

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perubahan iklim menjadi salah satu bencana global terbesar di abad ke-21 (Nyberg & Wright, 2022), ditandai dengan peningkatan suhu bumi, kenaikan permukaan laut, dan cuaca ekstrem akibat peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (GHGs) di atmosfer oleh karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), nitrogen oksida (N_2O), nitrogen trifluorida (NF_3), hidrofluorokarbon (HFCs), serta perfluorokarbon (PFCs) dan sulfur heksafluorida (SF_6) (Filonchik et al., 2024; Luo et al., 2016; Pigeolet et al., 2019; UNEP, 2023). Menurut *Carbon Direct* (2024), sejak tahun 1750, penduduk bumi telah menyumbang pemanasan global dengan menghasilkan 1,6 triliun ton CO_2 ke udara dan lautan atau sekitar 40 miliar ton CO_2 setiap tahun. Berdasarkan laporan oleh IPCC (2021), IEA (2023) dan *BP Statistical Review of World Energy* (2023), lebih dari 60% penyebab pemanasan global bersumber pada emisi karbon yang berasal dari produksi dan konsumsi energi berbasis fosil di sektor industri, energi, dan transportasi seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Bahkan, *Global Carbon Budget* (2024) juga menunjukkan proyeksi peningkatan emisi CO_2 dari bahan bakar fosil sebesar 0,8%, mencapai rekor 37,4 miliar ton.

Peningkatan konsentrasi GHGs ini menyebabkan peningkatan suhu bumi naik secara masif hingga mencapai $1,1^\circ\text{C}$ di atas tingkat pra-industri (NASA, 2022) atau naik 50% sejak revolusi industri serta lebih tinggi daripada peningkatan alami

yang diamati pada akhir zaman es terakhir 20.000 tahun yang lalu (NASA, 2025) bahkan dalam catatan paleoklimatik 800.000 tahun yang lalu (Blunden et al., 2023). Menurut laporan NCEI (2025), tahun 2024 tercatat sebagai tahun terpanas secara global sejak pencatatan dimulai pada tahun 1850, dengan suhu rata-rata mencapai 1,29°C di atas rata-rata abad ke-20, melanjutkan tren pemanasan yang meningkat lebih dari tiga kali lipat sejak tahun 1975. Fenomena panjang ini memicu berbagai kerusakan lingkungan termasuk gelombang panas di Eropa dan Amerika Utara, peningkatan frekuensi badai dengan intensitas kuat di Samudra Atlantik, kekeringan yang menyebabkan krisis pangan di Afrika serta banjir bandang akibat curah hujan ekstrem di Pakistan pada tahun 2022, yang menenggelamkan hampir sepertiga daratannya (UNEP, 2023; WMO, 2023). Selain itu, kenaikan permukaan laut diprediksi mencapai lebih dari 30cm pada tahun 2050 akibat pencairan es kutub, yang berisiko menenggelamkan pulau-pulau kecil dan daerah pesisir padat (Climate.gov, 2022; King et al., 2020; NOAA, 2023). Oleh karena itu, sangat penting untuk mengurangi emisi tahunan dan menghilangkan emisi historis dari atmosfer (IPCC, 2018).

Untuk mengatasi perubahan iklim yang bertujuan membatasi pemanasan global di bawah 2°C dan berfokus pada pencapaian target 1,5°C (IPCC, 2018, 2022, 2023; Mooney et al., 2021; UNCCC, 2015), berbagai studi menekankan kebutuhan akan pengendalian perubahan iklim sehingga dikembangkan suatu instrumen pendukung dekarbonisasi dengan pendekatan inovatif dan kolaboratif, yaitu penetapan harga karbon (*carbon pricing*) yang mengukur nilai moneter 1 mtCO₂e (PwC Indonesia, 2024), dan menggunakan teknologi *blockchain* serta mekanisme

carbon offset (Bakarich et al., 2020; Glavanits, 2020; Mora et al., 2021). Laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2018) mengenai target 1,5°C menyajikan kisaran harga karbon yang diperlukan untuk menjaga puncak kenaikan suhu global tetap di bawah 1,5°C pada abad ke-21 dengan probabilitas 50-66%. Kisaran harga tersebut diperkirakan berada pada US\$135-6.050 per tCO₂e pada tahun 2030, US\$245-14.300 per tCO₂e pada 2050, US\$420-19.300 per tCO₂e pada 2070, dan US\$690-30.100 per tCO₂e pada 2100 (nilai tidak terdiskonto). Kisaran harga ini merepresentasikan estimasi biaya marjinal pengurangan emisi, yang mencakup baik harga yang dihasilkan dari kebijakan dengan penetapan harga emisi GHGs secara eksplisit maupun biaya implisit dari kebijakan mitigasi lainnya.

Gagasan *carbon offset* bersumber dari ekonom John Harkness Dales (Dales, 1986) yang mengusulkan izin yang dapat diperdagangkan sebagai cara untuk mengendalikan polusi, sehingga berbagai negara telah menerapkan skema perdagangan emisi, dan pasar karbon telah menjadi pusat dari upaya global untuk menanggulangi perubahan iklim. Transisi dari penggunaan gas alam menuju energi terbarukan diproyeksikan dapat mengurangi emisi CO₂ global sebesar 1% hingga 5% pada tahun 2030 (IEA, 2022). Selain itu, banyak emiten perusahaan sudah melakukan manajemen keberlanjutan melalui tindakan sistematis dalam operasionalnya, untuk meningkatkan keberlanjutan perusahaan (Delmas et al., 2019). Perusahaan yang secara proaktif menggunakan kredit karbon untuk mengimbangi (*offset*) emisi residual berada pada posisi yang lebih baik dalam memitigasi dampak finansial dari meningkatnya biaya karbon. Kredit karbon berfungsi sebagai instrumen pelindung terhadap potensi penalti regulasi di masa

depan dengan melengkapi upaya pengurangan emisi langsung serta mengompensasi emisi yang secara teknis atau ekonomis belum dapat dieliminasi. Peran perlindungan ini menjadi semakin krusial seiring dengan perkembangan kebijakan penetapan harga karbon di berbagai yurisdiksi utama, yang didorong oleh meningkatnya ambisi kebijakan iklim dan komitmen untuk mencapai *net-zero emissions* pada tahun 2050. Sejalan dengan tren tersebut, Bank Dunia memperkirakan bahwa mekanisme regulasi emisi global yang berada di bawah instrumen penetapan harga karbon, termasuk pajak karbon dan *emissions trading systems* (ETS), telah mencakup sekitar 23% dari total emisi global, meningkat 7% dari tahun 2019 (World Bank, 2023).

Sebagai respon dari *Kyoto Protocol* serta *Article 6.2* dan *Article 6.4 Paris Agreement*, membahas cara perjanjian antar pemerintah dan VCMs, serta kompensasi emisi karbon, sehingga mendorong pemerintah untuk memperdagangkan pengurangan emisi satu sama lain secara bilateral atau multilateral. Perjanjian tersebut digunakan untuk mempromosikan pembangunan berkelanjutan dan tanggungjawab ekosistem lingkungan, dengan memastikan bahwa hanya satu negara mitra yang menghitung pengurangan emisi sebagai kredit terhadap target nasionalnya atau *Nationally Determined Contributions* (NDCs). Tercatat pada tahun 2023, sebanyak 130 negara telah memulai mengintegrasikan kebijakan mitigasi emisi atau *Carbon Dioxide Removal* (CDR) untuk mengurangi 43% emisi di tahun 2030 dan mencapai target *Net Zero Emissions* (NZE) pada tahun 2050, dengan memperkenalkan mekanisme pasar karbon wajib atau *compliance carbon markets* (CCMs) melalui *Clean Development Mechanism* (CDM),

Emissions Trading System (ETS) dan *Joint Implementation* (JI) yang memanfaatkan insentif ekonomi dengan total kapitalisasi pasar mencapai USD 20 triliun (United Nations, (n.d.); *European Environment Agency*, 2023; IPCC, 2022; UNFCCC, n.d.-a, n.d.-b, n.d.-c, n.d.-d, 2015; Matsuo, 1999; Pisu et al., 2023).

Uni Eropa (EU) meluncurkan *European Green Deal* dan paket *Fit for 55* yang memperluas *Emissions Trading System* (ETS) serta memperkenalkan *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM) untuk mencegah kebocoran karbon dari impor (European Commission, 2023). Amerika Serikat mengesahkan *Inflation Reduction Act* (IRA) yang mengalokasikan lebih dari \$370 miliar untuk mendukung energi bersih, kendaraan listrik, dan teknologi *carbon capture and storage* (CCS) (U.S. Department of Energy, 2022). China telah mengoperasikan ETS nasional sejak 2021, yang terdiri lebih dari 2.200 perusahaan di sektor tenaga listrik sebagai bagian dari strategi dekarbonisasi sektor energi (ICAP, 2023). Sementara itu, Indonesia mengadopsi *Long-term Strategy on Low Carbon and Climate Resilience* (LTS-LCCR) 2050, memperkuat komitmen *Nationally Determined Contribution* (NDC), dan mulai menerapkan ETS berbasis sektor PLTU sejak 2023 sebagai bagian dari pembangunan pasar karbon domestik (UNFCCC, 2022).

Di sisi lain, *Voluntary Carbon Markets* (VCMs) atau pasar karbon sukarela secara bertahap muncul sebagai mekanisme kelembagaan alternatif oleh organisasi swasta untuk mengatur aliran karbon yang tidak diatur oleh pemerintah. VCMs pertama kali diperkenalkan pada tahun 2012, namun dalam beberapa tahun terakhir aktivitasnya cenderung menurun (Clifford Chance, 2024). Menurut Donofrio et al. (2021) dan World Bank (2022), volume (MtCO₂e) dan nilai perdagangan (USD)

dalam VCMs meningkat secara eksponensial per tahun, dan mencapai lebih dari USD 1 miliar pada tahun 2022. Melalui skema *emissions trading* atau *carbon offset*, perusahaan dan individu dapat mengkompensasi emisi mereka (Trouwloon et al., 2023) dengan melakukan transaksi kredit karbon dari proyek-proyek ramah lingkungan, seperti reforestasi, pengembangan energi terbarukan, dan konservasi lahan gambut melalui VCMs guna mengimbangi jejak karbon yang dihasilkan seiring dengan meningkatnya kesadaran terhadap urgensi dekarbonisasi atau aksi iklim (respon terhadap perubahan iklim antropogenik mereorientasi sistem sosial dan ekonomi menuju keberlanjutan) tanpa harus terikat regulasi pemerintah (Stanley et al., 2014; *Ecosystem Marketplace*, 2023; Kossov, 2022; Gillingham et al., 2018).

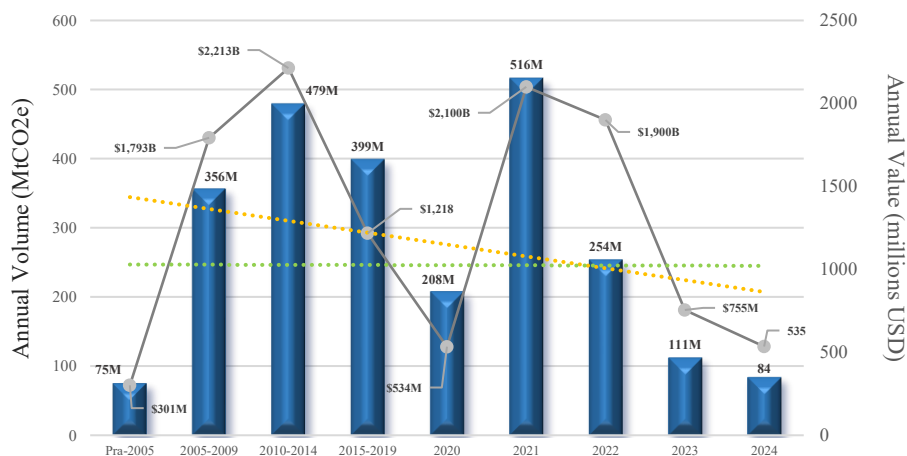
Tabel 1.1-1 Total Volume, Nilai, dan Harga Transaksi Tahunan VCMs Sebelum Tahun 2005–2024

	Pra-2005	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020	2021	2022	2023	2024
Volume (MtCO _{2e})	75M	356M	479M	399M	208M	516M	254M	111M	84.4M
Value (million USD)	\$301M	\$1,793B	\$2,213B	\$1,218B	\$534M	\$2,190B	\$1,980B	\$723M	535.1M
Harga (USD)	\$4,01	\$5.03	\$4,62	\$3,05	\$2,56	\$4,24	\$7,79	\$6,53	6.34

Sumber: Procon (2024, 2025)

Dengan adanya mekanisme VCMs, entitas yang tidak dapat segera mengurangi emisi secara langsung dapat berkontribusi untuk mendanai proyek-proyek yang memberikan dampak lingkungan positif. Meskipun telah ada selama beberapa dekade, VCMs belum sepenuhnya berkembang menjadi mekanisme yang efektif sebagaimana yang diharapkan (Global Digital Finance, 2025). Menurut laporan *Climate Policy Initiative National Oceanic and Atmospheric Administration* (2023) dan *Refinitiv Carbon Market Year in Review* (2023),

mencatat nilai perdagangan karbon global meningkat, terutama di Eropa (EU ETS) dan China, mencapai lebih dari \$850 miliar. Meskipun permintaan kredit karbon dari sektor swasta terus meningkat sebagai bagian dari strategi keberlanjutan perusahaan (MacDonagh & Williams, 2024; Twidale & Mcfarlane, 2023), volume transaksi karbon melalui VCMs turun 56% dibandingkan tahun sebelumnya sebesar 254 MtCO₂e, dengan total kredit karbon yang diperdagangkan mencapai 111 MtCO₂e dan harga kredit karbon per ton juga mengalami penurunan moderat sebesar 11%, rata-rata sebesar \$6,53 per ton (Forest Trends, 2023; Rodriguez et al, 2024) (Tabel 1.1-1 & Gambar 1.1-1).



Sumber: Procon (2024, 2025)

Gambar 1.1-1 VCMs berdasarkan Volume dan Nilai Perdagangan Karbon Sebelum 2005-2024

Terlepas dari fluktuasi yang signifikan, potensi VCMs tetap positif dengan adanya tekanan dari investor dan regulator untuk mencapai target keberlanjutan dan jika masalah kredibilitas dapat diatasi (BloombergNEF, 2023; Forest Trends, 2023; Reuters, 2023). Tekanan ini mendorong pergeseran preferensi pasar dari sekadar volume transaksi menuju kualitas kredit karbon, khususnya yang memenuhi standar integritas tinggi seperti *Core Carbon Principles* (CCP) dari *Integrity Council for*

the Voluntary Carbon Market (IC-VCM) dan skema CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*) yang dikembangkan oleh ICAO. Skema ini menetapkan kriteria yang ketat dalam pemilihan jenis proyek dan metodologi penghitungan kredit karbon (Kaplan et al., 2023; Roston et al., 2023) untuk memastikan bahwa *carbon offset* benar-benar berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim.

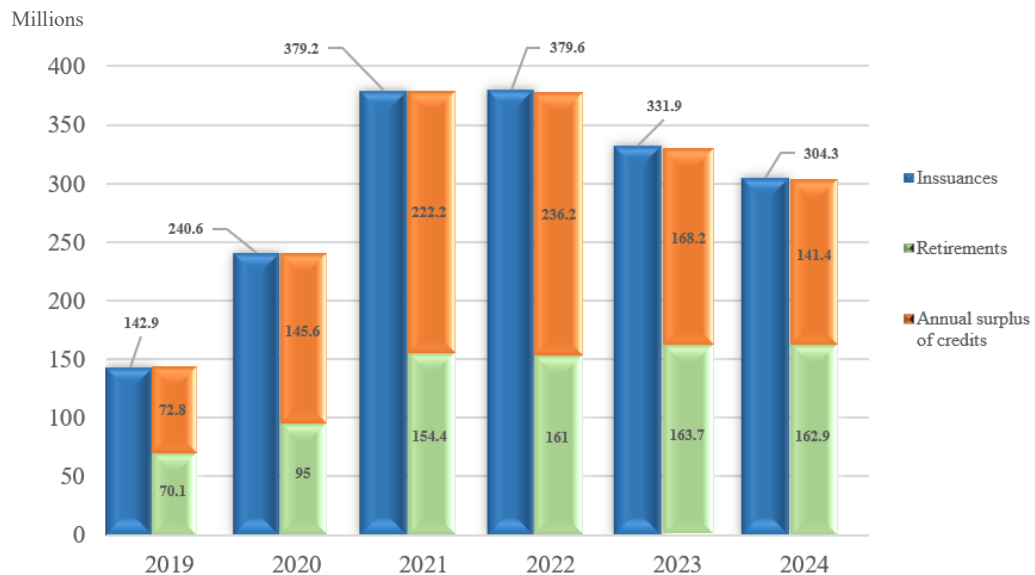
Berdasarkan laporan oleh Mannion et al (2023), bahwa industri CDR diproyeksikan mampu menghasilkan penghilangan emisi berskala gigaton untuk mendukung pencapaian target *net-zero*, yang diperkirakan bernilai hingga USD 1,2 triliun pada tahun 2050. Sejalan dengan proyeksi tersebut, Parry et al (2024) menyatakan bahwa permintaan terhadap kredit karbon jenis *durable removals* CO₂ melalui teknologi seperti DACS atau BECCS diperkirakan mencapai 100 juta ton CO₂ (MtCO₂) pada tahun 2030, meskipun pasokan saat ini hanya berkisar 50 juta ton. Lebih lanjut, Mckinsey (2024) dan Blaufelder et al (2021) meramalkan bahwa meskipun nilai VCMs secara global masih relatif kecil, yaitu sekitar USD 300 juta pada tahun 2022, namun diproyeksikan akan tumbuh 15 kali lipat pada 2030 (*Institute of International Finance*, 2021) dan bahkan mencapai 100 kali lipat pada 2050, dengan potensi total perdagangan sebesar USD 500 miliar.

Selain itu, perbedaan signifikan dalam preferensi konsumen terhadap kredit karbon berbasis alam (*nature-based*) dibandingkan dengan teknologi *carbon removal* mencerminkan kecenderungan pengguna untuk membayar lebih tinggi untuk jenis kredit karbon dengan kredibilitas tinggi (MacDonagh & Williams, 2024). Berdasarkan laporan Abatable oleh Brun et al (2025), volume kredit karbon

yang diberhentikan (*retired*) dengan mengintegrasikan CCP atau standar kualitas CORSIA meningkat dari 29% pada 2021 menjadi hampir 50% pada 2024. *Buyer* menunjukkan preferensi harga yang lebih tinggi, dengan premi hingga \$10 per ton untuk kredit berlabel CCP. Hal ini didukung oleh penelitian Rogers et al. (2023) dan Frey et al. (2023), yang menjelaskan bahwa konsumen bersedia membayar 27% di atas premi dasar untuk produk dan kemasan hijau. Sementara itu, penelitian oleh *BeZero Carbon* (2024) menemukan bahwa kredit karbon *nature-based* dengan kualitas tinggi memperoleh premi harga yang lebih besar di VCMs, dengan rata-rata kenaikan satu tingkat (*notch*) dalam skala rating BeZero sama dengan kenaikan sebesar 20% terhadap harga kredit. Bahkan, proyek seperti *Improved Forest Management* (IFM) dengan rating lebih tinggi mendapatkan premi harga fantastis sebesar 400%. Selain itu, BeZero Carbon merupakan satu-satunya proyek REDD+ hutan tropis yang disertifikasi oleh Verra dan berperingkat 'A', yang mencerminkan risiko tambahan proyek yang terbatas, risiko kredit berlebih yang rendah, dan risiko non-permanen yang berkurang (BRCarbon, n.d.). Temuan ini memperkuat bukti adanya hubungan signifikan antara kualitas proyek dan harga jual kredit karbon.

Meskipun total penerbitan (*issuances*) kredit mulai melambat sejak 2022, tingkat *retirement* tetap stabil pada kisaran 140 juta ton per tahun, mencerminkan adanya permintaan yang positif terhadap kredit karbon berkualitas tinggi. Selain itu, surplus kredit tahunan menurun dari puncaknya sebesar 286 juta ton pada 2021 menjadi 160 juta ton pada 2024, seiring melambatnya penerbitan kredit dan meningkatnya akumulasi kredit *removal* sebesar 72 juta ton atau 5,7% dari total surplus kumulatif 1,2Gt hingga akhir 2024. Hal ini mengindikasikan bahwa pasar

lebih selektif pada proyek dengan kontribusi nyata terhadap pengurangan emisi, bukan hanya pencegahan (*avoidance*).



Sumber: Brun et al (2025)

Gambar 1.1-2 Perlambatan Surplus Kredit Karbon

Dalam upaya memastikan integritas VCMs dalam mencapai target pengurangan emisi global, *Science Based Targets initiative (SBTi)* melakukan pembaharuan standar *net-zero* perusahaan, menetapkan bahwa kredit karbon tidak dapat menggantikan pengurangan emisi internal melalui skema *offset*, melainkan hanya dapat digunakan untuk emisi yang tidak dapat dihindari (*Financial Times*, 2023). Emisi yang dapat diperdagangkan dalam VCMs, seperti yang dihasilkan dari industri semen akibat proses kalsinasi batu kapur dan industri baja yang masih bergantung pada kokas dalam tanur tinggi (*blast furnace*), perusahaan diperbolehkan menggunakan kredit karbon untuk mengimbangi sisa emisi tersebut karena masih terbatasnya penggunaan teknologi inovatif seperti *carbon capture and storage (CCS)* dan *hydrogen-based direct reduction*. Hal yang sama berlaku untuk sektor transportasi jarak jauh, seperti transportasi udara yang masih mengandalkan

bahan bakar jet (*aviation fuel*) dan transportasi laut yang banyak menggunakan minyak berat (*heavy fuel oil*), karena alternatif rendah karbon seperti *Sustainable Aviation Fuel* (SAF) dan bahan bakar LNG atau amonia masih dalam tahap pengembangan dan belum diterapkan secara luas. Pendekatan ini bertujuan untuk memastikan bahwa perusahaan benar-benar berkontribusi pada pengurangan emisi global, bukan sekadar membeli kredit karbon sebagai cara instan untuk terlihat ramah lingkungan tanpa melakukan perubahan mendasar dalam operasional.

Otis (2023) menjelaskan bahwa meskipun VCMs sangat menjanjikan dalam upaya dekarbonisasi global, mekanisme pasarnya perlu dievaluasi secara kompresensif khususnya dalam aspek transparansi pelaporan, kredibilitas kredit karbon, dan regulasi pasar. Ketidakselarasan standar global, inkonsistensi kebijakan, hambatan regulasi dan kompleksitas struktur pasar dapat menghambat efektivitas penerapan solusi keuangan berkelanjutan karena melemahkan kepercayaan investor, serta menimbulkan ketidakpastian dalam menilai dampak proyek dekarbonasi sehingga diperlukan standar sertifikasi kuat seperti *Verified Carbon Standard* (VCS atau Verra) dan *Gold Standard* (GS) untuk menjamin validitas kredit karbon (Arrifin, 2023; *National Institute of Standards and Technology*, 2023; Broekhoff et al., 2021).

Massachusetts Institute of Technology (2023) juga menyoroti kurangnya akuntabilitas metodologi perhitungan penyerapan karbon dapat menghambat efektivitas VCMs dengan adanya risiko *double counting* dan potensi *greenwashing*. Seperti halnya skandal yang menimpa Verra tahun 2023, dimana 90% kredit karbon yang dikelola dari proyek konservasi hutan hujan tidak mencerminkan pengurangan

emisi yang nyata (Greenfield, 2023), sehingga mengurungkan kepercayaan pasar dengan nilai perdagangan turun sebesar 6% pada kuartal pertama (Twidale & Mcfarlane, 2023). Selain itu, fragmentasi regulasi juga berperan dalam memperburuk kualitas kredit karbon (*Integrity Council for the Voluntary Carbon Market*, 2023; Pascoe et al., 2022). Oleh karena itu, penerapan teknologi *blockchain* menjadi salah satu alternatif untuk meningkatkan transparansi (Biswas et al., 2019) dan efisiensi VCMs sebagai respon akan kebutuhan mekanisme pemantauan jangka panjang yang menuntut verifikasi independen agar perdagangan kredit karbon lebih terpercaya (Carbon Market Watch, 2023).

Menurut *International Emissions Trading Association* (IETA) (2023), *blockchain* merupakan teknologi pencatatan transaksi digital terdesentralisasi dengan sistem *distributed ledger* yang *immutable* dan transparan, dapat diverifikasi oleh semua pihak dengan jejak audit yang mencegah praktik manipulasi data karena setiap kredit karbon yang diperdagangkan mampu ditelusuri hingga ke sumbernya sehingga meningkatkan akuntabilitas di seluruh rantai pasokan kredit karbon (Tapscott & Tapscott, 2016; Naeem et al., 2022; Bai et al., 2023). Meskipun *blockchain* dapat mengkodekan asal-usul setiap kredit karbon yang ditransaksikan, tetapi tidak menjamin keabsahan metode pengukuran yang mendasarinya (Haryono, 2025; Segaran et al., 2025). Penggunaan *smart contracts* dalam *carbon trading* berbasis *blockchain* dapat mengotomatisasi verifikasi perjanjian antara pembeli dan penjual tanpa perantara, sehingga mengurangi biaya transaksi dan asimetri informasi (Buterin, 2014; White, 2025). Integrasi *blockchain* dalam VCMs berfungsi sebagai sarana perdagangan digital yang dapat membangun kepercayaan

di antara para pelaku pasar melalui transparansi pelaporan kredit karbon dan memastikan dampak positif proyek mitigasi, sekaligus meningkatkan interoperabilitas antara sistem perdagangan karbon regional dan global (Wang et al., 2022; WEF, 2023). Dalam studi yang dilakukan oleh *Climateworks Centre* (2023), ditemukan bahwa keterbukaan informasi dan kemudahan akses terhadap pasar karbon dapat mendorong lebih banyak individu dan perusahaan untuk berinvestasi dalam skema penyerapan karbon. Dengan demikian, *smart contracts* dalam *blockchain* memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi dan integritas ekosistem VCMs.

Dengan meningkatnya urgensi mitigasi perubahan iklim, pasar karbon telah menarik perhatian global. Secara khusus perusahaan dapat memanfaatkan teknologi digital untuk mengatasi perubahan iklim (George & Schillebeeckx, 2021; George et al., 2020; Lember et al., 2019). Salah satu inovasi penerapan *blockchain* dalam VCMs adalah tokenisasi kredit karbon yang menawarkan transparansi, likuiditas, dan aksesibilitas global, dengan mengubah unit kredit karbon menjadi aset digital yang dapat diperdagangkan dalam bentuk token (World Bank, 2023). Hal ini dibuktikan oleh otoritas moneter dan organisasi internasional di seluruh dunia yang melacak peningkatan penggunaan aset digital dalam transaksi keuangan (tokenisasi) dalam beberapa tahun terakhir (Banco Central do Brasil, n.d.). Kehadiran token karbon di pasar sekunder memungkinkan transaksi jual beli dan pertukaran (*swapping*) secara efisien melalui *smart contracts* yang mengotomatisasi proses validasi dan pembayaran (Kumari et al., 2022). Tokenisasi menggunakan sistem *decentralized finance* (DeFi) membuka peluang

investasi bagi banyak pihak tanpa memerlukan investasi besar melalui mekanisme *crowdfunding* (International Emissions Trading Association, 2023; Wahjono, 2022, Sitanggang & Manalu, 2018). WEF (2023) menambahkan bahwa penggabungan tokenisasi dengan *stablecoins* atau *Central Bank Digital Currency* (CBDC) dapat memfasilitasi pembayaran lintas batas yang lebih cepat dan murah dalam perdagangan karbon. Menurut *Climateworks Centre* (2023), tokenisasi meningkatkan likuiditas dan aksesibilitas kredit karbon, serta memfasilitasi perdagangan yang lebih cepat dibandingkan pasar karbon konvensional yang mengharuskan pembelian dalam lot besar (OECD, 2020), dengan kapitalisasi pasar aset token global diperkirakan mencapai \$16 triliun pada tahun 2030 (*Merevolusi Keberlanjutan: Dampak Tokenisasi Kredit Karbon*, n.d.).

Kendati demikian, tokenisasi dalam sistem kredit karbon dengan *blockchain* menghadapi tantangan lingkungan, terutama keberagaman standar, berdasarkan kontrak token atau jenis kredit karbon yang dapat menghambat interoperabilitas dan perdagangan dengan likuiditas tinggi, sehingga menyebabkan pasar yang terfragmentasi, tidak efisien, dan volatil (Diaz-Valdivia, 2022; Nowak, 2022). Selain itu konsumsi energi yang tinggi pada jaringan *blockchain* yang menggunakan mekanisme konsensus *Proof of Work* (PoW), justru menambah emisi karbon dan menyebabkan timbulnya limbah elektronik yang signifikan akibat seringnya penggantian perangkat keras penambangan sehingga berkontradiktif dengan prinsip dekarbonisasi (Bala et al., 2016; *Cambridge Centre for Alternative Finance*, 2021; De Vries, 2018; Fadeyi et al., 2019; Huynh et al., 2022; Jiang et al., 2021; Jones et al., 2022; Nández Alonso et al., 2021; Sang et al., 2022). Untuk

mengatasi masalah ini, transisi ke mekanisme *Proof of Stake* (PoS), seperti yang dilakukan Ethereum pada tahun 2022, yang dapat mengurangi konsumsi energi hingga 99,98% (Ethereum Foundation, 2022; Köhler and Pizzol, 2019; Truby, 2018; Vlachos et al., 2021). Pada Juni 2022, Polygon sebagai teknologi layer-2 dan *sidechains* berbasis PoS untuk Ethereum, terbukti mampu mencapai karbon netral seperti *blockchain* Algorand, XRP Ledger, dan Celo, melalui pembelian dan pensiun (*retirement*) kredit karbon senilai USD 400.000, mewakili 104,794ton emisi GHGs, untuk mengimbangi jejak karbon yang dihasilkan sejak awal operasional jaringannya (Polygon Labs, 2023; WEF, 2023).

Berbagai inisiatif telah dikembangkan diatas infrastruktur Polygon seperti KlimaDAO, Toucan Protocol, dan Moss.Earth turut berkontribusi dalam tokenisasi kredit karbon dengan pendekatan yang lebih transparan dan efisien. KlimaDAO sebagai organisasi otonom terdesentralisasi (DAO) memanfaatkan *blockchain* Polygon untuk menciptakan pasar karbon digital yang lebih likuid dan transparan. Hal ini dibuktikan dengan KlimaDAO telah memfasilitasi retirement lebih dari 17 juta ton kredit karbon digital, setara dengan sekitar 2% dari total VCMs global (Buckton, 2023). Toucan Protocol menyediakan *Base Carbon Tonne* (BCT), yaitu token yang mewakili satu metrik ton kredit karbon yang telah dikonversi ke dalam *blockchain* (Toucan Protocol, 2023). Toucan menyediakan proses *bridging* dan tokenisasi, sedangkan KlimaDAO berfungsi sebagai ekosistem keuangan terdesentralisasi (DeFi) yang mengelola penggunaan kredit karbon melalui *staking* dan *yield farming* (Ballesteros-Rodríguez et al, 2024).

Sedangkan Moss.Earth memperkenalkan token MCO₂, yang mewakili satu ton kredit karbon yang diverifikasi sebagai hasil dari konservasi hutan hujan tropis di Amerika Latin. Moss.Earth berkontribusi pada upaya tokenisasi karbon dengan pendekatan *project-based credits*, yang ditransparansikan melalui teknologi *blockchain* untuk menjamin akuntabilitas lingkungan dan keaslian klaim emisi (Moss.Earth, 2023). Integrasi dari berbagai platform seperti KlimaDAO, Toucan Protocol, dan Moss.Earth di atas infrastruktur Polygon dan Ethereum, memungkinkan penggabungan berbagai proyek kredit karbon dalam satu ekosistem yang terbuka dan dapat diaudit sehingga perdagangan karbon digital dapat menjadi lebih efisien, inklusif, dan terpercaya. Oleh karena itu, diperlukan kerangka regulasi yang jelas untuk mendukung *digital monitoring, reporting, and verification* (D-MRV) dan tata kelola yang adaptif dalam perdagangan karbon digital (Belenky, 2022; Woo et al., 2021).

Biocrypto merupakan istilah baru yang mengacu pada *tokenized green assets* (Ferreira, 2025) yang mewakili kredit karbon berbasis sumber daya biologis, khususnya dari proses penyerapan karbon, sebagai pengembangan spesifik dari konsep *crypto carbon credits* yang mengintegrasikan teknologi *blockchain* dan *cryptocurrency* dalam tokenisasi kredit karbon serta *green finance* (Ballesteros-Rodríguez et al., 2024; Leonhard, 2017; Soriano, 2025) atau *biodiversity finance* (Naifar, 2025). Melalui integrasi teknologi seperti *sensor Internet of Things* (IoT), *Remote Sensing* dan *AI-based systems* (*high-resolution satellite imagery, aerial monitoring, and machine learning algorithms*), proyek-proyek pengurangan emisi berbasis teknologi seperti *Direct Air Carbon Capture and Storage* (DACCS),

Carbon Capture, Utilisation, and Storage (CCUS), maupun *nature-based solutions* (berbasis alam) dapat dimonitor secara *real-time*, memungkinkan verifikasi cadangan karbon hutan dan volume karbon yang diserap atau disimpan dengan akurasi tinggi dan auditabilitas penuh, serta membantu mendeteksi deforestasi dan degradasi, atau perubahan tutupan lahan dari waktu ke waktu (Gupta, 2024; Schär, 2021; Watts, 2023). Data penyerapan karbon yang akurat tersebut kemudian menjadi dasar penerbitan aset *biocrypto*, yang diperdagangkan di *blockchain* sebagai representasi digital dari kredit karbon yang telah diverifikasi. Penerapan *biocrypto* dapat ditemukan pada token Nori, yang merepresentasikan satu ton CO₂ ekuivalen yang diserap melalui praktik pertanian regeneratif dan diperdagangkan sebagai *Nori Removal Tonne (NRT)* pada *blockchain* (Nori, 2021). Selaian itu, ada SEED Token sebagai insentif digital yang terlibat dalam aktivitas ekologis seperti penanaman pohon, restorasi lahan, dan edukasi lingkungan, sekaligus mendukung pemberdayaan masyarakat lokal dalam konservasi alam (SEED, 2022).

Tokenized carbon asset on-chain trading berbasis *biocrypto* melalui VCMs merupakan pendekatan inovatif yang menggabungkan teknologi *blockchain*, tokenisasi kredit karbon menjadi aset *cryptocurrency*, seperti *Non-Fungible Token (NFT)*. Pemanfaatan *blockchain* sebagai *marketplace* token kredit karbon, menjadikan skema perdagangan lebih efisien, transparan dan mudah diakses (Netke, 2025). *Biocrypto* sebagai sistem keuangan atau investasi iklim dapat berpotensi mengurangi risiko *greenwashing* dalam upaya dekarbonisasi (WEF, 2023). Sementara itu, mekanisme *on-chain trading* dalam *carbon offset* meningkatkan fleksibilitas dalam pengelolaan emisi dengan memungkinkan

pertukaran kredit antar pihak (*pool*) berdasarkan kebutuhan aktual antar proyek karbon pada lintas yuridiksi (Swinkels, 2024). Kombinasi dari ketiga elemen ini masih sangat jarang untuk diteliti dan berpotensi mendorong terbentuknya pasar karbon yang lebih inklusif, serta memperluas partisipasi publik dalam inisiatif keberlanjutan.

Meskipun demikian, komitmen global terhadap mitigasi perubahan iklim terus meningkat, kesenjangan antara target dan implementasi kebijakan masih menjadi tantangan utama. Banyak negara telah menetapkan target *Nationally Determined Contributions* (NDCs) yang semakin ambisius, namun target tersebut belum sepenuhnya didukung oleh adopsi kebijakan yang memadai untuk mencapai *net-zero emissions* (Nascimento et al., 2023a). Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan ambisi target iklim belum secara otomatis diterjemahkan ke dalam instrumen kebijakan yang efektif di tingkat nasional. Dalam kerangka *Paris Agreement*, mekanisme peningkatan ambisi (*ratcheting mechanism*) sangat bergantung pada konsistensi antara penetapan target dan implementasi kebijakan (Nascimento et al., 2023b). Oleh karena itu, peningkatan ambisi harus disertai dengan penerapan kebijakan yang terstandarisasi menjadi elemen fundamental agar mekanisme tersebut dapat berfungsi secara efektif. Salah satunya adalah *current policies scenario* yang mengasumsikan tidak adanya tindakan mitigasi tambahan di luar kebijakan iklim yang telah secara resmi diadopsi (Kuramochi et al., 2021; Roelfsema et al., 2022). Proyeksi dalam skenario ini mencerminkan seluruh kebijakan relevan sebagai keputusan legislatif, perintah eksekutif, atau instrumen kebijakan setara lainnya. Rencana atau strategi yang baru diumumkan secara publik

tidak diperhitungkan, kecuali telah disertai dengan instrumen kebijakan konkret untuk implementasinya. Pendekatan pendefinisian skenario ini sejalan dengan metodologi yang digunakan oleh.

Likuiditas VCMs dalam perdagangan kredit karbon digital dapat diwujudkan apabila didukung oleh kerangka regulasi yang kuat dan keseragaman standar secara global. Salah satu contoh penerapan regulasi yang mendorong transparansi rantai pasok kredit karbon adalah kebijakan yang diterapkan oleh Uni Eropa (EU). Melalui *European Union Deforestation Regulation* (EUDR) No. 2023/1115, EU menetapkan larangan impor terhadap komoditas seperti kelapa sawit, karet, dan kopi yang berasal dari lahan yang mengalami deforestasi sejak 2020, serta mewajibkan pelaksanaan *due diligence* berbasis pelacakan geospasial (*geospatial tracing*), yang akan diberlakukan pada 30 Desember 2025 untuk perusahaan besar dan 30 Juni 2026 untuk industri kecil (Official Journal of the EU, 2023; Evans et al., 2025). Regulasi ini merupakan bagian dari inisiatif *European Green Deal* dan melengkapi *Corporate Sustainability Due Diligence Directive* (CSDDD), yang bertujuan untuk memastikan bahwa produk yang diperdagangkan di pasar EU tidak memiliki keterkaitan dengan deforestasi, degradasi hutan, atau pelanggaran terhadap hak masyarakat adat. Di sisi lain, pelaku usaha yang gagal membuktikan *due diligence* dapat dikenakan denda hingga 4% dari omzet mereka di wilayah UE berdasarkan ketentuan EUDR, serta sanksi pidana tambahan sesuai hukum nasional negara anggota (Debevoise & Plimpton, 2024; SME Today, 2025).

Implementasi regulasi ini menjadi tantangan serius bagi proyek karbon berbasis alam, khususnya di sektor kelapa sawit yang rentan terhadap isu

deforestasi dan lemahnya sistem pelacakan karbon (*carbon tracing*) seperti Indonesia, yang menempati posisi ke tujuh di tahun 2024 (*European Commission: Joint Research Centre*, 2024; Rapier, 2025), bahkan naik satu level menjadi peringkat ke delapan di tahun ini (*European Commission: Joint Research Centre*, 2025) sebagai *carbon emitter* terbesar secara global. Tanpa dukungan sistem verifikasi domestik yang kompatibel dengan standar internasional seperti EUDR, serta infrastruktur teknologi pemantauan digital berbasis *blockchain* dan sensor satelit, kredibilitas proyek karbon Indonesia akan diragukan dan berisiko dikeluarkan dari skema *offset* pasar Eropa. Dalam konteks ini, transparansi berbasis tokenisasi dan digitalisasi kredit karbon menjadi semakin krusial untuk memenuhi ekspektasi pasar global yang menuntut integritas data tinggi dan kepatuhan terhadap prinsip keberlanjutan (World Bank, 2023).

Penerapan *tokenized carbon asset on-chain trading* berbasis *biocrypto* melalui VCMs tidak hanya relevan dari sisi akademik, tetapi juga penting secara praktis bagi industri dan pembuat kebijakan untuk membangun ekosistem perdagangan karbon yang lebih kredibel. Sistem tokenisasi yang mudah dipahami publik dan transparan dapat meningkatkan kesadaran serta partisipasi masyarakat dalam bertransaksi kredit karbon, sehingga dapat meningkatkan likuiditas token karbon (World Bank, 2022). Sementara penggunaan *biocrypto* dalam sistem perdagangan VCMs menawarkan peluang disruptif untuk mentransformasi pasar karbon, keberhasilan implementasi model ini sangat bergantung pada kolaborasi antara pemerintah, sektor swasta, organisasi lingkungan dan internasional, serta keberadaan kerangka regulasi yang terstandarisasi global (Onabowale, 2025).

Dengan demikian, penguatan regulasi dan standar tokenisasi karbon menjadi faktor utama dalam memastikan bahwa perdagangan karbon berbasis *blockchain* benar-benar dapat berkontribusi terhadap pencapaian target *net-zero emissions* dan transformasi ekonomi rendah karbon secara global. Penelitian ini membangun diskusi untuk penyelidikan dan implementasi praktis di masa depan, mendukung pasar karbon yang lebih transparan, efisien, dan dapat dipercaya untuk ekonomi yang berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini akan membahas beberapa pertanyaan mendasar terkait implementasi *tokenized carbon assets on-chain trading* berbasis *biocrypto*, di antaranya:

1. Apakah *tokenized carbon assets on-chain trading* berpengaruh terhadap likuiditas VCMs?
2. Apakah adopsi *biocrypto* berpengaruh terhadap likuiditas VCMs?
3. Apakah volume perdagangan dan volatilitas *return* berpengaruh terhadap *bid-ask spread*?
4. Seberapa besar pengaruh regulasi pada hubungan *tokenized carbon assets on-chain trading* dan adopsi *biocrypto* terhadap likuiditas VCMs?
5. Apakah pemodelan GARCH-type yang tepat untuk volatilitas token kredit karbon?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model inovatif yang mengintegrasikan *blockchain* dan *biocrypto* dalam *tokenized carbon assets on-chain trading* pada VCMs. Adapun tujuan utama dari penelitian ini meliputi:

1. Menganalisis dampak *tokenized carbon assets on-chain trading* terhadap likuiditas VCMs.
2. Menganalisis korelasi antara adopsi *biocrypto* dan pertumbuhan transaksi karbon di VCMs.
3. Menganalisis hubungan antara volume perdagangan dan *return* volatilitas terhadap *bid-ask spread* pada likuiditas VCMs.
4. Menguji pengaruh indeks regulasi pada hubungan *tokenized carbon assets on-chain trading* dan adopsi *biocrypto* terhadap likuiditas VCMs.
5. Menentukan model GARCH dalam analisis *return* volatilitas token kredit karbon.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan bagi berbagai pemangku kepentingan dalam ekosistem perdagangan karbon, baik dalam aspek akademik, regulasi, maupun industri.

a. Bagi akademisi

Penelitian ini akan menambah wawasan ilmiah mengenai penerapan blockchain dalam perdagangan karbon, khususnya dalam konteks *tokenized carbon assets on-chain trading* berbasis *biocrypto*. Dengan adanya kajian ini, diharapkan dapat memperkaya literatur mengenai inovasi teknologi dalam pasar karbon serta membuka peluang bagi penelitian lanjutan yang lebih mendalam.

b. Bagi regulator

Penelitian ini dapat memberikan wawasan bagi pembuat kebijakan mengenai potensi regulasi yang diperlukan untuk memastikan bahwa mekanisme tokenisasi karbon tetap sesuai dengan standar keberlanjutan dan kepatuhan lingkungan global.

c. Bagi pelaku industri

Penelitian ini memberikan panduan strategis bagi pelaku industri dalam mengadopsi *tokenized carbon assets on-chain trading* berbasis *biocrypto*, memungkinkan peningkatan transparansi, efisiensi, dan likuiditas dalam perdagangan karbon, serta membantu optimalisasi kepatuhan terhadap regulasi lingkungan melalui pencatatan berbasis *blockchain*.

1.5 Batasan Penelitian

Penelitian ini memiliki sejumlah batasan yang bersumber dari keterbatasan struktural data *on-chain* pada *tokenized carbon markets* yang digunakan. Adapun batasan-batasan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Objek Penelitian

Objek penelitian mencakup token karbon berbasis *blockchain* yang diperdagangkan di VCMs dan direpresentasikan dalam bentuk *tokenized carbon assets* (\$KLIMA, BCT, dan MCO₂). Token yang dianalisis dibatasi pada token karbon berbasis *biocrypto* yang telah aktif diperdagangkan secara *on-chain* dan memiliki data historis harga serta aktivitas transaksi yang dapat diakses secara publik.

2. Infrastruktur Pasar

Penelitian ini difokuskan pada VCMs berbasis *blockchain* (*blockchain-based biocrypto* VCMs), tanpa mencakup pasar karbon wajib (*compliance carbon markets*) atau perdagangan kredit karbon konvensional di luar ekosistem *blockchain*. Analisis dibatasi pada mekanisme perdagangan *on-chain* yang berlangsung melalui *decentralized exchanges* (DEXs), yang meliputi *blockchain* Ethereum dan Polygon dengan protokol serupa, serta aggregator harga *CoinMarketCap* dan *CoinGecko*.

3. Pendekatan *Market Microstructure*

Pendekatan *market microstructure* difokuskan pada karakteristik perdagangan token karbon, yang terdiri dari:

- a) Likuiditas pasar yang diukur melalui indikator mikrostruktur (misalnya *bid-ask spread*, volume perdagangan, volatilitas *return*)
- b) Struktur suplai token beredar (*circulating supply*) dan aktivitas perdagangan *on-chain* token karbon
- c) Efektivitas aktivitas partisipasi pasar dalam adopsi *biocrypto* yang direpresentasikan oleh parameter *on-chain* seperti jumlah *active wallets*, kapitalisasi ukuran pasar dan intensitas transaksi

4. Analisis Volatilitas *Return*

Volatilitas *return* token karbon dianalisis menggunakan pendekatan GARCH-type estimation, yang mencakup model standar GARCH dan turunannya untuk menangkap karakteristik *volatility clustering*, persistensi volatilitas, dan potensi asimetri *return*. Penelitian ini tidak mencakup pemodelan dan

forecasting harga jangka panjang atau penilaian fundamental karbon secara fisik.

5. Batasan Metodologis

Penelitian ini menggunakan data historis harga dan transaksi *on-chain* dengan periode observasi 1075 sampel. Analisis dibatasi pada pendekatan kuantitatif dan tidak mencakup aspek kualitatif seperti desain kelembagaan, verifikasi proyek karbon secara teknis, maupun evaluasi dampak lingkungan secara langsung.

6. Batasan Kebijakan

Penelitian ini tidak mengevaluasi efektivitas kebijakan iklim secara normatif, melainkan menggunakan konteks kebijakan global secara umum sebagai latar belakang untuk memahami peran *tokenized carbon assets on-chain trading* dan adopsi *biocrypto* sebagai instrumen perdagangan dalam dinamika likuiditas VCMs.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan penelitian ini dibagi menjadi tiga bagian yaitu bagian awal, bagian isi, bagian akhir, yang masing-masing diuraikan sebagai berikut:

1. Bagian Awal

Dalam penulisan thesis ini, bagian awal berisi halaman judul, halaman pengesahan, motto dan persembahan, abstrak, daftar isi, daftar tabel, daftar gambar, daftar lampiran dan daftar singkatan.

2. Bagian Isi

Bagian isi dari penulisan thesis ini terdiri atas lima bab, yang meliputi sebagai berikut:

a. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan secara komprehensif mengenai latar belakang penelitian, perumusan masalah yang menjadi inti kajian, tujuan yang ingin dicapai, manfaat teoritis dan praktis dari penelitian, serta sistematika penulisan tesis secara keseluruhan.

b. BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini memuat landasan konseptual yang terdiri dari definisi dan penjelasan masing-masing variabel penelitian berdasarkan teori yang relevan, ulasan terhadap hasil studi empiris sebelumnya, perumusan hipotesis, serta penyusunan kerangka pemikiran yang menjadi dasar analisis dalam penelitian ini.

c. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan mengenai pendekatan dan jenis penelitian yang digunakan, fokus dan objek penelitian, metode pengumpulan data, serta teknik analisis data.

d. BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil analisis data berdasarkan metode yang telah ditentukan, disertai dengan interpretasi mendalam terhadap temuan penelitian. Pembahasan dilakukan dengan membandingkan hasil yang diperoleh dengan teori maupun studi terdahulu untuk mengidentifikasi kesesuaian atau penyimpangan.

e. BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini terdiri dari kesimpulan hasil penelitian, keterbatasan penelitian dan saran yang berkaitan dengan hasil penelitian.

3. Bagian Akhir

Bagian ini berisi daftar pustaka sebagai acuan penulisan dan lampiran yang melengkapi uraian pada bagian isi.