

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 *Market Microstructure Theory*

Menurut *National Bureau of Economic Research* (NBER) *market microstructure* merupakan cabang ilmu ekonomi dan keuangan atau studi mengenai intermediasi dan lembaga-lembaga pertukaran aset (Spulber, 1996) yang secara teoretis, empiris, dan eksperimental mengkaji bagaimana mekanisme perdagangan sekuritas (proses pertukaran aset diatur oleh regulasi perdagangan secara eksplisit) (Easley & O'hara, 1995), struktur pasar, dan perilaku pelaku pasar mempengaruhi biaya transaksi, harga, volume dan aktivitas perdagangan (Doostian & Touski, 2024), serta likuiditas dan volatilitas aset keuangan (Hansen & Lunde, 2006; Sewell, 2007). Selain itu menurut (Biais, Glosten & Spatt, 2005; O'Hara, 1995), *market microstructure* berdampak pada proses pembentukan harga (*price formation* atau *price discovery*), yang terjadi melalui interaksi order beli dan jual (Madhavan, 2000) baik melalui perantara *order clerk* atau *saitori* (perantara), sistem perdagangan terpusat seperti bursa, dan perdagangan elektronik atau digital. Dalam pasar perdagangan, aset keuangan seperti saham atau obligasi tidak mengalami transformasi, melainkan hanya berpindah kepemilikan dari satu investor ke investor lainnya (Stoll, 2003).

Mekanisme perdagangan merupakan bentuk atau cara suatu sekuritas diperdagangkan berdasarkan jenis pasar, pembentukan harga, bentuk pesanan (*order forms*) dan tingkat transparansi. Sedangkan regulasi pasar merupakan aturan

yang mengendalikan perdagangan dan perilaku pelaku pasar, seperti aturan prioritas pesanan (*priority order*), ukuran *tick* dan *spread*, pencatatan (*listing*), satuan perdagangan (*trading unit*), ambang batas harga (*price thresholds* atau *limits*), status perdagangan (*trading status*), *short selling*, dan perdagangan di luar pasar (*off-chain market*) (Aigbovo & Isibor, 2017).

Sejalan dengan Krause (2005) dan O'Hara (1995) *market microstructure theory* tidak berfokus pada nilai fundamental dari aset yang diperdagangkan di bursa, karena nilai tersebut diasumsikan ditentukan secara eksogen. Sebaliknya, teori ini memodelkan proses pembentukan harga di pasar aset dengan nilai fundamental yang sudah ada, serta bagaimana proses tersebut dipengaruhi oleh aturan perdagangan. Dalam konteks aset keuangan digital, khususnya *tokenized carbon assets on-chain trading*, pendekatan *market microstructure* menjadi relevan karena harga dan likuiditas tidak hanya ditentukan oleh nilai intrinsik kredit karbon, tetapi juga oleh struktur perdagangan berbasis *blockchain*, intensitas transaksi, dan karakteristik pelaku pasar yang terdesentralisasi.

2.1.1 Struktur Pasar dalam *Blockchain-Based Markets Microstructure*

Struktur pasar merupakan elemen fundamental dalam *market microstructure* yang menentukan bagaimana transaksi dieksekusi, diklasifikasikan dan likuiditas terbentuk (Linnenluecke et al., 2017). Struktur pasar dibedakan menjadi *quote-driven market* dan *order-driven market* (Madhavan, 2000). Pada pasar berbasis *blockchain*, perdagangan token karbon berlangsung dalam *order-driven market* melalui mekanisme *decentralized exchange* (DEX) dan *automated market maker* (AMM). Tidak adanya *designated market maker* menyebabkan likuiditas bersifat

endogen dan sangat bergantung pada partisipasi pelaku pasar. Kondisi ini menjadikan pasar token karbon lebih rentan terhadap fluktuasi likuiditas dan volatilitas dibandingkan pasar keuangan tradisional yang terpusat.

Pasar berbasis *blockchain* memiliki karakteristik *microstructure* yang berbeda dibandingkan pasar keuangan konvensional. Berdasarkan tingkat otomatisasi, mekanisme perdagangan dapat berlangsung pada bursa melalui sistem *open outcry* atau melalui sistem perdagangan elektronik berbasis layar, dengan pasar terotomatisasi yang menawarkan transparansi transaksi dan aturan perdagangan yang lebih baik sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi pasar (Madhavan, 2000). Transparansi *on-chain* memungkinkan seluruh transaksi dapat diamati secara publik, namun identitas ekonomi pelaku pasar tetap bersifat pseudonim. Selain itu, transparansi merupakan atribut pasar yang merujuk pada sejauh mana pelaku pasar memiliki informasi mengenai proses perdagangan (Hasbrouck, 2007). Pasar elektronik, dalam hal ini *blockchain* VCMs, yang secara *real time* mengomunikasikan kuotasi *bid* dan *ask* dari pembeli dan penjual serta harga transaksi yang telah dieksekusi dianggap memiliki tingkat transparansi yang tinggi. Selain itu, tidak adanya otoritas terpusat dan peran perantara tradisional menyebabkan likuiditas sepenuhnya bergantung pada mekanisme pasar dan partisipasi pengguna. Karakteristik ini menciptakan dinamika likuiditas dan volatilitas yang unik pada perdagangan token karbon, sekaligus membuka potensi risiko manipulasi pasar dan ketidakstabilan harga. *Blockchain* sebagai fasilitas pasar berupa jaringan komunikasi berkecepatan tinggi dan sistem komputer, dan sebagian besar transaksi dieksekusi dengan sedikit atau tanpa intervensi manusia.

Investor dapat memasukkan order secara daring, order tersebut diarahkan secara otomatis ke lokasi perdagangan, dieksekusi terhadap order yang telah ada sebelumnya, serta diteruskan secara otomatis ke proses kliring dan penyelesaian (Stoll, 2003). Dengan demikian, teknologi telah mengubah hubungan antara investor, *broker*, dan *dealer*, serta fasilitas pasar yang menjadi sarana interaksi.

Lee dan Ready (1991) yang mengembangkan algoritma untuk mengiferensi arah perdagangan dari data *intraday* untuk menganalisis *order flow* dan *trader behaviour*. Sedangkan Kissell (2014) menjelaskan bahwa instrumen keuangan diperdagangkan di berbagai bursa dengan intervensi terbatas *market maker*, serta pencocokan antara pembeli dan penjual dilakukan melalui algoritma perdagangan secara digital, dalam konteks penelitian adalah penggunaan *blockchain* VCMs dalam perdagangan kredit karbon. Untuk mengembangkan algoritma dan sistem perdagangan yang paling efisien serta menguntungkan, *market maker* harus memahami mekanisme internal dari setiap *venue* (*blockchain* DEX) perdagangan yang dapat mempengaruhi *order*, dan hasil perdagangan (*bottom line*). Pemahaman tersebut memungkinkan kalibrasi algoritma perdagangan oleh *trader* untuk meningkatkan kualitas pengambilan keputusan, serta oleh manajer portofolio dalam meningkatkan pemilihan aset dan komposisi portofolio (O'Hara, 1987) dengan keberadaan berbagai *venue*, *dark pools*, *crossing networks* dan model penetapan harga yang beragam, sehingga dapat mencapai eksekusi terbaik (Kissell, 2014).

2.1.2 Asimetri Informasi dalam *Market Microstructure*

Dinamika harga dan volume yang dihasilkan dari *order* perdagangan dapat membantu memahami perilaku investor serta tingkat informasi yang digunakan

dalam aktivitas perdagangan. Pandangan tradisional dalam teori pasar keuangan menyatakan bahwa harga terbentuk melalui mekanisme permintaan dan penawaran. Namun, faktor-faktor seperti asimetri informasi dan perbedaan waktu perdagangan dapat menyebabkan penyimpangan harga.

Market microstructure theory tradisional mengklasifikasikan pelaku pasar berdasarkan sistem informasi yang dimiliki, yaitu *trader* berinformasi (*informed traders*) dan *trader* tidak berinformasi (*uninformed traders*) (Grossman, 1976). *Informed trader* memiliki keunggulan informasi mengenai aset yang tidak dimiliki oleh *trader* lain dan memanfaatkan keunggulan tersebut dalam aktivitas perdagangan. Sementara itu, investor tidak berinformasi melakukan perdagangan karena alasan non-informasi. Dalam beberapa kasus, mereka disebut sebagai *noise traders*, karena keputusan perdagangannya didasarkan pada keyakinan dan sentimen yang tidak berlandaskan informasi fundamental. Informasi kemudian tercermin ke dalam harga pasar melalui aktivitas perdagangan yang dilakukan oleh *trader* berinformasi (O'Hara, 2003).

Asimetri informasi dalam *market microstructure* menjelaskan perbedaan tingkat informasi antara pelaku pasar. Dalam perdagangan aset, pelaku yang memiliki informasi lebih baik (*informed traders*) dapat mempengaruhi harga dan likuiditas, sedangkan pelaku tanpa informasi lengkap (*uninformed traders*) menanggung risiko *adverse selection*. Pada VCMs berbasis *blockchain*, asimetri informasi tidak hanya berkaitan dengan informasi pasar, tetapi juga dengan kualitas kredit karbon yang mendasari token, seperti *additionality*, *permanence*, dan proses verifikasi. Asimetri informasi ini berpotensi memperlebar *bid-ask spread* dan

meningkatkan volatilitas *return* token karbon. Bossaerts dan Hillion (1991) menunjukkan bahwa keberadaan *informed traders* meningkatkan *bid-ask spread* pasar, terutama ketika informasi mengenai intervensi pemerintah tidak simetris di antara pelaku pasar. Seangkan Morse dan Ushman (1983) menunjukkan bahwa *bid-ask spread* tidak bereaksi signifikan terhadap pengumuman informasi publik, namun meningkat tajam pada periode dengan perubahan harga besar, yang mengindikasikan meningkatnya kekhawatiran pasar terhadap keberadaan *trader* berinformasi superior.

Glosten dan Milgrom (1985) mengembangkan model pasar yang berfokus pada pelaku perdagangan, menjelaskan bahwa perbedaan informasi antar *trader* menimbulkan biaya informasi yang harus ditanggung dalam aktivitas perdagangan yang tercermin pada *bid-ask spread* sebagai kompensasi atas risiko *adverse selection*. Biaya informasi (*information cost*) berbeda dengan biaya eksekusi (*executing cost*). Biaya eksekusi merupakan harga tertinggi yang bersedia dibayar oleh pembeli dan harga terendah yang bersedia diterima oleh penjual (Chang et al., 1999). Sedangkan, biaya informasi merupakan biaya yang harus ditanggung pelaku pasar (*market maker*) untuk melakukan jual-beli aset, di luar harga aset tersebut. Biaya suatu transaksi sangat bergantung pada informasi yang dimiliki oleh para pelaku perdagangan *Market maker* berisiko menjual aset dengan harga terlalu rendah kepada pembeli yang memiliki informasi superior (*informed buyer*) dan membeli aset dengan harga tinggi dari penjual yang memiliki informasi superior (*informed seller*). Jika tidak ada friksi pasar, maka harga *bid* dan *ask* akan sama, dan fluktuasi harga jangka pendek hanya akan bergantung pada kedatangan

informasi. Friksi pasar, yang timbul dari biaya pemrosesan pesanan, risiko inventori yang ditanggung oleh penyedia likuiditas, opsi yang diberikan oleh penyedia likuiditas, serta asimetri informasi, menyebabkan perbedaan harga *bid* dan *ask* serta volatilitas harga jangka pendek.

Allen dan Gorton (1992) menjelaskan bahwa *buyer* cenderung menghindari perdagangan dengan investor yang memiliki informasi superior, memiliki fleksibilitas dalam memilih waktu perdagangan, dan cenderung melakukan perdagangan secara berkelompok (*clustering*). Ketika *buyer* likuiditas tidak melakukan *clustering*, transaksi pembelian lebih mungkin dilakukan oleh *trader* berinformasi dibandingkan transaksi penjualan, sehingga pergerakan harga akibat pembelian menjadi lebih besar daripada penjualan. Merton (1987) mengungkapkan bahwa dampak informasi yang tidak lengkap terhadap keseimbangan pasar modal dapat membuka peluang terjadinya manipulasi, yaitu *uninformed traders* berada pada posisi yang kurang menguntungkan dalam pasar dengan informasi yang tidak lengkap. Investor yang tidak memiliki akses informasi yang sama atas semua aset atau sekuritas menghadapi risiko dan kerugian relatif lebih tinggi karena tidak dapat menilai sekuritas atau tidak dapat membedakan sekuritas dengan set informasi yang berbeda yang mengakibatkan pasar menjadi tersegmentasi. Penilaian suatu aset bergantung pada informasi yang dimiliki oleh investor, sehingga ketidakkonsistenan informasi akan menyulitkan penentuan harga yang tepat (Cochrane, 2000). Meskipun pelaku pasar telah menyepakati suatu harga, transaksi tetap dapat terjadi pada harga yang keliru, yaitu tidak efisien secara informasional, apabila investor tidak memiliki informasi yang akurat (Fama, 1970).

Sekuritas dengan tingkat informasi yang lebih rendah cenderung memiliki likuiditas yang lebih rendah, namun memiliki biaya transaksi yang lebih tinggi, karena adanya premi informasi yang menyebabkan harga ekuilibrium menyimpang dari kondisi pasar ideal (*perfect-market model*). Biaya informasi dan keterbatasan penyebaran informasi yang menciptakan ketidaksetaraan antara *informed trader* dan *uninformed trader*, sehingga menurunkan efisiensi pasar.

2.1.3 *Price Discovery* dan Efisiensi Pasar

Price formation (penentuan harga aset) merupakan proses pembentukan dan penetapan harga suatu aset (*asset pricing*) (Kissel, 2014; O'hara, 2003). Harga tersebut terdiri dari biaya transaksi likuiditas dari aset serta risiko yang muncul dari proses penemuan harga, yang meliputi biaya pemrosesan *order*, biaya *adverse selection*, biaya penahanan inventori, serta kekuatan monopoli. Menurut O'Hara (2003), pasar memiliki dua fungsi utama, yaitu penyediaan likuiditas dan fasilitasi proses penemuan harga (*price discovery*). Harga aset mengalami perubahan di dalam pasar yang dipengaruhi oleh karakteristik *trader* serta sistem perdagangan yang berlaku (O'Hara & Oldfield, 1986).

Proses *price discovery* menggambarkan bagaimana informasi baru tercermin ke dalam harga aset melalui aktivitas perdagangan. Dalam kerangka *market microstructure*, efisiensi pasar bergantung pada seberapa cepat dan akurat informasi diabsorpsi oleh harga. Pada perdagangan *tokenized carbon assets*, harga tidak hanya merefleksikan ekspektasi terhadap nilai ekonomi kredit karbon, tetapi juga dipengaruhi oleh spekulasi kripto, arbitrase DeFi, dan aktivitas non-fundamental lainnya. Kondisi ini berpotensi menimbulkan *noise trading*, sehingga harga token

karbon mungkin belum sepenuhnya mencerminkan informasi fundamental secara efisien.

Dalam *market microstructure theory* tradisional terdapat dua pendekatan utama dalam menjelaskan perilaku penetapan harga, yaitu model berbasis inventori dan model berbasis asimetri informasi (Doostian & Touski, 2024). Model inventori mempertimbangkan permasalahan inventori yang dihadapi oleh seorang dealer ketika pembeli dan penjual datang ke pasar secara tidak sinkron (asinkron) (Aigbovo & Isibor, 2017). Model inventori (Stoll, 1978; Amihud & Mendelson, 1980) mengkaji ketidakpastian aliran *order*, risiko inventori, serta permasalahan optimasi yang dihadapi penyedia likuiditas di bawah kondisi aversi risiko, karena *market maker* menetapkan kuotasi harga, sehingga biaya pemrosesan *order* dan pemeliharaan inventori dapat terpenuhi. Sedangkan, model asimetri informasi memodelkan dinamika pasar dan proses penyesuaian harga dengan menggunakan kerangka teori asimetri informasi dan *adverse selection*, yang terdiri dari model perdagangan sekuensial (Copeland & Galai, 1983; Glosten & Milgrom, 1985) dan model perdagangan strategis (Kyle, 1985). Selain itu, Aigbovo dan Isibor (2017) menjelaskan model sintesis yang menggabungkan unsur *adverse selection* dengan biaya inventori dan pemrosesan *order*.

Ketika biaya akibat asimetri informasi diperhitungkan, maka perdagangan memiliki efek yang berbeda antara *informed trader* dan *uninformed trader* (Aigbovo & Isibor, 2017). Bollen, Smith, dan Whaley (2004) menunjukkan bahwa ketika transaksi dilakukan oleh *trader* tidak berinformasi, kompensasi yang diminta oleh *dealer* setara dengan nilai sebuah opsi beli (*call option*) yang sedikit *out-of-*

the-money (OTM), dengan harga pelaksanaan yang sama dengan harga *ask*. Sebaliknya, apabila investor merupakan *trader* berinformasi, ia mengetahui bahwa harga sebenarnya dari saham akan berada di atas harga *ask*, sehingga nilai kompensasi yang diterima oleh *market maker* setara dengan nilai sebuah opsi beli yang sedikit *in-the-money*.

2.1.4 Likuiditas dalam Perspektif *Market Microstructure*

Likuiditas merupakan determinan utama dalam *market behavior* (O'hara, 1995). Pasar yang likuid umumnya dipahami sebagai pasar yang mampu mengakomodasi transaksi dengan dampak harga yang rendah, sehingga menguntungkan bagi investor. Dengan menyediakan likuiditas, pasar memfasilitasi pertukaran aset antar *trader*, dengan mengurangi biaya pencarian *counterparty*, karena pelaku pasar mudah ditemukan melalui mekanisme pasar serta memastikan bahwa harga yang terbentuk lebih efisien secara informasional. Menurut Hasbrouck (2007), terdapat dua jenis pelaku pasar, yaitu *external investor* dan *market maker*. *Market maker* berperan sebagai spekulan, bukan sebagai spesialis, karena mengambil posisi pada aset berisiko tetapi tidak mengutip harga *bid* dan *ask*. Karena tidak ada informasi privat, trader eksternal berperan sebagai penyedia likuiditas atau *noise traders*. Sedangkan, penurunan biaya transaksi memungkinkan investor lebih responsif untuk menyesuaikan keputusan investasi sesuai dengan informasi dan preferensi yang dimiliki, sehingga pasar menjadi likuid.

Likuiditas merupakan salah satu konsep sentral dalam *market microstructure* dan mencerminkan kemampuan suatu aset untuk diperdagangkan dengan cepat tanpa menyebabkan perubahan harga yang signifikan. Likuiditas memiliki beberapa

dimensi utama, yaitu *breadth*, *tightness (bid-ask spread)*, *depth* (kedalaman pasar), *immediacy* (kecepatan eksekusi), dan *resiliency* (kemampuan harga kembali ke keseimbangan). *Breadth* mengacu pada keberadaan order dalam volume yang besar. *Tightness*, yang diukur melalui *bid-ask spread*, mencerminkan tingkat kompensasi yang diminta penyedia likuiditas atas penyediaan *immediacy* dalam mengeksekusi *order* beli dan jual. Semakin kecil *spread* menunjukkan semakin rendah biaya eksekusi *order* dan semakin efisien mekanisme perdagangan, maka pasar dianggap lebih likuid. Apabila harga bervariasi sesuai dengan ukuran transaksi, maka *spread* untuk transaksi besar dapat secara signifikan lebih lebar dibandingkan *spread* untuk transaksi kecil. Sedangkan *depth* menunjukkan adanya *order* pada kedua sisi pasar (beli dan jual) di sekitar harga keseimbangan saat ini. Sedangkan, *resiliency* mencerminkan kemampuan pasar untuk merespons perubahan harga yang disebabkan oleh ketidakseimbangan order yang bersifat sementara atau dalam jangka pendek. Suatu pasar dikatakan tidak resilien apabila aliran order tidak dapat dengan cepat menyesuaikan diri terhadap kesalahan dalam proses penemuan harga (*price discovery*) (Madhavan, 2000).

Likuiditas tidak hanya merefleksikan karakteristik pasar, tetapi juga dapat dimodelkan sebagai hasil dari interaksi antara permintaan dan penawaran *immediacy*, serta merepresentasikan harga dari *immediacy*, atau secara esensial gagasan bahwa trader yang bersedia menunda transaksi akan memperoleh harga yang lebih baik dibandingkan *trader* yang menuntut eksekusi segera (Grossman & Miller, 1988). Dengan demikian, sebagaimana trader *limit order* dapat memperoleh harga yang lebih menguntungkan dengan menunggu, trader *market order* menerima

harga yang kurang menguntungkan sebagai kompensasi atas manfaat bertransaksi saat ini dibandingkan nanti. Ketika trader memaksakan diri untuk bertransaksi segera daripada menunggu (*holding behavior*), maka efek harga (*price effects*) dapat muncul. Dimensi waktu ini menunjukkan bahwa pergerakan harga antar periode merupakan ukuran fundamental dari likuiditas.

Dalam literatur *market microstructure*, *bid-ask spread* sebagai kompensasi yang harus dibayar *trader* atas kemampuan untuk bertransaksi secara cepat (Glosten & Milgrom, 1985; Stoll, 2000). Namun, kehadiran *informed trader* meningkatkan risiko bagi penyedia likuiditas, untuk menyesuaikan kuotasi harga dengan memperlebar *spread* atau membatasi kedalaman pasar. Dengan demikian, tingkat likuiditas tidak hanya ditentukan oleh volume perdagangan, tetapi juga oleh desain mekanisme perdagangan, transparansi pasar, dan distribusi informasi, yang secara bersama-sama memengaruhi efisiensi harga dan stabilitas pasar (O'Hara, 1995; Hasbrouck, 2007).

2.2 Carbon Offsetting

Carbon offsetting (CO) merujuk pada proses kompensasi atas emisi karbon untuk tujuan investasi atau mendanai proyek-proyek yang mengurangi atau menghilangkan emisi, seperti inisiatif reboisasi atau energi terbarukan (Trouwloon et al., 2023) atau untuk pensiun (*retirement*) di dalam registri melalui bursa karbon *AirCarbon Exchange* (ACX) yang memfasilitasi perdagangan kredit karbon (*carbon trading*) secara digital menggunakan teknologi *blockchain* untuk mengurangi biaya intermediasi dan meningkatkan transparansi dalam VCMs (Swinkels, 2024). CO merupakan mekanisme utama dalam VCMs, di mana

organisasi atau individu membeli kredit karbon untuk menyeimbangkan jejak karbon mereka sendiri (Davidson, 2008; Paul, 2024). Operasional CO berada di luar regulasi formal, dan bergantung pada standar independen seperti *Gold Standard* dan *Verified Carbon Standard* untuk menjamin kualitas proyek dan pengurangan emisi (Lovell, 2010). Meskipun terdapat kekhawatiran terkait kredibilitas dan praktik *greenwashing*, bukti menunjukkan bahwa CO dapat berkontribusi terhadap pengurangan emisi dan pembangunan berkelanjutan jika digunakan secara transparan dan bertanggung jawab (Calel et al., 2021; Carter et al., 2021; Gans, 2007). Pada akhirnya, CO efektif digunakan sebagai pelengkap, bukan pengganti, dari upaya pengurangan emisi dan komitmen iklim di masa depan.

2.3 *Carbon Credit sebagai Intangibel Asset*

Carbon credit (kredit karbon) atau *carbon offset* adalah sertifikat yang mewakili dan memberikan hak atas satu metrik ton ekuivalen karbon dioksida (tCO₂e) (Pei et al., 2013; Saraji et al., 2021) yang telah berhasil dihindari atau dihilangkan dari atmosfer yang diukur dengan mengacu pada skenario dasar (*Center for Strategic & International Studies* (CSIS), 2023; Favasuli et al., 2021; *International Swaps and Derivatives Association* (ISDA), 2021b). Jadi, secara sederhana, kredit karbon adalah bentuk izin yang memungkinkan perusahaan atau individu untuk mengeluarkan sejumlah karbon dioksida atau jenis GHGs lainnya, dan menciptakan insentif finansial untuk mengurangi emisi atau *carbon footprint* mengimbangi jejak karbon sebagai *private investment* bagi organisasi atau swasta (Dugbartey et al., 2025). Sedangkan, pasar kredit karbon dirancang untuk memberi insentif pengurangan emisi gas rumah kaca dengan memungkinkan entitas yang

mengurangi emisi di bawah batas yang dialokasikan untuk menjual kelebihan kredit kepada orang lain yang membutuhkannya untuk memenuhi persyaratan peraturan.

Kredit karbon dapat diklasifikasikan sebagai *Virtual Digital Assets* (VDA) yang merupakan representasi aset digital (Sharma et al, 2022) dari emisi karbon yang diterbitkan oleh lembaga registri independen dan diperdagangkan melalui teknologi *blockchain* atau ditransfer secara digital, dan dapat digunakan untuk tujuan pembayaran maupun investasi seperti *cryptocurrency*, *DeFi* dan NFT (Chevet, 2018). Secara hukum, kredit karbon bukanlah klaim kontraktual maupun sekuritas yang dikeluarkan oleh entitas hukum atau skema investasi kolektif yang memberikan hak atau akses modal (Banque de France, 2024), namun sebagai hak properti tidak berwujud (*intangible asset*) (Ben McQuahe & Co., 2023) yang dapat dipertukarkan (*fungible*), dibuat, dibeli, dijual, (Looney, 2009) dihentikan (*retired*) (Clifford Chance, 2022; *United Nations Commission on International Trade Law*, 2024), dijaminkan (*security interest*) atau *pledged as collateral* (McMillan, 2010), dan diperlakukan khusus saat terjadi kebangkrutan (termasuk *close-out netting*) (UNIDROIT, 2025) ; ISDA, 2021b).

ETS sebagai instrumen kebijakan yang menetapkan batas maksimum emisi yang diizinkan dan mengeluarkan izin emisi yang setara dengan jumlah tersebut (Merlo et al., 2025). Perusahaan yang melebihi batas emisi mereka dapat membeli izin tambahan dari perusahaan lain yang juga telah melebihi alokasi mereka atau telah melaksanakan langkah pengurangan yang melebihi yang diperlukan untuk memenuhi target pengurangan emisi jangka pendek maupun untuk sepenuhnya menghilangkan emisi guna mencapai target *net-zero*. Mekanisme ini menciptakan

pasar untuk izin emisi, di mana harga ditentukan oleh penawaran dan permintaan (Shobande et al., 2024). Oleh karena itu, kredit karbon dapat menjadi alat yang bernilai untuk memobilisasi pendanaan publik dan swasta guna mendukung pengurangan dan penyerapan emisi tambahan (hasil mitigasi), jika integritasnya terjamin, perhitungannya dilakukan secara ketat, dan penggunaannya melengkapi aksi iklim yang ambisius (Ahanon et al, 2023).

Sertifikat emisi tCO₂ yang diperdagangkan terbagi menjadi 2 jenis (Saraji et al., 2021). *Voluntary Emissions Reduction* (VER) merupakan kredit karbon yang diperdagangkan di VCMs (*over-the-counter*), digunakan oleh entitas swasta atau individu yang ingin mengimbangi emisi mereka secara sukarela. Sementara, *Certified Emissions Reduction* (CER) adalah unit atau kredit emisi yang dihasilkan melalui kerangka regulasi formal atau melalui *compliance market*, dengan tujuan untuk mengimbangi emisi dari suatu proyek secara terverifikasi dan sesuai standar internasional. Perbedaan jenis dan metode pengurangan emisi sangat mempengaruhi harga kredit karbon di pasar karbon. Harga kredit karbon berkisar antara USD10 hingga USD1.000 per ton CO₂. *Nature-based solutions*, seperti reboisasi, memiliki harga kredit karbon yang lebih rendah, yaitu sekitar USD10 hingga USD25 per ton CO₂. Sedangkan, penghilangan emisi berbasis teknologi, seperti *Direct Air Carbon Capture and Storage* (DACCS) dan *Bioenergy with Carbon Capture and Storage* (BECCS), bernilai lebih tinggi, sekitar USD100 hingga USD1.000 per ton CO₂. Menurut Akerlof (1970) ketidakpastian kualitas dan harga dapat menyebabkan seleksi yang merugikan. Oleh karena itu, kredit karbon memiliki peran sentral sebagai instrumen pasar yang tidak hanya merepresentasikan

upaya pengurangan emisi, tetapi juga memiliki nilai ekonomi dan hukum yang signifikan dalam mendukung transisi menuju *net-zero*.

2.4 *Compliance Carbon Markets* (CCMs)

Compliance carbon markets (CCMs) atau pasar karbon wajib (*mandatory*) merupakan pasar keuangan yang menetapkan target pengurangan emisi karbon dan perjanjian iklim global, dibentuk melalui undang-undang atau mekanisme formal, yaitu regulasi *cap-and-trade* (Sim et al., 2024) yang mengizinkan penggunaan kredit karbon menuju kewajiban regulasi dan dibatasi pada yurisdiksi atau skema di mana mekanisme seperti itu dibuat, baik di tingkat internasional, nasional, maupun regional (ISDA, 2021). Dalam CCMs, entitas yang terlibat diatur secara hukum untuk membeli dan menyerahkan izin emisi karbon atau *offset* yaitu jumlah emisi karbon yang diizinkan untuk dikeluarkan oleh suatu perusahaan atau entitas untuk memenuhi target regulasi. CDM yang dibentuk di bawah Protokol Kyoto, merupakan CCMs yang menerapkan prosedur dan aturan yang seragam untuk menjamin kualitas kredit emisi, termasuk registrasi terpusat, basis data yang dapat diakses publik, dan standar akreditasi (Franki, 2022). Selain itu, *European Union Emission Trading System* (EU ETS), merupakan CCMs yang mengatur skema perdagangan karbon wajib di Eropa. Mekanisme perdagangan karbon menciptakan insentif finansial untuk mengurangi emisi yang memungkinkan perusahaan memperdagangkan kredit karbon di pasar yang diatur (Dugbartey et al., 2025). Dengan kerangka hukum yang jelas dan sistem pengawasan yang ketat, CCMs menjadi instrumen utama dalam memastikan kepatuhan terhadap target emisi dan mendukung upaya global dalam mitigasi iklim.

2.5 *Voluntary Carbon Markets* (VCMs)

Voluntary Carbon Markets (VCMs) adalah pasar keuangan yang bersifat terdesentralisasi dan terus berkembang (*nascent*) dengan sistem regulasi dan lembaga sertifikasi independen, yang memungkinkan pihak swasta, pemerintah atau individu dapat membeli, menjual, dan memperdagangkan kredit karbon secara sukarela untuk mengimbangi emisi karbon di luar target mitigasi yang diwajibkan (Ahluwalia et al., 2020 ; Bassi et al., 2025; ISDA, 2021; World Bank, 2022). Berbeda dengan CCMs yang diatur secara ketat oleh otoritas pemerintah, VCMs tidak berada di bawah pengawasan langsung otoritas pemerintah mana pun sehingga tidak mempunyai kerangka hukum yang terstandarisasi (Kreibich et al., 2021). VCMs berperan dalam mitigasi perubahan iklim dengan memungkinkan organisasi mendanai proyek-proyek pengurangan atau penghilangan emisi karbon di luar kewajiban regulasi (Betz et al., 2022; Michelle et al., 2022). Meskipun pasar ini mendorong inovasi dan investasi, terdapat tantangan hukum, perpajakan, dan struktural yang dapat menghambat efektivitas dan skalabilitasnya (Winkelman et al., 2023). VCMs sebagai bagian dari sistem *baseline-and-credit*, yang bertujuan untuk mengurangi emisi GHGs dan melengkapi sistem *cap-and-trade* dalam mengatur alokasi emisi (Bassi et al, 2025), mendukung upaya penghapusan emisi karbon dari atmosfer secara permanen, dengan strategi *reduce first, mitigate second* akan memungkinkan perusahaan untuk mencapai *net-zero* dengan cara yang ekonomis efisien (ISDA, 2021). Meskipun demikian, pembelian kredit karbon melalui VCMs tidak selalu mengurangi emisi karbon secara aktual (Calele et al. 2021; Carter, et al., 2021)

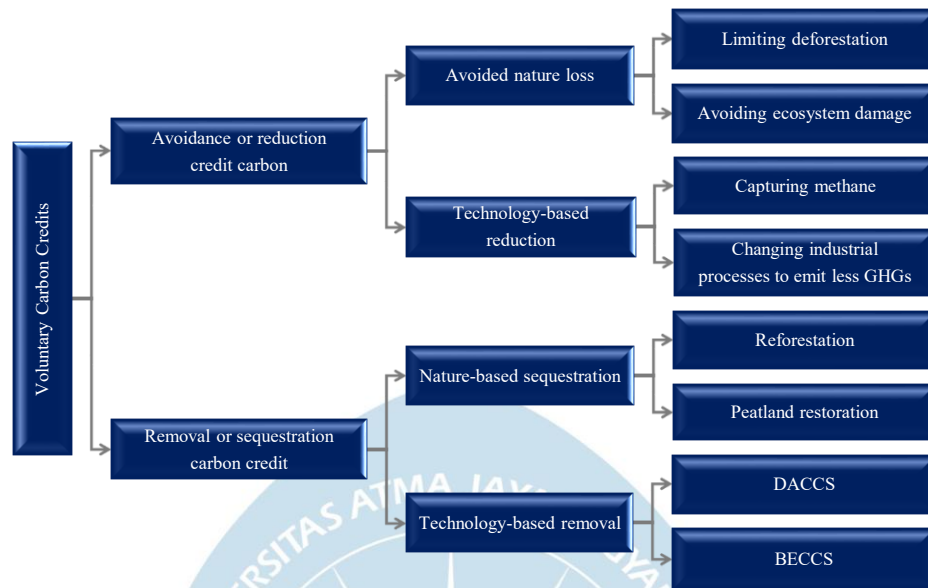
Integrasi instrumen derivatif ke dalam VCMs juga menjadi sarana untuk meningkatkan likuiditas, mengelola volatilitas harga, dan menarik partisipasi institusional (Spilker et al, 2023), yang sama dengan CCMs CCMs (Swinkels et al., 2023). Selain itu, berbagai inisiatif global dikembangkan untuk meningkatkan standardisasi dan transparansi dalam aktivitas VCMs (McGeady et al, 2023). Namun, masih ada kekhawatiran terkait kegagalan pasar seperti kualitas kredit yang tidak konsisten dan kurangnya akuntabilitas, sehingga mendorong perlunya kerangka kebijakan yang lebih kuat untuk menjamin integritas lingkungan dari pasar ini (Battocletti et al, 2023).

Secara teoritis, VCMs dapat dipahami melalui kerangka *market-based environmental governance*, yang memadukan logika pasar dan tata kelola lingkungan dalam pengelolaan emisi karbon yang bertujuan menginternalisasi eksternalitas negatif dari aktivitas ekonomi melalui mekanisme harga, di mana kredit karbon menjadi alat insentif bagi pengurangan emisi secara sukarela (Stavins, 2001). Dalam konteks tata kelola lingkungan, VCMs mencerminkan *environmental governance theory* yang inklusif dan terdesentralisasi (Lemos et al., 2006) dan *governance architecture* (Bierman et al., 2020) dengan menekankan pada pendekatan multi-stakeholder dan peran aktor non-negara dalam pengelolaan sumber daya alam serta produksi nilai lingkungan, termasuk verifikasi dan validasi pengurangan emisi karbon pada berbagai tingkat yuridiksi (Bulkeley et al., 2012). Keberadaan VCMs menegaskan pergeseran paradigma, dalam sektor keuangan, yang ditandai oleh inovasi yang cepat dan potensi besar untuk mengganggu struktur ekonomi tradisional secara signifikan (Signh et al., 2024), dari regulasi sentralistik

menuju tata kelola hibrida yang menggabungkan logika pasar, mekanisme berbasis konsensus, dan legitimasi institusional dalam mitigasi perubahan iklim. Pendekatan ini memberikan fleksibilitas dalam adaptasi kebijakan dan memungkinkan kolaborasi lintas sektor untuk meningkatkan efektivitas dekarbonisasi.

Carbon credit dalam VCMs disebut dalam berbagai pendekatan sebagai *voluntary carbon credits* (VCCs), *voluntary carbon offset* (VCO) atau *Verified Emission Reduction* (VER) yang dikategorikan menjadi 4, yaitu *avoided nature loss*, seperti deforestasi; *nature-based sequestration*, melalui reforestasi; *avoidance of emissions*, seperti metana dari tempat pembuangan sampah; dan *direct removal CO₂ dari atmosfer* (*Carbon Offsets Grow in Importance as Producers Target Net-Zero*, 2021; Franki, 2021). Sedangkan, berdasarkan jenis proyek *carbon credit* (IOSCO, 2022b; Perkins et al., 2021) terbagi menjadi 2, yang meliputi:

- a. *Removal or Sequestration Carbon Credit* (penghilangan kredit karbon) atau kredit yang mewakili emisi yang diambil dari atmosfer dan kemudian disimpan secara permanen seperti *nature-based solutions* dengan reboisasi maupun teknologi biochar atau BECCS dan DACCS.
- b. *Avoidance or Reduction Carbon Credit* (penghindaran kredit karbon) yang merupakan pengurangan emisi bersertifikat dari proyek-proyek yang mengurangi emisi yang ada saat ini dibandingkan dengan skenario dasar (*baseline*) yang diterima, seperti proyek pembatasan deforestasi, dan pendanaan transisi menuju energi terbarukan.



Sumber: (ISDA, 2021)

Gambar 2.5-1 Struktur VCMs

2.5.1 *Blockchain* sebagai Infrastruktur Pendukung VCMs

Infrastruktur digital merupakan instrumen fundamental dalam tokenisasi kredit karbon untuk membentuk sistem perdagangan yang *decentralized*, *transparent*, dan *interoperable* dalam tata kelola pasar digital. Pendekatan ini sejalan dengan *Infrastructure-as-Code* (IaC) dan *trustless systems*, yaitu sistem digital sebagai infrastruktur yang dapat dikonfigurasi dan dijalankan secara otomatis untuk mengurangi ketergantungan pada lembaga perantara melalui mekanisme konsensus terdistribusi (Narayanan et al., 2016), sekaligus menjembatani kekosongan institusional (*institutional voids*) yang menjadi hambatan dalam pengembangan pasar (Beck et al., 2018). *Blockchain* juga digunakan dalam pengembangan dan operasionalisasi aset kripto, perdagangan internasional, perpajakan, manajemen rantai pasok, operasi bisnis, dan tata kelola (Bai et al., 2019; Centobelli et al., 2021; Kimani et al., 2020; Pólvara et al., 2020; Varriale et al., 2020).

Menurut Glavanits (2020), Mora et al. (2021) dan Parmentola et al (2021) teknologi *blockchain* berpotensi sebagai solusi digital yang dapat mendukung SDGs, dan *circular economy* melalui mekanisme penguatan hak atas sumber daya, pelacakan asal produk, dan pemberian insentif perilaku (Herweijer et al., 2018; Hughes et al., 2019; Mulligan et al., 2024). Kud (2023) menambahkan bahwa *distributed ledger technology* (DLT) pada infrastruktur digital *blockchain* dapat menggantikan fungsi pasar tradisional serta merevolusi industri dan teknologi *green finance* melalui otomatisasi aset digital, sehingga meningkatkan efisiensi, transparansi, dan akses pembiayaan pada proyek lingkungan atau aksi iklim internasional (Corbet et al., 2019; De Vries, 2018; Tian et al., 2020). Secara empiris, infrastruktur digital juga berkontribusi pada penurunan emisi karbon, terutama jika didukung kebijakan fiskal yang mendorong transformasi digital berkelanjutan (Abbas et al., 2024) serta memfasilitasi bentuk produksi hijau yang baru melalui pengembangan *green supply-chain* (Bai & Sarkis, 2019; Saberi et al., 2019). Selain itu, *blockchain* memberikan dampak signifikan pada arus keuangan, membantu operasional aset tidak likuid dan meningkatkan volume perdagangan karbon, sehingga membuat lebih mudah diakses (Zhao et al., 2022).

Blockchain menyediakan infrastruktur digital sebagai *database* atau sistem pencatatan transaksi (penerbitan, transfer, dan pensiun kredit karbon) dalam *distributed ledger technology* (DLT) (Alt et al., 2025; Hughes et al., 2019; Garg, 2023; ISDA, 2020; Li et al., 2018b; Rauchs et al., 2018; Zafar, 2025; Zwitter et al., 2020) atau jaringan blok digital (Moll et al., 2019) yang mengandalkan internet dan protokol TCP atau IP (Anthony, 2023) dan bersifat *pseudonymous* dengan

menggunakan teknologi kriptografi untuk memastikan keamanan jaringan serta integritas data yang dicatat bebas dari gangguan (*tamper proof*) (Thilakavathy et al., 2023; Denter et al., 2023; Josenhans, 2024; Kuner et al., 2021; Lee, 2024). Teknologi *blockchain* telah mentransformasikan cara aset direpresentasikan, dipindahkan, dan diperdagangkan (Nguyen et al., 2021; Wankmüller et al., 2023). Karakteristik utama dari *blockchain* meliputi kestabilan dan keamanan sistem (Kavanagh et al., 2020), verifikasi independen (*publicly-verifiable*) (Dai et al., 2017), permanensi (*immutable audit trail*), deteksi *fraud* (*manipulation detection*) yang mencegah perubahan data historis dengan adanya *tamper-evident records* (Iansiti et al., 2017; Jaffer et al., 2024; Rodriguez, 2025), dan transparansi yang memungkinkan semua pihak untuk mengakses riwayat transaksi secara terbuka (Government Office for Science, 2016). DLT pada *blockchain* juga menjamin transparansi, keterlacakan dan keamanan sistem (Saber et al., 2019).

Selaras dengan prinsip *accountability* dan *transparency* dalam tata kelola lingkungan (Wong et al., 2021; Ciplet et al., 2018; Kollmus, 2015), *blockchain* berfungsi memperkuat akuntabilitas (Van Pelt et al., 2021) dan mekanisme audit secara *real-time* (Catalini et al., 2020; Dong et al., 2023) untuk mengurangi risiko *double counting* dan *fake credit* (Baruch et al., 2022; Dorfleitner et al., 2021; Zhang et al., 2019). Teknologi *blockchain* mampu menyediakan cara agar kebenaran (*veracity*) data kepatuhan dapat dipercaya, mengurangi peran perantara dan efisiensi waktu (Carlson, 2018; Date et al., 2022; Kim, 2022; Rauchs et al., 2018), menurunkan biaya transaksi melalui tokenisasi dan *smart contracts* sebagai sistem kepercayaan berbasis algoritma atau kode komputer (*node*) yang membentuk

jaringan *peer-to-peer* dengan mencocokkan pembeli dan penjual berdasarkan preferensi untuk asal geografis, jenis proyek (reboisasi atau energi terbarukan), dan toleransi harga, untuk mempercepat serta memperkuat sinkronisasi dan persebaran transaksi perdagangan (karbon) (Beck et al., 2018; Berg, 2019; Clack et al., 2019; Davidson et al., 2016; De Fillipi et al., 2016; Hussein et al., 2023; Nguyen et al., 2023; Sanderson, 2022; Tapscott et al., 2016; Teplý et al., 2021; Yaga et al., 2019).

Menurut Cong et al. (2018) dan Karamitsos et al. (2018) *smart contracts* merupakan kontrak digital yang memungkinkan pelaksanaan ketentuan berdasarkan konsensus terdesentralisasi atau kriteria kepatuhan, bersifat tahan terhadap manipulasi, dan dapat menegakkan kesepakatan secara otomatis melalui eksekusi terprogram (Dencer-Brown et al., 2022; Galenovich et al., 2022). Dalam VCMs, *smart contracts* mengatur siklus hidup token seperti penerbitan, pensiun (penghapusan permanen dari peredaran), dan transfer kepemilikan. Otomatisasi memastikan bahwa setelah token pensiun, yang mengindikasikan telah terjadi kompensasi emisi, token tidak dapat masuk kembali ke sirkulasi untuk diperdagangkan. Penggunaan *smart contracts* memungkinkan sistem pelacakan terhadap perubahan kepemilikan dan status pensiun sehingga menjaga integritas dalam inisiatif pengimbangan karbon dan mendukung kerangka kerja akuntansi iklim yang kuat di seluruh yurisdiksi.

Technology-Mediated Trust (Bodó, 2021) menjelaskan bahwa dalam konteks sistem digital, kepercayaan tidak lagi bergantung pada institusi formal atau otoritas eksternal (*trustless infrastructure for financial transaction*) (De Filippi et al., 2016) seperti bank atau lembaga keuangan, melainkan pada integritas

teknologinya, sehingga membentuk sistem tata kelola baru berbasis protokol yang efisien, otomatis, dan minim manipulasi (Lessig, 2006). *Blockchain* sebagai *transparency-enhancing technology* digunakan untuk memperkuat kepercayaan pasar yang memperluas partisipasi lintas yurisdiksi melalui mekanisme tokenisasi; kredit karbon diubah secara efisien menjadi aset digital yang diperdagangkan di platform publik (Treiblmaier & Sillaber, 2021). Selain itu, Allen et al (2020) juga menambahkan bahwa *blockchain* berfungsi sebagai instrumen regulasi yang mendukung distribusi kekuasaan dan *bargaining power* antar pemangku kepentingan, serta memperkuat prinsip *smart governance* dalam pengelolaan proyek lingkungan. Lebih lanjut, *Sociotechnical Systems Theory* memperkuat pandangan ini dengan menekankan bahwa *blockchain* memfasilitasi interaksi antara aktor sosial dan struktur teknis dalam menciptakan ekosistem pasar karbon yang lebih adaptif dan inklusif.

Dalam kerangka *Diffusion of Innovation* oleh Rogers, proses adopsi teknologi *blockchain* dalam VCMs dapat diklasifikasikan sebagai inovasi berbasis kompatibilitas sistemik dan observabilitas hasil (García-Avilés, 2020), yang memperkuat dimensi observabilitas melalui *on-chain ledger* dimana seluruh transaksi dan metadata kredit karbon dapat diakses secara publik (*open source*) yang mendukung efisiensi *price discovery*. Sedangkan *smart contracts* mencerminkan disintermediasi sistematis, yang menggantikan pihak ketiga dengan otomatisasi (Tapscott & Tapscott, 2016). Dengan demikian, infrastruktur *blockchain* dalam VCMs berperan sebagai entitas institusional yang secara aktif

membentuk ulang sistem tata kelola pasar karbon digital yang menjamin legitimasi, transparansi, dan keberlanjutannya.

2.5.1.1 *Blockchain Explorer*: Etherscan dan PolygonScan

Etherscan dan Polygonscan merupakan *blockchain explorer* atau alat pelacak transaksi (Gálvez et al., 2023) token kredit karbon. Kedua platform ini mencerminkan *Digital Trust Infrastructure Theory*, di mana kepercayaan dibangun melalui sistem yang transparan, bukan otoritas terpusat (Beck et al., 2018). Dalam sistem pasar karbon berbasis token, audit publik atas transaksi menjadi elemen penting dalam memastikan transparansi dan akuntabilitas, untuk mencegah praktik *greenwashing* melalui sistem verifikasi yang terbuka dan terdesentralisasi (Bernards et al., 2022).

Etherscan merupakan database publik untuk melacak (*block explorer*) dan menganalisis aktivitas di jaringan *blockchain* Ethereum, sehingga pengguna dapat melihat riwayat transaksi, validasi biaya gas (*gas fee*), validasi blok terbaru, interaksi *smart contracts* dan distribusi token ERC-20 maupun NFT. Ethereum adalah platform *software* berbasis *blockchain* pertama (Buterin, 2009; Nageshwar et al., 2021) dengan sistem *backend* yang mengaplikasikan *smart contract* (Ali et al., 2021) dengan mekanisme *proof of stake* (PoS) untuk mendukung *cryptocurrency* serta pembentukan dan perdagangan NFT dengan membangun *decentralized application* (dApps) (Cai et al., 2018; Ølnes et al., 2017; Raval, 2016), sekaligus menjalankan transaksi dalam bentuk kode kontrak yang dikompilasi menjadi *bytecode* *Ethereum Virtual Machine* (EVM) (Watanabe et al., 2016). EVM merupakan ekosistem virtual yang menyediakan infrastruktur *runtime*

untuk mengeksekusi *smart contract* (Alharby et al., 2017) meski memiliki keterbatasan pada *throughput* transaksi dan tingginya biaya transaksi (Yan et al., 2025) termasuk *gas fee* (Ali et al., 2021; Meiser et al., 2024) karena membutuhkan daya komputasi (*hashing power*) untuk menjalankan operasionalnya (Nageshawar et al., 2012). Sedangkan, dApps memberi pengguna kemampuan untuk menegakkan aturan kepemilikan, fungsi transisi status, dan format transaksi (Jennath et al., 2019) serta mengembangkan *node* yang dapat diakses dan ditulis dalam berbagai bahasa pemrograman tingkat tinggi (*Solidity*) (Vogelsteller et al., 2015) seperti sistem *decentralized finance* (DeFi) atau permainan berbasis perdagangan seperti *blockchain Crypto-Kitties* dan *marketplace The Sandbox* (Kanellopoulos et al., 2021). Ethereum dapat mendukung berbagai fitur seperti batas penarikan (*withdrawal limits*), perulangan (*loops*), kontrak keuangan (*financial contracts*), dan pasar perjudian (*gambling markets*)

Polygonscan merupakan alat analitik pada jaringan Polygon bertujuan untuk mencari dan memverifikasi informasi transaksi, memantau aktivitas dompet, mengecek saldo token, menelusuri *smart contract* yang telah di-*deploy* serta menyediakan visualisasi data seperti *block time*, volume transaksi, dan interaksi pengguna dalam proyek DeFi dan NFT. Polygon (sebelumnya dikenal sebagai *Matic*) adalah solusi penskalaan Layer 2 yang dikenal dengan Ethereum 2.0 yang dibangun untuk meningkatkan skalabilitas (menangani volume transaksi yang lebih tinggi), keamanan (mencegah *double-spending*), desentralisasi (tidak ada redundansi atau kepemilikan terpusat pada entitas tertentu) dan protokol (meanisme consensus) pada Layer 1 (Buterin et al., 2022; Gangwal, 2022; Rosca et al, 2023; Yan et al.,

2025). Polygon berfungsi sebagai *sidechain* Ethereum (Liang, 2024; Singh et al., 2020) untuk memfasilitasi transaksi yang lebih cepat dengan biaya yang lebih rendah (Pandey, 2023; *Polygon Knowledge Layer*, n.d.). Polygon menggunakan *Optimistic Rollups* (Gramoli et al., 2015) untuk memproses pemanggilan kontrak (*contract calls*) di luar rantai utama (*off-chain*) dengan menggabungkan teknologi *plasma chains* dengan mekanisme konsensus *Proof of Stake-Checkpointing* (PoS-C) (Bez, 2019; Neiheiser, 2023; Paul et al., 2023) untuk meningkatkan privasi dan keamanan dengan kriptografi, yang berfungsi untuk mengamankan jaringan dan secara berkala menyinkronkan data menggunakan *bridge* ke Ethereum *mainnet* atau *mainchain* (Neiheiser et al., 2023) dan *subchain* (Pandey, 2023) guna memastikan validitas, finalitas transaksi dan verifikasi (Kovak, 2025).

2.5.1.2 *Price Agregator*: CoinGecko dan CoinMarketCap

CoinMarketCap dan CoinGecko adalah platform penyedia data *cryptocurrency* yang menyajikan informasi global mengenai Bitcoin dan berbagai altcoin (Julianto, 2023), termasuk token kredit karbon. Benedetti et al. (2021) menyebutkan bahwa CoinMarketCap merupakan basis data terbaik yang komprehensif dan kredibel untuk mengumpulkan data mata uang kripto serta banyak digunakan dalam literatur akademik (Aslan et al., 2022) sekaligus untuk memprediksi harga *cryptocurrency* menggunakan algoritma *machine learning* (Singh et al., 2023). Platform ini mengagregasi data perdagangan harian dari bursa publik yang mengenakan biaya transaksi, dan data tersebut ditampilkan dalam indeks yang tersedia di NASDAQ, Bloomberg Terminal, serta Thomson Reuters (Howell et al., 2018). Sedangkan CoinGecko berperan penting dalam memperoleh dan menyediakan informasi

transaksi, aktivitas jaringan dan data *cryptocurrency* secara *real-time*, mencakup harga, kapitalisasi pasar, serta volume perdagangan (Gupta et al, 2024), untuk mendukung analisis harga dan performa historis aset kripto (Anusha et al., 2024).

Meskipun tidak memberikan akurasi data secara penuh, platform ini dapat membantu meminimalkan risiko kerugian finansial yang besar dengan menyediakan, mengidentifikasi dan menganalisis data yang relevan tentang token atau mata uang kripto serta tren pasar secara *real-time* sebelum dilakukan aktivitas perdagangan. Vidal-Tomás (2022) menyoroti bahwa Coinmarketcap dan Coingecko mencakup sebagian besar aktivitas perdagangan *cryptocurrency* global karena memiliki karakteristik yang secara fundamental sama dengan platform *main exchange* seperti Coinbase dan Bitstamp serta situs pemeringkat alternatif seperti *Cryptocompare*. Namun, penggunaan agregasi data dari berbagai bursa untuk menghasilkan satu harga tunggal suatu *cryptocurrency* dapat menimbulkan potensi permasalahan, terutama terkait dengan akurasi dan validitas data yang disajikan.

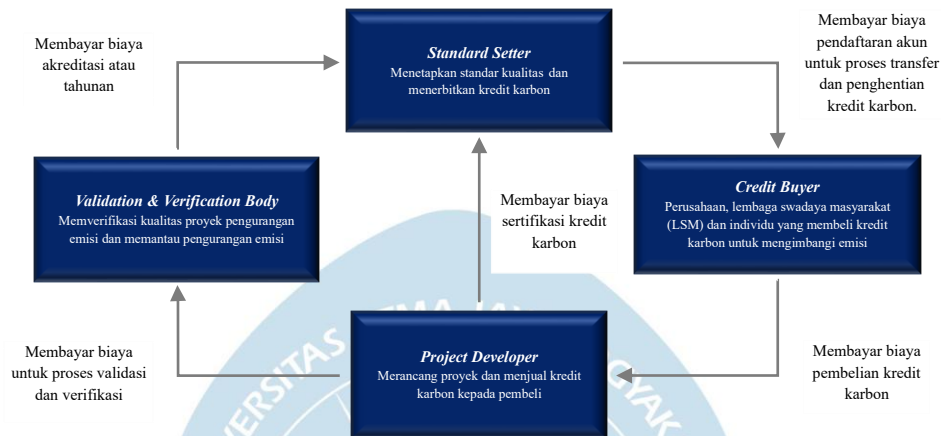
Dalam *Efficient Market Hypothesis* (Fama, 1970), transparansi informasi merupakan kunci efisiensi harga (Milgrom dan Tadelis, 2018). CoinGecko dan CoinMarketCap sebagai agregator data aset digital, menyediakan indikator seperti harga token, volume perdagangan, dan kapitalisasi pasar yang berfungsi sebagai sinyal pasar untuk mendukung *price discovery* dan mengurangi asimetri informasi (Amihud & Mendelson, 1986) serta menyediakan akses publik yang dapat diverifikasi, sehingga mendukung akuntabilitas pasar karbon digital (Nielsen, 2021). Pendekatan ini konsisten dengan konsep *corporate carbon transparency*, yang menekankan pentingnya pengungkapan data sebagai dasar tata kelola dan

pelaporan lingkungan yang bertanggung jawab (Elsayih et al., 2018). Dengan demikian, CoinGecko dan CoinMarketCap berperan penting dalam memperkuat efisiensi pasar digital sekaligus mendukung tata kelola lingkungan dalam ekonomi karbon berbasis *blockchain*.

2.5.2 Mekanisme Perdagangan VCMs

Tata kelola VCMs merupakan mekanisme swasta yang bergerak secara independen, untuk mengatur operasionalnya pada berbagai skala dan dipimpin oleh perusahaan transnasional yang bergantung pada kebijakan nasional dan subnasional, regulasi, serta partisipasi pelaku pasar untuk menjamin kualitas dan dampak dari pengembangan proyek-proyek karbon. Mekanisme VCMs beroperasi berdasarkan asas *Project Cycle Management*, yang terdiri dari tahapan sistematis melalui proses pengembangan proyek karbon, verifikasi serta validasi oleh pihak ketiga, pendaftaran pada *registry* karbon, sampai penjualan atau penebusan kredit (Madauss, 2024; Hassan, 2020). Pendekatan *Result-Based Financing* (RBF) (Gustavsson et al., 2015; Instiglio, Inc., 2018) memperkuat mekanisme ini serta menekankan insentif ekonomi hanya diberikan untuk pengurangan atau penghindaran emisi yang terverifikasi dengan kredibel oleh lembaga independen. Prinsip ini sejalan dengan *incentive theory* (Abudy et al., 2020) dalam manajemen korporat, bahwa kompensasi eksekutif harus berkorelasi positif dengan kinerja yang dihasilkan, sebagai bentuk penguatan positif dan negatif yang komprehensif. Tata kelola VCMs yang baik menunjukkan efektivitas, transparansi, dan legitimasi yang lebih tinggi, sehingga perlu untuk menemukan mekanisme yang mampu

melacak aliran emisi, menghindari *double counting*, dan mematuhi persyaratan akuntansi yang disepakati secara internasional (Lang et al., 2019).



Sumber: Battocletti et al. (2023) dan Lang et al. (2019)

Gambar 2.5-2 Entitas dan *Cashflow* dalam VCMs

Mekanisme VCMs melibatkan sejumlah pelaku utama, antara lain:

1. *Project owners and developers*: Entitas publik atau swasta yang bertanggung jawab atas pengembangan proyek penghasil kredit karbon dan menjualnya.
2. *Carbon Standard*: Menetapkan aturan dan persyaratan teknis yang harus dipenuhi oleh proyek penghasil kredit karbon.
3. *Registry*: Menyimpan informasi serta melacak status kredit karbon selama siklus hidupnya, termasuk penerbitan, transfer, dan penghentian.
4. *Seller and buyer*: Lembaga keuangan, pedagang, entitas dengan kewajiban emisi (*compliance entities*), korporasi, pemerintah, LSM, dan individu.
5. *Verifiers and assurers*: Pihak independen yang bertanggung jawab menyusun program penjaminan mutu dan melakukan proses verifikasi.
6. *Exchanges*: Bursa komoditas yang menyediakan perdagangan kontrak spot dan kontrak berjangka (*forward*) untuk kredit karbon.

Mekanisme VCMs memanfaatkan teknologi *blockchain* guna mengelola registri digital dengan melacak sumber dan status verifikasi kredit karbon. *Emission Reduction Purchase Agreement* (ERPA) merupakan kontrak yang mengikat secara hukum antara pihak penjual dan pembeli untuk penyerahan kredit karbon terverifikasi dalam jumlah, harga, dan periode tertentu (World Bank, 2021). Mekanisme ini diintegrasikan dengan *smart contract* untuk mengotomatisasi pelaksanaan klausul kontrak, seperti verifikasi, pengalihan hak, dan pembayaran, sehingga meningkatkan transparansi dan mengurangi risiko keterlambatan atau sengketa serta meminimalisasi potensi *double counting*, manipulasi atau *greenwashing* dan intervensi sepihak (KlimaDAO, 2022; Toucan Protocol, 2022; Schär, 2021). Proses verifikasi dilakukan oleh lembaga verifikasi dan sertifikasi untuk memastikan bahwa kredit karbon yang diperdagangkan telah memenuhi standar yang diakui secara internasional, sebelum diserahkan kepada pembeli.

2.5.3 Peran Standar Sertifikasi dalam VCMs

Untuk mengelola permintaan yang meningkat akan kredit karbon, perusahaan dan organisasi swasta telah mengembangkan standar dan mempertahankan registri kredit. Pasal 6.4 dalam *Paris Agreement* menyerukan Perserikatan Bangsa-Bangsa untuk membentuk badan kredit terpusat untuk mengadopsi standar dan metodologi untuk memastikan konsistensi dan menghindari penghitungan ganda (Seligman, 2025). *Carbon standard* berperan sebagai pusat operasi VCMs yang terdiri dari peraturan, prosedur terstandarisasi, dan metodologi yang menjadi dasar dalam penerbitan dan sertifikasi atau pengesahan kredit karbon. Standar ini dikembangkan dan diawasi oleh organisasi

standar atau pihak ketiga independen (*validation and verification bodies*), seperti lembaga internasional non-pemerintah (NGO) yang memiliki fungsi untuk menetapkan standar, regulasi, sistem validasi dan verifikasi sekaligus sebagai *regulator de facto* bagi VCMs dengan memastikan kualitas, kredibilitas, serta integritas lingkungan dari kredit karbon yang diterbitkan (Broekhoff, 2007; Dyck et al., 2023). Dengan keberadaan standar ini, proyek VCMs dapat memperoleh sertifikasi, diterbitkan ke dalam registri, dan diperdagangkan secara transparan, sehingga memfasilitasi keterlacakan (*traceability*) dan meningkatkan kepercayaan pasar.

Dalam kerangka *Market-Based Instruments Theory* (Stavins, 2003), sertifikasi karbon dalam VCMs berfungsi sebagai *quasi-regulatory instrument* yang memungkinkan internalisasi eksternalitas melalui mekanisme pasar. Sertifikasi ini menetapkan parameter evaluatif atas nilai karbon, yang memiliki karakteristik *credence goods*, sebagaimana dikaji oleh Farukh et al. (2020), di mana kualitasnya tidak dapat diamati langsung bahkan setelah dikonsumsi. Saat ini, terdapat sejumlah lembaga yang telah mapan dalam VCMs, seperti *American Carbon Registry* (ACR), *Climate Action Reserve* (CAR), *Gold Standard* (GS), dan *Verified Carbon Standard* (VCS) oleh Verra (Dawes et al., 2023), yang mengatur *supply* pasar, menetapkan standar proyek, memverifikasi kepatuhan terhadap standar tersebut, serta mengelola registri yang mengatur *minting* dan *retirement* kredit karbon (Dawes et al., 2023).

Sebagai bagian dari regulasi pasar, standar seperti Verra dan Gold Standard berperan sebagai *epistemic authority* (Haas, 2018) yang memastikan kredibilitas

melalui verifikasi berbasis kriteria objektif, bertindak sebagai *institutional gatekeeper* untuk mengontrol asimetri informasi dan mencegah eksploitasi narasi keberlanjutan (Delmas & Burbano, 2011). Selanjutnya, dalam konteks digitalisasi pasar karbon, teknologi *blockchain* menawarkan pergeseran dari sistem validasi tertutup menuju sistem *verifiable by design*, meningkatkan transparansi dan akuntabilitas sertifikasi karbon sesuai dengan prinsip *institutional transparency* dalam tata kelola lingkungan digital (Schär, 2021). Dengan demikian, sertifikasi karbon dalam VCMs berfungsi tidak hanya sebagai mekanisme administratif tetapi juga sebagai instrumen tata kelola yang mendefinisikan legitimasi dan parameter pasar karbon.

2.5.4 Pertumbuhan dan Dampak VCMs terhadap Keberlanjutan

Pertumbuhan VCMs menunjukkan ekspansi *green economy* dan transformasi tata kelola lingkungan yang bersifat polisentris dengan jaringan institusi yang berkoordinasi tanpa otoritas pusat atau regulator tunggal (Ostrom, 2010; Jordan et al, 2021). Berdasarkan laporan *Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets* (TSVCM) yang disusun oleh *Institute of International Finance* (2021), *soft law mechanism* berperan dalam membentuk legitimasi pasar karbon dengan sistem konsensus, meskipun tanpa kekuatan hukum yang mengikat. Kotchen (2006, 2007, 2009) menjelaskan bahwa peningkatan permintaan produk lingkungan didorong oleh nilai atau insentif sosial dan reputasional. Pemberian insentif ini sejalan dengan *Tokenomics Theory* (Chohan, 2022), yang menjelaskan bahwa desain insentif dapat digunakan untuk mendorong perilaku ekonomi tertentu melalui imbal hasil terukur. Hal ini diperkuat dengan *Corporate Social Responsibility*

Institutionalization Theory (Campbell, 2007) yang menekankan bahwa praktik CSR didorong oleh tekanan kelembagaan yang menciptakan norma kepatuhan, bukan hanya strategi perusahaan. Dengan demikian, pertumbuhan VCMs membentuk dan dipengaruhi oleh struktur normatif, sistem kepercayaan, dan dinamika tata kelola yang bersifat multipusat, yang semakin kuat melalui integrasi antara pasar, teknologi, dan standar kelembagaan.

2.5.5 Tantangan dalam VCMs

Perkembangan VCMs menunjukkan tren positif di tengah dominasi CCMs oleh target emisi pemerintah. Namun, fragmentasi pasar, fluktuasi harga yang tinggi, dan kualitas kredit yang rendah menunjukkan adanya indikasi ketidakefisienan dalam VCMs (Diamond et al, 2024; ISDA 2021).

1. Kualitas Kredit Karbon

Kredit karbon merupakan produk homogen, sehingga kualitasnya sangat bergantung pada proyek yang mendasarinya. Isu seperti metodologi proyek, dampak lingkungan dan sosial, serta potensi *greenwashing* membuat pembeli menuntut transparansi tinggi. Hal ini juga menyebabkan kesulitan dalam standarisasi kontrak pasar primer karena keberagaman isu pada tiap proyek.

2. Risiko *Double Counting*

Double counting terjadi saat satu unit reduksi emisi diklaim lebih dari sekali, baik dalam skema VCMs atau CCMs. Contohnya, ketika satu ton CO₂e yang telah direduksi dijual sebagai VCC, namun juga dilaporkan dalam inventaris nasional untuk menghindari kewajiban membeli kredit di pasar karbon wajib.

3. Keterbatasan *Price Discovery*

Minimnya transparansi dan referensi harga menghambat proses *price discovery* yang menyulitkan pembeli dalam menilai kewajaran harga dan penjual dalam memperoleh pembiayaan proyek, sehingga biaya transaksi meningkat (volatilitas tinggi) dan partisipasi pasar menjadi terbatas.

4. Interaksi dengan *Article 6 Paris Agreement*

Article 6 memungkinkan negara untuk memperdagangkan hasil reduksi emisi dalam bentuk *Internationally Transferred Mitigation Outcomes* (ITMOs). VCMs mendorong integrasi pasar karbon internasional, namun memerlukan *adjustment* agar tidak terjadi *double counting*. Ketidakjelasan implementasi dan keterbatasan kapasitas negara berkembang dalam melakukan penyesuaian akuntansi dapat menghambat transaksi dan likuiditas VCMs.

5. Fragmentasi Pasar

VCMs bersifat terfragmentasi secara geografis, metodologis, dan kelembagaan (misalnya perbedaan standar, registri, dan tipe proyek). Keragaman ini menyulitkan pengembangan pasar yang efisien dan terstandar, sehingga menghambat likuiditas dan kepercayaan pasar secara luas.

2.5.6 Efisiensi dan Likuiditas VCMs

Efisiensi pasar VCMs merujuk pada sejauh mana harga pasar mencerminkan seluruh informasi yang tersedia secara relevan yang berhubungan dengan kemampuan pelaku pasar dalam mengakses, memperdagangkan, dan menilai harga kredit karbon secara adil dan transparan. Likuiditas sebagai bagian dari efisiensi pasar, mencerminkan kemudahan suatu aset diperdagangkan tanpa menyebabkan

perubahan harga yang signifikan. Likuiditas adalah konsep yang digunakan untuk menilai aset keuangan (Zhu et al., 2025) dan faktor risiko dalam penetapan harga aset yang sensitif terhadap guncangan likuiditas pasar, serta mengakibatkan *return* yang diharapkan lebih tinggi (Díaz et al., 2020). *Liquidity premium theory* menyarankan bahwa aset yang tidak likuid dengan biaya transaksi tinggi memiliki *return* yang diharapkan relatif tinggi, sementara aset likuid dengan biaya transaksi rendah memiliki *return* yang diharapkan relatif rendah (Sundaresan et al., 2024). Indikator utama likuiditas dalam penelitian ini menggunakan pola perdagangan *intraday* (Kissel, 2014), meliputi *bid-ask spread*, volume perdagangan, dan *return* volatilitas.

2.5.6.1 *Bid-Ask Spread* (BAS) Kredit Karbon

Bid-ask spread (BAS) merupakan salah satu ukuran *illiquidity* pasar, yang digunakan untuk menetapkan harga aset yang tidak mudah dan tidak cepat dijual atau ditukar menjadi uang tunai tanpa mengalami penurunan nilai yang signifikan (Korajczyk et al., 2008). Literatur mikrostruktur pasar (Madhavan, 2000) mendefinisikan *bid-ask spread* sebagai nilai yang dibayarkan untuk memperoleh *immediacy*. BAS adalah selisih antara *bid price* (harga beli tertinggi yang bersedia dibayarkan oleh pembeli dalam suatu transaksi) dan *ask price* (harga jual terendah yang ditawarkan oleh penjual) yang merupakan kompensasi atas *immediacy* (Eraker et al., 2023; Li et al., 2018a; Mahendra et al., 2017) dari suatu aset atau instrumen keuangan seperti token karbon. Dalam *order-driven market*, pedagang melakukan transaksi dengan mengajukan *market order* atau *limit order*. Pengambil harga (*price takers*) akan menempatkan pesanan pasar untuk membeli atau menjual aset,

sehingga investor menerima tawaran terbaik atau permintaan terbaik yang ditentukan oleh pembuat pasar (*market maker*).

Bid-ask spread dapat digunakan sebagai *proxy* atau indikator yang mencerminkan tingkat likuiditas token karbon, khususnya bagi investor yang ingin mendapatkan *capital gain* secara cepat (Dharma et al., 2022; Hagströmer, 2021; Utami et al., 2020). *Spread* lebar menunjukkan adanya selisih besar antara harga beli dan jual serta likuiditas lebih lemah untuk suatu aset, dan akan lebih sulit untuk menukar aset pada harga yang stabil, menjadikannya metrik penting saat menilai likuiditas keseluruhan aset dari sudut pandang investasi. Hal ini dapat menyebabkan aset menjadi kurang aktif diperdagangkan, karena biaya transaksi menjadi lebih mahal (Pan et al., 2021). Selama volatilitas harga, *spread* biasanya melebar saat pembuat pasar melakukan lindung nilai posisi mereka untuk menghindari terjebak dalam lonjakan harga (*price swing*) yang berisiko tinggi dan tidak menguntungkan. Sebaliknya, jika nilai *spread* rendah menunjukkan pasar yang likuid dan efisien. Selisih harga yang kecil membuat transaksi lebih murah dan menarik bagi investor, sehingga aktivitas perdagangan token karbon menjadi lebih tinggi (Ardia et al., 2021). Ryder (2023) mengungkapkan bahwa *spread* merupakan suatu gambaran dari persepsi risiko oleh *market maker* terhadap volatilitas harga. *Spread* yang tetap melebar setelah periode volatilitas, mengindikasikan bahwa pelaku pasar memperkirakan volatilitas harga akan berlanjut.

Jika pasar efisien secara informasi dan biaya transaksi nol, maka harga pasar yang teramati mencerminkan semua informasi yang relevan (Roll, 1984). Perubahan harga akan terjadi hanya jika informasi yang tidak terduga diterima oleh

pelaku pasar. Tidak akan ada ketergantungan serial dalam perubahan harga berturut-turut (kecuali yang dihasilkan oleh ketergantungan serial dalam tingkat pengembalian yang diharapkan).

2.5.6.2 Volume Perdagangan Kredit Karbon

Volume perdagangan (*traded volume*) atau *dollar volume* ($\$Volume$) dalam pasar modal didefinisikan sebagai total nilai moneter (dalam dollar) dari transaksi atau perdagangan yang secara spesifik terjadi pada periode tertentu (Chordia, 2001) di seluruh platform *Centralized Exchange* (CEX) dan *Decentralized Exchange* (DEX). Indikator ini menunjukkan seberapa besar aliran dana yang masuk dan keluar melalui suatu aset, sehingga membantu investor dalam menilai tingkat aktivitas dan potensi pergerakan harga. Volume perdagangan digunakan untuk menilai likuiditas (Noeberg et al., 2020), tingkat aktivitas atau reaksi pasar (Bianchi et al., 2022) dan minat investor terhadap suatu aset (Zhang et al., 2023; Boonvorachote et al., 2016). *Dollar volume* yang lebih tinggi menunjukkan kemudahan dalam melakukan transaksi jual beli (*entry* dan *exit*) bagi para pelaku pasar. Jika nilai total volume saham yang diperdagangkan lebih besar daripada jumlah saham yang diterbitkan, menunjukkan pasar saham yang lebih likuid sehingga aktivitas volume perdagangan akan meningkat (Kusumastuti et al., 2015). Volume perdagangan menjelaskan tentang kekuatan antara penawaran dan permintaan di pasar saham yang merupakan manifestasi dari perilaku dan minat investor. Volume perdagangan yang tinggi, menjelaskan bahwa minat investor juga tinggi, dan sebaliknya. Selain itu, volume juga menggambarkan aktivitas

perdagangan di pasar saham, sehingga menjadi indikator penting dalam mengevaluasi kondisi dan aktivitas pasar.

Volume perdagangan berbanding lurus dengan harga aset. Semakin tinggi volume perdagangan, maka semakin aktif pasar tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa aset memiliki tingkat likuiditas yang tinggi, karena dapat dengan cepat diperjualbelikan di pasar tanpa menyebabkan perubahan harga yang signifikan. Penelitian oleh Xu et al. (2023) menunjukkan bahwa volume perdagangan yang tinggi cenderung mempersempit *bid-ask spread* dan meningkatkan likuiditas pasar, meskipun adanya asimetri informasi. Selain itu, volume perdagangan berperan penting dalam menjaga efisiensi harga dan stabilitas pasar (Pingel et al., 2023). Khususnya dalam pasar kripto, volume memiliki nilai prediktif terhadap *return* dan *risk*, serta mencerminkan tingkat *adverse selection* pada pasangan kripto yang kurang likuid (Bianchi et al., 2022).

2.5.6.3 Volatilitas Harga Token Kredit Karbon

Volatilitas harga yang dimaksud dalam penelitian ini adalah varian *return* atau risiko token kredit karbon. Dalam bidang keuangan, volatilitas merujuk pada fluktuasi atau variasi harga sekuritas atau komoditas, termasuk token kredit karbon, dari waktu ke waktu yang digunakan sebagai ukuran penilaian tingkat risiko pasar saham serta penemuan dan penentuan harga instrumen derivatif (Black et al., 2012; Sutrisno, 2020; Yang et al., 2020). Semakin tinggi volatilitas, semakin besar ketidakpastian terhadap *return*, namun memberikan peluang untuk melakukan perdagangan atau transaksi guna memperoleh keuntungan dari selisih antara harga awal dan harga akhir (*margin*) pada saat transaksi. Menurut Markowitz (1952),

expected return tinggi diimbangi dengan risiko yang rendah, sehingga bertentangan dengan teori *Capital Asset Pricing Model* (CAPM) (Sharpe, 1964) yang menyatakan bahwa semakin tinggi risiko sistematis, maka semakin tinggi *return* yang diharapkan sebagai kompensasi bagi investor (Leirvik, 2021). Volatilitas tinggi menunjukkan aktivitas pasar yang rendah (ilikuid) (Amihud et al., 1986) dan tingginya tingkat asimetri informasi (Biais et al., 2019).

Penemuan harga di pasar yang masih baru (*nascent market*) sangat tidak stabil yang dipengaruhi oleh faktor-faktor di luar harga karbon, termasuk sentimen pasar kripto sebagai kelas aset dan euforia terhadap teknologi baru (Kreppmeier et al., 2023). Hal ini sejalan dengan kondisi pada pasar *cryptocurrency* yang sangat volatil dibandingkan dengan pasar keuangan tradisional, sehingga peramalan volatilitas menjadi sangat penting untuk manajemen risiko (Bariviera et al., 2017; Blau, 2017; Klein et al., 2018; Kwapien et al., 2022). Dalam perdagangan kredit karbon, penggunaan platform *cryptocurrencies* dianggap sebagai aktivitas yang berisiko karena potensi kerugian akibat volatilitas yang sangat tinggi (Kozak et al., 2021; Marella et al., 2021). Salah satu penyebab adanya fluktuasi adalah *distraction* (gangguan) atau *shocks* (kejutan) yang memengaruhi perilaku investor. *Distraction-Conflict Theory* oleh R.S. Baron (Baron, 1986; Davis et al., 2022) menyatakan bahwa kehadiran stimulus eksternal, seperti berita viral, rumor di media sosial, atau informasi yang tidak relevan namun menarik perhatian investor (Nicholson, 2005), meningkatkan *arousal* (gairah mental), mengalihkan perhatian atau konsentrasi (Kent, 2007), menciptakan konflik kognitif, serta memengaruhi kinerja secara positif atau negatif (McLeod, 2023).

Sedangkan, teori *attention-based asset pricing* menjelaskan bahwa harga aset tidak hanya ditentukan oleh faktor fundamental, tetapi juga oleh bagaimana perhatian investor terdistribusi di pasar. Menurut Barber dan Odean (2008), investor memiliki kapasitas perhatian yang terbatas sehingga cenderung bereaksi secara berlebihan terhadap informasi yang menonjol, seperti lonjakan harga, volume tinggi, atau berita viral, namun mengabaikan informasi lain yang lebih substantif namun kurang terlihat. Hirshleifer dan Teoh (2003) menambahkan bahwa proses pengambilan keputusan investor sangat dipengaruhi oleh *salience*, yaitu kecenderungan untuk memproses informasi yang mencolok atau mudah diamati dan menarik perhatian atau memiliki daya tarik emosional, sehingga reaksi pasar sering bersifat parsial dan tertundakan serta tidak rasional. Keterbatasan perhatian ini menyebabkan *mispricing*, peningkatan volatilitas, serta persistensi *shock* yang berkepanjangan karena informasi tidak sepenuhnya terkapitalisasi ke dalam harga pada saat menerima *shock* awal dalam bentuk *good news* atau *bad news*. Dengan demikian, teori ini memberikan kerangka yang kuat untuk memahami mengapa pasar dengan atensi investor yang terfragmentasi, seperti aset token karbon berbasis *blockchain* menunjukkan pola *long-memory volatility* dan dinamika harga yang tidak langsung kembali ke kondisi ekuilibrium.

Volatilitas token mencerminkan reaksi investor yang berkelanjutan dan berlebihan terhadap informasi investasi internal atau eksternal yang secara inheren meningkatkan persepsi risiko. Banerjee et al. (2022) menunjukkan bahwa sentimen berita COVID-19 secara signifikan berdampak pada pengembalian dan volatilitas mata uang kripto. Khalfaoui et al. (2023) menyoroti pengaruh perhatian perang

Rusia-Ukraina pada pasar mata uang kripto, sedangkan Gemici et al. (2022) mencerminkan pentingnya postingan media sosial, seperti yang ditangkap oleh ketidakpastian ekonomi berbasis Twitter, untuk penetapan harga aset *safe-haven* seperti Bitcoin.

Twitter sebagai platform media sosial terbukti menjadi sumber data untuk prediksi harga saham maupun *cryptocurrency*. Penelitian oleh Akbiyik et al. (2021), Lamon et al. (2017), Sapkota (2022) dan Zou et al. (2023) menunjukkan bahwa analisis sentimen dari berita dan media sosial dapat meningkatkan akurasi model dalam memprediksi harga aset kripto. Hal ini didukung penelitian Shen et al. (2019) dan Wu et al. (2021) yang menemukan bahwa jumlah tweet atau ukuran ketidakpastian berbasis Twitter menentukan volume transaksi dan volatilitas realisasi Bitcoin pada hari berikutnya. Hirshleifer et al. (2003) menyatakan bahwa distraksi eksternal dapat menyebabkan reaksi emosional dan impulsif dalam pengambilan keputusan atau menjadi kurang rasional. Lebih lanjut, Alnaes et al. (2014), Garel et al. (2021), dan Kempf et al. (2017) menunjukkan bahwa perhatian investor bergeser secara kolektif pada sektor yang terdampak oleh guncangan eksogen (*exogenous shocks*), sehingga melemahkan pengawasan (*attention constraints*) dan mendorong *executive compensation stickiness*, yang menunjukkan bahwa konflik kognitif tidak hanya mempengaruhi perilaku investor, tetapi juga berdampak pada tata kelola korporasi secara sistemik (Chan et al., 2021; Hong et al., 2023; Schmidt, 2018; Yang et al., 2021).

Dalam perdagangan kredit karbon berbasis kripto, tingginya eksposur terhadap informasi spekulatif dan minimnya transparansi memperbesar efek

distraksi mendorong lonjakan aktivitas transaksi yang tidak proporsional, karena didominasi oleh investor jangka pendek atau spekulan (Kyriazis, 2019), terhadap nilai intrinsik aset dan menciptakan perilaku skeptisisme terhadap fluktuasi harga yang signifikan dari aset *blockchain* (Algieri, 2012). Akibatnya, investor sering kali mengabaikan informasi fundamental, yang dapat menimbulkan *mispricing* aset dan mendorong volatilitas harga ke level ekstrem. Menurut Blanchard et al. (1982), kesalahan penetapan harga (*mispricing*) lebih mungkin terjadi pada pasar dengan fundamental yang sulit untuk dinilai.

Dalam analisis pasar, volatilitas diklasifikasikan menjadi dua (Rangel, 2011; Hwang, 2000). *Transitory volatility* adalah volatilitas *short-lived* (jangka pendek) atau bersifat sementara akibat dari aktivitas *noise trading* seperti kebijakan fiskal. Sedangkan, *fundamental volatility* adalah volatilitas jangka panjang dan bersifat persisten yang disebabkan oleh munculnya *stochastic information* (acak) yang tidak langsung teramati namun berdampak pada nilai riil aset seperti *inflation shocks*.

2.6 *Tokenized Carbon Credit sebagai Digital Asset*

Tokenisasi kredit karbon (*Tokenization Carbon Credit*) adalah proses mengubah hak kepemilikan atas suatu aset (Burgoyne et al., 2025) atau digitalisasi yang merepresentasikan aset nyata (*real-world assets*) (Moncada et al., 2024; Rodriguez, 2024; Swinkels, 2023) atau aset tidak berwujud (*intangible asset*) (Ali et al. 2023) seperti kredit karbon (Saraji et al., 2021; Swinkels, 2024) menjadi token kripto (Carapella, 2023; Zheng et al., 2022) dengan menggunakan teknologi *blockchain* dan *smart contract* (Takanashi et al., 2020) serta menyimpannya dalam bentuk yang terenkripsi, transparan, dan konkret (Dowling, 2022; Popescu, 2021). Tokenisasi

aset yang didukung oleh *blockchain* mengubah model keuangan tradisional, efisiensi transaksi, penciptaan nilai, dan distribusi risiko di antara pelaku pasar (Tanveer, 2025), dengan kecepatan mekanisme penerbitan dan penyebaran token kriptografi sehingga menjadi salah satu aplikasi utama dari jaringan *blockchain* (Schletz et al., 2020; Voshmgir, 2019), yang mendukung koordinasi antar pelaku dalam suatu lingkungan yang diatur untuk mencapai sistem insentif (Freni et al., 2022).

Tokenisasi kredit karbon merupakan elemen sentral dalam *Regenerative Finance* (ReFi), bagian dari *Decentralized Finance* (DeFi), yang berfokus pada mitigasi perubahan iklim melalui berbagai jenis aset digital (Fullerton, 2015; Gibbons, 2020; Diaz-Valdivia et al., 2022). Tokenisasi menawarkan potensi pertumbuhan pasar yang signifikan, meningkatkan likuiditas dan aksesibilitas melalui kepemilikan fraksional dan interoperabilitas lintas batas dengan memanfaatkan teknologi *blockchain* (Mottaghi et al., 2024). Hal ini sejalan dengan Malekan (2022) yang menemukan bahwa investasi token berbasis *blockchain* memiliki kesamaan dengan ekuitas *startup*, yang memiliki likuiditas tinggi dan mekanisme penemuan harga sejak awal. Sejalan dengan Zhou et al. (2023) bahwa *blockchain* sebagai komponen krusial dalam tokenisasi pasar karbon mampu mengurangi biaya transaksi (*overhead administrative*), meningkatkan likuiditas, dan memperluas akses ke instrumen keuangan karbon, meskipun masih memiliki hambatan teknis, regulasi, dan ekonomi (Gallopp et al., 2025).

Dengan tokenisasi, sertifikat kredit karbon (*Tokenized Carbon Credit*) diterbitkan dalam bentuk token (Zhang et al, 2024a), memungkinkan pemegang

token memiliki klaim kepemilikan yang legal atau sah secara hukum (Aldasoro, 2023) yang selaras dengan *Property Rights Theory* oleh Demsetz (1967). Sertifikat digital ini berfungsi sebagai bukti pencapaian *offset* yang dapat dipindahtangankan, memungkinkan entitas untuk berpartisipasi dalam CCMs dan VCMs. Setelah ditokenisasi, kredit karbon dapat dijual di bursa terdesentralisasi (DEX), ditransfer antar *wallet* dan jaringan, atau dipensiunkan (*retired*) untuk klaim *offset* karbon, dan dapat diintegrasikan dengan berbagai protokol keuangan terdesentralisasi (DeFi) seperti *yield farming*, *staking*, *derivative* dan *stablecoin* berbasis karbon. Tokenisasi memungkinkan harga kredit karbon direpresentasikan secara transparan sesuai dengan nilai aset riil tersebut dan dapat diverifikasi (Catalini & Gans, 2020; World Bank, 2023).

Tokenisasi kredit karbon dilakukan dengan menggunakan metodologi verifikasi dan sertifikasi oleh Verra atau Gold Standard dengan kredit karbon yang diamankan dan dicatat dalam DLT (Nowak, 2022), atau dicetak secara langsung (*native minting*) di *blockchain* menggunakan *machine learning* dan data satelit (Sorensen, 2023). Kredit karbon yang ditokenisasi dari *legacy ledger*, menggunakan kriteria yang berbeda untuk menentukan jumlah dan jenis kredit yang akan ditokenisasi. Sedangkan untuk token kredit karbon yang diterbitkan oleh *blockchain*, seperti Ethereum dan Polygon, mengikuti standar ERC20 dan ERC721 untuk jenis token yang dapat dipertukarkan (*fungible*) dan tidak dapat dipertukarkan (*non-fungible*). Satu unit token merepresentasikan satu ton metrik CO₂ ekuivalen yang telah ditangkap atau emisi yang berhasil dihindari, serta disesuaikan dengan mekanisme insentif yang mendasari token, perdagangan, dan distribusinya.

Konsep *Anticipated Affordances* menjelaskan bagaimana ekspektasi terhadap kemampuan teknologi mendorong adopsi tokenisasi karbon (Johannessen, 2023). Tokenisasi menjadi penghubung antara aset digital dan sistem keuangan tradisional, yang memperkuat peran infrastruktur digital sehingga mendorong efisiensi dan aksesibilitas (Allen et al., 2020) yang lebih besar terhadap investasi, menyederhanakan pengelolaan aset (Babushkina et al., 2024,) mengurangi friksi pasar (OECD, 2020) serta meningkatkan likuiditas (Bayhoca et al., 2023; Chalmers et al., 2022; Takanashi et al., 2020). Selain itu, selaras dengan *Agency Theory*, tokenisasi dapat meningkatkan integritas transaksi dan keterlacakan unit karbon melalui sistem verifikasi otomatis dan transparan, sehingga dapat mengurangi asimetri informasi dan konflik kepentingan (Tian et al., 2020; Chen et al., 2021; Akerlof, 1970; Jensen & Meckling, 1976; Eisenhardt, 1989), menggantikan sistem sebelumnya yang bersifat tertutup (Kumari et al., 2022). Tokenisasi juga berfungsi untuk melindungi data keuangan sensitif (Sonika, 2025) serta mengurangi risiko pelanggaran data dan penipuan (George et al., 2024). Dengan demikian, tokenisasi bukan hanya transformasi teknologi atas aset karbon, tetapi menjadi instrumen penting dalam pembentukan struktur, legitimasi, dan tata kelola baru di pasar karbon berbasis *blockchain*.

2.6.1 Manfaat Tokenisasi Kredit Karbon

Integrasi teknologi *blockchain* ke dalam upaya mitigasi iklim telah memperkenalkan metode baru untuk mendigitalkan aset lingkungan, khususnya melalui penciptaan unit kriptografi yang mewakili pengurangan karbon yang terverifikasi. Tokenisasi mendukung upaya membangun infrastruktur keuangan

yang terbuka, terdesentralisasi, dan dapat disusun ulang (*composable*) dengan memanfaatkan keunggulan dari DeFi (Popescu, 2020). Tokenisasi kredit karbon dengan infrastruktur platform digital *blockchain* memberikan berbagai manfaat penting lain yang mendorong minat dan investasi (Burgoyne et al., 2025):

1. Transparansi dan keterlacakan yang lebih tinggi

Teknologi *blockchain* mencatat setiap transaksi dan kepemilikan kredit karbon secara permanen dan transparan, sehingga mengurangi risiko kecurangan dan manipulasi yang memastikan integritas pasar kredit karbon karena menciptakan jejak yang dapat diaudit dan diverifikasi.

2. Peningkatan likuiditas dan kemudahan akses

Kredit karbon yang telah ditokenisasi dapat diperjualbelikan secara digital sehingga meminimalisasi hambatan masuk bagi investor kecil yang berdampak pada peningkatan likuiditas pasar karena melibatkan partisipasi dari individu dan organisasi kecil dalam perdagangan kredit karbon.

3. Efisiensi operasional dan pengurangan biaya

Blockchain menyederhanakan dan mengotomatisasi proses penerbitan (*minting*), perdagangan (*trading*), dan penghapusan atau pemensiunan (*retirement*) kredit karbon menggunakan *smart contract* sehingga transaksi lebih efisien dengan menurunkan biaya administrasi dan waktu penyelesaian.

4. Manfaat strategis bagi lembaga keuangan

Tokenisasi dapat memberikan manfaat dari peningkatan akses ke pembiayaan karbon sebagai kelas aset baru yang berpotensi menyalurkan modal untuk pasar karbon. Lembaga keuangan berpotensi untuk menciptakan *green bonds* dan

sekuritas tokenisasi melalui pemanfaatan kredit karbon digital dengan platform perdagangan yang aman dan jaminan kualitas proyek karbon.

Menurut teori transaksi portofolio (Mankiw, 2000; *Portfolio Theory and Management*, 2013; Soler Ramos et al., 2000), optimalisasi manajemen portofolio investasi dilakukan dengan mempertimbangkan kombinasi aset yang menawarkan profil risiko dan pengembalian yang berbeda, sekaligus berfungsi sebagai penyimpan nilai yang aman, stabil dan memiliki karakteristik defensif dibandingkan dengan saham atau obligasi yang lebih fluktuatif dalam menghadapi ketidakpastian makroekonomi seperti perubahan kondisi moneter dan volatilitas pasar. Tokenisasi aset biologis karbon mendukung teori ini melalui penerapan prinsip ESG (*Environmental, Social Responsibility, and Corporate Governance*) dan kolaborasi lintas sektor, sehingga dapat membuka peluang strategi diversifikasi portofolio (Ankenbrand et al., 2018; Baur et al., 2018a; Briere et al., 2015) yang sudah berlaku selama periode tekanan seperti pandemi COVID-19 (Goodell et al., 2021), sebagai *hedging* (lindung nilai untuk mengurangi risiko kerugian) (Corbet et al., 2018; Demiralay et al., 2022; Dyhrberg, 2016; Fang et al., 2019; Grinberg, 2011), *safe haven* (tempat berlindung untuk mempertahankan nilai aset saat terjadi krisis atau gejolak pasar) (Baur et al., 2018b; Colon et al., 2021; Conlon et al., 2018; Corbet et al., 2022; Feng et al., 2018; Platanakis et al., 2019; Wang, 2021) yang nilainya tidak bergantung pada performa perusahaan atau kebijakan moneter, melalui penghapusan hambatan geografis dengan sistem perdagangan digital, serta eksekusi otomatis berbasis *smart contracts* untuk mempercepat proses dekarbonisasi (Lei et al., 2024; Zhang et al., 2017). Dengan demikian, implikasi

teori portofolio dan inovasi digital dapat membentuk ulang kerangka investasi yang dapat digunakan oleh investor untuk memaksimalkan keuntungan dan mendiversifikasi risiko serta adaptif pada keberlanjutan.

2.6.2 Skema Tokenisasi Kredit Karbon

Kredit karbon dapat ditokenisasi melalui sistem *bridge* dari registri tradisional ke *blockchain* dan menghasilkan token. Implementasi dapat bervariasi antar platform dan registri. Beberapa menawarkan *bridge* dua arah, yaitu kredit yang ditokenisasi dapat ditokenisasi ulang dan dikembalikan ke registri asli jika diperlukan (Burgoyne et al., 2025). Tokenisasi dilakukan melalui skema berikut ini:

1. Penguncian di akun kustodian (*Locking in Custodian Account*)

Kredit karbon dapat dipindahkan atau ditukarkan oleh pemegang kredit dari registri seperti Verra atau Gold Standard ke akun kustodian yang dikendalikan oleh platform seperti Toucan Protocol untuk menghubungkan registri karbon tradisional dengan jaringan *blockchain*. Akun ini berfungsi sebagai brankas aman yang memastikan kredit asli tetap utuh, diverifikasi keasliannya, dan tidak dapat dihitung ganda.

2. Pencetakan token (*Minting*)

Token dicetak ke dalam *blockchain* seperti Ethereum berdasarkan kredit yang sudah diamankan di akun kustodian menggunakan standar ERC-20 untuk token yang dapat dipertukarkan dan ERC-721 untuk token yang tidak dapat dipertukarkan. Token ini mewakili kredit karbon secara *on-chain*, satu token bernilai sama dengan satu kredit karbon, yang berisi metadata dari kredit asli

di registri, seperti jenis proyek, tahun penerbitan, standar sertifikasi dan identifikasi unik.

3. Fungsi token (*Functionality Token*)

Token yang telah dicetak dapat diperdagangkan di berbagai platform *blockchain*, dan dipensiunkan untuk klaim *offset*. Kredit yang sesuai di registri juga dipensiunkan, mencegah penghitungan ganda.

Keseluruhan proses pencetakan token, pemensiunan kredit, dan pembaruan registri diotomatisasi dengan *smart contracts* sehingga menciptakan sistem perdagangan kredit karbon yang efisien dan transparan di *blockchain*, untuk menjaga kredibilitas manfaat lingkungan yang mendasari dan tetap terhubung dengan registri asli.

2.6.3 Tokenisasi dalam Proyek Karbon

Tokenisasi kredit karbon sebagaimana diterapkan dalam proyek Toucan Protocol, KlimaDAO, dan Moss.Earth mencerminkan pergeseran menuju *digital environmental governance* yang mengintegrasikan aset lingkungan dengan mekanisme *decentralized finance* (DeFi), sesuai dengan prinsip *cryptoeconomics* dan *DeFi integration theory* (Chen et al., 2022c; Werbach, 2018) yang mencerminkan *Institutional Theory* atau pembentukan norma baru dalam tata kelola keberlanjutan (Scott, 2001). Menurut *Digital Institutionalism Theory* (Brous et al., 2020), transformasi teknologi mendorong terbentuknya institusi digital yang otonom dan terstandar, menggantikan birokrasi konvensional yang cenderung lambat dan mahal. Selain itu, penerapan tokenisasi sejalan dengan *Diffusion of Innovation Theory* (Rogers, 2003) dan *Socio-Technical Transitions Theory* (Geels,

2002), di mana *blockchain* berperan sebagai *niche* yang mendorong transisi sistemik dengan dukungan *crypto-environmentalist* sebagai agen transformasi yang memperbaharui model tata kelola konvensional sehingga membentuk praktik baru yang lebih terbuka dan berorientasi pada lingkungan.

2.6.3.1 Token \$KLIMA dalam Ekosistem DAO

KlimaDAO adalah *blockchain* perdagangan karbon yang memanfaatkan struktur *Decentralized Autonomous Organization* (DAO) (Bellavitis et al., 2023) untuk membangun ekosistem ekonomi karbon digital, yaitu sistem yang menghasilkan insentif terhadap pengurangan CO₂ dari atmosfer atau mata uang berbasis karbon (*crypto-carbon*) dengan keseluruhan biaya nyata dari emisi karbon yang diinternalisasi dalam setiap transaksi (Sorensen, 2023). KlimaDAO menciptakan token \$KLIMA yang didukung oleh *treasury* dengan memensiunkan *Verified Carbon Units* (VCUs) dan melalui mekanisme kontrak *staking* dan *bonding* yang bersumber dari token karbon BCT dan MCO₂. Token \$KLIMA bertujuan untuk menjadikan kredit karbon sebagai cadangan (*backing*) dari aset kripto lainnya seperti stablecoin untuk meningkatkan harga *offset* pada VCMs. Selain mendorong kompensasi karbon pasif, KlimaDAO memberi insentif terhadap penerbitan *Tokenized Carbon Tonnes* (TCT) baru di *blockchain* menggunakan mekanisme insentif berbasis token \$KLIMA (Rodriguez, 2024).

Tokenisasi \$KLIMA diinisiasi dengan perolehan kredit karbon dari berbagai proyek lingkungan, seperti kehutanan, energi angin, dan panel surya. Kredit karbon tersebut direpresentasikan melalui *carbon bridge* dalam bentuk token TCO₂, yang didepositokan ke dalam *Toucan Base Carbon Pool*. Selanjutnya, kredit karbon

ditokenisasi menjadi BCT dan dapat digunakan dalam mekanisme bonding, yaitu proses di mana BCT dimasukkan ke dalam KlimaDAO *treasury*. Melalui mekanisme ini, pengguna dapat menukar (*swapping*) token BCT dengan token \$KLIMA baru, sementara perbendaharaan DAO menyimpan BCT tersebut sebagai cadangan (*backing*) dari \$KLIMA yang diedarkan dan menjamin bahwa satu token \$KLIMA setara dengan satu ton CO₂ terverifikasi atau *verified carbon units* (VCUs) dari registri seperti Verra (Rodriguez, 2024).

Token \$KLIMA dalam kerangka *Sustainable Finance Theory* (Sullivan & Mackenzie, 2020), memperluas pendekatan ESG melalui mekanisme yang dapat diverifikasi dan ditelusuri di *blockchain*. Teknologi ini juga mencerminkan prinsip *Diffusion of Innovation Theory* (Rogers, 2003), dengan DAO sebagai pionir inovasi digital di pasar karbon. Selain itu, proyek ini menunjukkan penerapan *Token Economy Framework* (Hassan et al., 2020) yang menekankan partisipasi komunitas dalam penyelesaian isu lingkungan. Dengan demikian, KlimaDAO mengintegrasikan inovasi keuangan digital dan tata kelola lingkungan berbasis komunitas dalam mendukung transisi menuju perdagangan karbon yang transparan, berkelanjutan serta dapat membangun kepercayaan dalam VCMs (Adams et al., 2021a; Slavin et al., 2022).

2.6.3.2 Token BCT pada Ekosistem DeFi *Toucan Protocol*

Toucan Protocol merupakan infrastruktur dalam pasar karbon yang diluncurkan pada Oktober 2021 dalam *public blockchain* untuk memulai sistem keuangan regeneratif. Infrastruktur *Toucan Protocol* melibatkan *Toucan Carbon Bridge* yang menghubungkan registri karbon tradisional seperti Verra dengan *Toucan Meta*

Registry, yaitu registri *on-chain* yang berjalan di jaringan Polygon dan *Toucan Carbon Pools* (Dias-Valdivia et al., 2022). Tokenisasi kredit karbon melalui *Toucan Protocol* dilakukan dengan mengkonversi aset *off-chain* menjadi token digital atau kredit karbon *on-chain Tokenized CO2* (TCO2), yang menghubungkan arsitektur Web3 dengan dorongan dekarbonisasi dari *offset* aktual. TCO2 *semi-fungible* berisi informasi unik tentang setiap proyek yang dikodekan secara *on-chain* dan diverifikasi, sehingga menghubungkan Toucan ke salah satu standar *offset* karbon utama. *Toucan Protocol* menciptakan token *Base Carbon Tonne* (BCT) melalui *carbon bridge* (jembatan publik) sebagai bentuk agregasi dari TCO2 untuk diperdagangkan di berbagai aplikasi *decentralized finance* (DeFi) dengan ekosistem keuangan kripto seperti QuickSwap dan SushiSwap pada jaringan Polygon (Sorensen, 2023). Proses *bridging* diawali dengan memensiunkan kredit karbon di registri sumber dalam bentuk kumpulan (*batch*) yang direpresentasikan sebagai BatchNFT dengan standar ERC721. BatchNFT ditokenisasi atau difraksionalkan menjadi token *fungible* TCO2 dalam bentuk token referensi karbon seperti *Base Carbon Tonne* (BCT) atau *Nature Carbon Tokens* (NCT) yang dapat dijual di bursa terdesentralisasi sesuai standar token ERC20 atau dapat disimpan dalam *pool*.

Base Carbon Tonnes (BCT) adalah token acuan yang merepresentasikan satu ton karbon dari registri *Verra Verified Carbon Unit* (VCU) untuk kredit tahun 2008 atau setelahnya, yang dijembatani melalui Toucan Protocol. Verra merupakan penerbit utama kredit karbon sukarela, dan setiap VCU yang dicetak dalam registrinya merepresentasikan pengurangan emisi nyata dari suatu proyek yang

telah diukur serta diaudit oleh pihak ketiga independen. Toucan Bridge merupakan mekanisme pertama yang memungkinkan pengguna mana pun untuk menjembatani VCU mereka ke dalam aset kripto, dan karena BCT berbentuk token ERC-20 yang bersifat *fungible*, token ini dapat diintegrasikan secara langsung ke dalam berbagai aplikasi DeFi. BCT menjadi komponen dasar dalam pengembangan ekosistem *regenerative finance* yang terbuka.

BCT adalah *fungible* token karbon yang memiliki keterkaitan langsung dengan kredit karbon dari lembaga registri Verra, memastikan bahwa setiap token merepresentasikan satu kredit karbon (Rodriguez, 2024). Setiap 1 BCT mewakili satu ton CO₂ yang telah di-*offset* melalui berbagai inisiatif mitigasi emisi karbon. Pengguna dapat membeli dan memensiunkan (*retire*) token BCT untuk menetralkan jejak karbon mereka. *Retirement* digunakan untuk mencegah klaim ganda pada unit karbon yang diperdagangkan dan menjaga integritas lingkungan (Hermwille, 2016). Pendekatan ini menciptakan *technological affordance* baru berupa keterbukaan akses dan transparansi verifikasi berbasis *blockchain* (Hutchby, 2001). Oleh karena itu, Toucan Protocol menjadi salah satu model transformasional dalam penguatan tata kelola karbon digital yang transparan, dapat ditelusuri dan diaudit, serta tidak dapat dimanipulasi.

2.6.3.3 MOSS.Earth dan Monetisasi melalui MCO2

MOSS.Earth merupakan proyek dengan mengandalkan konsep tokenisasi untuk memberi insentif kepada produksi *offset* karbon dan pengurangan karbon dalam bentuk token *Moss Carbon Credit* (MCO2) dan proyek NFT berbasis iklim. MOSS tidak mengelola proyek *offset* secara langsung, namun *offset* berkualitas tinggi

berasal dari penyedia lain. MOSS Amazon NFT merupakan inisiatif teknologi dari Brasil yang berasal dari penjualan lahan hutan dengan kepemilikan aktual untuk mendanai pelestarian dan pengawasan hutan. Sedangkan proyek MOSS adalah bagian dari Celo Reserve, mendukung stablecoin berbasis iklim (cUSD, cEUR) yang memonetisasi proyek konservasi dan reboisasi hutan hujan Amazon sebagai salah satu penyerap karbon terbesar di dunia dan berisiko mengalami deforestasi. Hak atas offset pada hutan tersebut didigitalkan dan ditokenisasi dari sistem registri lama (*legacy-ledger*) menjadi token MCO2 sebagai NFT yang dapat diperdagangkan di bursa seperti Coinbase atau melalui platform Uniswap dan QuickSwap pada jaringan Ethereum (Rodriguez, 2024). Token MCO2 dapat digolongkan juga sebagai *fungible token* yang mengikuti standar ERC-20, dan mewakili kepemilikan atas kredit karbon yang belum dipensiunkan, dan saat ini masih disimpan oleh MOSS. Dengan kata lain, satu token MCO2 mewakili satu ton emisi CO₂ ekuivalen yang berhasil dicegah (Sorensen, 2023). Token MCO2 memiliki karakteristik yang sama dengan token BCT yang menggunakan sistem *pooling* dari berbagai sumber proyek karbon. Proses tokenisasi MCO2 dilakukan terpusat oleh MOSS, yang menerbitkan dan mengelola token berdasarkan kredit karbon dalam kustodian (penyimpanan) yang bertanggung jawab terhadap proses verifikasi kredit karbon. Setiap pengguna token tidak berpartisipasi langsung dalam proses tokenisasi, sehingga semua kriteria tentang jenis kredit yang diterima untuk MCO2 ditentukan dan ditegakkan sepenuhnya oleh MOSS. Dengan membakar token MCO2, MOSS mengunci proyek *offset* secara permanen, mengurangi

pasokan *offset* secara keseluruhan di pasar dan meningkatkan harga *offset* yang tersisa.

Pendekatan ini mencerminkan *Digital Environmental Governance Theory* (Lösch & Schneider, 2020), yang menekankan bahwa digitalisasi menciptakan tata kelola lingkungan yang lebih partisipatif dan berbasis data, mendorong transformasi ekonomi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan serta meningkatkan intensitas regulasi lingkungan (Zhao et al., 2024). Dalam kerangka *Nature-Based Financial Instruments Theory* (OECD, 2021), proyek MOSS mengintegrasikan aktivitas lingkungan ke dalam sistem keuangan melalui inovasi tokenisasi. Selain itu, MOSS,Earth mengadopsi prinsip *Democratization of Finance Theory* (Zetsche et al., 2017), dengan membuka akses publik terhadap pasar karbon melalui *blockchain*, serta *Asset Tokenization Theory* (OECD, 2020), yang menjelaskan proses digitalisasi aset untuk mendukung efisiensi dan transparansi dalam perdagangan karbon.

2.7 *Biocrypto* sebagai *Financing Framework* dalam Kredit Karbon

Cryptocurrency adalah mata uang digital atau *e-money* (Hai et al., 2023), berfungsi sebagai sistem perbankan alternatif (Alzahrani, 2019) alat tukar, alat pembayaran, serta penyimpan nilai (kekayaan) yang tidak terikat pada pemerintah atau otoritas pusat. *Cryptocurrencies* disebut sebagai token *blockchain* pertama yang menarik perhatian regulator, karena kenaikan nilainya yang pesat dengan tingkat adopsi yang luas dan menjangkau banyak audiens dari berbagai sektor (Blandin et al et al., 2018; Cryptomus, 2024). *Cryptocurrency* dapat diaplikasikan untuk memfasilitasi perdagangan kredit karbon (Brown et al., 2022) dan pendanaan proyek-proyek

lingkungan (Ngyuen et al., 2021), yang dikenal dengan *crypto carbon credits* (CCC). CCC merupakan integrasi dari teknologi *blockchain* dan *cryptocurrency* untuk mengubah kredit karbon menjadi aset *crypto* dalam bentuk token digital, yang diterbitkan kepada organisasi atau individu yang telah berhasil mengurangi emisi GHGs di pasar desentralisasi dengan sistem *ledger blockchain* (Tan, 2024; Sorensen, 2023; Leonhard, 2017).

Istilah *biocrypto* dalam penelitian ini berasal dari kata *biology* dan *cryptocurrency* sebagai bagian dalam CCC yang berfokus pada aset digital dalam bentuk token yang mewakili kredit karbon dari sumber daya biologis atau *nature-based*, seperti penyerapan karbon oleh hutan, tanaman, atau ekosistem alam lainnya untuk menciptakan nilai ekonomi atau insentif karbon (Venkatesh et al., 2024; Fiegenbaum, 2024; Khanna & Maheshwari, 2023). *Biocrypto* juga sejalan dengan konsep *biodiversity credits* sebagai mekanisme untuk mentransformasikan nilai ekosistem alami menjadi token digital yang dapat diperdagangkan secara transparan (Netke, 2025; Manfrino, 2024; Sorensen, 2023; Saraji et al., 2021). Dengan memanfaatkan *cryptocurrency* sebagai alat tukar dan penyimpanan nilai dari token kredit karbon, konsep *biocrypto* memungkinkan sumber daya biologis penyerap karbon diakui dalam *blockchain* sebagai aset yang dapat diperdagangkan dan diakumulasi secara global.

Pendekatan ini sejalan dengan teori *Ecological Economics* (Costanza et al., 1997) yang menekankan perlunya menginternalisasi nilai lingkungan ke dalam mekanisme pasar. *Technological Affordance Theory* (Hutchby, 2001) memberikan kerangka teoritis mengenai bagaimana teknologi *blockchain* menciptakan peluang

untuk merekayasa ulang insentif pelestarian lingkungan melalui tokenisasi. Di sisi lain, *Token Economy Theory* (Shermin, 2017) menjelaskan bahwa token digital dapat digunakan sebagai instrumen insentif dalam konteks sosial dan ekologis, memperkuat logika ekonomi lingkungan dalam kerangka digital.

2.7.1 *Biocrypto* dan Ekonomi Sirkular Digital

Berdasarkan *Circular Economy Theory* (Ellen MacArthur Foundation, 2015; Stahel, 2016) dan *Digital Sustainability Theory* (George et al., 2020), *biocrypto* menciptakan insentif sirkular berbasis *blockchain*, yang menekankan pada pengurangan limbah dan perpanjangan siklus hidup produk melalui prinsip *reducing* atau *refurbishing*, *reusing*, *recycling*, *remanufacturing* (Bai et al., 2018a; De Jesus et al., 2018; Tura et al., 2019; Zhu, 2018) guna membentuk sistem ekonomi yang restoratif dan regeneratif. Pelacakan, penelusuran, dan responsivitas rantai pasok dapat didukung melalui praktik ekonomi sirkular yang didukung oleh teknologi *blockchain* (Nadin et al., 2021), meskipun penerapannya masih terbatas pada tahap uji coba (*pilot study stage*) dan belum mencapai implementasi penuh di sektor industri (Kouhizadeh et al., 2019). Pendekatan ini diintegrasikan dengan teknologi *Internet of Things* (IoT), dan citra satelit, sehingga membentuk siklus nilai moneter yang berkelanjutan, otomatis, dan berbasis data (Geissdoerfer et al., 2017).

Biocrypto dirancang untuk menciptakan *closed-loop incentive mechanisms* (Nowostawski & Williams, 2021), yaitu emisi karbon digunakan kembali (Korhonen et al., 2018) dalam bentuk token digital untuk mendorong tindakan ekologis berulang sesuai dengan kerangka *digital environmentalism* (Goodman,

2020), serta memberikan keuntungan dalam manajemen portfolio dengan memanfaatkan sumber daya dan material yang dibebaskan ke dalam siklus produksi baru dalam program keberlanjutan, sehingga memperkuat prinsip ekonomi sirkular dan meningkatkan nilai tambah perusahaan (Bai et al., 2018b). Desain token *biocrypto* memanfaatkan prinsip *token engineering theory* (Zargham et al., 2020), yang memadukan *mechanism design* (Buterin, 2017) dan *game-theoretical frameworks* (Fudenberg & Tirole, 1991) untuk menciptakan ekosistem berbasis insentif yang mendorong kooperasi dan keberlanjutan. Pendekatan ini juga mencerminkan *regenerative economics* (Fullerton, 2015), yang menekankan pentingnya penciptaan nilai ekonomi yang selaras dengan pemulihan sosial dan ekologis. Dengan demikian, *biocrypto* bukan hanya sebagai sebuah instrumen digital, melainkan infrastruktur pasar yang menggabungkan keberlanjutan, desentralisasi, dan transparansi dalam satu kerangka ekonomi sirkular digital.

2.7.2 Mekanisme Kerja dan Teknologi Pendukung *Biocrypto*

Mekanisme kerja *biocrypto* didasarkan pada proses tokenisasi manfaat lingkungan yang diverifikasi melalui teknologi tinggi seperti sensor IoT dan *blockchain* berbasis protokol MRV. Proses ini mencerminkan integrasi antara sistem fisik dan digital sebagaimana dijelaskan oleh *Digital Twin Theory* (Grieves & Vickers, 2017), di mana lingkungan fisik direpresentasikan secara *real-time* melalui data digital yang dinamis. *Socio-Technical Systems Theory* (Bostrom, 2006) memberikan landasan bahwa keberhasilan verifikasi digital tidak hanya bergantung pada kecanggihan teknologi, tetapi juga pada dukungan kelembagaan dan kepercayaan sosial. Pendekatan *Data-Driven Environmental Governance* (Gupta et al., 2020)

menunjukkan bahwa teknologi dapat memperkuat akuntabilitas dan transparansi dalam pengelolaan lingkungan berbasis bukti. Sementara itu, *Blockchain Governance Theory* (Zwitter et al., 2018) menekankan peran *blockchain* dalam menciptakan sistem tata kelola yang terdesentralisasi dan dapat diaudit, yang sangat penting untuk menjamin integritas token berbasis jasa ekosistem.

2.7.3 Verifikasi Digital dalam Sistem *Biocrypto*

Sistem verifikasi digital dalam *biocrypto* berevolusi menuju logika *algorithmic governance* (Aneesh, 2006), di mana validasi atas klaim lingkungan dilakukan secara otomatis melalui *smart contracts* yang terprogram untuk menilai data berbasis parameter objektif. Teknologi seperti sensor IoT, citra satelit, dan *remote sensing* menyediakan data *real-time* yang kemudian diproses melalui blockchain, sehingga menciptakan sistem verifikasi yang selaras dengan prinsip *Data-Driven Environmental Governance* (Gupta et al., 2020). Verifikasi ini tidak hanya mempercepat proses sertifikasi, tetapi juga memungkinkan *real-time auditing* (Kokina et al., 2017), yang memperkuat integritas pasar karbon dengan mendeteksi anomali atau klaim palsu secara instan. Untuk menjamin privasi data, teknologi *Zero-Knowledge Proofs* diimplementasikan sesuai kerangka *Privacy-Preserving Data Governance* (Zyskind et al., 2015), memastikan transparansi audit tanpa membuka informasi sensitif. Dengan memadukan prinsip *Cybernetic Regulation Theory* (Ashby, 1956), *Sociotechnical Systems Theory* (Trist & Emery, 1973), dan *Blockchain Governance* (Zwitter et al., 2018), sistem verifikasi digital dalam *biocrypto* tidak hanya membangun kepercayaan publik, tetapi juga memfasilitasi ekosistem desentralistik yang resilien terhadap manipulasi data dan *greenwashing*.

2.7.4 Studi Kasus Inovasi *Biocrypto*

Implementasi *biocrypto* dalam VCMs menggabungkan teknologi blockchain dengan prinsip-prinsip keberlanjutan, memperkenalkan konsep baru dalam tokenisasi sebagai metode untuk memfasilitasi pembayaran berbasis ekosistem. Tokenisasi seperti yang diterapkan dalam SEED Token, Nori Token, dan EverGreen Coin (EGC) telah mengubah cara pelaporan, verifikasi, dan penghargaan atas upaya konservasi, dengan menggunakan mekanisme berbasis data yang memastikan transparansi dan akuntabilitas. Dalam kerangka *Environmental Finance Theory* (Barker et al., 2022), inovasi ini mengarah pada pembentukan pasar karbon yang lebih efisien, yang mempertemukan insentif ekonomi dan hasil lingkungan yang terukur. Penerapan teori *Impact Investing* (Jackson & Harji, 2012) pada proyek-proyek ini mencerminkan transisi dari investasi berbasis profit semata menjadi investasi yang mengutamakan dampak sosial dan ekologis. Penggunaan blockchain untuk verifikasi dan akuntabilitas sejalan dengan teori *Environmental Governance* (Meadowcroft, 2007), yang menekankan pentingnya mekanisme tata kelola yang terbuka dan transparan untuk keberlanjutan jangka panjang.

1. SEED Token

SEED Token memanfaatkan teknologi *blockchain* untuk mendigitalisasi dan mentransformasikan skema *Payment for Ecosystem Services* (PES) dalam proyek reforestasi dan agroforestri. Berdasarkan teori *Natural Capital Accounting* (Obst, 2015), token ini mengubah sumber daya alam yang dilindungi menjadi aset yang terukur dan dapat diperdagangkan, meningkatkan transparansi dalam transaksi terkait keberlanjutan. SEED Token juga

merefleksikan prinsip-prinsip dari *Environmental Finance Theory* (Barker et al., 2022), sebagai instrumen keuangan berbasis alam yang menghubungkan pembiayaan dengan hasil ekologis yang terukur dan diverifikasi. Dalam konteks ini, SEED Token dapat dilihat sebagai contoh implementasi dari teori *Impact Investing* (Jackson & Harji, 2012), yang mendukung proyek yang tidak hanya memberikan keuntungan finansial, tetapi juga menghasilkan dampak sosial dan lingkungan yang terukur. Proyek ini juga sejalan dengan teori *Internet of Nature* (Franco et al., 2021), yang mendalami penggunaan teknologi digital untuk pemantauan dan pelaporan hasil lingkungan secara *real-time*.

2. Nori Token

Nori Token mengimplementasikan pendekatan *Result-Based Finance* (RBF) yang menghubungkan pembiayaan langsung dengan hasil aktual pengurangan emisi karbon melalui praktik pertanian regeneratif. Dari perspektif teori *Carbon Removal Economics* (Griscom et al., 2017), Nori Token berfungsi sebagai alat dalam menciptakan mekanisme pasar untuk penghilangan karbon yang lebih terukur dan transparan. Proyek ini juga mengadopsi prinsip *Behavioral Environmental Economics* (Shogren & Taylor, 2008), di mana pemberian insentif mendorong perubahan perilaku yang lebih efektif. Implementasi teknologi *blockchain* dalam verifikasi pengurangan karbon sesuai dengan teori *Blockchain for Climate Governance* (Schletz et al., 2022), yang menunjukkan bahwa teknologi ini dapat menciptakan mekanisme kepercayaan yang lebih independen dan terverifikasi dalam pengelolaan data iklim dan pembiayaan karbon.

3. *EverGreen Coin*

EverGreen Coin (EGC) mengadopsi model insentif berbasis token untuk mendukung pelestarian biodiversitas dan restorasi ekosistem dengan melibatkan komunitas lokal. Melalui pendekatan *Community-Based Environmental Management* (Pretty, 2003), EGC memberikan peran sentral kepada masyarakat dalam pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan. Dengan mengintegrasikan prinsip *Commons Governance* (Ostrom, 1990), EGC menunjukkan bahwa pengelolaan sumber daya alam yang dikelola oleh komunitas lokal dapat dilakukan dengan efektif apabila didukung oleh insentif yang tepat dan aturan yang jelas. EGC juga sejalan dengan *Social-Ecological Systems Theory* (Folke et al., 2005), yang menganggap keberlanjutan sebagai hasil dari interaksi kompleks antara sistem sosial dan ekologi. Proyek ini juga mencerminkan desain token yang mendukung keberlanjutan melalui *Sustainable Token Design Framework* (Nowostawski & Williams, 2021), yang mengutamakan keseimbangan antara keberlanjutan sosial, ekologis, dan ekonomi.

2.7.5 Adopsi *Biocrypto*

Adopsi *biocrypto* dalam perdagangan kredit karbon dilakukan berdasarkan faktor makroekonomi seperti kapitalisasi pasar (*market capitalization*) sebagai ukuran nilai total dari token kredit karbon digital yang beredar, jumlah atau frekuensi transaksi (*transfer amount*) yang mencerminkan tingkat aktivitas dan likuiditas token kredit karbon tersebut dalam ekosistem *blockchain* serta *wallet* aktif (*active*

wallet addresses) sebagai representasi jumlah pengguna atau entitas yang berinteraksi dengan token.

2.7.5.1 *Market Capitalization*

Market Capitalization (Marketcap) merupakan salah satu indikator dalam *cryptocurrencies* (Ani, 2024). Metrik ini digunakan untuk menilai ukuran relatif, likuiditas pasar, serta tingkat kepercayaan investor terhadap suatu aset, seperti token karbon dalam perdagangan karbon digital. Menurut Taylor (2024), kapitalisasi pasar sangat penting untuk diukur atau dipertimbangkan di pasar keuangan karena memberikan ringkasan cepat tentang ukuran perusahaan dan nilai keseluruhan yang diberikan oleh pemegang saham. Selain itu, Pantelidis et al (2024) mengusulkan penggunaan rasio *Total Value Locked (TVL)* terhadap *marketcap* (T/M ratio) sebagai indikator untuk mengevaluasi performa dan efisiensi aset DeFi. *Marketcap* dihitung dengan mengalikan harga terkini dari sebuah token dengan jumlah total koin atau token yang beredar di pasar. Menurut Wu et al. (2018), *marketcap* pada aset digital seperti koin dan token mengikuti pola distribusi *power-law*, di mana sejumlah kecil aset memiliki *marketcap* yang sangat besar. Semakin tinggi *marketcap*, maka semakin besar nilai pasar dari aset digital tersebut, yang menunjukkan stabilitas harga dan adopsi jangka panjang. Dalam konteks aset digital seperti *cryptocurrency* dan NFT, *marketcap* bukan hanya mencerminkan nilai total dari token yang telah dicetak (*mined*) atau beredar (*in supply*) berdasarkan persepsi pasar terhadap nilainya pada saat tertentu, tetapi juga berfungsi sebagai indikator dominasi dan popularitas dari aset tersebut di pasar kripto (Ani, 2024).

2.7.5.2 Frekuensi Perdagangan

Transfer amount atau *number of trades* merujuk pada frekuensi perdagangan atau transaksi (Chordia, 2001) pada jaringan *blockchain*. Menurut Sidanti et al. (2021), frekuensi perdagangan merupakan sebuah gambaran yang menunjukkan berapa banyak peristiwa transaksi jual beli, dalam hal ini token kredit karbon, yang terjadi pada periode waktu tertentu, sehingga memberikan informasi berkaitan dengan jumlah token dan nilai transaksi atas token yang diperdagangkan. Frekuensi berkorelasi positif dengan jumlah pemegang saham (*holders* atau *wallet* aktif), sehingga frekuensi menunjukkan aktif atau tidaknya saham emitmen dalam perdagangan pasar (Niawaradila et al., 2021). Selain itu, Frekuensi perdagangan juga menjadi indikator reaksi pasar alam menanggapi berita pasar modal (Ainindya et al, 2023). Frekuensi perdagangan yang tinggi mencerminkan intensitas transaksi dan minat investor terhadap suatu saham, yang secara teoritis dan empiris diasosiasikan dengan peningkatan likuiditas pasar.

Frekuensi transaksi digunakan untuk menilai tingkat adopsi suatu aset kripto karena mencerminkan intensitas aktivitas pasar. konsep perdagangan frekuensi tinggi (*High-Frequency Trading* (HFT) merupakan strategi investasi di mana saham dibeli dan dijual dalam waktu yang sangat singkat oleh algoritma komputer, yang dalam kondisi ekstrem aktivitas intraday berlangsung dalam hitungan mikrodetik (O'Hara et al., 2019). HFT ditandai dengan volume perdagangan yang sangat tinggi dan tingkat *return* yang relatif rendah, namun memberikan stabilitas secara keseluruhan. Strategi HFT menurut O'Hara (2015) dan Rojcek et al. (2016) dilakukan untuk memperoleh keuntungan dari perubahan pasar jangka pendek,

yang mampu meningkatkan kualitas pasar, mempersempit *spread*, meningkatkan kedalaman pasar, dan memperkuat proses penemuan harga.

Menurut Chu et al. (2020), strategi momentum dalam perdagangan frekuensi tinggi dapat diterapkan secara efektif pada aset digital yang memiliki volume transaksi tinggi. Semakin sering token diperdagangkan dalam jaringan *blockchain*, maka semakin tinggi keterlibatan pasar yang mencerminkan kepercayaan dan utilisasi token dalam ekosistem digital. Selain itu, *cryptocurrency* pada level frekuensi tinggi juga digunakan untuk mengevaluasi efisiensi pasar dan likuiditas (Zhang et al., 2019). Loporchio et al. (2024) juga menjelaskan bahwa analisis pola jaringan transfer token, baik untuk NFT maupun token fungible seperti ERC-20, dapat memberikan gambaran adopsi pengguna dan distribusi kepemilikan token. Oleh karena itu, dalam adopsi biocrypto, *transfer amount* atau frekuensi transaksi dapat digunakan sebagai indikator kualitas pasar dan representasi kuantitatif dari partisipasi pengguna dan likuiditas aset di jaringan.

2.7.5.3 *Wallet* Aktif

Crypto wallet merupakan komponen fundamental dalam ekosistem *blockchain* yang berfungsi sebagai antarmuka antara pengguna dan jaringan *blockchain* dalam pengelolaan aset digital. Berbeda dengan dompet konvensional yang menyimpan uang secara fisik, *crypto wallet* tidak menyimpan aset secara langsung, melainkan menyimpan kredensial kriptografis berupa *public key* dan *private key* yang memungkinkan pengguna mengakses dan mengendalikan kepemilikan aset di dalam *blockchain*.

Dalam jaringan Ethereum, aset kripto asli (*native asset*) yang digunakan untuk membayar biaya transaksi dan menjalankan *smartcontract* adalah Ether (ETH). Seluruh aktivitas transaksi di jaringan Ethereum memerlukan ETH sebagai *gas fee*. Sedangkan, pada jaringan Polygon, aset kripto asli yang berfungsi sebagai *native token* adalah MATIC, yang digunakan untuk membayar biaya transaksi, mengeksekusi *smartcontract*, dan mengamankan jaringan Polygon melalui mekanisme konsensusnya. Seluruh aset ETH, MATIC, serta token berbasis ERC-20 dan ERC-721 secara permanen tercatat di dalam *ledger* terdistribusi, sedangkan *wallet* berperan sebagai sarana untuk mengirim instruksi transaksi kepada jaringan (*on-chain*).

Kepemilikan aset digital direpresentasikan melalui alamat publik (*public address*) yang unik dan berbeda bagi setiap pengguna dan digunakan sebagai tujuan penerimaan aset. Akses dan otorisasi atas alamat tersebut dijamin oleh *private key* yang berfungsi sebagai bukti kepemilikan dan mekanisme autentikasi transaksi. Oleh karena itu, keamanan *wallet* sangat bergantung pada pengelolaan *private key*, sehingga kehilangan atau kebocoran *private key* dapat mengakibatkan hilangnya kendali atas aset secara permanen.

Berdasarkan tingkat keterhubungannya dengan internet, *crypto wallet* secara diklasifikasikan menjadi *hot wallet* dan *cold wallet* (Amir, 2023). *Hot wallet* merupakan *wallet* yang terhubung secara daring dan menawarkan kemudahan akses serta fleksibilitas tinggi dalam melakukan transaksi, namun memiliki tingkat risiko keamanan yang lebih besar. Sebaliknya, *cold wallet* menyimpan kredensial kriptografis secara luring sehingga memberikan perlindungan yang lebih kuat

terhadap risiko peretasan, dan umumnya digunakan untuk penyimpanan aset dalam jangka panjang.

Selain itu, *wallet* juga dapat dibedakan berdasarkan bentuk dan medium penggunaannya, seperti *mobile wallet*, *desktop wallet*, *web wallet*, *paper wallet*, dan *hardware wallet* (Amir, 2023).

1. *Mobile Wallet (Hot)* merupakan aplikasi *wallet* di smartphone dengan fitur sederhana.
2. *Desktop Wallet (Hot)* adalah *wallet* di komputer yang umumnya memiliki fitur lebih lengkap.
3. *Web Wallet (Hot)* merupakan *wallet* berbasis web yang dapat diakses melalui browser.
4. *Paper Wallet (Cold)* merupakan penyimpanan *public* dan *private key* yang dicetak pada kertas.
5. *Hardware Wallet (Cold)* merupakan perangkat fisik khusus dengan tingkat keamanan tinggi, termasuk PIN dan *two-factor authentication* (2FA) atau autentikasi dua faktor.

Perbedaan jenis *wallet* mencerminkan *trade-off* antara kemudahan penggunaan dan tingkat keamanan. Dalam konteks penelitian *market microstructure* berbasis *blockchain*, jumlah dan aktivitas *wallet* dapat digunakan sebagai indikator partisipasi pasar dan tingkat adopsi jaringan, meskipun tidak seluruh aktivitas *wallet* secara langsung berkontribusi terhadap perdagangan atau pembentukan harga.

Active Wallet Addresses atau *wallet* aktif merupakan jumlah dompet *blockchain* atau pengguna aktif yang berpartisipasi dalam pasar NFT (baik sebagai penjual maupun pembeli), yang digunakan sebagai indikator untuk mengukur tingkat adopsi, keterlibatan pengguna dalam ekosistem aset digital (Ante, 2021) dan membuktikan kepemilikan aset menggunakan *blockchain* (Alizadeh et al., 2023; Çamalan et al., 2024; Westland, 2023). Semakin banyak *wallet* yang terlibat dalam transaksi, maka semakin luas distribusi dan adopsi dari token tersebut di *blockchain*. Hal ini sejalan dengan *Art. 94 GDPR – Repeal of Directive 95/46/EC - General Data Protection Regulation (GDPR) (n.d.)*, yang menekankan bahwa sifat desentralisasi pada *blockchain* bertujuan untuk menggantikan satu aktor terpusat dengan banyak peserta. Pemilik token dapat melakukan perdagangan token miliknya sendiri secara transparan namun “anonim” (Ansalami, 2019; Michalski, 2020) menggunakan *alphanumeric public address* (seperti 0x872...) (Baruch et al., 2022), dengan cara mentransfer token tersebut antara dua alamat *wallet* yang berbeda di jaringan *blockchain* publik. Setiap kali transaksi fungibel token dilakukan menggunakan standar ERC-20, *smart contract* memuat *event* (Loporchio, 2024). *Event* merupakan informasi historis transaksi yang memungkinkan pelacakan transfer token secara publik dan transparan melalui eksplorasi data *on-chain*. Setiap transaksi token menghasilkan catatan tentang pengirim, penerima, dan jumlah token, sehingga memungkinkan pengukuran volume dan frekuensi transaksi yang digunakan untuk menilai tingkat adopsi dan aktivitas pasar, menyusun graf transaksi (*transfer graphs*), mendeteksi perilaku adopsi pengguna, dan menganalisis likuiditas token di pasar (Chen et al., 2020;

Josenhans et al., 2025). Setelah pembayaran berhasil dilakukan dan penandatanganan memorandum penawaran secara digital, investor secara otomatis menerima token ke dalam *wallet* melalui *smart contract* (Kreppmeier, 2023).

Anonimitas merujuk pada *pseudonymous* yang berarti bahwa riwayat setiap transaksi dicatat dan dilihat secara publik, namun identitas pengirim dan penerima disembunyikan atau disamarkan (Gardhouse, 2024; Sankar et al., 2017; Uripe et al., 2020; Xu et al., 2016) melalui alamat dompet (*wallet address*) dalam bentuk nomor digital, sehingga tidak ada yang mengetahui siapa yang mengirim atau menerima uang kecuali ada klaim transaksi (Alzahrani, 2019). Identitas pengirim atau penerima suatu transaksi hanya dapat diketahui ketika salah satu *wallet* mencairkan dana dengan mengirimkan aset kripto ke situs penukaran (*exchange*), lalu mentransfernya ke rekening bank. Penggunaan “anonim” dalam transaksi seringkali menyebabkan praktik *wash trading* atau *money laundering*, yaitu permintaan terhadap aset dapat disimulasikan, dipalsukan, atau dilebih-lebihkan dengan tujuan untuk menarik minat investor. Dengan *blockchain*, semua transaksi yang valid dan sah dicatat ke dalam sebuah blok (Glaser, 2017; Zheng et al., 2017), yang berisi tanda tangan digital dan penanda waktu (*digital signature and timestamp*) (Kokina et al., 2017) serta mencantumkan referensi (*hash*) ke blok sebelumnya, sehingga setiap upaya untuk memanipulasi urutan atau isi transaksi masa lalu akan langsung menghasilkan ketidaksesuaian yang nyata dalam rantai blok karena penggunaan kode algoritma (Angelis et al., 2019; De Fillipi, 2016; Harris et al., 2019; Kavanagh et al., 2020; McGurk et al., 2024; Nakamoto, 2008; Tripathi et al., 2023). *Hashing* adalah proses penciptaan jejak digital dari segala

jenis informasi yang dibagikan dalam transaksi untuk memverifikasi keaslian transaksi (Zwitter et al., 2020). *Hash* sebagai pengenalan, bukan penyimpanan salinan file sebenarnya yang ditautkan dengan token tertentu dan kemudian dicatat ke dalam *blockchain*, dengan tujuan untuk menghemat konsumsi gas saat melakukan pencatatan data ke dalam jaringan *blockchain* (Wang et al., 2021). Oleh karena itu, *wallet* tidak hanya mencerminkan tingkat partisipasi pengguna aktif, tetapi dapat menjadi indikator validitas dan integritas aktivitas pasar.

2.8 *On-chain Trading* pada VCMs

Transaksi dalam jaringan *blockchain* merujuk pada tindakan pemindahan aset digital dari satu alamat ke alamat lain yang diinisiasi melalui *wallet* pengguna. Pada jaringan Ethereum, transaksi melibatkan pemindahan aset berbasis Ethereum, baik berupa aset native Ether (ETH) maupun token berbasis standar ERC. Sedangkan pada jaringan Polygon transaksi mencakup pemindahan aset berbasis Polygon, termasuk token native MATIC dan token ERC-20 atau ERC-721 yang berjalan di atas jaringan tersebut. Seluruh transaksi direkam secara permanen dalam *ledger* terdistribusi dan dieksekusi melalui mekanisme konsensus jaringan, sehingga menjamin transparansi, keterlacakan, dan finalitas transaksi. Dalam analisis *market microstructure* berbasis *blockchain*, transaksi merepresentasikan unit observasi fundamental yang mencerminkan aktivitas ekonomi, aliran order, dan dinamika likuiditas pada pasar DEX.

2.8.1 Aktivitas Transaksi dalam *Blockchain* Ethereum dan Polygon

Dalam jaringan *blockchain* Ethereum dan Polygon, transaksi secara teknis diklasifikasikan ke dalam tiga jenis utama berdasarkan mekanisme eksekusinya,

yaitu *normal transactions*, *internal transactions*, dan *token transfers* (Amir, 023; Lee, 2025). Klasifikasi ini bersifat teknis dan digunakan oleh *blockchain explorer* seperti Etherscan dan Polygonscan untuk merekam serta menampilkan aktivitas *on-chain*.

Normal transaction merupakan bentuk transaksi paling dasar, yaitu sebuah *externally owned address* (EOA), yang umumnya direpresentasikan sebagai alamat *wallet* pengguna, mengirimkan aset *crypto native* secara langsung ke EOA lain. Pada jaringan Ethereum, aset native yang digunakan adalah Ether (ETH), sedangkan pada jaringan Polygon adalah MATIC. Jenis transaksi ini tidak melibatkan eksekusi *smartcontract* dan digunakan untuk transfer nilai langsung antar pengguna atau pembayaran biaya transaksi (*gas fee*). *Normal transaction* dicatat pada tab *Transactions* di Etherscan dan Polygonscan dan mencerminkan perpindahan nilai yang bersifat eksplisit dan mudah diidentifikasi.

Internal transaction merujuk pada perpindahan aset native yang terjadi sebagai konsekuensi dari eksekusi *smartcontract*. Berbeda dengan *normal transaction*, *internal transaction* tidak diinisiasi secara langsung oleh *wallet* pengguna, melainkan dihasilkan secara internal selama pemanggilan fungsi kontrak pintar. Aktivitas ini lazim ditemukan dalam interaksi dengan protokol decentralized finance (DeFi), seperti perdagangan di DEX, *bridging* lintas *blockchain*, atau mekanisme *treasury* protokol. *Internal transaction* dicatat secara terpisah oleh *blockchain explorer* pada tab *Internal Transactions* dan berperan penting dalam mengungkap aliran nilai yang tidak terlihat secara langsung dari transaksi utama.

Token transfer mencakup seluruh transaksi yang melibatkan token *non-native* yang mengikuti standar tertentu, seperti ERC-20 untuk *fungible token* dan ERC-721 untuk *non-fungible token*. Dalam konteks jaringan Ethereum dan Polygon, sebagian besar aktivitas ekonomi yang melibatkan aset kripto selain ETH dan MATIC tercatat sebagai ERC-20 Token Txns dan ERC-721 Token Txns tab. Perdagangan token karbon berbasis *blockchain*, seperti \$KLIMA, BCT, dan MCO2, sepenuhnya tercermin dalam transaksi ERC-20 token transfer, karena token diperdagangkan di DEX, disediakan sebagai likuiditas, dipindahkan antar *wallet*, maupun dikeluarkan dari sirkulasi melalui mekanisme *burning* dan *retirement*.

Meskipun token transfer menyediakan informasi terperinci mengenai perpindahan token, klasifikasi ini bersifat teknis dan tidak membedakan fungsi ekonomi yang mendasari transaksi tersebut. Satu transaksi ERC-20 dapat merepresentasikan berbagai aktivitas ekonomi yang berbeda, termasuk perdagangan spot, arbitrase, penyediaan likuiditas, atau aktivitas non-perdagangan. Oleh karena itu, dalam analisis *market microstructure* berbasis *blockchain*, diperlukan pemetaan dan klasifikasi jenis *token transfer* untuk mengidentifikasi transaksi yang berkontribusi langsung terhadap pembentukan harga, likuiditas, dan dinamika perdagangan serta mengukur variabel mikrostruktur pasar seperti volume perdagangan, intensitas transaksi, dan partisipasi *wallet* aktif pada token karbon \$KLIMA, BCT, dan MCO2.

2.8.1.1 *Token Transfer (Buy- Sell)*

2.8.1.2 *Carbon Swaps sebagai alternatif Financial Derivatives*

Derivatif atas produk VCMs, token kredit karbon, membutuhkan waktu lebih lama untuk berkembang dibandingkan dengan CCMs, yang memungkinkan satu entitas pusat (bursa) menerbitkan instrumen kepatuhan melalui proses lelang atau alokasi, VCMs bergantung pada proyek-proyek karbon yang disertifikasi oleh lembaga registri. Setelah disertifikasi, kredit *offset* karbon tersebut dapat diperdagangkan secara bebas, namun memiliki karakteristik unik yang ditentukan oleh jenis proyek, lokasi geografis, tahun penerbitan (*vintage year*), lembaga sertifikasi, proses sertifikasi, serta *co-benefits* (Spilker & Nugent, 2022). Keragaman karakteristik ini membuat proses standarisasi menjadi semakin menantang, yang tercermin dalam penyebaran harga yang sangat bervariasi di VCMs (Bose et al., 2021). Berdasarkan hak emisi karbon atau jenis kontrak pembayaran (*contract payment flows*), instrumen keuangan derivatif karbon (*carbon finance derivatives*) dibagi menjadi 3 jenis, meliputi *carbon credit options*, *carbon credit futures*, dan *carbon credit swaps* (Cheng, 2022; Daskalakis et al., 2009; EY, 2023; ISDA, 2021a; Tang, 2023). Derivatif karbon memiliki kompleksitas yang cukup tinggi dimana nilai aset dasarnya atau harga izin emisi karbon menentukan karakteristik utama dari instrumen keuangan dan mengandung risiko yang sulit untuk diprediksi maupun dihindari, yang terdiri dari risiko pasar, risiko kredit, dan risiko operasional. Meskipun bentuk spesifik dari masing-masing derivatif ini berbeda, semuanya memiliki fungsi dasar yang serupa, yaitu sebagai instrumen keuangan kredit karbon (ISDA, 2021a), perlindungan terhadap risiko fluktuasi harga (*hedging*) (Eagle,

2020; Ostrovnaya et al., 2023 ; Sakti et al., 2016; Uluyol, 2024; Varsani, 2022; Welt, 2010) dan penetapan harga (*price discovery*) (CFTC, 2011; Chevallier, 2010; *Commodity Exchange Act*, 7 U.S.C. § 2(a), as amended by Dodd-Frank Act, 2010; Keller et al, 2023; Liu et al., 2021; Spilker et al., 2022; Zhang et al., 2023).

Carbon credit futures (kontrak berjangka) adalah instrumen derivatif dengan kontrak terstandarisasi dalam hal kualitas, kuantitas, waktu, dan lokasi pengiriman (Lannoo et al, 2020) yang mewajibkan transaksi kredit karbon pada harga yang telah ditentukan (*set price*) untuk diselesaikan dengan penyerahan kontrak fisik maupun pembayaran tunai pada tanggal tertentu di masa depan (Varsani et al., 2022), dengan pergerakan harga yang berbeda dari pola komoditas atau aset keuangan tradisional karena lebih dipengaruhi faktor regulasi dan dinamika *supply-demand allowance* emisi dibandingkan faktor makroekonomi seperti *return* (Chevallier, 2009), sehingga data harga bersifat konsisten, terbuka, *prescient* yang meningkatkan transparansi (Spilker et al., 2022), serta memberikan eksposur ekonomi meskipun tidak memiliki dampak nyata secara langsung (Ferenc et al., 2022). *Carbon credit option* (opsi) merupakan instrumen derivatif yang tidak mengikat seperti *future carbon* dan memberikan hak namun tidak memiliki kewajiban bagi pemegangnya untuk membeli (*call option*) atau menjual (*put option*) kredit karbon pada harga tertentu (*strike price*) sebelum tanggal jatuh tempo kontrak yang telah ditentukan, sehingga memberikan fleksibilitas lebih besar karena pemegang dapat memilih untuk mengeksekusi kontrak (*strategic positioning*) jika kondisi pasar menguntungkan, atau membiarkannya kedaluwarsa jika tidak sesuai ekspektasi (EY, 2025; ISDA, 2021a; Lannoo et al., 2020; Ni et al.,

2008). Sedangkan, *carbon credit swap* adalah derivatif OTC yang tidak terstandarisasi dan merupakan perjanjian antara dua pihak atas pertukaran izin atau *offset* kredit karbon pada periode tertentu yang diselesaikan dengan pembayaran tanpa pengiriman fisik (ISDA, 2021a).

Dari ketiga jenis derivatif, *carbon options* dan *carbon futures* merupakan produk standar yang diperdagangkan di bursa secara terpusat seperti CCMs, sehingga bursa berperan dalam meningkatkan likuiditas, menyediakan transparansi harga, serta mengurangi risiko dengan mekanisme kliring (ISDA, 2021; Kamali, 1999). Sedangkan, *carbon swaps* atau *commodity swaps* yang menempatkan kredit karbon sebagai komoditas (Saraji et al., 2021) menawarkan pendekatan yang lebih stabil dan kolaboratif karena didasarkan pada pertukaran nilai karbon yang ekuivalen secara nyata, sehingga lebih mendukung tujuan mitigasi emisi, mengurangi risiko keuangan, serta lebih inklusif bagi proyek-proyek berbasis komunitas dalam VCMs. *Carbon swaps* memungkinkan salah satu pihak untuk menjual sejumlah hak emisi karbon kepada pihak lain dengan harga yang telah ditentukan, sementara pihak lainnya menyetujui untuk membeli hak emisi karbon tersebut. Tujuan utama dari *swaps* ini adalah untuk mentransfer risiko dan mengunci harga beli ataupun harga jual kredit karbon di masa depan. *Swap offset-allowance* memungkinkan perusahaan yang belum mencapai kuota *offset* yang diizinkan untuk menjual izin mereka dan membeli *offset*, sehingga memanfaatkan perbedaan harga dibandingkan perusahaan yang mungkin memiliki lebih banyak *offset* daripada izin dan sudah melebihi kuota mereka. Sejalan dengan temuan Kanamura (2016) perdagangan *carbon swap* berperan penting dalam

mempengaruhi hubungan antara harga dan volatilitas antar pasar karbon, terutama ketika dipengaruhi oleh dinamika harga energi.

Carbon swaps berbeda dengan *Credit Default Swaps* (CDS) yang merupakan instrumen keuangan derivatif *over-the-counter* (OTC) dalam manajemen risiko kredit (Bomm, 2022; IHS Markit, 2021; Simmons, 2019; Tabassum et al., 2023), khususnya risiko gagal bayar (*default*) dari suatu obligasi, yang memungkinkan investor (*Protection Buyer*) untuk menukar atau mengimbangi risiko atau eksposur kredit dengan investor lain (*Protection Seller*) (Baral, 2015; Hayes, 2025), sehingga menyebabkan lebih banyak likuidasi, mengurangi kemungkinan negosiasi ulang utang yang mahal serta mengurangi pembiayaan ekuitas yang mahal (Danis et al., 2018). CDS dapat digunakan untuk spekulasi (Bartram et al., 2022), lindung nilai (Caglio et al, 2016), atau sebagai bentuk arbitrase (Adesoye, 2023).

Carbon swap adalah bentuk *commodity swap* yang didasarkan pada hak emisi karbon, yaitu suatu perjanjian antara dua pihak di mana harga pasar yang bersifat mengambang (*floating price*) ditukar dengan harga tetap (*fixed price*) dalam jangka waktu tertentu (Liu et al., 2024). Melalui mekanisme *carbon swap*, produsen dan konsumen dapat mengunci harga tetap atas hak emisi karbon untuk melindungi diri dari fluktuasi harga di pasar (*hedging*). Penetapan harga *swap* (*pricing swap*) dilakukan sebelum kontrak ditandatangani, dengan tujuan menentukan harga tetap dalam kontrak *swap* dimana nilai awal kontrak adalah nol, sehingga kedua belah pihak akan memperoleh keuntungan yang seimbang. Meskipun nilai *carbon swap* adalah nol pada saat awal peluncuran, fluktuasi harga karbon dapat menyebabkan nilainya menjadi positif atau bahkan negatif setelah periode tersebut. Hal ini dapat

digunakan untuk menentukan nilai pasar dan mendeteksi potensi keuntungan dan kerugian untuk manajemen risiko.

Carbon swaps mencerminkan prinsip *cooperative game theory* (Osborne & Rubinstein, 1994), yaitu situasi permainan strategis, yaitu dua pihak dapat mencapai hasil saling menguntungkan melalui kolaborasi dan pertukaran nilai yang setara, yang sering disebut sebagai *win-win solution*. Sedangkan, instrumen derivatif *carbon options* dan *carbon futures* mencerminkan *zero-sum game*, di mana keuntungan yang diperoleh oleh satu pihak secara langsung menjadi kerugian bagi pihak lainnya (Morris, 1994). Oleh karena itu, *carbon swaps* dianggap lebih sejalan dengan prinsip VCMs yang berorientasi pada nilai lingkungan dan bukan hanya mengutamakan keuntungan finansial.

Penerapan skema *swapping* pada *carbon offset* sesuai dengan *Market Liquidity Theory* (Amihud & Mendelson, 1986; Chordia et al., 2005), yang menekankan bahwa likuiditas pasar yang tinggi memungkinkan pertukaran aset tanpa distorsi harga, sehingga mendukung efisiensi, stabilitas dan fleksibilitas sistem perdagangan melalui protokol desentralisasi yang memungkinkan pertukaran kredit karbon dari berbagai jenis proyek dan lintas platform dengan beragam standar sertifikasi. Meskipun demikian, *Environmental Governance Theory* menekankan pentingnya legitimasi dan akuntabilitas melalui mekanisme verifikasi, regulasi lunak, dan partisipasi multi-pemangku kepentingan (Lemos & Agrawal, 2006). Selain itu, *Matching Theory* menyoroti pentingnya kesesuaian antara preferensi penyedia dan pengguna kredit karbon (Shapley & Roth, 2012), sedangkan *Mechanism Design Theory* menekankan pentingnya sistem yang dapat

mengungkapkan preferensi secara jujur dan mencegah perilaku oportunistik (Maskin, 2008). Dengan demikian, mekanisme *carbon swaps* dapat dioptimalkan dengan mengintegrasikan protokol lintas rantai dan *smart contracts* untuk mencapai efisiensi, transparansi, dan kredibilitas dalam pasar karbon global.

Penerapan skema *swapping* pada *carbon offset* sesuai dengan *Market Liquidity Theory* (Amihud & Mendelson, 1986; Chordia et al., 2005), yang menekankan bahwa likuiditas pasar yang tinggi memungkinkan pertukaran aset tanpa distorsi harga, sehingga mendukung efisiensi, stabilitas dan fleksibilitas sistem perdagangan melalui protokol desentralisasi yang memungkinkan pertukaran kredit karbon dari berbagai jenis proyek dan lintas platform dengan beragam standar sertifikasi. Meskipun demikian, *Environmental Governance Theory* menekankan pentingnya legitimasi dan akuntabilitas melalui mekanisme verifikasi, regulasi lunak, dan partisipasi multi-pemangku kepentingan (Lemos & Agrawal, 2006). Selain itu, *Matching Theory* menyoroti pentingnya kesesuaian antara preferensi penyedia dan pengguna kredit karbon (Shapley & Roth, 2012), sedangkan *Mechanism Design Theory* menekankan pentingnya sistem yang dapat mengungkapkan preferensi secara jujur dan mencegah perilaku oportunistik (Maskin, 2008). Dengan demikian, mekanisme *carbon swaps* dapat dioptimalkan dengan mengintegrasikan protokol lintas rantai dan *smart contracts* untuk mencapai efisiensi, transparansi, dan kredibilitas dalam pasar karbon global.

Mekanisme *swaps* tidak hanya terbatas pada transfer aset kripto, namun dapat diadaptasi untuk *tokenized credit carbon* yang memungkinkan pertukaran aset kredit karbon dari berbagai proyek mitigasi iklim serta antar platform secara

otomatis dan transparan berdasarkan parameter terstandarisasi seperti nilai emisi ekuivalen dan *co-benefits* tanpa memerlukan transaksi moneter langsung sehingga meningkatkan likuiditas (Schneider et al., 2015; Köhler & Pizzol, 2021).

2.8.2 Integrasi *Bridge Blockchain (Cross-chain Transfer)*

Bridging merupakan mekanisme pemindahan token karbon dari *sidechain* dan *main chain* (Kannengießer et al., 2020; Notland, Nowostawski, & Haro, 2025), seperti dari Ethereum ke Polygon atau sebaliknya melalui mekanisme *cross-chain bridge* (CCF) (Abebe et al., 2023; Lee et al., 2023) sebagai infrastruktur penghubung antar jaringan *blockchain*, sehingga token pada jaringan asal dikunci (*lock*) atau dibakar (*burn*) dan representasi token yang setara dicetak (*mint*) atau dilepaskan (*unlock*) pada jaringan tujuan (Zamyatin, 2021). Dalam ekosistem *blockchain*, *bridging* berfungsi untuk meningkatkan interoperabilitas antar jaringan yang sebelumnya terisolasi (Zou et al., 2025)⁷, sehingga memungkinkan aset yang sama untuk diperdagangkan dan dimanfaatkan di berbagai ekosistem DeFi dengan karakteristik likuiditas, biaya transaksi, dan mekanisme perdagangan yang berbeda (Kate et al., 2025; Li et al., 2025; Schär, 2021). *Locking* dilakukan melalui *smartcontract* yang mengunci token asli di *blockchain* asal atau dibakar pada *side chain* sebelum dibuka atau secara simultan mencetak representasi token baru di *blockchain* tujuan (Notland, Nowostawski, & Haro, 2025). Proses ini melibatkan token sintetis yang merepresentasikan hak pemilik untuk menebus (*redeem*) token asli. Aktivitas ini memungkinkan akses terhadap *venue* perdagangan yang berbeda, sehingga dapat menyebabkan fragmentasi likuiditas antar jaringan.

Proses *bridging* kredit karbon dimulai dari registri tradisional *off-chain*, seperti Verra, kredit karbon diverifikasi dan disertifikasi. Melalui protokol Toucan, kredit tersebut ditokenisasi menjadi TCO2 yang mewakili satu ton CO₂e, sehingga dapat diakses di *blockchain*. Selanjutnya, TCO2 dikonsolidasikan dalam *pool* likuiditas dan dikonversi menjadi BCT sebagai bentuk standar token karbon di jaringan Polygon, yang berfungsi sebagai aset dasar dalam ekosistem perdagangan karbon digital. BCT kemudian dapat digunakan dalam mekanisme bonding di KlimaDAO, di mana pengguna menukar BCT dengan token \$KLIMA. Token BCT yang masuk akan disimpan di treasury KlimaDAO, sehingga setiap \$KLIMA didukung oleh aset karbon nyata. Dengan demikian, proses bridging dari off-chain hingga bonding tidak hanya mentransfer aset ke blockchain, tetapi juga mengintegrasikan kredit karbon ke dalam sistem tata kelola terdesentralisasi, memperkuat likuiditas pasar, dan mendukung tujuan keberlanjutan melalui pengurangan pasokan karbon yang dapat diperdagangkan.

Terdapat tiga metode utama untuk memfasilitasi transfer lintas rantai (*cross-chain*) berdasarkan dokumentasi Ethereum (Ethereum, 2024; Li.Fi, 2022), sebagai berikut:

- a. *Lock and mint*: Mengunci (*lock*) aset di *source chain* dan mencetak (*mint*) aset di *destination chain*.
- b. *Burn and mint*: Membakar (*burn*) aset di *source chain* dan mencetak aset baru di *destination chain*.
- c. *Atomic swaps*: Menukar aset secara *peer-to-peer* di *source chain* dengan aset di *destination chain* bersama pihak (*wallet*) lain, dengan *Hash Time-Locked*

Contracts (HTLCs) sebagai mekanisme kanonik dan protokol lintas rantai untuk memastikan pertukaran aset berlangsung secara aman tanpa pihak ketiga (Novak, 2023).

Locking on Source Chain merupakan mekanisme penguncian aset digital dalam *smartcontract* di *escrow* sehingga token tidak dapat. Dalam interoperabilitas lintas *blockchain*, *locking* digunakan sebagai mekanisme *cross-chain bridge*, sehingga token pada jaringan asal dikunci untuk mencegah *double spending* dan berbagai serangan keamanan (Lee et al., 2023; Zhang et al., 2023c), yang berdampak pada pencurian aset, pencetakan token palsu, atau manipulasi transaksi lintas *chain*, sebelum token representatif dicetak (*minted*) pada jaringan tujuan (Notland, Nowostawski, & Haro, 2025). Mekanisme ini memastikan konsistensi suplai token lintas jaringan serta menjaga integritas nilai aset yang direpresentasikan. Dalam pasar karbon berbasis *blockchain*, *locking* juga berperan sebagai tahap transisional sebelum proses *minting* token karbon, *bridging*, atau *retirement*, terutama ketika kredit karbon perlu diverifikasi atau ditahan sementara untuk tujuan tata kelola dan akuntabilitas lingkungan. Dari perspektif market microstructure, *locking* secara efektif mengurangi *tradable supply* dalam jangka pendek, sehingga dapat memengaruhi kedalaman pasar (*depth*), tekanan likuiditas, serta dinamika harga token karbon digital pada berbagai venue perdagangan terdesentralisasi (Hasbrouck, 2007).

Minting on Destination Chain dalam pasar karbon berbasis *blockchain* merupakan mekanisme penciptaan token digital yang merepresentasikan kredit karbon yang telah diverifikasi dan di-*bridge* ke jaringan, sehingga menciptakan

token yang dapat diperdagangkan secara *on-chain*. Setelah kredit karbon asli ditokenisasi dari *registry off-chain*, *smartcontract* mencetak token baru di jaringan *blockchain* yang merepresentasikan satu ton ekuivalen karbon dioksida, dengan memasukkan metadata dari register asli ke dalam token *on-chain* untuk memastikan keterkaitan nilai lingkungan dan keaslian proyeknya (Burgoyne & OLexiuk, 2025; Sustainability Directory, 2025). Proses ini memungkinkan token karbon tersebut untuk diperjualbelikan, dipertukarkan, atau dipensiunkan di pasar digital, serta memfasilitasi transparansi dan aksesibilitas perdagangan tanpa perantara tradisional. Dalam perspektif *market microstructure*, mekanisme *minting* secara langsung berkontribusi terhadap suplai *tradable* token, memengaruhi *breadth* pasar dan *depth* likuiditas dengan memperluas jumlah aset yang tersedia bagi pelaku pasar untuk diperdagangkan.

Burning merupakan mekanisme pembakaran atau penghancuran token setelah token digunakan untuk mengklaim *carbon offset (retirement)*, sehingga token dihapus dari peredaran atau sirkulasi pasar secara permanen pada *ledger blockchain*. Menurut penelitian empiris terhadap *blockchain-based carbon credit exchange*, sejumlah besar token karbon yang awalnya dimint telah dibakar (burned) sehingga hanya sebagian kecil yang tersisa untuk diperdagangkan di pasar sekunder (Swinkels, 2024). Di dalam sistem *blockchain*, *burning* tercatat secara transparan dan tidak dapat dibatalkan (*non-reversible*), yang memperkuat sifat *immutable* dari penghapusan token tersebut. Proses ini mempunyai implikasi signifikan terhadap *total circulating supply*, yang berdampak pada pembentukan harga karena berkurangnya pasokan relatif terhadap permintaan, sehingga dapat meningkatkan

kelangkaan aset dan mempengaruhi ekspektasi harga serta berpotensi memengaruhi dimensi likuiditas seperti *tightness* dan *depth* dalam pasar token karbon digital dalam horizon jangka menengah hingga panjang.

Dari perspektif *market microstructure*, aktivitas *bridging* mempengaruhi distribusi *order flow* dan membuka peluang arbitrase lintas *chain*, karena perpindahan aset antar *chain* dapat mengubah kedalaman pasar, volume perdagangan, serta tekanan harga pada masing-masing venue perdagangan, yang pada akhirnya memperkuat fenomena fragmentasi pasar digital (Hasbrouck, 2007). Selain itu, proses *bridging* juga melibatkan biaya transaksi dan risiko tambahan, seperti risiko *smartcontract*, risiko validator, dan potensi kegagalan mekanisme konsensus, yang dapat memengaruhi perilaku *trader* dan *market maker* dalam menentukan lokasi perdagangan *on-chain* yang paling efisien (Harz & Knottenbelt, 2018; Zhang et al., 2019). Oleh karena itu, *bridging* tidak hanya merupakan mekanisme teknis lintas *blockchain*, tetapi juga menjadi faktor struktural yang berperan dalam pembentukan likuiditas, struktur biaya transaksi, dan efisiensi harga dalam pasar aset digital yang terfragmentasi.

2.8.3 Retirement (Carbon Offset)

Retirement merupakan salah satu mekanisme fundamental dalam pasar karbon yang merujuk pada pemensiunan atau proses penghapusan atau kredit karbon dari peredaran pasar secara permanen setelah kredit tersebut digunakan untuk mengimbangi emisi GHGs (Chaudhari et al., 2025; Merlo et al., 2025). Mekanisme *retirement* dalam pasar karbon berbasis *blockchain* dilakukan melalui model *buy and burn*. Token karbon yang telah dibeli dikirim ke alamat

smartcontract yang ditetapkan dan secara permanen dikeluarkan dari peredaran, sehingga memastikan bahwa kredit tersebut tidak dapat diperdagangkan kembali dan mencegah *double spending* serta penipuan (*greenwashing*). Dalam kerangka VCMs, *retirement* berfungsi sebagai tahap akhir dari siklus hidup kredit karbon, yang menegaskan bahwa satu unit kredit karbon hanya dapat digunakan satu kali untuk tujuan *offset* emisi. Dengan demikian, *retirement* berperan penting dalam menjaga kredibilitas lingkungan, mencegah terjadinya *double counting*, serta memastikan integritas klaim pengurangan emisi.

Pada pasar karbon berbasis *blockchain*, *retirement* diwujudkan melalui mekanisme tokenisasi kredit karbon, seperti pada token \$KLIMA, BCT, dan MCO2. Token karbon ini merepresentasikan klaim atas kredit karbon yang telah diverifikasi oleh standar lingkungan tertentu, seperti Verra atau Gold Standard. Proses *retirement* dilakukan ketika pemegang token berinteraksi dengan *smartcontract* khusus yang dirancang untuk mengunci atau membakar (*burn*) token karbon tersebut secara permanen. Setelah token dipensiunkan, token tersebut tidak lagi dapat ditransfer, diperdagangkan, maupun digunakan dalam aktivitas pasar lainnya, sehingga secara efektif mengeluarkannya dari suplai beredar (*circulating supply*).

Kredit karbon yang diterbitkan oleh regulator dari *compliance market* hanya dapat digunakan dalam satu yurisdiksi, namun dalam VCMs, kredit karbon yang dihasilkan di satu negara dapat digunakan untuk mengimbangi emisi perusahaan atau individu di negara lain (Piesse, 2023). Perbedaan yurisdiksi menimbulkan ketidakpastian regulasi dengan mewajibkan persetujuan dari otoritas untuk ekspor

kredit karbon yang berasal dari dalam negeri. Untuk mencatat klaim lingkungan, kredit karbon dipensiunkan melalui sebuah registri dan tidak lagi dapat diperdagangkan. Kombinasi kedua pasar tersebut menciptakan ekosistem perdagangan yang dapat diakses oleh produsen karbon yang dalam operasinya menghasilkan *carbon offsets*. Harga *carbon offset* bervariasi sesuai dengan kualitas proyek. Validator pihak ketiga (registri) menjamin bahwa setiap *carbon offset* berasal dari pengurangan emisi nyata di dunia. Semakin banyak kredit karbon yang berhasil dipensiunkan, semakin sedikit karbon yang masuk ke atmosfer. Mengakhiri proses pensiun mengubah pasar karbon yang bersifat konsumtif menjadi investasi berbasis nilai.

Dari sisi teknis, aktivitas *retirement* dicatat secara transparan dan tidak dapat diubah (*immutable*) di dalam *blockchain*. Setiap transaksi *carbon retirement* menyimpan informasi penting, seperti alamat *wallet* pelaku *retirement*, jumlah token yang dipensiunkan, waktu transaksi, serta referensi *smartcontract* yang digunakan. Pencatatan ini dapat diverifikasi secara publik melalui *block explorer* seperti Etherscan dan Polygonscan, yang meningkatkan akuntabilitas dan transparansi dibandingkan mekanisme *retirement* pada pasar karbon konvensional. Transparansi ini menjadi keunggulan utama pasar karbon berbasis *blockchain* dalam mengurangi asimetri informasi antara pelaku pasar.

Ditinjau dari perspektif *market microstructure*, aktivitas *retirement* memiliki implikasi langsung terhadap likuiditas dan pembentukan harga token karbon. *Retirement* mengurangi jumlah token yang tersedia untuk diperdagangkan di pasar sekunder, sehingga berpotensi memengaruhi keseimbangan antara permintaan dan

penawaran. Penurunan suplai akibat retirement dapat meningkatkan tekanan harga, terutama ketika permintaan terhadap *offset* karbon tetap tinggi atau meningkat. Selain itu, peningkatan frekuensi retirement dapat mengurangi *depth* pasar dalam jangka pendek, yang pada akhirnya dapat memengaruhi *bid-ask spread* dan tingkat *tightness* pasar.

Lebih lanjut, *retirement* juga berperan dalam fungsi *price discovery*. Aktivitas *retirement* mencerminkan permintaan riil terhadap *offset* karbon, bukan hanya terbatas pada aktivitas spekulatif. Oleh karena itu, tingkat *retirement* dapat dipandang sebagai sinyal fundamental yang mencerminkan nilai lingkungan dari token karbon. Dalam pasar karbon digital, spekulasi dan arbitrase sering kali mendominasi volume perdagangan, keberadaan aktivitas *retirement* membantu mengaitkan harga token dengan tujuan lingkungan yang mendasarinya. Dengan demikian, *retirement* tidak hanya merupakan mekanisme lingkungan untuk mengimbangi emisi karbon, tetapi juga menjadi elemen struktural penting dalam pasar karbon berbasis *blockchain*. Aktivitas ini memengaruhi suplai token beredar di pasar DEX, likuiditas, dan proses penemuan harga, serta memperkuat hubungan antara fungsi ekonomi pasar dan tujuan keberlanjutan lingkungan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai retirement menjadi krusial dalam analisis *market microstructure* dan likuiditas token karbon seperti \$KLIMA, BCT, dan MCO₂.

2.8.4 *Treasury Transactions*

Dalam sistem keuangan terdesentralisasi (*decentralized finance* atau DeFi), *treasury* merujuk pada kumpulan aset digital yang dikelola oleh suatu protokol atau organisasi berbasis *blockchain* melalui *smartcontract* atau wallet resmi. *Treasury*

berfungsi sebagai *carbon-backed token* atau *reserve assets* (cadangan aset) sebagai pusat pengelolaan nilai ekonomi protokol dan menjadi instrumen utama dalam menjaga keberlanjutan sistem, baik dari sisi operasional maupun stabilitas pasar, terutama untuk memperoleh karbon digital (KlimaDAO, 2022a). Berbeda dengan kepemilikan token oleh investor ritel, aset yang tersimpan dalam *treasury* tidak selalu bertujuan untuk diperdagangkan secara aktif di pasar sekunder, melainkan dialokasikan untuk tujuan strategis seperti penyediaan likuiditas (*treasury* disebut sebagai aset) untuk pasar *on-chain* melalui likuiditas yang dimiliki protokol, insentif partisipasi, pembiayaan pengembangan, dan stabilisasi harga. Oleh karena itu, keberadaan *treasury* menciptakan pemisahan yang jelas antara *total supply* dan *effective circulating supply*, yang memiliki implikasi penting terhadap dinamika perdagangan *on-chain*.

Dalam perspektif *market microstructure* cadangan *treasury* sebagai bentuk *non-tradable supply* dapat mengurangi jumlah token beredar yang tersedia untuk transaksi harian. Literatur mikrostruktur menegaskan bahwa likuiditas pasar tidak hanya ditentukan oleh total aset yang tercatat, melainkan oleh proporsi aset yang aktif dalam proses pembentukan harga (*price discovery*) melalui *order flow* (Kyle, 1985; O'Hara, 1995). Token yang disimpan dalam *treasury*, meskipun tercatat secara transparan di *blockchain*, tidak berkontribusi langsung terhadap *order flow* dan *market depth* karena tidak diperdagangkan secara rutin (Cong et al., 2021). Kondisi ini menyebabkan perbedaan antara likuiditas nominal dan likuiditas efektif, yaitu pasar terlihat memiliki suplai besar, namun kenyataannya hanya sebagian kecil token yang benar-benar beredar dan diperdagangkan secara aktif,

sebagaimana juga ditegaskan dalam studi likuiditas pasar kripto dan token berbasis protokol (Auer & Claessens, 2018).

Pada token karbon berbasis *blockchain* seperti \$KLIMA, BCT, dan MCO₂, *treasury* berfungsi tidak hanya sebagai aset spekulatif, tetapi juga sebagai representasi nilai lingkungan dan instrumen mitigasi emisi. Meskipun KlimaDAO merupakan organisasi otonom terdesentralisasi (*decentralized autonomous organization*), namun KlimaDAO tetap sebagian bersifat *centralized*, dengan peran penting dimainkan oleh tim inti yang memegang akses *treasury* dan protokol (KlimaDAO, 2022d). Pada KlimaDAO, *treasury* memegang berbagai aset pendukung seperti BCT dan stablecoin yang berfungsi sebagai *backing assets* bagi token \$KLIMA, sebagaimana dijelaskan secara eksplisit dalam dokumentasi resmi dan analisis akademik tentang desain ekonomi KlimaDAO (KlimaDAO, 2022a). Selain itu, DAO's *treasury* merupakan implementasi brankas sederhana yang menyimpan token yang mewakili kredit karbon dan dolar Amerika Serikat dalam bentuk stablecoin (token dengan nilai dolar AS) serta menyimpan semua dana yang dikumpulkan oleh protokol (KlimaDAO, 2022b). Akses ke perbendaharaan dijamin oleh 3 dari 5 multisig yang dipegang oleh Tim Inti. *Treasury* dirancang untuk menopang nilai intrinsik \$KLIMA dan menciptakan mekanisme stabilisasi harga melalui strategi *bonding*, *staking*, dan pengelolaan likuiditas (KlimaDAO, 2022c). Dominasi *treasury* kredit karbon pada KlimaDAO sebesar 4% dari seluruh kredit yang tersedia di VCMs, menempatkan KlimaDAO *treasury* sebagai salah satu *potential carbon credit holder* (Cujowolf 2022; Quorum, 2022). Selain itu, *blockchain* secara permanen mencatat transaksi dan kepemilikan token, sehingga

memberikan hak tata kelola dan hak atas perbendaharaan kepada para pemegang token \$KLIMA yang sebanding dengan jumlah token yang dimiliki, dan setiap token \$KLIMA didukung oleh setidaknya satu ton kredit CO₂e (Jirásek, 2023). Selain itu, kepemilikan atas perbendaharaan dan kunci penandatanganan protokol (*protocol signing keys*) memberikan mereka kekuasaan yang cukup besar. Dengan demikian, selain menjadi tempat penyimpanan aset, *treasury* berperan aktif dalam membentuk struktur pasar dan ekspektasi pelaku pasar terhadap nilai jangka panjang token karbon digital.

Pada token BCT yang dikembangkan oleh Toucan Protocol, *treasury* memiliki peran penting dalam mengelola hasil tokenisasi kredit karbon dari VCMs. BCT adalah token karbon hasil *bridging* kredit karbon dari registri seperti Verra ke blockchain Polygon. Tidak ada *treasury* khusus BCT. BCT hanya berfungsi sebagai aset dasar yang bisa diperdagangkan atau digunakan dalam protokol lain. *Treasury* muncul ketika DAO seperti KlimaDAO mengakumulasi BCT ke dalam *vault* mereka untuk mendukung token \$KLIMA. BCT merepresentasikan kumpulan kredit karbon terverifikasi, salah satunya oleh Puro.earth, yang dapat diperdagangkan, digunakan sebagai likuiditas DeFi, atau *retired* untuk tujuan *offset* emisi, sebagaimana dijelaskan dalam kerangka kerja Toucan Protocol (Toucan Protocol, 2021). Token BCT yang disimpan dalam *treasury* dialokasikan untuk *bridging* lintas rantai, penyediaan likuiditas, atau penyeimbangan pasar. Selama token-token ini belum dilepas ke pasar sekunder, token BCT tidak berkontribusi terhadap volume perdagangan, sehingga mempengaruhi interpretasi data aktivitas *on-chain* dan menyebabkan likuiditas aktual lebih rendah dibandingkan suplai

tercatat, sebagaimana juga dicatat dalam literatur tokenisasi karbon (Ballesteros-Rodríguez et al., 2024).

Sementara itu, pada MCO₂ yang diterbitkan oleh MOSS Earth, tidak ada *treasury* internal MCO₂. Moss menerbitkan token berdasarkan kredit karbon yang dibeli dan diverifikasi, lalu token tersebut bisa digunakan oleh pihak lain, untuk *offsetting* atau *treasury* DAO. *Treasury* berfungsi sebagai mekanisme pengendalian suplai token karbon yang berasal dari proyek REDD+ dari *Tropical Forest Forever Facility* (TFFF) atau konservasi hutan hujan tropis Amazon di Brasil. Token MCO₂ yang disimpan dalam *treasury* umumnya dilepas secara bertahap sesuai dengan permintaan pasar dan strategi penerbit, sebagaimana dijelaskan dalam dokumen tokenomics MOSS Earth (MOSS Earth, 2022). Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi risiko kelebihan suplai yang dapat menekan harga token karbon di pasar sekunder. Dalam konteks ini, *treasury* berperan sebagai *supply management tool* yang memungkinkan penerbit token untuk mengatur ritme distribusi aset karbon digital, sejalan dengan literatur ekonomi yang menekankan pentingnya pengendalian suplai pada pasar dengan likuiditas terbatas.

Dari sudut pandang analisis *on-chain*, transaksi yang melibatkan *treasury* perlu dibedakan secara konseptual dari transaksi perdagangan biasa antar investor. Transfer token dari atau ke *wallet treasury* sering kali mencerminkan keputusan operasional protokol, seperti penambahan likuiditas, redistribusi insentif, atau persiapan *retirement* token karbon, bukan motif spekulatif (Buterin, 2017). Oleh karena itu, memasukkan transaksi *treasury* sebagai bagian dari aktivitas perdagangan tanpa klasifikasi yang tepat dapat menyebabkan bias dalam

pengukuran volume, frekuensi transaksi, dan intensitas perdagangan. Literatur empiris keuangan kripto menekankan pentingnya pemisahan antara *economic trading activity* dan *protocol-driven transactions* untuk memperoleh estimasi likuiditas dan aktivitas pasar yang lebih akurat (Cong et al., 2021).

Keberadaan treasury juga memiliki implikasi signifikan terhadap volatilitas harga dan *bid-ask spread*. Ketika proporsi token yang disimpan dalam treasury relatif besar dibandingkan dengan suplai beredar, pasar cenderung memiliki kedalaman yang lebih tipis, sehingga harga menjadi lebih sensitif terhadap transaksi berskala besar. Sebaliknya, pelepasan token dari *treasury* ke pasar dapat menciptakan *supply shock* yang meningkatkan volatilitas jangka pendek. Fenomena ini konsisten dengan teori mikrostruktur pasar yang menyatakan bahwa perubahan mendadak dalam ketersediaan aset akan mengganggu keseimbangan permintaan dan penawaran, terutama pada pasar dengan likuiditas terbatas dan partisipan yang relatif sedikit seperti pasar karbon berbasis blockchain (Kyle, 1985; O'Hara, 1995).

Dengan demikian, cadangan *treasury* berpengaruh terhadap aktivitas perdagangan *on-chain* token karbon serta analisis likuiditas yang dapat menjelaskan perbedaan likuiditas antar token seperti \$KLIMA, BCT, dan MCO2. *Treasury* mempengaruhi suplai efektif, kedalaman pasar, stabilitas harga, serta interpretasi data transaksi *on-chain*. Integrasi konsep *treasury* ke dalam kerangka analisis mikrostruktur pasar *on-chain* memungkinkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai bagaimana desain protokol, tata kelola DAO, dan kebijakan internal penerbit memengaruhi dinamika pasar karbon digital (Auer & Claessens, 2018; Ballesteros-Rodríguez et al., 2024).

2.8.5 *Pooling (Liquidity Provision)*

Pooling, atau *liquidity provision*, merupakan mekanisme penyediaan likuiditas di pasar terdesentralisasi (DEX) melalui pengalokasian *peer-assets* ke dalam *liquidity pool* yang dikelola oleh *smartcontract*, sehingga perdagangan aset digital berlangsung tanpa ketergantungan pada sistem pencocokan order. Mekanisme ini muncul sebagai respons terhadap keterbatasan sistem *order-driven market* atau *limit order book* pada *blockchain*, terutama berkaitan dengan biaya transaksi, latensi, dan kebutuhan akan partisipasi aktif *market maker*. Dalam sistem *automated market maker* (AMM), harga aset tidak ditentukan melalui proses pencocokan order beli dan jual, melainkan melalui fungsi algoritmik yang bergantung pada komposisi aset dalam *pool*, seperti *constant product function* yang diperkenalkan oleh Uniswap (Adams et al., 2021b; Angeris & Chatzigiannis, 2020; Othman, 2012). Berbeda dengan pasar berbasis *limit order book* dengan likuiditas yang muncul dari order pasif sehingga dapat ditarik kapan saja. Namun, likuiditas dalam *pooling* bersifat terkunci (*locked liquidity*) dan hanya dapat diakses melalui aturan *smartcontract* yang telah ditentukan sebelumnya. Dengan demikian, *liquidity pool* berperan sebagai penyedia likuiditas pasif yang selalu tersedia, sehingga perdagangan terjadi secara kontinu tanpa kehadiran *counterpart* pada saat transaksi berlangsung.

Dari perspektif *market microstructure*, *pooling* dapat dipahami sebagai bentuk baru dari penyediaan *immediacy*, sehingga *liquidity providers* (LPs) atau penyedia likuiditas menggantikan peran *dealer* atau *market maker* tradisional dalam menanggung risiko inventori dan fluktuasi harga jangka pendek. LPs diberikan

kemampuan untuk memusatkan likuiditas dengan membatasi pada suatu rentang harga tertentu (Adams et al., 2021b). Hal ini meningkatkan efisiensi modal dari kumpulan (*pool*) dan memungkinkan LPs untuk mendekati kurva cadangan yang mereka kehendaki, sekaligus tetap dapat digabungkan secara efisien dengan likuiditas lain dalam kumpulan tersebut. LPs memperoleh kompensasi melalui biaya transaksi (*trading fees*) yang dibayarkan oleh *trader*, yang secara ekonomi setara dengan *bid-ask spread* (Hasbrouck, 2007). Besarnya likuiditas yang terkunci dalam *pool* (*total value locked*) menentukan kedalaman pasar (*depth*) dan kemampuan pasar menyerap order dalam jumlah besar tanpa menimbulkan dampak harga yang signifikan. Dengan kata lain, *pooling* berkontribusi langsung terhadap likuiditas seperti *tightness*, *depth*, dan *immediacy*, meskipun tanpa kuotasi harga eksplisit seperti pada pasar berbasis *order book*.

Mekanisme *pooling* juga memiliki struktur risiko seperti *impermanent loss*, yaitu penurunan nilai relatif portofolio aset dalam *pool* akibat perubahan harga aset di luar *pool*, yang mencerminkan biaya inventori dalam konteks AMM (Adams et al., 2021b). Risiko ini menjadikan keputusan untuk menyediakan likuiditas sebagai hasil dari pertimbangan rasional antara pendapatan biaya transaksi, volatilitas harga, dan peluang alternatif investasi. Dalam konteks pasar karbon berbasis *blockchain*, seperti token \$KLIMA, BCT, dan MCO₂, *pooling* memiliki implikasi yang signifikan terhadap stabilitas likuiditas pasar sekunder, pembentukan harga karbon digital, serta transmisi volatilitas antar aset yang saling terhubung dalam *pool* yang sama. Oleh karena itu, *pooling* tidak hanya berfungsi sebagai mekanisme teknis perdagangan, tetapi juga sebagai elemen struktural yang membentuk

dinamika likuiditas dan efisiensi harga dalam ekosistem VCMs berbasis *blockchain*.

2.8.6 *Smart Contract Interactions*

Interaksi kontrak (*contract interactions*) dalam jaringan *blockchain* merupakan proses komunikasi dengan *smart contract* yang telah dipublikasikan (*deployed*). Interaksi terdiri dari seluruh aktivitas transaksi yang melibatkan eksekusi *smart contract* yang tidak terbatas pada pemindahan aset langsung antar *wallet* (*externally owned accounts* or EOA) di DEX, dan mencakup kegiatan untuk melakukan permintaan (*querying*) terhadap informasi yang tersimpan dalam kontrak maupun mengeksekusi fungsi-fungsi tertentu yang telah didefinisikan di dalamnya. Bentuk interaksi kontrak dapat sangat beragam, mulai dari pengecekan saldo, pemanggilan fungsi logika bisnis, hingga pelaksanaan transfer token dan aset digital lainnya.

Profiles digunakan untuk menyediakan konfigurasi jaringan dan kontrak, sedangkan metode dinamis (*dynamic methods*) berfungsi untuk menyederhanakan tugas-tugas interaksi yang umum dilakukan. Selain itu, *scripts* digunakan untuk mengotomatisasi interaksi kontrak untuk keperluan pemrosesan terprogram (*programmatic tasks*), sehingga interaksi dapat dilakukan secara efisien dan berulang tanpa campur tangan manual. Interaksi kontrak ini merupakan elemen fundamental dalam pemanfaatan aplikasi terdesentralisasi (*decentralized applications* atau dApps), karena seluruh layanan dan fungsi yang ditawarkan oleh *smartcontracts* bergantung pada mekanisme komunikasi lintas kontrak dalam ekosistem *blockchain* serta memungkinkan modularitas kode, komposabilitas

protokol DeFi, serta integrasi berbagai fungsi keuangan dalam satu sistem terdistribusi (Buterin, 2014; Wood, 2014).

Secara umum, kontrak dapat berinteraksi dengan cara mentransfer ETH, memanggil fungsi dari kontrak lain, atau mengeksekusi kode eksternal sebagai bagian dari proses transaksi on-chain. *Contract interactions* dapat membentuk *trading mechanism* yang menentukan bagaimana order dieksekusi, harga ditentukan, dan biaya transaksi dibebankan kepada pelaku pasar. Berbeda dengan pasar tradisional yang memisahkan fungsi perdagangan, kliring, dan *settlement*, *smartcontract* mengintegrasikan seluruh proses tersebut ke dalam satu lapisan protokol (Buterin, 2014; Szabo, 1997). Integrasi ini mempengaruhi biaya transaksi (*gas fees*) yang secara langsung berdampak pada perilaku trader dan penyedia likuiditas dalam memilih *venue* perdagangan (Hasbrouck, 2007; Madhavan, 2000). Salah satu contoh pada *Ethereum Virtual Machine* (EVM) yang menyediakan beberapa mekanisme pemanggilan lintas kontrak yang memiliki karakteristik dan implikasi mikrostruktural yang berbeda (Jin et al., 2025).

1. Mekanisme CALL merupakan bentuk pemanggilan fungsi standar, di mana kontrak pemanggil mengeksekusi fungsi pada kontrak target dengan konteks penyimpanan (*storage*) yang terpisah, sehingga perubahan status hanya terjadi pada kontrak yang dipanggil.
2. Mekanisme STATICCALL, di sisi lain, dirancang sebagai pemanggilan *read-only* yang menjamin bahwa kontrak target tidak dapat memodifikasi keadaan blockchain, sehingga banyak digunakan untuk kueri data dan perhitungan harga tanpa risiko perubahan state (Wood, 2014). Mekanisme ini berperan

penting dalam menjaga integritas data dan efisiensi gas pada aplikasi keuangan terdesentralisasi.

3. Mekanisme DELEGATECALL, yaitu mekanisme di mana kode kontrak eksternal dijalankan dalam konteks penyimpanan kontrak pemanggil. DELEGATECALL banyak dimanfaatkan dalam pola *upgradeable smart contracts*, karena memungkinkan logika kontrak diperbarui tanpa mengubah alamat kontrak utama. Namun, pendekatan ini juga membawa implikasi risiko keamanan yang signifikan, karena kesalahan atau kerentanan pada kontrak eksternal dapat secara langsung memengaruhi state kontrak pemanggil (Atzei et al., 2017; Chen et al., 2017).
4. Mekanisme CALLCODE, yang memiliki konsep serupa dengan DELEGATECALL, kini dianggap usang dan jarang digunakan dalam pengembangan modern.

Contract interactions juga berperan dalam pembentukan harga dan transmisi informasi. Dalam sistem berbasis AMM, setiap interaksi kontrak secara langsung mengubah *state* kontrak dan rasio aset di dalamnya, sehingga memicu penyesuaian harga secara algoritmik. Hal ini membuat proses *price discovery* bersifat endogen terhadap aktivitas *on-chain* dan dapat diamati secara *real time* oleh seluruh pelaku pasar, meningkatkan transparansi namun juga membuka ruang bagi strategi perdagangan berbasis kecepatan dan urutan transaksi (*miner or maximal extractable value* atau MEV) (Schär, 2021).

Selain itu, terdapat mekanisme *staking* yang merupakan bentuk interaksi kontraktual antara pengguna dan *smart contract*, sehingga token dikunci (*locked*)

untuk periode tertentu guna memperoleh imbal hasil atau hak ekonomi tertentu. Dalam ekosistem blockchain, staking berfungsi sebagai mekanisme insentif untuk mendorong partisipasi jangka menengah hingga panjang, baik dalam konteks keamanan jaringan, tata kelola (*governance*), maupun stabilisasi likuiditas dan harga aset digital. Berbeda dengan perdagangan *spot* yang bersifat likuid dan segera, *staking* secara sengaja mengorbankan likuiditas jangka pendek dengan tujuan memperoleh kompensasi berupa *reward*, yang dapat berasal dari inflasi token, biaya protokol, atau mekanisme redistribusi internal (Schär, 2021; Saleh, 2020).

Selain itu *staking* juga dapat meningkatkan *demand* yang dapat mengakibatkan kenaikan kapitalisasi pasar dan berimplikasi pada peningkatan keadamaan terhadap serangan *double spending* pada *blockchain* (Cong et al., 2020b). Dari perspektif *market microstructure*, *staking* memiliki implikasi langsung terhadap struktur pasokan token yang dapat diperdagangkan (*tradable supply*). Dengan mengunci token ke dalam *smartcontract*, *staking* secara efektif mengurangi jumlah token yang tersedia di pasar sekunder, sehingga berpotensi meningkatkan kelangkaan relatif, memengaruhi kedalaman pasar (*depth*), serta menekan volatilitas jangka pendek melalui pengurangan tekanan jual. Mekanisme ini memiliki kesamaan ekonomi dengan *inventory withdrawal* dalam literatur mikrostruktur tradisional, di mana penarikan aset dari pasar dapat memengaruhi harga dan likuiditas (Hasbrouck, 2007; Madhavan, 2000). Dalam konteks token karbon, staking sering digunakan untuk menyelaraskan insentif antara pemegang token dan tujuan lingkungan jangka panjang, seperti mendorong *carbon offset* atau

stabilisasi nilai karbon digital. Selain itu, *staking* berfungsi sebagai instrumen pengelolaan likuiditas endogen, sehingga protokol secara tidak langsung mengatur keseimbangan antara likuiditas dan stabilitas harga melalui struktur insentif.

Sedangkan *unstaking*, merupakan mekanisme penarikan kembali token yang sebelumnya dikunci setelah periode penguncian (*lock-up period*) atau syarat tertentu terpenuhi. Proses ini mengembalikan token ke dalam sirkulasi pasar yang disertai dengan *unbonding period*, yaitu jeda waktu sebelum token kembali likuid dan dapat diperdagangkan, sehingga dapat meningkatkan kembali likuiditas dan volume perdagangan. Namun, *unstaking* berpotensi menciptakan tekanan jual yang signifikan apabila dilakukan secara simultan oleh banyak pelaku pasar, khususnya dalam kondisi ketidakpastian harga. Keberadaan *unbonding period*, adalah jeda waktu antara *un stake* aset kripto dan saat aset tersebut kembali dapat diakses untuk diperdagangkan, menciptakan friksi temporal karena keputusan *unstaking* bersifat strategis dan dipengaruhi oleh ekspektasi harga, volatilitas, dan kondisi pasar. Konsep ini sejalan dengan analisis Makarov & Schoar (2022) yang berhubungan dengan insentif dan keamanan dalam sistem PoS. Oleh karena itu, protokol dapat menerapkan mekanisme *cool-down period* atau penalti *unstaking* untuk mengurangi risiko lonjakan pasokan mendadak dan menjaga stabilitas pasar (Adams et al., 2021b; Schär, 2021). Dalam ekosistem DeFi dan VCMs berbasis *blockchain*, interaksi kontraktual melalui *staking* dan *unstaking* berfungsi sebagai alat desain pasar (*market design tool*) yang mempengaruhi dinamika likuiditas, perilaku investor, dan transmisi volatilitas harga.

2.8.7 Arbitrase

Dalam teori ekonomi keuangan, arbitrase merupakan konsep dasar mengenai efisiensi (Brunnermeier & Pedersen, 2009; Mitchell et al., 2007) dan pembentukan harga di pasar keuangan, meskipun pasar tidak selalu menyediakan peluang arbitrase bebas risiko setelah memperhitungkan biaya transaksi (Akram, Rime, & Sarno, 2008). Arbitrase dalam aktivitas transfer token merujuk pada strategi perdagangan yang memanfaatkan perbedaan harga token di berbagai *exchange* (bursa) sebagai *venue* perdagangan, jaringan *blockchain*, atau *liquidity paired-pool* untuk memperoleh keuntungan (*profit*) (Ito et al., 2020). *Trader* dapat membeli token dengan harga lebih rendah pada satu DEX dan secara bersamaan menjual token dengan harga lebih tinggi di DEX lain, sehingga menghasilkan keuntungan langsung dari selisih harga (*spread*) tanpa terpapar risiko pasar. Dengan demikian, arbitrase sebagai peluang memperoleh keuntungan tanpa risiko (Hau, 2014), khususnya risiko *carry trade* yang melibatkan portofolio berbagai mata uang seperti *spread* pada *interest rate currencies* pasar global dengan dolar AS (Lustig et al., 2010), volatilitas *foreign exchange* secara global (Menkhoff et al., 2012), serta likuiditas pasar (Brunnermeier et al., 2009).

Perbedaan harga terjadi karena inefisiensi sementara (*transitory asset pricing effects*) di pasar yang disebabkan oleh faktor-faktor seperti penawaran dan permintaan, fragmentasi likuiditas serta perbedaan mekanisme perdagangan antar *exchange*. Fenomena ini sejalan dengan konsep *segmented arbitrage* oleh Siriwardane, Sunderam, dan Wallen (2025), yang menekankan bahwa pasar keuangan modern cenderung tersegmentasi akibat friksi institusional, keterbatasan

likuiditas, serta hambatan transaksi, sehingga harga aset yang sama tidak selalu terintegrasi secara sempurna. Menurut Grossman & Stiglitz (1976) tentang pasar keuangan, efisiensi tidak ditafsirkan sebagai pernyataan tentang harga yang benar pada setiap titik waktu tetapi gagasan bahwa di pasar keuangan yang berfungsi secara efisien, peluang arbitrase jangka pendek dapat muncul dan mengundang pedagang untuk mengeksploitasinya, yang membuatnya bermanfaat untuk mengamati pasar yang relevan.

Dari perspektif *market microstructure*, menunjukkan bagaimana perbedaan harga dapat terjadi untuk aset identik di pasar yang kurang terpusat, tersegmentasi atau dengan tingkat transparansi yang tidak sempurna (O'Hara, 1995). Selain itu, aktivitas arbitrase berperan sebagai mekanisme koreksi harga, karena arus transfer token yang dilakukan oleh *arbitrageur* membantu menyelaraskan harga antar *venue* dan meningkatkan efisiensi informasi pasar serta mencegah diskriminasi harga di berbagai negara (Madhavan, 2000; Hasbrouck, 2007). Kelemahan dari perdagangan arbitrase adalah margin keuntungan bisa kecil, dan membutuhkan modal besar untuk menghasilkan keuntungan yang optimal. Untuk menggunakan arbitrase, trader harus mengidentifikasi inefisiensi pasar dan menghitung potensi keuntungan dikurangi biaya transaksi untuk menentukan apakah perdagangan sepadan dengan risikonya.

Proses arbitrase diawali dengan pemantauan harga aset secara berkelanjutan untuk mendeteksi *mispricing* jangka pendek, dengan teknologi algoritma perdagangan berfrekuensi tinggi (*high-frequency trading*) sehingga peluang arbitrase dapat diidentifikasi dan dieksekusi dalam waktu yang sangat singkat.

Arbitrase juga terjadi lintas negara sebagai konsekuensi dari perbedaan nilai tukar, regulasi, dan tingkat integrasi pasar internasional, dengan strategi utama berupa eksekusi perintah beli dan jual secara simultan untuk meminimalkan risiko fluktuasi harga. Namun, efektivitas arbitrase sangat bergantung pada keberadaan friksi pasar, terutama biaya transaksi dan biaya perdagangan, yang dapat mengurangi bahkan meniadakan potensi keuntungan.

Selain itu, trader dapat memanfaatkan arbitrase berbasis informasi dan waktu. Peristiwa berita atau rilis informasi tertentu dapat memicu reaksi harga yang tidak seragam antar pasar, menciptakan peluang arbitrase berbasis berita. Perbedaan jam perdagangan dan kesenjangan waktu antar pasar juga menjadi sumber peluang arbitrase, terutama pada pasar global yang tidak beroperasi secara serentak. Tingginya fragmentasi bursa perdagangan semakin memperbesar peluang arbitrase, namun sekaligus menuntut kecepatan eksekusi dan manajemen risiko yang cermat agar keuntungan dapat direalisasikan secara optimal. Keberadaan arbitrase ini menunjukkan bahwa proses *price discovery* bersifat endogen terhadap struktur mikro pasar, termasuk biaya transaksi, kecepatan eksekusi, dan kedalaman likuiditas masing-masing *venue* (Kyle, 1985; Schär, 2021).

Meskipun arbitrase berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi harga dan integrasi pasar, arbitrase memiliki implikasi terhadap likuiditas dan volatilitas jangka pendek. Transfer token dalam jumlah besar untuk tujuan arbitrase dapat menimbulkan tekanan sementara pada likuiditas *pool* atau meningkatkan volatilitas harga *intraday*, terutama pada pasar dengan kedalaman terbatas seperti token karbon berbasis *blockchain*. Dengan demikian, arbitrase tidak hanya berfungsi

untuk mendorong konvergensi harga antar pasar, tetapi juga merupakan faktor penting dalam dinamika likuiditas dan perilaku perdagangan yang membentuk struktur mikro pasar aset digital.

2.8.8 *Tokenized Carbon Asset On-chain Trading*

Dalam pendekatan ekonometrika, khususnya aset kripto karbon, analisis keterkaitan antara sistem tokenisasi dan dinamika pasar karbon konvensional membutuhkan instrumen yang mampu merepresentasikan kondisi pasar sesungguhnya, sekaligus untuk menilai efektivitas pasar, efisiensi likuiditas, serta potensi pertumbuhan dari mekanisme pertukaran kredit karbon digital. Untuk menjawab tantangan ini, digunakan tiga instrumen pasar yang berkaitan dengan dinamika penawaran, permintaan, serta nilai dari tokenisasi kredit karbon, yaitu *token supply*, *volume transaksi*, dan *value transaksi*, untuk menjamin akurasi analisis kuantitatif.

2.8.8.1 *Total Supply*

Token supply (pasokan) adalah jumlah token yang telah dicetak dan tersedia di jaringan *blockchain*. Terdapat tiga jenis *supply token* dalam *cryptocurrency* (Alzahrani, 2019), khususnya *Crypto Credit Carbon*. *Maximum supply* mengacu pada jumlah maksimum token yang dapat dibuat atau dicetak sepanjang masa hidup suatu aset kripto. *Total supply* adalah jumlah token yang ada saat ini, meliputi token yang terkunci, disimpan, hilang, atau tidak dapat diperdagangkan di pasar publik. *Circulating supply* adalah jumlah token beredar di pasar, yang dapat diperdagangkan, dapat diakses oleh publik serta digunakan untuk menghitung *marketcap*.

Dalam *tokenomics*, dinamika permintaan dan penawaran, utilitas token, distribusi, dan mekanisme insentif mencakup bagaimana pasokan token (*token supply*) dirancang, dikelola, dan disesuaikan secara algoritmik dalam ekosistem *blockchain* (Chyzhevska et al., 2024; Kaur, 2025; Kiayias et al., 2023). *Token supply* mencerminkan ketersediaan aset digital di pasar dan berperan penting dalam mempengaruhi tingkat kelangkaan serta potensi tekanan inflasi terhadap nilai token tersebut (Bihani et al., 2025). Total pasokan dan distribusi token memiliki pengaruh yang signifikan terhadap aksesibilitas dan likuiditas suatu aset digital dalam ekosistem *blockchain*. Dalam model *token-based platform finance*, Cong et al. (2020a) menekankan pentingnya pengaturan *token supply* secara dinamis untuk menyesuaikan insentif antara pemilik dan pengguna platform. Merujuk pada prinsip Friedman, penggunaan kontrol adaptif atau kebijakan *burning* (pemusnahan) dan *on-chain treasury* yaitu pembelian kembali token atau penerapan pajak atas kepemilikan token saat terjadi inflasi dengan *over-supply token* (suplai token berlebih), serta *minting* (penerbitan) token baru saat aktivitas platform meningkat dan pasar mengalami stagnasi, mencerminkan pendekatan moneter berbasis *blockchain* yang bertujuan menjaga nilai karena harga token yang volatil serta likuiditas jangka panjang (Kiayias et al., 2023; Liu et al., 2022; Tang et al., 2023). Sejalan dengan teori *market timing*, dimana penyesuaian struktur modal dilakukan dengan menerbitkan ekuitas ketika harga saham tinggi dan biaya modal rendah (Baker et al., 2002; Welch, 2004). Selain itu, Shivdasani et al (2009) menunjukkan bahwa dalam kondisi *hot credit markets*, *supply-driven leverage* atau peningkatan

pasokan instrumen keuangan dapat mendorong aktivitas investasi berisiko dengan likuiditas tinggi.

Dalam *blockchain gaming*, token dengan *fixed supply* dan distribusi besar cenderung memiliki likuiditas lebih tinggi (Sareen, 2023), terlebih ketika pemegang token (*holders*) dapat mengakses peringkat dan persentase kepemilikan terhadap *total supply token* di *decentralized exchange* (DEX), yang mendorong terbentuknya *liquidity pool* (Bhoyar, 2025). Analogi dari studi Axelson et al. (2010) menunjukkan bahwa ketersediaan utang murah (*cheap credit supply*) mendorong peningkatan *leverage* dan harga pembelian dalam transaksi *leveraged buyouts* (LBO). Fenomena ini mencerminkan bagaimana insentif keuangan yang berlebihan akibat pasokan modal yang longgar dapat mendorong perilaku spekulatif dan overvaluasi aset. Ketidakseimbangan *token supply*, baik melalui *over-minting* maupun distribusi yang tidak adil, dapat menimbulkan volatilitas nilai, konflik kepentingan, bahkan ketidakpercayaan terhadap proyek itu sendiri, sehingga desain suplai dan distribusi token menjadi elemen penting dalam memastikan efisiensi serta keberlanjutan sistem tokenisasi, khususnya model *swaps*.

2.8.8.2 Volume Transaksi

Volume transaksi (*volume of transaction* atau *shared volume*) merupakan instrumen untuk mengevaluasi tingkat aktivitas dan likuiditas suatu aset, yang mencerminkan kepercayaan serta minat investor dalam pasar. Dalam konteks token karbon, volume transaksi merujuk pada jumlah unit token yang berpindah tangan atau berhasil diperdagangkan dalam periode waktu tertentu dalam platform *on-chain* (Antulov-Fantulin et al., 2018; Chordia, 2001; Surya, 2016) pada jaringan *blockchain*, di

mana satu token setara dengan satu ton karbon dioksida ($1 \text{ token} = 1 \text{ tCO}_2$). Volume transaksi dapat digunakan sebagai indikator nilai pasar seperti menentukan valuasi aset kripto (Hafner & Majeri, 2022; Zheng et al., 2021) dan pemodelan harga kripto (Kumar, 2018), serta memiliki hubungan saling mempengaruhi (*Granger-causality*) (Ghabri et al., 2023) dengan *return* (Khaknejad, 2019). Volume transaksi *on-chain* berisi informasi dari *ledger blockchain*, seperti detail setiap transaksi (dari dan ke *wallet addresses*, jumlah token, dan biaya yang dibayarkan), serta tingkat kesulitan dan ukuran blok (Jagannath et al., 2021; Kim et al., 2022), sehingga tidak ada volume tersembunyi (*iceberg orders*) atau *dark pools* (Dimpfl, 2017).

Volume transaksi dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti perubahan kebijakan pasar, harga saham, pengumuman korporat, dan peristiwa eksternal. Volume transaksi cenderung lebih tinggi pada saat harga naik (*uptick*) dibandingkan saat harga turun (*downtick*), yang menunjukkan adanya asimetri dalam perilaku pasar terhadap fluktuasi harga (Epps, 1997). Indikator harga seperti *Market to Book Value* (MBV), *Price Earnings Ratio* (PER), *Market Value Added* (MVA), dan *Economic Value Added* (EVA) berkorelasi terhadap peningkatan volume transaksi (Astikawati et al., 2017). Sebaliknya, dengan adanya faktor inflasi menyebabkan volume transaksi berkorelasi negatif terhadap harga saham (Choiriyah, 2018). Hal ini mengindikasikan bahwa investor mempertimbangkan faktor-faktor fundamental dalam membuat keputusan investasi.

Faktor-faktor eksternal seperti pengumuman implementasi *Employee Stock Options Program* (ESOP) (Najy et al., 2017), perubahan jam perdagangan (Hidayat, 2017) serta sentimen pasar terhadap berita atau isu sosial-ekonomi (Ante, 2023;

Souza et al., 2023) mempengaruhi reaksi dan perilaku investor (Gabrovsek et al., 2017) karena persepsi negatif terhadap potensi dilusi aset digital yang menyebabkan ketidakakuratan prediksi harga (Critien et al., 2022; Khaknejad, 2019) sehingga menurunkan volume transaksi. Sebaliknya, volume transaksi melonjak tinggi dalam kondisi krisis, seperti saat pengumuman kasus pertama pandemi COVID-19 di Indonesia, terutama saham pada sektor farmasi. Hal ini menunjukkan sensitivitas volume transaksi terhadap informasi krisis, ekspektasi pasar dan faktor makroekonomi seperti inflasi global serta harga komoditas, termasuk emas (Feyen et al., 2022; Sholichah et al., 2022). Dengan demikian, volume transaksi tidak hanya mencerminkan aktivitas pasar, tetapi juga berperan penting sebagai indikator dinamis dari likuiditas, harga, dan perilaku investor dalam ekosistem kripto dan aset digital.

2.8.8.3 Nilai Transaksi

Transaction Value (nilai transaksi) merupakan harga yang sebenarnya nilai actual (*actual value*) dibayar atau harus dibayar (*ECFR :: 19 CFR 152.103 – Transaction Value., n.d.; U.S. Customs and Border Protection, 2007*) untuk unit atau lot suatu aset (Mallinova et al, 2010) seperti saham, obligasi, kripto, kontrak berjangka atau instrumen keuangan derivatif seperti token karbon (Yamani, 2023) dalam transaksi perdagangan *on-chain*. Nilai transaksi dihitung dengan mengalikan total jumlah saham yang diperdagangkan dengan harga saham selama periode tertentu. Metrik ini digunakan untuk mengungkapkan berapa banyak uang yang mengalir melalui suatu aset, serta menganalisis kesehatan, kelayakan dan keberlanjutan suatu pasar atau sekuritas untuk membantu investor menilai tingkat aktivitas dan potensi

pergerakan harga. Nilai transaksi yang tinggi tidak selalu mengindikasikan likuiditas tinggi, namun dapat menunjukkan peningkatan minat pada suatu aset yang disebabkan oleh perdagangan besar oleh investor institusional, peristiwa atau berita penting, dan praktik perdagangan manipulatif. Hal ini menyebabkan sinyal palsu dan salah tafsir sentimen pasar karena tingginya volume perdagangan (*noise trading*) yang mengakibatkan volatilitas tinggi serta meningkatkan risiko investasi (Gudmundsdottir, 2012), sehingga penggunaan proxy *volatility over volume* (VoV) dapat memberikan pengukuran likuiditas yang lebih akurat dan representatif (Fong et al., 2018).

Nilai transaksi dipengaruhi jumlah *token* kredit karbon yang berpindah tangan atau berhasil diperdagangkan (total yang dibeli, dijual, atau ditukar dalam suatu transaksi tertentu) dan *fixed price* (harga yang berlaku selama transaksi tersebut dilakukan untuk setiap unit token yang diperdagangkan). Nilai transaksi dihitung dengan mengalikan jumlah token yang ditransaksikan dengan harga periode transaksi. Ini memberikan representasi moneter dari aktivitas perdagangan pada waktu spesifik, dan memberikan gambaran yang lebih jelas tentang keterlibatan pasar daripada hanya melihat volume token. Nilai transaksi selalu berfluktuasi berdasarkan pergerakan harga dan frekuensi perdagangan. Peningkatan minat beli atau jual meningkatkan nilai transaksi, bahkan jika harga tetap stabil. Sebaliknya, perubahan harga yang tajam dapat mempengaruhi nilai transaksi meskipun volume token tetap sama.

Nilai transaksi merupakan faktor utama untuk mengidentifikasi peluang investasi potensial yang digunakan bersama dengan *tear sheet* untuk menilai

apakah suatu saham dinilai terlalu rendah (*undervalued*) atau terlalu tinggi (*overvalued*) berdasarkan volume perdagangan relatif terhadap *marketcap*. Metrik ini juga digunakan sebagai representasi terhadap kondisi pasar dalam pengukuran likuiditas (Bekaert, 2007), dengan memanfaatkan *dollar-volume-weighted average* dalam pengukuran *effective spread* pada transaksi dengan nilai perdagangan tinggi (Bogousslavsky et al, 2019; Goyenko et al., 2009) dan *absolute return ratio* harian terhadap *dollar trading volume* untuk mengestimasi *price impact* (Amihud, 2002), serta mengaplikasikan *signed dollar volume* untuk mengukur inovasi *price reversal* Pastor et al (2003). Nilai transaksi dijadikan ukuran yang berfungsi untuk memahami nilai riil dari sekuritas melalui analisis rasio harga terhadap laba (*price-to-earnings ratio*) atau nilai intrinsik saham dibandingkan harga pasar saat ini. Selain itu, nilai transaksi juga mempengaruhi *decision-making* dalam menilai tingkat keuntungan suatu transaksi (Soni et al., 2019). Studi terbaru menunjukkan bahwa transaksi bernilai rendah dengan frekuensi tinggi berpengaruh terhadap *total number of transactions* (Mínguez et al., 2024).

Studi terdahulu menunjukkan bahwa mekanisme seperti *Security Token Offerings* (STO) (Monchau et al., 2022), tokenisasi aset real estat (Steininger et al., 2022) menurunkan hambatan masuk pasar, memperbesar skala transaksi dan memperluas akses investor, sehingga meningkatkan nilai transaksi. Selain itu, pasar NFT menunjukkan bahwa nilai tukar Ethereum-USD menjadi faktor dominan yang memengaruhi volume perdagangan dalam denominasi USD (Çamalan et al., 2024), sementara hubungan dengan perdagangan Bitcoin dan Ether juga menguatkan keterkaitan lintas aset (Westland, 2023). Bahkan pada instrumen seperti fan token,

nilai transaksi menunjukkan keterhubungan likuiditas dengan pasar ekuitas (Foglia et al., 2024), dengan perilaku *herd* muncul pada kondisi volatilitas tinggi dan volume rendah (Dedousi et al., 2025). Dengan demikian, *transaction value* merupakan indikator krusial dalam memahami kinerja, likuiditas, dan keterhubungan pasar aset virtual dengan sektor keuangan lainnya.

2.9 Efek Moderasi

Efek moderasi merupakan perubahan hubungan antara variabel independen dan variabel dependen yang terjadi melalui efek interaksi dengan variabel moderator dalam *moderated regression analysis* (MRA) (Cronbach, 1987; Irwin & McClelland, 2001; Memon et al., 2019), yang mempengaruhi bentuk dan kekuatan hubungan antara variabel independen dan variabel dependen (Aguinis et al., 2016; Sharma et al., 1981; Smithson, 2012). Model moderasi menjelaskan “kapan” atau “untuk siapa” suatu variabel secara kuat menjelaskan atau menyebabkan perubahan pada variabel hasil (Frazier et al., 2004). Bentuk hubungan menggambarkan bagaimana pengaruh variabel independen bekerja terhadap variabel dependen, sedangkan kekuatan hubungan menunjukkan kemampuan variabel independen dalam memprediksi variabel dependen, yang dipengaruhi oleh varians dari *error term* dalam model regresi moderasi. Oleh karena itu, dalam MRA, moderator sebagai variabel ketiga dapat mengubah bentuk hubungan antara variabel independen dan variabel dependen. Efek moderasi diukur melalui koefisien regresi yang menangkap efek interaksi. Jika efek interaksi terdeteksi dalam MRA, maka dapat dilakukan analisis kemiringan sederhana (*simple slopes analysis*) (Irwin & McClelland, 2001; MacCallum et al., 2002; Park & Yi, 2022; Spiller et al., 2013)

atau efek kondisional dalam *conditional process analysis* (Hayes, 2013; Preacher et al., 2007) untuk menilai pengaruh variabel independen dari moderator terhadap variabel dependen.

Gardner et al. (2017) mengemukakan tiga jenis efek moderasi, yaitu memperkuat (*strengthening*), melemahkan (*weakening*), dan membalik arah (*reversing*). Dawson (2014) memberikan implikasi praktis untuk penerapan MRA, sedangkan Aguinis et al. (2016) menyoroti isu seperti *measurement error*, kategorisasi artifisial variabel kontinu, dan kolinearitas antar prediktor. *Mean-centering* dapat mengurangi kolinearitas (Aiken & West, 1991; Jaccard et al., 1990), namun juga tidak menghilangkan efek tersebut (Echambadi & Hess, 2007). Oleh karena itu, model regresi moderasi dan analisis kemiringan (*skewness*) sederhana tidak dapat sepenuhnya bebas dari kolinearitas, karena keduanya tidak memperhitungkan korelasi antara efek interaksi dan efek langsung terhadap variabel dependen. Selain itu, analisis regresi moderasi dapat menghasilkan efek moderasi semu (*spurious moderation*) karena efek interaksi menangkap varians variabel dependen akibat efek non-linear dari prediktor (Daryanto & Lukas, 2022).

Dalam penelitian ini indeks regulasi pasar karbon digunakan sebagai variabel moderator untuk menguji apakah tingkat regulasi pasar karbon dalam pasar sekunder berbasis *blockchain* VCMs memperkuat atau melemahkan pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen. Dengan demikian, variabel regulasi diharapkan mampu memberikan pemahaman empiris mengenai peran kebijakan regulasi dalam membentuk dinamika hubungan antar variabel penelitian.

2.10 Regulasi *Carbon Offset Market*

Kerangka regulasi atau konstruksi hukum merupakan arsitektur tata kelola yang terstruktur (*structural governance*), terdiri dari hukum, kebijakan, standar, dan mekanisme penegakan yang dirancang untuk mengarahkan aktivitas ekonomi dan sosial menuju pencapaian tujuan keberlanjutan atau SDGs (Wan et al., 2023). Regulasi berperan penting dalam menerjemahkan prinsip keberlanjutan yang bersifat abstrak menjadi mandat dan insentif yang dapat dilaksanakan. Perbedaan antar negara atau lintas yurisdiksi dalam mengakui sertifikat digital yang mewakili pengurangan emisi, serta mengklasifikasikan dan mengenakan pajak terhadap instrumen keuangan token dengan basis kripto mempengaruhi likuiditas pasar dan insentif peserta, yang dapat menghambat proses dekarbonasi. Oleh karena itu, penyelarasan standar registri dengan mekanisme penerbitan algoritma konsensus atau kriptografi sangat penting untuk membangun kepercayaan

Tata kelola di pasar aset tradisional umumnya bersifat terpusat (*centralized*), dengan badan regulasi, lembaga keuangan, dan perantara lainnya berperan dalam pemantauan dan penegakkan kepatuhan, meskipun rentan terhadap ketidakpatuhan dan sanksi finansial dapat menyebabkan ketidakefisienan, konflik kepentingan, dan keterbatasan dalam proses pengambilan keputusan (Chen et al., 2022a; Gupta et al., 2024; Harish et al., 2023). Penggunaan *blockchain* dalam perdagangan token kredit karbon memiliki tata kelola otomatis dalam bentuk kendali terdesentralisasi yang menggantikan otoritas vertikal dengan algoritma otonom, sehingga mengurangi ketergantungan pada intervensi manusia (Murray et al., 2021). Meskipun tidak melibatkan peran badan regulasi, namun tetap

membutuhkan kerangka regulasi digital yang mengatur proses transaksi. Regulasi yang adaptif dan jelas, termasuk standar verifikasi *on-chain*, perlindungan data, serta panduan penggunaan *smart contracts*, dapat memperkuat hubungan positif *blockchain* dan kinerja VCMs dengan menciptakan *regulatory assurance* bagi investor dan pelaku pasar, sehingga mampu meningkatkan likuiditas token kredit karbon. Dalam hal ini, *regulatory technology (regtech)* (Gozman et al., 2020) dan *digital governance* (Hanisch et al., 2023) dapat berfungsi sebagai penghubung yang menerjemahkan ketentuan hukum ke dalam protokol otomatis yang memfasilitasi kepatuhan secara *real-time* tanpa mengorbankan efisiensi.

Peraturan yang berlaku untuk penawaran dan sepanjang siklus hidup sekuritas digital direpresentasikan di *blockchain* melalui penegakan pemrograman kepemilikan dan pembatasan perdagangan (OECD, 2020). Namun, penggunaan *blockchain* khususnya dalam VCMs masih sangat terfragmentasi, dengan metode MRV yang tidak konsisten, serta pengakuan hukum yang belum jelas (Kreibich et al., 2021; Siphthorpe et al., 2022), dengan kerangka regulasi yang kompleks dan keberadaan berbagai subpasar (Hickey et al., 2023), serta perbedaan yurisdiksi terhadap lisensi, perlindungan investor, dan persyaratan anti-pencucian uang (Chen et al., 2022b; Hanneke et al., 2024). Regulasi yang tidak terstandarisasi (Zhang et al., 2018), ditambah dengan kompleksitas teknis dari *smart contracts* dan infrastruktur *blockchain*, meningkatkan kerentanan terkait penipuan, peretasan, dan pelanggaran keamanan lainnya (Lu et al., 2024; Bhatia et al., 2024). Laporan OECD (2025) menekankan pentingnya standardisasi dan harmonisasi global terkait interpretasi hukum serta pengawasan regulasi yang berkaitan dengan tokenisasi.

Meskipun, tokenisasi menawarkan transparansi dan efisiensi yang lebih besar melalui fitur DLT bawaan *blockchain* tetapi menghadapi tantangan terkait kepercayaan pembeli dan ketidakpastian regulasi, sekaligus kekhawatiran mengenai harga dan stabilitas finansial, dampak terhadap kebijakan moneter, dan integritas keseluruhan sistem pembayaran tradisional, karena ekosistem VCMs masih berkembang dan belum stabil (Bassi et al., 2025).

Adopsi aset tokenisasi bergantung pada kemampuan untuk menavigasi kerangka hukum yang berubah-ubah, mengurangi inkonsistensi lintas batas, dan menerapkan strategi keamanan siber yang kuat. Hal ini dibuktikan oleh Lambert (2022), dalam penelitiannya bahwa token keamanan atau *security token offerings* (STO) yang merupakan representasi digital dari produk investasi yang tercatat di *blockchain*, berada di bawah pengawasan undang-undang sekuritas dengan biaya transaksi yang lebih rendah (Momtaz, 2021), memungkinkan kepemilikan fraksional oleh fitur divisibilitas *blockchain* yang menurunkan hambatan masuk dan investor kecil untuk memiliki sebagian kecil aset (Kreppmeier et al., 2023b; Perlman, 2019), audit transaksi dalam *immutable ledger*, perdagangan *peer-to-peer* antara pemegang token, penyelesaian transaksi secara *real-time*, dan meningkatkan likuiditas (Kreppmeier et al., 2023a; Ante et al., 2020).

Prinsip dan tantangan serupa juga berlaku pada tokenisasi karbon, yang menghadirkan kompleksitas tambahan terkait integritas pasar karbon dan koordinasi lintas yurisdiksi, seperti penggunaan Bitcoin yang menghubungkan para penggunanya secara global serta memungkinkan untuk memperdagangkan aset keuangan yang tidak berwujud, tidak diatur, dan terdesentralisasi tanpa adanya

padanan ekonomi atau jaminan dari bank sentral maupun otoritas negara (Glaser et al., 2014; Yermack, 2015). Regulasi bukan hanya berfungsi sebagai alat koersif yang membatasi, tetapi juga sebagai fasilitator pembentukan sistem kepatuhan yang berbasis teknologi, sebagaimana dikemukakan dalam *meta-regulation theory* (Gunningham, 2009). Dalam hal ini, teknologi *blockchain* dan *smart contracts* dapat diposisikan sebagai *co-regulators* yang mendukung prinsip kepatuhan otomatis (*self-enforcing compliance*), mengurangi kebutuhan terhadap pengawasan eksternal. Perspektif ini diperkuat oleh pendekatan *Hybrid Governance Models* (Ostrom, 2010), yang memadukan regulasi formal negara dengan mekanisme informal berbasis komunitas dan protokol teknis. Sementara itu, kerangka *Global Administrative Law* (Kingsbury et al., 2005) memperluas dimensi regulasi ke tataran transnasional, menekankan perlunya prinsip transparansi, legalitas, dan partisipasi dalam sistem administratif yang melibatkan aktor non-negara. Standar internasional seperti ISO 14097 (ISO, 2019) berperan sebagai *meta-regulators* yang menyediakan kerangka normatif global bagi sistem tokenisasi karbon. Dengan demikian, regulasi berfungsi bukan hanya untuk mengatur, tetapi juga untuk membentuk kondisi struktural bagi legitimasi, efisiensi, dan keberlanjutan pasar karbon berbasis teknologi.

Menurut Stiglitz (2022), regulasi yang jelas dan terstruktur dapat memperkuat likuiditas dengan meningkatkan partisipasi pasar. Namun, regulasi yang terlalu ketat juga dapat membatasi fleksibilitas dan menghambat inovasi dalam perdagangan karbon berbasis *blockchain* (Tapscott et al., 2021). Sejalan dengan pendekatan *Environmental Governance* dan *Institutional Theory*, bahwa

kebijakan lingkungan yang efektif memerlukan institusi yang dirancang untuk mengarahkan perilaku pasar secara tepat, sekaligus mencegah celah regulasi seperti *regulatory arbitrage* dalam memfasilitasi transisi menuju ekonomi hijau berbasis teknologi. Oleh karena itu, keseimbangan antara kejelasan regulasi dan ruang inovasi menjadi kunci untuk memastikan bahwa tokenisasi karbon tidak hanya memperkuat integritas pasar, tetapi juga berkontribusi nyata pada pencapaian target keberlanjutan global.

2.10.1 Taksonomi dan Klasifikasi Token Kredit Karbon

Token *blockchain* merupakan *digital bearer bond* (obligasi pembawa digital), yang kepemilikannya ditentukan oleh *data on-chain* pada *blockchain* (Tasca et al., 2019). Penerapan kerangka regulasi pada token berbasis *blockchain*, dilakukan untuk membedakan aset kripto, khususnya token kredit karbon atau *crypto carbon*, yang dianggap sebagai sekuritas dari jenis aset kripto lainnya (Blandin et al., 2018), karena tidak ada definisi hukum tunggal atau status legal yang disepakati secara global (Chawla et al., 2023; ISDA, 2021b; Sim et al., 2024). Tidak adanya representasi homogen atas token *blockchain* sebagai satu kelas aset digital (komoditas, sekuritas atau kelas aset baru) karena perbedaan karakteristik dan tujuan, menjadikan token tidak memiliki nilai intrinsik yang tetap. Dalam konteks *trust arrangement*, kurangnya kejelasan mengenai status hukum VCCs dapat merugikan kepentingan para penerima manfaat, khususnya dalam menegakkan hak-hak berdasarkan aspek *trust* tersebut (Sim et al., 2024). Selain itu, permintaan terhadap kredit karbon dari standar tertentu dipengaruhi oleh legitimasi institusi penerbit kredit tersebut (Bernstein, 2011), sedangkan legalitas VCCs ditentukan

berdasarkan undang-undang nasional masing-masing yurisdiksi, meskipun belum ada pernyataan otoritatif yang secara langsung berkaitan dengan VCCs (ISDA, 2021b). Oleh karena itu, untuk mengurangi ketidakpastian residual pasar terkait status hukum VCCs, diperlukan kejelasan regulasi terhadap taksonomi kredit karbon melalui pernyataan hukum otoritatif, amandemen legislasi, dan panduan regulasi lintas yurisdiksi agar sesuai dengan lanskap keuangan yang berkembang (Christophorou et al., 2025).

Penelitian oleh Euler (2018) dan Oliveira et al. (2018) mengusulkan berbagai metrik taksonomi untuk mengelompokkan token berdasarkan sifat token yang multi-dimensi. Token kredit karbon dapat diklasifikasikan sebagai komoditas (Saraji et al., 2021; Sustainability Directory, 2025a), produk atau instrumen keuangan (*Australian Securities and Exchange Commission*, 2019; *International Organization of Securities Commissions*, 2022), *intangible instruments* yang dikenakan pajak barang dan jasa (ISDA, 2021b; PwC, 2023), distribusi sekuritas seperti kontrak investasi atau hak kontraktual (*contractual rights*) (Ontario Securities Commission, 2020; Sim et al., 2024), serta diposisikan bukan sebagai sekuritas dan derivatif (Ferreira, 2020) ataupun *Digital Payment Tokens* (DPT) yang diatur berdasarkan *Payment Services Act* 2019 (PS Act) untuk menjadi alat pembayaran barang atau jasa yang sah seperti *cryptocurrency* bahkan untuk pelunasan utang (Sim et al., 2024). Selain itu, Lo et al. (2020) dan Mougayar (2017) juga mengembangkan kerangka karakteristik token, untuk mengidentifikasi fungsi token (sebagai alat pembayaran, utilitas, aset, dan hasil), fitur token (imbalan

staking dan alat tukar), serta distribusi token (untuk pihak internal perusahaan, atau dikhususkan bagi penambang dan penyedia layanan).

Token kredit karbon memiliki kedudukan yang berbeda bergantung pada konteks regulasi dan hukum yang berlaku pada suatu yuridiksi (*regulatory arbitrage*) serta berdampak pada pengawasan peraturan, persyaratan kepatuhan, kelayakan keseluruhan proyek tokenisasi karbon serta volume kredit yang diperdagangkan (Frost, 2020; Von Solms, 2021). Kejelasan status hukum kredit karbon di berbagai yurisdiksi menjadi sangat penting karena transaksi kredit karbon umumnya bersifat lintas batas, sehingga status hukumnya dapat mempengaruhi integritas dan transparansi transaksi VCMs, termasuk pencatatan dan transfer dalam registri, pelaporan keuangan yang diaudit, hingga penyelesaian sengketa kepemilikan (Chawla et al., 2023). Dengan memberikan kejelasan mengenai status hukum, standar verifikasi, dan tata kelola platform, regulator dapat membangun kepercayaan dan menarik partisipasi yang lebih besar dari sisi penyedia maupun pengguna, sehingga dapat mempercepat penyaluran modal ke proyek-proyek pengurangan dan penghilangan karbon yang berdampak nyata secara global. Sifat tantangan yang multidimensional ini menuntut pendekatan lintas sektor, yang melibatkan tidak hanya regulator lingkungan dan keuangan, tetapi juga pakar teknologi, pemangku kepentingan pasar karbon, dan badan internasional untuk memastikan bahwa kerangka kerja yang diterapkan sesuai dengan tujuan dan dapat beroperasi secara global.

2.10.2 *Regulatory Sandboxes*

Perkembangan DLT dan tokenisasi kredit karbon melalui teknologi *blockchain* mampu mengatasi fragmentasi data, memperkuat integritas pasar meningkatkan transparansi, akuntabilitas, dan efisiensi perdagangan karbon. Regulasi kebijakan dan risiko hukum merupakan tantangan utama dalam penerapan perdagangan karbon berbasis *blockchain* berskala besar, yang mendorong inovasi dan mitigasi risiko melalui pembangunan infrastruktur digital dan penerapan *regulatory sandboxes* (Lin, 2025; Mulligan et al., 2024; Zhou et al., 2023). Menurut Papantoniou (2022) dan Yeoh (2016) penerapan *regulatory sandbox* dapat mempermudah dan membuat proses kepatuhan serta pemantauan risiko secara global menjadi lebih fleksibel, sehingga mengurangi risiko yang terkait dengan ketidakjelasan hukum. Sedangkan, Boys et al. (2025) menekankan perlunya pertimbangan untuk memperkenalkan *sandboxes* bukan hanya untuk mendorong kemajuan pada sektor *fintech* sebagai bagian dari *data protection authorities* (UNICEF, 2019), namun juga ke sektor keberlanjutan untuk merevolusi tokenisasi kredit karbon, sehingga para pelaku pasar (regulator dan organisasi) dapat menguji teknologi baru khususnya kelayakan, kepatuhan, keandalan instrumen hukum dan keuangan, serta tata kelola (Bains et al., 2023 Carolina et al., 2021; DFSA, 2025; Sanarta, 2023) model tokenisasi kredit karbon dalam lingkungan yang terkontrol dan aman tanpa langsung tunduk pada regulasi (*regulatory restrictions*) yang berlaku (Martin et al., 2019; *Sustainability Directory*, 2025b; *The Digital Chamber*, 2025; Zreik et al., 2025). Selain itu, *sandboxes* dapat mendukung perbaikan proses dan prosedur, penyelarasan standar, ekspektasi pelaku pasar, identifikasi, mitigasi

risiko, serta mendorong inovasi sejalan dengan persyaratan kepatuhan serta tujuan sosial yang lebih luas (Adeoye et al., 2024).

Gromova (2020) menunjukkan bahwa *sandboxes* berfungsi sebagai rezim hukum eksperimental (*experimental legal regime*) untuk mendukung keberlanjutan dengan mempercepat adopsi inovasi digital. Lebih dari 50 yurisdiksi telah mengadopsi *sandboxes* dan *innovation hubs* untuk mendukung *fintech* yang efektif dalam mendorong inovasi digital (Buckley et al., 2019) melalui penguatan infrastruktur digital yang mendukung transparansi serta efisiensi dalam perdagangan digital (Miglioni, 2022). Di UE, *regulatory sandboxes* sudah dibentuk untuk menguji proyek-proyek inovatif perdagangan karbon berbasis *blockchain* dalam lingkungan yang terkontrol atau dibebaskan dari beberapa batasan regulasi (Richardson et al., 2025).

Mekanisme *regulatory sandboxes* dilakukan melalui dua tahap, yaitu penetapan penyelenggara sebagai *prototype* (berdasarkan kesepakatan forum) serta tahap evaluasi dan eksperimen (Sanarta, 2023). *Atrophy scenario* menggambarkan kegagalan *sandbox* karena desain yang buruk yang menyebabkan stagnasi pasar, dominasi industri, dan kurangnya harmonisasi regulasi internasional, sedangkan *Ascend scenario* menekankan *sandbox* sebagai penghubung inovasi teknologi, transparansi, dan kolaborasi global yang mempercepat aksi iklim dan pembiayaan berkelanjutan (Sustainability Directory, 2025b). Apabila proyek *sandbox* dalam tokenisasi kredit karbon berhasil, maka token karbon atau *crypto carbon* dapat bertransisi menjadi produk keuangan yang diakui dan diatur sepenuhnya oleh negara.

Sandboxes regulation dirancang untuk mengidentifikasi peluang, tantangan dan risiko sebelum implementasi secara luas, mendorong inovasi yang bertanggung jawab di sektor yang kompleks dan vital (khususnya sektor keuangan) (Carolina et al., 2021) serta menekankan pentingnya interoperabilitas peraturan di antara platform tokenisasi yang berbeda serta menciptakan keseimbangan antara inovasi teknologi dan pengawasan regulatif, terutama di pasar karbon digital yang masih berkembang (Christophorou et al., 2015). Meskipun tokenisasi menjanjikan peningkatan pasar karbon melalui peningkatan likuiditas dan transparansi, namun ketidakharmonisan regulasi internasional dan adanya konflik yurisdiksi menjadi hambatan utama dalam inovasi teknologi (Ohta, 2023; Sustainability Directory (2025b)). Oleh karena itu, keberhasilan implementasi tokenisasi kredit karbon sangat bergantung pada dukungan negara dalam kejelasan regulasi dan protokol standar, infrastruktur digital yang memadai, serta kebijakan yang memastikan keberlanjutan dan kepercayaan publik (Howson, 2019; Pwc, 2024; Qin et al., 2022) sebagai prasyarat penting agar inovasi seperti tokenisasi kredit karbon di VCMs dapat berjalan efektif, sah, dan berkelanjutan.

Regulasi dalam tokenisasi karbon merupakan instrumen kelembagaan yang membentuk struktur insentif dan batasan bagi aktor ekonomi dalam pasar yang terdigitalisasi, sejalan dengan teori ekonomi kelembagaan dari North (1990). Dalam *Regulatory Governance Theory* (Levi-Faur, 2011), efektivitas intervensi regulatif ditentukan oleh kapasitas institusi untuk membentuk koordinasi lintas yurisdiksi serta adaptabilitas terhadap kompleksitas teknologi baru. Teori ini menyoroti bahwa tata kelola yang terlalu rigid justru menciptakan disinsentif terhadap adopsi

inovasi seperti tokenisasi karbon. Sementara itu, *Legal Taxonomy Theory* (Schauer, 2006) menekankan bahwa pengelompokan aset digital seperti token karbon ke dalam kategori hukum tertentu (sekuritas, komoditas, atau aset *non-fungible*) menjadi krusial untuk menghindari kekaburan normatif yang berujung pada *regulatory arbitrage*, yaitu praktik pemanfaatan celah antar-yurisdiksi demi menghindari pengawasan. Keterbatasan ini tidak hanya melemahkan integritas pasar, tetapi juga menghambat terciptanya standar global yang saling diakui (*mutual recognition*). Pendekatan *adaptive regulation* dan *regulatory sandboxes* (Arner et al., 2017; Chatzara, 2020; Merlo et al., 2025) menjadi solusi untuk menjembatani inovasi dengan kepastian hukum melalui kerangka eksperimen legal yang terkendali dan fleksibel, yang menjamin standarisasi serta memastikan kepercayaan dan kepatuhan. Dengan demikian, kombinasi penguatan infrastruktur digital dan penerapan *regulatory sandboxes* dapat menjadi landasan utama dalam mempercepat transformasi VCMs yang inklusif dan berkelanjutan.

2.10.3 Consumer Protection

Dalam kerangka hukum beberapa yuridiksi, aset virtual sudah diakui dan dikategorikan sebagai properti yang sah (Held, 2025; Kandathil, 2024; Lee, 2024; Smith, 2023; Wyczik, 2024) serta memperoleh perlindungan hukum (Blitzer, 2023; Wang et al., 2022; Yingzi 2022). Menurut Bandi (2025), hak milik (*Personal Property Rights*) yang terdefinisi dengan baik dapat memberikan perlindungan universal dalam ekosistem aset digital dan membentuk kerangka regulasi dan operasional yang memungkinkan interoperabilitas lintas yurisdiksi serta penegakan hukum atas kepemilikan dan transaksi tokenisasi. Sedangkan penelitian oleh

Acquisti et al., 2016, mengutamakan nilai ekonomi dan konsekuensi dari perlindungan serta pengungkapan informasi pribadi, serta pada pemahaman dan keputusan konsumen terkait dengan pertukaran manfaat dan risiko yang menyertai privasi dan pembagian data pribadi.

Dari sisi teknis, perangkat lunak *blockchain* masih berada dalam tahap awal pengembangan, sehingga memberikan perlindungan terbatas terhadap serangan *Sybil*, *Denial-of-Service*, maupun perilaku invasif terhadap privasi oleh para pelaku pasar (Moser et al., 2017). Peningkatan ancaman keamanan dan masalah pelanggaran data di seluruh sistem digital (*cloud computing*), mengakibatkan pengetatan *data privacy regulations* dan sanksi untuk ketidakpatuhan, sehingga dibutuhkan solusi perlindungan data dengan tetap yang mempertahankan fungsionalitas operasional yang merujuk pada *Privacy Enhancing Data De-Identification Framework* - ISO/IEC 27559:2022(E) untuk melakukan *privacy impact assessment* (PIA) dan *threat modeling* terhadap data yang akan diungkap (ISO, 2022). *Data tokenization* digunakan sebagai mekanisme untuk meningkatkan keamanan dan privasi data (Gardhouse, 2024; Insights Desk, 2024; Moser et al., 2017. Ron et al., 2013), sekaligus mengurangi biaya dan *overhead* untuk memenuhi persyaratan kepatuhan, seperti yang ditetapkan oleh *Payment Card Industry Data Security Standar* (PCI DSS) dan *General Data Protection Regulation* (GDPR) yang berkaitan dengan pengelolaan dan penskalaan sumber daya untuk tokenisasi data sensitif pelanggan (AWS, n.d.; Perfecto, n.d.).

Menurut Singh (2024), *data tokenization* adalah teknik substitusi dalam *cybersecurity* untuk melindungi informasi asli dengan menukarkan atau mengganti

data sensitif atau *personally identifiable information* (PII) dan informasi keuangan, seperti nomor kartu kredit, rekening bank (*Primary Account Number*, PAN), atau jaminan sosial (*Social Security Number*, SSN) dengan serangkaian *alphanumeric strings* atau *placeholder non-sensitif* (CEI, n.d.) yang disebut token di aplikasi *frontend* atau *backend*. Token tidak memiliki makna intrinsik dan tidak dapat direkayasa balik (*reversible*) untuk mengungkapkan data asli, namun menjadi berguna karena mewakili nilai moneter tertentu. Kerangka kerja ini menggabungkan langkah-langkah keamanan berlapis untuk melindungi API tokenisasi dan detokenisasi dengan meminimalkan lokasi penyimpanan data data sensitif terenkripsi di brankas token, sehingga mencegah akses tidak sah atau tidak dapat disusupi (*attack surface*) tanpa akses ke sistem asal (Bian, 2025).

Penggunaan *blockchain* dengan sistem DLT yang tidak dapat diubah (*immutable*) menciptakan tantangan dalam perlindungan data (Akanfe et al, 2024; Bandi, 2025; Fernandez-Vazquez et al., 2023), khususnya pada aspek transparansi yang berpotensi mengorbankan privasi karena memungkinkan partisipasi tanpa batasan identitas (Zafar, 2025). Hal ini ditambah dengan kerentanan *cryptocurrencies* terhadap isu perlindungan konsumen, pencucian uang (*money laundering*), dan pembiayaan aktivitas ilegal (Ferreira, 2020; Katte, 2024). Selain itu, resistensi *blockchain* terhadap modifikasi data, termasuk kekakuan *smart contracts* (Shoaib, 2023), menyulitkan pemenuhan persyaratan hukum seperti GDPR yang memperkuat perlindungan hak individu atas perlindungan dan jaminan terhadap aliran bebas data pribadi (EUR-Lex - 52020SC0115 - EN - EUR-Lex, n.d.; Kuner et al., 2021 Laudon, 1996; Posner, 1980; Rieger et al., 2019) dan kewajiban

untuk melakukan koreksi atas kesalahan data (Daudén-Esmel et al., 2024; Finck et al., 2020; Haque et al., 2021). Oleh karena itu, kerangka regulasi dan mekanisme sanksi pelanggaran (*fraud misrepresentation*) yang jelas dalam tokenisasi karbon dapat memberikan jaminan hukum terhadap perlindungan data pengguna (Bandi, 2025; Lacity, 2022; Moore et al., 2013; Renwick et al., 2020; Trevor, 2010), khususnya jika rincian keuangan aktual investor terekspos yang mengancam keamanan transaksi keuangan dan merusak kepercayaan terhadap sistem keuangan digital (Bayram et al., 2022).

2.10.4 Legalitas VCMs

Ambisi transformatif *Paris Agreement* untuk membatasi laju kenaikan suhu global dengan berfokus pada pengurangan emisi GHGs, mendorong perusahaan untuk menetapkan target *net-zero* yang melebihi persyaratan hukum sehingga perusahaan menggabungkan mekanisme pengelolaan karbon melalui CCMs dan VCMs untuk memenuhi komitmen pengurangan emisi, baik yang bersifat regulatif atau sukarela (Blaufelder et al., 2021). VCMs berfungsi sebagai katalis yang membuka akses pendanaan baru bagi proyek-proyek mitigasi iklim dan mempercepat investasi melalui mekanisme pasar yang lebih fleksibel dibandingkan CCMs dengan memanfaatkan *blockchain* (Baruch et al., 2022). Meskipun demikian, legalitas dan efektivitas VCMs mendapatkan kritik karena belum terstandarisasi dengan arsitektur hukum dari *Paris Agreement* secara kredibel dan sah (Hermwille et al., 2016; Machnik et al., 2020; Nowak, 2022) serta belum ada kejelasan sejauh mana kredit karbon sukarela dapat memberikan kontribusi tambahan di luar *Nationally Determined Contribution* (NDC) yang sudah mencerminkan ambisi setinggi

mungkin (Michaelowa et al., 2019; Sim et al., 2024). Oleh karena itu, agar VCMs sah digunakan di bawah *Paris Agreement*, mekanisme *offset* harus mampu mendukung negara tuan rumah (*host country*) dalam memulai jalur transformasional dan pencapaian target *carbon neutrality*, serta tidak memperkuat ketergantungan pada pembangunan dengan emisi karbon tinggi (Carrillo et al., 2019; Kreibich et al., 2021; Qi et al., 2024).

Selain itu, legalitas VCMs berisiko terhadap *double claiming*, yaitu hasil mitigasi dari suatu proyek karbon diklaim oleh negara tuan rumah untuk pemenuhan NDC dan oleh pihak pembeli (negara lain atau entitas swasta) sebagai klaim netralitas karbon secara bersamaan (Gatti et al., 2019). Praktik ini dianggap sebagai salah satu bentuk *double counting* yang dapat merusak integritas lingkungan (*environmental integrity*), dan berpotensi meningkatkan emisi bersih global apabila *host country* menurunkan ambisi domestik atau permintaan terhadap produk berkarbon tinggi meningkat karena dipasarkan sebagai *carbon neutral* (Hood et al., 2014; Schneider et al., 2019). Hal ini menunjukkan bahwa VCMs belum sepenuhnya memiliki kerangka hukum dan legitimasi yang jelas dalam arsitektur hukum *Paris Agreement*, serta kemampuan untuk mengatasi tantangan berkaitan dengan informasi asimetris (Schmitz et al., 2005).

Legalitas dan kredibilitas VCMs juga sangat bergantung pada legitimasi standar sertifikasi seperti *Verified Carbon Standard* (VCS) milik Verra dan Gold Standard, karena regulasi formal yang mengikat masih lemah (Green, 2016; Hickmann, 2017; Merger, 2011; Philips et al., 2013), sehingga ketiadaan kerangka regulasi terpusat membatasi efektivitas, keberlanjutan dan perluasan pasar (Franki,

2022) serta adanya risiko fragmentasi dan penurunan kepercayaan (Sim et al., 2024), karena persaingan lembaga sertifikasi dengan beragam metodologi atau persyaratan (Kanwalroop et al., 2011; Merger et al., 2011; Michaelowa et al., 2018; Streck, 2021). ISDA (2021b) menekankan bahwa kejelasan hukum sangat dibutuhkan agar *secondary markets* (VCMs) dapat berfungsi dengan baik, termasuk dalam aspek legal, pajak, dan akuntansi kredit karbon serta memberi keyakinan kepada peserta pasar untuk menerima hak pribadi atau *personal rights (in personam)* dan hak kepemilikan atau *proprietary rights (in rem)* atas VCCs yang mereka beli (Sim et al., 2024).

Verra dan Gold Standard berperan sebagai mekanisme *self-regulation* yang menetapkan kredensial teknis dan prosedural untuk memastikan setiap kredit karbon mewakili pengurangan emisi yang sah dan nyata (Bumpus, 2010). Penelitian oleh Christiansen (2024) menyoroti krisis legitimasi akibat tekanan publik dan serangan hukum terhadap praktik *offset* yang tidak kredibel sehingga memaksa reformasi regulasi terhadap VCMs, seperti yang terjadi ketika banyak kredit Verra dikritik tidak valid, dan mendorong adopsi solusi MRV digital untuk memperkuat integritas pasar (Ahonen et al., 2022; Mehling, 2019; Michaelowa et al., 2019; Verra, 2021). Dalam hal ini, aspek utama dari legitimasi tata kelola VCMs adalah integritas dan transparansi dalam pengambilan keputusan (Gupta et al., 2016), yang memungkinkan bagi pemangku kepentingan untuk berinteraksi dengan institusi yang mengawasi sistem, sehingga memungkinkan munculnya peran individu dari bawah ke atas (*bottom-up*) (Spaargaren, 2013), meskipun dapat meningkatkan risiko hukum dan masalah reputasi (Battocletti et al., 2023). Selain

itu, evolusi VCMs sejak tahun 2020, menunjukkan bahwa pembentukan ruang regulasi informal melalui ICROA, VCM-WG, dan TSVCM sangat penting untuk menyusun tata kelola sukarela yang lebih kredibel (Kreibich et al., 2021, TSVCM, 2021). Dyck et al (2023) dan Ohta (2023) menunjukkan bahwa Verra menguasai lebih dari 70% dan Gold Standard di atas 16% dari kredit karbon VCMs secara global. Meskipun, sudah ada lembaga registri pada VCMs, tidak ada standar umum atau regulasi administratif federal yang menciptakan norma hukum untuk mengatur pengukuran dan verifikasi *offset*, sehingga kekuasaan pengawasan menjadi terdispersi karena otoritas regulasi dibagi antara berbagai badan federal dan aturan hukum umum yang dapat bertentangan pada kasus, pengadilan, dan yurisdiksi yang berbeda (Franki, 2021; Moromoke et al., 2024). Hal ini menegaskan dominasi dan pengaruh lembaga standarisasi dan verifikasi independen dalam membentuk struktur legal dan operasional pasar.

2.10.5 Token Kredit Karbon dalam Lanskap ESG

Tingkat partisipasi aktif lembaga keuangan dan insentif fiskal dalam mendukung proyek ESG berbasis token karbon menunjukkan transformasi menuju ekosistem investasi yang berkelanjutan dan terintegrasi (Acar, 2024; Mandas et al., 2023; Wang, 2024a). Penggunaan standar ESG di berbagai sektor telah mendorong perusahaan untuk mengadopsi prinsip keberlanjutan yang didukung oleh regulasi global, produk keuangan berbasis ESG, dan tuntutan investor terhadap investasi etis yang tidak hanya berorientasi pada keuntungan tetapi juga aspek lingkungan (Yu, 2024). Jain et al. (2019) menemukan bahwa standar ESG memberikan *return*

kompetitif, bahkan dalam kondisi pasar krisis, sehingga membuka peluang untuk tokenisasi indeks ESG sebagai instrumen investasi digital yang kredibel.

Dalam konteks tokenisasi karbon, keterlibatan lembaga keuangan dan dukungan fiskal menjadi fondasi penting untuk memperkuat legitimasi VCMs, meningkatkan nilai token berbasis reputasi ESG, dan mendorong transisi perusahaan menuju standar keberlanjutan global (Efthymiou et al., 2023). Menurut Lagodiyenko (2024), pajak tidak hanya menjadi instrumen fiskal, tetapi juga berperan sebagai indikator kontribusi sosial perusahaan. Kumari (2025) dan Huang et al. (2024), menegaskan bahwa penerapan insentif keuangan pemerintah seperti *green tax incentives* dan reformasi pajak (pengurangan atau potongan pajak, termasuk kredit pajak) (Wen et al., 2025) serta investasi dalam program CSR (Indriastuti et al., 2021; Singal, 2014) memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan kinerja dan tanggungjawab ESG perusahaan (Huang et al., 2024; Schramade, 2016; Zhang et al., 2024). Kredit pajak dan tarif *feed-in* (FITs) secara luas diakui sebagai alat yang efektif untuk mendorong pengembangan energi terbarukan (Elliot, 2024). Pendekatan terintegrasi ini tercermin dalam pengembangan standar dan praktik pelaporan keuangan (Cowan et al., 2024) dan keberlanjutan yang menggabungkan aspek finansial dan non-finansial, serta dalam adopsi model keuangan berkelanjutan di negara-negara OECD yang menunjukkan korelasi positif terhadap pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs) (Ferri, 2019; Jayaram et al., 2020; Oza, 2023; Ziolo et al., 2021), yang mendorong inovasi teknologi hijau (Li et al., 2022), meningkatkan investasi berkelanjutan melalui peningkatan ukuran perusahaan serta mempengaruhi tingkat pengambilan

risiko manajemen (Qi et al., 2024) dengan mengurangi hambatan fiskal (Tan et al., 2022; Xin, 2025) untuk mempercepat transisi perusahaan menuju standar ESG (Lagodiyenko et al., 2024).

Dari perspektif lembaga keuangan, keterlibatan bank dalam ESG dan tokenisasi karbon menunjukkan pergeseran peran institusi keuangan dari penyedia modal menjadi katalis keberlanjutan dan inovasi teknologi. Menurut laporan PwC (2024), bank memiliki peluang strategis untuk menciptakan produk keuangan *hybrid* baru seperti *green bonds*, *green loans*, *carbon baskets* dan *structured products* (Borodako; 2023) yang terhubung langsung dengan token karbon, untuk memperkuat reputasi dan daya saing di tengah meningkatnya kesadaran iklim. Shetty et al (2024) menunjukkan bahwa integrasi ESG pada sektor perbankan atau finansial dapat membantu dalam mengelola risiko, meningkatkan kepercayaan pelanggan, meningkatkan transparansi data, edukasi pasar, serta pemanfaatan teknologi untuk mendorong keberlanjutan sosial, meskipun masih menghadapi tantangan regulasi dan tuntutan akan undang-undang ESG yang lebih komprehensif (Acar, 2024; PwC, 2024; Wang, 2024b). Studi oleh *Bank of Singapore* dan EY (2023) menekankan bahwa bank yang tergabung dalam *Net Zero Banking Alliance* berperan aktif dalam mendukung VCMs melalui pembelian dan perdagangan kredit karbon, serta pengembangan platform digital untuk mitigasi emisi.

Di sisi lain, Leandro (2025) menunjukkan bahwa instrumen seperti NTN-G di Brasil, yang merupakan obligasi publik berbasis token karbon, dapat memperkuat reputasi institusional negara dan menarik investasi ESG global melalui keterlibatan bank sebagai fasilitator transaksi dan penjamin kredibilitas pasar.

Selain itu, bank berperan efektif sebagai oposisi bagi perusahaan utilitas atau industri dalam menjual sertifikat karbon dalam ETS, dengan melakukan *hedging* atas eksposurnya dengan membeli spot di pasar atau melalui lelang, untuk mengatasi ketidaksesuaian pasokan *spot* dan permintaan berjangka, sekaligus meminimalkan biaya transaksi kepatuhan, meningkatkan likuiditas, menstabilkan harga sertifikat karbon, serta memungkinkan perusahaan untuk merencanakan investasi strategis pada teknologi pengurangan emisi karbon (ISDA, 2021c).

Inovasi tokenisasi karbon melalui *blockchain*, seperti yang ditawarkan oleh konsep *Carboncoin* (Golding et al., 2022), menunjukkan bahwa instrumen digital berbasis reputasi ESG dapat memperkuat kredibilitas VCMs karena memberikan hak bagi produsen energi untuk mengeluarkan karbon dan tidak mengandalkan izin *off-chain* dan terpusat, sehingga produsen bebas menukar *Carboncoin* satu sama lain dengan mata uang fiat. Namun penelitian oleh Col et al (2016), Davis et al (2016) dan Guenther et al (2013), menunjukkan bahwa perencanaan pajak digunakan untuk mengoptimalkan kewajiban fiskal sekaligus meningkatkan reputasi ESG perusahaan, dengan melakukan penghindaran pajak melalui *tax havens* atau selisih akuntansi, bukan sebagai bentuk tanggung jawab sosial. Sebaliknya, Lanis et al (2014) menemukan bahwa perusahaan dengan kinerja *Corporate Social Responsibility* (CSR) yang tinggi memiliki kecenderungan untuk tidak melakukan penghindaran pajak. Dengan demikian, kombinasi antara peran aktif lembaga keuangan dan skema insentif fiskal menjadi faktor utama dalam mendukung keberhasilan proyek ESG berbasis token karbon serta memperkuat legitimasi VCMs dengan peran sentral bank yang tidak hanya

berfungsi sebagai perantara keuangan, tetapi juga sebagai arsitek ekosistem karbon digital yang transparan, likuid, dan terintegrasi dengan standar ESG global.

2.11 Tinjauan Literatur Empiris

Literatur terdahulu menjadi dasar penting dalam merumuskan kerangka teoretis pengembangan *tokenized carbon assets on-chain trading* berbasis *biocrypto* melalui VCMs. Penelitian sebelumnya banyak menyoroti potensi teknologi *blockchain* dalam meningkatkan transparansi, efisiensi, dan keandalan sistem perdagangan karbon. Tokenisasi aset karbon telah diidentifikasi sebagai mekanisme inovatif untuk meningkatkan likuiditas dan mempercepat transaksi dalam ekosistem VCMs. Meskipun demikian, penelitian yang secara spesifik mengintegrasikan konsep *biocrypto* ke dalam sistem perdagangan kredit karbon secara *on-chain* untuk mengukur likuiditas VCMs masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini berupaya mengisi celah tersebut dengan mengembangkan model yang menyatukan teknologi *blockchain*, mekanisme *on-chain trading*, dan sistem keuangan hijau *biocrypto* untuk meningkatkan likuiditas VCMs. Berikut adalah tabel yang merangkum penelitian terdahulu dalam tiga tahun terakhir yang relevan dan mendukung kerangka konseptual dalam studi ini

Tabel 2.11-1 Tinjauan Literatur Empiris

Judul	Sumber	Variabel Independen	Variabel Dependen	Metode	Pengukuran	Hasil	Gap	Implikasi
<i>Blockchain and tokenized carbon markets: Empirical evidence on market efficiency and transaction dynamics</i>	Haykel Tlili (2025)	- Adopsi <i>blockchain</i> (<i>tokenization events</i>) - Biaya transaksi	- Harga token - Volume Perdagangan	Analisis panel data harian	Kerangka <i>Difference-in-Differences fixed-effects</i> untuk mengukur dampak adopsi <i>blockchain</i> pada variabel pasar karbon digital	- Biaya transaksi yang lebih tinggi menjadi sinyal kepercayaan infrastruktur, meningkatkan keyakinan investor di pasar karbon berlikuiditas rendah - Adopsi <i>blockchain</i> memperkuat efisiensi harga dalam kondisi likuiditas tertentu namun memiliki efek jangka pendek terbatas pada volume perdagangan	Teknologi <i>blockchain</i> dapat meningkatkan efisiensi pasar dan kepercayaan, namun efek harga negatif pasca-tokenisasi yang menunjukkan adanya persepsi ketidakpastian atau distorsi harga terkait desain tata kelola platform yang belum sepenuhnya dijelaskan.	- Pembuat kebijakan dan pengembang harus meningkatkan komunikasi, penggunaan verifikasi pihak ketiga, dan keselarasan dengan standar internasional untuk membangun kepercayaan - Diperlukan standar tata kelola minimum seperti aturan pengungkapan, mekanisme audit, dan registri kredibel guna menjaga integritas lingkungan pada platform token karbon

<i>Trading Carbon Credit Tokens on the Blockchain</i>	Laurens Swinkels (2024)	- Mekanisme tokenisasi berbasis <i>blockchain</i> - Volume token karbon yang ditokenisasi dan dibakar - Jumlah dan aktivitas <i>wallet</i> (minting, burning) - Jenis token karbon	- Likuiditas VCMs - Harga token karbon di pasar sekunder - Korelasi harga token dengan harga proyek karbon - Volatilitas harga token	- Kuantitatif dengan Regresi Linier - Analisis empiris perdagangan token di <i>blockchain</i> - menggunakan data harga pasar	- Perbandingan harga token dengan harga kredit karbon tradisional - Jumlah token tCO₂e - Nilai turnover - Jumlah transaksi	- 3.8 juta tCO₂e ditokenisasi, 2.8 juta dibakar, 1 juta tersedia - Volume perdagangan \$21.2 juta - Likuiditas terbatas pada beberapa jenis token meski transparansi meningkat dan <i>turnover</i> signifikan - Harga token paling likuid sejalan dengan harga proyek karbon	- Minimnya studi empiris tentang efektivitas dan integrasi pasar karbon berbasis <i>blockchain</i> dengan pasar karbon tradisional - Belum diteliti integrasi token karbon dengan mekanisme keuangan lain ke DeFi atau derivatif (<i>swaps</i>, <i>hedging</i>)	- Integrasi token karbon dalam kerangka tata kelola keuangan iklim yang lebih luas dapat melindungi terhadap risiko spekulatif dan sistemik serta mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan - Potensi <i>blockchain</i> untuk mengurangi biaya intermediasi dalam pasar karbon - Validasi harga token menunjukkan integrasi pasar yang sehat - Perluasan studi ke platform lain dan analisis kualitas proyek
---	-------------------------	---	---	--	--	--	--	---

						serupa di luar platform		karbon sangat diperlukan
<i>Tokenized Carbon Credits in Voluntary Carbon Markets: The Case of KlimaDAO</i>	Alberto Ballesteros Rodríguez, Juan De-Lucio, & Miguel-Ángel Sicilia (2024)	- Tokenisasi kredit karbon melalui DAO (KlimaDAO) - Mekanisme <i>staking</i> dan <i>bonding</i> - Struktur insentif dan tata kelola berbasis komunitas	- Efisiensi dan transparansi perdagangan karbon - Partisipasi dan retensi pengguna - Stabilitas harga dan kapitalisasi pasar	- Studi kasus DAO (analisis data <i>on-chain</i> dan <i>governance</i> dari subgraph dan blockchain Polygon) - Evaluasi performa ekonomi, partisipasi pengguna, dan dinamika pasar	- Kapitalisasi pasar dan harga token \$KLIMA - <i>Total Value Locked</i> (TVL) - Volume <i>staking</i> dan <i>unstaking</i> - Jumlah dan pola pensiun kredit karbon - Distribusi kepemilikan token	- KlimaDAO berhasil meningkatkan adopsi awal pasar karbon digital - Aktivitas menurun seiring kematangan pasar dan tantangan retensi - Tingkat konsentrasi token tinggi di beberapa akun dan <i>treasury</i>	- Belum ada standar tata kelola dan interoperabilitas dalam pasar karbon ter-tokenisasi di VCMs berbasis DAO - Mekanisme insentif belum sepenuhnya mendukung partisipasi jangka panjang	- Diperlukan pengembangan kerangka regulasi dan standardisasi untuk menjaga legitimasi dan transparansi - Model tokenisasi karbon KlimaDAO dapat menjadi <i>benchmark</i>, namun harus didukung oleh sistem verifikasi dan partisipasi multi-pihak yang kuat, serta menjadi dasar untuk merancang sistem <i>tokenized carbon assets on-chain trading</i> yang lebih inklusif dan stabil melalui VCMs berbasis <i>biocrypto</i>

<i>Klima DAO: a crypto answer to carbon markets</i>	Michal Jirásek (2023)	- Desain organisasi DAO (desentralisasi, smart contract) - Teknologi blockchain - Token \$KLIMA sebagai cadangan berbasis karbon	- Transparansi dan efisiensi VCMs - Partisipasi komunitas - Likuiditas dan adopsi token \$KLIMA	Studi kasus eksploratif dan deskriptif terhadap organisasi KlimaDAO	- Volume token \$KLIMA yang diperdagangkan - Jumlah kredit karbon yang dikumpulkan - Partisipasi voting komunitas - Struktur organisasi DAO	- Klima DAO berhasil mengumpulkan 18 MtCO₂e dalam tahun pertama - Menjadi salah satu pemegang kredit karbon terbesar di VCMs	Minimnya penelitian akademik tentang DAO sebagai bentuk organisasi baru dan keterbatasan interaksi DAO dengan pihak non-kripto	- DAO dapat menjadi model organisasi baru untuk pasar karbon - Perlu regulasi dan tata kelola yang lebih kuat untuk menjamin akuntabilitas dan kepercayaan
<i>Tokenized Carbon Credits</i>	Derek Sorensen (202a)	- Standarisasi token - Metodologi substansi token karbon - Mekanisme pooling dan interoperabilitas lintas blockchain	- Likuiditas pasar karbon on-chain - Interoperabilitas antar proyek dan aplikasi - Efisiensi transaksi, transparansi VCMs	Studi literatur serta analisis deskriptif berbagai protocol dan proyek tokenisasi karbon di blockchain	Jumlah protokol yang interoperable, biaya & kecepatan transaksi	Tokenisasi meningkatkan transparansi, namun interoperabilitas terbatas	- Belum ada standar global untuk metodologi verifikasi karbon - Pooling belum mampu mempertahankan perbedaan nilai token secara dinamis - Fragmentasi pasar lintas blockchain masih tinggi	- Dibutuhkan <i>marketplace</i> terbuka untuk metodologi verifikasi karbon yang transparan dan dapat diverifikasi - Standarisasi metadata dan struktur token dapat mendukung interoperabilitas dan valuasi dinamis
<i>Structured Pools for Tokenized Carbon Credits</i>	Derek Sorensen (2023b)	Desain mekanisme <i>structured pools</i> (penggabungan token karbon NFT)	Likuiditas pasar dan stabilitas harga token karbon	Studi desain sistem dan analisis komparatif terhadap	- Volatilitas harga sebelum dan sesudah <i>pooling</i> - Tingkat likuiditas token	<i>Structured pool</i> yang diusulkan mampu mengatasi kelemahan pooling konvensional, meningkatkan	- Belum diuji secara empiris dalam pasar karbon nyata.	<i>Structured pool</i> dapat menjadi solusi teknis untuk meningkatkan

		ke dalam pool homogen dengan logika algoritma)		mekanisme <i>pooling</i>	karbon (<i>depth of liquidity</i>)	likuiditas dan mengurangi volatilitas harga token karbon	- Belum adanya mekanisme <i>pooling</i> yang optimal untuk token karbon berbasis NFT yang memiliki metadata unik dan tidak dapat dipertukarkan secara langsung.	efisiensi VCMs berbasis <i>blockchain</i> , mendukung adopsi lebih luas dan stabilitas pasar
<i>Design of Public Voluntary Carbon Market Mechanism based on Crosschain and Token Economics</i>	Hou et al (2022)	- Desain mekanisme VCMs - Model ekonomi <i>dual-token</i> (<i>utility</i> dan <i>governance token</i>) - Teknologi <i>crosschain</i> (<i>relaychain</i>)	- Efektivitas VCMs Partisipasi publik Keamanan dan isolasi sistem	Desain sistem dan pendekatan konseptual berbasis teknologi (<i>engineering design</i> dan sistem arsitektur)	- Struktur <i>logical architecture</i> (<i>workflow</i> , komunikasi informasi, aliran nilai) - Potensi insentif token terhadap partisipasi publik - Hasil simulasi isolasi dan keamanan antar operator dalam <i>Crosschain</i>	Mekanisme VCMs publik yang diusulkan, dengan memanfaatkan teknologi lintas rantai (<i>crosschain</i>) dan insentif ekonomi token (<i>dual-token</i>), secara efektif meningkatkan partisipasi publik dan mengurangi emisi di kota-kota modern serta memastikan keamanan sistem.	- Desain pasar karbon publik berbasis <i>blockchain</i> belum diuji implementasi dalam skala besar, sehingga belum ada evaluasi empiris atau belum terbukti efektivitas insentif <i>dual-token</i>	- Potensi besar untuk meningkatkan partisipasi publik dalam pengurangan emisi - Desain ini dapat menjadi dasar pengembangan sistem karbon digital yang aman dan terdesentralisasi
<i>Governance of ReFi Ecosystem and Integrity of Voluntary Carbon Markets</i>	Carlos Andres Diaz Valdivia & M. Poblet Balcells (2022)	- Infrastruktur <i>blockchain</i> (Ethereum, Cosmos) - Model <i>governance</i> atau desain DAO dan	- Integritas tata kelola VCMs Efisiensi, transparansi dan akuntabilitas	Analisis kualitatif berbasis dokumen (<i>whitepapers</i> proyek ReFi atau tokenisasi	- Mekanisme voting DAO, keterlibatan komunitas, distribusi kekuasaan <i>governance</i>	- DAO memperkuat transparansi dan partisipasi - Proyek ReFi berbasis <i>blockchain</i> menunjukkan janji untuk akuntansi dan	- Belum ada standar tata kelola global terpadu untuk mekanisme penyelesaian	- Perlu pengembangan kerangka tata kelola yang lebih kuat untuk ReFi agar integritas pasar

		Dapps berbasis ReFi	sistem karbon berbasis ReFi	karbon: Celo, Regen, Toucan, Klima, Moss)	- Kepatuhan terhadap prinsip Ostrom (batasan, aturan internal, <i>monitoring</i> , pengakuan hak)	perdagangan karbon berbiaya transaksi rendah, tetapi beberapa prinsip masih <i>ad-hoc</i> atau sedang berlangsung, serta mekanisme sanksi dan resolusi konflik masih lemah	sengketa ReFi dalam VCMs	karbon tetap terjaga
		- Tokenisasi aset fisik dan otomatisasi <i>smart contracts</i>			- Identifikasi praktik <i>ad-hoc</i> dalam tata kelola		- Praktik DAO masih dalam tahap eksperimental dan belum sepenuhnya sepenuhnya <i>Ostrom-compliant</i>	- Tokenisasi dan otomatisasi dapat meningkatkan koordinasi, dengan mekanisme pengawasan dan akuntabilitas yang jelas
Carbon Credits Meet Blockchain – Cryptocarbon Projects	Gordon Kuo Siong Tan (2024)	- Tokenisasi karbon menggunakan teknologi <i>blockchain</i> dalam proyek <i>cryptocarbon</i>	- Tata kelola VCMs	Analisis dokumen (<i>white papers</i>) dan studi kasus proyek <i>cryptocarbon</i>	- Transformasi kredit karbon menjadi aset kripto	- <i>Blockchain</i> mempercepat tokenisasi karbon, tetapi orientasi lebih ke <i>profit</i> dibanding manfaat iklim	- Belum ada model keseimbangan antara insentif finansial dan <i>outcome</i> iklim nyata	- Diperlukan pengembangan desain mekanisme tokenisasi karbon seperti model <i>tokenized carbon assets on-chain trading</i> yang lebih bertanggung jawab dan berorientasi pada keberlanjutan
		- Mekanisme finansialisasi berbasis algoritma	- Keterkaitan spasial antara kredit karbon dan proyek konservasi iklim proyek <i>cryptocarbon</i> (orientasi proyek pada <i>profit</i> vs dampak iklim)		- Pola sirkulasi aset karbon di pasar kripto	- <i>Blockchain</i> mempercepat finansialisasi pasar karbon	- Kurangnya kajian kritis terhadap dampak tata kelola dari finansialisasi karbon berbasis <i>blockchain</i>	yang lebih bertanggung jawab dan berorientasi pada keberlanjutan
					- Dampak terhadap tujuan iklim dan tata kelola	- Kredit karbon diubah menjadi berbagai bentuk aset kripto	- Belumlah ada standar untuk menjaga integritas lingkungan dalam tokenisasi aset karbon	- Regulasi dan tata kelola harus mengimbangi inovasi teknologi untuk
						- Tata kelola VCMs berisiko memburuk karena orientasi profit dan hilangnya keterkaitan spasial dengan proyek		

						konservasi yang mendasari		mencapai tujuan iklim
<i>Pricing and Valuation of Carbon Swap in Uncertain Finance Market</i>	Zhe Liu & Yanbin Li (2024)	- Model matematis carbon swap berbasis <i>uncertain differential equation</i> (<i>uncertain DEs</i>) - Parameter pasar: tingkat bunga bebas risiko, waktu kontrak, harga awal	- Harga tetap dalam kontrak <i>swap</i> karbon - Nilai pasar <i>swap</i> selama masa kontrak (nilai wajar) - Akurasi estimasi nilai <i>swap</i>	- Pemodelan matematis berbasis <i>uncertain differential equations</i> - Estimasi parameter menggunakan metode momen dan data aktual	- Formula valuasi <i>swap</i> karbon - Uji ketidakpastian terhadap data harga <i>spot</i> karbon Analisis sensitivitas model	- Model berhasil menghitung harga dan valuasi <i>swap</i> karbon secara akurat dalam kondisi pasar yang tidak pasti - Validasi dilakukan dengan data harga <i>spot</i> dari <i>European Energy Exchange</i>	- Belum dikaitkan dengan tokenisasi dan <i>blockchain</i>; hanya berfokus pada teori finansial - Terbatasnya pendekatan non-probabilistik dalam valuasi derivatif karbon - Belum banyak studi yang menggunakan <i>uncertainty theory</i> untuk instrumen keuangan karbon	<i>Carbon swap</i> dapat digunakan sebagai instrumen utama dalam tokenisasi karbon dalam <i>blockchain</i> VCMS
<i>Credit default swaps and corporate carbon emissions in Japan</i>	Tatsuyoshi Okimoto & Sumiko Takaoka (2024)	- Emisi karbon perusahaan - Ukuran pendapatan perusahaan (<i>corporate revenue size</i>) - Tekanan investor diukur dari jumlah signatory PRI	- CDS <i>spreads</i> (selisih <i>swap</i> risiko kredit perusahaan) - CDS <i>spread curve</i> (kurva selisih CDS: jangka pendek, panjang, dan slope)	Kuantitatif empiris berbasis data panel, dengan pendekatan regresi dan analisis kurva CDS	- <i>Carbon emissions</i>: Total emisi (Scope 1, 2, dan 3) dalam ton CO₂e. - Investor pressure: Jumlah investor yang menjadi signatory pada UN PRI.	- Ukuran pendapatan perusahaan adalah faktor paling signifikan dalam menentukan emisi karbon. - Tekanan dari investor menurunkan emisi karbon, terutama pada perusahaan	Belum ada integrasi antara carbon pricing dan teknologi <i>blockchain</i> dan tokenisasi dalam konteks VCMs.	Menunjukkan bahwa <i>carbon risk</i> sudah mulai dipricing oleh pasar keuangan yang memberi peluang untuk tokenisasi emisi karbon sebagai instrumen keuangan baru berbasis

					- CDS spreads: Harga pasar atas risiko gagal bayar perusahaan. - CDS spread curve: Perbedaan antara CDS jangka pendek dan panjang	- dengan rating investasi tinggi. - Emisi karbon memiliki efek yang berubah-ubah terhadap CDS spreads, mendukung hipotesis investor awareness. - Emisi karbon lebih diperhitungkan dalam sektor yang transisinya ke energi bersih lebih mudah dan murah. - Emisi karbon memengaruhi kurva CDS: semakin tinggi emisi, semakin curam kurva CDS yang meningkatkan risiko jangka panjang.	blockchain VCMs.	
<i>A Digital Crypto Asset Based on Ecological Footprint to Achieve Climate Neutrality</i>	Stefania Amato, Agata Matarazzo, Valentina Riolo, Gaetano Giuseppe Russo, & Annamaria	- Pengurangan Ecological Footprint (gHa) - Adopsi teknologi blockchain - Partisipasi dalam proyek energi efisien	- Likuiditas dan transparansi pasar agrifood - Perubahan perilaku berkelanjutan - Investasi hijau	- Studi konseptual dan eksploratif - Studi kasus (Efforce, SolarCoin, Carbon Token San Marino) - Analisis literatur dan	- Jejak ekologis dalam satuan <i>global hectare</i> (gHa) - Efisiensi energi yang ditokenisasi - Dampak lingkungan dari	- Pengurangan <i>Ecological Footprint</i> yang ditokenisasi dinilai efektif untuk mempercepat netralitas iklim dan pembangunan berkelanjutan (SDGs) dengan	- Belum ada regulasi jelas untuk <i>Ecological Footprint credits</i> - Risiko legal, teknis, dan privasi belum teratasi - Volatilitas harga <i>crypto</i>	- Perlu kerangka hukum dan regulasi untuk mendukung tokenisasi jejak ekologis - Potensi besar untuk pembiayaan

	Noemi Vella (2021)	- Desain smart contract	- Efisiensi energi dan pengurangan emisi	teknologi blockchain	smart contract berbasis crypto	meningkatkan likuiditas, transparansi, aksesibilitas, dan standarisasi dalam sektor agrifood melalui aset digital berbasis <i>blockchain</i> . - Penerapan blockchain menghadapi berbagai risiko serius seperti: risiko hukum dan regulasi. teknis, protocol, privasi, pasar serta keamanan siber.		proyek hijau melalui DeFi
<i>Crypto-asset Market Regulation and Sustainable Development Goals</i>	Witold Srokosz (2024)	Regulasi aset kripto (yang berlaku dan yang diusulkan, MiCA dan regulasi nasional)	- Pengurangan konsumsi energi <i>blockchain</i> - Kontribusi terhadap pencapaian SDGs	Metode dogmatis-hukum (analisis yuridis terhadap regulasi yang ada dan rancangan regulasi)	- Adanya ketentuan eksplisit tentang konsumsi energi - Keterkaitan regulasi dengan indikator SDGs - Efek terhadap efisiensi energi dan perlindungan konsumen	Regulasi tidak secara langsung mengatur konsumsi energi <i>blockchain</i> yang digunakan untuk menerbitkan dan memperdagangkan aset kripto serta tidak secara langsung berkontribusi pada pembatasan emisi GHGs. Namun, berkontribusi pada pencapaian SDGs lainnya melalui perlindungan	- Minimnya regulasi yang secara eksplisit mengatur konsumsi energi <i>blockchain</i> - Belum ada integrasi antara regulasi aset kripto dan hukum energi	- Perlu regulasi khusus dalam hukum energi untuk mengatur konsumsi energi <i>blockchain</i> - Regulasi aset kripto dapat mendukung prinsip SDGs

<i>Carbon Credits and Offsetting: Navigating Legal Frameworks, Innovative Solutions, and Controversies</i>	Karthik Gupta (2024)	- Kerangka hukum dan regulasi (nasional, internasional, dan sektoral) - Teknologi baru (AI, remote sensing, blockchain, CCUS) - Solusi berbasis alam (REDD+, reforestasi, pengelolaan hutan) - Inisiatif sektoral (offsetting penerbangan dan maritim) - Inovasi kebijakan (CBAM)	- Efektivitas dan integritas pasar karbon - Pengurangan emisi GHGs - Keadilan distribusi	Analisis kualitatif dengan - Teori hukum lingkungan internasional - Teori ekonomi pasar karbon - Studi kasus (REDD+, CORSIA, CCUS) - Data empiris dan analisis kebijakan	- Evaluasi terhadap keberhasilan, tantangan, dan dampak nyata dari sistem perdagangan karbon - Analisis regulasi dan teknologi	konsumen, efisiensi sistem, dan penguatan institusi - Pasar karbon menawarkan solusi efisien untuk pengurangan emisi, tetapi masih menghadapi kritik terkait integritas lingkungan dan etika - Proyek <i>offset</i> sering gagal memenuhi prinsip tambahanitas dan permanensi - Teknologi seperti AI dan blockchain dapat meningkatkan transparansi dan akurasi - Regulasi yang tidak seragam menyebabkan fragmentasi dan risiko <i>double-counting</i>	- Kurangnya harmonisasi standar global untuk <i>offsetting</i> serta pemanfaatan <i>blockchain</i> dan tokenisasi kredit karbon - Tantangan dalam menghubungkan pasar karbon lintas negara	Diperlukan reformasi hukum, inovasi kebijakan, dan kolaborasi lintas sektor untuk memperkuat pasar karbon sebagai instrumen iklim yang kredibel dan adil
--	----------------------	---	--	---	---	--	---	--

Sumber: Penulis (2025)

Dengan mengintegrasikan studi empiris terdahulu, memberikan dasar yang komprehensif untuk membantu proses menemukan wawasan baru yang sejalan dengan data yang ada, sehingga memberikan kepercayaan pada studi ini dengan memastikan bahwa asumsi dan kesimpulannya didukung oleh sumber data ilmiah yang secara historis dapat diandalkan, sehingga meningkatkan integritas dan keandalan tesis ini.

2.12 Model Hipotesis

2.12.1 Pengaruh *Tokenized Carbon Assets On-chain Trading* terhadap Likuiditas VCMs.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa aktivitas pasar, yang tercermin dalam ukuran transaksi, berperan penting dalam membentuk volume perdagangan. Cheng (2005, 2006) dan Pichl (2006) menjelaskan bahwa faktor biaya transaksi dan struktur pasar terbukti memengaruhi hubungan antara volume perdagangan dan harga aset, di mana peningkatan jumlah transaksi mendorong aktivitas perdagangan yang lebih tinggi. Penelitian lain oleh Lee et al. (2025) dan Liu et al. (2010) menemukan bahwa *supply*, nilai transaksi dan distribusi aset juga berdampak pada dinamika volume perdagangan karena menentukan ketersediaan instrumen bagi investor. Lebih jauh, volume dan nilai transaksi secara konsisten berhubungan positif dengan fluktuasi harga, *abnormal return*, serta pergerakan indeks pasar (Bhattacharya et al., 2016; Epps, 2009; George et al., 1994; Najiatun et al., 2022; Salim et al., 2022). Studi berbasis teori gelombang probabilitas dan model GARCH oleh Shi (2005, 2006) dan Takaishi et al. (2016), juga menegaskan bahwa volume dan nilai transaksi mencerminkan intensitas informasi di pasar, yang berpengaruh

pada volatilitas serta peningkatan volume perdagangan. Dalam konteks *digital economy* dan pasar kripto, nilai transaksi dan jumlah transfer terbukti memperbesar likuiditas dan volume perdagangan (Ante, 2020; Liu et al., 2023). Bahkan, prediksi harga dan analisis legalitas transaksi memperlihatkan bahwa nilai transaksi menentukan tingkat volume perdagangan (Bhaduri, 2000; Chen, 2011). Sedangkan, penelitian berbasis manajemen transaksi dalam perdagangan komoditas oleh Shaju et al. (2023) menemukan bahwa *lot size* atau nilai per transaksi menjadi kunci utama dalam menentukan volume transaksi yang terjadi dan meningkatkan akurasi prediksi volume perdagangan serta efektivitas strategi pasar.

Selain itu, konsep *value area* dalam *market profile* juga menegaskan keterkaitan antara *supply*, *demand*, dan volume perdagangan. Penelitian oleh Chutka et al. (2021) menunjukkan bahwa area dengan volume perdagangan tinggi membentuk *value area* dengan kecenderungan pasar untuk bertahan karena sebagian besar permintaan dan penawaran terpenuhi. Selanjutnya, Chitaley et al (2010) menegaskan bahwa *price range* dapat ditentukan berdasarkan volume transaksi historis yang sebanding dengan volume perdagangan yang diinginkan, sehingga volume transaksi historis maupun aktual berperan penting dalam menentukan volume perdagangan. Berdasarkan bukti empiris dari penelitian terdahulu, aktivitas pasar yang tercermin dari *total supply*, volume dan nilai transaksi berkorelasi dengan dinamika pasar dan likuiditas perdagangan. Semakin tinggi *total supply* yang tersedia, semakin banyak transaksi dilakukan, dan semakin besar nilai transaksi, maka semakin tinggi volume perdagangan

Penelitian lain yang berhubungan dengan pengaruh antara *total supply*, volume transaksi, nilai transaksi, volatilitas, dan likuiditas menunjukkan heterogenitas hasil temuan. Studi oleh Makarov et al. (2020) dan Pagnotta et al. (2020) menyoroti bahwa likuiditas di pasar kripto sangat dipengaruhi oleh volatilitas harga antar bursa. Menurut Kharif (2017) dan Scaillet et al. (2020), transaksi Bitcoin dalam jumlah besar yang dilakukan oleh para *whale* (entitas dengan dominasi aset kripto) juga berpengaruh pada tingginya volatilitas pasar meskipun hanya dengan satu transaksi. Penelitian oleh Antulov-Fantulin et al. (2018) menemukan bahwa volatilitas jangka pendek dapat diidentifikasi langsung dari *blockchain* melalui representasi graf volume transaksi harian Bitcoin atau model *Synthesizer Transformer* berbasis *deep learning* menggunakan data *on-chain* (CryptoQuant) (Herremans et al., 2022; Tay et al., 2020) untuk memprediksi harga saham (Ding et al., 2020; Kim et al., 2022; Liu et al., 2019; Zhang et al., 2022) dan lonjakan volatilitas (Katsiampa, 2017; Bergsli et al., 2022) pada Dogecoin (Sridhar et al., 2021) dan Bitcoin (Jain, 2019) sebagai *early warning indicator* (EWIs).

Bakhtiar et al. (2023) mengkaji penggunaan Hukum Metcalfe untuk mengidentifikasi pengaruh *wallet* aktif, volume transaksi, dan pasokan beredar (*circulation supply*) terhadap fitur *store-of-value* yang berpengaruh secara signifikan dalam menurunkan volatilitas harian stablecoin, dan sebanding dengan volatilitas emas sebagai aset lindung nilai. Fidan et al. (2022), menjelaskan bahwa volatilitas antar aset kripto menunjukkan pola *transmission* dan *asymmetric effects* serta dipengaruhi oleh aktivitas transaksi dan distribusi pasokan yang berdampak pada stabilitas harga dan kedalaman pasar (Bakhtiar et al., 2023; Cong et al. 2021;

Liu et al., 2022), sedangkan nilai transaksi yang besar mempercepat perputaran uang kripto dan menambah tekanan harga (Pernice et al., 2019).

Ciaian et al. (2015) dan Kanamura (2009) menekankan bahwa volatilitas harga energi dapat dijelaskan oleh hubungan *supply-demand*, 173tatis terdapat perubahan mendadak dalam permintaan atau gangguan dalam pasokan, harga menjadi lebih fluktuatif. Dan Katsiampa (2017) menggunakan model GARCH menegaskan bahwa Bitcoin sebagai determinan utama volatilitas yang lebih menyerupai aset spekulatif karena tingginya 173tatist volatilitasnya dan *return* yang dipicu oleh keterbatasan pasokan tetap, sehingga harga sangat 173tastic terhadap perubahan permintaan (Baur, 2017; Cheah et al., 2015; Grinberg, 2011). Sementara itu, Phillip et al. (2019) dan Bariviera et al. (2017) mengidentifikasi bahwa volatilitas kripto memiliki pola *long memory* yang berosilasi, berbeda dari aset fiat dengan peluruhan yang stabil, mengindikasikan pengaruh aktivitas pasar terhadap fluktuasi harga jangka panjang.

Model *Mixture of Distribution Hypothesis* (MDH) memberikan pemahaman mengenai perilaku volume dan volatilitas dengan merujuk pada kedua variabel sebagai campuran aliran informasi (Darolles et al., 2017). Studi oleh Gursoy et al. (2008), mengemukakan bahwa total volume transaksi 173tatis proksi yang buruk untuk aliran informasi di pasar saham negara berkembang, meskipun demikian volume perdagangan yang tidak terduga (*surprise volume*) menunjukkan hubungan yang signifikan dengan volatilitas bersyarat (*conditional volatility*). Bajzik (2021), Belhaj et al. (2015), Bouri et al. (2016), Koesoemasari, et al. (2017), Sutrisno (2017), dan Yamani (2023), menemukan hubungan 173tastic173173 volume dan

return (volatilitas), namun (Bouri et al., 2019) efek ini hanya terjadi jika volatilitas harga rendah dan bergantung pada jenis metodologi penghitungan, serta dipengaruhi oleh asimetri dan ketidakteraturan jaringan (Walden, 2018).

Gkillas et al. (2021) menemukan adanya korelasi antara aktivitas transaksi *on-chain* dan volatilitas. Hal yang sama juga dikemukakan oleh Raheman et al. (2021) dalam manajemen portofolio kripto data *on-chain* digunakan untuk memprediksi tren harga dan volatilitas. Volume transaksi telah terbukti secara konsisten meningkatkan likuiditas di berbagai pasar (seperti obligasi, valuta asing (FX) dan pasar berjangka), terutama pada saham berkapitalisasi besar atau yang diperdagangkan dengan frekuensi tinggi yang lebih efisien dalam merespons informasi, sehingga mengurangi persistensi volatilitas saham kecil dengan likuiditas rendah (Bian et al., 2020; Bogousslavsky et al., 2019; Gebka, 2005; Hotchkiss et al., 2017; Karaa et al., 2018; Negrea et al., 2008; Sensoy et al., 2019; Park, 2022; Viratama et al., 2022). Sebaliknya, Bentouir et al. (2022) menunjukkan bahwa volatilitas yang tetap tinggi dan persisten, menunjukkan ketidakstabilan dalam pasar. Sedangkan Girard et al. (2007), menemukan hubungan negatif antara volume yang diharapkan (*expected volume*) dan volatilitas di beberapa pasar negara berkembang, yang mencerminkan inefisiensi di pasar tersebut. Penelitian lain di Bursa Efek Indonesia (BEI) oleh Widowati (2013) dan Zulfikar (2013), menunjukkan bahwa semakin besar volume transaksi, semakin tinggi likuiditas, sementara volatilitas *return* justru menurunkan likuiditas. Toe et al. (2022) menyoroti efek *lagged volume* sebagai pendorong volatilitas di pasar Afrika, sedangkan Girard et al (2017) menunjukkan

bahwa dekomposisi volume menjadi komponen ekspektasi dan kejutan (*shocks*) dapat menjelaskan persistensi volatilitas di pasar negara berkembang. Meskipun 175 statistik persistensi volatilitas harian rendah atau menurun, volume transaksi secara signifikan meningkatkan dan membentuk dinamika volatilitas harga. Berbeda dengan penelitian pada pasar ekuitas BRIC oleh Naik et al. (2015) yang menemukan bahwa asimetri volatilitas yang substansial dengan volume transaksi kontemporer secara signifikan berhubungan dengan volatilitas, tetapi volume perdagangan tidak mengurangi persistensi volatilitas.

Penelitian oleh Nurcahyani et al. (2022), menemukan bahwa tingginya volume transaksi saham, diikuti dengan volatilitas harga saham yang tinggi, yang sekaligus menunjukkan tren pergerakan harga (*up-down trend*) dan kehati-hatian dalam perilaku perdagangan serta praktik manajemen risiko yang lebih baik (Naik et al., 2017). Pasar ekuitas BRIC menunjukkan asimetri volatilitas yang substansial, dengan volume perdagangan kontemporer secara signifikan terkait dengan volatilitas, tetapi volume perdagangan tidak mengurangi persistensi volatilitas. Sedangkan, Sudewi et al. (2019) menunjukkan hal yang berbeda, yaitu volume dan suku bunga memiliki efek positif terhadap volatilitas harga saham di Bursa Efek London, namun tidak mempengaruhi volatilitas harga saham di Bursa Efek Indonesia. Hal yang sama diungkapkan oleh Luo (2021), yang menemukan tidak ada hubungan antara volume dan volatilitas dalam pasar berjangka minyak mentah. Di pasar komoditas ternak, volume transaksi yang tinggi mampu menurunkan biaya likuiditas melalui *bid-ask spread* yang lebih sempit, meskipun volatilitas juga meningkat seiring dengan naiknya volume transaksi (Corbet et al., 2019; Frank,

2011). Di pasar saham AS, volume transaksi dan likuiditas berbanding lurus, tetapi volatilitas *order imbalance* menjadi faktor yang signifikan dalam menentukan risiko likuiditas (Bogousslavsky et al., 2019; Chordia et al., 2019). Penelitian lain oleh Hsieh (2014), Huson et al. (2020), Naik et al. (2018), dan Supriati et al. (2019) secara konsisten menemukan bahwa volume memiliki dampak positif dan signifikan secara statistik terhadap volatilitas pengembalian saham, sehingga memperkuat validitas volume transaksi sebagai faktor penting dalam menjelaskan dinamika volatilitas di berbagai pasar keuangan.

Chan et al. (2000) memperdalam analisis mikrostruktur dengan menilai ukuran transaksi, jumlah transaksi, dan ketidakseimbangan pesanan (*balance order*), serta menyimpulkan bahwa volatilitas memiliki hubungan positif dan signifikan terhadap volume transaksi, sehingga memperkuat peran volatilitas dalam meningkatkan likuiditas. Hasil penelitian ini sejalan dengan Pereira et al. (2010) dan Kalimipalli et al. (2012), yang menyatakan bahwa volatilitas tinggi dapat menarik investor yang toleran terhadap risiko dan meningkatkan likuiditas baik di pasar saham maupun obligasi. Namun, hasil yang bertolak belakang dengan Chung et al. (2002) serta Wahyuliantini et al. (2015), yang menunjukkan bahwa volatilitas tidak memiliki hubungan signifikan terhadap likuiditas, sehingga menekankan pentingnya konteks pasar, jenis aset, dan perilaku investor dalam membentuk dinamika likuiditas.

Secara konseptual, *total supply* yang terdistribusi luas dapat mengurangi fluktuasi harga, sementara volume dan nilai transaksi yang tinggi mendorong partisipasi pasar yang lebih aktif dan memperkuat kedalaman likuiditas. Hal ini

sejalan dengan teori *market microstructure* (O'Hara, 1995) yang menyatakan bahwa intensitas perdagangan dan distribusi pasokan berperan penting dalam menentukan kedalaman pasar dan stabilitas harga, serta didukung oleh bukti empiris dari pasar kripto, saham, dan komoditas (Baur, 2017; Katsiampa, 2017; Widowati, 2013; Corbet et al., 2019). Oleh karena itu, diasumsikan bahwa volume dan nilai transaksi yang tinggi, serta *total supply* yang terdistribusi secara optimal berkontribusi pada penurunan volatilitas dan peningkatan likuiditas, sehingga hipotesis penelitian dirumuskan sebagai berikut:

Sedangkan, *bid-ask spread* merupakan salah satu indikator utama dari likuiditas pasar, yang mencerminkan biaya transaksi dan asimetri informasi antara pelaku pasar. Penelitian mengenai *spread intraday* saham di pasar Chile oleh Fuente-Mella et al. (2017), menemukan bahwa *quantity supplied* dan karakteristik broker berpengaruh signifikan terhadap *bid-ask spread*. Nath et al. (2017) juga menemukan hubungan signifikan antara *bid-ask spread* dan faktor-faktor penentunya, seperti ketidakseimbangan pesanan, eksekusi transaksi, volatilitas, dan volume perdagangan dalam konteks perdagangan intraday di pasar surat utang pemerintah. Paital et al. (2016) menemukan hubungan antara volatilitas dengan volume dan *spread* yang lemah yang menggambarkan ketidakefisienan informasi di pasar India. Hal yang sama juga diungkapkan oleh Liu et al. (2016), yang menunjukkan hubungan positif antara *bid-ask spread* dan volatilitas, serta hubungan negatif dengan volume perdagangan. Bessembinder (2003) menekankan bahwa peningkatan nilai transaksi (*dollar trading volume*) berkorelasi negatif dengan *bid-ask spread* di pasar obligasi korporasi AS, yang mendukung gagasan

bahwa intensitas transaksi mempersempit *spread* melalui peningkatan efisiensi informasi. Prinsip *market microstructure invariance* oleh Kyle et al. (2016), menunjukkan bahwa ukuran dan frekuensi transaksi memiliki hubungan sistematis dengan biaya transaksi dan volatilitas, sehingga pasar dengan kedalaman tinggi (*market dept*) dan *supply* yang besar cenderung menunjukkan efisiensi dan stabilitas harga serta *spread* yang lebih rendah secara struktural.

Sebaliknya, ketika *supply* aset terbatas atau perdagangan terfragmentasi di berbagai bursa, biaya *inventory* dan risiko *adverse selection* meningkat, sehingga *spread* cenderung melebar (Hagströmer et al., 2016). Naiknya volume perdagangan berpengaruh terhadap tingkat *bid ask spread* suatu saham (Shobriati et al., 2013; Rosdiana, 2019, Kurniawan et al., 2019; Perdana et al., 2014; Ulfaniza et al., 2017; Alkusani et al., 2020). Chordia et al. (2000) secara empiris menunjukkan bahwa ketidakseimbangan *order flow* atau *order imbalance* berdampak langsung pada *spread* dan *return*, di mana volume tinggi dapat meningkatkan risiko *inventory* dan memperlebar *spread*. Barclay et al. (1993) menambahkan bahwa ukuran transaksi besar sering kali membawa informasi, sehingga *spread* cenderung melebar untuk melindungi *market maker* dari potensi kerugian dan dampak harga akibat informasi tersembunyi. Chekili et al. (2013) dalam konteks pasar Tunisia dan Lee (1998) di pasar modal Malaysia (KLSE), menunjukkan bahwa perusahaan atau aset kecil dengan *free float* rendah cenderung memiliki *spread* lebih lebar karena likuiditas rendah, sementara penurunan biaya transaksi melalui peningkatan volume perdagangan dan arus pesanan dapat mempersempit *spread* dengan meningkatkan frekuensi pasar dan efisiensi likuiditas. Copeland et al. (1983) dan Riedl et al.

(2009) menambahkan bahwa *asimetri informasi* tetap membuat *market maker* memperlebar *spread* meskipun *supply* besar, sebagai bentuk proteksi dari potensi kerugian karena trader yang memiliki informasi superior.

Penelitian oleh Ningrum (2022) dan Rengifuryaan et al. (2019) menjelaskan variabel volume transaksi berpengaruh secara signifikan terhadap *bid-ask spread*. Sedangkan Dewi et al. (2015), Surya (2016), dan Zatira et al. (2022), menemukan bahwa volume transaksi tidak berkorelasi dengan *bid-ask spread* atau parsial (Rosdiana, 2019). Namun, penelitian oleh Narayan et al. (2015), Putri et al. (2024) dan Utami et al. (2020) menunjukkan bahwa volume transaksi suatu sekuritas memberikan pengaruh positif pada *bid-ask spread*. Semakin tinggi *bid-ask spread* menngindikasikan saham sulit untuk diperdagangkan atau aktivitas perdagangan yang menurun sehingga likuiditas saham rendah. Studi oleh Bogousslavsky et al. (2019) terhadap saham AS, menemukan bahwa pada saham berkapitalisasi besar, *bid-ask spread* berkorelasi positif dengan volume perdagangan, bahkan setelah mengontrol volatilitas, terutama didorong oleh komponen volume sistemik (*common component*), yang mencerminkan tekanan likuiditas pasar secara luas. Penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi volume, maka semakin lebar *spread*-nya. Temuan ini sejalan dengan mekanisme *inventory risk* (Bollen et al., 2004; Hasbrouck, 1991) pada teori *inventory channel*, yang menjelaskan bahwa peningkatan volume dan nilai transaksi memperbesar eksposur risiko untuk *market maker*, sehingga mereka menaikkan *spread* untuk mengkompensasi ketidakpastian posisi yang bertujuan untuk mengurangi konsesi harga. Selain itu, volatilitas dari *order imbalance* juga terbukti sangat berkorelasi dengan *spread*, sehingga

memperkuat argumen bahwa tekanan satu sisi pasar akibat lonjakan pasokan (*total supply*) dapat memperlebar *spread*. Easley et al. (1996) menyoroiti perdagangan berbasis informasi, yaitu semakin tinggi probabilitas informasi (risiko asimetri), volume perdagangan menurun yang menyebabkan investor harus menyimpan saham dalam waktu yang lama sehingga meningkatkan biaya *inventory holding* dan menyebabkan *bid-ask spread* yang tinggi. Investor atau trader mengelola inventori kas dan saham melalui aktivitas jual beli saham secara berkelanjutan dalam suatu sistem yang dinamis, dimana perintah beli akan mengurangi inventori kas, sedangkan perintah jual akan meningkatkan inventori kas (Pan et al, 2021).

Penelitian oleh Fadilah et al. (2023), Frieder et al. (2006), Hamidah (2018), Khoirayanti et al. (2020), Napitulu (2013), Paramita et al. (2014), dan Rio et al., 2020, menemukan bahwa volume mempunyai pengaruh negatif signifikan terhadap *bid-ask spread*. Hubungan negatif antara *spread* dengan jumlah transaksi dan volume transaksi menunjukkan bahwa *spread* akan lebih rendah ketika jumlah transaksi dan volume perdagangan lebih tinggi, sejalan dengan temuan dari Giouvris et al. (2008) dan Heflin et al. (2000). Volume transaksi yang tinggi mencerminkan keaktifan saham untuk diperdagangkan, sehingga *broker* atau *dealer* tidak perlu menyimpan saham dalam waktu yang lama (*holding time* pendek) karena turnover cepat dan rendahnya risiko volatilitas harga, sehingga mengurangi biaya kepemilikan saham serta berdampak pada *bid-ask spread* yang lebih kecil (Hendryati et al., 2019). Meskipun demikian, volume transaksi yang tinggi memiliki kecenderungan bersumber dari aktivitas *noise trading*, bukan dari trader yang memiliki informasi superior yang secara eksplisit mencerminkan intensitas informasi yang masuk ke pasar (Foster et

al., 1990). Kwapień et al. (2022) menambahkan bahwa data dari platform HitBTC menunjukkan volume besar meskipun frekuensi transaksi rendah, yang mengindikasikan adanya *wash trading* (Cong et al., 2019; Chen et al., 2022b; Pennec et al., 2021).

Selain itu, korelasi negatif antara volume dan *spread* disebabkan oleh informasi internal (*endogenous informed trading*), volatilitas stokastik, dan volume yang berubah-ubah yang memperkuat ketidakpastian harga (Collin-Dufresne, 2016). Hal ini sejalan dengan teori klasik seperti model *adverse selection* atau *inventory cost*, yang menyatakan bahwa volume tinggi pada saham dengan kapitalisasi kecil yang didominasi oleh komponen volume idiosinkratik akan mempersempit *spread* (Foster, 1993; Glosten et al., 1988), sehingga membantu mengurangi biaya transaksi. Semakin rendah nilai *bid-ask spread* menunjukkan bahwa saham tersebut memiliki likuiditas yang tinggi (Briliantini et al., 2019; Yustinur et al., 2021). Sedangkan volatilitas idiosinkratik berkorelasi positif atau meningkatkan *bid-ask spread* (Bogousslavsky et al., 2019). Dengan mengendalikan volatilitas yang berasal dari ketidakseimbangan pesanan berfrekuensi tinggi, hubungan volume dan *bid-ask spread* pada saham kecil dan besar dapat direkonsiliasi melalui mekanisme *inventory*. Berdasarkan landasan tersebut, maka dirumuskan hipotesis sebagai berikut:

H1 = Tokenized Carbon Asset on-chain Trading (total supply, volume transaksi, nilai transaksi) berpengaruh terhadap Likuiditas VCMs (volume perdagangan, bid-ask spread, volatilitas return)

2.12.2 Adopsi biocrypto berpengaruh terhadap peningkatan transaksi VCMs

Volume perdagangan yang tinggi dapat meningkatkan likuiditas, memperkuat proses penemuan harga, dan mencerminkan sentimen investor yang berimplikasi signifikan terhadap kapitalisasi pasar suatu aset. Volume tinggi tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kapitalisasi pasar, tetapi dapat berdampak pada peningkatan volatilitas dan potensi manipulasi pasar, yaitu upaya meningkatkan volume perdagangan secara artifisial untuk menciptakan ilusi minat pasar dan memperbesar kapitalisasi pasar, seperti skema *pump and dump* (Allen et al., 1992). Riyanto et al. (2018) menemukan bahwa saham berkapitalisasi kecil memiliki resiko manipulasi yang rendah, sedangkan menurut Aggarwal et al. (2006), Bouraoui et al. (2013), dan Huang et al. (2005) saham dengan kapitalisasi kecil memiliki potensi manipulasi yang tinggi. Selain itu, volume perdagangan dipengaruhi oleh arus informasi, perusahaan yang secara konsisten mengungkapkan berita positif dapat mengalami peningkatan volume perdagangan yang berkelanjutan, dan dapat menyebabkan kenaikan kapitalisasi pasar (FasterCapital, 2025).

Alhussayen (2022) juga menganalisis hubungan kapitalisasi dengan volume secara implisit dalam konteks pasar saham Kolombia dan menyimpulkan bahwa terdapat korelasi positif signifikan antara kedua variabel tersebut, dan diasumsikan berlaku di semua pasar keuangan. Dengan kata lain, ketika kapitalisasi pasar meningkat seiring waktu, volume perdagangan juga cenderung meningkat. Namun, penelitian di pasar Amerika Serikat oleh Noeberg et al. (2024) menunjukkan hasil

yang berbeda dari asumsi umum tersebut, yaitu hubungan kapitalisasi dengan volume yang cenderung negatif, atau bahkan tidak ditemukan hubungan signifikan.

Volume perdagangan juga dapat dipengaruhi oleh kapitalisasi pasar suatu perusahaan. Menurut Banz (1981), kapitalisasi pasar mencerminkan nilai aset perusahaan dan dapat digunakan sebagai ukuran dari ukuran perusahaan. Studi di Nigeria menemukan bahwa kapitalisasi pasar berhubungan positif signifikan dengan profitabilitas perusahaan, serta nilai sekuritas yang diperdagangkan, yang menunjukkan peran penting kapitalisasi pasar dalam meningkatkan nilai total perdagangan (Ogunsanwo et al., 2022). Penelitian lain menegaskan bahwa *market capitalization* dan *total value of transactions* memiliki dampak positif terhadap pertumbuhan ekonomi nasional, sehingga memperkuat bukti bahwa besarnya kapitalisasi pasar mendorong nilai transaksi yang lebih tinggi (Oluwaleye et al., 2023). Selain itu, frekuensi transaksi juga terbukti berpengaruh positif terhadap total nilai perdagangan. Studi berbasis simulasi menemukan bahwa semakin banyak aktivitas perdagangan, volume dan efisiensi pasar meningkat secara signifikan, meski diikuti dengan kenaikan volatilitas (Hanson, 2016; Peivandi et al., 2018). Hal ini dikarenakan frekuensi perdagangan berbanding lurus dengan volume perdagangan, semakin besar frekuensi transaksi maka semakin tinggi volume transaksi yang dihasilkan (Khoirayanti et al., 2020) dan diasumsikan volume perdagangan atau nilai perdagangan kumulatif yang tinggi. Wang et al. (2021) menggunakan data berfrekuensi tinggi (*hourly*) untuk mengukur efisiensi pasar dengan metode entropi multiskala (*multiscale entropy-based method*), serta menemukan bahwa penurunan efisiensi pasar berkorelasi dengan peningkatan

aktivitas transaksi, yang menunjukkan bahwa frekuensi transaksi meningkat saat pasar bereaksi terhadap informasi baru.

Penelitian mengenai akses pasar modal menunjukkan bahwa jumlah partisipan atau peningkatan jumlah *trader* (yang dapat disamakan dengan jumlah *wallet*) turut meningkatkan nilai perdagangan saham di bursa (Jamali et al., 2012). Penelitian di China oleh Bi et al. (2022) memperkuat temuan ini bahwa partisipasi investor institusional dalam transaksi besar mendorong kenaikan nilai total perdagangan. Sedangkan Albayati et al. (2020) menekankan bahwa *cryptocurrency wallet* merupakan pintu utama bagi pengguna untuk berpartisipasi dalam perdagangan, pertukaran dan transaksi kripto (Zhao, 2018). Tingkat adopsi *wallet* sangat dipengaruhi oleh kepercayaan dan pengalaman pengguna (UX). Temuan ini memperkuat argumen bahwa semakin banyak *wallet* yang digunakan secara aktif, semakin besar potensi peningkatan volume perdagangan kripto karena faktor spekulasi dan permintaan informasi memicu aktivitas pasar Kufo et al. (2023). Oleh karena itu, jmlah pemilik *wallet* serta tingkat penggunaan aktual menjadi ukuran keberhasilan adopsi (Moniruzzaman et al., 2020).

Penelitian lain oleh Guzmán et al. (2021) menemukan bahwa peningkatan partisipasi investor individu selama masa *lockdown* pandemi COVID-19 berkontribusi terhadap lonjakan volume perdagangan Bitcoin. Fenomena ini sejalan dengan studi Ozik et al. (2021) dan Pagano et al. (2021) yang menunjukkan bahwa peningkatan jumlah akun perdagangan atau investor Robinhood berdampak negatif pada kualitas pasar, meskipun berpengaruh positif terhadap intensitas pasar karena investor secara aktif terlibat dalam strategi perdagangan momentum dan kontrarian.

Chiah et al. (2020) dan Harjoto (2021), juga menangkap lonjakan volume perdagangan berdampak buruk pada *return* saham serta meningkatkan volatilitas. Namun, tingginya volume perdagangan Bitcoin sering diasosiasikan dengan aktivitas perjudian atau sebagai investasi spekulatif (Baek et al., 2015; Bauret al., 2018; Gao et al., 2015; Tan et al., 2020). Harris (2003) menjelaskan bahwa tindakan spekulatif oleh investor sering kali dipicu oleh pelaku yang disebut sebagai *bluffer*. *Bluffer* merupakan pedagang yang menyesatkan dan mendorong investor lain untuk melakukan transaksi yang tidak tepat demi keuntungan pribadi dengan cara *rumormongers* (penyebarkan rumor) dan *price manipulators* (manipulator harga). Selain itu, studi oleh Sukhomlyn (2024) secara eksplisit menyebutkan bahwa ekosistem kripto terdiri dari ribuan koin dan token, platform *blockchain*, *exchange*, dan *wallet*, yang secara kolektif membentuk kapitalisasi pasar kripto. Penelitian ini menegaskan bahwa volume perdagangan harian kripto telah mencapai level yang sama dengan bursa saham besar tradisional.

Volatilitas pasar *cryptocurrency* dipengaruhi oleh sejumlah faktor fundamental, antara lain kapitalisasi pasar, aktivitas *on-chain* (seperti jumlah *wallet* aktif), dan frekuensi transaksi. Volume perdagangan yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan volatilitas, karena harga suatu aset berfluktuasi akibat banyaknya jumlah transaksi. Volatilitas juga dapat mempengaruhi kapitalisasi pasar, seperti yang terlihat pada periode tekanan pasar ketika volume perdagangan melonjak dan kapitalisasi pasar berubah secara ekstrem. Mikhaylov et al. (2021) menekankan bahwa volatilitas token memiliki peran penting dalam konteks instrumen keuangan untuk lindung nilai terhadap aset tradisional dan penentuan

harga. Penelitian oleh Pessa et al. (2023) menunjukkan bahwa volatilitas *return* harga menurun seiring bertambahnya usia aset kripto (waktu sejak genesis *block* atau *listing* pertama) dan meningkatnya kapitalisasi pasar. Selain itu faktor harga, pangsa pasar, peringkat, kapitalisasi pasar volume dan *Return on Investment* (ROI) merupakan prediktif utama untuk memproyeksi *return* kripto jangka pendek atau harian dengan menggunakan mekanisme *machine learning algorithm* seperti model XGBoost (Alessandretti et al., 2018), *Bayesian neural network* (BNN) (Jang et al., 2018) dan *Long Short-Term Memory* (LSTM) (McNally et al., 2018). Sedangkan analisis *inter-transaction time* (Kwapien et al., 2022), mengungkapkan adanya autokorelasi hukum pangkat (*power-law*) jangka panjang, multifraktalitas, serta hubungan erat dengan volatilitas, terutama dalam perdagangan intensitas tinggi.

Dalam aktivitas jaringan *blockchain* dan adopsi pengguna, penelitian oleh Parino et al. (2018) menganalisis karakterisasi adopsi *blockchain* Bitcoin berdasarkan negara, dengan menggunakan indeks *Gross Domestic Profit* (GDP) per kapita, perdagangan bebas, dan penetrasi internet sebagai variabel kunci yang berkorelasi dengan tingkat adopsi pengguna. Jevremović et al. (2022) juga mengeksplorasi dampak interaktivitas teknologi *blockchain* terhadap perilaku pengguna dan berfokus pada perbedaan interaktifitas teknologi yang menentukan kategori pengguna aktif dari teknologi *blockchain*.

Moncada et al. (2024) mengidentifikasi hubungan empiris antara peningkatan volatilitas harga token dan basis pengguna aktif (diukur melalui jumlah *wallet* aktif) yang dimediasi oleh penggunaan token sebagai alat tukar untuk mendorong strategi kepemilikan token dengan mengurangi aktivitas transaksi dan berfokus pada sistem

tokenomics yang mengatur penerbitan atau penciptaan, distribusi, utilitas, penggunaan dan tata kelola token (Lo et al., 2020), serta membentuk aturan dan mekanisme insentif dalam jaringan *blockchain*, sekaligus mengamati fluktuasi harga yang dapat memperpanjang waktu investasi pengguna. Hasil penelitian menunjukkan korelasi negatif antara volatilitas harga dan *wallet* aktif. Peningkatan volatilitas diikuti dengan penurunan aktivitas transaksi, yang menunjukkan bahwa persepsi pasar terhadap volatilitas harga tidak selalu bersifat negatif dan token dengan fungsi pertukaran tetap mampu memberi stabilitas, sehingga volatilitas harga token dapat diperlakukan sebagai peluang untuk meningkatkan tingkat retensi token. Penelitian lain oleh Chen et al. (2020) menemukan bahwa tingginya tingkat adopsi pengguna dan stabilitas harga token berkorelasi dengan penurunan volatilitas produktivitas platform. Sebaliknya, Aalborg et al. (2019) menemukan korelasi positif antara *wallet* aktif dalam jaringan Bitcoin dan *return* harian, menunjukkan bahwa aktivitas jaringan merupakan penggerak harga yang signifikan.

Penelitian oleh Glaser et al., 2014 menyatakan bahwa peningkatan *users* atau *wallet addresses* secara signifikan menunjukkan masuknya pengguna baru atau *uninformed* yang lebih tertarik pada Bitcoin sebagai aset spekulatif daripada sebagai alat tukar dan melakukan transaksi berdasarkan sentimen, bukan utilitas, sehingga memperbesar fluktuasi harga karena perilaku *herd*, *panic buying* atau *selling*, dan kurangnya pemahaman terhadap fundamental pasar. Semakin banyak *wallet* aktif yang dimotivasi oleh spekulasi, semakin tinggi potensi volatilitas yang dapat menyebabkan ketidakstabilan. Selain itu, Al Guindy (2021) menemukan

bahwa meningkatnya perhatian investor (diukur dengan aktivitas media sosial), krisis kesehatan global (Rasheed et al., 2022) dan faktor eksternal, seperti volatilitas realisasi S&P 500 (Conrad et al., 2018) berkorelasi dengan peningkatan volatilitas harga. Karagiannopoulou et al. (2023) dan Salisu dan Ogbonna (2022) menunjukkan bahwa berita yang didorong oleh ketakutan, seperti peningkatan kasus COVID-19, secara nyata meningkatkan volatilitas Bitcoin, dibandingkan periode sebelum pandemi. Baur et al. (2018b) menyoroti keunikan volatilitas kripto yang lebih responsif terhadap guncangan positif daripada negatif, yang bertentangan dengan perilaku pasar saham konvensional.

Kapitalisasi pasar memiliki hubungan yang signifikan dengan volatilitas pasar. Volume perdagangan yang lebih tinggi secara umum meningkatkan volatilitas, sementara kapitalisasi pasar menunjukkan korelasi terbalik terhadap volatilitas dan volume perdagangan berkorelasi positif dengan kapitalisasi pasar. Fama et al. (1993) menunjukkan bahwa dalam *three-factor model*, *size (marketcap)* adalah faktor sistematis yang mempengaruhi *return*. Menurut teori keuangan (Fama et al., 1996), dalam pasar saham, perusahaan kecil cenderung memiliki eksposur risiko yang tinggi, sehingga memberikan *return* yang lebih tinggi bagi investor. Maleka (2024), menambahkan bahwa portofolio *small-high* menghasilkan return rata-rata tertinggi dan juga memiliki volatilitas yang lebih tinggi (Bera et al., 2020). Namun, dalam penelitian Şoiman et al. (2024) ekspektasi *return* token DeFi memiliki hubungan negatif dengan *size*, yang mengindikasikan bahwa token berkapitalisasi besar menghasilkan *return* yang lebih tinggi.

Bekaert et al. (1997) menjelaskan bahwa perusahaan kecil lebih berisiko terhadap guncangan makroekonomi dan asimetri informasi, sehingga volatilitas *return* lebih tinggi. Sedangkan Bali et al. (2005), menghubungkan ukuran perusahaan dengan risiko *downside* dan volatilitas idiosinkratik, serta menunjukkan bahwa perusahaan kecil cenderung memiliki risiko tinggi. Selain itu, tidak ditemukan bukti korelasi signifikan antara pengembalian portofolio tertimbang nilai (*value-weighted portfolio returns*) dan volatilitas saham rata-rata tertimbang sama, yang berarti bahwa volatilitas idiosinkratik tidak selalu menjelaskan variasi return portofolio secara agregat. Atsiwo et al. (2024) dan Peterburgsky (2024), menguji peran *size*, *value*, dan *volatility*, menjelaskan hubungan antara ukuran dan nilai portofolio terhadap respons terhadap guncangan volatilitas, serta menunjukkan bahwa saham berkapitalisasi kecil mengalami volatilitas yang lebih tinggi dibandingkan saham berkapitalisasi besar. Selain itu, hubungan antara ukuran perusahaan dan tingkat volatilitas bersifat negatif, yang berarti semakin kecil ukuran perusahaan, semakin besar tingkat volatilitas. Namun Norberg et al. (2024) menemukan bahwa saham dengan kapitalisasi besar cenderung mengalami penurunan volatilitas saat pasar stres, sedangkan volume perdagangan lebih memengaruhi volatilitas dalam kondisi abnormal.

Analisis efek *spillover* oleh Yi et al. (2018) menunjukkan bahwa pergerakan kapitalisasi pasar berdampak langsung pada volatilitas. Aset dengan kapitalisasi pasar besar seperti Bitcoin memiliki kecenderungan untuk mentransmisikan guncangan volatilitas, sementara aset berkapitalisasi kecil lebih banyak menyerapnya. Studi oleh Simitsi et al. (2018) juga menguji *spillover return* dan

menunjukkan volatilitas jangka pendek dari perusahaan teknologi mempengaruhi Bitcoin, sebaliknya volatilitas Bitcoin berdampak jangka panjang terhadap saham di sektor energi. Sareen (2023) mengidentifikasi berbagai faktor *on-chain* dan *off-chain*, seperti persentase token yang dialokasikan untuk penjualan privat dan hadiah, durasi periode *vesting* token, serta kapitalisasi pasar token yang dapat memengaruhi volatilitas token. Kapitalisasi pasar yang lebih tinggi menunjukkan penurunan volatilitas yang lebih besar selama periode pasar yang penuh tekanan (Norberg et al., 2024). Seperti yang disebutkan oleh Brogaard et al. (2017) bahwa peningkatan volume pasar dapat meningkatkan likuiditas, namun dampaknya terhadap volatilitas berbeda dibandingkan dengan kondisi pasar normal, terlepas dari besarnya kapitalisasi pasar.

Dalam kondisi pasar yang tidak stabil atau abnormal, strategi perdagangan cepat melalui *high-frequency trading* justru memberikan efek positif serta menyebabkan pembatalan pesanan dan penarikan likuiditas, sehingga meningkatkan fluktuasi harga dan volatilitas. Sedangkan pada kondisi pasar *bearish*, kapitalisasi besar seperti Bitcoin, Ethereum, dan Ripple berperan penting dalam menentukan volatilitas, yang ditunjukkan dengan model ARCH atau GARCH serta DCC-GARCH (Kyriazis et al., 2019). Penelitian selama krisis global COVID-19 dan perang Rusia–Ukraina oleh Gherghina et al. (2025) menunjukkan adanya *efek leverage* dan persistensi volatilitas yang bervariasi pada aset berkapitalisasi besar, seperti BTC, ETH, BNB, USDC, USDT, XRP, dan ADA. Peterburgsky (2024), menjelaskan bahwa ukuran perusahaan dan nilai portofolio berkontribusi terhadap respons terhadap guncangan volatilitas. Saham dengan

kapitalisasi kecil mengalami volatilitas yang lebih tinggi dibandingkan saham berkapitalisasi besar, serta menetapkan bahwa korelasi antara kapitalisasi pasar dan volatilitas bersifat negatif. Sedangkan menurut Mukti (2019), volatilitas harga dan kapitalisasi pasar memiliki pengaruh positif signifikan dan likuiditas saham mempengaruhi *return* saham secara negatif.

Suhendar et al. (2023) dan Taslim et al. (2016) menunjukkan bahwa frekuensi perdagangan saham mempengaruhi nilai likuiditas perusahaan. Frekuensi perdagangan berpengaruh positif signifikan terhadap *return* saham, variabel volume perdagangan, kapitalisasi pasar variabel dan hari perdagangan berpengaruh negatif tidak signifikan terhadap *return* saham. Penelitian oleh Brauneis et al. (2021), menemukan bahwa volume dan jumlah transaksi memiliki korelasi positif yang kuat dengan *benchmark liquidity measures*, dalam kondisi volume dan volatilitas tinggi maupun rendah. Jumlah transaksi di pasar obligasi kota berhubungan positif dengan volatilitas harga, sedangkan ukuran transaksi rata-rata memiliki hubungan negatif dengan volatilitas harga (Downing et al., 2004). Puspaputri et al. (2017) menemukan bahwa di pasar obligasi korporasi Indonesia, volume perdagangan dan frekuensi perdagangan berkorelasi positif dengan volatilitas obligasi, yang konsisten dengan model berbasis informasi, sementara ilikuiditas menyebabkan hubungan tersebut lebih kuat. Hasil penelitian yang sama juga dijelaskan oleh (Marshall et al., 2012), bahwa aktivitas pasar yang tinggi (volume dan frekuensi transaksi) berkorelasi positif dengan tingkat eksekusi biaya, yang berarti volatilitas dan likuiditas meningkat bersamaan, dengan menunjukkan tingkat *return* rata-rata (*mean reversion*). Sedangkan Sarajoti (2005) melihat bahwa volume tinggi dapat

menurunkan biaya transaksi, jika transaksi dilakukan dengan *floor trader* yang kompetitif. Selain itu, Gerhold et al. (2013) menemukan bahwa *order flow* dan volume transaksi mengandung informasi signifikan terhadap premi risiko.

Beberapa studi menyoroti aktivitas investor, konsentrasi dompet (*wallet*), atau perilaku pemegang aset dapat memperlebar *bid-ask spread*, meskipun sebagian besar literatur justru menemukan sebaliknya. Penelitian oleh Black (1986), menemukan bahwa investor ritel skala kecil dapat berkontribusi terhadap *noise trading*, yang meningkatkan volatilitas dan memperlebar *spread*. Dalam konsep De Long et al. (1990), *noise trading* dapat mendestabilisasi harga dan meningkatkan risiko, sehingga berimplikasi langsung terhadap pelebaran *spread* sebagai bentuk kompensasi agar pasar tetap aktif dan likuid. Menurut Black (1986); Chen et al. (2021), Han et al. (2024) dan Ramiah et al. (2015), *noise traders* merupakan, investor yang bertransaksi atau membuat keputusan investasi tanpa menggunakan fundamental keuangan, namun berdasarkan sentimen atau informasi sementara yang keliru. Bloomfield et al. (2009), menjelaskan bahwa pedagang yang tidak berpengetahuan memberikan beberapa manfaat bagi pasar dengan meningkatkan volume dan kedalaman pasar, sekaligus mengurangi *bid-ask spread* dan dampak harga sementara dari perdagangan. Fender et al. (2015) menyimpulkan bahwa meningkatnya keberadaan pedagang yang memiliki informasi signifikan secara kuat memengaruhi *spread*. Penelitian ini didukung oleh Bender et al. (2013) dengan menggunakan pola grafik *head-and-shoulders* meskipun tidak secara akurat dapat memprediksi arah harga, namun menunjukkan bahwa bias kognitif seperti *korelasi ilusif* mendorong *noise trader* yang tidak sepenuhnya rasional (*noise*) menyebabkan

lonjakan volume yang dikaitkan dengan penurunan *bid-ask spread*, karena dianggap sebagai *uninformed noise trading* yang mengurangi risiko seleksi bagi pembuat pasar. Mendel et al. (2012) menambahkan bahwa *spread* yang kecil pada obligasi korporasi dan harga *credit default swap* (CDS) dapat menyesatkan serta mencerminkan persepsi pasar yang terlalu optimis terhadap risiko keuangan. Baker et al. (2004) menyarankan untuk menggunakan indikator volume transaksi sebagai representasi dari sentimen investor, sehingga dapat menjelaskan bahwa jenis dan persepsi terhadap *noise trading* dapat memoderasi dampaknya terhadap *spread*.

Frekuensi perdagangan merupakan faktor yang memengaruhi *bid-ask spread* dan dapat membantu investor untuk mengetahui apakah saham diminati atau tidak. Penelitian oleh Patoni & Lasmana (2015) menunjukkan bahwa frekuensi perdagangan saham memiliki pengaruh terhadap *bid-ask spread*. Sementara itu, Holder et al. (2009) meneliti pasar *Treasury futures* di CBOT dan menemukan bahwa variabel *microstructure* seperti jumlah kontrak, jumlah trader, dan rasio *scalper* terhadap *non-scalper* (CTI ratios), memiliki pengaruh signifikan terhadap *spread*. Volume tinggi dan volatilitas harga (*risks proxy*) memperlebar *spread*, sedangkan peningkatan jumlah trader justru mempersempit *spread* karena kompetisi antar pelaku pasar dan ketidakpastian informasi. Frekuensi perdagangan memiliki hubungan positif terhadap *bid-ask spread* dan mempengaruhi persepsi investor (Khoirayanti et al., 2020). Investor cenderung tidak melakukan transaksi pada saham yang tidak liquid, sehingga tekanan pada *spread* dapat dikurangi. Sedangkan Bessembinder (2003), menemukan bahwa frekuensi perdagangan berkorelasi negatif dengan *bid-ask spread* di pasar obligasi korporasi AS. Sejalan

dengan temuan Husni et al. (2024), bahwa frekuensi perdagangan tidak berpengaruh signifikan terhadap *bid-ask spread*, namun volatilitas harga berpengaruh negatif. Selain itu, estimator *high-low* oleh Corwin & Schultz (2012) menunjukkan bahwa biaya efektif dapat di-*underestimate* saat frekuensi transaksi rendah atau dalam kondisi pasar yang kurang likuid. Penelitian ini secara implisit mencerminkan dalam pasar yang kurang aktif *spread* cenderung melebar. Selain itu, Zhang et al. (2020) meneliti efisiensi pasar dan likuiditas Bitcoin, Ethereum, dan Litecoin berdasarkan data frekuensi tinggi, serta menunjukkan bahwa inefisiensi pasar kripto bergantung pada kondisi pasar, yaitu efisiensi terjadi selama periode pasar *bullish* dan menjadi tidak efisien selama periode *bearish*.

Studi lain mengemukakan bahwa kapitalisasi pasar berpengaruh dalam menentukan besaran *bid-ask spread* sebagai indikator biaya transaksi dan likuiditas pasar. Studi empiris dari Madhavan (2000) menegaskan bahwa kapitalisasi pasar, harga saham, volatilitas saham, dan volume perdagangan merupakan determinan utama dari *spread*. Ukuran kapitalisasi pasar ditentukan oleh jumlah saham beredar dan harga pasar saham yang relatif tetap dalam jangka waktu tertentu, namun maka perubahan kapitalisasi saham yang terjadi di bursa dari periode tertentu didominasi oleh volatilitas harga pasar saham di bursa (Aprullah et al., 2013). Perusahaan dengan kapitalisasi pasar besar cenderung memiliki *bid-ask spread* yang lebih sempit, karena likuiditas investasi yang lebih tinggi dan asimetri informasi yang lebih rendah (Aprullah et al., 2013; Utami et al., 2020). Kapitalisasi pasar menunjukkan bahwa saham aktif diperdagangkan, sehingga *spread* akan lebih rendah. Selain itu, semakin tinggi harga saham dan jumlah saham beredar, juga

memperkecil *bid-ask spread*. Jika saham diperdagangkan aktif, maka *dealer* cenderung menyimpan atau mengelola portfolio saham dalam jangka waktu yang lebih lama, sehingga mengurangi biaya kepemilikan dan menyebabkan *spread* lebih lebar karena dealer menetapkan harga jual-beli dengan margin lebih besar untuk mengoptimalkan keuntungan (Stoll, 1989) yang berkontribusi pada penurunan kecepatan perputaran (*velocity*) sehingga para pemegang token cenderung menunggu pergerakan pasar daripada melakukan perdagangan berulang (Moncada et al., 2024). Namun, periode kepemilikan yang lebih panjang dapat berdampak pada pelebaran *bid-ask spread* (Chung et al., 2005).

Sejalan dengan penelitian oleh Hidayat et al. (2000) yang menemukan bahwa harga saham berpengaruh negatif terhadap *spread*. Harga saham yang tinggi mencerminkan tingginya kapitalisasi nilai pasar perusahaan, sehingga semakin tinggi nilai tersebut, maka semakin kecil *bid-ask spread* (Utami et al., 2020). Sejalan dengan temuan Narayan et al. (2014), studi ini menemukan bahwa volatilitas return memiliki hubungan negatif terhadap *spread*, yang berarti bahwa volatilitas return menurunkan *spread*. Volatilitas yang lebih tinggi meningkatkan risiko, dan *bid-ask spread* tidak sepenuhnya mencerminkan harga risiko. Sedangkan, korelasi positif *spread* dengan kapitalisasi pasar menunjukkan bahwa meskipun volume perdagangan tinggi, *spread* tidak selalu menurun.

Dalam perdagangan frekuensi tinggi di India, kapitalisasi pasar yang lebih besar juga berasosiasi dengan *spread* yang lebih lebar pada sektor dan periode tertentu, sehingga menegaskan peran dinamika perdagangan dan volatilitas pasar (Pan et al., 2021). Faktor-faktor lain seperti volume perdagangan, varians *return*,

struktur kepemilikan, dan tingkat persaingan antar pelaku pasar juga berpengaruh terhadap *bid-ask spread*, bahkan pada perusahaan berkapitalisasi besar (Laux, 1995; Wiharno et al., 2018). Dengan demikian, meskipun kapitalisasi pasar secara umum berhubungan negatif dengan *bid-ask spread*, hubungan ini tidak bersifat universal dan dapat bervariasi tergantung pada kondisi pasar, volatilitas, serta struktur perdagangan.

Berdasarkan uraian hasil penelitian terdahulu, hipotesis dirumuskan sebagai berikut:

H2 = Adopsi Biocrypto (marketcap, frekuensi transaksi, wallet aktif) berpengaruh terhadap Likuiditas VCMs (volume perdagangan, bid-ask spread, volatilitas return)

2.12.3 Pengaruh *Bid-ask Spread* dan Volatilitas terhadap Volume Perdagangan

Hubungan antara volatilitas *return*, *bid-ask spread* dan volume perdagangan sebagai ukuran likuiditas digunakan sebagai subjek atau variabel dalam berbagai studi empiris dengan hasil temuan yang tidak sepenuhnya positif. Secara umum, volatilitas harga dapat meningkatkan volume perdagangan, karena pergerakan harga yang besar mendorong aktivitas jual beli yang lebih tinggi (Fung et al., 1998), namun *bid-ask spread* memiliki hubungan negatif dengan volume, karena *spread* yang lebar menunjukkan biaya transaksi yang lebih tinggi, sehingga investor cenderung mengurangi aktivitas perdagangan (Kalimipalli et al., 2002; Wang et al., 2000).

Secara teoritis, hubungan positif ketiga variabel likuiditas dapat dijelaskan menggunakan model hipotesis campuran distribusi atau *Mixture of Distribution*

Hypothesis (MDH) oleh Andersen, 1996, Alsubaie et al., 2009, Choi et al. (2012), Clark (1973), Epps et al. (1976), Harris (1986), Karpoff, 1987; dan Tauchen et al. (1983), menegaskan bahwa volatilitas *return* saham dan volume perdagangan harus berkorelasi positif. Selain itu, banyaknya informasi yang masuk secara simultan ke pasar mendorong terbentuknya harga ekuilibrium, yang semakin memperbesar volume perdagangan dan fluktuasi harga saham, namun informasi dalam volume masa lalu tidak dapat digunakan sebagai referensi untuk memprediksi volatilitas di masa depan. Sedangkan studi oleh Aggarwal et al., (2011) dan Darrat et al. (2003), menunjukkan perilaku yang tidak konsisten pada MDH dengan variasi hubungan kausalitas satu arah, negatif atau bahkan tidak berkorelasi signifikan. Dengan menggunakan model hipotesis yang sama, Paital et al. (2016) menemukan hubungan positif kontemporer antara volatilitas *return* dengan volume perdagangan, serta volatilitas *return* dan *bid-ask spread*, meskipun tidak dapat menjelaskan kausalitas antara volume perdagangan dan volatilitas *return*. Sedangkan, analisis uji *Granger Causality* menunjukkan bahwa informasi yang melekat pada volume perdagangan dan *bid-ask spread* dapat digunakan untuk memprediksi volatilitas *return* saham.

Hipotesis kedatangan informasi berurutan atau *Sequential Information Arrival Hypothesis* (SIAH) oleh Chiang et al., 2010, Copeland (1976), Girma et al. (2002), Darrat et al. (2003, 2007), dan Jennings et al. (1981), menyatakan bahwa informasi baru yang disebarkan secara berurutan, mempengaruhi trader untuk melakukan transaksi lebih awal berdasarkan informasi yang diterima, dan mendorong hubungan timbal balik yang saling mempengaruhi atau kausal dua arah

antara volatilitas *return* dan volume dengan pola pergerakan searah, sehingga informasi dan nilai volume perdagangan masa lalu dapat digunakan untuk memprediksi volatilitas di masa depan atau sebaliknya (Smirlock et al., 1988). Sedangkan Boubaker et al. (2011) dan Choi et al. (2012) menemukan efek yang berbeda. Di pasar saham Istanbul, Celik (2013) menemukan hubungan kausal positif dua arah yang hanya terjadi pada periode krisis global dan tidak mengurangi persistensi volatilitas, sehingga hanya mendukung sebagian hipotesis dari SIAH. Sedangkan pada periode pra-krisis, tidak ditemukan hubungan kausal namun menekan persistensi volatilitas, dan mendukung validitas MDH.

Selain korelasi positif antara volume dan volatilitas di pasar Korea, Jepang, China, dan Hong Kong, Choi et al. (2013) juga menangkap pola kausalitas yang bervariasi antar negara. Lee et al. (2002) membuktikan adanya hubungan kontemporer positif dan hubungan umpan balik (*feedback relationship*) antara volume dan volatilitas di pasar AS, Inggris, dan Jepang, hubungan kausalitas satu arah di pasar India (Mahajan et al., 2009), hubungan kausal dua arah di pasar saham India (Tripathy, 2011), Brasil (Medeiros et al., 2008) dan NYSE (Darrat et al., 2007). Meskipun dalam penelitian Thammasiri et al. (2010) tidak ditemukan hubungan kausalitas di pasar TFEX dan China (Chuang et al., 2012). Sedangkan, Leon (2007) menunjukkan bahwa volume perdagangan memiliki kemampuan prediksi yang kuat terhadap volatilitas *return* saham di bursa regional Uni Ekonomi dan Moneter Afrika Barat.

Pengujian hubungan volatilitas *return* dan volume perdagangan pada data frekuensi tinggi oleh Giot et al. (2010) dan Hatrick et al. (2011) menemukan bahwa

jumlah transaksi merupakan faktor dominan yang membentuk hubungan volume dan volatilitas realisasi. Gwilym et al. (1999) menunjukkan kausalitas dua arah dengan menguji perilaku *intraday* dari volatilitas dan volume return kontrak berjangka FTSE-100, Short Sterling, dan Long Gilt LIFFE dengan interval 5 menit. Sedangkan Halova (2012) menggunakan uji kausalitas *Granger* pada data *intraday* harga dan volume perdagangan kontrak berjangka minyak dan gas di NYMEX, serta menyimpulkan bahwa nilai volume masa lalu membantu menjelaskan volatilitas, sehingga mendukung model SIAH. Penelitian oleh Okan et al. (2009) menunjukkan hubungan dinamis dan kausal pada kontrak berjangka indeks ISE-30 dan mendukung model SIAH, namun menolak validitas MDH. Sedangkan, Boyacıoğlu et al. (2010) dan Kiran (2010) menguraikan bahwa MDH dan SIAH tidak valid digunakan pada indeks ISE-100, karena terdapat kausalitas dan korelasi negatif jangka panjang dari volatilitas *return* dan volume perdagangan. Sebaliknya, hubungan kontemporer positif antara volume perdagangan terhadap volatilitas return ditemukan hampir pada sebagian besar saham BEI yang diuji, namun, tidak terdapat bukti yang cukup mendukung teori MDH dan SIAH (Agung et al., 2024).

Ahmed et al. (2005), menyatakan bahwa dinamika antara volatilitas dan volume perdagangan mengalami perubahan signifikan dibandingkan dengan kondisi pasar yang normal. Volume perdagangan yang lebih tinggi menunjukkan adanya penyesuaian pasar terhadap informasi baru dan perilaku investor yang secara proaktif menganalisis data, yang menyebabkan peningkatan persistensi volatilitas (Mnari, 2019). Fifi et al. (2017) menambahkan bahwa volume perdagangan *intraday* di pasar minyak dan gas memiliki hubungan positif dengan

volatilitas yang direalisasikan sehingga memperkuat MDH. Volume dapat menyebabkan volatilitas selama masa guncangan (*turbulent times*) dan volatilitas menyebabkan volume selama masa tenang (*good times*). Selain itu, tidak ditemukan hubungan jangka panjang antara volume dan volatilitas, karena ketidakhadiran *noise traders*. Sedangkan hasil penelitian oleh Bessembinder et al. (1992) berkaitan dengan aktivitas perdagangan berjangka yang lebih besar (*volume and open interest*) menemukan bahwa volatilitas ekuitas secara positif berkorelasi dengan *unexpected volume* tetapi berdampak negatif dengan *forecastable volume*, serta menunjukkan pasar berjangka aktif meningkatkan likuiditas dan kedalaman pasar ekuitas.

Dalam lingkup *microscopic theory*, *spread* harus selalu menurun seiring dengan peningkatan volume perdagangan (Sarkissian, 2021). Sedangkan Hassan et al. (2021) menggunakan model VAR untuk menunjukkan hubungan signifikan antara *spread* dan volume. Dalam tiga kasus, volume memengaruhi *spread*, dan dalam tiga kasus lainnya, *spread* mempengaruhi volume. Pada empat kasus, ditemukan hubungan kausalitas, *spread* mempengaruhi volume dan volume juga memengaruhi *spread*. Hanya terdapat dua kasus di mana *spread* dan volume bersifat kointegratif, yaitu memiliki hubungan jangka panjang yang stabil. Bahkan hasil penelitian juga menunjukkan bahwa dalam 35 dari 45 kasus, tidak terdapat hubungan yang signifikan antara *spread* dan volume. Temuan ini sejalan dengan Narayana et al. (2015) menunjukkan sebagian besar perusahaan tidak menunjukkan hubungan antara harga dan *spread* serta antara volume dan *spread*. Penelitian oleh Liu et al. (2016) menemukan hubungan positif antara *bid-ask spread* dan volatilitas,

serta hubungan negatif dengan volume perdagangan. Worthington et al. (2003) mengukur peran kedatangan informasi yang diproksikan melalui *bid-ask spread* dan volume, baik yang bersifat kontemporer maupun tertunda, terhadap volatilitas *return intraday* pada saham-saham individu di pasar saham Australia. Mereka menyimpulkan bahwa pengaruh *bid-ask spread* terhadap volatilitas relatif lebih besar, sementara efek volume bersifat lebih umum namun relatif kecil. Chakrabarty et al. (2005) meneliti variabel-variabel yang memengaruhi *bid-ask spread* saham yang terdaftar di NSE dengan menggunakan data penutupan harian. Hasilnya mengonfirmasi hubungan negatif antara *spread* dan volume perdagangan, sementara volatilitas berhubungan positif dengan *spread*.

Wang et al. (2000), menggunakan data dari pasar berjangka, menunjukkan bahwa volume perdagangan, *bid-ask spread*, dan volatilitas harga ditentukan secara bersama-sama. Sedangkan pada estimasi volatilitas menunjukkan hubungan positif dengan *bid-ask spread* dan hubungan negatif dengan volume perdagangan yang tertunda. Penelitian oleh Bogousslavsky et al. (2023) menganalisis *order imbalance volatility* yang menjadi penentu utama likuiditas dan menjelaskan hubungan positif antara *spread* dan volume pada saham besar. Penelitian oleh Dinh (2017), menunjukkan hubungan antara *bid-ask spread* dan volume *imbalance* bergantung pada tingkat likuiditas saham. Dalam kondisi pasar saham yang likuid *spread* cenderung menyempit saat *imbalance* > 1 dan melebar saat *imbalance* < -1 , sementara pada saham tidak likuid, hubungan tersebut tidak konsisten dan bervariasi antar saham dengan nilai *imbalance* pada rentang -1 sampai 1. Di sisi lain, volatilitas harga di pasar ternak (Frank, 2011) dan volatilitas yang

dipersepsikan dari pasar valuta asing berdasarkan data opsi mata uang oleh Wei (1994), terbukti memperlebar *spread* saat harga lebih fluktuatif, sehingga meningkatkan risiko bagi *market maker* untuk menyediakan likuiditas. Berdasarkan studi empiris dan teori pendukung, maka dirumuskan hipotesis penelitian sebagai berikut:

H3 = Volume perdagangan dan volatilitas berkorelasi positif dengan Bid-ask spread

2.12.4 Regulasi pasar karbon memoderasi hubungan antara tokenisasi dan likuiditas VCMs

Kerangka regulasi saat ini untuk tokenisasi karbon *offset* masih tentatif dan terfragmentasi, menciptakan peluang dan risiko signifikan dalam interpretasi yurisdiksi dan ambiguitas kepatuhan seperti *greenwashing* dan spekulasi sehingga menghambat inovasi, meningkatkan biaya kepatuhan, dan merusak tujuan dekarbonisasi. Regulasi secara signifikan juga berperan dalam meningkatkan likuiditas dengan menetapkan pedoman dan praktik pengawasan yang memastikan lembaga keuangan mempertahankan *buffer* likuiditas yang memadai. Studi lintas negara oleh Miah et al. (2021), Paiva et al. (2014), Streck et al. (2021) dan To et al. (2017) menunjukkan keberhasilan dari proyek *offset* karbon kehutanan di bawah kerangka REDD+ yang diimplementasikan melalui VCMs, namun masih membutuhkan kerangka kelembagaan dan hukum yang solid, transparansi struktur tata kelola yang mampu mengakomodasi keterlibatan masyarakat atas penilaian kualitas proyek dan pemberian insentif serta aliran dana ke proyek REDD+. Beberapa negara telah mengembangkan regulasi aset kripto yang dapat menjadi

acuan dalam membangun kerangka hukum tokenisasi karbon, seperti *Markets in Crypto-Assets Regulation* (MiCA) yang menetapkan persyaratan perizinan, pengawasan, dan kepatuhan bagi penyedia layanan aset kripto di seluruh wilayah UE (Council of the European Union, 2022a). *Government of Malta* (2018) dalam undang-undang *Virtual Financial Assets Act*, memperkenalkan rezim perizinan dan pengawasan oleh Otoritas Jasa Keuangan Malta. Gibraltar menyediakan DLT *Regulations* yang mewajibkan pendaftaran dan pengawasan terhadap penyedia layanan berbasis teknologi *blockchain* (*Government of Gibraltar*, 2017). Sedangkan Liechtenstein melalui *Token and TT Service Provider Act* (TVTG), menyediakan kerangka hukum yang komprehensif untuk layanan berbasis token di bawah pengawasan public (*Government of Liechtenstein*, 2019). Regulasi-regulasi ini menunjukkan arah kebijakan yang dapat mendukung integrasi tokenisasi karbon ke dalam sistem VCMs secara lebih akuntabel dan berkelanjutan.

Keberhasilan tokenisasi karbon *offset* bergantung pada pembentukan kerangka peraturan yang kuat dan harmonis yang menumbuhkan kepercayaan dan integritas lingkungan serta mendorong inovasi yang lebih luas dalam keuangan berkelanjutan dan teknologi yang bertanggung jawab. Penelitian mengenai peran regulasi dalam pasar keuangan, khususnya aset kripto, menunjukkan bahwa regulasi dan sentimen kebijakan memiliki pengaruh signifikan terhadap dinamika pasar. Gupta (2024) menganalisis kerangka hukum dan teknologi inovatif dalam pasar karbon untuk meningkatkan efektivitas, integritas lingkungan, dan keadilan dalam skema kredit karbon dan *offsetting*. Penelitian oleh (Bonaparte, 2022; Bonaparte et al, 2022) menemukan bahwa *Regulation Sentiment Index* (CRSX)

berdampak besar pada volatilitas harga dan volume perdagangan kripto, meskipun pengaruh jangka panjang terhadap harga relatif terbatas. Selain itu, pengenalan instrumen *futures* yang teregulasi di CME terbukti meningkatkan volume perdagangan dan volatilitas Bitcoin, yang menunjukkan bahwa kebijakan regulasi dapat memperkuat hubungan antara *supply*, volume transaksi, dan volatilitas (Menchetti et al., 2021).

Zhang et al. (2023) membuktikan bahwa volatilitas di pasar mata uang kripto meningkat secara signifikan setelah pengumuman regulasi, khususnya oleh *Chinese policymaker* selama masa pandemi. Sedangkan, perang Rusia-Ukraina mendorong peningkatan volatilitas komoditas, terutama dipicu oleh cadangan devisa Rusia, diikuti oleh faktor perdagangan, sentimen, dan kebijakan moneter, dengan kepanikan investor serta kenaikan suku bunga *The Fed* yang semakin memperkuat dampaknya (Fang et al, 2022). Kamal et al. (2023) juga menegaskan bahwa konflik dan krisis menyebabkan penurunan signifikan pada likuiditas dan *return* kripto.

Di sisi lain, pengembangan *Regulatory Risk Index* (CRRIX) berbasis *machine learning* juga berhasil menunjukkan adanya keterkaitan erat antara risiko regulasi dan indeks volatilitas pasar kripto (VCRIX) (Ni et al., 2020). Penerapan kebijakan pelarangan perdagangan aset kripto yang diberlakukan oleh China sejak tahun 2021, terbukti meningkatkan hubungan antar aset kripto dengan efek volatilitas ekstrem terhadap Bitcoin (Yu et al., 2022). *Canadian Securities Administrators* (CSA) belum mengeluarkan panduan khusus undang-undang federal atau provinsi di Kanada tentang kredit karbon yang ditokenisasi, tetapi

hukum sekuritas yang ada dapat berlaku jika token dianggap sebagai kontrak investasi atau derivatif (Burgoyne et al., 2025). Selain itu, penelitian lain menegaskan bahwa regulasi juga berpengaruh terhadap *bid-ask spread* dan nilai transaksi, karena kebijakan seperti *tick size rules* atau *transaction costs* dapat memengaruhi kedalaman pasar dan biaya perdagangan (Hussain, 2011; Kalimipalli et al. 2002; Wang et al., 2000). Menurut Asif et al. (2024), Singh et al (2024) dan Vignesh et al. (2024), regulasi aset kripto dapat mengurangi manipulasi pasar seperti *spoofing*, *pump-and-dump*, dan *wash trading*, serta meningkatkan stabilitas pasar dengan mempersempit *spread* dan mengatur *leverage*.

Meskipun membawa manfaat, tokenisasi menghadapi tantangan berupa ketidakjelasan regulasi, kurangnya interoperabilitas, serta resistensi terhadap perubahan (Miglo, 2022; Tezel et al., 2021). Dalam perspektif *Institutional Theory* (Scott, 2005), regulasi berperan sebagai kerangka normatif dan kognitif yang membentuk perilaku aktor pasar. Regulasi yang mendukung penggunaan token kripto karbon pada *blockchain* VCMs, menciptakan kepastian hukum dan mendorong partisipasi lebih luas dari aktor institusional atau swasta, sehingga memperkuat pengaruh positif tokenisasi terhadap likuiditas. Namun, regulasi yang restriktif atau ambigu dapat menghambat adopsi teknologi dan menurunkan kepercayaan pasar. Oleh karena itu, berdasarkan bukti empiris dan teori pendukung, maka indeks regulasi diposisikan sebagai variabel moderator untuk menilai kekuatan yang secara spesifik memperkuat pengaruh tokenisasi dan likuiditas pasar karbon serta mendukung hipotesis sebagai berikut:

H4 = Indeks regulasi memoderasi hubungan antara tokenized carbon assets on-chain trading (total supply, volume transaksi, nilai transaksi) dan likuiditas VCMs (volume perdagangan, volatilitas, bid-ask spread).

2.12.5 Regulasi pasar karbon memoderasi hubungan antara adopsi biocrypto dan likuiditas VCMs

Menurut *Environmental Governance Theory* (Lemos et al., 2006), tata kelola lingkungan yang adaptif dan transparan dapat meningkatkan efektivitas mekanisme berbasis teknologi. *Financial Technology* (Fintech) telah memperluas akses terhadap layanan keuangan yang mampu menjangkau investor kecil (Qin et al., 2023), sedangkan keuangan berkelanjutan (*sustainable finance*) menjadi instrumen investasi yang mengarahkan aliran modal pada pembiayaan proyek-proyek yang memprioritaskan iklim, seperti pengurangan emisi karbon, untuk mencapai SDGs (Junjie et al., 2023; Purohit et al., 2023; Sabbar, 2023; Schloesser et al., 2022; Svoboda, 2023; Yucel, 2023). Penelitian oleh Liu et al. (2023) menunjukkan bahwa FinTech dapat meningkatkan efisiensi pasar kredit karbon dengan memanfaatkan teknologi *blockchain* untuk pelacakan dan verifikasi kredit karbon, yang mampu menurunkan biaya transaksi dan risiko *human error*, serta meningkatkan kepercayaan pelaku pasar dalam pengambilan keputusan keuangan, sehingga mendorong investasi yang lebih tinggi dengan jaminan akurasi (Biswas et al., 2024; Cao, 2023; Lăzăroiu, 2023; Seyedjafarrangraz, 2024). Penggunaan *machine learning* dan *artificial intelligent* dalam analisis *dataset*, membantu proses identifikasi dan *forecasting* peluang investasi yang menjembatani dunia keuangan dengan pengelolaan lingkungan (Du et al., 2022; Nilashi et al., 2023; Ning et al.,

2022). Namun, tantangan seperti fragmentasi regulasi, risiko keamanan siber, dan kesenjangan digital, dapat membatasi adopsi luas solusi keberlanjutan berbasis Fintech (Onabowale, 2024). Cunha et al. (2021) dan Hassan et al. (2024) menekankan pentingnya kerangka regulasi dan tata kelola yang mendukung, standar global yang konsisten, serta kolaborasi antar pemangku kepentingan untuk memaksimalkan potensi Fintech dalam mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan.

Kerangka regulasi *crypto-assets* di berbagai yurisdiksi (EU, AS, Asia) yang dihubungkan dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs) oleh Srokosz (2024), menjelaskan bahwa aturan transparansi dan perlindungan investor dapat mempengaruhi kompetitivitas pasar, memperkuat atau menekan efek instrumen inovatif seperti dampak teknologi *blockchain* pada tujuan keberlanjutan (*energy consumption and emissions*) serta dapat menurunkan risiko pasar. Regulasi yang jelas mengenai akuntabilitas, verifikasi digital, dan pengakuan nilai ekonomi dari token lingkungan dapat memperkuat pengaruh *biocrypto*, sebagai Fintech, terhadap likuiditas. Sebaliknya, ketidakpastian regulasi dapat menciptakan resistensi pasar dan memperlambat penetrasi *biocrypto* ke dalam VCMs sebagai bagian dari sistem keuangan berkelanjutan.

Regulatory Change and Monetary Policy oleh *Committee on the Global Financial System* (2015) membahas pentingnya menilai dampak gabungan dari regulasi keuangan baru terhadap kebijakan moneter, serta menyoroti bagaimana tingkat suku bunga dan perubahan regulasi secara langsung mempengaruhi volatilitas pasar. Sedangkan, KPMG (2022) menekankan bahwa RegTech berperan

dalam meningkatkan transparansi, efisiensi, dan akuntabilitas proses kepatuhan melalui pemanfaatan otomatisasi, integrasi data, dan analitik tingkat lanjut. Sejalan dengan itu, *Hong Kong Monetary Authority* (HKMA, 2022) menunjukkan bahwa penerapan RegTech pada Seneca, memungkinkan pengawasan kepatuhan secara *real-time* yang meningkatkan interoperabilitas data lintas lembaga keuangan. RegTech tidak hanya diposisikan sebagai instrumen pendukung, tetapi sebagai agen transformasi regulasi yang dapat merespons kompleksitas inovasi keuangan digital. Selain itu, RegTech berperan penting dalam pseudonimisasi data, untuk meningkatkan privasi, perlindungan data (Buckley et al., 2020) dan meningkatkan keamanan keuangan dan memastikan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan yang rentan terhadap ancaman keamanan siber (Chukwunweike et al., 2024a; Dugbartey et al., 2025; Javid et al., 2025; Nwafor et al., 2024) serta mengurangi risiko investasi berkelanjutan dan kejahatan keuangan (*financial crime*) seperti pencucian uang, penipuan, penggelapan, *insider trading* (Bakhos-Douaihy et al., 2023; Chukwunweike et al., 2024b; Gidage et al., 2024; Ku-Mahamud et al. 2018; Kurum, 2023; Meiryani et al., (2022); Turki et al., 2020).

Regulasi aset kripto berperan dalam transisi menuju ekonomi rendah karbon, yang memastikan bahwa inovasi digital DLT *blockchain* selaras dengan prinsip keberlanjutan yang mengintegrasikan aspek lingkungan ke dalam tata kelola aset digital, meskipun terdapat kendala dalam pengukuran dampak iklim, baik metode atau estimasi, yang berkaitan dengan konsumsi energi dari penggunaan *blockchain* (ISO, 2015). Regulasi MiCA di UE (*Council of the European Union*, 2022a,b) yang merujuk pada kerangka SFDR dan EU *Taxonomy* sebagai dasar dalam

pengungkapan keberlanjutan (*European Parliament & Council of the European Union*, 2019), mengusulkan agar aset kripto berbasis PoW menyertakan penilaian independen terhadap konsumsi energi dari jaringan *blockchain* dalam dokumen *whitepaper. Executive Order on Ensuring Responsible Development of Digital* oleh Presiden Amerika Serikat secara eksplisit menyoroti kemajuan DLT sebagai layanan keuangan dalam pasar aset digital kripto, yang berdampak pada permintaan energi dan iklim (OSTP, 2022). Selain itu, penerapan larangan absolut terhadap aset kripto, pengaturan konsumsi energi melalui regulasi, serta penegakan hukum terhadap aktivitas tambang kripto ilegal terbukti efektif dalam berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon (Dindar et al., 2022; Sang et al., 2022). Dengan demikian, regulasi menjadi instrumen pengendali risiko lingkungan dari teknologi *blockchain* yang mendukung mekanisme VCMs yang berkelanjutan.

Studi *event analysis* menemukan bahwa berita regulasi menimbulkan *abnormal return* negatif serta mengubah pola perdagangan tergantung tingkat likuiditas dan asimetri informasi aset (Chokor et al., 2021). Dalam konteks pasar saham, implementasi kebijakan seperti aturan fraksi harga (*tick size*) pada indeks saham LQ45 terbukti menurunkan volume dan volatilitas secara signifikan, meskipun tidak mempengaruhi rasio kedalaman terhadap *spread* relatif, sehingga berdampak pada *return* saham (Fajri et al., 2019). Penelitian ini menunjukkan bahwa adanya hubungan erat antara regulasi dan likuiditas pasar. Hasil penelitian yang sama juga dikonfirmasi oleh Alexander et al., (2006) dan Zhou (2004) melalui analisis mikrostruktur pasar menunjukkan bahwa regulasi terkait *short-selling*, *tick*

size, dan kewajiban pengungkapan terbukti memengaruhi *bid-ask spread*, likuiditas, dan volatilitas perdagangan.

Rojcek et al. (2016) menekankan bahwa regulasi dapat mempengaruhi *market quality* seperti kedalaman pasar dan biaya transaksi. Selain itu, aturan minimum waktu tunggu (*minimum resting time*) atau *speed bumps* mengurangi dampak informasi asimetris dan volatilitas. Sedangkan *rebates* pada *limit orders*, yang justru memperburuk *effective spreads*. Temuan ini menunjukkan bahwa regulasi menyebabkan terjadinya transfer kekayaan dari *high-frequency traders* kepada spekulan yang lebih lambat. Farmer et al. (2012) melalui laporan kebijakan *UK Government's Foresight Report*, menekankan bahwa perdagangan kontinu mendorong *arms race* berbasis kecepatan di antara pelaku pasar, yang dapat meningkatkan volatilitas dan biaya transaksi. Sebaliknya, penerapan regulasi berbasis desain pasar seperti *frequent batch auctions* terbukti mampu menghentikan *arms race*, sehingga menunjukkan bahwa regulasi berperan penting sebagai variabel moderasi yang dapat mengubah kekuatan hubungan antara indikator mikrostruktur pasar dengan kualitas perdagangan (Budish et al., 2015; Farmer et al., 2012).

Bias et al. (2015) menguji tingkat ekuilibrium investasi pada teknologi kecepatan menggunakan model ekspektasi rasional Grossman-Stiglitz yang mengakibatkan respon berlebihan secara sosial, dan inefisiensi pasar, sehingga diusulkan penerapan pajak Pigovian sebagai instrumen regulasi. Penelitian lain juga mengusulkan berbagai instrumen kebijakan seperti *Tobin taxes (financial transactions taxes)*, *minimum resting times*, *message-to-trade ratios*, dan *random*

delay untuk meminimalisir dampak negatif *HFT arms race* seperti spekulasi dan volatilitas berlebihan di pasar ekuitas dan valuta asing, sekaligus meningkatkan stabilitas dan transparansi, khususnya dalam menghadapi isu struktur pasar seperti *Flash Crash*, dengan menciptakan *level playing field* antara pusat perdagangan dan investor (Budish et al., 2012; Haldane, 2011; Niederauer, 2012; SEC & CFTC, 2010; Summers et al., 1989; Stiglitz, 2014; Tobin, 1978). Jiang et al. (2021) menunjukkan bahwa tanpa intervensi kebijakan yang tepat, algoritma konsensus PoW dalam jaringan *blockchain* membutuhkan konsumsi energi tinggi dan menghasilkan emisi karbon yang besar. Penelitian ini menggunakan pemodelan *Bitcoin blockchain carbon emission model* (BBCE), dengan membandingkan efektivitas berbagai kebijakan, dan menemukan bahwa pendekatan regulasi berbasis lokasi (*site regulation*) lebih efektif dalam menurunkan intensitas emisi karbon dibandingkan kebijakan pajak karbon (*carbon tax*) (Hagman et al., 2019) atau pembatasan akses pasar (*market access*) dan *benchmark* (Vilkov et al., 2023). Literatur empiris ini menegaskan peran penting regulasi dalam memoderasi hubungan antara aktivitas perdagangan berfrekuensi tinggi, inovasi teknologi blockchain dengan kualitas pasar.

Secara umum, perdagangan dengan kecepatan tinggi dan volume besar mempersempit *bid-ask spread* di pasar. Sedangkan bagi penjual dalam perdagangan frekuensi tinggi, *spread* yang tinggi dapat menghasilkan keuntungan yang lebih besar, meskipun mengindikasikan risiko yang lebih tinggi (Ghasemiyeh et al., 2017). Kim et al. (1996) dan Minardi et al. (2006) menemukan hubungan positif antara *spread* dan volume perdagangan. Secara keseluruhan, bukti empiris

memperlihatkan bahwa indeks regulasi dan kebijakan pasar mampu memoderasi kekuatan hubungan antara total supply, volume perdagangan, volatilitas, nilai transaksi, dan *bid-ask spread*, dengan arah pengaruh yang bervariasi tergantung karakteristik aset dan jenis regulasi yang diterapkan, sehingga hipotesis penelitian dijabarkan sebagai berikut:

H5 = Indeks regulasi memoderasi hubungan antara adopsi biocrypto (marketcap, frekuensi transaksi, wallet aktif) dan likuiditas VCMs (volume perdagangan, volatilitas, bid-ask spread)

2.12.6 Estimasi Model GARCH

Volatilitas harga kripto menunjukkan karakteristik heteroskedastisitas bersyarat yang dapat dimodelkan secara efektif dengan pendekatan GARCH, sehingga dapat diadaptasi untuk menggambarkan dinamika *return* volatilitas pada token kredit karbon seperti \$KLIMA, BCT, dan MCO2. Dalam penelitian ini digunakan model simetris dan asimetris GARCH, untuk menguji kemampuan prediksi dari berbagai model GARCH dalam menggambarkan volatilitas return token bagi trader. Pemodelan dan *forecasting* volatiltas return meliputi *Exponential GARCH* (EGARCH) yang diusulkan oleh Nelson (1991), *Asymmetric Power GARCH* (APARCH) yang dikembangkan oleh Ding, Granger, dan Engle (1993) serta *Fractionally Integrated GARCH* (FIGARCH) oleh Baillie (1996). Pemodelan dilakukan karena setiap pasar menunjukkan performa, ukuran, dan karakteristik yang berbeda, sehingga spesifikasi estimator dilakukan untuk mendapatkan model terbaik dalam menggambarkan volatilitas secara akurat dan mendekati nilai

aktualnya, yang secara tidak langsung mempengaruhi keputusan trader atas produk investasi (Yalama et al., 2008).

Model GARCH dapat memberikan hasil prediksi lebih akurat untuk aset kripto, Bitcoin Ethereum, Litecoin, Ripple, Monero, Dash, Stellar, dan NEM (Ngunyi et al., 2019). Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Almansour et al. (2021) menggunakan data statistik harian berdasarkan harga pembukaan (*open price*) mata uang kripto, dengan model ARCH dan GARCH yang efektif dalam memprediksi volatilitas pasar kripto, serta mengindikasikan bahwa volatilitas historis memiliki pengaruh terhadap volatilitas saat ini. Penelitian lain oleh Guirguis (2024) pada *cryptocurrency* Shiba, Bitcoin, dan Ethereum menggunakan model EGARCH yang menunjukkan bahwa tidak terdapat autokorelasi pada residual atau bersifat homoskedastik, tetapi guncangan positif dan negatif menyebabkan penyimpangan dari kenormalan.

Penelitian saham LQ-45 pada IDX oleh Rita et al. (2018) untuk menguji pola hari perdagangan (*weekday pattern*) dengan model GARCH. Hasil pengujian menunjukkan variasi dalam *return* rata-rata saham selama hari-hari perdagangan. Hari Senin menunjukkan *return* terendah, sedangkan hari Rabu menunjukkan *return* tertinggi. Namun, pengaruh *return* rata-rata hari Jumat terhadap *return* hari Senin tetap tidak terbukti, serta *return* hari Senin lebih dipengaruhi oleh frekuensi perdagangan, bukan volume perdagangan. Zhang (2024) memprediksi pergerakan harga indeks New York Stock Exchange (NYSE) menggunakan data harian dengan model ARCH, GARCH, dan *Markov-Switching*, serta menyimpulkan bahwa indeks NYSE memiliki potensi untuk meningkat dalam jangka pendek, namun tren jangka

panjang sulit diprediksi karena ketidakpastian ekonomi AS, sehingga investor disarankan memberi perhatian pada faktor makroekonomi serta guncangan politik dan global dalam strategi investasi. Sedangkan, Xia (2024) menunjukkan bahwa meskipun ARIMA dapat memberikan prediksi jangka pendek yang cukup optimistis terhadap harga penutupan *Apple's stock*, model ini tidak disarankan digunakan secara tunggal untuk prediksi jangka panjang karena adanya tren non-linear dan pola musiman dalam data harga saham.

Wang et al. (2022) meneliti interaksi antara Bitcoin dan variabel ekonomi AS seperti indeks harga konsumen dan jumlah uang beredar, yang tersedia dalam frekuensi bulanan dengan menerapkan model GARCH multivariat, serta menunjukkan bahwa Bitcoin berkorelasi positif dengan saham, obligasi, dan komoditas, serta berkorelasi negatif dengan indeks dolar AS, yang bertentangan dengan peran Bitcoin sebagai aset *safe haven*. Secara khusus, selama periode krisis seperti COVID-19, korelasi positif tersebut meningkat, sehingga mengurangi manfaat diversifikasi. Bouoiyour et al. (2015) dan Gronwald (2014) menggunakan analisis GARCH untuk meneliti harga Bitcoin, dan kedua penelitian ini menunjukkan penurunan volatilitas yang signifikan dalam kondisi pasar yang belum mencapai kematangan struktural. Dyhrberg (2016a,b) menggunakan metodologi GARCH asimetris untuk menyelidiki kemampuan Bitcoin dalam lindung nilai dan sebagai alat tukar seperti emas dan dolar AS yang dapat menghasilkan keuntungan karena berfungsi sebagai instrumen investasi sekaligus alat manajemen portofolio, terutama bagi investor yang menghindari risiko.

Sebaliknya, Kyriazis et al. (2019) mengeksplorasi volatilitas Bitcoin, Ethereum, dan Ripple yang memiliki kapitalisasi tertinggi selama pasar *bearish*

dengan menggunakan model ARCH, GARCH, dan DCC-GARCH, yang menunjukkan sebagian besar kripto bersifat komplementer, tanpa ada kemampuan lindung nilai yang signifikan selama penurunan pasar. Baur et al. (2018a) menambahkan bahwa Bitcoin tidak dapat diposisikan sebagai aset *safe haven* karena korelasi lemah dengan saham, obligasi, dan komoditas dalam kondisi normal atau krisis. Penelitian lain oleh Chan et al. (2019) justru menunjukkan kemampuan lindung nilai yang kuat oleh Bitcoin terhadap indeks saham seperti Euro-Index, Shanghai A-Share, S&P500, Nikkei, dan indeks TSX dengan pendekatan ketergantungan frekuensi dan metodologi DCC-GARCH serta CCC-GARCH. Dalam studi komprehensif, Huang et al. (2021) menunjukkan bahwa Bitcoin dapat berfungsi sebagai diversifikasi portofolio yang efektif untuk saham lokal atau *safe haven* selama pasar *bearish* akibat COVID-19 di Australia, namun memiliki kekuatan yang lemah di Kanada, Eropa, Inggris, dan Amerika Serikat. Mariana et al. (2021), menemukan kesesuaian Bitcoin dan Ethereum sebagai *safe haven* jangka pendek, terutama selama pandemi, di mana *return* harian mereka cenderung berkorelasi negatif dengan *return* S&P500, serta menyarankan bahwa Ethereum lebih efektif sebagai *safe haven* dibandingkan Bitcoin. Selain itu, Studi oleh Barone-Adesi et al. (2018) dan Huang et al. (2017) menunjukkan bahwa penerapan model GARCH pada indeks S&P lebih sesuai dibandingkan pendekatan volatilitas lainnya dalam penentuan harga opsi. GARCH juga digunakan oleh Peng et al. (2022) dan Sahamkhadama et al. (2018) untuk mengelola risiko dan alokasi aset dalam optimalisasi portofolio, dengan *return* yang menunjukkan *skewness* dan leptokurtosis, yaitu puncak distribusi lebih tinggi dari rata-rata dengan ekor tebal.

Katsiampa (2017) mengestimasi volatilitas Bitcoin dan menyimpulkan bahwa AR-CGARCH merupakan model yang paling tepat untuk menggambarkan volatilitas. Sementara model IGARCH dan GJR-GARCH dalam penelitian Chu et al. (2017) adalah estimator paling optimal untuk memodelkan volatilitas selama masa pertumbuhan Bitcoin, Dash, Dogecoin, Litecoin, Maidsafecoin, Monero, dan Ripple, serta menegaskan perlunya analisis yang lebih dalam, pengawasan regulasi, dan peningkatan ukuran risiko. Pada penelitian lanjutan, Katsiampa (2019) menggunakan model BEKK-GARCH asimetris diagonal dan menemukan bahwa varians kondisional Bitcoin, Ether, Ripple, Litecoin, dan Stellar Lumen dipengaruhi secara signifikan oleh kesalahan kuadrat masa lalu (*past squared errors*) dan volatilitas kondisional. Estimator yang sama juga digunakan oleh Beneki et al. (2019) dengan menunjukkan adanya perubahan korelasi signifikan serta kemampuan diversifikasi pada Bitcoin dan Ethereum. Model BEKK-GARCH oleh Klein et al. (2018) menunjukkan peran penting emas dalam pasar keuangan pada saat terjadi tren *bearish*, sementara Bitcoin memperlihatkan efek berlawanan namun tetap berkorelasi positif dengan pasar *bearish*. Selain itu, Bitcoin tidak menunjukkan kemampuan lindung nilai portofolio dan tidak memiliki hubungan asimetris antara *return* dan volatilitas, meskipun guncangan positif meningkatkan volatilitas kondisional yang lebih besar dibandingkan guncangan negatif.

Symitsi et al. (2018) menemukan adanya *spillover return* jangka pendek dari perusahaan teknologi ke Bitcoin, *spillover* jangka panjang dari Bitcoin ke perusahaan energi dan *spillover* guncangan asimetris dua arah antara Bitcoin dan indeks saham yang menunjukkan peluang perdagangan yang menguntungkan

dengan estimator VAR(1)-BEKK-AGARCH. Penggunaan model BEKK-GARCH(1,1) diagonal bivariat dengan pemodelan simultan terhadap varians dan kovarians, serta *Vector Autoregression* (VAR) oleh Beneki et al. (2019) menunjukkan ketidakefisienan pasar akibat respons tertunda dalam volatilitas Bitcoin setelah terjadi guncangan pada *return* Ethereum, sehingga keputusan trader untuk memasukkan mata uang kripto yang sangat volatil ke dalam portofolio perlu dilakukan dengan sangat hati-hati.

Engle et al. (1993) memperkenalkan konsep *news impact curve* yang mengukur bagaimana informasi baru (positif atau negatif) diintegrasikan ke dalam estimasi volatilitas. Bouoiyour et al. (2015) menerapkan ekstensi model GARCH dengan menunjukkan bahwa volatilitas Bitcoin sangat responsif dan sensitif terhadap berita negatif yang secara signifikan memperburuk fluktuasi harga, sehingga faktor eksternal perlu dimasukkan ke dalam pemodelan dan peramalan volatilitas Bitcoin. Sedangkan, Apergis (2022) menemukan dampak positif pandemi COVID-19, sebagai faktor eksplisit yang meningkatkan akurasi prediksi, terhadap volatilitas kondisional *return* dari delapan mata uang kripto dengan pendekatan pemodelan GARCH asimetris. Melalui pendekatan ini, mereka menunjukkan bahwa volatilitas cenderung merespons secara asimetris terhadap berita, di mana bad news menghasilkan lonjakan volatilitas yang lebih besar dibandingkan good news, mendukung keberadaan *leverage effect* dalam pasar keuangan.

Model GARCH univariat oleh Taera et al. (2023) menunjukkan peningkatan volatilitas pada sebagian besar aset Islam atau Syariah, ESG, konvensional,

FinTech, dan komoditas, kecuali Bitcoin yang mengalami penurunan volatilitas selama krisis pandemi COVID-19 dan perang Rusia–Ukraina. Selain itu, Chi et al. (2021) juga menemukan model GARCH univariat merupakan estimator terbaik untuk menangkap volatilitas Bitcoin dan Ethereum, sementara model GJR-GARCH tidak menunjukkan respons volatilitas asimetris terhadap return masa lalu. Dalam hal sampel model VARMA-DCC-AGARCH multivariat lebih baik dari model GARCH, meskipun menunjukkan kinerja yang lebih rendah di luar sampel. Selain itu, prediksi volatilitas berbasis GARCH melebihi volatilitas implisit dari opsi, sehingga menghasilkan strategi perdagangan yang menguntungkan dengan memanfaatkan inefisiensi harga di pasar opsi kripto. Model GARCH multivariat VARMA(1,1)-DCC-GJR-GARCH juga digunakan oleh Guesmi et al. (2019) untuk menguji dampak silang kondisional serta *spillover* volatilitas antara Bitcoin dan indikator keuangan dengan risiko yang lebih rendah.

Bergsli et al. (2022) membandingkan varians model GARCH dan model *heterogen autoregressive* (HAR) dalam peramalan volatilitas Bitcoin. EGARCH dan APARCH terbukti efektif meramalkan volatilitas, sedangkan model HAR berbasis varians realisasi dari data frekuensi tinggi lebih baik dalam meramalkan volatilitas jangka pendek dari model GARCH berbasis data harian. Tan et al. (2021) mengusulkan model TV-MSGARCH (*Markov-switching* GARCH) yang lebih baik dalam *fitting in-sample* dan memberikan prediksi *out-of-sample* dari model GARCH tradisional serta menyoroti pentingnya efek waktu dalam probabilitas transisi untuk menangani volatilitas ekstrem Bitcoin, dengan memasukkan variabel eksogen seperti volume perdagangan harian BTC dan data pencarian Google.

Hattori (2019) menemukan bahwa model EGARCH dan APARCH dengan distribusi normal memiliki akurasi prediksi volatilitas Bitcoin yang lebih tinggi dibandingkan distribusi *t-skewed*, berdasarkan metrik MSE dan QLIKE terhadap volatilitas realisasi dari *return intraday* 5 menit, untuk memastikan akurasi prediksi meskipun terdapat potensi *noise*. Pratas et al. (2023) juga melakukan analisis kemampuan prediksi dengan menggunakan *return* logaritmik Bitcoin antara GARCH dan *deep learning methodologies*, serta menemukan bahwa model MLP dan RNN menghasilkan prediksi jangka pendek yang lebih halus dengan biaya komputasi yang signifikan, meskipun kurang responsif terhadap lonjakan volatilitas besar, sedangkan model LSTM lebih efektif menangkap dan menyesuaikan pergerakan volatilitas ekstrem.

Darné et al. (2019) dan Katsiampa (2017) menggunakan estimator QML dengan memasukan *return* Bitcoin dalam estimasi model, namun tidak menghasilkan model GARCH yang sesuai untuk estimasi *return* Bitcoin. Troster et al. (2019) menggunakan spesifikasi GARCH *fat tails* dan model *Generalized Autoregressive Score* (GAS) berdasarkan fungsi skor dari densitas kondisional prediktif *return* Bitcoin yang memberikan kecocokan model (*goodness-of-fit*) terbaik serta cakupan risiko (*risk capital*) yang paling akurat dalam memproyeksikan *Value-at-Risk* (VaR) Bitcoin. Analisis *multifractal detrended fluctuation* (MF-DFA) dan model GARCH, GJR-GARCH, serta RGARCH oleh Takaishi (2018) menunjukkan ketidakefisienan pasar dan multifraktalitas harga Bitcoin berasal dari korelasi temporal dan distribusi *fat tails*. Yıldırım et al. (2023) menggunakan kriteria informasi Akaike untuk menentukan model prediksi

volatilitas *return* Bitcoin menggunakan data harga mingguan, serta menemukan GARCH(1,1) sebagai estimator terbaik, meskipun uji ARCH-LM menunjukkan tidak adanya efek ARCH dalam residual. Ferreira et al. (2024) menunjukkan efektivitas dan kesesuaian model volatilitas EGARCH(1,1) dengan MATIC, GARCH(1,1) untuk VET serta kegagalan estimator terhadap SOL dan BTT yang diakibatkan oleh keterbatasan pasar dibandingkan Bitcoin.

Khan et al. (2021) menguji model GARCH(1,1) dan GJR-GARCH(1,1) untuk mengidentifikasi fenomena kluster volatilitas dan efek leverage dalam kripto. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pasar kripto mengalami persistensi volatilitas, fenomena ekor gemuk (*fat-tail*), dan efek leverage selama masa pandemi. Fung et al. (2022) juga membuktikan bahwa model GARCH dengan distribusi Student-t mampu menangkap karakteristik volatilitas *risk and return* ekstrem seperti memori panjang, kluster volatilitas, ekor berat, dan efek leverage negatif secara signifikan dan model TGARCH-student t yang lebih optimal dalam menangkap asimetri respons volatilitas terhadap guncangan harga selama penurunan pasar, dengan performa prediksi VaR *fat tails* yang lebih baik dari distribusi normal. Caporale et al. (2019) menemukan bahwa model GARCH dua rezim lebih baik dalam memprediksi VaR dan *Expected Shortfall* (ES) untuk mata uang kripto utama, serta menekankan efek *leverage* yang signifikan dan perlunya *switching regime* untuk meningkatkan manajemen risiko dan pengawasan regulasi.

Kim et al. (2021) menganalisis volatilitas menggunakan model *Bayesian Stochastic Volatility* (SV) dan beberapa model GARCH, serta menemukan bahwa model SV lebih akurat dalam memprediksi volatilitas jangka panjang daripada

model GARCH, terutama untuk data keuangan yang sangat volatil seperti mata uang kripto. Tiwari et al. (2019) membandingkan variasi model GARCH dan volatilitas stokastik (SV) dengan log-volatilitas AR(1) yang lebih fleksibel karena menggabungkan lonjakan volatilitas, efek leverage, dan inovasi terdistribusi t untuk menilai kecocokan terhadap *return* harga Bitcoin dan Litecoin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model SV- t paling cocok untuk Bitcoin, sementara model GARCH- t memberikan performa terbaik untuk Litecoin.

Penelitian oleh Miron et al. (2010) menggunakan data *return* saham harian dari Amerika Serikat dan Rumania dengan pendekatan EGARCH, PGARCH, dan TGARCH, serta menemukan bahwa kesalahan prediksi EGARCH lebih rendah dari TGARCH. Lestano et al. (2010) menemukan adanya *asymmetric volatility transmission* dalam hubungan timbal balik antara pasar saham Singapura dan Indonesia dengan menggunakan model EGARCH (1,1). Yalama et al. (2008) menambahkan 4 model baru ke dalam pemodelan, yaitu IGARCH, GARCH-M, TARCH dan PARCH, yang dapat menggambarkan dinamika volatilitas pasar dengan baik, serta mampu mereplikasi perilaku deret waktu keuangan secara lebih akurat dibandingkan model simetris (Maqsood et al. (2017). Berdasarkan hasil estimasi atau *fitting model*, Sari et al. (2017) menyimpulkan bahwa model asimetris GARCH merupakan estimator dalam merepresentasikan akurasi prediksi volatilitas *return* saham.

Model EGARCH-M digunakan oleh Saleem (2007) pada bursa saham Karachi (Pakistan), dan menemukan bahwa *return* positif berkorelasi dengan peningkatan volatilitas, yang mengindikasikan adanya efek asimetris dalam respons pasar

terhadap informasi. Penelitian lain oleh Yu et al. (2008) menggunakan model EGARCH untuk menganalisis integrasi pasar saham Middle East and North Africa (MENA) dengan sistem keuangan global, serta menunjukkan hubungan positif signifikan antara risiko dan *return* di pasar saham Bahrain, Oman, dan Arab Saudi. Namun, volatilitas bukan menjadi bagian dari faktor risiko di Mesir, Yordania, Maroko, dan Turki. Sedangkan pada bursa saham Makedonia (MSE), risiko dan *return* memiliki hubungan yang lemah (Kovacic, 2008). Karmakar (2005) juga menyimpulkan bahwa model EGARCH mampu menangkap hubungan negatif risiko dan *return* di pasar saham India, khususnya pada indeks S&P CNX Nifty.

Sedangkan oleh Guirguis (2018) model EGARCH(1,1) digunakan untuk menangkap dinamika volatilitas nonlinier dan penyimpangan dari normalitas dalam data GBP/USD, meskipun efek asimetris tidak signifikan, namun tetap mampu mengakomodasi *shock* positif dan negatif serta menghasilkan residual yang homoskedastik dan bebas autokorelasi. Penelitian terbaru oleh Studi oleh Guirguis (2024) menerapkan model EGARCH untuk menganalisis volatilitas tiga aset kripto Shiba, Bitcoin, dan Ethereum dan hasil analisis menunjukkan bahwa ketiga aset tersebut memiliki residual yang homoskedastik dan tidak menunjukkan autokorelasi, namun tetap mengalami *shock* positif dan negatif yang menyebabkan penyimpangan dari distribusi normal. Penelitian oleh Ikrima et al. (2023) menggunakan model EGARCH untuk menganalisis *volatility spillover* antara Bitcoin, Ethereum, Tether, dan emas dunia dengan menggunakan *weekly data* dan metode EGARCH. Hasilnya menunjukkan adanya hubungan *spillover* yang signifikan antara Bitcoin dan Ethereum, yang mengindikasikan bahwa perubahan

harga Bitcoin diikuti oleh pergerakan dan perubahan harga Ethereum dengan arah yang sama. Selain itu, *shock positif* memiliki pengaruh lebih besar dibandingkan *shock negatif* terhadap volatilitas Bitcoin relatif terhadap Ethereum. Namun, hubungan volatilitas antara Bitcoin dan Tether, serta Bitcoin dan emas dunia, tidak dapat dianalisis lebih lanjut menggunakan model EGARCH karena data harga kedua aset tersebut menunjukkan homoskedastisitas, sehingga tidak memenuhi syarat untuk pemodelan heteroskedastisitas. Temuan ini menegaskan pentingnya penggunaan model asimetris seperti EGARCH dalam menangkap dinamika volatilitas kripto yang kompleks dan tidak simetris. Lin (2018) membandingkan kemampuan adaptasi berbagai model GARCH dalam menangkap dinamika volatilitas pada SSE Composite Index dengan menggunakan data return harian periode 2013–2017. Berdasarkan analisis empiris dan evaluasi peramalan, hasil penelitian menunjukkan bahwa model EGARCH mengungguli model ARCH, TARCH, GARCH, dan ARIMA, sehingga lebih unggul dalam memprediksi perilaku volatilitas pada indeks saham yang diteliti.

Di sisi lain, studi oleh Pandia et al. (2019) menunjukkan bahwa model APARCH(1,1) memberikan akurasi dalam memodelkan *return* saham Bank BCA, karena kemampuannya mengakomodasi perbedaan dampak antara *good news* dan *bad news* terhadap volatilitas. Najibullah et al. (2023) menerapkan model APARCH untuk meramalkan volatilitas Indeks Harga Saham Gabungan (IHSG) serta mengestimasi nilai *Value-at-Risk* (VaR), serta menunjukkan bahwa model APARCH menghasilkan estimasi VaR yang lebih responsif dan adaptif dengan struktur model yang mampu menangkap karakteristik ketidaksimetrisan volatilitas

pasar secara lebih komprehensif. Sedangkan penelitian tentang harga harian minyak mentah dunia oleh Famuji et al. (2024) menemukan bahwa model APARCH(1,1) memberikan akurasi peramalan yang lebih tinggi dibandingkan model ARCH(2), dan lebih baik dalam menangani data *time series* yang mengandung heteroskedastisitas dan efek asimetris. Sedangkan penggunaan model PGARCH dalam studi oleh Kande Arachchi (2018) memungkinkan identifikasi dinamika volatilitas asimetris dari berbagai mata uang terhadap Rupee Sri Lanka, di mana *shock* positif dan negatif dapat dianalisis secara simultan untuk mendukung peramalan pasar valuta asing dalam konteks global.

Di sisi lain berbagai studi menunjukkan bahwa model FIGARCH memiliki keunggulan dalam menangkap dinamika volatilitas jangka panjang dibandingkan model heteroskedastisitas kondisional lainnya. Baillie et al. (1996) menggunakan FIGARCH untuk memodelkan fluktuasi nilai tukar, sedangkan Bollerslev et al. (1996) dan Beine et al. (2002) untuk analisis *return* saham. Klein et al. (2018) mengaplikasikan FIAPARCH sebagai estimator terbaik dalam menangkap respons asimetris Bitcoin terhadap guncangan pasar dan persistensi volatilitas yang tinggi. Menurut Tayefi et al. (2012), model FIGARCH memiliki keunggulan dalam menangkap persistensi jangka panjang pada volatilitas deret waktu, dibandingkan model heteroskedastik konvensional seperti ARCH dan GARCH. Hal senada diungkapkan oleh Rakshit et al. (2023) dalam studi harga harian komoditas, menegaskan bahwa pendekatan fraksional FIGARCH lebih efektif untuk memodelkan volatilitas jangka panjang.

FIGARCH juga terbukti mampu merepresentasikan sifat *long memory* dalam return komoditas berjangka, sebagaimana ditunjukkan oleh Baillie et al. (2007) melalui analisis data harian dan *intraday* enam komoditas. Paul (2014) dan Rakshit et al. (2022) juga menegaskan kemampuan model ARFIMA yang mampu menangkap volatilitas *long memory*. Antonakakis (2007) membandingkan performa peramalan volatilitas nilai tukar harian di negara maju dan berkembang, dan menemukan bahwa model FIGARCH memberikan hasil yang lebih akurat, baik dalam sampel maupun di luar sampel. Studi oleh Cheong et al. (2008) pada pasar saham Malaysia (KLCI) mengungkapkan bahwa FIGARCH dapat menangkap perubahan struktural dalam volatilitas, terutama saat terjadi krisis mata uang. Penelitian oleh Banerjee et al. (2006) menggunakan data *high frequency intraday* frekuensi tinggi dari Bursa Saham Nasional India untuk menguji efektivitas model ini dalam menangkap pola volatilitas harian.

Sedangkan Mukherjee et al. (2011) menunjukkan bahwa FIGARCH sesuai untuk berbagai seri return saham di BSE, karena mampu menangkap *long memory effect* yang tidak terdeteksi oleh model GARCH konvensional. Paul et al. (2016) menerapkan FIGARCH untuk memodelkan memori jangka panjang dalam volatilitas harga spot komoditas gram di Delhi, India. Sedangkan, Mitra et al. (2018) menggunakan ARFIMA-FIGARCH untuk memodelkan harga komoditas kentang di pasar Agra dan Amritsar, India. Hal yang sama ditemukan oleh Aliyu et al. (2023) membandingkan model ARFIMA-GARCH dan ARFIMA-FIGARCH untuk memodelkan volatilitas nilai tukar Naira terhadap Dolar, serta Bentes (2015) menemukan bahwa FIGARCH(1,d,1) secara tepat menggambarkan proses

volatilitas harga emas dan merupakan model terbaik untuk meramalkan volatilitas *return* emas.

Selain itu, Crato et al. (2000) serta Jin et al. (2004) menerapkan FIGARCH untuk menganalisis volatilitas harian komoditas pertanian berjangka, dan menangkap fluktuasi yang bersifat persisten. Sedangkan di sektor lain, FIGARCH digunakan dalam peramalan tingkat permukaan Danau Great Salt, yang menunjukkan fleksibilitas model dalam berbagai konteks data deret waktu (Li et al., 2007). Rakshit dan Paul (2024) mengembangkan kerangka FIGARCH dengan menurunkan formula peramalan di luar sampel (*out-of-sample*) beserta varians galat peramalannya untuk model AR(1)-FIGARCH(1,d,1), dengan menggunakan data harga spot modal bawang merah dari pasar Delhi, Lasalgaon, dan Bengaluru di India, serta indeks S&P 500, guna menunjukkan secara empiris kemampuan model tersebut dalam menangkap dinamika volatilitas dengan sifat *long memory*.

Chen et al. (2022d) mengembangkan model FIGARCH baru yang berbasis operator fraksional Caputo (FIGARCH-C) dan metode *quasi-maximum likelihood estimation* (QMLE) digunakan untuk mengestimasi parameter model FIGARCH-C(1,d,1), FIGARCH(1,d,1), dan GARCH(1,1). Hasil penelitian menunjukkan bahwa model FIGARCH dan FIGARCH-C secara signifikan lebih unggul dibandingkan model GARCH dalam menangkap sifat long memory dan persistensi volatilitas pada return minyak mentah Brent dan indeks S&P 500. Mabrouk (2016) membandingkan kemampuan peramalan dua model GARCH terintegrasi simetris (FIGARCH dan HYGARCH) dengan satu model asimetris (FIAPARCH) yang berbasis distribusi Student-t skewed. Setiap model digunakan untuk meramalkan

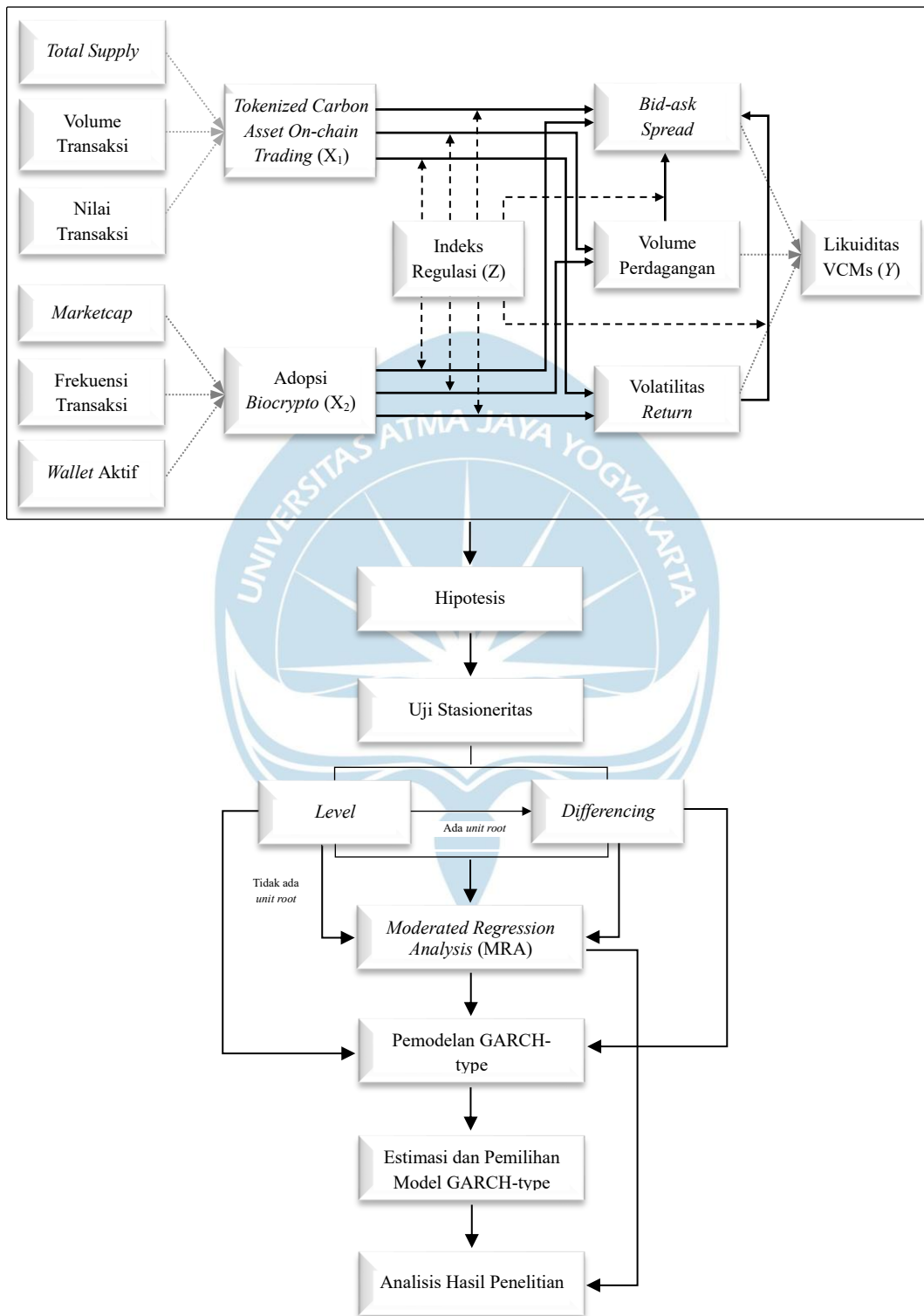
varians kondisional harian dari 10 aset keuangan selama periode sampel sekitar 18 tahun pada tujuh indeks saham (Dow Jones, NASDAQ, S&P 500, DAX 30, FTSE 100, CAC 40, dan Nikkei 225) serta tiga nilai tukar terhadap dolar AS (GBP–USD, YEN–USD, dan EUR-USD). Hasil penelitian menunjukkan bahwa model AR(1)–FIAPARCH(1,d,1) dengan distribusi Student-t skewed relatif lebih unggul dibandingkan model lainnya dalam peramalan di luar sampel (*out-of-sample*) untuk horizon satu, lima, dan lima belas hari. Selain itu, hasil penelitian juga menunjukkan tidak adanya perbedaan yang signifikan antara model AR(1)–FIGARCH(1,d,1) dan AR(1)–HYGARCH(1,d,1), karena keduanya memiliki kemampuan peramalan yang setara.

Berdasarkan uraian diatas, untuk memahami dinamika volatilitas token kredit karbon, maka dibutuhkan estimasi model GARCH sehingga hipotesis dirumuskan sebagai berikut:

H6 : Model EGARCH(1,1) dengan distribusi Student-t adalah estimator terbaik untuk memodelkan volatilitas return token karbon dibandingkan model GARCH(1,1), TGARCH(1,1), APARCH(1,1) dan FIGARCH(1,d,1).

2.13 Kerangka Konseptual

Kerangka konseptual merupakan peta konsep yang digunakan sebagai dasar acuan dalam merumuskan pertanyaan penelitian, merancang metodologi penelitian, mengumpulkan data, menganalisis hasil temuan, dan menarik kesimpulan.



Sumber: Peneliti (2025)

Gambar 2.11-1 Flowchart Model Penelitian