

# Analisis Adaptasi Dan Mitigasi Perubahan Iklim Provinsi Sulawesi Utara

Muh. Alifian Al Anshari A<sup>#1</sup>, Hendra Riogilang<sup>#2</sup>, Herawaty Riogilang<sup>#3</sup>, O. B. A. Sompie<sup>#4</sup>, Tommy Jansen<sup>#5</sup>

<sup>#</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Sam Ratulangi

Jl. Kampus UNSRAT Kelurahan Bahu, Manado, Indonesia, 95115

<sup>1</sup>ansharialifian9@gmail.com; <sup>2</sup>hendrariogilang001@gmail.com; <sup>3</sup>era28115@gmail.com;

<sup>4</sup>bsompie@yahoo.com; <sup>5</sup>tommijansen@yahoo.com

## Abstrak

Provinsi Sulawesi Utara adalah salah satu daerah prioritas penanganan perubahan iklim oleh Bappenas (2021). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kondisi iklim di Sulawesi Utara, dampak dan upaya adaptasi dan mitigasi perubahan iklim yang dapat dilakukan. Hasil penelitian ini berupa analisis kondisi iklim serta dampak iklim dan rekomendasi solusinya di beberapa kabupaten/kota di Sulawesi Utara diantaranya Minahasa, Kepulauan Sangihe, Bolaang Mongondow, Manado, dan Siau Tagulandang Biaro. Pada Dasarian I Januari 2023, anomali Sea Surface Temperature SST di wilayah Nino3.4 (Pasifik Tengah dan Timur) menunjukkan kondisi La Nina Lemah sebesar -0,80 dan anomali SST di Samudra Hindia menunjukkan fase Indian Ocean Dipole (IOD) Positif sebesar +0,71. Permasalahan yang diangkat di Minahasa adalah dampak banjir, rekomendasi solusi berupa pengembangan saluran primer dan underground tunnelling. Permasalahan yang diangkat di Sangihe adalah potensi krisis air bersih, rekomendasi solusi berupa sea water reverse osmosis (SWRO). Permasalahan yang diangkat di Bolaang Mongondow adalah dampak kekeringan, rekomendasi solusi berupa pengembangan agroforestry. Permasalahan yang diangkat di Manado adalah emisi transportasi, rekomendasi solusi berupa pengembangan transit-oriented development. Permasalahan yang diangkat di Sitaro adalah krisis air bersih, solusi yang diusulkan adalah rainwater harvesting.

**Kata kunci** – perubahan iklim, adaptasi dan mitigasi, Sulawesi Utara

## I. PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara yang rentan terhadap dampak perubahan iklim (Bappenas, 2021). Dampak tersebut tentu akan mempengaruhi pembangunan nasional dan daerah

dalam aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan (Bappenas 2021). Provinsi Sulawesi Utara adalah satu dari tiga provinsi hasil validasi lapangan yang termasuk lokasi prioritas ketahanan iklim (Bappenas, 2021). Dalam menyelesaikan tantangan perubahan iklim, seluruh pihak dapat melakukan tindakan adaptasi untuk menyesuaikan diri terhadap dampak yang dihasilkan serta mitigasi untuk mengurangi dan menurunkan dampak emisi GRK. Kota-kota perlu menurunkan emisi GRK dan merespon dampak perubahan iklim dengan melalui adaptasi dan mitigasi, begitupun dengan daerah lainnya di tingkat kabupaten. Namun, penerjemahan kebijakan iklim dari global ke regional/provinsi dan praktik manajemen di tingkat lokal/kabupaten bukanlah proses yang mudah (Landauer dkk, 2019). Sulawesi Utara sendiri merasakan dampak perubahan iklim, salah satunya berupa bencana hidrometeorologi.

Dampak perubahan iklim yang terjadi di Sulawesi Utara mengakibatkan beberapa kabupaten/kota mengalami peningkatan intensitas bencana dan merugikan aktivitas manusia dan perkembangan ekonomi daerah. Selain itu, peningkatan emisi karbon yang menjadi penyebab terjadinya perubahan iklim juga disebabkan oleh kontribusi emisi karbon dari beberapa kota di Sulawesi Utara. Sarana dan prasarana lingkungan penting untuk pengembangan kehidupan ekonomi, sosial, dan budaya (Riogilang, H, 2016) dan sebagai upaya adaptasi dan mitigasi perubahan iklim. Penelitian ini berfokus pada upaya dalam melakukan adaptasi dan mitigasi perubahan iklim dalam lingkup Sulawesi Utara.

### B. Rumusan Masalah

- Bagaimana kondisi iklim eksisting di Provinsi Sulawesi Utara?
- Bagaimana dampak iklim serta strategi adaptasi dan mitigasi perubahan iklim yang dapat dilakukan di Provinsi Sulawesi Utara?

### C. Batasan Penelitian

- Analisis dilakukan pada tingkat lanskap dan pada kabupaten/kota yaitu Minahasa, Kepulauan Sangihe, Bolaang Mongondow, Manado, dan Siau Tagulandang Biaro.
- Wawancara dilakukan dan dibatasi kepada ahli

yaitu dosen perguruan tinggi dengan tujuan untuk menggali referensi terkait solusi.

- Tidak dianalisis Rencana Anggaran Biaya (RAB).
- Tidak dilakukan pengujian laboratorium dan perhitungan lapangan, hanya menggunakan data sekunder yang relevan dengan pembahasan.

**D. Tujuan Penelitian**

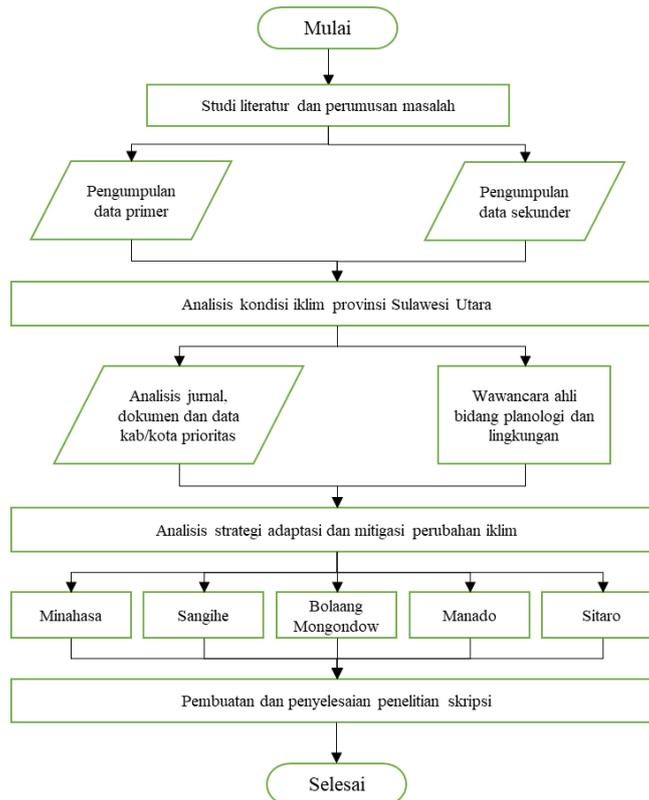
Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

- Mengetahui kondisi iklim eksisting di Provinsi Sulawesi Utara

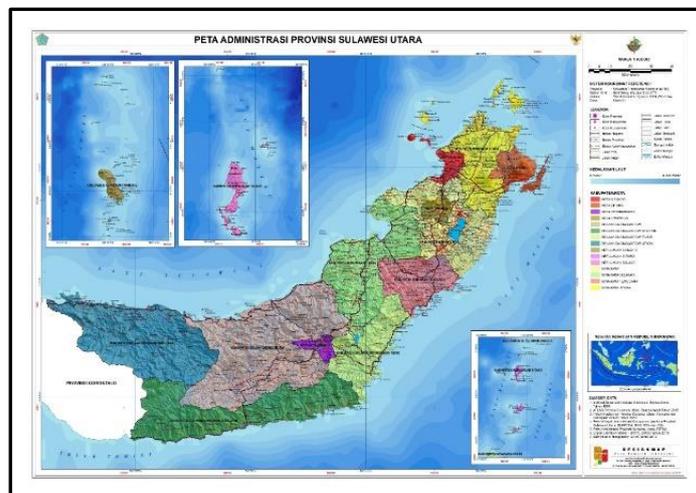
- Memberikan rekomendasi terkait pengembangan strategi adaptasi dan mitigasi perubahan iklim di Provinsi Sulawesi utara

**II. METODOLOGI PENELITIAN**

Dalam pelaksanaan suatu penelitian, diperlukan adanya tahapan proses yang akan dilakukan dalam penelitian ini digambarkan dalam bagan alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian



Gambar 2. Peta Lokasi Penelitian  
(Sumber: Peta Tematik Indo, 2013)

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

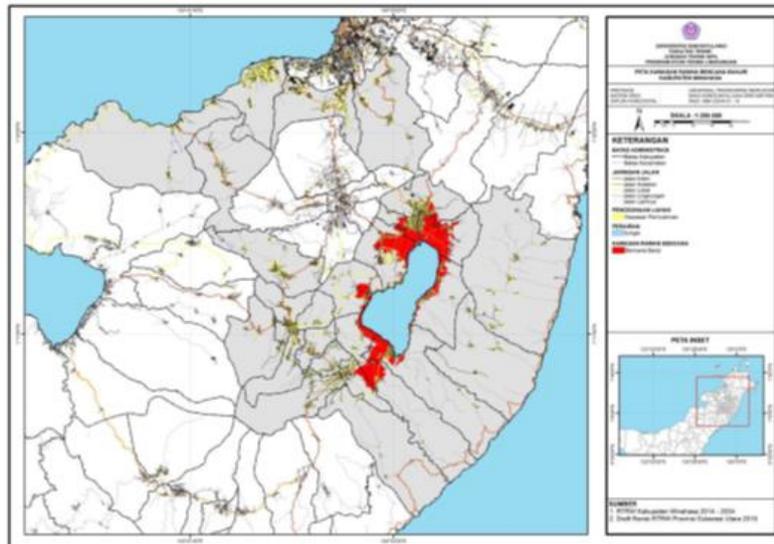
#### A. Gambaran Umum Lokasi Penelitian

Provinsi Sulawesi Utara merupakan salah satu daerah di Indonesia yang rentan terhadap perubahan iklim. Berdasarkan laporan Bappenas (2021), Sulawesi Utara adalah satu dari tiga daerah prioritas ketahanan iklim, kedua provinsi lainnya adalah Aceh dan Nusa Tenggara Timur.

Dilansir dari BMKG (2023), pada Dasarian I Januari 2023, anomali SST Pasifik di Wilayah Nino 3.4 diprediksi masih didominasi kondisi anomali negatif (dingin) pada Februari hingga Maret 2023, kemudian meluruh menuju anomali positif (hangat) hingga Juli 2023. Anomali SST Wilayah Samudra Hindia bagian timur dan barat diprediksi dalam kondisi dingin pada Februari 2023 kemudian berangsur netral hingga Juli 2023.

Pada lokasi di Pasifik Tengah Ekuator (Nino3.4 region) memiliki kondisi suhu permukaan laut pada kondisi La Nina dengan indeks bernilai -0.80 yang mengindikasikan masih berlanjutnya fenomena La Nina dengan intensitas Lemah. La Nina tahun ini merupakan La Nina di tahun ke-3 berturut turut sejak 2020. BMKG memprakirakan fenomena La Nina berangsur menjadi Netral sampai dengan Juli 2023. Sebagian besar pusat layanan iklim lainnya juga memprediksi kondisi ENSO (*El Nino-Southern Oscillation*) Netral terjadi pada periode JFM 2023.

Adapun pada pemantauan kondisi IOD (*Indian Ocean Dipole*) pada bulan Januari 2023 menunjukkan indeks IOD sebesar +0.71 (IOD Positif), sehingga terjadi pengurangan curah hujan di kawasan timur Samudra Pasifik. Kondisi IOD diprediksi akan Kembali Netral pada bulan Februari hingga Juli 2023. Sebagian besar pusat layanan iklim lainnya memprediksi IOD Netral hingga Juli 2023.



Gambar 1. Peta Risiko Bencana Banjir Minahasa Berdasarkan RTRW Minahasa 2014-2034

#### B. Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim di Minahasa

Minahasa adalah salah satu kabupaten terluas di Sulawesi Utara. Dengan jumlah penduduk 347.29 jiwa pada tahun 2020. Pada pembahasan ini difokuskan pada dampak perubahan iklim yang terdapat di Minahasa. Permasalahan yang diangkat di Minahasa adalah dampak perubahan iklim pada sektor air yaitu dampak banjir. Minahasa berdasarkan BNPB (2022) termasuk dalam kategori terdampak banjir dengan risiko tinggi dan tertinggi di Sulawesi Utara. Berikut ini adalah data hasil analisis spasial risiko banjir di Minahasa dengan mengadopsi data dari RTRW Minahasa 2014-2034 dan draft revisi RTRW Sulawesi Utara 2019.

Perubahan fungsi lahan, kurangnya ruang resapan air dan keadaan drainase yang kurang baik

menyebabkan banjir (Rurung dkk, 2019). Selain itu, banjir juga disebabkan terutama oleh penyempitan dan pendangkalan saluran drainase dan sungai akibat penumpukan sampah, derasnya limpasan air oleh permukaan yang keras, serta berbagai reklamasi sungai secara illegal (Riogilang, H, 2015). Pada pembahasan ini difokuskan pada desain saluran primer untuk mengalirkan air yang berasal dari pegunungan menuju danau Tondano dan menuju DAS Tondano, disesuaikan dengan jarak dan area tangkapan banjir, kemudian beban limpasan air di danau Tondano dialirkan menggunakan konsep underground tunnelling. Salah satu alasan digunakannya terowongan air adalah karena keterbatasan lahan untuk pengendalian banjir (Indrawan & Siregar, 2018).

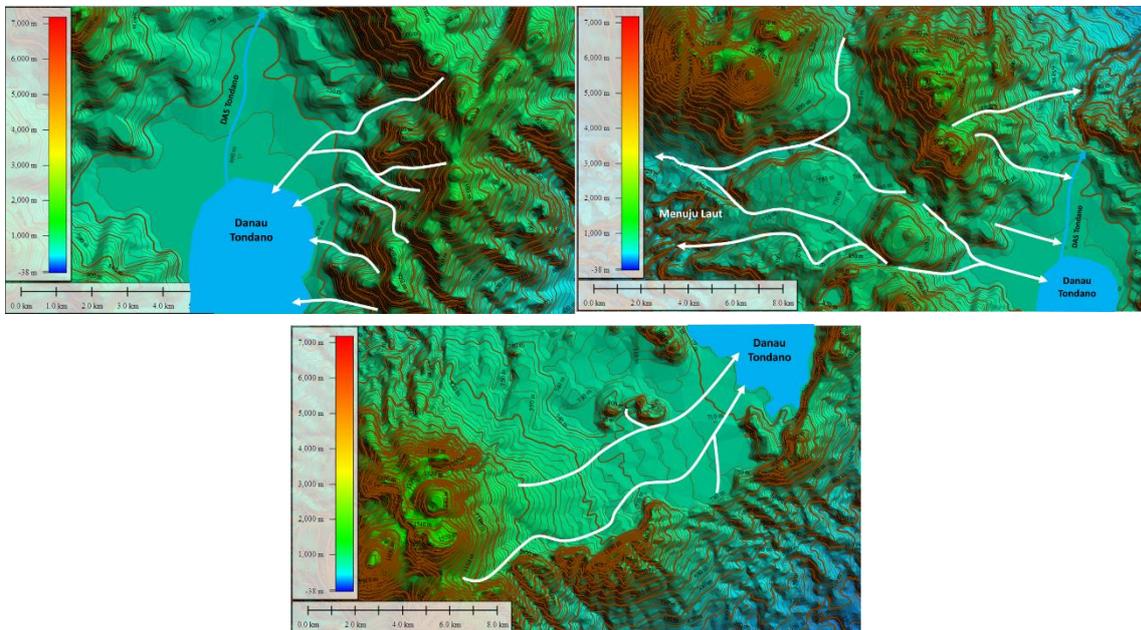
Area rawan banjir dibagi menjadi 2 (tiga) zona yaitu Zona Utara 1, Zona Utara 2, dan Zona Selatan.

Zona tersebut dibagi berdasarkan kontur daerah sekitaran daerah risiko banjir di danau Tondano. Kemudian dilakukan analisis topografi menggunakan Global Mapper berdasarkan tiap-tiap zona. Pada zona pertama yaitu Zona Utara 1, daerah tangkapan banjir dari pegunungan diarahkan menuju danau Tondano. Hal ini dilakukan karena luasan tangkapan air cukup besar dan apabila air dialirkan menuju DAS Tondano, akan mengakibatkan luapan air di daerah hilir sehingga air dialirkan menuju danau Tondano melalui celah-celah antar pegunungan. Berikutnya adalah pada area Zona Utara 2, desain aliran air hujan dibagi menjadi 2 arah, yaitu pada daerah yang mengarah menuju danau Tondano dan daerah yang mengarah pada bagian hilir menuju laut. Pada area yang menuju danau Tondano, diarahkan berdasarkan jarak tempuh terdekat sehingga ada saluran air yang menuju danau dan ada pula yang menuju DAS Tondano. Selanjutnya adalah melakukan desain saluran primer

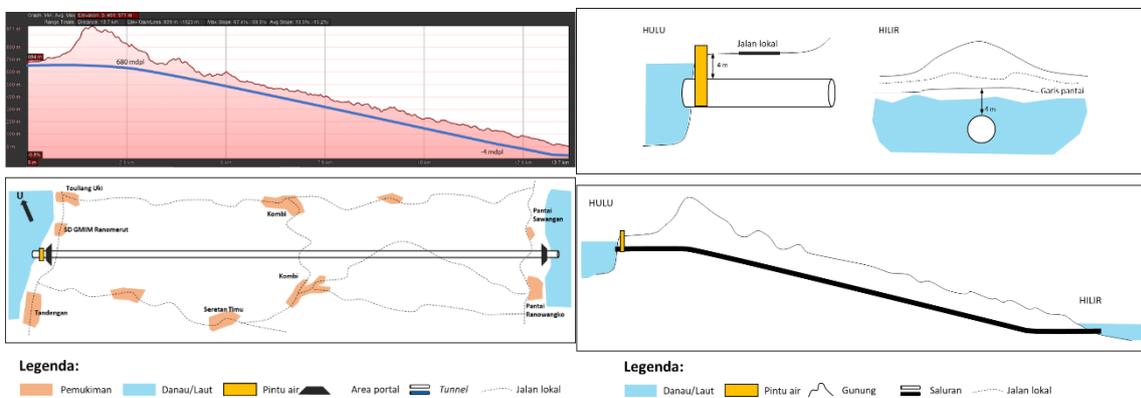
pada Zona Selatan. Adapun pada zona ini air berasal dari hulu menuju danau Tondano. Pada kondisi eksisting, sudah terdapat aliran Sub-DAS yang berada pada daerah tersebut. Namun pada pembahasan ini difokuskan pada pengembangan saluran primer pada aliran yang telah didesain dan dengan kapasitas yang lebih besar sehingga dapat mengalirkan air dengan baik sesuai intensitas hujan.

Setelah analisis desain saluran primer menuju danau Tondano, kemudian dianalisis rencana pengembangan underground tunneling untuk mengalirkan air dari danau menuju laut yang terdekat dari danau serta aman dari sisi kegeologian.

Analisis desain saluran menggunakan saluran pipa berbentuk lingkaran yang membentang dari ujung danau Tondano hingga ke muara pantai selatan Minahasa. Berdasarkan analisis topografi, didapatkan desain saluran seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 2. Desain Saluran Primer Zona Utara 1, Zona Utara 2, dan Zona Selatan



Gambar 3. Desain Underground Tunneling

Perhitungan kapasitas tunnel berdasarkan probable maximum flood Creager equations yaitu:

$$Q = (46 \times 0,02832) \times C \times (0,3861 \times A)^a$$

$$a = 0,894 \times (0,3861 \times A)^{-0,048}$$

Dimana:

- Q = Specific peak discharge (m3/s)
- C = Creager coefficient

A = Catchment area (km<sup>2</sup>)

a = Regional coefficient

Area tangkapan dianalisis menggunakan Google Earth mencakup seluruh area terdampak banjir pada kaldera Tondano dengan luas rencana 333 km<sup>2</sup>.

**TABEL 1**  
**Analisis Debit Banjir Puncak Rencana**

Location	Kaldera Tondano
Catchment area (km <sup>2</sup> )	333
Return period (m <sup>3</sup> /s)	
2-year	348,84
20-year	872,09
100-year	1.220,93
200-year	1.395,34
Probable max flood (PMF)	3.139,52

Berdasarkan analisis tersebut, diambil data rencana banjir kala ulang periode 200 tahun, yaitu 1.395,34 m<sup>3</sup>/s. Pengembangan tunnel yang dipilih adalah model berdasarkan the Zagros long tunnel Arbabsiar et al (2020) dengan diameter mesin 6,73 m. Debit saluran dianalisis untuk mengetahui kapasitas limpasan yang dapat dihasilkan dari perencanaan saluran underground tunnelling tersebut menggunakan persamaan berikut

$$Q = 0,2785 \times C_{HW} \times D^{2,63} \times S^{0,54} \quad S = \frac{H}{L}$$

Dimana:

- Q = debit rencana (m3/s)
- C = koefisien kekasaran pipa
- D = diameter pipa (m)
- S = slope/kemiringan pipa
- H = kehilangan tekanan (m)
- L = panjang pipa

Hasil analisis ditunjukkan pada Tabel 2.

**TABEL 2**  
**Analisis Debit Saluran**

Perhitungan	Hasil	Satuan
Diameter saluran rencana	6,73	m
Koef. kekasaran saluran	150	
Slope	0,022	
Luas permukaan saluran	35,555	m <sup>2</sup>
Kecepatan saluran	22,244	m/s
Debit saluran dihasilkan	800,764	m <sup>3</sup> /s

Analisis efisiensi dilakukan untuk mengetahui kinerja *underground tunnelling* untuk mengurangi dampak banjir khususnya pada daerah tangkapan air di Kaldera Tondano menggunakan persamaan berikut

$$Efisiensi = \frac{Debit\ saluran\ rencana}{Debit\ banjir\ rencana} \times 100\%$$

$$Efisiensi = \frac{800,764}{1.395,34} \times 100\%$$

$$Efisiensi = 57,38\%$$

Sehingga efisiensi kinerja underground tunnelling dengan diameter 6,73 m serta kapasitas 800,764 m<sup>3</sup>/s pada kaldera Tondano seluas 333 km<sup>2</sup> pada rencana debit banjir kala ulang kala ulang 200 tahun 1.395,34 m<sup>3</sup>/s memiliki efisiensi 57,4%. Hal tersebut masih diluar perhitungan kapasitas lahan dan ekosistem dalam mereduksi banjir dan menyerap air hujan. Perlu untuk dilakukan kajian mendalam dalam meningkatkan kapasitas lahan dan ekosistem untuk meningkatkan efisiensi pengendalian banjir.

**C. Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim di Kepulauan Sangihe**

Kepulauan Sangihe adalah salah kabupaten yang berbentuk kepulauan yang terletak di bagian utara provinsi Sulawesi Utara. Dengan jumlah penduduk 139.262 jiwa pada tahun 2020. Pada pembahasan ini difokuskan pada dampak perubahan iklim yang ditinjau berdasarkan risiko bencana alam yang terdapat di Sangihe. Air laut mempunyai sifat asin karena mengandung senyawa garam (NaCl) yang cukup tinggi. Kadar garam air laut 3% dari jumlah total keseluruhan air laut. Air laut bisa dijadikan sumber air bersih dengan melalui proses dan persyaratan (Mananoma dkk, 2016). Dampak perubahan iklim yang diangkat di Sangihe adalah proyeksi terjadinya krisis air di masa mendatang, rekomendasi solusi yang diberikan adalah desain pengembangan desalinasi air laut dengan metode sea water reverse osmosis (SWRO). Hal tersebut merupakan upaya adaptasi terhadap perubahan iklim

dengan memanfaatkan ekosistem air laut sebagai sumber air bersih. Baku mutu pH untuk air bersih adalah 6-9 karena pada rentang tersebut air berada pada kondisi netral, tidak asam dan mendekati sifat basa. Kondisi terlalu asam atau terlalu basa pada air hasil olahan, akan merusak ekosistem badan air penerima (Wijaya dkk, 2022).

Hasil proyeksi BMKG terhadap perubahan curah hujan musiman periode 2034-2040 terhadap periode 2006-2014 di Sulawesi Utara (Des – Jan – Feb). Pada peta tersebut terlihat bahwa kabupaten Kepulauan Sangihe berpotensi mengalami perubahan curah

hujan dengan berkurang <-40% (skala tinggi). Pengurangan tersebut diprediksi akan memengaruhi penyediaan air bersih mendatang.

Adapun rencana pengembangan SWRO dihitung berdasarkan proyeksi penduduk tahun 2035, diperoleh jumlah penduduk proyeksi pada tahun 2035 adalah 137.395 jiwa, dimana jumlah penduduk tahun 2020 adalah 139.262 jiwa (BPS Sangihe, 2020). Perhitungan kebutuhan air bersih didasarkan pada kebutuhan pada faktor jam puncak (FJP) dan diperoleh pada tahun 2035 dibutuhkan 0,57 m<sup>3</sup>/det.

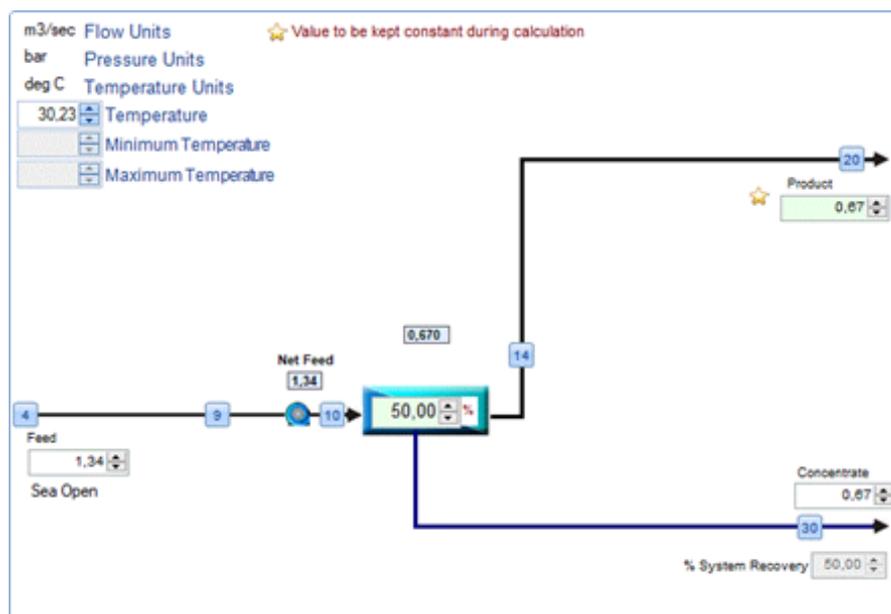
**TABEL 3**  
**Rekapitulasi Kebutuhan Air Sangihe Rencana**

Hitungan	Hasil	Satuan
Debit proyeksi FJP	0,57	m3/s
Faktor keamanan 25%	0,15	m3/s
System recovery 50%	0,72	m3/s
<b>Total feed</b>	<b>1,44</b>	<b>m3/s</b>
<b>Total produksi</b>	<b>0,72</b>	<b>m3/s</b>

Faktor keamanan adalah penambahan jumlah air didasarkan pada faktor ketidakpastian di masa depan sehingga jumlah air ditingkatkan 25% dari kebutuhan hasil proyeksi FJP. SWRO didesain menggunakan Toray Design System 2 (DS2) dengan mengacu pada data standar yaitu suhu, pH, TDS. Dalam penelitian ini tidak dilakukan pengukuran lapangan, data diambil dari sumber referensi ilmiah pada 2 lokasi yaitu barat daya pulau siladen Minahasa Utara oleh Patty dkk (2015) dan teluk Totok Minahasa Tenggara oleh Hosea dkk (2019). Nilai suhu diambil 30,23 oC, pH diambil 7,65 dan TDS diambil 32.804 yang merupakan rerata dari kedua sumber diatas. Nilai pH netral sehingga tidak diperlukan penambahan dosis

pH. SWRO menggunakan metode single pass dan two-stage dalam penerapannya.

Jenis pengolahan yang dilakukan adalah Sea Open dengan mengambil air laut dan dialirkan melalui proses SWRO menjadi air yang siap untuk diproduksi. Adapun untuk pengukuran kimia air tidak dilakukan pengambilan sampel dilapangan sehingga untuk pengukuran ion dilakukan secara otomatis oleh sistem. Kemudian dilakukan pengolahan melalui program berupa perhitungan kadar salinitas air laut melalui fitur “balance with NaCl” sehingga didapatkan luaran data berupa tingkat kelarutan dan kadar ion. Berikut ini hasil simulasi pengembangan SWRO menggunakan Toray DS2.



**Gambar 4. Flow Diagram Unit RO**

Gambar di atas adalah skema SWRO Sangihe yang direncanakan dengan mengolah 1,44 m<sup>3</sup>/s air laut menjadi 0.72 m<sup>3</sup>/s air bersih siap distribusi, kemudian menyisakan system recovery 50% yaitu 0,72 m<sup>3</sup>/s untuk dibuang kembali ke laut. Pada analisis yang dilakukan menggunakan software Toray DS2 tersebut, dilihat bahwa pilihan model membran RO yang digunakan adalah TM820M-400.

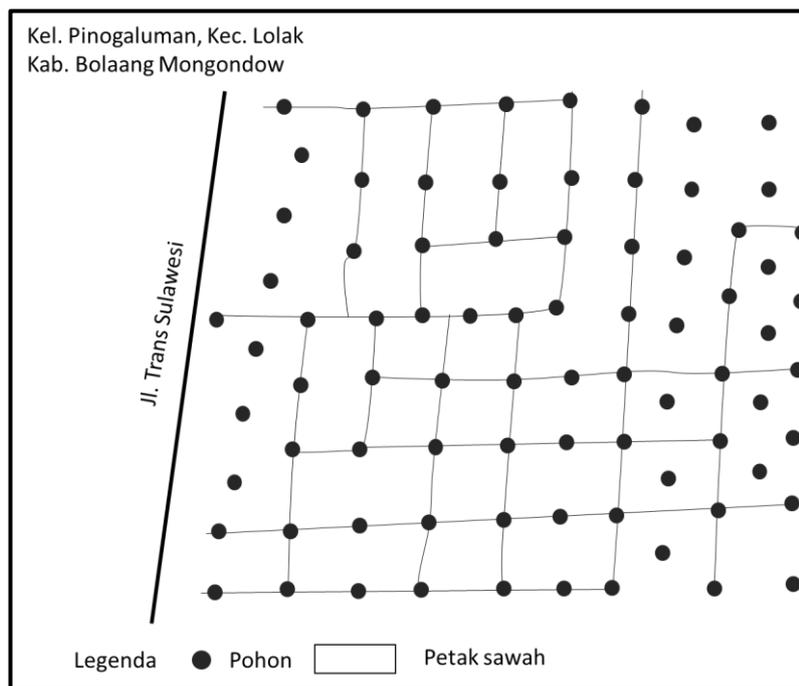
**D. Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim di Bolaang Mongondow**

Bolaang Mongondow adalah salah satu kabupaten dengan aktivitas perekonomian utama pada pertanian. Dengan jumlah penduduk 248.751 jiwa pada tahun 2020. Pada pembahasan ini difokuskan pada dampak perubahan iklim yang ditinjau berdasarkan risiko bencana alam yang terdapat di Bolaang Mongondow. Dampak perubahan iklim yang diangkat dalam pembahasan ini adalah dampak kekeringan dan proyeksi penurunan curah hujan dimasa mendatang, rekomendasi solusi yang diberikan adalah pengembangan pertanian dengan pendekatan agroforestry. Upaya ini merupakan langkah adaptasi perubahan iklim dengan memanfaatkan pepohonan jenis tertentu untuk mengikat air tanah sehingga dapat

menyimpan cadangan air pada musim kemarau panjang, serta merupakan langkah mitigasi perubahan iklim dengan mengurangi emisi karbon pertanian.

Berdasarkan permasalahan yang dijelaskan sebelumnya, bahwa Bolaang Mongondow memiliki potensi dampak iklim berupa kekeringan dan akan mengancam kestabilan aktifitas persawahan di masa mendatang. Rekomendasi solusi yang diberikan adalah pengembangan agroforestry. Agroforestri secara sederhana merupakan menanam pohon diatas lahan persawahan atau pertanian. Dilansir dari Burgess (2019), agroforestri bermanfaat untuk meningkatkan produktivitas hasil pertanian, mengatasi perubahan iklim, mengurangi aliran banjir di hilir, meningkatkan biodiversitas, dan mengurangi stress pada hewan ternak ternak. Agroforestri dikembangkan menggunakan pendekatan alley cropping.

Berikut ini adalah pendekatan konsep agroforestri yang dapat diterapkan pada seluruh area persawahan di Bolaang Mongondow. Jenis agroforestri yang dilakukan adalah alley cropping atau agrosilvikultur. Gambar dibawah ini adalah desain penerapan agroforestri di salah satu atau beberapa petak sawah di Lolak.



Gambar 5. Sampel Desain Agroforestri di Lolak

Adapun untuk teknis penilaian dan pemilihan tanaman serta besaran kapasitas dan efisiensi dari pemilihan jenis tanaman tidak dilakukan dalam penelitian ini dan dibutuhkan penelitian lebih lanjut.

**E. Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim di Manado**

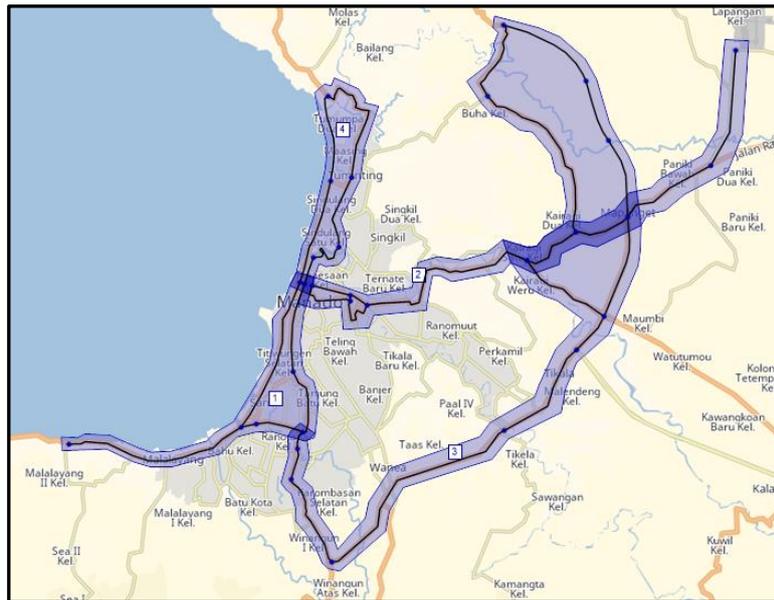
Dalam beberapa tahun terakhir, isu perubahan iklim sangat diperhatikan oleh banyak orang,

terutama para pecinta lingkungan. (Kolondam dkk, 2022). Manado memiliki beberapa terminal (Perangin-angin dkk, 2022) dan sering terjadi kemacetan pada beberapa titik (Lawalata dkk, 2021). Sekitar 75% dampak perubahan iklim terdapat pada sektor energi, pertanian, dan transportasi (IPCC, 2014). Berdasarkan pada sumber-sumber emisi GRK di Indonesia, 5,1% sumber emisi tersebut berasal dari sektor transportasi.

Penelitian dilakukan oleh Momongan dkk (2017), kendaraan bermotor yang semakin hari semakin meningkat menyebabkan penggunaan bahan bakar yang tinggi sehingga meningkatkan buangan sisa-sisa bahan bakar ke udara dan mengakibatkan pencemaran udara. Besaran emisi Karbonmonoksida (CO) yang dihasilkan oleh aktivitas transportasi perkotaan di kota Manado mencapai 1.610.007 ton/bulan atau 19.320.085 ton/tahun, emisi Karbonmonoksida (CO) ini dihasilkan dari 19.429.920 kendaraan/bulan atau 233.159.040 kendaraan/tahun. Oleh karenanya, sektor transportasi publik perlu dilakukan pengembangan yang

berorientasi dari *car-oriented development* menjadi *transit-oriented development*.

Wakari dkk (2019) menjelaskan bahwa di Manado proporsi penduduk terlayani angkutan umum adalah 29% dan tidak terlayani 71% sehingga perlu untuk dilakukan mengembangkan sistem transportasi publik yang berkelanjutan. Desain rute dilakukan berdasarkan jalan utama Manado dan berdasarkan kepadatan penduduk. Pemerintah kota Manado telah memiliki desain trayek Bus Rapid Transit yang tertuang dalam RTRW kota Manado tahun 2014-2034. Pengembangan desain rute mempertimbangkan keterjangkauan menggunakan PTV Visum



Gambar 6. Desain Simulasi Rute TOD Manado

- Dengan keterangan sebagai berikut
1. Koridor K1M (Koridor 1 Terminal Malalayang, Bus Medium)  
Rute: Terminal Malalayang – Zero Point – Monumen Sam Ratulangi – Terminal Malalayang.
  2. Koridor K2M (Koridor 2 Terminal Paal 2, Bus Medium)  
Rute: Terminal Paal 2 – Jl. Ahmad Yani – Bandar Udara Internasional Sam Ratulangi – Terminal Paal 2.
  3. Koridor K3S (Koridor 3 Terminal Karombasan, Bus Small)  
Rute: Terminal Karombasan – Monumen Sam Ratulangi – IAIN Manado – Politeknik Negeri Manado – Ring Road – Terminal Karombasan.
  4. Koridor K4S (Koridor 4 Terminal Tuminting, Bus Small)  
Rute: Terminal Tuminting – Jl. Boulevard II – Zero Point – Pasar Bersehati – Terminal Tuminting.
- Perhitungan jumlah armada dihitung berdasarkan Pedoman Teknis Penyelenggaraan Angkutan Penumpang Umum di Wilayah Perkotaan Dalam

Trayek Tetap dan Teratur oleh Departemen Perhubungan RI tahun 2002. Adapun untuk data perhitungan diperoleh dari hasil penelitian terdahulu sehingga dalam penelitian ini tidak dilakukan pengambilan data primer.

Analisis pertama adalah perhitungan permintaan pelayanan angkutan penumpang umum. Adapun pada perhitungan ini telah dianalisis sebelumnya oleh Ering dkk (2022) menerangkan mengenai data permintaan potensial diperoleh dari hasil survei stated preference. Berdasarkan data survei, 14% pengguna kendaraan pribadi menginginkan untuk berpindah ke transportasi publik apabila fasilitasnya memadai. Berdasarkan data tersebut kemudian diperoleh permintaan potensial dengan menjumlahkan data permintaan aktual dengan data minat pindah yaitu sebesar  $D = 45.194$  perjalanan orang/hari, dengan  $D = demand$ . Data tersebut menjadi data acuan dalam pengembangan jumlah armada yang dibutuhkan berdasarkan proyeksi penduduk tahun 2035 pada tiap-tiap persentase penduduk kecamatan dan kelurahan.

Berikutnya adalah menentukan jumlah armada bus berdasarkan beberapa perhitungan diantaranya

load factor (diambil 70% pada kondisi dinamis), kapasitas kendaraan (diambil bus sedang berkapasitas 30 dan bus kecil berkapasitas 19 penumpang), waktu sirkulasi dihitung dengan rumus

$$CT_{ABA} = (T_{AB} + T_{BA}) + (\sigma_{AB} + \sigma_{BA}) + (T_{TA} + T_{TB})$$

Dengan:

$CT_{ABA}$  = waktu sirkulasi dari A ke B kembali ke A

$T_{AB}, T_{BA}$  = waktu perjalanan rata-rata dari A – B dan B – A (dihitung menggunakan prediksi Google Maps)

$\sigma_{AB}, \sigma_{BA}$  = deviasi waktu dari A ke B dan B ke A (5%)

$T_{TA}, T_{TB}$  = waktu henti kendaraan (diambil 10%)

Kemudian perhitungan headway dengan rumus:

$$H = \frac{60xCxLf}{P'}$$

Dengan:

H = waktu antara (menit)

P' = rencana jumlah penumpang perjam

C = kapasitas kendaraan

Lf = load factor

Perhitungan jumlah armada dengan rumus

$$K = \frac{Ct}{HxfA}$$

Dengan:

K = jumlah kendaraan

Ct = waktu sirkulasi (menit)

H = headway (menit)

fA = waktu ketersediaan kendaraan (100%)

Berikut ini hasil perhitungan armada berdasarkan kebutuhan desain tiap-tiap koridor

**TABEL 4**  
**Kebutuhan Armada Tiap Koridor**

Koridor	CT ABA	P	C	H	K
K1M	48	127	30	9,9	5
K2M	71,4	127	30	9,9	7
K3S	74,8	242	19	3,3	23
K4S	39,1	257	19	3,1	13

#### F. Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim di Siau Tagulandang Biaro

Siau Tagulandang Biaro (Sitaro) adalah salah satu kabupaten yang berbentuk kepulauan yang terletak di bagian utara provinsi Sulawesi Utara. Dengan jumlah penduduk 71.817 jiwa pada tahun 2020. Pada pembahasan ini difokuskan pada dampak perubahan iklim yang ditinjau berdasarkan risiko bencana alam yang terdapat di Sitaro. Kebutuhan terhadap air bersih pada suatu daerah akan semakin bertambah dengan adanya peningkatan jumlah penduduk serta kemajuan pembangunan (Nur dkk, 2022).

Solusi yang direkomendasikan adalah Rainwater Harvesting atau Pemanenan Air Hujan (PAH) Komunal dengan memanfaatkan potensi air hujan yang akan datang. Seperti pada pembahasan sebelumnya, bahwa potensi curah hujan musiman di Sitaro diproyeksikan menurun sekitar 20%, maka diperlukan pengembangan infrastruktur dalam memanfaatkan air hujan tersebut agar dapat memenuhi kebutuhan air masyarakat di masa mendatang. Perencanaan PAH Komunal dilakukan dengan konsep membuat bangunan PAH dalam ukuran yang besar berdasarkan proporsi penduduk di tiap-tiap kelurahan sehingga luasan atap yang dibutuhkan pada tiap-tiap kelurahan dapat mencukupi kebutuhan air bersih.

Besaran curah hujan rencana yang digunakan dalam proyeksi PAH Komunal pada tahun 2035 adalah 203 mm. Berikutnya adalah menghitung proyeksi consecutive dry days (CDD) berdasarkan data hari tanpa hujan 2017-2021 dan proyeksi 2035. Kemudian rencana hari tidak hujan di Sitaro pada tahun 2035 adalah 243 hari, sehingga jumlah hari hujan menjadi 122 hari.

Data kebutuhan air domestik diperlukan untuk mengetahui volume air hujan yang bisa ditampung melalui rencana atap bangunan melalui perhitungan yang sederhana untuk menentukan volume air hujan yang bisa dipanen bagi kebutuhan domestik (perkantoran/rumah tangga) pada rumus berikut.

$$Ka = \sum A x Ks x \sum non (CH)$$

Dengan:

Ka = kebutuhan air domestik (liter/tahun)

$\sum A$  = jumlah jiwa yang beraktivitas (orang)

Ks = rata-rata konsumsi air (orang/hari)

$\sum non CH$  = jumlah hari tidak ada hujan pertahun

Berdasarkan perhitungan diperoleh dengan penduduk Sitaro sejumlah 94.121 orang pada tahun 2035 berdasarkan hasil proyeksi dengan kebutuhan rata-rata 70 liter/orang/hari maka diproyeksikan di area tersebut dapat memanfaatkan air hujan sejumlah 1.761.098 m<sup>3</sup>.

Perhitungan luas atap dibutuhkan untuk menampung volume air hujan yang dibutuhkan dilakukan menggunakan rumus suplai air hujan dengan rumus yaitu:

$$S = \frac{(A x M x F)}{1000}$$

Dengan:

S = Suplai air hujan yang dapat diterima (m<sup>3</sup>)

A = Luas atap bangunan (m<sup>2</sup>)

M = Tinggi curah hujan median bulanan (mm)

F = Faktor efisiensi/kehilangan air = 0,95

Adapun pada perencanaan PAH Komunal ini tidak berpatokan pada luasan atap rumah warga namun berdasarkan rencana pembangunan PAH Komunal sesuai kebutuhan air dimasa mendatang

sehingga diasumsikan supply air hujan yang dapat diterima tiap bulannya sesuai dengan kebutuhan proyeksi air bersih.

$$A = \frac{S \times 1000}{M \times F}$$

$$A = \frac{146.758 \times 1000}{203 \times 0.95} = 760.996 \text{ m}^2$$

Berdasarkan perhitungan diatas, dapat dikatakan bahwa untuk memenuhi kebutuhan air saat tidak

hujan selama proyeksi 243 hari dengan kemampuan curah hujan bulanan proyeksi 203 mm. Maka diperlukan atap total seluas 760.996 m<sup>2</sup> agar dapat memanen air hujan sesuai dengan kebutuhan masyarakat pada tahun 2035. Pada perencanaan ini, PAH Komunal dihitung dengan scenario unit dan dimensi yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan air bersih penduduk Sitaro pada tiap-tiap kecamatan dengan hasil ditunjukkan pada Tabel 5.

**TABEL 5**  
**Rencana Dimensi dan Unit PAH Komunal**

No.	Kecamatan	Volume PAH (m <sup>3</sup> )	Dimensi rencana			Jumlah unit
			Luas bak (m <sup>2</sup> )	Tinggi bak (m)	Vol. bak (m <sup>3</sup> )	
1	Biaro	7714	245	2	490	16
2	Tagulandang Selatan	10028	245	2	490	20
3	Tagulandang	26999	245	2	490	55
4	Tagulandang Utara	8678	245	2	490	18
5	Siau Barat Selatan	9295	245	2	490	19
6	Siau Timur Selatan	17935	245	2	490	37
7	Siau Barat	17839	245	2	490	36
8	Siau Tengah	4146	245	2	490	8
9	Siau Timur	35677	245	2	490	73
10	Siau Barat Utara	8968	245	2	490	18
<b>Jumlah</b>		<b>147280</b>				<b>301</b>

**IV. KESIMPULAN DAN SARAN**

**A. Kesimpulan**

Provinsi Sulawesi Utara adalah salah satu daerah prioritas penanganan perubahan iklim oleh Bappenas. Pada Dasarian I Januari 2023, anomali *Sea Surface Temperature SST* di wilayah Nino3.4 (Pasifik Tengah dan Timur) menunjukkan kondisi La Nina Lemah sebesar -0,80 dan anomali SST di Samudra Hindia menunjukkan fase *Indian Ocean Dipole (IOD)* Positif sebesar +0,71. Beberapa daerah yang menjadi prioritas penelitian ini diantaranya Minahasa, Kepulauan Sangihe, Bolaang Mongondow, Manado, dan Siau Tagulandang Biaro. Permasalahan yang diangkat di Minahasa adalah dampak banjir, rekomendasi solusi berupa pengembangan saluran primer dan *underground tunnelling*. Permasalahan yang diangkat di Sangihe adalah potensi krisis air bersih, rekomendasi solusi berupa *sea water reverse osmosis (SWRO)*. Permasalahan yang diangkat di Bolaang Mongondow adalah dampak kekeringan, rekomendasi solusi berupa pengembangan *agroforestry*. Permasalahan yang diangkat di Manado adalah emisi transportasi, rekomendasi solusi berupa pengembangan *transit-oriented development*. Permasalahan yang diangkat di Sitaro adalah krisis air bersih, solusi yang direkomendasikan adalah *rainwater harvesting*.

**B. Saran**

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, maka diberikan rekomendasi sebagai berikut

1. Pengembangan penilaian risiko iklim menggunakan pendekatan *Community-based risk assessment (CRA)* dan solusi pemberdayaan masyarakat menggunakan metode *Community-based Approach*.
2. Penelitian pada masing-masing daerah mengacu pada data sekunder, untuk mendapatkan hasil yang akurat, diperlukan pengembangan lebih lanjut dengan menambah data primer dan konsep telah dipaparkan.
3. Pemerintah provinsi Sulawesi Utara dan pemerintah kabupaten/kota se-Sulawesi Utara dapat lebih meningkatkan upaya adaptasi dan mitigasi perubahan iklim demi keberlangsungan hidup generasi mendatang.

**KUTIPAN**

[1] Arbabsiar, M. H., Farsangi, M. A. E., & Mansouri, H. (2020). A new model for predicting the advance rate of a Tunnel Boring Machine (TBM) in hard rock conditions. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 35(2).

[2] Bappenas. (2021). *Ringkasan Eksekutif Kebijakan Pembangunan Berketahanan Iklim 2020 – 2045*.

[3] BMKG. (2023). *Analisis Dinamika Atmosfer-Laut; Analisis & Prediksi Curah Hujan; Update Dasarian I Januari 2023*.

[4] BNPB. (2022). *Indeks Risiko Bencana Indonesia tahun 2021*.

- [5] Burgess, P. (2019). *The Agroforestry Handbook: Agroforestry for the UK*. Soil Association Limited. Bristol.
- [6] Hosea, F., Mantiri, D. M., Paulus, J. J., Rompas, R. M., Lumoindong, F., & Mudeng, J. D. (2019). Analisis Logam Timbal (Pb) pada *Kappaphycus alvarezii* (Doty) Alga Merah yang di Budidaya di Teluk Totok Minahasa Tenggara, Sulawesi Utara. *Jurnal Pesisir dan Laut Tropis*, 7(3), 157-166.
- [7] Indrawan, I., & Siregar, R. I. (2018). Pemodelan Penerapan Terowongan Air (Tunnel) dalam Mengatasi Banjir Akibat Luapan Sungai Deli. *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 25(2), 113-120.
- [8] IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [9] Kolondam, N. M., Riogilang, H., & Riogilang, H. (2022). Strategi Penerapan Konsep Green City Di Kabupaten Minahasa Tenggara. *TEKNO*, 20(81).
- [10] Landauer, M., Juhola, S., & Klein, J. (2019). The role of scale in integrating climate change adaptation and mitigation in cities. *Journal of Environmental Planning and Management*, 62(5), 741-765.
- [11] Lawalata, J., Riogilang, H., & Rondonuwu, S. G. (2021). Analisis Pencemaran Udara Gas CO Akibat Pembuangan Gas Emisi Kendaraan Bermotor Di Depan Bahu Mall Pada Ruas Jalan Wolter Monginsidi Kota Manado. *TEKNO*, 19(78).
- [12] Mananoma, T., Tanudjaja, L., & Jansen, T. (2016). Desain sistem jaringan dan distribusi air bersih pedesaan (studi kasus desa warembungan). *Jurnal Sipil Statik*, 4(11).
- [13] Momongan, J. F., Gosal, P. H., & Kumurur, V. (2017). Efektivitas jalur hijau dalam menyerap emisi gas rumah kaca di Kota Manado. *Spasial*, 4(1), 36-43.
- [14] Nur, W. M., Mangangka, I. R., & Legrans, R. R. (2022). Perencanaan Sistem Penyediaan Air Minum Di Kelurahan Folarora Kota Tidore Kepulauan. *TEKNO*, 20(82), 687-698.
- [15] Patty, W., Manu, G., Reppie, E., & Dey, L. N. (2015). Komunitas Ikan Karang pada Terumbu Buatan Biorock di Perairan Pulau Siladen Kota Manado, Sulawesi Utara. *Jurnal Perikanan Universitas Gadjah Mada*, 17(2), 73-78.
- [16] Perangin-Angin, D. R., Riogilang, H., & Mangangka, I. (2022). Analisis Tingkat Kebisingan Lingkungan Di Kawasan Terminal Karombasan Kota Manado. *TEKNO*, 20(82), 527-536.
- [17] Riogilang, H. (2015). Tantangan Manado menuju kota hijau. *Jurnal LPPM Bidang Sains dan Teknologi*, 2(2), 103-112.
- [18] Riogilang, H. (2016). Identifikasi Dan Pedampingan Untuk Mengatasi Masalah Sanitasi Pada Pemukiman Kumuh Di Kampung Sanger, Sario Manado. *Jurnal LPPM bidang Sains dan teknologi*, 3(2), 54-63.
- [19] Rurung, M.A., Riogilang, H. and Hendratta, L.A., 2019. Perencanaan sistem drainase berwawasan lingkungan dengan sumur resapan di lahan Perumahan Wenwin-Sea Tumpengan Kabupaten Minahasa. *Jurnal Sipil Statik*, 7(2).
- [20] Virginia Livana Ering, V., Sabrina Handayani, M. T., Handayani, S., & Dessy Angga Afrianti, D. A. (2022). Perencanaan Bus Rapid Transit di Kota Manado. *Perencanaan Bus Rapid Transit di Kota Manado*, 1(1), 1-11.
- [21] Wakari, V. V., Rogi, O. H., & Makarau, V. H. (2019). Daya Dukung Layanan Angkot Berdasarkan Jarak Jangkauan Masyarakat Terhadap Jalur Trayek di Kota Manado. *SPASIAL*, 6(3), 553-560.
- [22] Wijaya, S. A., Riogilang, H., & Sompie, O. B. A. (2022). Analisis Kapasitas Pengolahan Air Lindi Di TPA Aertembaga Kota Bitung. *TEKNO*, 20(82), 1031-1039.