

Simulasi Agent-Based dalam Prediksi *Turnover* dan Strategi Retensi Karyawan

Asfa Davissyah ^{*1}, Farel Indra Januarta ², Muhammad Ainul Yaqin ³

¹ Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang; 230605110186@student.uin-malang.ac.id

² Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang; 230605110115@student.uin-malang.ac.id

³ Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang; yaqinov@ti.uin-malang.ac.id

Abstrak: Tingginya tingkat perputaran (*turnover*) karyawan menimbulkan tantangan operasional yang signifikan pada industri padat karya seperti peternakan ayam. Penelitian ini menerapkan metode *Agent-Based Modeling* (ABM) menggunakan sistem ERP berbasis *spreadsheet* untuk memprediksi dinamika *turnover* dan mengevaluasi efektivitas strategi retensi. Menggunakan data historis Human Capital, kami mensimulasikan perilaku 200 agen heterogen selama periode 24 bulan di bawah tiga skenario eksperimental: Baseline (Kontrol), Bonus Finansial, dan Jenjang Karir (*Career pathing*). Simulasi menunjukkan bahwa penerapan *Career pathing* menghasilkan penurunan tingkat *turnover* tahunan dari 70,65% (skenario kontrol) menjadi 60,87%, yaitu berkurang sebesar 9,78 poin persentase, sehingga menjadikannya intervensi paling efektif secara operasional. Temuan ini sejalan dengan literatur yang menyatakan bahwa pengembangan profesional mengurangi intensi keluar karyawan. Namun, analisis biaya-manfaat mengungkapkan sebuah paradoks: penerapan *Career pathing* secara universal menyebabkan defisit finansial yang masif akibat tingginya biaya retensi, sedangkan skenario Kontrol justru paling efisien secara finansial meskipun tingkat atrisinya tinggi. Studi ini menyimpulkan bahwa meskipun insentif non-finansial efektif menstabilkan tenaga kerja, penerapannya harus ditargetkan secara selektif menggunakan pendekatan berbasis data untuk menjamin kelayakan finansial.

Keywords: Manajemen Sumber Daya Manusia (SDM), Simulasi Berbasis Agen, *Turnover* Karyawan, Strategi Retensi, Pengembangan Karier

DOI: <https://doi.org/10.47134/jacis.v6i1.157>

*Correspondensi: Asfa Davissyah

Email: 230605110186@student.uin-malang.ac.id

Receive: 5 Desember 2025

Accepted: 10 Desember 2025

Published: 12 Desember 2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstrak: High employee *turnover* poses significant operational challenges in labor-intensive industries such as poultry farming. This study utilizes *Agent-Based Modeling* (ABM) within a custom *spreadsheet*-based ERP environment to predict *turnover* dynamics and evaluate the efficacy of retention strategies. Using historical Human Capital data, we simulated the behavior of 200 heterogeneous agents over a 24-month period under three experimental scenarios: Baseline (Control), Financial Bonus, and *Career pathing*. The simulation results indicate that *Career pathing* was operationally the most effective intervention, reducing the annualized *turnover* rate to 60.87%, significantly lower than the Control scenario (70.65%). This finding aligns with literature suggesting that professional development reduces *turnover* intention. However, a cost-benefit analysis revealed a critical paradox: the universal implementation of *Career pathing* resulted in a massive financial deficit due to high retention costs, whereas the Control scenario remained the most financially efficient despite high attrition. The study concludes that while non-financial incentives effectively stabilize the workforce, they must be selectively targeted

using data-driven approaches rather than applied universally to ensure financial viability.

Keywords: Human Capital Management (HCM), Agent-Based Simulation, Employee *Turnover*, Retention Strategy, *Career pathing*

PENDAHULUAN

Turnover karyawan merupakan tantangan kritis yang mengancam stabilitas operasional dan efisiensi biaya, khususnya pada industri padat karya seperti peternakan ayam. Tingkat pergantian staf yang tinggi tidak hanya memicu eskalasi biaya rekrutmen dan pelatihan, tetapi juga mendisrupsi konsistensi perawatan ternak yang berdampak langsung pada produktivitas [1]. Meskipun data historis karyawan yang mencakup pola perilaku dan kinerja tersimpan dalam sistem administrasi, potensi data ini sering kali terabaikan. Kompleksitas format data dalam sistem manajemen sederhana seperti *Enterprise Resource Planning* (ERP) berbasis *spreadsheet* sering kali menjadi hambatan dalam pemanfaatannya untuk prediksi risiko *turnover* yang akurat [1].

Isu utama dalam manajemen tenaga kerja saat ini adalah keterbatasan metode analisis tradisional dalam menangkap heterogenitas perilaku individu dan interaksi dinamis antara insentif dengan keputusan keluar-masuk karyawan. Pendekatan konvensional sering gagal memodelkan fenomena *emergent* dari interaksi mikro antar-karyawan[2]. Di sisi lain, pelaksanaan eksperimen langsung di lapangan untuk menguji strategi retensi, seperti kenaikan bonus atau restrukturisasi jenjang karir, memiliki risiko gangguan operasional dan biaya yang tinggi. Oleh karena itu, terdapat kebutuhan mendesak akan pendekatan komputasional yang mampu mensimulasikan dampak kebijakan pada tingkat individu sebelum diimplementasikan secara nyata.

Agent-Based Modeling (ABM) menawarkan solusi metodologis yang unggul untuk mengatasi kesenjangan tersebut[3]. Berbeda dengan simulasi berbasis persamaan (*System Dynamics*), ABM mampu memodelkan entitas individu ("agen") yang memiliki otonomi keputusan dan perilaku yang beragam[4]. Fleksibilitas ini memungkinkan pemodelan preferensi tenaga kerja yang kompleks terhadap berbagai insentif[4][5]. Dalam konteks strategi retensi, literatur menegaskan bahwa intervensi pengembangan profesional memiliki korelasi positif dengan loyalitas karyawan. Sementara itu peluang pengembangan karir (*career pathing*) dan pelatihan berkelanjutan secara signifikan mereduksi intensi *turnover*, sering kali lebih efektif dibandingkan insentif finansial semata[6]. Namun, studi mengenai efektivitas kombinasi antara kejelasan karir dan bonus dalam skenario simulasi dinamis masih terbatas.

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada integrasi pemanfaatan data riil dari sistem ERP sederhana berbasis Excel ke dalam simulasi ABM yang canggih untuk sektor peternakan, sebuah sektor yang umumnya tertinggal dalam adopsi teknologi HR prediktif. Sinergi antara kecerdasan buatan dan ABM ternyata dapat membuka wawasan mendalam mengenai perilaku adaptif agen [7]. Penelitian ini mengisi kesenjangan literatur dengan membuktikan bahwa alat manajerial sederhana dapat diberdayakan melalui simulasi untuk menghasilkan strategi retensi yang *cost-effective* dan berbasis bukti [8].

Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi tingkat *turnover* dan mengevaluasi efektivitas intervensi retensi spesifik, yaitu *career pathing* dan bonus finansial, melalui simulasi berbasis

agen. Manfaat penelitian ini secara praktis adalah menyediakan kerangka kerja pengambilan keputusan bagi manajemen untuk merancang kebijakan SDM yang efisien tanpa risiko uji coba lapangan. Secara teoretis, studi ini berkontribusi pada literatur manajemen SDM dengan mendemonstrasikan validitas penggunaan data administratif *low-fidelity* dalam simulasi perilaku organisasi yang kompleks[9].

METODE

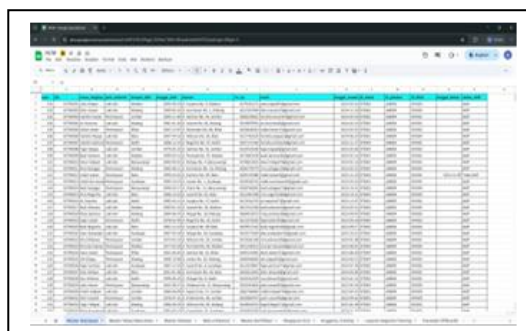
Desain Penelitian

Penelitian ini menerapkan desain eksperimental berbasis simulasi komputer menggunakan pendekatan *Agent-Based Modeling* (ABM). Pendekatan ini dipilih karena kemampuannya untuk memodelkan sistem yang kompleks dengan mensimulasikan interaksi antara agen otonom (karyawan) di dalam lingkungan kerja[10],[11]. Setiap agen dikarakterisasi oleh atribut heterogen yang spesifik, meliputi usia, masa kerja (*tenure*), jabatan, dan tingkat upah, yang secara empiris telah divalidasi sebagai prediktor utama dalam memproyeksikan perilaku *turnover* karyawan.

Melalui eksperimen *in silico*, model ini mengevaluasi dinamika keputusan agen untuk bertahan atau keluar sebagai respons terhadap dua variabel intervensi utama: kejelasan jenjang karir (*career pathing*) dan insentif finansial (bonus). Pemilihan variabel ini didasarkan pada literatur yang menunjukkan bahwa peluang pengembangan profesional dan pelatihan memiliki korelasi yang kuat dengan penurunan intensi keluar (*turnover intention*) dan peningkatan retensi karyawan. Desain ini memungkinkan pengamatan terhadap fenomena emergent pada tingkat organisasi yang muncul dari akumulasi keputusan mikro individu agen, yang sering kali sulit ditangkap oleh metode analisis linier tradisional.

Populasi dan Sampling

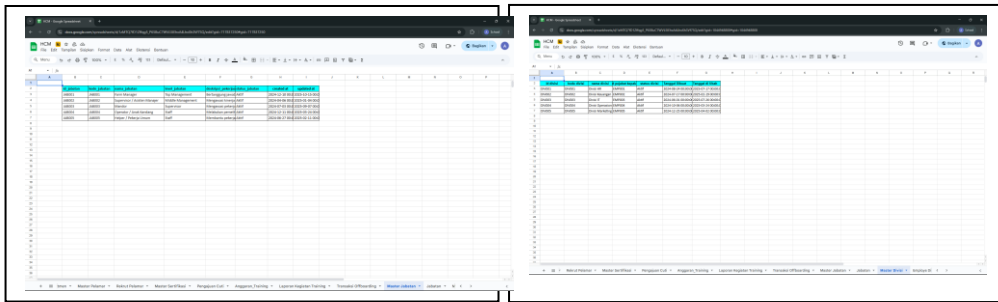
Basis data empiris yang digunakan untuk menginisialisasi parameter agen dalam simulasi ini bersumber dari sistem *Enterprise Resource Planning* (ERP) *Human Capital Management* (HCM) milik perusahaan peternakan ayam. Sistem ini dibangun berbasis *spreadsheet* dengan struktur basis data relasional untuk mencatat siklus hidup karyawan. Ekstraksi data dilakukan dari empat modul utama yang tersedia pada tabulasi sistem, yaitu:

The image shows a screenshot of a spreadsheet application, likely Microsoft Excel, displaying a large table of employee data. The table has multiple columns and rows, with some cells highlighted in blue. The data appears to be organized into several sections, possibly representing different attributes of the employees. The spreadsheet is viewed through a window with a standard operating system interface.

Gambar 1. Master Employee

1. Modul Atribut Individu (Sheet: *Master Employee*) Modul ini berfungsi sebagai sumber data primer untuk karakteristik agen. Variabel yang diekstraksi meliputi:
 - a) Identitas dan Demografi: *id_employee*, *jenis_kelamin*, dan *tanggal_lahir* (digunakan untuk menghitung variabel usia agen).

- b) Masa Kerja (*Tenure*): Dihitung berdasarkan selisih antara tanggal_masuk dengan waktu simulasi saat ini.
 - c) Status Kepegawaian: Atribut status_aktif (Aktif/Tidak Aktif) dan tanggal_keluar digunakan sebagai data historis (*ground truth*) untuk memvalidasi pola *turnover* agen dalam fase kalibrasi model.
2. Modul Struktur Organisasi (Sheet: Master Jabatan & Master Divisi) Modul ini memetakan hierarki dan lingkungan kerja agen, yang relevan untuk skenario intervensi *Career pathing*.



Gambar 2. Master Jabatan dan Master Divisi

- a) Data dari tab Master Jabatan digunakan untuk menentukan stratifikasi agen berdasarkan level_jabatan (misalnya: *Top Management*, *Middle Management*, Supervisor, hingga Staff). Atribut ini menentukan ambang batas kepuasan kerja dan aspirasi karir agen.
 - b) Data dari tab Master Divisi (*id_divisi*, *nama_divisi*) digunakan untuk mengelompokkan agen ke dalam klaster kerja spesifik (Operasional, HR, Keuangan, dll.) guna mensimulasikan dinamika interaksi antar-divisi.
3. Modul Kompensasi dan Insentif (Sheet: Master Gaji) Modul ini menjadi basis data untuk skenario intervensi Bonus. Data yang diekstraksi mencakup komponen remunerasi berdasarkan atribut tipe_komponen:

Gambar 3. Master Gaji

- a) Komponen Tetap: Seperti Gaji Pokok dan Tunjangan, yang membentuk keamanan finansial dasar agen.
- b) Komponen Variabel: Khususnya Bonus Kinerja dan Lembur. Logika perhitungan bonus diambil dari kolom rumus_perhitungan (misalnya, formula persentase dari nilai default) untuk mensimulasikan respons agen terhadap fluktuasi insentif finansial.

Integrasi data dari ketiga modul di atas memungkinkan pembentukan populasi agen sintetik yang merepresentasikan profil demografis, posisional, dan finansial karyawan secara akurat sesuai kondisi riil perusahaan.

Model Simulasi

Model simulasi dibangun dengan mengintegrasikan data kinerja bulanan karyawan dengan mesin probabilitas risiko (*risk probability engine*). Struktur model terdiri dari dua komponen utama yang saling terhubung dalam arsitektur *spreadsheet*, yaitu Pembaruan Status Agen (*State Update*) dan Logika Keputusan Agen (*Decision Logic*).

1. Pembaruan Status Dinamis (*Assessment_Bulanan*)

Komponen ini berfungsi sebagai *environment* yang memberikan umpan balik periodik terhadap kinerja agen. Data pada tab *Assessment* Bulanan mencatat variabel dinamis yang berubah setiap periode waktu t . Berdasarkan asumsi operasional peternakan, waktu aktif pekerjaan ditetapkan standar 22 hari kerja per bulan. Variabel produktivitas_rata2 dan tingkat_kepuasan diperlakukan sebagai input eksogen yang diisi secara manual berdasarkan hasil penilaian lapangan, merefleksikan kondisi psikologis dan kinerja nyata yang tidak selalu dapat dikuantifikasi oleh mesin secara otomatis.

Data kepuasan dari modul ini ditarik ke dalam modul analisis utama menggunakan fungsi pencarian referensi (*lookup function*) untuk memastikan sinkronisasi data antar-sheet: =VLOOKUP(id_karyawan, *Assessment_Range*, Col_Index, FALSE).

2. Simulasi Status Dinamis (*Assessment_Bulanan*)

Inti dari simulasi *Agent-Based* ini terletak pada tab *Master Analisis*, di mana setiap agen menghitung probabilitas keluarnya sendiri (*Presign*) berdasarkan seperangkat aturan heuristik yang memadukan faktor demografis dan psikologis.

Peneliti mendefinisikan algoritma pengambilan keputusan agen berdasarkan lima asumsi dasar perilaku tenaga kerja di sektor peternakan:

- a) Risiko Dasar (*Stochasticity*): Terdapat risiko acak alami sebesar 5% bahwa karyawan akan keluar tanpa memandang kondisi kerja.
- b) Sensitivitas Kepuasan: Kepuasan kerja di bawah ambang batas 60% meningkatkan risiko keluar.
- c) Faktor Usia: Agen berusia muda (<25 tahun) memiliki volatilitas lebih tinggi (+3% risiko) dibandingkan agen yang lebih tua (-3% risiko), merefleksikan tren eksplorasi karir pada demografi usia produktif awal.
- d) Masa Kerja (*Tenure*): Agen dengan masa kerja <1 tahun dianggap berada pada fase adaptasi kritis dengan risiko *turnover* lebih tinggi.
- e) Batas Probabilitas: Probabilitas dibatasi (*bounded*) antara 1% hingga 99% untuk mengakomodasi ketidakpastian.

Eksperimen Simulasi

Eksperimen dilakukan dengan menjalankan simulasi *Monte Carlo* pada populasi agen sebanyak $N=200$ karyawan selama periode waktu $T=24$ bulan. Setiap agen akan diperbarui

status kepegawaiannya ("Active" atau "Resign") secara iteratif pada setiap langkah waktu bulanan ($t=1, \dots, 24$). Eksperimen dibagi ke dalam tiga skenario utama untuk menguji efektivitas strategi retensi yang berbeda:

1. Kondisi Kontrol (*Baseline*)

Skenario ini merepresentasikan kondisi operasional standar tanpa intervensi tambahan. Probabilitas *turnover* agen *Presign* pada setiap bulan dihitung murni berdasarkan fungsi risiko dasar yang telah didefinisikan sebelumnya di (persamaan risiko demografis dan kepuasan), tanpa adanya faktor mitigasi eksternal. Skenario ini berfungsi sebagai *counterfactual* untuk mengukur efektivitas relatif dari skenario intervensi. Transisi status agen pada bulan pertama ($t=1$) ditentukan oleh fungsi stokastik:

$$Status_{i,t} = \begin{cases} Resign \rightarrow \text{jika } RAND() < P_{resign}(i) \\ Active \rightarrow \text{jika sebaliknya} \end{cases}$$

Untuk bulan selanjutnya ($t > 1$), status agen bersifat *path-dependent*:

$$Status_{i,t} = \begin{cases} Status_{i,t} \rightarrow \text{jika } Status_{i,t} \neq Active \\ Resign \rightarrow \text{jika } RAND() < P_{resign}(i) \\ Active \rightarrow \text{jika sebaliknya} \end{cases}$$

2. Intervensi Insentif Finansial (*Retention Bonus*)

Skenario ini mensimulasikan penerapan "*Retention Bonus*" sebagai intervensi datar (*flat intervention*) yang diberikan kepada seluruh agen.

- a) Mekanisme Intervensi: Pemberian bonus diasumsikan menurunkan probabilitas *resign* dasar *Presign* sebesar 20% secara seragam untuk setiap agen. Probabilitas baru *Presign* dihitung sebagai:

$$P'_{resign}(i) = P_{resign}(i) \times 0.8$$

- b) Asumsi Biaya: Biaya implementasi dihitung berdasarkan rata-rata bonus historis karyawan yang diproyeksikan sebanyak 6 kali pemberian per tahun, dengan estimasi biaya satuan sebesar Rp 1.626.000 per agen/tahun.

3. Intervensi Insentif Finansial (*Retention Bonus*)

Skenario ini menguji efek psikologis dari "Janji Promosi" bertahap. Intervensi ini diasumsikan menciptakan efek "penguncian" (*lock-in effect*) di mana agen cenderung bertahan untuk mencapai milestone karir tertentu. Risiko *turnover* dimodelkan menurun secara progresif seiring bertambahnya masa kerja agen dalam simulasi:

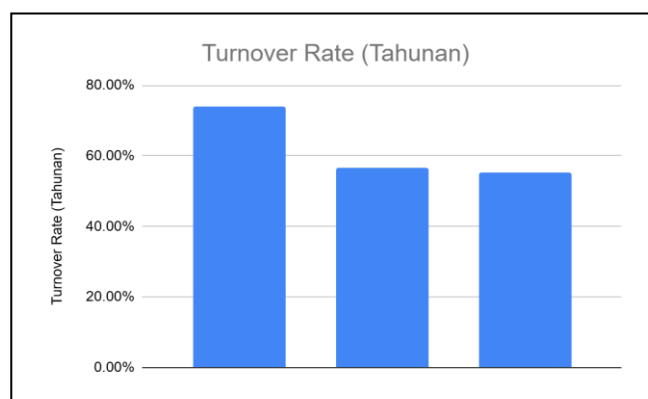
- a) Fase Mentoring (Bulan 1–11): Risiko turun 5% dengan ($P'_{resign}(i) = P_{resign}(i) \times 0.95$)
- b) Fase Senioritas (Bulan 12–23): Risiko turun signifikan sebesar 15% dengan ($P'_{resign}(i) = P_{resign}(i) \times 0.85$) setelah agen mencapai milestone tahun pertama.
- c) Fase Supervisi (Bulan 24+): Risiko turun drastis sebesar 25% dengan ($P'_{resign}(i) = P_{resign}(i) \times 0.75$) sebagai respons terhadap pencapaian posisi Supervisor.

Ketiga skenario dijalankan secara paralel dalam lembar kerja terpisah (Sim_A_Kontrol, Sim_B_Bonus, Sim_C_Career) untuk memungkinkan perbandingan *head-to-head* terhadap tingkat atrisi kumulatif dan efisiensi biaya per agen yang dipertahankan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Komparatif Tingkat *Turnover*

Dinamika retensi karyawan selama periode simulasi 24 bulan divisualisasikan melalui diagram batang pada Gambar 4. Diagram ini mengilustrasikan laju penurunan jumlah agen aktif setiap bulannya, memperlihatkan pola divergensi antara kelompok kontrol dan intervensi seiring berjalannya waktu simulasi.



Gambar 4. Grafik *Turnover Rate* (Tahunan)

Pada Skenario A (Kontrol), kurva menunjukkan penurunan terjal yang konsisten, berakhir dengan jumlah resign tertinggi sebanyak 65 agen. Hal ini menghasilkan tingkat *turnover* tahunan (*annualized turnover rate*) sebesar 70,65%, yang mengindikasikan kerentanan stabilitas tenaga kerja tanpa intervensi manajemen. Sebaliknya, penerapan intervensi menunjukkan pelandaian kurva atrisi: a) Skenario B (Bonus Kinerja): Menurunkan total resign menjadi 60 orang (*Turnover*: 65,22%). Skenario C (*Career pathing*): Menunjukkan retensi terbaik dengan total resign 56 orang (*Turnover*: 60,87%).

Untuk menguji signifikansi perbedaan proporsi *turnover* antara Skenario A (70,65%) dan Skenario C (60,87%), dilakukan uji statistik beda proporsi (*Z-test for two proportions*). Hasil perhitungan menunjukkan nilai $Z = 1,40$ ($p\text{-value} \approx 0,16$). Meskipun perbedaan ini belum mencapai signifikansi statistik pada taraf kepercayaan 95% ($p < 0,05$) akibat keterbatasan ukuran sampel populasi agen ($N = 92$), penurunan absolut sebesar $\approx 10\%$ mengindikasikan dampak praktis yang substansial dari intervensi jenjang karir dalam memitigasi risiko *turnover*.

Temuan ini secara kualitatif mengonfirmasi hipotesis bahwa kejelasan jenjang karir memberikan insentif psikologis yang lebih kuat bagi agen untuk bertahan dibandingkan sekadar insentif finansial. Hal ini selaras dengan tinjauan sistematis penulis [6] yang menemukan bahwa peluang pengembangan profesional sering kali menjadi prediktor retensi yang lebih dominan daripada gaji pada tenaga kerja sektor teknis. Agen dalam model merespons positif terhadap "janji promosi" pada Skenario C, yang menciptakan efek *lock-in* psikologis setelah melewati milestone masa kerja tertentu.

Analisis Biaya-Manfaat (*Cost-Benefit Analysis*)

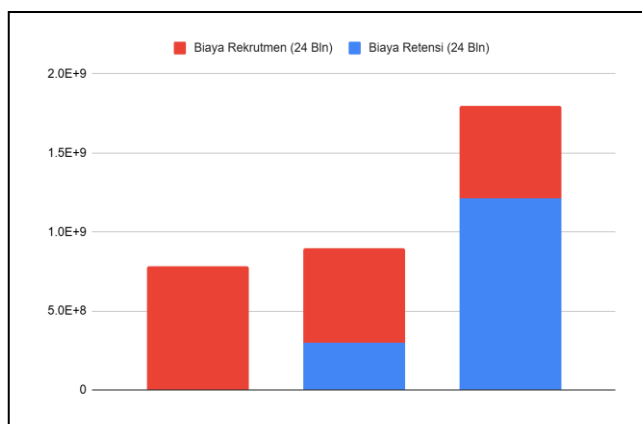
Evaluasi finansial dilakukan dengan menghitung total biaya operasional SDM (*Total Cost of Workforce Turnover*) selama periode simulasi 24 bulan. Struktur biaya terdiri dari dua komponen utama: (1) Biaya Rekrutmen/Penggantian (Rp 11.500.000 per agen baru) dan (2) Biaya Retensi/Pencegahan (insentif bonus dan program karir).

Tabel 1 menyajikan rekapitulasi biaya untuk setiap skenario. Hal yang perlu diperhatikan bahwa Skenario A berfungsi sebagai *baseline* tanpa biaya retensi, sehingga seluruh pengeluaran dialokasikan untuk penanganan akibat *turnover* (biaya reaktif).

Tabel 1. Perbandingan Biaya Total dan Efisiensi Intervensi (24 Bulan)

Skenario	Total Karyawan	24 Bulan				Total Biaya (IDR)	Penghematan (vs Kontrol) (IDR)
		Total Resign	Turnover Rate	Biaya Retensi (IDR)	Biaya Rekrutmen (IDR)		
A: Kontrol	92	65	70.65%	0	747,500,000	747,500,000	0
B: Bonus	92	60	65.22%	299,184,000	690,000,000	989,184,000	-241,684,000
C: Career	92	56	60.87%	1,214,400,000	644,000,000	1,858,400,000	-1,110,900,000

Visualisasi perbandingan komponen biaya antar skenario dapat dilihat pada Gambar 9 (*Bar Chart*). Grafik tersebut memperlihatkan bahwa meskipun Skenario C berhasil menekan biaya rekrutmen hingga titik terendah (penghematan Rp 103,5 Juta dibanding A), proporsi biaya retensi yang sangat besar mendominasi struktur total biaya, menyebabkan inefisiensi finansial dalam jangka pendek.



Gambar 9. Komparasi Komponen Biaya Operasional SDM Antar Skenario (Rekrutmen vs Retensi)

Pembahasan

Interpretasi Hasil *Turnover* dan Retensi

Penurunan tingkat *turnover* terendah yang dicapai pada Skenario C (*Career pathing*) mengindikasikan bahwa kepastian jenjang karir memberikan dampak psikologis yang signifikan terhadap keputusan agen untuk bertahan. Dalam konteks perilaku organisasi, kejelasan promosi menciptakan rasa aman secara psikologis (*psychological safety*) dan persepsi dukungan organisasi yang lebih kuat dibandingkan sekadar insentif finansial sesaat. Hal ini selaras dengan temuan [6]s, yang menyatakan bahwa peluang pengembangan profesional secara konsisten berkorelasi negatif dengan intensi keluar, karena memenuhi kebutuhan aktualisasi diri karyawan. Agen dalam simulasi merespons

"janji promosi" sebagai investasi jangka panjang, yang meningkatkan ambang batas toleransi mereka terhadap godaan untuk keluar.

Paradoks Biaya dan Model Cost of Turnover

Temuan penelitian ini menyoroti fenomena paradoksal di mana intervensi yang sukses secara operasional (menurunkan *turnover* hingga 10%) justru gagal secara finansial. Menganalisis fenomena ini melalui lensa teori biaya perputaran karyawan (Cost of Turnover Model), biaya SDM terbagi menjadi biaya pemisahan/penggantian dan biaya pencegahan/pelatihan. Dalam Skenario A, perusahaan menanggung biaya penggantian yang tinggi akibat tingginya laju keluar masuk karyawan. Namun, pada Skenario C, perusahaan mengalihkan beban ke biaya pencegahan (*career pathing*) yang ternyata volume biayanya jauh lebih besar karena diterapkan secara "datar" (universal coverage) kepada 92 agen.

Kondisi ini menunjukkan bahwa titik impas (*break-even point*) investasi retensi tidak tercapai dalam periode simulasi 24 bulan. Hal ini disebabkan oleh absennya variabel keuntungan produktivitas dalam perhitungan *Return on Investment* (ROI). Intervensi pengembangan karir idealnya menghasilkan kenaikan produktivitas agen (*intangible benefits*) yang seharusnya dihitung sebagai pengurang biaya. Tanpa memasukkan valuasi produktivitas ini, intervensi strategi "mahal" seperti *Career pathing* akan selalu terlihat defisit jika hanya disandingkan *apple-to-apple* dengan biaya rekrutmen fisik.

Oleh karena itu, strategi optimal bagi manajemen bukanlah menghentikan intervensi, melainkan mengubah metode distribusinya. Peneliti [1] menyarankan penggunaan *Machine Learning* pada data HR untuk memprediksi agen mana yang paling mungkin keluar, sehingga biaya retensi (bonus/karir) hanya diinvestasikan pada segmen tersebut. Pendekatan tertarget ini secara teoritis akan menurunkan komponen biaya retensi secara drastis sambil mempertahankan efektivitas penurunan *turnover*.

Implikasi Manajerial

Temuan penelitian ini membawa implikasi strategis yang mendalam bagi manajemen sumber daya manusia di industri peternakan ayam. Pertama, hasil simulasi menegaskan urgensi untuk melakukan transformasi dari pendekatan retensi berbasis populasi (*population-based*) menuju pendekatan berbasis risiko individu (*risk-based retention*). Strategi "satu ukuran untuk semua" (*universal costing*) pada Skenario C terbukti membebani struktur keuangan perusahaan secara tidak proporsional. Oleh karena itu, manajemen disarankan untuk memanfaatkan skor probabilitas keluar (*Presign*) yang dihasilkan oleh sistem ERP untuk melakukan segmentasi karyawan ke dalam klaster risiko (Rendah, Sedang, Tinggi). Investasi mahal seperti program *Career pathing* sebaiknya diprioritaskan hanya untuk karyawan "Bintang" (kinerja tinggi) yang berada dalam klaster risiko tinggi, guna memaksimalkan *Return on Investment* (ROI) dari anggaran retensi.

Kedua, meskipun analisis finansial menunjukkan defisit pada skenario intervensi, manajemen perlu meninjau ulang definisi "biaya" dalam konteks keberlanjutan operasional. Model saat ini hanya menangkap biaya eksplisit (*tangible costs*). Namun, dalam realitas operasional kandang yang padat karya, kehilangan karyawan berpengalaman menimbulkan biaya implisit (*intangible costs*) yang masif, seperti penurunan performa ternak akibat inkonsistensi perawatan, hilangnya pengetahuan institusional (*tacit knowledge*), serta biaya lembur bagi staf tersisa yang harus menutupi kekosongan. Jika valuasi risiko operasional ini

dikuantifikasi, strategi *Career pathing* kemungkinan besar akan terbukti lebih efisien secara holistik dibandingkan membiarkan tingkat *turnover* tetap tinggi. Terakhir, efektivitas *Career pathing* menyoroti pentingnya kontrak psikologis; memberikan kejelasan masa depan ternyata mampu menciptakan "keterikatan emosional" yang meningkatkan ambang batas toleransi karyawan terhadap godaan eksternal.

Relevansi dengan Literatur

Penelitian ini memberikan kontribusi empiris yang memperkuat literatur *Agent-Based Modeling* (ABM), khususnya dalam konteks pemodelan tenaga kerja di sektor non-teknologi. Hasil studi memvalidasi keunggulan ABM dalam menangkap heterogenitas perilaku agen yang sering kali terabaikan dalam metode *System Dynamics* atau regresi linier tradisional. Kemampuan model untuk memproyeksikan bahwa insentif non-finansial (*career pathing*) lebih efektif daripada insentif finansial (bonus) konsisten dengan temuan [6] yang menekankan bahwa dalam jangka panjang, pemenuhan kebutuhan aktualisasi diri melalui pengembangan profesional merupakan prediktor retensi yang lebih dominan daripada sekadar kompensasi moneter.

Selain itu, studi ini juga memperkaya diskursus mengenai demokratisasi analitik data. Sejalan dengan peneliti [12] yang membahas hambatan adopsi teknologi dalam industri konstruksi dan teknik, penelitian ini membuktikan bahwa alat yang aksesibel seperti *spreadsheet* dapat dimanfaatkan untuk melakukan simulasi perilaku organisasi yang kompleks tanpa memerlukan infrastruktur perangkat lunak yang mahal. Namun, temuan mengenai "paradoks biaya" (efektif secara operasional namun tidak efisien secara finansial) menambahkan nuansa baru pada literatur yang ada, menunjukkan bahwa intervensi SDM tidak bisa hanya dievaluasi dari metrik retensi semata, melainkan harus diintegrasikan dengan model aktuarial biaya untuk mendapatkan gambaran kelayakan bisnis yang utuh.

Keterbatasan Model

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan metodologis yang perlu diakui sebagai konteks bagi interpretasi hasil dan peluang pengembangan studi di masa depan. Pertama, penggunaan platform *spreadsheet* membatasi skalabilitas simulasi, di mana peningkatan jumlah agen secara masif atau penambahan kompleksitas aturan perilaku dapat membebani performa pemrosesan komputasi secara signifikan jika dibandingkan dengan penggunaan perangkat lunak ABM terdedikasi seperti NetLogo atau *AnyLogic*. Selain kendala teknis, model saat ini mengonseptualisasikan agen sebagai entitas yang beroperasi secara isolatif, sehingga belum mengakomodasi dinamika jejaring sosial atau efek penularan (*contagion effect*) di mana keputusan keluar satu individu kunci dapat memicu gelombang *turnover* pada rekan kerjanya. Lebih lanjut, agen dalam simulasi ini beroperasi berdasarkan aturan logika deterministik yang statis (*static rule-based*), dan belum mengadopsi kemampuan adaptif atau pembelajaran kognitif (*reinforcement learning*) yang memungkinkan agen untuk belajar dari pengalaman *historis* atau memodifikasi preferensi mereka seiring waktu, sebuah fitur yang kini mulai banyak dikembangkan dalam arsitektur agen berbasis *Large Language Models* (LLM) untuk meningkatkan realisme perilaku manusia. Terakhir, simulasi ini diasumsikan berjalan dalam sistem tertutup (*closed system*) yang mengabaikan potensi guncangan eksternal dinamis, seperti perubahan inflasi ekonomi atau strategi rekrutmen agresif dari kompetitor, yang secara riil dapat mengubah probabilitas *turnover* agen secara drastis di luar kendali parameter internal perusahaan.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mendemonstrasikan penerapan *Agent-Based Modeling* (ABM) menggunakan platform *spreadsheet* untuk memprediksi dinamika *turnover* karyawan di sektor peternakan ayam. Hasil simulasi mengonfirmasi bahwa intervensi non-finansial berupa kejelasan jenjang karir (*Career pathing*) adalah strategi yang paling efektif secara operasional, mampu menurunkan tingkat *turnover* tahunan secara signifikan dibandingkan insentif bonus maupun kondisi kontrol. Temuan ini sejalan dengan literatur yang menekankan pentingnya pengembangan profesional dalam menjaga stabilitas tenaga kerja. Namun, analisis biaya-manfaat mengungkapkan bahwa penerapan intervensi secara universal (kepada seluruh populasi karyawan) menghasilkan beban finansial yang jauh melampaui penghematan dari biaya rekrutmen yang dihindari, sehingga menciptakan defisit anggaran yang besar dalam jangka pendek.

Secara implikatif, studi ini menyimpulkan bahwa meskipun strategi retensi mampu menstabilkan tenaga kerja, implementasinya memerlukan pendekatan yang lebih selektif dan terarah. Manajemen disarankan untuk tidak menerapkan insentif secara merata ("datar"), melainkan menggunakan analitik data untuk menargetkan intervensi hanya pada segmen karyawan berisiko tinggi atau berkinerja tinggi guna mengoptimalkan efisiensi biaya. Secara metodologis, penelitian ini memvalidasi bahwa integrasi data historis ERP ke dalam simulasi berbasis agen dapat menjadi alat bantu pengambilan keputusan yang andal dan cost-effective bagi industri yang belum mengadopsi teknologi tinggi, memungkinkan evaluasi dampak kebijakan yang kompleks sebelum diterapkan secara nyata di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Fukui *et al.*, "Machine Learning with Human Resources Data: Predicting Turnover among Community Mental Health Center Employees," *J. Ment. Health Policy Econ.*, vol. 26, no. 2, pp. 63–76, 2023.
- [2] C. Gao *et al.*, "Large language models empowered agent-based modeling and simulation: a survey and perspectives," *Humanit. Soc. Sci. Commun.*, vol. 11, no. 1, 2024, doi: 10.1057/s41599-024-03611-3.
- [3] P. Vuthi, I. Peters, and J. Sudeikat, "Agent - based modeling (ABM) for urban neighborhood energy systems: literature review and proposal for an all integrative ABM approach," *Energy Informatics*, vol. 5, no. 4, pp. 1–26, 2022, doi: 10.1186/s42162-022-00247-y.
- [4] R. Cassidy *et al.*, "Mathematical modelling for health systems research: A systematic review of system dynamics and agent-based models," *BMC Health Serv. Res.*, vol. 19, no. 1, pp. 15–17, 2019, doi: 10.1186/s12913-019-4627-7.
- [5] R. N. Afdal, R. T. Simorangkir, and P. Harliana, "Pemodelan Arus Kendaraan Menggunakan Agent-Based Modeling: Studi Kasus Lalu Lintas Jalan Tuas Medan," *J. Pinter*, vol. 9, no. 1, pp. 55–61, 2025, doi: 10.21009/pinter.9.1.8.
- [6] R. Shiri, A. El-Metwally, M. Sallinen, M. Pöyry, M. Härmä, and S. Toppinen-Tanner, "The Role of Continuing Professional Training or Development in Maintaining Current Employment: A Systematic Review," *Healthc.*, vol. 11, no. 21, pp. 1–17, 2023, doi: 10.3390/healthcare11212900.
- [7] Ștefan Ionescu, C. Delcea, N. Chiriță, and I. Nica, "Exploring the Use of Artificial

- Intelligence in Agent-Based Modeling Applications: A Bibliometric Study," *Algorithms*, vol. 17, no. 1, 2024, doi: 10.3390/a17010021.
- [8] S. T. Lindau *et al.*, "Building and experimenting with an agent-based model to study the population-level impact of CommunityRx, a clinic-based community resource referral intervention," *PLoS Comput. Biol.*, vol. 17, no. 10, pp. 1–23, 2021, doi: 10.1371/journal.pcbi.1009471.
- [9] C. A. Arbelaez-Velasquez, D. Giraldo, and S. Quintero, "Analysis of a Teleworking Technology Adoption Case: An Agent-Based Model," *Sustain.*, vol. 14, no. 16, 2022, doi: 10.3390/su14169930.
- [10] S. Mazzetto, "Interdisciplinary Perspectives on Agent-Based Modeling in the Architecture, Engineering, and Construction Industry: A Comprehensive Review," *MDPI - Build.*, vol. October, 2024, doi: 10.3390/buildings14113480.
- [11] M. T. Robani, F. R. Aderiyana, N. S. Manahan, and M. P. Wilantara, "Analisis Literatur Mengenai Peran AI Agent dalam Efisiensi Automasi Digital," *JOISIE (Journal Inf. Syst. Informatics Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 77–89, 2025, doi: 10.35145/joisie.v9i1.4964.
- [12] P. Brady, "Comprehensive review," *Shipp. World Shipbuild.*, vol. 208, no. 4233, pp. 46–48, 2007, doi: 10.1201/9781003353034-6.