

Dinamika Stunting Remaja Perempuan di Jawa Timur Berdasarkan Model Kompartemen

Erna Setiawati¹

¹Program Studi Matematika, Fakultas MIPA, Universitas Billfath, Lamongan, Indonesia

Article History

Received 29 Desember 2025

Revised 23 Februari 2026

Accepted 25 Februari 2026

Published 28 Februari 2026



Copyright © 2026 by Authors, Published by JRMM Group. This is an open access article under the CC BY-SA License.



Abstract. The prevalence of stunting among adolescent girls represents a significant public health issue in East Java. This study aims to analyze the dynamics of stunting associated with early marriage using a simulation-based compartmental model. The model represents population flows from adolescent girls to mothers and subsequently to children through social and reproductive transition processes, with key parameters including the rates of early marriage, ideal-age marriage, childbirth, and stunting recovery. Simulations are employed to predict changes in compartment proportions and to assess sensitivity to key parameters. The results indicate that a reduction in early marriage rates has the potential to gradually decrease the proportion of children at risk of stunting, while sensitivity analysis of parameter γ shows that an increased risk of stunting births from adolescent mothers can accelerate the accumulation of stunting in the population. These findings highlight that social factors at early reproductive stages may generate intergenerational health impacts, suggesting that policies delaying age at first marriage could support stunting reduction efforts. The developed compartmental model provides a quantitative framework for understanding the relationship between social dynamics and health outcomes and may serve as a decision-support tool for maternal and child health policy formulation.

Keywords: compartmental model; sensitivity analysis; early marriage; stunting prevalence

Abstrak. Prevalensi stunting pada remaja perempuan merupakan masalah kesehatan masyarakat yang signifikan di Jawa Timur. Penelitian ini bertujuan menganalisis dinamika stunting terkait pernikahan dini menggunakan model kompartemen berbasis simulasi. Model merepresentasikan aliran populasi dari remaja perempuan, ibu, hingga anak melalui proses transisi sosial dan reproduktif, dengan parameter utama meliputi laju pernikahan dini, pernikahan usia ideal, kelahiran, dan pemulihan stunting. Simulasi digunakan untuk memprediksi perubahan proporsi kompartemen serta menilai sensitivitas terhadap parameter kunci. Hasil menunjukkan bahwa penurunan laju pernikahan dini berpotensi menurunkan proporsi anak berisiko stunting secara bertahap, sedangkan analisis sensitivitas parameter γ menunjukkan bahwa peningkatan risiko kelahiran anak stunting dari ibu remaja dapat mempercepat akumulasi stunting dalam populasi. Temuan ini menekankan bahwa faktor sosial pada tahap awal kehidupan reproduktif dapat menghasilkan dampak kesehatan lintas generasi, sehingga kebijakan yang menunda usia pernikahan berpotensi mendukung upaya penurunan stunting. Model kompartemen yang dikembangkan menyediakan kerangka kuantitatif untuk memahami hubungan antara dinamika sosial dan kesehatan serta dapat menjadi alat bantu dalam perumusan kebijakan kesehatan ibu dan anak.

Kata kunci: model kompartemen; analisis sensitivitas; pernikahan dini; prevalensi stunting

1. Pendahuluan

Stunting merupakan salah satu masalah kesehatan masyarakat paling serius di negara berkembang dan menjadi fokus utama pembangunan kesehatan global. Stunting didefinisikan sebagai kondisi tinggi badan anak yang berada di bawah standar pertumbuhan menurut umur, yaitu *height-for-age Z-score* < -2 standar deviasi berdasarkan WHO Child Growth Standards [1]. Kondisi ini mencerminkan kekurangan gizi kronis sejak fase awal kehidupan dan berimplikasi jangka panjang terhadap kualitas sumber daya manusia [2].

Stunting tidak hanya berdampak pada pertumbuhan fisik, tetapi juga menghambat perkembangan kognitif, prestasi belajar, produktivitas ekonomi di masa dewasa, serta meningkatkan risiko penyakit kronis [2]. Oleh karena itu, penurunan stunting menjadi target utama dalam Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya target 2.2 yang menargetkan penghapusan segala bentuk malnutrisi pada tahun 2030 [3].

Di Indonesia, pemantauan stunting dilakukan melalui Survei Status Gizi Indonesia (SSGI) yang dikelola oleh Ke-

menterian Kesehatan Republik Indonesia. Hasil SSGI 2024 menunjukkan prevalensi stunting nasional turun menjadi 19,8%, namun disparitas antar wilayah masih besar dan beberapa provinsi termasuk Jawa Timur masih memiliki beban kasus yang tinggi [4]. Fakta ini menunjukkan bahwa meskipun kemajuan telah dicapai, stunting tetap merupakan persoalan struktural yang memerlukan pendekatan lintas sektor dan berkelanjutan.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa stunting merupakan kondisi yang dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk status gizi ibu, pendidikan dan kondisi ekonomi rumah tangga, pola asuh dan praktik pemberian makan, serta sanitasi dan lingkungan, yang semuanya berinteraksi untuk menentukan risiko pertumbuhan anak yang terganggu pada usia dini [5]. Namun, faktor sosial yang semakin mendapat perhatian sebagai determinan tidak langsung stunting adalah pernikahan dini.

Pernikahan dini didefinisikan sebagai pernikahan sebelum usia 18 tahun dan dikaitkan dengan berbagai konsekuensi kesehatan reproduksi serta sosial. Remaja perempuan yang menikah dini cenderung mengalami kehamilan pada usia biol-

ogis yang belum optimal, memiliki status gizi lebih rendah, dan akses terhadap layanan kesehatan yang terbatas, sehingga meningkatkan risiko komplikasi kehamilan dan gangguan pertumbuhan janin [6].

Sejumlah studi ilmiah lima tahun terakhir menunjukkan hubungan signifikan antara pernikahan dini dan kejadian stunting. Penelitian di Kalimantan Barat menemukan bahwa anak yang lahir dari ibu yang menikah di usia anak memiliki risiko stunting lebih tinggi dibandingkan ibu yang menikah pada usia dewasa [7]. Hasil serupa ditemukan pada studi di Wonosobo yang menunjukkan bahwa pernikahan usia anak merupakan faktor risiko signifikan terhadap kejadian stunting pada balita [8]. Penelitian lain juga menunjukkan adanya hubungan antara usia menikah ibu yang dini dengan status gizi anak dan kejadian stunting. Studi klinis menunjukkan bahwa pernikahan dan kehamilan pada usia muda berasosiasi dengan pertumbuhan anak yang lebih buruk berdasarkan skor tinggi-umur (LAZ) yang relevan dengan stunting [9]. Studi di Langkat, Sumatera Utara, menemukan prevalensi stunting yang signifikan lebih tinggi pada anak dari ibu yang menikah pada usia <18 tahun [10]; dan penelitian di Wonosobo melaporkan hubungan antara pernikahan usia anak dan stunting balita [11].

Meskipun temuan-temuan tersebut konsisten menunjukkan adanya asosiasi antara pernikahan dini dan stunting, sebagian besar penelitian masih berfokus pada identifikasi faktor risiko secara statistik tanpa mengeksplorasi mekanisme transisi sosial-biologis yang mendasari hubungan tersebut. Selain itu, banyak studi menggunakan desain observasional satu periode waktu sehingga tidak mampu menggambarkan bagaimana perubahan prevalensi pernikahan dini dalam suatu populasi dapat memengaruhi distribusi risiko stunting secara bertahap lintas generasi.

Walaupun hubungan tersebut telah banyak dilaporkan, sebagian besar penelitian menggunakan pendekatan cross-sectional yang bersifat statis dan hanya menangkap hubungan asosiasi pada satu titik waktu [7]. Pendekatan ini belum mampu menggambarkan mekanisme dinamis bagaimana pernikahan dini sebagai fenomena sosial memengaruhi transisi kehidupan remaja menjadi ibu berisiko dan kemudian berdampak pada kejadian stunting lintas generasi.

Selain keterbatasan temporal, penelitian sebelumnya juga jarang mengintegrasikan variabel sosial, reproduksi, dan gizi dalam satu kerangka analitis terpadu. Akibatnya, implikasi kebijakan yang dihasilkan sering bersifat sektoral dan belum sepenuhnya mencerminkan kompleksitas interaksi antar faktor dalam sistem populasi.

Selain itu, kajian yang mengintegrasikan fenomena ini ke dalam kerangka pemodelan sistem dinamis di tingkat regional, khususnya di Jawa Timur, masih sangat terbatas. Padahal, Jawa Timur merupakan salah satu provinsi dengan jumlah balita stunting terbesar di Indonesia [4] dan juga memiliki prevalensi pernikahan anak yang relatif tinggi di beberapa kabupaten [12].

Kesenjangan penelitian inilah yang melatarbelakangi penelitian ini. Penelitian ini mengusulkan penggunaan model kompartemen, suatu pendekatan pemodelan matematika yang membagi populasi ke dalam beberapa status dan memodelkan transisi antar status seiring waktu. Model kompartemen telah digunakan secara luas untuk memahami dinamika penyebaran dan intervensi dalam konteks epidemiologi melalui pemba-

gian populasi menjadi beberapa kelas yang terhubung oleh laju transisi [13]. Berbeda dengan pendekatan statistik konvensional yang umumnya mengukur hubungan faktor risiko secara langsung pada satu waktu pengamatan, model kompartemen memungkinkan representasi mekanisme transisi populasi secara eksplisit. Dengan pendekatan ini, penelitian tidak hanya mengidentifikasi faktor yang berasosiasi dengan stunting, tetapi juga mensimulasikan bagaimana perubahan struktur sosial seperti penundaan usia pernikahan dapat memengaruhi distribusi risiko stunting dalam jangka panjang. Pendekatan ini masih jarang diterapkan pada isu sosial-kesehatan di tingkat provinsi di Indonesia, namun memiliki potensi untuk memberikan pemahaman sistematis tentang bagaimana perubahan prevalensi pernikahan dini dapat memengaruhi profil stunting dalam jangka panjang melalui alur transisi dari remaja ke ibu dan selanjutnya ke anak.

Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini bukan hanya pada identifikasi hubungan antara pernikahan dini dan stunting, tetapi pada penyusunan kerangka dinamika populasi yang mampu menjelaskan bagaimana perubahan pada satu tahap kehidupan dapat menghasilkan konsekuensi kesehatan pada tahap berikutnya.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) membangun model kompartemen yang merepresentasikan hubungan antara pernikahan dini dan kejadian stunting di Provinsi Jawa Timur; (2) mengkalibrasi model menggunakan data sekunder resmi dari BPS dan Kementerian Kesehatan; serta (3) menganalisis implikasi kebijakan dari berbagai skenario intervensi pencegahan pernikahan dini terhadap penurunan stunting.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan sistem dinamis untuk isu sosial-kesehatan pernikahan dini dan stunting di tingkat provinsi, yang selama ini lebih banyak dianalisis secara statis. Model ini diharapkan mampu menjadi alat bantu kebijakan berbasis bukti yang dapat memproyeksikan dampak jangka panjang intervensi lintas sektor.

2. Metode Penelitian

Bagian ini menjelaskan kerangka metodologis yang digunakan untuk membangun dan menganalisis model kompartemen. Uraian dimulai dari desain penelitian dan sumber data, kemudian dilanjutkan dengan struktur model, penentuan parameter, serta pendekatan analisis yang digunakan dalam simulasi.

2.1. Jenis dan Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan desain studi pemodelan sistem dinamis menggunakan pendekatan model kompartemen deterministik. Model kompartemen digunakan untuk merepresentasikan perubahan status populasi dari waktu ke waktu melalui sistem persamaan diferensial, dan masih menjadi pendekatan utama dalam kajian dinamika populasi dan kesehatan masyarakat kontemporer karena kemampuannya menangkap transisi antar kondisi sosial-biologis secara sistematis [14]. Pendekatan ini memungkinkan analisis tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga prediktif terhadap dampak kebijakan sosial terhadap prevalensi stunting dalam jangka panjang.

2.2. Sumber Data

Seluruh variabel penelitian diperoleh dari data sekunder resmi tanpa melibatkan pengumpulan data primer. Data prevalensi stunting diambil dari Survei Status Gizi Indonesia (SSGI) 2024 yang dipublikasikan oleh Kementerian Kesehatan Republik Indonesia [4]. Data prevalensi pernikahan dini, struktur usia perempuan, serta indikator demografi Jawa Timur diperoleh dari publikasi Badan Pusat Statistik Kabupaten Banyuwangi dan Badan Pusat Statistik Provinsi Jawa Timur [15] [16]. Kedua sumber ini digunakan untuk membangun kondisi awal populasi serta sebagai dasar estimasi parameter dalam model.

2.3. Struktur Model dan Definisi Variabel

Populasi perempuan usia reproduktif dan balita dimodelkan dalam beberapa kompartemen yang mencerminkan tahapan sosial dan biologis yang relevan terhadap pembentukan risiko stunting, yaitu remaja perempuan belum menikah, perempuan menikah dini, perempuan menikah usia ideal, ibu berisiko, balita stunting, dan balita normal. Transisi antar kompartemen direpresentasikan oleh sistem persamaan diferensial yang memodelkan perubahan ukuran populasi setiap kompartemen sepanjang waktu. Pendekatan ini mengikuti kerangka pemodelan sistem dinamis yang digunakan secara luas dalam kajian populasi dan kesehatan masyarakat modern [14].

Setiap variabel memiliki interpretasi eksplisit: jumlah remaja perempuan yang belum menikah, jumlah perempuan yang menikah dini, jumlah perempuan menikah usia ideal, jumlah ibu berisiko, jumlah balita stunting, dan jumlah balita normal. Transisi antar status dikendalikan oleh parameter laju yang merepresentasikan probabilitas sosial-biologis, termasuk laju pernikahan dini dan probabilitas kelahiran berisiko.

2.4. Penentuan Parameter dan Analisis Sensitivitas

Parameter model ditentukan berdasarkan estimasi awal kompartemen dan literatur terkait, dengan penyesuaian agar output simulasi sesuai dengan prevalensi stunting remaja perempuan di Jawa Timur. Sistem persamaan diferensial diselesaikan menggunakan metode Runge-Kutta orde empat, yang memiliki kestabilan dan akurasi tinggi untuk simulasi sistem dinamis populasi [13].

Model diuji melalui analisis sensitivitas parameter (γ , dengan mensimulasikan beberapa skenario ($\gamma = 0,15; 0,20; 0,25; 0,30$) dan mengamati pengaruhnya terhadap prevalensi stunting. Pendekatan ini juga memungkinkan simulasi berbagai intervensi, seperti pengurangan laju pernikahan dini, untuk mengevaluasi dampak potensial terhadap penurunan stunting jangka panjang.

Sebagian parameter dalam model tidak tersedia secara langsung dari data observasional sehingga harus ditentukan melalui pendekatan estimasi berbasis literatur, kalibrasi terhadap data prevalensi, serta asumsi rasional yang konsisten dengan konteks demografi lokal. Penggunaan parameter berbasis asumsi ini merupakan keterbatasan umum dalam pemodelan populasi karena nilai sebenarnya dapat bervariasi antar wilayah dan waktu. Oleh karena itu, interpretasi hasil simulasi dilakukan secara hati-hati dengan menekankan sifatnya sebagai proyeksi skenario, bukan prediksi deterministik.

Sebagian parameter dalam model tidak tersedia secara langsung dari data observasional sehingga harus ditentukan melalui proses kalibrasi model terhadap data prevalensi serta rujukan literatur. Dalam kerangka pemodelan sistem dinamis, pendekatan ini umum digunakan ketika parameter bersifat laten atau tidak terukur secara langsung, namun konsekuensinya adalah adanya ketidakpastian struktural dalam estimasi nilai parameter. Ketidakpastian tersebut berpotensi memengaruhi ketepatan prediksi numerik model, meskipun pola dinamika sistem umumnya tetap stabil.

Untuk meminimalkan potensi bias akibat asumsi parameter, penelitian ini menerapkan analisis sensitivitas guna menguji kestabilan perilaku model terhadap variasi nilai parameter kunci. Dengan demikian, hasil simulasi diharapkan tetap memberikan gambaran kecenderungan dinamika sistem meskipun terdapat ketidakpastian pada beberapa parameter yang diestimasi.

Untuk menjaga validitas metodologis, parameter berbasis asumsi tidak digunakan sebagai nilai tunggal yang dianggap pasti, melainkan sebagai rentang nilai yang diuji melalui analisis sensitivitas. Dengan demikian, fokus interpretasi penelitian ini bukan pada estimasi numerik absolut, tetapi pada konsistensi arah perubahan sistem dan respon model terhadap variasi kebijakan. Pendekatan ini memungkinkan model tetap berfungsi sebagai alat eksplorasi kebijakan yang robust meskipun terdapat keterbatasan dalam identifikasi parameter empiris.

Pendekatan model kompartemen dipilih karena mampu menangkap dinamika lintas tahap kehidupan, mendukung evaluasi skenario kebijakan, serta memastikan transparansi dan replikasi dalam penelitian berbasis simulasi [14].

3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil formulasi model serta interpretasi dinamika sistem berdasarkan simulasi numerik. Pembahasan diawali dengan penyusunan struktur matematis model, kemudian dilanjutkan dengan analisis dinamika kompartemen dan sensitivitas parameter.

3.1. Formulasi Model dan Definisi Variabel

Model kompartemen dalam penelitian ini dirancang untuk merepresentasikan dinamika hubungan antara pernikahan dini dan kejadian stunting pada remaja perempuan di Jawa Timur melalui pendekatan sistem dinamis berbasis transisi status sosial dan biologis. Populasi perempuan dan anak dimodelkan dalam tujuh kompartemen yang mencerminkan tahapan kehidupan yang relevan terhadap pembentukan risiko stunting, yaitu remaja perempuan belum menikah (R), perempuan menikah dini (M_e), perempuan menikah pada usia ideal (M_n), ibu dari pernikahan dini (I_r), ibu dari pernikahan usia ideal (I_n), anak stunting (B_s), dan anak normal (B_n).

Model ini dibangun dalam kerangka kohort generasional, di mana kompartemen awal R merepresentasikan satu kelompok remaja perempuan yang diamati sepanjang horizon waktu simulasi tanpa memasukkan aliran masuk populasi eksternal. Pendekatan ini dipilih karena fokus penelitian adalah menganalisis perubahan status pernikahan dan dampaknya terhadap risiko stunting dalam satu generasi perempuan beserta luaran kelahirannya, bukan untuk memodelkan per-

tumbuhan populasi secara demografis. Dengan demikian, kelahiran dalam model diperlakukan sebagai hasil internal dari transisi status ibu, sementara migrasi dan dinamika populasi eksternal tidak dimasukkan ke dalam sistem.

Struktur model mengikuti alur kehidupan yang bersifat sekuensial. Remaja perempuan dapat memasuki pernikahan dini atau pernikahan usia ideal dengan laju masing-masing α dan β . Perempuan yang menikah kemudian bertransisi menjadi ibu melalui laju θ untuk pernikahan dini dan λ untuk pernikahan usia ideal. Ibu dari pernikahan dini memiliki dua kemungkinan luaran kelahiran, yaitu melahirkan anak stunting dengan laju γ atau anak normal dengan laju η . Sementara itu, ibu dari pernikahan usia ideal diasumsikan melahirkan anak normal dengan laju μ . Anak yang lahir dalam kondisi stunting dapat mengalami perbaikan status gizi melalui intervensi kesehatan dan nutrisi dengan laju pemulihan δ .

Dengan definisi proses tersebut, dinamika perubahan ukuran setiap kompartemen dapat dinyatakan dalam bentuk sistem persamaan diferensial berikut.

$$\frac{dR}{dt} = -(\alpha + \beta)R \quad (1)$$

$$\frac{dM_e}{dt} = \alpha R - \theta M_e \quad (2)$$

$$\frac{dM_n}{dt} = \beta R - \lambda M_n \quad (3)$$

$$\frac{dI_r}{dt} = \theta M_e - (\gamma + \eta)I_r \quad (4)$$

$$\frac{dI_n}{dt} = \lambda M_n - \mu I_n \quad (5)$$

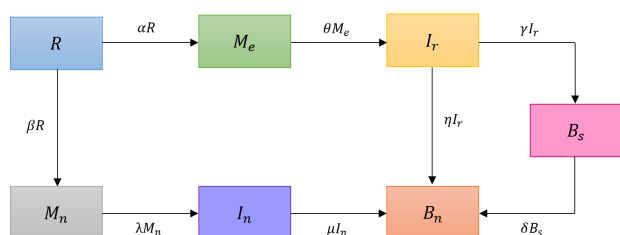
$$\frac{dB_s}{dt} = \gamma I_r - \delta B_s \quad (6)$$

$$\frac{dB_n}{dt} = \eta I_r + \mu I_n + \delta B_s \quad (7)$$

Parameter model memiliki interpretasi sebagai laju transisi per satuan waktu. Parameter α dan β menyatakan laju pernikahan dini dan pernikahan usia ideal pada remaja perempuan. Parameter θ dan λ menyatakan laju transisi perempuan menikah menjadi ibu. Parameter γ , η , dan μ merepresentasikan laju kelahiran berdasarkan kondisi ibu, sedangkan δ menyatakan laju pemulihan anak stunting akibat intervensi kesehatan.

Formulasi ini memastikan bahwa setiap aliran keluar dari suatu kompartemen secara eksplisit muncul sebagai aliran masuk pada kompartemen tujuan, sehingga konservasi populasi dalam sistem tetap terjaga. Selain itu, pemisahan parameter untuk setiap proses memungkinkan interpretasi model yang lebih jelas dan mendukung analisis sensitivitas terhadap faktor sosial dan kesehatan yang memengaruhi stunting.

Untuk mempermudah pemahaman alur transisi antar kompartemen, diagram kompartemen disajikan di bawah ini:



Gambar 1: Diagram kompartemen model

Diagram tersebut merangkum aliran transisi utama dari status remaja menuju status pernikahan dan selanjutnya ke kondisi gizi anak. Berdasarkan struktur ini, sistem persamaan diferensial diselesaikan secara numerik menggunakan metode Runge-Kutta orde empat untuk memperoleh dinamika temporal setiap kompartemen, kemudian dilanjutkan dengan analisis sensitivitas parameter γ .

Analisis kestabilan titik ekuilibrium tidak dilakukan dalam studi ini karena fokus penelitian adalah menilai dinamika prevalensi stunting berdasarkan simulasi kompartemen dan analisis sensitivitas parameter γ . Pendekatan simulasi berbasis data empiris dinilai telah memadai untuk menggambarkan pengaruh perubahan parameter dan intervensi terhadap sistem. Analisis kestabilan matematis menjadi lebih relevan apabila tujuan penelitian diperluas untuk mengevaluasi perilaku jangka panjang sistem secara teoretis.

3.2. Estimasi Parameter dan Kondisi Awal

Nilai parameter model ditentukan berdasarkan data resmi dan literatur terbaru, sementara beberapa parameter diasumsikan untuk mengakomodasi ketidakpastian atau keterbatasan data. Seluruh parameter dalam model dinyatakan sebagai laju transisi per satuan waktu (tahun^{-1}), sehingga konsisten dengan sistem persamaan diferensial yang digunakan.

Laju pernikahan dini (α) diperoleh dari data BPS Jawa Timur tahun 2023, di mana persentase perempuan usia 10 tahun ke atas yang menikah sebelum usia 17 tahun adalah 19,49%. Masa risiko pernikahan dini didefinisikan antara usia 10-16 tahun, yaitu 7 tahun. Dengan demikian,

$$\alpha = \frac{0.1949}{7} \approx 0,028 \text{ per tahun}$$

Laju pernikahan usia ideal (β) dihitung dari sisa proporsi perempuan yang tidak menikah dini ($1 - 0,1949 = 0,8051$) dan masa risiko usia 17-20 tahun, yaitu 4 tahun:

$$\beta = \frac{0,8051}{4} \approx 0,201 \text{ per tahun}$$

Selanjutnya, laju transisi menjadi ibu, yaitu θ untuk perempuan menikah dini dan λ untuk perempuan menikah usia ideal. Kedua parameter ini merepresentasikan laju kelahiran pertama. Berdasarkan literatur demografi reproduksi, rata-rata jarak waktu dari pernikahan ke kelahiran pertama berkisar 1,5-2 tahun. Oleh karena itu, digunakan pendekatan kebalikan waktu tunggu rata-rata, sehingga:

$$\theta \approx \lambda \approx \frac{1}{2} = 0,5 \text{ per tahun}$$

Nilai ini berarti sekitar 50% perempuan menikah akan melahirkan dalam satu tahun pengamatan, yang masih realistis untuk model kohort reproduksi.

Parameter γ merepresentasikan laju kelahiran anak stunting dari ibu remaja dalam model, yaitu tingkat di mana ibu dalam kompartemen berisiko melahirkan anak dengan status gizi stunting. Dengan demikian, γ diperlakukan sebagai parameter transisi langsung dari kompartemen ibu berisiko ke kompartemen anak stunting, bukan sebagai proporsi dari laju kelahiran total. Nilai γ dipilih sebesar 0,25 berdasarkan literatur yang menunjukkan bahwa sekitar seperempat anak dari ibu remaja berada pada risiko gangguan gizi. Analisis

data nasional di *Bangladesh* menunjukkan bahwa proporsi anak dari ibu yang menikah dan melahirkan pada usia remaja yang mengalami *undernutrition* (gabungan *stunting*, *wasting*, dan *underweight*) mencapai sekitar 25%, dan secara signifikan lebih tinggi dibandingkan anak dari ibu dewasa [17]. Temuan tersebut konsisten dengan hasil studi *Indonesian Family Life Survey* (IFLS) yang menunjukkan bahwa anak di bawah lima tahun dari ibu yang menikah pada usia ≤ 19 tahun memiliki risiko stunting yang lebih tinggi dibandingkan anak dari ibu yang menikah pada usia lebih tua ($OR \approx 1,2$) [18]. Secara keseluruhan, temuan-temuan ini mengindikasikan bahwa pernikahan dan kelahiran pada usia remaja berkontribusi terhadap meningkatnya kerentanan gizi anak.

Untuk melengkapi struktur model, diperkenalkan parameter η sebagai laju kelahiran anak tidak stunting dari ibu remaja. Karena setiap ibu remaja dapat melahirkan anak stunting dengan laju $\gamma\theta$, sisa kelahiran yang tidak stunting dihitung sebagai komplementer, maka

$$\eta = \theta - (\gamma\theta) = 0,5 - 0,125 = 0,375$$

Dengan demikian, nilai $\eta = 0,375$ menunjukkan laju kelahiran anak normal dari ibu remaja, sedangkan $\gamma\theta = 0,125$ adalah laju kelahiran anak stunting yang sudah digunakan dalam simulasi.

Untuk ibu usia ideal diasumsikan bahwa seluruh kelahiran terjadi pada laju tetap sehingga

$$\mu = \lambda = 0,5.$$

Laju pemulihan stunting (δ) ditetapkan sebesar 0,12, yang merepresentasikan proporsi anak stunting yang kembali ke status gizi normal per tahun. Nilai ini didasarkan pada tren penurunan prevalensi stunting nasional yang dilaporkan dalam Survei Status Gizi Indonesia (SSGI) 2024, di mana prevalensi stunting menurun dari 21,5% pada 2023 menjadi 19,8% pada 2024. Penurunan ini menunjukkan adanya perbaikan status gizi anak secara agregat pada tingkat populasi. Berdasarkan tren tersebut, model mengasumsikan laju pemulihan tahunan sebesar 0,12 sebagai pendekatan agregat untuk merepresentasikan efek intervensi gizi dan layanan kesehatan dalam kerangka dinamika kompartemen.

Tabel 1: Parameter Model

Parameter	Nilai	Keterangan	Sumber
α	0,028	Laju pernikahan dini	BPS Jatim
β	0,201	Laju pernikahan usia ideal	BPS Jatim
θ	0,5	Laju menjadi ibu (nikah dini)	Asumsi demografi
λ	0,5	Laju menjadi ibu (nikah ideal)	Asumsi demografi
γ	0,25	Proporsi kelahiran berisiko stunting	Literatur
η	0,375	Laju kelahiran normal dari ibu remaja	Turunan model
μ	0,5	Laju kelahiran dari ibu usia ideal	Asumsi model
δ	0,12	Pemulihan stunting	SSGI

Kondisi awal model dinyatakan sebagai proporsi terhadap satu basis populasi kohort perempuan, yaitu seluruh perempuan usia 10-20 tahun. Dengan demikian, seluruh kompartemen perempuan dinormalisasi terhadap total kohort ini, sedangkan kompartemen anak diperlakukan sebagai luaran kumulatif dari sistem.

Berdasarkan data BPS, jumlah perempuan usia 10–16 tahun adalah sekitar 2.011,1 ribu, dan usia 17-20 tahun sekitar 1.161,2 ribu, sehingga total kohort perempuan awal adalah

$$N = 2.011,1 + 1.161,2 = 3.172,3 \text{ ribu.}$$

Seluruh kondisi awal kemudian dihitung sebagai proporsi terhadap N .

Jumlah remaja menikah dini adalah sekitar 391,6 ribu, sehingga

$$M_{e0}^{\text{total}} = \frac{391,6}{3172,3} \approx 0,123.$$

Diasumsikan bahwa 20% dari kelompok ini telah memiliki anak, sehingga

$$I_{r0} = 0,2 \times 0,123 \approx 0,025,$$

dan sisanya merupakan perempuan menikah dini tanpa anak,

$$M_{e0} = 0,123 - 0,025 = 0,098.$$

Untuk kelompok menikah usia ideal diperoleh proporsi awal

$$M_{n0}^{\text{total}} \approx 0,366.$$

Diasumsikan sebagian kecil telah menjadi ibu, misalnya sekitar 10%, sehingga

$$I_{n0} = 0,037, \quad M_{n0} = 0,366 - 0,037 = 0,329.$$

Remaja yang belum menikah dihitung sebagai sisa populasi,

$$R_0 = 1 - (M_{e0} + M_{n0} + I_{r0} + I_{n0}) \approx 0,511.$$

Dengan konstruksi ini diperoleh

$$R_0 + M_{e0} + M_{n0} + I_{r0} + I_{n0} = 1,$$

yang menunjukkan bahwa seluruh kompartemen perempuan telah ternormalisasi secara konsisten dalam satu basis populasi. Kompartemen anak dinyatakan sebagai luaran awal sistem. Berdasarkan prevalensi stunting Jawa Timur, digunakan

$$B_{s0} = 0,20, \quad B_{n0} = 0,80.$$

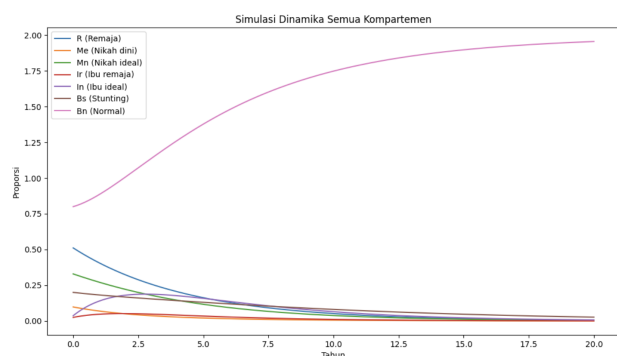
Tabel 2: Kondisi Awal Kompartemen (Ternormalisasi)

Kompartemen	Nilai Awal
R_0	0,511
M_{e0}	0,098
M_{n0}	0,329
I_{r0}	0,025
I_{n0}	0,037
B_{s0}	0,200
B_{n0}	0,800

3.3. Simulasi Dinamika Kompartemen

Simulasi dinamika kompartemen dilakukan menggunakan sistem persamaan diferensial yang telah diformulasikan pada Subbab 3.1. Penyelesaian numerik dilakukan dengan metode Runge-Kutta orde empat menggunakan parameter dan kondisi awal yang telah diestimasi pada Subbab 3.2. Seluruh kompartemen perempuan dinormalisasi terhadap satu kohort populasi, sedangkan kompartemen anak diperlakukan sebagai luaran kumulatif dari sistem.

Grafik berikut menunjukkan perubahan proporsi setiap kompartemen sepanjang waktu simulasi 20 tahun:



Gambar 2: Simulasi dinamika seluruh kompartemen model

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kompartemen remaja belum menikah (R) menurun secara bertahap seiring sebagian individu memasuki pernikahan dini (M_e) maupun pernikahan usia ideal (M_n). Kompartemen M_e mengalami sedikit peningkatan pada fase awal simulasi, kemudian menurun perlahan karena transisi menuju kompartemen ibu remaja (I_r). Kompartemen M_n cenderung stabil dengan sedikit penurunan, mencerminkan sebagian perempuan yang menunda pernikahan hingga usia ideal.

Kompartemen ibu remaja (I_r) menunjukkan kenaikan kecil pada fase awal, kemudian menurun secara perlahan menuju kondisi stabil. Sebaliknya, kompartemen ibu usia ideal (I_n) awalnya meningkat, kemudian menurun perlahan hingga mencapai keseimbangan. Pola ini mencerminkan aliran populasi dari status menikah menuju status ibu dan kelahiran anak, serta efek kumulatif dari transisi internal populasi.

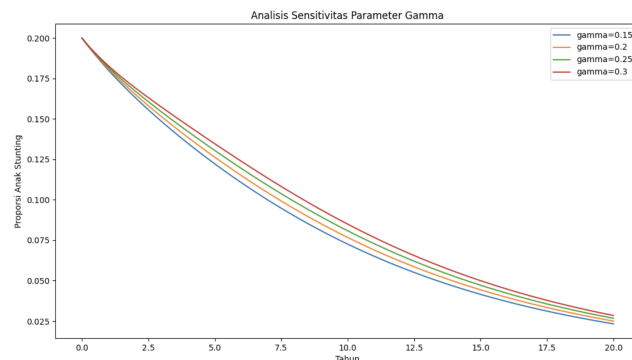
Kompartemen anak stunting (B_s) menurun perlahan seiring pemulihan gizi (δ), sedangkan kompartemen anak tidak stunting (B_n) terus meningkat hingga mendekati kondisi stabil, dipengaruhi oleh kelahiran dari ibu usia ideal dan pemulihan dari B_s .

Secara keseluruhan, simulasi menunjukkan bahwa dinamika prevalensi stunting sangat dipengaruhi oleh distribusi usia pernikahan, laju kelahiran, serta efektivitas pemulihan gizi. Intervensi yang menunda usia pernikahan dan meningkatkan layanan gizi berpotensi menurunkan risiko stunting pada anak. Strategi kebijakan yang mengintegrasikan pencegahan pernikahan dini dan penguatan layanan gizi ibu-anak menjadi kunci untuk menurunkan prevalensi stunting secara berkelanjutan.

Untuk melengkapi pemahaman terhadap dinamika sistem, analisis selanjutnya difokuskan pada sensitivitas model terhadap parameter kunci yang memengaruhi risiko stunting. Parameter yang dikaji secara khusus adalah laju risiko stunting dari ibu ke anak (γ), karena parameter ini merepresentasikan jalur penting intervensi kesehatan ibu dan anak dalam konteks kebijakan pencegahan stunting.

3.4. Analisis Sensitivitas Parameter γ

Untuk menilai pengaruh variasi laju risiko stunting dari ibu ke anak (γ) terhadap dinamika prevalensi anak stunting, dilakukan analisis sensitivitas dengan beberapa nilai γ , yaitu 0,15; 0,20; 0,25; dan 0,30. Hasil simulasi ditampilkan pada grafik berikut:



Gambar 3: Analisis sensitivitas γ pada kompartemen B_s

Dari grafik terlihat bahwa peningkatan nilai γ memperlambat penurunan proporsi kompartemen anak stunting (B_s), sedangkan penurunan γ mempercepat penurunan tersebut dan meningkatkan proporsi anak dengan status gizi normal (B_n).

Meskipun demikian, perubahan nilai γ dalam rentang yang diuji tidak mengubah pola umum dinamika sistem. Semua skenario menunjukkan kecenderungan menuju kondisi stabil dengan keberadaan kedua kompartemen anak, baik stunting maupun normal. Hal ini menunjukkan bahwa model relatif *robust* terhadap variasi parameter γ , dengan perubahan parameter lebih memengaruhi kecepatan menuju keseimbangan serta tingkat prevalensi akhir, tanpa mengubah struktur dinamika populasi secara keseluruhan.

Interpretasi hasil ini menegaskan bahwa upaya intervensi yang menurunkan risiko stunting sejak masa kehamilan; misalnya melalui peningkatan status gizi ibu, pemantauan kehamilan, serta intervensi pada ibu berisiko; berpotensi mempercepat penurunan proporsi anak stunting (B_s). Dengan demikian, parameter γ dalam model merepresentasikan jalur penting intervensi kesehatan yang dapat memengaruhi prevalensi stunting anak, terutama melalui kualitas layanan kesehatan ibu dan upaya perbaikan gizi sejak tahap awal kehidupan anak.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis dinamika prevalensi stunting pada remaja perempuan di Jawa Timur melalui model kompartemen berbasis simulasi. Hasil menunjukkan bahwa penurunan laju pernikahan dini berpotensi menurunkan prevalensi stunting pada ibu dan anak secara bertahap. Analisis sensitivitas parameter γ menegaskan bahwa perubahan risiko kelahiran anak stunting dari ibu remaja berpengaruh nyata terhadap proporsi anak stunting dalam jangka panjang. Temuan ini menunjukkan bahwa faktor sosial pada tahap awal kehidupan reproduktif dapat menghasilkan dampak kesehatan lintas generasi, sehingga intervensi yang menunda usia pernikahan berpotensi memberikan efek tidak langsung terhadap perbaikan status gizi anak.

Dari perspektif kebijakan, hasil simulasi mengindikasikan bahwa strategi pengurangan stunting tidak hanya perlu berfokus pada intervensi gizi setelah kelahiran, tetapi juga pada upaya preventif yang menunda usia pernikahan serta meningkatkan kualitas layanan gizi bagi ibu remaja. Integrasi intervensi pada tahap pra-kehamilan dan pasca-kelahiran ini berpotensi memberikan dampak yang lebih berkelanjutan.

dibandingkan pendekatan yang hanya berfokus pada satu tahap kehidupan.

Keterbatasan penelitian meliputi asumsi nilai awal kompartemen, penggunaan model deterministik, serta keterbatasan data yang mengikuti perkembangan populasi dari waktu ke waktu untuk kalibrasi parameter secara langsung. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan model stokastik, memasukkan heterogenitas wilayah, serta melakukan validasi dengan data yang mengikuti kelompok yang sama dari waktu ke waktu untuk meningkatkan ketepatan prediksi kebijakan.

Pernyataan Kontribusi Penulis (CRediT)

Erna Setiawati: Konseptualisasi, Metodologi, Analisis Formal, Kurasi Data, Penulisan–Draf Awal, Penulisan–Telaah dan Penyuntingan.

Deklarasi Penggunaan AI atau Teknologi Berbasis AI

ChatGPT digunakan secara terbatas untuk membantu penyusunan draf awal dan perapian bahasa. Formulasi model, analisis, dan interpretasi hasil sepenuhnya dilakukan oleh penulis.

Deklarasi Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Pendanaan dan Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

Ketersediaan Data

Data bersifat sekunder dan tersedia publik dari SSGI Kemenkes RI serta publikasi BPS (Provinsi Jawa Timur dan Kabupaten Banyuwangi). Materi replikasi dapat diminta ke penulis korespondensi melalui ernasetiawati@billfath.ac.id.

Daftar Pustaka

- [1] WHO, *Child malnutrition: Stunting among children under 5 years of age*, 2024. [Available online](#).
- [2] WHO, *Malnutrition*, 2024. Accessed: Dec. 25, 2025. [Available online](#).
- [3] UN, *End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture*, 2022. Accessed: Dec. 25, 2025. [Available online](#).
- [4] Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. “Ssgi 2024: Prevalensi stunting nasional turun menjadi 19.8%,” Accessed: Dec. 25, 2025. [Available online](#).
- [5] A. T. Mulyani, M. A. Khairinisa, A. Khatib, and A. Y. Chaerunisaa, “Understanding Stunting: Impact, Causes, and Strategy to Accelerate Stunting Reduction—A Narrative Review,” *Nutrients*, vol. 17, no. 9, 2025. DOI: [10.3390/nu17091493](#). [Available online](#).
- [6] UNICEF, *Child marriage*, 2023. Accessed: Dec. 25, 2025. [Available online](#).
- [7] L. Hastuti et al., “Indonesian Journal of Global Health Research,” *Indonesian Journal of Global Health Research*, vol. 7, no. 4, pp. 1081–1088, 2025. DOI: [10.37287/ijghr.v2i4.250](#). [Available online](#).
- [8] Mustajab dan Indriani, “Hubungan Pernikahan Usia Anak Terhadap Kejadian Stunting,” *Jurnal Keperawatan Widya Gantari Indonesia*, vol. 7, no. 1, pp. 1–6, 2023. [Available online](#).
- [9] J. C. Wells, A. A. Marphatia, M. Cortina-Borja, D. S. Manandhar, A. M. Reid, and N. M. Saville, “Associations of maternal age at marriage and pregnancy with infant undernutrition: Evidence from first-time mothers in rural lowland Nepal,” *American Journal of Biological Anthropology*, vol. 178, no. 4, pp. 557–573, 2022. DOI: [10.1002/ajpa.24560](#). [Available online](#).
- [10] S. Windani, I. Meiliawati, and T. S. Dewiati, “The relationship of early marriage to the incidence of stunting in langkat regency,” *International Journal of Cultural and Social Science*, vol. 6, no. 4, pp. 1259–1268, 2025. [Available online](#).
- [11] M. T. Jauhari, J. Ardian, N. Z. Solehah, and T. A. Saputri, “Relationship between Early Marriage and Maternal Nutrition Knowledge on Toddler Nutritional Status in Beleke Village West Lombok, Indonesia,” *AgriHealth: Journal of Agri-food, Nutrition and Public Health*, vol. 5, no. 2, pp. 142–149, 2024. DOI: [10.20961/agrihealth.v5i2.92320](#). [Available online](#).
- [12] BPS Jatim, *Jumlah Pernikahan Menurut Kabupaten/Kota di Provinsi Jawa Timur, 2020-2022*, 2023. Accessed: Dec. 25, 2025. [Available online](#).
- [13] O. Kiseleva, S. Yakovlev, O. Prytomanova, and O. Kuzenkov, “Mathematical Modeling of Regional Infectious Disease Dynamics Based on Extended Compartmental Models,” *Computation*, vol. 13, no. 8, pp. 1–15, 2025. DOI: [10.3390/computation13080187](#). [Available online](#).
- [14] F. Mirsaedi, M. Sheikhalishahi, M. Mohammadi, A. Pirayesh, and D. Ivanov, “Compartmental models in epidemiology: bridging the gap with operations research for enhanced epidemic control,” *Annals of Operations Research*, vol. 2003, 2025. DOI: [10.1007/s10479-025-06893-1](#). [Available online](#).
- [15] BPS Jatim, *Jumlah Penduduk Menurut Kelompok Umur dan Jenis Kelamin di Provinsi Jawa Timur, 2023*, 2024. [Available online](#).
- [16] BPS Kab. Banyuwangi, *Persentase Penduduk Perempuan Usia 10 Tahun Ke Atas di Jawa Timur yang Pernah Kawin Dirinci Menurut Kabupaten/Kota, Umur Kawin Pertama*, 2023, 2024. Accessed: Dec. 25, 2025. [Available online](#).
- [17] M. A. Hossain et al., “Understanding the socio-demographic and programmatic factors associated with adolescent motherhood and its association with child undernutrition in Bangladesh,” *BMC Public Health*, vol. 24, no. 1, pp. 1–13, 2024. DOI: [10.1186/s12889-024-19355-3](#).

- [18] D. Simbolon, F. Riastuti, and Kusdalinah, “Adolescent Marriages and Risk of Stunting in Indonesia: Based on Indonesian Family Life Survey (IFLS) 2014,” *The Indonesian Journal of Public Health*, vol. 19, no. 2, pp. 276–288, 2024. DOI: [10.20473/ijph.v19i2.2024.276-288](https://doi.org/10.20473/ijph.v19i2.2024.276-288). Available online.