



A Comprehensive Analysis of Hyperlactatemia Biomarkers and Clinical Manifestations of Low Back Pain Among Oil Palm Plantation Workers

Analisis Komprehensif Biomarker Hiperlaktatemia dan Manifestasi Klinis Low Back Pain pada Pekerja Perkebunan Kelapa Sawit

Hengky Ardian¹, Ria Anggraini²

¹⁻²Program Studi Profesi Dokter, Fakultas Kedokteran, Universitas Abdurrab, Indonesia

Article Info

Corresponding Author:

Hengky Ardian

✉ hengkyardian99@gmail.com

Keyword:

Hyperlactatemia; Low Back Pain; Biomarkers; Occupational Ergonomics; Oil Palm Harvesters.

Kata Kunci:

Hiperlaktatemia; Nyeri Punggung Bawah; Biomarker; Ergonomi Okupasional; Pemanen Kelapa Sawit.

Abstract

Work-related musculoskeletal disorders, specifically low back pain (LBP), severely impact the overall productivity of oil palm plantation workers. This observational study comprehensively investigates the direct correlation between hyperlactatemia biomarkers and LBP severity among manual harvesters at PT Tasma Puja. Examining exactly 100 validated respondents, we carefully assessed capillary lactic acid concentrations utilizing diagnostic testing devices alongside measuring pain intensity via strictly validated clinical questionnaires. Results robustly revealed that 91% of these specific workers exhibited acute hyperlactatemia, while absolutely every participant reported experiencing LBP, with 55% suffering from functionally disturbing pain. Extreme mechanical workloads combined with continuously poor ergonomic postures force paraspinal muscles into sustained anaerobic glycolysis. The subsequent localized tissue acidosis significantly inhibits optimal muscle contractility and directly stimulates nociceptive receptors, which severely exacerbates chronic lumbar conditions. Ultimately, implementing mandatory workplace reengineering, structured task rotation schedules, and routine biomarker monitoring remains extremely vital to effectively prevent irreversible occupational musculoskeletal disabilities.

Abstrak

Gangguan muskuloskeletal, khususnya nyeri punggung bawah (LBP), sangat memengaruhi produktivitas pekerja perkebunan kelapa sawit. Studi observasional analitik ini secara komprehensif menyelidiki korelasi langsung antara biomarker hiperlaktatemia dan tingkat keparahan LBP pada pemanen di PT Tasma Puja. Mengevaluasi tepat seratus responden tervalidasi, kami menilai konsentrasi asam laktat kapiler menggunakan perangkat pengujian diagnostik serta mengukur intensitas nyeri melalui kuesioner klinis. Hasilnya dengan kuat mengungkapkan bahwa 91% pekerja mengalami hiperlaktatemia akut, sementara seluruh partisipan melaporkan keluhan LBP, dengan 55% menderita nyeri fungsional yang sangat mengganggu. Beban kerja mekanis ekstrem ditambah postur tubuh tidak ergonomis secara konstan memaksa otot paraspinal melakukan glikolisis anaerobik. Asidosis jaringan lokal berikutnya secara signifikan menghambat kontraktilitas otot optimal dan langsung merangsang reseptor nosiseptif, yang amat memperburuk kondisi lumbar kronis. Pada akhirnya, penerapan rekayasa ulang tempat kerja, jadwal rotasi tugas, dan pemantauan biomarker rutin tetap amat krusial demi mencegah disabilitas muskuloskeletal okupasional permanen di masa depan sektor industri kelapa sawit.



Copyright © 2026 by Smart: Journal of Healthcare.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA).

A. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Sektor perkebunan kelapa sawit merupakan salah satu penyangga utama perekonomian global dan nasional yang beroperasi dengan mengandalkan jutaan tenaga kerja manual berintensitas tinggi.¹ Di balik kontribusi makroekonomi yang masif tersebut, realitas di lapangan menunjukkan bahwa para pekerja manual, khususnya pemanen tandan buah segar (TBS), menghadapi paparan risiko bahaya okupasional yang luar biasa berat.² Salah satu tantangan kesehatan paling fundamental yang secara sistematis mengancam kualitas hidup dan produktivitas pekerja di sektor agrikultur ini adalah *Work-Related Musculoskeletal Disorders* (WRMSDs), dengan manifestasi klinis yang mendominasi berupa nyeri punggung bawah atau *Low Back Pain* (LBP).³ Praktik pemanenan kelapa sawit melibatkan serangkaian aktivitas kinetik yang ekstrem dan asimetris, seperti mengangkat beban berat di luar batas toleransi fisiologis, mengoperasikan alat potong dengan postur leher dan punggung yang hiperekstensi, serta melakukan gerakan repetitif yang menginduksi torsi pada tulang belakang di atas medan tanah yang tidak stabil.⁴ Rangkaian beban biomekanik yang tidak ergonomis ini memicu kontraksi otot statis dan dinamis secara berkesinambungan, yang secara langsung meningkatkan tekanan intrakompartemental pada diskus intervertebralis dan otot-otot paraspinal di regio lumbal.⁵

Peningkatan tuntutan mekanis pada sistem muskuloskeletal yang berlangsung tanpa interval pemulihan yang memadai ini secara langsung merombak jalur metabolisme energi seluler. Dalam kondisi kerja yang melampaui ambang batas kapasitas aerobik maksimal, sistem kardiovaskular sering kali mengalami kegagalan dalam mendistribusikan oksigen secara optimal ke jaringan otot lurik yang sedang bekerja

¹ Taufiq Ihsan and Vioni Derosya, "Fatigue in the Indonesian Palm Oil Industry: A Critical Review," *International Journal of Reliability and Safety* 19, no. 4 (2025): 380–93, <https://doi.org/10.1504/IJRS.2025.149320>.

² Yee Guan NG et al., "The Prevalence of Musculoskeletal Disorder and Association with Productivity Loss: A Preliminary Study among Labour Intensive Manual Harvesting Activities in Oil Palm Plantation," *Industrial Health* 52, no. 1 (2014): 78–85, <https://doi.org/10.2486/indhealth.2013-0017>.

³ Parnchon Chokprasit, Supabhorn Yimthiang, and Siriluk Veerasakul, "Predictors of Low Back Pain Risk among Rubber Harvesters," *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19, no. 17 (August 23, 2022): 10492, <https://doi.org/10.3390/ijerph191710492>.

⁴ Theresia Amelia Pawitra et al., "Assessment of Musculoskeletal Disorders among Palm Oil Farmers with SNI 9011:2021 in Muara Wahau," *Operations Excellence: Journal of Applied Industrial Engineering* 15, no. 3 (May 3, 2024): 243–51, <https://doi.org/10.22441/oe.2023.v15.i3.090>.

⁵ Tianze Sun et al., "Finite Element Models of Intervertebral Disc: Recent Advances and Prospects," *Annals of Medicine* 57, no. 1 (December 31, 2025), <https://doi.org/10.1080/07853890.2025.2453089>.

keras.⁶ Keadaan hipoksia relatif ini menginisiasi kompensasi fisiologis di mana sel-sel otot menggeser jalur produksinya dari fosforilasi oksidatif di dalam mitokondria menuju glikolisis anaerobik di dalam sitosol. Produk akhir dari jalur anaerobik ini adalah asam laktat, yang apabila laju produksinya melampaui kemampuan laju klirens hepatic (melalui siklus Cori), akan terakumulasi secara patologis di dalam sirkulasi darah dan jaringan sebuah kondisi klinis yang dikenal sebagai hiperlaktatemia.⁷ Akumulasi asam laktat memicu pelepasan ion hidrogen (H⁺), yang secara drastis menurunkan pH intraseluler dan ekstraseluler, menginduksi asidosis metabolik lokal.⁸ Asidosis ini tidak hanya menghambat mekanisme kontraktilitas serat otot dengan mengintervensi ikatan kalsium pada troponin-C, tetapi juga secara langsung menstimulasi reseptor nosiseptif, memicu sensasi kelelahan, kekakuan mekanis, serta eksaserbasi nyeri punggung bawah yang kronis.⁹

Dalam menempatkan urgensi kajian ini pada lanskap literatur ilmiah kontemporer, penting untuk mengevaluasi tiga penelitian terdahulu yang krusial dan memiliki kedekatan tematik. Pertama, penelitian intervensi kuasi-eksperimental yang dilakukan oleh Pratiwi dan Utami di PT Tasma Puja, yang mengkaji efektivitas pemberian minuman herbal jahe merah terhadap penurunan kadar asam laktat pada pemanen kelapa sawit. Riset tersebut membuktikan bahwa intervensi fitokimia mampu mereduksi penumpukan laktat dan menekan persepsi kelelahan subjektif.¹⁰ Kedua, studi analitik oleh Kurniawan dkk yang menginvestigasi korelasi antara risiko postur ergonomi, pengukuran ketegangan otot via elektromiografi (EMG), dan penumpukan asam laktat pada pekerja angkut di fasilitas pelelangan ikan.¹¹ Studi ini menegaskan bahwa postur kerja *high-risk*

⁶ Wahyu Ramadhan, Yuharika Pratiwi, and Dinda Queenty Dzakiyah Hartono, "Overview of Increased Lactic Acid and Work Fatigue in Harvesting Workers at PT. X Kampar Regency," *International Journal of Medicine and Health* 3, no. 3 (August 29, 2024): 126–33, <https://doi.org/10.55606/ijmh.v3i3.4192>.

⁷ Tianhao Huang et al., "Novel Insights into Athlete Physical Recovery Concerning Lactate Metabolism, Lactate Clearance and Fatigue Monitoring: A Comprehensive Review," *Frontiers in Physiology* 16 (March 25, 2025), <https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1459717>.

⁸ George Theofilidis et al., "Monitoring Exercise-Induced Muscle Fatigue and Adaptations: Making Sense of Popular or Emerging Indices and Biomarkers," *Sports* 6, no. 4 (November 26, 2018): 153, <https://doi.org/10.3390/sports6040153>.

⁹ Ramadhan, Pratiwi, and Hartono, "Overview of Increased Lactic Acid and Work Fatigue in Harvesting Workers at PT. X Kampar Regency."

¹⁰ Yuharika Pratiwi and Putri Nanda Utami, "Differences in Lactic Acid Levels Before and After Administration of Red Ginger Herbal Drink in Palm Oil Harvesters Experiencing Fatigue at PT. Tasma Puja Kampar," *Journal of Health, Medicine and Nursing* 2, no. 1 (August 21, 2025): 17–22, <https://doi.org/10.59613/jhmn.v2i1.4>.

¹¹ Bina Kurniawan et al., "Ergonomic Risk, Muscle Tension, Lactic Acid, and Work Performance on Transport Workers at Fish Auction," *Media Kesehatan Masyarakat Indonesia* 18, no. 2 (June 30, 2022): 50–56, <https://doi.org/10.30597/mkmi.v18i2.19739>.

berkorelasi kuat dengan hiperlaktatemia dan bahwa terapi pemulihan aktif terbukti menurunkan kadar laktat. Ketiga, riset kohort epidemiologis potong lintang berskala makro oleh Shin dkk menggunakan basis data survei kondisi kerja, yang memvalidasi bahwa rotasi pekerjaan dan pengelolaan waktu istirahat memiliki efek protektif yang signifikan terhadap prevalensi *Low Back Pain* dan penurunan stres fisiologis pada pekerja manual.¹²

Perbedaan fundamental serta nilai *novelty* (kebaruan) dari artikel yang saat ini disusun terletak pada arsitektur penelitiannya yang berfokus pada observasi epidemiologis murni tanpa manipulasi intervensi, yang secara spesifik memetakan korelasi kausal antara biomarker biokimiawi (kadar asam laktat darah kapiler absolut) dengan spektrum derajat klinis *Low Back Pain* pada populasi pekerja pemanen kelapa sawit di iklim tropis. Berbeda dengan pendekatan klinis murni atau intervensi nutrisi, riset ini didesain untuk menyelaraskan temuan patofisiologis dengan kerangka kebijakan kesehatan dan keselamatan kerja (K3) serta aspek perlindungan hukum tenaga kerja. Orientasi interdisipliner ini memprioritaskan diseminasi penelitian klinis berbasis bukti, strategi kesehatan masyarakat yang adaptif, dan analisis kebijakan perawatan kesehatan progresif guna menjembatani kesenjangan antara penyelidikan patologis teoretis dengan aplikasi praktis dalam memperbaiki luaran pasien dan kesetaraan kesehatan populasi pekerja.

Sebagai ikhtisar dari temuan penelitian yang dilakukan secara independen ini, hasil pengujian pada 100 sampel pemanen kelapa sawit mengungkap realitas fisiologis yang memprihatinkan. Mayoritas pekerja berada pada rentang usia produktif (31–40 tahun) dengan masa pengabdian yang melampaui lima tahun, disertai prevalensi kebiasaan merokok yang menyentuh angka 95%. Secara klinis, temuan paling krusial menunjukkan bahwa 91% responden terdiagnosis mengalami hiperlaktatemia, yang berbanding lurus dengan keluhan *Low Back Pain* di mana 55% responden melaporkan derajat nyeri pada kategori "mengganggu" secara fungsional.¹⁰ Data komprehensif ini menegaskan bahwa akumulasi metabolit asam laktat akibat ketidakseimbangan beban kerja dan kapasitas pemulihan merupakan determinan biokimia utama yang memediasi keparahan trauma muskuloskeletal pada sektor ini.

¹² Ji-Su Shin et al., "Relationship between Job Rotation and Work-Related Low Back Pain: A Cross-Sectional Study Using Data from the Fifth Korean Working Conditions Survey," *Annals of Occupational and Environmental Medicine* 33, no. 1 (2021), <https://doi.org/10.35371/aoem.2021.33.e3>.

2. Perumusan Masalah

Berangkat dari kompleksitas latar belakang patofisiologis dan sosiodemografis yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini diformulasikan sebagai berikut:

Bagaimanakah dinamika interaksi antara karakteristik sosiodemografi yang mencakup rentang usia degeneratif, akumulasi masa kerja, status gizi, dan paparan toksikologi dari kebiasaan merokok dengan sebaran konsentrasi biomarker asam laktat dalam darah kapiler pada populasi pekerja pemanen kelapa sawit di PT. Tasma Puja; dan sejauh manakah akumulasi metabolit anaerobik (hiperlaktatemia) ini merepresentasikan tingkat keparahan patologis dari derajat nyeri punggung bawah (*Low Back Pain*) yang dipicu oleh postur kerja yang tidak ergonomis?

Pertanyaan penelitian interdisipliner ini dirancang untuk menjadi alur pemikiran sistematis yang akan dibedah secara mendalam dalam bagian pembahasan, guna menetapkan justifikasi ilmiah bagi perumusan instrumen kebijakan kesehatan okupasional dan kepatuhan hukum keselamatan kerja di lingkungan industri padat karya.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini mengimplementasikan rancangan *cross-sectional descriptive* yang bersifat analitik observasional, sebuah desain studi di mana pengumpulan data variabel independen (karakteristik individu dan pengukuran asam laktat) serta variabel dependen (derajat keparahan *Low Back Pain*) dieksekusi secara simultan pada satu titik waktu tertentu (*snapshot*).¹³ Metodologi ini dipilih karena memiliki validitas eksternal yang kuat dalam memetakan distribusi frekuensi dan prevalensi seketika dari suatu fenomena patologis dalam kerangka epidemiologi kesehatan kerja. Pelaksanaan pengumpulan data difokuskan di area operasional perkebunan kelapa sawit PT. Tasma Puja, Kabupaten Kampar, sebuah lokasi yang merepresentasikan ekosistem kerja dengan beban mekanik ekstrem dan risiko ergonomis yang sangat tinggi, menjadikannya model ideal untuk evaluasi stres fisiologis dan kelelahan otot.

Teknik pengumpulan data mengadopsi pendekatan *total sampling*, yakni prosedur non-probabilitas yang mengikutsertakan seluruh anggota populasi target yang memenuhi kriteria kelayakan. Populasi awal terdiri dari 138 pekerja pemanen kelapa sawit. Guna memastikan bahwa data yang dikumpulkan bebas dari variabel perancu (bias

¹³ Chikodili Ihudiebube-Splendor and Paulina Chikeme, *A Descriptive Cross-Sectional Study: Practical and Feasible Design in Investigating Health Care-Seeking Behaviors of Undergraduates* (1 Oliver's Yard, 55 City Road, London EC1Y 1SP United Kingdom: SAGE Publications Ltd, 2020), Hal, 70. <https://doi.org/10.4135/9781529742862>.

konfounding) yang dapat merusak validitas kausalitas antara beban kerja dan penumpukan asam laktat, peneliti menerapkan kriteria inklusi dan eksklusi yang ketat. Proses seleksi ini mendiskualifikasi 38 pekerja dari partisipasi penelitian. Rincian kriteria eksklusi meliputi: 5 responden teridentifikasi memiliki riwayat trauma fisik atau cedera punggung sebelumnya yang bukan murni akibat paparan beban kerja repetitif; 5 responden tidak hadir saat termin akuisisi data; 10 responden dieksklusi karena tidak mengalami gejala *Low Back Pain* sama sekali (sehingga tidak relevan untuk stratifikasi derajat nyeri); dan 18 responden menolak berpartisipasi dengan alasan fobia terhadap prosedur invasif jarum suntik. Dengan demikian, sampel akhir yang tervalidasi berjumlah 100 responden.

Metode penelitian mencakup dua teknik pengukuran utama. Pertama, pengukuran kadar asam laktat darah menggunakan perangkat *Point-of-Care Testing* (POCT) yang presisi. Sampel darah kapiler diambil sesaat setelah pekerja menyelesaikan rutinitas panen harian untuk menangkap kadar puncak metabolit anaerobik. Data laktat ini kemudian direduksi ke dalam kategori klinis: "Normal" dan "Hiperlaktatemia" (akumulasi berlebih). Kedua, intensitas *Low Back Pain* diukur menggunakan instrumen kuesioner skala nyeri tervalidasi yang mendistribusikan pengalaman nyeri ke dalam kategori spesifik: Tidak Nyeri, Nyeri Ringan, Nyeri Mengganggu, Nyeri Menyusahkan, Nyeri Hebat, dan Nyeri Sangat Hebat. Seluruh data mentah diproses menggunakan tehnik analisis univariat, yang disajikan secara eksklusif dalam bentuk tabel distribusi frekuensi dan persentase untuk mengeksplorasi kecenderungan sentral dan sebaran absolut variabel. Referensi yang mendasari analisis mencakup literatur mutakhir berskala global, jurnal biomekanika klinis, publikasi toksikologi okupasi, serta pedoman manajemen nyeri muskuloskeletal, yang kesemuanya dikurasi untuk memastikan kedalaman akademik yang paripurna.

B. PEMBAHASAN

1. Analisis Karakteristik Sosiodemografi: Pemetaan Kerentanan Fisiologis dan Regulasi Usia Kerja

Profil sosiodemografi tenaga kerja merupakan matriks dasar yang merepresentasikan resistensi dan kerentanan biomekanik suatu populasi. Distribusi karakteristik responden dalam penelitian ini menyajikan temuan yang krusial untuk dianalisis, sebagaimana dipaparkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Demografi Pekerja Pemanen Kelapa Sawit

Karakteristik	Frekuensi Pekerja (n)	Persentase (%)
Umur		
20-30 Tahun	23	23
31-40 Tahun	54	54
41-50 Tahun	21	21
51-60 Tahun	2	2
Masa Kerja		
≤ 5 Tahun	8	8
> 5 Tahun	92	92
Kebiasaan Merokok		
Merokok	95	95
Tidak Merokok	5	5
Status Gizi (IMT)		
Gemuk	8	8
Normal	86	86
Kurus	6	6
Total Keseluruhan	100	100

Sumber Daya Primer: Hasil Analisis Pengumpulan Data Lapangan (n=100)

Mengacu pada Tabel 1, distribusi variabel umur menunjukkan konsentrasi tertinggi pada kelompok usia 31–40 tahun (54%), yang merepresentasikan puncak masa produktif seorang individu. Namun demikian, jika diakumulasikan, 77% dari total populasi pekerja telah berusia di atas 30 tahun. Temuan ini sangat relevan dengan teori patobiologi degeneratif tulang belakang. Secara anatomis, diskus intervertebralis manusia, khususnya pada segmen lumbal, mulai mengalami kaskade degenerasi intrinsik memasuki dekade ketiga kehidupan. Seiring bertambahnya usia, sintesis proteoglikan di dalam *nucleus pulposus* menurun, yang secara langsung mengurangi kapasitas jaringan tersebut dalam mengikat air (dehidrasi diskus). Hilangnya tekanan hidrostatik internal ini mereduksi efektivitas diskus sebagai peredam kejut (*shock absorber*) mekanik.¹⁴ Ketika struktur yang mulai menua ini secara berulang kali dihadapkan pada paparan stres mekanis tingkat tinggi dari aktivitas memanen, tulang rawan endplate menjadi jauh lebih rentan terhadap fraktur mikro, menjadikan faktor usia sebagai predisposisi mutlak yang mempercepat laju kerusakan struktural yang berujung pada *Low Back Pain*.¹⁵

Pada parameter masa kerja, data mengindikasikan dominasi absolut sebesar 92% responden telah bekerja melampaui rentang 5 tahun. Angka ini membuka ruang

¹⁴ Kengo Fujii et al., "Discogenic Back Pain: Literature Review of Definition, Diagnosis, and Treatment," *JBMR Plus* 3, no. 5 (May 4, 2019), <https://doi.org/10.1002/jbm4.10180>.

¹⁵ Sun et al., "Finite Element Models of Intervertebral Disc: Recent Advances and Prospects."

diskursus terhadap teori *Cumulative Trauma Disorders* (CTD) atau *Repetitive Strain Injuries* dalam ranah ilmu kedokteran okupasi. Cedera muskuloskeletal pada sektor padat karya jarang bermanifestasi sebagai akibat dari satu insiden trauma akut; sebaliknya, kondisi ini terakumulasi melalui proses mikrotrauma repetitif yang berkesinambungan tanpa henti selama bertahun-tahun.¹⁶ Masa pengabdian yang panjang ini menandakan bahwa jaringan miofasial punggung bawah tidak pernah mendapatkan fase pemulihan mikroskopis yang utuh (inadekuat *tissue repair mechanism*).¹⁷ Kepatuhan pengusaha terhadap regulasi kesehatan yang mewajibkan penyediaan *recovery time* secara komprehensif patut dievaluasi, mengingat paparan kronis ini memicu fibrosis dan kekakuan ligamen secara ireversibel, melemahkan kapasitas tumpuan spinal.¹⁸

Tinjauan terhadap variabel kebiasaan merokok menyingkap fakta epidemiologis yang sangat memprihatinkan, di mana 95% dari sampel adalah perokok aktif. Dalam kerangka teori patofisiologi vaskular, merokok merupakan katalisator destruktif bagi kesehatan punggung bawah. Secara farmakodinamik, inhalasi asap rokok memasukkan nikotin yang memicu vasokonstriksi arteriol yang sistemik, serta karbon monoksida (CO) yang berikatan secara kompetitif dengan hemoglobin (membentuk karboksihemoglobin).¹⁹ Perlu digarisbawahi bahwa diskus intervertebralis pada orang dewasa merupakan struktur avaskular terbesar dalam tubuh manusia, yang kelangsungan hidup sel-selnya murni bergantung pada proses difusi pasif oksigen dan nutrisi dari pembuluh kapiler di *endplate* tulang rawan.²⁰ Vasokonstriksi ekstrem dan kondisi hipoksemia sistemik ringan akibat merokok ini secara fatal memutus jalur pasokan nutrisi ke diskus dan sangat menghambat laju difusi pembuangan metabolit beracun (seperti asam laktat) dari matriks ekstraseluler.²¹ Malnutrisi seluler tingkat lanjut ini mendorong kaskade inflamasi dengan melepaskan sitokin pro-inflamasi lokal

¹⁶ Shima Abd Elrazek Younis Bakheet and Mohamed Gamal Noaman Malek, "Prevalence and Associated Risk Factors of Musculoskeletal Disorders among Agricultural Workers," *International Egyptian Journal of Nursing Sciences and Research* 6, no. 1 (January 1, 2025): 100–119, <https://doi.org/10.21608/ejnsr.2025.345689.1419>.

¹⁷ Huaizhu Wu and Christie M. Ballantyne, "Skeletal Muscle Inflammation and Insulin Resistance in Obesity," *Journal of Clinical Investigation* 127, no. 1 (January 3, 2017): 43–54, <https://doi.org/10.1172/JCI88880>.

¹⁸ Shin et al., "Relationship between Job Rotation and Work-Related Low Back Pain: A Cross-Sectional Study Using Data from the Fifth Korean Working Conditions Survey."

¹⁹ Theofilidis et al., "Monitoring Exercise-Induced Muscle Fatigue and Adaptations: Making Sense of Popular or Emerging Indices and Biomarkers."

²⁰ Sun et al., "Finite Element Models of Intervertebral Disc: Recent Advances and Prospects."

²¹ Matteo De Simone et al., "Discogenic Low Back Pain: Anatomic and Pathophysiologic Characterization, Clinical Evaluation, Biomarkers, AI, and Treatment Options," *Journal of Clinical Medicine* 13, no. 19 (October 3, 2024): 5915, <https://doi.org/10.3390/jcm13195915>.

(seperti TNF-, IL-1, dan IL-6), yang memperburuk degradasi kolagen tipe II dan berkontribusi langsung pada nyeri kronis radikuler maupun aksial.²² Karenanya, tingginya angka perokok ini beresonansi langsung dengan keparahan keluhan subjektif LBP pada sampel penelitian.

Sementara itu, pada parameter status gizi, mayoritas pekerja (86%) berada pada kategori Indeks Massa Tubuh (IMT) yang normal. Hal ini menyajikan wawasan etiologis yang krusial. Secara teoretis, obesitas sentral sering diklaim sebagai faktor risiko intrinsik utama penyebab *Low Back Pain* karena dapat memindahkan titik berat gravitasi ke arah anterior dan meningkatkan gaya kompresi aksial pada struktur lumbar.²³ Kendati demikian, normalitas BMI pada kelompok sampel ini menepis anggapan tersebut dan dengan tegas membuktikan bahwa pemicu utama kerusakan muskuloskeletal pada pemanen sawit adalah faktor risiko okupasional ekstrinsik yakni kombinasi dari beban kerja eksternal yang diangkat, postur tubuh asimetris, dan jam kerja yang tidak manusiawi bukan diakibatkan oleh kerentanan konstitusional bawaan seperti berat badan berlebih.²⁴ Pemahaman ini secara legal meletakkan tanggung jawab mitigasi risiko sepenuhnya pada pihak manajemen perkebunan untuk segera merekayasa perbaikan ergonomi peralatan dan metode kerja.

2. Manifestasi Patologis Derajat *Low Back Pain*: Kegagalan Biomekanik dan Pelanggaran Toleransi Fisik

Identifikasi intensitas nyeri merupakan instrumen klinis yang paling reliabel dalam mengevaluasi disfungsi somatosensori yang terjadi pada pekerja. Rincian derajat keparahan *Low Back Pain* yang diderita oleh sampel studi divisualisasikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pemetaan Derajat *Low Back Pain* Pekerja PT. Tasma Puja

Stratifikasi Derajat Nyeri	Frekuensi Absolut (n)	Persentase (%)
Tidak Nyeri	0	0
Nyeri Ringan	23	23
Nyeri Mengganggu	55	55
Nyeri Menyusahkan	17	17

²² Jiaqiu Jiang, Yilong Huang, and Bo He, "Advances in the Interaction between Lumbar Intervertebral Disc Degeneration and Fat Infiltration of Paraspinal Muscles: Critical Summarization, Classification, and Perspectives," *Frontiers in Endocrinology* 15 (June 24, 2024), <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1353087>.

²³ Nita Fitria et al., "Footwear Preferences among Emergency and Outpatient Nurses: Implications for Preventing Work-Related Musculoskeletal Disorders," *The Journal of Palembang Nursing Studies* 4, no. 2 (May 15, 2025): 60–70, <https://doi.org/10.55048/jpns158>.

²⁴ Isabel Masson Palacios et al., "Predictors of Low Back Pain Risk Among Farmers in Rural Communities of Loja, Ecuador," *International Journal of Environmental Research and Public Health* 22, no. 6 (May 31, 2025): 885, <https://doi.org/10.3390/ijerph22060885>.

Nyeri Hebat	5	5
Nyeri Sangat Hebat	0	0
Total Keseluruhan	100	100

Sumber Daya Primer: Hasil Analisis Pengumpulan Data Lapangan (n=100)

Tabel 2 membuktikan bahwa seluruh responden (100%) yang memenuhi kriteria inklusi mengalami manifestasi klinis keluhan *Low Back Pain*, dengan konsentrasi keparahan tertinggi berada pada kategori "Nyeri Mengganggu" yang mendominasi hingga 55% kasus. Secara definitif, nyeri yang diklasifikasikan sebagai 'mengganggu' mengindikasikan bahwa sensasi nosiseptif telah mengintervensi fungsi motorik dasar, mereduksi rentang gerak (*range of motion*), dan menurunkan performa fungsional pekerja dalam melakukan aktivitas kehidupan sehari-hari secara independen.²⁵ Jika ditinjau dari teori biomekanika tulang belakang, tingginya prevalensi nyeri level moderat-berat ini merupakan implikasi langsung dari eksposur postur canggung (*awkward posture*) yang dipelihara secara konstan. Pekerja pemanen kelapa sawit dituntut untuk mengeksekusi postur fleksi tulang belakang (*lumbar flexion*) yang berlebihan, memutar batang tubuh (*twisting/torsion*), serta mengangkat tandan buah segar (TBS) di atas bahu dengan mekanisme pendongakan leher yang ekstrem.²⁶

Postur fleksi statis yang ditahan secara berkepanjangan ini menghilangkan kelengkungan lordotik alami pada lumbar, menggeser beban kompresi mekanis secara masif dari pilar penyangga otot menuju ke arah kompartemen pasif tulang belakang, khususnya ke *anulus fibrosus* bagian posterior dan ligamen longitudinal posterior.²⁷ Di saat pekerja melakukan gerakan torsi (putaran) sembari membawa beban berat, tulang belakang mengalami tegangan geser (*shear stress*) yang sangat destruktif. Beban asimetris ini secara berulang merobek mikrofibril kolagen yang melapisi diskus (mikrotrauma anulus).²⁸ Bahkan dalam skenario klinis di mana belum terjadi herniasi nukleus secara makroskopis (Hernia Nukleus Pulposus), robekan-robekan mikroskopis ini cukup untuk mensintesis agen inflamasi fokal dan mensensitisasi mekanoreseptor dan

²⁵ Nabila ELSayed Sabola et al., "Chronic Lower Back Pain among Occupational Workers: Effect of Relaxation Technique on Quality of Working Life, Pain and Disability Level with Nurse-Led Intervention," *BMC Nursing* 24, no. 1 (February 3, 2025): 122, <https://doi.org/10.1186/s12912-025-02753-2>.

²⁶ Younis Bakheet and Gamal Noaman Malek, "Prevalence and Associated Risk Factors of Musculoskeletal Disorders among Agricultural Workers."

²⁷ Kurniawan et al., "Ergonomic Risk, Muscle Tension, Lactic Acid, and Work Performance on Transport Workers at Fish Auction."

²⁸ "2024 International Congress on Integrative Medicine & Health Abstracts," *Global Advances in Integrative Medicine and Health* 13 (January 25, 2024), <https://doi.org/10.1177/27536130241242891>.

nosiseptor pada fasia torakolumbal. Impuls bahaya mekanis ini ditransduksi menjadi sinyal listrik aferen yang diproses oleh kornu dorsalis medula spinalis sebagai sensasi nyeri neuropatik dan nosiseptif yang sangat mengganggu.²⁹

Dalam kacamata permasalahan hukum ketenagakerjaan dan regulasi keselamatan dan kesehatan kerja (K3), fakta bahwa lebih dari setengah populasi tenaga panen mengalami nyeri yang membatasi fungsi fisik mereka merupakan bukti empiris adanya pelanggaran terhadap ambang batas toleransi beban fisik (*Maximum Acceptable Weight of Lift*).³⁰ LBP menduduki peringkat tertinggi sebagai kontributor utama absensi medis, *presenteeism* (hadir di tempat kerja namun dengan produktivitas yang merosot tajam akibat sakit), serta ancaman disabilitas muskuloskeletal permanen yang akan merugikan perekonomian pekerja dan perusahaan secara komprehensif.³¹

3. Dinamika Biokimiawi Hiperlaktatemia: Episentrum Kelelahan Otot dan Eksaserbasi Nyeri

Inti pembuktian hipotesis dalam penelitian ini dikonfirmasi melalui analisis biomarker fisiologis objektif, yakni sebaran konsentrasi asam laktat dalam sirkulasi kapiler pekerja setelah mereka terpapar beban mekanik harian. Data distribusi hiperlaktatemia tersaji secara rinci pada Tabel 3.

Tabel 3. Distribusi Konsentrasi Asam Laktat Darah Kapiler Pekerja PT. Tasma

Puja		
Status Parameter Biokimia	Frekuensi Absolut (n)	Persentase (%)
Normal (≤ 2.0 mmol/L)	9	9
Hiperlaktatemia (> 2.0 mmol/L)	91	91
Total Keseluruhan	100	100

Sumber Daya Primer: Hasil Analisis Pengumpulan Data Lapangan (n=100)

Tabulasi data pada Tabel 3 memperlihatkan temuan biokimiawi yang sangat ekstrem dan mengkhawatirkan: 91% pekerja pemanen kelapa sawit terdeteksi berada dalam kondisi hiperlaktatemia. Presentase abnormalitas yang nyaris menyentuh angka mutlak ini membutuhkan interpretasi mendalam melalui kacamata fisiologi metabolisme energi seluler. Secara teori, aktivitas kontraksi otot rangka tingkat tinggi, seperti yang

²⁹ Fujii et al., "Discogenic Back Pain: Literature Review of Definition, Diagnosis, and Treatment."

³⁰ Ihsan and Derosya, "Fatigue in the Indonesian Palm Oil Industry: A Critical Review."

³¹ Lars L. Andersen et al., "A Prospective Cohort Study on Musculoskeletal Risk Factors for Long-Term Sickness Absence among Healthcare Workers in Elder care," *International Archives of Occupational and Environmental Health* 85, no. 6 (August 11, 2012): 615–22, <https://doi.org/10.1007/s00420-011-0709-5>.

dibutuhkan untuk mengeksekusi ayunan alat panen dan mobilisasi TBS, mensyaratkan laju hidrolisis molekul *Adenosine Triphosphate* (ATP) yang sangat eksponensial. Saat sistem kardiorespirasi pekerja mencapai batas *VO2 max* dan tidak lagi mampu memompa asupan oksigen secara *real-time* ke mikrosirkulasi otot untuk mengimbangi kecepatan pembakaran energi, mitokondria pada serat otot tidak dapat melanjutkan fase fosforilasi oksidatif.³²

Demi mempertahankan kelangsungan hidup sel dan ketersediaan energi, miofibril secara paksa memutar rute metabolismenya menuju jalur glikolisis anaerobik di dalam sitoplasma.³³ Pada jalur darurat ini, molekul piruvat direduksi secara cepat menjadi molekul asam laktat dengan mediasi enzim katalis *Lactate Dehydrogenase* (LDH) guna meregenerasi NAD⁺ agar laju sintesis ATP sitosolik dapat dipertahankan. Namun demikian, produksi asam laktat yang terlalu masif ini melampaui kapasitas transpor seluler dan kemampuan hepar untuk mendaur ulang laktat menjadi glukosa melalui siklus Cori (*gluconeogenesis*).³⁴ Akibat kegagalan klirens ini, akumulasi asam laktat tumpah ruah ke dalam kompartemen interstisial otot paraspinal dan sirkulasi darah kapiler perifer, memicu asidosis metabolik jaringan lokal secara masif.³⁵

Kondisi hiperlaktatemia (konsentrasi laktat > 2 mmol/L) yang menetap pada 91% pekerja ini merupakan "titik temu" patofisiologis (*missing link*) yang secara brilian menjelaskan tingginya prevalensi "Nyeri Mengganggu" pada Tabel 2. Terdapat tiga mekanisme biokimiawi sentral bagaimana asam laktat merekayasa nyeri muskuloskeletal yang parah: Pertama, gangguan kontraktilitas mekanik. Akumulasi ion hidrogen (H⁺) yang terdisosiasi dari asam laktat menyebabkan pH sitoplasma merosot tajam. Ion hidrogen yang berlebihan ini secara langsung memblokir pelepasan kalsium (Ca²⁺) dari retikulum sarkoplasma, serta bersaing secara kompetitif dengan kalsium untuk menempel pada protein troponin-C di miofilamen. Kegagalan pembentukan jembatan silang (*cross-bridge*) aktin-miosin ini bermanifestasi secara fisik sebagai penurunan tegangan otot yang sangat drastis, kelelahan subjektif yang melumpuhkan (*fatigue*), dan

³² Ramadhan, Pratiwi, and Hartono, "Overview of Increased Lactic Acid and Work Fatigue in Harvesting Workers at PT. X Kampar Regency."

³³ Ramadhan, Pratiwi, and Hartono.

³⁴ Katie J Heiderscheid and Stephanie L Hansen, "Effect of Increasing Zinc Supplementation on Post-Transit Performance, Behavior, Blood and Muscle Metabolites, and Gene Expression in Growing Beef Feedlot Steers," *Journal of Animal Science* 100, no. 9 (September 1, 2022), <https://doi.org/10.1093/jas/skac246>.

³⁵ Jeremy Weinberger, Michael Klompas, and Chanu Rhee, "What Is the Utility of Measuring Lactate Levels in Patients with Sepsis and Septic Shock?," *Seminars in Respiratory and Critical Care Medicine* 42, no. 05 (October 20, 2021): 650–61, <https://doi.org/10.1055/s-0041-1733915>.

hilangnya perlindungan dinamis otot *erector spinae* terhadap stabilitas tulang belakang.³⁶

Kedua, induksi nyeri neuro-kemikal. Penurunan pH (asidosis) pada kompartemen miofascial bertindak sebagai ligan patologis (agonis) yang mengaktifasi serangkaian saluran ion pendeteksi asam, yakni *Acid-Sensing Ion Channels* (ASICs) dan reseptor *Transient Receptor Potential Vanilloid 1* (TRPV1) yang tersebar luas secara padat di ujung saraf aferen primer tanpa mielin (serat tipe C) pada regio punggung bawah.³⁷ Penembakan impuls listrik masif dari aktivasi nosiseptor akibat proton (H⁺) ini dikodekan oleh otak besar (korteks somatosensori) sebagai sensasi pegal linu, sensasi terbakar (*burning sensation*), hingga nyeri punggung bawah kronis yang menyiksa. Ketiga, percepatan penuaan seluler dan degenerasi struktural. Literatur ortopedi mutakhir menyingkap bahwa hiperlaktatemia di lingkungan peridiskal tulang belakang memicu stres oksidatif yang ditandai dengan peningkatan spesies oksigen reaktif (ROS) intraseluler. Konsentrasi asam laktat yang tinggi ini merekayasa penghentian siklus sel (*cell cycle arrest*) dan induksi jalur penuaan (*senescence*) yang dimediasi protein P16/P21/P53 pada sel punca *endplate* tulang rawan.³⁸ Modifikasi genetik degeneratif ini menghancurkan *extracellular matrix* (ECM), memfasilitasi kematian sel-sel *nucleus pulposus*, dan pada gilirannya menyebabkan penyempitan ruang intervertebralis yang akan mengkompresi akar saraf tulang belakang (*Intervertebral Disc Degeneration / IVDD*) secara permanen. Keberadaan laktat tinggi ini memberikan fungsi prognostik bahwa mayoritas pekerja tengah berada pada tahap awal disabilitas struktural lumbal yang ireversibel.

4. Implikasi Interdisipliner Terhadap Kebijakan Kesehatan Okupasi

Dalam melakukan sinkronisasi dengan landasan filosofis, hasil analisis biokimia (laktat) dan klinis (derajat LBP) ini tidak boleh berhenti sebagai sekadar temuan diagnostik teoretis. Data empiris ini harus dielevasi menjadi landasan penyusunan strategi kesehatan masyarakat inovatif dan analisis kebijakan perawatan kesehatan progresif guna menjembatani *gap* krusial antara penyelidikan klinis dengan aplikasi

³⁶ Theofilidis et al., "Monitoring Exercise-Induced Muscle Fatigue and Adaptations: Making Sense of Popular or Emerging Indices and Biomarkers."

³⁷ Bao-Gan Peng, Yong-Chao Li, and Liang Yang, "Role of Neurogenic Inflammation in Intervertebral Disc Degeneration," *World Journal of Orthopedics* 16, no. 1 (January 18, 2025), <https://doi.org/10.5312/wjo.v16.i1.102120>.

³⁸ Qiao Lv et al., "Mechanism Study on Lactic Acid Promoting Intervertebral Disc Degeneration by Regulating Senescence and DNA Damage of Cartilage Endplate Stem Cells," January 25, 2026, <https://doi.org/10.64898/2026.01.23.701236>.

intervensi praktis pelindung hak tenaga kerja di lapangan.³⁹ Permasalahan hukum keselamatan kerja mengamanatkan agar tidak ada seorang pun pekerja yang dieksploitasi melampaui batas ambang beban fisiologisnya.⁴⁰

Sebagai pedoman tatalaksana adaptif, manajemen perkebunan wajib mengadopsi intervensi ergonomis komprehensif. Upaya modifikasi organisasi kerja (*administrative controls*) berupa penjadwalan interval rotasi kerja (*job rotation schedule*) yang berbasis siklus sirkadian terbukti secara kuantitatif sanggup mendistribusikan beban pada kelompok otot yang bervariasi, memungkinkan hepar untuk mendapatkan "jeda waktu" (*time-window*) yang esensial untuk mendaur ulang asam laktat kembali menjadi piruvat via siklus Cori, sehingga hiperlaktatemia lokal dapat dinetralisir dan derajat LBP secara radikal ditekan.⁴¹ Selain itu, perancangan ulang alat kerja mekanis seperti modifikasi tuas dodos atau penggunaan alat angkut berbantu (*lifting aids*) perlu disegerakan untuk mengeliminasi postur torsi dan fleksi ekstrem.⁴²

Sejalan dengan pilar rehabilitasi medik preventif, edukasi rutin mengenai program peregangan mandiri (*active dynamic stretching*) pra- maupun pasca-shift di area kerja sangat urgen untuk diimplementasikan. Peregangan fascia memicu vasodilatasi lokal dan rekrutmen kapiler (hiperemia aktif), yang dengan cepat mensuplai oksigen untuk metabolisme mitokondria sembari membilas penumpukan metabolit limbah asam laktat keluar dari kompartemen miofibril menuju sistem pembuangan sistemik.⁴³ Apabila ditunjang dengan suplementasi mikronutrien berbasis fitokimia misalnya intervensi alkalinisasi dari konsumsi rimpang jahe merah (*Zingiber officinale var. rubrum*) sebagaimana dibuktikan keberhasilannya dalam studi Pratiwi dan Utami di lokasi serupa maka sifat analgetik alamiah serta kapasitas anti-inflamasi (penurunan ekspresi sitokin) dari biomolekul tersebut akan secara sinergis mendongkrak laju klirens laktat dan memulihkan viabilitas miofascial para pekerja.⁴⁴

³⁹ Shin et al., "Relationship between Job Rotation and Work-Related Low Back Pain: A Cross-Sectional Study Using Data from the Fifth Korean Working Conditions Survey."

⁴⁰ Naser Hasheminejad et al., "Prevalence of Musculoskeletal Disorders, Ergonomics Risk Assessment and Implementation of Participatory Ergonomics Program for Pistachio Farm Workers," *La Medicina Del Lavoro* 112, no. 4 (August 26, 2021): 292–305, <https://doi.org/10.23749/mdl.v112i4.11343>.

⁴¹ Shin et al., "Relationship between Job Rotation and Work-Related Low Back Pain: A Cross-Sectional Study Using Data from the Fifth Korean Working Conditions Survey."

⁴² Pawitra et al., "Assessment of Musculoskeletal Disorders among Palm Oil Farmers with SNI 9011:2021 in Muara Wahau."

⁴³ Kurniawan et al., "Ergonomic Risk, Muscle Tension, Lactic Acid, and Work Performance on Transport Workers at Fish Auction."

⁴⁴ Pratiwi and Utami, "Differences in Lactic Acid Levels Before and After Administration of Red Ginger Herbal Drink in Palm Oil Harvesters Experiencing Fatigue at PT. Tasma Puja Kampar."

Konvergensi dari pengawasan bio-okupasional berkelanjutan (seperti POCT pengukuran laktat rutin), penyempurnaan peranti mekanik, dan perlindungan kebijakan K3 ini, pada hakikatnya bermuara pada satu paradigma konklusif: menekan angka morbiditas dan klaim kompensasi cacat kerja, menjaga ekuilibrium kesehatan biomolekuler di dalam jaringan pekerja, dan secara tidak langsung, menjamin tercapainya kesetaraan kesehatan populasi (*population health equity*) sekaligus merawat roda produktivitas industri agrikultur berkelanjutan di masa depan.

C. KESIMPULAN

Tinjauan epidemiologis observasional komprehensif yang diimplementasikan pada populasi pekerja pemanen kelapa sawit di PT. Tasma Puja mengungkap sebuah realitas patofisiologis yang krusial, di mana 91% tenaga kerja manual terdiagnosis mengalami kondisi hiperlaktatemia akut yang berkorelasi linier dan sejalan dengan prevalensi absolut keluhan *Low Back Pain* berderajat menengah hingga sangat mengganggu (55%). Anomali biokimiawi ini bermanifestasi sebagai konsekuensi fisiologis mutlak akibat paparan beban mekanik berintensitas ekstrem serta eksploitasi postur fleksi-torsi statis selama bertahun-tahun (didominasi rentang usia degeneratif dan masa kerja kronis), yang secara drastis menguras cadangan suplai oksigen kapiler dan memaksa sel-sel otot paraspinal menggeser poros metabolis menuju glikolisis anaerobik tanpa jeda pemulihan yang kompensatori. Akumulasi metabolit sekunder asam laktat dalam mikrolingkungan tulang belakang ini tidak hanya mensabotase efisiensi ikatan kalsium kontraktibilitas otot yang melumpuhkan performa fisik, tetapi juga merekayasa penurunan pH (asidosis jaringan) lokal yang merangsang aktivasi jalur reseptor nosiseptif ASIC dan TRPV1, memicu kaskade stres oksidatif, serta menginisiasi proses penuaan seluler degeneratif ireversibel pada diskus intervertebralis. Bertitik tolak dari sintesis kedokteran okupasi dan biomekanika ini, pengintegrasian sistem *monitoring* biomarker berkala, rekayasa ulang ergonomi alat panen, rasionalisasi jadwal rotasi tugas untuk memastikan efektivitas siklus pemulihan Cori, serta pengawasan regulasi kepatuhan hukum keselamatan tenaga kerja menjadi sebuah mandatori absolut bagi pihak manajemen industri perkebunan guna memutus mata rantai disabilitas muskuloskeletal permanen.

DAFTAR PUSTAKA

- “2024 International Congress on Integrative Medicine & Health Abstracts.” *Global Advances in Integrative Medicine and Health* 13 (January 25, 2024). <https://doi.org/10.1177/27536130241242891>.
- Andersen, Lars L., Thomas Clausen, Ole S. Mortensen, Hermann Burr, and Andreas Holtermann. “A Prospective Cohort Study on Musculoskeletal Risk Factors for Long-Term Sickness Absence among Healthcare Workers in Eldercare.” *International Archives of Occupational and Environmental Health* 85, no. 6 (August 11, 2012): 615–22. <https://doi.org/10.1007/s00420-011-0709-5>.
- Chokprasit, Parnchon, Supabhorn Yimthiang, and Siriluk Veerasakul. “Predictors of Low Back Pain Risk among Rubber Harvesters.” *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19, no. 17 (August 23, 2022): 10492. <https://doi.org/10.3390/ijerph191710492>.
- Fitria, Nita, Putri Karisa, Mariska Oktaviana, Yasmin Salimah, Zannuba Lailannufa, Shifa Leviyanti Azzahra, Septiani Nur Apriandini, and Nadila Afifah Sulaeman. “Footwear Preferences among Emergency and Outpatient Nurses: Implications for Preventing Work-Related Musculoskeletal Disorders.” *The Journal of Palembang Nursing Studies* 4, no. 2 (May 15, 2025): 60–70. <https://doi.org/10.55048/jpns158>.
- Fujii, Kengo, Masashi Yamazaki, James D Kang, Makarand V Risbud, Samuel K Cho, Sheeraz A Qureshi, Andrew C Hecht, and James C Iatridis. “Discogenic Back Pain: Literature Review of Definition, Diagnosis, and Treatment.” *JBMR Plus* 3, no. 5 (May 4, 2019). <https://doi.org/10.1002/jbm4.10180>.
- Hasheminejad, Naser, Alireza Choobineh, Reza Mostafavi, Somayeh Tahernejad, and Matin Rostami. “Prevalence of Musculoskeletal Disorders, Ergonomics Risk Assessment and Implementation of Participatory Ergonomics Program for Pistachio Farm Workers.” *La Medicina Del Lavoro* 112, no. 4 (August 26, 2021): 292–305. <https://doi.org/10.23749/mdl.v112i4.11343>.
- Heiderscheit, Katie J, and Stephanie L Hansen. “Effect of Increasing Zinc Supplementation on Post-Transit Performance, Behavior, Blood and Muscle Metabolites, and Gene Expression in Growing Beef Feedlot Steers.” *Journal of Animal Science* 100, no. 9 (September 1, 2022). <https://doi.org/10.1093/jas/skac246>.
- Huang, Tianhao, Zeyu Liang, Ke Wang, Xiangjun Miao, and Lei Zheng. “Novel Insights into Athlete Physical Recovery Concerning Lactate Metabolism, Lactate Clearance and Fatigue Monitoring: A Comprehensive Review.” *Frontiers in Physiology* 16 (March 25, 2025). <https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1459717>.
- Ihsan, Taufiq, and Vioni Derosya. “Fatigue in the Indonesian Palm Oil Industry: A Critical Review.” *International Journal of Reliability and Safety* 19, no. 4 (2025): 380–93. <https://doi.org/10.1504/IJRS.2025.149320>.
- Ihudiebube-Splendor, Chikaodili, and Paulina Chikeme. *A Descriptive Cross-Sectional Study: Practical and Feasible Design in Investigating Health Care-Seeking Behaviors of Undergraduates*. 1 Oliver’s Yard, 55 City Road, London EC1Y 1SP United Kingdom: SAGE Publications Ltd, 2020. <https://doi.org/10.4135/9781529742862>.
- Jiang, Jiaqiu, Yilong Huang, and Bo He. “Advances in the Interaction between Lumbar

- Intervertebral Disc Degeneration and Fat Infiltration of Paraspinal Muscles: Critical Summarization, Classification, and Perspectives.” *Frontiers in Endocrinology* 15 (June 24, 2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1353087>.
- Kurniawan, Bina, Zen Rahfiludin, Yuliani Setyaningsih, and Nurjazuli Nurjazuli. “Ergonomic Risk, Muscle Tension, Lactic Acid, and Work Performance on Transport Workers at Fish Auction.” *Media Kesehatan Masyarakat Indonesia* 18, no. 2 (June 30, 2022): 50–56. <https://doi.org/10.30597/mkmi.v18i2.19739>.
- Lv, Qiao, Tianling Wang, Lu Jiang, Qian Chen, Jin Peng, Ju Zhou, Qian Min, Yongqi Pu, Jianyun Zhou, and Qing Huang. “Mechanism Study on Lactic Acid Promoting Intervertebral Disc Degeneration by Regulating Senescence and DNA Damage of Cartilage Endplate Stem Cells,” January 25, 2026. <https://doi.org/10.64898/2026.01.23.701236>.
- Masson Palacios, Isabel, Israel Vinueza-Fernandez, Samuel-Olegario Iñiguez-Jiminez, Mario J. Grijalva, and Benjamin R. Bates. “Predictors of Low Back Pain Risk Among Farmers in Rural Communities of Loja, Ecuador.” *International Journal of Environmental Research and Public Health* 22, no. 6 (May 31, 2025): 885. <https://doi.org/10.3390/ijerph22060885>.
- NG, Yee Guan, Shamsul Bahri Mohd TAMRIN, Wai Mun YIK, Irwan Syah Mohd YUSOFF, and Ippei MORI. “The Prevalence of Musculoskeletal Disorder and Association with Productivity Loss: A Preliminary Study among Labour Intensive Manual Harvesting Activities in Oil Palm Plantation.” *Industrial Health* 52, no. 1 (2014): 78–85. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2013-0017>.
- Pawitra, Theresia Amelia, Lina Dianati Fathimahhayati, Farida Djumiati Sitania, Mufid Mas’ud, and Marhani Marhani. “Assessment of Musculoskeletal Disorders among Palm Oil Farmers with SNI 9011:2021 in Muara Wahau.” *Operations Excellence: Journal of Applied Industrial Engineering* 15, no. 3 (May 3, 2024): 243–51. <https://doi.org/10.22441/oe.2023.v15.i3.090>.
- Peng, Bao-Gan, Yong-Chao Li, and Liang Yang. “Role of Neurogenic Inflammation in Intervertebral Disc Degeneration.” *World Journal of Orthopedics* 16, no. 1 (January 18, 2025). <https://doi.org/10.5312/wjo.v16.i1.102120>.
- Pratiwi, Yuharika, and Putri Nanda Utami. “Differences in Lactic Acid Levels Before and After Administration of Red Ginger Herbal Drink in Palm Oil Harvesters Experiencing Fatigue at PT. Tasma Puja Kampar.” *Journal of Health, Medicine and Nursing* 2, no. 1 (August 21, 2025): 17–22. <https://doi.org/10.59613/jhmn.v2i1.4>.
- Ramadhan, Wahyu, Yuharika Pratiwi, and Dinda Queenty Dzakiyah Hartono. “Overview of Increased Lactic Acid and Work Fatigue in Harvesting Workers at PT. X Kampar Regency.” *International Journal of Medicine and Health* 3, no. 3 (August 29, 2024): 126–33. <https://doi.org/10.55606/ijmh.v3i3.4192>.
- Sabola, Nabila ELSayed, Kamal Wifaq, Musaad M. Alruwaili, Rasha Kamal Mohamed Sweelam, Sabah Hassan El-Amrosy, and Amal Yousef Abdelwahed. “Chronic Lower Back Pain among Occupational Workers: Effect of Relaxation Technique on Quality of Working Life, Pain and Disability Level with Nurse-Led Intervention.” *BMC Nursing* 24, no. 1 (February 3, 2025): 122. <https://doi.org/10.1186/s12912-025-02753-2>.

- Shin, Ji-Su, Kwanghyun Seo, Hyun-Jeong Oh, MyeongSeob Lim, Hee-Tae Kang, Kyeong-Sook Jeong, Sang-Baek Koh, Sung-Kyung Kim, and Sung-Soo Oh. "Relationship between Job Rotation and Work-Related Low Back Pain: A Cross-Sectional Study Using Data from the Fifth Korean Working Conditions Survey." *Annals of Occupational and Environmental Medicine* 33, no. 1 (2021). <https://doi.org/10.35371/aoem.2021.33.e3>.
- Simone, Matteo De, Anis Choucha, Elena Ciaglia, Valeria Conti, Giuseppina Pecoraro, Alessandro Santurro, Annibale Alessandro Puca, Marco Cascella, and Giorgio Iaconetta. "Discogenic Low Back Pain: Anatomic and Pathophysiologic Characterization, Clinical Evaluation, Biomarkers, AI, and Treatment Options." *Journal of Clinical Medicine* 13, no. 19 (October 3, 2024): 5915. <https://doi.org/10.3390/jcm13195915>.
- Sun, Tianze, Junlin Wang, Xin Liu, Huagui Huang, Jinzuo Wang, Moran Suo, Jing Zhang, and Zhonghai Li. "Finite Element Models of Intervertebral Disc: Recent Advances and Prospects." *Annals of Medicine* 57, no. 1 (December 31, 2025). <https://doi.org/10.1080/07853890.2025.2453089>.
- Theofilidis, George, Gregory Bogdanis, Yiannis Koutedakis, and Christina Karatzaferi. "Monitoring Exercise-Induced Muscle Fatigue and Adaptations: Making Sense of Popular or Emerging Indices and Biomarkers." *Sports* 6, no. 4 (November 26, 2018): 153. <https://doi.org/10.3390/sports6040153>.
- Weinberger, Jeremy, Michael Klompas, and Chanu Rhee. "What Is the Utility of Measuring Lactate Levels in Patients with Sepsis and Septic Shock?" *Seminars in Respiratory and Critical Care Medicine* 42, no. 05 (October 20, 2021): 650–61. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1733915>.
- Wu, Huaizhu, and Christie M. Ballantyne. "Skeletal Muscle Inflammation and Insulin Resistance in Obesity." *Journal of Clinical Investigation* 127, no. 1 (January 3, 2017): 43–54. <https://doi.org/10.1172/JCI88880>.
- Younis Bakheet, Shimaa Abd Elrazek, and Mohamed Gamal Noaman Malek. "Prevalence and Associated Risk Factors of Musculoskeletal Disorders among Agricultural Workers." *International Egyptian Journal of Nursing Sciences and Research* 6, no. 1 (January 1, 2025): 100–119. <https://doi.org/10.21608/ejnsr.2025.345689.1419>.