

EVALUASI EKSOSKELETON DALAM MEREDISTRIBUSI BEBAN OTOT PEMANEN KELAPA SAWIT DENGAN ANALISIS BIOMEKANIK

ABI KARAMI FADLI



**PROGRAM STUDI TEKNIK PERTANIAN DAN BIOSISTEM
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “Evaluasi Eksoskeleton dalam Meredistribusi Beban Otot Pemanen Kelapa Sawit dengan Analisis Biomekanik” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir skripsi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, September 2026

Abi Karami Fadli
F1401221039



ABSTRAK

ABI KARAMI FADLI. Evaluasi Eksoskeleton dalam Meredistribusi Beban Otot Pemanen Kelapa Sawit dengan Analisis Biomekanik. Dibimbing oleh LENNY SAULIA dan M FAIZ SYUAIB.

Pemanenan kelapa sawit secara manual menggunakan egrek berpotensi menimbulkan gangguan otot rangka akibat kerja (GOTRAK), terutama pada area bahu, lengan, dan punggung. Tim peneliti BRIN dan IPB telah mengembangkan prototipe *Upper Limb Exoskeleton* (ULE) pasif sebagai alat bantu untuk mereduksi beban muskuloskeletal pemanen. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas ULE dalam mereduksi beban muskuloskeletal pada aktivitas pemotongan tandan buah segar kelapa sawit. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan biomekanik berbasis *inverse dynamics* dengan data gerak yang diperoleh dari *Noitom Motion Capture System* dan diolah melalui *Axis Studio*. Pemodelan muskuloskeletal dilakukan menggunakan perangkat lunak *Biomechanics of Bodies* (BoB) untuk memperoleh estimasi *muscle force* dan *joint contact force* (JCF). Analisis difokuskan pada otot deltoid, trapezius, bisep, dan lumbar, serta pada sendi bahu, siku, dan L5-pelvis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa otot bisep merupakan otot dengan estimasi *muscle force* tertinggi, sedangkan sendi L5-pelvis menerima estimasi JCF terbesar selama aktivitas pemotongan. Penggunaan ULE menunjukkan perubahan pola pembebanan antara sisi kanan dan kiri tubuh, dengan penurunan *muscle force* terbesar terjadi pada deltoid kanan, disertai peningkatan pada deltoid kiri. Pola tersebut menunjukkan adanya kecenderungan redistribusi beban antara sisi kanan dan kiri tubuh. Secara keseluruhan, ULE menunjukkan potensi sebagai intervensi ergonomi dalam mengurangi beban muskuloskeletal pada pemanen kelapa sawit.

Kata kunci: analisis biomekanik, eksoskeleton pasif, dinamika invers, gaya otot, pemanenan kelapa sawit



ABSTRACT

ABI KARAMI FADLI. Evaluation of an Exoskeleton in Redistributing Muscle Loads among Oil Palm Harvesters through Biomechanical analysis. Supervised by LENNY SAULIA and M FAIZ SYUAIB.

Manual oil palm harvesting using an egrek poses a high risk of work-related musculoskeletal disorders (MSDs), particularly affecting the shoulders, arms, and lower back. A research team from BRIN and IPB has developed a passive Upper Limb Exoskeleton (ULE) prototype to reduce the musculoskeletal load experienced by harvesters. This study aimed to evaluate the effectiveness of the ULE in reducing musculoskeletal loads during the fresh fruit bunch cutting task. Biomechanical analysis was performed using an inverse dynamics approach based on motion data acquired with the Noitom Motion Capture System and processed using Axis Studio. A musculoskeletal model was developed in Biomechanics of Bodies (BoB) software to estimate muscle force and joint contact force (JCF). The analysis focused on the deltoid, trapezius, biceps, and lumbar muscles, as well as the shoulder, elbow, and the L5-pelvis joints. The results showed that the biceps exhibited the highest estimated muscle force, while the L5-pelvis joint experienced the highest estimated JCF during the cutting task. The use of ULE resulted in changes in the loading pattern between the right and left sides of the body, with the greatest decrease in *muscle force* occurring in the right deltoid, accompanied by an increase in the left deltoid. This pattern indicates a tendency toward load redistribution between the right and left sides of the body. Overall, the ULE shows potential as an ergonomic intervention for reducing musculoskeletal loading among oil palm harvesters.

Keywords: *biomechanical analysis, passive exoskeleton, inverse dynamics, muscle force, oil palm harvesting*



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

EVALUASI EKSOSKELETON DALAM MEREDISTRIBUSI BEBAN OTOT PEMANEN KELAPA SAWIT DENGAN ANALISIS BIOMEKANIK

ABI KARAMI FADLI

Skripsi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana pada
Program Studi Teknik Pertanian dan Biosistem

**PROGRAM STUDI TEKNIK PERTANIAN DAN BIOSISTEM
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University



Judul Skripsi : Evaluasi Eksoskeleton dalam Meredistribusi Beban Otot Pemanen Kelapa Sawit dengan Analisis Biomekanik

Nama : Abi Karami Fadli
NIM : F1401221039

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Dr. Lenny Saulia, S.T.P., M.Si.
NIP 197306201998022001

Pembimbing 2:

Prof. Dr. Ir. M. Faiz Syuaib, M. Agr.
NIP 196708311994021001

Diketahui oleh

Ketua Program Studi Teknik Pertanian dan Biosistem:

Prof. Dr. Ir. Edy Hartulistiyoso, M.Sc, Agr
NIP 196304251989031001

Tanggal Ujian:
(13 Agustus 2026)

Tanggal Lulus:

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga skripsi ini berhasil diselesaikan. Penelitian dengan judul “Evaluasi Eksoskeleton dalam Meredistribusi Beban Otot Pemanen Kelapa Sawit dengan Analisis Biomekanik” ini, telah dilaksanakan sejak bulan Juni 2026 sampai bulan Juli 2026. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Dr. Lenny Saulia S.T.P., M.Si. dan Prof. Dr. Ir. M. Faiz Syuaib, M.Agr. selaku dosen pembimbing I dan pembimbing II yang selalu memberikan bimbingan, arahan, nasihat, saran, dan ilmu pengetahuan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Pak Muqorob Tajalli, M.Si dan Ibu Nugrahaning Sani Dewi, Ph.D atas semua arahan, bantuan, dan ilmu pengetahuan yang diberikan kepada penulis selama proses penelitian dan pengolahan data.
3. Pak Kadek Heri Sanjaya, Ph.D dan Pak Yukhi Mustaqim Kusuma Sya'Bana, M.A. atas bantuan yang diberikan selama pengambilan data.
4. Pak Riko Budi Prasetyo, S.Tr selaku Asisten Afdeling PT Perkebunan Nusantara IV yang telah memberikan bantuan selama pengambilan data sehingga pelaksanaan penelitian berjalan dengan lancar.
5. Kedua orang tua tercinta, yaitu Papa Chairul Fadli S.E. dan Mama Dini Rizkinings Lestari S.E., juga kedua adik, Ghazi Akram Fadli dan Mazaya Mufida Fadli, serta seluruh keluarga yang senantiasa memberikan do'a, semangat, dan dukungan berupa materi dan non materi yang tak terhingga nilainya selama masa hidup penulis.
6. Program studi Teknik Pertanian dan Biosistem dan Fakultas Teknik dan Teknologi yang telah memberikan izin pelaksanaan penelitian.
7. PT Perkebunan Nusantara IV atas bantuan dan fasilitas yang diberikan sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik.
8. Teman-teman satu bimbingan, yakni Dana, Shayna, Mawan, Riza, dan Yusuf yang telah membantu selama proses penelitian.
9. Teman-teman Konoha, yakni Tasha, Mahathir, Danu, dan Wilfi yang telah kebersamai penulis dan memberikan banyak inspirasi selama masa perkuliahan.
10. Teman-teman SMA 104 Jakarta (SAKOVA), yaitu Mestalla, Farhan, Ica, Namira, dan Yesha yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.
11. Seluruh teman-teman Teknik Mesin dan Biosistem angkatan 59 (VERMILION) atas kebersamaannya selama masa perkuliahan.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, September 2026

Abi Karami Fadli



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	3
1.5 Ruang Lingkup	3
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pemanenan Kelapa Sawit	5
2.2 Gangguan Muskuloskeletal (<i>Muskuloskeletal Disorders</i>)	5
2.3 <i>Upper Limb Exoskeleton (ULE)</i>	6
2.4 Karakteristik Anatomi dan Fungsi Otot	7
2.5 <i>Muscle Force</i>	9
2.6 <i>Joint Contact Force (JCF)</i>	10
2.7 <i>Noitom Motion Capture System</i>	10
2.8 Biomekanika dan Pendekatan <i>Inverse Dynamics</i>	11
2.9 Pemodelan Muskuloskeletal menggunakan <i>Biomechanics of Bodies (BoB)</i>	12
2.10 Gaya Pemotongan pada Aktivitas Pemanenan Kelapa Sawit	13
METODE	14
3.1 Waktu dan Tempat	14
3.2 Instrumen Penelitian	14
3.3 Subjek Penelitian	14
3.4 Prosedur Penelitian	15
3.5 Penelitian Pendahuluan	16
3.6 Persiapan Subjek dan Instrumen	16
3.7 Pengambilan Data	16
3.8 Sinkronisasi Data	17
3.9 <i>Scaling Model Biomekanik (BoB)</i>	18
3.10 Parameter Pengukuran	19
3.11 Pengolahan Data (<i>Inverse Dynamics</i>)	23
3.12 Analisis Data	24
3.13 Interpretasi Hasil	25
HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1 Gambaran Umum Aktivitas Pemanenan	26
4.2 Hasil Pengukuran Lapangan	26
4.3 Analisis <i>Muscle Force</i>	29
4.4 Analisis <i>Joint Contact Force (JCF)</i>	32
4.5 Analisis Statistik Perubahan <i>Muscle Force</i> dengan Intervensi ULE	35
4.6 Analisis Statistik Perubahan JCF dengan Intervensi ULE	37
4.7 Interpretasi Efektivitas ULE	39



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

V	SIMPULAN DAN SARAN	41
5.1	Simpulan	41
5.2	Saran	41
	DAFTAR PUSTAKA	43
	LAMPIRAN	46
	RIWAYAT HIDUP	67



DAFTAR TABEL

1	Elemen-elemen kerja pada aktivitas pemanenan kelapa sawit	5
2	Penyimpanan data penelitian	17
3	Hasil uji korelasi Spearman antara <i>muscle force</i> dan JCF	34
4	Hasil uji normalitas Shapiro-Wilk pada variabel <i>muscle force</i>	35
5	Hasil uji perbedaan dan <i>effect size</i> pada variabel <i>muscle force</i>	36
6	Hasil uji normalitas Shapiro-Wilk pada variabel JCF	37
7	Hasil uji perbedaan dan <i>effect size</i> pada variabel JCF	38

DAFTAR GAMBAR

1	Prototipe ULE pasif: (a) tampak depan (b) tampak samping (c) tampak belakang	6
2	Letak anatomis otot deltoid (Patton dan Thibodeau 2010)	7
3	Letak anatomis otot trapezius (Sugijanto dan Army 2015)	8
4	Letak anatomis otot bisept (Netter 2019)	8
5	Letak anatomis otot <i>iliocostalis lumborum</i> (Sumida 2023)	9
6	Ilustrasi hubungan antara gaya otot dan JCF (Bauer 2019)	10
7	<i>Noitom Motion Capture System</i> (Hui dan Xuelian 2025)	11
8	Ilustrasi alur sistem <i>model-based inverse dynamics</i>	12
9	Proses akuisisi data dan perhitungan <i>output</i> pada BoB (Auer S <i>et al.</i> 2022)	13
10	Diagram alir prosedur penelitian	15
11	Tampilan kalibrasi pose gerakan di Axis Studio: (a) <i>A-pose</i> (b) <i>S-pose</i> (c) <i>T-pose</i>	16
12	Sinkronisasi data melalui Kinovea	18
13	<i>Scaling</i> model menggunakan BoB	18
14	Ilustrasi geometris untuk menghitung jarak kerja optimal dan panjang galah alat pada kegiatan pemanenan kelapa sawit secara manual (Syuaib 2015)	20
15	<i>Free body diagram</i> (FBD) gaya eksternal pada egrek selama proses pemotongan TBS	22
16	Diagram alir prosedur analisis data	25
17	Letak kelima komponen strap ULE	26
18	Grafik hubungan sudut kerja dengan total gaya tarik lima komponen ULE	27
19	Pengukuran berat egrek	28
20	Grafik estimasi <i>muscle force</i> maksimum tanpa intervensi ULE (n = 11)	30
21	Grafik estimasi <i>muscle force</i> maksimum dengan intervensi ULE (n = 11)	31
22	Grafik perbandingan estimasi <i>muscle force</i> maksimum tanpa dan dengan intervensi ULE (n = 11)	32
23	Grafik perbandingan estimasi nilai JCF maksimum tanpa dan dengan intervensi ULE (n = 11)	33



DAFTAR LAMPIRAN

1	Karakteristik subjek dari 11 pemanen di Kebun Kelapa Sawit Cimulang	47
2	Hasil pengukuran gaya tarikan pada lima komponen strap ULE	48
3	Hasil rata-rata perhitungan sudut kerja egrek terhadap tinggi target potong dari 11 pemanen di Kebun Kelapa Sawit Cimulang	50
4	Hasil perhitungan gaya pembebanan sebagai input koding force.txt	51
5	Grafik Estimasi <i>Muscle Force</i> Maksimum tanpa Intervensi ULE pada 11 Subjek	52
6	Grafik Estimasi <i>Muscle Force</i> Maksimum dengan Intervensi ULE pada 11 Subjek	56
7	Tabel hasil uji normalitas Shapiro-Wilk	60
8	Tabel hasil uji parametrik <i>paired t-test</i>	61
9	Tabel hasil uji nonparametrik <i>Wilcoxon signed-rank</i>	62
10	Tabel hasil uji korelasi Spearman	63