Adaptive Transmission Multi-Path Protocol untuk IKN Smart City

Muhamad Asvial 1, Annastya Bagas. Dewantara 1

1 Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia

Email: [asvial@eng.ui.](mailto:asvial@eng.ui.)ac.id; annastya.bagas@ui.ac.id

\*Corresponding author

**Abstract**— Kehadiran *Wireless Sensor Networks* (WSN) telah merevolusi metodepengumpulan data di berbagai sektor seperti tatisti, otomotif, militer, pertanian, dan medis. Perkembangan teknologi manufaktur mendorong sensor WSN pada aplikasi seperti *Internet of Underwater Things* (IoUT), di mana *Underwater Wireless Sensor Network* (UWSN) memegang peran vital. UWSN hadapi atenuasi, interferensi, dan noise, mempengaruhi IoUT dalam energi, latensi, dan reabilitasnya. Penelitian ini bertujuan untuk merancang serta menganalisis protocol routing optimum melalui pendekatan berbasis *artificial intelligence* (AI) dengan algoritma *Reinforcement Learning* (RL) dalam penentuan jalur transmisi optimum, klasterisasi K-Means untuk pemilihan *cluster head* (CH), serta penggunaan *multi-layer trilateration* dalam meningkatkan *coverage*, *network lifetime* serta energi konsumsi dari UWSN. Pendekatan *mix-method* digunakan: analisis numerik, tatistic, serta interpretasi kualitatif, dengan sampling eksperimental berbasis simulasi melalui model matematis untuk representasi transmisi di bawah laut.

**Keywords**—first term, second term, third term, fourth term, fifth term, sixth term, seventh term

# Introduction

Pemindahan ibu kota negara Indonesia dari DKI Jakarta menuju Ibu Kota Nusantara (IKN) merupakan program pemerintah Indonesia dalam menciptakan pemerataan pembangunan sekaligus untuk mempercepat transformasi ekonomi Indoneisa. Dalam mencapai tujuan tersebut, perencanaan pembangunan infrastruktur dari IKN harus mempertimbangkan faktor-faktor sekuritas serta keselamatan masyarakat. IKN terletak pada persimpangan lempeng Indo-Australia, lempeng pasifik dan lempeng Eurasia, yang menyebkan aktivitas pergeseran tektonik sering terjadi yang berpotensi terjadi bencana tsunami [1]. Salah satu tindakan preventif dari pencegahan tsunami adalah dengan menempatkan beberapa wireless sensor salah satunya sensor pressure akustik untuk memonitoring serta mendeteksi terjadinya aktivitas pergeseran tektonik yang digunakan sebagai system early warning tsunami [2], [3].

Kehadiran Wireless Sensor Network (WSN) telah merevolusi metode pengumpulan data serta proses monitoring data di dalam berbagai bidang meliputi industrial, automotive, military, agriculture, serta medical [4], [5], [6], [7], [8]. WSNs merupakan jaringan yang terdiri atas multiple small node yang memiliki kemampuan untuk melakukan sensing, komputasi serta komunikasi nirkabel satu sama lain ataupun ke base station (BS) melalui machine-to-machine protocol. Perkembangan teknologi manufaktur telah mendorong perkembangan teknologi sensor pada WSNs, salah satu dari penerapan tersebut adalah Internet of Underwater Things (IoUT) yang diterapkan melalui *floating buoy* atau *anchor buoy* untuk pengambilan data suhu, salinitas, tekanan, dan Cahaya [9], [10], [11]. Underwater Wireless Sensor Network merupakan arsitektur yang mengatur protocol transmisi dan penerimaan data dari IoUT. Permasalahan utama yang terjadi pada implementasi sistem UWSN adalah permasalahan atenuasi, interferensi, serta noise yang disebabkan oleh pengaruh lingkungan dan aktivitas manusia [12]. Protokol *routing* memainkan peranan penting dalam mengendalikan proses transmisi, agregasi serta integrasi data, yang berperngaruh pada reabilitas, latensi serta efisiensi energi dari UWSN. Selain itu, strategi *deployment* dari UWSN memiliki pengaruh terhadap skalabilitas serta *lifespan* dari UWSN[13]*.* Sehingga, desain protokol *routing* serta strategi *deployment* menjadi krusial dalam perancangan arsitektur UWSN untuk meningkatkan network lifetime, efisiensi penggunaan energi serta jumlah throughput yang dihasilkan dari sensor.

Terdapat beberapa pendekatan yang dapat dilakukan pada optimalisasi energy WSNs, Kamal dan Al-Karaki membagi jenis routing protocol berdasarkan network structure yakni flat, hierarchical dan location based protocol yang dapat dibagi kembali berdasarkan routing protocol yang diambil yakni multipath-based, query-based, negotiation based, quality of service (QoS) based dan coherent-based tergantung pada operational protocol yang digunakan [14]. Pada routing protocol network structure, system hierarichal based protocol memiliki keunggulan dari flat dan location based protocol karena pada hierarchical based protocol terdapat the selection of node dimana sensing information is assigned to the nodes with low energy sedangkan data processing dan data transmisi di bebankan pada node dengan energy tinggi, sehingga lifetime, scability serta minimisasi energy dapat dicapai [15]. Liu membagi hierarchical based protocol ke dalam empat bagian yakni chain-based protocol, tree-based protocol, grid-based protocol, area-based protocol serta cluster-based protocol [16], dan menunjukkan keunggulan dari cluster-based protocol dalam hal scalability, load balancing serta network life.

Dalam mengatasi permasalahan *atenuasi*, *noise* dan limitasi energi beberapa pendekatan telah dilakukan, Rizvi et.al menggunakan pendekatan cluster-based protocol dengan menerapakan protocol LEACH, untuk menciptakan distribusi energy merata dengan membagi beban energy consumption yang sama pada setiap node[17], akan tetapi Pemilihan Cluster Head (CH) serta jumlah cluster pada LEACH di setiap rondenya didasarkan atas probabilitas random, yang menyebabkan system eleksi node untuk menjadi CH pada node dengan energy tinggi dan node dengan energy yang rendah memiliki probabilitas yang sama dan menyebabkan kehadiran orphan node karena letak CH yang jauh dari node, yang mana menjadi permasalahan pada LEACH. Terlebih lagi pada pengiriman data dari CH kepada BS masih didasarkan atas single hop, yang menjadikan penerapan LEACH tidak ideal pada large network [18].

Dalam mengatasi pemilihan CH random pada LEACH, Omeke et.al menerapkan system pemilihan CH yang di dasarkan atas algoritma K-Means dengan menggunakan parameter jarak antar Cluster serta threshold energy untuk node dapat terpilih sebagai CH, yang meningkatkan network balance dan load balance pada network [19], pendekatan serupa juga dilakukan oleh Krishnaswamy et.al, melalui pendekatan Fuzzy Logic pada LEACH untuk melakukan pemilihan CH dengan membagi node ke dalam beberapa level energy dan jarak antar cluster [20], akan tetapi pendekatan ini hanya menyelesaikan permasalahan yang terjadi pada setup phase, namun belum dapat menyelesaikan permasalahan orphan node serta transmisi single hop yang terlalu jauh pada proses Steady State.

Dalam mengatasi permasalahan yang terjadi pada transmisi single hop, Hu and Fei melakukan pendekatan transmisi multi hop menggunakan algoritma Q-Learning, untuk menurunkan energy yang terjadi pada proses Overhead serta menurunkan keberadaan node failure yang terjadi akibat orphan node. Pemilihan jalur multi hop dilakukan berdasarkan energy residual dari node asal hingga node tujuan [21], akan tetapi pendekatan menggunakan flat-based protocol memiliki skalabilitas yang rendah terutama pada network dengan area yang luas.

Strategi deployment dari UWSN memiliki pengaruh terhadap skalabilitas dan network lifetime dari UWSN, terutama pada implementasi yang membutuhkan resolusi pembacaan tinggi seperti aplikasi militer, tactical surveillance dan disaster prevention yang membutuhkan coverage serta jarak transmisi yang luas. Dalam mengatasu permasalahan tersebut, Pompli et.al mengajukan strategi trilateration untuk menentukan jumlah node optimum pada UWSN yang memperhitungkan coverage sensing serta jarak transmisi maksimum dari node [22]

Dalam mengatasi permasalahan atenuasi, interferensi ,noise serta coverage yang terdapat pada UWSN, penelitian ini dilakukan dengan menerapkan konsep multi-layer trilateration untuk meningkatkan coverage sensing, konsep K-Means untuk memilih CH optimum serta multi agent Q-Learning untuk menciptakan route optimum pada setiap CH dan orphan node secara multi-hop untuk mengurangi jarak yang ditempuh dari CH ke BS maupun orphan node ke CH atau BTS. Penentuan CH serta route optimum akan didasarkan pada jarak serta energy residual dari masing-masing node terhubung untuk menciptakan load balancing pada UWSN. Evaluasi performa dari pendekatan ini akan dilakukan dengan membandingkan performa pada LEACH konvensional dengan pendeketan yang dilakukan, meliputi performa packet delivered, energy consumption serta network lifetime.

Penulisan dari paper ini dibagi ke dalam beberapa section, yakni : 1. Introduction, which explains the background, problem formulation, research objectives, scope, and research systematics; 2. related work, which contains previous research that has been done before; 3 Proposed model, this section describes the research steps carried out consisting of the research approach, research methods used, and simulation design; 4. Result and Analysis This section describes the results and discussion

of the simulations that have been carried out, which were evaluated on specific parameters; 5. In conclusion, this section contains findings drawn from the results and discussion, considering the research objectives and suggestions for research development.

# Underwater Acoustic Channel Model

Pemodelan dari karakteristik chanel akustik bawah air secara garis besar dipengaruhi oleh tiga komponen yakni propagation loss, propagation delay dan noise. Nilai dari masing-masing komponen tersebut di pengaruhi oleh parameter-parameter seperti frekuensi operasi, jarak transmisi, kedalaman, salinitas, temperature serta pH pada lingkungan bawah air yang di dasarkan atas karakteristik dari lingkungan bawah air yang digunakan. Pemodelan dari karakteristik chanel akustik tersebut bertujuan untuk menghitung link budget serta mengetahui performa dari protocol UWSN yang digunakan.

Propagation loss merupakan besar loss yang dialami pada saat transmisi dari node satu ke node lainnya, loss tersebut disebabkan akibat absorbtion yang disebabkan oleh magnesium sulphate, boric acid, pergerakan partikel dan geometrical spreading. merupakan propagation loss yang nilainya dipengaruhi oleh nilai jarak , frekuensi dengan satuan kilohertz, koefisien spreading dan koefisien absorbsi , yang ditunjukkan pada persamaan (1). Besar nilai dipengaruhi oleh geometrical spreading untuk spherical , untuk cylindrical , dan untuk practical digunakan [12].

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Pada pemodelan koefisien atenuasi, terdapat beberapa model yang digunakan, yakni Thorp, Fisher & Simons dan Ainslie & McColm. Persamaan Ainslie & McColm memiliki hasil yang akurat, karena menggunakan parameter kedalaman, temperature, salinitas dan pH dalam pemodelannya [23] Persamaan dari Anslie & McColm ditunjukkan pada persamaan (2), dengan temperature dalam celcius , salinitas dalam ppt , dan adalah frekuensi relaksasi dengan satuan kilohertz, dan kedalaman dengan satuan kilometer.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

Komunikasi akustik nirkabel dipengaruhi oleh media yang dilalui, yang mana mempengaruhi throughput, latensi dan quality of service pada komunikasi data. Terdapat beberapa pemodelan yang digunakan untuk memodelkan kecepatan suara untuk propagasi bawah air, salah satunya adalah persamaan MacKenzie yang ditunjukkan pada persamaan (3), persamaan MacKenzie memiliki pemodelan yang lebih akurat ketimbang pemodelan lain seperti persamaan Medwin, pada pemodelan kedalaman lebih dari 1 km [24].

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

Selain kecepatan suara, besar noise juga mempengaruhi quality of service dari komunikasi akustik. Ambient noise model merupakan model yang digunakan dalam merpresentasikan kehadiran noise pada bawah air, Ambient noise model dapat direpresentasikan ke dalam bentuk Gaussian dan memiliki continous power spectral density, dengan sumber noise terbesar adalah turbulensi , aktivitas kapal , ombak yang terbentuk akibat peregerakan angin dan pengaruh termal [25], yang direpresentasikan pada persamaan (4).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

Dalam memperhitungkan besar transmisi daya serta QoS yang digunakan, perhitungan link budget dilakukan dengan mempertimbangkan signal-to-noise-ratio (SNR) yang nilainya dipengaruhi oleh atenuasi dan noise dengan jarak dan frekuensi sebagai variable dependant, yang ditunjukkan pada persamaan (5).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

# Propose Method

Desain protokol routing serta strategi deployment memiliki peranan penting dalam menghadapi propagation loss, propagation delay serta noise merupakan pada implementasi UWSN. Dalam menghadapi permasalahan tersebut, penelitian ini menggunakan strategi deployment multi-layer trilateration dilakukan sebagai pengembangan dari trilateration oleh Pompili et.al [22], untuk meningkatkan coverage pembacaan serta mengurangi rendundant node yang di deploy dengan memerhatikan jarak transmisi maksimum serta jarak sensing dari sensor yang ditunjukkan pada Fig 1. Pada desain protokol routing, penggunaan multi-hop LEACH dengan algoritma K-Means dan Q-learning digunakan untuk meningkatkan network lifetime, efisiensi penggunaan energi serta jumlah throughput yang dihasilkan oleh sensor.

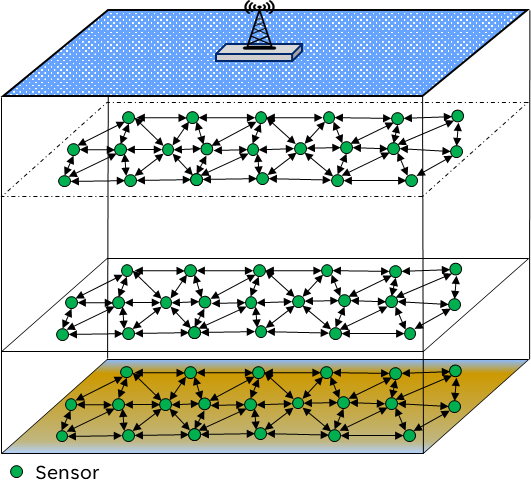


Fig 1. Propose method architecture

LEACH merupakan hierarichal-based routing protocol yang membagi masing-masing node nya ke dalam bentuk structural ke dalam CH dan node member. LEACH juga dapat dikategorikan sebagai cluster-based routing protocol yang membagi jaringannya ke dalam bentuk cluster. Transmisi data dari LEACH menggunakan time-division-multiple-access (TDMA), karena pendekatan menggunakan TDMA menggunakan konsumsi energy yang rendah dengan menyimpan energy pada keadaan idle ketika channel sedang digunakan [26], Heinzelman et al. menjelaskan penggunaan TDMA bertujuan untuk menghindari terjadinya collision dan memudahkan pembagian bandwidth dengan fixed channelization scheme ketimbang FDMA yang memerlukan dynamic channelization scheme karena jumlah cluster yang tidak tentu di setiap rondenya. Pada pengoperasiannya pada tiap round, LEACH akan memiliki dua phase yakni set-up phase dan steady-state phase, yang ditunjukkan pada Fig 2.

A black and white rectangular object with black text

Description automatically generated

Fig 2. LEACH operation time line

Pada protocol LEACH, node yang tidak memiliki data untuk dikirim akan mengalami idle pada periode waktu tertentu dan node yang memiliki data akan melakukan penerimaan dan pengiriman data ke CH/BS. Persamaan yang digunakan pada pemodelan UWSN menggunakan model modifikasi dari Rizvi et.al [27], dengan mengubah dari bentuk energi ke dalam bentuk daya serta menghapus unsur energi disipasi dari pengaruh energi elektronik pada persamaan karena nilai nya yang jauh lebih kecil ketimbang energy transmit, idle dan receive. Modifikasi persamaan tersebut menyerupai persamaan Li dan Lazarou [28], dengan penambahan disipasi energi pada pembentukan cluster.

Daya yang dibutuhkan pada saat pengiriman data dari node member ke CH serta dari CH ke BS di representasikan sebagai pada persamaan (6), yang dipengaruhi oleh propagation loss pada persamaan (1). Sebaliknya daya yang dibutuhkan untuk menerima data di representasikan dengan . Daya idle merupakaan energy disipasi ketika node tidak melakukan pengiriman data.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

Bernoulli trial digunakan untuk memodelkan event pengiriman data dari node yang ditunjukkan pada persamaan (7) dengan probabilitas dari node memiliki data untuk dikirim adalah , banyak trial dalam hal ini adalah jumlah node, dan nilai expected value merupakan perkiraan jumlah node yang dapat melakukan pengiriman data [28]

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

Besar throughput dari UWSN dipengaruhi oleh medium propagasi yang mempengaruhi kecepatan propagasi. Pada WSN terrestrial kecepatan propagasi dari pengiriman data adalah kecepatan cahaya sehingga ratio delay antara waktu transmisi dan waktu propagasi mendekati nol. Ketiga komponen tersebut di tunjukkan pada persamaan (8)-(10). Pada TDMA nilai dipengaruhi oleh control packet , data packet , dan dalam bytes dan adalah bitrate dengan satuan bit/s. Pada UWSN, kecepatan propagasi sensor akustik dipengaruhi oleh medium bawah air yang ditunjukkan pada persamaan (3), yang menyebabkan ratio delay pada UWSN signifikan lebih besar ketimbang WSN terrestrial.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |
|  | (9) |
|  | (10) |

Pada pemilihan cluster head, LEACH menggunakan non-persistent carrier-sense-multiple-access-collision-avoidance (CSMA/CA). Non-persistent CSMA memiliki throughput lebih besar ketimbang 1-persistent CSMA dan p-persistent CSMA karena non-persistent CSMA menggunakan teknik random backoff untuk mengecek apakah channel busy berdasarkan periode waktu random [29]. Persamaan throughput dari Non-persistent di representasikan oleh dan ditunjukkan pada persamaan (11).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

Pada setup phase proses pemilihan CH, dilakukan berdasarkan probabilitas random pada setiap rondenya, yang dapat menyebabkan permasalahan, salah satunya adalah jarak node member dengan CH yang terlalu jauh. Hal ini menyebabkan node tidak dapat melakukan pengiriman data dan menjadi orphan node, serta node failure yang terjadi akibat energy node habis ketika melakukan pengiriman.

Dalam mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan dengan menggunakan algoritma K-Means clustering pada menentukan pemilihan CH. Jarak transmisi memiliki peranan penting pada proses disipasi energi. Semakin besar jarak antar CH dengan member node, semakin besar juga energi yang digunakan pada proses pengiriman data. Pada penelitian ini penentuan CH di dasarkan atas parameter koordinat lokasi serta energi residual dari node.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |

Dalam menentukan klaster, algoritma K-Means menggunakan fungsi objektif untuk meminimalkan euclidian distance dari centroid dengan terhadap vektor node i-th dari banyak sensor dan banyak klaster , yang di tunjukkan pada persamaan (12), dengan fungsi objektif ditunjukkan pada persamaan (13). Algoritma K-Means clustering memperbarui posisi centroid pada setiap iterasinya. Proses update dari posisi centroid di dasarkan atas derivasi parsial, dengan posisi centroid setelah di update berubah terhadap derivasi parsial dari fungsi objektif yang ditunjukkan pada persamaan (14).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (13) |

Tahapan pemilihan CH dan pembentukan kluster, tidak hanya dilakukan pada optimasi teknik pemilihan klister, namun juga dengan menambahkan perhitungan jumlah kluster optimum. Penelitian terkait penentuan jumlah kluster optimum telah banyak dilakukan, Zytoune et.al melakukan perhitungan kluster berdasarkan area, banyak node serta jarak ke base station [30], Hamaali et.al menggunakan elbow method dalam menentukan kluster optimum berdasarkan nilai sum of squared dari jarak node terhadap nilai centroidnya [31]. Akan tetapi, terdapat limitasi pada kedua pendekatan tersebut, yakni perhitungan optimum kluster hanya di dasarkan atas koordinat lokasi dari node. Penelitian ini menggunakan Shiloutte method dengan mempertimbangkan energi residual dari node dalam menghitung optimum kluster sebelum melakukan proses pemilihan CH.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (14) |

Proses penunjukkan node sebagai CH, dilakukan berdasarkan nilai tertinggi. Nilai merepresentasikan score pemilihan CH dari jarak euclidian dari node satu dengan node lainnya pada satu kluster serta energi residual dari masing-masing node yang ditunjukkan pada persamaan (7). Dalam proses perhitungan , transformasi data dilakukan melalui standardisasi dilakukan untuk menyamakan skala dari lokasi koordinat dengan energi.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (15) |

Pada proses pemilihan CH, node yang terpilih untuk menjadi CH akan mengirimkan control packet ke base station untuk menginformasikan status pengangkatannya sebagai CH, node yang memiliki data untuk dikirim akan mengalami idle yang dimodelkan melalui bernoulli trial pada persamaan (9). Setelah control packet diterima oleh base station, base station akan mengirimkan control packet kembali kepada CH yang berisikan schedule pengiriman data dari masing-masing kluster. Ketiga tahapan tersebut di representasikan pada persamaan (16) sebagai pemodelan disipasi energi pada proses seleksi.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (16) |

Masing-masing dari CH akan membroadcast advertisement message menggunakan non persistent CSMA dari media-access-control (MAC) protocol yang ditunjukkan pada persamaan (19). Setiap node menentukan daerah cluster nya masing-masing berdasarkan received energy strength dari CH yang ditunjukkan pada persamaan (20), dengan mengirimkan join-request message ke CH.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (19) |
|  | (20) |

Pada steady state phase, setiap CH membentuk TDMA schedule dan melakukan broadcast dari schedule tersebut ke seluruh node pada clusternya , sebagai konfigurasi dari data transmisi yang ditunjukkan pada persamaan (21). Masing-masing dari node akan menerima schedule yang diterima dari broadcast CH, kemudian mengirimkan packet control kepada CH dan mengalami fase idle yang ditunjukkan pada persamaan (22).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (21) |
|  | (22) |

Masing-masing dari node akan mengirimkan data packet kepada CH kedalam bentuk frame untuk dialokasikan ke dalam slot transmisi dengan durasi frame pada tiap member node adalah konstan yang ditunjukkan pada persamaan (23). Data packet tersebut diterima dan di agregasi oleh CH untuk kemudian dikirimkan ke base station ditunjukkan pada persamaan (24) menggunakan transmisi single hop.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (23) |
|  | (24) |

Penggunaan transmisi single hop seringkali menyebabkan terjadinya node failure. Salah satu penyebab terjadinya node failure adalah jarak pengiriman data dari node terhadap CH melebihi jarak transmisi maksimum, yang menyebabkan node tidak dapat melakukan pengiriman data dan menjadi node orphan. Dalam mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini melakukan pendekatan transmisi multi hop dengan reinforcement learning untuk menciptakan rute optimum sebagai jalur transmisi data.

Reinforcement Learning (RL) merupakan teknik pemodelan yang bertujuan untuk mencapai tujuan tertentu berdasarkan pengalaman yang dilakukan oleh agent dalam mengevaluasi action yang dilakukan pada state yang diberikan [32]. Algoritma RL di dasarkan atas Markov Decision Process (MDP) yang dikarakteristikan oleh kehadiran empat parameter yakni , dimana adalah set of states, set of actions, set of transition probabilites dan adalah set of rewards.

Pada MDP, komponen terdiri atas yang merepresentasikan probabilitas dari state ke state selanjutnya pada aksi yang dilakukan oleh agent. Probabilitas dari perpindahan state terhadap state ditunjukkan pada persamaan (25), dengan total dari probabilitas bernilai satu, dengan dan .

|  |  |
| --- | --- |
|  | (25) |

Perpindahan yang dilakukan oleh agent state ke state selanjutnya pada aksi dan waktu akan memperoleh direct reward yang ditunjukkan pada persamaaan (26). Persamaan tersebut merepresentasikan akumulasi dari immediate reward yang didapatkan oleh agent dalam melakukan aksi pada seluruh possible next state.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (26) |
|  |  |

Transisi dari state ke state selanjutnya ditentukan oleh aksi , yang menyebabkan pengambilan keputusan atas aksi yang dilakukan memiliki peranan penting dalam mencapai tujuan. Penggunaan policy digunakan dalam menentukan aksi terbaik pada suatu state ke dalam bentuk probabilitas yang di dasarkan atas expected reward [33], yang ditunjukkan pada persamaan (27).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (27) |

Nilai dari state pada policy sebagai expected total reward sebagai value function di representasikan dengan yang ditunjukkan pada persamaan (28). Value dari dipengaruhi oleh discount factor . Nilai berada pada interval , nilai yang rendah akan membuat pengaruh current reward lebih signifikan dari future reward, akan tetapi hal ini dapat menyebabkan model cenderung konvergen ke local optimum dan bukan global optimum, sebaliknya nilai yang tinggi akan menyebabkan model sensitif dan slower learning [34], dengan nilai merepresentasikan index dari future step.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (28) |

Tujuan dari reinforcement learning adalah mendapatkan nilai state optimum. Nilai state optimum di dapatkan dengan memaksimumkan nilai . Nilai dari dipengaruhi oleh policy dalam pengambilan aksi. Maka untuk mendapatkan , pengambilan aksi harus di dasarkan atas nilai maksimum dari reward yang di dapatkan yang disebut sebagai bellman equation [32].

|  |  |
| --- | --- |
|  | (29) |

Secara teori nilai dari policy optimum dapat diselesaikan menggunakan persamaan (29), akan tetapi pendekatan ini membutuhkan waktu yang cukup lama untuk konvergen, membutuhkan komputasi besar dalam pemrosesannya serta membutuhkan pengetahuan terhadap environment seperti transition probabilities atau reward dari model [35], yang mana hal ini sulit dilakukan pada wireless sensor communicatioin karena lingkungan dari network yang dinamik dan unpredictable serta resource seperti energi yang terbatas.

Dalam mengatasi permasalahan tersebut, pendekatan model free dengan Q-learning digunakan untuk mengetahui policy optimum dari aksi pada state yang di representasikan pada persaamaan (30), ketimbang mengevaluasi seluruh policy pada state seperti persamaan (29) yang membutuhkan komputasi besar.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (30) |

Sama halnya seperti , tujuan akhir dari Q-learning adalah untuk mendapatkan policy optimum dari sebagai Q function. Namun, perbedaan antara dengan adalah pada pengambilan strategi optimum bertujuan untuk mendapatkan aksi yang dapat memaksimumkan nilai di tunjukkan pada persamaan (31).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (31) |

Penentuan policy optimum dari membutuhkan iterasi berulang terhadap seluruh state dan seluruh aksi serta membutuhkan informasi terhadap transition probabilities dari lingkungan. Dalam mengatasi permasalahan tersebut, pendekatan temporal difference dilakukan untuk mengestimasi nilai melalui proses iterasi untuk mengupdate nilai dari . Pada temporal difference, agent berinteraksi dengan lingkungannya pada setiap time step secara sequential untuk mengupdate nilainya berdasarkan nilai immediate dan future reward sepanjang waktu yang ditunjukkan pada persamaan (32).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (32) |

Pengambilan aksi untuk mendapatkan policy optimum pada reinforcement learning seringkali dihadapkan permasalahan exploration dan exploitation. Exploration merupakan pengambilan aksi baru untuk mendapatkan informasi dari lingkungan, menurunkan tingkat uncertainty dan mencegah model untuk konvergen di local optima. Exploitation merupakan pengambilan aksi optimum yang didasarkan atas pengetahuan model, exploitasi yang terlalu berlebihan dapat menyebabkan model mengalami konvergen prematur pada local optima. Dalam menyeimbangkan permasalahan exploration dan exploitation, penggunaan algoritma -greedy digunakan pada persamaan (32) dengan mentuning nilai untuk mendapatkan policy optimum [36].

Pemodelan lingkungan UWSN dari Q-learning bertujuan untuk menciptakan transmisi multi hop untuk pengiriman data dari orphan node ke base station. Pemodelan diawali melalui pembentukan graph dengan masing-masing vertex merepresentasikan node serta edge yang menghubungkan vertex , merepresentasikan relasi antar vertex. Node tersebut di rerepsentasikan ke dalam bentuk state , dengan nilai Graph tersebut membentuk adjacency matrix yang digunakan sebagai immediate reward pada persaamaan (34). Adjcacency matrix sebagai graph memudahkan interpretasi dalam memahami relasi serta karakteristik dari jaringan [37]. Nilai edge yang menghubungkan vertex, disusun menggunakan weighted ege yang didasarkan atas energi residual serta jarak terhadap node pada state selanjutnya yang ditunjukkan pada persamaan (33), yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi dari network [38].

|  |  |
| --- | --- |
|  | (33) |
|  | (34) |

Proses multi hop dilakukan melalui sensor satu ke sensor lainnya hingga mencapai base station. Dalam melakukan transisi dari state satu ke state lainnya, agent harus melakukan aksi, pengambilan aksi berbeda-beda pada setiap state . Ilustrasi proses pengiriman data ditunjukkan pada Fig 3., ditunjukkan proses pengiriman data dari sensor ke-1 yang di representasikan pada . Ilustrasi tersebut menunjukkan pengiriman data dari state ke base station melalui pengambilan aksi awal dari tiga aksi berbeda . Perpindahan state ke state dilakukan berdasarkan pengambilan aksi dari possible aksi pada state berdasarkan policy optimum dari yang di update berdasarkan immediate reward .

A diagram of a diagram

Description automatically generated

Fig 3. State transition

Pada fase steady state, terdapat beberapa orphan node yang tidak memiliki CH untuk dikirimkan data, sehingga node orphan tersebut harus mengirimkan data secara multi hop ke base station. Masing-masing sensor tersebut bergerak sebagai agent dan mengirimkan data dengan mengupdate graph tersebut secara dinamik dan sequential yang ditunjukkan pada Algorithm 1., yang dikenal sebagai Sequential Multi-agent reinforcement learning [39].

|  |
| --- |
| Algorithm 1 Multihop Transmission Pseudocode |
| Input : *,*  Output :  For each do:  Create a graph and reward function  State of the orphan node  For each episode do:  While not base station do:  uniform random [0,1]  If Then:    Else:    End        End For  End For |

# Methodology

Penelitian ini bertujuan untuk merancang desain protokol routing adaptif dengan menggunakan metode Multi-agent reinforcement learning pada transmisi multi-hop untuk node orphan dan K-Means algorithm dalam pemilihan CH. Analisis serta pemodelan matematis dari underwater akustik channel di perairan laut IKN untuk memberikan informasi serta pemahaman tambahan yang berguna pada penerapan implementasi UWSN terhadap karakteristik lingkungan tersebut.

Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan mix-method dengan menggabungkan pendekatan kuantitatif melalui analisis numerik dan tatistic serta pendekatan kualitatif dalam menginterpretasi aspek-aspek yang mempengaruhi hasil dari simulasi dan komparasi. Metode sampling dilakukan secara eksperimental berbasis simulasi program komputer melalui pemodelan lingkungan bawah air laut IKN yang didasarkan atas parameter-parameter yang ditunjukkan pada Table 1, hasil studi literatur serta hasil analisis yang dilakukan.

TABLE I. Simulation Parameters

| **Parameters** | **Values** |
| --- | --- |
| Depth | 1000 m |
| Length | 1000 m |
| Width | 1000 m |
| Sensing range | 250 m |
| Transmission range | 1200 m |
| Spreading factor | 2 |
| Number of frames | 10 |
| Control packet | 1 bytes |
| Data packet | 2500 bytes |
| Initial energy | 1 J |
| Bernoulli probability | 0.9 |

Studi literatur dilakukan dalam menentukan karakteristik dari perairan IKN. Karakteristik tersebut mencakup nilai salinitas, pH, temperatur dan kecepatan angin, yang di dapatkan melalui penelitian yang telah dilakukan sebelumnya maupun asumsi berdasarkan fenomena atau keadaan tertentu. Selain karakteristik perairan IKN, penentuan nilai frekuensi optimum juga dilakukan melalui analisis nilai propagation loss serta noise dengan memvariasikan kedalaman dari peletakkan sensor.

Penelitian ini juga melakukan analisis link budget yang diperlukan untuk menentukan daya yang dibutuhkan untuk melakukan pengiriman data apabila nilai SNR yang diinginkan bernilai 30 dB. Analisis throughput dilakukan untuk mengetahui kinerja variasi protokol lainnya serta protokol yang digunakan, yang berguna sebagai data pendukung terhadap metode yang digunakan.

Proses iterative sampling dilakukan untuk menganalisis performa dari model dengan melakukan komparasi menggunakan metode-metode yang telah dilakukan sebelumnya. Evaluasi performa dilakukan menggunakan metriks network lifetime, packet sent, dan energi konsumsi, untuk mengetahui kelebihan dan limitasi pada metode yang diajukan.

# Result and Discussion

Informasi karakteristik perairan laut IKN tersebut bertujuan untuk mengetahui model dari underwater akustik channel. Laut IKN terletak pada daerah selat makassar. Pada kedalaman 1 km, laut IKN memiliki karakteristik dari salinitas, pH dan temperatur sebesar 34.31 ppt, 7.82 dan 4.11 [40], [41]. Selat makassar dipengaruhi oleh angin southeast monsoon yang menybebkan fenomena upwelling dengan kecepatan angin 6 m/s [42]. Pembangunan IKN bertujuan untuk menggantikan perkembangan ekonomi dari Jakarta. Hal ini memicu terjadinya peningkatan aktivitas kapal dari aktivitas pengiriman logistik ataupun perdagangan [43]. Atas dasar tersebut, penentuan konstanta aktivitas kapal yang diperlukan pada peramaan (4) di asumsikan bernilai 0.8.

Noise merupakan komponen penentu kualitas sinyal yang diterima. Distribusi noise pada perairan laut IKN dalam pemodelan underwater akustik channel dilakukan menggunakan persamaan (4) dengan parameter karakteristik perairan IKN di dapatkan bahwa pengaruh turbulensi memiliki pengaruh tinggi pada frekuensi 0-10 Hz. Pada frekuensi 10-100 Hz, aktivitas kapal memiliki pengaruh tinggi. Pada frekuensi 100 Hz - 100 kHz pengaruh dari kecepatan angin memiliki pengaruh tinggi, dan di atas frekuensi 100 kHz, thermal memiliki pengaruh tinggi yang ditunjukkan pada Fig 4.

A graph of different colored lines

Description automatically generated

Fig 4. Karakteristik Noise Underwater Akustik Channel Laut IKN

Frekuensi dapat dikatakan sebagai frekuensi optimum, apabila memiliki terletak pada nilai SNR minimum. Persamaan (5) menunjukkan relasi antara SNR dengan atenuasi dan noise, semakin besar nilai atenuasi dan noise maka akan semakin kecil nilai dari SNR. Nilai atenuasi dan noise bergantung pada variabel jarak serta frekuensi yang diberikan. Ditunjukkan pada Fig 5 dengan memvariasikan jarak yang berbeda-beda, di dapatkan frekuensi optimum berbeda-beda pada setiap jaraknya. Pada penelitian ini, peletakkan sensor diletakkan di daerah kedalaman 1 km dan di dapatkan frekuensi optimum pada nilai 38.51 kHz.

A graph of different colors and numbers

Description automatically generated

Fig 5. Pengaruh frekuensi terhadap noise dan atenuasi

Perhitungan link budget dilakukan untuk mendapatkan daya minimum nilai dalam mencapai nilai SNR 30 dB. Melalui perhitungan pada kedalaman sebesar 1 km, dan frekuensi optimum sebesar 38.51 kHz, di dapatkan nilai noise total sebesar 23.94 dB dan nilai atenuasi sebesar -54.27 dB, dengan nilai  sebesar 0.32 dB atau 0.92 W. Hasil dari perhitungan tersebut akan digunakan sebagai dasar dalam menentukan daya transmit, daya receive serta daya idle dari sensor akustik.

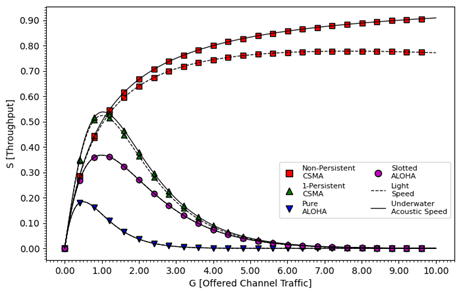


Fig 6. Pengaruh frekuensi terhadap noise dan atenuasi

Propagasi delay pada underwater akustik channel mempengaruhi nilai throughput. Persamaan (11) dan (12) menunjukkan pengaruh ratio delay yang nilainya dipengaruhi oleh kecepatan propagasi. Kecepatan propagasi akustik di underwater pada kedalaman 1 m bernilai sebesar 1630.85 m/s dan pada kedalaman 1 km bernilai sebesar 1630.87 m/s. Pada Fig 6, ditunjukkan perbedaan antara throughput pada kecepatan propagasi underwater dengan kecepatan propagasi pada kecepatan cahaya pada bitrate sebesar 500 bit/s. Gambar tersebut menunjukkan nilai throughput terbesar terdapat pada protokol Non-persistent CSMA, hal ini disebabkan pada Non-persistent CSMA, pengiriman data oleh sensor, dilakukan dengan menunggu CH/BS dalam keadaan idle, apabila CH/BS sedang sibuk maka sensor tersebut akan mengunggu waktu backoff random sebelum mengirimkan data kembali. Hal ini akan mengurangi potensi terjadinya collision yang disebabkan akibat banyan sensor yang mengirimkan data secara bersamaan, hasil penelitian tersebut selaras dengan penelitian Zhao et.al yang menunjukkan performa protokol CSMA yang baik pada underwater [44].

Melalui perhitungan analisis theoritical diketahui daya minimum yang dibutuhkan untuk mengirimkan data pada jarak 1 km dan SNR 30 dB adalah 0.92 W. Maka daya dari sensor yang digunakan harus melebihi nilai . Dalam pengujian performa protokol, nilai , , yang digunakan adalah 2 W, 0.5 W dan 2 mW, penentuan nilai tersebut dilakukan secara arbitrary berdasarkan nilai yang umum digunakan pada modem akustik komersial [45].

Comparison between multi layer trilateration to random distribution

|  |  |
| --- | --- |
| A graph of a graph with numbers and points  Description automatically generated with medium confidence | A graph of a graph with numbers and points  Description automatically generated with medium confidence |
| (a) Multilayer Trilateration | (b) Random |
| Fig 6. Deployment Comparison | |

+A graph of a function

Description automatically generated

Fig 6.

**Comparison of k means clustering with**

**Training dari reinforcement learning n**

# Conclusion

The 'conclusions' are a key component of the paper. It should complement the 'abstract' and is normally used by experts to value the paper's engineering content. A conclusion is not merely a summary of the main topics covered or a re-statement of your research problem, but a synthesis of key points and, if applicable, where you recommend new areas for future research.

##### Conflict of Interest

Please declare whether or not the submitted work was carried out with a conflict of interest. If yes, please state any personal, professional or financial relationships that could potentially be construed as a conflict of interest. If no, please add "The authors declare no conflict of interest".

##### Funding

Please add funding information here, e.g., this research was funded by NAME OF FUNDER, grant number XX. If there is no funding, this section can be removed.

##### References

[1] H. Sri Naryanto Peneliti Ahli Utama pada Pusat Teknologi Reduksi Risiko Bencana, K. TPSA -Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi Gedung BPPT, J. M. Thamrin, G. Geostech, K. Puspiptek Serpong, and T. Selatan, “Analisis Sumber Tsunami untuk Pertimbangan Perencanaan Jalur Kabel InaCBT di Selat Makasar,” *Jurnal ALAMI : Jurnal Teknologi Reduksi Risiko Bencana*, vol. 5, no. 1, pp. 8–18, Jul. 2021, doi: 10.29122/ALAMI.V5I1.4736.

[2] M. Inoue, Y. Tanioka, and Y. Yamanaka, “Method for Near-Real Time Estimation of Tsunami Sources Using Ocean Bottom Pressure Sensor Network (S-Net),” *Geosciences 2019, Vol. 9, Page 310*, vol. 9, no. 7, p. 310, Jul. 2019, doi: 10.3390/GEOSCIENCES9070310.

[3] K. Casey, A. Lim, and G. Dozier, “A Sensor Network Architecture for Tsunami Detection and Response,” *Int J Distrib Sens Netw*, vol. 4, pp. 27–42, 2008, doi: 10.1080/15501320701774675.

[4] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, “Wireless sensor network survey,” *Computer Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, Aug. 2008, doi: 10.1016/J.COMNET.2008.04.002.

[5] G. Cui *et al.*, “Detecting Rain–Snow-Transition Elevations in Mountain Basins Using Wireless Sensor Networks,” *J Hydrometeorol*, vol. 21, no. 9, pp. 2061–2081, Sep. 2020, doi: 10.1175/JHM-D-20-0028.1.

[6] 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.

[7] 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.

[8] H. Askari, A. Khajepour, M. B. Khamesee, and Z. L. Wang, “Embedded self-powered sensing systems for smart vehicles and intelligent transportation,” *Nano Energy*, vol. 66, p. 104103, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.NANOEN.2019.104103.

[9] J. Trevathan *et al.*, “SEMAT — The Next Generation of Inexpensive Marine Environmental Monitoring and Measurement Systems,” *Sensors 2012, Vol. 12, Pages 9711-9748*, vol. 12, no. 7, pp. 9711–9748, Jul. 2012, doi: 10.3390/S120709711.

[10] C. A. Pérez, M. Jimenéz, F. Soto, R. Torres, J. A. López, and A. Iborra, “A system for monitoring marine environments based on wireless sensor networks,” *OCEANS 2011 IEEE - Spain*, 2011, doi: 10.1109/OCEANS-SPAIN.2011.6003584.

[11] E. Felemban, “Acoustic frequency optimization for underwater wireless sensor network,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 6, pp. 642–648, 2020, doi: 10.14569/IJACSA.2020.0110678.

[12] D. Bradley, “ Handbook of Underwater Acoustic Engineering ,” *J Acoust Soc Am*, vol. 120, no. 5, pp. 2393–2393, Nov. 2006, doi: 10.1121/1.2354068.

[13] D. Zeng, X. Wu, Y. Wang, H. Chen, K. Liang, and L. Shu, “A Survey on Sensor Deployment in Underwater Sensor Networks,” *Communications in Computer and Information Science*, vol. 418 CCIS, pp. 133–143, 2014, doi: 10.1007/978-3-642-54522-1\_14/COVER.

[14] 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.

[15] M. Haque, T. Ahmad, and M. Imran, “Review of Hierarchical Routing Protocols for Wireless Sensor Networks,” *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 19, pp. 237–246, 2018, doi: 10.1007/978-981-10-5523-2\_22/COVER.

[16] X. Liu, “Atypical Hierarchical Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: A Review,” *IEEE Sens J*, vol. 15, no. 10, pp. 5372–5383, Oct. 2015, doi: 10.1109/JSEN.2015.2445796.

[17] H. H. Rizvi, S. A. Khan, and R. N. Enam, “Clustering Base Energy Efficient Mechanism for an Underwater Wireless Sensor Network,” *Wirel Pers Commun*, vol. 124, no. 4, pp. 3725–3741, Jun. 2022, doi: 10.1007/S11277-022-09536-X/FIGURES/5.

[18] I. Daanoune, B. Abdennaceur, and A. Ballouk, “A comprehensive survey on LEACH-based clustering routing protocols in Wireless Sensor Networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 114, p. 102409, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.ADHOC.2020.102409.

[19] K. G. Omeke *et al.*, “DEKCS: A Dynamic Clustering Protocol to Prolong Underwater Sensor Networks,” *IEEE Sens J*, vol. 21, no. 7, pp. 9457–9464, Apr. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3054943.

[20] V. Krishnaswamy, S. Kumar, and S. Manvi, “Clustering and data aggregation scheme in underwater wireless acoustic sensor network,” *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 17, no. 4, pp. 1604–1614, Aug. 2019, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v17i4.11379.

[21] 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.

[22] D. Pompili, T. Melodia, and I. F. Akyildiz, “Three-dimensional and two-dimensional deployment analysis for underwater acoustic sensor networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 4, pp. 778–790, Jun. 2009, doi: 10.1016/J.ADHOC.2008.07.010.

[23] S. Aydin and T. O. Onur, “Investigation of parameters affecting underwater communication channel,” *Journal of Engineering Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 39–44, 2020, doi: 10.21272/jes.2020.7(1).f4.

[24] H. Medwin, “Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters,” *J Acoust Soc Am*, vol. 58, no. 6, pp. 1318–1319, Dec. 1975, doi: 10.1121/1.380790.

[25] R. F. W. Coates, “Underwater Acoustic Systems,” *Underwater Acoustic Systems*, 1990, doi: 10.1007/978-1-349-20508-0.

[26] L. P. Clare, G. J. Pottie, and J. R. Agre, “Self-organizing distributed sensor networks,” *Unattended Ground Sensor Technologies and Applications*, vol. 3713, p. 229, Jul. 1999, doi: 10.1117/12.357138.

[27] H. H. Rizvi, S. A. Khan, R. N. Enam, M. Naseem, K. Nisar, and D. B. Rawat, “Adaptive Energy Efficient Circular Spinning Protocol for Dynamic Cluster Based UWSNs,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 61937–61950, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3181589.

[28] J. Li and G. Y. Lazarou, “A bit-map-assisted energy-efficient MAC scheme for wireless sensor networks,” *Third International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2004*, pp. 55–60, 2004, doi: 10.1145/984622.984631.

[29] G. Y. Lazarou, J. Li, and J. Picone, “A cluster-based power-efficient MAC scheme for event-driven sensing applications,” *Ad Hoc Networks*, vol. 5, no. 7, pp. 1017–1030, Sep. 2007, doi: 10.1016/J.ADHOC.2006.05.001.

[30] O. Zytoune, D. Aboutajdine, and M. Tazi, “Energy balanced clustering algorithm for routing in heterogeneous wireless sensor networks,” *2010 5th International Symposium on I/V Communications and Mobile Networks, ISIVC 2010*, 2010, doi: 10.1109/ISVC.2010.5656182.

[31] G. W. Hamaali, K. A. Abduljabbar, and D. R. Sulaiman, “K-means Clustering and PSO Algorithm for Wireless Sensor Networks Optimization”, doi: 10.31663/tqujes13.1.475(2023).

[32] L. Adaptation and A. Optimization, “Reinforcement Learning State-of-the-Art,” vol. 12.

[33] H. Yu and D. P. Bertsekas, “Q-learning and policy iteration algorithms for stochastic shortest path problems,” *Ann Oper Res*, vol. 208, no. 1, pp. 95–132, Sep. 2013, doi: 10.1007/S10479-012-1128-Z/METRICS.

[34] X. Lin, Q. Xing, and F. Liu, “Choice of discount rate in reinforcement learning with long-delay rewards,” *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 33, no. 2, pp. 381–392, Apr. 2022, doi: 10.23919/JSEE.2022.000040.

[35] M. Van Otterlo and M. Wiering, “Reinforcement learning and markov decision processes,” *Adaptation, Learning, and Optimization*, vol. 12, pp. 3–42, 2012, doi: 10.1007/978-3-642-27645-3\_1/COVER.

[36] V. Bulut, “Optimal path planning method based on epsilon-greedy Q-learning algorithm,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 44, no. 3, pp. 1–14, Mar. 2022, doi: 10.1007/S40430-022-03399-W/FIGURES/17.

[37] J. Cota-Ruiz, P. Rivas-Perea, E. Sifuentes, and R. Gonzalez-Landaeta, “A Recursive Shortest Path Routing Algorithm with Application for Wireless Sensor Network Localization,” *IEEE Sens J*, vol. 16, no. 11, pp. 4631–4637, Jun. 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2543680.

[38] Z. A. Dagdeviren, “Weighted Connected Vertex Cover Based Energy-Efficient Link Monitoring for Wireless Sensor Networks towards Secure Internet of Things,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 10107–10119, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3050930.

[39] Y. S. Nasir and D. Guo, “Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Dynamic Power Allocation in Wireless Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 10, pp. 2239–2250, Oct. 2019, doi: 10.1109/JSAC.2019.2933973.

[40] W. S. Pranowo *et al.*, “Characteristic of Temperature and Salinity in The Makassar Strait Based on Arlindo 2005 and Timit 2015 CTD Cruise Data,” *Jurnal Chart Datum*, vol. 8, no. 2, pp. 107–116, Nov. 2022, doi: 10.37875/CHARTDATUM.V8I2.144.

[41] H. Mahasiswa, O. " Triton, " Institut, T. Bandung, P. Sains, and T. Kelautan, “PROSIDING SEMINAR NASIONAL KELAUTAN,” 2012, Accessed: Jan. 30, 2024. [Online]. Available: http://www.fitb.itb.ac.id/kk-oseanografi

[42] F. G. Utama, A. S. Atmadipoera, M. Purba, E. H. Sudjono, and R. Zuraida, “Analysis of upwelling event in Southern Makassar Strait,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 54, no. 1, p. 012085, Jan. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/54/1/012085.

[43] L. Aprianti, M. A. Berawi, S. Gunawan, and M. Sari, “CONCEPTUAL DESIGN OF PORT DEVELOPMENT TO SUPPORT THE LOGISTICS SUPPLY OF INDONESIA’S NEW NUSANTARA CAPITAL CITY,” pp. 367–379, 2023, doi: 10.31705/WCS.2023.31.

[44] Q. Zhao, A. J. Lambert, and C. R. Benson, “A note on CSMA performance in underwater acoustic networks,” *Comput Commun*, vol. 55, pp. 62–68, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.COMCOM.2014.08.016.

[45] S. Sendra, J. Lloret, J. M. Jimenez, and L. Parra, “Underwater Acoustic Modems,” *IEEE Sens J*, vol. 16, no. 11, pp. 4063–4071, Jun. 2016, doi: 10.1109/JSEN.2015.2434890.