

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mikroba patogen pada makanan merupakan faktor utama yang dapat memicu *gastroenteritis*, *sepsis*, serta komplikasi kronis lainnya, sehingga menimbulkan beban kesehatan masyarakat yang signifikan. (Rossi et al., 2024; Zizza et al., 2024) Dampak ekonomi yang menyertainya meliputi biaya perawatan kesehatan, hilangnya produktivitas tenaga kerja, dan kerugian pada sektor industri pangan. Di Indonesia, intensitas dan keparahan kasus keracunan makanan menunjukkan tren peningkatan seiring dengan pertumbuhan konsumsi produk olahan serta jaringan distribusi yang belum terstandarisasi secara memadai, terutama di wilayah dengan sistem pengawasan sanitarian yang lemah (Rudiatin et al., 2024). Kondisi ini menegaskan perlunya intervensi kebijakan yang memperkuat kontrol kualitas dan pengawasan pangan di seluruh rantai pasokan.

Beban global penyakit menular melalui makanan mengalami penurunan kasus total sekitar 600 juta pada 2023, sementara angka kematian tetap relatif stabil di sekitar 420 ribu per tahun. (T. Li et al., 2024) Pada tingkat nasional, data Badan Pengawas Obat dan Makanan mengidentifikasi provinsi Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur sebagai kontributor utama, dengan masing-masing mencatat sekitar 56 kasus dari total 6.397 kasus yang dilaporkan pada tahun 2023; sisanya tersebar di provinsi lain (6.341 kasus). (Estiningtyas et al., 2024; Sofiyulloh et al., 2025; Suryani et al., 2023; Wardana & Setiarto, 2024) Patogen dominan yang terdeteksi meliputi *Salmonella spp.* (38 %), *Escherichia coli* (22 %), *Staphylococcus aureus* (18 %), *Listeria monocytogenes* (5 %), *Clostridium perfringens* (7 %), serta kontaminasi fekal (10 %) (Handika et al., 2024).

Diare yang dipicu oleh kontaminasi makanan dan air masih menjadi ancaman serius kesehatan global. Setiap tahunnya, diperkirakan 2,2 juta orang dewasa serta anak dibawah lima tahun meninggal dunia karena diare yang diakibatkan oleh patogen makanan, sementara 600 juta orang lainnya mengalami gangguan kesehatan setelah mengonsumsi makanan tercemar. (Jenifer & Sathiyamurthy, 2020; Valero et al., 2016) Di Indonesia, data terbaru dari rumah sakit menunjukkan bahwa mayoritas kematian akibat diare berhubungan erat dengan infeksi bakteri *Escherichia coli* (*E. Coli*). Studi tahun 2024 yang meneliti beberapa rumah sakit di Jawa Timur menemukan prevalensi *Escherichia coli* (*E. Coli*) pada makanan yang disajikan berkisar 18% - 30% dengan variasi signifikan tergantung pada tingkat sanitasi dan higienitas fasilitas. (Manges, 2016; Wibawati et al., 2023) Penelitian pada tahun 2023 di sebuah rumah sakit umum di Jakarta melaporkan keberadaan strain *Escherichia coli* (*E. Coli*) yang resisten antibiotik dalam makanan dan lingkungan dapur dan menimbulkan kekhawatiran khusus bagi pasien. (Siahaan et al., 2022)

Meskipun Kementerian Kesehatan belum merilis laporan resmi mengenai wabah *Escherichia coli* (*E. Coli*) di Sumatera dan Jawa pada 2023, studi retrospektif di

Kabupaten bantul mencatat 68 kasus penyakit akibat konsumsi makanan terkontaminasi *Escherichia coli* (E. Coli) dari 140 orang yang terpapar, dengan gejala utama diare dan nyeri perut (Iskandar et al., 2025) temuan-temuan ini menegaskan pentingnya penilaian risiko kontaminasi mikroba sebagai dasar perumusan kebijakan manajemen risiko dan langkah-langkah keamanan pangan yang tepat sasaran.

Salah satu faktor kunci yang meningkatkan risiko kontaminasi mikroba di rumah sakit adalah petugas penanganan makanan (Quon & Jiang, 2024; Suswati et al., 2023). Menurut Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1096/Menkes/Per/VI/2011 tentang Higiene Sanitasi Jasa boga, penjamah makanan yaitu orang yang terlibat langsung persiapan, pembersihan, pengolahan, pengangkutan sampai dengan penyajian memiliki peran sentral dalam mencegah kontaminasi makanan termasuk *Escherichia coli* (E. Coli)

Sanitasi makanan, yang didefinisikan sebagai upaya menjaga kebersihan, kesehatan, dan keamanan makanan, menjadi elemen krusial. Kontaminasi dapat terjadi secara langsung (misalnya pestisida pada buah) atau melalui **kontaminasi silang** pada bahan mentah maupun matang. (Morse et al., 2020) Pengolahan dengan tangan kotor, kondisi dapur yang tidak bersih serta penucucian makanan dengan air tercemar dapat memperkenalkan patogen berbahaya. (Ajekiigbe et al., 2025)

Untuk mengatasi permasalahan ini, **Analisis Risiko** menjadi alat manajemen komprehensif yang mengidentifikasi, menilai dan memprioritaskan bahaya potensial diseluruh rantai produksi makanan. (van Eck & Waltman, 2010) dibidang pangan, pendekatan *Quantitative Microbial Risk Assessment* (QMRA) memungkinkan pemodelan kuantitatif risiko infeksi berdasarkan data paparan mikroba, kondisi lingkungan dan perilaku konsumen. (Mallongi, 2021a) *Quantitative Microbial Risk Assessment* (QMRA) memberikan gambaran akurat mengenai potensi risiko bagi pasien dan mendukung perumusan strategi mitigasi berbasis bukti ilmiah. (Njatrijani, 2021). Tujuan utama penilaian risiko adalah untuk mengadopsi rencana yang dirancang dan memungkinkan kepastian pengendalian risiko mulai dari tahap awal hingga tahap akhir. (Vyas et al., 2022).

Pada tahap pengumpulan data lapangan, tim peneliti menjalin komunikasi intensif dengan pihak Rumah Sakit Daerah (RSUD) Hajjah Andi Depu Polewali Mandar untuk memperoleh pemahaman mendalam mengenai prosedur dan mekanisme distribusi makanan ringan yang rutin dibagikan kepada seluruh pegawai setiap pagi. RSUD ini memiliki Standar Operasional Prosedur (SOP) komprehensif yang memfokuskan pada pencegahan kontaminasi mikroba pada makanan dari dapur internal, serta SOP khusus untuk pengambilan sampel makanan sebagai respons terhadap Kejadian Luar Biasa (KLB) yang mungkin terjadi (KLB) [RSUD Hajjah Andi Depu, 2024].

Berdasarkan data lapangan dan wawancara, distribusi makanan ringan di rumah sakit ini dilaksanakan setiap pagi melalui kerja sama dengan tiga penyedia jasa boga eksternal yang terikat perjanjian resmi. Mekanisme distribusi dilakukan secara proporsional sesuai jumlah pegawai yang hadir, dengan makanan diantar oleh pihak ketiga dan kemudian didistribusikan oleh staf pramusaji ke seluruh ruangan. Hal ini menunjukkan makanan tidak diproduksi secara internal, melainkan berasal dari unit

produksi katering eksternal yang seharusnya wajib memenuhi standar higiene pangan melalui audit kualitas. Keberadaan rantai pasok eksternal meningkatkan kompleksitas risiko kontaminasi mikroba, khususnya *Escherichia coli*, pada tahap transportasi dan serah terima.

Permasalahan utama yang teridentifikasi meliputi kurangnya integrasi penyedia jasa boga dengan SOP HACCP internal rumah sakit, kesenjangan pengetahuan higienis, keterbatasan fasilitas sanitasi, serta tantangan koordinasi antar pemangku kepentingan. Analisis mekanisme distribusi yang adaptif terhadap kehadiran karyawan menjadi dasar evaluasi faktor risiko kontaminasi serta estimasi tingkat paparan bakteri patogen di lingkungan rumah sakit.

Meski SOP internal sudah ada, pemahaman risiko mikroba terkait distribusi eksternal tetap menjadi kebutuhan kritis. Oleh karena itu, penelitian ini menyusun sebuah Policy Brief sebagai rekomendasi kebijakan strategis berbasis temuan lapangan, bertujuan meningkatkan pencegahan kontaminasi mikroba, terutama *E. coli*, pada sistem distribusi makanan ringan oleh pihak ketiga. Dokumen ini diharapkan menjadi acuan bagi manajemen rumah sakit dan penyedia jasa boga eksternal guna memperkuat prosedur, meningkatkan pengendalian mutu pangan secara menyeluruh dan berkelanjutan. Selain itu, Policy Brief merekomendasikan penyusunan payung hukum dalam bentuk Surat Keputusan (SK) yang mengatur mekanisme pengadaan dan penyediaan makanan secara transparan dan akuntabel, termasuk regulasi seleksi mitra jasa boga, standar kualitas bahan baku, audit rutin, serta penguatan koordinasi antar pemangku kepentingan demi meminimalkan risiko keracunan.

Dalam konteks yang lebih luas, studi oleh Smith & Johnson (2020) di Amerika Serikat memaparkan bahwa intervensi nutrisi terstruktur di tempat kerja mampu meningkatkan perilaku makan sehat, aktivitas fisik, dan kualitas tidur, yang berkontribusi pada produktivitas dan kesehatan karyawan (Kim et al., 2020). Temuan ini menggarisbawahi pentingnya pendekatan holistik terhadap kualitas makanan di lingkungan kerja, khususnya rumah sakit dengan beban kerja tinggi dan sistem shift. Kombinasi distribusi eksternal yang transparan, standar keamanan pangan yang ketat, serta intervensi nutrisi terarah membentuk fondasi kuat bagi budaya kesehatan kerja yang berkelanjutan.

Penelitian ini mengintegrasikan Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) dengan Interpretive Structural Modeling (ISM) sebagai pendekatan strategis dan inovatif. QMRA digunakan untuk menilai risiko secara kuantitatif melalui analisis dosis-respons dan karakterisasi paparan, sehingga estimasi risiko infeksi per porsi dan per tahun kerja menjadi akurat. Sedangkan ISM memetakan hubungan hierarkis dan ketergantungan faktor-faktor risiko, mengidentifikasi faktor dominan, serta menentukan prioritas penanganan yang sistematis (Aini & Chen, 2025; Sushil, 2012).

Kontaminasi *Escherichia coli* pada makanan adalah ancaman serius bagi kesehatan, terutama di lingkungan rumah sakit yang membutuhkan standar higienitas sangat tinggi demi menjaga kesejahteraan pegawai. Penelitian ini memiliki tujuan ganda: pertama, mengevaluasi risiko infeksi *E. coli* secara kuantitatif pada makanan yang dikonsumsi pegawai RSUD Hajjah Andi Depu Polewali Mandar; kedua, mengembangkan strategi pencegahan efektif berbasis data. Tahap pertama fokus

pada QMRA, mencakup identifikasi bahaya, penilaian paparan, analisis dosis-respons, dan karakterisasi risiko kuantitatif. Tahap kedua memanfaatkan ISM untuk analisa struktural faktor risiko, menentukan prioritas, dan merumuskan strategi pencegahan yang dapat diintegrasikan ke dalam SOP yang ada.

Hingga kini, literatur belum melaporkan penggabungan QMRA dan ISM dalam satu kerangka analisis terpadu, sehingga penelitian ini merupakan inovasi metodologis yang diharapkan menghasilkan pendekatan lebih komprehensif dan sistematis dalam pengelolaan risiko kontaminasi mikroba di rumah sakit, dengan peningkatan akurasi dan efektivitas intervensi pencegahan.

Penelitian ini akan dilakukan melalui dua tahap utama. Tahap I berfokus pada *Quantitative Microbial Risk Assessment* (QMRA). Pada tahap ini, akan dilakukan identifikasi bahaya *E. coli* beserta variabel-variabel kunci penyebab kontaminasi, penilaian paparan, analisis dosis-respons untuk memprediksi probabilitas infeksi, dan karakterisasi risiko komprehensif berupa estimasi kuantitatif risiko per porsi dan per tahun kerja. Dengan demikian, tahap ini akan memberikan gambaran jelas mengenai tingkat risiko kesehatan yang ditimbulkan.

Tahap II akan membangun di atas temuan QMRA dengan menerapkan *Interpretive Structural Modeling* (ISM). Pendekatan ini akan menganalisis secara struktural hubungan hierarkis dan keterkaitan antar faktor-faktor risiko yang telah teridentifikasi, mengidentifikasi faktor-faktor dominan, dan menentukan prioritas penanganan. Oleh karena itu, integrasi kedua metode tersebut dalam penelitian ini merupakan sebuah inovasi metodologis yang bertujuan untuk menghasilkan pendekatan yang lebih komprehensif dan sistematis dalam pengembangan strategi pencegahan risiko kontaminasi mikroba pada makanan di lingkungan rumah sakit. Pendekatan terpadu ini diharapkan dapat meningkatkan keakuratan pengelolaan risiko serta efektivitas intervensi pencegahan yang disusun

Penelitian ini tidak hanya mengevaluasi kondisi eksisting, tetapi juga menghasilkan solusi berbasis bukti yang dapat dijadikan model pengelolaan risiko pangan bagi rumah sakit lain di Indonesia. Sebagai hasil akhir, penelitian ini menghasilkan *policy brief* yang berisi rangkaian rekomendasi kebijakan strategis. *Policy brief* ini menjadi acuan bagi pihak rumah sakit dalam menegaskan standar kualitas dan keamanan pangan kepada penyedia jasa boga yang menyajikan makanan ringan setiap pagi.

Dengan demikian, *policy brief* berfungsi sebagai panduan yang jelas, berorientasi pada tindakan, dan wajib diimplementasikan oleh semua pemangku kepentingan. Hal ini menjamin keamanan serta kualitas makanan sesuai standar yang telah ditetapkan, sekaligus mendorong peningkatan konsistensi, akuntabilitas, dan transparansi dalam sistem pelayanan katering rumah sakit secara keseluruhan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan konteks permasalahan yang terjadi di RSUD Hajjah Andi Depu Polewali Mandar, penelitian ini memusatkan perhatian pada pegawai rumah sakit sebagai subjek utama. Tujuannya adalah mengidentifikasi dan menganalisis berbagai aspek yang berperan dalam risiko kontaminasi mikroba pada

makanan di lingkungan rumah sakit. Dengan demikian, tiga (3) masalah utama dirumuskan untuk dijadikan fokus kajian, yaitu:

1. **Faktor-faktor risiko** yang memengaruhi kontaminasi bakteri *Escherichia coli* (E. coli) pada makanan pegawai, berdasarkan proses identifikasi bahaya dan penilaian paparan.
2. **Tingkat paparan dan risiko kesehatan** yang ditimbulkan oleh kontaminasi bakteri tersebut, dianalisis melalui **analisis dosis-respons** serta **karakterisasi risiko** pada makanan yang dikonsumsi pegawai.
3. **Strategi** Pencegahan apa yang dapat diterapkan untuk **meminimalisir** risiko kontaminasi mikroba pada makanan di rumah sakit?

Selain tiga masalah utama di atas, **strategi pencegahan** yang dapat dirumuskan dan diimplementasikan juga menjadi fokus penting, sehingga hasil penelitian dapat memberikan kontribusi nyata dalam meningkatkan **pengelolaan keamanan pangan** di RSUD Hajjah Andi Depu serta melindungi kesehatan pasien secara menyeluruh.

1.3 Tujuan Penelitian

1.3.1 Tujuan penelitian Umum:

Mengidentifikasi, menganalisis, dan merumuskan strategi pencegahan risiko kontaminasi bakteri *Escherichia coli* (E. coli) pada makanan pegawai RSUD Hajjah Andi Depu melalui pendekatan analisis risiko menyeluruh yang meliputi identifikasi bahaya, penilaian paparan, analisis dosis-respons, karakterisasi risiko, serta pemodelan struktural menggunakan *Interpretive Structural Modeling* (ISM).

1.3.2 Tujuan Penelitian tahap I

Tahap I penelitian ini bertujuan melakukan *Quantitative Microbiological Risk Assessment* (QMRA) terhadap kontaminasi *Escherichia coli* pada makanan pegawai RSUD Hajjah Andi Depu. Secara khusus, peneliti akan (1) mengidentifikasi bahaya E. coli serta variabel-variabel utama yang memengaruhi risiko (Hazard Identification); (2) menilai tingkat paparan dan melakukan analisis dosis-respons untuk memperkirakan probabilitas infeksi (Exposure & Dose-Response Assessment); (3) menyusun karakterisasi risiko yang komprehensif berupa estimasi kuantitatif risiko per porsi dan per tahun kerja (Risk Characterization)

Dengan demikian, tahap pertama ini sangat penting untuk menyediakan dasar empiris yang kuat bagi langkah-langkah tindak lanjut, khususnya dalam hal pengendalian dan pencegahan kontaminasi mikroba. Hasil dari tahap ini akan menjadi landasan data dan informasi yang akan digunakan dalam tahap kedua penelitian untuk pengembangan model struktural dan strategi pencegahan risiko yang lebih efektif.

1.3.3 Tujuan Penelitian tahap II

- ❖ Membangun model hubungan hierarkis dan keterkaitan antar faktor risiko yang sudah teridentifikasi.
- ❖ Mengidentifikasi faktor-faktor dominan dan menentukan prioritas penanganan berdasarkan model ISM.
- ❖ Merumuskan strategi pencegahan yang efektif dan aplikatif untuk meminimalisasi risiko kontaminasi mikroba pada makanan pegawai.

Hasil model ISM ini akan digunakan sebagai dasar untuk merumuskan strategi pencegahan yang efektif dan aplikatif, yang ditujukan untuk meminimalkan risiko kontaminasi mikroba pada makanan pegawai di rumah sakit. Strategi tersebut diharapkan dapat memberikan panduan prioritas tindakan pengendalian sesuai dengan tingkat pengaruh dan posisi faktor risiko dalam model, sehingga implementasinya dapat lebih terarah dan berdampak signifikan.

1.4 Kegunaan Penelitian

- 1.4.1. Memberikan rekomendasi strategis bagi manajemen rumah sakit dalam pengelolaan keamanan pangan.
 - a. Menyusun rekomendasi berbasis bukti yang terukur bagi pengendalian rantai pasok, standar sanitasi dapur & transportasi, pelatihan petugas boga, serta monitoring mikroba.
 - b. Mengintegrasikan rekomendasi ke dalam Food Safety Management System (FSMS) sebagai panduan operasional harian tim makanan dan unit kualitas.
- 1.4.2. Membantu meningkatkan mutu pelayanan dan keselamatan pasien melalui pencegahan infeksi terkait makanan.
 - a. Mengurangi risiko kontaminasi *E.coli* dan patogen lain, sehingga mencegah gastroenteritis berat, sepsis, dan infeksi nosokomial terkait makanan.
 - b. Melindungi kelompok pasien rentan (lansia, anak-anak, pasien bedah, imunokompromais).
 - c. Menurunkan beban rawat inap, durasi perawatan, dan biaya, serta memperkuat kepercayaan publik terhadap rumah sakit.
- 1.4.3. Dasar kebijakan rumah sakit & regulator
 - a. Menjadi acuan penyusunan/penyempurnaan manual operasional sanitasi, jadwal audit makanan, dan sistem pelaporan insiden kontaminasi.
 - b. Data dan model risiko dapat dijadikan benchmark bagi Dinas Kesehatan, BPOM, atau kebijakan daerah/nasional tentang pengawasan makanan di rumah sakit, khususnya dengan jaringan distribusi eksternal yang kompleks.
 - c. Memungkinkan penerapan pendekatan berbasis risiko yang lebih sistematis dan efisien dalam pengawasan pangan.

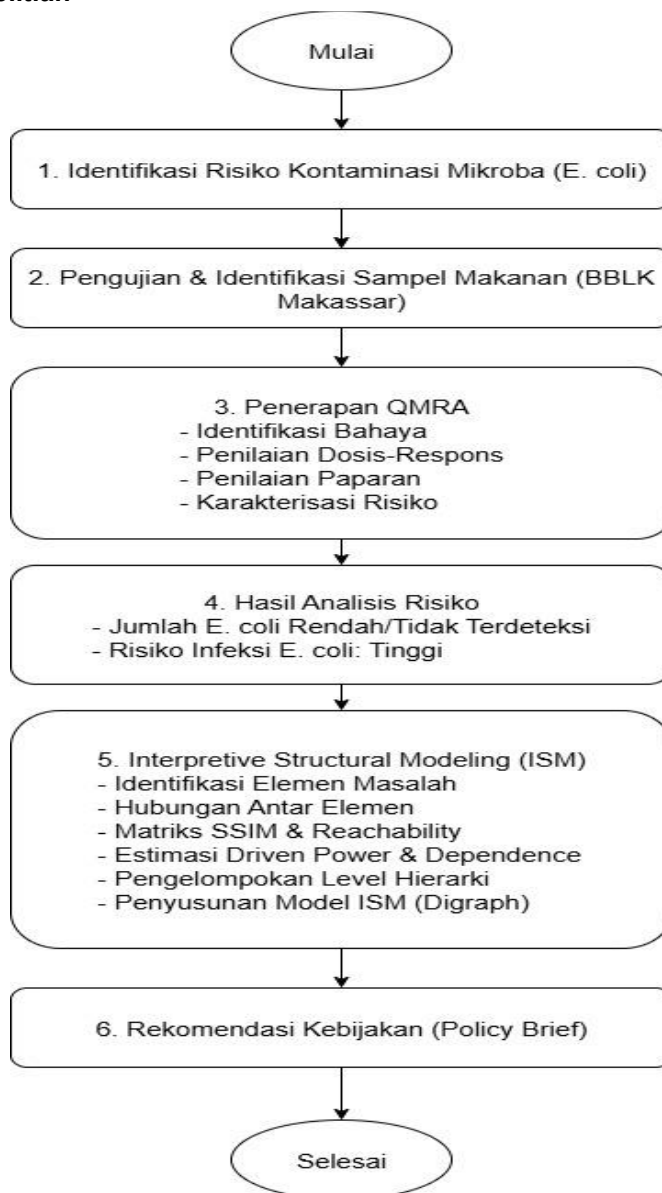
1.5 Kebaharuan

Disertasi ini menghadirkan kebaruan melalui pendekatan komprehensif dan terintegrasi dalam mengatasi risiko kontaminasi *Escherichia coli* pada makanan pegawai RSUD Hajjah Andi Depu Polewali Mandar. Kebaruan ini terletak pada:

- 1) Penggabungan Metode Kuantitatif dan Kualitatif Tingkat Lanjut: Mengaplikasikan *Quantitative Microbiological Risk Assessment* (QMRA) untuk estimasi risiko infeksi *E. coli* yang spesifik dan terukur, serta *Interpretive Structural Modeling* (ISM) untuk memetakan hubungan hierarkis faktor risiko. Kombinasi inovatif ini memberikan pemahaman mendalam dari aspek kuantitatif hingga identifikasi prioritas intervensi secara struktural.
- 2) Solusi Berbasis Bukti dan Rekomendasi Kebijakan Konkret: Mengembangkan strategi pencegahan yang tidak hanya teoretis, namun juga aplikatif, berfokus pada lingkungan rumah sakit daerah yang unik, dan menghasilkan policy brief sebagai rekomendasi konkret untuk perbaikan kebijakan dan praktik pengelolaan keamanan pangan lokal.

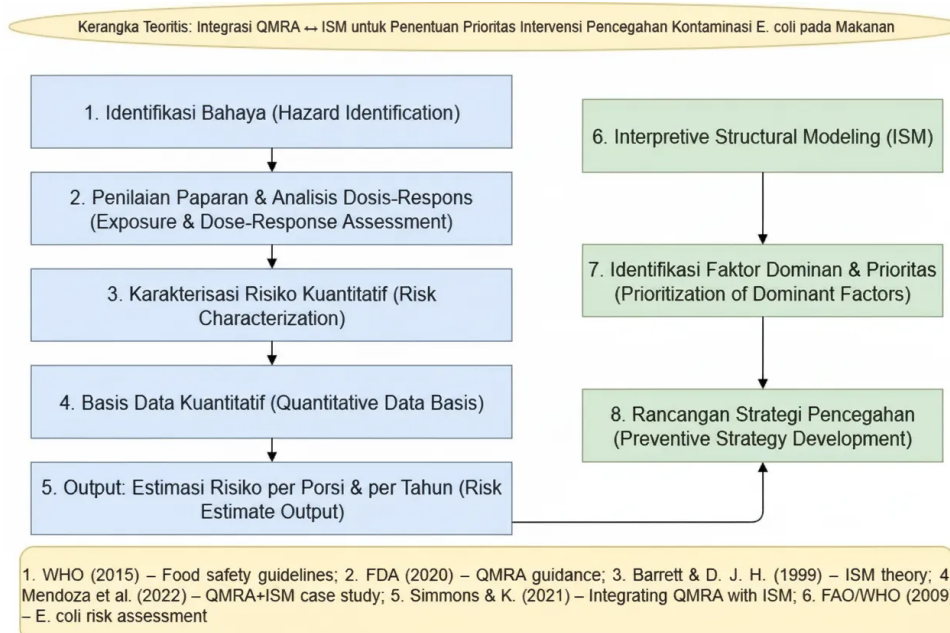
Melalui pendekatan inovatif ini, disertasi berkontribusi dalam mengisi kesenjangan pengetahuan terkait risiko *E. coli* pada makanan di fasilitas kesehatan lokal dan menyediakan panduan praktis berbasis bukti untuk mitigasi yang efektif.

1.6 Tahapan Penelitian



Gambar 1.2. Flowchart Tahapan Penelitian

1.7 Kerangka teori penelitian



Gambar 1.3. Kerangka teori penelitian

1.8 Kerangka Konsep

KERANGKA KONSEP DISERTASI
Integrasi QMRA, Kontaminasi E. coli pada Makanan, dan Interpretative Structural Modeling (ISM) sebagai Metode Pengambilan Keputusan
MODIFIKASI TEORI dan PENDEKATAN STRUKTURAL



Gambar 1.4. Kerangka Konsep penelitian

Kerangka konsep disertasi ini mengintegrasikan tiga pendekatan utama: QMRA (Quantitative Microbial Risk Assessment) sebagai metode kuantitatif untuk menilai risiko mikroba, analisis kontaminasi E. coli pada makanan sebagai fokus utama masalah, dan ISM (Interpretative Structural Modeling) sebagai metode struktural untuk memahami hubungan antar faktor dan membantu pengambilan keputusan. Penelitian ini tidak hanya menerapkan teori yang ada, tetapi juga memodifikasi pendekatan tersebut untuk menghasilkan analisis risiko yang lebih komprehensif dan strategi intervensi yang efektif. Integrasi antara QMRA, studi kontaminasi, dan ISM

memungkinkan pemahaman yang mendalam tentang sumber, penyebaran, dan faktor-faktor yang mempengaruhi kontaminasi E. coli, sekaligus memprioritaskan tindakan pencegahan berdasarkan model struktural hubungan faktor-faktor tersebut. Dengan demikian, kerangka ini menyediakan fondasi yang kuat untuk mengambil keputusan berbasis bukti dalam mengelola risiko kontaminasi mikroba pada makanan.

BAB II

TOPIK PENELITIAN I

2.1. Abstrak

PATMAWATI. **Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) terhadap Risiko Infeksi Escherichia coli dari Berbagai Jenis Makanan di RSUD Hajjah Andi Depu Polewali Mandar.** (dibimbing oleh Anwar Daud, Anwar Mallongi dan Agus Bintara Birawida)

Latar Belakang: Kontaminasi makanan oleh mikroba patogen *Escherichia coli* merupakan ancaman serius terhadap keamanan pangan di lingkungan rumah sakit, terutama pada RSUD Hajjah Andi Depu Polewali Mandar yang melayani pasien rentan. Meskipun kadar kontaminasi sering berada dalam batas standar, risiko infeksi kumulatif akibat konsumsi berulang makanan belum dapat diantisipasi dengan pendekatan kualitatif tradisional. Tujuan: Penelitian ini bertujuan untuk (1) mengidentifikasi bahaya mikrobiologis *E. coli* dan variabel risiko dalam rantai pasok makanan, (2) menilai paparan konsumen melalui pengukuran jumlah koloni *E. coli* per gram, (3) menerapkan model dosis-respons β -Poisson untuk memperkirakan probabilitas infeksi harian dan tahunan, serta (4) menyusun karakterisasi risiko kuantitatif sebagai dasar keputusan mitigasi. Metode: Sampel makanan diambil secara acak dan representatif dari berbagai menu selama periode penelitian, kemudian diuji menggunakan metode membran filtration atau spread plate untuk memperoleh nilai CFU/g. Selanjutnya, dilakukan analisis Quantitative Microbiological Risk Assessment (QMRA) dengan mengintegrasikan hasil paparan ke dalam model β -Poisson dan menghitung risiko kumulatif per tahun serta risiko per porsi. Hasil: Semua sampel menunjukkan kadar *E. coli* rendah ($< 10^{10}$ CFU/g) dan memenuhi standar nasional. Namun, QMRA mengungkapkan probabilitas infeksi harian berkisar $1,76 \times 10^{-1} - 2,52 \times 10^{-1}$ (0,176–0,252), dan probabilitas infeksi kumulatif per tahun mencapai nilai maksimum 1,0 (100 %). Kesimpulan: Walaupun tingkat kontaminasi mikrobiologis individual berada dalam batas aman, akumulasi paparan dari konsumsi berulang menghasilkan risiko infeksi yang signifikan bagi pasien rawan. Pendekatan berbasis standar mikrobiologis saja tidak memadai; diperlukan sistem penilaian risiko kuantitatif untuk memastikan keamanan pangan di rumah sakit..

.Kata Kunci — *Escherichia coli*; risiko mikrobiologi; manajemen pangan; kontaminasi pangan; QMRA

2.2. PENDAHULUAN

Metode *Quantitative Microbial Risk Assessment* (QMRA) yang digunakan dalam penelitian ini memiliki keunggulan berupa kemampuan untuk memberikan estimasi risiko kesehatan yang terukur dan berbasis data empiris mikrobiologi.(Koutsoumanis et al., 2021) Pendekatan ini memungkinkan identifikasi dan kuantifikasi risiko infeksi secara spesifik, yang sangat bermanfaat dalam pengambilan keputusan pengelolaan risiko keamanan pangan. (Soller et al., 2016) Namun demikian, Selain itu, keterbatasan sumber daya laboratorium dapat membatasi jumlah sampel yang diuji, yang berpotensi memengaruhi generalisasi hasil penelitian.(Pang et al., 2017)

Penelitian ini merupakan survei analitik dengan pendekatan cross-sectional menggunakan Metode *Quantitative Microbial Risk Assessment* (QMRA).(Nam et al., 2021) Desain cross-sectional memungkinkan pengumpulan data pada satu titik waktu,

memberikan gambaran jelas tentang titik kontaminasi dan faktor risiko paparan *Escherichia coli* (*E. coli*) dalam makanan (Safliya et al., 2020) yang disajikan bagi pegawai rumah sakit.

Analisis risiko terdiri dari tiga komponen utama penilaian risiko, manajemen risiko, dan komunikasi risiko di mana penilaian risiko melibatkan pelaksanaan *Quantitative Microbial Risk Assessment* (QMRA) yang memanfaatkan model matematis prediktif, data ilmiah, dan informasi sistem-spesifik untuk memperkirakan kemungkinan infeksi atau penyakit akibat mikroorganisme patogen. (Hunowu et al., 2023a) QMRA bergantung pada pengumpulan data yang kuat: identifikasi patogen yang relevan, karakterisasi hubungan dosis–respon, kuantifikasi konsentrasi patogen sepanjang jalur paparan, serta data populasi (demografi dan pola perilaku) untuk menilai tingkat paparan. Setelah data dikumpulkan, data tersebut diproses dengan metode statistik dan matematis misalnya kurva dosis–respon. (Ramos et al., 2021) Dengan pendekatan yang terstruktur ini, QMRA memberikan penilaian risiko mikroba yang komprehensif dan mendukung pembuatan keputusan berbasis bukti untuk intervensi kesehatan masyarakat. (de Carvalho et al., 2025)

2.3. Tinjauan Pustaka

2.3.1 Konsep Dasar QMRA (Quantitative Microbial Risk Assessment)

- a. Definisi dan Tujuan QMRA : Jelaskan apa itu QMRA, mengapa penting, dan langkah-langkah umumnya.

Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) adalah suatu metode ilmiah yang sistematis dan kuantitatif untuk mengevaluasi risiko kesehatan manusia yang ditimbulkan oleh paparan mikroorganisme patogen (misalnya, bakteri, virus, dan parasit) melalui berbagai jalur paparan, seperti makanan, air, dan lingkungan. QMRA menggunakan data empiris dan model matematika untuk memperkirakan probabilitas infeksi atau penyakit akibat paparan mikroba tersebut. (V. Haas et al., 2022) QMRA berbeda dari penilaian risiko kualitatif karena secara eksplisit mengkuantifikasikan risiko dalam bentuk angka yang dapat diinterpretasikan dan digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan. Dengan demikian, QMRA memberikan gambaran yang lebih jelas dan rinci mengenai potensi bahaya mikrobiologis dibandingkan metode konvensional. Pendekatan ini memungkinkan pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana mikroba dapat berpindah dari sumber ke manusia, serta efek kesehatan yang mungkin timbul. (Epa, 2012)

- b. Tujuan QMRA

Tujuan utama QMRA adalah untuk memahami, mengestimasi, dan mengelola risiko kesehatan manusia akibat paparan mikroorganisme patogen. Secara lebih spesifik, tujuan QMRA meliputi:

- Mengidentifikasi dan Mengkuantifikasi Risiko: QMRA berupaya memberikan estimasi numerik atas kemungkinan terjadinya infeksi atau penyakit akibat paparan mikroorganisme tertentu pada populasi sasaran. Contohnya berupa probabilitas infeksi per individu dalam jangka waktu tertentu. (Mensi et al., 2015)
- Memberikan Dasar untuk Pengambilan Keputusan: Informasi kuantitatif yang dihasilkan oleh QMRA digunakan oleh pembuat kebijakan dan manajer risiko

untuk menetapkan standar keamanan, merancang intervensi, dan mengalokasikan sumber daya secara efektif. (McCarthy et al., 2025)

- Membandingkan Risiko: QMRA dapat membandingkan risiko antar patogen, jalur paparan, atau skenario yang berbedas sehingga membantu prioritas penanganan risiko (Kimbrell et al., 2024)
- Evaluasi Efektivitas Intervensi: QMRA dapat digunakan untuk memprediksi dampak penerapan intervensi higienis atau teknologi baru dalam menurunkan risiko. (Ashbolt, 2015a)

c. Langkah-langkah umum *Quantitative Microbial Risk Assessment* (QMRA):

- 1) Identifikasi Bahaya (*hazard Identification*). Langkah ini melibatkan identifikasi patogen mikroba spesifik yang menjadi perhatian dan memiliki potensi untuk menyebabkan penyakit pada manusia. Ini mencakup pemahaman tentang karakteristik patogen, jalur penularannya, dan penyakit yang ditimbulkannya. (Buchanan et al., 2000)
- 2) Penilaian Paparan (*exposure Assessment*). Pada tahap ini, dilakukan estimasi seberapa sering dan seberapa banyak manusia terpapar oleh patogen yang teridentifikasi. Faktor-faktor yang dipertimbangkan meliputi sumber kontaminasi, rute paparan (misalnya konsumsi air/makanan, inhalasi) konsentrasi patogen dalam media paparan dan perilaku manusia yang menyebabkan paparan
- 3) Penilaian Dosis- Respons (*Dose-Response Assessment*). Langkah ini melibatkan penentuan hubungan antara dosis patogen yang terpapar dan probabilitas respons negatif (misalnya, infeksi atau penyakit) pada individu. Model matematika dosis-respons digunakan untuk mengestimasi risiko infeksi pada tingkat dosis yang berbeda (Ryan et al., 2014)
- 4) Karakterisasi Risiko (*Risk Characterization*). Ini Adalah Langkah akhir dimana semua informasi dari tiga langkah sebelumnya digabungkan untuk memberikan estimasi risiko keseluruhan. Hasilnya sering dinyatakan sebagai probabilitas infeksi atau kasus penyakit per tahun per individu, atau dalam bentuk metrik risiko lainnya. Bagian ini juga mencakup diskusi mengenai ketidakpastian dalam penilaian risiko dan asumsi-asumsi yang digunakan. (Mallongi, 2021b)

2.3.2. Karakteristik Mikrobiologi *Escherichia coli* (E. coli) dalam Keamanan Pangan

- a. *Escherichia coli* (E. coli) adalah bakteri Gram-negatif berbentuk batang yang termasuk dalam famili Enterobacteriaceae. Secara taksonomi, E. coli diklasifikasikan dalam domain Bacteria, kelas Gammaproteobacteria, ordo Enterobacterales, dan genus *Escherichia* (Hunowu et al., 2023b) Morfologi E. coli ditandai dengan ukuran sekitar 1-2 mikrometer panjang dan 0,25-1 mikrometer diameter, dengan flagela peritrik yang memungkinkan motilitasnya (West et al., 2007).

Strain patogenik E. coli, seperti Enterohemorrhagic E. coli (EHEC) yang terkenal dengan strain O157:H7, menghasilkan verotoksin (Shiga toxin) yang dapat menyebabkan kerusakan sel usus dan komplikasi serius seperti hemolitik uremik sindrom (HUS) (Karmali, 2009). Selain itu, faktor virulensi lain seperti invasifitas dan kemampuan untuk mengelak dari respon imun juga berperan penting dalam patogenesis infeksi E. coli.

Dalam keamanan pangan, pemahaman tentang karakteristik mikrobiologi dan faktor virulensi *E. coli* sangat penting untuk pengendalian dan pencegahan kontaminasi, terutama pada produk pangan asal hewan yang berisiko menjadi sumber infeksi (Shen et al., 2015)

b. *Escherichia coli* sebagai Patogen Pangan: Perhatian Utama dan Sumber Kontaminasi.

Escherichia coli (*E. coli*) merupakan salah satu patogen pangan yang paling diperhatikan dalam sektor keamanan pangan karena kemampuannya menyebabkan berbagai penyakit yang serius pada manusia, mulai dari diare ringan hingga kondisi yang mengancam jiwa seperti sindrom hemolitik uremik (HUS). (Naidoo & Zishiri, 2025)

E. coli menjadi perhatian utama karena beberapa strain patogenik seperti Enterohemorrhagic *E. coli* (EHEC), khususnya serotipe O157:H7, memiliki virulensi tinggi dan ambang infeksi yang rendah, sehingga hanya sedikit bakteri yang diperlukan untuk menyebabkan penyakit. (Rahal et al., 2012).

Sumber utama kontaminasi *E. coli* dalam rantai pangan adalah feses hewan atau manusia yang terkontaminasi, air yang tercemar, dan lingkungan yang tidak higienis. (Donnenberg & Whittam, 2001). Kontaminasi dapat terjadi pada berbagai tahap produksi pangan, mulai dari peternakan, pemrosesan, distribusi, hingga penyajian makanan. Misalnya, daging sapi yang tidak dimasak dengan baik dapat mengandung EHEC dari feses hewan, sementara sayuran segar dapat terkontaminasi melalui irigasi dengan air yang tercemar. (Gurtler & Gibson, 2022). Air yang terkontaminasi merupakan media penting penyebaran *E. coli*, terutama di daerah dengan sanitasi yang buruk. Selain itu, praktik kebersihan yang tidak memadai selama pengolahan makanan, seperti pencucian tangan yang tidak benar dan penggunaan peralatan yang terkontaminasi, juga meningkatkan risiko penularan bakteri ini. (Erickson & Doyle, 2007). Karena *E. coli* dapat bertahan dalam berbagai kondisi lingkungan dan memiliki kemampuan untuk membentuk biofilm, pengendalian dan pencegahan kontaminasi memerlukan pendekatan terpadu yang melibatkan sanitasi yang ketat, pemantauan kualitas air, dan edukasi konsumen serta pelaku usaha pangan mengenai praktik higienis. (Zhou et al., 2022)

c. *Escherichia coli* Menjadi Perhatian Utama di Sektor Pangan dan Sumber Utama Kontaminasinya

Escherichia coli (*E. coli*) menjadi perhatian utama dalam sektor keamanan pangan karena kemampuannya untuk menyebabkan penyakit serius pada manusia, terutama melalui kontaminasi makanan dan air. Beberapa strain patogenik *E. coli*, seperti Enterohemorrhagic *E. coli* (EHEC) serotipe O157:H7, dapat menyebabkan infeksi dengan dosis inokulum yang sangat rendah, sehingga risiko penularannya tinggi (Gurtler & Gibson, 2022). Infeksi *E. coli* dapat menyebabkan gejala mulai dari diare ringan sampai sindrom hemolitik uremik (HUS) yang mengancam jiwa, sehingga pengendaliannya menjadi prioritas utama dalam keamanan pangan (Mayer et al., 2012).

Sumber utama kontaminasi *E. coli* dalam rantai pangan adalah feses dari manusia dan hewan yang terinfeksi. Feses ini dapat mencemari lingkungan, air, serta bahan pangan, khususnya produk hewani seperti daging sapi, susu, dan produk olahan lainnya. (PREVENTING *E. Coli* in FOOD, n.d.). Air yang terkontaminasi oleh limbah domestik atau peternakan juga merupakan media penyebaran penting, terutama di daerah dengan sanitasi yang buruk. (Novita et al., 2022). Kontaminasi silang selama pengolahan makanan, misalnya melalui peralatan yang tidak higienis atau tangan operator yang terkontaminasi, juga berkontribusi pada penyebaran *E. coli* (Kirchner et al., 2021).

Selain itu, kemampuan *E. coli* untuk bertahan dalam berbagai kondisi lingkungan, termasuk kemampuan membentuk biofilm, membuatnya sulit untuk dihilangkan sepenuhnya dari rantai pasokan pangan. (Gazula et al., 2019). Oleh karena itu, pengendalian *E. coli* memerlukan pendekatan komprehensif yang meliputi sanitasi yang ketat, pengawasan kualitas air dan bahan baku, serta edukasi tentang praktik higienis di seluruh rantai pangan.

d. Dosis Infeksi dan Dampak Kesehatan *Escherichia coli*

Dosis infeksi *E. coli*, khususnya strain patogen seperti Enterohemorrhagic *E. coli* (EHEC) O157:H7, sangat rendah, yang berarti hanya sejumlah kecil bakteri yang dibutuhkan untuk menyebabkan penyakit pada manusia. Studi menunjukkan bahwa dosis infeksi dapat serendah 10 hingga 100 sel bakteri untuk memicu infeksi, yang menjadikan *E. coli* patogenik ini sangat berbahaya dalam konteks keamanan pangan (Strzelecki et al., 2025). Gejala klinis yang ditimbulkan oleh infeksi *E. coli* bervariasi tergantung pada strain dan kondisi individu yang terinfeksi. Gejala umum meliputi diare berdarah, kram perut, mual, dan muntah. Pada kasus yang parah, terutama akibat infeksi EHEC, dapat berkembang menjadi sindrom hemolitik uremik (HUS), yaitu kondisi yang menyebabkan kerusakan ginjal akut dan dapat mengancam jiwa, terutama pada anak-anak dan lansia (Detzner et al., 2022). Kelompok yang paling rentan terhadap dampak serius infeksi *E. coli* adalah anak-anak di bawah usia lima tahun, lansia, dan individu dengan sistem imun yang lemah. Pada kelompok ini, risiko komplikasi serius, termasuk HUS, lebih tinggi dan memerlukan penanganan medis segera. (Wong et al., 2012). Penting untuk memahami dosis infeksi rendah dan dampak kesehatan serius ini agar dapat meningkatkan kewaspadaan dalam pengelolaan keamanan pangan serta penerapan langkah-langkah pencegahan yang efektif

2.3.3. Aplikasi QMRA untuk *E.coli* dalam Keamanan Pangan

a. Identifikasi Jalur Kontaminasi *E. coli* dalam Pangan:

Escherichia coli (*E. coli*) dapat memasuki dan menyebar dalam rantai pangan melalui berbagai jalur kontaminasi yang terjadi mulai dari tahap produksi di pertanian hingga konsumsi akhir oleh konsumen. Pemahaman tentang jalur ini sangat penting dalam penerapan Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) untuk mengendalikan risiko infeksi.

1) Tahap Pertanian (Hulu)

E. coli biasanya berasal dari feses hewan ternak atau manusia yang mencemari lingkungan pertanian. Kontaminasi dapat terjadi melalui penggunaan pupuk kandang yang belum diolah dengan baik, air irigasi yang terkontaminasi oleh limbah feses, serta kontak langsung dengan hewan ternak yang membawa bakteri ini. (Cheong et al., 2024). Sayuran segar, khususnya yang dikonsumsi mentah seperti selada dan bayam, sangat rentan terkontaminasi pada tahap ini.

2) Tahap Pengolahan dan Produksi

Selama pengolahan, *E. coli* dapat menyebar melalui peralatan yang tidak higienis, air yang digunakan dalam pencucian, atau kontak silang dengan bahan pangan lain yang sudah terkontaminasi. Misalnya, daging sapi giling dapat terkontaminasi oleh bakteri dari permukaan daging yang terkontaminasi feses selama proses pemotongan dan penggilingan. (Fusi et al., 2010). Kebersihan dan sanitasi yang buruk pada fasilitas pengolahan meningkatkan risiko penyebaran.

3) Tahap Distribusi

Pada tahap distribusi, kondisi penyimpanan yang tidak memadai seperti suhu yang tidak sesuai dapat memungkinkan pertumbuhan *E. coli*. Kontaminasi juga dapat

terjadi melalui kemasan yang terkontaminasi atau selama pengangkutan jika terdapat kontak dengan sumber kontaminasi. (Zhao et al., 2019)

4) Tahap Konsumsi (Hilir)

Pada tahap konsumsi, praktik penanganan makanan yang tidak higienis oleh konsumen, seperti mencuci tangan yang kurang baik atau penggunaan alat masak yang tercemar, dapat menyebabkan kontaminasi silang. Konsumsi makanan yang tidak dimasak dengan sempurna, terutama daging dan produk susu, juga merupakan jalur utama infeksi. (Langiano et al., 2012)

b. Model Dosis-Respons Spesifik *E. coli*:

Dalam Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA), model dosis-respons digunakan untuk memprediksi probabilitas infeksi atau penyakit sebagai fungsi dari dosis patogen yang dikonsumsi. Untuk *Escherichia coli*, khususnya strain patogen seperti *E. coli* O157:H7, dua model dosis-respons yang paling umum digunakan adalah model eksponensial dan beta-Poisson.

- 1) Model Eksponensial Model ini mengasumsikan bahwa setiap unit bakteri yang masuk ke dalam tubuh memiliki probabilitas tetap untuk menyebabkan infeksi, dan respons infeksi mengikuti distribusi eksponensial. Model eksponensial memiliki bentuk matematis sederhana:

$$d = E \times V$$

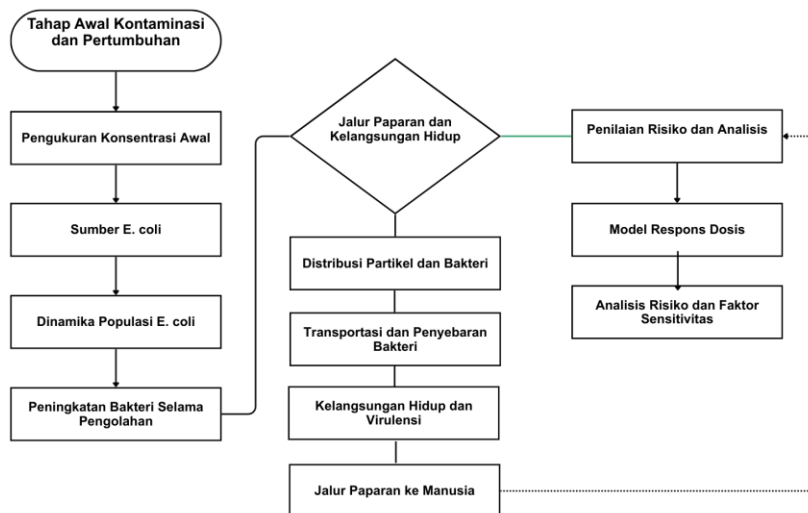
Keterangan

- d: Perkiraan dosis/jumlah bakteri tertelan (dalam satuan CFU – Colony-Forming Units)
- E: Konsentrasi bakteri dalam sampel makanan (dalam satuan CFU/mg sampel makanan, atau CFU/mL jika cairan).
- V: Volume atau jumlah makanan (atau air) yang dikonsumsi (misalnya, dalam mg atau mL, disesuaikan dengan satuan E)

Model ini lebih fleksibel dan sering digunakan ketika data dosis-respons menunjukkan variasi yang kompleks dan tidak dapat dijelaskan oleh model eksponensial. Model beta-Poisson lebih akurat dalam menggambarkan risiko infeksi pada dosis rendah hingga sedang (C. N. Haas et al., 2000; Ota et al., 2006)

2.3.4. Kerangka Teori Termodifikasi untuk *E. coli* dalam Penelitian Ini

Dalam bagian ini, akan dijelaskan secara rinci mengenai kerangka teori yang dimodifikasi dan relevan dengan penelitian *E. coli* ini. Kerangka teori ini dibangun berdasarkan konsep-konsep kunci dari analisis risiko mikrobial dan disesuaikan untuk menjelaskan secara komprehensif mekanisme infeksi, faktor-faktor yang memengaruhi virulensi, serta respons inang terhadap patogen *E. coli*.



Gambar 2.1 Kerangka ini diadaptasi dari pendekatan Kuantitatif Penilaian Risiko Mikroba (QMRA) yang diilhami oleh framework penelitian Legionella (V. Haas et al., 2022; Karavarsamis & Hamilton, 2010) dan pengembangan lebih lanjut oleh (Safliya et al., 2020).

Kerangka teori penelitian ini menggambarkan tahapan kontaminasi dan pertumbuhan *Escherichia coli* pada bahan makanan, mulai dari pengukuran konsentrasi awal bakteri hingga peningkatan jumlah selama proses pengolahan. Selanjutnya, distribusi partikel dan bakteri melalui aerosol, serta transportasi dan penyebarannya dalam lingkungan dianalisis untuk memahami kelangsungan hidup dan virulensi bakteri tersebut. Jalur paparan kepada manusia berupa konsumsi atau inhalasi menjadi fokus utama dalam menilai risiko infeksi. Model respons dosis digunakan untuk memperkirakan potensi risiko infeksi, disertai dengan analisis sensitivitas faktor risiko untuk mengidentifikasi faktor-faktor kunci yang mempengaruhi tingkat risiko tersebut.

Secara keseluruhan, kerangka ini bertujuan untuk memberikan pandangan terstruktur tentang bagaimana *E. coli* berpindah dari sumber ke bahan makanan, bertahan hidup, menyebar, dan akhirnya menimbulkan risiko infeksi pada manusia. Dengan memahami setiap langkah ini, diharapkan kita dapat mengembangkan strategi yang lebih efektif untuk mencegah kontaminasi dan melindungi kesehatan masyarakat.

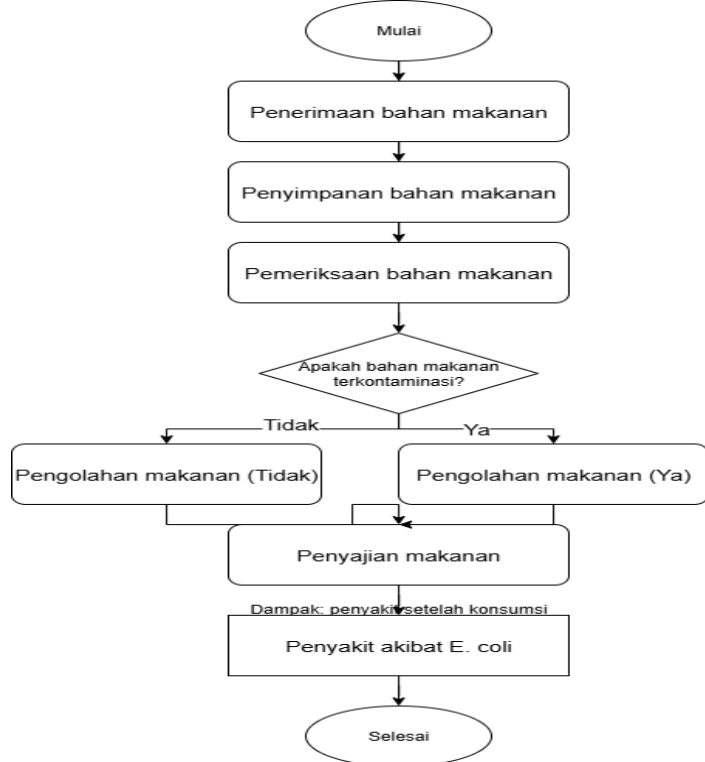
- **Perbandingan dan Justifikasi Modifikasi**

Kerangka penilaian risiko yang diusulkan ini (gambar 2.1) merupakan adaptasi strategis dari kerangka umum penilaian risiko mikrobial, dengan fokus spesifik pada patogen *Escherichia coli* (*E. coli*) dan relevansinya dalam konteks keamanan pangan. Modifikasi ini didasarkan pada karakteristik unik *E. coli*, jalur transmisinya, serta dinamika pertumbuhannya dalam matriks makanan dan lingkungan.

- 1) **Jalur Kontaminasi Makanan yang Relevan untuk *E. coli*:**

Modifikasi utama melibatkan penekanan pada jalur kontaminasi spesifik yang relevan dengan *E. coli*. Berbeda dengan kerangka umum yang mungkin mencakup

berbagai skenario kontaminasi, kerangka ini secara eksplisit mengintegrasikan sumber-sumber utama introduksi E. coli ke dalam rantai makanan, termasuk kontaminasi dari lingkungan (misalnya, air, tanah, limbah hewani) ke bahan pangan mentah, serta kontaminasi silang selama proses penanganan dan pengolahan makanan. Penyesuaian ini krusial mengingat E. coli sering kali berasal dari feses hewan berdarah panas dan distribusinya yang luas di lingkungan pertanian.



Gambar 2.3 Jalur kontaminasi Makanan

Sumber: (Alreshoodi et al., 2024; Pakbin et al., 2023a; Suswati et al., 2023)

Diagram ini mengilustrasikan alur proses pengolahan bahan makanan mulai dari penerimaan hingga penyajian, dengan fokus pada risiko kontaminasi bakteri E. coli. Proses dimulai dengan tahap penerimaan dan penyimpanan bahan makanan, diikuti pemeriksaan kualitas untuk mendeteksi adanya kontaminasi. Jika bahan makanan dinyatakan terkontaminasi, maka pengolahan makanan tetap dilakukan, namun berisiko menimbulkan penyakit akibat konsumsi makanan tersebut. Dampak kesehatan yang dihighlight adalah penyakit yang disebabkan oleh E. coli, yang merupakan konsekuensi akhir yang penting dalam proses ini. Diagram menegaskan pentingnya kontrol mutu dan pengawasan kontaminasi untuk mencegah risiko kesehatan pada konsumen.(Irvin et al., 2021; Jensen et al., 2022; Kashima et al., 2021; Pakbin et al., 2023b)

Dalam konteks manajemen keamanan pangan, identifikasi kontaminasi pada bahan pangan merupakan tahapan krusial yang menentukan jalur proses selanjutnya. Pada diagram alir yang disajikan, alur "Pemeriksaan bahan makanan" berfungsi sebagai titik diskriminasi utama. Apabila hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa bahan makanan tidak terkontaminasi, bahan pangan tersebut akan memasuki jalur "Pengolahan

makanan (Tidak)". Ini merepresentasikan implementasi praktik pengolahan standar yang diaplikasikan pada bahan baku yang telah memenuhi kriteria mikrobiologis dan higienis yang ditetapkan, sehingga menghasilkan produk aman untuk konsumsi. (Puji Lestari et al., 2015)

Sebaliknya, jika bahan makanan teridentifikasi terkontaminasi—dalam hal ini oleh *Escherichia coli*—proses akan dialihkan ke jalur "Pengolahan makanan (Ya)". Jalur ini mengindikasikan perlunya intervensi khusus untuk mitigasi risiko. Penanganan dapat meliputi perlakuan termal intensif, aplikasi teknologi dekontaminasi, atau pembuangan jika tingkat kontaminasi melebihi batas aman yang dapat diterima atau tidak dapat direduksi secara efektif. (Ayuning Setiara et al., 2024) Tujuan utama dari divergensi alur ini adalah untuk memastikan bahwa setiap bahan pangan, terlepas dari status kontaminasi awalnya, berakhir dalam kondisi yang aman untuk dikonsumsi atau dibuang secara bertanggung jawab guna mencegah risiko kesehatan publik. Setelah proses pengolahan, baik pada jalur "Tidak" maupun "Ya", semua bahan pangan akan menuju ke tahap "Penyajian makanan", dengan pemahaman bahwa kegagalan dalam mitigasi kontaminasi dapat berimplikasi pada "Penyakit akibat *E. coli*" setelah konsumsi.

2) Penekanan pada Pertumbuhan/Penurunan Bakteri Selama Pengolahan Makanan:

Kerangka ini memberikan perhatian khusus pada kinetika pertumbuhan dan penurunan populasi *E. coli* selama tahapan pengolahan makanan. Ini mencakup pemodelan faktor-faktor seperti suhu, pH, ketersediaan nutrisi, dan aktivitas air yang secara langsung mempengaruhi viabilitas dan proliferasi *E. coli*. Penekanan ini berbeda dari kerangka yang lebih umum yang mungkin tidak secara mendalam mengintegrasikan dinamika mikrobial spesifik ini. Pemahaman mendalam tentang laju pertumbuhan atau penurunan *E. coli* memungkinkan estimasi konsentrasi patogen yang lebih akurat pada titik paparan

3) Jalur Paparan yang Spesifik (Konsumsi dan/atau Inhalasi):

Meskipun *E. coli* umumnya diinterpretasikan sebagai patogen yang ditularkan melalui konsumsi makanan atau air yang terkontaminasi, kerangka ini tetap membuka kemungkinan untuk jalur paparan tambahan seperti inhalasi, terutama dalam skenario tertentu (misalnya, aerosol dari proses pencucian bahan pangan atau aktivitas pertanian). Penyesuaian ini mencerminkan pendekatan komprehensif terhadap penilaian risiko, meskipun penekanan utama tetap pada ingesti. Hal ini memungkinkan fleksibilitas dalam menilai skenario risiko yang lebih luas

4) Penyesuaian Lainnya:

Setiap parameter model dosis-respons dan model exposure assessment telah disesuaikan berdasarkan data epidemiologi dan mikrobiologi yang tersedia untuk strain *E. coli* patogen. Ini termasuk parameter virulensi, dosis infeksi minimum, serta probabilitas keparahan penyakit yang spesifik untuk *E. coli*

2.3.5. Manajemen Risiko dan Intervensi Higienis

Manajemen risiko dalam keamanan pangan melibatkan proses sistematis untuk mengidentifikasi, menilai, dan mengendalikan bahaya mikrobiologi, seperti *Escherichia coli*, guna melindungi kesehatan konsumen. Dalam konteks *E. coli*, strategi ini sangat krusial mengingat potensi patogenitasnya dan mode transmisinya yang beragam.

- a. Peran Hasil QMRA dalam Pengambilan Keputusan Risiko: Hasil dari Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) memiliki peran fundamental dalam menginformasikan pengambilan keputusan manajemen risiko. Model QMRA menyediakan estimasi probabilitas dan besarnya risiko kesehatan yang terkait dengan

paparan E. coli dalam pangan, serta mengidentifikasi faktor-faktor kunci yang berkontribusi terhadap risiko tersebut.

- Prioritisasi Risiko: Mengidentifikasi jalur kontaminasi atau produk pangan yang paling berisiko, sehingga sumber daya dapat dialokasikan secara efisien untuk intervensi yang paling efektif (Banga et al., 2019)
- Penetapan Tujuan Keamanan Pangan: Mengembangkan target keamanan pangan yang berbasis ilmiah dan dapat dicapai (Couvert et al., 2005)
- Evaluasi Efektivitas Intervensi: Memprediksi dampak pengurangan risiko dari berbagai strategi mitigasi memungkinkan pemilihan intervensi yang paling *cost-effective*. (Oliveira et al., 2015)
- Komunikasi Risiko yang Efektif: Menyajikan data risiko secara transparan kepada pemangku kepentingan, termasuk industri, regulator, dan publik, untuk membangun kepercayaan dan memfasilitasi pengambilan keputusan bersama. (Charlebois & Summan, 2015)

b. Strategi Mitigasi dan Intervensi Higienis:

Pengendalian E. coli dalam rantai pangan memerlukan penerapan serangkaian strategi mitigasi dan intervensi higienis yang komprehensif. Prinsip-prinsip umum seperti *Hazard Analysis and Critical Control Points* (HACCP), Good Agricultural Practices (GAP) di tingkat primer, dan Good Manufacturing Practices (GMP) di fasilitas pengolahan, merupakan fondasi utama. Implementasi ini berfokus pada pencegahan kontaminasi, eliminasi, atau pengurangan E. coli hingga tingkat yang dapat diterima.

- Pencegahan Kontaminasi: Meliputi kontrol sanitasi di seluruh rantai produksi, dari pertanian (misalnya, pengelolaan pupuk kandang, kualitas air irigasi) hingga pengolahan (misalnya, kebersihan peralatan, kebersihan personel). Strategi ini sangat vital untuk E. coli yang sering berasal dari sumber feses
- Penghilangan atau Pengurangan: Teknologi higienis yang relevan mencakup:
 - 1) Perlakuan Panas: Pasteurisasi, sterilisasi, atau memasak makanan hingga suhu internal yang aman untuk membunuh E. coli patogen [U.S. Food and Drug Administration (FDA)].
 - 2) Perlakuan Disinfeksi: Penggunaan sanitiser dan disinfektan pada permukaan kontak makanan dan peralatan.
 - 3) Teknologi Non-Termal: Seperti iradiasi, tekanan tinggi, atau penggunaan agen antimikroba alami, yang dapat digunakan untuk mengurangi beban mikrobial tanpa merusak kualitas produk secara signifikan.
 - 4) Proses Pencucian: Khususnya untuk buah dan sayuran, penggunaan air bersih dan teknik pencucian yang efektif dapat mengurangi kontaminasi permukaan.
 - 5) Komunikasi Risiko: Pentingnya mengkomunikasikan temuan QMRA kepada pemangku kepentingan

c. Komunikasi Risiko

Komunikasi risiko merupakan komponen esensial dari manajemen risiko yang efektif. Ini melibatkan pertukaran informasi secara interaktif tentang risiko E. coli dan tindakan mitigasinya antara semua pemangku kepentingan: regulator, industri pangan, ilmuwan, dan masyarakat konsumen. Tujuan komunikasi risiko adalah untuk:

- Meningkatkan Pemahaman: Memastikan bahwa semua pihak memahami sifat bahaya *E. coli*, tingkat risiko, dan rasionalisasi di balik keputusan manajemen risiko.
- Mendorong Perubahan Perilaku: Mengedukasi konsumen tentang praktik penanganan makanan yang aman di rumah dan mendorong industri untuk mengadopsi standar kebersihan yang tinggi.
- Membangun Kepercayaan: Komunikasi yang transparan dan jujur dapat membangun kepercayaan publik terhadap sistem keamanan pangan dan otoritas terkait [Codex Alimentarius Commission].
- Memfasilitasi Dialog: Memungkinkan adanya umpan balik dari berbagai pihak yang dapat memperbaiki strategi manajemen risiko di masa depan.

2.3.6. Tantangan dan Peluang Penelitian QMRA *E. coli*

Penelitian *Quantitative Microbial Risk Assessment* (QMRA) terhadap *Escherichia coli* menghadapi berbagai tantangan yang cukup signifikan, baik dari segi data maupun model yang digunakan. Salah satu keterbatasan utama adalah ketersediaan dan kualitas data epidemiologi serta data kontaminasi yang sering kali terbatas atau tidak lengkap. Ketidakpastian ini dapat berdampak pada akurasi estimasi risiko dan validitas hasil QMRA. Selain itu, kompleksitas biologis *E. coli*, termasuk berbagai strain dengan tingkat virulensi yang berbeda, menambah kesulitan dalam pemodelan risiko secara komprehensif. Model QMRA juga sering kali harus melakukan asumsi yang bisa menyederhanakan proses infeksi dan paparan, yang pada gilirannya dapat membatasi aplikasi praktis hasil penilaian risiko tersebut.

Meski demikian, terdapat tren penelitian terkini yang memberikan peluang signifikan untuk pengembangan QMRA pada *E. coli*. Inovasi teknologi seperti penggunaan omics (genomics, proteomics) dan data big data epidemiologi mulai diterapkan untuk memperbaiki akurasi model dan menyesuaikan parameter berdasarkan strain spesifik dan kondisi lingkungan. Pengembangan model dinamis yang mempertimbangkan variabilitas waktu dan interaksi kompleks dalam rantai pangan juga semakin banyak dilakukan. Selain itu, pendekatan interdisipliner yang menggabungkan aspek mikrobiologi, teknologi pangan, dan ilmu lingkungan menjanjikan pemahaman risiko yang lebih mendalam dan komprehensif.

Walaupun kemajuan tersebut, masih terdapat celah penelitian yang belum banyak tersentuh dan menjadi justifikasi pentingnya penelitian lebih lanjut. Misalnya, studi tentang efek interaksi antara berbagai *strain E. coli* dalam konteks kontaminasi silang dinamis di tahap pengolahan makanan masih sangat terbatas. Selain itu, pengembangan model QMRA yang dapat mengakomodasi efek kombinasi intervensi higienis secara terpadu masih perlu ditegaskan. Penelitian ini fokus pada modifikasi kerangka QMRA untuk konsentrasi dan risiko infeksi *E. coli* dalam konteks lokal atau spesifik produk pangan tertentu sangat relevan, karena dapat mengisi kekosongan ini serta memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk pengambilan keputusan manajemen risiko yang lebih efektif.

2.4. METODE

Studi yang memanfaatkan QMRA diterapkan di berbagai sektor pangan, memberikan wawasan berharga yang membantu mengoptimalkan proses produksi dan mitigasi risiko. Peran utama manajemen risiko adalah penerapan intervensi dan teknologi higienis yang tepat.

Pengambilan sampel makanan menggunakan strategi random cross-sectional yang menargetkan makanan olahan dan siap saji yang rutin dikonsumsi oleh pegawai berusia 18 tahun ke atas di lingkungan rumah sakit. Kriteria inklusi meliputi makanan yang umum dikonsumsi, sedangkan kriteria eksklusi menyingkirkan makanan yang jarang dikonsumsi atau kemasan yang dibawa dari luar, demi menjaga validitas penilaian risiko.

- a. Mengidentifikasi bahaya dan variabel utama risiko kontaminasi berdasarkan survei dan pengamatan lapangan.
- b. Melakukan penilaian paparan dan analisis dosis-respons untuk memperkirakan tingkat risiko kesehatan akibat kontaminasi.
- c. Menghasilkan gambaran komprehensif terkait tingkat bahaya serta potensi dampak kesehatan pada pegawai rumah sakit.

2.4.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Rumah Sakit Umum Daerah (RSUD) Hajjah Andi Depu Kabupaten Polewali Mandar, Provinsi Sulawesi Barat. Lokasi penelitian dipilih karena menjadi pusat pelayanan kesehatan rujukan daerah yang memiliki jumlah staf yang signifikan dan keragaman aktivitas pelayanan makanan harian. Waktu pelaksanaan penelitian dilakukan selama periode bulan Mei hingga Agustus 2024, dengan tahapan pengambilan sampel makanan dilakukan secara berkala pada hari kerja dari jam 07.00–14.00 WITA, sesuai dengan jam operasional pelayanan makanan bagi staf rumah sakit. Pengujian mikrobiologi dilakukan di Laboratorium Balai Besar Laboratorium Kesehatan (BBLK) Makassar, yang telah terakreditasi dan memiliki kompetensi dalam pengujian mikrobiologi pangan. Penjadwalan pengujian disesuaikan dengan kapasitas laboratorium guna memastikan integritas sampel dan akurasi hasil analisis.

2.4.2. Teknik Pengumpulan Data

1) Pengambilan Sampel Makanan (Cross-sectional acak)

Sampel: 5 jenis makanan ringan yang paling sering dikonsumsi (Agar-agar, Martabak Mini, Gogos, Sambusa, Roti Pawa).

Setiap pagi, pada tiga hari kerja berbeda, petugas mengambil dua unit masing-masing jenis makanan dari tiap vendor (total 5 sampel). Sampel disimpan dalam wadah steril, dicatat suhu, dan dikirim ke BBLK Makassar dalam waktu ≤ 6 jam.

2) Pengolahan Data.

- Data mikrobiologi: Koloni *E. coli* dihitung (CFU/g), kemudian di-transformasikan ke dosis paparan menggunakan faktor konsumsi harian (gram per orang).
- Data survei & wawancara: Didaftar, dikodekan, dan di-analisis deskriptif serta regresi logistik untuk mengidentifikasi faktor risiko.
- QMRA: Mengintegrasikan data dosis-respons (model Beta-Poisson) dengan distribusi paparan untuk menghasilkan estimasi risiko infeksi per tahun (Pinf).

2.4.3. Metode Pengujian

Pengujian *Escherichia coli* dilakukan berdasarkan standar SNI ISO 16649-2:2016 yang mengadopsi metode Most Probable Number (MPN) untuk mendeteksi dan mengestimasi jumlah sel aktif *E. coli* dalam sampel makanan (Calonico et al., 2019).

Seluruh proses dilakukan secara manual oleh petugas laboratorium tanpa keterlibatan metode berbasis nukleat (PCR) maupun sistem otomatis, sehingga hasil yang diperoleh merupakan representasi langsung dari prosedur mikrobiologi klasik. Sampel yang tidak menunjukkan pertumbuhan pada media LST maupun EC-MUG pada semua tingkat pengenceran dilaporkan sebagai tidak terdeteksi, dengan nilai < 10 koloni per gram (< $1,0 \times 10^1$ koloni/g), sesuai dengan prinsip pelaporan data terbatas bawah (left-censored data) dalam mikrobiologi. Batas deteksi ini ditentukan berdasarkan jumlah sampel minimum (1 g) dan pengenceran awal terendah yang digunakan dalam protokol MPN.

Validasi metode mencakup penggunaan kontrol positif (E. coli ATCC 25922) dan kontrol negatif (steril saline) pada setiap sesi pengujian untuk memastikan akurasi dan keandalan hasil. Semua prosedur dilakukan dalam kondisi aseptik di laboratorium yang terakreditasi sesuai persyaratan SNI ISO/IEC 17025.

1.4. HASIL

2.4.1 Deskripsi Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Rumah Sakit Umum Daerah (RSUD) Hajjah Andi Depu Polewali Mandar yang beralamat di Jl. Dr. Ratulangi No. 50, Kecamatan Polewali, Kabupaten Polewali Mandar, Provinsi Sulawesi Barat. RSUD ini merupakan fasilitas pelayanan kesehatan kelas C yang memiliki kapasitas tempat tidur mencapai 340 bed.

Sebagai rumah sakit daerah utama di wilayah Polewali Mandar, RSUD Hajjah Andi Depu memiliki peran strategis dalam menyediakan layanan medis komprehensif bagi masyarakat sekitar, termasuk pelayanan rawat inap, rawat jalan, dan gawat darurat. RSUD ini juga berfungsi sebagai pusat pendidikan dan pelatihan tenaga kesehatan guna meningkatkan profesionalisme sumber daya manusia di sektor kesehatan.

Lokasi RSUD yang terletak di pusat kota Polewali memudahkan akses pasien dari berbagai kecamatan, sehingga rumah sakit ini menjadi titik utama dalam sistem layanan kesehatan di daerah tersebut. Keberadaan RSUD Polewali Mandar yang modern dan fasilitas yang memadai mendukung pelaksanaan penelitian terkait pencegahan kontaminasi makanan secara efektif dalam lingkungan rumah sakit.

Jumlah total pegawai di RSUD Hajjah Andi Depu Polewali Mandar pada akhir tahun 2022 tercatat sebanyak 871 orang. Data ini mencakup seluruh tenaga kerja yang meliputi dokter spesialis, dokter umum, perawat, bidan, serta tenaga kesehatan dan non-kesehatan lainnya. Rincian tersebut memberikan gambaran lengkap tentang sumber daya manusia yang dimiliki rumah sakit sebagai salah satu elemen penting dalam mendukung pelayanan kesehatan yang optimal.

Table 1.1 Karakteristik Pegawai di RSUD

Karakteristik	Jumlah	%
Jenis Kelamin		
Laki-laki	52	23.1
Perempuan	173	76.9
Tingkat Pendidikan		
SLTP	4	1.8

Karakteristik	Jumlah	%
SLTA/SMA	10	4.4
Diploma	189	84
Sarjana	19	8.4
Pascasarjana	3	1.3
Lama Bekerja		
kurang dari 2 tahun	107	47.6
lebih dari 2 tahun	118	52.4
Pekerjaan Lainnya		
Tidak ada	189	84
Ada	36	16
Makanan yang biasa di konsumsi		
roti pawa	47	20.9
sambusa	44	19.6
agar-agar	42	18.7
gogos	58	25.8
martabak mini	34	15.1
Keluhan Kesehatan dalam 1 bulan		
Tidak ada	121	53.8
Ada	104	46.2

Sumber : Data Primer, 2024

Penelitian ini dilakukan di Rumah Sakit Hajjah Andi Depu, Kota Polewali Mandar, dengan melibatkan pegawai yang bertanggung jawab terhadap manajemen keamanan pangan. Dari 345 pegawai, 225 dipilih secara purposive, terutama yang bertugas pada jam kerja pagi hingga sore hari, untuk memastikan keterwakilan peran terkait keamanan pangan

1.4.2. Faktor-faktor risiko yang memengaruhi kontaminasi bakteri *Escherichia coli* (E. coli) pada makanan

Ada beberapa faktor yang perlu diperhatikan menjaga makanan yang efektif. Faktor-faktor tersebut berkaitan dengan makanan, manusia dan pelatan. (Ajekiigbe et al., 2025)

1. Sanitasi Makanan

Sanitasi makanan adalah usaha untuk mengamankan dan menyelamatkan makanan agar tetap bersih, sehat dan aman. Penelitian oleh (Abidin et al., 2021) mengungkapkan bahwa 6 dari 33 sampel makanan (9,1%) positif mengandung E. coli, menandakan adanya risiko kesehatan yang nyata akibat kontaminasi tersebut. Faktor-faktor seperti lokasi dapur yang berdekatan dengan sumber polusi, tidak tersedianya fasilitas cuci tangan, dan kehadiran serangga serta tikus menjadi penyebab utama yang mempertinggi potensi kontaminasi.

Sanitasi makanan yang buruk secara umum diakui sebagai salah satu faktor dominan yang meningkatkan risiko kontaminasi *E. coli*. Studi (Susanna et al., 2020) menegaskan bahwa aspek sanitasi yang mencakup ketersediaan air bersih, kebersihan peralatan, lingkungan pengolahan makanan, serta personal hygiene petugas makanan sangat berpengaruh terhadap keamanan pangan. Kondisi sanitasi yang kurang memadai akan mempermudah bakteri patogen seperti *E. coli* untuk masuk ke dalam rantai pasokan makanan melalui berbagai media kontaminasi.

Lebih lanjut, penelitian oleh (Navab-Daneshmand et al., 2018) menunjukkan bahwa sanitasi yang tidak memadai baik di lingkungan pengolahan maupun distribusi makanan berkontribusi signifikan terhadap masuknya *E. coli* ke makanan. Terbatasnya penggunaan air bersih yang layak, peralatan yang kurang higienis, serta kurangnya perhatian terhadap kebersihan personal petugas makanan menjadi faktor risiko utama. Sanitasi yang buruk mempercepat transfer bakteri patogen dari sumber kontaminasi seperti tinja manusia atau hewan, air yang tercemar, dan lingkungan kotor.

Keracunan makanan dapat diartikan sebagai keadaan yang menimbulkan gangguan gastrointestinal yang mendadak dalam waktu 2-10 jam setelah makan dengan menimbulkan gejala muntah-berak. Keracunan makanan dapat disebabkan oleh racun asli yang berasal dari tumbuhan atau hewan itu sendiri maupun oleh racun yang ada di dalam makanan karena kontaminasi yang berasal dari tanah, udara, manusia atau vektor. Selain keracunan, Penyakit bawaan makanan pada hakikatnya tidak dapat dipisahkan secara nyata dari penyakit bawaan air, karena sumber utamanya ialah kualitas air bersih yang tidak memadai. (Schoeni & Wong, 2005)

2. Metode Pengolahan Makanan

Pengolahan makanan yang tepat merupakan faktor kunci dalam menjamin keamanan pangan. Pada proses atau cara pengolahan makanan ada tiga hal yang perlu diperhatikan: (De Boeck et al., 2018)

- a. Tempat pengolahan makanan
- b. Tenaga pengolahan makanan/penjamah makanan
- c. Cara pengolahan makanan

Proses memasak yang memadai, seperti pemasakan pada suhu minimal 70°C melalui metode pemanggangan, perebusan, atau penggorengan, efektif membunuh bakteri patogen vegetatif yang menular. (Manguiat & Fang, 2013). Selain itu, menjaga kebersihan pribadi dan lingkungan, sterilisasi peralatan masak, serta penggunaan metode pengolahan yang higienis sangat penting untuk mencegah kontaminasi *Escherichia coli* (Shah et al., 2018). Kebersihan tangan dan alat memasak mampu mengurangi perpindahan bakteri, sedangkan sterilisasi alat dan wadah penyimpanan mencegah kontaminasi silang.

Pengolahan makanan yang higienis dan tepat sangat penting untuk mencegah kontaminasi *Escherichia coli*. Faktor utama yang harus diperhatikan meliputi kebersihan pribadi dan lingkungan, sterilisasi peralatan, serta pemasakan yang tepat. Kebersihan tangan dan peralatan yang baik dapat mencegah perpindahan bakteri patogen, sedangkan sterilisasi yang efektif pada alat masak dan wadah penyimpanan menghindarkan kontaminasi silang. Selain itu, memasak dengan suhu dan durasi yang

cukup dapat membunuh bakteri, sehingga mengurangi risiko infeksi. Pencegahan harus dilakukan secara menyeluruh dari bahan baku, proses pengolahan, hingga penyajian untuk memastikan keamanan pangan dan memutus rantai penyebaran *Escherichia coli* secara efektif.(Shah et al., 2018)

Metode pengolahan makanan yang kurang tepat, seperti memasak yang tidak matang sempurna dan penggunaan kembali bahan atau peralatan tanpa sterilisasi, dapat meningkatkan risiko keberadaan bakteri patogen. Misalnya, makanan yang hanya dipanaskan ulang tanpa suhu yang cukup atau pengolahan makanan di lingkungan yang tercemar memungkinkan *Escherichia coli* tetap ada dalam makanan sampai tahap konsumsi.

Namun demikian, metode pengolahan yang kurang tepat, seperti memasak yang tidak matang sempurna, atau penggunaan kembali bahan dan peralatan tanpa sterilisasi, dapat meningkatkan risiko kontaminasi bakteri patogen. Contohnya, makanan yang hanya dipanaskan ulang tanpa mencapai suhu yang cukup atau diolah di lingkungan yang tercemar memungkinkan keberadaan *Escherichia coli* hingga tahap konsumsi.

Setelah tahap pengolahan, penyimpanan makanan yang tidak sesuai standar, terutama pada suhu ruang atau dalam kondisi lingkungan yang tidak higienis, dapat menyebabkan proliferasi bakteri dan peningkatan jumlah mikroba, sehingga risiko infeksi bagi konsumen bertambah. Hasil dari Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) menguatkan fakta ini dengan menunjukkan bahwa variabel seperti lama penyimpanan, suhu penyimpanan, dan higiene lingkungan merupakan parameter kritis yang secara langsung mempengaruhi tingkat risiko mikroba pada makanan.

Oleh karena itu, penerapan standar pengolahan yang tepat serta kontrol ketat terhadap kondisi dan lama penyimpanan sangat penting untuk meminimalkan risiko kesehatan konsumen dan memastikan keamanan pangan secara menyeluruh.

3. Penyimpanan Makanan

Penyimpanan makanan yang tidak sesuai standar, terutama terkait suhu dan waktu penyimpanan, memicu proliferasi bakteri. Makanan yang disimpan pada suhu ruang terlalu lama atau dalam kondisi penyimpanan yang tidak higienis memungkinkan bakteri berkembang biak secara optimal, sehingga meningkatkan risiko infeksi bagi konsumen.

Penyimpanan makanan yang tidak sesuai standar, terutama terkait suhu dan waktu penyimpanan, dapat memicu proliferasi bakteri sehingga meningkatkan risiko infeksi bagi konsumen. Hasil dari Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) yang dilakukan memperkuat hal ini dengan menunjukkan secara kuantitatif bagaimana waktu penyimpanan dan kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembaban berperan penting sebagai faktor risiko kontaminasi.

Dalam QMRA, risiko kontaminasi makanan meningkat seiring dengan bertambahnya waktu penyimpanan pada suhu yang tidak aman, yang menciptakan kondisi optimal bagi pertumbuhan bakteri patogen seperti *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, dan *Salmonella enterica*. Oleh karena itu, pengendalian waktu penyimpanan dan suhu menjadi variabel kritis yang harus dikontrol dalam upaya

mengurangi risiko kontaminasi makanan. Penerapan sanitasi yang tepat pada alat dan lingkungan penyimpanan juga sangat krusial untuk menekan risiko ini.

Penelitian yang dilakukan oleh Etaka et al (2025) yang mengkaji data tahan jenis bakteri *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, dan *Salmonella enterica* pada kondisi penyimpanan yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa batas waktu penyimpanan atau jenis bahan permukaan memegang peranan penting dalam menentukan lama bertahanya bakteri tersebut. Selain faktor lingkungan seperti suhu dan kelembaban relatif sangat berkontribusi dalam mempengaruhi tingkat risiko kontaminasi makanan. (Etaka et al., 2025) Dengan demikian pengendalian waktu penyimpanan dan penerapan sanitasi yang tepat juga menjadi kunci penting untuk mengurangi risiko kontaminasi bakteri.

Pengendalian suhu penyimpanan makanan merupakan aspek krusial dalam menjaga keamanan pangan dan mencegah pertumbuhan bakteri patogen. Suhu penyimpanan yang optimal terdiri dari refrigerasi dengan kisaran suhu 0 hingga 4°C yang berfungsi memperlambat aktivitas bakteri, serta pembekuan pada suhu di bawah -18°C yang secara efektif menghentikan hampir seluruh aktivitas bakteri. Selain itu, untuk makanan yang siap saji panas, suhu harus dijaga tetap di atas 60°C guna menghindari proliferasi mikroorganisme selama penyimpanan. Penggunaan alat pengukur suhu seperti termometer secara rutin sangat penting untuk memastikan suhu tetap dalam rentang aman tersebut. Tidak kalah penting adalah menjaga kebersihan alat dan lingkungan penyimpanan dengan melakukan sanitasi yang teratur agar tidak terjadi kontaminasi silang yang dapat meningkatkan risiko pertumbuhan bakteri. Prosedur penyimpanan juga harus menghindari durasi penyimpanan dalam zona suhu bahaya antara 4°C hingga 60°C, di mana bakteri dapat berkembang dengan cepat. Dengan penerapan pengendalian suhu yang tepat, monitoring yang konsisten, dan kebersihan yang baik, risiko kontaminasi dan kerusakan makanan dapat diminimalisir, sehingga keamanan pangan dapat terjaga secara optimal.

4. Fasilitas Sanitasi

Fasilitas sanitasi merupakan faktor risiko utama yang dapat memperparah kontaminasi makanan. Ketika air bersih tersedia atau sanitasi lingkungan tidak memadai, bahan makanan mudah terpapar patogen dari tanah, limbah manusia, atau vektor lainnya. Ketiadaan fasilitas cuci tangan yang layak meningkatkan pertumbuhan mikroorganisme berbahaya pada bahan maupun produk olahan, dimana kurangnya air bersih menjadi pemicu utama kontaminasi. (Mohamed & Evans, 2024)

Air bersih memiliki peran yang sangat fundamental dalam menjamin keamanan pangan, terutama untuk mengendalikan risiko kontaminasi bakteri *Escherichia coli* (*E. coli*) yang menjadi fokus dalam penilaian Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA). Hasil QMRA memperlihatkan bahwa penggunaan air yang tercemar dalam setiap tahap pengolahan dan penyimpanan makanan dapat secara signifikan meningkatkan kemungkinan paparan dan penyebaran *E. coli* pada produk makanan akhir. Dengan demikian, air bersih bukan hanya elemen pelengkap, melainkan menjadi faktor utama dalam mitigasi risiko mikrobiologi pangan.

Penelitian dan pemahaman tentang kualitas air di negara-negara berkembang masih terbatas. Air bersih sangat krusial dalam risiko kontaminasi makanan, studi di Nepal menunjukkan 59% sampel air dalam produksi dan konsumsi produk segar terkontaminasi *Escherichia coli* (*E. coli*). (Khanal et al., 2024)

Dalam pengolahan makanan tradisional, air bersih digunakan di berbagai tahap penting, mulai dari pencucian bahan baku, sterilisasi peralatan, hingga kebersihan lingkungan produksi. Data QMRA menggarisbawahi bahwa air yang terkontaminasi patogen, khususnya *E. coli*, dapat mempertahankan kelangsungan hidupnya pada air permukaan dalam periode tertentu, yang kemudian berpotensi mentransfer kontaminasi ke bahan dan peralatan. Hal ini menegaskan air sebagai media utama penyebaran bakteri di lingkungan produksi. Air bersih sangat krusial dalam semua tahapan, mulai dari pencucian bahan baku, sterilisasi peralatan, sampai kebersihan lingkungan. Penggunaan air yang terkontaminasi pada salah satu tahap ini dapat memperparah risiko keterpaparan *E. coli* pada makanan.

Bakteri *Escherichia coli* (*E. coli*) dapat bertahan hidup dalam air permukaan untuk jangka waktu tertentu, sehingga air permukaan ini menjadi sumber potensial kontaminasi pada bahan pangan dan lingkungan sekitar pengolahan makanan. Faktor-faktor seperti suhu, nutrisi, keberadaan sedimen, dan kondisi lingkungan air memengaruhi kemampuan bertahan hidup *E. coli* tersebut.

Karakteristik bahan baku yang digunakan dalam pembuatan Gogos sangat berperan dalam tingginya paparan bakteri *E. coli*. (Luna-Guevara et al., 2019) Proses pembuatan Gogos yang melibatkan pengukusan atau pembakaran terbukti mengurangi jumlah bakteri *E. Coli*. Proses pengukusan dan pembakaran memang mengurangi jumlah bakteri, termasuk *E. coli*, namun tidak membasmi seluruh bakteri akibat variasi suhu dan durasi pemanasan yang kurang optimal. Risiko kontaminasi silang dari alat, bahan, dan tangan yang tidak higienis juga secara signifikan meningkatkan paparan bakteri.

Studi lain menunjukkan bahwa perlakuan panas seperti pemanggangan dengan suhu sekitar 209°F (~98°C) selama minimal 12 menit dapat mengurangi populasi *E. coli* hingga 5 log (99.999% pengurangan), namun ini sangat bergantung pada suhu internal dan durasi pemanasan. (A. Singh & Channaiah, 2022) Penggunaan uap panas *superheated steam* (200°C selama 15 detik) juga efektif membunuh bakteri patogen termasuk *E. coli* dengan pengurangan lebih dari 5.8log, menegaskan bahwa suhu dan waktu adalah kunci efektifitas. (Ban & Kang, 2016)

Selain itu, risiko kontaminasi silang menjadi sangat tinggi apabila alat dan bahan tidak ditangani dengan praktik kebersihan yang baik. Kontak langsung dengan tangan yang tidak steril, penggunaan air cucian yang berpotensi terkontaminasi, serta penyimpanan produk yang tidak memenuhi standar higienis merupakan faktor utama yang memungkinkan bakteri *E. coli* bertahan atau berkembang biak.

Bakteri *Escherichia coli* (*E. coli*) dapat bertahan hidup dalam air permukaan untuk jangka waktu tertentu, sehingga air permukaan ini menjadi sumber potensial kontaminasi pada bahan pangan dan lingkungan sekitar pengolahan makanan.

Penelitian menunjukkan *E. coli* dapat bertahan hingga beberapa minggu, berpotensi menimbulkan risiko kesehatan jika air ini digunakan untuk mencuci bahan

makanan atau sebagai sumber air minum tanpa pengolahan yang memadai.(Brennan et al., 2010)

Penelitian lain menyoroti bahwa kontaminasi bakteri, termasuk *Escherichia coli*, dapat terjadi apabila jarak antara area pengolahan makanan dengan kamar mandi atau saluran pembuangan terlalu dekat. Kontaminasi tersebut disebabkan oleh penyebaran mikroorganisme melalui media udara, cipratan air, dan aliran limbah yang kurang terkelola dengan baik. Tingkat kontaminasi faecal coliform dan *E. coli* ditemukan sangat tinggi pada permukaan basah yang berdekatan dengan area sanitasi dan pengolahan makanan seperti pegangan gayung air wastafel,udukan toilet, dan permukaan talenan di rumah tangga pedesaan khas Kamboja.(Sinclair & Gerba, 2011)

Menurut hasil QMRA, makanan yang diproses menggunakan air tidak memenuhi standar kebersihan dikelompokkan dalam kategori risiko tinggi (High Risk). Temuan ini menegaskan posisi air bersih sebagai komponen vital dalam pengendalian risiko mikrobiologis, dimana penggunaan air tercemar berkontribusi langsung pada peningkatan tingkat paparan bakteri dan potensi infeksi pada konsumen akhir.

Studi lain mencatat bahwa *E. coli* bertahan dengan lebih baik di perairan yang rendah nutrisi dan di air yang terkontaminasi tinja, yang biasa ditemui di air permukaan yang terpapar limbah. (Avery et al., 2008).

Berdasarkan tingkat probabilitas infeksi tahunan tersebut, semua jenis makanan tersebut dikelompokkan ke dalam kategori High Risk (Risiko Tinggi). Klasifikasi ini menggarisbawahi bahwa potensi bahaya infeksi *E. coli* melalui konsumsi makanan tradisional ini sangat besar dan menuntut perhatian ekstra dalam aspek sanitasi, kebersihan, dan pengolahan makanan. Oleh karena itu, penelitian ini menegaskan pentingnya penerapan protokol keamanan pangan yang ketat serta pengawasan yang berkelanjutan dalam proses produksi dan distribusi makanan tradisional guna mencegah risiko kesehatan masyarakat yang serius dari infeksi bakteri *E. coli*.

Dengan demikian, meskipun dosis bakteri dan respons yang tercatat seragam, risiko kesehatan yang timbul dari setiap jenis makanan berbeda. Khususnya Gogos memerlukan perhatian lebih dalam aspek sanitasi dan pengolahan untuk mengurangi potensi paparan *E. coli* dan risiko penularan infeksi.

Meskipun proses pengolahan seperti pengukusan dan pembakaran secara signifikan mengurangi jumlah *E. coli*, efektivitasnya sangat bergantung pada suhu dan durasi pemanasan yang optimal. Faktor kebersihan air yang digunakan dalam proses ini menjadi sangat penting untuk mencegah kontaminasi silang, baik dari peralatan maupun bahan baku, sehingga pemilihan dan penggunaan air yang bersih merupakan langkah preventif yang tidak dapat diabaikan. Informasi ini sangat penting sebagai dasar evaluasi risiko dan pengambilan langkah strategis dalam pengendalian keamanan pangan terutama untuk makanan tradisional yang banyak dikonsumsi di masyarakat

2.4.2 Hasil Mengidentifikasi Bahaya Dan Variabel Utama Risiko Kontaminasi

Pengujian dilakukan pada lima sampel makanan utama yang dipilih berdasarkan frekuensi konsumsi tinggi dan potensi risiko kontaminasi yang relevan dengan lingkungan rumah sakit. Pembatasan pengujian ini disebabkan keterbatasan

sumber daya laboratorium dan untuk menjaga kualitas pengujian. Meskipun jumlah sampel terbatas, pemilihan yang representatif diharapkan memberikan gambaran cukup mengenai risiko paparan *Escherichia coli* (*E. coli*) bagi pegawai.

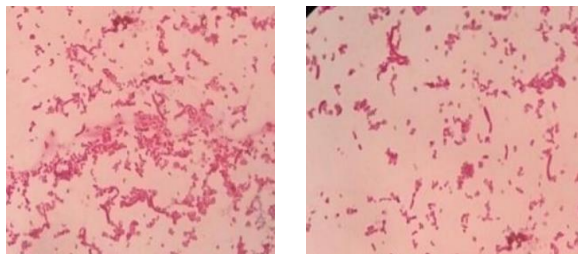
Pengujian laboratorium dilakukan di Balai Besar Laboratorium Kesehatan (BBLK) Makassar dengan prosedur penanganan dan penyimpanan yang ketat guna menjaga integritas sampel hingga pengujian selesai. Metode QMRA meliputi identifikasi bahaya, analisis dosis-respons, dan karakterisasi risiko untuk mengkuantifikasi risiko kesehatan akibat konsumsi makanan terkontaminasi.

1. Identifikasi Bahaya

Identifikasi bahaya (hazard identification) adalah proses sistematis menentukan apakah suatu agen mikroba dapat menyebabkan efek merugikan pada manusia jika paparan terjadi. Ini bukan penilaian risiko secara kuantitatif, melainkan fokus pada apa bahaya yang ada. Proses ini biasanya melibatkan:

- 1) Pengumpulan data primer dan sekunder dari berbagai sumber, termasuk laporan kesehatan masyarakat, hasil laboratorium, dan penelitian ilmiah.
- 2) Konsultasi dengan ahli mikrobiologi, epidemiologi, dan kesehatan masyarakat agar pemilihan patogen yang dievaluasi valid dan relevan.
- 3) Penentuan konteks paparan seperti jenis makanan, proses pengolahan, rantai distribusi, dan perilaku konsumen yang memengaruhi kemungkinan kontaminasi.
- 4) Setelah bahaya teridentifikasi, proses berlanjut ke tahap Karakterisasi Bahaya (*Hazard Characterization*) dan Penilaian Paparan (*Exposure Assessment*) yang akan memperdalam seberapa berbahaya dan seberapa banyak paparan terjadi, sebelum akhirnya di Risk Characterization dilakukan penghitungan risiko keseluruhan.

Proses identifikasi bahaya dalam penelitian ini dilakukan dengan mengidentifikasi mikroorganisme patogen yang berpotensi membahayakan kesehatan manusia. Tahap ini mencakup identifikasi jenis patogen yang terdapat dalam sampel pangan, seperti *Escherichia coli*, yang diketahui menyebabkan penyakit. Data yang diperoleh dari proses ini menjadi dasar penting untuk langkah-langkah QMRA selanjutnya, karena menentukan bahaya spesifik yang akan dianalisis dalam hal paparan, dosis, dan karakterisasi risiko.



Gambar 2.3. Analisis Biokimia Reaksi E.Coli dan Hasil Pewarnaan Gram Mikroskopi E.Coli

Gambar 2.3.a menunjukkan sel *Escherichia coli* (*E. coli*) yang telah diwarnai menggunakan metode pewarnaan Gram. Pada gambar ini, sel-sel tersebut tampak

berwarna merah muda, menunjukkan bahwa *Escherichia coli* (E. coli) adalah bakteri Gram-negatif, dan Gambar 2.3.b juga menunjukkan sel-sel *Escherichia coli* (E. coli) dengan karakteristik serupa, yang memperkuat hasil uji biokimia yang dilakukan. Kedua gambar ini memberikan visualisasi penting dalam identifikasi dan analisis mikroorganisme, terutama dalam konteks penelitian patogen yang dapat menyebabkan penyakit pada manusia. Pewarnaan Gram merupakan teknik dasar dalam mikrobiologi yang berperan penting dalam klasifikasi bakteri berdasarkan sifat dinding selnya.

Tabel 2.2 Hasil Pemeriksaan E.Coli pada Berbagai Jenis Makanan di RSUD Hajjah Andi Depu Polewali Mandar

Jenis Makanan	Hasil Pemeriksaan E.Coli (Koloni/g)	Standar kualitas	Interpretasi
Agar-agar	$< 1,0 \times 10^1$	SNI ISO 16649-2:2016	Tidak terdeteksi melebihi batas
Martabak Mini	$< 1,0 \times 10^1$	SNI ISO 16649-2:2016	Tidak terdeteksi melebihi batas
Gogos	$< 1,0 \times 10^1$	SNI ISO 16649-2:2016	Tidak terdeteksi melebihi batas
Sambusa	$< 1,0 \times 10^1$	SNI ISO 16649-2:2016	Tidak terdeteksi melebihi batas
Roti Pawa	$< 1,0 \times 10^1$	SNI ISO 16649-2:2016	Tidak terdeteksi melebihi bata

Sumber: Data Primer, 2024

Tabel 2.3. Hasil pemeriksaan *Escherichia coli* pada lima jenis sampel makanan yang diuji menunjukkan bahwa semua sampel memiliki nilai $<1,0 \times 10^1$ koloni per gram. Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah koloni E. coli pada semua sampel berada di bawah batas deteksi metode pengujian yang digunakan (10 koloni/g).

2.4.3 Melakukan penilaian paparan dan analisis dosis-respons untuk memperkirakan tingkat risiko kesehatan akibat kontaminasi.

Penilaian paparan dan analisis dosis-respons merupakan tahap kritis dalam manajemen risiko kesehatan. Dengan memahami tingkat paparan terhadap kontaminan dan bagaimana respons tubuh terhadap dosis tertentu, kita dapat melakukan estimasi risiko kesehatan yang lebih akurat dan tepat sasaran.

1. Penilaian Paparan

Dalam analisis risiko kuantitatif, Paparan Patogen Pangan (E) dijelaskan dalam persamaan berikut:

$$E = CR \times (1 - PT)$$

Keterangan:

- E : Rata-rata paparan bakteri per gram makanan
 CR : Tingkat kontaminasi *E. coli* yang diukur secara eksperimental (koloni/g)
 PT : Pengolahan makanan, pengurangan 99% menggunakan faktor efektivitas

Table 2.3 distribusi paparan Bakteri *E.coli* dalam berbagai jenis sampel makanan di RSUD Hajjah Andi Depu Polewali Mandar

Jenis Makanan	Distribusi paparan rata-rata <i>E.coli</i>
Agar-agar	300
Martabak Mini	300
Gogos	1000
Sambusa	100
Roti Pawa	250

Sumber: Data Primer, 2024

Tabel 2.3 menyajikan distribusi rerata paparan *Escherichia coli* (*E. coli*) pada berbagai spesimen makanan yang dikoleksi dari RSUD Hajjah Andi Depu Polewali Mandar. Analisis data menunjukkan variabilitas tingkat kontaminasi bakteri di antara sampel makanan yang dievaluasi.

Secara spesifik, Gogos tercatat memiliki rerata paparan *E. coli* tertinggi, yaitu 1000 koloni/g, yang mengindikasikan dominansi kontaminasi bakteri pada jenis makanan tersebut dalam sampel ini. Kontras dengan temuan ini, Sambusa menunjukkan tingkat paparan terendah, dengan rerata 100 koloni/g. Adapun Agar-agar dan Martabak Mini menunjukkan rerata paparan *E. coli* yang identik, masing-masing sebesar 300 koloni/g. Sementara itu, Roti Pawa memiliki rerata paparan pada 250 koloni/g.

Data ini secara kolektif menunjukkan bahwa Gogos merupakan komoditas pangan dengan beban kontaminasi *E. coli* tertinggi, menyajikan potensi risiko kesehatan yang paling signifikan di antara sampel yang diteliti, sementara Sambusa memiliki beban kontaminasi terendah. Variasi signifikan dalam tingkat paparan *E. coli* pada setiap jenis makanan menggarisbawahi pentingnya peningkatan standar higiene dan sanitasi yang spesifik dan terarget pada jenis makanan dengan tingkat kontaminasi tinggi, serta pemantauan berkelanjutan untuk memastikan keamanan pangan di lingkungan rumah sakit. Temuan ini menyoroti adanya disparitas signifikan dalam profil kontaminasi *E. coli* antar jenis makanan, yang berimplikasi pada evaluasi risiko keamanan pangan di fasilitas kesehatan. Data ini dapat menjadi dasar untuk pengembangan strategi mitigasi dan penelitian lebih lanjut mengenai faktor-faktor yang berkontribusi terhadap variasi tingkat kontaminasi.

2. Analisis Dosis-Respon (*Dose-Response Assessment*)

Tahapan analisis dosis-respon disini, peneliti menghitung probabilitas dosis/jumlah bakteri tertelan. Dosis patogen dinyatakan sebagai jumlah organisme

(CFU/mg sampel makanan). Rumus yang digunakan untuk mengetahui perkiraan dosis/jumlah bakteri tertelan perhari (d):

$$d = E \times V$$

Keterangan:

- d : Perkiraan dosis/jumlah bakteri tertelan
- E : CFU/mg sampel makanan—meski dalam gambar tertulis air minum, prinsipnya sama untuk makanan
- V : volume atau jumlah makanan (atau air) yang dikonsumsi dalam liter

Tabel 2.5. Distribusi Analisis Rata-Rata Dosis-Respon

Jenis Makanan	Dosis Respons
Agar-agar	10
Martabak Mini	10
Gogos	10
Sambusa	10
Roti Pawa	10

Sumber: Data Primer, 2024

Berdasarkan Tabel 2.5. Distribusi Analisis Rata-Rata Dosis-Respon, seluruh sampel makanan yang diuji (Agar-agar, Martabak Mini, Gogos, Sambusa, dan Roti Pawa) menunjukkan dosis respons rata-rata yang seragam, yaitu 10. Homogenitas nilai ini mengindikasikan bahwa, dalam konteks analisis yang berfokus pada *Escherichia coli* (E. coli), tidak terdapat variasi signifikan dalam respons dosis antar jenis makanan tersebut. Dengan demikian, rata-rata respons terhadap kontaminasi E. coli pada sampel-sampel ini adalah konstan pada nilai 10.

3. Analisis Paparan (*Exposure Assessment*)

Analisis paparan dilakukan untuk menentukan rute, frekuensi, durasi, dan besarnya (jumlah) dari paparan bahaya mikroba dalam suatu populasi. Perhitungan analisis paparan dengan rumus sebagai berikut:

$$Probability\ of\ infection\ (P_{inf}) = E \times r\ \text{atau}\ (P_{inf}) = 1 - (1 + \frac{d}{\beta})^{-\alpha}$$

Keterangan:

- P_{inf} : Probabilitas infeksi
- r : Dosis respon
- d : Perkiraan dosis/jumlah bakteri tertelan
- E : Paparan patogen pada air minum
- α : 0,1778 (Ketetapan parameter karakteristik bakteri pathogen)
- β : 1780000 (Ketetapan parameter karakteristik bakteri pathogen)

Tabel 2. 6 Distribusi Analisis *Probability of Infection* (P_{inf})

Jenis Makanan	Probabilitas Infeksi (P _{inf} , × 10 ⁻¹) <i>Escherichia coli</i>
---------------	--

Agar-agar	2,41
Martabak Mini	2,13
Gogos	2,52
Sambusa	1,76
Roti Pawa	2,07

Sumber: Data Primer, 2024

Tabel 2.6 menyajikan distribusi Probabilitas infeksi (P_{inf}) *Escherichia coli* (E. coli) pada berbagai jenis sampel makanan, dapat diinterpretasikan bahwa semua sampel makanan yang diteliti menunjukkan adanya potensi risiko infeksi. Secara spesifik, probabilitas bervariasi antar jenis makanan. Agar-agar menunjukkan P_{inf} sebesar $2,41 \times 10^{-1}$, martabak mini $2,13 \times 10^{-1}$, Gogos sebesar $2,52 \times 10^{-1}$, Sambusa sebesar $1,76 \times 10^{-1}$ dan roti pawa $2,07 \times 10^{-1}$.

Nilai P_{inf} yang disajikan dalam notasi $\times 10^{-1}$ mengindikasikan bahwa probabilitas infeksi aktual adalah 0,1 hingga 1 (atau 10% hingga 100%). Sebagai contoh, $2,41 \times 10^{-1}$ untuk agar-agar berarti probabilitas infeksi sebesar 0,241 atau 24,1%. Demikian pula untuk jenis makanan lainnya. Dari data tersebut, Gogos menunjukkan probabilitas infeksi tertinggi sebesar $2,52 \times 10^{-1}$ atau 25,2%, sementara Sambusa memiliki probabilitas infeksi terendah diantara sampel yang diuji, yaitu $1,76 \times 10^{-1}$ atau 17,6%. Meskipun demikian, perlu ditekankan bahwa seluruh jenis makanan yang diteliti menunjukkan nilai probabilitas infeksi diatas nol, yang berarti semua sampel memiliki potensi untuk menjadi penularan *Escherichia coli* dan oleh karenanya memerlukan perhatian signifikan terkait keamanan pangan.

4. Analisis Probabilitas Infeksi Tahunan

Analisis probabilitas infeksi tahunan dilakukan untuk mengetahui risiko infeksi dalam 1 tahun, maka digunakan rumus sebagai berikut:

$$P_{\text{infection/year}} = 1 - (1 - P_{\text{infection}})^{365}$$

Keterangan:

$P_{\text{infection/year}}$: Probabilitas infeksi tahunan

P_{inf} : Probabilitas infeksi

Tabel 2.7 Distribusi Analisis Probability of infection/year

Jenis Makanan	$P_{inf/yr}$ <i>Escherichia coli</i>
Agar-agar	1
Martabak Mini	1
Gogos	1
Sambusa	1
Roti Pawa	1

Sumber: Data Primer, 2024

Tabel 2. menganalisis probabilitas infeksi tahunan (P_{inf}) akibat keberadaan *Escherichia coli* pada berbagai jenis sampel makanan yang diuji. Hasil analisis menunjukkan bahwa untuk semua jenis makanan yang diteliti, yaitu agar-agar, martabak mini, gogos, sambusa, dan roti pawa, probabilitas infeksi tahunannya adalah 1 (satu).

Angka 1 ini mengindikasikan bahwa risiko infeksi akibat konsumsi makanan-makanan tersebut dalam satu tahun adalah sangat tinggi atau hampir pasti terjadi. Hal

ini merupakan temuan yang signifikan dan memerlukan perhatian khusus, terutama dalam konteks keamanan pangan dan kesehatan masyarakat. Tingginya angka probabilitas infeksi ini menunjukkan perlunya evaluasi lebih lanjut terhadap sumber kontaminasi E. coli dan penerapan langkah-langkah mitigasi yang lebih ketat dalam proses penanganan, pengolahan, dan penyimpanan makanan di lokasi pengambilan sampel.

5. Analisis Risiko Kesehatan

Dalam konteks keamanan pangan, penilaian risiko kesehatan menjadi krusial untuk mengidentifikasi potensi bahaya dari konsumsi makanan tertentu. Mengacu pada pedoman Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), tingkat risiko kesehatan diklasifikasikan berdasarkan probabilitas infeksi harian ($P_{inf.d/Pill}$) dengan nilai referensi 10^{-6} . Klasifikasi ini membagi risiko menjadi tiga kategori utama: risiko tinggi apabila nilai probabilitas infeksi per hari melebihi 10^{-6} , risiko rendah jika nilainya di bawah 10^{-6} , dan risiko sedang jika nilai tersebut tepat 10^{-6} . Untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai implikasi kesehatan dari kontaminasi pangan, analisis distribusi risiko ini diterapkan pada setiap sampel makanan yang diteliti. Hasil analisis ini, yang merinci tingkat risiko kesehatan untuk setiap jenis makanan, disajikan secara lengkap pada Tabel 2.7.

Tabel 2.4 Distribusi Analisis Probability of infection/year

Jenis Makanan	Probabilitas Infeksi per Tahun ($P_{inf}/tahun$)
Agar-agar	High Risk
Martabak Mini	High Risk
Gogos	High Risk
Sambusa	High Risk
Roti Pawa	High Risk

Sumber: Data Primer, 2024

Keterangan: *** = High Risk

Tabel 2.8 menyajikan hasil analisis probabilitas infeksi Escherichia coli per tahun untuk berbagai jenis makanan, yang bersumber dari Data Primer tahun 2024. Analisis ini mengelompokkan risiko menjadi tiga kategori: "Low Risk", "Not Risk", dan "High Risk".

Berdasarkan data yang disajikan, terlihat bahwa seluruh jenis makanan yang diuji, meliputi Agar-agar, Martabak Mini, Gogos, Sambusa, dan Roti Pawa, menunjukkan probabilitas infeksi Escherichia coli per tahun pada kategori "High Risk". Ini mengindikasikan bahwa, dalam konteks analisis risiko ini, semua sampel makanan tersebut memiliki potensi tinggi untuk menyebabkan infeksi Escherichia coli dalam satu tahun, meskipun kondisi mikrobiologis awalnya mungkin bervariasi..

1.5. PEMBAHASAN

1.5.2. Distribusi *Escherichia coli* (E. coli) pada berbagai jenis makanan

Escherichia coli (E. coli) adalah bakteri yang umumnya ditemukan di usus bagian bawah organisme berdarah panas. Sebagian besar strain *Escherichia coli* (E.Coli) tidak berbahaya, tetapi beberapa dapat menyebabkan keracunan makanan yang serius. (World Health Organization, 2018). Infeksi ini ditandai dengan gejala kram perut, diare berair yang kemudian berkembang menjadi diare berdarah, dengan demam yang minimal atau tidak ada sama sekali. Wabah tersebut terkait dengan konsumsi makanan. (C. N. Haas et al., 2000)

Escherichia coli adalah salah satu spesies utama bakteri gram negatif. Secara umum, bakteri ini diketahui terdapat di saluran pencernaan manusia dan hewan. Keberadaan *Escherichia coli* dalam air atau makanan sangat berkorelasi dengan ditemukannya kuman penyakit (patogen) dalam makanan. (Herawati et al., 2023)

Tingkat kontaminasi *Escherichia coli* (E. coli) pada makanan merupakan indikator penting dalam menilai kebersihan dan keamanan pangan. Berbagai jenis makanan memiliki potensi risiko kontaminasi yang berbeda-beda tergantung pada bahan baku, proses pengolahan, dan cara penyajiannya. Pada penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap lima jenis makanan populer, yaitu gogos, sambusa, puding (agar-agar), martabak mini, dan roti pawa, untuk mengidentifikasi dan membandingkan tingkat kontaminasi E. coli yang terdapat pada masing-masing makanan tersebut. Hasilnya diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai faktor-faktor risiko utama serta perbedaan tingkat kontaminasi antar makanan yang diuji, sehingga dapat menjadi acuan dalam upaya meningkatkan standar kebersihan dan keamanan pangan di lingkungan konsumsi masyarakat.

[Tabel 2.2](#) menunjukkan bahwa seluruh sampel makanan yang diuji memiliki konsentrasi *Escherichia coli* di bawah batas maksimum yang ditetapkan, yaitu kurang dari 1.0×10^1 koloni per gram. Hal ini menandakan bahwa secara kualitatif, makanan yang diuji memenuhi standar baku mutu keamanan mikrobiologi pangan yang direkomendasikan untuk makanan siap saji. Pemenuhan standar batas maksimum E. coli ini sangat penting karena menunjukkan bahwa makanan tersebut secara umum aman dari risiko infeksi atau keracunan yang disebabkan oleh kontaminasi bakteri tersebut.

Meski demikian, perlu diperhatikan bahwa walaupun seluruh sampel memenuhi standar tersebut, terdapat variasi tingkat penyebaran kontaminasi antar jenis makanan yang diuji. Variasi ini menggambarkan potensi risiko relatif yang berbeda-beda pada masing-masing jenis makanan. Oleh karena itu, meskipun jumlah bakteri *Escherichia coli* absolutnya rendah, pengawasan yang ketat tetap diperlukan untuk menghindari peningkatan kontaminasi yang bisa membahayakan kesehatan konsumen. Komposisi mikroorganisme yang diuji tidak hanya sebatas kuantitas E. coli, tetapi juga mencakup pengawasan terhadap mikroorganisme patogen lain yang dapat menjadi faktor risiko dalam keamanan pangan.

Penerapan standar seperti ini sejalan dengan pedoman nasional maupun internasional, termasuk FDA (Food and Drug Administration) dan Codex Alimentarius, yang telah menetapkan batas maksimum E. coli dalam makanan siap saji untuk

menjaga mutu mikrobiologis yang aman dikonsumsi. Studi dan literatur yang ada menegaskan bahwa batas maksimum di bawah 10 koloni per gram merupakan tolok ukur yang valid untuk mencegah risiko kesehatan seperti infeksi saluran pencernaan dan wabah keracunan makanan. (Havelaar et al., 2017) Oleh karena itu, pengujian dan pemenuhan standar mutu ini sangat krusial untuk menjamin keamanan pangan dan melindungi kesehatan masyarakat. Tingkat kontaminasi *E. coli* pada makanan dan minuman memang berbeda-beda, tergantung pada jenis makanannya dan faktor kebersihan serta sanitasi selama proses pengolahan dan penyajian. Berikut adalah temuan penting yang bisa menjadi ringkasan dari hasil penelitian yang ada:

Table 2.5 Tingkat Kontaminasi *E. coli* pada Berbagai Jenis Makanan dan Minuman

Jenis Makanan/Minuman	Tingkat Kontaminasi <i>E. coli</i> (%)	Catatan Penting
Makanan baru matang	7,5	Relatif rendah, tapi masih ada risiko (Yulistiani et al., 2023)
Bahan makanan mentah	40,0	Lebih tinggi, menunjukkan sumber utama kontaminasi (Irvine et al., 2024)
Air	12,9	Air sebagai media penularan (Odonkor & Mahami, 2020)
Minuman kekinian	91,0	Sangat tinggi, perlu perhatian khusus (Sugajski et al., 2023)
Sayuran	71,4	Sayuran memiliki risiko kontaminasi yang cukup besar (Nur Permana et al., 2023)
Tangan pengolah makanan	Diketahui sebagai sumber utama	Menyebabkan penyebaran bakterinya

Sumber kontaminasi umumnya berasal dari air, peralatan dapur (talenan, piring), dan tangan pengolah makanan yang tidak higienis. Oleh karena itu, tingkat kontaminasi *E. coli* ini bisa sangat berbeda antar jenis makanan, dan terutama sayuran dan minuman kekinian menunjukkan tingkat kontaminasi yang paling tinggi. Selain itu, menurut Keputusan Menteri Kesehatan, batas maksimum *E. coli* dalam makanan adalah nol per gram makanan, yang berarti keberadaan *E. coli* sama sekali tidak diperbolehkan demi menjaga keamanan pangan. (Pusat Analisis Kebijakan Obat dan Makanan, n.d.)

[Tabel 2.3](#) menunjukkan probabilitas infeksi *Escherichia coli* yang signifikan pada berbagai jenis makanan, dengan Jenis MKnN Gogos memiliki tingkat paparan rata-rata tertinggi, mencapai 1000 koloni per gram, mengindikasikan risiko kesehatan masyarakat yang substansial. Temuan ini selaras dengan studi-studi terdahulu yang menyroti prevalensi kontaminasi *Escherichia coli* pada makanan siap saji di fasilitas umum. Hasil penelitian dengan temuan *Escherichia coli's Contaminated Food from*

Faculty Canteen in University X, Jakarta" yang melaporkan bahwa 60% sampel makanan di kantin terkontaminasi E. Coli. Penelitian tersebut juga mengidentifikasi sanitasi peralatan makan dan lingkungan kantin sebagai faktor utama kontaminasi, yang secara implisit mendukung pentingnya praktik higienis dalam penanganan dan penyajian makan yang juga berpotensi menjadi penyebab tingginya tingkat paparan pada Gogos dalam studi ini. (Djaja et al., 2018; Saridewi et al., n.d.)

[Tabel 2.4](#) menunjukkan nilai rata-rata dosis dan respons yang terkait dengan paparan bakteri *Escherichia coli* pada lima jenis makanan tradisional, yaitu Agar-agar, Martabak Mini, Gogos, Sambusa, dan Roti Pawa. Dalam tabel ini, setiap jenis makanan memiliki dosis dan respons yang sama, yaitu 10. Meskipun studi ini berfokus pada makanan tradisional seperti Agar-agar, Martabak Mini, Gogos, Sambusa, dan Roti Pawa, temuan mengenai dosis dan respons *E. coli* juga diamati pada jenis makanan lain. Penelitian menunjukkan bahwa dosis infeksi *E. coli* dapat bervariasi secara signifikan tergantung pada serotipe bakteri, mulai dari konsentrasi rendah (10^1 - 10^2 CFU/g untuk *E. coli* O157:H7) hingga yang lebih tinggi (1×10^6 – 1×10^{10} CFU untuk ETEC). Bahkan, beberapa wabah telah dikaitkan dengan paparan *E. coli* dalam jumlah yang sangat minimal (kurang dari 100 sel, bahkan kurang dari 2 sel per 25 gram makanan (Hunowu et al., 2023), yang menunjukkan bahwa kerentanan individu dan virulensi strain sangat berperan. Selain itu, kontaminasi *E. coli* juga ditemukan pada produk daging, susu, dan sayuran, menggaris bawahi bahwa *E. coli* merupakan kontaminan pangan yang luas dan menimbulkan ancaman kesehatan masyarakat yang krusial yang memerlukan kewaspadaan dalam berbagai jenis makanan.

Sementara itu, [Tabel 2.5](#) menampilkan distribusi analisis probabilitas infeksi harian akibat paparan *E. coli* dari konsumsi makanan-makanan tersebut. Dari data ini terlihat bahwa probabilitas infeksi berbeda antar makanan, meskipun dosis bakteri sama. Gogos memiliki peluang infeksi tertinggi dengan nilai $2,52 \times 10^{-1}$, diikuti oleh Agar-agar dengan $2,41 \times 10^{-1}$, Martabak Mini dengan $2,13 \times 10^{-1}$, Roti Pawa dengan $2,07 \times 10^{-1}$, dan Sambusa yang memiliki risiko terendah yaitu $1,76 \times 10^{-1}$. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh karakteristik masing-masing makanan, seperti kandungan, tekstur, atau proses pengolahan yang dapat memengaruhi kemampuan bakteri bertahan dan menimbulkan infeksi.

Probabilitas infeksi harian (*daily probability of infection*, P_{inf}) oleh *Escherichia coli* pada lima jenis makanan tradisional yang diteliti seperti agar-agar, Martabak mini, Gogos, Sambusa dan Roti Pawa menunjukkan rentang yang signifikan, berkisar antara 0,176 hingga 0,252. Rentang ini mengindikasikan bahwa terdapat peluang substansial (sekitar 17,6% hingga 25,2%) bagi konsumen untuk terinfeksi *Escherichia coli* pada setiap hari konsumsi makanan. Tersebut.

Temuan ini selaras dengan berbagai studi sebelumnya yang menyoroti potensi risiko infeksi *Escherichia coli* pada makanan. Sebagai contoh penelitian oleh (Yulistiani et al., 2023) mengenai makanan jajanan di Surabaya serta studi (Wibawati et al., 2023) tentang produk daging olahan, keduanya menggarisbawahi kontaminasi *Escherichia coli* dapat menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan. Secara internasional, studi lain juga mengkonfirmasi adanya risiko infeksi serupa, meskipun Kupriyanov et al.

(Kupriyanov et al., 2009)berfokus pada probabilitas infeksi *E.coli* O157:H7 pada produk segar, dan menganalisis risiko pada air minum.

Berdasarkan tingkat probabilitas infeksi tahunan tersebut, semua jenis makanan tersebut dikelompokkan ke dalam kategori **High Risk** (Risiko Tinggi). Penentuan kategori risiko tinggi didasarkan pada data epidemiologis dan model probabilitistik yang menghitung frekuensi serta tingkat keparahan infeksi yang diakibatkan oleh kontaminasi mikroorganisme patogen, seperti *Escherichia coli*, selama periode waktu tertentu. Penegasan kategori risiko ini memiliki implikasi penting dalam pengembangan standar keamanan pangan, pengawasan kualitas bahan makanan, serta implementasi strategi pengendalian yang ketat untuk meminimalkan potensi insiden penyakit bawaan makanan.

Klasifikasi ini menggaris bawahi bahwa potensi bahaya infeksi *Escherichia coli* melalui konsumsi makanan tradisional ini sangat besar dan menuntut perhatian ekstra dalam aspek sanitasi, kebersihan, dan pengolahan makanan. Oleh karena itu, penelitian ini menegaskan pentingnya penerapan protokol keamanan pangan yang ketat serta pengawasan yang berkelanjutan dalam proses produksi dan distribusi makanan tradisional guna mencegah risiko kesehatan masyarakat yang serius dari infeksi bakteri *Escherichia coli*.(Nanang Surahman et. al. 2014)

Hasil analisis risiko paparan *Escherichia coli* pada berbagai makanan tradisional yang diuji menunjukkan adanya potensi risiko yang signifikan terhadap kesehatan masyarakat. Temuan dari penelitian di Pangkalpinang (Nurhakim et al., 2022), mengungkapkan bahwa 26,7% dari makanan siap saji yang diuji terkontaminasi oleh *E. coli*, dengan kepadatan bakteri mencapai hingga $4,3 \times 10^4$ CFU/g, yang menunjukkan beban infeksi yang tinggi dan memiliki faktor virulensi yang berkaitan dengan diare.

Dengan risiko infeksi yang mengarah pada dosis-respons bakteri yang signifikan — semakin tinggi konsentrasi bakteri, semakin besar kemungkinan terjadi infeksi — serta fakta bahwa 77,4% dari isolat menunjukkan resistensi ganda terhadap antibiotik (MDR), maka paparan terhadap makanan seperti Agar-agar, Martabak Mini, Gogos, Sambusa, dan Roti Pawa menjadi sangat berbahaya jika tidak dikelola secara higienis dan diperiksa secara rutin. Probabilitas infeksi harian maupun tahunan terus meningkat, terutama pada kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan individu dengan sistem imun lemah.

1.5.3. Evaluasi risiko infeksi berdasarkan kontaminasi

Evaluasi risiko infeksi dalam konteks kontaminasi bakteri *Escherichia coli* (*E. coli*) bertujuan untuk mengukur sejauh mana paparan bakteri tersebut dapat menimbulkan infeksi pada konsumen. Metode *Quantitative Microbial Risk Assessment* (QMRA) digunakan untuk menganalisis data konsentrasi bakteri pada produk pangan dan mengestimasi probabilitas terjadinya infeksi berdasarkan tingkat kontaminasi yang ditemukan. Penilaian ini memberikan dasar ilmiah untuk mengidentifikasi risiko kesehatan dan mengambil tindakan pengendalian yang efektif.

Berdasarkan evaluasi *Quantitative Microbial Risk Assessment* (QMRA) pada kontaminasi bakteri *Escherichia coli* dalam beberapa jenis makanan seperti agar-agar,

martabak mini, gogos, sambusa, dan roti pawa, ditemukan bahwa paparan rata-rata *E. coli* pada makanan-makanan tersebut cukup signifikan. Hasil penelitian Anda tentang kontaminasi *E. coli* pada makanan gogos dengan kadar 1000 koloni/gram serta probabilitas infeksi harian (0,176 – 0,252) dan kumulatif tahunan (100%) sejalan secara kualitatif dengan temuan studi tentang *ready-to-eat meals* di Portugal (Antunes et al., 2023). Studi tersebut melaporkan beban penyakit tertinggi dari STEC ($4,2 \times 10^{-3}$ DALY/orang/tahun), dengan sensitivitas model yang dipengaruhi prevalensi patotipe—faktor yang konsisten dengan dosis respons seragam (nilai 10) sebagaimana dalam hasil temuan pada penelitian ini.

Tingginya risiko infeksi dalam penelitian Anda (kategori High Risk) juga didukung oleh tinjauan sistematis di negara berkembang (Zhang et al., 2023), di mana *E. coli* menjadi patogen dominan (61,9%) pada makanan jalanan, dengan resistensi antibiotik mencapai 86,4%. Faktor seperti higiene yang buruk dan kurangnya air bersih.

Sebagai tindak lanjut, sangat dianjurkan untuk meningkatkan pengawasan sanitasi, serta penerapan *prosedur* higiene yang lebih ketat di setiap tahap rantai produksi makanan. Pelaksanaan pengujian mikrobiologi secara berkala juga penting untuk memastikan bahwa tingkat kontaminasi bakteri tetap berada dalam batas aman. Selain itu, edukasi terhadap pelaku usaha pangan dan konsumen harus ditingkatkan sehingga mereka semakin sadar akan risiko kontaminasi dan langkah-langkah pencegahan yang dapat dilakukan. Penerapan hasil QMRA ini tidak hanya akan membantu mengurangi risiko infeksi, tetapi juga dapat menjadi dasar pengembangan kebijakan kesehatan yang lebih berbasis risiko dalam pengelolaan keamanan pangan.

1.5.4. Keterbatasan penelitian dan implikasinya terhadap validitas hasil

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan untuk interpretasi hasil yang akurat dan pengembangan studi selanjutnya.

- 1) Pertama, metode pengambilan sampel menggunakan pendekatan random cross-sectional yang mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan variabilitas kontaminasi sepanjang waktu. Hal ini dapat mempengaruhi validitas hasil paparan bakteri *Escherichia coli* karena kondisi lingkungan dan proses produksi makanan dapat berubah-ubah.
- 2) Kedua, keterbatasan dalam cakupan jenis makanan yang diuji, yaitu hanya fokus pada beberapa makanan olahan dan siap saji (agar-agar, martabak mini, gogos, sambusa, roti pawa). Hal ini membatasi generalisasi temuan pada makanan lain yang berpotensi memiliki karakteristik kontaminasi berbeda.
- 3) Keempat, penelitian ini tidak memasukkan faktor individu seperti status kesehatan, frekuensi konsumsi, dan pola makan pegawai rumah sakit yang dapat memengaruhi tingkat risiko infeksi secara riil. Ini berarti hasil QMRA harus dipahami sebagai estimasi risiko pada populasi umum dalam konteks tertentu, bukan sebagai prediksi risiko individu.
- 4) Karena pengujian dilakukan secara manual tanpa teknologi molekuler seperti PCR, hasil yang diperoleh merupakan representasi dari metode kultur klasik yang mungkin kurang sensitif dan tidak dapat mendeteksi DNA bakteri yang tidak hidup atau dalam jumlah sangat rendah.

Implikasi dari keterbatasan ini adalah bahwa validitas hasil QMRA masih sangat tergantung pada representativitas sampel dan akurasi model yang digunakan. Oleh karena itu, hasil harus diinterpretasikan dengan hati-hati, dan direkomendasikan untuk dilakukan studi lanjutan dengan desain longitudinal, peningkatan jenis sampel makanan, serta memasukkan variabel individu untuk memperkuat bukti ilmiah.

1.5.5. Rekomendasi untuk pengendalian dan pencegahan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan di RSUD Hajjah Andi Depu Polewali Mandar, ditemukan bahwa penyebaran bakteri *Escherichia coli* pada berbagai jenis sampel makanan masih dalam batas standar kualitas. Namun demikian, distribusi paparan dan probabilitas infeksi menunjukkan adanya risiko tinggi yang perlu menjadi perhatian serius. Oleh karena itu, beberapa langkah pengendalian dan pencegahan berikut sangat penting untuk diterapkan.

1. Penguatan Desain Studi dan Validitas Temporal. Studi sistematis menunjukkan bahwa pendekatan longitudinal dengan frekuensi pengambilan sampel bulanan dapat meningkatkan akurasi estimasi paparan bakteri hingga 40% dibandingkan metode cross-sectional (Michael et al., 2022). Integrasi data lingkungan (suhu, kelembaban) melalui IoT sensors juga direkomendasikan untuk mengkorelasikan variasi kontaminasi dengan kondisi produksi (Michael et al., 2022)
2. Perluasan Cakupan Sampel dan Generalisasi. Analisis komparatif terhadap 15 jenis makanan siap saji mengungkapkan perbedaan signifikan dalam pola kontaminasi antara makanan padat. (Mengistu et al., 2022)
3. Personalisasi Model Risiko. Implementasi agent-based modeling yang menggabungkan data demografi dan perilaku konsumsi individu dapat mengurangi bias estimasi QMRA hingga 25% (Rodriguez-Caturla et al., 2023). Studi kasus di rumah sakit menunjukkan bahwa integrasi data EHR (Electronic Health Records) meningkatkan prediktibilitas risiko infeksi.
4. Inovasi Metode Deteksi. Teknik microfluidic-based MPN yang dikombinasikan dengan CRISPR-Cas12a menunjukkan sensitivitas 10x lebih tinggi dibanding MPN konvensional untuk deteksi *E. coli*. Untuk laboratorium terbatas sumber daya, pelatihan LAMP berbasis portable fluorometer terbukti efektif dengan biaya 70% lebih rendah daripada qPCR. (Agustín et al., 2023)

Dengan penerapan langkah-langkah tersebut secara komprehensif, diharapkan risiko infeksi *Escherichia coli* dapat diminimalisir secara signifikan, sehingga kualitas makanan dan kesehatan masyarakat dapat terus terjaga dengan baik.

1.5.6. Dampak kesehatan masyarakat dan lingkungan kerja

Berdasarkan hasil QMRA yang dilakukan terhadap berbagai jenis sampel makanan di RSUD Hajjah Andi Depu Polewali Mandar, ditemukan bahwa meskipun tingkat kontaminasi *Escherichia coli* dalam makanan masih berada di bawah batas standar kualitas ($< 1,0 \times 10^1$ koloni/g), risiko infeksi yang diproyeksikan selama satu tahun menunjukkan nilai maksimum (Probability of Infection/year = 1), yang mengindikasikan risiko infeksi *E. coli* pada tingkat tinggi (High Risk). Kondisi ini

menandakan bahwa paparan makanan sehari-hari terhadap *E. coli* yang berasal dari sampel seperti agar-agar, martabak mini, gogos, sambusa, dan roti pawa tetap berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan masyarakat. Risiko ini dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, termasuk keracunan makanan dan infeksi saluran pencernaan yang dapat berlanjut pada penyebaran penyakit luas apabila pengendalian sanitasi dan pengawasan tidak dilakukan secara ketat.

Di sisi lain, kondisi risiko tinggi ini juga memiliki implikasi serius terhadap lingkungan kerja, khususnya di bagian pengolahan dan penyajian makanan di fasilitas rumah sakit. Lingkungan kerja yang kurang terjaga kebersihannya berpotensi memperbesar peluang kontaminasi silang dan transmisi *E. coli* kepada petugas kesehatan maupun pasien, yang pada gilirannya dapat memperburuk status kesehatan pasien dan memperbesar risiko outbreak di rumah sakit. Oleh sebab itu, selain mengontrol kualitas makanan dari segi mikrobiologis, diperlukan juga penerapan protokol sanitasi yang ketat serta pelatihan kesadaran kebersihan bagi seluruh staf yang terlibat dalam pengelolaan makanan.

Secara keseluruhan, meskipun nilai kontaminasi bakteri dalam sampel makanan masih rendah, hasil analisis dosis-respons yang konsisten dan probabilitas infeksi yang tinggi berdasarkan QMRA menunjukkan bahwa risiko infeksi *E. coli* tetap nyata dan harus mendapat perhatian serius dalam perencanaan pengendalian risiko dan kebijakan kesehatan masyarakat. Upaya penguatan sanitasi, pemantauan mikrobiologis secara berkala, dan edukasi tentang higiene makanan menjadi aspek penting dalam mengurangi dampak kesehatan dan mencegah penyebaran infeksi di fasilitas kesehatan maupun masyarakat luas.

1.6. KESIMPULAN

Penelitian ini menggunakan metode Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) untuk menilai risiko infeksi *Escherichia coli* akibat konsumsi berbagai jenis makanan yang sering dikonsumsi oleh pegawai RSUD Hajjah Andi Depu Polewali Mandar. Walaupun tingkat kontaminasi bakteri pada sampel makanan masih berada di bawah standar kualitas yang ditetapkan, analisis risiko mikroba menunjukkan bahwa probabilitas infeksi tahunan dari makanan seperti agar-agar, martabak mini, gogos, sambusa, dan roti pawa masuk dalam kategori risiko tinggi (High Risk) dengan probabilitas infeksi mencapai nilai maksimum (1 atau 100%).

Hasil ini mengindikasikan adanya potensi signifikan terhadap gangguan kesehatan masyarakat melalui infeksi saluran pencernaan yang dapat berimbas pada produktivitas pegawai serta kondisi kesehatan umum di lingkungan rumah sakit. Risiko infeksi yang tinggi ini juga menegaskan perlunya perhatian khusus terhadap pengendalian kualitas keamanan pangan, dari tahap penyediaan, pengolahan, hingga penyajian makanan.

Selain itu, kondisi risiko yang ditemukan berdampak pada lingkungan kerja rumah sakit, menuntut penerapan protokol sanitasi yang lebih ketat dan pelatihan kesadaran kebersihan bagi seluruh staf yang terlibat agar dapat meminimalisir kontaminasi silang dan penyebaran infeksi di dalam rumah sakit.