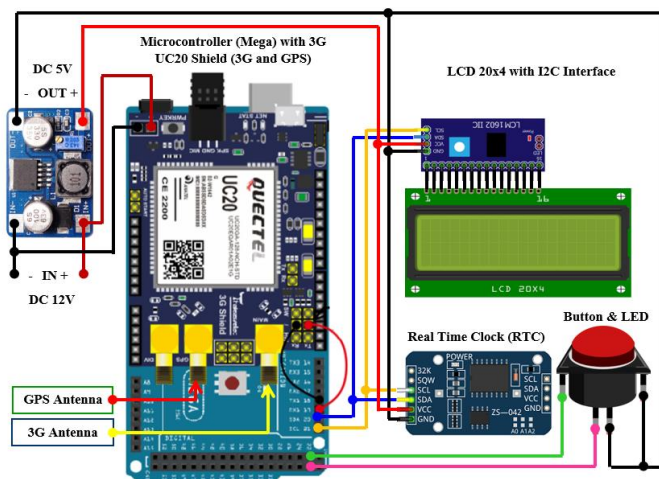


(ກ) ຝື່ນທີ່ປິດ (Indoor)

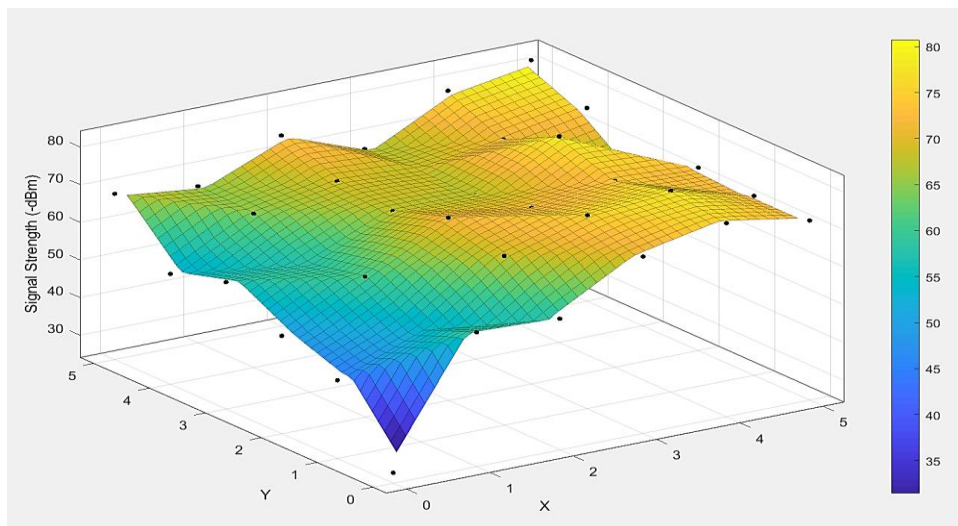


(ຂ) ຝື່ນທີ່ເປີດ (Outdoor)

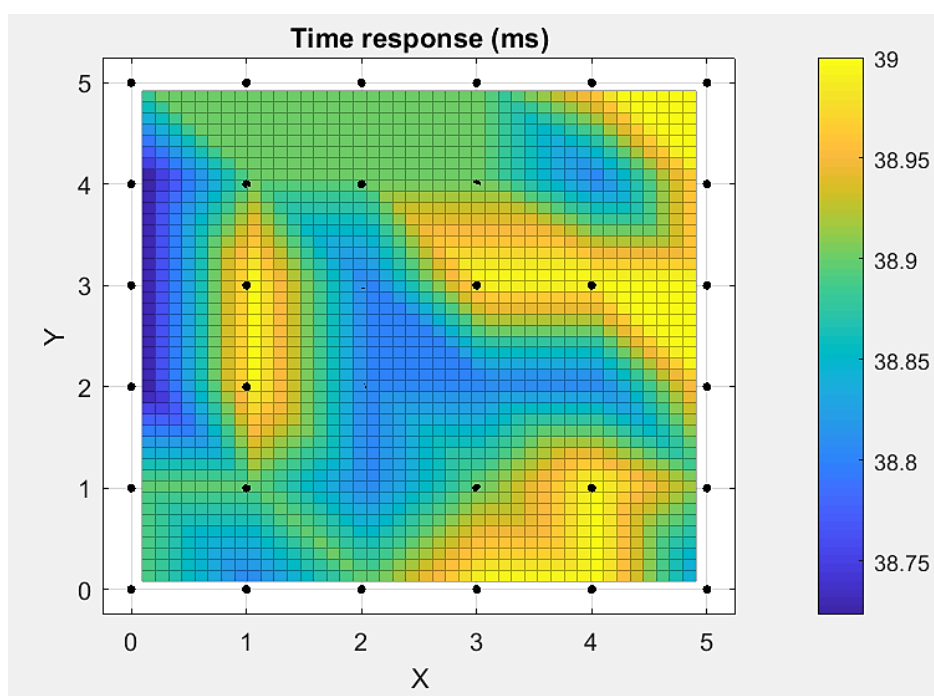
ຮູບທີ 3: ແຜນຜັງສະຖານທີ່ທົດສອບ ແລະ ຈຸດວັດແທກສັນຍານ



ຮູບທີ 4: ສ່ວນຕິດຕໍ່ຜູ້ໃຊ້ ແລະ ການແຈ້ງເຕືອນ



ຮູບທີ 5: ເສັ້ນສະແດງຄວາມແຮງຂອງສັນຍານທີ່ວັດແທກໄດ້ໃນພື້ນທີ່ປິດ



ຮູບທີ 6: ເສັ້ນສະແດງຄວາມແຮງຂອງສັນຍານທີ່ວັດແທກໄດ້ໃນພື້ນທີ່ເປີດ