

Analisis Performa Input Teks Satu Jari dan Dua Jari pada Antarmuka *Mid-Air Virtual Keyboard*

Performance Analysis of Single-Finger and Two-Finger Text Input on a Mid-Air Virtual Keyboard

Susmitha Canny^{1*}, Nur Fitria Ningsih²

¹Program Studi Teknik Industri, Fakultas Rekayasa Industri, Universitas Telkom, Bandung, Indonesia

²Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Manufaktur, Politeknik Manufaktur Bandung, Bandung, Indonesia

*Penulis korespondensi, email: susmithacanny@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Perkembangan *mixed reality* (MR), *augmented reality* (AR), dan *virtual reality* (VR) meningkat seiring kemampuan *processing*, sehingga mendorong adopsi antarmuka virtual seperti *mid-air virtual keyboard* yang memberi fleksibilitas namun menimbulkan tantangan pada kecepatan dan akurasi pengetikan. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh dua teknik input, yaitu satu jari dan dua jari, terhadap performa pengetikan pada *mid-air virtual keyboard* dalam lingkungan MR. Desain penelitian adalah eksperimen *within-subjects* dengan *purposive sampling* yang merekrut 18 partisipan dewasa sehat. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan dukungan *hand-tracking*, di mana partisipan menyelesaikan tugas pengetikan pada beberapa kombinasi teknik pengetikan dan setiap kondisi dilakukan pengukuran kecepatan dan keakuratan pengetikan. Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif, uji normalitas Shapiro–Wilk, *repeated measures ANOVA*, ukuran efek dan interval kepercayaan dilaporkan untuk memperkuat interpretasi. Hasil menunjukkan teknik dua jari menghasilkan laju pengetikan tertinggi, sedangkan satu jari memberikan tingkat akurasi lebih baik. Temuan ini memberikan rekomendasi praktis untuk pemilihan teknik input dalam perancangan antarmuka *mid-air* guna meningkatkan produktivitas pengetikan di lingkungan *mixed reality*.

Kata kunci: akurasi pengetikan, antarmuka *mid-air*, kecepatan pengetikan, teknik pengetikan

Abstract

The development of *mixed reality* (MR), *augmented reality* (AR), and *virtual reality* (VR) has accelerated alongside increases in *processing* power, encouraging the adoption of virtual interfaces such as the *mid-air virtual keyboard*, which offer flexibility but introduce challenges for typing speed and accuracy. This study evaluates the effects of two input techniques, single-finger and two-finger methods, on typing performance using a *mid-air virtual keyboard* within an MR environment. The study employed a *within-subjects* experimental design with *purposive sampling* to recruit 18 healthy adult participants. The method consisted of experiments with integrated *hand-tracking*, in which participants completed typing tasks across the input technique conditions and typing speed and accuracy were measured for each condition. Data were analyzed using descriptive statistics, Shapiro–Wilk tests for normality, *repeated-measures ANOVA*, and effect sizes and confidence intervals were reported to strengthen interpretation. Results show that the two-finger technique produced the highest typing speed, whereas the single-finger technique yielded greater accuracy. These findings offer practical guidance for selecting input methods in the design of *mid-air* interfaces to improve typing productivity in *mixed reality* environments.

Keywords: accuracy, *mid-air* interface, *mixed reality*, typing speed, typing technique

1. Pendahuluan

Perkembangan *mixed reality* (MR), *augmented reality* (AR), dan *virtual reality* (VR) semakin pesat seiring meningkatnya kapasitas *processing*, sehingga adopsi perangkat MR terus meluas (Morimoto *et al.*, 2022; Dudley *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023). Walaupun teknologi interaktif pada sistem *mixed reality* (MR) terus berkembang pesat, masalah praktik terkait pengalaman pengetikan di dalam lingkungan

How to Cite:

Canny, S. and Ningsih, N.F. (2025) 'Analisis performa input teks satu jari dan dua jari pada antarmuka *Mid-Air Virtual Keyboard*', *Journal of Integrated System*, 8(2), pp. 166-176. Available at: <https://doi.org/10.28932/jis.v8i2.13578>.

MR tetap eksis sehingga membutuhkan kajian empiris dan solusi desain (Dube and Arif, 2023; Darbar *et al.*, 2024). Pengetikan pada lingkungan virtual berbeda secara substansial dibandingkan pengetikan pada *keyboard* fisik di komputer desktop maupun pada *on-screen keyboard* perangkat mobile, khususnya karena perbedaan bidang pandang, minimnya umpan balik haptik, dan dinamika ruang kerja pengguna yang berubah-ubah, perbedaan ini berimplikasi langsung pada aspek kecepatan dan akurasi pengetikan yang menjadi fokus penelitian antarmuka teks pada MR.

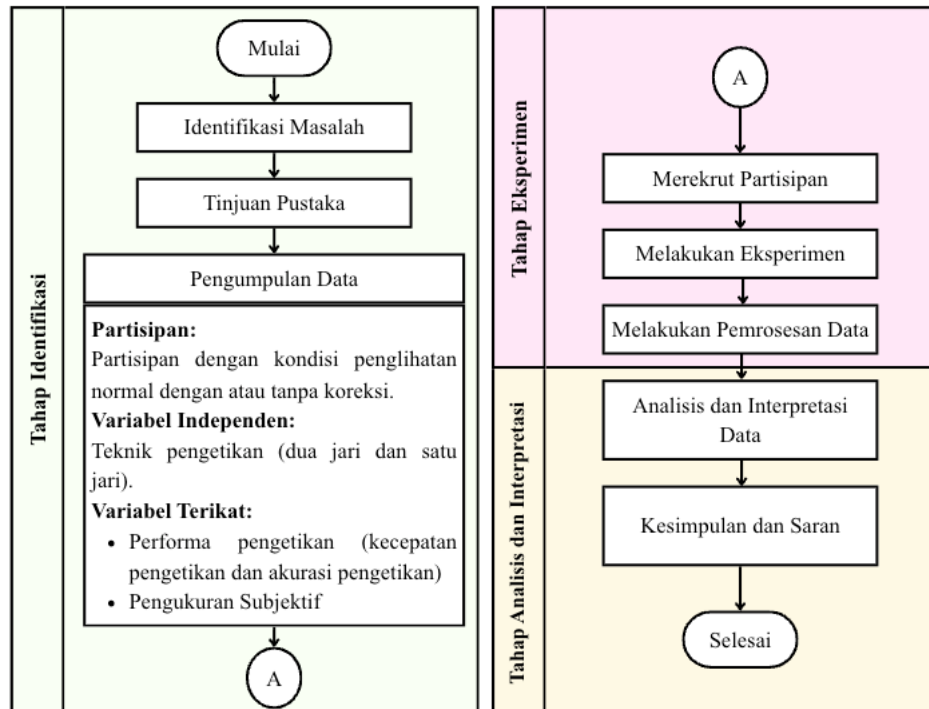
Dalam konteks tersebut, salah satu bentuk interaksi yang menonjol adalah *mid-air virtual keyboard*, yaitu representasi *keyboard* virtual yang mengambang di ruang pengguna dan dioperasikan melalui pelacakan tangan atau gestur tanpa permukaan fisik, umumnya ditampilkan pada perangkat *head-mounted display* (HMD) dengan dukungan *hand tracking* untuk mendeteksi posisi jari dan input pengguna (Dudley *et al.*, 2023). Karakteristik *mid-air* berbeda secara fundamental dari *keyboard* fisik, ketiadaan umpan balik taktil, variabilitas ukuran dan posisi tampilan, serta keterbatasan visual dapat memengaruhi perilaku *text entry* dan menurunkan performa pengguna, oleh karena itu studi yang menelaah secara terfokus strategi input dasar seperti *satu jari* versus *dua jari* menjadi krusial untuk merumuskan rekomendasi desain yang efektif dan aman.

Sejumlah studi telah menelaah berbagai aspek *text entry* pada lingkungan imersif termasuk pengaruh tampilan visual, umpan balik haptik, dan variasi teknik input terhadap kecepatan serta ketepatan pengetikan, namun banyak penelitian tersebut menguji beberapa faktor sekaligus sehingga sulit memisahkan efek masing-masing variabel (Wang *et al.*, 2023; Lin and Canny, 2024). Studi komparatif yang spesifik membandingkan strategi input dasar seperti satu jari dan dua jari pada kondisi *mid-air* masih terbatas, padahal perbedaan konseptual antara kedua strategi tersebut dapat berimplikasi langsung pada *trade-off* antara kecepatan pengetikan dan tingkat kesalahan (Wang *et al.*, 2023). Oleh karena itu, penelitian yang mengisolasi variabel metode pengetikan dan menggombinasikannya dengan pengukuran subjektif akan memperkaya pemahaman tentang bagaimana pilihan strategi input memengaruhi performa dan kenyamanan pengguna dalam praktik.

Penelitian ini dirancang sebagai eksperimen *within-subjects* di mana setiap partisipan menjalankan tugas pengetikan pada dua kondisi input yaitu satu jari dan dua jari pada *mid-air virtual keyboard* yang dijalankan melalui headset MR dengan dukungan *hand tracking*. Tugas pengetikan terdiri dari serangkaian frasa standar yang distandarisasi untuk memastikan konsistensi kesulitan dan semua keluaran teks serta waktu direkam otomatis untuk menghitung *words per minute* (WPM) dan *character error rate* (CER) (Van Waes *et al.*, 2021). Selain metrik objektif, partisipan mengisi *NASA Task Load Index* (NASA-TLX) untuk menilai beban kerja subjektif dan *Virtual Reality Sickness Questionnaire* (VRSQ) untuk mengukur gejala *motion* atau *cybersickness* setelah menyelesaikan tiap kondisi (Hart and Staveland, 1988; Chang, Kim and Yoo, 2020; Hart, 2020). Data dianalisis dengan statistik deskriptif dan uji inferensial yang sesuai, disertai pelaporan ukuran efek dan interval kepercayaan, sehingga temuan diharapkan memberikan kontribusi penelitian berupa bukti empiris yang dapat dijadikan dasar rekomendasi desain *interface* mid air dalam konteks MR untuk meningkatkan produktivitas pengetikan sekaligus menjaga kenyamanan pengguna.

2. Metode

Metodologi penelitian ini terdiri dari tiga tahapan utama yang divisualisasikan pada Gambar 1. Tahapan-tahapan tersebut terdiri dari tahap identifikasi, tahap eksperimen, dan tahap analisis serta interpretasi data. Secara ringkas tahap pertama yaitu tahap identifikasi meliputi observasi awal dan perumusan kondisi eksperimen. Pada tahap ini ditentukan partisipan, variabel independen, dan variabel terikat, setelah sebelumnya dilakukan tinjauan pustaka. Tahap berikutnya adalah tahap eksperimen. Pada tahap ini dilaksanakan rekrutmen partisipan, eksperimen, dan pemrosesan data. Pada tahap kedua ini pengujian terhadap dua teknik pengetikan pada *mid-air virtual keyboard* dengan desain *within-subjects* sehingga setiap partisipan menjalani kedua kondisi. Tahap akhir meliputi analisis data statistik dan interpretasi hasil. Tahap ketiga ini berujung pada kesimpulan serta rekomendasi berdasarkan penelitian yang telah dilakukan.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.1 Partisipan

Penelitian melibatkan 18 partisipan mahasiswa terdiri atas 12 laki-laki dan 6 perempuan, usia 19–29 tahun. Semua partisipan adalah pengguna tangan kanan dan memiliki penglihatan normal atau terkoreksi ke normal. Sebelum pengujian, peserta wajib lolos uji ketajaman penglihatan Snellen dan menyatakan tidak memiliki keluhan nyeri atau gangguan pada lengan, tangan, atau bahu. Semua partisipan menandatangani formulir persetujuan.

2.2 Desain Eksperimen

Penelitian menggunakan rancangan eksperimen *within-subjects* dengan dua kondisi perlakuan yaitu teknik pengetikan satu jari dan dua jari. Urutan kondisi diacak untuk setiap partisipan guna mengurangi efek urutan. Setiap partisipan menjalani sesi latihan singkat untuk masing-masing teknik sebelum pengambilan data utama. Tugas pengetikan terdiri dari serangkaian frasa standar yang diambil dari korpus teks yang umum dipakai dalam penelitian *text-entry* sehingga tingkat kesulitan antar-frasa terstandarisasi. Setelah menyelesaikan tiap kondisi, partisipan diminta mengisi kuesioner subjektif.

2.3 Peralatan dan Pengaturan Eksperimen

Eksperimen dijalankan pada *mid-air virtual keyboard* yang ditampilkan melalui headset MR yang mendukung *hand-tracking* terintegrasi. Spesifikasi perangkat dicatat secara rinci (Hololens 2, resolusi 2048 x 1080 *pixels*, 60Hz) untuk kepentingan replikasi (Microsoft, 2022). Sistem pengujian menggunakan situs atau aplikasi *typing test* yang mampu merekam *keystroke* termasuk karakter yang benar dan salah, kata yang benar dan salah, serta cap waktu untuk setiap *input*. Kumpulan frasa yang digunakan untuk sesi latihan dan pengukuran utama diambil dari daftar frasa yang tersedia di situs York University (MacKenzie, 2002). Contoh teks frasa yang digunakan dalam eksperimen ini terdapat pada Tabel 1.

2.4 Prosedur Eksperimen

Setiap sesi eksperimen mengikuti urutan prosedural berikut:

1. Partisipan menandatangani formulir persetujuan dan melakukan uji Snellen apabila belum ada data valid sebelumnya.
2. Partisipan menerima instruksi umum dan melakukan latihan singkat pada *mid-air virtual keyboard* untuk familiarisasi dengan antarmuka dan masing-masing teknik pengetikan.
3. Untuk setiap kondisi teknik (satu jari dan dua jari) partisipan mengetik sejumlah frasa standar. Urutan kondisi diacak. Antara kondisi diberikan jeda singkat untuk mengurangi kelelahan.
4. Setelah menyelesaikan setiap kondisi partisipan melepas HMD dan mengisi instrumen subjektif yaitu *NASA Task Load Index* (NASA-TLX) dan *Virtual Reality Sickness Questionnaire* (VRSQ).
5. Semua data *keystroke* direkam secara otomatis oleh sistem termasuk waktu mulai, waktu selesai, teks yang diketik, serta kesalahan ketik. Data ini kemudian diekspor untuk analisis lebih lanjut.
6. Durasi total sesi yakni 30 menit yang sudah mencakup eksperimen dan pengisian kuesioner.

Tabel 1. Contoh teks frasa (MacKenzie, 2002)

Frasa Latihan	Frasa Eksperimen
<i>my watch fell in the water</i>	<i>do not drink too much</i>
<i>prevailing wind from the east</i>	<i>take a coffee break</i>
<i>never too rich and never too thin</i>	<i>popularity is desired by all</i>
<i>breathing is difficult</i>	<i>the music is better than it sounds</i>
<i>I can see the rings on Saturn</i>	<i>starlight and dewdrop</i>
	<i>the living is easy</i>
	<i>fish are jumping</i>
	<i>the cotton is high</i>
	<i>drove my chevy to the levee</i>
	<i>but the levee was dry</i>
	<i>i took the rover from the shop</i>
	<i>movie about a nutty professor</i>
	<i>come and see our new car</i>
	<i>coming up with killer sound bites</i>
	<i>i am going to a music lesson</i>
<i>a problem with the engine</i>	<i>the opposing team is over there</i>
<i>elephants are afraid of mice</i>	<i>soon we will return from the city</i>
<i>my favorite place to visit</i>	<i>i am wearing a tie and a jacket</i>
<i>three two one zero blast off</i>	<i>the quick brown fox jumped</i>
<i>my favorite subject is psychology</i>	<i>all together in one big pile</i>
	<i>wear a crown with many jewels</i>
	<i>there will be some fog tonight</i>
	<i>i am allergic to bees and peanuts</i>
	<i>he is still on our team</i>
	<i>the dow jones index has risen</i>
	<i>my preferred treat is chocolate</i>
	<i>the king sends you to the tower</i>
	<i>we are subjects and must obey</i>
	<i>mom made her a turtleneck</i>
	<i>goldilocks and the three bears</i>
<i>prayer in schools offends some</i>	<i>i do not fully agree with you</i>
<i>he is just like everyone else</i>	<i>gas bills are sent monthly</i>
<i>great disturbance in the force</i>	<i>earth quakes are predictable</i>
<i>love means many things</i>	<i>life is but a dream</i>
<i>you must be getting old</i>	<i>take it to the recycling depot</i>
	<i>sent this by registered mail</i>
	<i>fall is my favorite season</i>
	<i>a fox is a very smart animal</i>
	<i>the kids are very excited</i>
	<i>parking lot is full of trucks</i>
	<i>my bike has a flat tire</i>
	<i>do not walk too quickly</i>
	<i>a duck quacks to ask for food</i>
	<i>limited warranty of two years</i>
	<i>the four seasons will come</i>

2.5 Pengukuran

Kecepatan pengetikan diukur dengan metrik *words per minute* (WPM) yang dihitung menggunakan rumus standar (Wobbrock, 2007).

$$\text{WPM} = \frac{\text{Jumlah karakter yang diketik}}{5} \div \text{waktu (menit)} \quad (1)$$

Pembagi 5 mengasumsikan panjang kata rata-rata 5 karakter. Akurasi pengetikan dinilai menggunakan *character error rate* (CER) atau persentase kesalahan karakter yang dihitung (Abdoli, 2025).

$$\text{CER} = \frac{S + D + I}{N} \times 100\% \quad (2)$$

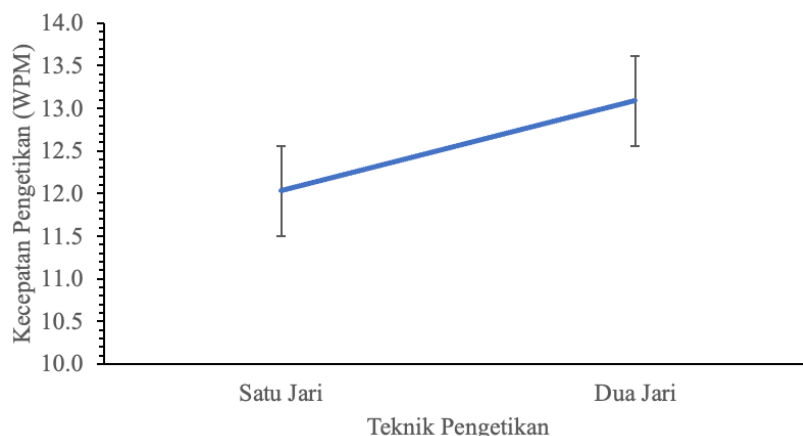
dengan S = *substitutions* (penggantian), D = *deletions* (penghapusan), I = *insertions* (penyisipan), dan N = jumlah karakter pada teks referensi. Selain CER, dapat pula dilaporkan *word accuracy rate* yaitu persentase kata benar terhadap total kata yang harus diketik. Pengukuran subjektif meliputi:

- *NASA Task Load Index* (NASA-TLX) untuk menilai beban kerja subjektif terkait tugas. Instrumen ini mengikuti prosedur penilaian standar dimana partisipan memberikan skor pada beberapa dimensi beban kerja (Hart and Staveland, 1988; Hart, 2020). Dimensi dalam NASA TLX terdiri dari dimensi beban mental (*mental demand*), beban fisik (*physical demand*), beban waktu (*temporal demand*), performa (*performance*), upaya (*effort*), dan frustrasi (*frustration*).
- *Virtual Reality Sickness Questionnaire* (VRSQ) untuk mengukur gejala *motion* atau *cybersickness*. VRSQ menilai gejala oculomotor dan disorientasi pada beberapa item, dan skor akhir dinormalisasi pada rentang 0–100 sehingga skor lebih tinggi menunjukkan tingkat sickness lebih besar (Kourtesis *et al.*, 2019, 2023; Chang, Kim and Yoo, 2020).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kecepatan Pengetikan

Analisis kecepatan pengetikan menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kedua teknik input yang diuji. Rata-rata *words per minute* (WPM) untuk teknik dua jari adalah 13,088 ($\pm 4,223$), sedangkan teknik satu jari menghasilkan rata-rata 12,032 ($\pm 3,232$) (Gambar 2). Pemeriksaan normalitas pada *difference scores* menunjukkan tidak ada pelanggaran (Shapiro-Wilk $W = 0,991$, $p = 0,284$). Oleh karena itu, analisis parametrik dapat digunakan, uji *repeated measurement* ANOVA mengonfirmasi pengaruh teknik pengetikan terhadap kecepatan dengan nilai $p = 0,001$, yang mengindikasikan bahwa perbedaan kecepatan antara kondisi satu jari dan dua jari bersifat signifikan secara statistik. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan kedua jari indeks secara simultan cenderung meningkatkan laju pengetikan di lingkungan *mid-air* dibandingkan penggunaan satu jari saja.



Gambar 2. Perbandingan kecepatan pengetikan berdasarkan teknik pengetikan

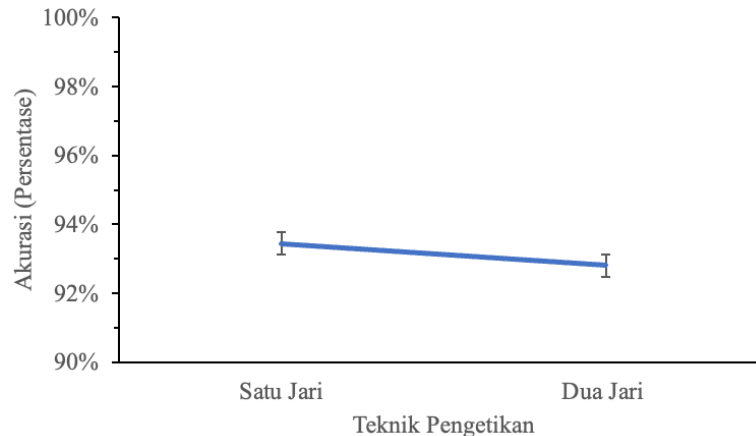
Secara mekanistik, teknik satu jari (Gambar 3.a) yang menanggung keseluruhan beban di satu jari. Berbeda dengan teknik dua jari (Gambar 3.b) yang melakukan distribusi beban kerja antar tangan sehingga setiap jari tidak menanggung subset tombol yang melebihi batas. Dengan pembagian tugas ini, lingkup gerakan per jari pada teknik dua jari menjadi berkurang sehingga jarak gerakan rata-rata menyusut dan waktu perpindahan antar-tekanan tombol menjadi lebih singkat. Sehingga menyebabkan kecepatan pengetikan meningkat. Temuan ini sejalan dengan literatur yang menunjukkan bahwa pembagian pekerjaan antar anggota gerak (*bimanual coordination*) dapat meningkatkan throughput tugas manual tertentu pada antarmuka imersif (Dudley *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023).



Gambar 3. a. Teknik pengetikan satu jari; b. Teknik pengetikan dua jari

3.2 Akurasi Pengetikan

Meskipun analisis inferensial tidak menemukan perbedaan akurasi yang signifikan antara teknik satu jari dan dua jari, secara deskriptif kondisi dua jari menunjukkan rata-rata akurasi yang lebih rendah (rata-rata satu jari 93,449% dan dua jari 92,809%) (Gambar 4). Ada beberapa mekanisme yang dapat menjelaskan kecenderungan ini. Pertama, strategi dua jari cenderung meningkatkan kecepatan pengetikan melalui pembagian beban motorik antar tangan sehingga masing-masing jari menempuh jarak gerak yang lebih pendek dan frekuensi tekan meningkat, namun pembagian tugas bimanual tersebut juga menaikkan kompleksitas koordinasi spasial dan temporal, sehingga peluang *mis-target* pada tombol yang berdekatan meningkat, khususnya pada antarmuka *mid-air* yang tidak menyediakan umpan balik taktil (*haptic*) yang membantu koreksi posisi (Weiss *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2019). Kedua, ketiadaan sensasi tekan fisik memaksa pengguna mengandalkan pemantauan visual, ketika dua titik input harus dipantau secara simultan, kapasitas perhatian visual terdistribusi sehingga presisi kontrol posisi tiap jari berkurang, sebuah konsekuensi yang dapat dijelaskan oleh teori atensi dan multitasking (Wickens, 2008). Ketiga, pola individual dalam *trade-off* kecepatan-akurasi dapat menghasilkan rata-rata grup yang tampak serupa sementara di tingkat individu terjadi pergeseran perilaku, beberapa partisipan mungkin memilih meningkatkan kecepatan dengan sedikit menurunkan ketelitian, sedangkan yang lain tetap menjaga akurasi sambil menerima laju yang lebih lambat (Fitts, 1954; Grubert *et al.*, 2018).



Gambar 4. Perbandingan akurasi pengetikan berdasarkan teknik pengetikan

Oleh karena itu, meskipun perbedaan deskriptif pada akurasi relatif kecil dan tidak signifikan secara statistik, pola tersebut konsisten dengan hipotesis *trade-off* yang didukung oleh literatur mengenai interaksi motorik dan batasan perhatian pada antarmuka imersif (Dudley *et al.*, 2023). Secara praktis, temuan ini menyarankan agar perancang antarmuka *mid-air* menyediakan mode adaptif yang memungkinkan pengguna memilih preferensi antara kecepatan pengetikan dan ketelitian serta menerapkan intervensi desain seperti *spacing* dinamis antar-tombol dan penguatan *micro-feedback* visual guna meminimalkan *trade-off* negatif tanpa mengorbankan produktivitas.

3.3 Pengalaman Subjektif

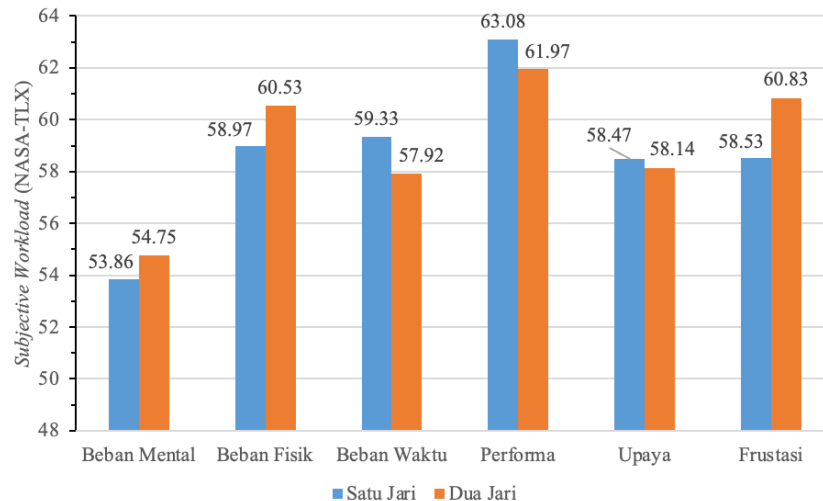
Dalam penelitian ini, penulis menggunakan dua jenis kuesioner umpan balik subjektif untuk menilai pengalaman para partisipan. Berikut ini merupakan evaluasi pengalaman subjektif yang dilakukan dalam penelitian ini.

3.3.1 Analisis Beban Kerja yang Dirasakan (*Perceived Workload*)

Hasil pengukuran beban kerja yang diperoleh dengan NASA-TLX memperlihatkan pola yang cukup konsisten antar-dimensi (Gambar 5). Jika dilihat per dimensi, kondisi dua jari menunjukkan nilai beban kerja yang lebih tinggi pada dimensi beban mental (54,75; $\Delta = +0,89$), beban fisik (60,53; $\Delta = +1,56$) dan frustrasi (60,83; $\Delta = +2,30$). Sebaliknya, kondisi satu jari mendapatkan skor lebih tinggi pada beban waktu (59,33; $\Delta = +1,41$), performa yang dirasakan (63,08; $\Delta = +1,11$) dan upaya (58,47; $\Delta = +0,33$). Rata-rata keseluruhan keenam dimensi lebih tinggi pada kondisi dua jari dibanding satu jari.

Interpretasi praktis dari pola ini adalah bahwa penggunaan dua jari cenderung menambah tuntutan fisik dan frustrasi partisipan meskipun partisipan melaporkan persepsi performa yang sedikit lebih baik pada kondisi tersebut. Peningkatan beban fisik sesuai dengan mekanisme kontrol motorik bimanual dimana gerakan lebih sering dan melibatkan rentang yang berbeda sehingga otot-otot lengan dan bahu bekerja lebih intensif pada pengetikan *mid-air* (Dudley *et al.*, 2023; Lin and Canny, 2024). Lonjakan skor frustrasi pada kondisi dua jari dapat berkaitan dengan kebutuhan koordinasi yang lebih tinggi dan pengalaman ketidaknyamanan sensorimotor yang tercatat juga dalam skor VRSQ, sehingga walau produktivitas (WPM) meningkat, pengalaman afektif pengguna memburuk (Darbar *et al.*, 2024).

Di sisi lain, skor performa yang lebih tinggi pada kondisi satu jari menunjukkan bahwa partisipan menilai keberhasilan tugas mereka sedikit lebih rendah saat menggunakan satu jari. Hal ini konsisten dengan temuan objektif bahwa dua jari meningkatkan WPM, sehingga pengguna merasakan bahwa performa aktual mereka lebih baik dengan dua jari meskipun hal tersebut diikuti dengan keterbatasan akurasi. Beban waktu yang lebih tinggi pada satu jari mengindikasikan persepsi tekanan waktu atau kebutuhan tempo yang lebih besar saat menggunakan satu jari, masalah yang logis mengingat kecepatan pengetikan rata-rata lebih rendah pada kondisi tersebut.



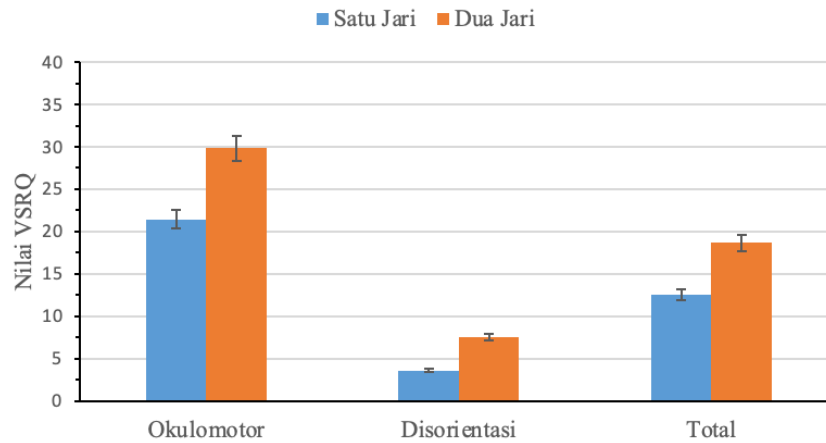
Gambar 5. Beban kerja yang dirasakan oleh partisipan ketika menggunakan teknik satu jari dan dua jari

3.3.2 Analisis Motion Sickness

Hasil pengukuran *Virtual Reality Sickness Questionnaire* (VRSQ) menunjukkan perbedaan yang konsisten dan signifikan antara teknik satu jari dan dua jari (lihat Gambar 6). Teknik dua jari menghasilkan skor okulomotor rata-rata 29,815 (SD= 13,502) dibandingkan 21,435 (SD= 14,177) pada teknik satu jari ($\Delta = +8,380$) (Gambar 6). Komponen disorientasi dan skor total VRSQ mengikuti pola serupa, yaitu dua jari (7,481) dan satu jari (3,593) ($\Delta = +3,888$) untuk disorientasi. Skor total VRSQ dua jari (18,648) dan satu jari (12,514) ($\Delta = +6,134$), dengan $p < .001$ untuk ketiga domain, sehingga menunjukkan peningkatan gejala *cybersickness* yang terhubung secara kuat dengan penggunaan teknik *dua jari*. Secara mekanistik, peningkatan skor okulomotor pada kondisi dua jari berkaitan dengan beban visual yang meningkat akibat kebutuhan monitoring simultan dua titik input (Choe, Park and Kim, 2021). Monitoring dua titik input meningkatkan frekuensi perpindahan akomodasi dan *vergence* sehingga memperbesar kerja okulomotor dan meningkatkan probabilitas gejala seperti kelelahan mata, penglihatan kabur, dan kesulitan mempertahankan fokus (Lin and Canny, 2022; Kourtesis *et al.*, 2023). Selain itu, ketiadaan umpan balik taktil pada antarmuka *mid-air* memperkuat ketergantungan pada koreksi visual, ketika isyarat visual tidak sinkron dengan masukan proprioseptif timbul *sensorimotor conflict* yang berkontribusi pada disorientasi dan rasa pusing (Kourtesis *et al.*, 2023; Darbar *et al.*, 2024).

Peningkatan tempo pengetikan yang umumnya terjadi pada mode dua jari juga berperan melalui peningkatan frekuensi gerakan kepala dan mata, sehingga memperbesar paparan terhadap perubahan visual yang cepat dan meningkatkan risiko konflik visual-vestibular. Konflik visual-vestibular ini merupakan mekanisme pemicu mual, pusing, dan disorientasi dalam sistem VR atau MR, oleh karena itu, akumulasi gerakan cepat dan perubahan pandangan pada mode dua jari menjelaskan peningkatan skor VRSQ secara teoretis (Kourtesis *et al.*, 2023). Dengan kata lain, meskipun dua jari dapat meningkatkan *throughput*, efek samping fisiologis yang teramati menandakan adanya *trade-off* performa dengan kenyamanan yang perlu dipertimbangkan.

Dari perspektif desain, temuan ini menuntut strategi mitigasi yang bersifat teknis dan operasional. Secara teknis, pengurangan kebutuhan monitoring simultan dapat dicapai dengan pengelompokan tata letak tombol atau mode input berbasis kontekstual sehingga hanya satu fokus visual diperlukan pada satu waktu, penambahan *micro-feedback* haptik atau auditori dapat mengurangi ketergantungan pada koreksi visual penuh. Secara operasional, pembatasan durasi sesi, jeda adaptif yang dipicu oleh indikator subjektif atau objektif, dan opsi mode bertingkat (misal mode kecepatan pengetikan dan mode presisi) dapat membantu menyeimbangkan produktivitas dan kenyamanan pengguna. Implementasi mitigasi ini sebaiknya disertai evaluasi empiris untuk memastikan bahwa intervensi tidak menurunkan keuntungan kinerja.



Gambar 6. Skor VRSQ untuk masing-masing teknik pengetikan

3.3.3 Integrasi Temuan

Temuan studi menunjukkan adanya *trade-off* yang konsisten antara produktivitas dan kenyamanan pengguna saat menggunakan *mid-air virtual keyboard*: teknik dua jari meningkatkan *throughput* teks sehingga menghasilkan WPM yang lebih tinggi tetapi diikuti oleh kecenderungan penurunan akurasi yang kecil serta peningkatan beban subjektif dan gejala *cybersickness*, sementara teknik satu jari mempertahankan akurasi sedikit lebih baik dengan beban waktu yang lebih terasa oleh pengguna. Pola ini selaras dengan prinsip *speed-accuracy trade-off* yang dikemukakan Fitts, di mana peningkatan kecepatan sering mengorbankan ketelitian (Fitts, 1954). Secara kognitif, distribusi perhatian yang diperlukan untuk memantau dua titik input secara simultan dapat menjelaskan kenaikan beban mental dan penurunan kenyamanan menurut teori sumber daya ganda dan batasan atensi (Wickens, 2008).

Lebih lanjut, peningkatan skor VRSQ pada kondisi dua jari kemungkinan besar berkaitan dengan beban okulomotor dan konflik sensorimotor yang timbul ketika koreksi posisi sangat bergantung pada informasi visual tanpa umpan balik taktil, sebuah mekanisme yang telah diidentifikasi sebagai pemicu utama *cybersickness* pada sistem imersif (Kourtesis *et al.*, 2019; Chang, Kim and Yoo, 2020). Temuan objektif dan subjektif yang saling melengkapi ini menegaskan bahwa optimasi desain *mid-air* sebaiknya tidak hanya mengejar *throughput* semata tetapi juga memperhatikan mitigasi beban visual dan sensorimotor, misalnya melalui pengelompokan tombol, *micro-feedback* (haptik atau audio) atau mode operasi adaptif yang menyeimbangkan kebutuhan kecepatan dan presisi (Grubert *et al.*, 2018; Dudley *et al.*, 2023). Dengan demikian, keputusan pemilihan teknik input pada aplikasi MR sebaiknya didasarkan pada konteks penggunaan dan toleransi pengguna terhadap ketidaknyamanan fisiologis, bukan semata-mata pada perbedaan kecil pada akurasi yang tidak signifikan secara statistik.

4. Simpulan

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh strategi pengetikan satu jari dan dua jari terhadap performa pengetikan pada *mid-air virtual keyboard* dengan menyajikan bukti empiris mengenai *trade-off* antara kecepatan dan kenyamanan. Secara ringkas, teknik dua jari menghasilkan peningkatan kecepatan yang signifikan secara statistik (WPM lebih tinggi), sedangkan akurasi karakter lebih tinggi di teknik pengetikan satu jari, sehingga dari sisi produktivitas dua jari memberikan keuntungan tanpa mengorbankan tingkat kesalahan secara umum. Namun temuan subjektif menunjukkan dampak yang perlu diperhatikan yaitu skor NASA-TLX yang cenderung lebih tinggi pada beberapa dimensi dan skor VRSQ yang secara konsisten lebih tinggi pada teknik dua jari, yang mengindikasikan peningkatan beban kerja dan gejala *cybersickness* ketika pengguna mengadopsi strategi *bimanual* pada antarmuka tanpa haptik. Keterbatasan studi meliputi ukuran sampel yang terbatas dan dominasi partisipan pengguna tangan kanan, durasi sesi eksperimen yang relatif singkat, penggunaan satu jenis HMD dan konfigurasi *keyboard* tertentu, serta ketiadaan pengukuran fisiologis objektif yang dapat mengonfirmasi mekanisme okulomotor dan vestibular, sehingga generalisasi hasil perlu dilakukan dengan kehati-hatian.

Secara praktis, hasil ini menyarankan agar perancang *interface mid-air* mempertimbangkan mode adaptif yang memungkinkan pengguna memilih antara *throughput* dan *precision*, menerapkan mitigasi seperti *spacing* dinamis antar tombol, *micro-feedback* visual atau auditori, serta kebijakan durasi sesi untuk mengurangi risiko akumulasi gejala. Untuk pengembangan ilmu dan penelitian selanjutnya diperlukan studi *longitudinal* yang mengevaluasi efek pembelajaran, analisis korelasi perubahan WPM dengan perubahan skor VRSQ pada level individu, pengujian intervensi mitigasi (misal *haptic* atau *audio cues*), serta inklusi metrik fisiologis seperti *eye tracking* dan pupilometri untuk memperkuat pemahaman mekanistik yang ditemukan dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Chang, E., Kim, H.T. and Yoo, B. (2020) 'Virtual reality sickness: a review of causes and measurements', *International Journal of Human-Computer Interaction* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1778351>.
- Choe, M., Park, J. and Kim, H.K. (2021) 'Effect of target size, location, and input method on interaction in immersive virtual reality', *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(21). Available at: <https://doi.org/10.3390/app11219846>.
- Choi, D. et al. (2019) 'Designing hand pose aware virtual keyboard with hand drift tolerance', *IEEE Access*, 7, pp. 96035–96047. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929310>.
- Darbar, R. et al. (2024) 'An empirical evaluation of on-arm tap typing for AR HMDs', in *Proceedings - SUI 2024: ACM Symposium on Spatial User Interaction*. Association for Computing Machinery, Inc. Available at: <https://doi.org/10.1145/3677386.3682084>.
- Dube, T.J. and Arif, A.S. (2023) 'Ultrasonic keyboard: a mid-air virtual qwerty with ultrasonic feedback for virtual reality', in *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. New York, NY, USA: ACM, pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1145/3569009.3573117>.
- Dudley, J.J. et al. (2023) 'Evaluating the performance of hand-based probabilistic text input methods on a mid-air virtual qwerty keyboard', *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(11), pp. 4567–4577. Available at: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3320238>.
- Fitts, P.M. (1954) 'The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement', *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), pp. 381–391. Available at: <https://doi.org/10.1037/h0055392>.
- Grubert, J. et al. (2018) 'Text entry in immersive head-mounted display-based virtual reality using standard keyboards', in *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, pp. 159–166. Available at: <https://doi.org/10.1109/VR.2018.8446059>.
- Hart, S. (2020) *NASA TLX task load index*, NASA. Available at: <https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/> (Accessed: May 4, 2024).
- Hart, S.G. and Staveland, L.E. (1988) 'Development of NASA-TLX (task load index): results of empirical and theoretical research', *Advances in Psychology*, 52(C), pp. 139–183. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9).
- Kourtesis, P. et al. (2019) 'Validation of the virtual reality neuroscience questionnaire: maximum duration of immersive virtual reality sessions without the presence of pertinent adverse symptomatology', *Frontiers in Human Neuroscience*, 13. Available at: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00417>.
- Kourtesis, P. et al. (2023) 'Cybersickness in virtual reality questionnaire (CSQ-VR): a validation and comparison against SSQ and VRSQ', *Virtual Worlds*, 2(1), pp. 16–35. Available at: <https://doi.org/10.3390/virtualworlds2010002>.
- Lin, C.J. and Canny, S. (2022) 'Effects of virtual target size, position, and parallax on vergence-accommodation conflict as estimated by actual gaze', *Scientific Reports*, 12(1), pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24450-9>.
- Lin, C.J. and Canny, S. (2024) 'Investigating the effect of key size, typing angle, and typing technique of virtual keyboard on typing productivity, biomechanics, and usability in a mixed reality environment', *International Journal of Human-Computer Studies*, 191, p. 103339. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2024.103339>.

- MacKenzie, I.S. (2002) *A note on phrase sets for evaluating text entry techniques*, York University. Available at: <https://www.yorku.ca/mack/RN-PhraseSet.html> (Accessed: October 20, 2025).
- Microsoft (2022) *Hololens 2*. Available at: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/hardware#document-experiences> (Accessed: September 2, 2025).
- Morimoto, T. *et al.* (2022) 'XR (Extended reality: virtual reality, augmented reality, mixed reality) technology in spine medicine: status quo and quo vadis', *Journal of Clinical Medicine*, 11(2). Available at: <https://doi.org/10.3390/jcm11020470>.
- Van Waes, L. *et al.* (2021) 'Measuring and assessing typing skills in writing research', *Journal of Writing Research*, 13(vol. 13 issue 1), pp. 107–153. Available at: <https://doi.org/10.17239/jowr-2021.13.01.04>.
- Wang, Yueyang *et al.* (2023) 'A Comparative study of the typing performance of two mid-air text input methods in virtual environments', *Sensors*, 23(15), p. 6988. Available at: <https://doi.org/10.3390/s23156988>.
- Weiss, M. *et al.* (2009) 'SLAP widgets: bridging the gap between virtual and physical controls on tabletops', *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, (May 2014), pp. 3229–3234. Available at: <https://doi.org/10.1145/1520340.1520462>.
- Wickens, C.D. (2008) 'Multiple resources and mental workload', *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(3), pp. 449–455. Available at: <https://doi.org/10.1518/001872008X288394>.
- Wobbrock, J.O. (2007) 'Measures of text entry performance', in *Text Entry Systems*. Elsevier, pp. 47–74. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-012373591-1/50003-6>.