

Desain Sistem Kerja dan *Upper Limb Exoskeleton* untuk Peningkatan Produktivitas dan Keselamatan Kerja Panen-Muat Kelapa Sawit

(*Work System and Upper Limb Exoskeleton Design for Improving Productivity and Safety in Oil Palm Harvesting Tasks*)

M. Faiz Syuaib¹⁾, Nugrahaning Sani Dewi²⁾, Muqorob Tajalli²⁾, Kadek Heri Sanjaya²⁾, Raizumi Fil'aini³⁾

¹⁾Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian Institut Pertanian Bogor

²⁾Pusat Riset Mekatronika Cerdas, Badan Riset dan Inovasi Nasional

³⁾Jurusan Teknik Biosistem, Institut Teknologi Sumatera

*faizs@ipb.ac.id

ABSTRAK

Tuntutan akan tingginya produktivitas kelapa sawit belum diiringi peningkatan keselamatan dan kesehatan kerja. Variabiliti karakteristik lingkungan kerja, bentuk, tinggi, dan diameter pohon sawit, posisi tandan dan pelepah sawit masih relatif menyulitkan untuk penerapan mekanisasi/ otomasi dalam pemanenan sawit. Kegiatan panen-muat sawit masih bergantung pada tenaga manusia yang memiliki keterbatasan fisiologi dan kapasitas kerja. Panen-muat sawit melibatkan gerakan berulang-ulang seperti membungkuk, mengangkat dan menarik beban yang berat, membutuhkan prioritas tinggi untuk intervensi keamanan kerja. Analisis fisiologi kerja pemanen seperti data pengukuran beban jantung, otot dan gerak sebagai landasan penting kebijakan dan perbaikan sistem kerja. Selain itu, pendekatan desain dan implementasi exoskeleton (alat bantu okupasional-keselamatan kerja) pada pemanen adalah terobosan yang rasional untuk perbaikan sistem dan keselamatan kerja yang pada akhirnya bermanfaat untuk peningkatan efektivitas, produktivitas, kesejahteraan dan keberlanjutan kerja para pemanen sawit. Sehingga tujuan penelitian ini adalah untuk merancang, mendesain dan menguji upper limb exoskeleton untuk peningkatan produktivitas dan keselamatan kerja panen-muat sawit serta melakukan analisis sosial ekonominya.

Kata Kunci : *Upper Limb Exoskeleton (ULE)*, Kesehatan dan Keselamatan Kerja, Panen-muat Kelapa Sawit, Perbaikan Sistem Kerja

ABSTRACT

The demand for high oil palm productivity has not been accompanied by improvements in occupational safety and health. The variability of the work environment, the shape, height, and diameter of oil palm trees, and the position of the bunches and fronds still relatively hamper the implementation of mechanization/automation in oil palm harvesting. Oil palm harvesting and loading activities still rely on human labor, which has limited physiology and work capacity. Oil palm harvesting and loading involve repetitive movements such as bending, lifting, and pulling heavy loads, requiring high priority for occupational safety interventions. Analysis of harvester work physiology, such as data on heart, muscle, and movement load measurements, is an important basis for policies and work system improvements. In addition, the design and implementation approach of exoskeletons (occupational safety aids) for harvester is a rational breakthrough for improving work systems and safety, which ultimately benefits the effectiveness, productivity, welfare, and sustainability of oil palm harvester. Therefore, the objectives of this study are to design, design, and test an upper limb exoskeleton to increase productivity and safety in oil palm harvesting and loading, as well as to conduct a socio-economic analysis.

Keywords: *Upper Limb Exoskeleton (ULE)*, *Occupational health and safety*, *Oil palm harvesting*, *work system improvement*.

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Aktivitas pertanian sering melibatkan gerakan/ postur yang sulit dan dilakukan berulang-ulang termasuk membungkuk, mengangkat dan menarik objek yang berat. Hal ini menimbulkan resiko kerja dan membutuhkan prioritas tinggi untuk intervensi keamanan kerjanya (Meyers et al. 2000). Tidak terkecuali di aktivitas perkebunan sawit yang masih melibatkan *high intensive labor* untuk proses panen-muat. Sedangkan peningkatan produktivitas kelapa sawit tidak bisa dipisahkan dengan proses panen-muat sawit. Keberhasilan pemanenan akan menunjang pencapaian produktivitas tanaman (Pusat Penelitian Kelapa Sawit 2007). Kegiatan pemanenan yang sebagian besar masih dilakukan dengan cara manual yang bergantung pada tenaga manusia menimbulkan resiko keselamatan dan kesehatan kerja (K3). Tahun 2018 lembaga sertifikasi *Roundtable Sustainable palm Oil* (RSPO) melakukan survei penelitian tentang pengaruh RSPO dan evaluasinya kepada para produsen kelapa sawit, processor dan trader, penggiat lingkungan dan sosial (NGO), konsumen, retailer dan investor. Hasil dari survei tersebut menyatakan bahwa kondisi saat bekerja “*working condition*” yang menyangkut kesehatan dan keselamatan kerja (K3) pekerja menjadi satu diantara tiga isu prioritas permasalahan dalam kajian penelitian yang harus dilakukan.



Gambar 1. Gerakan pemanenan kelapa sawit dengan menggunakan egrek (Syuaib et al. 2015)

Questionary survey (Syuaib 2015) yang dilakukan pada riset-riset terdahulu kepada 141 pemanen kelapa sawit di 3 perkebunan di Sumatra, Kalimantan dan Sulawesi juga mengungkap persepsi subjektif pemanen tentang bagian tubuh yang paling terdampak oleh beban dari aktivitas pemanenan kelapa sawit secara manual. Bagian tubuh yang terdampak yaitu bahu, pinggang, anggota gerak tubuh bagian atas dan bawah, leher dan punggung. Lebih spesifik, kegiatan memanen kelapa sawit dengan egrek di tinggi pohon lebih dari 3 m (Gambar 1) tergolong berbahaya, khususnya untuk bagian leher dan anggota gerak tubuh bagian atas (upper limb) pemanen (Syuaib et al. 2015). Data-data tersebut menunjukkan pentingnya penelitian lanjutan yang mendalam terkait analisis fisiologi pemanen, meliputi beban kerja jantung, otot dan gerak pemanen untuk mengurangi resiko cidera, perbaikan sistem kerja dan peningkatan performa kerja. Variabiliti karakteristik lingkungan kerja, bentuk, tinggi, dan diameter pohon sawit, posisi tandan dan pelepasan sawit masih relatif menyulitkan untuk penerapan mekanisasi/ otomasi dalam

pemanenan sawit. Sehingga tenaga manusia masih menjadi andalan sebagai pelaksana kegiatan panen-muat. Sehingga pendekatan desain dan implementasi exoskeleton (alat bantu okupasional-keselamatan kerja) pada pemanen adalah terobosan yang rasional untuk perbaikan sistem dan keselamatan kerja yang pada akhirnya bermanfaat untuk peningkatan efektivitas, produktivitas, kesejahteraan dan keberlanjutan kerja para pemanen sawit. Pengujian dan analisis sosial ekonomi dari implementasi eksoskeleton ke pemanen juga perlu dilakukan agar hasil teknologi (eksoskeleton) dapat diterima dan digunakan oleh pemanen.

1.2. Perumusan Masalah

- 1) Tuntutan tingginya produktivitas kelapa sawit belum diiringi peningkatan keselamatan dan kesehatan kerja pada proses pemanenan kelapa sawit .
- 2) Peran manusia dalam kerja pemanenan (*harvesting tasks*) kelapa sawit masih sulit untuk digantikan sepenuhnya dengan mesin ataupun sistem mekanisasi lainnya.
- 3) Kegiatan pemanenan masih mengandalkan manusia yang memiliki keterbatasan gerak bagian tubuh, struktur atau fungsi anatomi, fisiologi tubuh dan kapasitas tenaga, sehingga berimplikasi pada tingginya resiko kerja pada proses panen-muat kelapa sawit.
- 4) Masih sangat terbatasnya data dan penelitian mengenai alat bantu okupasional keselamatan dan kesehatan kerja pada proses panen-muat kelapa sawit yang berguna untuk pengambilan kebijakan/ prosedur kerja dan desain pengembangan mekanisasi panen-muat kelapa sawit untuk peningkatan K3, keberlanjutan kerja, serta produktivitas dan kesejahteraan pekerja panen (pemanen) kelapa sawit.
- 5) Belum pernah dilakukan kajian sosial ekonomi terhadap implementasi eksoskeleton di pemanenan kelapa sawit.
- 6) Maka, dirasa perlu untuk merencang, mengembangkan dan mengaplikasikan *Upper limb exoskeleton* sebagai alat bantu K3 dalam kerja dengan harapan dapat menurunkan resiko cedera kerja serta diterima secara positif oleh para permanen (pekerja panen).

1.3. Rekam Jejak Hasil Riset Terdahulu, Terobosan dan Kebaharuan

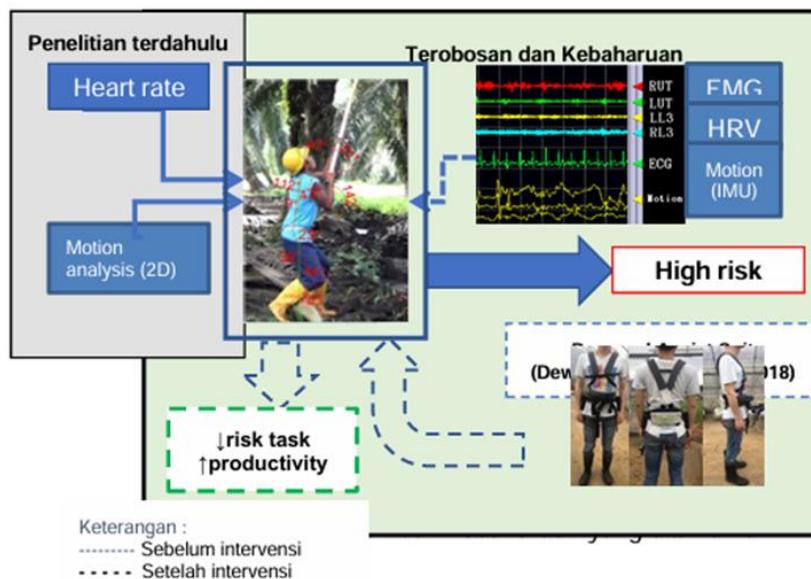
Pada tahun 2012, Prof. Dr. M. Faiz Syuaib bersama dengan tim termasuk Nugrahaning Sani Dewi, Ph.D dan Raizumi Filaini, M.Si melakukan kajian ergonomika untuk penyempurnaan sistem dan produktivitas kerja panen-muat sawit di beberapa kebun milik salah satu perusahaan perkebunan sawit di tanah air. Penelitian dilakukan di 3 kebun yang berada di Sumatra, Kalimantan dan Sulawesi. Penelitian ini berhasil mendapatkan data anthropometri 141 pemanen laki-laki yang secara acak dipilih diantara pemanen yang ada di 3 kebun. Data ini berperan penting untuk dijadikan dasar merancang sistem kerja dan mendesain alat perlengkapan agar kesesuaian produktivitas menjadi optimal. Selain itu data studi gerak dan waktu didapat dari perekaman video proses pemanenan. Data beban kerja didapat dengan perekaman denyut jantung (heart rate) dengan menggunakan heart rate monitor (HRM) pada tiap proses pemanenan kelapa sawit yang terbagi kedalam beberapa tahapan/ elemen kerja.

Dari kajian tersebut dapat didefinisikan alur dan elemen-elemen kerja yang secara distingif dapat diamati dan dianalisis. Secara umum proses pemanenan didefinisikan dalam 9 elemen kerja, yaitu yang dimulai dari kegiatan verifikasi tandan matang (Ve), lalu secara sekuensial dilanjutkan dengan menyiapkan alat panen (Pr), memotong tandan dan pelepas (Cu), mencacak dan memindahkan pelepas (Ba), membuang sisanya tandan buah (Ck), memungut berondolan (Br), memuat tandan ke angkong (Lo), perpindahan dari

satu tempat ke tempat lain (Mo), membongkar dan merapihkan tandan di Tempat Pengumpulan Hasil (TPH) (Un) (Gambar 2) (Syuaib et al. 2015). Postur tubuh pemanen di ketiga lokasi relatif ideal dan seragam dengan tinggi badan rata-rata 160 cm dan berat badan 55 kg. Studi gerak berdasarkan selang alami gerakan yang disimulasikan melalui pada data video capture menghasilkan kesimpulan elemen kerja yang paling beresiko adalah pemotongan tandan dengan menggunakan egrek (CuE). Bagian tubuh yang beresiko mengalami cidera pada elemen kerja CuE adalah leher, punggung-pinggang, bahu, lengan dan pergelangan kaki sebagai tumpuan beban. Sedangkan dengan analisis RULA, kegiatan CuE berada dalam level 4 yang merupakan postur bekerja di luar batas aman.



Gambar 2. Proses dan Elemen kerja panen-muat sawit (Syuaib et al. 2015).



Gambar 3. Terobosan dan kebaharuan yang ditawarkan

Dari pengamatan selama pengambilan data di lapang dan analisis kesesuaian yang telah dilakukan, peran manusia sebagai tenaga inti dalam tahapan pemotongan tandan (CuE) masih sulit untuk digantikan seutuhnya dengan mesin/ robot karena banyak faktor yang mempengaruhi. Seperti faktor topografi kebun yang bervariasi, belum ditemukannya alat/ artificial intelligent penentu kematangan sawit yang presisi dan aplikatif di kebun. Selain itu faktor yang sangat penting adalah bervariasinya letak tandan dan pelepah, diameter dan tinggi pohon sawit. Sebagian besar perkebunan di indonesia memiliki pohon sawit

yang berumur lebih dari 10 tahun dengan tinggi pohon lebih dari 8 m. Faktor ini yang menyebabkan desain mekanisasi dalam proses Cu mengalami banyak kendala terutama pengaruh alat/mesin terhadap pelepas dan tandan setelah pemotongan. Sedangkan pemotongan dengan posisi yang salah akan menyebabkan rusaknya pelepas yang lain yang akan bedampak pada proses pembentukan bunga sawit selanjutnya. Padahal pohon sawit yang berumur lebih dari 10 tahun memiliki produktivitas dan kualitas minyak yang tinggi. Hal tersebut yang menyebabkan peran manusia sebagai tenaga inti panen-muat tetap dipertahankan. Sehingga terobosan yang kami tawarkan adalah dengan melengkapi manusia tersebut dengan alat yang dapat melindungi bagian tubuh yang paling terdampak dalam proses panen-muat dan meningkatkan fungsi bagian tubuh tersebut agar proses panen-muat dapat ditingkatkan produktivitasnya (Gambar 3). Alat tersebut berupa exoskeleton yang dikenakan pada anggota gerak tubuh bagian atas (*upper limb*) pemanen.

Selain itu analisis gerak dan beban kerja yang dilakukan pada penelitian sebelumnya belum mencerminkan beban kerja sebenarnya dikarenakan keterbatasan data fisiologi manusia yang dikumpulkan pada saat itu. Sehingga investigasi ergonomika diperlukan lebih dalam lagi untuk mengembangkan desain sistem dan alat kerja yang dapat menghindari resiko kesehatan dan cidera kerja (Syuaib 2015). Kebaharuan teknologi pengukuran fisiologi manusia saat ini berupa elektrokardiogram (ECG) untuk mengetahui beban kerja pemanenan dan elektromiogram (EMG) untuk analisis kerja otot. Selain data gerakan pemanen juga dapat terekam dan dideskripsikan secara presisi oleh accelerometer untuk analisis gerak tingkat lanjut (Gambar 3). ECG, EMG dan *motion capture system* (MoCap) juga digunakan ditahapan pengujian. Untuk analisis penerapan teknologi akan dilakukan serangkaian usability test untuk melihat tingkat penerimaan pemanen terhadap hasil teknologi serta analisis sosial ekonominya.

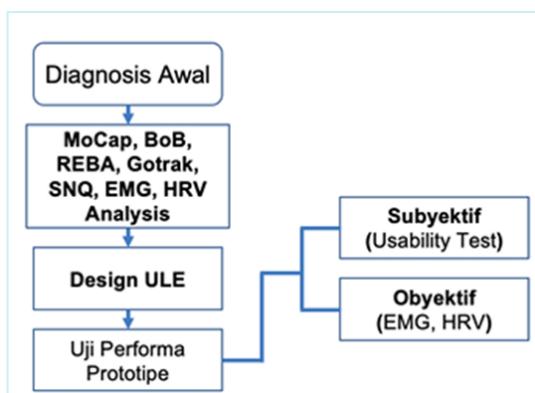
1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah : 1) Merancang dan membuat sistem kerja panen-muat sesuai dengan kesehatan dan keselamatan kerja (K3); 2) Mendesain *upper limb exoskeleton* (ULE) untuk peningkatan produktivitas dan keselamatan kerja panen-muat sawit; 3) Melakukan pengujian *upper limb exoskeleton* dari segi usabilitas dan analisis ekonominya.

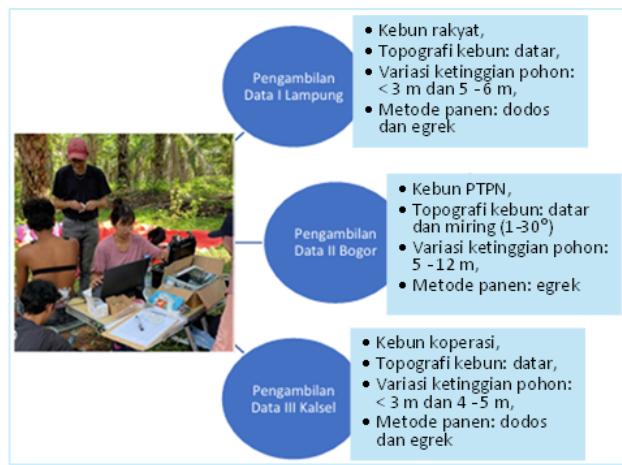
2. Metodologi Penelitian

Langkah pertama dalam penelitian ini adalah melakukan diagnosis awal antara lain dengan analisis gerak presisi dengan menggunakan *Motion Capture System* (MoCap), analisis dan simulasi biomekanik dengan menggunakan *Biomechanic of Bodies* (BoB), analisis resiko kerja dengan REBA (Rapid Body Assessment) yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya, pengukuran gangguan otot rangka (Gotrak) dan *Standardized Nordic Questionnaire* (SNQ). Diagnosis awal ini juga didukung dengan pengukuran beban otot dengan menggunakan *surface electromyography* (sEMG) dan analisis denyut jantung (Heart Rate, HR). Hasil dari diagnosis awal digunakan sebagai dasar pengembangan design ULE. Desain ini menjadi dasar pembuatan prototipe yang akan kita uji performanya kepada pemanen sawit langsung di tempat kerja sebenarnya yaitu di perkebunan sawit. Uji performa sawit terdiri dari pengujian subyektif dan obyektif. Pengujian subyektif terdiri dari rangkaian prosedur usability test sedangkan pengujian obyektif menggunakan instrumen EMG dan heart rate monitor (HRM).

Hasil dari diagnosis awal digunakan sebagai dasar pengembangan design ULE. Desain ini menjadi dasar pembuatan prototipe yang akan kita uji performanya kepada pemanen sawit langsung di tempat kerja sebenarnya yaitu di perkebunan sawit. Uji performa sawit terdiri dari pengujian subyektif dan obyektif. Pengujian subyektif terdiri dari rangkaian prosedur usability test sedangkan pengujian obyektif menggunakan instrumen sEMG dan heart rate monitor untuk analisis beban kerja.



Gambar 4. Alur Penelitian



Gambar 5. Sebaran Lokasi Pengambilan Data

2.1. Prosedur Pengujian dan Pengambilan Data

Pengambilan data untuk pemetaan resiko kerja sebagai tahapan awal pembuatan ULE dilakukan di 3 kebun di 3 lokasi, yaitu Lampung, Bogor dan Kalimantan Selatan, dengan kondisi umum kebun dan pohon sawit sebagaimana tersaji pada Gambar 5. Sedangkan alur/prosedur pengambilan data untuk pengujian efektivitas dan acceptabiliti penggunaan ULE disajikan pada Gambar 6.

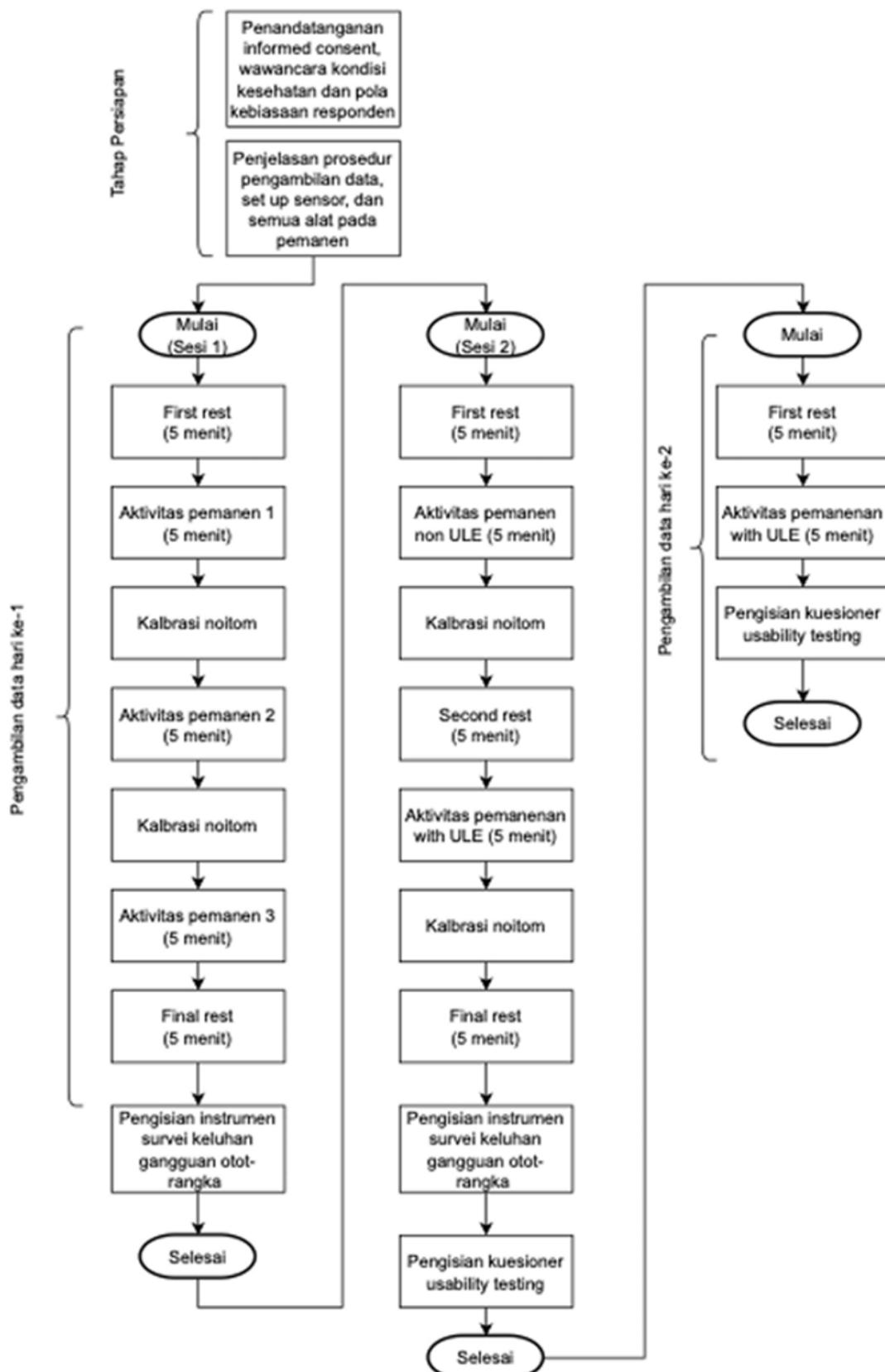
2.2. Subyek Pengujian (Pemanen)

Tabel 1 menyajikan karakteristik subyek di masing-masing lokasi pengambilan data. Data tersebut menunjukkan data karakteristik pemanen, termasuk didalamnya merupakan baseline parameter fisiologis, umur, tinggi dan berat badan serta Body Mass Index (BMI). Dari data BMI pemanen, semua subyek pemanen tergolong dalam BMI normal (WHO 2004). Pemanen berjumlah 4 orang di Lampung, 17 orang di Bogor dan 17 orang di Kalsel, berjenis kelamin laki-laki. Pengalaman kerja sebagai pemanen rata-rata 4 ± 2 tahun, 16 ± 4 tahun 10 ± 2 tahun berturut-turut untuk Lampung, Bogor dan Kalsel. Para subyek memiliki tidur yang cukup sesuai dengan usia mereka (P2PTM Kemenkes RI) dengan rata-rata $7,7 \pm 0,9$ jam/ hari dengan intensitas bekerja sebagai pemanen rata-rata $7 \pm 0,9$ jam/hari. Pemanen juga memiliki kebiasaan melakukan physical activity setelah bekerja, 1-2 kali seminggu seperti olahraga sepak bola (20%), badminton (20%), futsal (10%) dan mencari rumput (20%). Sedangkan 30% subyek lain tidak mempunyai kegiatan fisik lain selain bekerja sebagai pemanen. Semua subyek adalah perokok dengan intensitas konsumsi rokok adalah 1-2 bungkus rokok/hari, namun dari hasil wawancara, tidak ada riwayat penyakit jantung maupun pernafasan yang diderita subyek.

Tabel 1 Karakteristik subyek Lampung

Variabel	Lampung (n = 4)		Bogor (n = 17)		Kalsel	
	Rata-Rata	SD	Rata-Rata	SD	Rata-Rata	SD
Usia (tahun)	31	7,0	44	8,6	42	9,0
Tinggi badan (cm)	164	7,0	164	5,8	162	7,0
Berat badan (kg)	63	12,0	54	5,9	58	7,0
Body Mass Index (BMI: kg/m ²)	23	1,0	20	1,7	22	3,0
Age-adjusted HR max (bpm/min)	189	7,0	176	8,6	178	9,0
Pengalaman Kerja (tahun)	4	2,0	16	4,0	10	8,0
Rata-rata waktu kerja/hari (jam)	8	0,0	7	0,9	7	1,0

*Body mass index (BMI) = berat (kg)/[tinggi(m)]²; **age-adjusted maximum heart rate (HR max) = 220 - age (years)



Gambar 6. Prosedur Pengambilan Data

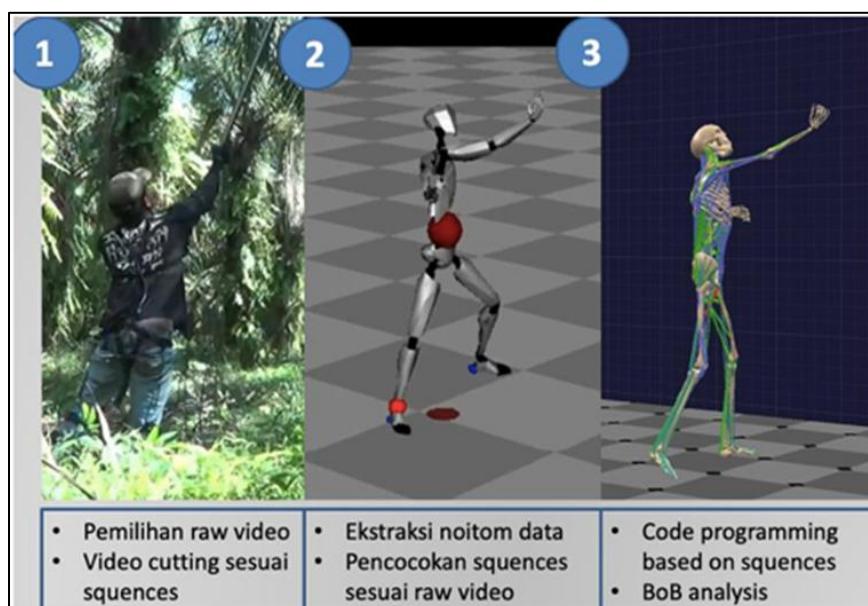
2.3. Motion Capture System (MoCap) dan Biomechanic of Bodies (BoB)

Motion capture System (MoCap) dengan menggunakan Noitom digunakan untuk merekam pergerakan tubuh pemanen secara presisi berdasarkan *perception neuron* (Noitom.Ltd, USA). Alat ini terdiri dari sensor-sensor yang dipasangkan pada joint-joint tubuh pemanen di selang anggota gerak atas seperti di kepala, bahu, siku, pergelangan tangan dan selang anggota gerak bawah seperti di pinggang, lutut, dan pergelangan kaki (Gambar 7). Nantinya hasil data dari noitom akan dianalisis biomekaniknya dan disimulasikan dengan menggunakan *Biomechanic of Bodies (BoB)* software.

Motion analysis dimulai dari pemilihan motion data dari raw video untuk dipotong per sequence gerakan. Selanjutnya data gerak presisi dari noitom diekstrak sesuai dengan sequence data raw video. Selanjutnya data *input sequences* dari *noitom* diekspor ke BoB (*BoB Biomechanics, UK*). BoB adalah paket analisis biomekanik yang dapat menangkap data gerakan (*motion capture*) dan menghitung distribusi beban otot (Shippen and May 2016). Tahapan pengoahan data dari data gerak ke BoB digambarkan pada Gambar 8.



Gambar 7. Pemasangan Noitom dan heart rate monitor



Gambar 8. Tahapan pengolahan data gerak (motion analysis) dan biomekanik

2.4. Pengukuran Prevalensi Gotrak dan *Usability Test*

Salah satu yang mendasari perlunya pengembangan ULE adalah adanya risiko gangguan otot-rangka pada pemanen kelapa sawit. Metode yang digunakan adalah Instrumen Survei Gangguan Otot-rangka SNI 9011:2021 dan Standardized Nordic Questionnaire (Kuorinka et al., 1987). Pengumpulan data dilakukan sebelum pemanen bekerja menggunakan ULE. Pengukuran usability test menggunakan beberapa instrumen kuesioner, diantaranya adalah USE Questionnaire: Usefulness, Satisfaction, and Ease of use (Lund, 2001), System Usability Scale (SUS) (Brooke, 1986), Center of Occupational and Environmental Health (COEH) (2021), dan instrumen usability testing yang dikembangkan oleh Scwerha et al. (2021).

2.5. Pengujian dan Analisis Denyut Jantung (*HR analysis*)

Heart rate monitor dipasang pada bagian sternum (Gambar 9) untuk merekam aktivitas listrik otot jantung sebagai pengukuran metabolik tidak langsung dan interpretasi heart rate variability (HRV) atau yang biasa disebut variabilitas denyut jantung (Berntson et al. 1997). Nilai HRV yang rendah berkaitan erat dengan stressor fisik dan psikis serta berbagai masalah kesehatan sedangkan HRV yang tinggi berhubungan erat dengan kapasitas kognitif lebih baik, resiliensi psikologis, dan kemampuan adaptasi lebih baik terhadap stress secara afektif, kognitif, dan fisiologis (Hansen et al. 2004; Shaffer, McCraty dan Zerr 2014; Beauchaine dan Thayer 2015). Dalam penelitian ini, analisis beban fisik aktivitas petani sawit baik saat menggunakan alat bantu exoskeleton maupun tidak, akan ditinjau dari denyut jantung (heart rate) dan beberapa parameter HRV time-domain (mean RR, SDNN, dan RMSSD) dan frequency-domain (LF, HF, dan rasio LF/HF).

2.6. Pengujian dengan sEMG

Surface electromyography (sEMG) yang dipasang pada pemanen adalah Trigno lite system (Delsys Incorporated, USA). Trigno lite system menyajikan data performance berkualitas tinggi yang merupakan gabungan EMG dan data gerakan. Sistem ini dapat memonitor dan merekam data otot secara wireless, sehingga pemanen dapat melakukan kegiatan pemanenan secara alami serta dalam kondisi nyaman untuk pengambilan data tanpa terganggu dengan kabel sensor konektor. Metode Root Means Square (RMS) digunakan untuk menentukan aktivasi otot (on) atau deaktivasi (off) (Soderberg and Knutson 2000) , dan juga telah dilakukan banyak penelitian sebelumnya (Dewi and Komatsuzaki 2018; Lotz et al. 2009; Godwin et al. 2009). RMS amplitude dihitung dengan menggunakan software Trigno Discover (Delsys Ltd. USA). RMS digunakan untuk menganalisis amplitude berdasarkan time-domain. Perubahan aktivitas otot selama aktivitas panen-muat direkam dan dihitung dengan RMS amplitude dari sinyal EMG.

3. Hasil dan Diskusi

Penelitian ini terdiri dari 3 (dua) bagian penting, yaitu: 1) identifikasi dan pemetaan resiko kerja; 2) perancangan prototipe *Upper Limb Exoskeleton* (ULE); dan 3) pengujian dan evaluasi peforma prototipe ULE hasil rancangan (Gambar 9).

3.1. Rancangan *Upper Limb Exoskeleton* (ULE) Generasi 1

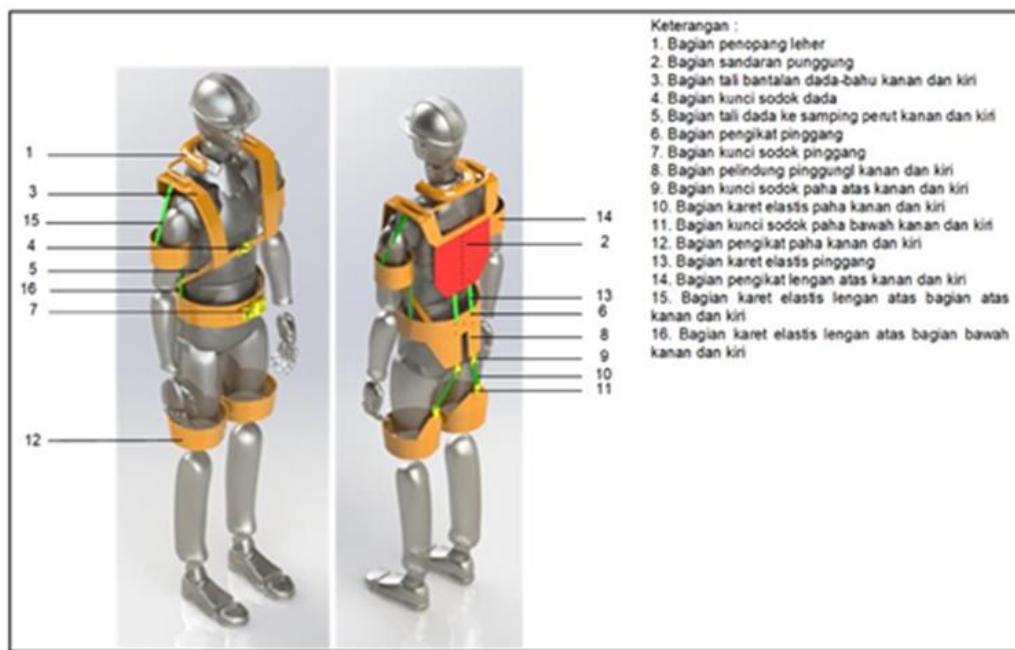
Perancangan atau desain ULE prototipe 1 (generasi 1) ini digunakan oleh pemanen kelapa sawit dengan fokus intervensi pada tubuh bagian atas (leher, lengan atas, punggung, pinggang dan paha). Prototipe 1 ini tanpa motor penggerak, tanpa baterai (passive exoskeleton) yang ringan dan mudah digunakan untuk peningkatan produktivitas dan keselamatan kerja panen sampai muat kelapa sawit.

Tabel 2 Uraian fungsi dan komponen ULE

No.	Fungsi	Komponen
1.	Mengikat, merekatkan alat bantu dengan anggota tubuh pemanen	1. Pengikat pinggang 2. Pengikat lengan atas 3. Pengikat paha
2.	Menopang dan melindungi anggota tubuh pemanen	1. Penopang leher 2. Sandaran punggung
3.	Memberikan energi tambahan dan penyebaran gaya beban kerja pemanen	1. Karet elastis lengan atas 2. Karet elastis pinggang 3. Karet elastis paha
4.	Menghubungkan bagian -bagian eksoskeleton	1. Tali bantalan dada-bahu 2. Tali dada ke samping perut
4.	Mengunci alat bantu	1. Kunci sodok dada 2. Kunci sodok pinggang



Gambar 9. Prototipe ULE dan Pengujiannya



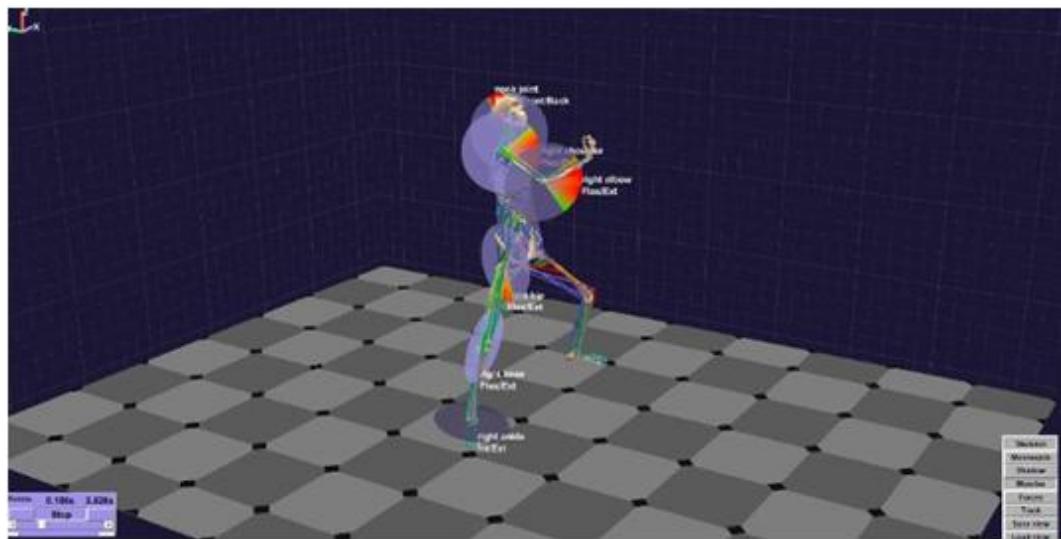
Gambar 10. Desain struktural ULE (Prototipe 1)

Fungsi utama dari ULE adalah membantu pemanen kelapa sawit dalam memberikan energi tambahan dan menyebar gaya yang diakibatkan oleh beban kerja saat panen dan muat kelapa sawit. Fungsi dan komponen ULE serta Desain struktural dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 10. Pembuatan prototipe ULE telah berhasil dilakukan sesuai dengan kriteria desain, desain fungsional dan desain struktural. Untuk itu diperlukan tahapan pengujian kepada pemanen kelapa sawit. Tujuan pengujian prototipe ULE gen 1 adalah agar diketahui kelebihan dan kekurangan desain prototipe sehingga desain bisa dikembangkan. Tujuan akhir ULE dapat layak dan diterima oleh pemanen kelapa sawit.

Pada penelitian-penelitian lain sebelumnya, ada beberapa jenis eksoskeleton yang digunakan pada industri perakitan otomotif (Iranzo et al. 2020; Spada et al. 2017) dan kegiatan kebersihan (Pacifico et al. 2023) namun belum bisa diterapkan pada kegiatan panen sampai muat kelapa sawit. Penelitian tentang eksoskeleton yang digunakan untuk panen kelapa sawit memiliki kekurangan tidak ada penyangga pada leher (Harith et al. 2021).

3.2. Motion Capture System (MoCap) dan Biomechanic of Bodies (BoB)

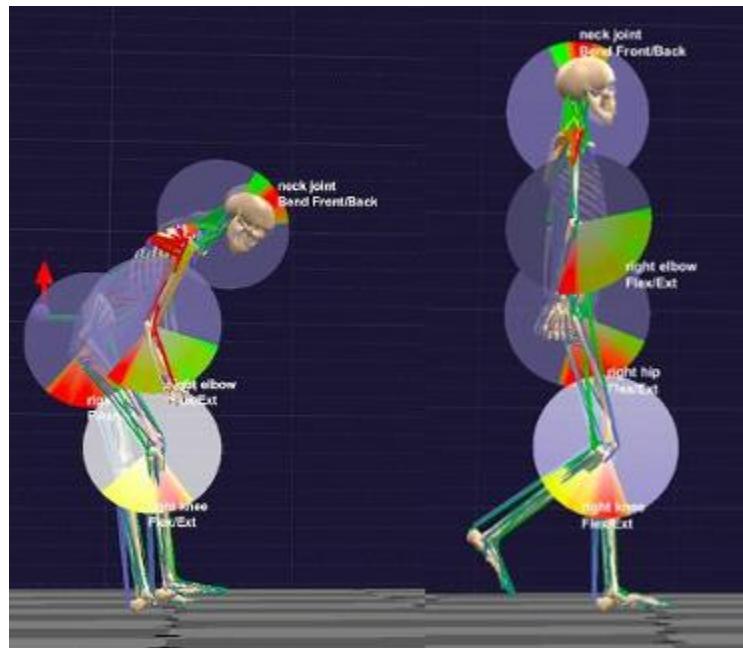
Gerakan berulang (repetitive) dan batas sudut aman gerakan BoB digunakan untuk mendeteksi limit angle (batas sudut aman gerakan) yang diperbolehkan berdasarkan metode RULA (McAtamney and Corlett 1993) yang dikembangkan (generate) pada coding sequence yang telah ditentukan sebelumnya. RULA merupakan metode yang sering digunakan untuk menghasilkan asesmen beban musculoskeletal pada postur leher, bagian tubuh secara keseluruhan (trunk), bagian anggota gerak atas, fungsi otot dan beban luar yang dialami (McAtamney and Corlett 1993). Berdasarkan Gambar 11 didapatkan hasil bahwa pada cutting (Cu) sequence terjadi gerakan repetitive yang digambarkan dengan range warna merah serta mengindikasikan sudut gerak tidak aman yang terbentuk diantara gerakan pemotongan kelapa sawit di bahu, lengan dan leher pemanen. Gerakan tersebut umumnya adalah neck extension, shoulder flexion dan arm flexion. Sedangkan gerakan lower limb berada pada range yang tergolong aman.



Gambar 11 Analisis BoB untuk gerakan berulang (repetitive) dan batas sudut aman gerakan pada sekuen kerja cutting (Cu)

Pada aktivitas muat dari menancapkan tajuk ke TBS, mengangkat TBS secara manual ke angkong dan mendorong angkong ke TPS, gerakan repetitive dan sudut aman gerakan ditunjukkan pada Gambar 12. Gambar tersebut menunjukkan pemanen memuat tandan ke angkong (Lo), perpindahan dari satu tempat ke tempat lain (Mo). Pada gerakan saat mengangkat angkong untuk memulai Mo, terdapat sudut tidak

aman pada pinggang, lutut dan leher. Namun gerakan tersebut tergolong gerakan sesaat yang pembebanannya relatif dalam waktu singkat (1-2 detik) dibandingkan gerakan repetitive saat mendorong angkong. Dimana pada gerakan mendorong angkong sambil berjalan, terdapat gerakan repetitive pada paha dan lutut.



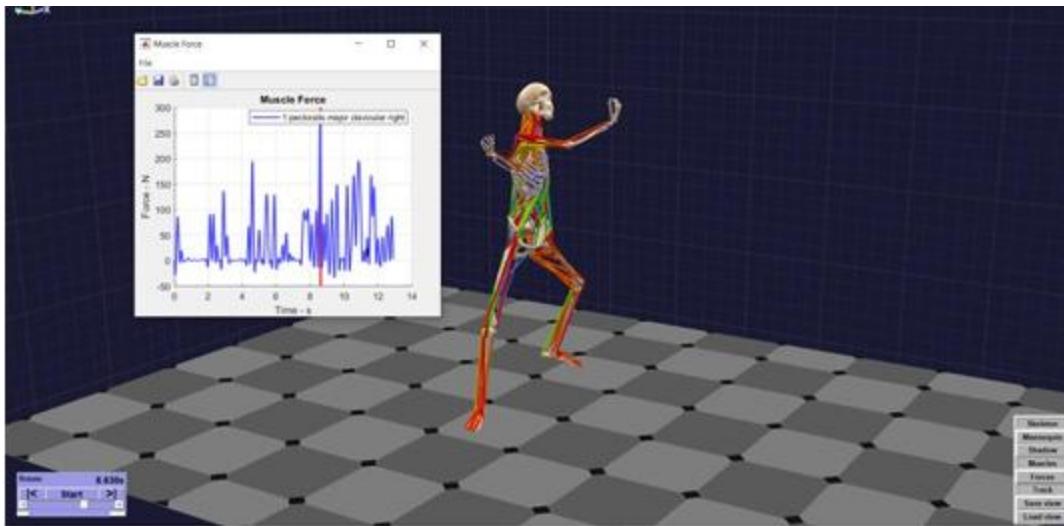
Gambar 12 Analisis BoB untuk gerakan berulang (*repetitive*) dan batas sudut aman pada sekuen Muat (*Loading*: Lo) dan Angkut (*Moving*: Mo)

3.3. Muscle force

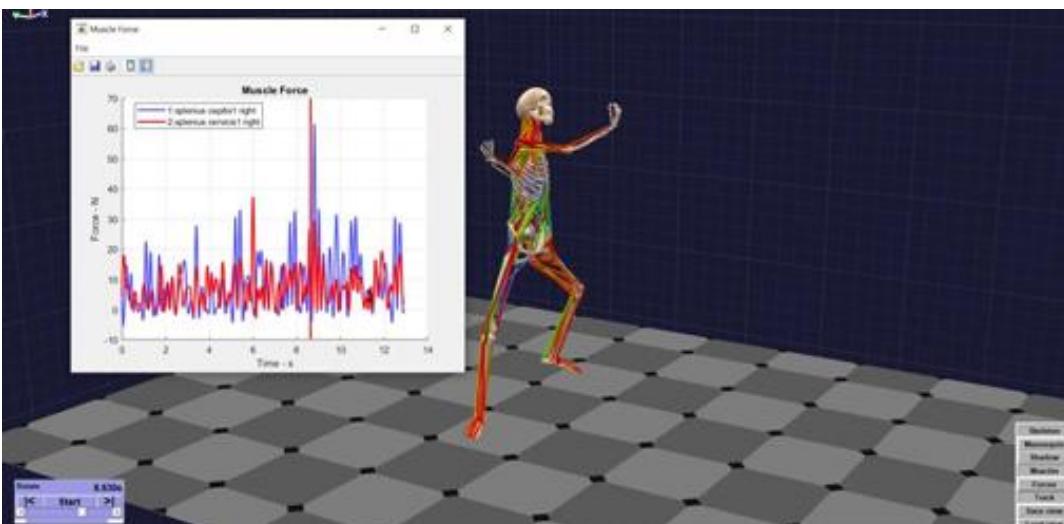
Muscle force adalah besaran yang dibutuhkan otot skeletal untuk merespon stimuli neuron, mengkonversi energi metabolismik menjadi gaya aktif yang menarik tulang-tulang melalui serabut-serabut otot (Tsianos and Loeb 2014). Perhitungan muscle force dilakukan dengan menggunakan BoB dengan melakukan simulasi. Coding yang kita kembangkan dijadikan sebagai input external force untuk men generate data biomekanik yang menghasilkan besaran *muscle force* seperti yang terlihat pada Gambar 13. Dari hasil tersebut terlihat *muscle force* pada otot pectoralis major yang merupakan otot utama penggerak bahu (*shoulder*). *Muscle force* tersebut mencapai puncaknya pada gerakan menarik di detik ke-9. Sedangkan otot lainnya seperti otot penggerak leher *splenius cervicis* dan *splenius capitis* (Gambar 14) besaran muscle force nya tidak sebesar seperti pada bahu. Selain pada otot bahu dan leher, dilakukan pula analisis BoB *muscle force* pada otot penggerak lengan yaitu otot biceps (Gambar 15) yang rentang nilainya masih dibawah otot bahu.

3.4. Prevalensi Keluhan Gangguan Otot-rangka (Gotrak)

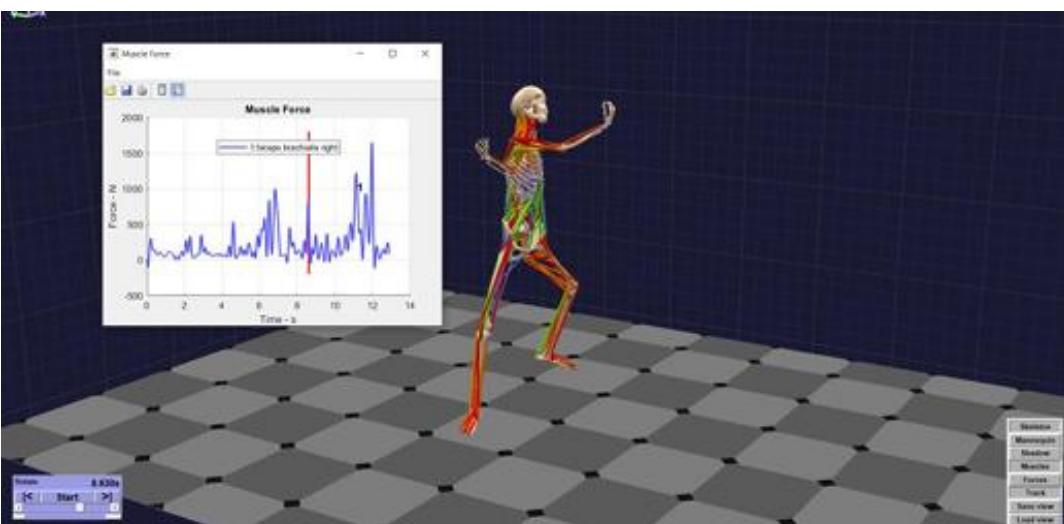
Pada Gambar 16 dapat dilihat hasil pengukuran prevalensi keluhan gangguan otot-rangka selama 12 bulan terakhir. Keluhan yang paling banyak dirasakan oleh pemanen kelapa sawit adalah pada punggung bawah (80%) yang diikuti dengan leher (60%), bahu kanan (40%), lengan kiri (40%), betis kanan (40%), betis kiri (40%), bahu kiri (33%), punggung atas (33%), lengan kanan (33%), siku kiri (27%), tangan kiri (27%), pinggul kanan (27%), pinggul kiri (27%), paha kiri (27%), lutut kanan (27%), tangan kanan (20%), paha kanan (20%), siku kanan (13%), lutut kiri (13%), kaki kanan (7%), dan kaki kiri (7%).



Gambar 13 Muscle force pada bahu pemanen



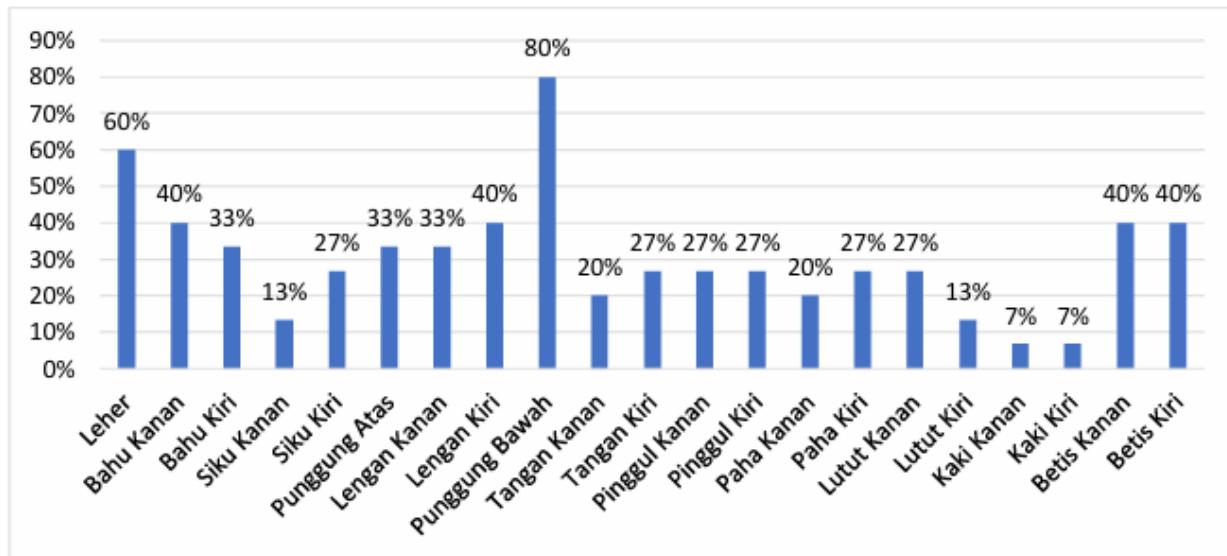
Gambar 14 Muscle force pada leher pemanen



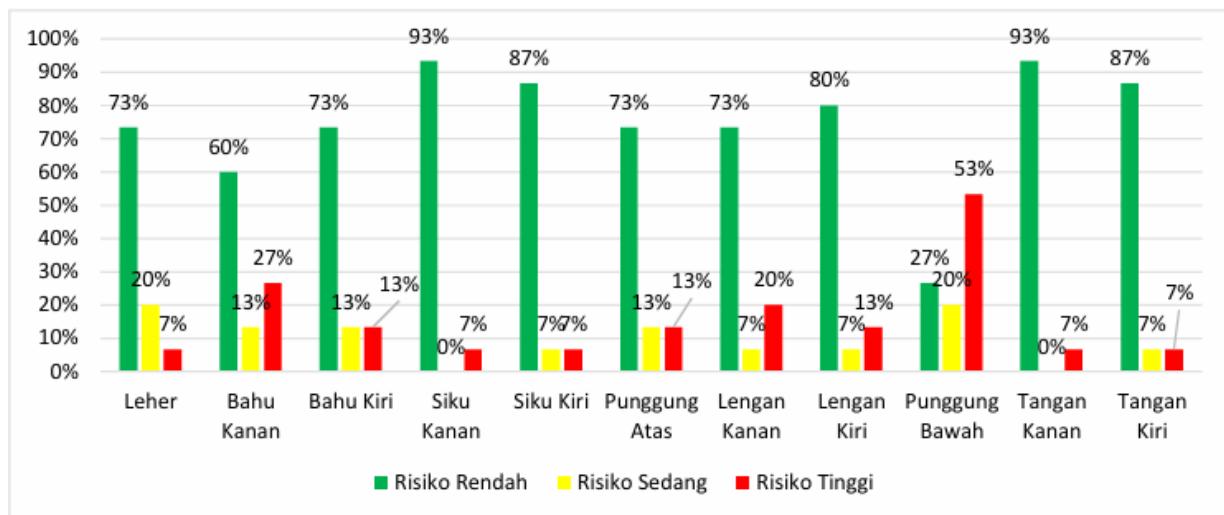
Gambar 15 Muscle force pada lengan pemanen

Dari prevalensi keluhan gangguan otot-rangka pada beberapa anggota tubuh, selanjutnya adalah pemetaan tingkat risiko berdasarkan SNI 9011:2021 Ergonomi yang memperhitungkan kategori intensitas dan tingkat keparahan. Pada Gambar 17 dapat dilihat hasil pemetaan risiko keluhan gangguan otot-rangka. tingkat risiko yang paling tinggi untuk tubuh bagian atas ada pada punggung bawah sebesar 53%. Risiko tinggi yang kedua adalah bahu kanan sebesar 27%. Hal ini menjadi salah satu poin pertimbangan dalam merancang intervensi bagi pemanen kelapa sawit ke depannya.

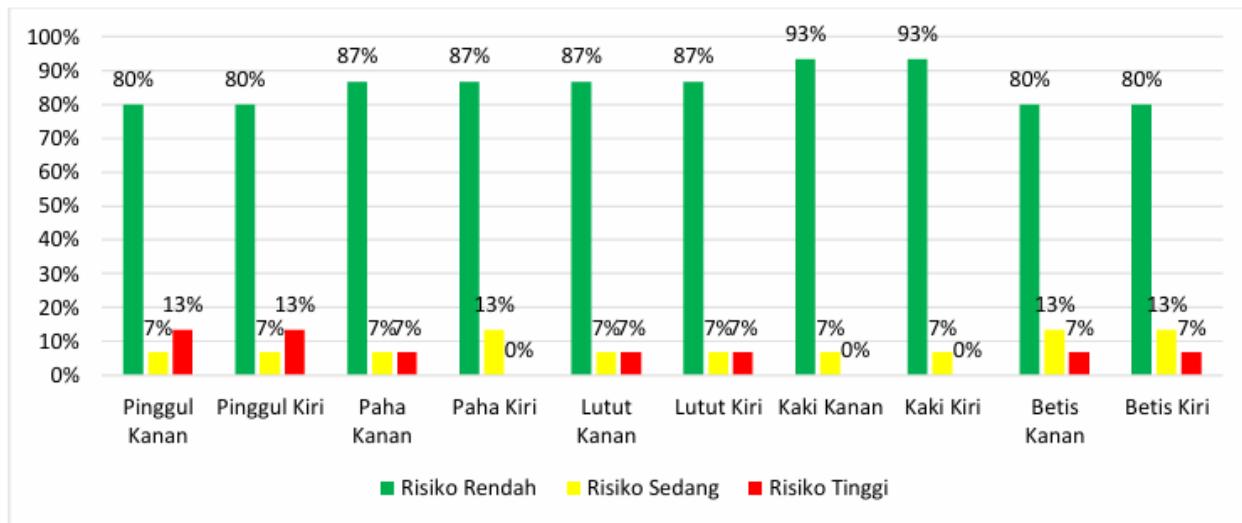
Di sisi lain, pada Gambar 18 dapat dilihat hasil pemetaan risiko keluhan gangguan otot-rangka. tingkat risiko yang paling tinggi untuk tubuh bagian bawah ada pada pinggul kanan dan pinggul kiri sebesar 13%. Risiko tinggi yang kedua adalah paha kanan, lutut kanan, lutut kiri, betis kanan, dan betis kiri sebesar 7%.



Gambar 16 Prevalensi Keluhan Gangguan Otot-rangka selama 12 Bulan Terakhir



Gambar 17 Pemetaan Risiko Keluhan Gangguan Otot-rangka pada Tubuh Bagian Atas



Gambar 18 Pemetaan Risiko Keluhan Gangguan Otot-rangka pada Tubuh Bagian Bawah

3.5. Hasil Pengukuran Usability dengan Kuesioner USE

Dilihat hasil rekapitulasi jawaban kuesioner USE untuk mengukur tingkat usability penggunaan eksoskeleton oleh pemanen, bahwa tingkat *usability* penggunaan eksoskeleton adalah sebesar 83%. Presentase ini masuk ke dalam kategori "Sangat Layak". Hal ini menunjukkan respon yang positif terkait persepsi penggunaan eksoskeleton dari pemanen kelapa sawit.

Hasil Pengukuran Usability dengan Kuesioner SUS menunjukkan 78,53. Nilai ini masuk ke dalam tingkat usability yang dapat diterima atau "Acceptable" dengan rating "Excellent". Oleh karena itu, berdasarkan pengukuran *usability* menggunakan kuesioner menunjukkan bahwa prototipe ULE gen 1 dapat diterima oleh pemanen kelapa sawit dengan rating tingkat usability yang sangat baik.

3.6. Hubungan Persepsi Pemanen dengan Tingkat Kesiapan Menggunakan ULE (Kuesioner COEH)

Untuk mengetahui persepsi dari pemanen yang berkontribusi dalam kesiapan pemanen menggunakan eksoskeleton, dilakukan pengukuran dengan kuesioner yang dikembangkan oleh COEH. Persepsi yang diukur adalah persepsi terkait manfaat, hambatan yang dirasakan, serta persepsi terkait manfaat menggunakan ULE. Hasil analisis menunjukkan bahwa hubungan antara persepsi pemanen terkait manfaat dengan kesiapan menggunakan eksoskeleton yang signifikan dan nilai korelasi yang cukup kuat ($r=0,445$; $p<0,05$). Terlihat hubungan yang berbanding lurus dengan tren kenaikan positif. Hal ini menunjukkan bahwa semakin baik persepsi pemanen terkait manfaat penggunaan eksoskeleton, maka semakin besar tingkat kesiapan pemanen menggunakan eksoskeleton.

Di sisi lain, apabila dilihat hasil uji hubungan antara hambatan yang dirasakan dengan kesiapan menggunakan eksoskeleton, hasil pengolahan data menunjukkan hubungan yang tidak signifikan, tetapi masih terlihat adanya hubungan yang logis ($r=-0,268$; $p>0,05$). Terlihat plot data menunjukkan adanya tren penurunan atau hubungan yang berbanding terbalik. Semakin besar hambatan yang dirasakan oleh pemanen, maka semakin kecil kesiapan pemanen untuk menggunakan eksoskeleton. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang serupa yang menguji eksoskeleton pada pekerja konstruksi.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1. Kesimpulan

- 1) Pada diagnosis resiko awal dengan menggunakan *motion analysis* dan simulasi *BoB* terdapat gerakan yang menjadi perhatian yaitu pada segmen *upper limb* antara lain akibat *neck extension*, *shoulder flexion* dan *arm flexion*. Simulasi *muscle force* yang tertinggi ada di otot bahu dan lengan.
- 2) Pada diagnosis awal dengan metode subyektif Gotrak dan SNQ menyatakan Risiko keluhan GOTRAK yang tinggi terdapat pada punggung bawah (53%), bahu kanan (27%), dan lengan kanan (20%).
- 3) Berdasarkan kuisioner USE, tingkat *usability* penggunaan eksoskeleton adalah sebesar 83%. Presentase ini masuk ke dalam kategori "Sangat Layak". Hal ini menunjukkan respon yang positif terkait persepsi penggunaan eksoskeleton dari pemanen kelapa sawit.
- 4) Rata-rata hasil pengolahan data SUS menunjukkan nilai 78,53. Nilai ini masuk ke dalam tingkat *usability* yang dapat diterima atau "Acceptable" dengan rating "Excellent". Oleh karena itu, berdasarkan pengukuran *usability* menggunakan kuesioner menunjukkan bahwa prototipe ULE gen 1 dapat diterima oleh pemanen kelapa sawit dengan rating tingkat *usability* yang sangat baik.
- 5) Berdasarkan Kuisioner COEH, hubungan antara persepsi pemanen terkait manfaat dengan kesiapan menggunakan eksoskeleton yang signifikan dan nilai korelasi yang cukup kuat ($r=0,445$; $p<0,05$). Semakin baik persepsi pemanen terkait manfaat penggunaan ULE, maka semakin besar tingkat kesiapan pemanen menggunakan ULE. Semakin besar hambatan yang dirasakan oleh pemanen, maka semakin kecil kesiapan pemanen untuk menggunakan ULE.
- 7) Dari pengujian obyektif, aktivasi otot mengalami penurunan pada otot *deltoid* dan *trapezium* pada sekuen *cutting* di tengah dan akhir pada aplikasi ketinggian pohon 5-12 m dengan menggunakan egrek.
- 9) Secara umum penggunaan ULE terbukti berhasil menurunkan aktivasi otot ketika menggunakan egrek yang banyak didominasi gerakan lengan di atas bahu (*over-shoulder work*) maupun di level bahu (*shoulder-level work*), terutama ketika memanen pohon sawit > 3 m, namun penggunaan ULE meningkatkan aktivitas otot ketika memakai dodos untuk memanen pohon dengan ketinggian rendah < 3 m.

3.2 Saran

1. Penelitian ini masih menunjukkan potensi pengembangan ULE sampai pada kondisi paling ideal dan sampai pada penerimaan dan penggunaan yang maksimal pada pemanen. Sehingga dibutuhkan penelitian lanjutan agar ULE dapat adaptif diaplikasikan pada semua perbedaan variabel yang ada di lapangan.

Daftar Pustaka

Baltrusch, S.J., van Dieën, J.H., van Bennekom, C.A.M., Houdijk, H., 2018. The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Appl. Ergon.* 72, 94–106. Bogue, R., 2018. Exoskeletons – a review of industrial applications. *Ind. Robot: Int. J.* 45 (5), 585–590. <https://doi.org/10.1108/IR-05-2018-0109>.

Dewi, N. S., Syuaib, M. F., & Saulia, L. 2015. Desain Model Diagnostik Resiko Ergonomi pada Kelapa Sawit Secara Manual. *Jurnal Keteknikan Pertanian*, 3(1)

- Dewi, N. S., Komatsuzaki, M., Yamakawa, Y., Takahashi, H., Shibanuma, S., Yasue, T., & Sasaki, S. 2017. Community gardens as health promoters: effects on mental and physical stress levels in adults with and without mental disabilities. *Sustainability*, 9(1), 63.
- Dewi, N.S and Komatsuzaki M. 2018. On-Body Personal Assist Suit for Commercial Farming: Effect on Heart rate, EMG, Trunk Movements and User Acceptance during Digging. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2018., 68, 290 296.
- Dewi, N. S., Komatsuzaki, M., Yamakawa, Y., Takahashi, H., Shibanuma, S., Yasue, T., & Sasaki, S . 2018. Trunk Movement Quantification in Adults with and without Mental Disability during Gardening Tasks Using a Wireless Tri-Axial Accelerometer. *Journal of Japanese Farm Work Research*, 53 (4): 164-172.
- Harris, A.D., McGregor, J.C., Perencevich, E.N., Furuno, J.P., Zhu, J., Peterson, D.E., Finkelstein, J., 2006. The use and interpretation of quasi experimental studies in medical informatics. *J. Am. Med. Inf. Assoc.* 13, 16 –23
- Kuorinka, I., Jonsson, B., Kilbom, A., Vinterberg, H., Biering-Sørensen, F., Andersson, G., Jørgensen, K., 1987. Standardised Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms. *Appl. Ergon.* 18 (3), 233 –237.
- Meyers, J.M., Fauchet, J., Tejeda, D.G., Kabashima, J., Miles, J.A., Janowitz, I., Duraj, V., Smith, R. and Weber, E. 2000. High risk tasks for musculoskeletal disorders in agricultural In Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting (Vol. 44, No. 22, pp. 616-619). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Omoniyi, A., Trask, C., Milosavljevic, S., & Thamsuwan, O. 2020. Farmers' perceptions of exoskeleton use on farms: Finding the right tool for the work (er). *International Journal of Industrial Ergonomics*, 80, 103036.
- Putranti, K. A., Herodian, S., & Syuaib, M. F. 2012. Studi waktu (time study) pada aktivitas pemanenan kelapa sawit di Perkebunan Sari Lembah Subur, Riau. *Jurnal Keteknikan Pertanian*, 26(2).
- Rosales Luengas, Y., López-Gutiérrez, R., Salazar, S., & Lozano, R. (2018). Robust controls for upper limb exoskeleton, real-time results. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 232(7), 797-806. RSPO. 2018. Research survey results: RSPO impacts and evaluation. <https://www.rspo.org/impacts/research-and-evidence>
- Syuaib, M. F. 2015. Ergonomic study on the manual harvesting tasks of oil-palm plantation in Indonesia based on anthropometric, postures and work motions analyses. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 17(3).
- Syuaib, M. F., Dewi, N. S., & Sari, T. N. 2015. Studi Gerak Kerja Pemanenan Kelapa Sawit Secara Manual. *Jurnal Keteknikan Pertanian*, 3(1).
- Upasani, S., Franco, R., Niewolny, K., & Srinivasan, D. (2019). The potential for exoskeletons to improve health and safety in agriculture—Perspectives from service providers. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 222-229.
- P2PTM Kemenkes RI. Kebutuhan tidur sesuai usia. <https://p2ptm.kemkes.go.id/infographic-p2ptm/obesitas/kebutuhan-tidur-sesuai-usia>
- McAtamney, L.; Corlett, E.N. RULA: A survey method for the investigation of work related upper limb disorders. *Appl. Ergon.* 1993, 24, 91–99.

- Tsianos, G. A., & Loeb, G. E. (2014). Physiology and Computational Principles of Muscle Force Generation.
- Kadir, B. A., & Broberg, O. (2021). Human-centered design of work systems in the transition to industry 4.0. *Applied Ergonomics*, 92, 103334.
- PTPN 1. (2018) Standar panen kelapa sawit. <https://ptpn1.co.id/artikel/standar-panen-kelapa-sawit>
- Iranzo, S., Piedrabuena, A., Iordanov, D., Martinez-Iranzo, U., & Belda-Lois, J. M. (2020). Ergonomics assessment of passive upper-limb exoskeletons in an automotive assembly plant. *Applied Ergonomics*, 87, 103120.
- Spada, S., Ghibaudo, L., Gilotta, S., Gastaldi, L., & Cavatorta, M. P. (2017). Investigation into the applicability of a passive upper-limb exoskeleton in automotive industry. *Procedia Manufacturing*, 11, 1255-1262.
- Pacifico, I., Aprigliano, F., Parri, A., Cannillo, G., Melandri, I., Sabatini, A. M., ... & Crea, S. (2023). Evaluation of a spring-loaded upper-limb exoskeleton in cleaning activities. *Applied Ergonomics*, 106, 103877.
- Harith, H. H., Mohd, M. F., & Sowat, S. N. (2021). A preliminary investigation on upper limb exoskeleton assistance for simulated agricultural tasks. *Applied Ergonomics*, 95, 103455.