



Digital Human Modeling sebagai Evaluasi dan Perancangan Meja Kerja Pengelasan untuk Pembelajaran Praktikum Mahasiswa

Eko Wahyu Abryandoko*, Ardana Putri Farahdiansari, Ahmad Ridho Ramadhani, Moh. Nurudduja

Program Studi Teknik Industri, Universitas Bojonegoro, Jl. Lettu Suyitno No.2, Bojonegoro, Jawa Timur 62119, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Artikel Masuk: 17 Maret 2024

Artikel direvisi: 28 Mei 2024

Artikel diterima: 08 Juni 2024

Kata kunci

Digital Human Modeling
Ergonomi
Konsep Desain
Meja Kerja Pengelasan

ABSTRAK

Perancangan konsep meja kerja pengelasan untuk proses pembelajaran perlu memper-timbangkan resiko *Work-related musculoskeletal disorders* (WMSDs). Perancangan konsep meja kerja pengelasan dilakukan dengan tujuan meminimalisir risiko EFPs, khususnya jenis gerakan fleksi ke depan pada leher dan posisi lengan yang terangkat saat melakukan pengelasan dalam posisi berdiri dengan estimasi welding selama 360 menit. Penelitian ini bertujuan untuk merancang konsep desain meja kerja pengelasan yang ergonomis, dengan penilaian menggunakan beberapa parameter yang disimulasikan menggunakan Digital Human Modeling. Metode yang digunakan untuk merancang konsep meja kerja pengelasan adalah metode Pugh concept Selection, yang kemudian disimulasikan menggunakan perangkat lunak Catia V5 R21 untuk menganalisis nilai LBA dan RULA. Parameter postur tubuh model manusia disesuaikan dengan tiga subjek yang diuji menggunakan meja kerja sebelum dimodifikasi. Hasil identifikasi pada konsep desain, ditemukan alternatif konsep desain I untuk meja kerja pengelasan. Konsep ini mencakup beberapa parameter spesifikasi, termasuk kemampuan meja untuk disesuaikan secara langsung, penjepit komponen pengelasan yang dibuat secara permanen, penggunaan manual tanpa alat bantu setup, kemampuan penyesuaian sudut kemiringan meja, dan ketinggian meja yang dapat disesuaikan menggunakan sistem ulir. Setelah mendapatkan konsep desain tersebut, dilakukan pengujian simulasi pada konsep desain terpilih. Hasil pengujian simulasi didapatkan nilai LBA pada konsep desain meja pengelasan dengan ketinggian 70 cm dan 100 cm (tinggi meja dapat menyesuaikan postur tubuh) lebih aman dan nyaman dibandingkan dengan desain meja pengelasan sebelum dimodifikasi (50 cm). Hal ini juga terjadi pada penilaian RULA. Dimana desain meja kerja pengelasan baru mampu meningkatkan nilai yang semula 7 menjadi 3. Berdasarkan temuan tersebut, pengembangan konsep meja kerja pengelasan terbukti efektif untuk digunakan dalam proses pembelajaran, karena mahasiswa dapat mempelajari secara langsung penggunaan meja yang tepat dengan memperhitungkan kesejahteraan ergonomis operator untuk mengurangi risiko cedera WMSDs pada pekerjaan pengelasan.

ABSTRACT

When designing a welding workbench concept for the learning process, the risk of work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) needs to be considered. The design of the welding workbench concept was carried out to minimize the risk of EFPs, especially the type of forward flexion of the neck and the raised arm position when welding in a standing position, with an estimated welding time of 360 minutes. This research aims to design an ergonomic welding workbench design concept with an assessment using several parameters simulated using digital human modeling. The method used to design the welding workbench concept is the Pugh concept selection method, which is then simulated using Catia V5 R21 software to analyze the LBA and RULA values. The body posture parameters of the human model were adjusted for three subjects tested using a workbench before being modified. As a result of identifying the initial design concept, an alternative design concept for the welding workbench was discovered. This concept includes several specification parameters, including the ability of the table to be adjusted directly, permanently clamped welding components, manual use without setup tools, the ability to adjust the angle of the table, and the ability to adjust the height of the table using a thread system. After getting the design concept, simulation testing is carried out on the selected design concept. The simulation test results showed that the LBA value of the welding table design concept with a height of 70 cm and 100 cm (the height of the table can adjust body posture) is safer and more comfortable compared to the welding table design before modification (50 cm). It also happened in the RULA assessment, where the new welding workbench design increased the original score of 7 to 3. Based on these findings, the development of the welding workbench concept proved to be effective for use in the learning process because students could learn directly about the correct use of the table. Consider the ergonomic well-being of operators to reduce the risk of injury to WMSDs in welding work.

Keywords

MSDs
Digital Human Modelling
Ergonomics
Design Concept
Welding Workbench

* Penulis Korespondensi

Eko Wahyu Abryandoko
E-mail: abryandoko@gmail.com

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



© 2023. Some rights reserved

1. PENDAHULUAN

Work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) merupakan masalah muskuloskeletal yang paling umum terjadi secara global (Yang *et al.*, 2023). Kondisi yang sama terjadi di negara berkembang, dimana keluhan *musculoskeletal* dianggap sebagai penyebab utama komplikasi dan kecacatan (Lee *et al.*, 2023). Pekerjaan pengelasan adalah salah satu kelompok pekerjaan yang membutuhkan waktu yang cukup lama dengan posisi yang menetap, postur dengan posisi bertahan dan dipaksakan sehingga dapat menyebabkan kelelahan otot dini (Okumus *et al.*, 2023), selain itu pekerjaan pengelasan juga dapat menyebabkan gangguan WMSDs dalam jangka panjang bagi pekerja (Lee *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2023). Meskipun pembahasan mengenai bidang ergonomi sering dilakukan untuk mengurangi WMSDs pada berbagai kelompok pekerja, namun WMSD masih sering kali terjadi terutama dari *extended forced postures* (EFPs) (Lourenço & Luís, 2021). Kebutuhan evaluasi dan desain untuk membuat meja kerja pengelasan menggunakan intervensi ergonomis penting dilakukan untuk mendapatkan rancangan meja kerja yang efektif dan nyaman bagi mahasiswa.

Proses pembelajaran dalam *konsep learning factory*, seperti yang dijelaskan oleh Baena *et al.* (2017), mirip dengan lingkungan fabrikasi nyata, dimana proses pembelajaran diarahkan untuk mengoptimalkan pengembangan potensi mahasiswa. Stojkić & Bošnjak (2019), menyatakan bahwa *learning factory* dalam sektor produksi merupakan pilar utama dalam menanggapi tantangan seperti fragmentasi pasar, produk yang disesuaikan secara individual, dan fluktuasi permintaan dan penjualan. Kegiatan pembelajaran pada sebagian besar program studi teknik industri di Indonesia sudah mulai menerapkan *learning factory*, bertujuan untuk menyelesaikan masalah rekayasa yang kompleks, termasuk yang melibatkan manusia, material, peralatan, energi, informasi, dan biaya (Tan *et al.*, 2020). Penerapan *learning factory* memungkinkan mendukung pengembangan kompetensi praktikan secara efektif, dengan pembelajaran yang berlangsung secara aktif dan situasional, sehingga praktikan dapat mengatasi tantangan yang muncul dalam proses manufaktur.

Modul kegiatan praktikum terintegrasi dalam konsep *learning factory* untuk pembuatan produk memerlukan beberapa stasiun kerja yang harus disiapkan, termasuk kerja bangku, *turning*, *milling*, *welding*, *woodworking*, *bekleding*, serta *finishing*. Namun, pembelajaran pengelasan dengan posisi berdiri memiliki risiko *Ergonomic-related Musculoskeletal Disorders* (EFPs), seperti gerakan fleksi ke depan pada leher dan posisi lengan yang terangkat. Risiko EFPs ini muncul karena mahasiswa memiliki postur kerja berbeda, dapat mengakibatkan postur yang dipaksakan dan berpotensi menyebabkan kelelahan otot dini (Ahmad *et al.*, 2020). Beberapa penelitian menunjukkan desain meja kerja pengelasan memberikan pengaruh pada kenyamanan praktikan selama proses pengelasan. (Yusop, *et al.* 2018), mengusulkan desain meja kerja pengelasan baru di lembaga pendidikan. Hasil dari desain baru ini menunjukkan peningkatan signifikan dengan penurunan skor RULA dari 6 menjadi 2, sehingga mampu meningkatkan proses pengelasan dan mengurangi masalah ergonomis. Penelitian yang sama dilakukan

oleh Ariyanti *et al.* (2019), yang mengusulkan rancangan alat bantu pada stasiun kerja pengelasan berupa bangku, penyangga pipa, katrol, hasil penelitian menunjukkan dengan *workstation* baru, postur kerja yang buruk dapat diperbaiki, sehingga mampu meningkatkan efisiensi waktu kerja sebesar 8,33 menit dari kondisi kerja sebelumnya. Baru-baru ini, banyak penelitian studi ergonomis tentang postur kerja menggunakan pendekatan model manusia digital. Pendekatan ini memungkinkan para peneliti untuk mempelajari risiko dalam lingkungan kerja yang sama pada pekerja dengan tingkat detail yang lebih tinggi, serta untuk mengevaluasi berbagai skenario dan solusi desain dengan lebih cermat (Ji *et al.*, 2023; Mohammed *et al.*, 2020; Raghunathan & R, 2016).

Model produk dan model manusia dapat disimulasikan dalam lingkungan yang sama dengan berbagai postur atau tugas manusia, sehingga memungkinkan untuk menghindari risiko EFPs secara langsung pada praktikan. Marín & Marín (2021), menjelaskan penggunaan simulasi model manusia. Para peneliti dapat mengevaluasi potensi risiko ergonomi sebelum produk atau lingkungan kerja dibuat secara fisik, dan mengidentifikasi perubahan yang diperlukan untuk meningkatkan kesehatan dan kenyamanan pekerja.

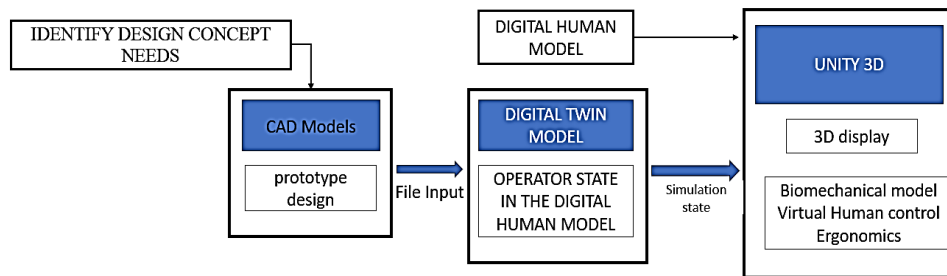
Penelitian ini bermaksud menjembatani kesenjangan tersebut, dengan fokus pada dua aspek utama. Pertama, adalah perancangan konsep desain meja kerja pengelasan yang didasarkan pada identifikasi kebutuhan, yang dievaluasi berdasarkan permasalahan yang terjadi pada kondisi aktual. Penilaian konsep desain meja kerja pengelasan dilakukan menggunakan metode *Pugh concept Selection*. Kedua, adalah melakukan simulasi dan pemodelan konsep desain meja kerja pengelasan yang dikombinasikan dengan simulasi postur tubuh subjek uji untuk mengevaluasi desain meja pengelasan yang terpilih. Proses evaluasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Catia V5 R21. Dengan pendekatan ini, para peneliti dapat mengidentifikasi potensi risiko ergonomi sebelum produk atau lingkungan kerja dibuat secara fisik, serta mengidentifikasi perubahan yang diperlukan untuk meningkatkan kesehatan dan kenyamanan mahasiswa

2. METODE PENELITIAN

Desain konsep desain meja kerja pengelasan pada penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan diantaranya sebagai berikut:

1. Identifikasi kebutuhan konsep desain meja kerja pengelasan yang dievaluasi berdasarkan permasalahan yang terjadi pada kondisi aktual.
2. Penilaian konsep desain meja kerja pengelasan menggunakan metode *pugh concept Selection* (Frey *et al.*, 2009).
3. Simulasi menggunakan software Catia V5 R21 pada konsep desain meja kerja pengelasan yang dikombinasikan dengan simulasi tubuh manusia dilakukan untuk mengevaluasi keamanan dan kenyamanan pada praktikan.

Penggunaan model manusia digunakan untuk menganalisis kesesuaian desain dengan keamanan dan kenyamanan operator. Pengoperasian perangkat lunak Catia V5 R21 dilakukan dengan cara mengimpor manusia digital dengan konsep desain terpilih. Adegan simulasi dioperasikan secara dinamis dengan menye-



Gambar 1. Skematik Diagram Desain Menggunakan Pendekatan Model Produk dan Model Manusia

suaikan proses pengelasan secara aktual. Postur kerja praktikan disesuaikan dengan pengujian pada postur kerja nyata, sehingga dapat membandingkan desain sebelum dan sesudah dari sudut pandang ergonomi. **Gambar 1** merupakan skematik diagram desain menggunakan pendekatan model produk dan model manusia.

Parameter input model produk dan model manusia yang digunakan, terdiri dari parameter konsep meja kerja pengelasan yang terpilih dan parameter model manusia dengan kriteria postur tubuh yang disesuaikan pada tiga subjek uji. Simulasi desain meja kerja pengelasan diuji dengan beberapa parameter ketinggian meja yaitu 70 cm dan 100 cm. Dua modul analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak Catia V5 R21 diantaranya adalah:

1. Analisis *Lower Back Analysis* (LBA) untuk mengevaluasi postur kerja berdasarkan penilaian tekanan punggung bawah terutama yang menunjukkan kekuatan vertebra lumbalis L5/L4 (Malakoutian *et al.*, 2022). Parameter penilaian dilakukan dengan membandingkan hasil nilai LBA pada proses pengelasan dengan *database National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH). Perbandingan nilai LBA digunakan untuk menentukan apakah setiap nilai berada dalam kisaran yang dapat dikontrol, yaitu ketika tekanan punggung bawah melebihi 3400 N, maka semakin besar tingkat keparahan cedera punggung bawah yang terjadi (Hlávková *et al.*, 2016; Waters *et al.*, 1993).
2. Analisis *Rapid Upper Limb Assessment* (RULA) untuk mendeteksi postur kerja berdasarkan beban *musculoskeletal* yang memungkinkan dapat menimbulkan resiko atau gangguan pada operator. Analisis yang digunakan dengan cara membandingkan beban *musculoskeletal* antara desain meja kerja yang sekarang dengan yang telah dimodifikasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Identifikasi Kebutuhan Meja Kerja Pengelasan

Kebutuhan terhadap desain meja kerja pengelasan muncul karena adanya beberapa permasalahan yang menyebabkan WMSDs pada praktikan. Salah satu permasalahan utamanya adalah desain meja kerja yang tidak dapat menyesuaikan dengan kebutuhan postur kerja praktikan.

Estimasi waktu praktikum pengelasan mengacu pada kegiatan modul Praktikum Terintegrasi (PTI) dalam konsep *learning factory*. Pada umumnya PTI terdiri dari kegiatan workshop meliputi modul kerja

bangku, *turning*, *milling*, *welding*, *woodworking*, *bekleding*, dan *finishing* (Ahmad *et al.*, 2020). Estimasi pembebanan sks pada PTI adalah 2 sks dalam satu semester. Menurut Permenristekdikti No. 44 tahun 2015 pasal 17 menyatakan beban satu sks praktikum adalah 170 menit/ minggu/semester, maka 2 sks dengan 16 kali pertemuan/semester membutuhkan waktu sebanyak 5440 menit. Total waktu yang dibutuhkan dalam pelaksanaan praktikum terintegrasi adalah 6640 menit atau kelebihan 18 persen dari ketetapan yang berlaku. Jika diestimasi, kebutuhan waktu pada kegiatan workshop memerlukan waktu sebanyak 2550 menit. Estimasi waktu pelaksanaan kegiatan *workshop* pada umumnya terdiri dari proses manufaktur kerja bangku sebanyak 450 menit, *turning* sebanyak 330 menit, *milling* sebanyak 330 menit, *welding* sebanyak 360 menit, *woodworking* dan *bekleding* sebanyak 480 menit, serta *finishing* sebanyak 600 menit.

Keadaan meja kerja pengelasan saat ini masih belum dapat membantu proses pengelasan dengan maksimal. Desain meja kerja pengelasan pada umumnya dibuat dengan kondisi ketinggian kaki-kaki meja 50 cm dan papan meja menetap, sehingga tidak dapat disesuaikan dengan postur tubuh operator. **Gambar 2** merupakan contoh permasalahan pada meja kerja pengelasan yang terjadi.

Meja kerja pengelasan sebelum dimodifikasi dinilai berdasarkan sudut postur kerja praktikan (**Gambar 2**). Masing-masing subjek memiliki postur tubuh yang berbeda. Tiga subjek tersebut nantinya digunakan sebagai postur tubuh acuan simulasi menggunakan perangkat lunak Catia V5 R21, untuk dibandingkan tingkat keamanan dan kenyamanan desain meja sebelum dan sesudah di modifikasi. penyesuaian model manusia dari postur tubuh pada masing-masing subjek yang terdapat pada **Gambar 2**, mencakup penyesuaian sudut postur tubuh, posisi tangan, dan posisi tubuh secara keseluruhan untuk menciptakan representasi yang akurat dari kondisi aktual yang terjadi.

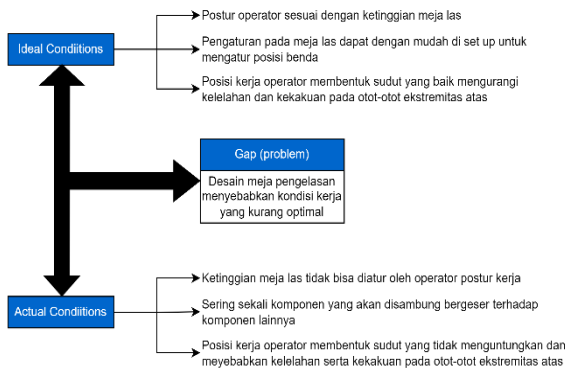
Permasalahan pada meja kerja pengelasan dengan kaki-kaki dan papan meja yang tidak dapat disesuaikan dengan aktivitas yang selama ini dilakukan operator berpotensi menyebabkan *musculoskeletal disorder*. Dalam kasus yang sama dilaporkan oleh (Nedohe *et al.*, 2023), postur kerja dengan kondisi kaki-kaki meja menetap dan tinggi kaki meja yang tidak dapat disesuaikan telah diidentifikasi sebagai penyebab utama WMSDs pada operator pengelasan. Posisi kerja yang tidak ergonomis ini menyebabkan operator membentuk sudut 180 derajat pada segmen kepala, leher, dan bahu, serta segmen pinggang dan bahu



Gambar 2. Sudut Postur Kerja Praktikan Menggunakan Meja Kerja Pengelasan Sebelum Dimodifikasi A). Sudut Postur Kerja Subjek Satu B). Sudut Postur Kerja Subjek Dua C). Sudut Postur Kerja Subjek Tiga

membentuk sudut 25 derajat. Hal ini mengakibatkan timbulnya kelelahan dan kekakuan pada otot anggota gerak atas dengan cepat. Oleh karena itu, desain meja kerja pengelasan yang dapat disesuaikan dengan postur kerja individu menjadi sangat penting untuk mencegah terjadinya WMSDs pada operator.

Kebutuhan desain meja kerja pengelasan dikarenakan munculnya beberapa permasalahan yang mengakibatkan WMSDs pada operator. Hal ini terjadi ketika meja kerja tidak dapat disesuaikan dengan postur tubuh praktikan, seperti ketinggian yang tidak sesuai atau kemampuan rotasi yang terbatas. Munculnya permasalahan pada desain meja kerja pengelasan menyebabkan kondisi aktual proses pengelasan tidak sesuai dengan kondisi ideal, sehingga terjadi gap (**Gambar 3**).



Gambar 3. Representasi Gap Permasalahan pada Desain Meja Kerja Pengelasan

Kedaaan aktual yang terjadi pada **Gambar 2** menunjukkan beberapa permasalahan yang mengakibatkan kondisi kerja kurang optimal pada proses pengelasan. Penyebab permasalahan terjadi karena dimensi meja las tidak dapat menyesuaikan dengan postur kerja operator. Selisih ketinggian dan kemiringan meja yang tidak dapat disesuaikan mengakibatkan hasil pengelasan menjadi tidak presisi

3.2. Identifikasi Kebutuhan Konsep Rancangan Meja Kerja Pengelasan

Identifikasi kebutuhan konsep desain meja kerja pengelasan dievaluasi berdasarkan permasalahan yang terjadi pada kondisi aktual. Konsep desain meja kerja pengelasan dilakukan menggunakan komposisi

yang dijabarkan menjadi kebutuhan teknis perancangan sehingga dapat diketahui spesifikasi kebutuhan target untuk perbaikan desain meja kerja pengelasan. Kebutuhan teknis perancangan konsep desain meja kerja pengelasan dijelaskan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Kebutuhan Teknis Perancangan konsep desain meja kerja pengelasan

No	Kebutuhan Desain	Spesifikasi Target
1	Meja kerja pengelasan dirancang dapat mempercepat proses <i>set up</i> pengelasan	Meja kerja pengelasan dirancang secara permanen pada setiap komponen untuk mengurangi <i>set up</i>
2	Meja kerja pengelasan dirancang untuk mendapatkan hasil pengelasan yang maksimal dan presisi	Meja kerja pengelasan dirancang dengan penjepit komponen pengelasan untuk mengurangi pergeseran komponen yang akan dilas
3	Meja kerja pengelasan didesain dengan sistem kerja yang sederhana	Meja kerja pengelasan dapat dioperasikan secara manual
4	Desain meja kerja pengelasan dapat dimiringkan menyesuaikan dengan posisi kenyamanan gerak operator	Meja kerja pengelasan dirancang dengan fitur <i>adjustable</i> yang dapat memiringkan meja hingga 30 derajat
5	Desain kaki meja kerja pengelasan dapat menyesuaikan dengan postur kerja operator	Kaki meja kerja pengelasan dirancang dengan fitur <i>adjustable</i> yang dapat naik turunkan antara 50 cm sampai dengan 100 cm.

3.3. Penyusunan Konsep Desain Meja Kerja Pengelasan

Penyusunan konsep desain meja kerja pengelasan dilakukan dengan menggunakan *morphological chart*. Identifikasi dilakukan untuk mengetahui elemen-elemen penting untuk memperluas pencarian solusi dari beberapa alternatif. **Tabel 2** merupakan *morphological chart* dari konsep desain meja kerja pengelasan.

Morphological chart menunjukkan konsep desain yang diperoleh berdasarkan pembagian dari solusi pencarian internal dan eksternal. Konsep yang didapat

sebanyak tiga konsep desain dan dibagi berdasarkan warna, diantaranya adalah warna biru untuk konsep desain I, warna oranye untuk konsep desain II, dan warna hitam untuk konsep desain III.

Tabel 2. Morphological Chart Alternative Konsep

No	Solusi Fungsi	Alternatif 1	Flow alternatif		Alternatif 2
			1	2	
1.	Mekanik Rangka	dapat disesuaikan	●	●	dengan bantuan alat
2.	penjepit komponen pengelasan	permanen	●	●	dapat disesuaikan
3.	Pengoprasi an secara mudah	manual tanpa alat bantu set up	●	●	membutuhk an alat bantu set up.
4.	Mekanisme Kemiringan meja	permane n 30 derajat	●	●	dapat disesuaikan.
5.	Ketinggian meja pengelasan dapat disesuaikan	sistem hidrolik	●	●	sistem ulir

3.4. Penilaian Konsep Rancangan Stasiun Kerja

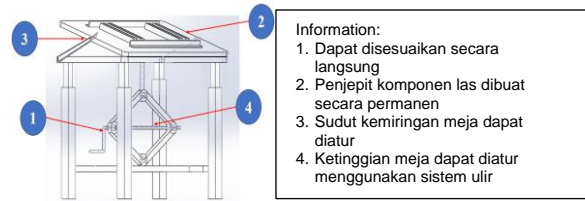
Penyaringan tiga konsep desain meja kerja pengelasan yang telah diperoleh diidentifikasi menggunakan penilaian konsep produk menggunakan metode *Pugh Concept Selection* (Frey et al., 2009). Penilaian konsep produk dilakukan dengan diskusi bersama pengguna dan ahli untuk mendapatkan empat kriteria seleksi berdasarkan metode *Pugh Concept Selection* yaitu *performance*, *features*, *durability*, dan *serviceability*. Tabel 3 merupakan hasil rekapitulasi penyaringan konsep dari desain meja kerja pengelasan.

Tabel 3. Rekapitulasi Penyaringan Konsep Desain Meja Kerja Pengelasan

No.	Kriteria Seleksi	Rekapitulasi Penyaringan Alternatif Konsep Desain		
		Konsep Desain I	Konsep Desain II	Konsep Desain III
1	Performance	+	0	0
2	Features	+	+	+
3	Durability	+	+	+
4	Serviceability	+	+	-
Jumlah (+)		4	3	3
Jumlah (0)		0	1	0
Jumlah (-)		0	0	1
Nilai Akhir		4	3	2

Rekapitulasi penyaringan konsep dari desain meja kerja pengelasan telah diidentifikasi. Alternatif konsep dari beberapa pendapat sehingga didapatkan nilai alternatif tertinggi yaitu konsep desain I dengan spesifikasi yang menjadi parameter adalah Meja kerja pengelasan dapat disesuaikan secara langsung, penjepit komponen pengelasan dibuat secara permanen. Langkah penggunaan manual tanpa alat bantu set up. Kemiringan meja dapat disesuaikan sudut kemiringannya dan ketinggian meja dapat disesuaikan menggunakan sistem ulir. Gambar 4 merupakan hasil alternatif konsep

desain meja kerja pengelasan yang telah divalidasi.



Gambar 4. Konsep Desain Meja Kerja Pengelasan yang telah Divalidasi

3.5. Modeling and Simulation Lingkungan Kerja Pengelasan

Dua set modul simulasi pengujian desain meja kerja pengelasan menggunakan perangkat lunak Catia V5 R21, diantaranya sebagai berikut:

1. Operator diposisikan secara berdiri menggunakan konsep desain meja kerja pengelasan,
2. Operator disimulasikan melakukan pengelasan.
3. Postur tubuh operator disimulasikan berdasarkan 3 subjek uji (Gambar 2) dengan kriteria postur tubuh yang dijelaskan pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter Kriteria Postur Tubuh Berdasarkan 3 Subjek Uji Meja Kerja Sebelum Dimodifikasi

Nama Dimensi		Subjek	Subjek	Subjek
		1	2	3
Tinggi Tubuh		181	172	176
Tinggi Siku	Dalam	19	17	18
Posisi Duduk				
Tinggi Mata Berdiri		168	160	162
Panjang Tangan		80	79	80
Rentang Kedepan				

Postur tubuh operator pada simulasi disesuaikan berdasarkan postur tubuh pengujian meja kerja sebelum dimodifikasi. Postur tubuh operator pada tiga subjek uji digunakan sebagai parameter model manusia untuk disimulasikan dengan konsep desain meja kerja pengelasan yang telah divalidasi. Parameter ketinggian desain meja kerja pengelasan ditentukan dengan dua parameter yaitu 70 cm dan 100 cm dibandingkan dengan desain meja sebelum dimodifikasi dengan ketinggian meja 50 cm. Kemiringan desain meja kerja pengelasan disimulasikan dengan parameter 30 derajat (Gambar 5).

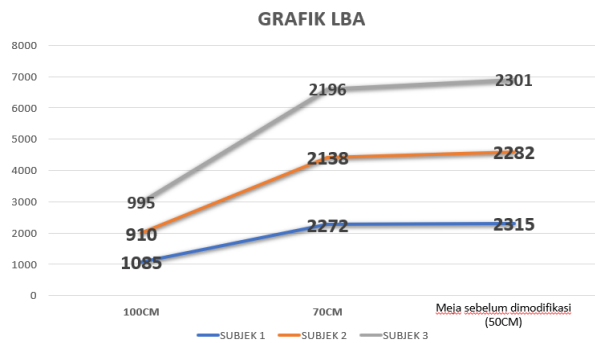


Gambar 5. Pengujian Simulasi Model Manusia dengan Konsep Desain Meja Kerja Pengelasan

Desain meja kerja pengelasan yang disimulasikan dengan model manusia dibandingkan dengan hasil uji meja kerja sebelum dimodifikasi pada tiga subjek. Analisis untuk menilai efektivitas desain meja kerja pengelasan menggunakan penilaian *Lower Back Analysis* (LBA) dan *Rapid Upper Limb Assessment* (RULA)

3.5.1. Analisis Postur Bekerja dengan LBA

Penilaian LBA pada konsep desain meja kerja pengelasan dilakukan dengan membandingkan konsep meja sebelum dimodifikasi. Parameter uji dianalisis dengan ketentuan NIOSH, dimana beban punggung praktikan dinilai dengan ketentuan minimum 500 N dan maksimum adalah 3480N. Gambar 6 menjelaskan hasil pengujian simulasi LBA pada konsep desain meja kerja pengelasan sebelum dan sesudah dimodifikasi.



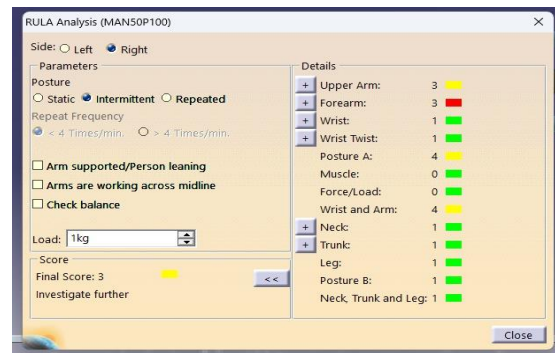
Gambar 6. Hasil Pengujian Simulasi LBA Sebelum dan Sesudah Dimodifikasi

Hasil pengujian simulasi LBA menunjukkan bahwa parameter ketinggian meja yang berbeda menunjukkan adanya pengaruh terhadap gaya yang bekerja pada tulang punggung operator. Ditemukan bahwa dengan parameter pengujian menggunakan simulasi menunjukkan semakin tinggi meja kerja, semakin rendah nilai LBA-nya. Nilai LBA yang paling optimal pada masing-masing subjek didapatkan pada desain meja dengan ketinggian 100 cm, dimana nilai LBA pada subjek 1 sebesar 1085 N, subjek 2 sebesar 910 N, dan subjek 3 sebesar 995 N. Hasil LBA dianalisis bahwa desain meja pengelasan yang sudah dimodifikasi lebih aman dan nyaman digunakan pada masing-masing subjek dibandingkan dengan meja sebelum dimodifikasi.

Penggunaan desain meja pengelasan yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan postur praktikan memungkinkan dapat mengurangi resiko kecelakaan dan meningkatkan kenyamanan bagi praktikan pengelasan. Nodooshan et al. (2016) menekankan bahwa permasalahan ergonomis dalam kondisi kerja di bengkel memiliki implikasi serius terhadap kesehatan dan kesejahteraan pekerja. Hal ini termasuk resiko cedera *muskuloskeletal*, stres fisik dan mental, serta penurunan produktivitas. Pendapat yang sama diuraikan dalam penelitian Ariyanti et al. (2019) bahwa merancang stasiun kerja menggunakan prinsip ergonomi dapat membantu mengurangi keluhan pada pekerja fisik. Dengan memperhatikan faktor-faktor seperti kesesuaian tinggi meja, posisi alat yang ergonomis, dan ruang gerak yang cukup, stasiun kerja baru dapat memberikan lingkungan kerja yang lebih nyaman dan aman bagi praktikan.

3.5.2. Analisis Postur Bekerja dengan Metode RULA

Penilaian RULA dianalisis menggunakan postur kerja pada tiga subjek dengan postur (Tabel 4). Analisis RULA dilakukan dengan membandingkan meja kerja pengelasan sebelum dimodifikasi dengan simulasi desain meja setelah dimodifikasi. Sistem penilaian RULA pada software Catia V5 R21 dinilai berdasarkan score yang didapatkan dari sistem, dimana semakin tinggi skornya, semakin besar pengaruh postur terhadap sistem *muskuloskeletal* sendi *ekstremitas* atas. Gambar 7 merupakan contoh hasil penilaian RULA yang didapatkan dari software Catia V5 R21



Gambar 7. Contoh Hasil Penilaian RULA

Hasil penilaian RULA direkapitulasi berdasarkan parameter pengujian yang telah direncanakan. Identifikasi Score rula dilakukan dengan melihat hasil penilaian, jika nilai diatas 4 maka desain meja kerja pengelasan buruk terhadap postur tubuh.

Rekapitulasi penilaian RULA menunjukkan hasil yang menarik dalam mengevaluasi efektivitas desain meja kerja pengelasan baru (Tabel 5). Berdasarkan nilai rata-rata yang mencapai 3, dapat disimpulkan bahwa desain meja kerja pengelasan baru menunjukkan hasil yang optimal dalam hal ergonomi, jika dibandingkan dengan meja pengelasan sebelum dimodifikasi yang memiliki nilai RULA diatas 6. Peningkatan signifikan dalam nilai RULA dari meja pengelasan sebelum dimodifikasi (50 cm) ke desain meja kerja pengelasan yang baru menunjukkan bahwa perubahan desain tersebut efektif dalam mengurangi potensi risiko cedera *muskuloskeletal* dan meningkatkan kenyamanan bagi mahasiswa.

Tabel 5. Rekapitulasi Penilaian RULA dengan Menggunakan Desain Meja Kerja Pengelasan

Tinggi Meja	Subjek 1	Subjek 2	Subjek 3
Meja sebelum dimodifikasi (50CM)	6	7	7
70 cm	4	3	3
100 cm	3	3	3

Temuan yang serupa yang dihasilkan Yusop et al. (2018), memberikan konfirmasi tambahan terhadap efektivitas desain dalam meningkatkan proses pengelasan dan mengurangi masalah ergonomi. Dengan menggunakan analisis RULA pada postur siswa selama proses pengelasan dengan menggunakan perangkat lunak CATIA V5R19. Penelitian ini menunjukkan bahwa

desain yang diusulkan memberikan hasil yang signifikan dengan skor RULA dari 6 menjadi 2. Hal ini menegaskan pentingnya memperhatikan faktor ergonomi dalam merancang stasiun kerja atau peralatan untuk meningkatkan kesehatan, kenyamanan, dan produktivitas mahasiswa. Evaluasi dan perbaikan dalam lingkungan kerja untuk memastikan bahwa kondisi kerja memenuhi standar keselamatan dan kesehatan yang tinggi serta mendukung kinerja yang optimal bagi para mahasiswa.

4. KESIMPULAN

Hasil identifikasi dari beberapa konsep produk menggunakan pendekatan *Pugh Concept Selection* didapatkan konsep desain dengan alternatif I. Spesifikasi konsep desain pada alternatif I meliputi beberapa parameter diantaranya adalah meja kerja pengelasan dapat disesuaikan secara langsung, penjepit komponen pengelasan dibuat secara permanen, langkah penggunaan manual tanpa alat bantu set up, kemiringan meja dapat disesuaikan sudutnya, dan ketinggian meja dapat disesuaikan menggunakan sistem ulir. Desain konsep meja pengelasan yang terpilih, selanjutnya disimulasikan menggunakan software catia V5 R21 dan dibandingkan dengan desain meja pengelasan sebelum dimodifikasi. Konsep pengujian dilakukan pada tiga subjek, yang kemudian postur tubuh dari subjek digunakan sebagai parameter simulasi. Dari hasil pengujian simulasi didapatkan nilai LBA pada konsep desain meja pengelasan dengan ketinggian 70 cm dan 100 cm (tinggi meja dapat menyesuaikan postur tubuh) lebih aman dan nyaman dibandingkan dengan desain meja pengelasan sebelum dimodifikasi (50 cm). Hal ini juga terjadi pada penilaian RULA, dimana desain meja kerja pengelasan baru mampu meningkatkan nilai yang semula 7 menjadi 3.

Secara keseluruhan, penerapan model manusia dalam evaluasi dan perancangan meja kerja pengelasan menawarkan pendekatan yang holistik dan berorientasi pada solusi untuk meningkatkan kesehatan, kenyamanan, dan produktivitas di tempat kerja. Hal ini memungkinkan dapat membekali mahasiswa dengan keterampilan yang relevan dan mengarah pada pengembangan produk yang lebih aman, ergonomis, dan inovatif di masa depan.

Namun, seperti yang disoroti dalam penelitian ini, terdapat keterbatasan yang perlu diperhatikan. Salah satunya adalah bahwa beban pegangan las tidak diperhitungkan dalam pengujian LBA. Hal ini merupakan aspek penting yang dapat mempengaruhi nilai LBA dan mempengaruhi evaluasi risiko ergonomi secara menyeluruh. Oleh karena itu, penelitian di masa depan diharapkan dapat memperluas ruang lingkup evaluasi untuk memasukkan faktor-faktor seperti beban pegangan las, sehingga memberikan gambaran yang lebih lengkap dan akurat tentang kondisi kerja yang dihadapi oleh pekerja pengelasan. Dengan memperhatikan keterbatasan tersebut, penelitian di masa depan dapat lebih mendalam untuk memeriksa aspek-aspek tertentu dari desain meja kerja pengelasan dan memastikan bahwa solusi yang diusulkan secara efektif memperhatikan semua faktor yang relevan untuk menciptakan lingkungan kerja yang aman, nyaman, dan produktif bagi para pekerja.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, N. S., Abdullah, A. A. A., Thyng, O. K., & Xin, T. L. (2020). Musculoskeletal disorders among dental students. *J Res Med Dent Sci*, 8(3), 32–38. <https://www.jrmds.in/articles/musculoskeletal-disorders-among-dental-students.pdf>
- Ariyanti, S., Widodo, L., Zulkarnain, M., & Timotius, K. (2019). Design work station of pipe welding with ergonomic approach. *SINERGI*, 23(2), 107–114. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2019.2.003>
- Baena, F., Guarin, A., Mora, J., Sauza, J., & Retat, S. (2017). Learning Factory: The Path to Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 9, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.022>
- Frey, D. D., Herder, P. M., Wijnia, Y., Subrahmanian, E., Katsikopoulos, K., & Clausing, D. P. (2009). The Pugh Controlled Convergence method: model-based evaluation and implications for design theory. *Research in Engineering Design*, 20(1), 41–58. <https://doi.org/10.1007/s00163-008-0056-z>
- Hlávková, J., Lebeda, T., Tichý, T., Gaďourek, P., Urban, P., Nakládalová, M., Laštovková, A., Fenclová, Z., Ridzoň, P., Ehler, E., Richter, M., Pešáková, L., & Pelclová, D. (2016). Evaluation of Lumbar Spine Load by Computational Method in Order to Acknowledge Low-back Disorders as Occupational Diseases. *Central European Journal of Public Health*, 24(1), 58–67. <https://doi.org/10.21101/cejph.a4332>
- Ji, X., Hettiarachchige, R. O., Littman, A. L. E., & Piovesan, D. (2023). Using Digital Human Modelling to Evaluate the Risk of Musculoskeletal Injury for Workers in the Healthcare Industry. *Sensors*, 23(5), 2781. <https://doi.org/10.3390/s23052781>
- Lee, Y.-C., Hong, X., & Man, S. S. (2023). Prevalence and Associated Factors of Work-Related Musculoskeletal Disorders Symptoms among Construction Workers: A Cross-Sectional Study in South China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4653. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054653>
- Lourenço, L., & Luís, S. (2021). Musculoskeletal Disorders in Portuguese Welders: Effects on Bodily Pain and Health-Related Quality of Life. *Frontiers in Public Health*, 9, 660451. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.660451>
- Malakoutian, M., Sanchez, C. A., Brown, S. H. M., Street, J., Fels, S., & Oxland, T. R. (2022). Biomechanical Properties of Paraspinal Muscles Influence Spinal Loading—A Musculoskeletal Simulation Study. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 852201. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.852201>
- Marín, J., & Marín, J. J. (2021). Forces: A Motion Capture-Based Ergonomic Method for the Today's World. *Sensors*, 21(15), 5139. <https://doi.org/10.3390/s21155139>
- Mohammed, A. R., Mohamed, M. O., Alhubaishy, Y. A., Nasser, K. A., & Fahim, I. S. (2020). Ergonomic

- analysis of a working posture in steel industry in Egypt using digital human modeling. *SN Applied Sciences*, 2(12), 2085. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03872-y>
- Nedohe, K., Mpofu, K., & Makinde, O. (2023). Assessment of Ergonomics Risk Experienced by Welding Workers in a Rail Component Manufacturing Organization. In *International conference on flexible automation and intelligent manufacturing* (pp. 227–236). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18326-3_23
- Nodooshan, H. S., Booshehri, S. K., Daneshmandi, H., & Choobineh, A. R. (2016). Ergonomic workplace assessment in orthotic and prosthetic workshops. *Work*, 55(2), 463–470. <https://doi.org/10.3233/WOR-162401>
- Okumus, D., Fariya, S., Tamer, S., Gunbeyaz, S. A., Yildiz, G., Kurt, R. E., & Barlas, B. (2023). The impact of fatigue on shipyard welding workers' occupational health and safety and performance. *Ocean Engineering*, 285, 115296. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115296>
- Raghunathan, R., & R, S. (2016). Review of Recent Developments in Ergonomic Design and Digital Human Models. *Industrial Engineering & Management*, 5(2), 316–2169. <https://doi.org/10.4172/2169-0316.1000186>
- Stojkić, Ž., & Bošnjak, I. (2019). Development of Learning Factory at FSRE, University of Mostar. *Procedia Manufacturing*, 31, 180–186. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.029>
- Tan, H.-S., Ivander, Oktarina, R., Reynaldo, V., & Sharina, C. (2020). Conceptual development of learning factory for industrial engineering education in Indonesia context as an enabler of students' competencies in industry 4.0 era. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 426(1), 12123. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/426/1/012123>
- Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A., & Fine, L. J. (1993). Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics*, 36(7), 749–776. <https://doi.org/10.1080/00140139308967940>
- Yang, F., Di, N., Guo, W., Ding, W., Jia, N., Zhang, H., Li, D., Wang, D., Wang, R., Zhang, D., Liu, Y., Shen, B., Wang, Z., & Yin, Y. (2023). The prevalence and risk factors of work related musculoskeletal disorders among electronics manufacturing workers: a cross-sectional analytical study in China. *BMC Public Health*, 23(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s12889-022-14952-6>
- Yusop, M., Mat, S., Ramli, F. R., Dullah, A. R., & Khalil, S. N. (2018). Design of welding armrest based on ergonomics analysis: Case study at educational institution In Johor Bahru, Malaysia. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(1), 309–313. https://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2018/jeas_0118_6670.pdf