P-ISSN: 3047-3527, E-ISSN: 3047-7018
JURAMA, Vol. 3, No. 4, November 2026
Lembaga Aspirasi Pendidikan, Penelitian dan Pengabdian Putra Bangsa (LP4B) Tangerang Selatan

OTOMATISASI DAN DISRUPSI KETENAGAKERJAAN: ANALISIS EKONOMI MANAJERIAL TERHADAP DAMPAK TEKNOLOGI PADA UPAH DAN KESEMPATAN KERJA DI INDONESIA

Tri Cahya Ningsih[1*], Ai Epa Nurlatifah[2]
[12] Program Studi Ekonomi, Universitas Pamulang, Indonesia
[1*]tricahya1907@gmail.com, [2]latifahaieva234@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak otomatisasi dan adopsi teknologi terhadap upah dan kesempatan kerja di Indonesia melalui pendekatan ekonomi manajerial yang komprehensif. Gelombang keempat revolusi industri yang ditandai oleh kecerdasan buatan, robotika, dan otomatisasi proses berbasis perangkat lunak telah menciptakan disrupsi ketenagakerjaan yang sangat fundamental, mengancam jutaan pekerjaan rutin dan berulang yang selama ini menjadi tulang punggung penyerapan tenaga kerja di negara berkembang seperti Indonesia. Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan data panel dari 34 provinsi Indonesia selama periode 2015-2023 (272 observasi) yang dianalisis menggunakan Fixed Effects Model (FEM) dan Difference-in-Differences (DiD) untuk mengidentifikasi hubungan kausal antara tingkat otomatisasi industri dengan perubahan upah dan tingkat pengangguran sektoral. Variabel otomatisasi diproksikan melalui Indeks Penetrasi Robot (Robot Penetration Index) yang diadaptasi dari metodologi International Federation of Robotics dikombinasikan dengan indeks adopsi teknologi digital sektor industri dari Kementerian Perindustrian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan indeks otomatisasi sebesar satu standar deviasi berkorelasi dengan penurunan kesempatan kerja di sektor manufaktur sebesar 4,7% (β = -0,312; $p <$ 0,001) dan peningkatan upah rata-rata pekerja yang tersisa sebesar 8,3% (β = 0,247; $p <$ 0,01), mencerminkan kombinasi antara substitusi pekerjaan rutin dan komplementaritas teknologi dengan pekerja terampil. Sektor-sektor dengan kerentanan otomatisasi tertinggi di Indonesia mencakup manufaktur tekstil (78,3% pekerjaan berisiko tinggi tergantikan), pengolahan makanan (71,2%), dan jasa administrasi (67,8%), sementara sektor perawatan, pendidikan, dan seni kreatif menunjukkan ketahanan tertinggi terhadap otomatisasi. Temuan ini memberikan implikasi kebijakan yang sangat mendesak bagi pemerintah Indonesia untuk mengakselerasi program reskilling dan upskilling tenaga kerja, mereformasi sistem pendidikan kejuruan, dan mengembangkan jaring pengaman sosial yang adaptif terhadap perubahan struktural ketenagakerjaan akibat gelombang otomatisasi yang tidak dapat dihindari.

Kata kunci: Otomatisasi; Disrupsi Ketenagakerjaan; Ekonomi Manajerial; Upah; Kesempatan Kerja; Revolusi Industri 4.0; Reskilling

ABSTRACT

This study aims to analyze the impact of automation and technology adoption on wages and employment opportunities in Indonesia through a comprehensive managerial economics approach. The fourth wave of industrial revolution characterized by artificial intelligence, robotics, and software-based process automation has created highly fundamental employment disruption, threatening millions of routine and repetitive jobs that have long been the backbone of labor absorption in developing countries such as Indonesia. This study employs a quantitative method with a panel data approach from 34 Indonesian provinces over the period 2015-2023 (272 observations) analyzed using Fixed Effects Model (FEM) and Difference-in-Differences (DiD) to identify causal relationships between industry automation levels and changes in wages and sectoral unemployment rates. The automation variable is proxied through the Robot Penetration Index adapted from International Federation of

Robotics methodology combined with the digital technology adoption index of industrial sectors from the Ministry of Industry. The results indicate that an increase of one standard deviation in the automation index correlates with a 4.7% decline in employment in the manufacturing sector ($\beta = -0.312$; $p < 0.001$) and an 8.3% increase in average wages of remaining workers ($\beta = 0.247$; $p < 0.01$), reflecting a combination of routine job substitution and technology complementarity with skilled workers. Sectors with the highest automation vulnerability in Indonesia include textile manufacturing (78.3% of jobs at high risk of replacement), food processing (71.2%), and administrative services (67.8%), while care, education, and creative arts sectors demonstrate the highest resilience to automation. These findings provide highly urgent policy implications for the Indonesian government to accelerate worker reskilling and upskilling programs, reform vocational education systems, and develop social safety nets that are adaptive to structural changes in employment resulting from the inevitable automation wave.

Keywords: Automation; Employment Disruption; Managerial Economics; Wages; Employment; Industry 4.0; Reskilling

---

PENDAHULUAN

Revolusi industri keempat yang ditandai oleh konvergensi kecerdasan buatan (AI), robotika canggih, Internet of Things, komputasi awan, dan otomatisasi proses berbasis perangkat lunak sedang mengubah lanskap ketenagakerjaan global dengan kecepatan dan kedalaman yang belum pernah terjadi dalam sejarah perekonomian modern. World Economic Forum (2024) dalam laporan Future of Jobs yang paling komprehensif mengidentifikasi bahwa 85 juta pekerjaan di 26 negara akan tergantikan oleh otomatisasi pada tahun 2025, sementara 97 juta pekerjaan baru yang bersifat lebih manusia-mesin kolaboratif akan tercipta dalam periode yang sama — namun dengan distribusi geografis, sektoral, dan kompetensi yang sangat berbeda dari pekerjaan yang hilang sehingga proses transisi tersebut penuh dengan potensi disrupsi sosial ekonomi yang sangat besar. McKinsey Global Institute (2023) memperkirakan bahwa antara 400 juta hingga 800 juta pekerja global dapat terdisplasi oleh otomatisasi pada tahun 2030, dengan pekerja di negara berkembang yang memiliki proporsi pekerjaan rutin dan berulang lebih tinggi menghadapi risiko yang jauh lebih besar dibandingkan pekerja di negara maju yang sudah memiliki komposisi pekerjaan yang lebih terdiversifikasi menuju pekerjaan kognitif-kreatif yang lebih sulit diotomatisasi. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD, 2023) dalam laporan Employment Outlook memperkirakan bahwa 14% dari seluruh pekerjaan yang ada saat ini memiliki kemungkinan otomatisasi yang sangat tinggi (lebih dari 70%) dan 32% pekerjaan lainnya akan mengalami perubahan komposisi tugas yang sangat signifikan akibat adopsi teknologi digital, yang secara bersama-sama mengimplikasikan bahwa hampir separuh dari seluruh angkatan kerja global akan menghadapi kebutuhan reskilling yang sangat substansial dalam satu dekade mendatang. Dalam konteks ini, kajian ekonomi manajerial mengenai dampak otomatisasi terhadap upah dan kesempatan kerja bukan lagi sekadar diskursus akademis futuristis melainkan pertanyaan kebijakan yang sangat mendesak dan sangat berdampak nyata terhadap kehidupan jutaan pekerja dan keluarga mereka.

Perdebatan akademis mengenai dampak otomatisasi terhadap ketenagakerjaan memiliki sejarah yang panjang namun semakin intens dalam satu dekade terakhir seiring dipublikasikannya studi-studi empiris yang berhasil mengkuantifikasi risiko otomatisasi pada level pekerjaan dengan sangat presisi. Frey dan Osborne (2017) dalam studi seminal yang menganalisis 702 jenis pekerjaan di Amerika Serikat menemukan bahwa 47% pekerjaan memiliki risiko tinggi tergantikan oleh komputerisasi dalam dua dekade mendatang — sebuah temuan yang mengejutkan dan memicu gelombang penelitian replikasi di berbagai negara. UNESCO Institute for Statistics (2023) dalam laporan komprehensif mengenai masa depan pekerjaan di negara berkembang mengidentifikasi bahwa negara-negara berkembang dengan struktur tenaga kerja yang masih sangat dominan di sektor manufaktur padat karya, jasa tradisional, dan pertanian konvensional menghadapi risiko disrupsi otomatisasi yang secara proporsi jauh lebih besar dibandingkan negara maju yang sudah bertransisi ke ekonomi berbasis pengetahuan dan layanan. International Labour Organization (ILO, 2023) dalam

laporan World Employment and Social Outlook memperkirakan bahwa negara-negara ASEAN menghadapi risiko otomatisasi tertinggi di dunia dengan 56% dari seluruh pekerjaan di kawasan ini tergolong sangat rentan terhadap otomatisasi dalam jangka menengah, sebuah angka yang jauh melampaui rata-rata global sebesar 34%. Acemoglu dan Restrepo (2022) dalam penelitian empiris yang sangat berpengaruh menggunakan data level industri dari 19 negara menemukan bahwa setiap robot yang ditambahkan per 1.000 pekerja berkorelasi dengan penurunan rasio tenaga kerja-populasi sebesar 0,18-0,34 poin persentase dan penurunan upah rata-rata sebesar 0,25-0,50%, membuktikan secara kausal bahwa adopsi robot memiliki efek substitusi pekerjaan yang nyata dan substansial di luar argumen yang menyatakan bahwa teknologi selalu menciptakan pekerjaan baru yang lebih banyak dari yang dihilangkannya. Perdebatan antara optimis teknologi (technoptimist) yang meyakini bahwa otomatisasi akan menciptakan lebih banyak pekerjaan baru dan pessimis teknologi yang khawatir akan pengangguran massal terus berlangsung, namun fakta empiris semakin menunjukkan bahwa dampaknya sangat heterogen tergantung pada jenis pekerjaan, kualifikasi pekerja, dan kapasitas adaptasi institusional yang dimiliki masing-masing negara.

Indonesia sebagai negara dengan populasi 278 juta jiwa dan angkatan kerja lebih dari 149 juta orang merupakan salah satu pasar tenaga kerja terbesar dan paling kompleks di Asia Tenggara, dengan karakteristik struktural yang menciptakan kerentanan yang sangat tinggi terhadap gelombang otomatisasi yang sedang berlangsung. Badan Pusat Statistik (BPS, 2024) mencatat bahwa 38,5% dari total angkatan kerja Indonesia masih bekerja di sektor pertanian yang belum banyak tersentuh otomatisasi modern, namun 27,2% bekerja di sektor industri pengolahan dan jasa yang justru merupakan sektor dengan penetrasi otomatisasi paling cepat dalam dekade terakhir. Tingkat pendidikan angkatan kerja Indonesia yang masih relatif rendah menjadi faktor kerentanan yang sangat serius: BPS (2024) melaporkan bahwa 52,3% tenaga kerja Indonesia hanya berpendidikan setingkat SMP ke bawah, yang secara empiris berkorelasi sangat kuat dengan kerentanan terhadap otomatisasi karena pekerjaan dengan tingkat pendidikan rendah umumnya mencakup tugas-tugas rutin dan berulang yang paling mudah diotomatisasi dengan teknologi yang sudah tersedia saat ini. Kementerian Ketenagakerjaan (2024) memperkirakan bahwa sekitar 23 juta pekerjaan di Indonesia berisiko tinggi mengalami otomatisasi dalam sepuluh tahun ke depan, setara dengan 15,4% dari total angkatan kerja yang ada saat ini sebuah angka yang sangat signifikan yang membutuhkan respons kebijakan yang sangat terencana, sangat terkoordinasi, dan sangat cepat. Paradoksnya, Indonesia juga memiliki potensi untuk memanfaatkan otomatisasi secara positif melalui peningkatan produktivitas industri yang dapat meningkatkan daya saing ekspor, pertumbuhan ekonomi yang lebih cepat, dan pada akhirnya penciptaan lapangan kerja baru yang lebih berkualitas — namun hanya jika transisi ini dikelola dengan kebijakan yang tepat dan dengan investasi yang memadai dalam peningkatan kapabilitas sumber daya manusia yang sangat masif.

Dari perspektif ekonomi manajerial, keputusan perusahaan untuk mengadopsi teknologi otomatisasi dapat dianalisis sebagai keputusan investasi modal yang membandingkan biaya akuisisi dan pemeliharaan teknologi dengan penghematan biaya tenaga kerja yang dapat direalisasikan, dalam kerangka analisis biaya-manfaat yang mempertimbangkan horison investasi jangka panjang dan risiko yang melekat. Brynjolfsson dan McAfee (2022) dalam pembaruan karya mereka mengenai era mesin mengidentifikasi bahwa penurunan biaya teknologi yang sangat dramatis biaya robot industri turun rata-rata 27% per dekade sejak tahun 1990 sementara biaya tenaga kerja terus meningkat seiring pertumbuhan ekonomi menciptakan titik crossover yang semakin banyak dilampaui oleh perusahaan di berbagai industri, sehingga adopsi otomatisasi semakin menjadi pilihan yang secara ekonomis lebih menguntungkan dibandingkan mempertahankan tenaga kerja manusia untuk tugas-tugas yang dapat diotomatisasi. Dalam kerangka fungsi produksi neoklasik, otomatisasi dapat dipahami sebagai substitusi kapital terhadap tenaga kerja yang sensitif terhadap harga relatif antara keduanya: ketika upah riil meningkat lebih cepat dari biaya modal teknologi, perusahaan memiliki insentif yang semakin kuat untuk mensubstitusi tenaga kerja dengan modal teknologi, menciptakan tekanan otomatisasi yang bersifat endogen terhadap kebijakan upah minimum yang terlalu agresif. Aksoy et al. (2022) mengkonfirmasi mekanisme substitusi ini secara empiris menggunakan data dari 60 negara dan menemukan bahwa kenaikan upah minimum yang melebihi produktivitas marjinal tenaga kerja secara signifikan meningkatkan laju adopsi robot industri, sebuah temuan yang memiliki implikasi kebijakan

yang sangat penting bagi Indonesia yang menerapkan kebijakan kenaikan upah minimum regional setiap tahun. Namun perspektif ekonomi manajerial yang lebih holistik juga mengakui bahwa teknologi tidak hanya bersifat substitutif terhadap tenaga kerja melainkan juga komplementer: teknologi dapat meningkatkan produktivitas pekerja yang tersisa sehingga meningkatkan permintaan tenaga kerja yang lebih terampil, menciptakan distribusi dampak yang sangat tidak merata di antara pekerja dengan kualifikasi berbeda yang disebut sebagai task-biased technical change.

Salah satu temuan paling penting dan paling konsisten dalam literatur ekonomi ketenagakerjaan modern adalah bahwa otomatisasi tidak mengakibatkan penurunan permintaan tenaga kerja secara merata di seluruh spektrum kualifikasi, melainkan menciptakan polarisasi (hollowing out) yang mengikis pekerjaan kelas menengah rutin sementara meningkatkan permintaan di ujung atas (pekerjaan kognitif kompleks) dan mempertahankan pekerjaan di ujung bawah (pekerjaan manual non-rutin). Autor dan Salomons (2023) dalam penelitian longitudinal yang menggunakan data dari 19 industri di 28 negara menemukan bahwa pekerjaan yang paling rentan terhadap otomatisasi adalah pekerjaan yang didominasi oleh tugas-tugas rutin dan berulang yang dapat dikodifikasikan secara formal baik tugas kognitif rutin (seperti pengolahan data, akuntansi dasar, dan administrasi) maupun tugas manual rutin (seperti perakitan lini produksi dan operasi mesin standar) sementara pekerjaan yang membutuhkan kemampuan sosial yang kompleks, kreativitas tidak terstruktur, dan sentuhan emosional manusia menunjukkan ketahanan yang jauh lebih tinggi. Fenomena skill-biased technical change (SBTC) yang mendokumentasikan kecenderungan teknologi untuk meningkatkan produktivitas dan permintaan pekerja terampil relatif terhadap pekerja tidak terampil telah menjadi salah satu penjelasan utama untuk meningkatnya ketimpangan upah yang konsisten teramati di hampir semua negara yang mengalami percepatan digitalisasi ekonomi. Dalam konteks Indonesia, polarisasi pekerjaan akibat otomatisasi memiliki dimensi tambahan yang sangat penting: kesenjangan upah antara pekerja formal dan informal yang sangat besar, dengan ekonomi informal menyerap 57,3% angkatan kerja pada tahun 2023 menurut BPS, menciptakan situasi di mana dampak otomatisasi pada sektor formal dapat memperburuk tekanan di sektor informal ketika pekerja yang tersisihkan dari sektor formal mencari pekerjaan di sektor informal yang mengakibatkan penurunan upah di segmen bawah pasar tenaga kerja. Santoso dan Wahyudi (2022) mengkonfirmasi bukti awal polarisasi pekerjaan di Indonesia menggunakan data Sakernas untuk periode 2010-2020 dan menemukan bahwa pekerjaan kelas menengah dengan intensitas tugas rutin yang tinggi mengalami penurunan pangsa dalam total kesempatan kerja yang konsisten selama satu dekade, sementara pekerjaan di ujung atas dan ujung bawah distribusi kualifikasi justru meningkat pangsa relatifnya.

Hubungan antara otomatisasi dan upah merupakan salah satu pertanyaan empiris yang paling kompleks dan paling banyak diperdebatkan dalam ekonomi ketenagakerjaan, karena terdapat beberapa mekanisme transmisi yang beroperasi secara bersamaan dengan arah yang saling berlawanan dan dengan besaran yang sangat bergantung pada konteks institusional masing-masing ekonomi. Mekanisme pertama adalah efek substitusi langsung (direct substitution effect) di mana otomatisasi mengurangi permintaan tenaga kerja untuk tugas-tugas yang tergantikan, yang dalam pasar tenaga kerja kompetitif akan menurunkan upah ekuilibrium untuk jenis pekerjaan tersebut. Mekanisme kedua adalah efek komplementaritas (complementarity effect) di mana teknologi meningkatkan produktivitas marjinal pekerja yang bekerja berdampingan dengan teknologi tersebut, mendorong kenaikan upah bagi pekerja yang mampu mengoperasikan dan mengoptimalkan teknologi baru. Mekanisme ketiga adalah efek pasar produk (product market effect) di mana otomatisasi yang menurunkan biaya produksi dapat menghasilkan penurunan harga output, peningkatan permintaan produk, dan ekspansi output yang pada gilirannya meningkatkan permintaan tenaga kerja keseluruhan meskipun intensitas tenaga kerja per unit output menurun. Berg et al. (2021) mengkuantifikasi ketiga mekanisme tersebut menggunakan model keseimbangan umum terkomputer (CGE model) yang dikalibrasi untuk 25 negara berkembang dan menemukan bahwa efek bersih (net effect) otomatisasi terhadap upah rata-rata bersifat positif dalam jangka panjang tetapi sangat negatif dalam jangka pendek — transisi yang menyakitkan namun dapat dikelola dengan kebijakan yang tepat. Dalam konteks Indonesia, Pratiwi dan Nugroho (2023) mengkaji dampak adopsi teknologi digital pada upah menggunakan data Survei Angkatan Kerja Nasional (Sakernas) dan menemukan bahwa pekerja dengan keterampilan digital yang lebih tinggi menerima premium upah rata-rata 23,7% dibandingkan pekerja dengan profil pekerjaan

serupa namun tanpa keterampilan digital, mengkonfirmasi bahwa digital skill premium merupakan mekanisme transmisi otomatisasi terhadap ketimpangan upah yang sangat nyata dan sangat signifikan di pasar tenaga kerja Indonesia.

Identifikasi sektor-sektor dengan kerentanan otomatisasi tertinggi di Indonesia sangat penting untuk merancang kebijakan yang tepat sasaran dan dapat memberikan dampak perlindungan yang paling efektif bagi pekerja yang paling rentan. Kementerian Perindustrian (2024) dalam peta jalan otomatisasi industri nasional mengidentifikasi bahwa manufaktur tekstil dan garmen merupakan sektor dengan potensi otomatisasi tertinggi di Indonesia: mesin penjahit otomatis, robot pemotong kain, dan sistem penyelesaian otomatis berbasis computer vision sudah tersedia secara komersial dan dalam lima tahun ke depan diperkirakan mampu menggantikan 60-70% pekerjaan operator yang saat ini dilakukan oleh sekitar 4,2 juta tenaga kerja di sektor ini. Sektor pengolahan makanan dan minuman yang mempekerjakan 3,8 juta pekerja juga menghadapi tekanan otomatisasi yang sangat besar, dengan sistem sortasi otomatis, pengemasan robotik, dan quality control berbasis AI sudah mulai diadopsi oleh perusahaan-perusahaan besar yang secara langsung mengancam pekerjaan buruh pabrik berupah rendah yang merupakan sumber penghidupan utama bagi jutaan keluarga berpenghasilan menengah ke bawah di Jawa dan Sumatera. Di sektor jasa, penerapan AI generatif dan otomatisasi proses robotik (RPA) mengancam secara sangat serius pekerjaan-pekerjaan administratif, entri data, pemrosesan dokumen, dan layanan pelanggan yang menyerap jutaan pekerja berpendidikan menengah yang selama ini memandang pekerjaan kerah putih sebagai jalur mobilitas sosial yang sangat diidamkan. Darmawan dan Kurniawan (2023) dalam penelitian yang menggunakan metodologi Frey-Osborne yang diadaptasi untuk konteks Indonesia mengklasifikasikan 501 jenis pekerjaan yang paling umum di Indonesia berdasarkan risiko otomatisasinya dan menemukan bahwa 42,3% pekerjaan memiliki probabilitas tergantikan lebih dari 70% — sebuah proporsi yang sangat mengkhawatirkan dan jauh di atas rata-rata Asia Tenggara sebesar 38,7%.

Dimensi ketimpangan dari dampak otomatisasi terhadap ketenagakerjaan merupakan aspek yang paling mengkhawatirkan dari perspektif keadilan sosial dan kohesi sosial Indonesia sebagai bangsa yang secara konstitusional berkomitmen terhadap keadilan ekonomi dan pemerataan kesejahteraan. Acemoglu dan Restrepo (2022) dalam penelitian yang mengkaji 19 negara dengan tingkat adopsi robot yang berbeda menemukan bahwa kenaikan 1 poin persentase dalam rasio robot per pekerja berkorelasi dengan kenaikan koefisien Gini sebesar 0,1-0,2 poin dalam lima tahun berikutnya, mengkonfirmasi bahwa otomatisasi secara sistematis memperburuk distribusi pendapatan dengan menguntungkan pemilik modal dan pekerja berketerampilan tinggi sementara merugikan pekerja berketerampilan rendah dan menengah. Indonesia yang sudah menghadapi tantangan ketimpangan yang signifikan dengan koefisien Gini 0,381 pada tahun 2023 menurut BPS tidak dapat mengabaikan risiko bahwa otomatisasi yang tidak dikelola dengan kebijakan redistribusi yang memadai dapat mendorong ketimpangan ke tingkat yang mengancam stabilitas sosial. Pasar tenaga kerja informal yang sangat besar di Indonesia menyerap 57,3% angkatan kerja pada 2023 menciptakan komplikasi tambahan yang sangat serius: ketika pekerja formal tersisih oleh otomatisasi, mereka umumnya tidak memiliki akses terhadap jaring pengaman sosial formal seperti asuransi pengangguran dan terpaksa masuk ke sektor informal yang sudah sangat padat, menekan upah di segmen paling bawah pasar tenaga kerja dan memperburuk kondisi sosial kelompok yang paling rentan. Sukirno dan Hidayat (2023) mengkonfirmasi mekanisme ini secara empiris untuk Indonesia menggunakan data Sakernas 2015-2022 dan menemukan bahwa provinsi-provinsi yang mengalami adopsi otomatisasi lebih cepat di sektor formalnya menunjukkan pertumbuhan sektor informal yang lebih tinggi dengan upah rata-rata informal yang lebih rendah, mengkonfirmasi bahwa otomatisasi memiliki efek trickle-down negatif terhadap pasar tenaga kerja informal yang merupakan kantong terbesar kerentanan pekerja Indonesia.

Pengalaman negara-negara yang lebih maju dalam menghadapi disrupsi otomatisasi memberikan pembelajaran kebijakan yang sangat berharga meskipun dengan catatan penting bahwa setiap konteks nasional memiliki keunikannya masing-masing yang tidak dapat diimitasi secara langsung tanpa adaptasi. Negara-negara Nordik Swedia, Denmark, Finlandia, dan Norwegia — telah lama mengembangkan model flexicurity yang menggabungkan fleksibilitas pasar tenaga kerja bagi pengusaha dengan keamanan penghasilan yang kuat bagi pekerja melalui sistem tunjangan

pengangguran yang sangat generous dan program pelatihan ulang yang aktif dan komprehensif. Singapore sebagai negara yang paling progresif di Asia dalam menghadapi otomatisasi telah menginvestasikan lebih dari SGD 1 miliar per tahun sejak 2017 melalui SkillsFuture Program yang memberikan kredit pelatihan kepada seluruh warga negara di atas 25 tahun untuk mengikuti program reskilling yang relevan dengan kebutuhan pasar kerja masa depan sebuah investasi masif dalam modal manusia yang telah meningkatkan employability dan adaptabilitas tenaga kerja Singapura secara sangat signifikan. Jerman menerapkan Kurzarbeit (short-time work scheme) yang memungkinkan perusahaan mengurangi jam kerja daripada memecat pekerja ketika menghadapi perubahan struktural, dengan pemerintah menanggung sebagian upah yang hilang sebuah kebijakan yang terbukti sangat efektif dalam meredam dampak disrupsi otomatisasi terhadap pengangguran jangka pendek sambil memberikan waktu bagi pekerja untuk beradaptasi dan memperoleh keterampilan baru. Wajdi dan Maulida (2023) membandingkan respons kebijakan Indonesia dengan negara-negara tersebut dan mengidentifikasi kesenjangan yang sangat besar: program Kartu Prakerja yang diluncurkan Indonesia pada tahun 2020 memiliki konsep yang tepat arah namun masih sangat terbatas dalam jangkauan, kualitas pelatihan, dan kesesuaian dengan kebutuhan industri nyata, membutuhkan reformasi yang menyeluruh untuk dapat benar-benar mempersiapkan tenaga kerja Indonesia menghadapi masa depan pekerjaan yang didominasi oleh teknologi.

Penelitian mengenai dampak otomatisasi dan teknologi terhadap ketenagakerjaan di Indonesia sudah mulai berkembang dalam beberapa tahun terakhir namun masih sangat terbatas dalam hal cakupan metodologis, kedalaman analisis kausal, dan integrasi antara dimensi upah dan kesempatan kerja dalam satu kerangka penelitian yang komprehensif. Santoso dan Wahyudi (2022) menganalisis polarisasi pekerjaan di Indonesia menggunakan data Sakernas 2010-2020 namun tidak mengukur dampak langsung dari variabel otomatisasi yang terkuantifikasi, melainkan hanya menganalisis tren komposisi pekerjaan yang berubah tanpa menghubungkannya secara kausal dengan data adopsi teknologi di level industri. Pratiwi dan Nugroho (2023) mengkaji digital skill premium dalam pasar tenaga kerja Indonesia namun dengan cakupan yang sangat terbatas pada kota-kota besar dan tidak menangkap heterogenitas yang sangat besar antar provinsi yang merupakan karakteristik kritis dari ketenagakerjaan Indonesia yang sangat tersebar secara geografis. Darmawan dan Kurniawan (2023) melakukan klasifikasi risiko otomatisasi untuk 501 jenis pekerjaan Indonesia namun menggunakan metodologi deskriptif tanpa pengujian empiris kausal mengenai dampak aktual otomatisasi terhadap perubahan upah dan kesempatan kerja yang sudah terjadi. Sukirno dan Hidayat (2023) menganalisis dampak otomatisasi terhadap sektor informal namun hanya untuk sektor manufaktur tanpa mencakup sektor jasa yang merupakan sektor tumbuh paling cepat dalam ekonomi Indonesia. Kesenjangan penelitian yang sangat jelas ini — tidak adanya penelitian yang menggunakan data panel multiprovinsial dengan pendekatan kausal yang robust untuk mengestimasi dampak otomatisasi secara simultan terhadap upah dan kesempatan kerja di berbagai sektor di Indonesia menjadi justifikasi utama bagi penelitian ini untuk hadir dengan kontribusi metodologis dan empiris yang sangat dibutuhkan.

Urgensi penelitian ini sangat tinggi karena Indonesia sedang berada pada titik bifurkasi yang sangat kritis dalam trajektori pembangunan ketenagakerjaannya: keputusan dan kebijakan yang diambil dalam lima hingga sepuluh tahun ke depan akan sangat menentukan apakah Indonesia mampu memanfaatkan otomatisasi sebagai batu loncatan menuju produktivitas yang lebih tinggi dan kesejahteraan yang lebih merata, atau terperangkap dalam middle income trap yang diperparah oleh disrupsi ketenagakerjaan tanpa sistem adaptasi yang memadai. Perspektif ekonomi manajerial yang diadopsi dalam penelitian ini menambahkan dimensi yang belum cukup dieksplorasi dalam literatur yang ada: bagaimana keputusan perusahaan untuk mengadopsi otomatisasi dipengaruhi oleh struktur biaya relatif antara tenaga kerja dan teknologi, dan bagaimana keputusan-keputusan tersebut di tingkat mikro secara agregat membentuk dinamika ketenagakerjaan di tingkat sektoral dan nasional. International Monetary Fund (IMF, 2023) dalam laporan khusus mengenai otomatisasi di Asia Tenggara menegaskan bahwa respons kebijakan yang tepat dan tepat waktu terhadap disrupsi otomatisasi dapat mengkonversi apa yang berpotensi menjadi krisis ketenagakerjaan menjadi peluang transformasi ekonomi yang menguntungkan, namun window of opportunity tersebut tidak akan terbuka selamanya dan memerlukan aksi kebijakan yang dimulai sekarang, bukan setelah disrupsi sudah terlanjur terjadi secara masif. Penelitian ini berkontribusi pada tiga lapisan pengetahuan: teoritis

melalui pengujian mekanisme transmisi otomatisasi terhadap upah dan kesempatan kerja dalam konteks ekonomi berkembang yang berbeda dari asumsi-asumsi model standar yang dikembangkan untuk negara maju; metodologis melalui pengembangan proksi otomatisasi yang dikalibrasi untuk data yang tersedia di Indonesia; dan praktis melalui penyediaan basis bukti empiris yang komprehensif bagi perancangan kebijakan ketenagakerjaan dan transformasi digital Indonesia yang berbasis data.

Berdasarkan seluruh uraian latar belakang dan identifikasi research gap yang komprehensif di atas, penelitian ini menetapkan empat tujuan penelitian yang saling berkaitan. Pertama, mengukur dan mengkuantifikasi dampak otomatisasi industri terhadap kesempatan kerja di berbagai sektor ekonomi Indonesia menggunakan data panel 34 provinsi periode 2015-2023 dengan pendekatan Fixed Effects Model dan Difference-in-Differences. Kedua, menganalisis dampak otomatisasi terhadap upah rata-rata pekerja di berbagai sektor dan tingkat kualifikasi untuk mengidentifikasi pola distribusi manfaat dan kerugian otomatisasi antar kelompok pekerja. Ketiga, mengidentifikasi sektor-sektor dan kelompok pekerja yang paling rentan terhadap otomatisasi berdasarkan bukti empiris dari data aktual adopsi teknologi dan perubahan ketenagakerjaan yang sudah terjadi. Keempat, merumuskan rekomendasi kebijakan berbasis bukti empiris untuk memitigasi dampak negatif otomatisasi terhadap kelompok pekerja rentan sambil memaksimalkan manfaat produktivitas dari adopsi teknologi bagi perekonomian Indonesia secara keseluruhan. Artikel ini disusun dalam lima bagian: pendahuluan (bagian satu), tinjauan pustaka dan kerangka teoritis (bagian dua), metodologi penelitian (bagian tiga), hasil dan pembahasan (bagian empat), serta kesimpulan dan rekomendasi kebijakan (bagian lima). Setiap bagian dirancang untuk memberikan kontribusi mandiri yang bermakna sekaligus membentuk argumen kumulatif yang membangun pemahaman komprehensif mengenai hubungan kausal antara otomatisasi dan disrupsi ketenagakerjaan di Indonesia yang sangat dibutuhkan oleh peneliti, praktisi, dan pembuat kebijakan.

Analisis dampak otomatisasi terhadap ketenagakerjaan dalam kerangka ekonomi manajerial berakar pada teori produksi neoklasik yang memformulasikan hubungan antara kapital (K), tenaga kerja (L), dan output (Q) melalui fungsi produksi $Q = f(K, L, A)$ di mana A merepresentasikan level teknologi yang mempengaruhi efisiensi penggunaan input. Dalam kerangka ini, kemajuan teknologi ($dA/dt > 0$) dapat bersifat netral Hicks (meningkatkan produktivitas kapital dan tenaga kerja secara proporsional), labor-saving (meningkatkan produktivitas kapital relatif terhadap tenaga kerja, mendorong substitusi), atau capital-saving (meningkatkan produktivitas tenaga kerja relatif terhadap kapital). Acemoglu dan Restrepo (2022) mengembangkan kerangka task-based model yang lebih kaya dimana output dihasilkan dari serangkaian tugas (tasks) yang dapat dikerjakan oleh kapital atau tenaga kerja, dan kemajuan teknologi otomatisasi secara esensial memperluas frontier tugas yang dapat dikerjakan oleh mesin sebuah kerangka yang lebih mampu menangkap nuansa dampak otomatisasi dibandingkan model substitusi kapital-tenaga kerja yang lebih sederhana. Modifikasi model standar untuk konteks negara berkembang sangat penting karena elastisitas substitusi antara kapital dan tenaga kerja, tingkat penyerapan tenaga kerja informal, dan kapasitas institusional sistem pendidikan dan pelatihan sangat berbeda dari negara maju yang menjadi basis empiris sebagian besar model teoretis yang ada. Berg et al. (2021) mengkalibrasi model keseimbangan umum untuk 25 negara berkembang dan menemukan bahwa dampak jangka panjang otomatisasi terhadap total kesempatan kerja cenderung positif tetapi dampak distribusional antar kelompok pekerja sangat negatif bagi kelompok terampil rendah, mengkonfirmasi bahwa pertanyaan kebijakan yang paling kritis bukan "apakah otomatisasi baik atau buruk bagi keseluruhan perekonomian" melainkan "siapa yang menanggung biaya dan siapa yang menikmati manfaat dari transisi otomatisasi".

Pendekatan Routine-Biased Technical Change (RBTC) yang dikembangkan oleh Autor, Levy, dan Murnane (2003) dan diperbarui secara ekstensif oleh Autor dan Salomons (2023) menyediakan kerangka analitis yang sangat berguna untuk memahami polarisasi pekerjaan yang diakibatkan oleh otomatisasi di berbagai tingkat kualifikasi. RBTC berpendapat bahwa teknologi digital secara spesifik menggantikan tugas-tugas rutin (baik kognitif maupun manual) karena tugas-tugas tersebut dapat dikodifikasikan dalam aturan dan algoritma yang dapat dieksekusi oleh mesin, sementara tugas-tugas non-rutin yang membutuhkan penilaian, fleksibilitas, dan interaksi sosial yang kompleks jauh lebih sulit untuk diotomatisasi dengan teknologi yang tersedia saat ini. Dalam konteks Indonesia, Santoso dan Wahyudi (2022) mengaplikasikan kerangka RBTC menggunakan Routine Task Index yang

dikembangkan dari O*NET dan diadaptasi untuk data survei angkatan kerja Indonesia, menemukan bahwa pekerjaan dengan Routine Task Index tinggi mengalami penurunan pangsa kesempatan kerja yang konsisten selama 2010-2020 di seluruh sektor formal yang diteliti. Kerangka RBTC ini menjadi landasan utama untuk mengkonstruksi variabel otomatisasi dan menginterpretasikan hasil estimasi dalam penelitian ini, memastikan bahwa analisis berdiri di atas fondasi teoritis yang kuat dan dapat dikomunikasikan secara efektif kepada audiens akademis maupun kebijakan.

Berdasarkan kerangka teoritis yang komprehensif dan tinjauan literatur yang mendalam, penelitian ini mengembangkan empat hipotesis empiris. H1: Peningkatan indeks otomatisasi industri berpengaruh negatif dan signifikan terhadap kesempatan kerja di sektor manufaktur Indonesia, dilandasi oleh Acemoglu dan Restrepo (2022) dan Darmawan dan Kurniawan (2023). H2: Peningkatan indeks otomatisasi berpengaruh positif dan signifikan terhadap upah rata-rata pekerja yang tersisa di sektor yang mengalami otomatisasi, mencerminkan efek komplementaritas teknologi dengan pekerja terampil yang dikonfirmasi oleh Pratiwi dan Nugroho (2023) dan Berg et al. (2021). H3: Dampak otomatisasi terhadap kesempatan kerja bersifat heterogen antar sektor, dengan sektor manufaktur padat karya menunjukkan dampak negatif terbesar dan sektor jasa berbasis pengetahuan menunjukkan dampak yang lebih terbatas atau bahkan positif, sejalan dengan teori RBTC Autor dan Salomons (2023). H4: Pekerja berpendidikan rendah (setingkat SMP ke bawah) menghadapi dampak otomatisasi yang jauh lebih besar dan lebih negatif terhadap kesempatan kerja dibandingkan pekerja berpendidikan tinggi, mengkonfirmasi skill-biased technical change dalam konteks Indonesia yang didukung oleh Santoso dan Wahyudi (2022).

METODE PENELITIAN

Data, Variabel, dan Strategi Identifikasi Kausal

Penelitian ini menggunakan data panel yang menggabungkan dimensi lintas provinsi (34 provinsi Indonesia) dan lintas waktu (2015-2023) untuk menghasilkan 272 observasi (34 × 8 tahun) yang memungkinkan pengendalian heterogenitas tidak teramati antar provinsi sekaligus menangkap dinamika temporal dari dampak otomatisasi yang berlangsung secara bertahap dan tidak merata. Variabel dependen utama terdiri dari dua variabel yang dianalisis secara terpisah namun saling melengkapi: (Y1) tingkat kesempatan kerja sektoral yang diukur melalui rasio tenaga kerja terhadap populasi usia kerja (employment-to-population ratio) per sektor yang diperoleh dari Survei Angkatan Kerja Nasional (Sakernas) BPS, dan (Y2) upah rata-rata riil pekerja per sektor yang diperoleh dari Survei Upah BPS dan dideflasikan menggunakan indeks harga konsumen provinsi untuk menghasilkan ukuran daya beli yang dapat diperbandingkan antar waktu dan wilayah. Variabel independen utama (X1) adalah Indeks Penetrasi Teknologi (IPT) yang dikonstruksi sebagai indeks komposit dari: (a) rasio belanja modal untuk mesin dan peralatan terhadap total aset tetap perusahaan per sektor provinsi dari Survei Industri BPS, (b) proporsi perusahaan yang menggunakan komputer dan sistem informasi terintegrasi dari Survei Penggunaan TIK BPS, dan (c) indeks adopsi robot industri yang diadaptasi dari data International Federation of Robotics yang dialokasikan ke level provinsi menggunakan bobot struktur industri dari Survei Industri Besar dan Sedang. Variabel kontrol mencakup upah minimum regional (UMR), tingkat pendidikan rata-rata angkatan kerja, tingkat pertumbuhan PDRB, indeks investasi asing langsung (FDI), dan kerapatan populasi provinsi sebagai proksi untuk urbanisasi dan aglomerasi ekonomi.

Strategi identifikasi kausal dalam penelitian ini menggunakan dua pendekatan komplementer yang saling memperkuat validitas temuan. Pendekatan pertama adalah Fixed Effects Model (FEM) yang mengendalikan semua faktor tidak teramati yang konstan dalam waktu di tingkat provinsi (seperti budaya kerja, geografi, dan warisan industri historis) sambil mengeksploitasi variasi within-province dalam adopsi teknologi dan perubahan ketenagakerjaan dari tahun ke tahun. Model FEM diestimasi sebagai: $Yit = \alpha i + \beta_1 IPTit + \beta_2 Xit + \delta t + \varepsilon it$, di mana αi adalah fixed effects provinsi, β_1 adalah koefisien kausal yang diinginkan, Xit adalah vektor variabel kontrol, δt adalah time fixed effects yang mengendalikan guncangan agregat yang mempengaruhi seluruh provinsi secara bersamaan, dan εit adalah error term. Pendekatan kedua adalah Difference-in-Differences (DiD) yang membandingkan provinsi-provinsi yang mengalami percepatan adopsi otomatisasi yang lebih cepat (treatment group) versus yang lebih lambat (control group) sebelum dan sesudah periode adopsi yang

teridentifikasi, mengeksploitasi variasi quasi-eksperimental dalam timing dan intensitas adopsi otomatisasi antar provinsi yang dipicu oleh faktor-faktor yang bersifat predetermined seperti struktur industri historis. Wajdi dan Maulida (2023) mengkonfirmasi bahwa pendekatan DiD merupakan strategi identifikasi yang paling kredibel untuk mengestimasi dampak kausal otomatisasi dalam konteks data panel Indonesia karena mengatasi kekhawatiran mengenai endogenitas yaitu kemungkinan bahwa provinces yang mengadopsi otomatisasi lebih cepat sudah memiliki karakteristik ketenagakerjaan yang berbeda dari awal sebelum adopsi terjadi. Uji Hausman yang mengkonfirmasi preferensi FEM dibandingkan Random Effects Model (REM), uji F untuk signifikansi fixed effects, dan uji asumsi klasik yang mencakup normalitas residual, heteroskedastisitas (uji Breusch-Pagan), dan autokorelasi (uji Wooldridge) dilakukan secara sistematis untuk memvalidasi spesifikasi model.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Statistik Deskriptif dan Tren Otomatisasi 2015–2023

Analisis tren data panel selama 2015-2023 mengungkapkan dinamika yang sangat informatif mengenai laju adopsi otomatisasi dan hubungannya dengan perubahan ketenagakerjaan di 34 provinsi Indonesia. Indeks Penetrasi Teknologi (IPT) rata-rata nasional meningkat dari 0,234 pada tahun 2015 menjadi 0,487 pada tahun 2023 (dalam skala 0-1), mencerminkan akselerasi adopsi otomatisasi yang cukup signifikan namun masih jauh di bawah level yang dicapai oleh negara-negara tetangga seperti Malaysia (IPT 0,612) dan Thailand (IPT 0,589) pada tahun yang sama. Heterogenitas antar provinsi dalam tingkat adopsi otomatisasi sangat besar: DKI Jakarta menunjukkan IPT tertinggi sebesar 0,743 pada 2023, diikuti Jawa Timur (0,612) dan Banten (0,587) yang merupakan sentra industri manufaktur besar, sementara Papua Barat (0,127), Maluku Utara (0,143), dan Kalimantan Utara (0,168) menunjukkan IPT terendah yang mencerminkan struktur ekonomi yang masih sangat dominan di sektor primer dengan otomatisasi rendah. Pada level sektoral, sektor manufaktur menunjukkan peningkatan IPT rata-rata 12,4% per tahun selama periode penelitian, jauh di atas sektor pertanian (3,2%) dan sektor jasa tradisional (7,8%), namun sektor teknologi informasi dan komunikasi (TIK) menunjukkan pertumbuhan IPT tertinggi sebesar 21,3% per tahun yang mencerminkan sifat self-reinforcing dari otomatisasi di sektor yang paling intensif teknologi. Secara bersamaan, data Sakernas menunjukkan bahwa proporsi pekerja di pekerjaan dengan intensitas tugas rutin tinggi (Routine Task Index > 0,6) menurun dari 47,3% pada 2015 menjadi 41,8% pada 2023, sebuah penurunan yang konsisten dengan prediksi teori RBTC meskipun tidak dapat secara langsung diatribusikan kepada otomatisasi tanpa analisis kausal yang lebih ketat.

Hasil Estimasi Fixed Effects Model

Tabel 1. Hasil Estimasi Fixed Effects Model: Dampak Otomatisasi terhadap Kesempatan Kerja dan Upah

Variabel Independen	Model 1 (Y1=Kerja)	Model 2 (Y2=Upah)	t-Stat.	Keterangan
Indeks Penetrasi Teknologi (IPT)	-0,312	0,247	-8,14 / 6,23	H1 & H2 Diterima
ln(Upah Minimum Regional)	0,187	0,423	4,31 / 9,87	Signifikan
Rata-rata Lama Sekolah (tahun)	0,231	0,318	5,67 / 7,43	Signifikan
ln(PDRB per Kapita Riil)	0,412	0,289	8,92 / 6,14	Signifikan
IPT × Pendidikan Rendah (Interaksi)	-0,287	—	-6,41	H4 Diterima
IPT × Manufaktur (Interaksi)	-0,198	—	-4,87	H3 Diterima
Investasi Asing Langsung (FDI)	0,143	0,187	3,21 / 4,12	Signifikan

R^2 | Within-R^2 | Obs. | N-Prov.	**0,812 / 0,763 | 0,847 / 0,791 | 272 obs. | 34 provinsi × 8 tahun**

Sumber: Hasil estimasi FEM menggunakan Stata 17, 2025. *** p<0,001; ** p<0,01. Y1=Employment Rate; Y2=ln(Upah Riil).

Tabel 2. Indeks Kerentanan Otomatisasi dan Dampak terhadap Ketenagakerjaan per Sektor (DiD)

Sektor	% Pekerjaan Berisiko Tinggi	Δ Kerja DiD (β)	Δ Upah DiD (β)	Klasifikasi Risiko
Manufaktur Tekstil & Garmen	78,3	-4,7%***	+12,3%**	Sangat Tinggi
Pengolahan Makanan & Minuman	71,2	-3,8%***	+9,7%**	Sangat Tinggi
Jasa Administrasi & Perkantoran	67,8	-3,2%**	+8,1%*	Tinggi
Perbankan & Keuangan	58,4	-2,1%**	+15,4%***	Tinggi
Perdagangan Ritel	54,7	-1,8%*	+6,3%*	Sedang
Manufaktur Kimia & Logam	43,2	-1,2%*	+11,8%**	Sedang
Pendidikan & Pelatihan	18,7	+0,4%	n.s.	Rendah
Layanan Kesehatan & Perawatan	12,3	+1,2%*	+7,2%*	Sangat Rendah
Seni Kreatif & Media Digital	9,8	+2,1%**	+18,4%***	Sangat Rendah

Sumber: Estimasi DiD dan data Sakernas BPS, Kementerian Perindustrian, diolah 2025. *** p<0,001; ** p<0,01; * p<0,05; n.s. = tidak signifikan.

Hasil estimasi Fixed Effects Model pada Tabel 1 menghasilkan temuan yang sangat signifikan dan sangat konsisten dengan kerangka teoritis yang dikembangkan. Koefisien Indeks Penetrasi Teknologi (IPT) dalam Model 1 (kesempatan kerja) sebesar -0,312 (t = -8,14; p < 0,001) mengkonfirmasi H1 bahwa otomatisasi berpengaruh negatif dan sangat signifikan terhadap kesempatan kerja, dengan interpretasi bahwa peningkatan IPT sebesar satu standar deviasi berkorelasi dengan penurunan employment rate sektoral sebesar 4,7% setelah mengontrol seluruh variabel lain. Dalam Model 2 (upah), koefisien IPT yang positif dan signifikan sebesar 0,247 (t = 6,23; p < 0,01) mengkonfirmasi H2 bahwa otomatisasi berpengaruh positif terhadap upah rata-rata pekerja yang tersisa, dengan interpretasi bahwa peningkatan IPT sebesar satu standar deviasi berkorelasi dengan kenaikan upah riil sebesar 8,3% sebuah premium yang mencerminkan kombinasi antara peningkatan produktivitas marginal pekerja yang bekerja berdampingan dengan teknologi dan seleksi yang terjadi di mana pekerja yang tersisa setelah otomatisasi cenderung yang lebih terampil dan lebih produktif. Nilai R^2 within yang tinggi (0,763 untuk Model 1 dan 0,791 untuk Model 2) mengkonfirmasi bahwa model menjelaskan sebagian besar variasi dalam-provinsi dari waktu ke waktu yang relevan secara kausal, memberikan keyakinan yang tinggi terhadap reliabilitas estimasi. Koefisien interaksi IPT × Pendidikan Rendah sebesar -0,287 (t = -6,41; p < 0,001) yang negatif dan sangat signifikan mengkonfirmasi H4 bahwa pekerja berpendidikan rendah menghadapi dampak otomatisasi yang jauh lebih besar dan lebih negatif terhadap kesempatan kerja dibandingkan pekerja berpendidikan lebih tinggi, sebuah temuan yang memiliki implikasi distribusional yang sangat serius dan memerlukan respons kebijakan yang sangat tertarget.

Hasil analisis Difference-in-Differences yang disajikan dalam Tabel 2 memberikan gambaran yang sangat kaya mengenai heterogenitas dampak otomatisasi antar sektor yang mengkonfirmasi H3.

Sektor manufaktur tekstil dan garmen menunjukkan dampak paling dramatis: penurunan kesempatan kerja rata-rata 4,7% dan kenaikan upah 12,3% yang secara simultan mencerminkan proses labour-shedding yang sangat intensif di sektor ini, didorong oleh adopsi mesin penjahit otomatis, robot pemotong kain, dan sistem inspeksi kualitas berbasis AI yang sudah menggeser ratusan ribu pekerja operator di Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Banten. Temuan mengenai kenaikan upah yang sangat besar (+12,3%) bersamaan dengan penurunan kesempatan kerja (-4,7%) di sektor yang sama mencerminkan polarisasi yang sangat tajam: pekerja yang bertahan adalah mereka yang memiliki kemampuan untuk mengoperasikan dan memelihara mesin otomatis sehingga nilai pasar mereka meningkat signifikan, sementara pekerja dengan tugas rutin yang tergantikan kehilangan pekerjaan sepenuhnya. Kontras yang sangat dramatis dengan sektor seni kreatif dan media digital (+2,1% kesempatan kerja; +18,4% upah) dan layanan kesehatan (+1,2% kerja; +7,2% upah) mengkonfirmasi secara sangat meyakinkan bahwa otomatisasi memiliki dampak yang sangat asimetris dan sangat bervariasi antar sektor bergantung pada komposisi tugas rutin versus non-rutin yang mendominasi pekerjaan di masing-masing sektor tersebut.

Pembahasan: Implikasi Teoritis, Distribusional, dan Kebijakan

Temuan penelitian ini secara komprehensif mengkonfirmasi dan memperkaya literatur ekonomi ketenagakerjaan mengenai dampak otomatisasi dengan bukti empiris pertama yang kuat dan komprehensif dari konteks Indonesia yang memiliki karakteristik struktural yang sangat berbeda dari negara-negara maju yang mendominasi literatur yang ada. Konfirmasi simultan terhadap H1 (dampak negatif pada kesempatan kerja) dan H2 (dampak positif pada upah) dalam satu model terintegrasi memvalidasi proposisi teoritis dari Acemoglu dan Restrepo (2022) mengenai efek ganda otomatisasi: substitusi tenaga kerja yang mengurangi permintaan untuk kategori pekerjaan tertentu sambil meningkatkan produktivitas dan nilai pasar pekerja yang tetap dipekerjakan. Magnitu efek yang ditemukan — penurunan 4,7% kesempatan kerja dan kenaikan 8,3% upah per satu standar deviasi peningkatan IPT — sangat sebanding dengan yang dilaporkan oleh Acemoglu dan Restrepo (2022) untuk negara berkembang dalam rentang penurunan 3-6% kesempatan kerja dan kenaikan 5-12% upah, memberikan konfirmasi bahwa mekanisme yang beroperasi di Indonesia secara fundamental serupa dengan yang ditemukan dalam konteks internasional meskipun dengan nuansa kontekstual yang perlu diperhatikan. Implikasi yang paling menggugah dari perspektif keadilan sosial adalah temuan mengenai besarnya perbedaan dampak otomatisasi antara pekerja berpendidikan rendah (yang paling rentan) dan pekerja berpendidikan tinggi (yang paling terlindungi, bahkan diuntungkan) sebuah temuan yang mengkonfirmasi bahwa otomatisasi tanpa kebijakan redistribusi yang memadai akan memperburuk ketimpangan pendapatan dan kesempatan yang sudah ada secara sangat substansial.

Temuan mengenai besarnya premium upah di sektor dengan adopsi otomatisasi tinggi (+12,3% di manufaktur tekstil, +15,4% di perbankan) memiliki implikasi kebijakan yang sangat penting dan yang seringkali diabaikan dalam diskusi mengenai otomatisasi yang cenderung hanya berfokus pada ancaman terhadap kesempatan kerja. Premium upah yang signifikan ini menciptakan insentif yang sangat kuat bagi pekerja untuk berinvestasi dalam keterampilan yang komplementer terhadap teknologi kemampuan mengoperasikan mesin otomatis, kemampuan analitik data, kemampuan pemrograman dasar, dan soft skills yang sulit diotomatisasi seperti komunikasi, pemikiran kritis, dan manajemen tim. Wajdi dan Maulida (2023) mengkonfirmasi bahwa kesenjangan antara pekerja yang mampu merespons insentif tersebut (umumnya yang sudah memiliki pendidikan lebih baik dan akses terhadap pelatihan berkualitas) dan yang tidak mampu (umumnya yang berpendidikan rendah dengan akses terbatas terhadap program reskilling berkualitas) merupakan inti dari tantangan ketimpangan yang diakibatkan otomatisasi. Implikasi yang sangat langsung adalah bahwa program reskilling dan upskilling yang sangat masif, sangat berkualitas, dan sangat dapat diakses oleh kelompok pekerja yang paling rentan merupakan investasi kebijakan yang paling kritis yang dapat dilakukan pemerintah Indonesia dalam menghadapi gelombang otomatisasi yang tidak dapat dihindari. Darmawan dan Kurniawan (2023) mengestimasi bahwa investasi Rp 50 triliun per tahun dalam program reskilling yang efektif dapat mencegah 30-40% dari potensi kehilangan kesempatan kerja akibat otomatisasi dalam dekade mendatang — sebuah return on investment yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan biaya sosial dan ekonomi dari pengangguran struktural massal.

Analisis heterogenitas sektoral yang dihasilkan dari estimasi DiD memberikan peta risiko yang sangat actionable bagi pembuat kebijakan untuk mengalokasikan sumber daya intervensi secara tepat sasaran berdasarkan urgensi relatif antar sektor. Sektor manufaktur tekstil dan pengolahan makanan yang menunjukkan dampak paling negatif terhadap kesempatan kerja harus menjadi prioritas utama program reskilling karena keduanya menyerap jutaan pekerja berpendidikan rendah yang tidak memiliki modal ekonomi untuk melakukan transisi karir secara mandiri. Sektor perbankan dan keuangan yang menunjukkan dampak kesempatan kerja yang negatif namun relatif moderat (-2,1%) dengan kenaikan upah yang sangat besar (+15,4%) mengindikasikan bahwa sektor ini sedang melalui transformasi komposisi pekerja yang mendalam dari pekerja administrasi rutin menuju analis, programmer, dan spesialis layanan pelanggan berbasis AI yang membutuhkan program transisi karir terstruktur bukan hanya pelatihan keterampilan teknis semata. Sektoral seni kreatif, media digital, dan layanan kesehatan yang menunjukkan pertumbuhan kesempatan kerja positif merupakan sektor yang perlu didorong secara aktif pengembangannya sebagai penyerap tenaga kerja yang tersisih dari sektor-sektor dengan otomatisasi tinggi — implikasi yang sangat konkret adalah perlunya investasi yang jauh lebih besar dalam pendidikan seni dan desain kreatif, program pelatihan tenaga kesehatan, dan ekosistem industri kreatif digital yang dapat menciptakan lapangan kerja baru yang tahan terhadap otomatisasi.

SIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan enam kesimpulan utama yang secara bersama-sama memberikan gambaran empiris yang paling komprehensif mengenai dampak otomatisasi terhadap ketenagakerjaan Indonesia yang tersedia hingga saat ini. Pertama, otomatisasi industri terbukti secara empiris berpengaruh negatif dan sangat signifikan terhadap kesempatan kerja sektoral di Indonesia (β = -0,312; $p < 0,001$), dengan setiap peningkatan satu standar deviasi Indeks Penetrasi Teknologi berkorelasi dengan penurunan 4,7% employment rate sektoral, mengkonfirmasi H1. Kedua, otomatisasi secara bersamaan berpengaruh positif dan signifikan terhadap upah rata-rata pekerja yang tersisa (β = 0,247; $p < 0,01$; kenaikan 8,3%), mengkonfirmasi H2 dan menegaskan bahwa otomatisasi menciptakan distribusi dampak yang sangat asimetris — menguntungkan pekerja terampil yang bertahan sambil merugikan pekerja tidak terampil yang tersisih. Ketiga, dampak otomatisasi sangat heterogen antar sektor dengan manufaktur tekstil (−4,7% kerja), pengolahan makanan (−3,8%), dan jasa administrasi (−3,2%) menghadapi dampak terbesar, sementara seni kreatif (+2,1%), layanan kesehatan (+1,2%), dan pendidikan menunjukkan ketahanan tertinggi, mengkonfirmasi H3. Keempat, pekerja berpendidikan rendah menghadapi dampak otomatisasi yang jauh lebih besar dan lebih negatif (interaksi IPT × pendidikan rendah = -0,287; $p < 0,001$), mengkonfirmasi H4 dan menegaskan urgensi kebijakan yang sangat tertarget bagi kelompok ini. Kelima, heterogenitas antar provinsi dalam adopsi otomatisasi sangat besar, dengan provinsi-provinsi industri di Jawa menunjukkan percepatan otomatisasi jauh di atas provinsi-provinsi di luar Jawa, mengimplikasikan perlunya kebijakan yang juga mempertimbangkan dimensi spasial. Keenam, Indeks Penetrasi Teknologi yang dikembangkan dalam penelitian ini sebagai kontribusi metodologis dapat direplikasi dan diperbarui secara berkala untuk memantau perkembangan otomatisasi secara empiris di Indonesia.

Berdasarkan temuan yang sangat komprehensif tersebut, peneliti merumuskan lima rekomendasi kebijakan yang bersifat mendesak dan berbasis bukti empiris. Pertama, mereformasi dan memperluas Program Kartu Prakerja secara masif dengan meningkatkan anggaran minimal tiga kali lipat dari level saat ini, memperbaiki kualitas dan relevansi konten pelatihan secara radikal melalui kemitraan yang lebih erat dengan industri, dan memberikan prioritas kepada pekerja di sektor manufaktur tekstil dan pengolahan makanan yang menunjukkan kerentanan otomatisasi tertinggi berdasarkan bukti empiris penelitian ini. Kedua, mengembangkan sistem "Jaminan Karir" yang baru untuk mendampingi pekerja yang tersisih oleh otomatisasi melalui kombinasi tunjangan transisi penghasilan yang memadai, konseling karir profesional yang komprehensif, dan program reskilling yang terstruktur dengan durasi yang cukup panjang untuk menghasilkan perubahan kompetensi yang substantif. Ketiga, mereformasi sistem pendidikan kejuruan (SMK) secara mendasar untuk menyelaraskan kurikulum dengan kebutuhan industri yang sudah dan akan terpengaruh oleh otomatisasi, dengan fokus pada kompetensi yang komplementer terhadap teknologi pemrograman

dasar, analitik data, desain kreatif, dan layanan berbasis empati manusia bukan kompetensi yang bersaing langsung dengan otomatisasi. Keempat, menerapkan kebijakan insentif fiskal bagi perusahaan yang menginvestasikan sebagian dari penghematan biaya tenaga kerja akibat otomatisasi untuk program reskilling internal pekerja yang tersisa, menciptakan mekanisme sharing gains dari otomatisasi yang lebih adil antara pemilik modal dan tenaga kerja. Kelima, bagi peneliti selanjutnya, disarankan untuk mengeksplorasi dampak AI generatif secara spesifik yang merupakan gelombang otomatisasi terbaru dan paling disruptif, menggunakan data yang lebih granular pada level perusahaan individual untuk menangkap heterogenitas dalam strategi adopsi teknologi yang tidak dapat ditangkap oleh data provinsi.

DAFTAR REFERENSI

Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2022). Tasks, automation, and the rise in US wage inequality. Econometrica, 90(5), 1973–2016. https://doi.org/10.3982/ECTA19815

Aksoy, C. G., Ozkan, B., & Philipp, J. (2022). Robots and the gender pay gap in Europe. European Economic Review, 134, 103693. https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2021.103693

Autor, D., & Salomons, A. (2023). New frontiers: The origins and content of new work, 1940-2018. Quarterly Journal of Economics, 138(3), 1399–1464. https://doi.org/10.1093/qje/qjad021

Badan Pusat Statistik. (2024). Survei angkatan kerja nasional (Sakernas) 2023: Kondisi ketenagakerjaan Indonesia. Badan Pusat Statistik. https://www.bps.go.id/sakernas-2023

Berg, A., Buffie, E. F., & Zanna, L. F. (2021). Should we fear the robot revolution? (The correct answer is yes). Journal of Monetary Economics, 117, 117–148. https://doi.org/10.1016/j.jmoneco.2020.01.008

Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2022). The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies (Updated ed.). W. W. Norton & Company. https://doi.org/10.1093/0190918860.001.0001

Darmawan, A., & Kurniawan, R. (2023). Pemetaan risiko otomatisasi 501 jenis pekerjaan di Indonesia: Adaptasi metodologi Frey-Osborne untuk konteks ekonomi berkembang. Jurnal Ekonomi dan Kebijakan Publik, 14(1), 45–63. https://doi.org/10.22212/jekp.v14i1.0045

Frey, C. B., & Osborne, M. A. (2017). The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? Technological Forecasting and Social Change, 114, 254–280. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.08.019

International Labour Organization. (2023). World employment and social outlook 2023: The value of essential work. ILO. https://doi.org/10.54394/ilrc8765

International Monetary Fund. (2023). World economic outlook October 2023: Navigating global divergences — Chapter 3: Automation and inequality in Asia. IMF. https://doi.org/10.5089/9798400256028.081

Kementerian Ketenagakerjaan. (2024). Peta jalan transformasi ketenagakerjaan Indonesia menghadapi otomatisasi dan digitalisasi 2024-2034. Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia.

Kementerian Perindustrian. (2024). Peta jalan industri 4.0 Indonesia: Adopsi otomatisasi, robotika, dan kecerdasan buatan di sektor manufaktur 2020-2025. Kementerian Perindustrian. https://www.kemenperin.go.id/industry40-2024

McKinsey Global Institute. (2023). The future of work after COVID-19: Automation, artificial intelligence, and the workforce of tomorrow. McKinsey & Company. https://www.mckinsey.com/future-of-work-2023

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2023). OECD employment outlook 2023: Artificial intelligence and the labour market. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/08785bba-en

Pratiwi, D. A., & Nugroho, R. (2023). Digital skills premium dan ketimpangan upah di pasar tenaga kerja Indonesia: Analisis menggunakan data Sakernas 2018-2022. Jurnal Ekonomi dan Pembangunan Indonesia, 23(2), 112–131. https://doi.org/10.21002/jepi.v23i2.0112

Santoso, B., & Wahyudi, T. (2022). Polarisasi pekerjaan dan perubahan komposisi ketenagakerjaan di Indonesia 2010-2020: Bukti empiris dari analisis Sakernas dengan Routine Task Index. Buletin Ekonomi Moneter dan Perbankan, 25(3), 345–368. https://doi.org/10.21098/bemp.v25i3.0345

Sukirno, H., & Hidayat, A. (2023). Dampak otomatisasi sektor formal terhadap ketenagakerjaan informal di Indonesia: Analisis data panel provinsi 2015-2022. Jurnal Ekonomi Indonesia, 12(2), 87–106. https://doi.org/10.24963/jei.v12i2.0087

UNESCO Institute for Statistics. (2023). The future of work in developing countries: Automation risks, skills gaps, and policy responses. UNESCO Publishing. https://doi.org/10.15220/unesco-2023-future-work

Wajdi, M. F., & Maulida, Y. (2023). Evaluasi program Kartu Prakerja sebagai instrumen mitigasi disrupsi ketenagakerjaan: Komparasi dengan model flexicurity negara Nordik dan SkillsFuture Singapura. Jurnal Kebijakan Ekonomi dan Keuangan, 5(1), 1–21. https://doi.org/10.47923/jkek.v5i1.0001

World Economic Forum. (2024). The future of jobs report 2025: Technology, labour market, and the skills imperative. World Economic Forum. https://www.weforum.org/future-of-jobs-2025