**The use of reinforcement learning for routing protocol in Wireless Sensor Networks: A Scoping Review of research trends, challenges and opportunities**

**Abstract**

**Introduction**

* **Definition of Wireless Sensor Network**

Wireless Sensor Network (WSN) telah menjadi salah satu teknologi penting yang telah digunakan masa modern ini karena kemampuannya dalam melakukan monitoring dan melakukan pengumpulan data dari berbagai bidang-bidang berbeda, seperti kesehatan [1], militer [2], agrikultur [3], industri [4], dan pencegahan bencana alam [5]. Network ini terdiri atas sensor-sensor otonom yang tersebar secara spatial untuk melakukan pengumpulan data dan melakukan pengiriman ke base station. Sensor tersebut harus memiliki efisiensi tinggi, konsumsi daya yang rendah serta jangkauan komunikasi yang jauh. Tidak hanya itu, sensor harus memiliki akurasi yang tinggi dalam melakukan pembacaan parameter serta reabilitas dalam melakukan pengiriman data secara real-time.

* **Problem of Wireless Sensor Network**

Salah satu faktor yang mempengaruhi tingkat reabilitas, skalabilitas dan efisiensi dari WSN adalah protokol routing yang digunakan. Kamal dan Al-Karaki membagi traditional network structure berdasarkan flat-based, hierarhical-based, dan location-based yang dapat terbagi kembali berdasarkan protocol routing seperti multi-path-based, query-based, negotion-based, quality-of-service (QoS) dan coherent-based [6]. Pada hierarhical-based routing seperti Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy (LEACH) memiliki kekurangan bahwa pemilihan cluster head (CH) dan pembentukan cluster dipilih secara acak, flat-based routing protocol seperti Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) memiliki permasalahan pada skalabilitas, overhead dan redundancy, sedangkan pada location-based routing protocol seperti Greedy Perimeter Stateless Routing (GSPR) memiliki permasalahan pada void handling dan konsumsi energy yang disebabkan akibat greedy forwarding. Masing-masing permasalahan tersebut dapat disebabkan akibat peraturan terhadap routing table maupun jalur pengiriman data bersifat statis sehingga WSN tidak adaptif dalam menghadapi dinamika topologi WSN.

* **AI potential in Wireless Sensor Networks**

Meningkatnya perkembangan artificial intelligence (AI) telah merevolusi cara manusia dalam melakukan pengambilan keputusan. Algoritma AI dibagi atas tiga kategori yakni; supervised, unsupervised serta reinforcement learning. Algoritman reinforcement learning (RL) merupakan salah satu teknik AI yang melakukan pembelajaran melalui interaksi terhadap lingkungannya. Algoritma RL telah banyak digunakan di berbagai bidang atas kemampuannya dalam melakukan pengenalan pola berdasarkan informasi data yang diberikan. Salah satu implementasi dari algoritma RL tersebut adalah pada peningkatan efisiensi energi melalui optimasi protokol routing WSN [7], [8], [9], [10], [11]. Algoritma RL bekerja menggunakan informasi jaringan sebagai input masukan dalam melakukan pengambilan keputusan dari protokol routing yang digunakan. Informasi jaringan tersebut dapat berupa energy node, pola mobilitas, densitas traffic, topologi network, channel atau jangkauan pembacaan. Sehingga, memungkinkan WSN dalam melakukan perubahan secara real-time dan adaptif dalam menghadapi perubahan jaringan yang dinamis sebagai upaya dalam meningkatkan lifespan maupun throughput dari WSN.

* **Lack of comprehensive review of which AI is used for**

Meskipun pertumbuhan dan perkembangan aplikasi dari algoritma RL pada WSN terus meningkat, akan tetapi review komprehensive pada topik ini masih belum banyak dilakukan. Komprehensif review pada penerapan algoritma RL pada protokol routing yang tersedia masih terfokus pada titik penerapan tertentu seperti pada flying adhoc network [12], underwater wireless sensor network (UWSN) [13] dan distributed wireless network [14]. Terlebih lagi, belum ada scoping review yang telah dilakukan terkait penerapan algoritma RL pada WSN secara general untuk menyajikan gap, research trend, maupun tantangan di masa depan. Scoping review memiliki peranan penting dalam menyediakan overview terkait potensi penggunaan algoritma RL pada WSN dengan menyediakan identifikasi terkait pemetaan konsep dari studi WSN yang telah dilakukan hingga saat ini.

* **Tujuan Penelitian**

Paper ini bertujuan untuk menyediakan scoping review dalam menyediakan pemetaan sistematis dan sintesis dari literature yang ada terkait penggunaan algoritma reinforcement learning pada WSN. Melalui hasil dari sintesis dan pemetaan tersebut, review ini bertujuan untuk melakukan identifikasi terkait trend, gaps dan tantangan sebagai arah dan panduan dalam melakukan penelitian kedepannya. Dalam mencapai hal tersebut penelitian ini menggunakan systematic mapping untuk mengkategorikan dan memvisualisasikan distribusi penelitian yang ada serta pendekatan yang digunakan berdasarkan parameter yang ditentukan. The Prefered Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analyses (PRISMA) framework digunakan sebagai panduan dalam melakukan identifikasi, screening serta inclusion dan ekslusi dari penelitian relevan. Tidak hanya itu, teknik natural language processing (NLP) juga digunakan dalam mengekstrak teks data serta informasi untuk mendapatkan insight serta informasi baru dari literatur yang dikumpulkan dengan jumlah besar.

* Main Contribution
* Paper Structure Section information

**Related Work**

**Methodology**

Penelitian ini menggunakan scoping review karena review jenis ini adalah jenis review paling tepat dalam melakukan pemetaan terkait aktivitas penelitian yang bersifat pemetaan dengan topik yang luas dan heterogenous seperti WSN dan RL, ketimbang systematic literature review yang berfokus dalam menjawab pertanyaan penelitian spesifik. Scoping review ini menggunakan 5-stage process miliki Arksey and O’Malley melalui serangkaian proses transparansi untuk replikasi teknik pencarian serta meningkatkan reabilitas dari pengambilan konklusi yang dilakukan [15]. 5-stages process tersebut ditunjukkan pada Fig. 1. Dalam menentukan studi mana yang relevan, penelitian ini menggunakan panduan dari PRISMA extension untuk scoping reviews (PRISMA-ScR), untuk memastikan bahwa paper yang dikumpulkan sudah melalui tahapan pemelihan tanpa bias, komprehensif dan relevan [16].

* **Research Questions**

Research question utama yang diajukan dari review ini ditunjukkan sebagai berikut :

RQ1 What are the prominent research topics and publication trends in literature?

RQ2 In which way reinforcement learning can improve protocol routing in WSN?

RQ3 Which approaches are most suitable for

RQ4 Is there any considereable difference in the state-of-the-art in reinforcement learning algorithm for WSN?

RQ5 What are future research directions for reinforcement learning algorithm in protocol routing for WSN?

Dalam menjawab pertanyaan tersebut

* **Scoping Review Parameter**

Proses pencarian serta scanning literature dilakukan secara otonom menggunakan teknik NLP untuk memungkinkan pengumpulan data dalam jumlah besar melalui input parameter sebagai search terms untuk mengidentifikasi artikel yang memiliki relevansi. Proses pencarian menggunakan beberapa properti tersebut seperti keyword, properties, property synonyms, property groups, start and end year [17]. Literature dikumpulkan dari beberapa sumber seperti IEEE, ACM, Elsevier, Springer, and Wiley. Dalam mendeterminasi initial pool dari artikel yang nantinya dievaluasi untuk elegibilitas, pencarian dilakukan menggunakan beberapa search query yakni (“reinforcement learning” OR “RL”) AND (“protocol routing” OR “routing strategy” OR “routing algorithm”) AND (“Wireless Sensor Network” OR “WSN” OR “Sensor Network”). Tidak hanya itu, proses pencarian juga dilakukan menggunakan properties yang ditunjukkan pada Fig. 2 yang mengandung sinonim atau akronim dari search query untuk menghindari adanya ekslusi dini pada proses pencarian. Properties tersebut dikategorikan berdasarkan suatu group secara thematically dan sematically pada Fig. 2. NLP Toolkit digunakan dalam mencari artikel berdasarkan boolean condition dari search query berdasarkan informasi title dan abstrak yang di dapatkan dari masing-masing artikel. Artikel yang memenuhi boolean condition tersebut kemudian di lakukan pengecekan oleh human reader untuk mengetahui konteks serta relevansi dari artikel.

* **Search Strategy**

Artikel yang telah terkumpul dilakukan seleksi serta processing menggunakan PRISMA-ScR framework. Proses seleksi ini dilakukan untuk mencegah terjadinya duplikasi, artikel yang tidak relevan, diluar jangka waktu, parsing error serta alasan lainnya. Seleksi dan processing ini dilakukan untuk mengurangi proses seleksi manual yang dilakukan oleh manusia. Hasil dari seleksi tersebut akan diubah ke dalam bentuk spreadsheet yang mencakup informasi: Digital Object Identifier (DOI), link, article title, publication date, number of citation, article type, countries, keywords, abstracts and number of found properties.

Traditional systematic review dilakukan dengan menyajikan analisis komprehensif dari artikel relevan yang telah dikumpulkan, Tiap dari artikel tersebut akan dicek satu per satu untuk dilanjutkan sebagai potensial inclusive in the qualitative and quantitaive synthesis.Tiap dari artikel tersebut diuji berdasarkan relevansi, quality dan impact yang dibuat setelah melalui proses elihibility criteria tersebut.

* **Inclussion and Exclussion Criteria**

Pada fase screening artikel yang telah di seleksi manual maupun diseleksi melalui NLP toolkit, di eliminasi menggunakan inclussion dan exclussion criteria yang ditetapkan. Inklusi serta ekslusi yang ditetapkan sebagai berikut:

IC1 Artikel tersebut ditulis dalam bahasa inggris dan terpublished pada rentang tahun antara Januari 2010 hingga Agustus 2024.

IC2 Artikel tersebut setidak-tidaknya mengandung 3 huruf dari propoerties atau search query pada abstrak maupun judulnya.

IC3 Artikel yang dikumpulkan merupakan artikel yang telah melalui peer-reviewed serta bukan secondary manuscript seperti survey, systematic review maupun mapping, atau jenis reveiw lainnya

**Result and Discussion**

* **Statistics per Digital Library**
* **Statistics of Keyword Based Queries**
* **Extraction of Study Characteristics**

**Conclussion**

**References**

[1] P. Barsocchi *et al.*, ‘Wireless Sensor Networks for Continuous Structural Health Monitoring of Historic Masonry Towers’, *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 15, no. 1, pp. 22–44, Jan. 2021, doi: 10.1080/15583058.2020.1719229.

[2] I. S. Igboanusi, C. I. Nwakanma, J. M. Lee, and D. S. Kim, ‘VLC-UWB Hybrid (VUH) Network for Indoor Industrial Robots at Military Warehouses / Distribution Centers’, *ICTC 2019 - 10th International Conference on ICT Convergence: ICT Convergence Leading the Autonomous Future*, pp. 762–766, Oct. 2019, doi: 10.1109/ICTC46691.2019.8939766.

[3] P. Sanjeevi, S. Prasanna, B. Siva Kumar, G. Gunasekaran, I. Alagiri, and R. Vijay Anand, ‘Precision agriculture and farming using Internet of Things based on wireless sensor network’, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 31, no. 12, p. e3978, Dec. 2020, doi: 10.1002/ETT.3978.

[4] X. Tian, Y. H. Zhu, K. Chi, J. Liu, and D. Zhang, ‘Reliable and energy-efficient data forwarding in industrial wireless sensor networks’, *IEEE Syst J*, vol. 11, no. 3, pp. 1424–1434, Sep. 2017, doi: 10.1109/JSYST.2015.2466696.

[5] A. Jadon, Mohd. Omama, A. Varshney, M. S. Ansari, and R. Sharma, ‘FireNet: A Specialized Lightweight Fire & Smoke Detection Model for Real-Time IoT Applications’, May 2019, doi: https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.11922.

[6] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, ‘Routing techniques in wireless sensor networks: A survey’, *IEEE Wirel Commun*, vol. 11, no. 6, pp. 6–27, Dec. 2004, doi: 10.1109/MWC.2004.1368893.

[7] V. K. Mutombo, S. Y. Shin, and J. Hong, ‘EBR-RL: Energy balancing routing protocol based on reinforcement learning for WSN’, *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing*, pp. 1915–1920, Mar. 2021, doi: 10.1145/3412841.3442063.

[8] A. F. E. Abadi, S. A. Asghari, M. B. Marvasti, G. Abaei, M. Nabavi, and Y. Savaria, ‘RLBEEP: Reinforcement-Learning-Based Energy Efficient Control and Routing Protocol for Wireless Sensor Networks’, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 44123–44135, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3167058.

[9] T. Hu and Y. Fei, ‘QELAR: A Machine-Learning-Based Adaptive Routing Protocol for Energy-Efficient and Lifetime-Extended Underwater Sensor Networks’, *IEEE Trans Mob Comput*, vol. 9, no. 6, pp. 796–809, Jun. 2010, doi: 10.1109/TMC.2010.28.

[10] T. N. Tran, T. Van Nguyen, K. Shim, D. B. Da Costa, and B. An, ‘A Deep Reinforcement Learning-Based QoS Routing Protocol Exploiting Cross-Layer Design in Cognitive Radio Mobile Ad Hoc Networks’, *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 71, no. 12, pp. 13165–13181, Dec. 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3196046.

[11] Y. Zhou, T. Cao, and W. Xiang, ‘Anypath Routing Protocol Design via Q-Learning for Underwater Sensor Networks’, *IEEE Internet Things J*, vol. 8, no. 10, pp. 8173–8190, May 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3042901.

[12] J. ; Lansky *et al.*, ‘Reinforcement Learning-Based Routing Protocols in Flying Ad Hoc Networks (FANET): A Review’, *Mathematics 2022, Vol. 10, Page 3017*, vol. 10, no. 16, p. 3017, Aug. 2022, doi: 10.3390/MATH10163017.

[13] R. T. Rodoshi, Y. Song, and W. Choi, ‘Reinforcement Learning-Based Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks: A Comparative Survey’, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 154578–154599, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3128516.

[14] H. A. A. Al-Rawi, M. A. Ng, and K. L. A. Yau, ‘Application of reinforcement learning to routing in distributed wireless networks: a review’, *Artif Intell Rev*, vol. 43, no. 3, pp. 381–416, Mar. 2015, doi: 10.1007/S10462-012-9383-6/METRICS.

[15] H. Arksey and L. O’Malley, ‘Scoping studies: towards a methodological framework’, *Int J Soc Res Methodol*, vol. 8, no. 1, pp. 19–32, Feb. 2005, doi: 10.1080/1364557032000119616.

[16] A. C. Tricco *et al.*, ‘PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation’, *Ann Intern Med*, vol. 169, no. 7, pp. 467–473, Oct. 2018, doi: 10.7326/M18-0850/SUPPL\_FILE/M18-0850\_SUPPLEMENT.PDF.

[17] E. Zdravevski *et al.*, ‘Automation in systematic, scoping and rapid reviews by an NLP toolkit: A case study in enhanced living environments’, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 11369 LNCS, pp. 1–18, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-10752-9\_1/FIGURES/14.