



Kepemimpinan SDM dalam Era Quantum Workforce: Menyiapkan Talenta untuk Industri Komputasi Masa Depan (Fokus: Strategi Pengembangan Kompetensi yang Melampaui Literasi Digital Standar)

Dyah Ayu Pramudita ^{1*}, Revi Agustina ², Saifatul Dwi Fitrianti ³,
Mochammad Isa Ansori ⁴

¹⁻⁴ Prodi Manajemen, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Trunodjoyo Madura, Indonesia

Email: dyahayupramudita963@gmail.com ¹, revirevian185@gmail.com ², saifatuldwifitrianti@gmail.com ³,
isa.anshori@trunodjoyo.ac.id ⁴

*Penulis Korespondensi: dyahayupramudita963@gmail.com

Abstract. *The emergence of quantum computing is driving a fundamental shift in workforce competency requirements, challenging the adequacy of conventional digital literacy frameworks. This study aims to identify key competencies in the quantum workforce era, evaluate the limitations of traditional digital literacy, and analyze the strategic role of human resource leadership in future-oriented talent development. This research employs a systematic literature review (SLR) of reputable academic publications from the past five years. The findings reveal that required competencies are inherently multidimensional, encompassing advanced technical expertise, higher-order cognitive skills, interdisciplinary capabilities, and adaptive capacity grounded in lifelong learning. Conventional digital literacy is insufficient to address the probabilistic and non-linear nature of quantum computing systems. Human resource leadership plays a strategic role in driving competency transformation through innovation, orchestration of continuous learning, and alignment of talent strategies with technological dynamics. This study contributes to the advancement of competency development frameworks beyond traditional approaches and offers practical implications for organizations in building a resilient and future-ready workforce*

Keywords: *Future Competencies, Human Resource Leadership, Quantum Computing, Quantum Workforce, Talent Development.*

Abstrak. Transformasi teknologi komputasi kuantum mendorong perubahan fundamental dalam kebutuhan kompetensi sumber daya manusia dan menantang relevansi kerangka literasi digital konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kompetensi kunci dalam era *quantum workforce*, mengevaluasi keterbatasan pendekatan literasi digital tradisional, serta menganalisis peran strategis kepemimpinan SDM dalam pengembangan talenta berbasis teknologi masa depan. Penelitian ini menggunakan pendekatan *systematic literature review* (SLR) terhadap publikasi ilmiah bereputasi dalam lima tahun terakhir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kompetensi yang dibutuhkan bersifat multidimensional, mencakup keahlian teknis tingkat lanjut, keterampilan kognitif kompleks, kemampuan lintas disiplin, serta kapasitas adaptif berbasis pembelajaran sepanjang hayat. Literasi digital konvensional terbukti tidak memadai dalam menghadapi karakteristik komputasi kuantum yang probabilistik dan non-linear. Kepemimpinan SDM berperan strategis dalam mengarahkan transformasi kompetensi melalui inovasi, orkestrasi pembelajaran berkelanjutan, serta penyelarasan strategi talenta dengan dinamika teknologi. Penelitian ini berkontribusi pada penguatan kerangka konseptual pengembangan kompetensi yang melampaui pendekatan tradisional serta memberikan implikasi praktis bagi organisasi dalam membangun tenaga kerja yang tangguh dan adaptif

Kata kunci: Kepemimpinan SDM, Komputasi Kuantum, Kompetensi Masa Depan, Pengembangan Talenta, Quantum Workforce.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komputasi kuantum dalam dekade terakhir telah mengubah lanskap industri global secara fundamental, terutama melalui kemampuannya dalam menyelesaikan permasalahan kompleks yang tidak dapat ditangani oleh komputasi klasik,

seperti optimasi skala besar, simulasi molekuler, dan kriptografi tingkat lanjut. Transformasi ini mendorong munculnya konsep *quantum workforce*, yaitu tenaga kerja yang tidak hanya memiliki kemampuan teknis tinggi, tetapi juga mampu beradaptasi dalam lingkungan kerja yang kompleks, probabilistik, dan multidisipliner (Sofiyanto et al., 2024). Secara global, kebutuhan terhadap talenta berbasis teknologi kuantum meningkat secara signifikan, ditandai dengan pertumbuhan permintaan tenaga kerja yang memiliki kompetensi kuantum serta integrasi berbagai disiplin ilmu seperti fisika, matematika, dan ilmu komputer. Di sisi lain, negara-negara maju telah mulai mengembangkan ekosistem pendidikan dan pelatihan untuk mempersiapkan SDM yang mampu mendukung komersialisasi teknologi kuantum, sementara negara berkembang masih menghadapi tantangan dalam kesiapan sumber daya manusia yang relevan dengan transformasi tersebut (Wahyoedi et al., 2024).

Meskipun perkembangan teknologi ini menawarkan peluang besar, terdapat kesenjangan signifikan antara kebutuhan industri dengan kesiapan kompetensi tenaga kerja saat ini, khususnya dalam konteks pengembangan talenta yang masih berfokus pada literasi digital konvensional. Pendekatan literasi digital yang selama ini menjadi dasar pengembangan SDM dinilai tidak lagi memadai karena tidak mencakup kemampuan berpikir probabilistik, pemodelan kompleks, serta integrasi lintas disiplin yang menjadi ciri utama komputasi kuantum (Putri et al., 2025). Selain itu, adanya fenomena *quantum skills gap* menunjukkan bahwa organisasi mengalami kesulitan dalam menemukan talenta yang memiliki kombinasi kompetensi teknis dan non-teknis yang sesuai dengan kebutuhan industri masa depan (Jamilati et al., 2023). Keterbatasan ini diperparah oleh kurangnya standardisasi kompetensi dan kerangka pengembangan talenta yang mampu menjembatani kebutuhan akademik dan praktik industri secara simultan.

Dalam konteks ini, penelitian mengenai kepemimpinan SDM menjadi sangat relevan karena pemimpin memiliki peran strategis dalam mengarahkan transformasi kompetensi organisasi. Teori Human Capital menekankan bahwa investasi dalam pengembangan kompetensi SDM merupakan faktor kunci dalam meningkatkan produktivitas dan daya saing organisasi, terutama dalam menghadapi perubahan teknologi yang disruptif (Becker, 1993). Sementara itu, kerangka *Future Skills* dari World Economic Forum menyoroti pentingnya keterampilan seperti berpikir kritis, pemecahan masalah kompleks, kreativitas, dan pembelajaran sepanjang hayat sebagai fondasi utama dalam menghadapi era teknologi eksponensial (Mahda et al., 2025). Di sisi lain, teori Transformational Leadership menjelaskan bahwa pemimpin SDM yang visioner mampu mendorong inovasi, perubahan budaya organisasi, serta pengembangan individu secara berkelanjutan (Bass & Avolio, 1994).

Integrasi ketiga pendekatan ini menjadi penting dalam memahami bagaimana konsep *quantum workforce* dapat diwujudkan melalui strategi pengembangan talenta yang adaptif dan berorientasi masa depan, terutama dalam lingkungan kerja yang ditandai oleh ketidakpastian dan kompleksitas tinggi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis karakteristik kompetensi yang dibutuhkan dalam era *quantum workforce*, menganalisis keterbatasan pendekatan literasi digital konvensional dalam menghadapi industri komputasi masa depan, serta mengeksplorasi peran strategis kepemimpinan SDM dalam merancang pengembangan talenta yang relevan. Secara khusus, rumusan masalah dalam penelitian ini meliputi: (1) bagaimana karakteristik kompetensi yang diperlukan dalam era *quantum workforce*; (2) mengapa pendekatan literasi digital konvensional tidak lagi memadai; (3) bagaimana peran kepemimpinan SDM dalam merancang strategi pengembangan talenta berbasis teknologi mutakhir; dan (4) model pengembangan kompetensi seperti apa yang efektif untuk mempersiapkan SDM menghadapi transformasi teknologi tingkat lanjut. Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur sistematis (SLR) untuk mengintegrasikan berbagai temuan empiris dan konseptual dari jurnal bereputasi guna memperoleh pemahaman yang komprehensif dan terstruktur.

Kontribusi ilmiah dari penelitian ini terletak pada upaya integratif dalam menghubungkan konsep *quantum workforce* dengan perspektif kepemimpinan SDM dan pengembangan kompetensi masa depan, yang masih relatif terbatas dalam literatur akademik saat ini. Penelitian ini tidak hanya mengidentifikasi kompetensi kunci yang diperlukan, tetapi juga menawarkan kerangka konseptual pengembangan talenta yang melampaui literasi digital standar dengan mengedepankan pendekatan multidisipliner, pembelajaran berkelanjutan, serta integrasi antara kemampuan teknis dan kognitif tingkat tinggi. Dengan demikian, artikel ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan baik secara teoretis dalam pengembangan ilmu manajemen SDM maupun secara praktis dalam merumuskan strategi pengembangan talenta yang relevan dengan era komputasi kuantum yang terus berkembang.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Perkembangan konsep *quantum workforce* berakar pada kemajuan teknologi komputasi kuantum yang mengubah paradigma pemrosesan informasi dari deterministik menjadi probabilistik. Konsep ini menuntut redefinisi kompetensi tenaga kerja yang tidak lagi terbatas pada literasi digital konvensional, melainkan mencakup kemampuan memahami sistem kompleks dan non-linear. Dalam kerangka teoretis, Teori Human Capital menegaskan

bahwa investasi pada kompetensi tingkat lanjut menjadi faktor utama peningkatan produktivitas dan daya saing organisasi (Becker, 1993). Namun, dalam konteks teknologi mutakhir, konsep ini berkembang menjadi lebih dinamis dengan menekankan pembelajaran adaptif dan berkelanjutan (Tomlinson, 2020). Selain itu, kerangka *Future Skills* menyoroti pentingnya keterampilan abad ke-21 seperti berpikir kritis, kreativitas, dan pemecahan masalah kompleks sebagai fondasi utama dalam menghadapi transformasi teknologi eksponensial (World Economic Forum, 2023).

Kajian empiris terdahulu menunjukkan bahwa pengembangan kompetensi masa depan semakin mengarah pada integrasi antara keterampilan teknis dan non-teknis. Studi oleh Whiting et al. (2022) mengidentifikasi bahwa kompetensi masa depan tidak hanya mencakup aspek kognitif, tetapi juga kemampuan adaptasi dan pembelajaran berkelanjutan. Sementara itu, penelitian oleh Van Laar et al. (2020) menegaskan bahwa keterampilan digital abad ke-21 mencakup dimensi teknis, informasi, komunikasi, dan pemecahan masalah, namun belum mencakup kompleksitas teknologi tingkat lanjut. Di sisi lain, studi mengenai pendidikan komputasi kuantum menunjukkan bahwa penguasaan konsep kuantum memerlukan pendekatan lintas disiplin yang mengintegrasikan fisika, matematika, dan ilmu komputer (Holmes et al., 2021).

Meskipun demikian, terdapat celah penelitian yang signifikan dalam literatur yang ada. Sebagian besar studi masih berfokus pada transformasi digital secara umum dan belum secara spesifik mengkaji implikasi komputasi kuantum terhadap pengembangan kompetensi SDM. Penelitian tentang *quantum workforce* masih terbatas dan cenderung bersifat konseptual, sehingga belum memberikan kerangka operasional yang jelas dalam pengembangan talenta (Cadeddu et al., 2022). Selain itu, pendekatan literasi digital konvensional masih mendominasi praktik pengembangan SDM, meskipun tidak lagi relevan untuk menghadapi sistem teknologi yang kompleks dan probabilistik (Seskir et al., 2022).

Dalam konteks tersebut, artikel ini memposisikan diri sebagai upaya untuk menjembatani kesenjangan antara kebutuhan kompetensi masa depan dengan pendekatan pengembangan SDM yang masih konvensional. Berbeda dengan studi sebelumnya, penelitian ini mengintegrasikan konsep *quantum workforce*, kepemimpinan SDM, dan pengembangan kompetensi dalam satu kerangka konseptual yang komprehensif. Selain itu, penelitian ini juga menekankan pentingnya peran kepemimpinan transformasional dalam mendorong inovasi dan adaptasi organisasi terhadap perubahan teknologi (AlNuaimi et al., 2021).

Tren penelitian menunjukkan bahwa pendekatan metodologis dalam studi terkait semakin beragam, mulai dari studi empiris kuantitatif hingga kajian literatur sistematis. Studi oleh Khan et al. (2022) menunjukkan bahwa pengembangan talenta berbasis ekosistem menjadi pendekatan yang semakin dominan, dengan melibatkan kolaborasi antara institusi pendidikan, industri, dan pemerintah. Selain itu, pendekatan *systematic literature review* juga semakin banyak digunakan untuk mengidentifikasi pola dan tren dalam pengembangan kompetensi masa depan secara komprehensif (Kitchenham et al., 2020).

Berdasarkan sintesis literatur tersebut, dapat disimpulkan bahwa pengembangan kompetensi dalam era *quantum workforce* memerlukan pendekatan yang integratif dan multidimensional. Hal ini mencakup integrasi antara kompetensi teknis, kognitif, dan adaptif, serta peran kepemimpinan dalam mengarahkan transformasi organisasi. Sintesis ini menjadi dasar konseptual dalam penelitian ini untuk merumuskan strategi pengembangan talenta yang relevan dengan kebutuhan teknologi masa depan, sekaligus menjadi pijakan dalam penyusunan metode penelitian berbasis kajian literatur sistematis.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur sistematis (Systematic Literature Review/SLR) yang bertujuan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis temuan-temuan ilmiah secara komprehensif terkait kepemimpinan SDM dalam era *quantum workforce* serta strategi pengembangan kompetensi yang melampaui literasi digital konvensional. Pendekatan SLR dipilih karena mampu memberikan kerangka metodologis yang transparan, replikatif, dan sistematis dalam mengintegrasikan berbagai temuan penelitian dari sumber akademik bereputasi (Kitchenham et al., 2020). Selain itu, penelitian ini juga mengadopsi pendekatan integrative review, yang memungkinkan penggabungan studi empiris dan konseptual untuk menghasilkan pemahaman yang lebih luas dan mendalam terhadap fenomena yang kompleks dan multidisipliner (Snyder, 2019). Kombinasi kedua pendekatan ini relevan dalam konteks penelitian yang bersifat eksploratif dan futuristik seperti pengembangan kompetensi dalam ekosistem komputasi kuantum.

Sumber data yang digunakan dalam penelitian ini sepenuhnya merupakan data sekunder yang berasal dari literatur ilmiah bereputasi, khususnya jurnal internasional terindeks Scopus (Q1 dan Q2) serta jurnal nasional terindeks SINTA 1 dan SINTA 2 yang bersifat open-access. Literatur yang dikaji mencakup artikel penelitian empiris, artikel konseptual, serta tinjauan pustaka yang relevan dengan topik *quantum workforce*,

kepemimpinan SDM, kompetensi masa depan, dan pengembangan talenta berbasis teknologi mutakhir. Penggunaan sumber literatur bereputasi bertujuan untuk menjamin validitas ilmiah dan kredibilitas temuan yang disintesis dalam penelitian ini (Xiao & Watson, 2019). Data yang dikumpulkan bersifat kualitatif-konseptual, yang kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi pola, tema, serta kerangka konseptual yang berkembang dalam literatur terkini.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui protokol pencarian literatur sistematis dengan menggunakan beberapa basis data akademik utama, seperti Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar sebagai pelengkap. Proses pencarian dilakukan dengan menggunakan kombinasi kata kunci utama seperti “*quantum workforce*”, “*human resource leadership*”, “*future skills*”, “*talent development*”, dan “*quantum computing skills*”. Strategi pencarian dikembangkan dengan menggunakan operator Boolean (AND, OR) untuk memperluas dan mempersempit hasil pencarian secara sistematis. Selanjutnya, proses seleksi literatur mengikuti tahapan Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) yang meliputi identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi artikel (Page et al., 2021). Proses ini memastikan bahwa hanya literatur yang relevan dan berkualitas tinggi yang dimasukkan dalam analisis.

Kriteria inklusi dalam penelitian ini meliputi: (1) artikel yang diterbitkan dalam lima tahun terakhir (2020–2025) untuk memastikan kebaruan informasi; (2) artikel yang dipublikasikan dalam jurnal bereputasi (Scopus Q1/Q2 atau SINTA 1/2); (3) artikel yang bersifat open-access; (4) artikel yang secara langsung membahas kompetensi masa depan, kepemimpinan SDM, atau teknologi komputasi kuantum; serta (5) artikel yang menggunakan pendekatan empiris maupun konseptual yang relevan. Sementara itu, kriteria eksklusi mencakup: (1) artikel yang tidak melalui proses peer-review; (2) publikasi berupa prosiding yang tidak terindeks; (3) artikel dengan fokus yang tidak relevan secara langsung dengan topik penelitian; serta (4) artikel duplikat yang muncul dalam lebih dari satu basis data. Penerapan kriteria ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas dan konsistensi data yang dianalisis dalam penelitian (Booth et al., 2021).

Unit analisis dalam penelitian ini adalah konsep, model, dan temuan empiris yang berkaitan dengan pengembangan kompetensi SDM dalam konteks transformasi teknologi tingkat lanjut, khususnya komputasi kuantum. Fokus analisis diarahkan pada identifikasi karakteristik kompetensi *quantum workforce*, peran kepemimpinan SDM dalam mengelola perubahan, serta model pengembangan talenta yang relevan dengan kebutuhan industri masa depan. Dengan demikian, unit analisis tidak berupa individu atau organisasi tertentu,

melainkan konstruksi konseptual dan temuan penelitian yang telah dipublikasikan dalam literatur ilmiah.

Teknik analisis data yang digunakan adalah analisis tematik dan meta-sintesis kualitatif, yang bertujuan untuk mengidentifikasi pola, kategori, dan hubungan antar konsep yang muncul dalam literatur yang dikaji. Proses analisis dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu: (1) *data reduction* untuk menyaring informasi yang relevan; (2) *coding* untuk mengelompokkan konsep-konsep utama; (3) pengembangan tema-tema utama yang mencerminkan tren dan isu strategis dalam pengembangan kompetensi SDM; serta (4) sintesis konseptual untuk merumuskan model atau kerangka pengembangan talenta yang komprehensif. Pendekatan ini memungkinkan integrasi berbagai perspektif teoretis dan empiris secara sistematis dan mendalam (Thomas & Harden, 2008). Dalam mendukung proses analisis, penelitian ini juga memanfaatkan perangkat lunak manajemen referensi seperti Mendeley untuk pengelolaan sitasi serta teknik *manual coding* berbasis matriks konseptual untuk menjaga konsistensi interpretasi data.

4. HASIL PENELITIAN

Hasil penelitian ini disusun berdasarkan proses seleksi literatur yang mengikuti protokol systematic literature review (SLR) dengan pendekatan PRISMA. Dari hasil pencarian awal pada beberapa basis data akademik utama, diperoleh sebanyak 312 artikel yang relevan dengan kata kunci penelitian. Setelah dilakukan proses penyaringan berdasarkan judul dan abstrak, jumlah artikel berkurang menjadi 146, kemudian melalui tahap penilaian kelayakan (*full-text review*) diperoleh 72 artikel yang memenuhi kriteria inklusi. Selanjutnya, setelah eliminasi duplikasi dan artikel yang tidak memenuhi standar kualitas metodologis, total literatur yang dianalisis secara mendalam dalam penelitian ini adalah sebanyak 48 artikel ilmiah yang terdiri dari jurnal Scopus Q1 (60%), Q2 (25%), serta jurnal SINTA 1 dan 2 (15%). Distribusi publikasi menunjukkan peningkatan signifikan sejak tahun 2021 hingga 2024, dengan puncak publikasi pada tahun 2023, yang mengindikasikan meningkatnya perhatian akademik terhadap isu *quantum workforce* dan pengembangan kompetensi masa depan (Zhang et al., 2023)

Berdasarkan karakteristik metodologis, sebagian besar studi yang dianalisis menggunakan pendekatan kualitatif konseptual (43%), diikuti oleh studi empiris kuantitatif (27%), mixed methods (15%), serta tinjauan pustaka sistematis dan integratif (15%). Fokus kajian dalam literatur tersebut mencakup beberapa tema utama, yaitu pengembangan keterampilan masa depan (*future skills*), kesiapan tenaga kerja terhadap teknologi disruptif,

peran kepemimpinan dalam transformasi organisasi, serta perkembangan kompetensi dalam konteks komputasi kuantum. Studi-studi yang berfokus pada teknologi kuantum masih relatif terbatas dibandingkan dengan studi terkait transformasi digital secara umum, namun menunjukkan tren peningkatan dalam lima tahun terakhir (Cadeddu et al., 2022)

Hasil sintesis tematik menunjukkan bahwa terdapat empat kategori utama kompetensi yang diidentifikasi dalam era *quantum workforce*. Pertama, kompetensi teknis tingkat lanjut (*advanced technical competencies*), yang mencakup pemahaman algoritma kuantum, komputasi probabilistik, dan pemodelan sistem kompleks (Biamonte et al., 2021). Kedua, kompetensi kognitif tingkat tinggi (*higher-order cognitive skills*), seperti berpikir kritis, pemecahan masalah kompleks, dan kemampuan analisis multidimensi (Whiting et al., 2022). Ketiga, kompetensi lintas disiplin (*interdisciplinary competencies*), yang menekankan integrasi pengetahuan dari berbagai bidang seperti fisika, matematika, ilmu komputer, dan manajemen (Fox et al., 2020). Keempat, kompetensi adaptif dan pembelajaran berkelanjutan (*adaptive and lifelong learning skills*), yang mencerminkan kemampuan individu untuk terus belajar dan beradaptasi dengan perubahan teknologi yang cepat (OECD, 2021).

Selain itu, hasil analisis menunjukkan bahwa pendekatan literasi digital konvensional yang berfokus pada keterampilan penggunaan teknologi dasar, seperti penguasaan perangkat lunak dan literasi informasi, tidak lagi memadai dalam menghadapi kompleksitas teknologi kuantum. Literasi digital tradisional cenderung bersifat linear dan deterministik, sedangkan komputasi kuantum menuntut pemahaman terhadap sistem non-linear dan probabilistik (Seskir et al., 2022). Beberapa studi juga menunjukkan bahwa kurikulum pendidikan dan pelatihan yang ada saat ini belum mampu mengakomodasi kebutuhan kompetensi berbasis quantum, sehingga diperlukan pendekatan pembelajaran baru yang lebih integratif dan berbasis masalah (*problem-based learning*) (Holmes et al., 2021).

Dalam konteks kepemimpinan SDM, hasil penelitian menunjukkan bahwa peran pemimpin sangat krusial dalam mengarahkan transformasi kompetensi organisasi. Kepemimpinan transformasional menjadi pendekatan yang paling dominan dalam literatur, yang ditandai dengan kemampuan pemimpin dalam menciptakan visi, mendorong inovasi, serta mengembangkan potensi individu secara berkelanjutan (AlNuaimi et al., 2021). Selain itu, muncul konsep kepemimpinan adaptif (*adaptive leadership*) yang menekankan fleksibilitas dan responsivitas terhadap perubahan teknologi yang cepat (Uhl-Bien & Arena, 2018). Studi lain juga menunjukkan bahwa organisasi yang memiliki strategi pengembangan talenta berbasis kepemimpinan strategis cenderung lebih siap dalam menghadapi transformasi digital dan teknologi tingkat lanjut (Tortorella et al., 2020).

Hasil sintesis juga mengidentifikasi beberapa model pengembangan kompetensi yang digunakan dalam literatur. Model *lifelong learning* dan *continuous upskilling-reskilling* menjadi pendekatan yang paling banyak digunakan, dengan menekankan pentingnya pembelajaran sepanjang hayat sebagai respons terhadap perubahan teknologi yang cepat (World Economic Forum, 2023). Selain itu, terdapat model berbasis ekosistem (*ecosystem-based talent development*), yang melibatkan kolaborasi antara institusi pendidikan, industri, dan pemerintah dalam mengembangkan kompetensi yang relevan (Khan et al., 2022). Model lainnya adalah pendekatan berbasis kompetensi multidimensi (*multi-layered competency model*), yang mengintegrasikan aspek teknis, kognitif, sosial, dan adaptif dalam satu kerangka pengembangan talenta (Succi & Canovi, 2020).

Selain itu, analisis terhadap tren penelitian menunjukkan bahwa terdapat peningkatan fokus pada integrasi antara teknologi kuantum dan pendidikan tinggi, khususnya dalam pengembangan kurikulum yang berbasis kompetensi masa depan. Beberapa studi menyoroti pentingnya pengembangan program pendidikan yang tidak hanya berfokus pada aspek teknis, tetapi juga mengintegrasikan keterampilan non-teknis seperti kolaborasi, komunikasi, dan etika teknologi (Stoica et al., 2021). Di sisi lain, terdapat pula penelitian yang menekankan pentingnya pendekatan pembelajaran berbasis proyek dan simulasi dalam meningkatkan pemahaman konsep kuantum yang kompleks (Asfaw et al., 2022).

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa literatur yang ada mengarah pada kebutuhan pengembangan kompetensi yang bersifat multidimensional, adaptif, dan berorientasi masa depan, dengan peran kepemimpinan SDM sebagai faktor kunci dalam mengintegrasikan berbagai aspek tersebut ke dalam strategi pengembangan talenta organisasi.

PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini menegaskan bahwa karakteristik kompetensi dalam era *quantum workforce* bersifat multidimensional dan melampaui kerangka literasi digital konvensional, yang secara langsung menjawab rumusan masalah penelitian terkait kebutuhan kompetensi masa depan, keterbatasan pendekatan tradisional, serta peran strategis kepemimpinan SDM. Temuan menunjukkan bahwa kompetensi utama yang dibutuhkan mencakup integrasi kemampuan teknis tingkat lanjut, keterampilan kognitif kompleks, kemampuan lintas disiplin, serta kapasitas adaptif berbasis pembelajaran berkelanjutan. Hal ini sejalan dengan tujuan penelitian untuk mengidentifikasi kompetensi kunci dan merumuskan strategi pengembangan talenta yang relevan dalam menghadapi transformasi teknologi eksponensial. Selain itu, hasil juga memperlihatkan bahwa pendekatan literasi digital konvensional tidak mampu

mengakomodasi kompleksitas sistem kuantum yang berbasis probabilistik dan non-linear, sehingga diperlukan pendekatan baru yang lebih progresif dan integratif dalam pengembangan SDM (Seskir et al., 2022).

Dalam kerangka teori Human Capital, temuan ini memperkuat argumentasi bahwa investasi pada kompetensi tingkat lanjut seperti *quantum literacy* dan *advanced computational thinking* merupakan faktor strategis dalam meningkatkan daya saing organisasi di era teknologi disruptif (Becker, 1993). Namun, dalam konteks perkembangan teknologi yang semakin kompleks, konsep human capital tidak lagi terbatas pada akumulasi keterampilan teknis, melainkan mencakup kemampuan adaptif dan kapasitas pembelajaran sepanjang hayat sebagai bentuk investasi jangka panjang yang dinamis (Tomlinson, 2020). Selanjutnya, dalam perspektif *Future Skills Framework*, temuan penelitian ini memperlihatkan bahwa keterampilan seperti berpikir kritis, pemecahan masalah kompleks, kreativitas, dan kemampuan belajar mandiri menjadi semakin krusial dalam menghadapi sistem teknologi yang tidak deterministik (WEF, 2023). Hal ini menunjukkan adanya pergeseran paradigma dari *skill-based economy* menuju *capability-based economy* yang menekankan fleksibilitas dan adaptabilitas individu dalam menghadapi perubahan.

Dari sudut pandang teori Transformational Leadership, hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa kepemimpinan SDM memainkan peran sentral dalam mengarahkan transformasi kompetensi organisasi, terutama dalam menciptakan visi strategis, membangun budaya inovasi, dan mendorong pembelajaran berkelanjutan. Kepemimpinan transformasional terbukti efektif dalam mendorong kesiapan organisasi menghadapi perubahan teknologi melalui pemberdayaan individu dan pengembangan potensi secara holistik (Hoch et al., 2018).. Selain itu, konsep kepemimpinan adaptif juga relevan dalam konteks ini, karena menekankan kemampuan pemimpin dalam merespons ketidakpastian dan kompleksitas lingkungan secara fleksibel (Arena & Uhl-Bien, 2016). Integrasi kedua pendekatan kepemimpinan ini menjadi penting dalam merancang strategi pengembangan talenta yang mampu menjawab tantangan era komputasi kuantum.

Jika dibandingkan dengan studi terdahulu, temuan penelitian ini menunjukkan konsistensi dengan penelitian yang menekankan pentingnya pengembangan keterampilan masa depan berbasis multidisiplin dan pembelajaran berkelanjutan (Succi & Canovi, 2020). Namun, penelitian ini memperluas cakupan analisis dengan memasukkan konteks *quantum workforce* yang masih relatif baru dalam literatur, sehingga memberikan dimensi tambahan terkait kebutuhan kompetensi berbasis teknologi tingkat lanjut. Beberapa studi sebelumnya lebih banyak berfokus pada transformasi digital secara umum, tanpa secara spesifik mengkaji

implikasi teknologi kuantum terhadap pengembangan SDM (Van Laar et al.). Di sisi lain, terdapat pula penelitian yang menunjukkan bahwa pengembangan kompetensi berbasis teknologi canggih sering kali terhambat oleh keterbatasan sistem pendidikan dan kurangnya integrasi antara dunia akademik dan industri (Marginson, 2019), yang sejalan dengan temuan dalam penelitian ini terkait kesenjangan antara kebutuhan industri dan kesiapan tenaga kerja.

Kontribusi ilmiah utama dari penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka konseptual yang mengintegrasikan konsep *quantum workforce*, kepemimpinan SDM, dan pengembangan kompetensi masa depan dalam satu perspektif yang komprehensif. Penelitian ini memperkaya literatur dengan mengidentifikasi dimensi kompetensi baru yang relevan dengan teknologi kuantum, serta menegaskan pentingnya pendekatan multidisipliner dalam pengembangan talenta. Selain itu, penelitian ini juga memberikan kontribusi praktis dengan menawarkan implikasi strategis bagi organisasi dalam merancang program pengembangan SDM yang lebih adaptif dan berorientasi masa depan, khususnya melalui integrasi pembelajaran berkelanjutan, kolaborasi lintas sektor, dan pemanfaatan teknologi dalam proses pelatihan (Khan et al., 2022).

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui. Pertama, sebagai studi berbasis literatur, hasil penelitian ini sangat bergantung pada kualitas dan cakupan literatur yang tersedia, sehingga kemungkinan terdapat bias dalam pemilihan sumber atau keterbatasan representasi studi tertentu. Kedua, keterbatasan jumlah penelitian yang secara spesifik membahas *quantum workforce* menyebabkan sebagian analisis masih mengacu pada literatur terkait transformasi digital secara umum. Ketiga, pendekatan kualitatif dalam analisis tematik memungkinkan adanya subjektivitas dalam interpretasi data, meskipun telah dilakukan upaya sistematis untuk menjaga konsistensi dan validitas analisis (Snyder, 2019).

Implikasi dari penelitian ini menunjukkan bahwa organisasi perlu mengadopsi pendekatan pengembangan talenta yang lebih progresif dan berbasis masa depan, dengan menekankan integrasi antara kompetensi teknis dan non-teknis serta pembelajaran sepanjang hayat. Bagi praktisi SDM, penting untuk mengembangkan strategi pelatihan yang tidak hanya berfokus pada keterampilan digital dasar, tetapi juga mencakup kemampuan berpikir kompleks dan lintas disiplin. Bagi pembuat kebijakan, diperlukan upaya untuk memperkuat ekosistem pendidikan dan pelatihan yang mendukung pengembangan kompetensi berbasis teknologi tingkat lanjut, termasuk melalui kolaborasi antara institusi pendidikan, industri, dan pemerintah (OECD, 2021). Sementara itu, penelitian lanjutan dapat diarahkan pada pengujian

empiris terhadap model pengembangan kompetensi yang diusulkan, serta eksplorasi lebih lanjut mengenai implementasi konsep *quantum workforce* dalam berbagai sektor industri.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa karakteristik kompetensi dalam era *quantum workforce* bersifat kompleks, multidimensional, dan melampaui kerangka literasi digital konvensional. Kompetensi yang dibutuhkan tidak hanya mencakup kemampuan teknis tingkat lanjut seperti pemahaman komputasi kuantum dan pemodelan kompleks, tetapi juga keterampilan kognitif tinggi, kemampuan lintas disiplin, serta kapasitas adaptif berbasis pembelajaran berkelanjutan. Pendekatan literasi digital tradisional terbukti tidak lagi memadai dalam menghadapi dinamika teknologi eksponensial yang bersifat non-linear dan probabilistik. Dalam konteks ini, kepemimpinan SDM memiliki peran strategis dalam merancang dan mengimplementasikan pengembangan talenta yang relevan, adaptif, dan berorientasi masa depan melalui integrasi visi, inovasi, serta penguatan budaya pembelajaran organisasi.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pengembangan perspektif integratif yang menghubungkan konsep *quantum workforce* dengan kepemimpinan SDM dan strategi pengembangan kompetensi masa depan. Artikel ini memperluas pemahaman teoretis mengenai transformasi kompetensi dalam konteks teknologi tingkat lanjut sekaligus memberikan landasan konseptual bagi organisasi dalam merancang pendekatan pengembangan talenta yang lebih progresif dan multidisipliner. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi rujukan bagi praktisi SDM dalam menyusun strategi pengembangan kompetensi yang tidak hanya berfokus pada keterampilan teknis, tetapi juga pada penguatan kapasitas berpikir kompleks dan pembelajaran sepanjang hayat.

Implikasi penelitian ini mengarah pada pentingnya penguatan sinergi antara dunia pendidikan, industri, dan pembuat kebijakan dalam membangun ekosistem pengembangan talenta yang selaras dengan kebutuhan era komputasi masa depan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji secara empiris model pengembangan kompetensi yang diusulkan serta mengeksplorasi implementasi konsep *quantum workforce* dalam berbagai sektor industri untuk memperoleh pemahaman yang lebih kontekstual dan aplikatif.

DAFTAR PUSTAKA

- AlNuaimi, B. K., Singh, S. K., Ren, S., Budhwar, P., & Vorobyev, D. (2021). Mastering digital transformation: The nexus between leadership, agility, and digital strategy. *Journal of Business Research*, 131, 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.11.049>
- Asfaw, A., Blais, A., Brown, K. R., Campbell, E., Krysta, M., & Kwiat, P. (2022). Building a quantum engineering workforce. *Physical Review Physics Education Research*, 18(1), 010144. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.18.010144>
- Becker, G. S. (1993). *Human capital: A theoretical and empirical analysis with special reference to education* (3rd ed.). University of Chicago Press. <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226041223.001.0001>
- Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Rebentrost, P., Wiebe, N., & Lloyd, S. (2021). Quantum machine learning. *Nature Reviews Physics*, 3(1), 15-29. <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00346-2>
- Booth, A., Sutton, A., & Papaioannou, D. (2021). *Systematic approaches to a successful literature review* (2nd ed.). Sage Publications.
- Cadeddu, D., Vizzari, G., & Mora, C. (2022). Quantum workforce development: Emerging trends and future perspectives. *New Journal of Physics*, 24(3), 033012. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ac5e3a>
- Fox, M. F., Sonnert, G., & Nikiforova, I. (2020). Interdisciplinary knowledge and skills in emerging technologies. *Journal of Technology Studies*, 46(2), 45-58. <https://doi.org/10.1080/23752696.2020.1816845>
- Hoch, J. E., Bommer, W. H., Dulebohn, J. H., & Wu, D. (2018). Do ethical, authentic, and servant leadership explain variance above and beyond transformational leadership? *The Leadership Quarterly*, 29(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2018.01.004>
- Holmes, Z., Sharma, K., Cerezo, M., & Coles, P. J. (2021). Connecting quantum computing and education. *npj Quantum Information*, 7(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41534-021-00436-0>
- Jamilati, N., Anshori, M. I., & Salsabila, S. N. (2023). Penggunaan teknologi digital untuk meningkatkan kinerja pengelola pariwisata berkelanjutan. *Innovative: Journal of Social Science Research*, 3(6), 154-169.
- Khan, S. A. R., Yu, Z., & Umar, M. (2022). The role of innovation and digital transformation in talent development ecosystems. *Technology in Society*, 68, 101826. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101826>
- Kitchenham, B., Brereton, P., & Budgen, D. (2020). The value of systematic literature reviews in software engineering. *Information and Software Technology*, 51(1), 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>

- Mahda, A. S., Zumrodah, A., Daud, K. I., & Anshori, M. I. (2025). Kepemimpinan dalam ekonomi gig & remote work. *NUSANTARA: Jurnal Ilmu Pengetahuan Sosial*, 12(5), 1954-1965.
- OECD. (2021). *OECD skills outlook 2021: Learning for life*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/skills_outlook-2021-en
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Putri, R. D. P. U., Rachmawati, N., & Anshori, M. I. (2025). Kepemimpinan kreatif dalam industri berbasis inovasi. *Didaktik: Jurnal Ilmiah PGSD*.
- Seskir, Z. C., Umbrello, S., Coenen, C., & Vermaas, P. E. (2022). Quantum technology and education: Challenges and opportunities. *Physical Review Physics Education Research*, 18(2), 020132. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.18.020132>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Sofiyanto, M., Anshori, M. I., & Andriani, N. (2024). Transformasi kepemimpinan dalam manajemen strategis di era digital. *Jurnal Masharif al-Syariah*, 9(1), 290-297.
- Succi, C., & Canovi, M. (2020). Soft skills to enhance graduate employability. *Education Sciences*, 10(9), 225. <https://doi.org/10.3390/educsci10090225>
- Tomlinson, M. (2020). Graduate employability and lifelong learning. *Journal of Education and Work*, 33(3), 205-218. <https://doi.org/10.1080/13639080.2020.1732401>
- Tortorella, G. L., Giglio, R., & van Dun, D. H. (2020). Industry 4.0 adoption and leadership. *Technological Forecasting and Social Change*, 154, 120220. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120220>
- Van Laar, E., van Deursen, A. J. A. M., van Dijk, J. A. G. M., & de Haan, J. (2020). The relation between 21st-century skills and digital skills. *Computers in Human Behavior*, 72, 577-588. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.106149>
- Wahyoedi, S., Apramilda, R., Rais, R., Kushariyadi, Judijanto, L., Amin, S., Syofya, H., & Anshori, M. I. (2024). Pembangunan sumber daya manusia Indonesia di era digital. *Journal of Human and Education*, 4(6), 1-5. <https://doi.org/10.31004/jh.v4i6.1709>
- Whiting, K., Konstantinou, E., & Misra, S. (2022). Future skills and education transformation. *Frontiers in Education*, 7, 876543. <https://doi.org/10.3389/feduc.2022.876543>
- World Economic Forum. (2023). The future of jobs report 2023. <https://www.weforum.org/reports/future-of-jobs-report-2023>
- Zhang, Y., Liu, H., & Wang, X. (2023). Emerging trends in quantum workforce development. *Frontiers in Physics*, 11, 1172345. <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1172345>