

2. DASAR TEORI

2.1 Perubahan Iklim

Perubahan iklim adalah fenomena yang melibatkan variasi panjang waktu dalam kondisi cuaca global. Penyebab utama perubahan iklim adalah peningkatan konsentrasi gas-gas rumah kaca dalam atmosfer, yang menyebabkan peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi (Olabi & Abdelkareem, 2022). Gas-gas ini, seperti karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan oksida nitrat (N₂O), berasal dari berbagai kegiatan manusia, seperti pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan proses industri. Peningkatan suhu global berdampak luas pada berbagai sistem ekologis dan geofisika di seluruh dunia. Salah satu dampak paling nyata adalah kenaikan permukaan air laut akibat pelelehan es di kutub dan gunung es. Ini dapat menyebabkan banjir pesisir, ancaman terhadap pulau-pulau kecil, dan perubahan dalam distribusi kehidupan laut. Selain itu, perubahan iklim juga dapat mengakibatkan intensifikasi kejadian cuaca ekstrem, seperti topan, badai, kekeringan, dan banjir (Box et al., 2019).

Dampaknya juga terasa pada ekosistem darat, dengan pergeseran pola vegetasi dan migrasi hewan. Peningkatan suhu dapat mengubah habitat alami, mempengaruhi sirkulasi udara, dan meningkatkan risiko kebakaran hutan. Secara global, terdapat ancaman terhadap keberlanjutan pangan karena perubahan iklim mempengaruhi produktivitas pertanian, menyebabkan kekeringan, dan mengubah pola tanaman. Upaya untuk mengatasi perubahan iklim melibatkan langkah-langkah adaptasi dan mitigasi. Adaptasi melibatkan penyesuaian terhadap perubahan yang sudah terjadi atau yang tidak dapat dihindari, sementara mitigasi bertujuan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Kesepakatan internasional, seperti Peretujuan Paris, menjadi tonggak penting dalam upaya global untuk membatasi kenaikan suhu rata-rata global. Negara-negara berkomitmen untuk mengurangi emisi, meningkatkan efisiensi energi, dan mengadopsi energi terbarukan untuk meminimalkan dampak perubahan iklim di masa mendatang (Fawzy et al., 2020).

2.2 Air Payau

Air payau adalah jenis air yang memiliki salinitas atau kandungan garam yang lebih tinggi daripada air tawar biasa, tetapi kurang daripada air laut (Honarparvar et al., 2019). Kandungan garam dalam air payau bervariasi tergantung pada beberapa faktor, termasuk lokasi geografis, kondisi geologis, dan aktivitas manusia di sekitarnya. Sumber utama salinitas

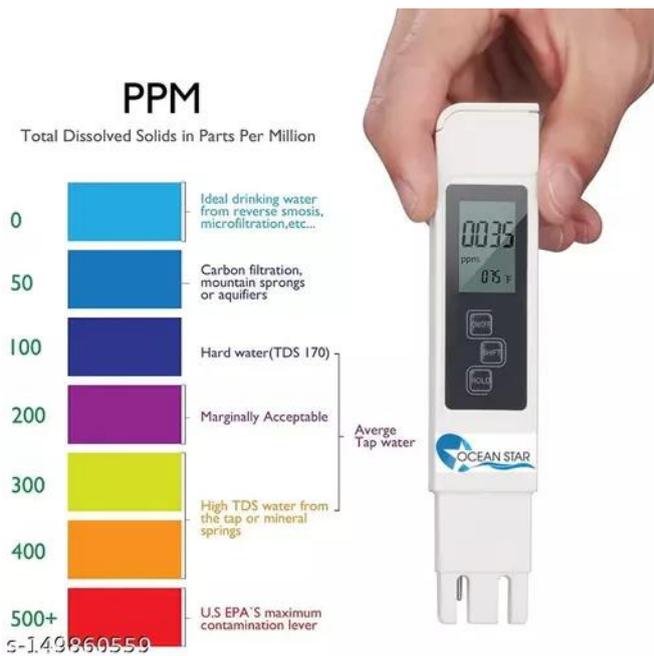
dalam air payau adalah mineral yang terlarut dari batuan di dasar tanah. Proses ini dapat diperkuat oleh air laut yang masuk melalui tanah, atau oleh proses penguapan yang meninggalkan garam-garam mineral di dalam air. Selain itu, aktivitas manusia seperti penggunaan pupuk, pembuangan limbah industri, atau pembangunan sumur garam juga dapat meningkatkan salinitas air payau.

Air payau memiliki beberapa karakteristik yang membedakannya dari air tawar dan air laut. Rasa asinnya lebih ringan daripada air laut, tetapi tetap terasa asin. Selain itu, air payau dapat ditemukan di daerah estuari, muara sungai, atau zona pesisir di mana air tawar dan air laut bertemu. Kondisi ini menyebabkan adanya zona transisi yang mendukung keberadaan air payau. Pemanfaatan air payau bervariasi tergantung pada kondisi lokal dan kebutuhan manusia di wilayah tersebut. Menurut Cong (2018), di beberapa tempat, air payau digunakan untuk pertanian, terutama di tanaman yang toleran terhadap salinitas tinggi seperti padi garam. Selain itu, tambak garam atau kolam ikan air payau dapat dimanfaatkan untuk budidaya organisme air asin yang memiliki nilai ekonomis.

Meskipun air payau memiliki potensi pemanfaatan, pengelolaannya juga memerlukan perhatian serius. Kandungan garam yang tinggi dapat merusak tanaman, tanah, dan infrastruktur. Selain itu, pengaruhnya terhadap ekosistem perairan dapat memengaruhi keberlanjutan hayati dan sumber daya alam. Oleh karena itu, diperlukan tindakan pengelolaan yang bijaksana, termasuk pemantauan salinitas, pengelolaan limbah, dan penggunaan teknologi yang tepat untuk memastikan bahwa pemanfaatan air payau dapat dilakukan secara berkelanjutan tanpa merusak lingkungan (Gaglio et al., 2019).

2.3 Total Dissolved Solids (TDS)

Menurut Sherrad, et al. (1987), (*Total Dissolved Solids* (TDS) merujuk pada jumlah keseluruhan zat terlarut yang ada dalam suatu larutan air. Zat terlarut ini mencakup mineral, garam, senyawa organik, dan logam berat yang dapat larut dalam air. Pengukuran TDS dilakukan dengan menentukan total massa padatan terlarut dalam suatu volume air, biasanya diukur dalam miligram per liter (mg/L) atau parts per million (ppm). Nilai TDS dapat berfluktuasi tergantung pada sumber airnya, termasuk air sungai, sumur, atau air minum yang dihasilkan oleh pengolahan air. Pada Gambar 2.1 dapat dilihat bentuk dari alat TDS dan cara membacanya.



Gambar 2.1 Produk Total Dissolved Solids

Sumber: <https://www.meesho.com/ocean-star-total-dissolved-solid-ec-meter-quality-temperature-tester-with-range-0-9990ppm-ideal-for-testing-drinking-water-aquariums-and-other/p/2h815b>

TDS memiliki dampak yang signifikan pada kualitas air dan dapat mempengaruhi berbagai penggunaan air, termasuk konsumsi manusia, pertanian, dan keperluan industri. Jumlah TDS yang tinggi dapat memberikan rasa air yang tidak enak dan meninggalkan endapan pada peralatan rumah tangga dan industri. Sebaliknya, TDS yang rendah mungkin menandakan kurangnya mineral esensial dalam air, yang bisa mempengaruhi rasa dan manfaat kesehatan air (Howard, 1933). Pemantauan dan pengelolaan TDS menjadi penting untuk memastikan kualitas air yang memenuhi standar kesehatan dan keamanan. Teknologi seperti reverse osmosis atau pengolahan air lanjutan dapat digunakan untuk mengurangi tingkat TDS dan meningkatkan kualitas air (Rahman et al., 2020). Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam tentang TDS sangat penting dalam menjaga kualitas air yang optimal dan memenuhi berbagai kebutuhan masyarakat dan sektor lainnya.

Total Dissolved Solids (TDS) dan tingkat pH adalah dua parameter kualitas air yang memberikan informasi berbeda tentang karakteristik kimia air. TDS mengukur jumlah total zat terlarut dalam air, seperti mineral, garam, dan senyawa organik. Sementara itu, pH mengukur tingkat keasaman atau kebasaan air. Skala pH berkisar dari 0 hingga 14, dengan nilai 7 dianggap netral. Angka di bawah 7 menunjukkan keasaman, sedangkan angka di atas 7

menunjukkan kebasaaan. Perubahan tingkat pH dapat mempengaruhi kelarutan senyawa kimia dalam air, termasuk logam berat, dan juga memengaruhi reaksi kimia yang terjadi dalam air (Jumaidi, 2023).

Perbedaan utama antara TDS dan pH adalah bahwa TDS memberikan gambaran tentang jumlah keseluruhan zat terlarut dalam air, sedangkan pH memberikan informasi tentang tingkat keasaman atau kebasaaan air. Meskipun keduanya dapat memberikan indikasi tentang kualitas air, informasi yang diberikan oleh TDS lebih bersifat komprehensif terkait dengan jumlah zat terlarut, sementara pH lebih fokus pada karakteristik asam-basa. Oleh karena itu, pengukuran TDS dan pH sering kali dilakukan bersamaan untuk memberikan pemahaman yang lebih lengkap tentang kualitas kimia suatu sumber air (Islam et al., 2017).

2.4 Proyeksi Peta Dunia

Menurut Setyawan et al. (2018), peta adalah gambar permukaan Bumi yang diperkecil yang digambar pada media kertas atau media lain dan berbentuk dua dimensi. Namun, Bumi adalah objek berbentuk bola dengan permukaan tidak rata yang berukuran tiga dimensi. Sistem proyeksi peta menampilkan bidang datar berdasarkan proyeksi permukaan bidang lengkung. Disebabkan oleh proses representasi ini, distorsi harus diperhitungkan untuk mendapatkan ketelitian dalam hal sudut, jarak, dan luas. Dua sistem proyeksi yang umum digunakan dalam SIG (Sistem Informasi Geografis) adalah sistem proyeksi koordinat geografi yang menggunakan longitude latitude (garis bujur dan garis lintang) dan Universal Transverse Mercator (UTM). Sistem proyeksi kartesian dapat digambarkan dalam unit X dan Y.

2.5 Pemetaan Batimetri

Menurut Febrianto et al. (2015), peta batimetri diperlukan untuk mendapatkan informasi tentang dasar laut karena batimetri adalah kedalaman dasar laut di mana ukuran tinggi rendah dasarnya termasuk. Informasi yang diperoleh dari peta ini dapat digunakan untuk menentukan alur perjalanan pelayaran dan tugas lain yang berkaitan dengan dasar laut. Febrianto, Hestirianto, dan Agus (2015) juga mengatakan bahwa pada awalnya, pengukuran batimetri dilakukan dengan metode konvensional dengan metode batu duga. Metode ini menggunakan bandul pemberat dengan massa antara 25 dan 75 kilogram yang dipasang dengan kabel. Namun, seiring berkembangnya teknologi, metode ini tidak lagi digunakan dan mulai ditinggalkan, terutama untuk pengukuran di perairan yang dalam dan luas. Pastiya teknologi yang digunakan saat ini adalah gelombang suara yang lebih baik karena tidak merusak lingkungan di sekitar lokasi penelitian. Meskipun peta batimetri tidak serinci dengan

peta permukaan bumi, kita dapat mengetahui kontur dasar laut dengan menggunakan peta batimetri, yang akan bermanfaat untuk penelitian, pertambangan, militer, dan perhubungan.

2.6 Pasang Surut Air Laut

Salah satu fenomena alam yang terjadi di laut adalah pasang surut air laut. Menurut Khan (2018), pasang surut adalah gerakan naik turun secara berulang dan teratur dari seluruh massa partikel air laut mulai dari permukaan sampai ke bagian terdalam dari dasar laut yang disebabkan oleh gaya gravitasi yang dipengaruhi oleh Bumi, bulan, dan matahari.

Ahmad, et al. (2017) menjelaskan pasang surut dapat dibedakan menjadi 4 tipe, antara lain:

1. Pasang surut harian tunggal (*diurnal tide*). Pasut ini merupakan pasut yang terjadi masing-masing satu kali yaitu satu kali pasang, dan satu kali surut dalam waktu 24 jam yang besarnya hampir sama.
2. Pasang surut harian ganda (*semi diurnal tide*). Pasut ini merupakan pasut yang terjadi masing-masing dua kali yaitu dua kali pasang, dan dua kali surut dalam waktu 24 jam yang besarnya hampir sama.
3. Pasang surut campuran condong ke harian tunggal (*mixed tide prevailing diurnal*). Pasut ini merupakan pasut yang terjadi satu kali tetapi terkadang terjadi dua kali pasang surut dengan perbedaan besar dan waktu.
4. Pasang surut campuran condong ke harian ganda (*mixed tide prevailing semi diurnal*). Pasut ini merupakan pasut yang terjadi dua kali tetapi terkadang terjadi satu kali pasang surut dengan perbedaan besar dan waktu.

Menurut Bilad (2014), komponen harmonik pasang surut merupakan penyebab pasang surut dengan bagian masing-masing, karena sesuai dengan penyebabnya yang periodik. Komponen-komponen ini adalah penyebab pasang surut dengan bagian masing-masing, seperti:

1. Komponen pasang periode panjang (*long period tide*)
2. Komponen pasang periode harian tunggal (*diurnal period tide*)
3. Komponen pasang periode harian ganda (*semi-diurnal period tide*)

Pada masing-masing kelompok komponen tersebut memiliki anggota yang dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1
Komponen Harmonik Pasang Surut (Madah, 2016)

<i>Tides</i>	<i>Tidal Constituent</i>	<i>Symbol</i>	<i>Tides</i>	<i>Tidal Constituent</i>	<i>Symbol</i>	<i>Tides</i>	<i>Tidal Constituent</i>	<i>Symbol</i>
<i>Semi-diurnal</i>	<i>Principal Lunar</i>	M2	<i>Diurnal</i>	<i>Luni-solar</i>	K1	<i>Long Period</i>	<i>Lunar monthly</i>	MM
	<i>Principal Solar</i>	S2		<i>Principal lunar</i>	O1		<i>Lunar semi-monthly</i>	MF
	<i>Larger Elliptical Lunar</i>	N2			S1		<i>Fourth Diurnal</i>	M4
		2N2		<i>Principal Solar</i>	P1		<i>Fourth Diurnal</i>	MN4
	<i>Declinational Lunar</i>	K2		<i>Larger elliptical lunar</i>	Q1		<i>Fourth Diurnal</i>	MS4

Setiap komponen mewakili perubahan periodik dalam posisi relatif bumi, bulan dan matahari. Komposisi berubah sesuai lokasi pasang surut yang diamati.

2.7 Model Hidrodinamika Menggunakan Delft3D

Selama bertahun-tahun, model numerik yang beragam digunakan untuk studi tentang transportasi air dan perairan. Di wilayah Zulawy, Polandia, model hidrodinamika dua dimensi pertama kali digunakan untuk memprediksi banjir selama badai musim dingin. Namun, variabilitas vertikal parameter yang diselidiki tidak dimasukkan ke dalam model dua dimensi yang digunakan. Namun, model 2D adalah alat untuk memperkirakan ketinggian air yang sangat bermanfaat dan akurat dalam penggunaannya (Catewicz & Jankowski, 1983). Mulai tahun 1994, model 2D dibangun berdasarkan sistem pemodelan MIKE 21, yang terdiri dari beberapa perbedaan modul: hidrodinamika, kualitas air, dan eutrofikasi, yang digunakan untuk memodelkan proses hidrobiologis dan hidrokimia (Oldakowski et al., 1995). Pada saat ini model hidrodinamik sudah dicapai dengan metode 3D untuk mensimulasikan Modul hidrodinamika yang didasarkan pada sistem pemodelan *Delft3D* (*Delft3D-FLOW*, 2014).

Deltares mengembangkan *Delft3D*, software berbasis open source, untuk mendorong lebih banyak ahli oseanografi dari seluruh dunia untuk berpartisipasi dalam pengembangan model. *Delft3D* dapat mensimulasikan arus, gelombang, angkutan sediman, kualitas air, perkembangan morfologi, dan ekologi di daerah yang dimodelkan untuk memperhitungkan

dan mendekati kondisi asli di daerah sungai, muara, dan pesisir. *Delft3D* adalah program pemodelan hidrodinamika atau simulasi perairan multi dimensi yang dapat digunakan untuk menghitung aliran air, gelombang, sedimen, kualitas air, dan analisis ekologi di daerah pantai. Menurut Fahmi dan Hafli (2019), aplikasi ini dapat digabungkan dengan *ArcGIS* dan membutuhkan beberapa program pendukung lainnya.

Selain itu, *Delft3D* memiliki kemampuan untuk memodelkan aliran masuk dari sungai dan sumber titik lainnya. Model terdiri dari persamaan kontinuitas dan gerak yang tidak stagnan atau stasioner. Dalam aplikasi ini, persamaan kontinuitas diselesaikan secara numerik dengan sistem lengkung ortogonal koordinat horizontal. Ini memastikan bahwa grid akan terbentuk dan terpasang dengan baik sesuai dengan bentuk area yang dimodelkan. Hasil *Delft3D-Flow* model membantu menghitung proses hidrodinamika dengan menggunakan model kualitas air (Bielecka & Kazmierski, 2003).

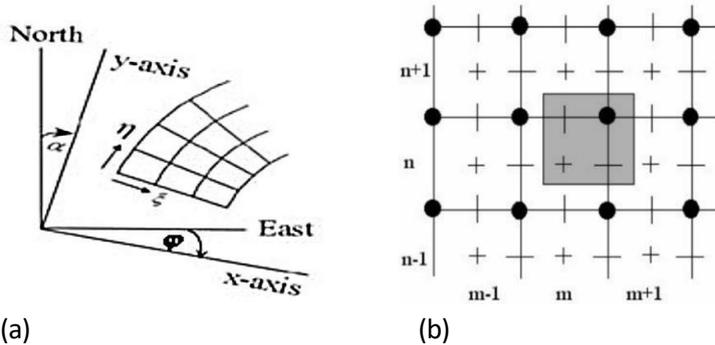
Salah satu cara untuk memperkirakan pergerakan air secara dinamis adalah dengan menggunakan model hidrodinamika (Putra & Niko, 2019). *Delft3D* adalah program untuk membuat model hidrodinamika yang menggunakan metode numerik untuk memproses data yang dimasukkan. Agar hasil simulasi benar dan dapat digunakan sebagai acuan dasar untuk melihat dan memprediksi pergerakan air secara dinamis yang terjadi dan yang akan datang, data utamanya adalah data sounding dari Deeper Smart Sonar atau data batimetri yang dapat diperoleh dari data batimetri GEBCO.

2.7.1 *Delft3D-Flow*

Delft3D-Flow adalah program software yang digunakan dalam *Delft3D* untuk menentukan SWE (*Shallow Water Equation*) atau persamaan air saat keadaan dangkal. SWE dibentuk oleh dua variabel berbeda, yaitu kecepatan dan ketinggian. Kemudian, tergantung pada model yang dibuat, variabel tersebut dapat disajikan dalam dua dimensi atau tiga dimensi. Selanjutnya, variabel tersebut diproyeksikan pada garis yang memiliki dua arah, yaitu arah horizontal dan vertikal.

Menurut Putra (2019), dalam simulasi *Delft3D* terdapat *grid*, yang merupakan garis bantu untuk koordinat vertikal dan horizontal. Mereka digunakan untuk menentukan luas area simulasi atau mengatur batas area yang terdiri dari dua sistem, *coordinate cartesian* yang berbentuk persegi dan *coordinate spherical*. Sistem koordinat kartesius bersifat kaku dan memiliki hanya dua parameter, yaitu arah vertikal (η) dan arah horizontal (ξ), sedangkan sistem koordinat *spherical* bebas. Latitude (α) menunjukkan nilai positif ke arah utara dan

longitude (ϕ) menunjukkan nilai positif ke arah timur (Lihat **Gambar 2.2**).



Gambar 2.2 Sistem *coordinate Spherical* (a) dan sistem *coordinate cartessian* (b) (Delft3D-FLOW, 2014)

Bagian-bagian yang ada pada *Delft3D-Flow* beserta fungsinya adalah sebagai berikut:

- a) *Delft3D-RGFGRID*: Membuat area yang dibagi dalam beberapa bagian dalam bentuk *grid* pada topografi
- b) *Delft3D-QUICKIN*: Masukan pada *grid* berupa data batimetri, kondisi asli untuk salinitas, *water level* dan lain-lain.
- c) *Delft3D-TRIANA*: Analisis pasang surut dalam interval waktu.
- d) *Delft3D-TIDE*: Analisis pasang surut terhadap *water level* dan kecepatan.
- e) *Delft3D-NESTHD*: Membuat batasan dari keseluruhan model.
- f) *Delft3D-GPP*: Menampilkan hasil simulasi berupa gambar animasi dan visualisasi.
- g) *Delft3D-QUICKPLOT*: sama halnya dengan *Delft3D-GPP*

Persamaan differensial penentu dalam kombinasi yang sesuai pengaturan inisial juga dapat diselesaikan dengan persamaan *grid finite difference*. Untuk menyelesaikan pemodelan arus dan pasang surut. Sistem *software Delft3D open source* menggunakan persamaan *Navier-Stokes* dalam perhitungannya. Menurut Girault dan Raviart (1979), rumus *Navier Stokes* adalah:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\rho x} + \frac{\partial(\rho v)}{\rho y} + \frac{\partial(\rho w)}{\rho z} = 0 \quad (2.1)$$

Dimana :

x,y,z = koordinat
u,v,w = komponen kecepatan
ρ = massa jenis

2.7.2 *Delft3D-Wave*

Delft3D Wave adalah sistem bagian yang digunakan untuk mensimulasikan gelombang yang dibuat di perairan pantai (Fahmi dan Hafli, 2019). *Delft 3D - Wave* tidak hanya dapat digunakan di perairan dangkal, tetapi juga di perairan menengah dan dalam. Untuk menghasilkan *MDW-file*, kita harus memasukkan data sebelum memulai *Delft 3D – Wave*. *File MDW* berisi semua data yang diperlukan untuk menjalankan simulasi pemodelan gelombang, yang dilakukan bersamaan dengan *Delft 3D – Flow* atau simulasi arus.

2.8 *Root Mean Square Error (RMSE)*

Dalam beberapa studi seperti meteorologi, kualitas udara, dan penelitian iklim, *Root Mean Square Error (RMSE)* adalah metode statistik standar yang digunakan untuk mengukur kinerja yang dihasilkan oleh model. Menurut Savage et al. (2013), dalam kegiatan di bidang geosains, banyak para peneliti yang menggunakan metode RMSE sebagai metrik standar untuk menilai seberapa besar kesalahan model yang dibuat. Oleh karena itu, tingkat kesalahan model hidrodinamika yang dihasilkan dapat dihitung dengan metode RMSE dengan menggunakan rumus RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Predicted_i - Actual_i)^2}{N}} \quad (2.2)$$

Dimana :

Predicted_i = Nilai Data Prediksi Simulasi
Actual_i = Nilai Data Observasi
N = Jumlah Data

Dua jenis data diperlukan untuk mengolah data menjadi angka RMSE yaitu data observasi dari stasiun pemantauan *real-time* di wilayah penelitian dan data prediksi dari hasil proses simulasi model hidrodinamika yang koordinatnya sama dengan stasiun pemantauan *real-time*.

2.9 HEC-RAS

HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*) adalah sebuah perangkat lunak yang dikembangkan oleh U.S. Army Corps of Engineers untuk melakukan analisis hidrolik dan pemodelan sungai yang sangat terperinci (Brunner, 2016). Program ini memainkan peran kunci dalam rekayasa sungai, perencanaan tata air, dan manajemen banjir. HEC-RAS menyediakan serangkaian fitur canggih yang memungkinkan para insinyur dan ahli hidrologi untuk menggambarkan dengan akurat perilaku aliran sungai di berbagai kondisi.

Salah satu fitur unggulan HEC-RAS adalah kemampuannya untuk memodelkan geometri sungai yang kompleks, termasuk perubahan elevasi dasar sungai, tepi sungai, dan struktur manusia seperti bendungan atau jembatan (Ogras & Onen, 2020). Ini memungkinkan pengguna untuk memahami dampak struktur tersebut terhadap pola aliran air dan potensi risiko banjir. HEC-RAS juga mencakup algoritma numerik yang canggih untuk perhitungan hidrolik, termasuk distribusi tekanan, kecepatan aliran, dan elevasi permukaan air.

Perangkat lunak ini dapat digunakan untuk menganalisis berbagai skenario, termasuk perubahan kondisi alam seperti curah hujan ekstrem atau peningkatan debit sungai. HEC-RAS juga mendukung pemodelan transisi aliran, di mana perubahan dalam waktu dan ruang dapat diamati dengan cermat. Dengan menggunakan HEC-RAS, para ahli dapat mengevaluasi risiko banjir, merencanakan struktur pengendalian banjir, dan mengembangkan strategi mitigasi untuk melindungi lingkungan dan infrastruktur.

Pengguna HEC-RAS dapat memvisualisasikan hasil analisis dalam bentuk peta dan grafik yang memberikan wawasan mendalam tentang dinamika sungai. Perangkat lunak ini memberikan solusi yang kuat untuk merancang dan mengelola sistem sungai secara efisien, mendukung pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan, dan membantu mitigasi risiko bencana alam terkait air.

2.10 Revolusi Industri 4.0 Menunjang Pemodelan Hidrodinamika

Dibandingkan dengan abad-abad sebelumnya, kemajuan teknologi di abad ke-21 sangat berbeda. Pada abad ke-18, pabrik menggunakan mesin pembangkit tenaga uap untuk memproduksi barang, pada abad ke-19 listrik menjadi sumber utama produksi massal industri, dan pada abad ke-20, industri mulai menggunakan teknologi atau otomatisasi yang berasal dari kemajuan teknologi abad sebelumnya. Seperti yang dapat dilihat pada bidang industri saat ini yang berkembang dengan pesat melalui dunia digital atau internet dalam hal teknologi informasi dan teknologi, jaringan komunikasi, dan metode perdagangan melalui media

elektronik (*e-commerce*). Saat ini kita berada di era keempat kemajuan teknologi, yaitu digitalisasi sektor industri yang dikenal sebagai Industri 4.0 (Rüßmann et al., 2015).

Dunia industri 4.0 dimulai pada tahun 2010 ketika pemerintah Jerman membuat kebijakan untuk mempertahankan industri Jerman dalam persaingan pasar global. Revolusi industri 4.0 memiliki tiga komponen utama (Ungurean et al., 2014):

1. *Internet of Things*: internet adalah kebutuhan utama untuk memperluas manfaat dari sebuah obyek
2. *Cyber-Physical Systems (CPS)*: Kolaborasi antara dunia maya dan dunia nyata
3. *Internet of Systems*: Penyimpanan data menggunakan jaringan internet tanpa menyediakan *hardware (cloud)*

Sektor konstruksi juga terkena dampak revolusi industri 4.0. Dari sudut pandang teknis, ada banyak masalah yang belum dapat diselesaikan dan akan dihadapi tanpa penggunaan teknologi (Nowotarski & Paslawski, 2017). Di industri manufaktur, analisis data besar telah muncul untuk mengoptimalkan kualitas produksi, menghemat energi, dan meningkatkan layanan peralatan (Rüßmann et al., 2015). Untuk mendapatkan data untuk pemodelan hidrodinamika, penelitian ini menggunakan fitur utama yang tersedia di era industri 4.0. Dengan menggunakan internet yang terintegrasi dengan stasiun pusat data perairan dan terhubung dengan BMKG, data penunjang pemodelan hidrodinamika dapat dikumpulkan dengan cepat dan sesuai dengan kondisi aslinya.

2.11 *State of the Art*

Pada tahun 2020 Konapala, Mishra, Wada, dan Mann melakukan penelitian dengan judul *Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation* (Tabel 2.2). Penelitian ini mengukur curah hujan dan proses penguapan terutama di musim hujan dengan tingkat penguapan yang tinggi. Sedangkan untuk musim kemarau peningkatan ketersediaan air tidak selalu signifikan. Hasil dari penelitian tersebut adalah untuk menunjukkan bahwa beberapa lokasi di dunia mengalami musim kemarau yang lebih kering karena dipengaruhi oleh penguapan dan curah hujan.

Penelitian yang dilakukan oleh Daba dan You pada tahun 2020 dengan judul *Assessment of climate change impacts on river flow regimes in the upstream of Awash Basin, Ethiopia: Based on IPCC fifth assessment report (AR5) climate change scenarios* (Tabel 2.2). Isu utama dalam penelitian ini adalah Perubahan pada musim kering lebih serius dibandingkan dengan musim hujan di dasar aliran sungai. Perubahan iklim dapat menyebabkan peningkatan limpasan pada musim hujan dan penurunan limpasan pada musim kering, mengakibatkan variasi musiman yang meningkat dalam limpasan dan aliran sungai. Penelitian ini mengungkapkan bahwa perubahan iklim akan memiliki dampak signifikan pada limpasan permukaan, aliran sungai, dan teramati peningkatan atau penurunan ketersediaan air yang tidak konsisten.

Goyal dan Surampalli pada tahun 2018 melakukan penelitian dengan judul *act of climate change on water resources in India* (Tabel 2.2). Penelitian ini meneliti tentang Perubahan iklim diharapkan berdampak lebih besar di beberapa wilayah India. Hal ini akan memengaruhi perencanaan sumber daya air, termasuk desain struktur hidrologi, manajemen banjir dan kekeringan, serta perencanaan perkotaan. Khususnya, ekonomi pertanian India yang bergantung pada musim hujan dan ketersediaan air sangat rentan terhadap perubahan iklim. Oleh karena itu, perlu meningkatkan penilaian dampak perubahan iklim dan mengadaptasi teknik dengan menggunakan skenario masa depan.

Pada tahun 2020, Tabari melakukan penelitian dengan judul *Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability* (Tabel 2.2). Terjadinya perubahan dalam intensitas banjir dan curah hujan ekstrem merupakan sebuah respon terhadap pemanasan global. Peningkatan curah hujan ekstrem dan penurunan yang diharapkan dalam curah hujan total di daerah kering mendukung pola "hujan deras setelah kemarau" di wilayah-wilayah ini. Hasilnya menunjukkan hubungan yang jelas antara perubahan banjir dan curah hujan ekstrem dengan ketersediaan air spasial dan musiman,

menunjukkan peningkatan yang lebih besar untuk wilayah dan musim dengan ketersediaan air (kelembaban) yang lebih tinggi.

Afshar dan Fahmi pada tahun 2019 melakukan penelitian dengan judul *Impact of climate change on water resources in Iran* (Tabel 2.2). Penelitian menjelaskan tentang deret Fourier dan pendekatan empiris The Francou dan Rodier telah digunakan untuk penilaian curah hujan dan analisis banjir, masing-masing. Telah ditemukan bahwa efek utama dari perubahan iklim terkait dengan sumber daya air adalah peningkatan suhu, pergeseran pola curah hujan, tutupan salju, dan peningkatan kemungkinan banjir dan kekeringan. Perubahan iklim juga dapat secara signifikan mengubah variasi musiman dalam perubahan aliran sungai.

Roth, Lemann, Zeleke, Subhatu, Nigussie, dan Hurni pada tahun 2018 melakukan penelitian dengan judul *Effects of climate change on water resources in the upper Blue Nile Basin of Ethiopia* (Tabel 2.2). Temuan dari penelitian ini menyoroti ketidakpastian yang masih ada di antara berbagai Model Iklim Global (GCMs) terkait perubahan yang diproyeksikan. Hasilnya menunjukkan tren serupa, tetapi pola perubahan curah hujan dan suhu berbeda. Meskipun model-model yang digunakan sejalan dalam hal tren umum, mereka berbeda dalam hasil curah hujan dan aliran sungai bulanan. Pada saat yang sama, meskipun terdapat perbedaan besar dalam nilai (absolut) aliran sungai yang diproyeksikan, semua model memprediksi perubahan dramatis lebih atau kurang dalam pola curah hujan dan suhu tahunan.

Pada tahun 2018, Kundzewicz, Krysanova, Benestad, Hov, Piniewski, dan Otto melakukan penelitian dengan judul *Uncertainty in climate change impacts on water resources* (Tabel 2.2). Karena proyeksi berbasis model terhadap dampak iklim pada sumber daya air dapat sangat berbeda, prosedur adaptasi perlu dikembangkan yang tidak memerlukan proyeksi yang pasti dan kuantitatif terhadap perubahan dalam variabel hidrologi, seperti aliran sungai, tingkat danau, kelembaban tanah, dan sebagainya, tetapi lebih berfokus pada rentang nilai yang diproyeksikan. Perencanaan adaptif seharusnya didasarkan pada ensemble dan pendekatan probabilitas multi-model daripada hanya satu skenario dan satu proyeksi nilai tunggal untuk masa depan.

Arora pada tahun 20219 melakukan penelitian dengan judul *Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions* (Tabel 2.2). Semua gangguan terkait iklim ini tidak hanya akan berdampak drastis pada pola distribusi makanan, tetapi juga pada kualitas dan aksesnya. Tidak hanya itu, hal ini juga akan menimbulkan kekhawatiran kemanusiaan karena keamanan pangan sangat terkait erat dengan kesehatan masyarakat dan

akan menciptakan siklus setan kelaparan, penyakit, dan kejahatan. Oleh karena itu, diperlukan tindakan/policies untuk mengurangi dampak yang disebabkan oleh variasi iklim secara mendesak.

Tabel 2.2

State of the Art

No.	Peneliti	Judul	Variabel	Hasil Penelitian
1.	(Konapala et al., 2020)	<i>Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation</i>	<i>global climate, non-parametric analysis, water availability</i>	Jika curah hujan lebih banyak daripada penguapan, maka ketersediaan air meningkat, terutama saat musim hujan di daerah dengan tingkat penguapan tinggi. Wilayah-wilayah yang memiliki tingkat penguapan tinggi cenderung mengalami peningkatan ketersediaan air, yang bisa meningkatkan risiko banjir di beberapa wilayah tertentu. Namun, pada musim kering, peningkatan ketersediaan air tidak selalu signifikan. Secara umum, penelitian ini juga menunjukkan bahwa beberapa lokasi di dunia mengalami musim kemarau yang semakin kering, dan hal ini dipengaruhi oleh peran penguapan dan curah hujan dalam perubahan musiman ketersediaan air.
2.	(Daba & You, 2020)	<i>Assessment of climate change impacts on river flow regimes in the upstream of Awash Basin, Ethiopia: Based on IPCC fifth assessment report (AR5) climate change scenarios</i>	<i>climate change; RCPs; GCM; streamflow; runoff; SWAT model</i>	Perubahan iklim dapat menyebabkan peningkatan limpasan pada musim hujan dan penurunan limpasan pada musim kering, sehingga menimbulkan variasi musiman yang lebih besar dalam aliran sungai. Penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan iklim akan berdampak besar pada limpasan permukaan, aliran sungai, dan ketersediaan air yang tidak konsisten. Oleh karena itu, hasil studi ini dapat memberikan informasi bermanfaat bagi para ahli hidro-klimatologi dan pengelola dalam membuat keputusan terbaik terkait manajemen pertanian dan sumber daya air di masa depan menghadapi perubahan iklim.

No.	Peneliti	Judul	Variabel	Hasil Penelitian
3.	(Goyal & Surampalli, 2018)	<i>Impact of climate change on water resources in India</i>	<i>Climate change, India, Precipitation, Temperature, Runoff</i>	Perubahan iklim di India akan berdampak besar, terutama pada perencanaan air, manajemen banjir, kekeringan, dan pembangunan perkotaan. Ekonomi pertanian yang bergantung pada musim hujan dan air menjadi sangat rentan. Oleh karena itu, penting untuk memahami dampaknya dan menyesuaikan diri dengan skenario masa depan. Saat ini, sistem sumber daya air India memiliki kekurangan data penting dan perlu ditingkatkan untuk menghadapi tantangan perubahan iklim. Rencana Aksi Nasional untuk Perubahan Iklim (NAPCC) yang diluncurkan pada 2008 memiliki tujuan untuk mengatasi dampak dan adaptasi perubahan iklim. India juga fokus pada peningkatan efisiensi penggunaan air sebesar 20% dan peningkatan tutupan hutan dari 23% menjadi 33%.
4.	(Tabari, 2020)	<i>Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability</i>	<i>Flooding, climate regions, seasonal cycle of water availability</i>	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan dalam intensitas banjir dan curah hujan ekstrem akibat pemanasan global sangat penting dan kuat ketika diakumulasi di berbagai wilayah iklim. Regionalisasi perubahan ini mengurangi kebisingan besar dari peristiwa ekstrem pada skala lokal, menghasilkan hasil yang lebih stabil. Peningkatan curah hujan ekstrem dan penurunan curah hujan total yang diharapkan di daerah kering mendukung pola "hujan deras setelah kemarau" di wilayah-wilayah ini. Hasilnya menunjukkan hubungan yang jelas antara perubahan banjir dan curah hujan ekstrem dengan ketersediaan air spasial dan musiman, menunjukkan peningkatan yang lebih besar untuk wilayah dan musim dengan ketersediaan air yang lebih tinggi.

No.	Peneliti	Judul	Variabel	Hasil Penelitian
5.	(Afshar & Fahmi, 2019)	<i>Impact of climate change on water resources in Iran</i>	<i>Climate change, Water structures</i>	Beberapa model telah digunakan untuk memprediksi perubahan iklim, tetapi prediksi jangka panjang untuk parameter cuaca merupakan tantangan yang diperlukan untuk manajemen sumber daya air. Oleh karena itu, deret Fourier dan pendekatan empiris The Francou dan Rodier telah digunakan untuk penilaian curah hujan dan analisis banjir, masing-masing. Telah ditemukan bahwa efek utama dari perubahan iklim terkait dengan sumber daya air adalah peningkatan suhu, pergeseran pola curah hujan, tutupan salju, dan peningkatan kemungkinan banjir dan kekeringan. Perubahan iklim juga dapat secara signifikan mengubah variasi musiman dalam perubahan aliran sungai.
6.	(Roth et al., 2018)	<i>Effects of climate change on water resources in the upper Blue Nile Basin of Ethiopia</i>	<i>Environmental science, Geography, Geoscience, Hydrology</i>	Suhu rata-rata di wilayah DAS Abay diperkirakan akan naik, dengan musim hujan utama yang semakin mereda dan hujan yang lebih merata sepanjang tahun. Perubahan ini kemungkinan besar akan mempengaruhi aliran sungai, yang diprediksi akan meningkat, entah itu secara perlahan atau drastis. Ini bisa membawa manfaat, seperti ketersediaan air yang lebih baik untuk pertanian dan kebutuhan harian, serta pembangkit listrik air. Sudan dan Mesir juga mungkin mendapatkan keuntungan dari aliran sungai yang lebih stabil dan meningkat. Meskipun begitu, masih ada ketidakpastian tentang bagaimana perubahan iklim akan memengaruhi Sungai Nil Biru. Oleh karena itu, fokus kebijakan harus tetap pada pemahaman dan adaptasi terhadap berbagai kemungkinan, serta upaya untuk mengurangi dampak perubahan iklim.

No.	Peneliti	Judul	Variabel	Hasil Penelitian
7.	(Kundzewicz et al., 2018)	<i>Uncertainty in climate change impacts on water resources</i>	<i>Uncertainty, Information, Climate change impacts, Water resources, Modelling</i>	Karena proyeksi dampak iklim pada sumber daya air berbasis model bisa sangat berbeda, kita perlu mengembangkan prosedur adaptasi yang tidak tergantung pada proyeksi yang pasti dan kuantitatif, misalnya untuk aliran sungai, tingkat danau, kelembaban tanah, dan sebagainya. Sebaliknya, kita lebih baik menggunakan rentang nilai yang mungkin diproyeksikan. Perencanaan adaptif sebaiknya didasarkan pada pendekatan ensemble dan probabilitas multi-model daripada hanya mengandalkan satu skenario dan satu nilai proyeksi untuk masa depan. Jika hasil ilmu pengetahuan belum cukup kokoh, kita bisa mempertimbangkan konsep ijin pencegahan sebagai bagian dari upaya untuk melindungi dari dampak perubahan iklim.
8.	(Arora, 2019)	<i>Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions</i>	<i>Climate change, Temperature, Agricultural</i>	Gangguan iklim ini tidak hanya akan berdampak besar pada cara makanan didistribusikan, tetapi juga pada kualitas dan aksesnya. Selain itu, hal ini juga bisa menimbulkan masalah kemanusiaan karena keamanan pangan sangat terkait dengan kesehatan dan bisa menciptakan siklus kelaparan, penyakit, dan kejahatan. Menurut laporan FAO, jumlah orang yang kelaparan terus meningkat sejak 2014, dari 804 juta pada tahun 2016 menjadi 824 juta pada tahun 2017. Ini menunjukkan bahwa mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan (SDG) untuk menghapus kelaparan pada tahun 2030 masih sulit. Oleh karena itu, perlu segera mengambil tindakan dan kebijakan untuk mengurangi dampak yang disebabkan oleh perubahan iklim.