



PAPER – OPEN ACCESS

## Evaluasi Beban Kerja Kognitif melalui Pengukuran Multimodal pada Variasi Tingkat Kesulitan Tugas dan Waktu Kerja

Author : G Setiawan, and MA Puspasari  
DOI : 10.32734/ee.v9i2.2727  
Electronic ISSN : 2654-704X  
Print ISSN : 2654-7031

*Volume 9 Issue 2 – 2026 TALENTA Conference Series: Energy & Engineering (EE)*



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/).

Published under licence by TALENTA Publisher, Universitas Sumatera Utara



# Evaluasi Beban Kerja Kognitif melalui Pengukuran Multimodal pada Variasi Tingkat Kesulitan Tugas dan Waktu Kerja

G Setiawan, MA Puspasari

Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, Depok 16424, Indonesia

[gavin.setiawan41@ui.ac.id](mailto:gavin.setiawan41@ui.ac.id), [mayaarlina@ui.ac.id](mailto:mayaarlina@ui.ac.id)

## Abstrak

Salah satu faktor penting yang memengaruhi kinerja pekerja dalam konteks industri adalah beban kerja kognitif. Namun, umumnya pengukuran beban kerja kognitif masih mengandalkan satu pendekatan tunggal, sehingga membatasi penerapannya dalam kondisi nyata di lapangan. Penelitian ini menggunakan pendekatan multimodal untuk mengkaji pengaruh tingkat kesulitan tugas dan waktu kerja terhadap beban kerja kognitif. Pada penelitian ini, pekerja diminta untuk menyelesaikan tugas yang menuntut secara kognitif dalam berbagai kondisi sebagai bagian dari desain eksperimen *within-subject*. Pengukuran beban kerja dilakukan menggunakan indikator fisiologis dan subjektif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tingkat kesulitan tugas secara signifikan meningkatkan beban kerja kognitif, sementara pengaruh waktu kerja terutama tercermin pada respons fisiologis. Temuan ini memberikan implikasi praktis bagi perancangan tugas dan penjadwalan kerja dalam konteks industri.

**Kata Kunci:** Beban kerja kognitif; pengukuran multimodal; EEG; HRV; NASA-TLX

## Abstract

*One important factor influencing worker performance in industrial contexts is cognitive workload. However, it is commonly assessed using a single measurement approach, which restricts its use in real-world settings. This study uses a multimodal assessment to examine how task difficulty and time of day affect cognitive workload. Office workers were required to perform cognitively demanding tasks in a variety of conditions as part of a within-subject experimental design. Physiological and subjective measures were used to evaluate workload. Results show that higher task difficulty significantly increased cognitive workload, while time-of-day effects were primarily reflected in physiological responses. These findings provide practical insights for task design and work scheduling in industrial contexts.*

**Keywords:** Cognitive workload; multimodal measurement; EEG; HRV; NASA-TLX

## 1. Pendahuluan

Beban kerja kognitif merupakan salah satu faktor penting dalam kinerja manusia dan didefinisikan sebagai rasio antara sumber daya yang tersedia pada individu dengan sumber daya yang dibutuhkan untuk menyelesaikan suatu tugas [1]. Aktivitas kerja sehari-hari sering kali terganggu oleh interupsi, tekanan waktu, dan stres, yang berkontribusi terhadap permasalahan kesehatan dan keselamatan kerja [2]. Tingkat beban kerja kognitif yang tidak optimal, baik akibat kelelahan mental maupun kurangnya perhatian, dapat menyebabkan penurunan kinerja [3]. Namun demikian, mekanisme dan dinamika spesifik mengenai bagaimana beban kerja kognitif yang berlebihan memengaruhi kinerja pekerja, penyelesaian tugas, serta risiko cedera, khususnya dalam sektor ritel, masih belum sepenuhnya dipahami [4].

Beban kerja mental bersifat multidimensional dan dipengaruhi oleh karakteristik tugas, individu, serta konteks lingkungan, sehingga sulit untuk diukur secara langsung [5]. Secara historis, pengukuran beban kerja banyak mengandalkan metode tunggal, seperti pengukuran subjektif atau indikator fisiologis individual. NASA Task Load Index (NASA-TLX) secara konsisten digunakan sebagai standar emas dalam mengevaluasi beban kerja kognitif secara subjektif, namun rentan terhadap bias ingatan dan kesalahan pelaporan retrospektif [6]. Di sisi lain, pengukuran fisiologis seperti elektroensefalografi (EEG) dan variabilitas denyut jantung (heart rate variability/HRV) memberikan informasi objektif mengenai respons neural dan otonom terhadap tuntutan kognitif, tetapi sensitif terhadap gangguan (*noise*), variasi individu, serta pengaruh lingkungan [5].

Oleh karena itu, pendekatan pengukuran multimodal semakin banyak digunakan untuk memberikan evaluasi yang lebih komprehensif dengan mengompensasi keterbatasan masing-masing metode [7,8]. Pendekatan multimodal telah diterapkan dalam berbagai konteks, mulai dari tugas berbasis komputer hingga pelatihan berbasis *virtual reality* untuk mensimulasikan beban kerja dalam kondisi nyata [9]. Namun demikian, penelitian yang mengkaji pengaruh waktu kerja dan tingkat kesulitan tugas menggunakan pendekatan multimodal masih terbatas, meskipun faktor ritme sirkadian dan temporal diketahui berinteraksi dengan tingkat performa dan kewaspadaan manusia.

Tingkat kesulitan tugas merupakan salah satu faktor yang telah terbukti memengaruhi beban kerja. Tugas yang lebih menuntut secara konsisten dikaitkan dengan peningkatan aktivasi fisiologis dan penilaian beban kerja subjektif dalam berbagai eksperimen terkontrol [10]. Di sisi lain, temuan terkait pengaruh waktu kerja masih menunjukkan hasil yang tidak konsisten akibat perbedaan metodologi antar penelitian. Oleh karena itu, diperlukan investigasi yang sistematis untuk mengkaji kedua faktor tersebut dalam kerangka pengukuran multimodal untuk mendukung pemahaman teoretis serta pengambilan keputusan praktis dalam konteks industri.

Untuk mengisi kesenjangan tersebut, penelitian ini menggunakan desain eksperimen *within-subject* untuk mengkaji pengaruh tingkat kesulitan tugas dan waktu kerja terhadap beban kerja kognitif dengan menggunakan pengukuran multimodal, yaitu fisiologis (EEG dan HRV) serta subjektif (NASA-TLX). Pemodelan linear *mixed effects* digunakan untuk mengakomodasi variasi antar partisipan. Penelitian ini memberikan kontribusi melalui integrasi berbagai indikator beban kerja dalam desain eksperimen yang terstruktur serta penyediaan bukti empiris yang relevan bagi perancangan tugas ergonomis dan penjadwalan kerja.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Desain Eksperimen

Penelitian ini menggunakan desain eksperimen *within-subject* untuk mengkaji pengaruh tingkat kesulitan tugas dan waktu kerja terhadap beban kerja kognitif. Dua variabel independen dimanipulasi, yaitu tingkat kesulitan tugas dengan dua level (mudah dan sulit), serta waktu kerja dengan tiga level (pagi, siang, dan sore). Setiap partisipan menjalani seluruh kombinasi kondisi tersebut, sehingga terdapat enam kondisi eksperimen untuk setiap partisipan.

Desain *repeated-measures* ini dipilih untuk mengurangi variabilitas antar individu serta meningkatkan sensitivitas statistik. Penelitian ini bersifat eksploratif dengan tujuan mengidentifikasi pola beban kerja yang konsisten pada aspek fisiologis, subjektif, dan kinerja.

### 2.2. Partisipan

Partisipan merupakan pekerja kantoran yang direkrut dari organisasi industri di sektor otomotif. Sebanyak 20 partisipan terlibat dalam penelitian ini, dengan komposisi 80% laki-laki dan 20% perempuan. Rata-rata usia partisipan adalah 34,3 tahun (standar deviasi = 13,03), dengan rentang usia antara 20 hingga 51 tahun. Rata-rata pengalaman kerja partisipan adalah 10,85 tahun dalam peran berbasis perkantoran di sektor industri otomotif.

Seluruh partisipan memiliki penglihatan normal atau telah dikoreksi menjadi normal serta tidak memiliki riwayat gangguan neurologis maupun kardiovaskular. Sebelum berpartisipasi, seluruh individu memberikan persetujuan (*informed consent*). Protokol penelitian dilaksanakan sesuai dengan pedoman etika penelitian yang melibatkan manusia.

Untuk mengevaluasi kecukupan ukuran sampel dalam mendeteksi efek *within-subject*, dilakukan *power analysis post hoc* menggunakan perangkat lunak G\*Power. Berdasarkan kerangka *repeated-measures* ANOVA dengan asumsi ukuran efek sedang ( $f = 0,25$ ), tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$ , enam pengukuran berulang, serta asumsi korelasi antar pengukuran sebesar 0,5, diperoleh nilai power sebesar  $\pm 0,85$  untuk total sampel  $N = 20$ . Nilai ini menunjukkan bahwa ukuran sampel memadai untuk mendeteksi efek berukuran sedang dalam desain eksperimen ini.

Distribusi partisipan tidak seimbang berdasarkan jenis kelamin. Oleh karena jumlah partisipan perempuan terbatas, analisis berdasarkan jenis kelamin tidak dilakukan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini merefleksikan karakteristik populasi sampel yang digunakan dan perlu diinterpretasikan dalam konteks tersebut.

### 2.3. Tugas dan Prosedur

Partisipan diminta untuk mengerjakan tugas aritmetika mental berbasis komputer yang dirancang untuk menghasilkan tingkat beban kerja kognitif yang berbeda. Setiap percobaan terdiri dari satu ekspresi aritmetika yang ditampilkan di tengah layar komputer. Partisipan diminta untuk menyelesaikan soal secara mental tanpa bantuan eksternal dan memberikan respons secepat dan seakurat mungkin menggunakan keyboard.

Tugas aritmetika dipilih karena merepresentasikan model sederhana dari pekerjaan kantor di dunia nyata. Penggunaan kondisi mudah dan sulit dimaksudkan untuk merepresentasikan variasi tingkat kesulitan tugas yang umum dijumpai dalam lingkungan

kerja, seperti pengambilan keputusan dan *multitasking*. Pendekatan ini memungkinkan analisis variasi beban kerja kognitif berdasarkan waktu kerja, sehingga dapat memberikan gambaran mengenai waktu optimal untuk menyelesaikan tugas dengan tingkat kesulitan tertentu.

Tingkat kesulitan tugas dimanipulasi dalam dua level, yaitu mudah dan sulit. Pada kondisi mudah, partisipan menyelesaikan soal aritmetika yang terdiri dari tiga komponen numerik (misalnya  $a + b + c$ ) selama enam menit. Setiap soal dihasilkan secara acak, dan partisipan menekan tombol “Y” jika hasil perhitungan berada di antara 10 hingga 20, dan “N” jika tidak.

Pada kondisi sulit, partisipan mengerjakan soal aritmetika yang lebih kompleks dengan beberapa komponen numerik serta operasi penjumlahan dan pengurangan bergantian (misalnya  $a + b - c + d - e + f - g$ ) selama enam menit. Partisipan menekan tombol “Y” jika hasil perhitungan berada di antara -4 hingga 6, dan “N” jika tidak. Urutan kondisi tugas diacak untuk setiap partisipan guna mengurangi efek urutan dan menjaga validitas internal. Interval istirahat selama 10 menit diberikan antar kondisi untuk meminimalkan kelelahan dan memungkinkan parameter fisiologis kembali mendekati kondisi awal.

Kondisi waktu kerja dibagi menjadi pagi (09.00–11.00), siang (12.00–14.00), dan sore (15.00–17.00). Untuk menjaga konsistensi, seluruh pengambilan data—terutama pada sesi siang—dilakukan sebelum makan siang guna meminimalkan variasi akibat efek fisiologis pasca makan.

Untuk mengurangi pengaruh faktor eksternal, partisipan diminta untuk tidak mengonsumsi kafein dan tidak merokok sebelum sesi eksperimen, serta memastikan waktu tidur minimal tujuh jam sebelum partisipasi. Kepatuhan terhadap instruksi ini dikonfirmasi melalui laporan mandiri.

#### 2.4. Akuisisi Data

Sinyal elektroensefalografi (EEG) direkam untuk menangkap korelat neural dari beban kerja kognitif. Data EEG diperoleh menggunakan perangkat Emotiv Insight dengan penempatan elektroda berdasarkan sistem internasional 10–20. Analisis difokuskan pada lokasi elektroda frontal AF3 dan AF4 yang berkaitan dengan kontrol kognitif, perhatian, dan memori kerja. Sinyal direkam dengan frekuensi sampling 128 Hz dan direferensikan menggunakan *common mode sense* (CMS) dan *driven right leg* (DRL). Filter band-pass 4–45 Hz diterapkan untuk menghilangkan drift frekuensi rendah dan noise frekuensi tinggi. Nilai *Average Power* (AP) dihitung untuk gelombang frekuensi Theta (4–8 Hz), Alpha (8–12 Hz), Beta Low (12–16 Hz), Beta High (16–25 Hz), dan Gamma (25–45 Hz), yang dikenal sebagai indikator sensitif terhadap perubahan beban kerja kognitif.

Respons kardiovaskular diukur menggunakan variabilitas denyut jantung (*heart rate variability*/HRV) yang diperoleh dari perangkat Polar H10 Heart Rate Sensor. Sinyal HRV direkam secara kontinu selama setiap kondisi tugas. Proses prapengolahan meliputi deteksi dan koreksi artefak serta denyut tidak teratur menggunakan prosedur penyaringan standar dengan perangkat lunak Kubios HRV Scientific. Parameter HRV dihitung berdasarkan segmen yang sesuai dengan masing-masing kondisi eksperimen, meliputi *mean heart rate* (Mean HR), *root mean square of successive differences* (RMSSD), standar deviasi interval normal (SDNN), serta komponen domain frekuensi seperti *low-frequency power* (LF). Parameter-parameter ini digunakan untuk menggambarkan respons sistem saraf otonom terhadap beban kerja mental.

Beban kerja subjektif diukur menggunakan NASA Task Load Index (NASA-TLX). Dalam penelitian ini, seluruh subskala digunakan kecuali dimensi tuntutan fisik (*physical demand*), karena tugas yang diberikan tidak melibatkan aktivitas fisik yang signifikan. Skor total NASA-TLX tanpa pembobotan digunakan untuk merepresentasikan beban kerja yang dirasakan pada setiap kondisi eksperimen.

Selain itu, kinerja tugas diukur menggunakan *error rate*, yaitu proporsi jawaban yang salah dibandingkan dengan total respons pada setiap kondisi. Kombinasi pengukuran fisiologis, subjektif, dan kinerja ini memberikan perspektif yang saling melengkapi dalam mengevaluasi beban kerja kognitif.

#### 2.5. Analisis Statistik

Sebelum analisis inferensial dilakukan, data diperiksa untuk memastikan kelengkapan dan kesesuaian terhadap asumsi distribusi. Normalitas variabel dependen dievaluasi menggunakan uji Shapiro–Wilk yang dikombinasikan dengan inspeksi visual. Statistik deskriptif dihitung untuk seluruh variabel beban kerja pada setiap kondisi tingkat kesulitan tugas dan waktu kerja.

Untuk menguji pengaruh tingkat kesulitan tugas dan waktu kerja terhadap beban kerja kognitif, digunakan model *linear mixed effects*. Model terpisah dibangun untuk setiap variabel dependen, dengan tingkat kesulitan tugas dan waktu sebagai efek tetap (*fixed effects*), serta partisipan sebagai efek acak (*random effect*) untuk mengakomodasi pengukuran berulang.

Apabila ditemukan efek yang signifikan, dilakukan analisis lanjutan (*post hoc*) untuk mengeksplorasi perbedaan antar kondisi. Selain itu, analisis korelasi dilakukan untuk mengkaji hubungan antara indikator fisiologis dan subjektif. Seluruh analisis statistik dilakukan menggunakan tingkat signifikansi standar.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil analisis statistik yang dilakukan untuk mengkaji pengaruh tingkat kesulitan tugas dan waktu kerja terhadap beban kerja kognitif, disertai dengan pembahasan yang terintegrasi berdasarkan indikator neural, kardiovaskular, subjektif, dan kinerja.

#### 3.1. Statistik Deskriptif

Statistik deskriptif berupa nilai rata-rata dan standar deviasi dihitung untuk seluruh variabel dependen pada setiap kondisi tingkat kesulitan tugas dan waktu kerja ditunjukkan oleh Tabel 1. Untuk pengukuran EEG, nilai AP gelombang theta menunjukkan nilai yang lebih tinggi pada kondisi tugas sulit dibandingkan tugas mudah, dengan perbedaan relatif sekitar 10–16% pada sesi siang dan sore. Pola ini sejalan dengan temuan bahwa aktivitas theta, khususnya pada area frontal dan anterior parietal, telah banyak dikaitkan dengan kontrol kognitif, keterlibatan memori kerja, dan upaya mental [11].

Tabel 1. Statistik deskriptif dari semua variabel dependen.

| Variabel              | Mudah             | Sulit             | Mudah             | Sulit             | Mudah             | Sulit              |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
|                       | Pagi              | Pagi              | Siang             | Siang             | Sore              | Sore               |
| AP Theta (dB)         | 19,432 ± 1,433    | 19,181 ± 1,184    | 14,721 ± 5,782    | 17,079 ± 3,221    | 14,953 ± 5,063    | 16,506 ± 4,337     |
| AP Alpha (dB)         | 17,766 ± 1,039    | 16,238 ± 1,098    | 17,271 ± 0,963    | 13,836 ± 3,219    | 16,272 ± 1,230    | 12,553 ± 4,443     |
| AP Beta Low (dB)      | 13,721 ± 1,632    | 15,797 ± 0,780    | 12,490 ± 2,083    | 14,533 ± 1,623    | 12,053 ± 2,001    | 12,798 ± 2,158     |
| AP Beta High (dB)     | 15,052 ± 1,338    | 15,404 ± 1,045    | 15,636 ± 1,380    | 16,190 ± 1,369    | 14,258 ± 1,783    | 10,842 ± 7,283     |
| AP Gamma (dB)         | 16,944 ± 1,439    | 18,206 ± 1,009    | 17,786 ± 1,172    | 19,774 ± 0,655    | 20,366 ± 0,624    | 19,346 ± 0,757     |
| Mean HR (bpm)         | 85,850 ± 11,684   | 83,604 ± 10,664   | 82,96 ± 10,354    | 83,412 ± 9,140    | 84,593 ± 11,692   | 84,836 ± 11,617    |
| RMSSD (ms)            | 21,714 ± 12,930   | 22,278 ± 12,602   | 25,296 ± 14,371   | 24,174 ± 11,887   | 24,285 ± 12,784   | 24,992 ± 14,340    |
| SDNN (ms)             | 21,441 ± 10,634   | 24,743 ± 11,882   | 23,469 ± 11,064   | 26,429 ± 10,980   | 23,366 ± 11,439   | 26,709 ± 15,121    |
| LF (ms <sup>2</sup> ) | 229,236 ± 201,650 | 385,846 ± 345,296 | 239,104 ± 187,935 | 387,786 ± 311,559 | 273,116 ± 281,308 | 562,710 ± 1030,035 |
| Total NASA-TLX        | 234,05 ± 64,454   | 353,75 ± 38,419   | 233,75 ± 46,421   | 286,25 ± 29,553   | 321 ± 59,595      | 351 ± 33,701       |
| Error Rate (%)        | 12,322 ± 16,328   | 29,446 ± 16,196   | 15,353 ± 21,7     | 22,102 ± 14,56    | 14,318 ± 22,45    | 38,546 ± 18,289    |

Sebaliknya, aktivitas pada gelombang Alpha menunjukkan nilai AP yang lebih rendah pada kondisi tugas sulit dibandingkan tugas mudah, dengan penurunan berkisar antara 9% hingga 20% pada seluruh waktu pengukuran. Penurunan aktivitas Alpha umumnya diinterpretasikan sebagai indikator aktivasi kortikal dan keterlibatan atensi, yang mencerminkan pelepasan inhibisi fungsional untuk mendukung pemrosesan informasi yang relevan dengan tugas [11][13].

Untuk gelombang Beta, dilakukan pemisahan antara Beta Low dan Beta High untuk memperoleh interpretasi yang lebih detail. Pada Beta Low, nilai AP menunjukkan peningkatan yang konsisten pada kondisi tugas sulit dibandingkan tugas mudah, dengan kenaikan sekitar 13,8% pada pagi hari, 16,3% pada siang hari, dan 6,2% pada sore hari. Pola ini mengindikasikan peningkatan keterlibatan atensi berkelanjutan (*sustained attention*) selama tugas dengan tingkat kesulitan yang lebih tinggi [22].

Sementara itu, pada Beta High, peningkatan AP pada kondisi sulit relatif lebih moderat dan bervariasi antar waktu. Pada pagi hari, perbedaan antara kondisi sulit dan mudah sangat kecil (~2,3), sedangkan pada siang hari peningkatan mencapai sekitar 3,6%. Namun, pada sore hari justru terjadi penurunan yang cukup besar pada kondisi sulit dibandingkan mudah, yaitu sekitar -23,8%. Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun Beta High umumnya dikaitkan dengan peningkatan beban kognitif dan tekanan mental, responsnya dapat dipengaruhi oleh faktor waktu kerja, seperti kelelahan atau penurunan kewaspadaan pada sore hari [22].

Sementara itu, nilai AP pada gelombang Gamma secara umum menunjukkan peningkatan sepanjang hari, dengan nilai tertinggi pada kondisi tugas mudah di sesi sore. Aktivitas Gamma juga diketahui berkaitan dengan pemrosesan kognitif tingkat tinggi dan integrasi informasi, serta peningkatan sinkronisasi neuronal selama tugas kompleks [21].

Pengukuran denyut jantung juga menunjukkan perbedaan sistematis antara tingkat kesulitan tugas. Nilai Mean HR mengalami sedikit peningkatan pada kondisi tugas sulit dibandingkan tugas mudah pada sesi siang dan sore (sekitar 0,3–0,5%). Namun, perbedaan ini relatif kecil dan tidak konsisten, yang sejalan dengan temuan bahwa mean heart rate merupakan indikator yang relatif kasar dalam mengukur beban kerja mental dan dipengaruhi oleh berbagai faktor eksternal [14]. Parameter HRV lainnya menunjukkan pola yang relatif konsisten, di mana nilai SDNN lebih tinggi pada tugas sulit dibandingkan tugas mudah di seluruh sesi, dengan peningkatan sekitar 12–15%. SDNN mencerminkan pengaruh gabungan sistem saraf simpatik dan parasimpatik serta sering diinterpretasikan sebagai indikator global fleksibilitas regulasi otonom [15]. Untuk komponen LF, pola umum menunjukkan bahwa nilai LF pada kondisi tugas sulit lebih tinggi dibandingkan tugas mudah, meskipun interpretasinya perlu dilakukan secara hati-hati karena mencerminkan kombinasi modulasi simpatik dan mekanisme barorefleks.

Beban kerja subjektif yang diukur menggunakan skor total NASA-TLX secara konsisten lebih tinggi pada kondisi tugas sulit di seluruh waktu pengukuran, dengan peningkatan relatif berkisar antara 9% hingga 51%. NASA-TLX mengintegrasikan berbagai dimensi beban kerja, termasuk tuntutan mental, usaha, dan frustrasi, sehingga sensitif terhadap variasi beban kerja akibat faktor tugas maupun konteks [18]. Pada evaluasi kinerja tugas yang diukur menggunakan error rate, ditemukan pola yang serupa dengan beban kerja subjektif, di mana error rate lebih tinggi pada tugas sulit dibandingkan tugas mudah. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan tuntutan kognitif tidak hanya dirasakan secara subjektif tetapi juga berdampak pada penurunan performa.

### 3.2. Pengaruh Tingkat Kesulitan Tugas dan Waktu Kerja

Model *linear mixed-effects* dibangun secara terpisah untuk setiap variabel dependen guna menguji pengaruh tingkat kesulitan tugas dan waktu kerja dengan mempertimbangkan variabilitas antar individu ditunjukkan pada Tabel 2. Pada seluruh model, *intercept* merepresentasikan kondisi tugas mudah pada pagi hari dan menunjukkan signifikansi statistik ( $p < 0,001$ ), yang mengindikasikan *estimasi baseline* yang stabil. *Estimated marginal means* disajikan pada Gambar 1.

Tabel 2. Model linear mixed effects dari semua variabel dependen.

| Variabel     | Fixed Effect              | Estimate | SE    | t      | p-value |
|--------------|---------------------------|----------|-------|--------|---------|
| AP Theta     | Intercept (Mudah-Pagi)    | 19,432   | 0,852 | 22,805 | <0,001  |
|              | Kesulitan Tugas (Sulit)   | -0,251   | 0,966 | -0,260 | 0,796   |
|              | Waktu (Siang)             | -4,711   | 0,966 | -4,875 | <0,001  |
|              | Waktu (Sore)              | -4,479   | 0,966 | -4,635 | <0,001  |
|              | Tingkat Kesulitan x Siang | 2,609    | 1,367 | 1,909  | 0,059   |
|              | Tingkat Kesulitan x Sore  | 1,804    | 1,367 | 1,320  | 0,190   |
| AP Alpha     | Intercept (Mudah-Pagi)    | 17,766   | 0,525 | 33,836 | <0,001  |
|              | Kesulitan Tugas (Sulit)   | -1,528   | 0,659 | -2,317 | 0,023   |
|              | Waktu (Siang)             | -0,495   | 0,659 | -0,751 | 0,454   |
|              | Waktu (Sore)              | -1,494   | 0,659 | -2,266 | 0,026   |
|              | Tingkat Kesulitan x Siang | -1,907   | 0,932 | -2,045 | 0,044   |
|              | Tingkat Kesulitan x Sore  | -2,191   | 0,932 | -2,350 | 0,021   |
| AP Beta Low  | Intercept (Mudah-Pagi)    | 13,721   | 0,387 | 35,465 | <0,001  |
|              | Kesulitan Tugas (Sulit)   | 2,076    | 0,437 | 4,745  | <0,001  |
|              | Waktu (Siang)             | -1,231   | 0,437 | -2,814 | 0,006   |
|              | Waktu (Sore)              | -1,668   | 0,437 | -3,814 | <0,001  |
|              | Tingkat Kesulitan x Siang | -0,034   | 0,619 | -0,054 | 0,957   |
|              | Tingkat Kesulitan x Sore  | -1,331   | 0,619 | -2,151 | 0,034   |
| AP Beta High | Intercept (Mudah-Pagi)    | 15,052   | 0,706 | 21,333 | <0,001  |
|              | Kesulitan Tugas (Sulit)   | 0,352    | 0,925 | 0,381  | 0,704   |
|              | Waktu (Siang)             | 0,584    | 0,925 | 0,632  | 0,529   |
|              | Waktu (Sore)              | -0,794   | 0,925 | -0,858 | 0,393   |
|              | Tingkat Kesulitan x Siang | 0,202    | 1,308 | 0,155  | 0,877   |
|              | Tingkat Kesulitan x Sore  | -3,768   | 1,308 | -2,882 | 0,005   |
| AP Gamma     | Intercept (Mudah-Pagi)    | 16,944   | 0,215 | 78,725 | <0,001  |
|              | Kesulitan Tugas (Sulit)   | 1,262    | 0,271 | 4,653  | <0,001  |

| Variabel       | Fixed Effect              | Estimate | SE      | t      | p-value |
|----------------|---------------------------|----------|---------|--------|---------|
| Mean HR        | Waktu (Siang)             | 0,842    | 0,271   | 3,104  | 0,002   |
|                | Waktu (Sore)              | 3,422    | 0,271   | 12,621 | <0,001  |
|                | Tingkat Kesulitan x Siang | 0,727    | 0,383   | 1,896  | 0,061   |
|                | Tingkat Kesulitan x Sore  | -2,281   | 0,383   | -5,950 | <0,001  |
|                | Intercept (Mudah-Pagi)    | 85,850   | 2,375   | 36,144 | <0,001  |
|                | Kesulitan Tugas (Sulit)   | -2,246   | 1,464   | -1,534 | 0,128   |
|                | Waktu (Siang)             | -2,889   | 1,464   | -1,973 | 0,051   |
|                | Waktu (Sore)              | -1,256   | 1,464   | -0,858 | 0,393   |
|                | Tingkat Kesulitan x Siang | 2,697    | 2,071   | 1,303  | 0,196   |
|                | Tingkat Kesulitan x Sore  | 2,488    | 2,071   | 1,202  | 0,232   |
|                | Intercept (Mudah-Pagi)    | 21,715   | 2,873   | 7,557  | <0,001  |
|                | Kesulitan Tugas (Sulit)   | 0,563    | 2,088   | 0,270  | 0,788   |
| RMSSD          | Waktu (Siang)             | 3,581    | 2,088   | 1,715  | 0,089   |
|                | Waktu (Sore)              | 2,571    | 2,088   | 1,231  | 0,221   |
|                | Tingkat Kesulitan x Siang | -1,685   | 2,953   | -0,571 | 0,570   |
|                | Tingkat Kesulitan x Sore  | 0,144    | 2,953   | 0,049  | 0,961   |
|                | Intercept (Mudah-Pagi)    | 21,441   | 2,604   | 8,233  | <0,001  |
|                | Kesulitan Tugas (Sulit)   | 3,302    | 1,653   | 1,998  | 0,049   |
|                | Waktu (Siang)             | 2,029    | 1,653   | 1,227  | 0,223   |
|                | Waktu (Sore)              | 1,925    | 1,653   | 1,165  | 0,247   |
| SDNN           | Tingkat Kesulitan x Siang | -0,342   | 2,338   | -0,146 | 0,884   |
|                | Tingkat Kesulitan x Sore  | 0,041    | 2,338   | 0,017  | 0,986   |
|                | Intercept (Mudah-Pagi)    | 229,236  | 106,488 | 2,153  | 0,035   |
|                | Kesulitan Tugas (Sulit)   | 156,611  | 115,942 | 1,351  | 0,180   |
|                | Waktu (Siang)             | 9,868    | 115,942 | 0,085  | 0,932   |
|                | Waktu (Sore)              | 43,880   | 115,942 | 0,378  | 0,706   |
|                | Tingkat Kesulitan x Siang | -7,928   | 163,967 | -0,048 | 0,962   |
|                | Tingkat Kesulitan x Sore  | 132,984  | 163,967 | 0,811  | 0,419   |
| LF             | Intercept (Mudah-Pagi)    | 234,05   | 10,28   | 22,77  | <0,001  |
|                | Kesulitan Tugas (Sulit)   | 119,70   | 12,09   | 9,9    | <0,001  |
|                | Waktu (Siang)             | -0,30    | 12,09   | -0,025 | 0,980   |
|                | Waktu (Sore)              | 86,95    | 12,09   | 7,191  | <0,001  |
|                | Tingkat Kesulitan x Siang | -67,20   | 17,10   | -3,930 | <0,001  |
|                | Tingkat Kesulitan x Sore  | -89,70   | 17,10   | -5,246 | <0,001  |
|                | Intercept (Mudah-Pagi)    | 12,322   | 4,029   | 3,058  | 0,003   |
|                | Kesulitan Tugas (Sulit)   | 17,124   | 5,222   | 3,279  | 0,001   |
| Total NASA-TLX | Waktu (Siang)             | 3,031    | 5,222   | 0,580  | 0,562   |
|                | Waktu (Sore)              | 1,996    | 5,222   | 0,382  | 0,703   |
|                | Tingkat Kesulitan x Siang | -10,375  | 7,385   | -1,405 | 0,163   |
|                | Tingkat Kesulitan x Sore  | 7,104    | 7,385   | 0,962  | 0,338   |
|                | Intercept (Mudah-Pagi)    | 12,322   | 4,029   | 3,058  | 0,003   |
|                | Kesulitan Tugas (Sulit)   | 17,124   | 5,222   | 3,279  | 0,001   |
|                | Waktu (Siang)             | 3,031    | 5,222   | 0,580  | 0,562   |
|                | Waktu (Sore)              | 1,996    | 5,222   | 0,382  | 0,703   |
| Error Rate     | Tingkat Kesulitan x Siang | -10,375  | 7,385   | -1,405 | 0,163   |
|                | Tingkat Kesulitan x Sore  | 7,104    | 7,385   | 0,962  | 0,338   |

Pada pengukuran EEG, AP gelombang Theta dipengaruhi secara signifikan oleh waktu kerja ( $p < 0,001$ ), sementara tingkat kesulitan tugas tidak menunjukkan pengaruh utama yang signifikan ( $p > 0,05$ ). Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas Theta lebih sensitif terhadap variasi kondisi kognitif sepanjang hari, seperti perubahan kewaspadaan dan kelelahan [12]. Dapat disimpulkan menjawab tujuan penelitian dimana variasi waktu terbukti memainkan peran yang lebih dominan dibandingkan kompleksitas tugas pada komponen Theta. Hasil ini juga memperluas temuan sebelumnya yang umumnya menekankan sensitivitas Theta terhadap

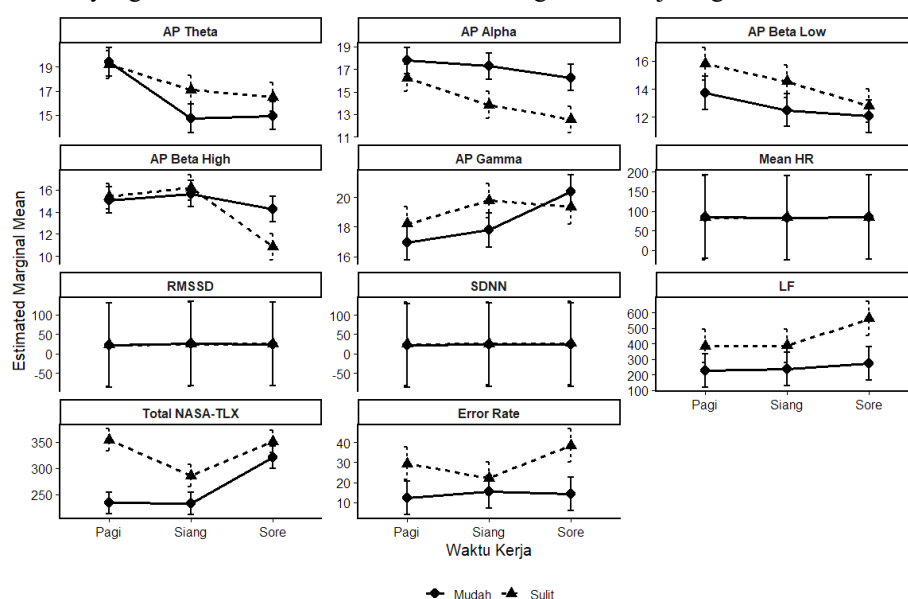
beban kerja, dengan menunjukkan bahwa dalam konteks desain tugas terkontrol, faktor waktu dapat menjadi determinan utama [11][12].

Sebaliknya, aktivitas gelombang Alpha menunjukkan pengaruh signifikan dari tingkat kesulitan tugas ( $p = 0,023$ ) dan waktu kerja ( $p = 0,026$ ), serta interaksi signifikan antara keduanya ( $p < 0,05$ ). Temuan ini menunjukkan bahwa aktivitas Alpha merupakan indikator yang sensitif terhadap perubahan tingkat kesulitan tugas dan dipengaruhi oleh konteks temporal. Hasil ini konsisten dengan sebagian besar literatur yang melaporkan desinkronisasi Alpha sebagai indikator peningkatan beban kerja mental. Penurunan aktivitas Alpha mencerminkan peningkatan keterlibatan atensi dan aktivasi kortikal selama pemrosesan kognitif [11][13]. Namun dalam penelitian ini ditunjukkan secara lebih spesifik bahwa efek tersebut dimodulasi oleh waktu kerja. Hal ini mengindikasikan bahwa hubungan antara Alpha dan beban kerja tidak bersifat statis, melainkan dipengaruhi oleh dinamika fisiologis harian.

Pada Beta Low, ditemukan pengaruh utama yang signifikan dari tingkat kesulitan tugas ( $p < 0,001$ ) serta waktu kerja, baik pada sesi siang ( $p = 0,006$ ) maupun sore ( $p < 0,001$ ). Selain itu, terdapat interaksi signifikan antara tingkat kesulitan tugas dan waktu pada sesi sore ( $p = 0,034$ ), namun tidak pada sesi siang ( $p > 0,05$ ). Hasil ini menunjukkan bahwa aktivitas Beta Low sensitif terhadap peningkatan tuntutan kognitif, sekaligus dipengaruhi oleh faktor waktu, di mana efek kesulitan tugas cenderung melemah pada sore hari. Temuan ini memberikan indikasi bahwa Beta Low tidak hanya merefleksikan keterlibatan atensi berkelanjutan, tetapi juga sensitif terhadap kondisi kelelahan yang berkembang. Berbeda dengan beberapa penelitian sebelumnya yang melaporkan peningkatan Beta sebagai respons linear terhadap beban kerja [22], hasil dalam penelitian ini menunjukkan adanya pelemahan efek pada periode sore, yang mengindikasikan kemungkinan keterbatasan sumber daya kognitif (*cognitive resource depletion*).

Sementara itu, pada Beta High tidak ditemukan pengaruh utama yang signifikan baik dari tingkat kesulitan tugas ( $p = 0,704$ ) maupun waktu kerja ( $p > 0,05$ ). Namun demikian, interaksi antara tingkat kesulitan tugas dan waktu pada sesi sore menunjukkan signifikansi ( $p = 0,005$ ). Temuan ini mengindikasikan bahwa respons Beta High terhadap peningkatan kesulitan tugas bersifat kontekstual dan bergantung pada waktu, dengan penurunan aktivitas yang signifikan pada kondisi tugas sulit di sore hari. Pola ini mengarah pada kemungkinan adanya pengaruh kelelahan atau penurunan kewaspadaan yang memodulasi respons beban kognitif pada frekuensi Beta tinggi. Berbeda dengan asumsi umum bahwa Beta High meningkat seiring dengan peningkatan beban kerja mental [22], hasil penelitian ini justru menunjukkan pola non-linear yang bergantung pada interaksi kondisi. Hal ini menunjukkan bahwa Beta High mungkin lebih merefleksikan dinamika regulasi kognitif tingkat tinggi, termasuk penurunan efisiensi pemrosesan akibat kelelahan, dibandingkan sekadar intensitas beban kerja.

Aktivitas gelombang Gamma menunjukkan pengaruh signifikan dari tingkat kesulitan tugas ( $p < 0,001$ ) dan waktu kerja ( $p \leq 0,002$ ), serta interaksi signifikan terutama pada kondisi sore ( $p < 0,001$ ). Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas Gamma secara konsisten responsif terhadap peningkatan tuntutan kognitif [21], namun juga memperlihatkan bahwa sensitivitas tersebut tetap dipengaruhi oleh waktu kerja. Konsistensi efek Gamma dibandingkan indikator lainnya mengindikasikan bahwa komponen ini berpotensi menjadi indikator yang lebih robust dalam sistem monitoring beban kerja kognitif berbasis EEG.



Gambar 1. Estimated marginal means dari EEG, HRV, penilaian subjektif, dan error rate sepanjang waktu dan kesulitan tugas

Pada indikator kardiovaskular, mean heart rate dan RMSSD tidak menunjukkan pengaruh signifikan baik sebagai efek utama maupun interaksi ( $p > 0,05$ ). Sebaliknya, SDNN menunjukkan pengaruh signifikan dari tingkat kesulitan tugas ( $p < 0,05$ ), yang mengindikasikan bahwa variabilitas denyut jantung secara keseluruhan lebih responsif terhadap beban kerja kognitif. RMSSD tidak menunjukkan perubahan signifikan, yang menunjukkan bahwa respons parasimpatik secara spesifik tidak dominan dalam kondisi ini [16]. Komponen LF tidak menunjukkan pengaruh signifikan baik dari tingkat kesulitan tugas maupun waktu kerja ( $p > 0,05$ ), meskipun terdapat indikasi variasi pada kondisi tertentu.

Beban kerja subjektif yang diukur menggunakan NASA-TLX menunjukkan pengaruh utama yang signifikan dari tingkat kesulitan tugas ( $p < 0,001$ ), serta pengaruh waktu kerja pada kondisi sore ( $p < 0,001$ ). Selain itu, terdapat interaksi signifikan antara tingkat kesulitan tugas dan waktu kerja ( $p < 0,001$ ). Sementara itu, error rate menunjukkan pengaruh utama yang signifikan dari tingkat kesulitan tugas ( $p = 0,001$ ), namun tidak menunjukkan pengaruh signifikan dari waktu kerja maupun interaksi ( $p > 0,05$ ). Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan beban kerja terutama dipengaruhi oleh kompleksitas tugas, dengan kemungkinan adanya strategi kompensasi dalam mempertahankan performa [19].

### 3.3. Analisis Lanjutan (post-Hoc)

Analisis post hoc dilakukan untuk mengeksplorasi lebih lanjut efek utama dan interaksi yang signifikan. Perbandingan berpasangan disesuaikan terhadap pengujian berganda. Hasil analisis meliputi perbedaan rata-rata, nilai  $t$ , *standard error*, nilai  $p$  yang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Simple effects dari tingkat kesulitan tugas pada waktu kerja berbeda.

| Variabel     | Waktu Kerja | Komparasi      | Perbedaan                    |             |        |         |
|--------------|-------------|----------------|------------------------------|-------------|--------|---------|
|              |             |                | Rata-Rata<br>(Sulit – Mudah) | SE          | t      | p-value |
| AP Theta     | Pagi        | Sulit vs Mudah | 0,251                        | 0,901 (19)  | 0,379  | 0,201   |
|              | Siang       | Sulit vs Mudah | -2,358                       | -3,000 (19) | 0,007  | 0,671   |
|              | Sore        | Sulit vs Mudah | -1,553                       | -1,541 (19) | 0,140  | 0,345   |
| AP Alpha     | Pagi        | Sulit vs Mudah | 1,528                        | 4,943 (19)  | <0,001 | 1,105   |
|              | Siang       | Sulit vs Mudah | 3,434                        | 6,129 (19)  | <0,001 | 1,370   |
|              | Sore        | Sulit vs Mudah | 3,719                        | 4,316 (19)  | <0,001 | 0,965   |
| AP Beta Low  | Pagi        | Sulit vs Mudah | -2,076                       | -5,562 (19) | <0,001 | 1,244   |
|              | Siang       | Sulit vs Mudah | -2,042                       | -6,590 (19) | <0,001 | 1,474   |
|              | Sore        | Sulit vs Mudah | -0,745                       | -1,776 (19) | 0,092  | 0,397   |
| AP Beta High | Pagi        | Sulit vs Mudah | -0,352                       | -1,167 (19) | 0,258  | 0,261   |
|              | Siang       | Sulit vs Mudah | -0,554                       | -2,884 (19) | 0,010  | 0,645   |
|              | Sore        | Sulit vs Mudah | 3,416                        | 2,457 (19)  | 0,024  | 0,549   |
| AP Gamma     | Pagi        | Sulit vs Mudah | -1,261                       | -4,273 (19) | <0,001 | 0,955   |
|              | Siang       | Sulit vs Mudah | -1,988                       | -9,495 (19) | <0,001 | 2,123   |
|              | Sore        | Sulit vs Mudah | 1,020                        | 6,254 (19)  | <0,001 | 1,398   |
| Mean HR      | Pagi        | Sulit vs Mudah | 2,246                        | 1,640 (19)  | 0,118  | 0,367   |
|              | Siang       | Sulit vs Mudah | -0,451                       | -0,570 (19) | 0,575  | 0,127   |
|              | Sore        | Sulit vs Mudah | -0,242                       | -0,517 (19) | 0,611  | 0,116   |
| RMSSD        | Pagi        | Sulit vs Mudah | -0,563                       | -0,574 (19) | 0,573  | 0,128   |
|              | Siang       | Sulit vs Mudah | 1,122                        | 0,494 (19)  | 0,627  | 0,110   |
|              | Sore        | Sulit vs Mudah | -0,707                       | -0,561 (19) | 0,582  | 0,125   |
| SDNN         | Pagi        | Sulit vs Mudah | -3,302                       | -3,289 (19) | 0,004  | 0,735   |
|              | Siang       | Sulit vs Mudah | -2,960                       | -2,466 (19) | 0,023  | 0,551   |
|              | Sore        | Sulit vs Mudah | -3,343                       | -2,480 (19) | 0,023  | 0,555   |
| LF           | Pagi        | Sulit vs Mudah | -156,611                     | -3,379 (19) | 0,003  | 0,755   |
|              | Siang       | Sulit vs Mudah | -148,682                     | -3,328 (19) | 0,004  | 0,744   |
|              | Sore        | Sulit vs Mudah | -289,594                     | -1,663 (19) | 0,113  | 0,372   |
|              | Pagi        | Sulit vs Mudah | -119,7                       | -9,935 (19) | <0,001 | 2,221   |

|            |       |                |         |             |        |       |
|------------|-------|----------------|---------|-------------|--------|-------|
| Total      | Siang | Sulit vs Mudah | -52,5   | -5,010 (19) | <0,001 | 1,120 |
| NASA-TLX   | Sore  | Sulit vs Mudah | -30     | -2,399 (19) | 0,027  | 0,536 |
|            | Pagi  | Sulit vs Mudah | -17,124 | -3,087 (19) | 0,006  | 0,690 |
| Error Rate | Siang | Sulit vs Mudah | -6,750  | -1,01 (19)  | 0,3254 | 0,226 |
|            | Sore  | Sulit vs Mudah | -24,229 | -3,825 (19) | 0,001  | 0,855 |

Pada gelombang Theta, perbedaan signifikan antara tugas sulit dan mudah hanya ditemukan pada sesi siang ( $p = 0,007$ ), sementara pada pagi dan sore tidak signifikan ( $p > 0,05$ ). Hal ini menunjukkan bahwa efek tingkat kesulitan tugas pada aktivitas Theta dipengaruhi oleh waktu kerja. Sebaliknya, aktivitas gelombang Alpha menunjukkan perbedaan signifikan antara tugas sulit dan mudah pada seluruh waktu pengukuran ( $p < 0,001$ ), dengan ukuran efek yang besar. Hal ini menegaskan bahwa Alpha merupakan indikator yang stabil dalam merefleksikan perubahan beban kerja kognitif.

Untuk gelombang Beta Low, hasil analisis post hoc menunjukkan bahwa perbedaan antara kondisi tugas sulit dan mudah tidak signifikan pada seluruh waktu pengukuran, baik pada pagi ( $p = 0,092$ ), siang ( $p > 0,05$ ), maupun sore ( $p > 0,05$ ). Meskipun secara deskriptif terdapat kecenderungan peningkatan nilai pada kondisi tugas sulit, hasil ini mengindikasikan bahwa perbedaan tersebut tidak cukup kuat secara statistik.

Sementara itu, pada gelombang Beta High, hasil post hoc juga tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kondisi tugas sulit dan mudah pada seluruh waktu pengukuran ( $p > 0,05$ ). Meskipun demikian, terdapat kecenderungan perubahan arah efek, khususnya pada sesi sore, di mana nilai rata-rata pada kondisi tugas sulit lebih rendah dibandingkan tugas mudah. Pola ini konsisten dengan hasil interaksi signifikan pada model LME, yang mengindikasikan bahwa respons Beta High terhadap tingkat kesulitan tugas bersifat kontekstual dan bergantung pada waktu kerja, meskipun tidak terdeteksi secara signifikan.

Pada gelombang Gamma, perbedaan signifikan antara tugas sulit dan mudah juga ditemukan pada seluruh waktu kerja ( $p < 0,001$ ), dengan ukuran efek besar hingga sangat besar. Hal ini menunjukkan sensitivitas yang tinggi terhadap peningkatan tuntutan kognitif.

Untuk indikator kardiovaskular, mean heart rate dan RMSSD tidak menunjukkan perbedaan signifikan pada seluruh kondisi ( $p > 0,05$ ). Sebaliknya, SDNN menunjukkan perbedaan signifikan antara tugas sulit dan mudah pada seluruh waktu ( $p < 0,05$ ), yang mengindikasikan sensitivitas terhadap tingkat kesulitan tugas. Komponen LF menunjukkan perbedaan signifikan pada pagi ( $p = 0,003$ ) dan siang ( $p = 0,004$ ), namun tidak pada sore ( $p > 0,05$ ).

Beban kerja subjektif menunjukkan perbedaan signifikan antara tugas sulit dan mudah pada seluruh waktu pengukuran ( $p < 0,05$  hingga  $p < 0,001$ ), sedangkan error rate menunjukkan perbedaan signifikan pada pagi ( $p < 0,01$ ) dan sore ( $p < 0,01$ ), tetapi tidak pada siang ( $p > 0,05$ ). Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh tingkat kesulitan tugas terhadap kinerja dapat bervariasi tergantung waktu kerja..

### 3.4. Hubungan Antar Pengukuran Multimodal

Analisis korelasi Pearson dilakukan untuk mengkaji hubungan antara indikator neural, kardiovaskular, subjektif, dan kinerja. Koefisien korelasi Pearson beserta nilai  $p$  disajikan pada Tabel 4 dan Tabel 5, dengan signifikansi ditetapkan pada  $p < 0,05$ .

Tabel 4. Korelasi Pearson antara fitur spektral EEG dengan indikator beban kerja fisiologis, subjektif, dan berbasis kinerja

| Variabel        | Mean HR       | RMSSD          | SDNN           | LF             | Total<br>NASA-TLX | Error Rate     |
|-----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|
| AP Theta        | 0,053 (0,564) | 0,0043 (0,962) | 0,069 (0,452)  | 0,14 (0,134)   | 0,19 (0,041)      | 0,001 (0,917)  |
| AP Alpha        | 0,056 (0,543) | -0,033 (0,723) | -0,072 (0,437) | -0,052 (0,574) | -0,27 (0,032)     | -0,19 (0,034)  |
| AP Beta<br>Low  | 0,15 (0,109)  | -0,15 (0,10)   | -0,091 (0,325) | -0,048 (0,601) | 0,15 (0,096)      | 0,018 (0,842)  |
| AP Beta<br>High | 0,015 (0,87)  | -0,034 (0,71)  | -0,053 (0,568) | -0,042 (0,647) | -0,15 (0,094)     | -0,12 (0,201)  |
| AP Gamma        | 0,063 (0,494) | 0,042 (0,65)   | 0,087 (0,344)  | 0,12 (0,181)   | 0,36 (<0,001)     | 0,0042 (0,963) |

Tabel 5. Korelasi Pearson antara indikator beban kerja kardiovaskular, beban kerja subjektif, dan kinerja tugas.

| Variabel | Waktu Kerja    | Komparasi      |
|----------|----------------|----------------|
| Mean HR  | 0,096 (0,298)  | -0,005 (0,954) |
| RMSSD    | -0,022 (0,808) | 0,049 (0,599)  |
| SDNN     | 0,07 (0,446)   | 0,084 (0,363)  |
| LF       | 0,14 (0,119)   | 0,049 (0,595)  |

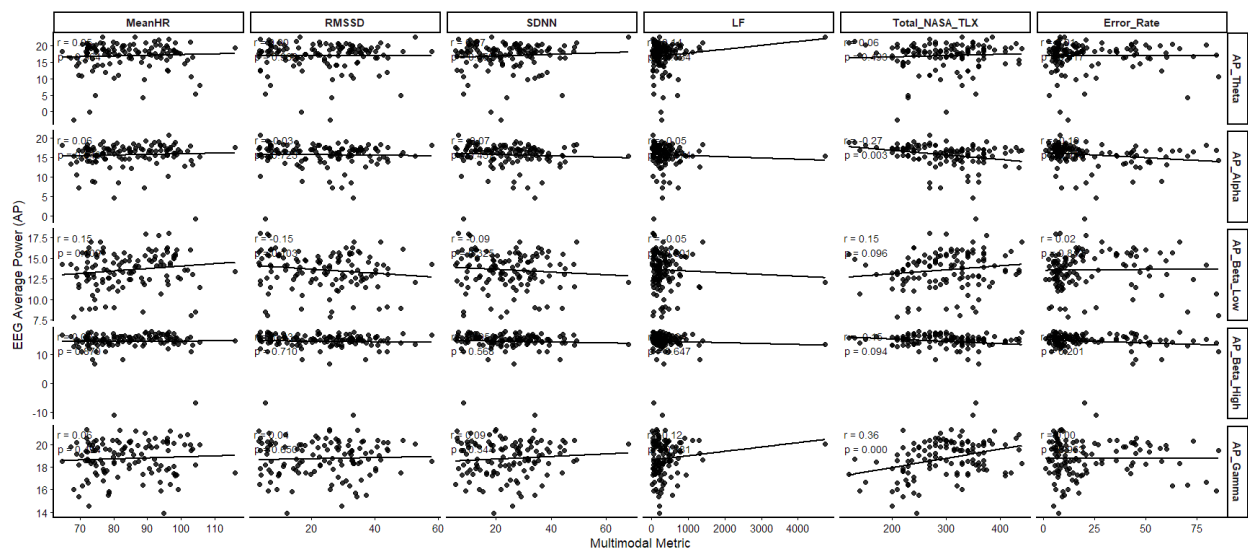
Untuk AP gelombang Theta, tidak ditemukan korelasi yang signifikan secara statistik dengan mean heart rate, RMSSD, SDNN, maupun error rate. Namun, ditemukan korelasi yang lemah tetapi signifikan secara statistik antara daya rata-rata pita Theta dan skor total NASA-TLX ( $p < 0,05$ ).

Aktivitas gelombang Alpha menunjukkan hubungan signifikan dengan beban kerja subjektif ( $p < 0,05$ ) dan *error rate* ( $p < 0,05$ ), yang mengindikasikan keterkaitan antara persepsi beban kerja dan performa. Hal ini sejalan dengan peran Alpha dalam mencerminkan keterlibatan kognitif dan efisiensi pemrosesan [20]. Temuan ini menunjukkan bahwa aktivitas Alpha tidak hanya merefleksikan proses kognitif internal, tetapi juga memiliki keterkaitan langsung dengan persepsi subjektif dan hasil performa. Dengan demikian, Alpha dapat dipandang sebagai jembatan antara proses neural dan pengalaman kognitif yang dirasakan individu. Hasil ini juga memperkuat temuan sebelumnya yang melaporkan hubungan antara desinkronisasi Alpha dan peningkatan tuntutan tugas, namun dalam penelitian ini diperluas dengan menunjukkan keterkaitannya secara simultan dengan performa aktual.

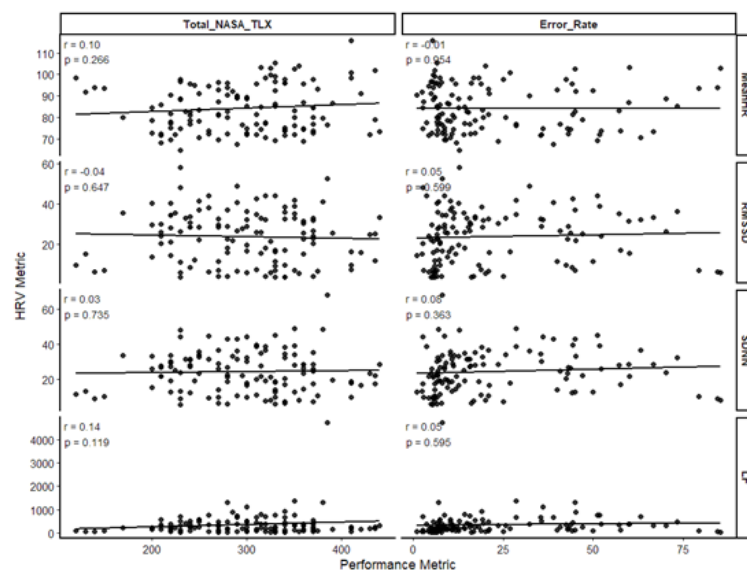
Untuk gelombang Beta Low, tidak ditemukan korelasi yang signifikan dengan indikator kardiovaskular (Mean HR, RMSSD, SDNN, LF), subjektif (NASA-TLX), maupun kinerja (*error rate*) ( $p > 0,05$ ). Meskipun demikian, terdapat kecenderungan korelasi positif dengan Mean HR ( $r = 0,15$ ;  $p = 0,109$ ) dan NASA-TLX ( $r = 0,15$ ;  $p = 0,096$ ), serta korelasi negatif dengan RMSSD ( $r = -0,15$ ;  $p = 0,10$ ). Pola ini mengindikasikan bahwa peningkatan aktivitas Beta Low mungkin berkaitan dengan peningkatan aktivasi fisiologis dan persepsi beban kerja, meskipun hubungan tersebut tidak cukup kuat untuk mencapai signifikansi statistik. Hal ini menunjukkan bahwa Beta Low kemungkinan merefleksikan aspek spesifik dari beban kerja, seperti keterlibatan atensi berkelanjutan, yang tidak selalu sejalan secara langsung dengan persepsi subjektif maupun respons otonom. Temuan ini berbeda dengan beberapa studi yang melaporkan hubungan lebih kuat antara Beta dan indikator fisiologis [22].

Sementara itu, pada gelombang Beta High juga tidak ditemukan korelasi yang signifikan dengan seluruh indikator multimodal ( $p > 0,05$ ). Nilai korelasi yang relatif kecil dan tidak konsisten, seperti hubungan negatif dengan NASA-TLX ( $r = -0,15$ ;  $p = 0,094$ ) dan *error rate* ( $r = -0,12$ ;  $p = 0,201$ ). Hasil ini menegaskan bahwa Beta High kemungkinan merepresentasikan dinamika regulasi kognitif yang lebih kompleks dan tidak dapat direduksi menjadi hubungan linier sederhana dengan indikator lain. Berbeda dengan asumsi umum bahwa peningkatan frekuensi tinggi selalu berkorelasi dengan peningkatan beban kerja, temuan ini menunjukkan bahwa pada kondisi tertentu, terutama yang melibatkan kelelahan, respons Beta High dapat terdisosiasi dari persepsi subjektif maupun performa.

Aktivitas gelombang Gamma menunjukkan korelasi positif yang signifikan dengan NASA-TLX ( $p < 0,001$ ). Temuan ini menunjukkan konsistensi antara aktivitas neural tingkat tinggi dan persepsi subjektif beban kerja, yang mengindikasikan bahwa Gamma merupakan indikator yang sensitif terhadap intensitas pemrosesan kognitif yang dirasakan individu, sehingga berpotensi menjadi kandidat utama dalam sistem monitoring beban kerja berbasis EEG. Hasil ini juga sejalan dengan literatur yang mengaitkan aktivitas Gamma dengan integrasi informasi dan beban kognitif kompleks [21].



Gambar 2. Korelasi pearson antara AP EEG dan pengukuran beban kerja multimodal



Gambar 3. Korelasi pearson antara metrik HRV dan pengukuran kinerja

Sebaliknya, indikator kardiovaskular tidak menunjukkan hubungan signifikan dengan indikator subjektif maupun kinerja ( $p > 0,05$ ). Tidak ditemukannya hubungan signifikan antara indikator kardiovaskular dengan indikator lainnya menunjukkan adanya kemungkinan disosiasi antara respons sistem saraf otonom dan aktivitas kognitif yang diukur secara neural. Berbeda dengan beberapa penelitian yang melaporkan hubungan antara HRV dan beban kerja mental [14][16]. Hal ini menunjukkan bahwa setiap modalitas pengukuran mencerminkan aspek yang berbeda dari beban kerja kognitif, sehingga mendukung penggunaan pendekatan multimodal untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif [21].

### 3.5. Implikasi terhadap Pengukuran dan Monitoring Beban Kerja

Secara keseluruhan, temuan penelitian ini menyoroti pentingnya pendekatan multimodal dalam menilai beban kerja kognitif, karena berbagai indikator menunjukkan tingkat sensitivitas yang berbeda terhadap tingkat kesulitan tugas dan variasi waktu kerja. Indikator EEG, khususnya aktivitas gelombang Alpha dan Gamma, menunjukkan respons yang konsisten terhadap tuntutan tugas. Sementara itu, gelombang Beta memberikan wawasan tambahan yang lebih kontekstual. Beta Low menunjukkan sensitivitas terhadap tingkat kesulitan tugas dan waktu kerja, yang mencerminkan keterlibatan atensi berkelanjutan, meskipun efeknya tidak selalu muncul. Sebaliknya, Beta High tidak menunjukkan hubungan yang konsisten, namun lebih dipengaruhi oleh interaksi

dengan waktu kerja, yang mengindikasikan perannya dalam merefleksikan dinamika kelelahan atau perubahan kewaspadaan. Di sisi lain, indikator kardiovaskular dan subjektif memberikan informasi tambahan.

Secara praktis, temuan ini mengindikasikan bahwa penjadwalan tugas perlu mempertimbangkan waktu kerja. Tugas dengan kompleksitas tinggi dan risiko kesalahan tinggi lebih optimal dilakukan pada periode siang, ketika efisiensi kognitif berada pada kondisi terbaik. Sebaliknya, periode sore menunjukkan peningkatan error dan indikasi kelelahan, sehingga sebaiknya dihindari untuk tugas kritis dan lebih difokuskan pada aktivitas rutin atau administratif.

Selain itu, pengelolaan tekanan waktu menjadi faktor penting, terutama pada kondisi beban kerja tinggi. Kombinasi tugas kompleks dan tekanan waktu yang tinggi, khususnya pada periode sore, berpotensi meningkatkan risiko *overload* dan penurunan performa. Oleh karena itu, penyediaan buffer waktu, pembatasan multitasking berbasis tenggat, serta penerapan jeda kerja singkat (*micro-break*) dapat membantu menjaga stabilitas kognitif dan mengurangi akumulasi kelelahan.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini mengkaji pengaruh tingkat kesulitan tugas dan waktu kerja terhadap beban kerja kognitif menggunakan kerangka multimodal yang mengombinasikan pengukuran elektrofisiologis, kardiovaskular, subjektif, dan berbasis kinerja. Melalui penerapan analisis deskriptif, pemodelan *linear mixed effects*, perbandingan *post hoc*, serta analisis korelasi, penelitian ini memberikan gambaran terintegrasi mengenai dinamika beban kerja pada berbagai kondisi eksperimen.

Pada indikator neural, AP gelombang Alpha menunjukkan sensitivitas yang konsisten terhadap tingkat kesulitan tugas di seluruh kondisi, sebagaimana ditunjukkan oleh perbedaan signifikan antara tugas mudah dan sulit serta hubungannya dengan beban kerja subjektif dan kinerja. Temuan ini menunjukkan bahwa aktivitas gelombang Alpha berkaitan dengan variasi tuntutan kognitif dalam konteks eksperimen yang digunakan. Aktivitas gelombang Theta menunjukkan pola yang lebih bergantung pada waktu, di mana perbedaan antar tingkat kesulitan tugas terutama muncul pada sesi siang, yang mengindikasikan bahwa modulasi Theta dapat dipengaruhi oleh variasi kondisi kognitif yang bersifat temporal selain oleh tuntutan tugas. Selain itu, analisis gelombang Beta memberikan wawasan tambahan terkait dinamika beban kerja kognitif. Beta Low menunjukkan sensitivitas terhadap tingkat kesulitan tugas dan waktu kerja pada tingkat model, yang mengindikasikan keterlibatan atensi berkelanjutan, meskipun efeknya tidak selalu muncul secara signifikan. Sebaliknya, Beta High tidak menunjukkan pengaruh utama yang konsisten, namun dipengaruhi oleh interaksi dengan waktu kerja, yang menunjukkan bahwa aktivitas pada gelombang ini lebih merefleksikan dinamika kontekstual seperti kelelahan atau perubahan kewaspadaan. Aktivitas gelombang Gamma menunjukkan pengaruh signifikan dari tingkat kesulitan tugas pada seluruh kondisi waktu kerja, serta adanya efek interaksi dengan waktu, yang menunjukkan bahwa dinamika Gamma responsif terhadap peningkatan tuntutan kognitif dalam kondisi yang diuji.

Pada pengukuran kardiovaskular, ditemukan pola sensitivitas yang berbeda. Mean HR menunjukkan respons yang terbatas terhadap variasi tingkat kesulitan tugas dan waktu kerja, sementara metrik variabilitas denyut jantung yang lain memberikan informasi yang lebih informatif. SDNN menunjukkan modulasi yang konsisten oleh tingkat kesulitan tugas pada seluruh sesi, yang mengindikasikan sensitivitas terhadap tuntutan kognitif yang berkelanjutan. Komponen low frequency (LF) menunjukkan perbedaan terkait tugas terutama pada kondisi pagi dan siang, yang mengindikasikan bahwa respons otonom terhadap beban kerja dapat bervariasi tergantung waktu kerja.

Beban kerja subjektif yang diukur menggunakan NASA-TLX menunjukkan sensitivitas yang kuat dan konsisten terhadap tingkat kesulitan tugas pada seluruh waktu pengukuran, dengan variasi tambahan yang dipengaruhi oleh waktu kerja. Kinerja tugas yang diukur melalui *error rate* juga mampu membedakan tingkat kesulitan tugas, sensitivitasnya terdeteksi terhadap pengaruh waktu kerja.

Analisis korelasi menunjukkan adanya hubungan selektif antar indikator beban kerja. Aktivitas gelombang Alpha berkaitan dengan beban kerja subjektif dan hasil kinerja. Gelombang Beta, khususnya Beta High, tidak menunjukkan hubungan linier yang kuat dengan indikator lain, yang memperkuat indikasi bahwa beberapa respons neural lebih bersifat kontekstual dibandingkan asosiasi langsung antar modalitas. Sementara itu, indikator kardiovaskular menunjukkan hubungan yang lebih lemah dengan indikator subjektif dan perilaku. Temuan ini mendukung pandangan bahwa setiap modalitas pengukuran merepresentasikan aspek yang berbeda namun saling melengkapi dalam beban kerja kognitif.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa beban kerja kognitif merupakan konstruk multidimensional yang tercermin secara berbeda pada indikator neural, fisiologis, subjektif, dan perilaku. Meskipun temuan ini memberikan wawasan mengenai pengaruh tingkat kesulitan tugas dan waktu kerja dalam kondisi eksperimen terkontrol, penelitian lanjutan dengan jumlah sampel yang lebih besar dan lingkungan tugas yang lebih representatif diperlukan untuk mendukung generalisasi ke aplikasi dunia nyata.

## Daftar Pustaka

- [1] Y. Zhou, S. Huang, Z. Xu, P. Wang, X. Wu, and D. Zhang, "Cognitive workload recognition using EEG signals and machine learning: A review," *IEEE Trans. Cogn. Develop. Syst.*, vol. 14, no. 3, pp. 799–818, 2022.
- [2] E. Galy, M. Cariou, and C. Mélan, "What is the relationship between mental workload factors and cognitive load types?" *Int. J. Psychophysiol.*, vol. 83, no. 3, pp. 269–275, 2012.
- [3] N. TWU Council, National occupational research agenda (NORA) for transportation, warehousing and utilities. National Institute for Occupational Safety and Health, 2018.
- [4] F. N. Biondi, A. Cacanindin, C. Douglas, and J. Cort, "Overloaded and at work: Investigating the effect of cognitive workload on assembly task performance," *Human Factors*, vol. 63, no. 5, pp. 1–15, 2021.
- [5] "An integrative review of cognitive workload assessment for safety management," *BMC Nurs.*, vol. 24, no. 1, pp. 1–18, 2025.
- [6] "Should we use the NASA-TLX in HCI? A review of theoretical and methodological issues around mental workload measurement," *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, vol. 186, pp. 1–15, 2025.
- [7] "Assessment of drivers' mental workload by multimodal measures during auditory-based dual-task driving scenarios," *Sensors*, vol. 24, no. 3, pp. 1–22, 2024.
- [8] "Multimodal measurement approach to identify individuals with mild cognitive impairment: Study protocol for a cross-sectional trial," *BMJ Open*, vol. 11, no. 2, pp. 1–10, 2021.
- [9] "Cognitive workload assessment during VR forklift training," *Ergonomics*, vol. 68, no. 4, pp. 1–14, 2025.
- [10] X. Ma, R. Monfared, R. Grant, and Y. M. Goh, "Determining cognitive workload using physiological measurements: Pupillometry and heart-rate variability," *Sensors*, vol. 24, no. 6, pp. 1–20, 2024.
- [11] W. Klimesch, "EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive processes," *Brain Res. Rev.*, vol. 29, no. 2–3, pp. 169–195, 1999.
- [12] J. F. Cavanagh and M. J. Frank, "Frontal theta as a mechanism for cognitive control," *Trends Cogn. Sci.*, vol. 18, no. 8, pp. 414–421, 2014.
- [13] O. Jensen and A. Mazaheri, "Shaping functional architecture by alpha activity: Gating by inhibition," *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 4, pp. 1–8, 2010.
- [14] S. H. Fairclough and L. J. M. Mulder, "Psychophysiological processes of mental effort," in *Engineering psychology and cognitive ergonomics*. Berlin, Germany: Springer, 2011, pp. 61–70.
- [15] Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology, "Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use," *Circulation*, vol. 93, no. 5, pp. 1043–1065, 1996.
- [16] J. F. Thayer, F. Åhs, M. Fredrikson, J. J. Sollers, and T. D. Wager, "A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies," *Neurosci. Biobehav. Rev.*, vol. 36, no. 2, pp. 747–756, 2012.
- [17] C. D. Wickens, "Multiple resources and mental workload," *Human Factors*, vol. 50, no. 3, pp. 449–455, 2008.
- [18] S. G. Hart and L. E. Staveland, "Development of NASA-TLX (task load index): Results of empirical and theoretical research," *Adv. Psychol.*, vol. 52, pp. 139–183, 1988.
- [19] G. R. J. Hockey, "Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload," *Biol. Psychol.*, vol. 45, no. 1–3, pp. 73–93, 1997.
- [20] W. Klimesch, P. Sauseng, and S. Hanslmayr, "EEG alpha oscillations: The inhibition–timing hypothesis," *Brain Res. Rev.*, vol. 53, no. 1, pp. 63–88, 2007.
- [21] R. L. Charles and J. Nixon, "Measuring mental workload using physiological measures: A systematic review," *Appl. Ergon.*, vol. 74, pp. 221–232, 2019.
- [22] A. K. Engel and P. Fries, "Beta-band oscillations—signalling the status quo?," *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 14, no. 10, pp. 156–165, 2010.