

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Masalah komunikasi merupakan salah satu persoalan mendasar yang mempengaruhi kemampuan individu dalam berinteraksi, belajar, dan menjalankan fungsi sosial secara efektif. [1] Di tingkat nasional, data GoodStats tahun 2023 mencatat bahwa 310 ribu masyarakat Indonesia tercatat tidak dapat berkomunikasi, menjadikan gangguan komunikasi sebagai masalah publik yang berimplikasi luas terhadap pendidikan, pekerjaan, dan integrasi sosial. [2] Fakta ini menunjukkan bahwa kesulitan komunikasi bukan persoalan sporadis, melainkan fenomena struktural yang berdampak langsung pada kualitas hidup dan perkembangan manusia. [3]

Untuk memahami akar masalah tersebut, komunikasi perlu didefinisikan secara konseptual. Kartini et al. (2024) menjelaskan bahwa komunikasi merupakan proses penyampaian informasi, ide, emosi, dan makna melalui simbol verbal maupun nonverbal, yang bertujuan menghasilkan perubahan perilaku atau respons. [4] Sementara itu, Qorib (2024) menegaskan bahwa komunikasi adalah proses multidimensional yang melibatkan aspek kognitif, emosional, sosial, dan kultural, sehingga kegagalan pada salah satu aspek dapat memicu kesalahpahaman, konflik interpersonal, serta terganggunya relasi sosial. [5]

Kesulitan pemrosesan informasi dan mengespresikan diri menjadi tantangan komunikasi yang berkorespondensi dengan karakteristik anak tunagrahita. Tunagrahita merupakan salah satu gangguan yang mengakibatkan permasalahan pada intelektual yang rumit dan mempengaruhi kemampuan kognitif seseorang. Istilah ini digunakan untuk merepresentasikan kondisi di mana seseorang memiliki keterbatasan dalam belajar, berpikir, dan beradaptasi dengan lingkungan sekitarnya [6]. Studi menyebutkan bahwa prevalensi anak dengan tunagrahita (*Intellectual Disability*) mencapai kisaran 1-3% populasi anak. [7] Diperkuat dengan masalah sebelumnya dan kondisi anak tunagrahita dapat disimpulkan bahwa kemampuan

mengolah informasi dan kemampuan mengekspresikan diri yang baik dapat meningkatkan kemampuan komunikasi anak tunagrahita secara signifikan.

Pada anak tunagrahita yang mengalami hambatan dalam perkembangan kognitif, proses membaca tidak dapat berlangsung secara optimal. Hasil dari salah satu penelitian mengungkapkan bahwa anak tunagrahita mengalami kesulitan dalam membedakan huruf yang berbentuk mirip seperti b, d, n, u, m, dan w dikarenakan melihat huruf tersebut seperti gambar, anak tunagrahita menganggap huruf-huruf itu hanya dibolak-balik [7]. Keterbatasan dalam kemampuan memori kerja, perhatian, serta kemampuan pengolahan fonologis, di mana suatu kemampuan untuk mengenali dan memanipulasi dalam bahasa lisan, membuat mereka kesulitan dalam menguasai keterampilan mekanis seperti mengenal huruf, menghubungkan bunyi dengan simbol grafem, dan membaca kata secara akurat. Selain itu, keterampilan pemahaman membaca juga terhambat karena kemampuan bahasa reseptif dan ekspresif yang cenderung rendah, serta kesulitan dalam memahami makna, inferensi, dan struktur wacana [8].

Pada domain ekspresi diri, permasalahan yang menjadi sorotan utama pada anak tunagrahita adalah keterbatasan kemampuan *performance-type expression*, khususnya dalam konteks berbicara di depan orang lain atau situasi yang menuntut keberanian verbal. Kemampuan mengekspresikan diri pada anak tunagrahita tidak semata-mata berkaitan dengan keberanian tampil, melainkan beririsan langsung dengan keterbatasan kognitif, bahasa, dan regulasi emosi yang melekat pada kondisi disabilitas intelektual. Gejala yang muncul pada proses ekspresi diri ini meliputi respons fisiologis seperti gemetar, berkeringat, detak jantung meningkat, serta respons psikologis berupa kecemasan berlebih dan ketakutan terhadap penilaian negatif [9], [10].

Dampak keterbatasan ekspresi diri dan kecemasan berbicara pada anak tunagrahita bersifat luas dan berjangka panjang, terutama dalam konteks pendidikan dan adaptasi sosial. Anak tunagrahita yang mengalami hambatan berbicara cenderung pasif dalam interaksi kelas, sulit mengungkapkan kebutuhan atau pemahaman, serta

kurang terlibat dalam aktivitas pembelajaran berbasis komunikasi [11]. Penelitian di SLB menunjukkan bahwa keterbatasan kemampuan berbicara pada anak tunagrahita sedang berdampak langsung pada keterlambatan perkembangan sosial dan rendahnya partisipasi belajar, meskipun secara potensial mereka masih mampu mengembangkan kemampuan komunikasi melalui intervensi yang tepat [11]. Dalam jangka panjang, keterbatasan ini berpotensi memperkuat ketergantungan sosial, menghambat kemandirian, dan mempersempit peluang integrasi anak tunagrahita dalam kehidupan bermasyarakat.

Kedua aspek yang telah dibahas mulai dari kemampuan membaca dan kemampuan menyampaikan bacaan adalah masalah komunikasi dasar namun ada Masalah terakhir yang dialami oleh anak tunagrahita dalam proses komunikasi yang turunannya dalam aspek belajar adalah kemampuan menulis. Kemampuan menulis merupakan salah satu keterampilan dasar yang penting untuk perkembangan setiap individu, terutama dalam pendidikan. Menulis memungkinkan individu untuk mengungkapkan pikiran, ide, dan informasi dengan cara yang sistematis. Namun, bagi anak tunagrahita, kemampuan menulis menjadi tantangan yang lebih besar dibandingkan dengan anak pada umumnya. Gangguan yang ada pada anak tunagrahita, seperti keterbatasan intelektual dan kesulitan motorik halus, mempengaruhi kemampuan mereka untuk menulis dengan baik dan jelas. Anak tunagrahita sering kali mengalami hambatan dalam menulis huruf, kata, dan kalimat dengan benar, yang pada gilirannya dapat membatasi kemampuan mereka untuk berkomunikasi secara tertulis [12].

Keseluruhan penjelasan diatas menunjukkan bahwa komunikasi, pengolahan informasi, dan ekspresi diri merupakan tiga domain yang saling terhubung dan membentuk fondasi kemampuan individu khususnya pada anak tunagrahita dalam belajar dan menghadapi serta berinteraksi secara sosial. Berbagai penelitian menegaskan bahwa kesulitan komunikasi tidak hanya hadir pada level interpersonal, tetapi juga mencakup ketidakmampuan memahami pesan, menyandikan makna, serta mengekspresikan gagasan secara efektif, sebagaimana terlihat pada tingginya prevalensi kecemasan komunikasi dan data nasional

mengenai anak tunagrahita yang tidak dapat berkomunikasi. Oleh sebab itu, peningkatan kapasitas komunikasi melalui penguatan kemampuan mengolah informasi dan ekspresi diri menjadi langkah krusial dalam menurunkan risiko kegagalan komunikasi, meningkatkan efektivitas pembelajaran, serta memperkuat kemampuan individu anak tunagrahita dalam menghadapi tuntutan sosial di berbagai konteks kehidupan.

Untuk memformulasikan masalah dengan lebih komprehensif maka harus dapat ditetapkan stakeholder yang terlibat dalam permasalahan komunikasi ini diantaranya adalah:

1. Anak Tunagrahita

Anak Tunagrahita merupakan kelompok utama yang membutuhkan metode atau alat bantu belajar agar dapat meningkatkan kemampuan kognitif seperti membaca, berhitung, dan mengenali objek.

2. Orang tua dan keluarga anak tunagrahita

Orang tua dan keluarga sering kali menghadapi tantangan dalam mendukung proses belajar anak tunagrahita. Solusi ini diharapkan dapat membantu mereka memantau perkembangan anak dan memberikan dukungan yang tepat.

3. Guru

terutama guru SLB atau pendidik khusus, menjadi pihak yang berperan langsung dalam proses pembelajaran anak tunagrahita. Alat bantu pembelajaran ini dapat mendukung guru dalam menyampaikan materi secara lebih interaktif dan menarik. Dengan adanya media yang sesuai karakteristik anak tunagrahita, guru dapat lebih mudah mengenalkan konsep dasar dan menyesuaikan pendekatan pembelajaran.

4. Psikolog atau pelatih Keterampilan Komunikasi

Berperan dalam memberikan dukungan mental dan teknik untuk mengatasi kecemasan sosial. Mereka membantu individu dengan kecemasan berbicara di depan umum melalui terapi atau pelatihan yang sesuai.

Pentingnya penyelesaian masalah komunikasi, pengolahan informasi, dan ekspresi diri terletak pada perannya yang fundamental dalam menentukan kualitas interaksi, keberhasilan proses pendidikan, serta kemampuan individu untuk berpartisipasi secara bermakna dalam kehidupan sosial. Pada anak tunagrahita, hambatan-hambatan tersebut tidak hanya mengganggu proses belajar, tetapi juga membatasi kemampuan mereka dalam mengekspresikan kebutuhan, membangun relasi sosial, dan mengembangkan kemandirian. Apabila kondisi ini tidak ditangani secara sistematis, dampak jangka panjang yang muncul meliputi meningkatnya ketergantungan sosial, rendahnya partisipasi pendidikan, terbatasnya peluang pengembangan diri, serta berlanjutnya stigma dan eksklusi sosial terhadap kelompok disabilitas intelektual. Sebaliknya, intervensi yang tepat dan adaptif untuk memperkuat kemampuan komunikasi, pengolahan informasi, dan ekspresi diri pada anak tunagrahita tidak hanya meningkatkan kapasitas individu dalam belajar dan berinteraksi, tetapi juga memberikan manfaat kolektif berupa terciptanya lingkungan pendidikan dan sosial yang lebih inklusif, berkeadilan, dan mampu memberdayakan seluruh lapisan masyarakat secara berkelanjutan.

1.1.1 Informasi Pengenalan Masalah

Gangguan tunagrahita ini pada umumnya muncul dari masa kanak-kanak, ditandai dengan keterbatasan intelektual yang signifikan, terlihat dalam kekurangan kemampuan mereka untuk memahami, mengingat, dan mencerna informasi[6]. Menurut PP No. 72 Tahun 1991 anak tunagrahita adalah anak yang memiliki keterbelakangan mental, termasuk di sini yang keterbelakangan mental ringan dan keterbelakangan mental sedang [13]. Menurut *American Association on Mental Deficiency* (AAMD) menetapkan tunagrahita sebagai kelainan yang mencakup fungsi intelektual umum di bawah rata-rata, yakni IQ 70 ke bawah berdasarkan tes dan muncul sebelum usia 16 tahun. Anak yang berkecenderungan mental dalam arti kurang atau tunagrahita yaitu anak yang didefinisikan memiliki tingkat kecerdasan yang sedemikian rendahnya dibawah normal sehingga untuk meniti tugas pekermabgannya memerlukan bantuan atau layanan secara khusus, terutama di dalamnya kebutuhan program pendidikan dan bimbingannya.

Alfred Binet memperkenalkan konsep *mental age* (usia mental), yaitu kemampuan mental seorang anak yang dibandingkan dengan usia kronologisnya. Anak dengan

usia mental lebih rendah dari usia sebenarnya dikategorikan memiliki kecerdasan di bawah rata-rata. Berdasarkan penelitian IQ, anak tunagrahita terbagi menjadi ringan, sedang, dan berat. Pada masa awal perkembangan, perbedaan anak tunagrahita dengan anak normal belum tampak jelas, namun seiring waktu perbedaan tersebut semakin terlihat, mereka mengalami hambatan atau keterbelakangan fungsi kecerdasan, sehingga membutuhkan suatu layanan pendidikan yang khusus untuk bisa mengembangkan potensi-potensi yang ada dalam dirinya secara optimal.[14]

Anak tunagrahita dapat dibedakan berdasarkan pada tingkatan intelegensinya, yaitu tunagrahita ringan (IQ 51-70), tunagrahita sedang (IQ 36-51), tunagrahita berat (IQ 20-35), dan tunagrahita sangat berat (IQ di bawah 20) [14]. Terdapat beberapa metode dalam mengklasifikasikan ragam anak tunagrahita. Salah satunya adalah dengan pengelompokan yang didasari kepada tingkat kemampuan pendidikan anak, sebagai berikut.

Menurut American Psychiatric Association klasifikasi anak tunagrahita dibagi atas mild, moderate, severe, profound.

Tingkat keparahan tunagrahita ringan (mild) ditandai dengan keterbatasan pada domain konseptual, sosial, dan praktikal yang relatif ringan dan sering kali baru tampak jelas seiring bertambahnya usia. Pada masa prasekolah, perbedaan kemampuan konseptual umumnya belum terlihat secara signifikan. Namun, pada usia sekolah dan remaja, anak mulai mengalami kesulitan dalam mempelajari keterampilan akademik dasar seperti membaca, menulis, berhitung, memahami waktu, serta konsep uang. Pada masa dewasa, individu menunjukkan keterbatasan dalam pemikiran abstrak dan fungsi eksekutif, termasuk kemampuan perencanaan, penyusunan strategi, penetapan prioritas, dan fleksibilitas kognitif. Dalam domain sosial, individu dengan tunagrahita ringan menunjukkan tingkat kematangan interaksi sosial yang lebih rendah dibandingkan teman sebaya. Mereka sering mengalami kesulitan dalam memahami dan menafsirkan isyarat sosial secara akurat, serta menunjukkan pola komunikasi dan penggunaan bahasa yang belum matang sesuai usia perkembangan. Selain itu, regulasi emosi dan perilaku juga cenderung kurang optimal, dan kondisi ini umumnya disadari oleh lingkungan

sosialnya. Pada domain praktikal, individu umumnya mampu mengurus diri sendiri sesuai dengan usianya dalam aktivitas perawatan sehari-hari. Dalam dunia kerja, individu dewasa dengan tunagrahita ringan memiliki peluang untuk bekerja pada jenis pekerjaan yang tidak menuntut keterampilan konseptual tinggi. Meskipun demikian, mereka umumnya masih memerlukan dukungan dalam pengambilan keputusan penting, terutama yang berkaitan dengan perawatan kesehatan dan aspek hukum.

Tingkat keparahan tunagrahita sedang (moderate) ditandai dengan keterlambatan yang signifikan dalam perkembangan keterampilan konseptual secara umum. Pada usia prasekolah, perkembangan bahasa dan keterampilan pra-akademik berlangsung lebih lambat dibandingkan anak seusianya. Saat memasuki usia sekolah, kemajuan dalam kemampuan membaca, menulis, matematika, serta pemahaman konsep waktu dan uang berlangsung secara lambat dan sangat terbatas dibandingkan dengan teman sebaya. Pada masa dewasa, keterampilan akademik individu umumnya berada pada tingkat dasar sehingga dukungan tetap diperlukan. Dalam domain sosial, individu menunjukkan perbedaan yang cukup mencolok dalam perilaku sosial dan kemampuan komunikasi sepanjang tahap perkembangan. Bahasa lisan menjadi sarana utama dalam interaksi sosial, namun dengan tingkat kompleksitas dan kematangan yang jauh lebih sederhana dibandingkan teman sebaya. Selain itu, individu sering mengalami kesulitan dalam memahami dan menafsirkan isyarat sosial secara tepat. Pada domain praktikal, individu mampu memenuhi kebutuhan pribadi dasar seperti makan, berpakaian, buang air, dan menjaga kebersihan diri, meskipun pencapaian kemandirian memerlukan waktu dan pelatihan yang lebih lama serta sering membutuhkan pengingat. Keterampilan rekreasi dapat dikembangkan, tetapi umumnya memerlukan dukungan tambahan dan kesempatan belajar dalam jangka waktu yang panjang. Pada sebagian kecil individu, dapat muncul perilaku maladaptif yang berpotensi menimbulkan permasalahan sosial.

Tingkat keparahan tunagrahita berat (severe) ditandai dengan pencapaian keterampilan konseptual yang sangat terbatas. Individu umumnya memiliki pemahaman yang minimal terhadap bahasa tulis dan konsep numerasi, termasuk konsep angka, kuantitas, waktu, dan uang. Dalam kehidupan sehari-hari, pengasuh

perlu memberikan dukungan yang ekstensif dan berkelanjutan dalam proses pemecahan masalah sepanjang kehidupan individu. Pada domain sosial dan komunikasi, kemampuan bahasa lisan sangat terbatas baik dari segi kosakata maupun tata bahasa. Bentuk ucapan biasanya berupa kata tunggal atau frasa pendek dan sering kali dilengkapi dengan metode komunikasi augmentatif. Komunikasi cenderung berfokus pada peristiwa sehari-hari yang bersifat saat ini, meskipun individu masih mampu memahami ucapan sederhana serta komunikasi berbasis gestur. Dalam domain praktikal, individu membutuhkan dukungan penuh dalam seluruh aktivitas kehidupan sehari-hari seperti makan, berpakaian, mandi, dan buang air, serta memerlukan pengawasan secara terus-menerus. Individu tidak mampu membuat keputusan yang bertanggung jawab terkait kesejahteraan diri sendiri maupun orang lain. Pada sebagian kecil individu, terdapat perilaku maladaptif yang signifikan, termasuk perilaku melukai diri sendiri, yang dapat menimbulkan dampak serius.

Tingkat keparahan tunagrahita sangat berat (profound) ditandai dengan keterampilan konseptual yang terutama berkaitan dengan interaksi langsung dengan dunia fisik dan bukan pada proses simbolis. Individu mampu menggunakan objek secara fungsional dalam konteks perawatan diri, pekerjaan, dan kegiatan rekreasi sederhana, serta dapat mengembangkan beberapa keterampilan visuospasial seperti mencocokkan dan menyortir objek berdasarkan karakteristik fisik. Namun, gangguan motorik dan sensorik yang menyertai sering kali menjadi hambatan utama dalam penggunaan objek secara optimal. Dalam domain sosial dan komunikasi, individu memiliki pemahaman yang sangat terbatas terhadap komunikasi simbolik, baik dalam bentuk ucapan maupun gestur, meskipun dalam beberapa kasus mampu memahami instruksi atau isyarat gestur yang sangat sederhana. Keinginan dan emosi terutama diekspresikan melalui komunikasi nonverbal dan nonsimbolis, serta interaksi sosial umumnya dimulai dan direspons melalui isyarat gestur dan ekspresi emosional. Pada domain praktikal, individu sepenuhnya bergantung pada orang lain dalam perawatan fisik, kesehatan, dan keselamatan sehari-hari, meskipun masih dapat berpartisipasi secara terbatas dalam beberapa kegiatan. Hambatan fisik dan sensorik yang menyertai menjadi faktor utama yang membatasi partisipasi aktif individu dalam kegiatan rumah tangga,

rekreasi, dan kejuruan. Perilaku maladaptif ditemukan pada sebagian kecil individu dalam proporsi yang signifikan.

a. Neurologis Disabilitas Intelektual

Salah satu penyebab dari sebagian kasus disabilitas intelektual adalah *down syndrom* [15]. Penelitian menggunakan pencitraan resonansi magnetik (MRI) resolusi tinggi menunjukkan bahwa anak dengan *down syndrome* memiliki volume struktur otak yang secara signifikan lebih kecil dibandingkan anak normal (grup kontrol). Hasil penelitian tersebut mengungkapkan bahwa volume lobus temporal kanan dan kiri berkurang masing-masing sekitar 18,6% dan 14,2%, sedangkan volume lobus frontal kanan dan kiri berkurang sekitar 24% dan 25,2%. Selain itu, volume *hippocampus* kanan dan kiri juga mengalami penurunan sekitar 39%, serta amigdala kanan dan kiri berkurang sekitar 23,5% dibandingkan dengan kelompok kontrol. [16]

b. Fase Perkembangan Membaca Anak Normal

Terdapat kesepakatan luas bahwa anak-anak melalui fase-fase yang dapat diprediksi dalam proses menjadi pembaca (Ehri, 1999; Frith, 1985; Gough, Juel, & Roper-Schneider, 1983; Marsh, Freidman, Welch, & Desberg, 1981). Kerangka yang dikembangkan oleh Ehri merupakan salah satu yang paling banyak dibuktikan secara empiris dan terus diperbarui. [17] Fase-fase dalam kerangka Ehri bersifat fleksibel dan tidak kaku; artinya, seorang anak dapat menunjukkan perilaku pada fase yang lebih maju sebelum sepenuhnya menguasai perilaku pada fase yang lebih awal. Pada kerangka Ehri,

- a. Fase pertama adalah *pre-alphabetic phase* (fase pra-alfabetik), ketika anak mulai mengenali beberapa kata berdasarkan ingatan. Pada tahap ini, mereka belum menggunakan korespondensi huruf-bunyi dalam mengidentifikasi kata. Sebaliknya, mereka bersandar pada petunjuk visual, seperti bentuk atau warna. Contohnya, anak mengenali kata “STOP” bukan karena memahami huruf dan bunyinya, tetapi karena bentuk atau gambarnya. Fase ini sangat bergantung pada kemampuan diskriminasi visual dan pembelajaran asosiasi, dan umumnya

dialami anak usia 3–5 tahun yang belum menerima pembelajaran membaca formal.

- b. Fase kedua adalah *partial alphabetic phase* (fase alfabetik parsial). Pada fase ini, anak mulai menggunakan satu atau dua huruf, biasanya huruf pertama atau terakhir beserta bunyinya untuk menebak suatu kata. Pengetahuan korespondensi huruf–bunyi masih terbatas, tetapi berkembang sangat cepat sebagai persiapan memasuki fase alfabetik penuh. Kesadaran fonologis mulai berperan karena untuk pertama kalinya anak menggunakan segmen ujaran (misalnya bunyi huruf) saat membaca, disertai penggunaan konteks untuk menebak kata. Fase ini biasanya dialami anak usia 4–6 tahun (TK–kelas 1).
- c. Fase ketiga adalah *full alphabetic phase* (fase alfabetik penuh). Anak mampu membaca kata baru dengan mengeja huruf demi huruf, kemudian merangkai bunyi untuk mengenali kata tersebut. Pada fase ini, anak telah menguasai korespondensi huruf–bunyi secara lebih lengkap, bahkan mulai memahami hubungan yang lebih kompleks antara kluster huruf dan kluster bunyi. Mereka juga mulai membaca berdasarkan analogi. Fase ini sangat bergantung pada kesadaran fonologis, memori kerja, dan kemampuan mengakses kode fonologis dari memori jangka panjang. Biasanya terjadi pada usia 5–7 tahun.
- d. Fase terakhir adalah *consolidated alphabetic phase* (fase alfabetik terkonsolidasi). Pada fase ini, anak menggunakan unit ortografis yang telah terkonsolidasi misalnya memahami bunyi “-tion” sehingga proses identifikasi kata menjadi lebih efisien. Anak dapat membaca kata-kata yang lebih beragam, termasuk kata tidak beraturan (*exception words*). Pengetahuan mengenai pola ortografi bahasa dan pemetaan unit ortografis ke unit fonologis menjadi sangat penting. Memori kerja tetap berperan, namun bergeser fungsinya dari mengelola identifikasi kata menuju pengelolaan pemahaman bacaan. Fase ini dialami anak usia 6–8 tahun (kelas 1–3). [17], [18]

Perkembangan membaca pada tahap awal melibatkan pembentukan korespondensi, baik yang berskala kecil maupun besar serta pembelajaran untuk menerapkannya secara sistematis dan efisien. Harm dan Seidenberg mengajukan sebuah model jaringan tentang perkembangan membaca, di mana unit fonologis dan unit

ortografis saling terhubung melalui pengalaman berbahasa dan pengalaman membaca teks. Model ini menjelaskan bahwa sebelum membaca dimulai, anak sudah membangun *jaringan fonologis*. Pengetahuan fonologis mencakup pemahaman mengenai bunyi-bunyi bahasa dan bagaimana bunyi tersebut muncul bersama. Seiring anak memperoleh paparan bahasa, pola kovariasi antar fitur fonologis diperkuat dan membentuk jaringan kognitif yang stabil. Koneksi antar unit fonologis dapat bernilai positif atau negatif, tergantung seberapa sering bunyi tersebut muncul bersama. [19]

Ketika anak telah mendapatkan banyak pengalaman berbahasa, bobot hubungan ini semakin akurat, sehingga jaringan fonologis siap digunakan saat mereka mulai belajar membaca. Pada fase ini, kemampuan diskriminasi, kategorisasi, dan asosiasi bunyi sangat krusial. Ketika anak mulai belajar huruf, mereka mulai membangun *jaringan ortografis*. Pengetahuan ortografis adalah pemahaman tentang bagaimana huruf dan pola huruf muncul bersama dalam bahasa tulis. Sama seperti dalam jaringan fonologis, pengalaman membaca membentuk kekuatan hubungan antar huruf. Misalnya, jika anak menyadari bahwa huruf “k” dan “n” sering muncul berurutan pada kata tertentu, mereka mampu membedakan mana yang tampak lebih seperti kata nyata. Kemampuan diskriminasi visual, kategorisasi pola, dan asosiasi menjadi sangat penting pada tahap ini. Menurut Harm dan Seidenberg, ketika jaringan ortografis berkembang, jaringan tersebut kemudian dipasangkan dengan jaringan fonologis yang telah terbentuk lebih dahulu. Membaca pada dasarnya adalah proses memetakan unit ortografis ke unit fonologis. Saat anak semakin sering terekspos pada teks dan pelafalannya, koneksi antar kedua unit tersebut semakin diperkuat. Kesalahan membaca pada tahap awal sangat wajar karena bobot hubungan belum optimal, tetapi seiring waktu proses *decoding* menjadi lebih cepat dan akurat. Hal ini menunjukkan bahwa pembentukan dan penyempurnaan hubungan lintas-modal antara pola visual (huruf) dan pola bunyi memerlukan pemanfaatan umpan balik yang konsisten. [23],[25]

Pemahaman tentang proses membaca menurut Harm dan Seidenberg menegaskan bahwa kemampuan membaca tumbuh dari integrasi antara jaringan fonologis dan

otografis, yang masing-masing membutuhkan bunyi dan pola visual. Namun, pada anak tunagrahita, proses pembentukan koneksi lintas-modal ini sering kali tidak berkembang secara optimal sehingga hambatan muncul pada kemampuan stimulus visual. [18]

c. Warna dan Stimulus Visual pada Anak Tunagrahita

Penelitian mengenai preferensi warna pada anak tunagrahita menunjukkan bahwa stimulus visual tertentu dapat secara signifikan memengaruhi perhatian, motivasi, dan respons belajar mereka. Siswa dengan hambatan intelektual cenderung memiliki preferensi kuat terhadap warna-warna cerah dan hangat, seperti merah, biru, kuning, serta hijau terang. Warna-warna ini lebih mudah menarik perhatian dan memberikan stimulus visual yang lebih dapat diproses oleh anak, sehingga meningkatkan keterlibatan mereka dalam aktivitas pembelajaran. [20] Sebaliknya, warna-warna gelap seperti hitam, abu-abu tua, dan coklat kurang disukai karena dianggap kurang menarik dan tidak mampu memicu respons visual yang kuat. Penelitian tersebut juga mengungkapkan bahwa siswa lebih menyukai warna tunggal yang sederhana dibanding kombinasi warna kompleks atau pola visual yang rumit, sebab kompleksitas visual dapat menambah beban kognitif dan mengurangi fokus mereka. Selain itu, penggunaan warna yang sesuai preferensi anak terbukti dapat meningkatkan perilaku positif, memperbaiki atensi, serta mendukung pemrosesan informasi visual secara lebih efektif [20]

Anak dengan hambatan intelektual cenderung lebih tertarik pada stimulus visual yang bersifat konkret dan familiar, seperti foto nyata, objek nyata, atau video yang menampilkan aktivitas atau benda yang mereka kenali. Visual seperti ini meningkatkan keterlibatan karena lebih mudah diproses secara kognitif dibandingkan gambar abstrak atau ilustrasi yang kompleks. Studi tersebut juga menunjukkan bahwa siswa lebih sering memilih visual dengan kompleksitas rendah, yakni gambar tunggal tanpa latar belakang ramai dan dengan kontras yang cukup jelas, sehingga mereka dapat fokus pada satu informasi inti tanpa terganggu oleh detail tambahan. Bahkan, hasil pengukuran preferensi visual dalam penelitian tersebut memperlihatkan kecenderungan urutan minat, di mana objek nyata dan foto

realistik lebih disukai dibanding video dan gambar garis, yang berarti semakin konkret representasi visual, semakin tinggi motivasi anak untuk menghadapinya. Visual yang konsisten, sederhana, dan relevan dengan pengalaman sehari-hari terbukti membantu mempertahankan perhatian serta meningkatkan pemahaman prosedural, terutama ketika digunakan dalam instruksi langkah demi Langkah [21]

d. Auditori dalam Pembelajaran Anak Tunagrahita

Selain preferensi visual, anak tunagrahita juga memiliki karakteristik khusus dalam memproses rangsangan audio. Berdasarkan penelitian, banyak anak dengan kesulitan belajar menunjukkan hambatan dalam *Auditory Processing Disorder* (APD), yaitu kesulitan memproses dan membedakan suara, terutama ketika berada di lingkungan yang bising atau ketika informasi audio berubah terlalu cepat. Temuan ini menegaskan bahwa media audio untuk anak dengan hambatan pemrosesan pendengaran perlu dirancang dengan suara instruksi yang jelas dan menonjol dibandingkan suara latar. Artinya, tingkat kebisingan harus ditekan seminimal mungkin sehingga anak dapat memusatkan perhatian pada sumber suara utama tanpa terganggu elemen lain seperti musik latar yang terlalu kompleks. Selain kejernihan, pengaturan tempo dan jeda juga menjadi hal penting. Materi audio perlu disampaikan dengan kecepatan yang tidak terburu-buru dan disertai jeda antar kalimat atau antar unit informasi, agar anak memiliki waktu yang cukup untuk memahami satu bagian sebelum beralih ke bagian berikutnya. Pola suara yang digunakan pun sebaiknya sederhana dan berulang, sehingga anak lebih mudah mengenali ritme dan isi pesan. Intensitas suara juga perlu dijaga tetap stabil pada level yang nyaman, sekitar 60 dB HL untuk mencegah overstimulasi dan memastikan informasi dapat diterima secara optimal. [22]

e. Kecemasan Berbicara di Depan Umum (*Public Speaking Anxiety*) pada Anak Tunagrahita

Terdapat satu lagi permasalahan yang dialami oleh anak tunagrahita yaitu Ketidakmampuan menangkap informasi lisan secara utuh, terutama dalam kondisi

yang menuntut respons cepat dan perhatian berkelanjutan, meningkatkan rasa tidak aman dan kekhawatiran akan kesalahan saat berbicara di hadapan orang lain. Situasi ini menjadikan *public speaking* sebagai pengalaman yang menekan secara psikologis, sehingga upaya pengembangan keterampilan berbicara pada anak tunagrahita tidak dapat hanya berfokus pada aspek latihan verbal, tetapi juga harus memperhatikan kondisi kecemasan yang menyertai proses tersebut. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mampu mengenali dan memantau tingkat kecemasan secara objektif selama aktivitas berbicara, sehingga intervensi *public speaking* dapat disesuaikan dengan kondisi emosional dan fisiologis anak, serta dirancang secara lebih efektif, aman, dan adaptif terhadap keterbatasan pemrosesan informasi yang mereka miliki. [23]

Salah satu gejala fisiologis yang paling jelas dari kecemasan *public speaking* adalah peningkatan detak jantung (*heart rate/HR*). Ketika seseorang mengalami kecemasan, tubuh akan merespons dengan mengaktifkan sistem saraf simpatis, yang memicu respons "*fight or flight*". Dalam konteks PSA, tubuh mempersiapkan diri untuk menghadapi tekanan sosial yang dianggap sebagai ancaman. Idealnya, detak jantung seseorang saat dalam kondisi relaksasi berada dalam rentang 60 hingga 100 bpm (detak per menit) [24]. Namun, saat berbicara di depan publik atau dalam situasi evaluasi sosial, detak jantung dapat meningkat jauh melebihi batas normal tersebut.

Pada proses *public speaking*, detak jantung dapat meningkat secara signifikan, bahkan mencapai 120-150 bpm atau lebih, yang menunjukkan tingkat kecemasan yang ekstrem. Hal ini mengarah pada fenomena yang dikenal sebagai *tachycardia*, di mana jantung berdetak lebih cepat dari normal, dan ini bisa sangat mengganggu dalam konteks berbicara di depan umum karena meningkatkan ketegangan fisik dan mental [25], [26]. Peningkatan detak jantung ini bukan hanya mencerminkan respons stres tetapi juga berkontribusi pada perasaan tidak nyaman dan kurangnya kepercayaan diri saat berbicara. Berikut adalah tabel yang menunjukkan perbandingan detak jantung pada kondisi ideal dan selama PSA:

Tabel 1. 1 Klasifikasi Detak Jantung Dengan Kecemasan [25]

Keadaan	Detak Jantung (BPM)	Keterangan
Ideal (Relaksasi)	60 – 100 BPM	Detak jantung normal pada kondisi rileks
Selama Public Speaking	120 – 150 BPM	Detak jantung meningkat karena kecemasan
Kecemasan Ekstrem	150 BPM atau lebih	Peningkatan ekstrem pada individu dengan PSA

Peningkatan detak jantung pada tabel 1.2 sejalan dengan pengaruh eksternal yang individu terima dari lingkungan ini berdampak dalam proses internalisasi respon yang mengindikasikan individu mengalami stress berat dan secara kumulatif mempengaruhi kemampuan untuk berbicara dengan percaya diri dan lancar. Selain detak jantung, *Galvanic Skin Response* (GSR) juga dapat menjadi indikator yang mampu mengkalkulasikan PSA. GSR mengukur konduktivitas listrik pada kulit yang dipengaruhi oleh kelembaban yang dihasilkan oleh keringat. Ketika anak tuangrahitia merasa cemas, kelenjar keringat menjadi lebih aktif, yang menyebabkan peningkatan konduktivitas kulit. Dalam keadaan ideal, nilai GSR akan rendah karena keringat yang minimal saat tubuh dalam keadaan rileks. Namun, selama situasi berbicara di depan publik, tubuh merespons kecemasan dengan lebih banyak keringat, sehingga GSR meningkat. Idealnya, GSR pada individu yang tidak cemas berada pada kisaran 0.5-2.0 μ S, mencerminkan kondisi tubuh yang rileks[27]. Namun, selama *Public Speaking*, GSR dapat meningkat secara signifikan hingga 5.0-8.0 μ S atau lebih, mencerminkan tingginya tingkat kecemasan yang mempengaruhi sistem saraf simpatis. Berikut adalah tabel 1.3 yang menunjukkan perbandingan antara nilai GSR pada kondisi rileks dan saat PSA:

Tabel 1. 2 Klasifikasi GSR Dengan Kecemasan [28]

Keadaan	GSR (μ S)	Keterangan

Ideal (Relaksasi)	0.5–2.0 μ S	Nilai GSR rendah menunjukkan kondisi rileks
Selama Public Speaking	5.0–8.0 μ S	GSR meningkat akibat peningkatan keringat saat cemas
Kecemasan Ekstrem	10 μ S atau lebih	GSR meningkat secara signifikan pada kecemasan tinggi

Peningkatan GSR koresponden dengan Tingkat kecemasan individu, semakin tinggi aktivitas kelenjar keringat maka mengindikasikan adanya respon terhadap kecemasan dan ini dapat memberikan Gambaran mengenai intensitas stress yang dialami oleh individu. Terdapat satu lagi gejala fisiologis yang dapat mengindikasikan kecemasan berbicara didepan umum yaitu gelombang otak atau Elektroensefalografi (EEG) yaitu teknik yang digunakan untuk merekam aktivitas listrik di otak melalui elektroda yang ditempatkan di kulit kepala. Aktivitas otak ini dapat dianalisis untuk memahami berbagai kondisi psikologis, termasuk kecemasan, dengan memantau gelombang otak yang diproduksi selama respons stres atau kecemasan. EEG telah digunakan dalam berbagai penelitian untuk mengidentifikasi pola-pola gelombang otak yang berkaitan dengan kecemasan, termasuk dalam konteks *Public Speaking Anxiety* (PSA) terhadap anak tunagrahita.

EEG memberikan informasi penting tentang aktivitas otak yang dapat mengindikasikan kecemasan. Dalam konteks PSA, EEG dapat digunakan untuk menganalisis perubahan dalam pola gelombang otak selama simulasi berbicara di depan audiens. Gelombang otak, seperti gelombang alfa (8–12 Hz), beta (13–30 Hz), dan theta (4–8 Hz), memiliki korelasi yang signifikan dengan tingkat kecemasan yang dirasakan.[29] Penelitian menunjukkan bahwa penurunan aktivitas gelombang alfa dan peningkatan gelombang beta sering terjadi pada individu yang mengalami kecemasan tinggi. Gelombang beta biasanya terkait dengan keadaan

terjaga dan fokus, namun juga dapat meningkat pada situasi stres, seperti berbicara di depan publik.[28]

Pola Gelombang Otak yang Terkait dengan Kecemasan

1. Gelombang Alfa (8–12 Hz)

Gelombang ini berhubungan dengan keadaan relaksasi dan ketenangan. Penurunan gelombang alfa dapat menunjukkan peningkatan kecemasan. Individu yang mengalami kecemasan cenderung memiliki gelombang alfa yang lebih rendah, menunjukkan ketegangan mental yang tinggi. [29]

2. Gelombang Beta (13–30 Hz)

Gelombang beta sering dikaitkan dengan aktivitas mental yang tinggi, seperti berpikir dan konsentrasi. Peningkatan gelombang beta di area otak tertentu, seperti frontal dan parietal, sering kali terjadi pada individu yang mengalami kecemasan, karena tubuh mereka berada dalam keadaan "waspada tinggi" atau respons terhadap ancaman. [29]

3. Gelombang Theta (4–8 Hz)

Gelombang theta berhubungan dengan perasaan mengantuk atau meditatif. Meskipun gelombang theta biasanya lebih aktif dalam kondisi relaksasi, penelitian juga menunjukkan bahwa meningkatnya aktivitas theta dapat berhubungan dengan peningkatan kecemasan dalam situasi tertentu, termasuk kecemasan sosial atau ketidakpastian. [29]

Berikut disertakan table 1.4 komparasi kondisi gelombang otak (EEG) terhadap perubahan kondisi kecemasan seseorang:

Tabel 1. 3 Prevalensi Sinyal EEG Terhadap Kecemasan [29]

Jenis Gelombang Otak	Frekuensi	Kondisi Normal (Relaksasi)	Kondisi Kecemasan (PSA)	Korelasi dengan Kecemasan
Alfa	8–12 Hz	Dominan saat relaksasi dan ketenangan	Menurun saat kecemasan meningkat	Penurunan gelombang alfa menunjukkan

				kecemasan tinggi
Beta	13–30 Hz	Terhubung dengan aktivitas mental yang tinggi	Peningkatan gelombang beta di area frontal dan parietal	Peningkatan gelombang beta menunjukkan peningkatan kecemasan
Theta	4–8 Hz	Terhubung dengan perasaan mengantuk atau meditatif	Peningkatan gelombang theta di beberapa area otak	Meningkatnya gelombang theta dapat menunjukkan kecemasan tinggi pada situasi tertentu

Dengan menggunakan EEG dapat memantau tingkat kecemasan namun penggunaannya lebih ditekankan untuk proses relaksasi karena kondisi gelombang otak sangat fluktuatif dan membutuhkan treatment yang benar benar focus dan tidak banyak pergerakan sehingga tidak dianjurkan untuk diterapkan dalam proses latihan.[29]

Penjelasan sebelumnya menjelaskan gambaran tentang respon sistem saraf simpatis secara umum tetapi ada satu indikator penting yang mengindikasikan adanya fluktuasi performa public speaking yaitu suara, parameter suara memainkan peran penting karena suara yang dihasilkan oleh seseorang sangat dipengaruhi oleh kecemasan atau ketegangan emosional. Salah satu parameter utama yang digunakan untuk menganalisis PSA adalah *Mel-Frequency Cepstral Coefficients* (MFCC). MFCC adalah representasi numerik dari spektrum suara yang berfokus pada bagaimana manusia mendengar frekuensi. Dengan kata lain, MFCC mengubah sinyal suara menjadi koefisien yang merepresentasikan kualitas suara (*timbre*). [26]

Individu dengan tingkat kecemasan tinggi cenderung menunjukkan penurunan kualitas suara yang terekam dalam nilai MFCC, khususnya pada rata-rata (*mean*) dan deviasi standar (*std*) dari koefisien yang diekstrak. Nilai MFCC yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dibanding baseline biasanya menandakan adanya gangguan pada kestabilan suara yang berhubungan dengan kecemasan. Selain itu, penelitian lain juga menunjukkan bahwa beberapa koefisien MFCC berhubungan signifikan dengan tingkat kecemasan, terutama saat berbicara spontan (*impromptu speech*) yang menuntut respon cepat di bawah tekanan. Selain MFCC, frekuensi dasar (F0) juga merupakan parameter suara yang sangat penting dalam mendeteksi PSA. F0 mengukur pitch suara, yang berkaitan langsung dengan ketegangan pada pita suara. Pada individu yang mengalami PSA, F0 dan MFCC cenderung meningkat, yang mencerminkan ketegangan laring yang disebabkan oleh kecemasan. [26]

Individu yang mengalami kecemasan tinggi sering memiliki F0 yang lebih dari 180 Hz, yang menunjukkan ketegangan yang jelas dalam kontrol vokal mereka. Di sisi lain, pada individu yang tidak mengalami kecemasan, F0 cenderung berada dalam kisaran yang lebih rendah, biasanya sekitar 120 Hz atau lebih rendah dalam situasi normal. Disisi lain, threshold MFCC dapat dipakai dengan mengukur perbedaan rata-rata nilai koefisien dibandingkan kondisi normal. Nilai MFCC >10 dB (pada rata-rata energi spektral) sering dijadikan indikator adanya peningkatan kecemasan dalam konteks public speaking. baik MFCC maupun F0 memberikan gambaran yang jelas tentang bagaimana kecemasan dapat mengubah kualitas suara, yang memberikan informasi penting dalam mendeteksi PSA.

Berikut adalah table 1.5 yang menunjukkan ambang batas untuk MFCC dan F0, yang digunakan untuk mendeteksi kecemasan berbicara di depan umum:

Tabel 1. 4 Prevalensi MFCC dan F0 Terhadap Kecemasan

Keadaan	MFCC (dB)	F0 (Hz)	Keterangan
---------	--------------	---------	------------

Ideal (Relaksasi)	< 10 dB	100 – 120 Hz	Kualitas suara stabil, pitch rendah, menunjukkan kondisi tenang
Selama PSA	> 10 dB	> 180 Hz	Perubahan kualitas suara, pitch naik karena ketegangan vocal
Kecemasan Ekstrem	> 15 dB	200 Hz atau lebih	Distorsi suara signifikan, pitch sangat tinggi, menandakan kecemasan berat

Selain MFCC dan F0, dua parameter suara lain yang sangat berguna dalam mendeteksi PSA adalah Shimmer dan Jitter. Shimmer mengukur variasi amplitudo suara, yaitu fluktuasi dalam kekuatan suara dari satu siklus suara ke siklus berikutnya. Ini berfungsi sebagai indikator fisik dari ketegangan yang terjadi dalam tubuh saat seseorang merasa cemas. ketika shimmer lebih tinggi dari 0.05 (unit relatif), itu menunjukkan adanya kecemasan yang signifikan, dengan suara yang lebih gemetar atau kurang stabil.[26]

Jitter mengukur variasi dalam frekuensi suara, yang mengindikasikan ketidakstabilan pitch suara dari satu siklus ke siklus berikutnya. Pada individu yang mengalami PSA, jitter seringkali meningkat karena kecemasan mempengaruhi kontrol suara mereka. Jitter yang lebih tinggi dari 0.03% menunjukkan adanya kecemasan yang lebih signifikan, sementara nilai jitter yang lebih rendah (sekitar 0.01%) biasanya ditemukan pada individu yang tidak mengalami PSA.[26]

Ditambah indikator pendukung lain yaitu perubahan pada *formant frequencies* (F1 dan F2) yang memberikan gambaran tentang kecemasan yang memengaruhi artikulasi suara. *Formant frequencies* adalah frekuensi resonansi utama pada saluran vokal yang membentuk kualitas vokal seseorang. F1 berhubungan dengan tinggi rendahnya posisi lidah, sementara F2 berkaitan dengan posisi lidah ke depan

atau ke belakang dalam rongga mulut. Dalam kondisi kecemasan, otot-otot artikulasi (lidah, rahang, bibir) menjadi lebih tegang sehingga mengubah konfigurasi resonansi. saat kecemasan meningkat, terjadi perubahan pola pada F1 dan F2, terutama dalam bentuk peningkatan rasio F1/F2 dan berkurangnya kejernihan vokal (*vowel clarity*)[25]. Dalam kondisi cemas, otot-otot artikulasi menjadi tegang sehingga menyebabkan perubahan rasio F1/F2. Normalnya, rasio ini stabil di atas 0.30, tetapi pada individu dengan PSA sering turun ke bawah 0.25–0.30, yang membuat artikulasi terdengar kurang jelas. Hal ini menandakan bahwa kecemasan tidak hanya mengubah kestabilan suara, tetapi juga memengaruhi kejelasan tutur kata.[25]

Kecemasan berbicara juga tercermin dalam pola jeda (*pause duration*) dan kecepatan berbicara (*speech rate*). Individu dengan PSA cenderung lebih sering berhenti sejenak, baik dengan jeda hening maupun pengisi suara seperti “uh” atau “emm”. Pada kondisi normal, durasi jeda hanya sekitar 10% dari total waktu berbicara, tetapi pada PSA bisa meningkat hingga 15–20%. Sementara itu, *speech rate* normal berkisar 120–150 kata per menit. Saat cemas, ada dua pola ekstrem: bicara melambat hingga di bawah 120 kata per menit karena kesulitan menyusun kalimat, atau justru terlalu cepat melampaui 160 kata per menit karena ingin segera mengakhiri situasi menegangkan.[27] Prevalensi parameter ini dapat dilihat pada table 1.6.

Tabel 1. 5 Prevalensi Parameter Suara Terhadap Kecemasan

Parameter	Indikator	Threshold	Keterangan
Shimmer	Variasi amplitudo antar siklus suara	Normal: <0.05 PSA: >0.05	Suara bergetar/tidak stabil, tanda ketegangan vokal
Jitter	Variasi frekuensi dasar antar siklus	Normal: ~0.01% PSA: >0.03%	Ketidakstabilan pitch, menandakan kontrol vokal terganggu

F1/F2	Resonansi vokal (artikulasional clarity)	Normal: ratio >0.30 PSA: <0.25–0.30	Artikulasi kurang jelas karena otot lidah/rahang tegang
Pause Duration	Persentase jeda selama berbicara	Normal: <10% PSA: >15–20%	Menunjukkan keraguan, beban kognitif tinggi, atau gugup
Speech Rate	Kecepatan berbicara (kata/menit)	Normal: 120–150 wpm PSA: <120 atau >160	Bicara melambat karena cemas, atau terlalu cepat akibat ingin segera selesai

Secara keseluruhan, dengan menggabungkan berbagai parameter suara seperti MFCC, F0, Shimmer, Jitter, F1/F2, dan kecepatan, PSA dapat lebih jelas didefinisikan dengan cara ini secara lebih jelas dan objektif. Setiap parameter memberikan insight yang berbeda tentang bagaimana kecemasan memengaruhi suara seseorang, memungkinkan untuk mengidentifikasi tingkat kecemasan.

Namun, Dalam domain *Public Speaking Anxiety* (PSA) menurut Dr.Septi Mayang Sari Dosen Psikologi UNAND, kecemasan yang dialami tidak hanya terletak pada respons emosional atau fisiologis secara umum, tetapi juga dapat dilihat dalam reaksi fisik dan psikosomatik yang terjadi pada tubuh, termasuk di posisi kepala yang cenderung ke bawah atau menghadap ke arah lain sering kali menjadi manifestasi fisik dari ketegangan mental, rasa tidak percaya diri, dan keinginan untuk menghindari perhatian audiens. Posisi kepala ini bisa menjadi indikasi adanya respon psikologis terhadap kecemasan, yang mengarah pada perubahan dalam cara tubuh berinteraksi dengan lingkungan sosial sekitar.

Posisi kepala yang menunduk ini berfungsi sebagai mekanisme pertahanan terhadap rasa takut atau cemas terhadap penilaian negatif dari orang lain. Ketika seseorang merasa terancam atau tidak nyaman, terutama dalam situasi berbicara di depan

umum, mereka sering kali secara involunter akan menurunkan pandangannya, mencari tempat yang lebih aman, atau mencoba menghindari fokus dari audiens.[30] Fenomena ini juga dikenal dengan istilah “*withdrawal behavior*” dalam psikologi, yang menggambarkan keinginan untuk menghindari atau mengurangi interaksi dengan audiens, biasanya karena rasa cemas. Posisi kepala yang sedikit menunduk (sekitar 15 hingga 30 derajat) umumnya menunjukkan ketidakpastian, sementara posisi yang lebih rendah (45 hingga 60 derajat) mengindikasikan kecemasan yang lebih parah, di mana individu berusaha menghindari perhatian audiens. [28] Dalam situasi yang lebih ekstrem, posisi kepala yang lebih rendah dari 60 derajat dapat mencerminkan keinginan untuk sepenuhnya menghindari kontak sosial dan menunjukkan penarikan diri secara psikologis.[28]

Pemaparan sebelumnya menjelaskan tentang gejala yang bisa dimonitoring waktu proses Public Speaking yang menandakan adanya gejala kecemasan, tapi untuk bisa menyelesaikan masalah PSA ada beberapa aspek yang harus dilakukan selain mengidentifikasi gejala harus ada acara untuk mengatasi kecemasan itu sendiri melalui proses latihan. Dalam tahap training public speaking, penting untuk menyediakan kombinasi pendekatan yang tidak hanya fokus pada aspek teknis, tetapi juga aspek psikologis. Berdasarkan penelitian sebelumnya, terdapat beberapa hal yang perlu diprovide dalam sesi pelatihan. Pertama, lingkungan latihan yang suportif dan kolaboratif melalui metode *peer teaching*. Peserta akan lebih mudah mengurangi kecemasan ketika berlatih bersama teman sebaya dibandingkan di hadapan audiens formal, karena suasana yang lebih santai dapat menurunkan rasa takut terhadap penilaian negatif[31]. Selain itu, pemodelan perilaku (*vicarious experience*) juga menjadi aspek penting, dimana peserta dapat mencontoh strategi berbicara dari role model yang berhasil. Dengan demikian, mereka memperoleh gambaran nyata bagaimana teknik public speaking diterapkan, yang berdampak langsung pada peningkatan *self-efficacy*[32].

Kedua, pelatihan harus menyertakan komponen treatment atau perlakuan untuk menurunkan Tingkat kecemasan disini ada dua perilaku yang terbukti efektif untuk menurunkan Tingkat kecemasan, terdapat riset penting dalam penelitian regulasi

kecemasan adalah bagaimana persepsi seseorang terhadap sinyal tubuhnya dapat dimodifikasi melalui intervensi berbasis *haptic feedback*. Studi *EmotionCheck* menunjukkan bahwa getaran halus yang mensimulasikan denyut jantung lambat dapat secara langsung mempengaruhi appraisal kognitif seseorang terhadap kecemasan [33]. Mekanismenya sederhana namun kuat Dimana ketika tubuh menerima rangsangan ritmis yang menyerupai detak jantung tenang, otak menafsirkan situasi sebagai kurang berbahaya, sehingga respons simpatis yang memicu kecemasan menurun secara signifikan didukung juga dengan penelitian yang melibatkan 67 peserta, kondisi “*slow heart rate vibration*” menghasilkan penurunan kecemasan paling besar secara signifikan lebih efektif dibandingkan kondisi tanpa getaran, getaran biasa, maupun getaran yang mengikuti detak jantung asli pengguna.[33]

Teknologi ini bekerja melalui *subtle haptic pulses* yang ditempatkan pada pergelangan tangan dengan intensitasnya sangat rendah, ritmis, dan tidak mengganggu fokus.[33] Mayoritas partisipan bahkan melaporkan bahwa getaran tidak terasa mengalihkan perhatian selama tugas presentasi sosial, sehingga intervensi haptic cocok diterapkan dalam skenario *public speaking* yang membutuhkan konsentrasi tinggi. Dengan demikian, *haptic-based false feedback* menjadi salah satu pendekatan regulasi kecemasan paling menjanjikan karena memberikan pengaruh pada tingkat interoceptive awareness individu yaitu persepsi terhadap sinyal tubuhnya sendiri tanpa menambah beban kognitif. [33]

Selain haptic cara lain berupa persuasi audio berupa suara dorongan bantuan dan afirmasi positif terbantu terbukti membantu menenangkan kondisi emosional peserta, terutama saat mereka menunjukkan gejala PSA seperti gemetar atau kehilangan fokus [32]. Ketiga, pelatihan sebaiknya menekankan latihan berulang (*mastery experience*) dengan memberikan kesempatan bagi peserta untuk mencoba berulang kali dalam berbagai situasi simulatif. Pengalaman keberhasilan kecil dari tiap sesi akan secara kumulatif membangun rasa percaya diri [32]. Keempat, pengelolaan aspek emosional harus dipandu dengan teknik relaksasi sederhana,

seperti pernafasan teratur, teknik fokus visual, atau jeda terstruktur dalam presentasi.

Dengan mengintegrasikan faktor-faktor tersebut ke dalam desain training, pelatihan public speaking tidak hanya akan mengurangi kecemasan tetapi juga secara nyata meningkatkan kemampuan komunikasi peserta. Hal ini sesuai dengan temuan Ayiz & Tauchid (2024) yang menekankan efektivitas peer teaching dalam mengurangi PS yang membuktikan bahwa penggunaan vicarious experience melalui Speak Up Now Training dapat meningkatkan public speaking self-efficacy[31].

Pada kemampuan menulis dalam banyak kasus, anak tunagrahita kesulitan dalam menulis secara berurutan atau menyusun kalimat yang sesuai dengan aturan bahasa yang benar. Kesalahan umum dalam menulis yang sering terjadi termasuk penghapusan huruf atau kata, kesalahan bunyi konsonan dan vokal, serta kesulitan dalam menulis huruf atau angka dengan bentuk yang serupa. [34] Keterampilan menulis yang baik sangat penting bagi anak tunagrahita untuk dapat berpartisipasi dalam pembelajaran dan kehidupan sosial mereka. Tanpa kemampuan menulis yang memadai, mereka akan kesulitan dalam mengikuti proses belajar di sekolah, yang seringkali bergantung pada kemampuan untuk menulis tugas, menyusun esai, atau bahkan mengikuti instruksi secara tertulis. [35]

1.1.2 Analisis Masalah dan Konstrain

Dalam perancangan dan pengembangan sistem pembelajaran bagi anak tunagrahita, diperlukan analisis permasalahan dan konstrain secara menyeluruh agar solusi yang dihasilkan tepat sasaran, aman, serta sesuai dengan karakteristik pengguna. Anak tunagrahita memiliki keterbatasan tertentu yang tidak hanya berkaitan dengan aspek kognitif, tetapi juga psikologis, pedagogis, serta kesehatan dan keselamatan. Oleh karena itu, pengembangan sistem harus mempertimbangkan berbagai konstrain yang mencakup keterbatasan kemampuan berpikir dan emosi anak, prinsip pendidikan khusus yang sesuai, aspek etika dan keselamatan penggunaan, serta batasan usia pengguna dan umur pakai alat. Analisis konstrain ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem yang dirancang dapat digunakan secara efektif, berkelanjutan, dan bertanggung jawab sesuai dengan kebutuhan serta kondisi anak tunagrahita.

1.1.2.1 Aspek Kognitif dan Psikologi

kognitif dan psikologis pada individu tunagrahita yang menjadi target pengembangan kemampuan membaca dan *public speaking* perlu diletakkan pada dua fakta operasional yang bersifat batasan: pertama, adanya keterbatasan belajar (*special learning needs*) yang membuat individu tidak efektif bila hanya diberi instruksi abstrak, materi tertulis, atau pelatihan kelompok standar; kedua, adanya kerentanan psikologis yang dapat memperburuk performa komunikasi ketika tuntutan sosial meningkat. Studi Llewellyn menunjukkan bahwa kelompok dengan *intellectual disability* dalam konteks layanan sosial sering diidentifikasi bukan semata karena label diagnostik, tetapi karena “*cognitive limitations resulting in learning difficulties*” yang membuat mereka tidak memperoleh manfaat optimal dari metode pembelajaran tradisional seperti materi tertulis atau instruksi kelompok, sehingga dibutuhkan adaptasi pembelajaran yang spesifik dan terstruktur. [36]

Dari sisi kognitif, konstrain utama yang harus diakui adalah rendahnya kapasitas pemrosesan informasi yang memengaruhi kecepatan memahami instruksi, mengintegrasikan beberapa isyarat sekaligus, dan mempertahankan informasi dalam memori kerja ketika performa sedang berlangsung. Pada studi tersebut, indikator “*special learning need*” tampak bukan hanya dari riwayat pendidikan khusus, tetapi juga dari profil kemampuan dasar yang sangat variatif: skor IQ pada K-BIT berada pada rentang 40–97 dengan rerata 72,6 dan lebih dari dua pertiga sampel berada pada IQ <70–79. Variabilitas ini menegaskan konstrain desain yang kritical yaitu solusi pembelajaran dan komunikasi harus memiliki mekanisme adaptasi tingkat kesulitan, panjang instruksi, dan jumlah langkah dalam satu siklus latihan. Jika sesi latihan memuat terlalu banyak komponen dalam satu waktu, beban kognitif akan cepat melampaui kapasitas individu, sehingga akurasi performa turun dan frustrasi meningkat. Implikasi teknisnya, arsitektur pelatihan harus memecah kompetensi *public speaking* menjadi unit mikro yang dapat diamati, dilatih, dan dievaluasi secara berurutan, dengan kriteria keberhasilan yang sederhana dan dapat dicapai bertahap. [36]

Konstrain berikutnya adalah keterbatasan literasi fungsional dan pemahaman bahasa yang berdampak langsung pada format materi peajaran membaca dan *public speaking*. Studi tersebut memperlihatkan bahwa komponen membaca (*rate, accuracy, comprehension*) berada pada rerata usia baca sekitar 9-10 tahun.[36] Walaupun pesannya sudah jelas materi yang bergantung pada teks panjang, istilah abstrak, atau instruksi multi-kalimat tanpa dukungan visual akan menjadi hambatan. Untuk pelatihan membaca dan public speaking, hal ini mengunci keputusan desain bahwa prompt latihan, contoh skrip, dan umpan balik harus diubah menjadi bahasa sangat konkret, kalimat pendek, dan idealnya diperkuat oleh contoh visual atau demonstrasi perilaku yang benar. Pada tahap implementasi, ini juga berarti evaluasi performa tidak boleh hanya mengandalkan laporan diri (*self-report*) atau instruksi tertulis, tetapi harus mengandalkan pengamatan langsung, isyarat visual, serta umpan balik segera setelah respons.[36]

Dari sisi psikologis, konstrain yang paling berpengaruh adalah kerentanan terhadap stres, kecemasan sosial, dan penurunan motivasi ketika menghadapi evaluasi. Studi Llewellyn dkk. menunjukkan bahwa subjek melaporkan kondisi kesehatan yang lebih buruk pada seluruh subskala SF-36 dibanding norma populasi, termasuk komponen *mental health* yang terkait perasaan cemas dan depresi. pada individu tunagrahita, kombinasi keterbatasan kognitif dan rasa tidak aman dapat mempercepat aktivasi stres sehingga performa turun sebelum keterampilan “inti” sempat ditampilkan. [36] Konstrain motivasional ini harus ditangani sebagai bagian dari rancangan sistem, bukan dianggap sebagai faktor eksternal. Secara teknis, ini mengikat kebutuhan akan desain intervensi yang mempertahankan engagement melalui penguatan positif yang sering dan terencana, sekaligus meminimalkan pemicu stres yang tidak perlu. Berdasarkan penjelasan konstraian tersebut maka dirumuskan beberapa statement fitur yang harus disediakan oleh sistem yaitu yaitu *Error correction* Dimana alat dilengkapi dengan fitur koreksi kesalahan yang memberikan jawaban yang benar ketika anak memberikan jawaban yang salah. Fitur ini membantu anak memahami kesalahannya, sehingga memperkuat proses belajar membaca.

1.1.2.2 Aspek Pedagogis dan Pendidikan Khusus.

Konstrain pedagogis dalam pendidikan anak tunagrahita yang menjadi target pengembangan kemampuan membaca dan public speaking tidak dapat dilepaskan dari karakteristik pembelajaran pendidikan khusus yang menuntut pendekatan konkret, bertahap, dan berulang. Dalam konteks ini, batasan utama terletak pada ketidakefektifan metode pedagogi konvensional yang bertumpu pada satu modalitas belajar, khususnya pendekatan visual-tekstual atau verbal abstrak. Anak tunagrahita secara operasional menunjukkan kesulitan ketika pembelajaran hanya disampaikan melalui ceramah, instruksi lisan panjang, atau bahan ajar tertulis tanpa dukungan pengalaman sensorik. Kondisi ini membatasi penggunaan alat pembelajaran monomodal dan mengharuskan penerapan pendekatan *multisensory* sebagai prasyarat pedagogis.

Secara pedagogis, konstrain pertama yang bersifat mengikat adalah kebutuhan akan pembelajaran konkret berbasis pengalaman sensorik langsung. Anak tunagrahita memiliki keterbatasan dalam membangun makna dari simbol abstrak seperti huruf, kata, maupun konsep komunikasi lisan (intonasi, jeda, dan ekspresi) apabila tidak diperkuat oleh rangsangan sensorik yang dapat dilihat, didengar, dan dirasakan. Oleh karena itu, pembelajaran membaca dan *public speaking* tidak dapat hanya mengandalkan teks atau suara, tetapi memerlukan integrasi stimulus visual, auditori, dan kinestetik. Konstrain ini mengunci keputusan desain bahwa alat bantu pembelajaran harus mendukung *multisensory learning* sebagai mekanisme utama pembentukan pemahaman.

Konstrain pedagogis berikutnya berkaitan dengan kebutuhan pengulangan (*repetition*) yang tinggi dalam proses belajar. Anak tunagrahita umumnya memerlukan frekuensi latihan yang jauh lebih banyak untuk mencapai tingkat pemahaman dan retensi yang stabil. Satu kali penyampaian materi, meskipun telah menggunakan pendekatan *multisensory*, sering kali belum cukup untuk memastikan keterampilan membaca atau *public speaking* dapat dipahami dan diingat. Kondisi ini membatasi penggunaan metode pembelajaran yang bersifat sekali pakai atau tidak memungkinkan pengulangan konsisten. Dari sudut pandang desain solusi, konstrain ini mengharuskan alat pembelajaran dirancang agar mudah digunakan

berulang kali, dengan struktur latihan yang sama, alur yang konsisten, dan stimulus sensorik yang dapat diakses kembali tanpa meningkatkan kompleksitas kognitif.

Konstrain pedagogis lain yang signifikan adalah ketergantungan pada modelling dan umpan balik langsung dalam setiap siklus pengulangan. Anak tunagrahita membutuhkan contoh yang dapat diamati dan ditiru secara berulang untuk memperkuat pembelajaran. Umpan balik yang tertunda atau hanya disampaikan secara verbal sering kali tidak efektif. Oleh karena itu, solusi pembelajaran dibatasi pada alat yang mampu menyediakan umpan balik secara langsung, sehingga setiap latihan tidak hanya menjadi repetisi mekanis, tetapi juga kesempatan untuk memperkuat pemahaman melalui koreksi segera.

Dengan mempertimbangkan keseluruhan batasan tersebut, dapat ditegaskan bahwa konstrain pedagogis dalam pendidikan khusus anak tunagrahita secara inheren mengharuskan penggunaan untuk memenuhi beberapa fitur yang pertama adalah kemampuan latihan yang terstandarisasi sesuai tingkat perkembangan anak berdasarkan Keputusan Kepala BSKAP No. 033/H/KR/2022. Regulasi ini menetapkan capaian pembelajaran inti bagi peserta didik berkebutuhan khusus, termasuk anak tunagrahita. Dalam mata pelajaran Bahasa Indonesia untuk Pendidikan Khusus, regulasi ini menekankan pengembangan literasi fungsional, yang mencakup kemampuan memahami simbol, kata, dan teks sederhana sesuai tingkat perkembangan anak.

1.1.2.3 Aspek Kesehatan Dan Keamanan Data Fisiologis

Dari perspektif kesehatan dan keselamatan, penggunaan sensor fisiologis seperti detak jantung, variabilitas detak jantung, aktivitas kulit (*electrodermal activity*), atau indikator fisiologis lain harus mempertimbangkan kerentanan fisik dan psikologis subjek anak. [37] Literatur menunjukkan bahwa meskipun sebagian besar pengukuran fisiologis bersifat non-invasif, sinyal-sinyal tersebut sangat sensitif terhadap berbagai faktor non-kognitif seperti emosi, stres, aktivitas fisik, dan kondisi lingkungan, sehingga berpotensi menimbulkan overstimulasi atau ketidaknyamanan apabila tidak dirancang secara tepat. Pada anak tunagrahita, sensitivitas ini menjadi konstrain kesehatan yang nyata karena stimulasi berlebih,

ketidaknyamanan sensor, atau prosedur yang terlalu rumit dapat memperburuk kecemasan, mengganggu fokus belajar, dan justru menurunkan efektivitas intervensi *public speaking*. [37] Oleh karena itu, solusi yang dirancang harus membatasi penggunaan sensor pada perangkat yang aman, ringan, tidak membatasi gerak, serta tidak menimbulkan persepsi “dipantau secara medis” yang dapat meningkatkan tekanan psikologis anak.

Selain aspek fisik konstrain juga mencakup validitas interpretasi data fisiologis agar tidak menimbulkan kesalahan penanganan. Studi menegaskan bahwa tidak ada satu indikator fisiologis tunggal yang sepenuhnya stabil dan sensitif di semua jenis tugas, karena setiap sinyal dipengaruhi oleh konteks aktivitas dan kondisi individu. [38] hal ini berarti bahwa peningkatan detak jantung atau respons kulit tidak selalu merepresentasikan kecemasan semata, tetapi bisa mencerminkan kelelahan, kebingungan, atau reaksi terhadap stimulus lingkungan. Konstrain ini mengharuskan sistem deteksi kecemasan dirancang secara konservatif, menggunakan ambang batas aman, serta menghindari interpretasi yang bersifat diagnostik atau klinis. [38] Data fisiologis harus diperlakukan sebagai indikator pendukung adaptasi pembelajaran, bukan sebagai alat diagnosis kesehatan, sehingga tidak menimbulkan risiko etik maupun psikologis bagi anak.

Konstrain berikutnya berkaitan langsung dengan keamanan data dan perlindungan privasi, mengingat data fisiologis termasuk dalam kategori data personal yang sensitif. Pengukuran sinyal seperti detak jantung, respons kulit, atau pola fisiologis lain merepresentasikan kondisi internal individu yang, jika disalahgunakan, dapat melanggar hak privasi dan martabat subjek penelitian. [37] Literatur tentang penggunaan data fisiologis menekankan pentingnya pengelolaan data yang hati-hati karena sinyal tersebut dapat mengungkap kondisi mental, tingkat stres, dan respons emosional individu secara tidak langsung. Dalam kasus anak tunagrahita, risiko ini menjadi lebih tinggi karena subjek termasuk kelompok rentan yang belum mampu memberikan persetujuan secara penuh dan sadar. [38] Oleh sebab itu, konstrain keamanan data mengharuskan sistem dirancang dengan prinsip minimisasi data, yakni hanya merekam parameter yang benar-benar diperlukan untuk tujuan adaptasi pembelajaran, tanpa menyimpan data mentah dalam jangka panjang.

Aspek yang paling penting diturunkan dari konstrain ini terkait keamanan dan etika pembuatan sistem berbasis data fisiologis, maka aspek ini akan menerjemahkan kedalam dua point yaitu:

- a. *Biometric Data Security and Privacy*, Dalam sistem ini, data biometrik seperti detak jantung, GSR, dan parameter suara digunakan untuk menganalisis tingkat kecemasan pengguna. sifat sensitif data biometrik, fitur keamanan dan privasi sangat penting. Sistem ini dilengkapi dengan enkripsi data untuk memastikan bahwa informasi pribadi dan kesehatan pengguna terlindungi. Selain itu, hanya pengguna yang memiliki izin yang dapat mengakses data mereka, memastikan bahwa data tidak digunakan untuk tujuan yang tidak sah.[39]
- b. *Audit Trail dan Traceability*, Fitur ini memungkinkan semua aktivitas yang terjadi dalam sistem untuk dilacak dan diaudit secara transparan. Setiap sesi pelatihan dan data yang dikumpulkan tercatat secara otomatis dalam log yang dapat diakses oleh administrator untuk tujuan audit atau perbaikan sistem. Fitur ini berguna untuk memastikan bahwa data yang dihasilkan dapat ditinjau kembali jika diperlukan, serta memberikan jaminan transparansi bagi pengguna mengenai bagaimana data mereka digunakan. [39]

1.1.2.4 Aspek penggunaan alat dan batas usia

Konstrain batasan usia anak dalam Tugas Akhir ini ditetapkan secara tegas sebagai batas maksimum penggunaan alat, yaitu anak tunagrahita dengan tingkat pendidikan paling tinggi setara kelas 6 Sekolah Dasar. Alat pembelajaran yang dirancang tidak ditujukan, tidak dioptimalkan, dan tidak divalidasi untuk digunakan pada anak tunagrahita di atas jenjang tersebut. Pembatasan ini merupakan konstrain desain yang disengaja untuk menjaga kesesuaian antara karakteristik perkembangan pengguna dan pendekatan pedagogis yang diterapkan dalam alat.

Secara pedagogis, anak tunagrahita pada jenjang setara kelas 6 SD masih berada pada tahap penguatan keterampilan dasar, khususnya membaca fungsional dan komunikasi lisan sederhana. Pada jenjang di atasnya, kebutuhan pembelajaran cenderung menuntut kemampuan abstraksi, struktur bahasa yang lebih kompleks,

serta konteks komunikasi sosial yang lebih luas. Perbedaan tuntutan ini membatasi ruang lingkup alat, karena desain multisensory yang difokuskan pada penguatan keterampilan dasar tidak lagi relevan untuk memenuhi kebutuhan perkembangan anak tunagrahita pada tingkat SMP atau setara. Oleh karena itu, penggunaan alat di luar batas usia tersebut berada di luar ruang lingkup perancangan Tugas Akhir ini.

Selain batas usia pengguna, konstrain lain yang diterapkan dalam perancangan alat ini adalah batasan penggunaan perangkat digital (*gadget*) pada anak tunagrahita, khususnya terkait durasi, intensitas, dan kompleksitas interaksi. Pembatasan ini didasarkan pada temuan dalam berbagai penelitian yang menunjukkan bahwa penggunaan gawai secara berlebihan pada anak berkebutuhan khusus dapat berdampak negatif terhadap konsentrasi, regulasi emosi, dan kelelahan kognitif, terutama pada anak dengan hambatan intelektual. Oleh karena itu, alat yang dirancang dalam Tugas Akhir ini tidak dimaksudkan untuk penggunaan jangka panjang secara terus-menerus, melainkan sebagai alat bantu pembelajaran terstruktur yang digunakan dalam sesi terbatas dan terkontrol, baik di lingkungan sekolah maupun pendampingan di rumah.

Dari sisi desain interaksi, keramahan pengguna (*user-friendliness*) juga ditetapkan sebagai konstrain utama dalam perancangan sistem. Antarmuka dan mekanisme penggunaan alat dibatasi pada pola interaksi yang sederhana, repetitif, dan mudah diprediksi, guna menyesuaikan dengan karakteristik kognitif anak tunagrahita. Jurnal yang dijadikan acuan menekankan bahwa anak dengan hambatan intelektual memiliki keterbatasan dalam memproses instruksi kompleks, navigasi berlapis, serta stimulus visual dan audio yang berlebihan. Oleh karena itu, desain sistem secara sengaja menghindari tampilan yang terlalu ramai, penggunaan menu bertingkat, serta interaksi yang memerlukan pengambilan keputusan kompleks dari pengguna.

Dengan adanya batasan usia, batasan penggunaan gawai, serta konstrain keramahan pengguna, ruang lingkup perancangan alat dalam Tugas Akhir ini menjadi lebih terfokus dan terukur. Seluruh batasan tersebut merupakan keputusan desain yang

disengaja untuk memastikan bahwa alat yang dikembangkan aman secara kognitif, relevan secara pedagogis, dan sesuai dengan karakteristik perkembangan anak tunagrahita, sekaligus menghindari generalisasi penggunaan di luar konteks yang telah divalidasi dalam penelitian ini.

1.1.2.5 Aspek Waktu Pengembangan

Development timeline sistem ini dibatasi oleh keterkaitan antar tahapan pengembangan, di mana perancangan hardware, integrasi sensor, pengembangan perangkat lunak, dan proses pengujian harus dilakukan secara bertahap dan tidak dapat sepenuhnya paralel. Keterbatasan sumber daya komputasi pada perangkat utama, kebutuhan integrasi lintas perangkat, serta keharusan melakukan pengujian secara hati-hati pada subjek anak tunagrahita turut memengaruhi kecepatan iterasi dan penyempurnaan sistem. Selain itu, tuntutan agar sistem berjalan stabil, aman, dan dapat diaudit secara lokal juga membatasi percepatan pengembangan, sehingga timeline lebih difokuskan pada keandalan dan validitas sistem dibandingkan kecepatan implementasi. Oleh karena itu waktu pengembangan dibatasi tidak lebih dari enam bulan.

1.1.3 Kebutuhan yang harus dipenuhi

Berdasarkan analisis yang dilakukan terhadap rancangan alat untuk membaca dan public speaking anak tunagrahita, alat yang nantinya akan dirancang diharapkan untuk dapat memenuhi sejumlah parameter berikut:

1. Alat yang dirancang harus mampu memonitoring kecemasan selama *public speaking* secara real-time.
2. Alat yang dirancang menyediakan latihan membaca sederhana dengan tingkat kesulitan bertahap
3. Alat mampu memberikan pengalaman latihan menulis
4. Alat yang dirancang dapat memberikan pembelajaran dengan multisensori
5. Alat dapat memberikan *feedback* serta evaluasi dan menyimpan progres latihan.

6. Alat yang dirancang harus mudah dioperasikan oleh pengguna.

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan analisis permasalahan dan kebutuhan yang telah diidentifikasi, tujuan perancangan alat ini adalah mengembangkan sebuah sistem pembelajaran komunikasi terpadu berbasis teknologi yang secara khusus mendukung anak tunagrahita dalam meningkatkan kemampuan membaca, menulis, dan berbicara (*public speaking*) melalui latihan yang terstruktur, adaptif, dan berulang. Sistem ini dirancang tidak hanya sebagai media latihan, tetapi juga sebagai platform evaluasi yang mampu merekam proses, hasil, dan perkembangan kemampuan komunikasi anak secara longitudinal.

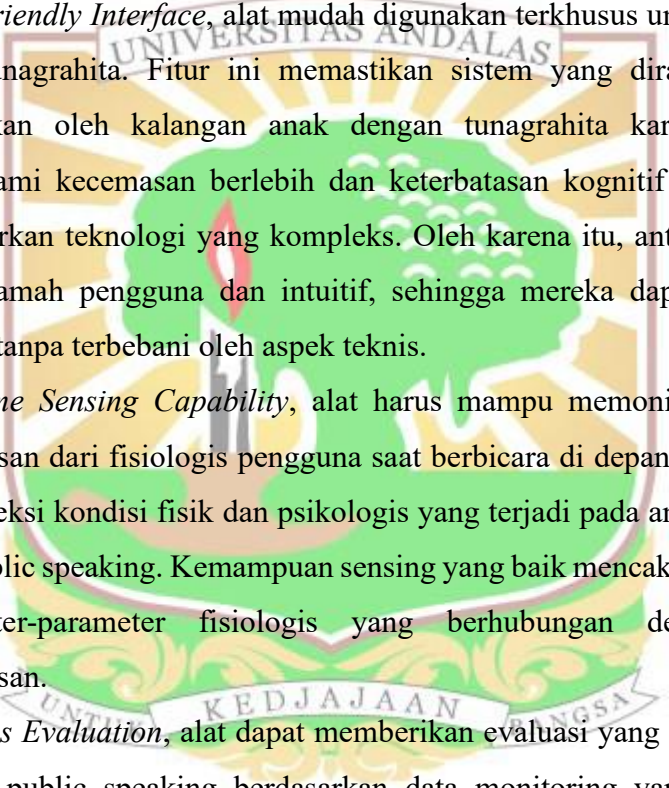
Selain berfokus pada aspek kognitif dan linguistik, alat ini bertujuan untuk mengintegrasikan pemantauan kondisi psikofisiologis pengguna, khususnya tingkat kecemasan saat latihan berbicara di depan umum, melalui pengolahan data fisiologis yang objektif. Data monitoring tersebut digunakan untuk menghasilkan klasifikasi kondisi pengguna dan menjadi dasar pemberian umpan balik secara *real-time* maupun pasca-latihan. Dengan pendekatan ini, sistem diharapkan mampu membantu pendamping dan orang tua dalam memahami hambatan yang dialami anak, baik dalam aspek teknis membaca dan menulis maupun dalam aspek emosional saat berkomunikasi, sehingga proses pembelajaran dapat disesuaikan secara bertahap, aman, dan terukur sesuai kebutuhan perkembangan pengguna.

1.2 Solusi

1.2.1 Karakteristik Produk

1.2.1.1 Fitur Dasar

Fitur dasar didefinisikan sebagai fitur yang wajib disediakan oleh sistem dan memiliki poin penting dalam menyelesaikan masalah, pembuatan dan formulasi dari fitur dasar ditinjau melalui kebutuhan dasar, oleh karena itu apa yang menjadi kebutuhan dasar sistem akan diturunkan menjadi fitur dasar yang pada tahap perancangan akan diadopsi oleh sistem. Setelah menganalisis kebutuhan dasar maka fitur dasar untuk sistem dapat dirumuskan sebagai berikut.

- 
- a. *Multisensory learning support*, alat harus memiliki kemampuan memberikan rangsangan belajar melalui lebih dari satu indera. Hal tersebut dapat meningkatkan minat anak dalam kegiatan pembelajaran membaca
 - b. *Feedback mechanism* dalam sistem pembelajaran membaca dan public speaking bagi anak tunagrahita berfungsi sebagai komponen kunci untuk menegaskan pemahaman terhadap respons yang benar atau salah sekaligus menjaga kondisi emosional dan motivasi belajar anak selama proses latihan.
 - c. *Data processing unit*, alat dapat memproses input dari anak dan mengeluarkan respon yang sesuai.
 - d. *User-Friendly Interface*, alat mudah digunakan terkhusus untuk kebutuhan anak tunagrahita. Fitur ini memastikan sistem yang dirancang mudah digunakan oleh kalangan anak dengan tunagrahita karena pengguna mengalami kecemasan berlebih dan keterbatasan kognitif hanya dengan memikirkan teknologi yang kompleks. Oleh karena itu, antarmuka sistem harus ramah pengguna dan intuitif, sehingga mereka dapat fokus pada latihan tanpa terbebani oleh aspek teknis.
 - e. *Real-time Sensing Capability*, alat harus mampu memonitoring Tingkat kecemasan dari fisiologis pengguna saat berbicara di depan umum. sistem mendeteksi kondisi fisik dan psikologis yang terjadi pada anak tunagrahita saat public speaking. Kemampuan sensing yang baik mencakup pengukuran parameter-parameter fisiologis yang berhubungan dengan tingkat kecemasan.
 - f. *Progress Evaluation*, alat dapat memberikan evaluasi yang relevan selama prosesi public speaking berdasarkan data monitoring yang didapatkan, evaluasi dapat dihasilkan setelah perolehan data akumulatif maupun berupa realtime feedback yang berlangsung selama proses berbicara di depan umum, parameter yang diambil adalah hasil prediksi dan hasil olah data primer yang didapat dari sensor kemudian diproses oleh sistem.

1.2.2 Usulan Solusi

Untuk mengatasi masalah komunikasi dan kecemasan berbicara serta permasalahan menulis oleh anak tunagrahita, solusi yang diusulkan adalah perancangan sistem

yang bisa menyediakan pengalaman latihan belajar, membaca dan menulis dalam satu sistem terpadu utama. Dengan pendekatan berbasis teknologi, usulan solusi yang dirancang diharapkan memenuhi kebutuhan pendidikan khusus dengan cara yang terstruktur, interaktif, dan adaptif terhadap kondisi individu masing-masing. Dimana ketiga kebutuhan akan dikembangkan dalam ketiga subsistem berbeda yang saling terintegrasi.

1.2.2.1 Usulan Solusi Subsistem 1

Usulan solusi untuk Subsistem pertama dirancang untuk mendukung anak tunagrahita dalam mengembangkan keterampilan membaca dasar. Solusi terkait ini akan dirancang menggunakan pendekatan multisensori, menggabungkan stimulasi visual, auditori, dan kinestetik untuk mempermudah proses pembelajaran. Dalam usulan subsistem harus ada komponen pengenalan kata dan suku kata, hingga kalimat sederhana yang dapat mereka pahami dan praktikkan.

1.2.2.1.1 Sub Sistem 1 Solusi 1: Belajar Membaca dengan Metode Fonik

Solusi pertama berfokus pada pembelajaran membaca menggunakan metode fonik, yaitu pendekatan yang mengajarkan hubungan sistematis antara huruf dan bunyi bahasa. Dalam metode fonik, anak diperkenalkan pada bunyi paling dasar dari huruf sebelum mereka diarahkan untuk membaca suku kata atau kata utuh. Pendekatan ini menekankan pentingnya mengenali bahwa setiap huruf memiliki representasi suara, misalnya huruf *b* berbunyi /b/, huruf *d* berbunyi /d/, huruf *m* berbunyi /m/, dan seterusnya. Setelah anak menguasai bunyi huruf-huruf dasar, proses meningkat menuju menggabungkan bunyi tersebut menjadi suku kata, dimulai dari pola sederhana seperti K-V (Konsonan–Vokal), misalnya *ba*, *bi*, *bu*, kemudian berkembang ke pola V-K seperti *am*, *in*, dan selanjutnya menuju pola yang lebih kompleks seperti K-V-K misalnya *bal*, *min*, atau *rum*. Dengan memahami pola fonik secara bertahap, anak dapat menguasai struktur bunyi dalam bahasa sehingga kemampuan membaca tidak hanya mengandalkan hafalan, tetapi berasal dari kemampuan fonologis yang terbangun dengan kuat. [40]

Dalam implementasi digitalnya, solusi fonik ini dituangkan ke dalam sebuah modul pembelajaran interaktif yang ditampilkan di layar perangkat mobile. Modul tersebut terdiri dari halaman pembelajaran yang memvisualisasikan huruf, gambar pendukung, serta animasi sederhana yang mencontohkan cara pengucapan bunyi huruf. Misalnya, ketika anak menekan huruf *b*, layar akan menampilkan animasi mulut yang menutup dan membuka sambil menghasilkan suara /b/, disertai ilustrasi untuk memperkuat asosiasi visual dan auditori. Pada tahap pembelajaran suku kata, modul menampilkan kombinasi huruf seperti “ba”, “be”, dan “bi” yang dapat ditekan untuk mendengar suara gabungan sesuai fonik. Seluruh tampilan dirancang dengan elemen visual sederhana dan warna kontras, sehingga ramah bagi anak usia dini dan tetap mempertahankan fokus pada hubungan antara huruf dan bunyi. [41]

Agar metode fonik ini tidak hanya bersifat pasif, digunakan teknologi machine learning berbasis speech recognition untuk menilai kemampuan anak dalam melafalkan bunyi huruf dan suku kata. Ketika sistem memberikan tugas mengucapkan “ba”, anak diminta menekan tombol mikrofon dan mengucapkannya. Model *speech recognition* kemudian mengolah suara yang masuk untuk dibandingkan dengan pola fonem target. Hasil evaluasi dikonversi menjadi skor atau umpan balik sederhana, misalnya berupa penanda visual seperti senyum, bintang, atau animasi, sehingga anak merasa termotivasi untuk mencoba lagi tanpa merasakan tekanan. Dengan integrasi fonik dan machine learning, solusi ini menciptakan pengalaman belajar membaca yang aktif, adaptif, dan responsif terhadap kemampuan masing-masing anak. [40]

Selain itu, sistem dirancang untuk mengikuti perkembangan anak secara bertahap. Ketika anak mulai lancar mengucapkan bunyi huruf, modul akan naik level menawarkan suku kata yang lebih beragam. Jika model deteksi ucapan menunjukkan bahwa anak sudah mampu konsisten mengucapkan pola K-V, maka sistem dapat beralih ke pengenalan kata sederhana menggunakan fonik lanjutan, misalnya membaca kata “buku”, “lima”, atau “mata”. Adaptasi ini membuat pembelajaran tidak monoton serta memungkinkan anak mengembangkan kemampuan membaca sesuai ritme mereka sendiri. Pada akhirnya, solusi ini bukan

hanya mengajarkan anak untuk membaca, tetapi membangun fondasi kesadaran fonologis yang menjadi dasar kemampuan literasi jangka panjang.[42]

1.2.2.1.2 Sub Sistem 1 Solusi 2: Belajar Membaca dengan Metode Global

Solusi kedua menerapkan metode global yang menekankan pembelajaran membaca melalui penggunaan kata sebagai satu kesatuan utuh, bukan melalui pemecahan bunyi huruf. Dalam pendekatan ini, anak diperkenalkan langsung pada kata-kata yang bermakna dan dekat dengan kehidupan sehari-hari, sehingga proses membaca dipahami sebagai kegiatan mengenali bentuk visual kata dan memahami maknanya secara kontekstual. Anak diajak mengenali kata-kata yang sering ditemui, seperti “ibu”, “ayah”, “makan”, “minum”, “bola”, dan “sekolah”, sehingga pembelajaran terasa lebih alami dan relevan dengan pengalaman mereka. Pendekatan ini mengikuti prinsip bahwa anak cenderung lebih mudah mengingat pola visual dan konteks makna dibandingkan struktur fonologis yang bersifat abstrak. [43]

Dalam implementasi perangkat digital, modul pembelajaran menyajikan kata-kata tersebut secara visual dengan ukuran teks yang jelas, ilustrasi konkret, dan audio pelafalan kata secara utuh. Setiap tampilan memuat satu kata inti yang disertai gambar pendukung dan tombol audio untuk mendengarkan cara pengucapan kata tersebut. Ketika anak memilih sebuah kata, sistem menampilkan ilustrasi yang sesuai dan memutar suara pengucapan kata sebagai satu kesatuan, bukan sebagai rangkaian bunyi huruf. Anak dapat berpindah ke kata lain dalam kelompok tema yang sama, sehingga mereka memahami hubungan antar kata berdasarkan konteks makna, bukan urutan huruf. [44]

Untuk meningkatkan keterlibatan anak, modul pembelajaran dilengkapi dengan teknologi *speech-to-text* berbasis *machine learning* guna mengevaluasi kemampuan anak dalam mengucapkan kata-kata yang ditampilkan. Saat anak diminta membaca sebuah kata, sistem merekam suara anak dan mengkonversinya menjadi teks, kemudian mencocokkannya dengan kata target. Jika hasil pengucapan sesuai atau mendekati, sistem memberikan umpan balik positif berupa animasi atau suara apresiatif. Jika pengucapan belum tepat, sistem memutar ulang contoh

pelafalan dan menampilkan kembali visual kata, sehingga anak dapat belajar melalui pengulangan tanpa merasa tertekan. [44]

Tingkat kesulitan dalam modul pembelajaran berbasis metode global ini dibagi menjadi dua tahapan utama, yaitu tingkat kata dan tingkat kalimat sederhana. Pada tingkat kata, anak difokuskan pada pengenalan dan pengucapan kata-kata utuh yang bermakna dan mudah dipahami. Setelah anak menunjukkan konsistensi dalam mengenali dan mengucapkan kata-kata tersebut, pembelajaran dilanjutkan ke tingkat kalimat sederhana. Pada tahap ini, anak diperkenalkan pada kalimat pendek yang tersusun dari kata-kata yang telah dipelajari sebelumnya, seperti “Ibu makan”, “Bola besar”, atau “Aku main bola”. Pembagian tingkat ini memungkinkan proses pembelajaran berlangsung secara bertahap dan terstruktur, dari pengenalan kata menuju pemahaman kalimat sederhana, tanpa meninggalkan karakter utama metode global yang menekankan pengenalan visual dan konteks makna. [45]

1.2.2.1.3 Sub Sistem 1 Solusi 3: Belajar Membaca dengan Metode RFID

Sistem pembelajaran membaca berbasis RFID dirancang sebagai salah satu pendekatan interaktif yang menggabungkan aktivitas fisik anak dengan teknologi digital yang adaptif. Dalam sistem ini, anak belajar menyusun huruf, suku kata, kata, hingga kalimat menggunakan kartu RFID yang masing-masing mewakili satu huruf. Kartu ini kemudian di-*scan* menggunakan modul RFID, dan huruf yang terdeteksi akan langsung muncul di layar perangkat pembelajaran. Pembelajaran dilakukan secara bertahap, dimulai dari level paling sederhana hingga anak mampu merangkai kalimat yang lebih panjang. Salah satu aspek kunci dari sistem ini adalah adanya tampilan kata atau kalimat target yang harus disusun oleh anak. [46] Dengan demikian, anak tidak sekadar menebak urutan huruf, melainkan belajar mencocokkan huruf fisik yang ia pegang dengan bentuk kata yang tampil di layar. Misalnya, ketika sistem menampilkan kata “IBU”, maka anak harus menemukan dan memindai kartu huruf “I”, kemudian huruf “B”, dan terakhir huruf “U”. Jika anak memulai dengan urutan yang salah, misalnya memindai huruf “B” terlebih dahulu, maka di layar akan muncul “B” sebagai huruf pertama sehingga susunan

kata menjadi tidak sama dengan target. Sistem kemudian memberikan umpan balik bahwa urutan tersebut keliru. [47]

Sistem juga menyediakan tingkat pembelajaran yang berbeda, dimulai dari level yang menampilkan kata di layar hingga level lanjutan di mana kata tidak lagi ditampilkan. Pada level awal, kata atau kalimat target sengaja ditampilkan agar anak memiliki acuan yang jelas. Hal ini sangat penting pada tahap awal membaca, karena anak masih memerlukan penguatan visual untuk memahami hubungan antara simbol huruf dan bunyinya. Setelah anak dianggap cukup mahir, sistem dapat memberikan tantangan tambahan, seperti menyusun kata tanpa tampilan visual. Pada tahap ini, instruksi diberikan melalui audio, misalnya “Susun kata IBU”. Ketika mencapai level lebih tinggi, anak juga dapat diminta menyusun kalimat seperti “Ibu memasak” atau “Saya makan nasi”. Penyusunan kalimat dilakukan dengan menyusun kartu huruf secara berurutan. [47]

Perbedaan tingkat kesulitan inilah yang menjadi landasan penting untuk penerapan *Reinforcement Learning* (RL) dalam sistem. RL digunakan untuk menentukan kapan seorang anak siap naik level, kapan perlu mengulang materi, dan jenis kata atau kalimat apa yang paling sesuai dengan kemampuannya. Sistem mengumpulkan data performa anak pada setiap sesi, termasuk durasi yang diperlukan untuk menyusun satu kata, jumlah kesalahan yang dilakukan, frekuensi pengulangan pada huruf atau suku kata tertentu, dan konsistensi hasil dalam beberapa sesi. [47] Data ini diterima sebagai “observasi” oleh agen RL. Berdasarkan observasi tersebut, agen RL kemudian memilih tindakan tertentu, seperti memberikan kata yang lebih mudah, mempertahankan level pembelajaran saat ini, memberikan kata dengan suku kata yang lebih kompleks, atau menyembunyikan tampilan kata untuk melatih daya ingat fonologis anak. Ketika anak menyelesaikan tugas dengan benar dan dalam waktu singkat, agen RL memperoleh *reward* positif, yang memperkuat keputusan bahwa anak siap menghadapi tingkat kesulitan lebih tinggi. Sebaliknya, jika anak mengalami banyak kesalahan atau membutuhkan waktu lama, agen RL mendapatkan *reward* negatif, sehingga sistem akan menurunkan tingkat kesulitan atau mengulang latihan tertentu.

1.2.2.2 Usulan Solusi Subsistem 2

Usulan solusi untuk Subsistem kedua akan memiliki pendekatan pada pengembangan dan penanganan kecemasan anak tunagrahita terkait kemampuan berbicara dan mengomunikasikan bacaan di depan orang lain. Usulan solusi di subsistem ini akan dilengkapi dengan teknologi memungkinkan anak untuk mengatasi kecemasan di depan audiens. Berikut diajukan tiga solusi dengan menggunakan pendekatan berbeda untuk memenuhi kebutuhan dasar atas solusi kecemasan dan mengkomunikasikan bacaan.

1.2.2.2.1 Subsistem 2 Solusi 1 : Sistem Latihan *Public Speaking* Berbasis Sensor Audio-Visual dengan integrasi Algoritma *Deep Learning*

Solusi pertama menawarkan perangkat latihan berbasis sensor audio-visual yang dirancang untuk memberikan evaluasi menyeluruh terkait kualitas berbicara dan tanda-tanda kecemasan yang muncul selama berbicara di depan umum. Perangkat ini menggabungkan sensor audio untuk merekam kualitas suara pengguna, termasuk parameter seperti *pitch* (tinggi rendahnya suara), kecepatan berbicara, volume, dan intonasi, serta sensor visual seperti kamera atau sensor gerakan untuk menangkap ekspresi wajah dan postur tubuh. analisis gabungan antara parameter akustik dan ciri linguistik terbukti dapat memprediksi tingkat kecemasan saat berbicara secara signifikan, terutama melalui perubahan *pitch*, *jitter*, dan kecepatan berbicara [26]. Selain aspek verbal, ekspresi wajah dan bahasa tubuh juga memainkan peran penting karena menjadi indikator non-verbal utama yang merefleksikan kecemasan dan memengaruhi bagaimana audiens menerima pesan [27].

Pengguna cukup berbicara di depan kamera atau perangkat sensor yang sudah terintegrasi dalam sistem. Sensor audio akan menganalisis suara pengguna untuk mendeteksi pola stres seperti getaran vokal, *pitch* tinggi, dan perubahan tempo bicara yang menandakan kecemasan. Sementara itu, sensor visual menangkap ekspresi wajah seperti ketegangan otot di sekitar mata dan mulut, serta postur tubuh yang kaku atau defensif, yang sering kali muncul pada individu dengan kecemasan berbicara [27]. Seluruh data yang terekam kemudian ditampilkan dalam bentuk

visual feedback melalui grafik interaktif di layar, memperlihatkan tingkat kestabilan suara, kontak mata, dan ekspresi wajah. Dengan pendekatan ini, pengguna tidak hanya melihat hasil evaluasi kuantitatif, tetapi juga memahami area spesifik yang perlu diperbaiki, seperti intonasi, gestur, atau kontrol ekspresi.

Sistem ini bekerja menggunakan analisis sinyal suara (*signal processing*) dan *computer vision* secara simultan. *Signal processing* mengevaluasi parameter seperti *pitch*, *jitter*, *shimmer*, dan durasi jeda, sedangkan *computer vision* menganalisis ekspresi wajah dan gerak tubuh untuk mengidentifikasi tanda-tanda kecemasan [27]. Ketika sistem mendeteksi peningkatan kecemasan *pitch* yang terlalu tinggi atau ekspresi wajah tegang, perangkat secara otomatis memberikan *feedback* visual atau audio yang berisi saran perbaikan dan rekomendasi untuk melakukan jeda relaksasi. Penelitian oleh Wörtwein et al. (2022) menunjukkan bahwa pendekatan berbasis visual dan akustik seperti ini efektif dalam menilai tingkat kecemasan dan memberikan umpan balik yang membantu meningkatkan performa *public speaking* [27].

Solusi ini menggunakan algoritma deep learning yang menggabungkan data audio dan visual untuk menghasilkan evaluasi holistik. Model *Convolutional Neural Network* (CNN) digunakan untuk menganalisis citra wajah dan mendeteksi emosi, sementara *Recurrent Neural Network* (RNN) digunakan untuk mempelajari pola temporal dari sinyal suara pengguna [25]. Kombinasi kedua model ini memungkinkan sistem untuk mendeteksi pola kecemasan verbal dan non-verbal secara simultan dan memberikan hasil evaluasi yang lebih akurat. Dengan adanya proses multi-modal fusion, sistem dapat menilai tingkat kecemasan pengguna berdasarkan korelasi antara suara dan ekspresi wajah, menghasilkan *feedback* yang lebih personal dan sesuai dengan kondisi pengguna.

Untuk mendeteksi postur kepala, solusi ini menggunakan kamera 3D atau kamera berbasis RGB (*Red, Green, Blue*) yang dipasangkan dengan algoritma pemrosesan citra. Teknologi ini menganalisis posisi kepala dan gerakan tubuh pembicara, mengidentifikasi perubahan dalam sudut kepala yang menunjukkan kecemasan.

Secara khusus, postur kepala yang cenderung ke bawah (*head-down posture*) dapat diidentifikasi dengan menghitung sudut rotasi kepala dalam ruang tiga dimensi. Sistem pengenalan gerakan kepala ini dilakukan melalui teknik deteksi wajah dan pencocokan fitur geometris yang mengidentifikasi titik-titik referensi pada wajah dan kepala, seperti mata, hidung, dan dagu. Dengan mengukur posisi dan pergerakan titik-titik ini, sistem dapat menentukan apakah kepala pembicara berada pada posisi menunduk (biasanya diukur dengan sudut 15 hingga 30 derajat untuk postur yang sedikit menunduk dan lebih dari 45 derajat untuk postur kepala yang lebih tertutup).

Solusi ini menyelesaikan masalah *Public Speaking Anxiety* (PSA) dengan menyediakan latihan berbasis data yang objektif dan interaktif. Melalui analisis audio-visual secara bersamaan, sistem ini mampu mendeteksi dan mengukur kecemasan pengguna secara komprehensif, baik dari aspek verbal maupun non-verbal. *Feedback* yang dihasilkan secara *real-time* memungkinkan pengguna untuk menyesuaikan gaya bicara dan bahasa tubuhnya selama latihan, sehingga secara bertahap meningkatkan rasa percaya diri dan mengurangi gejala kecemasan [25]. Dengan latihan berulang menggunakan sistem ini, pengguna dapat mempelajari pola komunikasi yang lebih tenang, stabil, dan ekspresif, yang berkontribusi langsung terhadap peningkatan keterampilan *public speaking* secara keseluruhan.

1.2.2.2.1 Subsistem 2 Solusi 2: *VR-based Training* dengan Multisensor

Solusi terintegrasi yang menggabungkan teknologi wearable dan realitas virtual (VR) untuk memantau dan menangani kecemasan pengguna secara komprehensif. Solusi ini menggunakan perangkat wearable untuk mendeteksi gejala fisik kecemasan secara *real-time* dan VR untuk memberikan pengalaman latihan berbicara di depan audiens virtual yang menyesuaikan dengan kondisi psikologis pengguna. Gabungan dua teknologi ini memberikan pendekatan yang lebih holistik, interaktif, dan *personalized* dalam mengatasi PSA.

Perangkat *wearable* yaitu *smartwatch*, menjadi alat utama untuk memantau gejala fisik yang terkait dengan kecemasan, seperti detak jantung dan *Galvanic Skin Response* (GSR). Detak jantung yang meningkat dan perubahan pada GSR adalah

indikator fisiologis yang kuat dari kecemasan, yang sering kali disertai dengan perasaan gelisah atau ketegangan. [29] Ketika perangkat *wearable* mendeteksi peningkatan kecemasan jika detak jantung atau GSR meningkat, perangkat tersebut memberikan umpan balik haptic, berupa getaran lembut pada pengguna. Umpan balik ini memberi tahu pengguna secara langsung tentang kondisi fisik mereka, memberi mereka kesempatan untuk merespons dengan cepat, seperti melakukan teknik relaksasi atau menyesuaikan kecepatan berbicara mereka. [29] Dengan cara ini, teknologi *wearable* memungkinkan pengguna untuk mengetahui dan mengendalikan reaksi fisik mereka terhadap kecemasan tanpa harus mengalihkan fokus mereka dari presentasi.

Di sisi lain, teknologi VR digunakan untuk memberikan pengalaman berbicara di depan audiens virtual. VR memungkinkan pengguna untuk berlatih berbicara dalam berbagai skenario yang disesuaikan dengan tingkat kecemasan yang mereka alami. Audiens virtual ini dapat dimanipulasi dalam hal interaksi dan tingkat responsivitasnya, menciptakan simulasi berbicara yang realistis. Audiens tersebut bisa bersifat mendukung atau lebih menantang, sesuai dengan analisis yang dilakukan oleh sistem VR berdasarkan data fisiologis yang diperoleh dari perangkat *wearable*. Dimana Ketika perangkat *wearable* mendeteksi peningkatan kecemasan, memberikan bantuan dan intervensi interaksi dengan audiens virtual, memberikan pengalaman yang lebih mendukung untuk mengurangi kecemasan pengguna. [29] Selain itu, VR dapat memberikan waktu istirahat jika diperlukan, untuk membantu pengguna menenangkan diri sebelum melanjutkan berbicara, menciptakan pengalaman latihan yang dinamis dan disesuaikan ditambah sensor gyro yang dipasang di perangkat, maka *device* dapat memonitoring posisi derajat *head-down* kepala yang mengindikasikan adanya respon lari dari kecemasan dan interaksi sosial selama *public speaking*. [28]

Selain memberikan umpan balik yang disesuaikan secara *real-time*, solusi terintegrasi ini juga memungkinkan pengguna untuk mengembangkan keterampilan berbicara mereka secara bertahap. Melalui latihan berulang dalam lingkungan VR yang semakin menantang, kecemasan pengguna dapat berkurang seiring waktu. Pengguna dapat memperoleh keterampilan berbicara yang lebih baik, memperbaiki

intonasi suara, postur tubuh, dan kecepatan berbicara, sambil merasa lebih percaya diri dalam menghadapi audiens nyata. VR menyediakan ruang latihan yang bebas dari penilaian sosial yang dapat mengurangi tekanan psikologis, sementara perangkat *wearable* memberikan pemantauan yang lebih objektif tentang tingkat kecemasan pengguna. Umpan balik yang diberikan memungkinkan pengguna untuk memperbaiki keterampilan mereka tanpa kehilangan fokus dari materi yang sedang dibicarakan, meningkatkan efektivitas presentasi mereka.

Metode komputasi yang digunakan dalam solusi ini berfokus pada penerapan algoritma machine learning untuk mengolah data fisiologis yang dikumpulkan dari perangkat *wearable*, seperti detak jantung dan *Galvanic Skin Response* (GSR). Data ini memberikan gambaran *real-time* mengenai tingkat kecemasan pengguna. *Machine learning* digunakan untuk mengenali pola kecemasan berdasarkan perubahan fisiologis pengguna. Algoritma klasifikasi dapat diterapkan untuk mengidentifikasi kategori kecemasan pengguna, seperti kecemasan ringan, sedang, atau berat, berdasarkan fluktuasi fisiologis yang terdeteksi oleh perangkat *wearable*.

Dengan menggunakan algoritma pembelajaran terawasi, sistem dapat dilatih untuk mengenali pola-pola kecemasan spesifik berdasarkan data historis. Sebagai contoh, jika perangkat *wearable* mendeteksi peningkatan detak jantung yang lebih tinggi dan GSR yang meningkat, algoritma *machine learning* akan mengklasifikasikan data ini sebagai kecemasan tingkat tinggi dan memberikan umpan balik yang sesuai, seperti penurunan intensitas audiens di VR atau pemberian waktu istirahat.

VR dapat berfungsi sebagai agen yang menanggapi *feedback* fisiologis yang diterima dari perangkat *wearable*. Ketika tingkat kecemasan meningkat, VR dapat menurunkan tekanan dengan mengubah perilaku audiens atau bahkan memperkenalkan skenario baru yang lebih mudah dihadapi oleh pengguna, jika kecemasan terdeteksi pada level yang sangat tinggi, [27]VR dapat mengubah audiens menjadi lebih mendukung atau mengurangi interaksi audiens. Di sisi lain, jika kecemasan rendah, VR dapat meningkatkan tantangan dengan menciptakan audiens yang lebih aktif dan responsif. Hal ini memungkinkan pengalaman latihan yang benar-benar personalized, di mana pengguna diberikan pengalaman berbicara

yang semakin menantang, namun tetap sesuai dengan kondisi psikologis mereka.[26]

Gabungan teknologi *wearable* dan VR ini secara efektif mengatasi PSA dengan memberikan pendekatan yang lebih holistik dan interaktif. Perangkat *wearable* memonitor kondisi fisik pengguna selama berbicara, sementara VR memberikan pengalaman latihan berbicara yang sangat realistis dengan audiens virtual. Ketika kecemasan terdeteksi melalui perangkat *wearable*, VR dapat menyesuaikan situasi berbicara untuk memberikan pengalaman yang lebih sesuai dengan kondisi psikologis pengguna. Solusi ini memberikan *feedback real-time* yang memungkinkan pengguna untuk langsung menyesuaikan teknik berbicara mereka, memperbaiki intonasi suara, kecepatan berbicara, atau postur tubuh tanpa kehilangan fokus dari presentasi. Dengan latihan berulang dalam lingkungan VR yang menantang, pengguna dapat mengurangi kecemasan mereka secara bertahap, sambil meningkatkan keterampilan berbicara mereka. Sistem ini juga memungkinkan evaluasi objektif dan terstruktur, yang memberi pengguna wawasan yang jelas tentang area yang perlu mereka perbaiki, membantu mereka merasa lebih percaya diri dan lebih siap berbicara di depan audiens.

1.2.2.2.1 Subsistem 2 Solusi 3: *Device* berbasis EEG Monitoring untuk *Treatment* Relaksasi Sebelum *Public Speaking*

Solusi ketiga untuk mengatasi masalah ini dapat diselesaikan dengan menggunakan teknologi EEG (*Electroencephalography*), yang mampu memonitor aktivitas otak untuk mendeteksi kecemasan sebelum seseorang berbicara di depan audiens. Dengan memanfaatkan perangkat *wearable* berbasis EEG, teknologi ini dapat mendeteksi gelombang otak yang berhubungan dengan kecemasan dan memberikan *feedback* relaksasi yang dapat membantu pengguna menenangkan pikiran mereka sebelum melakukan presentasi. Pendekatan ini berfokus pada pengelolaan kecemasan mental melalui stimulasi fisik dan kognitif yang berbasis pada data otak yang terdeteksi secara *real-time*. Teknologi EEG telah terbukti efektif dalam mendeteksi dan mengurangi kecemasan, seperti yang dijelaskan dalam penelitian terkait pengelolaan stres menggunakan *neurofeedback* EEG [29].

Pengguna cukup mengenakan perangkat EEG yang dipasang di kepala, seperti *headset EEG wearable*, yang dapat mengukur aktivitas gelombang otak selama persiapan berbicara. Setelah perangkat dipasang, pengguna akan diminta untuk duduk atau berdiri dalam posisi nyaman dan memulai sesi relaksasi. Teknologi EEG ini akan memantau pola gelombang beta (indikasi kecemasan) dan gelombang alfa (indikasi ketenangan) dalam otak. Begitu sistem mendeteksi peningkatan gelombang beta yang mengindikasikan kecemasan, perangkat akan memberikan *feedback* relaksasi, yang disampaikan melalui audio. *Feedback* ini berupa suara yang menenangkan atau getaran lembut untuk mengingatkan pengguna untuk mengatur pernapasan, melakukan meditasi. Penelitian telah menunjukkan bahwa *feedback* audio yang menggunakan suara relaksasi dapat menurunkan kecemasan secara signifikan [48].

Mekanisme utama solusi ini bekerja dengan cara memanfaatkan monitoring EEG yang mendeteksi aktivitas gelombang otak selama sesi latihan. Ketika perangkat mengenali peningkatan gelombang beta (yang menunjukkan kecemasan), sistem secara otomatis akan memberikan *feedback* relaksasi. *Feedback* ini terdiri dari suara audio relaksasi yang menenangkan, seperti suara pernapasan yang teratur atau suara alam yang telah terbukti menurunkan kecemasan mental [49]. Alternatifnya, *feedback haptic* berupa getaran lembut juga dapat diberikan untuk mengingatkan pengguna untuk menenangkan diri. Sebagai contoh, jika pengguna berada dalam kondisi sangat cemas, perangkat akan memberikan getaran lebih kuat untuk menekankan perlunya mengambil langkah-langkah relaksasi. Dengan cara ini, pengguna tidak hanya mendapatkan *feedback* fisik, tetapi juga dapat mengelola kondisi mental mereka sebelum berbicara di depan umum, memungkinkan mereka untuk lebih siap dan lebih tenang.

Metode komputasi yang digunakan dalam solusi ini adalah algoritma machine learning untuk menganalisis data EEG. Algoritma ini mengidentifikasi pola perubahan dalam gelombang otak yang menunjukkan peningkatan kecemasan (gelombang beta) dan penurunan kecemasan (gelombang alfa). Ketika kecemasan terdeteksi, sistem memberikan intervensi kognitif dan fisik dengan umpan balik audio atau haptic. Teknik ini memanfaatkan pengenalan pola berbasis data

fisiologis, di mana algoritma machine learning mempelajari pola dari data EEG untuk memprediksi tingkat kecemasan dan memberikan feedback yang disesuaikan sesuai dengan respons otak pengguna [48]. Teknologi ini memungkinkan perangkat untuk memberikan intervensi yang tepat waktu dan sangat relevan dengan kondisi kecemasan pengguna, memastikan pendekatan yang personal dan efisien.

Solusi ini dapat menyelesaikan masalah kecemasan dalam *public speaking* dengan memberikan pendekatan proaktif terhadap pengelolaan kecemasan sebelum berbicara. Dengan menggunakan teknologi EEG, solusi ini mampu mendeteksi tanda-tanda kecemasan dalam otak dan memberikan *feedback* relaksasi yang cepat sehingga pengguna dapat mengendalikan kecemasan mereka sebelum berbicara. Teknik relaksasi berbasis audio atau *haptic feedback* membantu menurunkan kecemasan secara mental dan fisik, meningkatkan kepercayaan diri pengguna. Berbeda dengan metode tradisional, seperti teknik relaksasi manual atau meditasi, solusi ini memberikan pendekatan berbasis data yang terukur dan lebih terstruktur, memungkinkan pengguna untuk merasa lebih tenang dan siap menghadapi audiens mereka. Dengan demikian, perangkat EEG ini tidak hanya membantu mengurangi kecemasan, tetapi juga memfasilitasi peningkatan kualitas presentasi dan komunikasi publik [29].

1.2.2.3 Usulan Solusi Subsistem 3

Dalam pengembangan keterampilan menulis anak tunagrahita, salah satu tantangan terbesar adalah meningkatkan kemampuan mereka untuk menulis dengan jelas dan terbaca, yang seringkali terhambat oleh kesulitan motorik halus atau ketidakmampuan mengikuti pola tulisan yang tepat. Anak-anak dengan gangguan intelektual seringkali mengalami kesulitan dalam menyusun huruf, kata, dan kalimat dengan rapi, yang mengarah pada ketidakmampuan untuk mengekspresikan pikiran mereka secara tertulis. Oleh karena itu, sangat penting untuk menyediakan alat bantu yang dapat membantu mereka berlatih menulis dengan cara yang lebih mudah dan menyenangkan.

Untuk itu, dibutuhkan sebuah sistem yang memungkinkan anak untuk berlatih menulis tanpa terbebani oleh keterbatasan fisik atau kecemasan yang muncul akibat

bentuk tulisan tangan mereka yang tidak rapi. Sistem ini harus dapat menyediakan panduan visual yang jelas, di mana anak dapat melihat contoh huruf, kata, atau kalimat yang harus ditulis. Selain itu, sistem tersebut perlu memberikan umpan balik yang langsung, baik dalam bentuk visual maupun suara, untuk memberi tahu anak apakah tulisan mereka sudah sesuai dengan panduan yang ditentukan atau perlu diperbaiki.

Selain itu, sistem ini harus dapat mengukur sejauh mana tulisan anak dapat dikenali dan dibandingkan dengan standar yang telah ditetapkan. Kemampuan untuk menilai keterbacaan tulisan secara objektif sangat penting dalam memberikan umpan balik yang konstruktif dan membantu anak untuk terus berkembang. Sistem yang digunakan juga harus cukup fleksibel untuk menyesuaikan dengan perkembangan kemampuan menulis anak dari waktu ke waktu, memberikan tantangan yang sesuai dengan kemampuan mereka.

Dengan demikian, sebuah subsistem yang terintegrasi yang dapat memberikan panduan visual, mendeteksi tulisan, dan memberikan umpan balik secara *real-time* sangat diperlukan untuk mendukung anak tunagrahita dalam proses belajar menulis. Subsistem ini tidak hanya akan memudahkan mereka untuk berlatih menulis dengan cara yang lebih efektif, tetapi juga membantu mereka meningkatkan keterampilan menulis mereka dalam lingkungan yang aman dan bebas dari tekanan. Untuk kebutuhan tersebut dirumuskan tiga tujuan dibawah.

1.2.2.3.1 Subsistem 3 Solusi 1: *Device* Pena Sensor IMU untuk Latihan Menulis Interaktif

Solusi pertama yang diusulkan untuk meningkatkan keterampilan menulis anak tunagrahita adalah penggunaan perangkat pena khusus yang dilengkapi dengan sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*). Pena ini dirancang untuk digunakan dalam latihan menulis, dengan tujuan membantu anak tunagrahita mengembangkan keterampilan motorik halus, meningkatkan akurasi tulisan, dan mengurangi kecemasan yang sering muncul ketika mereka dihadapkan dengan tugas menulis. Sensor IMU yang terintegrasi dalam pena ini akan melacak setiap gerakan pena,

mendeteksi arah dan kelengkungan garis, serta memantau apakah tulisan yang dibuat mengikuti pola yang benar.

Pena ini akan berfungsi sebagai alat latihan menulis yang langsung menghubungkan aksi fisik menulis dengan umpan balik visual dan sensorik. Ketika anak menulis, sistem akan menggambarkan jalur yang harus diikuti di layar dan memberikan indikasi jika tulisan menyimpang terlalu jauh dari jalur tersebut. Hal ini dimaksudkan untuk memotivasi anak untuk memperbaiki gerakan tangan mereka, meningkatkan keterampilan menulis secara bertahap, dan mengurangi ketegangan atau kecemasan yang muncul ketika mereka merasa tulisan mereka tidak rapi atau tidak sesuai.

Secara teknis, pena ini dilengkapi dengan sensor IMU yang mampu mendeteksi tiga jenis gerakan utama: akselerasi, rotasi, dan orientasi. Sensor ini mengukur pergerakan pena dalam ruang tiga dimensi, memonitor perubahan posisi pena dalam kaitannya dengan permukaan yang digunakan untuk menulis, serta melacak jalur yang ditulis oleh anak. Sensor IMU bekerja dengan mengukur perubahan posisi pena secara kontinu, memetakan gerakan pena ke dalam data digital yang kemudian diterjemahkan ke dalam bentuk garis tulisan pada layar.

Setiap kali anak menulis, data yang dikumpulkan oleh sensor akan diteruskan ke perangkat yang terhubung (misalnya tablet atau komputer) untuk diproses. Di perangkat ini, sistem akan menggambarkan jalur yang harus diikuti untuk setiap huruf atau angka sesuai dengan panduan yang telah disiapkan. Jika gerakan pena menyimpang dari jalur yang benar, sensor IMU akan mengirimkan sinyal ke perangkat untuk memberikan umpan balik berupa getaran pada pena, memberikan indikator langsung kepada anak bahwa mereka perlu memperbaiki posisi pena atau garis tulisan mereka.

Selain itu, sistem ini juga dilengkapi dengan panduan visual berupa garis atau titik yang menunjukkan langkah demi langkah cara menulis huruf atau angka dengan benar. Ketika anak mengikuti garis ini, sistem akan menghitung dan memberikan skor berdasarkan seberapa banyak garis yang sesuai dengan panduan, memberikan umpan balik positif untuk meningkatkan motivasi anak.

Cara kerja alat ini sangat sederhana namun efektif. Pena dengan sensor IMU akan dipasangkan dengan aplikasi perangkat lunak di perangkat layar yang dapat memonitor dan menampilkan aktivitas menulis secara langsung. Sebelum memulai latihan, anak akan diberi panduan visual berupa garis atau titik yang membentuk huruf atau angka yang perlu mereka tulis. Pena ini memungkinkan anak untuk menulis secara langsung di atas kertas atau permukaan yang datar, dengan perangkat lunak yang menampilkan jalur tulisan mereka di layar secara *real-time*.

Selama proses menulis, sensor IMU di dalam pena akan mendeteksi gerakan pena dan memetakan gerakan tersebut ke dalam bentuk data digital. Data ini kemudian diproses oleh perangkat yang terhubung untuk menghasilkan garis tulisan yang sesuai dengan pola yang telah ditentukan. Setiap kali anak menulis, sistem akan memantau sejauh mana tulisan mereka mengikuti jalur yang ditetapkan, dan jika ada kesalahan atau penyimpangan yang terlalu besar, pena akan memberikan umpan balik berupa getaran yang memberitahukan anak untuk memperbaiki tulisan mereka.

Sistem juga dilengkapi dengan mekanisme penilaian yang memberikan skor berdasarkan jumlah garis yang sesuai dengan panduan. Semakin banyak garis yang mengikuti pola yang benar, semakin tinggi skor yang didapat, yang dapat memotivasi anak untuk terus berlatih dan meningkatkan keterampilan menulis mereka. Skor ini dapat dilihat oleh anak secara langsung, memberikan mereka rasa pencapaian yang positif dan mengurangi rasa cemas terkait kesalahan tulisan.

Untuk memastikan alat ini berfungsi dengan akurat, metode komputasi yang digunakan di dalam sistem melibatkan beberapa teknik pengolahan sinyal gerakan pena. Ketika pena bergerak, sensor IMU akan menghasilkan data yang mencatat setiap perubahan posisi dan orientasi pena dalam ruang tiga dimensi. Data ini akan dikumpulkan dalam bentuk sinyal digital yang menunjukkan posisi pena pada waktu tertentu.

Sistem akan membandingkan data posisi pena dengan pola yang telah ditentukan (misalnya bentuk huruf atau angka yang harus ditulis) menggunakan algoritma pemrosesan pola yang memeriksa kesesuaian antara jalur tulisan yang dibuat anak

dengan jalur yang diinginkan. Setiap perbedaan atau penyimpangan akan terdeteksi, dan umpan balik berupa getaran pada pena akan diberikan jika ada kesalahan yang cukup signifikan.

Selain itu, sistem ini juga menggunakan algoritma untuk menghitung skor berdasarkan seberapa banyak tulisan anak yang mengikuti garis atau pola dengan tepat. Algoritma ini akan mengevaluasi gerakan pena dalam unit waktu yang sangat singkat untuk memberikan umpan balik secara *real-time*, memastikan bahwa anak selalu tahu apakah mereka menulis dengan benar atau perlu memperbaiki gerakan mereka.

Solusi ini sangat efektif dalam menyelesaikan masalah menulis pada anak tunagrahita, terutama yang terkait dengan keterbatasan motorik halus dan kesulitan mengikuti pola tulisan yang benar. Dengan adanya pena yang dilengkapi sensor IMU, anak dapat berlatih menulis dengan cara yang lebih interaktif dan menyenangkan. Umpan balik berbasis getaran memberikan sinyal yang jelas kepada anak setiap kali mereka menyimpang dari jalur yang benar, yang memungkinkan mereka untuk memperbaiki gerakan pena mereka dengan segera.

Selain itu, sistem yang menggunakan skor dan panduan visual memberikan motivasi tambahan bagi anak untuk terus berlatih. Skor ini dapat digunakan untuk melacak kemajuan mereka, yang membantu mengurangi rasa cemas atau frustrasi yang mungkin muncul akibat kesalahan dalam menulis. Dengan adanya sistem ini, anak tunagrahita dapat belajar menulis dengan lebih percaya diri, tanpa merasa tertekan atau terbebani oleh kesalahan-kesalahan yang terjadi.

Keunggulan utama dari solusi ini adalah kemampuannya untuk menyediakan umpan balik langsung dan efektif dalam proses latihan menulis. Pena dengan sensor IMU memungkinkan anak untuk berlatih menulis secara alami, sambil mendapatkan panduan yang jelas tentang bagaimana menulis dengan benar. Fitur getaran sebagai indikator kesalahan memberikan respons sensorik yang mudah dipahami, yang sangat membantu anak-anak dengan gangguan motorik halus atau kesulitan dalam menerima instruksi verbal yang kompleks.

Selain itu, sistem ini dirancang untuk mendukung pendekatan pembelajaran bertahap, di mana tingkat kesulitan meningkat secara bertahap sesuai dengan kemampuan anak. Dengan adanya skor sederhana, anak-anak dapat melihat perkembangan mereka secara langsung, yang meningkatkan motivasi dan rasa percaya diri mereka. Umpan balik yang cepat dan terpersonalisasi juga memastikan bahwa anak dapat belajar dengan cara yang tidak membebani mereka, menjaga suasana belajar yang menyenangkan dan produktif.

Meskipun solusi ini memiliki banyak keunggulan, ada beberapa kelemahan yang perlu diperhatikan. Salah satu kelemahan utama adalah keterbatasan perangkat keras dan perangkat lunak dalam mendeteksi dan mengoreksi kesalahan secara lebih kompleks. Meskipun getaran pada pena memberikan sinyal kesalahan yang jelas, beberapa anak mungkin mengalami kesulitan untuk memahami jenis kesalahan yang mereka lakukan jika tidak diberikan panduan visual yang lebih mendalam.

Selain itu, meskipun pena ini dirancang untuk memberikan umpan balik yang efektif, sensor IMU dalam pena tetap dapat terpengaruh oleh faktor-faktor eksternal seperti gerakan tangan yang tidak stabil atau permukaan tulisan yang tidak rata. Ini dapat menyebabkan kesalahan dalam pendeteksian gerakan pena dan mengurangi akurasi sistem. Masalah lain yang mungkin timbul adalah keterbatasan dalam hal penyimpanan data dan evaluasi jangka panjang, di mana skor dan hasil latihan tidak selalu mencerminkan kemampuan menulis anak secara menyeluruh, terutama jika anak tidak menggunakan perangkat secara konsisten.

1.2.2.3.1 Subsistem 3 Solusi 2: Papan Menulis Simbol untuk Penyusunan Kalimat

Solusi kedua yang diusulkan untuk membantu anak tunagrahita mengembangkan keterampilan menulis adalah penggunaan papan menulis berbasis *keyboard* simbol. Dalam sistem ini, anak tidak perlu menulis secara manual dengan pena, melainkan memilih huruf atau kata melalui tombol besar bergambar yang ada pada *keyboard* kustom. Konsep ini memungkinkan anak tunagrahita untuk fokus pada penyusunan kata dan kalimat, tanpa terbebani oleh kesulitan motorik halus yang seringkali

terkait dengan menulis tangan. Sistem ini memberikan cara yang lebih mudah dan interaktif bagi anak untuk berlatih menulis dan berkomunikasi dengan lebih efektif, mengurangi kecemasan terkait bentuk tulisan tangan, dan memotivasi mereka untuk meningkatkan keterampilan bahasa secara bertahap.

Dengan menggunakan papan menulis yang memanfaatkan *keyboard* besar bergambar, setiap tombol pada *keyboard* akan mewakili huruf, kata, atau bahkan frasa tertentu, sehingga anak-anak dapat memilih tombol yang sesuai dengan apa yang ingin mereka tulis. Hasil dari penekanan tombol akan ditampilkan dalam bentuk teks pada layar, serta diucapkan menggunakan *buzzer* atau *speaker*, memberikan umpan balik verbal. Sistem ini juga mendukung komunikasi dua arah, dengan kemampuan untuk mengirimkan teks ke aplikasi eksternal atau perangkat lain, memungkinkan anak untuk berbagi hasil penulisan mereka dengan orang lain.

Secara teknis, papan menulis ini terdiri dari keyboard kustom yang dilengkapi dengan tombol besar bergambar, di mana setiap tombol berfungsi untuk memilih huruf, kata, atau frasa yang telah diprogram. Tombol-tombol ini dirancang besar dan jelas, dengan gambar atau ikon yang mudah dipahami oleh anak-anak tunagrahita, untuk membantu mereka mengenali pilihan yang mereka inginkan dengan mudah. Sebagai tambahan, *keyboard* ini dilengkapi dengan tombol fungsi seperti spasi, hapus, dan kirim, yang memungkinkan anak untuk menavigasi teks yang mereka buat dengan mudah.

Mikrokontroler (MCU) akan membaca tekanan pada setiap tombol yang dipilih, kemudian mengonversinya menjadi *string* teks yang sesuai. Setelah itu, teks ini akan ditampilkan pada modul LCD karakter atau OLED kecil yang terpasang pada papan menulis, sehingga anak dapat melihat hasil penulisan mereka secara langsung. Selain itu, sistem ini juga dilengkapi dengan *buzzer* atau *speaker* yang membacakan kata atau kalimat yang telah ditulis, memberikan umpan balik suara yang membantu anak memahami dan mengingat kata-kata yang telah dipilih.

Modul Bluetooth atau WiFi dapat dipasang sebagai opsi untuk mengirim teks yang telah ditulis ke aplikasi Android, memungkinkan integrasi dengan sistem utama atau perangkat lain untuk tujuan komunikasi lebih lanjut. Fitur ini memudahkan

anak untuk berbagi hasil tulisan mereka dengan orang lain, misalnya dengan pengajar atau keluarga, dan dapat menghubungkan mereka dengan alat bantu komunikasi tambahan, seperti sistem komunikasi augmentatif dan alternatif (AAC).

Pada sistem ini, anak akan menggunakan papan menulis dengan tombol besar bergambar untuk memilih huruf, kata, atau frasa yang ingin mereka tulis. Setiap tombol pada *keyboard* akan mewakili simbol yang telah diprogram, seperti huruf alfabet atau kata-kata yang sering digunakan. Ketika anak menekan tombol, sistem mikrokontroler akan membaca input tersebut dan menyusunnya menjadi teks di layar. Untuk menulis kata atau kalimat lengkap, anak cukup menekan tombol sesuai urutan kata yang mereka inginkan.

Setelah anak selesai menyusun kalimat, mereka bisa menekan tombol fungsi seperti "spasi" untuk memberi jarak antar kata, "hapus" untuk mengoreksi kesalahan, atau "kirim" untuk mengirimkan hasil tulisan ke aplikasi. Teks yang telah disusun akan ditampilkan di modul LCD atau OLED dengan jelas, dan dapat dibacakan menggunakan *speaker* atau *buzzer*, memberikan konfirmasi verbal atas tulisan yang dihasilkan. Sistem ini memungkinkan anak untuk menulis dengan cara yang lebih mudah dan tidak terbebani oleh ketidakmampuan menulis tangan, sambil memotivasi mereka untuk terus berlatih dalam menyusun kata dan kalimat.

Metode komputasi yang digunakan dalam sistem ini melibatkan pemrosesan data input dari tombol keyboard dan pengolahan string teks menggunakan mikrokontroler. Setiap tekanan tombol pada keyboard kustom akan diterjemahkan menjadi data digital yang kemudian diproses untuk menyusun kalimat atau kata yang sesuai dengan urutan tombol yang dipilih. Mikrokontroler akan menambahkan fungsi-fungsi tertentu, seperti deteksi spasi, hapus, atau kirim, yang memungkinkan pengolahan teks secara real-time. Setelah teks disusun, mikrokontroler akan mengirimkan data ke modul tampilan LCD atau OLED untuk ditampilkan, serta mengaktifkan *buzzer* atau *speaker* untuk membaca kata atau kalimat tersebut.

Solusi papan menulis berbasis keyboard simbol ini efektif menyelesaikan masalah yang dihadapi anak tunagrahita dalam proses menulis. Anak tidak lagi harus berfokus pada keterampilan motorik halus yang sering kali menjadi hambatan

utama dalam menulis tangan, tetapi mereka dapat lebih fokus pada struktur kata dan kalimat. Sistem ini menghilangkan kecemasan terkait bentuk tulisan tangan dan memberikan mereka kebebasan untuk menulis dengan cara yang lebih mudah, menyenangkan, dan tidak membebani.

Selain itu, adanya umpan balik langsung baik secara visual maupun suara memperkuat pemahaman mereka terhadap kata dan kalimat yang sedang dibentuk. Sistem ini juga memberikan kemudahan bagi anak untuk berlatih menulis dan berkomunikasi tanpa kesulitan yang biasanya mereka alami saat menulis tangan. Dengan fitur pengiriman teks ke perangkat lain, anak juga dapat berbagi hasil tulisan mereka dengan keluarga, teman, atau pengajar, meningkatkan peluang interaksi sosial mereka.

Keunggulan utama dari solusi ini terletak pada kemampuannya untuk mengurangi hambatan yang biasanya dihadapi oleh anak tunagrahita dalam menulis, seperti kesulitan motorik halus atau kecemasan terkait bentuk tulisan tangan. Papan menulis dengan tombol besar bergambar memungkinkan anak untuk berlatih menulis dengan cara yang lebih mudah dan lebih menyenangkan, tanpa harus terbebani oleh kesulitan menulis manual. Selain itu, sistem ini memberikan umpan balik yang langsung melalui tampilan layar dan suara, yang membantu anak untuk lebih memahami dan mengingat apa yang telah mereka tulis.

Papan menulis ini juga mendukung komunikasi yang lebih baik melalui pengiriman teks ke aplikasi eksternal atau perangkat lain, memungkinkan anak untuk berbagi hasil tulisan mereka dengan orang lain. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya mendukung pembelajaran menulis, tetapi juga memperkuat keterampilan komunikasi dan interaksi sosial anak tunagrahita secara keseluruhan.

Walaupun solusi ini menawarkan banyak keunggulan, ada beberapa kelemahan yang perlu dipertimbangkan. Salah satu kelemahan utama adalah keterbatasan dalam hal pengenalan teks yang lebih kompleks. Meskipun sistem ini sangat efektif untuk menulis kata-kata dan frasa sederhana, penulisan kalimat yang lebih panjang atau kompleks mungkin memerlukan lebih banyak waktu atau latihan untuk dapat disusun dengan cepat dan efisien. Selain itu, keterbatasan dalam pengolahan

kalimat panjang atau teks yang melibatkan tata bahasa yang lebih rumit bisa menjadi tantangan bagi sistem ini.

Selain itu, meskipun keyboard besar bergambar dirancang untuk memudahkan anak dalam memilih tombol, beberapa anak mungkin masih kesulitan dalam mengenali gambar atau simbol yang ada pada tombol. Hal ini bisa mengurangi efektivitas sistem jika gambar pada tombol tidak cukup jelas atau mudah dipahami oleh anak tunagrahita yang lebih muda atau memiliki keterbatasan kognitif tertentu. Sistem ini juga bergantung pada perangkat keras seperti modul LCD atau OLED, yang mungkin memerlukan perawatan dan penggantian berkala jika ada kerusakan.

1.2.2.3.1 Subsistem 3 Solusi 3: Panduan Menulis dengan OCR dan Kamera untuk Evaluasi Tulisan

Solusi ketiga yang diusulkan untuk meningkatkan keterampilan menulis anak tunagrahita adalah penggunaan sistem panduan menulis yang dipadukan dengan teknologi pengenalan karakter optik (OCR) menggunakan dan kamera. Dalam sistem ini, anak akan menulis di atas kertas mengikuti panduan visual yang ditampilkan di layar, seperti contoh huruf, kata, atau kalimat. Setelah anak selesai menulis, *Single Board Computer* (SBC) akan mengaktifkan kamera untuk memotret tulisan mereka. Algoritma OCR, seperti Tesseract atau OpenCV, kemudian akan memproses gambar tulisan dan memberikan umpan balik mengenai keterbacaan tulisan serta kesesuaiannya dengan target yang ditentukan.

Dengan menggunakan sistem ini, anak tunagrahita dapat berlatih menulis dengan cara yang interaktif dan langsung mendapatkan umpan balik mengenai apakah tulisan mereka sudah sesuai atau perlu diperbaiki. Umpan balik tersebut tidak hanya disampaikan melalui teks atau suara, tetapi juga dalam bentuk rekomendasi yang lebih jelas, seperti "huruf A sudah benar" atau "coba tulis lagi", yang membantu anak untuk terus belajar dan memperbaiki keterampilan menulis mereka.

Layar LCD digunakan sebagai panduan visual untuk anak, menampilkan contoh huruf, garis bantu, atau kalimat yang harus ditulis. Selama proses menulis, anak dapat melihat panduan ini secara langsung di layar, memudahkan mereka untuk

menulis dengan benar. Setelah anak menyelesaikan tulisan, mereka akan menekan tombol untuk memulai proses pemotretan. Kamera kemudian mengambil gambar tulisan anak, yang dikirimkan ke Raspberry Pi untuk diproses.

Hasil gambar tersebut diproses menggunakan algoritma OCR, yang mengonversi gambar tulisan menjadi teks yang dapat dianalisis. Setelah teks dikenali, sistem memberikan umpan balik kepada anak melalui speaker, yang membacakan hasil OCR atau memberi instruksi seperti "huruf A sudah benar" atau "coba tulis lagi". Lampu LED ring atau strip digunakan untuk memastikan pencahayaan yang stabil di atas kertas, mengurangi gangguan akibat cahaya yang tidak merata, dan memastikan gambar yang diambil oleh kamera cukup jelas.

Cara kerja sistem ini dimulai dengan anak menulis di atas kertas sesuai dengan panduan yang ditampilkan di layar LCD. Layar ini menunjukkan contoh huruf, kata, atau kalimat yang harus ditulis, serta memberikan garis bantu yang jelas untuk membantu anak menulis dengan rapi. Setelah anak selesai menulis, mereka cukup menekan tombol "start" atau "scan" untuk memulai proses pemotretan.

Ketika tombol ditekan, kamera secara otomatis mengambil gambar tulisan anak yang ada di atas kertas. Gambar ini kemudian dikirim SBC, yang menjalankan algoritma OCR untuk mengkonversi gambar tulisan menjadi teks. OCR, dengan menggunakan teknologi Tesseract atau OpenCV, akan menilai keterbacaan tulisan anak, membandingkannya dengan target tulisan yang telah ditentukan, dan mengidentifikasi kesalahan yang ada.

Setelah proses OCR selesai, sistem memberikan umpan balik melalui speaker. Jika tulisan sudah sesuai, sistem bisa mengatakan "huruf A sudah benar". Jika ada kesalahan, sistem akan memberikan instruksi yang lebih spesifik, seperti "coba tulis lagi". Sistem juga menampilkan teks hasil OCR di layar, memungkinkan anak melihat apakah tulisan mereka sudah terbaca dengan benar.

Metode komputasi yang digunakan untuk memproses gambar tulisan dan memberikan umpan balik menggunakan teknologi OCR yang didukung oleh SBC yang kompatibel. Pusat pemrosesan menjalankan dua algoritma utama: Tesseract

dan OpenCV. Tesseract adalah perangkat lunak OCR open-source yang dapat mengenali karakter dalam gambar dan mengkonversinya menjadi teks. OpenCV digunakan untuk pengolahan gambar dan meningkatkan kualitas gambar sebelum diterapkan OCR, seperti pemrosesan pencahayaan dan kontras, serta pengenalan bentuk huruf yang lebih jelas.

Setelah gambar diambil oleh kamera, sistem akan menjalankan algoritma pengolahan gambar untuk memperbaiki kualitas gambar dan memastikan tulisan jelas untuk diolah. Kemudian, hasil gambar tersebut diproses oleh Tesseract untuk mengekstrak teks. Hasil teks ini kemudian dibandingkan dengan target tulisan yang sudah diprogram, dan sistem menghitung tingkat kecocokan serta memberikan umpan balik yang relevan. Teknologi ini memungkinkan sistem memberikan umpan balik secara real-time, memungkinkan anak untuk langsung mengetahui hasil tulisan mereka.

Solusi ini sangat efektif dalam mengatasi masalah menulis yang dihadapi anak tunagrahita, terutama yang berkaitan dengan kesulitan motorik halus dan ketidakmampuan untuk mengikuti garis tulisan yang tepat. Dengan menggunakan panduan visual di layar LCD, anak dapat mengikuti contoh tulisan tanpa harus berfokus pada bentuk tulisan tangan mereka. Proses pemotretan yang sederhana dan umpan balik berbasis OCR memberikan cara yang efektif untuk menilai kualitas tulisan anak secara objektif, mengurangi kecemasan yang mungkin timbul akibat ketidaksempurnaan tulisan tangan.

Sistem OCR ini juga memungkinkan anak untuk berlatih menulis dengan lebih mandiri, karena mereka dapat melihat hasil tulisan mereka dengan jelas dan mendapatkan umpan balik yang spesifik tentang apa yang perlu diperbaiki. Hal ini mendukung pembelajaran berbasis latihan yang bertahap, membantu anak meningkatkan keterampilan menulis mereka dengan cara yang lebih interaktif dan menyenangkan. Umpan balik yang cepat dan terstruktur juga memastikan bahwa anak tidak merasa frustrasi atau cemas dalam proses belajar.

Keunggulan utama dari solusi ini adalah kemampuan untuk memberikan umpan balik secara langsung dan objektif menggunakan teknologi OCR. Sistem ini

memungkinkan anak untuk menulis dengan mengikuti panduan visual dan kemudian mengevaluasi tulisan mereka dengan menggunakan teknologi yang dapat memverifikasi kesesuaian tulisan dengan target yang telah ditentukan. Umpan balik verbal yang diberikan melalui *speaker* juga sangat efektif untuk anak tunagrahita, karena mereka dapat mendengar dan memahami hasil tulisan mereka secara langsung, yang meningkatkan kepercayaan diri mereka dalam berlatih menulis.

Selain itu, penggunaan kamera memungkinkan sistem ini untuk menjadi perangkat yang cukup fleksibel dan terjangkau. Penggunaan lampu LED untuk pencahayaan yang stabil juga menambah keefektifan sistem, memastikan bahwa gambar tulisan yang diambil cukup jelas untuk diproses. Integrasi antara hardware yang sederhana dan teknologi OCR yang canggih memberikan solusi yang efisien dan efektif untuk anak tunagrahita dalam belajar menulis.

Walaupun solusi ini memiliki banyak keunggulan, terdapat beberapa kelemahan yang perlu diperhatikan. Salah satunya adalah keterbatasan dalam kualitas gambar yang dapat dipengaruhi oleh faktor pencahayaan yang tidak merata atau gerakan anak yang cepat saat menulis. Jika pencahayaan di sekitar kertas tidak stabil, kualitas gambar yang diambil oleh kamera dapat terpengaruh, yang dapat mengurangi akurasi proses OCR.

Selain itu, meskipun OCR dapat mengidentifikasi tulisan dengan cukup baik, sistem ini masih memiliki keterbatasan dalam mengenali tulisan yang sangat buram atau sulit dibaca. Jika tulisan anak tidak cukup jelas atau terdistorsi, OCR mungkin tidak dapat mengenali karakter dengan akurat, yang dapat mempengaruhi kualitas umpan balik yang diberikan. Solusi ini juga bergantung pada pengaturan yang cukup presisi, seperti posisi kertas dan kamera, untuk memastikan proses pemotretan yang optimal.

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Berdasarkan 9 solusi untuk tiga subsistem yang telah dirumuskan sebelumnya diperlukan analisis lebih mendalam lagi guna mendapatkan solusi terbaik untuk

menentukan solusi mana yang cocok untuk permasalahan pada topik ini. Metode yang digunakan untuk menganalisis solusi adalah *House Of Quality* seperti berikut

Tabel 1. 6 House of Quality

Karakteristik Dasar									
 = 5  = 3  = 1	Importance Rating (1 = Weak, 3 = Medium, 5 = Strong)	Percent of Importance Rating	Multisensory	Feedback	Data Processing	User-Friendly	Real-time Sensing	Progress Evaluation	
Konstrain									
Error Correction	5	19,23%							
Standardized Training	5	19,23%							
Self Training	3	11,54%							
Biometric Data Security and Privacy	5	19,23%							
Audit Trail dan Traceability	5	19,23%							
Development Timeline	3	11,54%							
Importance Rating			55	65	60	45	35	95	355
Percent of Importance			15,43296	18,31	16,9014	12,676	9,8532	26,7606	100
Sub Sistem 1	Solusi 1								2,872
	Solusi 2								3,894
	Solusi 3								3,037
Sub Sistem 2	Solusi 1								3,316
	Solusi 2								3,909
	Solusi 3								3,078
Sub Sistem 3	Solusi 1								2,74
	Solusi 2								3,134
	Solusi 3								3,696

Tabel 1. 7 Keterangan HOQ

Relationship Matrix			Solusi	
	Strong	5	Sub Sistem 1	Solusi 1: Belajar Membaca dengan Metode Fonik
	Medium	3		Solusi 2: Belajar Membaca dengan Metode Global
	Weak	1		Solusi 3: Belajar Membaca dengan Metode RFID
	No Relation	0	Sub Sistem 2	Solusi 1: Sistem Latihan Public Speaking Berbasis Sensor Audio-Visual dengan integrasi Algoritma Deep Learning
				Solusi 2: VR-based Training dengan Multisensor
				Solusi 3: Device berbasis EEG Monitoring untuk Treatment Relaksasi Sebelum Public Speaking
			Sub Sistem 3	Solusi 1: Device Pena Sensor IMU untuk Latihan Menulis Interaktif
				Solusi 2: Papan Menulis Simbol untuk Penyusunan Kalimat
				Solusi 3: Panduan Menulis dengan OCR dan Kamera untuk Evaluasi Tulisan

Berdasarkan Gambar *House Of Quality* diatas didapatkan poin akhir dari setiap solusi sebagai berikut :

Subsistem 1 :

Subsistem 1 Solusi 1 =2,872

$$(5 \times 15,492958\%) + (1 \times 18,3099\%) + (1 \times 16,9014\%) + (5 \times 12,6761\%) + (1 \times 9,85915\%) + (5 \times 26,7606\%) = 2,872$$

Subsistem 1 Solusi 2 =3,894

$$(5 \times 15,492958\%) + (3 \times 18,3099\%) + (3 \times 16,9014\%) + (5 \times 12,6761\%) + (1 \times 9,85915\%) + (5 \times 26,7606\%) = 3,894$$

Subsistem 1 Solusi 3 =3,037

$$(5 \times 15,492958\%) + (5 \times 18,3099\%) + (5 \times 16,9014\%) + (3 \times 12,6761\%) + (1 \times 9,85915\%) + (1 \times 26,7606\%) = 3,037$$

Subsistem 2 :

Subsistem 2 Solusi 1 = 2.516

$$(3 \times 15,492958\%) + (5 \times 18,3099\%) + (1 \times 16,9014\%) + (5 \times 12,6761\%) + (5 \times 9,85915\%) + (3 \times 26,7606\%) = 2,516$$

Subsistem 2 Solusi 2 = 3.909

$$(5 \times 15,492958\%) + (5 \times 18,3099\%) + (1 \times 16,9014\%) + (3 \times 12,6761\%) + (5 \times 9,85915\%) + (5 \times 26,7606\%) = 3,909$$

Subsistem 2 Solusi 3 = 3.077

$$(1 \times 15,492958\%) + (3 \times 18,3099\%) + (5 \times 16,9014\%) + (3 \times 12,6761\%) + (5 \times 9,85915\%) + (3 \times 26,7606\%) = 3,077$$

Subsistem 3 :

Subsistem 3 Solusi 1 = 2.739

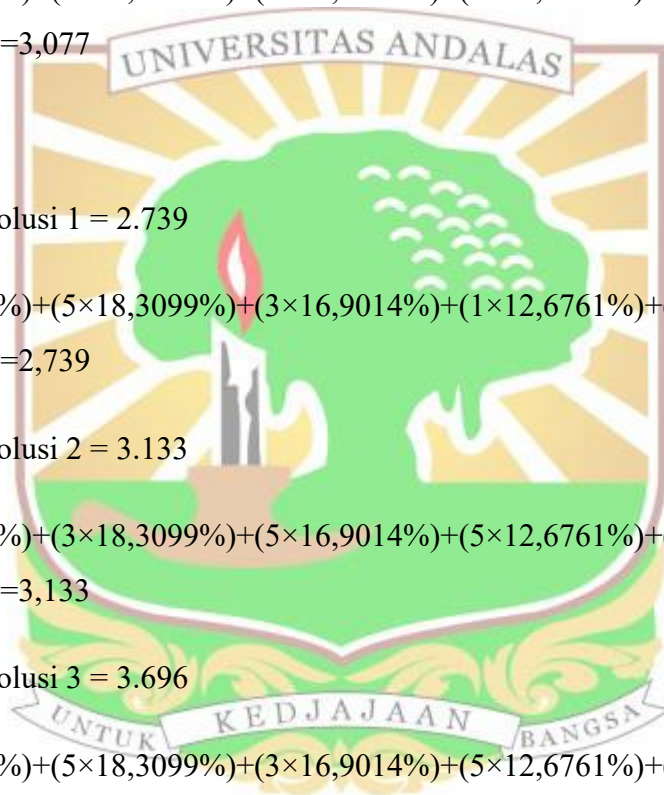
$$(1 \times 15,492958\%) + (5 \times 18,3099\%) + (3 \times 16,9014\%) + (1 \times 12,6761\%) + (5 \times 9,85915\%) + (3 \times 26,7606\%) = 2,739$$

Subsistem 3 Solusi 2 = 3.133

$$(1 \times 15,492958\%) + (3 \times 18,3099\%) + (5 \times 16,9014\%) + (5 \times 12,6761\%) + (3 \times 9,85915\%) + (3 \times 26,7606\%) = 3,133$$

Subsistem 3 Solusi 3 = 3.696

$$(1 \times 15,492958\%) + (5 \times 18,3099\%) + (3 \times 16,9014\%) + (5 \times 12,6761\%) + (3 \times 9,85915\%) + (5 \times 26,7606\%) = 3,696$$



Dalam proses pengembangan solusi yang melibatkan tiga subsistem berbagai fitur harus diprioritaskan untuk memastikan bahwa sistem dapat berfungsi dengan efektif dan efisien. Salah satu elemen yang sangat penting adalah *Error Correction*, yang diberikan rating 5. Sistem yang mampu secara otomatis mendeteksi dan mengoreksi kesalahan merupakan fondasi bagi keberhasilan operasional. Setiap gangguan atau *error* yang terjadi dalam sistem dapat berdampak besar terhadap kinerja dan kepercayaan pengguna. Oleh karena itu, sangat penting untuk

memberikan perhatian lebih pada *error correction* agar sistem dapat berjalan dengan lancar dan memberikan pengalaman yang optimal bagi penggunaanya.

Selain itu, *Standardized Training* juga memperoleh rating 5 karena pelatihan yang terstandarisasi adalah aspek krusial dalam memastikan setiap individu yang terlibat dalam penggunaan sistem memahami cara kerja sistem dengan baik. Tanpa pelatihan yang seragam, risiko kesalahan dalam penggunaan sistem akan meningkat. *Standardized training* memungkinkan semua pihak, baik itu pengguna, teknisi, atau administrator, memiliki pemahaman yang sama tentang prosedur yang harus diikuti, yang pada akhirnya memudahkan implementasi dan mengurangi potensi kesalahan operasional.

Sementara itu, *Self Training* diberikan rating 3, menunjukkan bahwa meskipun memberikan fleksibilitas, metode ini tidak sepenting pelatihan terstandarisasi atau koreksi kesalahan. *Self-training* bisa memberikan manfaat bagi pengguna yang lebih mandiri, tetapi tidak cukup efektif tanpa adanya dukungan yang lebih terstruktur. Oleh karena itu, meskipun bermanfaat, pendekatan ini harus dilengkapi dengan instruksi yang jelas dan dukungan lainnya untuk memastikan keberhasilan dalam pembelajaran dan penggunaan sistem.

Dalam konteks data yang lebih sensitif, seperti *Biometric Data Security and Privacy*, rating 5 menandakan bahwa perlindungan terhadap data biometrik sangatlah penting. Mengingat kerentanannya terhadap pelanggaran data dan peraturan privasi yang ketat, memastikan bahwa data tersebut terlindungi dengan baik dari akses yang tidak sah adalah prioritas utama. Solusi yang diusulkan harus mematuhi standar keamanan yang tinggi dan memastikan bahwa data pribadi pengguna terlindungi dengan maksimal.

Tak kalah penting, *Audit Trail and Traceability* juga diberikan rating 5. Dalam sistem yang melibatkan data dan transaksi, kemampuan untuk melacak setiap tindakan dan perubahan yang terjadi adalah kunci untuk menjaga transparansi, akuntabilitas, dan integritas. *Audit trail* memungkinkan untuk mengidentifikasi sumber masalah dan memantau sistem dengan lebih efektif, memberikan rasa aman baik bagi pengelola sistem maupun pengguna.

Terakhir, meskipun *Development Timeline* juga penting, rating 3 menunjukkan bahwa meskipun dibutuhkan perencanaan yang matang, waktu pengembangan memiliki fleksibilitas lebih besar. Pengembangan sistem seringkali dihadapkan pada berbagai tantangan dan perubahan kebutuhan yang memerlukan adaptasi cepat. Oleh karena itu, meskipun penting, timeline pengembangan tidak dianggap sebagai elemen yang harus diprioritaskan sepenuhnya dibandingkan dengan aspek-aspek yang lebih mendasar seperti keamanan dan koreksi kesalahan. Untuk memahami dan mengkomparasi lebih lanjut maka dibutuhkan analisa mendalam terhadap usulan solusi dengan membandingkan terhadap fitur dasar.

1.2.3.1 Analisi Fitur Dasar Subsistem 1 Solusi 1: Belajar Membaca dengan Metode Fonik

Solusi 1 mendapatkan skor 5 pada aspek Multisensori karena metode fonik yang digunakan menggabungkan dua modalitas belajar utama yaitu visual dan audio. Anak tidak hanya melihat huruf di layar, melainkan juga mendengarkan pelafalan bunyinya secara langsung sesuai prinsip fonik, di mana anak diperkenalkan pada bunyi huruf tunggal, suku kata K-V, dan berbagai gabungan fonem. Selain itu, modul pembelajaran yang tampil di layar memberikan stimulus visual yang konsisten, sedangkan audio memberi stimulus fonologis, sehingga pembelajaran menjadi lebih efektif untuk anak tunagrahita.

Pada aspek Feedback, Solusi 1 mendapatkan skor 1 karena meskipun sistem memberikan umpan balik otomatis berbasis speech recognition, model machine learning yang digunakan belum optimal untuk mengenali bunyi fonem tunggal. Secara teknis, sebagian besar model *speech-to-text* modern dikembangkan untuk mengenali kata atau kalimat utuh, dengan fokus pada pola akustik yang lebih panjang dan lebih kompleks. Sementara itu, fonem seperti /b/, /d/, /p/, atau /t/ memiliki durasi sangat pendek, bersifat subtil, dan memiliki karakteristik akustik yang saling berdekatan, sehingga tidak banyak didukung oleh model STT

Untuk aspek User-Friendly Interface, Solusi 1 memperoleh skor 5. Modul pembelajaran pada solusi ini dirancang khusus mengikuti kebutuhan visual anak tunagrahita. Tampilan huruf, warna kontras, ikon sederhana, serta layout yang tidak

rumit membuat anak mudah memahami instruksi dan mengikuti proses belajar fonik. Desain visual juga diarahkan untuk mengurangi beban kognitif sehingga anak bisa fokus pada tujuan utama: mengenali bunyi huruf dan suku kata.

Pada aspek *Data Processing*, Solusi 1 memperoleh nilai 1 karena kemampuan pemrosesan model speech recognition masih terbatas terutama dalam memahami fonem. Algoritma STT memerlukan pola suara yang lebih panjang untuk menghasilkan keluaran akurat, sehingga data suara berupa fonem pendek sulit diproses secara efektif.

Pada aspek Progres Evaluation, Solusi 1 mendapatkan nilai 5, karena pada solusi 1 terdapat fitur yang akan menyimpan hasil pembelajaran anak tunagrahita, di mana guru dan orang tua dapat melihat kata dan kalimat yang telah dibaca dan mengetahui perkembangan kemampuan membaca anak tersebut. Hal ini mendapatkan nilai lima karena dengan metode fonik feedback evaluation yang didapatkan dari metode ini cukup komprehensif

Pada aspek real-time sensing, Solusi 1 mendapatkan nilai 1 karena tidak menggunakan sensor dalam sistemnya. *Real-time* sensing dimiliki jika sistem memiliki kemampuan memonitoring dan mendapatkan data biologis pengguna secara waktu nyata (*real time*)

1.2.3.1 Analisi Fitur Dasar Subsistem 1 Solusi 2: Belajar Membaca dengan Metode Global

Solusi 1 memperoleh skor tertinggi, yaitu 5, pada aspek Multisensory karena modul pembelajaran yang disediakan menggabungkan tiga saluran utama: teks, gambar, dan audio penjelas. Pendekatan ini sangat penting untuk anak tunagrahita, yang mungkin kesulitan untuk memahami informasi hanya melalui satu jenis media. Dengan teks yang dapat dibaca, gambar yang memperjelas konsep, serta audio yang menyuarakan informasi, anak-anak dapat memperoleh penjelasan melalui berbagai saluran indra yang memudahkan mereka dalam menyerap informasi. Pembelajaran multisensori ini secara signifikan meningkatkan pemahaman dan retensi informasi

bagi anak tunagrahita, sehingga mendukung perkembangan mereka dalam membaca dengan cara yang lebih efektif dan menyenangkan.

Pada aspek Feedback, Solusi 1 mendapatkan skor 3, yang menunjukkan bahwa meskipun sistem memberikan umpan balik yang berguna, masih ada ruang untuk perbaikan. Sistem menggunakan *speech-to-text* untuk mengenali kata yang diucapkan anak, dan feedback diberikan berdasarkan kecocokan suara dengan kata yang ditampilkan. Meskipun model *speech-to-text* efektif dalam mengenali kata dengan akurasi yang cukup baik, pengenalan fonem, yaitu pengucapan suku kata atau kata utuh, tidak seakurat pengenalan kata utuh. Metode global ini meminta anak untuk mengucapkan kata atau suku kata dengan durasi yang lebih panjang dan pola akustik yang lebih stabil, yang memudahkan mesin untuk mengenali kata tersebut. Namun, umpan balik yang diberikan dalam sistem ini terkadang tidak seakurat yang diinginkan karena keterbatasan dalam pengenalan fonem, meskipun tetap cukup membantu dalam memperbaiki kesalahan.

Solusi 1 memperoleh skor 5 pada aspek User-Friendly Interface karena tampilan modul pembelajaran dirancang dengan sangat mempertimbangkan kebutuhan visual anak tunagrahita. Desain yang ramah pengguna ini mencakup kontras warna yang jelas, ukuran huruf yang besar, ikon yang informatif, serta navigasi yang sederhana dan mudah dipahami. Setiap elemen dalam antarmuka disusun dengan tujuan untuk memudahkan anak-anak berinteraksi dengan materi pembelajaran tanpa merasa kesulitan. Hal ini penting karena anak tunagrahita sering kali mengalami kesulitan dengan antarmuka yang rumit, sehingga sistem yang mudah digunakan akan meningkatkan efektivitas pembelajaran mereka. Dengan tampilan yang bersih dan mudah dipahami, anak-anak dapat fokus pada pembelajaran dan merasa nyaman dalam prosesnya.

Pada aspek *Data Processing*, Solusi 1 mendapatkan skor 3. Skor ini mencerminkan kenyataan bahwa meskipun metode global bekerja dengan kata dan suku kata, yang memungkinkan pengolahan data akustik yang lebih banyak, ada beberapa keterbatasan dalam pengolahan fonem. Pengenalan suara dengan sistem *speech-to-text* pada metode global menghasilkan lebih banyak data untuk diproses, yang berkontribusi pada stabilitas kinerja sistem. Namun, model ini tidak seefisien

metode yang lebih fokus pada fonem, yang berarti pengolahan data dalam Solusi 1 lebih stabil, tetapi masih dapat ditingkatkan dalam akurasi untuk pengenalan fonem.

Pada aspek *Progress Evaluation*, Solusi 1 memperoleh skor 5 karena adanya fitur yang memungkinkan penyimpanan hasil pembelajaran anak. Fitur ini memungkinkan guru dan orang tua untuk melacak perkembangan kemampuan membaca anak tunagrahita secara berkelanjutan. Dengan fitur penyimpanan hasil, guru dan orang tua dapat melihat kata dan kalimat yang telah dibaca anak, serta memonitor perkembangan kemampuan membaca mereka. Umpan balik yang diberikan dari sistem memungkinkan untuk evaluasi yang lebih jelas dan membantu dalam penyesuaian pendekatan pembelajaran yang lebih sesuai dengan kebutuhan anak.

Solusi 1 memperoleh skor 1 pada aspek Real-time Sensing karena sistem ini tidak menggunakan sensor untuk mendeteksi atau menganalisis gerakan fisik anak saat belajar. Meskipun sistem ini menggunakan *speech-to-text* untuk memberikan feedback pada pengucapan kata, tidak ada sensor fisik yang mendeteksi gerakan tangan atau interaksi anak dengan alat pembelajaran. Hal ini mengurangi kemampuan sistem untuk memberikan umpan balik secara langsung berdasarkan data sensorik yang lebih mendalam, seperti pemantauan gerakan tangan anak saat menulis atau berbicara. Sebagai akibatnya, meskipun efektif, sistem ini kurang dalam aspek real-time sensing yang bisa lebih memperkaya pengalaman belajar anak.

1.2.3.1 Analisi Fitur Dasar Subsistem 1 Solusi 3: Belajar Membaca dengan Metode RFID

Solusi 1 memperoleh skor tertinggi, 5, pada aspek Multisensory, karena sistem ini mengandalkan interaksi fisik melalui penggunaan kartu RFID, yang memungkinkan anak untuk merasakan dan berinteraksi langsung dengan media pembelajaran. Kartu RFID yang harus dipindai oleh anak memberikan pengalaman taktil, yang sangat efektif dalam membantu anak tunagrahita yang mungkin kesulitan dengan pendekatan pembelajaran konvensional. Selain itu, elemen visual berupa susunan kata yang ditampilkan di layar dan auditori berupa pembacaan kata

yang dipilih melalui pemindaian kartu, semakin memperkaya pengalaman pembelajaran mereka. Penggunaan berbagai saluran indra ini memungkinkan anak-anak untuk lebih mudah memahami dan mengingat informasi yang disampaikan, yang sangat penting bagi mereka dalam proses pembelajaran membaca.

Pada aspek Feedback, Solusi 1 mendapatkan skor 5 karena sistem memberikan umpan balik yang jelas dan langsung. Ketika anak men-scan huruf sesuai urutan kata yang benar, sistem akan menampilkan huruf tersebut di layar sebagai konfirmasi. Ini membantu anak untuk melihat langsung hasil dari interaksi mereka dengan sistem. Namun, jika urutan yang dipilih salah (misalnya, jika anak memilih urutan "i-b-u" untuk kata "ibu"), sistem akan memberikan umpan balik yang sesuai dengan menunjukkan bahwa hasilnya tidak sesuai. Koreksi seperti ini sangat penting untuk membantu anak mengerti dan memperbaiki kesalahan mereka, serta mengarah pada pemahaman yang lebih baik tentang urutan kata. Umpan balik yang diberikan dalam Solusi 1 sangat konstruktif, memberikan kesempatan bagi anak untuk belajar secara mandiri dan memahami pentingnya urutan huruf dalam kata.

Solusi 1 memperoleh skor 3 pada aspek *User-Friendly Interface*. Hal ini karena tampilan layar pada sistem ini hanya berfungsi untuk menampilkan instruksi kata atau kalimat yang harus disusun oleh anak. Meskipun tampilan ini sangat fungsional dan memberikan panduan yang jelas, sistem tidak dilengkapi dengan modul pembelajaran visual yang lebih mendalam, seperti gambar atau animasi yang dapat membantu memperkaya pengalaman belajar anak. Interface yang sederhana ini dapat memudahkan anak dalam mengikuti petunjuk, tetapi tidak memberikan stimulasi visual tambahan yang mungkin bisa lebih menarik dan memperkaya pembelajaran mereka. Dengan kata lain, tampilan ini memenuhi kebutuhan dasar, namun dapat ditingkatkan untuk lebih mendukung keterlibatan dan minat anak dalam proses belajar.

Pada aspek Data Processing, Solusi 1 mendapatkan skor 5. Sistem ini menggunakan teknologi RFID yang jauh lebih deterministik, stabil, dan akurat dalam memproses input dari kartu RFID. Pembacaan RFID tidak dipengaruhi oleh variasi suara, durasi, atau artikulasi yang mungkin dimiliki anak, yang sering menjadi kendala pada sistem pengenalan suara. Sistem hanya mencocokkan ID kartu dengan huruf

yang benar, sehingga kemungkinan error sangat kecil. Selain itu, sistem ini menggunakan Reinforcement Learning untuk menyesuaikan tingkat kesulitan kata dan kalimat berdasarkan performa anak, yang membuat pemrosesan data lebih adaptif dan dapat diandalkan. Sistem ini mampu mengoptimalkan pembelajaran dengan memberikan tantangan yang sesuai dengan kemampuan anak, memungkinkan mereka untuk berkembang sesuai dengan kemajuan mereka.

Pada aspek Progress Evaluation, Solusi 1 mendapatkan skor 1, karena meskipun sistem menyimpan hasil susunan kata anak, tidak ada mekanisme untuk menyimpan atau melacak progres membaca anak dalam jangka panjang. Hal ini berarti bahwa meskipun anak dapat menyusun kata-kata dengan benar, tidak ada sistem evaluasi yang dapat mengukur perkembangan kemampuan membaca mereka secara keseluruhan. Sistem ini tidak memberikan data atau laporan yang dapat digunakan untuk memonitor perkembangan kemampuan membaca anak, yang merupakan kelemahan dalam hal pengukuran efektivitas pembelajaran.

Solusi 1 memperoleh skor 1 pada aspek *Real-time Sensing* karena sistem ini tidak menggunakan sensor yang dapat memberikan umpan balik langsung mengenai gerakan atau interaksi fisik anak selain pembacaan RFID. Sistem hanya bergantung pada pemindaian kartu RFID dan tidak mengukur atau memantau gerakan lain yang mungkin dapat memberikan wawasan tambahan tentang perilaku atau cara belajar anak. Dengan kata lain, meskipun sistem ini efektif dalam mendeteksi urutan kartu RFID, tidak ada sensor yang memantau aspek lain seperti gerakan tangan atau respons fisik lainnya yang bisa memperkaya pengalaman belajar anak.

1.2.3.4 Analisis Fitur Dasar Subsistem 2 Solusi 1: Sistem Latihan *Public Speaking* Berbasis Sensor Audio-Visual dengan integrasi Algoritma *Deep Learning*

Dari aspek multisensory, solusi ini diberi nilai hubungan sedang (3). Sistem melibatkan lebih dari satu indera, terutama visual dan auditori, yang memungkinkan anak melihat simulasi audiens atau panduan visual sekaligus mendengar suara mereka sendiri saat berbicara. Namun, multisensori dalam solusi ini bukan ditujukan sebagai terapi sensori penuh, melainkan sebagai pendukung

latihan komunikasi lisan. Fokus utama tetap pada keberanian berbicara dan penyampaian pesan, bukan pada stimulasi multisensori yang kompleks. Oleh karena itu, kontribusi multisensory dianggap penting tetapi tidak menjadi fitur dominan. Berbeda dengan itu, fitur *feedback* memiliki hubungan yang sangat kuat (5) dengan solusi ini. Latihan public speaking sangat bergantung pada umpan balik yang jelas dan langsung agar pengguna mengetahui bagian mana yang sudah benar dan bagian mana yang perlu diperbaiki. Sistem audio-visual memungkinkan pemberian feedback secara konkret, seperti indikator sederhana terkait volume suara, kejelasan artikulasi, atau kestabilan sikap. Tanpa feedback yang memadai, latihan berisiko menjadi repetisi tanpa arah dan sulit menghasilkan peningkatan kemampuan. Oleh sebab itu, feedback menjadi komponen inti yang menentukan efektivitas solusi ini. Pada fitur data processing, hubungan yang ditunjukkan relatif lemah (1). Solusi ini tidak dirancang untuk melakukan pemrosesan data yang kompleks atau analisis lanjutan berbasis komputasi berat. Sistem cukup mengandalkan pengolahan sinyal sederhana untuk menghasilkan respon langsung selama latihan. Nilai utama solusi ini terletak pada pengalaman latihan dan interaksi real-time, bukan pada akumulasi atau analisis data mendalam. Oleh karena itu, pemrosesan data ditempatkan sebagai elemen pendukung minimum yang tidak menjadi fokus utama pengembangan. Aspek *user-friendly* menunjukkan hubungan yang sangat kuat (5) dengan solusi ini. Mengingat pengguna utama adalah anak tunagrahita, kemudahan penggunaan menjadi syarat mutlak agar sistem dapat diterima dan digunakan secara konsisten. Antarmuka yang sederhana, alur latihan yang jelas, serta minimnya langkah teknis sangat berpengaruh terhadap keberhasilan latihan. Sistem public speaking yang terlalu rumit berpotensi menimbulkan kebingungan, kecemasan, atau penolakan dari pengguna. Dengan demikian, karakter *user-friendly* menjadi prioritas utama dalam perancangan solusi ini. Fitur real-time sensing juga memiliki hubungan yang sangat kuat (5). Latihan berbicara di depan umum menuntut respons langsung agar pengguna dapat segera melakukan koreksi saat terjadi kesalahan, misalnya ketika suara terlalu pelan atau tempo bicara tidak stabil. Sensor audio-visual memungkinkan sistem menangkap performa pengguna secara langsung dan memberikan sinyal korektif pada saat yang sama. Tanpa kemampuan sensing real-time, manfaat latihan akan berkurang karena

koreksi diberikan terlambat dan tidak kontekstual. Sementara itu, hubungan dengan fitur progress evaluation berada pada tingkat sedang (3). Evaluasi perkembangan tetap diperlukan untuk memantau kemajuan latihan, namun pada konteks anak tunagrahita evaluasi sebaiknya bersifat sederhana dan tidak terlalu kompleks. Progres berbicara di depan umum tidak selalu linear dan sering kali berkaitan dengan aspek emosional seperti keberanian dan kenyamanan, yang sulit diukur secara kuantitatif. Oleh karena itu, evaluasi difokuskan pada indikator ringkas atau perbandingan antar sesi, tanpa menuntut analisis mendalam yang berpotensi membebani pengguna.

Secara keseluruhan, analisis ini menunjukkan bahwa kekuatan utama Subsistem 2 Solusi 1 terletak pada feedback, real-time sensing, dan kemudahan penggunaan, yang secara langsung mendukung tujuan utama latihan public speaking bagi anak tunagrahita. Sementara itu, aspek pemrosesan data dan evaluasi progres dirancang secukupnya agar sistem tetap ringan, tidak kompleks, dan sesuai dengan karakteristik serta kebutuhan pengguna. Pendekatan ini menegaskan bahwa solusi lebih menekankan pengalaman latihan yang aman, adaptif, dan mudah dipahami dibandingkan kompleksitas teknis yang berlebihan.

1.2.3.5 Analisis Fitur Dasar Subsistem 2 Solusi 2: *VR-based Training* dengan Multisensor

Sub Sistem 2 Solusi 2 dirancang sebagai pendekatan terpadu dalam pelatihan bicara bagi anak tunagrahita dengan penekanan pada struktur, pengulangan, dan penguatan bertahap, bukan pada pemantauan sensorik yang intensif. Solusi ini lebih menitikberatkan pada pembiasaan berbicara melalui skenario yang terkontrol, instruksi yang jelas, dan pola latihan yang konsisten. Oleh karena itu, hubungan antara solusi ini dengan fitur dasar pada House of Quality menunjukkan karakteristik yang berbeda dibandingkan Solusi 1, baik dari sisi kekuatan maupun prioritas fitur.

Pada fitur multisensory, solusi ini menunjukkan hubungan yang kuat (5). Sistem pelatihan dirancang untuk melibatkan rangsangan visual dan auditori secara seimbang, melalui tampilan teks atau simbol panduan berbicara yang disertai suara

contoh atau pengulangan verbal. Pendekatan multisensori ini penting untuk membantu anak tunagrahita memahami isi latihan secara lebih komprehensif, terutama bagi anak yang memiliki keterbatasan dalam memproses informasi verbal saja. Oleh karena itu, multisensory menjadi salah satu fondasi utama solusi ini dan layak mendapatkan nilai hubungan tertinggi.

Berbeda dengan Solusi 1, aspek feedback pada Solusi 2 juga memiliki hubungan yang kuat (5), namun dengan karakter yang sedikit berbeda. Feedback pada solusi ini lebih bersifat struktural dan penguatan (reinforcement), seperti konfirmasi benar/salah, pengulangan kalimat, atau dorongan verbal sederhana setelah anak menyelesaikan bagian latihan. Feedback tidak selalu diberikan secara dinamis berbasis sensor, tetapi tetap konsisten dan mudah dipahami. Karena feedback tetap menjadi komponen kunci dalam membangun kepercayaan diri dan memperbaiki performa berbicara, fitur ini tetap memperoleh penilaian tertinggi.

Untuk fitur data processing, hubungan yang ditunjukkan berada pada tingkat rendah (1). Solusi ini tidak bergantung pada pemrosesan data kompleks atau analisis performa berbasis komputasi. Sistem cukup memproses input sederhana seperti urutan latihan, pemilihan skenario, dan hasil latihan dasar. Fokus utama bukan pada pengolahan data yang mendalam, melainkan pada keberulangan latihan yang terstruktur. Oleh karena itu, data processing ditempatkan sebagai elemen pendukung minimal, bukan sebagai nilai jual utama solusi.

Pada aspek user-friendly, solusi ini menunjukkan hubungan sedang (3). Antarmuka dan alur latihan dirancang cukup sederhana, namun tetap memerlukan tingkat perhatian dan pemahaman tertentu dari pengguna, terutama dalam mengikuti urutan latihan dan instruksi. Dibandingkan Solusi 1 yang sangat mengandalkan respon intuitif real-time, Solusi 2 lebih bersifat prosedural. Hal ini membuatnya tetap ramah pengguna, tetapi tidak sepenuhnya intuitif bagi semua anak tunagrahita, sehingga penilaian hubungan berada pada tingkat menengah.

Fitur real-time sensing menunjukkan hubungan yang lemah (1) pada solusi ini. Solusi 2 tidak mengandalkan pemantauan kondisi pengguna secara langsung selama latihan berlangsung, seperti perubahan suara atau ekspresi secara real-time. Sistem

lebih fokus pada hasil latihan setelah satu segmen selesai, bukan pada koreksi instan selama proses berbicara. Karena sensing real-time bukan bagian inti dari mekanisme kerja solusi ini, maka fitur tersebut memperoleh nilai hubungan terendah.

Sebaliknya, progress evaluation memiliki hubungan yang kuat (5) dengan solusi ini. Karena pendekatan pelatihan bersifat bertahap dan terstruktur, evaluasi kemajuan menjadi komponen penting untuk memastikan anak mengalami peningkatan dari waktu ke waktu. Sistem dapat mencatat capaian latihan, jumlah pengulangan, atau keberhasilan menyelesaikan skenario tertentu sebagai indikator progres. Evaluasi ini membantu pendidik atau pendamping dalam memantau perkembangan anak tanpa membebani anak dengan penilaian yang kompleks. Oleh karena itu, fitur evaluasi progres menjadi salah satu kekuatan utama Solusi 2.

Secara keseluruhan, Sub Sistem 2 Solusi 2 menunjukkan karakter solusi yang terstruktur, stabil, dan berorientasi pada pembiasaan jangka menengah, dengan kekuatan utama pada multisensory, feedback, dan evaluasi progres. Sementara itu, aspek real-time sensing dan pemrosesan data sengaja diminimalkan untuk menjaga sistem tetap sederhana dan tidak membebani pengguna. Pendekatan ini menjadikan Solusi 2 cocok untuk anak tunagrahita yang membutuhkan latihan berulang dengan ritme yang konsisten dan evaluasi perkembangan yang jelas, tanpa ketergantungan pada teknologi sensor yang kompleks.

1.2.3.6 Analisis Fitur Dasar Subsistem 2 Solusi 3: *Device* berbasis EEG Monitoring untuk *Treatment* Relaksasi Sebelum *Public Speaking*

Sub Sistem 2 Solusi 3 dikembangkan sebagai pendekatan pelatihan *public speaking* yang menitikberatkan pada pengamatan performa secara tidak langsung dan evaluasi berbasis hasil, bukan pada koreksi langsung saat latihan berlangsung. Solusi ini memanfaatkan rekaman atau hasil performa berbicara untuk dianalisis setelah sesi latihan selesai, sehingga anak tunagrahita dapat memperoleh umpan balik dalam suasana yang lebih tenang dan tidak menekan. Karakter ini tercermin pada pola hubungan solusi dengan fitur-fitur dasar dalam *House of Quality*.

Pada fitur *multisensory*, Solusi 3 menunjukkan hubungan yang relatif lemah (1). Sistem ini tidak secara aktif menggabungkan berbagai stimulasi sensoris selama pelatihan berlangsung. Anak lebih difokuskan pada satu aktivitas utama, yaitu berbicara sesuai instruksi atau materi yang diberikan, tanpa banyak interaksi multisensoris tambahan. Pendekatan ini sengaja dipilih untuk menghindari overstimulasi yang berpotensi mengganggu konsentrasi anak tunagrahita. Oleh karena itu, multisensory bukan menjadi elemen dominan dalam solusi ini.

Berbeda dengan itu, aspek feedback memiliki hubungan yang kuat (5). Meskipun feedback tidak diberikan secara real-time, solusi ini tetap mengutamakan kualitas umpan balik setelah latihan selesai. *Feedback* disusun secara lebih reflektif, misalnya dengan menunjukkan bagian-bagian tertentu dari performa berbicara yang sudah baik dan yang perlu diperbaiki. Pola ini cocok untuk anak tunagrahita yang cenderung lebih menerima koreksi ketika tidak berada dalam situasi tampil langsung. Karena feedback tetap menjadi instrumen utama pembelajaran, fitur ini mendapatkan nilai hubungan tertinggi.

Untuk data processing, Solusi 3 menunjukkan hubungan yang kuat (5). Dibandingkan Solusi 1 dan 2, solusi ini lebih bergantung pada pemrosesan data untuk menganalisis hasil performa berbicara. Data suara, durasi bicara, atau struktur penyampaian diproses untuk menghasilkan informasi evaluatif yang dapat digunakan sebagai dasar umpan balik. Walaupun analisis yang dilakukan tetap disederhanakan agar sesuai konteks pendidikan khusus, peran data processing dalam solusi ini jelas lebih signifikan, sehingga layak diberi nilai hubungan tinggi.

Pada aspek user-friendly, hubungan yang ditunjukkan berada pada tingkat sedang (3). Dari sisi pengguna, sistem ini relatif mudah digunakan karena anak tidak perlu berinteraksi dengan banyak fitur selama latihan. Namun, proses pasca latihan seperti melihat hasil atau menerima penjelasan evaluasi tetap memerlukan pendampingan. Dengan demikian, solusi ini cukup ramah pengguna, tetapi tidak sepenuhnya intuitif bagi anak tunagrahita jika digunakan tanpa dukungan pendidik atau orang tua.

Fitur real-time sensing menunjukkan hubungan yang lemah (1). Solusi ini secara desain tidak mengandalkan pemantauan kondisi pengguna secara langsung selama berbicara. Tidak ada kebutuhan untuk memberikan sinyal korektif instan saat anak sedang tampil, karena pendekatan yang dipilih lebih bersifat evaluatif daripada korektif langsung. Oleh sebab itu, real-time sensing bukan kebutuhan utama dalam solusi ini dan mendapatkan nilai hubungan terendah.

Sebaliknya, *progress evaluation* kembali menunjukkan hubungan yang kuat (5). Karena solusi ini menekankan analisis hasil dan perbandingan performa antar sesi, evaluasi perkembangan menjadi elemen sentral. Sistem memungkinkan pemantauan kemajuan anak dari waktu ke waktu, baik dalam hal kelancaran berbicara, durasi bicara, maupun konsistensi penyampaian. Evaluasi yang bersifat longitudinal ini sangat penting untuk menilai efektivitas latihan *public speaking* pada anak tunagrahita, sehingga fitur ini memperoleh nilai hubungan tertinggi.

Secara keseluruhan, Sub Sistem 2 Solusi 3 merepresentasikan pendekatan evaluatif dan reflektif dalam pelatihan public speaking. Kekuatan utamanya terletak pada *feedback* pasca latihan, pemrosesan data, dan evaluasi progres, sementara aspek *multisensory* dan real-time sensing sengaja diminimalkan untuk menjaga fokus dan kenyamanan pengguna. Pendekatan ini menjadikan Solusi 3 sesuai untuk anak tunagrahita yang membutuhkan lingkungan latihan yang lebih tenang, tidak reaktif, serta menekankan pemahaman hasil dan perkembangan jangka panjang dibandingkan koreksi instan.

1.2.3.7 Analisis Fitur Dasar Subsistem 3 Solusi 1: *Device* Pena Sensor IMU untuk Latihan Menulis Interaktif

Subsistem 3 Solusi 1 dirancang untuk mendukung kemampuan menulis anak tunagrahita melalui pendekatan latihan motorik halus yang interaktif. Perangkat pena berbasis sensor gerak memungkinkan anak menulis secara langsung dengan gerakan tangan alami, sekaligus menerima umpan balik instan ketika terjadi kesalahan arah atau bentuk tulisan. Karakter solusi ini tercermin jelas dalam hubungan antara solusi dan fitur dasar yang dianalisis melalui *House of Quality*.

Pada fitur multisensory, solusi ini menunjukkan hubungan yang lemah (1). Meskipun latihan menulis melibatkan sentuhan dan penglihatan secara alami, sistem ini tidak secara eksplisit dirancang untuk memberikan stimulasi multisensori yang kaya atau berlapis. Fokus utama berada pada koordinasi tangan dan kontrol gerakan pena, bukan pada integrasi rangsangan visual, audio, dan taktil secara bersamaan. Oleh karena itu, multisensory hadir secara implisit sebagai bagian dari aktivitas menulis, namun bukan sebagai fitur yang sengaja diperkuat dalam desain sistem.

Berbeda dengan itu, fitur feedback memiliki hubungan yang sangat kuat (5). Pena dengan sensor gerak dirancang untuk memberikan umpan balik langsung, misalnya melalui getaran, ketika jalur tulisan menyimpang dari panduan. Feedback semacam ini sangat krusial bagi anak tunagrahita karena memungkinkan koreksi gerakan secara instan tanpa harus menunggu evaluasi dari pendamping. Umpan balik yang bersifat langsung dan sederhana membantu anak memahami kesalahan motorik halus secara intuitif, sehingga mempercepat proses pembelajaran menulis. Oleh sebab itu, *feedback* menjadi salah satu kekuatan utama solusi ini.

Pada aspek data processing, hubungan yang ditunjukkan berada pada tingkat sedang (3). Sistem memerlukan pemrosesan data untuk menerjemahkan gerakan pena menjadi jalur digital dan membandingkannya dengan pola tulisan yang diharapkan. Namun, pemrosesan ini bersifat dasar dan fungsional, tidak melibatkan analisis kompleks atau interpretasi lanjutan. Data diproses terutama untuk mendukung feedback real-time dan visualisasi jalur tulisan, sehingga perannya cukup penting tetapi tidak dominan.

Fitur user-friendly menunjukkan hubungan yang lemah (1). Meskipun secara konsep menulis dengan pena merupakan aktivitas yang familiar, penggunaan perangkat pena dengan sensor tetap memerlukan adaptasi, baik dari sisi anak maupun pendamping. Anak tunagrahita mungkin membutuhkan waktu untuk memahami makna getaran sebagai sinyal kesalahan, sementara pendamping perlu membantu dalam pengaturan awal dan interpretasi hasil latihan. Oleh karena itu, solusi ini belum sepenuhnya intuitif tanpa pendampingan, sehingga tingkat *user-*

friendly dinilai rendah dibandingkan solusi lain yang lebih berbasis antarmuka visual sederhana.

Pada fitur real-time sensing, solusi ini menunjukkan hubungan yang sangat kuat (5). Sensor gerak pada pena bekerja secara langsung menangkap pergerakan tangan saat menulis dan mengubahnya menjadi respon sistem saat itu juga. Kemampuan mendeteksi kesalahan secara real-time merupakan inti dari solusi ini, karena latihan motorik halus sangat bergantung pada koreksi langsung terhadap arah, tekanan, dan pola gerakan. Tanpa sensing *real-time*, efektivitas pena sebagai alat bantu latihan menulis akan berkurang secara signifikan.

Terakhir, pada fitur progress evaluation, hubungan yang ditunjukkan berada pada tingkat sedang (3). Sistem mampu memberikan gambaran kemajuan latihan, misalnya melalui jumlah garis yang sesuai dengan panduan atau tingkat ketepatan mengikuti pola. Namun, evaluasi progres yang dihasilkan masih bersifat sederhana dan lebih menekankan pada aspek motorik dibandingkan perkembangan kemampuan menulis secara menyeluruh. Evaluasi ini cukup membantu sebagai indikator latihan, tetapi belum menjadi instrumen utama dalam pemantauan jangka panjang.

Secara keseluruhan, Subsistem 3 Solusi 1 memiliki kekuatan utama pada feedback langsung dan real-time sensing, yang sangat sesuai untuk tujuan melatih motorik halus anak tunagrahita dalam kegiatan menulis. Sementara itu, aspek multisensory dan user-friendly tidak menjadi fokus utama, dan evaluasi progres dirancang secara sederhana agar tidak membebani pengguna. Karakter solusi ini menempatkannya sebagai perangkat latihan yang efektif untuk koreksi gerakan menulis secara langsung, terutama pada tahap awal pengembangan kemampuan menulis anak tunagrahita.

1.2.3.8 Analisis Fitur Dasar Subsistem 3 Solusi 2: Papan Menulis Simbol untuk Penyusunan Kalimat

Subsistem 3 Solusi 2 dirancang untuk membantu anak tunagrahita dalam mengembangkan kemampuan menulis pada level kognitif-linguistik, khususnya

dalam menyusun kata dan kalimat, tanpa dibebani oleh keterampilan motorik halus menulis tangan. Melalui papan menulis berbasis keyboard simbol dengan tombol besar bergambar, anak dapat mengekspresikan ide secara tertulis melalui proses pemilihan simbol yang merepresentasikan huruf, kata, atau frasa. Karakteristik solusi ini tercermin dalam hubungan spesifiknya dengan fitur-fitur dasar pada House of Quality.

Pada fitur multisensory, solusi ini menunjukkan hubungan yang lemah (1). Interaksi utama dalam sistem ini bersifat visual dan kinestetik sederhana, yaitu melihat simbol dan menekan tombol. Sistem tidak secara eksplisit dirancang untuk memberikan rangsangan multisensori yang kaya, seperti kombinasi visual, audio, dan sentuhan secara simultan. Fokus utama diarahkan pada kejelasan simbol dan kemudahan pemilihan, bukan pada stimulasi sensorik berlapis. Oleh karena itu, multisensory bukan merupakan elemen dominan dalam solusi ini.

Pada aspek feedback, hubungan yang ditunjukkan berada pada tingkat sedang (3). Sistem mampu memberikan umpan balik dasar, misalnya melalui tampilan teks hasil penyusunan kalimat di layar atau pembacaan kata/kalimat melalui speaker. Feedback ini berfungsi sebagai konfirmasi bahwa pilihan simbol telah diterjemahkan menjadi bentuk tulisan yang bermakna. Namun, feedback tidak bersifat korektif mendalam atau adaptif terhadap kesalahan struktur bahasa secara rinci. Oleh sebab itu, meskipun feedback hadir dan penting, kekuatannya berada pada tingkat menengah.

Fitur data processing menunjukkan hubungan yang sangat kuat (5). Inti dari solusi ini terletak pada kemampuan sistem dalam memproses input tombol menjadi rangkaian teks yang utuh. Setiap penekanan tombol harus diterjemahkan, disusun, dan dikelola secara berurutan oleh sistem agar membentuk kata dan kalimat yang benar. Proses ini menempatkan pemrosesan data sebagai komponen sentral, karena tanpa pengolahan input yang akurat dan konsisten, fungsi “menulis” melalui simbol tidak dapat terwujud. Oleh karena itu, data processing menjadi kekuatan utama solusi ini.

Pada fitur *user-friendly*, solusi ini juga menunjukkan hubungan yang kuat (5). Papan menulis simbol dirancang dengan tombol besar bergambar yang mudah dikenali, sehingga sangat sesuai dengan karakteristik anak tunagrahita. Anak tidak dituntut untuk menguasai keterampilan motorik halus atau memahami antarmuka kompleks. Konsep “memilih simbol = menulis” menjadikan sistem ini intuitif, mengurangi kecemasan, dan meningkatkan rasa keberhasilan dalam menulis. Oleh karena itu, kemudahan penggunaan menjadi salah satu keunggulan paling menonjol dari solusi ini.

Untuk fitur *real-time sensing*, hubungan yang ditunjukkan berada pada tingkat lemah (1). Solusi ini tidak memerlukan pemantauan kondisi pengguna atau respon fisik secara langsung. Sistem bekerja berdasarkan input diskret berupa penekanan tombol, bukan pada sensing kontinu seperti gerakan tangan atau tekanan. Dengan demikian, *real-time sensing* bukan bagian esensial dari mekanisme kerja solusi ini, sehingga wajar ditempatkan pada tingkat hubungan terendah.

Pada aspek *progress evaluation*, solusi ini menunjukkan hubungan yang kuat (5). Sistem secara alami memungkinkan pencatatan dan evaluasi perkembangan kemampuan menyusun kata dan kalimat, misalnya melalui panjang kalimat, variasi kosakata, atau frekuensi penggunaan simbol tertentu. Evaluasi ini sangat relevan karena tujuan utama solusi adalah meningkatkan kemampuan berbahasa tertulis, bukan sekadar latihan mekanis. Dengan demikian, *progress evaluation* menjadi komponen penting dalam memantau perkembangan kognitif dan linguistik anak tunagrahita.

Secara keseluruhan, Subsistem 3 Solusi 2 memiliki karakter sebagai solusi kognitif–linguistik dan struktural, dengan kekuatan utama pada data processing, *user-friendly*, dan evaluasi progres. Solusi ini secara efektif menjembatani keterbatasan motorik halus anak tunagrahita dengan kebutuhan untuk tetap berlatih menulis dan menyusun kalimat bermakna. Sementara itu, aspek multisensory dan *real-time sensing* diminimalkan untuk menjaga sistem tetap sederhana, fokus, dan mudah digunakan sesuai dengan kebutuhan pengguna.

1.2.3.9 Analisis Fitur Dasar Subsistem 3 Solusi 3: Panduan Menulis dengan OCR dan Kamera untuk Evaluasi Tulisan

Subsistem 3 Solusi 3 dikembangkan untuk mendukung kemampuan menulis anak tunagrahita melalui pendekatan panduan visual dan evaluasi berbasis hasil tulisan nyata di kertas. Dalam solusi ini, anak menulis secara manual mengikuti contoh huruf, kata, atau kalimat yang ditampilkan di layar, kemudian hasil tulisan dievaluasi menggunakan kamera dan sistem pengenalan karakter. Pendekatan ini menempatkan proses menulis tetap dalam konteks alami (kertas dan pensil), namun dilengkapi dengan evaluasi digital yang objektif. Karakteristik tersebut tercermin pada hubungan solusi ini dengan fitur dasar dalam House of Quality.

Pada fitur multisensory, solusi ini menunjukkan hubungan yang lemah (1). Meskipun melibatkan aspek visual (panduan di layar) dan kinestetik (aktivitas menulis tangan), sistem tidak dirancang untuk memberikan stimulasi multisensori secara eksplisit atau simultan. Tidak terdapat integrasi rangsangan audio atau taktil yang berfungsi sebagai elemen pembelajaran utama. Fokus utama diarahkan pada kejelasan panduan visual dan hasil tulisan, sehingga multisensory bukan menjadi kekuatan inti dalam solusi ini.

Pada aspek feedback, solusi ini menunjukkan hubungan yang kuat (5). Setelah tulisan anak dipindai dan dianalisis, sistem mampu memberikan umpan balik yang jelas terkait keterbacaan dan kesesuaian tulisan dengan target. Feedback dapat disampaikan dalam bentuk teks maupun suara sederhana, seperti konfirmasi keberhasilan atau ajakan untuk mencoba kembali. Umpan balik ini bersifat objektif karena didasarkan pada hasil tulisan aktual, bukan persepsi subjektif pendamping. Oleh karena itu, feedback menjadi komponen penting dalam mendukung pembelajaran menulis pada solusi ini.

Fitur data processing memiliki hubungan yang sangat kuat (5). Inti dari solusi ini terletak pada kemampuan sistem dalam memproses citra tulisan tangan menjadi informasi yang bermakna. Proses pengolahan gambar, ekstraksi karakter, dan perbandingan hasil tulisan dengan target menempatkan pemrosesan data sebagai elemen sentral. Tanpa kemampuan ini, sistem tidak dapat melakukan evaluasi

tulisan secara otomatis. Oleh sebab itu, data processing menjadi salah satu kekuatan utama Solusi 3.

Pada fitur user-friendly, hubungan yang ditunjukkan berada pada tingkat sedang (3). Dari sudut pandang anak, aktivitas menulis di kertas merupakan hal yang familiar dan relatif nyaman. Namun, proses tambahan seperti penempatan kertas yang tepat, pemindaian tulisan, dan menunggu hasil evaluasi memerlukan pendampingan. Sistem ini belum sepenuhnya intuitif untuk digunakan secara mandiri oleh anak tunagrahita, tetapi tetap dapat dioperasikan dengan baik dalam lingkungan pembelajaran yang didampingi. Oleh karena itu, tingkat user-friendly dinilai berada pada kategori menengah.

Untuk fitur real-time sensing, solusi ini menunjukkan hubungan yang lemah (1). Evaluasi tulisan dilakukan setelah proses menulis selesai, bukan selama aktivitas menulis berlangsung. Sistem tidak memberikan koreksi langsung terhadap gerakan tangan atau bentuk huruf saat ditulis. Pendekatan ini sengaja dipilih untuk menghindari gangguan konsentrasi anak selama menulis dan menempatkan evaluasi sebagai proses reflektif pascaaktivitas. Karena real-time sensing bukan bagian dari mekanisme utama solusi, fitur ini memperoleh nilai hubungan terendah.

Pada aspek progress evaluation, solusi ini menunjukkan hubungan yang sangat kuat (5). Sistem secara alami mendukung evaluasi perkembangan menulis dari waktu ke waktu melalui perbandingan hasil tulisan antar sesi. Kemajuan anak dapat diamati secara objektif berdasarkan peningkatan keterbacaan, ketepatan bentuk huruf, atau kesesuaian dengan target tulisan. Evaluasi ini sangat penting dalam konteks pendidikan anak tunagrahita karena memberikan dasar yang jelas bagi pendidik untuk menilai efektivitas latihan dan menyesuaikan strategi pembelajaran selanjutnya.

Secara keseluruhan, Subsistem 3 Solusi 3 memiliki karakter sebagai solusi evaluatif dan berbasis hasil nyata, dengan kekuatan utama pada feedback berbasis tulisan aktual, pemrosesan data, dan evaluasi progres jangka panjang. Sementara itu, aspek multisensory dan real-time sensing sengaja diminimalkan untuk menjaga fokus anak selama proses menulis. Pendekatan ini menjadikan Solusi 3 sangat relevan

untuk tahap evaluasi dan pemantauan perkembangan kemampuan menulis anak tunagrahita secara objektif dan berkelanjutan.

1.2.4 Solusi yang dipilih

Solusi yang dipilih merupakan Solusi terbaik berdasarkan penilaian dari HOQ dan dianalisis melalui keterkaitan antara fitur dasar dan fitur tambahan kemudian dilakukan Analisa terhadap Sembilan Solusi di tiga subsistem, satu Solusi terbaik dipilih untuk menyelesaikan masing-masing subsistem.

1.2.4.1 Solusi Subsistem 1

Solusi subsistem 1 yang dipilih dalam pengembangan sistem pembelajaran membaca bagi anak tunagrahita adalah Solusi 2: Belajar Membaca dengan Metode Global. Pendekatan ini dipilih karena menawarkan keterpaduan antara metode belajar yang sesuai dengan kemampuan kognitif anak tunagrahita dan dukungan teknologi yang mampu memberikan umpan balik secara otomatis. Metode global menekankan pengenalan pola visual berupa suku kata dan kata, sehingga anak tidak perlu memahami hubungan abstrak antara huruf dan bunyi secara mendetail. Pola belajar ini lebih intuitif dan lebih mudah diikuti, sebab anak langsung berinteraksi dengan unit bahasa yang memiliki makna lebih jelas. Proses belajar dibangun secara bertahap, dimulai dari pengenalan suku kata seperti ba, bi, bu, be, bo, lalu berlanjut pada penggabungan suku kata menjadi rangkaian seperti baba, babi, babo, hingga pada akhirnya membaca kata utuh seperti bapak, bola, atau sekolah. Tahapan ini memudahkan anak memahami keterkaitan antahuruf tanpa harus berfokus pada pengolahan fonem yang rumit. Dari sisi tampilan dan pengalaman pengguna, solusi ini juga mengutamakan antarmuka yang ramah anak tunagrahita. Modul pembelajaran ditampilkan dalam bentuk visual yang sederhana, jelas, dan tidak membebani kognisi. Elemen grafis seperti warna kontras, ukuran huruf besar, ilustrasi sederhana, serta tata letak yang tidak padat membantu anak tetap fokus pada materi inti tanpa terdistraksi oleh komponen visual yang tidak diperlukan.

Setiap tahap pembelajaran ditampilkan secara konsisten, dengan satu tugas per layar, sehingga anak dapat mengikuti instruksi dengan lebih mudah dan tidak merasa kewalahan. Pendekatan desain ini memastikan bahwa sistem dapat digunakan secara mandiri maupun dengan bantuan minimal dari pengajar. Dengan keseluruhan pertimbangan tersebut, Solusi 2 dipandang sebagai pendekatan yang paling sesuai untuk diterapkan.

1.2.4.2 Solusi Subsistem 2

Solusi yang dipilih untuk subsistem 2 yang memenuhi kebutuhan latihan bicara dan mengatasi kecemasan anak tunagrahita adalah solusi dua, yaitu pelatihan berbasis *Virtual Reality* (VR) dengan multi-sensor dan umpan balik haptic dan paduan suara, dipilih sebagai solusi utama untuk mengatasi masalah kecemasan berbicara di depan umum (PSA) karena menawarkan pendekatan yang paling komprehensif dan holistik. Dalam solusi ini, teknologi VR digunakan untuk mensimulasikan pengalaman berbicara di depan audiens virtual yang sangat realistis, yang dapat disesuaikan dengan tingkat kecemasan pengguna. Pengguna dapat berlatih berbicara dalam berbagai skenario berbicara yang menantang, yang membuat pengalaman ini sangat relevan dan efektif dalam membantu mereka mengatasi kecemasan yang timbul. Pengalaman berbicara di depan audiens virtual ini memiliki keunggulan dalam menciptakan situasi yang mendekati kenyataan, yang tidak hanya mengurangi kecemasan tetapi juga meningkatkan kepercayaan diri secara bertahap seiring waktu.

Keunggulan utama dari solusi ini adalah kemampuannya untuk mendeteksi gejala kecemasan secara real-time, melalui pemantauan detak jantung (*heart rate*) dan *Galvanic Skin Response* (GSR) serta dipadukan dengan monitoring head-down posture. Penggunaan sensor fisiologis ini sangat penting, karena kecemasan seringkali memanifestasikan dirinya dalam gejala fisik yang jelas seperti peningkatan detak jantung dan keringat berlebihan. Dengan memanfaatkan sensor-sensor ini, sistem dapat memberikan feedback langsung kepada pengguna saat tingkat kecemasan mereka meningkat, yang membantu mereka untuk menyesuaikan perilaku mereka saat berbicara. ketika detak jantung pengguna mulai meningkat, VR dapat memberikan feedback haptic dan audio untuk membantu

pengguna selama proses latihan. Interaksi seperti ini memungkinkan pengguna untuk belajar mengelola ketegangan secara efektif, sehingga mereka dapat berbicara lebih percaya diri.

Sistem ini juga memiliki keunggulan dalam memberikan pelatihan berbasis data yang objektif. Dengan adanya evaluasi yang terstruktur, pengguna dapat mengetahui kemajuan mereka dari waktu ke waktu dan melihat secara langsung area-area mana yang masih perlu diperbaiki. Fitur *Standardized Self Training* dalam sistem ini membantu pengguna dengan menetapkan standar yang jelas dan dapat diukur untuk keterampilan berbicara mereka, memberikan kerangka kerja yang jelas tentang apa yang harus dicapai. Hal ini sangat berguna karena memberikan cara bagi pengguna untuk melatih diri mereka sendiri dalam suasana yang lebih terkontrol dan objektif, daripada hanya berfokus pada teknik berbicara tanpa memahami bagaimana kecemasan mereka mempengaruhi performa berbicara mereka.

Selain itu, solusi ini juga menyediakan fitur *Audit Trail and Traceability*, yang memungkinkan pengguna dan pengembang sistem untuk melacak semua kemajuan dan evaluasi yang telah dilakukan selama sesi pelatihan. Dengan adanya sistem pelacakan ini, pengguna dapat melihat hasil dari setiap sesi pelatihan dan mengidentifikasi pola atau area yang memerlukan perhatian lebih lanjut. Fitur ini juga meningkatkan transparansi dalam penggunaan data dan hasil, sehingga pengguna merasa lebih yakin bahwa perkembangan mereka tercatat dengan baik dan dapat diakses kapan saja.

Secara keseluruhan, solusi ini dipilih karena kemampuannya untuk mengatasi kecemasan berbicara di depan umum secara komprehensif, tidak hanya melalui deteksi real-time kecemasan fisiologis, tetapi juga dengan memberikan umpan balik yang mendalam mengenai performa pengguna dalam situasi yang sangat realistis. Dengan menggunakan teknologi VR yang interaktif, solusi ini mampu memberikan pengalaman pelatihan yang sangat personal dan sesuai dengan kondisi psikologis masing-masing pengguna. Keunggulan sistem ini dalam memberikan pelatihan berbasis data yang objektif, evaluasi berkelanjutan, serta umpan balik yang

mendalam menjadikannya pilihan terbaik dalam membantu individu mengatasi PSA dan meningkatkan keterampilan berbicara mereka secara keseluruhan.

1.2.4.3 Solusi Subsistem 3

Berdasarkan hasil analisis *House of Quality* (HOQ) pada Subsistem 3 yang berfokus pada pengembangan kemampuan menulis anak tunagrahita, Solusi 3: Panduan Menulis dengan OCR dan Kamera untuk Evaluasi Tulisan ditetapkan sebagai solusi terpilih. Pemilihan ini didasarkan pada kesesuaian paling tinggi antara karakteristik solusi dengan kebutuhan fungsional utama subsistem, khususnya dalam aspek evaluasi tulisan, objektivitas penilaian, dan pemantauan perkembangan kemampuan menulis secara berkelanjutan.

Subsistem 3 secara konseptual tidak hanya ditujukan untuk melatih aktivitas menulis, tetapi juga untuk menilai keterbacaan dan kualitas tulisan anak secara sistematis. Dalam konteks ini, Solusi 3 memiliki keunggulan signifikan karena mampu menjembatani aktivitas menulis manual di media kertas yang merupakan konteks alami dan familiar bagi anak dengan sistem evaluasi digital yang objektif. Pendekatan ini memungkinkan proses belajar tetap berlangsung secara konvensional, namun hasilnya dapat dianalisis secara terukur.

Dari sisi kesesuaian terhadap fitur dasar, Solusi 3 menunjukkan hubungan yang sangat kuat pada fitur *feedback*, *data processing*, dan *progress evaluation*, yang merupakan kebutuhan utama Subsistem 3. Umpan balik yang dihasilkan tidak lagi bergantung sepenuhnya pada interpretasi subjektif pendamping, melainkan didasarkan pada hasil pengolahan tulisan aktual anak. Hal ini meningkatkan konsistensi penilaian dan memberikan informasi yang lebih jelas mengenai tingkat keberhasilan latihan menulis.

Keunggulan lain dari Solusi 3 terletak pada kemampuannya dalam evaluasi progres jangka panjang. Sistem memungkinkan perbandingan hasil tulisan antar sesi latihan, sehingga perkembangan anak dapat dipantau secara longitudinal. Aspek ini sangat penting dalam pendidikan anak tunagrahita, karena peningkatan kemampuan

menulis sering terjadi secara bertahap dan memerlukan dokumentasi perkembangan yang akurat. Dibandingkan Solusi 1 dan Solusi 2 yang lebih berfokus pada latihan langsung atau penyusunan simbol, Solusi 3 memberikan fondasi evaluatif yang lebih kuat untuk pengambilan keputusan pedagogis.

Meskipun Solusi 3 memiliki keterbatasan pada aspek *real-time sensing* dan *multisensory*, keterbatasan ini tidak menjadi penghambat utama dalam konteks Subsistem 3. Evaluasi menulis secara pasca aktivitas justru lebih sesuai untuk anak tunagrahita, karena mengurangi gangguan selama proses menulis dan menekan potensi kecemasan akibat koreksi langsung. Dengan demikian, pendekatan reflektif yang digunakan Solusi 3 dinilai lebih aman dan efektif untuk menjaga fokus dan kenyamanan anak.

Selain itu, dari perspektif implementasi sistem, Solusi 3 juga lebih fleksibel untuk diintegrasikan dengan subsistem lain, seperti sistem pelaporan perkembangan atau basis data pembelajaran. Hasil evaluasi tulisan dapat digunakan sebagai masukan bagi pendamping, pendidik, maupun sistem lain dalam menentukan strategi latihan lanjutan. Hal ini memperkuat peran Subsistem 3 tidak hanya sebagai alat latihan, tetapi juga sebagai instrumen evaluasi dan pengambilan keputusan pembelajaran.

Dengan mempertimbangkan keseluruhan hasil HOQ dan analisis fitur dasar, Solusi 3 dinilai paling mampu memenuhi tujuan Subsistem 3, yaitu menyediakan mekanisme evaluasi kemampuan menulis yang objektif, terukur, dan berkelanjutan, tanpa menghilangkan konteks alami aktivitas menulis anak tunagrahita. Oleh karena itu, Solusi 3 dipilih sebagai solusi utama untuk diimplementasikan pada Subsistem 3 dalam sistem yang diusulkan.