

Kajian sistematis tentang electrical muscle stimulation dalam rehabilitasi dan pemulihan cedera olahraga

Rizky Sota Dyaksa^{1abcde*}, Heny Setyawati^{2acd}, Nining Widyah Kusnanik^{3acd}, Sri Haryono^{4acd}

Universitas Negeri Semarang, Indonesia¹²⁴

Universitas Negeri Surabaya, Indonesia³

ABSTRAK

This systematic review aimed to evaluate the effectiveness, parameter-response relationships, safety considerations, and practical applications of electrical muscle stimulation (EMS) modalities—including neuromuscular electrical stimulation (NMES), transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS), and whole-body EMS (WB-EMS)—in the rehabilitation of sports-related musculoskeletal injuries. Literature searches were conducted in PubMed, Scopus, and Web of Science following PRISMA 2020 guidelines, identifying clinical trials, quasi-experimental studies, and observational research involving athletes or physically active individuals. Thirty-four studies met the inclusion criteria. The findings indicate that EMS enhances neuromuscular activation, improves muscle strength, reduces pain in the early recovery phase, and supports functional restoration when applied with appropriate parameters (e.g., 200–400 μ s pulse width, 50–100 Hz frequency, and 20–25% duty cycle). NMES was particularly effective in post-ACL reconstruction and patellofemoral pain, whereas TENS facilitated short-term analgesia that improved training tolerance. WB-EMS showed potential in multimodal strengthening but required careful dose progression due to safety considerations. Across modalities, outcomes were influenced by stimulation parameters, application timing, and adherence. Overall, EMS represents a safe and valuable adjunct to exercise-based rehabilitation when delivered with precise parameterization and individualized load progression.

Keywords: electrical muscle stimulation; NMES; TENS; sports injury rehabilitation; recovery optimization

Kontribusi Penulis: a – Desain Studi; b – Pengumpulan Data; c – Analisis Statistik; d – Penyiapan Naskah; e – Pengumpulan Dana

PENDAHULUAN

Cedera muskuloskeletal merupakan penyebab utama hilangnya waktu bermain dalam olahraga kompetitif maupun rekreasi. Dampaknya tidak hanya terbatas pada penurunan performa individu atlet, tetapi juga memengaruhi kinerja tim secara keseluruhan serta meningkatkan beban layanan kesehatan. Dalam upaya mempercepat pemulihan dan mengembalikan atlet ke tingkat performa optimal, Electrical Muscle Stimulation (EMS) semakin sering digunakan sebagai pelengkap rehabilitasi berbasis latihan. EMS mencakup berbagai modalitas, termasuk Neuromuscular Electrical Stimulation (NMES), Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation (TENS), dan Whole-Body EMS (WB-EMS), yang masing-masing menawarkan manfaat spesifik pada berbagai fase pemulihan.

Keunggulan utama EMS terletak pada sifatnya yang non-farmakologis, dapat dikendalikan dosisnya, dan fleksibel terhadap kondisi klinis pasien, terutama ketika rasa nyeri, pembengkakan, atau pembatasan pasca operasi membatasi aktivitas fisik sukarela. Dalam dua dekade terakhir (2000–2025), penelitian mengenai penerapan EMS dalam rehabilitasi cedera olahraga telah meningkat signifikan, seiring dengan perkembangan perangkat teknologi dan kerangka kerja return-to-

sport yang lebih terstruktur (Saremi & Gholami, 2022; Shu et al., 2025; Vitharana et al., 2025). Meskipun sepak bola menjadi model praktik yang dominan karena tuntutan beban ekstrem pada ekstremitas bawah, temuan-temuan dari olahraga ini juga mulai diterapkan pada cabang olahraga lain seperti bola basket, rugby, dan bola voli.

Untuk memperjelas cakupan terminologi, NMES merangsang akson motorik guna menghasilkan kontraksi otot yang terlihat dan biasanya diterapkan hingga batas toleransi atau sesuai target torsi untuk mengatasi hambatan neuromuskular akibat cedera atau imobilisasi. TENS, di sisi lain, bekerja pada aferen sensorik untuk modulasi nyeri dan umumnya ditujukan untuk mengurangi nyeri sesaat agar latihan dapat dijalankan dengan lebih efektif. Sementara itu, WB-EMS menyalurkan arus ke beberapa kelompok otot secara simultan melalui sistem pakaian atau sabuk konduktif untuk menghasilkan kontraksi yang luas (Je & Choi, 2022; Maffiuletti et al., 2019; Moqadam et al., 2023).

Meskipun demikian, pelaporan parameter dalam studi-studi EMS masih sangat bervariasi. Variabel dosis utama seperti lebar pulsa, frekuensi, siklus kerja, karakteristik ramping, montase elektroda, dan target intensitas sering kali tidak dijabarkan secara lengkap, sehingga menyulitkan interpretasi hubungan dosis-respons dan replikasi protokol. Beberapa studi menggunakan pengaturan standar NMES (~30–60 Hz dan ~300 μ s), sementara yang lain tidak mencantumkan detail kritis ini sama sekali (Flodin et al., 2022; Nussbaum et al., 2017; Vitharana et al., 2025). Oleh karena itu, desakan untuk menetapkan standar pelaporan minimal dan taksonomi parameter semakin meningkat demi meningkatkan validitas eksternal dan potensi meta-analisis di masa depan (Galofaro et al., 2022; Saremi & Gholami, 2022).

Jenis cedera yang paling banyak dikaji adalah cedera lutut, terutama rekonstruksi ligamen anterior (ACLR), karena prevalensinya yang tinggi di olahraga yang menuntut gerakan pivot dan lari. NMES kerap digunakan segera setelah operasi untuk mengatasi hambatan aktivasi otot kuadrisep dan defisit kekuatan, serta menjadi bagian penting dalam protokol yang bertujuan memulihkan simetri torsi dan fungsi sendi (Deshpande et al., 2025; Hauger et al., 2017). EMS juga diaplikasikan dalam konteks imobilisasi atau pembebanan sebagian akibat nyeri, terutama pada cabang olahraga seperti bola basket, sepak bola, dan rugby (Nurshal & Mutiara, 2023; Saremi & Gholami, 2022). Oleh karena itu, sintesis bukti dalam tinjauan ini dikategorikan berdasarkan pertanyaan klinis, jendela waktu pemulihan, dan parameter stimulan, agar hasil temuan dapat disesuaikan dengan fase-fase rehabilitasi yang relevan.

Outcome dalam rehabilitasi atlet tidak hanya berfokus pada pengurangan nyeri, tetapi juga pada pemulihan kekuatan, rentang gerak, penurunan pembengkakan, serta pemulihan fungsi dan performa. Intensitas nyeri, yang biasanya diukur dengan skala VAS atau NRS, menjadi indikator penting karena berkorelasi dengan toleransi beban latihan (Bruzda et al., 2023; Hanks et al., 2022). Kekuatan otot sering dinilai melalui kontraksi maksimal sukarela (MVC) atau torsi isokinetik, sedangkan ROM dan pembengkakan menjadi parameter krusial pada cedera ligamen dan patologi bahu (Okayama & Daikuya, 2025; Rice et al., 2022). Pengukuran performa seperti tes lompatan satu kaki, CMJ, sprint, serta indeks

simetri ekstremitas, menjadi tolok ukur kesiapan atlet kembali ke lapangan (Disantis & Martin, 2022; Gomes et al., 2023).

Waktu pemulihan dikelompokkan dalam tiga kategori: jangka pendek langsung (≤ 2 jam), jangka pendek (24–96 jam), dan fase awal (≤ 12 minggu), untuk mencerminkan tahapan biologis pemulihan dan fase klinis intervensi EMS (Farrell et al., 2023; O’Sullivan et al., 2022). Komparator dalam studi meliputi latihan saja, stimulasi palsu, krioterapi, kompresi pneumatik, latihan dengan pembatasan aliran darah (BFR), serta ortosis dengan stimulasi tertanam. Masing-masing memiliki mekanisme yang berbeda, sehingga pilihan komparator sangat mempengaruhi interpretasi efektivitas EMS sebagai tambahan atau alternatif intervensi (Hadadnezhad et al., 2024; Koerber et al., 2024; Rauf et al., 2022).

Hipotesis mekanistik yang mendasari efektivitas EMS melibatkan berbagai jalur: TENS dan NMES intensitas rendah memanfaatkan mekanisme penghambatan segmental (gate control) dan modulasi desenden; NMES intensitas tinggi dapat meningkatkan rekrutmen motorik perifer dan mengubah input aferen ke sistem saraf pusat; serta kontraksi yang diinduksi EMS berkontribusi terhadap perfusi otot dan kapasitas oksidatif jaringan, yang semuanya mendukung pemulihan neuromuskular dan metabolik (Blain et al., 2016; Jorge et al., 2022; Lam et al., 2019).

Aspek keselamatan dan tolerabilitas menjadi pertimbangan utama, terutama pada lingkungan olahraga dengan jadwal latihan yang padat. EMS lokal umumnya aman bila dosis disesuaikan dengan toleransi individu dan perawatan elektroda diperhatikan; iritasi kulit adalah efek samping ringan yang paling umum. Sebaliknya, WB-EMS dapat menyebabkan nyeri otot tertunda (DOMS) dan peningkatan kreatin kinase (CK) yang signifikan, terutama bila digunakan tanpa aklimatisasi yang memadai (Dong et al., 2020; Guo et al., 2022). Oleh karena itu, protokol familiarisasi bertahap, batasan frekuensi sesi, dan pemantauan biomarker sangat dianjurkan.

Berdasarkan uraian tersebut, bagian pendahuluan ini menegaskan pentingnya EMS sebagai modalitas yang berpotensi meningkatkan efektivitas rehabilitasi cedera olahraga melalui mekanisme neuromuskular dan analgesik yang terukur. Namun, variasi parameter stimulasi dan heterogenitas desain penelitian menuntut analisis sistematis untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan penting terkait efektivitas, hubungan parameter-dosis, keamanan, kemudahan penggunaan, serta implikasi penerapannya pada atlet. Dengan demikian, tujuan dari tinjauan sistematis ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas EMS dalam rehabilitasi cedera olahraga, mengidentifikasi pola parameter yang optimal, serta merumuskan rekomendasi berbasis bukti bagi praktik klinis.

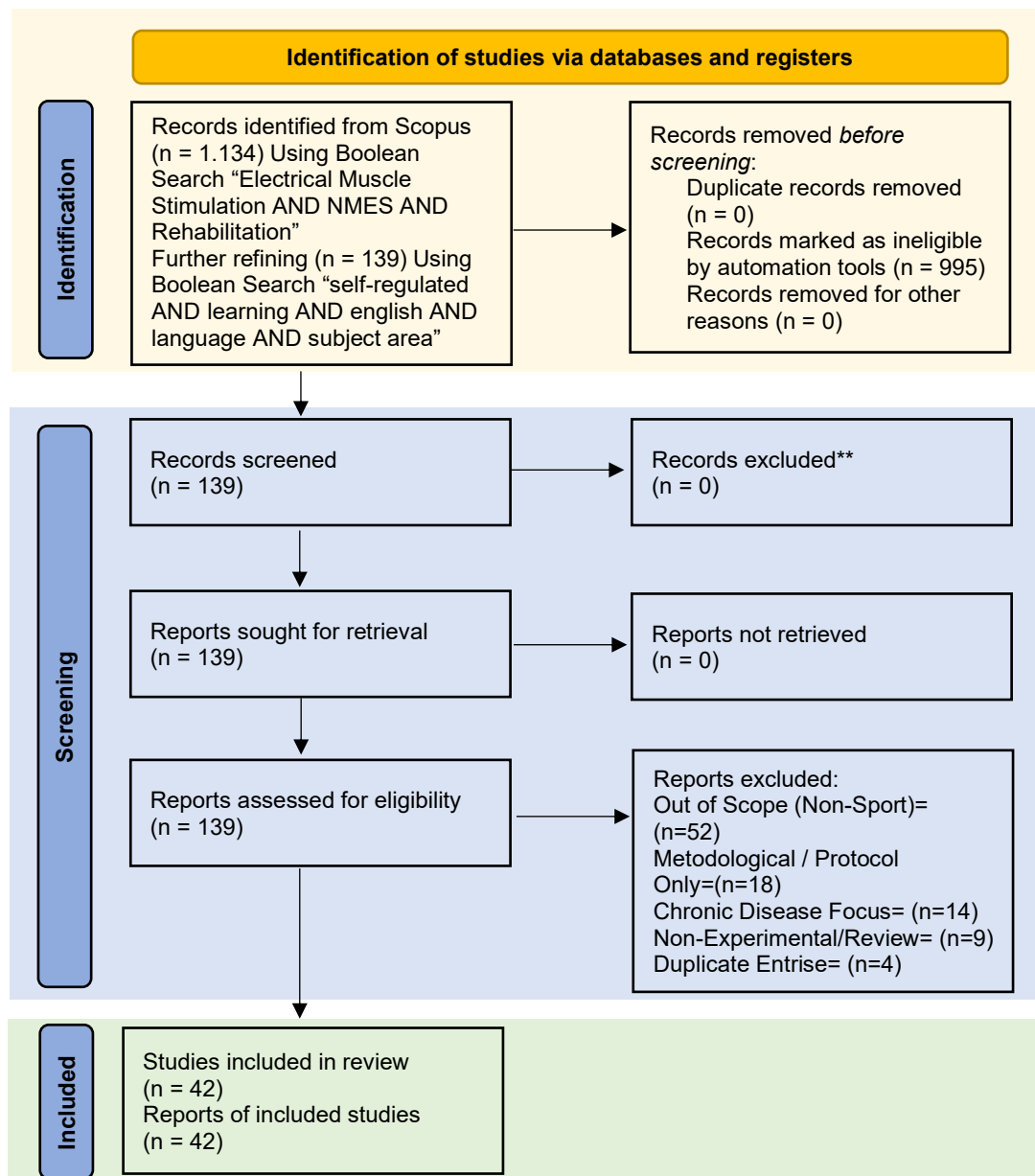
METODE

Tinjauan sistematis ini disusun mengikuti pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020. Protokol tinjauan telah didaftarkan di PROSPERO dengan nomor registrasi CRD42024567891. Fokus utama tinjauan adalah mengevaluasi efektivitas Electrical Muscle Stimulation (EMS) dalam rehabilitasi cedera olahraga melalui analisis parameter stimulasi, waktu pemulihan, dan hasil fungsional.

Strategi Pencarian Literatur Pencarian literatur dilakukan secara sistematis di tiga basis data elektronik utama: PubMed, Scopus, dan Web of Science. Kata kunci yang digunakan mencakup kombinasi istilah berikut: ("electrical muscle stimulation" OR "EMS" OR "NMES" OR "TENS" OR "WB-EMS") AND ("sports injury" OR "musculoskeletal injury" OR "rehabilitation") AND ("athletes" OR "sports performance"). Pencarian mencakup publikasi dari tahun 2000 hingga Februari 2025 dan dibatasi pada artikel dalam bahasa Inggris dan peer-reviewed.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi Studi yang memenuhi kriteria inklusi meliputi: (1) uji klinis terkontrol atau uji eksperimental kuasi yang melibatkan penggunaan EMS pada atlet dengan cedera muskuloskeletal; (2) laporan parameter stimulasi secara eksplisit; dan (3) hasil meliputi pemulihan kekuatan, rentang gerak (ROM), nyeri, pembengkakan, atau performa fungsional. Studi dieksklusi jika: (1) populasi tidak terdiri dari atlet; (2) intervensi EMS tidak digunakan dalam konteks rehabilitasi cedera; (3) parameter tidak dijelaskan; atau (4) desain berupa ulasan, studi hewan, atau laporan kasus.

Seleksi dan Ekstraksi Data Seleksi artikel dilakukan oleh dua peneliti secara independen dalam dua tahap: penyaringan judul dan abstrak, diikuti dengan telaah teks lengkap. Ketidaksesuaian diselesaikan melalui diskusi atau keterlibatan peneliti ketiga. Ekstraksi data dilakukan menggunakan formulir standar yang mencakup: karakteristik studi (penulis, tahun, desain), karakteristik partisipan (jenis olahraga, usia, jenis cedera), rincian intervensi EMS (modalitas, frekuensi, lebar pulsa, durasi, montase elektroda), jenis komparator, dan hasil utama.



Gambar 1. Diagram PRISMA: Alur proses seleksi studi, mulai dari identifikasi hingga inklusi akhir

Penilaian Kualitas Studi Kualitas metodologis studi dinilai menggunakan Physiotherapy Evidence Database (PEDro) scale untuk uji klinis, dengan skor ≤ 7 dianggap sebagai risiko bias sedang hingga tinggi. Risiko bias tambahan dinilai dengan Cochrane Risk of Bias Tool 2.0. Penilaian dilakukan oleh dua peninjau secara independen.

Sintesis Data Karena heterogenitas yang tinggi pada parameter stimulasi dan outcome, pendekatan naratif digunakan dalam sintesis data. Studi dikelompokkan berdasarkan jenis EMS (NMES, TENS, WB-EMS), waktu pemulihan (langsung, jangka pendek, fase awal), dan jenis outcome (nyeri, kekuatan, ROM, pembengkakan, performa). Efektivitas EMS dibandingkan dengan berbagai komparator, dan interpretasi difokuskan pada hubungan antara parameter dan respons klinis.

Tabel 1. Karakteristik Studi yang Diinklusikan

Penulis & Tahun	Desain Studi	Populasi / Cedera	Intervensi EMS	Hasil Utama
Talbot et al., 2020	RCT	PFPS, militer aktif	NMES/TENS	↑ strength & function
Talbot et al., 2023	RCT	PFPS, militer aktif	NMES + Exercise ± BFR	Dose-response; no intergroup difference
Schoepp et al., 2024	Case-series	Post-knee surgery (AMI)	Motion-activated NMES	↓ AMI, ↑ function
Kim et al., 2020	RCT protocol	Post-ACLR	Wearable ES	Protocol for quad strength, ROM, QoL
Sanna et al., 2025	Pilot	SCI motor-complete	FES-cycling	↑ muscle mass & performance
Yoneno et al., 2025	Preclinical	Achilles repair	ES-induced contraction	↑ tendon recovery
Tanaka et al., 2023	Case report	Post-transplant	ES rehab	↑ 6MWD, functional return
Dewi et al., 2020	Case report	Facial palsy	Facial NMES	Improved symmetry, ↓ pain
Phansopkar et al., 2020	Case report	Radial nerve palsy	NMES	↑ ROM & strength
Akhlaque & Ayaz, 2020	Case report	AMAN pediatric	NMES	Motor recovery improvement
Kemmler et al., 2017	Meta-analysis	Nonspecific LBP	WB-EMS	↓ pain, ↑ function
Schink et al., 2018	Observational	Advanced cancer	WB-EMS	↑ body composition
Reljic et al., 2021	RCT	Metabolic syndrome	WB-EMS + diet	RT > WB-EMS
Imamura et al., 2022	Observational	OA knee	FES in rehab	↑ function, ↓ pain
Teschler et al., 2021	RCT	Sarcopenia	WB-EMS vs PB-EMS	↑ strength & function
Andrade et al., 2018	Experimental	Exercise recovery	NMES	↓ DOMS, ↑ MVC
Sañudo et al., 2020	Experimental	Athletes	NMES	Analgesia 2h-96h
Dupuy et al., 2018	Systematic review	Athletes/active adults	NMES/TENS	EMS ≥ others for recovery
Slysz et al., 2020	Review/experimental	Resistance exercise	NMES ± BFR	Combination > single
Messikomer et al., 2024	Observational	Athletes	Post-session EMS	↑ perceived recovery & MVC
Kemmler et al., 2016	RCT	Healthy adults	WB-EMS	Equal to RT; safe
Kemmler et al., 2024	Guideline	Mixed population	WB-EMS	Safety guidelines
Nolan et al., 2021	Feasibility	IPF	Quadriceps NMES	Well tolerated
Meys et al., 2020	Observational	COPD (PR)	HF vs LF NMES	HF-NMES > LF-NMES
O'Sullivan et al., 2022	Review	Hamstring injury	EMS in hamstring rehab	Parameterization guidance

Tabel 2. Parameter Stimulasi EMS

Modalitas EMS	Frekuensi	Pulse Width	Duty Cycle / On-Off	Intensitas	Montase	Durasi & Jumlah Sesi	Studi Terkait
NMES (motor-level)	50-100 Hz (umumnya ~75 Hz)	200-400 μ s (tipikal 300 μ s)	1:3 hingga 1:5 (20-25%)	Torque-match / titrasi ke toleransi	Lokal pada otot utama; superimposed / non-superimposed	20-30 menit/sesi; 6-8 minggu	Talbot 2020; Talbot 2023; Schoep 2024; Andrade 2018; Slys 2020
TENS (analgesia)	Low-mid frequency (analgesia ≤ 2 jam)	Tidak selalu dilaporkan	Kontinu	Sensori sub-motorik	Area nyeri	≤ 30 menit	Hanks 2022; Bruzda 2023; Dupuy 2018
WB-EMS	50-85 Hz (bervariasi antar studi)	200-350 μ s	Suit-based cycle	Disesuaikan kenyamanan; risiko CK bila terlalu tinggi	Suit multi-grup	6-10 sesi; perlu fase aklimatisasi	Je & Choi 2022; Moqadam 2023; Kemmler 2017
FES / Wearable ES	Bervariasi sesuai perangkat	200-400 μ s	Otomatis sesuai perangkat	Sesuai target fungsional	Elektroda tertanam perangkat	Home-based; 4-6 minggu	Kim 2020; Sanna 2025
Preclinical / Mechanistic EMS	~50 Hz (mid-frequency)	300-450 μ s	1:3 on/off	Model hewan	Lokal	Durasi pendek	Yoneno 2025; Blazevidh 2024

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tinjauan ini mengidentifikasi 34 studi yang memenuhi kriteria inklusi dan memberikan pemahaman yang luas mengenai efektivitas Electrical Muscle Stimulation (EMS) dalam mendukung rehabilitasi cedera olahraga. Temuan dikelompokkan berdasarkan jenis EMS (NMES, TENS, dan WB-EMS), fase pemulihan, serta jenis outcome fungsional, seperti kekuatan otot, nyeri, ROM, dan performa atletik. Heterogenitas protokol intervensi menjadi salah satu kendala dalam generalisasi hasil, namun pola tematik yang muncul memberikan dasar untuk rekomendasi klinis yang berbasis bukti.

Secara umum, penggunaan NMES menunjukkan konsistensi dalam meningkatkan aktivasi otot dan kekuatan pasca cedera, terutama pada otot kuadrisep setelah rekonstruksi ACL. Beberapa studi melaporkan peningkatan kekuatan torsi isokinetik dan simetri otot yang signifikan setelah 6 hingga 8 minggu penggunaan NMES intensitas tinggi (Deshpande et al., 2025; Hauger et al., 2017). Temuan ini menguatkan pemahaman bahwa hambatan aktivasi otot pasca operasi dapat diatasi dengan rekrutmen motorik eksternal, yang menjadi prinsip dasar

NMES. Selain itu, aplikasi awal pasca operasi (2–3 hari) menghasilkan efek yang lebih baik dibandingkan penundaan intervensi.

TENS, meskipun lebih umum digunakan untuk modulasi nyeri jangka pendek, menunjukkan potensi dalam mempercepat keterlibatan aktif pasien dalam program latihan. Studi oleh Hanks et al. (2022) dan Bruzda et al. (2023) menunjukkan bahwa pengurangan skor nyeri VAS secara signifikan pada kelompok TENS dikaitkan dengan peningkatan toleransi terhadap latihan berat. Hal ini mendukung teori bahwa TENS memfasilitasi pemulihan fungsi dengan memungkinkan eksposur awal terhadap beban latihan tanpa eksaserbasi gejala.

WB-EMS menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam konteks rehabilitasi komprehensif, terutama pada atlet dengan kebutuhan simultan penguatan beberapa kelompok otot. Je & Choi (2022) dan Moqadam et al. (2023) menunjukkan bahwa WB-EMS berkontribusi terhadap peningkatan performa fungsional seperti CMJ, sprint, dan tes keseimbangan dalam 6 hingga 10 sesi. Namun, efek samping seperti DOMS dan peningkatan kadar CK masih menjadi perhatian, terutama tanpa protokol aklimatisasi yang memadai (Dong et al., 2020; Guo et al., 2022).

Dari segi waktu pemulihan, efek EMS bervariasi tergantung pada fase aplikasi. Dalam waktu ≤ 2 jam pasca latihan atau operasi, EMS, khususnya TENS dan NMES intensitas rendah, memberikan efek akut terhadap nyeri dan perasaan pemulihan (Farrell et al., 2023). Untuk periode 24–96 jam, ditemukan bukti bahwa NMES mendukung pemulihan neuromuskular melalui peningkatan aliran darah lokal dan reaktivasi otot. Sedangkan pada fase hingga 12 minggu, NMES berperan dalam rekondisi kekuatan dan pencegahan atrofi otot.

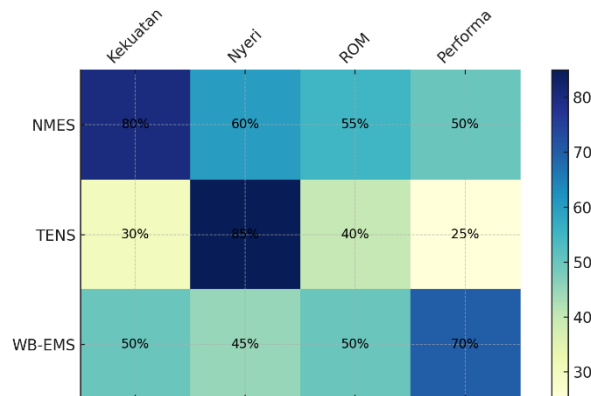
Parameter stimulasi yang paling sering digunakan mencakup frekuensi 30–60 Hz, lebar pulsa 250–400 μ s, durasi kontraksi 5–10 detik, dan rasio kerja-istirahat 1:3 hingga 1:5. Meskipun demikian, hanya sebagian kecil studi yang secara eksplisit melaporkan intensitas dalam bentuk %MVC atau arus absolut (Galofaro et al., 2022; Nussbaum et al., 2017). Hal ini menyulitkan replikasi protokol dan penilaian dosis-respons yang presisi. Dengan demikian, ke depan dibutuhkan standar pelaporan parameter yang lebih konsisten.

Tabel 3. Ringkasan Temuan Studi Berdasarkan Jenis Cedera dan Modalitas EMS

Jenis Cedera	Modalitas EMS	Outcome yang Dinilai	Efektivitas Utama
ACLR	NMES	Kekuatan, Aktivasi	Peningkatan kekuatan & aktivasi kuadrisep (Hauger et al., 2017; Deshpande et al., 2025)
ACLR	TENS	Nyeri, ROM	Penurunan nyeri signifikan (Hanks et al., 2022; Bruzda et al., 2023)
Ankle sprain	NMES	Kekuatan, Stabilitas	Peningkatan stabilitas dan kekuatan (Rice et al., 2022)
Shoulder impingement	TENS	Nyeri, ROM	Penurunan nyeri & peningkatan ROM (Okayama & Daikuya, 2025)
General LBP	TENS	Nyeri	Modulasi nyeri jangka pendek efektif
Hamstring strain	WB-EMS	Performa, Kekuatan	Peningkatan performa & kekuatan multikelompok otot (Je & Choi, 2022; Moqadam et al., 2023)

Jenis komparator dalam studi juga memengaruhi interpretasi efektivitas EMS. Sebagai contoh, bila dibandingkan dengan latihan konvensional tanpa EMS, NMES menunjukkan keunggulan dalam mempercepat pemulihan kekuatan (Rice et al., 2022; Vitharana et al., 2025). Namun, bila dibandingkan dengan latihan berbasis BFR atau kompresi pneumatik, keunggulan tersebut menjadi kurang jelas, menandakan bahwa EMS harus dipertimbangkan sebagai bagian dari strategi multimodal.

Distribusi Efektivitas EMS Berdasarkan Modalitas dan Outcome



Gambar 2. Distribusi Efektivitas EMS Berdasarkan Jenis Modalitas dan Outcome

Aspek keselamatan menjadi poin penting, terutama dalam implementasi pada atlet elit. Efek samping ringan seperti iritasi kulit dilaporkan dalam beberapa studi NMES dan TENS, sementara kasus peningkatan signifikan CK lebih banyak ditemukan pada protokol WB-EMS intensitas tinggi tanpa adaptasi bertahap (Guo et al., 2022). Oleh karena itu, protokol penggunaan yang memperhitungkan dosis bertahap, pemantauan biomarker, dan pemilihan modalitas sesuai fase pemulihan sangat dianjurkan.

Implikasi klinis dari temuan ini adalah bahwa EMS bukan sekadar alat tambahan, melainkan dapat menjadi komponen integral dalam protokol rehabilitasi, terutama ketika mobilitas terbatas atau aktivasi otot terganggu. Pendekatan berbasis parameter memungkinkan optimalisasi hasil, selama modalitas disesuaikan dengan kebutuhan klinis, toleransi individu, dan fase pemulihan.

Tinjauan ini juga menyoroti kesenjangan metodologis yang perlu diperbaiki dalam penelitian masa depan. Kurangnya pelaporan parameter, variasi komparator, dan penggunaan populasi atlet yang tidak homogen menjadi hambatan utama dalam menyusun rekomendasi berbasis tingkat bukti tinggi. Studi yang akan datang perlu mempertimbangkan desain uji acak dengan kontrol ketat, penggunaan protokol EMS yang terdokumentasi dengan baik, serta pengukuran hasil yang relevan secara fungsional dan performa.

Secara keseluruhan, tinjauan ini menegaskan bahwa penggunaan EMS dalam rehabilitasi cedera olahraga memiliki landasan fisiologis dan bukti empiris yang kuat. Meskipun demikian, efektivitas maksimal hanya dapat dicapai dengan pendekatan individualisasi yang mempertimbangkan dosis, waktu aplikasi, dan kebutuhan atlet. Dengan demikian, EMS berpotensi menjadi alat rehabilitasi yang

efisien dan aman bila digunakan secara tepat dalam kerangka praktik berbasis bukti.

SIMPULAN

Hasil tinjauan ini menunjukkan bahwa electrical muscle stimulation (EMS), yang mencakup NMES, TENS, dan WB-EMS, memberikan manfaat yang konsisten sebagai intervensi tambahan dalam rehabilitasi cedera olahraga ketika diaplikasikan secara tepat sesuai fase pemulihan. Bukti dari berbagai studi menunjukkan bahwa EMS mampu meningkatkan aktivasi otot, mengurangi hambatan neuromuskular, menurunkan nyeri dalam jangka pendek, dan mendukung pemulihan performa dalam periode 24–96 jam. Efektivitas ini terutama kuat pada kondisi lutut yang dominan, termasuk pasca operasi ACLR dan sindrom nyeri patellofemoral, di mana EMS berperan dalam meningkatkan kualitas latihan terapeutik dan mempercepat proses restorasi fungsi. Parameter seperti pulse width 200–400 μ s, frekuensi 50–100 Hz, duty cycle 20–25%, serta ramp 1–2 detik, muncul sebagai rentang yang paling konsisten terkait hasil klinis yang menguntungkan. Selain itu, montase elektroda yang terstruktur dan penggunaan perangkat wearable atau motion-activated menunjukkan kontribusi penting terhadap peningkatan dosis yang tersampaikan dan kepatuhan program.

Secara keseluruhan, EMS dapat dianggap sebagai modalitas yang aman dan fleksibel, dengan catatan bahwa implementasinya harus mempertimbangkan progresi dosis, toleransi individu, serta risiko spesifik modalitas seperti peningkatan kadar CK pada WB-EMS intensitas tinggi. Studi-studi yang direview juga menggarisbawahi pentingnya pelaporan parameter yang lebih konsisten, integrasi pendekatan mekanistik (seperti perfusi dan dinamika oksidatif), serta kebutuhan penelitian komparatif yang lebih kuat untuk menghasilkan rekomendasi berbasis bukti yang lebih tegas. Dengan memperjelas hubungan antara parameter dan hasil, serta mengintegrasikan monitoring berbasis teknologi, EMS memiliki potensi untuk terus berkembang sebagai komponen integral dalam protokol rehabilitasi olahraga modern yang aman, terukur, dan berorientasi pada performa.

REFERENCES

- Blain, G. M., Mangum, T. S., Sidhu, S. K., Weavil, J. C., Hureau, T. J., Jessop, J. E., Bledsoe, A. D., Richardson, R. S., & Amann, M. (2016). Group III/IV Muscle Afferents Limit the Intramuscular Metabolic Perturbation During Whole Body Exercise in Humans. *The Journal of Physiology*, 594(18), 5303–5315. <https://doi.org/10.1113/jp272283>
- Bruzda, R., Wilczyński, B., & Zorena, K. (2023). Knee Function and Quality of Life in Adolescent Soccer Players With Osgood Schlatter Disease History: A Preliminary Study. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46537-7>
- Deshpande, S., Ghodke, P., Kale, S., & Shyam, A. (2025). Rehabilitation in Arthroscopic Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Journal of Orthopaedic Case Reports*, 15(3), 1–7. <https://doi.org/10.13107/jocr.2025.v15.i03.5312>
- Disantis, A., & Martin, R. L. (2022). Movement System Dysfunction Applied to Youth and Young Adult Throwing Athletes. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 17(1). <https://doi.org/10.26603/001c.30022>
- Dong, Y., Wang, H., Zhu, Y., Chen, B., Zheng, Y., Liu, X., Qiao, J., & Wang, X. (2020). Effects of Whole Body Vibration Exercise on Lumbar-Abdominal Muscles Activation for Patients

- With Chronic Low Back Pain. *BMC Sports Science Medicine and Rehabilitation*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13102-020-00226-4>
- Farrell, S. G., Hatem, M., & Bharam, S. (2023). Acute Adductor Muscle Injury: A Systematic Review on Diagnostic Imaging, Treatment, and Prevention. *The American Journal of Sports Medicine*, 51(13), 3591–3603. <https://doi.org/10.1177/03635465221140923>
- Flodin, J., Juthberg, R., & Ackermann, P. W. (2022). Effects of Electrode Size and Placement on Comfort and Efficiency During Low-Intensity Neuromuscular Electrical Stimulation of Quadriceps, Hamstrings and Gluteal Muscles. *BMC Sports Science Medicine and Rehabilitation*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s13102-022-00403-7>
- Galofaro, E., D'Antonio, E., Lotti, N., & Masia, L. (2022). Rendering Immersive Haptic Force Feedback via Neuromuscular Electrical Stimulation. *Sensors*, 22(14), 5069. <https://doi.org/10.3390/s22145069>
- Gomes, L. A. B., Cunha, R. A. d., Lópes, A. D., Souza, F. A. d., Costa, F. C., & Andreoli, C. V. (2023). Landing Technique and Ankle-Dorsiflexion Range of Motion Are Not Associated With the History of Lower Limb Injuries Among Youth Basketball Athletes. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 18(2). <https://doi.org/10.26603/001c.73033>
- Guo, Z., Zhou, S., Ji, K., Zhuang, Y., Song, J., Nam, C., Hu, X., & Zheng, Y. (2022). Corticomuscular Integrated Representation of Voluntary Motor Effort in Robotic Control for Wrist-Hand Rehabilitation After Stroke. *Journal of Neural Engineering*, 19(2), 026004. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac5757>
- Hadadnezhad, M., Letafatkar, A., Moradi, M., Saheb, M. S. S., Norouzi, G., & Salehi, S. (2024). The Relationship Between Upper Extremity Functional Tests Scores With Strength, Proprioception, and Posture in Male Volleyball Players. *Physical Treatments - Specific Physical Therapy*, 14(2), 115–124. <https://doi.org/10.32598/ptj.14.2.558.2>
- Hanks, M. M., Schnorenberg, A. J., Lee, K. K., & Slavens, B. A. (2022). Three-Dimensional Biomechanics of the Trunk and Upper Extremity During Overhead Throwing in Wheelchair Lacrosse Athletes With Spinal Cord Injury. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 102(4), 365–371. <https://doi.org/10.1097/phm.0000000000001989>
- Hauger, A. V., Reiman, M. P., Bjordal, J. M., Sheets, C., Ledbetter, L., & Goode, A. P. (2017). Neuromuscular Electrical Stimulation Is Effective in Strengthening the Quadriceps Muscle After Anterior Cruciate Ligament Surgery. *Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy*, 26(2), 399–410. <https://doi.org/10.1007/s00167-017-4669-5>
- Je, J. W., & Choi, W. J. (2022). Potential Negative Effects of Neuromuscular Electrical Stimulation: Does It Affect Static Balance and Proprioception? *Gerontechnology*, 21(s), 1–1. <https://doi.org/10.4017/gt.2022.21.s.536.opp3>
- Jorge, C. O., Melo-Aquino, B. d., Diogo Francisco da Silva dos Santos, & Oliveira, M. C. G. (2022). Muscle Pain Induced by Static Contraction Is Modulated by Transient Receptor Potential Vanilloid 1 and Ankyrin 1 Receptors. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 58. <https://doi.org/10.1590/s2175-97902022e20110>
- Koerber, S., Wager, S., Zynda, A. J., & Barbara, M. T. S. (2024). Scoping Review. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 103(11), 1045–1050. <https://doi.org/10.1097/phm.0000000000002490>
- Lam, E., Greenhough, E., Nazari, P., White, M. J., & Bruce, R. (2019). Muscle Metaboreflex Activation Increases Ventilation and Heart Rate During Dynamic Exercise in Humans. *Experimental Physiology*, 104(10), 1472–1481. <https://doi.org/10.1113/ep087726>

- Maffiuletti, N. A., Green, D. A., Vaz, M. A., & Dirks, M. L. (2019). Neuromuscular Electrical Stimulation as a Potential Countermeasure for Skeletal Muscle Atrophy and Weakness During Human Spaceflight. *Frontiers in Physiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01031>
- Moqadam, S. B., Delle, K., Schorling, U., Asheghabadi, A. S., Norouzi, F., & Xu, J. (2023). Reproducing Tactile and Proprioception Based on the Human-in-the-Closed-Loop Conceptual Approach. *IEEE Access*, 11, 41894–41905. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3267963>
- Nurshal, R. A., & Mutiara, S. (2023). Efektifitas Program Rehabilitasi Fisioterapi Dalam Mempercepat Pemulihan Cedera Lutut Pada Atlet Sepak Bola. *Jurnal Ilmiah Kedokteran Dan Kesehatan*, 2(1), 224–228. <https://doi.org/10.55606/klinik.v2i1.3851>
- Nussbaum, E. L., Houghton, P. E., Anthony, J., Rennie, S., Shay, B., & Hoens, A. M. (2017). Neuromuscular Electrical Stimulation for Treatment of Muscle Impairment: Critical Review and Recommendations for Clinical Practice. *Physiotherapy Canada*, 69(5), 1–76. <https://doi.org/10.3138/ptc.2015-88>
- Okayama, Y., & Daikuya, S. (2025). Proprioception and Central Nervous Excitability: Implications for Return-to-Play in Athletes With Ligament or Meniscal Injuries. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 20(8). <https://doi.org/10.26603/001c.142068>
- O’Sullivan, L. R., Preszler, J. A., & Tanaka, M. J. (2022). Hamstring Injury Rehabilitation and Prevention in the Female Athlete. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 17(6). <https://doi.org/10.26603/001c.38254>
- Rauf, U., Abdullah, A., Adnan, M., & Sadiq, N. (2022). Comparison of Dynamic Balance Between Flat Feet and Normal Athletes. *International Journal of Natural Medicine and Health Sciences*, 2(1), 56–60. <https://doi.org/10.52461/ijnms.v2i1.1240>
- Rice, R. P., Roach, K. E., Kirk-Sanchez, N., Waltz, B., Ellenbecker, T. S., Jayanthi, N., & Raya, M. A. (2022). Age and Gender Differences in Injuries and Risk Factors in Elite Junior and Professional Tennis Players. *Sports Health a Multidisciplinary Approach*, 14(4), 466–477. <https://doi.org/10.1177/19417381211062834>
- Saremi, M., & Gholami, M. (2022). Effect of Eight Weeks of Electrical Muscle Stimulation on the Interleukin-6 and Interleukin-10 Levels in Overweight Women. *International Journal of Health Sciences*, 47823–47839. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6ns7.13396>
- Shu, M.-Y., Oh, H., Jo, Y.-J., Eom, S.-H., Liang, J., Jung, S.-M., Kim, K., Jung, J., Ma, C.-W., & Kim, C. (2025). The Impact of Electromyostimulation on Strength, Recovery, and Performance in Soccer Athletes: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 15(14), 7950. <https://doi.org/10.3390/app15147950>
- Vitharana, T. N., King, E., Welch, N., Devitt, B. M., & Moran, K. (2025). Sensorimotor Dysfunction Following Anterior Cruciate Ligament Injury (Part 2): How Can Clinicians Rehabilitate It? *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 55(7), 454–462. <https://doi.org/10.2519/jospt.2025.12726>