

## **DELAY TOLERANT NETWORK DAN LONG RANGE UNTUK SISTEM PERINGATAN DINI BANJIR: SEBUAH TINJAUAN LITERATUR**

**Bisma Putra Sulung<sup>1)</sup>, Agussalim<sup>1)</sup>, Andreas Nugroho Sihananto<sup>1)</sup>**

1) Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur

E-mail: [22081010026@student.upnjatim.ac.id](mailto:22081010026@student.upnjatim.ac.id)

### **Abstrak**

*Sistem peringatan dini (EWS) yang andal merupakan komponen krusial dalam manajemen bencana banjir perkotaan, namun seringkali terhambat oleh kegagalan infrastruktur komunikasi konvensional saat bencana terjadi. Tinjauan literatur ini secara sistematis mengeksplorasi potensi integrasi arsitektur Delay-Tolerant Network (DTN), yang dirancang untuk lingkungan dengan konektivitas terputus-putus, dengan teknologi Long Range (LoRa) yang hemat daya dan berjangkauan luas sebagai solusi EWS banjir yang tangguh. Metodologi yang digunakan adalah studi pustaka terhadap artikel ilmiah mengikuti panduan PRISMA 2020 dimana studi diidentifikasi melalui databased engan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditentukan. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa sinergi antara mekanisme "store-carry-and-forward" dari DTN dan kemampuan komunikasi multi-hop LoRa dapat menciptakan jaringan darurat yang resilien. Bukti dari studi menunjukkan bahwa implementasi protokol routing DTN (contohnya Epidemic Forwarding) di atas jaringan LoRa layak untuk skenario bencana.. Kesimpulannya, literatur yang ada sangat mendukung kelayakan teknis dan konseptual untuk merekomendasikan arsitektur DTN-LoRa sebagai EWS banjir yang lebih andal, berbiaya rendah, dan efektif di lingkungan yang menantang.*

**Kata kunci:** Delay Tolerant Network, LoRa, Sistem Peringatan Dini, Banjir, Tinjauan Literatur.

### **Pendahuluan**

Bencana alam seringkali merusak infrastruktur komunikasi yang ada, mengakibatkan terputusnya jalur komunikasi dan menghambat upaya penyelamatan [1]. Di Indonesia, negara yang rentan terhadap berbagai jenis bencana alam, kebutuhan akan strategi komunikasi yang efektif dalam manajemen bencana menjadi sangat mendesak [2]. Pemerintah Indonesia telah menginisiasi program seperti Kawasan Siaga Bencana (DPA) untuk mensinergikan lembaga lokal dan meningkatkan partisipasi masyarakat [2]. Namun, lembaga-lembaga ini seringkali bekerja secara sektoral sehingga hasilnya tidak optimal [2]. Oleh karena itu, diperlukan sebuah paradigma komunikasi alternatif yang dirancang khusus untuk lingkungan yang penuh tantangan [1]. Sistem Peringatan Dini atau *Early Warning System* (EWS) adalah salah satu solusi paling efektif untuk mitigasi kerugian akibat banjir [3]. EWS berbasis *Internet of Things* (IoT) modern memungkinkan pengumpulan data lingkungan secara luas untuk menghasilkan peringatan yang akurat dan tepat waktu [4]. Namun, sistem ini seringkali masih bergantung pada ketersediaan jaringan seluler atau internet yang rentan gagal saat bencana, sehingga diperlukan solusi komunikasi yang lebih tangguh [1] [5]. Untuk mengatasi tantangan ini, tinjauan ini mengkaji potensi integrasi dua teknologi: *Delay-Tolerant Network* (DTN) dan *Long Range* (LoRa). DTN adalah arsitektur jaringan yang dirancang untuk beroperasi di lingkungan dengan konektivitas yang terputus menggunakan mekanisme *store-carry-forward* [6] [7]. LoRa adalah teknologi komunikasi nirkabel berdaya rendah dengan jangkauan luas (LPWAN) yang ideal untuk perangkat sensor IoT [8]. Gabungan keduanya dapat menciptakan EWS mandiri dan hemat biaya. Studi literatur ini akan menganalisis penelitian yang ada terkait konsep DTN dan LoRa, studi integrasi keduanya dalam konteks bencana, dan aplikasi spesifik untuk EWS banjir.

### **Studi Pustaka**

Tinjauan pustaka ini disusun berdasarkan tiga kategori utama yaitu landasan konseptual dari setiap teknologi inti, studi mengenai integrasi dan aplikasi dalam skenario bencana, dan konteks spesifik EWS banjir beserta teknologi pendukungnya.

Landasan Konseptual Inti. Kerangka kerja yang diusulkan dibangun di atas tiga pilar teknologi dan konseptual yaitu arsitektur DTN, teknologi komunikasi LoRa, dan prinsip EWS berbasis IoT. *Delay-Tolerant Network* (DTN) adalah sebuah arsitektur jaringan yang filosofi

dasarnya adalah mengakui gangguan komunikasi sebagai fitur melekat, bukan anomali [6], memungkinkan perangkat untuk tetap menjadi bagian dari internet bahkan ketika terputus sementara [6]. DTN beroperasi dengan menyimpan, membawa, dan meneruskan pesan (*bundles*) antar node secara oportunistik [7]. Protokol utamanya, *Bundle Protocol* (BP), memungkinkan interoperabilitas dengan berbagai protokol di bawahnya [7]. Meski minat penelitian terhadap DTN tinggi, sebuah tinjauan literatur menyimpulkan bahwa masih banyak isu yang belum terpecahkan terkait kinerja dan *routing*, terutama yang berkaitan dengan mobilitas, energi, dan kemampuan komputasi *node* [7]. *Long Range* (LoRa) adalah teknologi lapisan fisik yang menggunakan modulasi *Chirp Spread Spectrum* (CSS) untuk komunikasi jarak jauh berdaya rendah [8]. Di atasnya, protokol *LoRa Wide Area Network* (LoRaWAN) mengatur komunikasi dalam topologi *star* [8]. Meski efisien, penelitian menunjukkan bahwa kebutuhan konektivitas untuk *massive IoT* sering melampaui kapabilitas LoRaWAN standar akibat interferensi sinyal dan tabrakan transmisi [8]. Berbagai solusi telah diusulkan untuk mengatasi ini, seperti skema penetapan *Spreading Factor* (SF) yang adaptif dan densifikasi *gateway* [8]. *Early Warning Systems* (EWS) berbasis IoT menyediakan metode efektif untuk mengumpulkan data lingkungan dan menghasilkan peringatan [4]. Umumnya terdiri dari lapisan persepsi, komunikasi, dan aplikasi [4]. Persyaratan utama untuk EWS berbasis IoT meliputi masa pakai baterai yang panjang, toleransi terhadap kegagalan (*fault tolerance*), jangkauan luas, dan latensi rendah [4]. Dalam konteks bencana, tidak ada satu pun teknologi komunikasi yang dapat diandalkan sepenuhnya; oleh karena itu, jaringan hibrida yang mengintegrasikan berbagai teknologi seperti satelit, ad-hoc, dan seluler menjadi penting untuk memastikan komunikasi tetap berjalan [1].

Integrasi Teknologi dan Aplikasi dalam Skenario Bencana. Studi yang paling signifikan adalah yang berhasil menjembatani konsep DTN dengan LoRa. Sebuah penelitian membuktikan bahwa sistem LoRa dengan protokol *Epidemic Forwarding* DTN adalah solusi untuk digunakan oleh tim penyelamat dalam situasi bencana [9], menggunakan LoRaMAC untuk komunikasi *device-to-device* (D2D) secara langsung yang membuktikan bahwa integrasi keduanya adalah praktis [9]. Kinerja LoRa dalam skenario pemantauan bencana juga telah dievaluasi dalam studi yang menyimpulkan bahwa dalam konteks pemantauan bencana, konfigurasi jaringan LoRaWAN harus kokoh agar bila satu parameter jaringan terpengaruh, parameter lain dapat mempertahankan kinerja optimal [10]. Hasil ini mendukung argumen perlunya lapisan protokol yang lebih tangguh seperti DTN. Studi lain secara eksplisit mengintegrasikan protokol DTN dalam konstelasi satelit LEO berbasis IoT untuk pencegahan banjir [5], dimana konsep tumpukan protokol DTN-IoT adalah kandidat yang baik untuk menyelesaikan tantangan yang disajikan oleh skenario NTN (*Non-Terrestrial Network*) dengan konektivitas yang terputus [5]. Untuk mengatasi keterbatasan topologi *star* di LoRaWAN, arsitektur *multi-hop* diusulkan dimana dapat meningkatkan area jangkauan untuk penyebaran IoT skala besar. Sementara *multi-radio* mengurangi sifat *half-duplex* dari radio LoRa [11]. Konsep *multi-hop* ini diimplementasikan dalam berbagai bentuk, termasuk jaringan *mesh* terdesentralisasi untuk pemantauan maritim yang tangguh, menunjukkan peningkatan keandalan transmisi data [12]. Selain itu, DTN telah dirancang dengan topologi hirarkis untuk aplikasi IoT, menggabungkan strategi *flooding* dan *forwarding* untuk menyeimbangkan antara tingkat pengiriman dan efisiensi sumber daya [13].

Konteks Spesifik EWS Banjir dan Teknologi Pendukung. Dalam konteks EWS banjir perkotaan, sistem multi-informasi yang memperhitungkan kerugian akibat banjir menjadi relevan. Sebuah studi menyimpulkan bahwa di antara empat jenis properti bangunan, area perumahan adalah yang paling terpengaruh oleh banjir dan area komersial mengalami kerugian ekonomi terbesar [3]. Dari perspektif sosial, implementasi EWS yang efektif bergantung pada partisipasi komunitas. Sebuah penelitian di Nepal menyimpulkan bahwa pendekatan yang diusulkan membantu memajukan EWS dengan mendukung komunikasi dan penyebaran pesan ke komunitas rentan dan meningkatkan kapasitas respons [14]. Dari sisi perangkat keras, pengembangan *gateway* LoRa berbiaya rendah menjadi menarik. Sebuah studi berhasil mendesain dan mengevaluasi *gateway dual-channel* berbiaya rendah yang meningkatkan *Packet Delivery Rate* (PDR) secara signifikan hingga di atas

94% dibandingkan dengan 80-85% untuk *single-channel* [15]. Desain seperti ini relevan untuk membangun prototipe EWS yang efisien dan ekonomis.

### Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian ini menggunakan metode Tinjauan Literatur Sistematis (*Systematic Literature Review / SLR*) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis penelitian-penelitian yang relevan secara komprehensif. Tinjauan literatur sistematis ini disusun dan dilaporkan mengikuti panduan *Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) 2020 [16]. Pertanyaan penelitian utama yang memandu tinjauan ini adalah: "Bagaimana kelayakan, potensi, dan tantangan dari integrasi arsitektur DTN dan LoRa sebagai solusi EWS banjir yang tangguh berdasarkan literatur ilmiah yang ada?".

Studi dimasukkan dalam tinjauan ini jika memenuhi kriteria inklusi berikut: (a) merupakan artikel jurnal atau prosiding konferensi yang dipublikasikan dalam rentang waktu lima tahun terakhir; (b) membahas setidaknya salah satu dari teknologi inti (DTN, LoRa, atau LoRaWAN) dalam konteks IoT, manajemen bencana, atau sistem peringatan dini; dan (c) menyajikan analisis arsitektur, implementasi, atau evaluasi kinerja. Kriteria eksklusi adalah studi yang fokus utamanya hanya pada aspek pemasaran atau kebijakan non-teknis tanpa pembahasan arsitektur yang mendalam. Pencarian literatur sistematis dilakukan pada tiga *database* publikasi ilmiah utama: IEEE Xplore, ScienceDirect, dan Google Scholar. Strategi pencarian menggunakan kombinasi kata kunci yang relevan dengan domain penelitian meliputi kombinasi dari "*Delay Tolerant Network*", "*LoRa*", "*Early Warning System*", "*Flood Monitoring*", dan "*Disaster Communication*". Variasi kata kunci ini diaplikasikan pada *database* lain untuk memaksimalkan cakupan. Proses seleksi studi dilakukan dalam beberapa tahap. Semua hasil pencarian dikumpulkan dan duplikasi dihapus lalu dilakukan peninjauan secara independen untuk menyaring judul dan abstrak berdasarkan kriteria kelayakan. Artikel yang dianggap potensial diambil teks lengkapnya untuk dievaluasi lebih lanjut.

Dari setiap studi yang disertakan, proses ekstraksi data dilakukan secara sistematis. Informasi yang dikumpulkan meliputi: (a) detail bibliografi (penulis, tahun); (b) tujuan penelitian; (c) arsitektur teknologi yang diusulkan; (d) metodologi evaluasi; (e) hasil utama dan metrik kinerja; dan (f) kesimpulan serta keterbatasan yang dilaporkan. Data ini kemudian dirangkum untuk memfasilitasi analisis. Karena studi yang disertakan bervariasi dalam metodologi dan metrik, meta-analisis kuantitatif tidak dilakukan. Sebagai gantinya, sintesis naratif berdasarkan tema digunakan untuk menganalisis dan merangkum temuan. Hasil dari studi yang relevan dikelompokkan ke dalam tiga kategori yang telah ditentukan sebelumnya: (a) Landasan Konseptual, (b) Integrasi Teknologi, dan (c) Konteks Aplikasi. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi tren dan kesenjangan dalam literatur yang ada untuk menjawab pertanyaan penelitian.

### Hasil dan Pembahasan

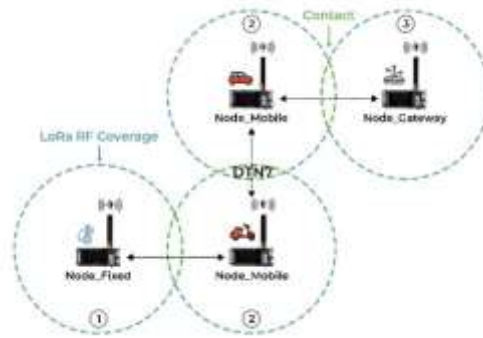
Proses pencarian awal menghasilkan total seratus catatan (*records*) lalu disaring berdasarkan judul dan abstraknya. Dari jumlah tersebut, lima puluh catatan dieksklusi karena tidak relevan dengan pertanyaan penelitian. Teks lengkap dari lima puluh artikel yang tersisa kemudian dievaluasi secara mendalam berdasarkan kriteria kelayakan. Tiga puluh artikel dieksklusi pada tahap ini dengan alasan: (a) tidak fokus pada arsitektur, (b) merupakan tinjauan literatur lain, atau (c) metodologi tidak dijelaskan dengan cukup. Pada akhirnya, sebanyak dua puluh studi dimasukkan dalam sintesis kualitatif ini. Hasil penggabungan dari literatur yang dianalisis memberikan dukungan kuat terhadap kelayakan dan potensi EWS banjir berbasis DTN dan LoRa. Pembahasan ini berpusat pada tiga pilar utama: sinergi teknis, ketangguhan sistem, dan kelayakan implementasi.

Sinergi utama teknis antara DTN dan LoRa terletak pada bagaimana DTN dan LoRa saling melengkapi. LoRa menyediakan lapisan fisik yang efisien [8], namun topologi bintang LoRaWAN standar memiliki keterbatasan [11]. Di sinilah DTN berperan. Dengan menerapkan protokol *routing* DTN, komunikasi *multi-hop* dapat diwujudkan [11] [12]. *Node* sensor dapat menyimpan data sementara dan meneruskannya ke *node* tetangga hingga mencapai *gateway* [6] [7]. Secara spesifik,

sebuah penelitian menyimpulkan bahwa arsitektur *multi-radio* dan *multi-hop* secara efektif mengurangi tantangan komunikasi LoRa untuk penyebaran IoT skala besar; secara kuantitatif, arsitektur ini terbukti mampu mengurangi *delay* rata-rata hingga 60% dan menekan kehilangan paket sebesar 2.9% dibandingkan dengan konfigurasi *single-radio* standar [11]. Konsep ini telah terbukti efektif, di mana implementasi protokol *Epidemic Forwarding* (protokol DTN) di atas LoRaMAC menunjukkan kelayakan yang menjanjikan untuk operasi penyelamatan bencana [9]. Selain itu, berbagai pendekatan untuk membangun jaringan *mesh* di atas LoRa telah dieksplorasi. Di satu sisi, ada pendekatan yang sangat modular dan ringan seperti AllLoRa, yang menggunakan skema *request/reply* sederhana untuk meneruskan pesan antar *node* dan telah teruji di lingkungan maritim [17]. Di sisi lain, ada pendekatan yang lebih terstruktur dengan protokol *routing* yang lebih kompleks seperti OSR-DLM dan BF-LoRaCAPS yang dirancang untuk lingkungan maritim namun dengan fokus pada metrik pemilihan rute yang seimbang dan mekanisme penjadwalan untuk menghindari tabrakan [12].

Peningkatan ketangguhan dan keandalan sistem adalah argumen utama dalam skenario bencana. Studi perbandingan arsitektur jaringan untuk pengumpulan data IoT di jaringan dinamis menyimpulkan bahwa DTN menunjukkan keandalan yang memadai di semua kasus, baik di jaringan stasioner maupun jaringan *mobile* yang terganggu, sementara skema NoD (*NDN-over-DTN*) unggul untuk jaringan *mobile* yang sangat terganggu [18]. Performa LoRa dapat menurun drastis di bawah tekanan, seperti saat jumlah *node* yang mentransmisikan data meningkat pesat [10], menandakan perlunya lapisan protokol yang lebih tangguh seperti DTN. Dengan lapisan DTN, jaringan tak lagi bergantung pada koneksi *end-to-end* yang konstan [7]. Jika sebuah sensor tidak dapat menjangkau *gateway*, pesannya tidak hilang melainkan disimpan dan diteruskan [6][7], yang secara fundamental meningkatkan toleransi kesalahan (*fault tolerance*) EWS [4]. Namun, implementasi jaringan *mesh* yang lebih andal seringkali menghadirkan *trade-off*. Penelitian pada jaringan LoRa maritim menunjukkan bahwa protokol yang memprioritaskan *Packet Delivery Rate* tinggi cenderung memiliki latensi yang sedikit lebih tinggi dibandingkan protokol yang dioptimalkan untuk kecepatan [12]. Konsep ini sejalan dengan skema pada WSN siklus kerja rendah, di mana strategi pengiriman data yang adaptif terbukti mampu mencapai penghematan energi signifikan dengan jaminan *delay* probabilistik, menunjukkan keseimbangan antara keandalan dan efisiensi energi [19].

Dari segi biaya dan implementasi, ide ini sangat layak. Perangkat keras LoRa dikenal berbiaya rendah, dan sebuah studi telah berhasil mendesain dan mengevaluasi *gateway dual-channel* berbiaya rendah yang secara signifikan meningkatkan *Packet Delivery Rate* (PDR) hingga di atas 94%, sebuah peningkatan substansial dari PDR 80-85% yang dicapai oleh *gateway single-channel* dalam kondisi yang sama [15]. Protokol DTN sendiri adalah solusi berbasis perangkat lunak [7]. Berdasarkan sintesis literatur, sebuah model konseptual untuk EWS banjir di Surabaya dapat direkomendasikan. Arsitektur ini dapat terdiri dari: (1) *Node* sensor LoRa berdaya rendah yang menerapkan skema *low duty-cycle* untuk efisiensi energi [19]; (2) Sebuah jaringan *mesh multi-hop* yang menggunakan protokol *routing* DTN seperti *Epidemic Forwarding* [9] atau varian hibrida yang dirancang untuk IoT [13]; (3) Sebuah *gateway dual-channel* berbiaya rendah sebagai titik pengumpulan data [15]; dan (4) Sebuah sistem pemantauan terpusat yang otomatis dan *real-time* untuk analisis kinerja jaringan [20]. Di masa depan, sistem EWS ini bahkan dapat ditingkatkan dengan kecerdasan buatan. Simulasi menunjukkan bahwa agen cerdas yang dioptimalkan dengan *Q-learning* mengungguli protokol tradisional dengan meningkatkan *delivery rate*, latensi, dan efisiensi energi [21].



Gambar 1. Skema konseptual *Node DTN7* sebagai *early warning system*

### Kesimpulan

Tinjauan literatur ini menegaskan bahwa integrasi arsitektur *Delay-Tolerant Network* (DTN) dan teknologi *Long Range* (LoRa) menawarkan solusi yang sangat menjanjikan dan layak secara teknis untuk pengembangan *Early Warning System* (EWS) banjir yang tangguh. Berdasarkan analisis komprehensif terhadap beberapa jurnal relevan, dapat disimpulkan bahwa: 1) Sinergi konsep yang kuat. Secara konsisten, literatur menunjukkan bahwa DTN secara efektif mengatasi kelemahan fundamental LoRaWAN dalam skenario bencana, yaitu ketergantungan pada konektivitas *single-hop* ke *gateway* [7]. Dengan mekanisme *store-carry-forward* [6], DTN terbukti mampu mengubah jaringan LoRa menjadi arsitektur *mesh* terdesentralisasi yang mampu bertahan dari gangguan konektivitas [11] [12] [17]. 2) Terbukti secara praktis. Studi utama berhasil mengimplementasikan protokol *routing* DTN (seperti *Epidemic Forwarding*) langsung di atas LoRaMAC [9] dan merancang arsitektur DTN yang dioptimalkan untuk IoT [13], menunjukkan kinerja menjanjikan dalam skenario simulasi bencana. 3) Meningkatkan ketangguhan sistem. Dalam kondisi jaringan yang sangat dinamis dan terganggu seperti saat terjadi banjir, DTN terbukti memberikan keandalan yang memadai di semua skenario yang diuji [18]. Ini sangat krusial untuk EWS, di mana kegagalan pengiriman satu peringatan saja dapat berakibat. 4) Pentingnya strategi komunikasi yang komprehensif dalam manajemen bencana di Indonesia [2] dan kebutuhan EWS yang mempertimbangkan dampak sosial-ekonomi [3] [14] menjadikan ide ini sangat relevan. Sistem DTN-LoRa dapat mendukung pengumpulan data dan memastikan informasi sampai kepada yang paling membutuhkan, bahkan ketika infrastruktur lumpuh [1].

Tinjauan literatur ini, meskipun komprehensif, memiliki keterbatasan karena hanya mencakup artikel yang dipublikasikan hingga Oktober 2025 dan tidak memasukkan literatur abu-abu (*grey literature*) seperti laporan teknis industri. Namun demikian, bukti yang disintesis memberikan landasan yang kuat. Sebagai penelitian lanjutan, direkomendasikan pengembangan dan pengujian prototipe fisik dari EWS berbasis DTN-LoRa di lapangan. Pengujian ini dapat mencakup pengumpulan data kinerja secara *real-time* dan otomatis untuk menyederhanakan proses evaluasi dan diagnosis kesalahan, sebagaimana ditunjukkan dalam sebuah arsitektur untuk penanganan data otomatis di *gateway* LoRaWAN [20]. Selain itu, eksplorasi penggunaan algoritma *routing* DTN yang adaptif berbasis *machine learning* dapat lebih meningkatkan efisiensi dan ketangguhan sistem [21].

### Daftar Pustaka

- [1] Q. Wang *et al.*, "An Overview of Emergency Communication Networks," Mar. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/rs15061595.

- [2] A. Prasetyo *et al.*, “Critical communication of disaster preparedness areas for informational strategies in disaster management in Indonesia,” Dec. 01, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.pdisas.2024.100368.
- [3] Y. Zang, Y. Meng, X. Guan, H. Lv, and D. Yan, “Study on urban flood early warning system considering flood loss,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 77, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.ijdrr.2022.103042.
- [4] M. Esposito, L. Palma, A. Belli, L. Sabbatini, and P. Pierleoni, “Recent Advances in Internet of Things Solutions for Early Warning Systems: A Review,” Mar. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/s22062124.
- [5] M. Marin-de-Yzaguirre, O. Fuste, and J. A. Ruiz-de-Azua, “Study to integrate Delay-Tolerant Network protocols in IoT LEO constellations for flood prevention,” *Acta Astronaut*, vol. 225, pp. 968–977, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.actaastro.2024.09.004.
- [6] G. Koukis, K. Safouri, and V. Tsaoussidis, “All about Delay-Tolerant Networking (DTN) Contributions to Future Internet,” Apr. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/fi16040129.
- [7] A. Castillo, C. Juiz, and B. Bermejo, “Delay and Disruption Tolerant Networking for Terrestrial and TCP/IP Applications: A Systematic Literature Review,” Sep. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/network4030012.
- [8] M. Jouhari, N. Saeed, M.-S. Alouini, and E. M. Amhoud, “A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges,” May 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3274934.
- [9] Y. Dalpathadu, T. Showry, V. Kuppusamy, and A. Förster, “Disseminating Data using LoRa and Epidemic Forwarding in Disaster Rescue Operations,” 2021, doi: 10.1145/3462203.
- [10] I. R. Lopes, P. R. da S. L. Coelho, R. Pasquini, and R. S. Miani, “Evaluating the Performance of LoRa Networks: A Study on Disaster Monitoring Scenarios,” *Internet of Things*, vol. 6, no. 1, Mar. 2025, doi: 10.3390/iot6010014.
- [11] L. Prade, J. Moraes, E. de Albuquerque, D. Rosário, and C. B. Both, “Multi-radio and multi-hop LoRa communication architecture for large scale IoT deployment,”

- [12] S. E. Elgharbi, M. Iturralde, Y. Dupuis, and A. Gaugue, "Maritime monitoring through LoRaWAN: Resilient decentralised mesh networks for enhanced data transmission," *Comput Commun*, vol. 241, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.comcom.2025.108276.
- [13] E. A. Abdellaoui Alaoui, S. C. Koumetio Tekouabou, A. Gallais, and S. Agoujil, "DTN Routing Hierarchical Topology for the Internet of Things," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2020, pp. 490–497. doi: 10.1016/j.procs.2020.03.107.
- [14] A. Shrestha, A. McCrone, J. Láng-Ritter, S. Gautam, M. Taka, and O. Varis, "Bridging gaps, saving lives: Integrating communities' voices and impact mapping into flood early warning systems in rural Nepal," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 118, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.ijdrr.2025.105238.
- [15] W. I. S. Bine and L. B. R. Aylon, "Design of a Low-Cost Gateway with LoRa Technology Serving Multiple Devices," *Sensors*, vol. 25, no. 16, Aug. 2025, doi: 10.3390/s25164948.
- [16] M. J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," Mar. 29, 2021, *BMJ Publishing Group*. doi: 10.1136/bmj.n71.
- [17] B. Arratia, E. Rosas, C. T. Calafate, J. C. Cano, J. M. Cecilia, and P. Manzoni, "AllLoRa: Empowering environmental intelligence through an advanced LoRa-based IoT solution," *Comput Commun*, vol. 218, pp. 44–58, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.comcom.2024.02.014.
- [18] V. Tsaoussidis, V. Demiroglou, M. Martinis, and D. Florou, "IoT Data Collection Over Dynamic Networks: A Performance Comparison of NDN, DTN and NoD." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/376238818>
- [19] S. Singh, V. Anand, and P. K. Bera, "A Delay-Tolerant low-duty cycle scheme in wireless sensor networks for IoT applications," *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, vol. 4, pp. 194–204, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.ijcce.2023.04.005.

- [20] M. Quiñones-Cuenca, E. Briceño-Sánchez, H. Jiménez-Salcedo, S. Quiñones-Cuenca, L. E. Castro Eras, and C. Carrión Betancourt, “Architecture for Automated Real-Time Bidirectional Data Handling in LoRaWAN Gateways,” *Automation*, vol. 6, no. 3, Sep. 2025, doi: 10.3390/automation6030038.
- [21] E. M. Sammou, “Intelligent Routing Agent Based on Q-Learning and Markov Decision Processes for Routing Optimization in DTN Networks,” *International Journal of Intelligent Networks*, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.ijin.2025.07.001.