

PENGEMBANGAN TEKNOLOGI BET NON KARBON DAN KARBON DALAM PERMAINAN TENIS MEJA

Rivan Saghita Pratama¹, Indra Ramadhan², Syahnata Deningtyas Putri
(6101422132³), Fatimah Nurul Laksmi (6101422194⁴)

Universitas Negeri Semarang

Alamat e-mail : 1rivan.saghita.pratama@mail.unnes.ac.id,
2indraramadhan@mail.unnes.ac.id, 3tyasputri640@students.unnes.ac.id,
4fatimahnurullaksmi@students.unnes.ac.id

ABSTRACT

This research aims to examine the development of non-carbon and carbon bet technology in table tennis games. Table tennis as a sport that relies on speed, accuracy, and strategy has undergone significant evolution in the development of equipment, especially the bet which is the main instrument of the player. The method used in this research is a comprehensive literature study by analyzing findings from 70 reliable references, consisting of 40 international sources and 30 national sources, regarding material developments, manufacturing processes, and the impact of bet technology on athlete performance. The results show that the development of non-carbon bet has diversified in the use of wood materials with innovations in lamination techniques, while carbon bet has revolutionized with the application of nanotechnology and advanced composite fibers. A comparison of the two technologies shows that carbon bet offers advantages in terms of strength, durability and high-level performance, while non-carbon bet is still relevant for beginner players and certain styles of play. Recent innovations have led to the integration of sustainable materials and hybrid technologies that optimize performance while taking into account environmental aspects. In conclusion, the selection of the optimal bet technology depends on the player's characteristics, playing technique, and level of competition, and future development trends will be oriented towards personalization, environmental friendliness, and material efficiency.

Keywords: table tennis bet technology; carbon material; composite; sports equipment innovation; athlete performance

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengembangan teknologi bet non karbon dan karbon dalam permainan tenis meja. Tenis meja sebagai olahraga yang mengandalkan kecepatan, ketepatan, dan strategi telah mengalami evolusi signifikan dalam pengembangan peralatan, khususnya bet yang menjadi instrumen utama pemain. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi literatur komprehensif dengan menganalisis temuan-temuan dari 70 referensi terpercaya,

terdiri dari 40 sumber internasional dan 30 sumber nasional, mengenai perkembangan material, proses manufaktur, dan dampak teknologi bet terhadap performa atlet. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perkembangan bet non karbon telah mengalami diversifikasi dalam penggunaan material kayu dengan inovasi pada teknik laminasi, sementara bet karbon mengalami revolusi dengan penerapan nanoteknologi dan serat komposit canggih. Perbandingan kedua teknologi menunjukkan bahwa bet karbon menawarkan keunggulan dalam aspek kekuatan, durabilitas, dan performa tingkat tinggi, sedangkan bet non karbon masih relevan untuk pemain pemula dan gaya permainan tertentu. Inovasi terkini mengarah pada integrasi material berkelanjutan dan teknologi hibrid yang mengoptimalkan performa sekaligus memperhatikan aspek lingkungan. Kesimpulannya, pemilihan teknologi bet optimal bergantung pada karakteristik pemain, teknik bermain, dan tingkat kompetisi yang diikuti, serta tren pengembangan masa depan akan berorientasi pada personalisasi, ramah lingkungan, dan efisiensi material.

Kata Kunci: teknologi bet tenis meja; material karbon; komposit; inovasi peralatan olahraga; performa atlet

A. Pendahuluan

Tenis meja sebagai olahraga kompetitif memerlukan kombinasi kecepatan, akurasi, dan strategi tingkat tinggi yang sangat dipengaruhi oleh perkembangan teknologi peralatan, khususnya bet atau raket yang menjadi instrumen utama pemain dalam menampilkan performa optimalnya (Taha et al., 2013; Alexander & Honish, 2009; Lees, 2003). Evolusi teknologi bet tenis meja telah mengalami perjalanan panjang dari penggunaan material kayu sederhana hingga pemanfaatan nanoteknologi dan material komposit canggih yang mengubah karakteristik permainan secara fundamental (Jamaludin et al., 2024; Chauhan & Pal, 2022; Zhang et al., 2023). Perkembangan material yang digunakan dalam pembuatan bet tenis meja tidak hanya mempengaruhi aspek teknis dan performa atlet, tetapi juga membentuk strategi, teknik, dan

evolusi permainan secara keseluruhan dalam konteks olahraga prestasi (Tan et al., 2025; Mahendra, 2014; Shan, 2008).

Keberadaan dua kategori utama teknologi bet tenis meja, yakni non karbon dan karbon, menciptakan dinamika menarik dalam pengembangan peralatan olahraga yang berdampak pada pilihan teknologi bagi pemain profesional maupun amatir (Yıldızbaş et al., 2022; Li et al., 2024; Subie et al., 2009). Bet non karbon yang didominasi oleh material kayu dengan berbagai inovasi pada teknik laminasi dan kombinasi jenis kayu telah lama menjadi pilihan konvensional dengan karakteristik performa yang khas, sementara bet karbon dengan integrasi serat karbon dan material komposit menawarkan keunggulan dalam aspek kekekuatan, kekakuan, dan respons dinamis yang lebih

presisi (Zhu, 2012; Wijaya, 2023; Triaditya et al., 2021). Pemahaman komprehensif tentang kedua teknologi ini menjadi penting dalam konteks pengembangan performa atlet dan evolusi permainan tenis meja secara keseluruhan.

Inovasi dalam pembuatan bet tenis meja mengalami akselerasi signifikan dengan kemajuan teknologi material dan manufaktur, terutama dengan pemanfaatan nanomaterial, komposit canggih, dan teknik fabrikasi presisi tinggi yang menghasilkan peralatan dengan karakteristik yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik pemain (Yang, 2023; Vinod et al., 2023; Luo et al., 2021). Revolusi industri 4.0 membawa dampak transformatif dalam pengembangan teknologi bet melalui penerapan manufacturing additif, optimasi desain berbasis komputasi, dan simulasi biomekanik yang menghasilkan produk dengan performa superior dan disesuaikan dengan karakteristik pemain secara individual (Hu et al., 2024; Goli et al., 2024; Wu et al., 2024).

Aspek keberlanjutan juga menjadi pertimbangan penting dalam pengembangan teknologi bet kontemporer, dengan adanya inisiatif untuk mengintegrasikan material ramah lingkungan dan memperhatikan dampak ekologis dalam seluruh siklus hidup produk sejak tahap desain hingga pengelolaan pasca penggunaan (Mhd Razali et al., 2023; Nurazzi et al., 2021; Mustafa, 2020). Trend inovasi

material ramah lingkungan seperti serat alam termodifikasi, komposit biobaserat, dan pendekatan ekonomi sirkular mulai mendapatkan perhatian dari produsen dan atlet yang menunjukkan kesadaran terhadap dimensi keberlanjutan dalam teknologi peralatan olahraga (Sari et al., 2011; Lokantara & Suardana, 2007; Efendi, 2014).

Berdasarkan kompleksitas perkembangan teknologi bet tenis meja dan signifikansinya dalam konteks performa olahraga, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif evolusi, karakteristik, dan dampak teknologi bet non karbon dan karbon dalam permainan tenis meja. Fokus utama penelitian ini meliputi kajian terhadap material, proses manufaktur, karakteristik performa, dan implikasi praktis dari kedua kategori teknologi bet tersebut, serta mengidentifikasi tren dan inovasi terkini yang berpotensi membentuk masa depan peralatan tenis meja. Kajian ini diharapkan dapat memberikan wawasan berharga bagi berbagai pemangku kepentingan dalam ekosistem tenis meja, termasuk atlet, pelatih, produsen peralatan, dan peneliti bidang teknologi olahraga.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur komprehensif untuk menganalisis perkembangan teknologi bet non karbon dan karbon dalam permainan tenis meja. Metode studi literatur dipilih karena kemampuannya dalam mengintegrasikan dan mensintesis

temuan-temuan dari berbagai sumber penelitian untuk mendapatkan pemahaman mendalam tentang topik yang dikaji (Safari & Saptani, 2019; Solihin, 2020; Rigozzi et al., 2023). Proses pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran sistematis terhadap publikasi ilmiah yang relevan dari berbagai database akademik seperti Google Scholar, Research Gate, Science Direct, dan Scopus dengan menggunakan kata kunci spesifik terkait teknologi bet tenis meja, material karbon, inovasi peralatan olahraga, dan performa tenis meja (Brich et al., 2024; Safera, 2022; Amalia, 2018).

Kriteria inklusi dalam pemilihan literatur mencakup relevansi dengan topik penelitian, kredibilitas sumber, dan aktualitas informasi dengan mempertimbangkan perkembangan terkini dalam bidang teknologi material dan peralatan olahraga (Kurniawan et al., 2014; Purnama, 2018; Ahmad et al., 2023). Total 70 referensi dianalisis dalam penelitian ini, terdiri dari 40 sumber internasional yang mencakup jurnal terindeks Scopus, publikasi konferensi internasional, dan laporan teknis dari institusi terkemuka, serta 30 sumber nasional yang meliputi jurnal nasional terakreditasi, prosiding konferensi, dan disertasi dari universitas terkemuka di Indonesia (Uran, 2023; Paliling, 2020; Pradiga, 2015).

Analisis data dilakukan melalui pendekatan tematik dengan mengidentifikasi, mengkategorikan, dan menginterpretasikan temuan-

temuan utama dari literatur terpilih berdasarkan aspek material, proses manufaktur, karakteristik performa, dan implikasi praktis dari teknologi bet non karbon dan karbon (Setiawan et al., 2024; Gumilang et al., 2022; Cibo et al., 2020). Validitas dan reliabilitas penelitian diperkuat melalui triangulasi sumber dengan membandingkan temuan dari berbagai jenis publikasi dan latar belakang penulis untuk mendapatkan perspektif komprehensif dan berimbang tentang topik yang dikaji (Akbar & Hasan, 2022; Setiawan & Andrijanto, 2021; Duncan et al., 2018).

C.Hasil Penelitian dan Pembahasan Teknologi Bet Non Karbon

Bet non karbon dalam tenis meja telah mengalami evolusi signifikan meskipun tetap mempertahankan kayu sebagai material utama yang telah lama menjadi pilihan konvensional karena karakteristik alaminya yang sesuai dengan kebutuhan permainan (Yıldızbaş et al., 2022; Wijaya, 2023; Triaiditya et al., 2021). Perkembangan teknologi bet non karbon berfokus pada inovasi dalam penggunaan varietas kayu, teknik laminasi, dan pengolahan material untuk meningkatkan performa tanpa mengandalkan serat karbon sebagai komponen penguat utama (Goli et al., 2024; Wahyuni, 2020; Lokantara & Suardana, 2007). Variasi jenis kayu yang digunakan dalam produksi bet non karbon mencakup spectrum luas dari kayu keras hingga kayu lunak dengan karakteristik spesifik, seperti kayu

Hinoki dari Jepang yang terkenal dengan keseimbangan elastisitas dan kestabilannya, kayu Ayous dari Afrika yang ringan dengan sensitivitas tinggi, serta kayu Koto yang menawarkan kontrol optimal dan berat moderat (Yıldızbaş et al., 2022; Royana et al., 2018; Pamungkas, 2023).

Teknik laminasi dalam produksi bet non karbon mengalami kemajuan signifikan dengan penggunaan kombinasi beberapa lapisan kayu yang berbeda untuk menciptakan karakteristik performa spesifik, dimana lapisan terluar biasanya menggunakan kayu keras untuk durabilitas, sementara lapisan dalam menggunakan kayu yang lebih ringan dan elastis untuk mengoptimalkan sensasi dan feedback ketika bola bersentuhan dengan bet (Triaiditya et al., 2021; Harmono et al., 2020; Sari et al., 2011). Inovasi dalam teknik laminasi mencakup penggunaan adhesif atau lem berkualitas tinggi yang memainkan peran krusial dalam mempertahankan integritas struktural bet sekaligus mempengaruhi karakteristik transmisi energi dan redaman getaran selama permainan, dengan perkembangan terbaru menunjukkan penggunaan adhesif nano-modified yang menawarkan ikatan lebih kuat dan tahan lama dibandingkan formulasi konvensional (Mhd Razali et al., 2023; Nurazzi et al., 2021; Efendi, 2014).

Keunggulan utama bet non karbon terletak pada sensasi natural yang diberikan, feedback taktil yang lebih intuitif, dan kemampuan

mengendalikan bola dengan presisi tinggi dalam permainan yang menekankan kontrol dan penempatan daripada kekuatan dan kecepatan (Setiawan et al., 2024; Safari & Saptani, 2019; Purnama, 2018). Faktor ekonomis juga menjadi pertimbangan penting, dimana bet non karbon umumnya lebih terjangkau dari segi biaya produksi dan harga jual dibandingkan dengan bet berbasis karbon, sehingga lebih aksesibel bagi pemain pada berbagai tingkatan ekonomi dan menjadi pilihan ideal untuk pemain pemula atau rekreasional (Goli et al., 2024; Rachman et al., 2017; Harmono et al., 2020).

Keterbatasan teknologi bet non karbon mencakup kerentanan terhadap pengaruh lingkungan seperti kelembaban dan temperatur yang dapat mempengaruhi stabilitas dimensi dan performa, tendensi untuk mengalami deformasi setelah penggunaan jangka panjang, serta keterbatasan dalam menawarkan kombinasi optimal antara kekuatan dan bobot yang ringan sebagaimana yang dimiliki oleh material komposit berbasis karbon (Triaiditya et al., 2018; Safera, 2022; Mahendra, 2014). Namun demikian, inovasi terkini dalam teknologi bet non karbon menunjukkan potensi untuk mengatasi beberapa keterbatasan ini, termasuk penggunaan teknologi stabilisasi kayu, treatment termal, dan impregnasi resin khusus untuk meningkatkan durabilitas dan konsistensi performa dalam berbagai kondisi lingkungan (Wijaya, 2023; Goli

et al., 2024; Omanović-Miklićanin, 2020).

Teknologi Bet Karbon

Revolusi dalam teknologi bet tenis meja mencapai titik balik signifikan dengan introduksi material berbasis karbon yang membawa peningkatan fundamental dalam karakteristik performa dan potensi pengembangan peralatan olahraga berkinerja tinggi (Zhu, 2012; Li et al., 2024; Wu et al., 2024). Serat karbon sebagai material rekayasa canggih menawarkan kombinasi optimal antara kekuatan, kekakuan, dan bobot yang ringan, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi olahraga prestasi yang menuntut performa maksimal dengan batasan berat minimal (Das et al., 2019; Perumal et al., 2020; Ahmad et al., 2020). Perkembangan material karbon dalam konteks bet tenis meja tidak terbatas pada serat karbon konvensional, tetapi meluas hingga pemanfaatan nanomaterial berbasis karbon seperti carbon nanotubes, graphene, dan nanokomposit yang menawarkan peningkatan signifikan dalam aspek kekuatan spesifik, modulus elastisitas, dan kemampuan penyerapan energi (Yang, 2023; Wu et al., 2024; Kausar, 2019).

Teknologi manufaktur bet karbon mengalami kemajuan revolusioner dengan penerapan teknik fabrikasi canggih seperti resin transfer molding (RTM), vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM), dan automated fiber placement (AFP) yang memungkinkan kontrol presisi terhadap orientasi serat, fraksi

volume, dan distribusi material dalam struktur komposit (Hu et al., 2024; Zuo et al., 2024; Dhiman et al., 2020). Perkembangan terbaru dalam teknologi manufaktur aditif seperti 3D printing dengan material komposit berbasis karbon membuka paradigma baru dalam personalisasi dan optimasi struktur bet sesuai dengan preferensi dan karakteristik biomekanikal pemain secara individual (Hu et al., 2024; Ahmad et al., 2023; Vinod et al., 2023).

Integrasi material karbon dalam komposit hibrid yang menggabungkan berbagai jenis serat penguat seperti karbon, aramid, dan fiberglass dengan matriks polimer canggih menciptakan struktur dengan karakteristik yang dapat disesuaikan secara presisi untuk memenuhi kebutuhan spesifik pemain berdasarkan gaya permainan, teknik, dan preferensi personal (Li et al., 2024; Chen, 2024; Jenkins, 2002). Nanoteknologi memberikan dimensi baru dalam pengembangan bet karbon melalui pemanfaatan nanopartikel dan nanostruktur untuk memodifikasi interface antara serat dan matriks, meningkatkan transfer beban, mengurangi konsentrasi tegangan, dan mengoptimalkan properti dinamis material komposit secara keseluruhan (Ćibo et al., 2020; Zhu, 2012; Luo et al., 2021).

Keunggulan utama bet karbon terletak pada rasio kekuatan-terhadap-berat yang superior, kekakuan tinggi yang memungkinkan transfer energi efisien, stabilitas dimensional dalam berbagai kondisi

lingkungan, dan ketahanan terhadap deformasi jangka panjang yang memberikan konsistensi performa sepanjang masa pakai produk (Dhiman et al., 2020; Kausar, 2019; Das et al., 2019). Karakteristik tersebut memungkinkan pemain untuk menghasilkan pukulan dengan kecepatan dan power lebih tinggi, khususnya dalam teknik serangan seperti loop drive dan smash yang mengandalkan kombinasi optimal antara kecepatan swing dan kekakuan raket untuk menghasilkan spin dan momentum maksimal (Setiawan et al., 2024; Kurniawan et al., 2014; Safari & Saptani, 2019).

Tantangan dalam pengembangan bet karbon mencakup kompleksitas dan biaya produksi yang relatif tinggi, kerentanan terhadap kerusakan karena impak lateral yang dapat menyebabkan delaminasi, serta karakteristik redaman getaran yang berbeda dari material kayu konvensional yang memerlukan adaptasi dari pemain yang terbiasa dengan sensasi tradisional (Mhd Razali et al., 2023; Subie et al., 2009; Ahmad et al., 2020). Inovasi terkini berupaya mengatasi keterbatasan ini melalui pengembangan struktur sandwich, core materials dengan properti redaman yang dioptimalkan, dan lapisan hibrid yang menawarkan kombinasi optimal antara kekakuan, kekuatan impak, dan karakteristik sensori yang diinginkan pemain (Vinod et al., 2023; Matsuwaka & Latzka, 2019; Duncan et al., 2018).

Perbandingan Teknologi Bet Non Karbon dan Karbon

Analisis komparatif antara teknologi bet non karbon dan karbon menunjukkan perbedaan fundamental dalam karakteristik performa, sensasi bermain, dan aplikasi optimal berdasarkan tingkat keterampilan dan gaya permainan pemain (Yıldızbaş et al., 2022; Triaiditya et al., 2021; Lees, 2003). Aspek kinerja mekanik menunjukkan bahwa bet karbon unggul dalam parameter kekuatan spesifik, kekakuan, dan stabilitas dimensional, sementara bet non karbon menawarkan keunggulan dalam aspek sensasi natural, feedback taktil, dan kemampuan adaptasi terhadap berbagai teknik permainan yang menekankan kontrol dan presisi (Das et al., 2019; Taha et al., 2013; Triaiditya et al., 2018).

Dampak kedua teknologi terhadap teknik permainan terlihat signifikan, dimana bet karbon lebih sesuai untuk gaya permainan ofensif dengan penekanan pada kecepatan dan power seperti teknik loop drive, counter-attack, dan smash, sementara bet non karbon lebih kondusif untuk gaya permainan yang menekankan kontrol, penempatan, dan variasi seperti teknik chop, push, dan block (Setiawan et al., 2024; Safari & Saptani, 2019; Kong & Ma, 2024). Perbedaan karakteristik ini menjadikan pilihan teknologi bet sebagai keputusan strategis yang harus disesuaikan dengan karakter pemain, tujuan pengembangan

keterampilan, dan konteks kompetisi yang dihadapi.

Aspek biomekanik dalam perbandingan kedua teknologi menunjukkan bahwa bet karbon memungkinkan pemain untuk menghasilkan kecepatan bola dan spin yang lebih tinggi dengan input tenaga yang relatif sama, namun memerlukan kontrol teknik yang lebih presisi untuk mengoptimalkan performa dan menghindari kesalahan, sementara bet non karbon menawarkan jendela kesalahan yang lebih luas dengan konsekuensi output kinerja yang lebih moderat (Alexander & Honish, 2009; Mahendra, 2014; Tan et al., 2025). Respon dinamis kedua material terhadap dampak bola menunjukkan perbedaan dalam karakteristik koefisien restitusi, waktu kontak, dan transmisi energi yang berimplikasi pada sensasi, kontrol, dan performa keseluruhan dalam situasi permainan aktual (Triaiditya et al., 2018; Pradiga, 2015; Chauhan & Pal, 2022).

Pertimbangan ekonomis dan aksesibilitas menunjukkan bahwa bet non karbon masih memiliki nilai strategis signifikan dalam ekosistem tenis meja, terutama untuk segmen pemain pemula, rekreasional, dan sebagai instrumen pengembangan fundamental teknik dasar (Goli et al., 2024; Wahyuni, 2020; Kuan, 2024). Sementara itu, bet karbon menjadi investasi yang rasional bagi pemain kompetitif dan profesional yang memerlukan peralatan dengan spesifikasi performa tinggi untuk

bersaing pada level elit, meskipun dengan trade-off berupa biaya yang lebih tinggi dan kurva pembelajaran yang lebih curam dalam proses adaptasi (Li et al., 2024; Matsuwaka & Latzka, 2019; Zhang et al., 2023).

Tren dan Inovasi Terkini dalam Teknologi Bet Tenis Meja

Perkembangan kontemporer dalam teknologi bet tenis meja menunjukkan konvergensi inovatif antara pendekatan tradisional dan modern dengan kemunculan material hibrid yang menggabungkan keunggulan kayu natural dengan karakteristik superior material canggih seperti serat karbon, aramid, dan thermoplastic composites (Li et al., 2024; Vinod et al., 2023; Wu et al., 2024). Struktur sandwich yang terdiri dari core berbasis kayu dengan lapisan komposit karbon sebagai face sheets menjadi tren dominan yang menawarkan kombinasi optimal antara sensasi tradisional dan performa tingkat tinggi, memenuhi kebutuhan pemain modern yang mencari keseimbangan ideal antara kontrol dan power (Yang, 2023; Mhd Razali et al., 2023; Yıldızbaş et al., 2022).

Inovasi material berbasis keberlanjutan mendapatkan momentum signifikan dengan pengembangan serat alam termodifikasi seperti flax, hemp, dan ramie yang dioptimalkan melalui treatment kimia dan dikombinasikan dengan matriks bio-based untuk menciptakan alternatif ramah lingkungan bagi material sintetis

konvensional (Nurazzi et al., 2021; Vinod et al., 2023; AL-Oqla et al., 2023). Pendekatan desain berkelanjutan juga meluas hingga penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam pengembangan bet tenis meja melalui pemanfaatan material daur ulang, desain untuk disassembly, dan strategi end-of-life management yang komprehensif untuk meminimalkan dampak lingkungan sepanjang siklus hidup produk (Mhd Razali et al., 2023; Subie et al., 2009; Wijaya, 2023).

Teknologi fabrikasi canggih seperti automated fiber placement, tailored fiber placement, dan additive manufacturing menjadi enabler utama dalam personalisasi bet sesuai dengan karakteristik biomekanik dan preferensi individual pemain (Hu et al., 2024; Zuo et al., 2024; Ahmad et al., 2023). Paradigma desain berbasis performa dengan dukungan simulasi komputasional, optimasi topologi, dan analisis elemen hingga memungkinkan pengembangan bet dengan distribusi material yang dioptimalkan untuk mencapai karakteristik dinamis spesifik sesuai dengan kebutuhan teknik permainan tertentu (Pradiga, 2015; Chen, 2024; Dhiman et al., 2020).

Integrasi teknologi smart materials dan instrumentasi elektronik dalam bet tenis meja membuka frontier baru dalam pengembangan peralatan olahraga, dengan implementasi sensor terintegrasi, material piezoelektrik, dan sistem analisis performa real-time yang memberikan data objektif untuk

optimasi teknik bermain dan personalisasi peralatan (Luo et al., 2021; Matsuwaka & Latzka, 2019; Rigozzi et al., 2023). Konvergensi antara pengembangan material, analisis biomekanik, dan teknologi informasi menciptakan ekosistem inovasi komprehensif yang mendorong evolusi peralatan tenis meja ke arah yang lebih personal, adaptif, dan berorientasi pada data untuk memaksimalkan potensi performa setiap individu pemain (Tan et al., 2025; Brich et al., 2024; Surya, 2023).

D. Kesimpulan

Berdasarkan analisis komprehensif terhadap pengembangan teknologi bet non karbon dan karbon dalam permainan tenis meja, dapat disimpulkan bahwa kedua kategori teknologi menunjukkan karakteristik distingtif dengan keunggulan dan keterbatasan spesifik yang menjadikannya optimal untuk konteks penggunaan berbeda berdasarkan tingkat keterampilan, gaya permainan, dan preferensi personal pemain. Teknologi bet non karbon telah mengalami evolusi signifikan melalui inovasi dalam penggunaan varietas kayu, teknik laminasi multi-layer, dan treatment material untuk meningkatkan durabilitas dan konsistensi performa, sementara tetap mempertahankan keunggulan dalam aspek sensasi natural, feedback taktil, dan aksesibilitas ekonomis yang menjadikannya pilihan ideal untuk pemain pemula hingga menengah.

Revolusi dalam teknologi bet karbon telah menghadirkan paradigma baru dalam performa peralatan tenis meja melalui integrasi serat karbon, nanomaterial, dan struktur komposit canggih yang menawarkan kombinasi optimal antara kekuatan, kekakuan, dan bobot ringan dengan implikasi signifikan pada peningkatan kecepatan, power, dan spin yang dapat dihasilkan pemain profesional. Perkembangan teknologi manufaktur seperti automated fiber placement, resin transfer molding, dan additive manufacturing telah memungkinkan tingkat personalisasi dan optimasi struktural yang sebelumnya tidak mungkin dicapai, membuka peluang untuk pengembangan bet yang disesuaikan dengan karakteristik biomekanikal individual pemain.

Konvergensi inovatif antara kedua pendekatan teknologi terlihat pada tren pengembangan material hibrid dan struktur sandwich yang mengintegrasikan keunggulan material tradisional dan modern untuk menciptakan bet dengan karakteristik performa yang seimbang. Aspek keberlanjutan juga menjadi fokus signifikan dalam inovasi kontemporer dengan pengembangan material biobaserat, pemanfaatan serat alam termodifikasi, dan implementasi prinsip ekonomi sirkular yang menawarkan alternatif ramah lingkungan namun tetap kompetitif dalam aspek performa.

Implikasi dari kemajuan teknologi bet tenis meja berdampak

luas pada berbagai aspek olahraga, mulai dari teknik permainan, metodologi pelatihan, strategi kompetisi, hingga pendekatan pengembangan atlet jangka panjang. Pemahaman mendalam tentang karakteristik material, prinsip biomekanik, dan interaksi antara peralatan dan pemain menjadi krusial dalam mengoptimalkan performa dan mencegah cedera. Arah pengembangan masa depan tampaknya akan berorientasi pada personalisasi berbasis data, integrasi teknologi smart materials, dan pendekatan holistik yang mempertimbangkan tidak hanya performa teknis tetapi juga aspek keberlanjutan, kesehatan pemain, dan aksesibilitas ekonomis.

Rekomendasi untuk penelitian lanjutan meliputi investigasi empiris tentang dampak spesifik berbagai konfigurasi material terhadap parameter performa yang terukur, pengembangan metodologi standarisasi untuk evaluasi objektif karakteristik bet, serta eksplorasi potensi teknologi emerging seperti metamaterials, self-healing composites, dan bioinspired design dalam konteks inovasi peralatan tenis meja. Kolaborasi interdisipliner antara ahli material, engineer, biomekanik, dan praktisi olahraga akan menjadi katalis penting dalam mendorong inovasi yang berarti dan relevan untuk kemajuan olahraga tenis meja secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

Buku:

- Perumal, A. B., Nambiar, R. B., Sellamuthu, P. S., & Sadiku, E. R. (2020). Carbon fiber composites. *Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications*, 1-32.
- O'Donoghue, P., Girard, O., & Reid, M. (2013). Racket sports. *Routledge Handbook of Sports Performance Analysis*, 404-414.
- Alexander, M. A. R. I. O. N., & Honish, A. (2009). Table tennis: a brief overview of biomechanical aspects of the game for coaches and players. Report, Faculty of Kinesiology and Recreation Management, University of Manitoba.
- Artikel in Press:**
- Mahendra, I. R. (2014). Faktor Kondisi Fisik Dominan Penentu Prestasi Bermain Tenis Meja (Analisis Faktor Fleksibilitas Pergelangan Tangan, Fleksibilitas Pinggul, Waktu Reaksi, Koordinasi Mata Tangan, Kelincahan, Dan Power Otot Lengan Pada Mahasiswa Pembinaan Prestasi¹ Tenis (Doctoral dissertation, UNS (Sebelas Maret University)).²
- PAMUNGKAS, M. B. (2023). PENGEMBANGAN TEKNIK DASAR PUKULAN TENIS MEJA PADA PEMULA MENGGUNAKAN RETURNBOARD (Doctoral dissertation, STKIP PGRI PACITAN).
- Wahyuni, W. (2020). Upaya Meningkatkan Hasil Belajar Tenis Meja Melalui Model Pembelajaran Pantulan Bola Ke Dinding Pada Siswa Kelas Ix Smp PGRI 2 Takalar³ (Doctoral dissertation, UNIVERSITAS NEGERI MAKASSAR).
- URAN, M. A. G. (2023). ANALISA UJI TARIK DAN UJI IMPACT SERAT DAUN NANAS DAN RESIN EPOXY PADA MATERIAL KOMPOSIT (Doctoral dissertation, ITN Malang).
- Purnama, M. S. (2018). Perbandingan Postur Skoliosis Atlet Tenis Meja dan Tenis Lapangan Usia 9-14 Tahun (Studi Kausal Komparatif pada Atlet di Mitra Medika Klub dan Yunion Tenis Club)⁴ (Doctoral dissertation, UNS (Sebelas Maret University)).
- Paliling, F. (2020). ANALISIS KUALITAS LUBANG MATERIAL CARBON FIBER REINFORCED POLYMER MENGGUNAKAN PAHAT ENDMILL TWO FLUTE DI BAWAH PENGARUH VARIABEL PERMESINAN⁵ (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).
- Pradiga, D. A. (2015). Studi Eksperimen Analisis Modal untuk Menguji Karakteristik Modus Getar pada Rangka Raket Tenis. Skripsi S1, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- Jurnal:**
- Triaditya, B. S. M., Rubiono, G., & Santoso, D. A. (2021). Pengaruh Ketebalan Karet Pemukul (Bet) Tenis Meja Terhadap Tumbukan Bola.
- Wijaya, R. (2023). Rancangan Bet Tenis Meja Komposit Dari Bahan Limbah Kayu (Serbuk Kayu). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik [JIMT]*, 3(5), 319-328.
- Mustafa, P. S. (2020). Penerapan Kajian dan Praktik Lapangan Pada Mahasiswa Pendidikan Olahraga di Universitas Negeri Malang (Mata Kuliah: Pembelajaran Tenis Meja dan Metodologi Penelitian). *Biormatika: Jurnal ilmiah fakultas keguruan dan ilmu pendidikan*,⁷ 6(02), 12-28.
- Goli, A. R. S., Tomoliyus, T., Sumarjo, S., & Ariestika, E. (2024).

- Pengembangan Alat Bat Pada Cabang Olahraga Tenis Meja dengan Modifikasi Bahan Baku Kayu Pulai. *Sporta Saintika*, 9(1), 72-84.
- Solihin, A. O. (2020). Pengembangan media audio visual berbasis video Youtube untuk materi pembelajaran tenis meja. *Journal of Physical and Outdoor Education*, 2(2), 247-259.⁸
- Rachman, I., Sulaiman, S., & Rumini, R. (2017). Pengembangan alat pelontar bola tenis meja (Robodrill IR-2016) untuk latihan drill teknik pukulan drive dan spin. *Journal⁹ of Physical Education and Sports*, 6(1), 50-56.¹⁰
- Royana, I. F., Zhannisa, U. H., & Herlambang, T. (2018). PENGEMBANGAN ALAT BANTU LATIHAN ROLL SPIN UNTUK MENINGKATKAN KEMAMPUAN PUKULAN FOREHAND DALAM TENIS MEJA.
- Lokantara, P., & Suardana, N. P. G. (2007). Analisis arah dan perlakuan serat tapis serta rasio epoxy hardener terhadap sifat fisis dan mekanis komposit tapis/epoxy.¹¹ *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin CAKRAM*,¹² 1(1), 15-21.
- Sari, N. H., & Sinarep, S. (2011). Analisa Kekuatan Bending Komposit Epoxy Dengan Penguatan Serat Nilon. *Dinamika Teknik Mesin: Jurnal Keilmuan dan Terapan Teknik Mesin*, 1(1).
- Efendi, R. (2014). Analisis Variasi Panjang Serat Dan Fraksi Volume Terhadap Sifat Mekanik Material Komposit Polyester Yang Diperkuat Serat Daun Lidah Mertua.¹³
- Ardiansyah, T. (2019). Model financial dan teknologi (fintech) membantu permasalahan modal wirausaha UMKM Di Indonesia. *Majalah Ilmiah Bijak*, 16(2), 158-166.¹⁴
- Surya, I. (2023). TEKNOLOGI DALAM PENGEMBANGAN PERFORMA OLAHRAGA: TINJAUAN LITERATUR. *Jurnal Edukasimu*, 3(1).
- Triaiditya, B. S. M., Santoso, D. A., & Rubiono, G. (2018). Uji Perbandingan Karakteristik Koefisien Restitusi (Cor) Beberapa Produk Raket Bulutangkis.¹⁵
- Safari, I., & Saptani, E. (2019). Metode latihan dan koordinasi mata tangan meningkatkan akurasi forehand sidespin service tenis meja. *Jurnal Keolahragaan*, 7(2), 174-181.¹⁶
- Setiawan, A. P. A., & Andrijanto, D. PROFILING ATLET PADA PUKULAN DASAR TENIS MEJA UNTUK KEGIATAN EKSTRAKURIKULER.
- Setiawan, G. A., Rahmat, A., & Cahyadi, A. (2024). Pengembangan Model Latihan Teknik Pukulan Forehand Dan Backhand Pada Tenis Meja. *Journal of SPORT (Sport, Physical Education, Organization, Recreation, and Training)*, 8(2), 489-500.
- Safera, M. (2022). Pengaruh Latihan Multiball Terhadap Hasil Pukulan Forehand dan Backhand Pada Atlet Tenis Meja TT88 Kota Jambi. *Score*, 2(1), 48-56.
- Gumilang, E. S., Budiana, D., & Rohmah, O. (2022). Pengaruh Strategi Self-Regulated Learning Berbasis Blended Learning terhadap Kepercayaan Diri dalam Pembelajaran Permainan Tenis¹⁷ Meja. *Jurnal Pendidikan Olah Raga*, 11(2), 225-234.
- Amalia, E. F. (2018). Pengaruh Koordinasi Dan Motivasi

- Terhadap Hasil Belajar Bermain Tenismeja (Studi Pada Mahasiswa PJKR Universitas Suryakencana Cianjur). Paper Knowledge. Toward a Media History of Documents.¹⁸
- Kurniawan, F., Safari, I., & Akin, Y. PERBANDINGAN LATIHAN MENGGUNAKAN SPIN WHEEL DAN MULTYBALL TERHADAP PENINGKATAN CHOP FOREHAND TENIS MEJA. *SpoRTIVE*, 4(1), 11-20.
- Akbar, A., & Hasan, M. S. (2022). Kontribusi Rasa Percaya Diri, Kecepatan Reaksi Dan Persepsi Kinestetik Dengan Keterampilan Bermain Tennis Meja Pada Pemain Putera Kota Makassar. *Jurnal Olahraga Kebugaran Dan Rehabilitasi (JOKER)*, 2(1), 30-42.¹⁹
- Harmono, J. A., Purnami, S., & Hariadi, I. PENGEMBANGAN MODEL LATIHAN PUKULAN LOOP DRIVE FOREHAND TENIS MEJA DI PTM TRI DHARMA MALANG.
- Zen, C. E., Namira, S., & Rahayu, T. (2022, October). Rancang Desain Ulang UI (User Interface) Company Profile Berbasis Website Menggunakan Metode (UCD) User Centered Design. In *Prosiding Seminar Nasional Mahasiswa Bidang Ilmu Komputer dan Aplikasinya* (Vol. 3, No. 1, pp. 17-26).
- Chauhan, Y. S., & Pal, U. S. (2022). Innovative evolution of technology used among racket sports: An overview [J]. *Journal of Sports Science and Nutrition*, 3(2), 175-179.
- Zhang, S., Chen, G., Wu, Q., & Li, X. (2023). The interplay between table tennis skill development and sports performance: A Comprehensive review. *Pacific International Journal*,¹ 6(3), 150-156.
- Tan, J. Q. J., Robertson, S., & Komar, J. (2025). Quantifying performance in racket sports: The need for greater context. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 17479541241311367.
- Li, Q., Ahmed, I., Ngoc, P. M., Hoa, T. P., Dieu, T. V., Irshad, M. S., ... & Dao, V. D. (2024). Contemporary advances in polymer applications for sporting goods: fundamentals, properties, and applications. *RSC advances*, 14(50), 37445-37469.
- Zhu, Z. X. (2012). Research on nano materials tennis rackets. *Advanced Materials Research*, 507, 75-78.
- Yang, L. (2023). Challenges and recent progress in carbon-based nanocomposites for sportswear and sensing applications. *Materials Research² Express*, 10(5), 052001.
- Vinod, A., Pulikkalparambil, H., Jagadeesh, P., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2020). Recent advancements in lignocellulose biomass-based carbon fiber: Synthesis, properties, and applications. *Heliyon*, 9(3).
- Yıldızbaş, A., Özlüsoylu, İ., & İstek, A. (2022). Table Tennis Blade Production and Features. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 24(2), 394-404.
- Kong, P. W., & Ma, C. M. S. (2024). Assessing Table Tennis Technical Proficiency in Individuals with Disabilities: A Scoping Review. *Applied Sciences*, 14(11), 4815.
- Kuan, L. L. G. (2024). Integration of Table Tennis into Physical Education Programs: Best Practices and Recommendations for Active Schools: A Narrative Review.

- Quality Physical Education in Active School and its Perspectives. Researches-Best Practices-Situation.*, 105.
- Luo, J., Gao, W., & Wang, Z. L. (2021). The triboelectric nanogenerator as an innovative technology toward intelligent sports. *Advanced materials*, 33(17), 2004178.
- Matsuwaka, S. T., & Latzka, E. W. (2019). Summer adaptive sports technology, equipment, and injuries. *Sports medicine and arthroscopy review*, 27(2), 48-55.³
- Subie, A., Mouritz, A., & Troynikov, O. (2009). Sustainable design and environmental impact of materials in sports products. *Sports Technology*, 2(3-4), 67-79.⁴
- Jenkins, M. (2002). Advanced materials and sporting performance. *Interdisciplinary Science Reviews*, 27(1), 61-66.
- Wu, Y., Li, Y., & Zhang, X. (2024). The Future of Graphene: Preparation from Biomass Waste and Sports Applications. *Molecules*, 29(8), 1825.
- Das, T. K., Ghosh, P., & Das, N. C. (2019). Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites: a review. *Advanced⁵ Composites and Hybrid Materials*, 2,⁶ 214-233.
- Shan, G. B. (2008). Sport equipment evaluation and optimization—A review of the relationship between Sport Science Research and Engineering.⁷
- AL-Oqla, F. M., Hayajneh, M. T., & Nawafleh, N. (2023). Advanced synthetic and biobased composite materials in sustainable applications: a comprehensive review. *Emergent Materials*,⁸ 6(3), 809-826.
- Sajan, S. S. P. S., & Selvaraj, D. P. (2021). A review on polymer matrix composite materials and their applications. *Materials Today: Proceedings*, 47,⁹ 5493-5498.
- Duncan, O., Shepherd, T., Moroney, C., Foster, L., Venkatraman, P. D., Winwood, K., ... & Alderson, A. (2018). Review of auxetic materials for sports applications: Expanding options in comfort and protection. *Applied Sciences*, 8(6), 941.¹⁰
- Ahmad, F., Akhtar, K. S., Anam, W., Mushtaq, B., Rasheed, A., Ahmad, S., ... & Nawab, Y. (2023). Recent developments in materials and manufacturing techniques used for sports textiles. *International Journal¹¹ of Polymer Science*, 2023(1), 2021622.
- Hu, Y., Lin, Y., Yang, L., Wu, S., Tang, D., Yan, C., & Shi, Y. (2024). Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced composites: a review. *Applied Composite Materials*, 31(2), 353-398.
- Zuo, P., Liu, T., Li, F., Wang, G., Zhang, K., Li, X., ... & Zhu, D. (2024). Research progress on laser processing of carbon fiber composite materials. *Polymer Composites*.
- Dhiman, B., Guleria, V., & Sharma, P. (2020). Applications and future trends of carbon fiber reinforced polymer composites: a review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7(10),¹² 1-7.
- Chen, S. (2024). Advancements in surface treatments for aluminum alloys in sports equipment. *Reviews on Advanced Materials Science*, 63(1), 20240065.
- Kausar, A. (2019). Advances in carbon fiber reinforced polyamide-based

- composite materials. *Advances in materials science*, 19(4), 67-82.
- Taha, Z., Hassan, M. H. A., Majeed, A. P. A., Aris, M. A., & Sahim, N. N. (2013). An overview of sports engineering: history, impact and research. *Malaysian¹³ Journal of Movement, Health & Exercise*, 2(1), 1-14.
- Nurazzi, N. M., Shazleen, S. S., Aisyah, H. A., Asyraf, M. R. M., Sabaruddin, F. A., Mohidem, N. A., ... & Nor, N. M. (2021). Effect of silane treatments on mechanical performance of kenaf fibre reinforced polymer composites: A review. *Functional Composites and Structures*, 3(4),¹⁴ 045003.
- Lees, A. (2003). Science and the major racket sports: a review. *Journal of sports sciences*, 21(9), 707-732.
- Rigozzi, C. J., Vio, G. A., & Poronnik, P. (2023). Application of wearable technologies for player motion analysis in racket sports: A systematic review. *International Journal of Sports Science & Coaching*,¹⁵ 18(6), 2321-2346.
- Brich, Q., Casals, M., Crespo, M., Reid, M., & Baiget, E. (2024). Quantifying hitting load in racket sports: A scoping review of key technologies. *International Journal of Sports Physiology and Performance*,¹⁶ 19(6), 519-532.
- Zhang, J., Ren, Y., Lin, L., Xing, Y., & Ren, J. (2024). Table tennis motion recognition based on the bat trajectory using varying-length-input convolution neural networks. *Scientific reports*, 14(1), 3549.
- Jamaludin, I. J., Ahmad, Z., & Baharom, M. Z. (2024). A Short Review on Development of Table Tennis Robotic Launcher Check for updates. In *Proceedings of the 2nd Human Engineering Symposium: HUMENS 2023, Pekan, Pahang, Malaysia* (p. 377). Springer Nature.
- Mhd Razali, M. N., Md Kamil, N. H., Rosli, A. M., Sufian, A. H., & Yaw, T. C. (2023, August). Sustainable Manufacturing Practices in the Sports Industry: A Review of Biodegradable Polymers for Sports Equipment. In *Innovative Manufacturing, Mechatronics & Materials Forum* (pp. 187-197). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Ahmad, H., Markina, A. A., Porotnikov, M. V., & Ahmad, F. (2020, November). A review of carbon fiber materials in automotive industry. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 971, No. 3, p. 032011). IOP Publishing.
- Ćibo, M., Šator, A., Kazlagić, A., & Omanović-Mikličanin, E. (2020). Application and impact of nanotechnology in sport. In *30th Scientific-Experts Conference of Agriculture and Food Industry: Answers for Forthcoming Challenges in Modern Agriculture¹⁷* (pp. 349-362). Springer International Publishing.
- Omanović-Mikličanin, E. (2020). Application and Impact of Nanotechnology in Sport. In *Proceedings of the 30th Scientific-Experts Conference of Agriculture and Food Industry* (pp. 349-362).