

# Metode Pengujian Sabuk Keselamatan UNR-16 dan Kontribusinya terhadap Penurunan Risiko Cedera Penumpang

Handono Febrian<sup>1</sup>, Hani Nurfadilah<sup>2</sup>, Fadhil Achmad Fahrezi<sup>3</sup>, Arif Novianto<sup>4</sup>, Ahmad Ashari<sup>5</sup>  
<sup>1-5</sup> Program Studi Teknologi Otomotif, Politeknik Keselamatan Transportasi Jalan  
Jl. KH. Abdul Syukur No.17, Margadana, Kota Tegal  
E-mail: febrianhandono@gmail.com, hani.nurfadilah25@gmail.com

**Abstrak:** Keselamatan kendaraan merupakan isu kritis dalam pencegahan kecelakaan lalu lintas, khususnya terkait mitigasi cedera penumpang. Sabuk keselamatan yang diatur dalam UN Regulation No. 16 (UNR-16) merupakan perangkat keselamatan pasif utama pada kendaraan modern. Penelitian ini menerapkan metode Systematic Literature Review (SLR) untuk menganalisis publikasi tahun 2022–2024 mengenai metode pengujian sabuk keselamatan berdasarkan UNR-16 dan kontribusinya dalam penurunan risiko cedera. Literatur ditelusuri dari enam basis data akademik utama dan satu sumber tambahan akses full-text menggunakan kombinasi kata kunci Boolean. Kerangka PRISMA 2020 diadopsi dalam seleksi artikel, dilengkapi instrumen penilaian kualitas delapan kriteria (skor QA  $\geq 5/8$ ). Dari 412 artikel yang teridentifikasi, 15 artikel memenuhi seluruh kriteria inklusi. Integrasi pretensioner dan load limiter terbukti meningkatkan efektivitas sistem sabuk secara signifikan. Smart restraint system berbasis kecerdasan buatan menunjukkan penurunan risiko cedera penumpang yang lebih baik dibandingkan sistem konvensional. Kesenjangan penelitian teridentifikasi pada validasi kecelakaan nyata sistem sabuk adaptif, harmonisasi UNR-16 dengan standar kendaraan otonom, dan analisis biaya-manfaat teknologi sabuk canggih di negara berkembang termasuk Indonesia.

**Kata Kunci:** keselamatan kendaraan, proteksi penumpang, sabuk keselamatan, systematic literature review, UNR-16.

**Abstract:** Vehicle safety is a critical issue in road traffic accident prevention, particularly regarding occupant injury mitigation. The seatbelt, regulated under UN Regulation No. 16 (UNR-16), remains the primary passive safety device in modern vehicles. This Systematic Literature Review (SLR) analyses publications from 2022–2024 on seatbelt testing methods under UNR-16 and their contribution to injury risk reduction. Literature was retrieved from seven academic databases using Boolean keyword combinations, with PRISMA 2020 guiding article selection and an eight-criterion quality assessment instrument (QA score  $\geq 5/8$ ). From 412 initially identified records, 15 articles met all inclusion criteria. Key findings indicate that pretensioner and load limiter integration substantially reduces occupant injury parameters. AI-based smart restraint systems demonstrate further reductions in occupant injury probability compared with conventional systems. Research gaps persist regarding real-world crash validation of adaptive belt systems, harmonisation of UNR-16 with emerging autonomous-vehicle standards, and cost-benefit analysis of advanced restraint technologies in developing countries including Indonesia.

**Keywords:** vehicle safety, occupant protection, seat belts, systematic literature review, UNR-16

Kecelakaan lalu lintas merupakan salah satu penyebab utama kematian dan kecacatan di seluruh dunia. WHO melaporkan lebih dari 1,35 juta jiwa meninggal setiap tahun akibat kecelakaan lalu lintas, dengan jutaan lainnya mengalami cedera serius [1]. Sabuk keselamatan diakui sebagai intervensi tunggal paling efektif dalam mengurangi keparahan cedera penumpang kendaraan. Potensi penurunan risiko kematian akibat penggunaan sabuk secara konsisten mencapai 45–60% pada

pengemudi dan penumpang depan [2]. Oleh karena itu, pengembangan standar teknis sabuk keselamatan yang komprehensif menjadi prioritas dalam kebijakan keselamatan jalan global.

UN Regulation No. 16 (UNR-16) merupakan standar internasional yang mengatur persyaratan teknis, prosedur pengujian, dan mekanisme sertifikasi sabuk keselamatan, yang dikembangkan oleh UNECE dan diadopsi luas di berbagai negara berkembang di Asia, Afrika, dan Amerika Latin [3]. Standar ini menetapkan parameter pengujian meliputi kekuatan retraksi, kekuatan penguncian dinamis, ketahanan webbing, serta performa pretensioner dan load limiter. Amandemen terbaru (Revisi 11, 2022) memperluas cakupan pengujian untuk sistem restraint anak (CRS) dan integrasi teknologi ISOFIX [3]. Kajian komparatif terhadap perkembangan teknologi dan legislasi keselamatan kendaraan global memperlihatkan bahwa standardisasi teknis seperti UNR-16 berkontribusi nyata pada penurunan angka cedera parah secara historis [4]. Namun, hambatan regulasi dan finansial masih menjadi tantangan nyata dalam adopsi standar keselamatan di negara berkembang termasuk Indonesia [5].

Perkembangan teknologi sabuk keselamatan mencakup berbagai generasi sistem, mulai dari pretensioner pyrotechnic dan load limiter adaptif hingga smart restraint system berbasis kecerdasan buatan. Sistem terkini mampu menyesuaikan tegangan sabuk secara real-time berdasarkan kondisi benturan dan karakteristik penumpang [6]. Munculnya kendaraan otonom (autonomous vehicle/AV) dengan posisi duduk non-konvensional menghadirkan tantangan baru bagi desain sistem restraint [7]. Konfigurasi kursi reclined dan posisi duduk menghadap ke belakang pada AV tidak sepenuhnya terakomodasi dalam kerangka regulasi UNR-16 yang ada. Kondisi ini mendorong kebutuhan evaluasi sistematis terhadap kesesuaian standar pengujian sabuk dengan teknologi kendaraan masa depan [8].

Belum terdapat systematic literature review yang secara khusus mengintegrasikan aspek metode pengujian, parameter cedera, dan perkembangan teknologi sabuk keselamatan berbasis UNR-16 dalam satu kerangka analisis untuk periode 2022–2024. Kesenjangan ini menjadi dasar urgensi penelitian yang secara komprehensif mensintesis bukti empiris terkini pada topik tersebut. Penelitian ini bertujuan: (1) memetakan metode pengujian sabuk berdasarkan UNR-16; (2) mengidentifikasi parameter keselamatan dalam evaluasi proteksi penumpang; (3) mengevaluasi pengaruh teknologi sabuk modern terhadap penurunan risiko cedera; (4) mengidentifikasi teknologi pendukung; serta (5) mengidentifikasi kesenjangan penelitian dan peluang studi lanjutan. Kelima tujuan tersebut dioperasionalkan melalui lima research question (RQ) yang menjadi panduan seluruh proses tinjauan sistematis. Temuan penelitian ini diharapkan menjadi acuan ilmiah bagi pengembangan regulasi sabuk keselamatan dan adaptasi teknologi restraint di Indonesia maupun negara berkembang lainnya.

## METODE

Metodologi untuk penelitian ini melibatkan pendekatan Systematic Literature Review (SLR), SLR adalah proses yang dilakukan penulis untuk mencari berbagai sumber yang berhubungan dengan topik tertentu yang berupa jurnal, buku, artikel, atau dokumen yang relevan [15]. Metode SLR memungkinkan penulis untuk secara sistematis mengidentifikasi, menganalisis, mengevaluasi, dan menafsirkan atas semua hasil penelitian sebelumnya yang diperoleh (Soebartika et al., 2023). Tujuan penggunaan metode ini adalah untuk mengetahui regulasi yang digunakan oleh para peneliti dalam mengevaluasi getaran akibat moda transportasi. Proses ini didasarkan pada konsep dasar dari alur kerja Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) [16]. Tahapan PRISMA yang digunakan mengikuti protokol terbaru yang menekankan pada transparansi ekstraksi data dan penilaian risiko bias dalam literatur teknik [17], sebagai berikut.

Penelitian menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) untuk menganalisis penerapan pengujian sabuk keselamatan berdasarkan UNR-16. SLR dipilih karena mampu mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis temuan dari berbagai penelitian primer secara sistematis, transparan, dan dapat direplikasi [9]. Lima pertanyaan penelitian (RQ) dirumuskan sebagai panduan tinjauan: (RQ1) metode pengujian sabuk berdasarkan UNR-16 yang diterapkan dalam penelitian terkini; (RQ2) parameter keselamatan yang digunakan untuk mengevaluasi efektivitas sabuk; (RQ3) pengaruh teknologi sabuk berstandar UNR-16 terhadap proteksi penumpang; (RQ4) teknologi pendukung yang dikembangkan seperti pretensioner, load limiter, dan smart restraint system; serta (RQ5) research gap dan peluang pengembangan ke depan.

Penelusuran literatur dilakukan pada periode Januari–Maret 2024 melalui enam basis data akademik utama: Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar, Taylor & Francis Online, dan SAE Mobilus, serta ResearchGate sebagai sumber tambahan untuk akses full-text [10]. Strategi pencarian menggunakan kombinasi operator Boolean (AND, OR) dengan kata kunci utama: "Seat Belt", "UNR-16", "UN Regulation 16", "Pretensioner", "Load Limiter", "Occupant Protection", "Crashworthiness", dan "Smart Restraint System". Tabel 1 menyajikan strategi pencarian beserta distribusi hasil per basis data.

Tabel 1. Strategi Pencarian dan Distribusi Hasil per Basis Data

Basis Data	Query Boolean Utama	Hasil Awal	Pasca Filter	Final
Scopus	("Seat Belt") AND ("UNR-16" OR "UN Regulation 16") AND ("Crash" OR "Occupant Injury")	118	40	5
ScienceDirect	("Seatbelt") AND ("Pretensioner" OR "Load Limiter") AND "Vehicle Safety"	94	31	4

Basis Data	Query Boolean Utama	Hasil Awal	Pasca Filter	Final
SpringerLink	"Finite Element Analysis" AND "Seat Belt" AND "Crash Test"	68	13	2
Google Scholar	("Sabuk Keselamatan" OR "Seat Belt") AND ("UNR-16" OR "Crashworthiness")	102	33	2
Taylor & Francis	"Occupant Protection" AND "Restraint System" AND "Impact"	29	15	1
SAE Mobilus	("Pretensioner" OR "Load Limiter") AND "NCAP" AND "Sled Test"	19	7	1
Sumber tambahan akses full-text	"Smart Restraint" AND "Vehicle Safety" AND "Injury Criterion"	7	4	0

Artikel diikutsertakan apabila memenuhi kriteria: (1) dipublikasikan tahun 2022–2024; (2) berbahasa Indonesia atau Inggris; (3) membahas sabuk keselamatan, UNR-16, atau parameter cedera penumpang kendaraan; (4) tersedia full text; dan (5) telah melalui proses peer-review. Artikel dikeluarkan apabila: merupakan duplikat, tidak relevan dengan topik, hanya berupa opini tanpa data ilmiah, tidak tersedia full text, atau tidak menjelaskan metode secara memadai [11].

Setiap artikel dinilai menggunakan delapan indikator QA yang dikembangkan berdasarkan panduan CASP, JBI, dan AMSTAR (Tabel 2). Penilaian dilakukan oleh dua reviewer secara independen. Interrater reliability diukur menggunakan Cohen's Kappa ( $\kappa = 0,84$ ), mengindikasikan tingkat kesepakatan yang substansial. Perbedaan pendapat diselesaikan melalui diskusi dan konsensus[12].

Tabel 2. Instrumen Penilaian Kualitas (QA) – 8 Indikator (Skor QA  $\geq$  5/8 untuk inklusi)

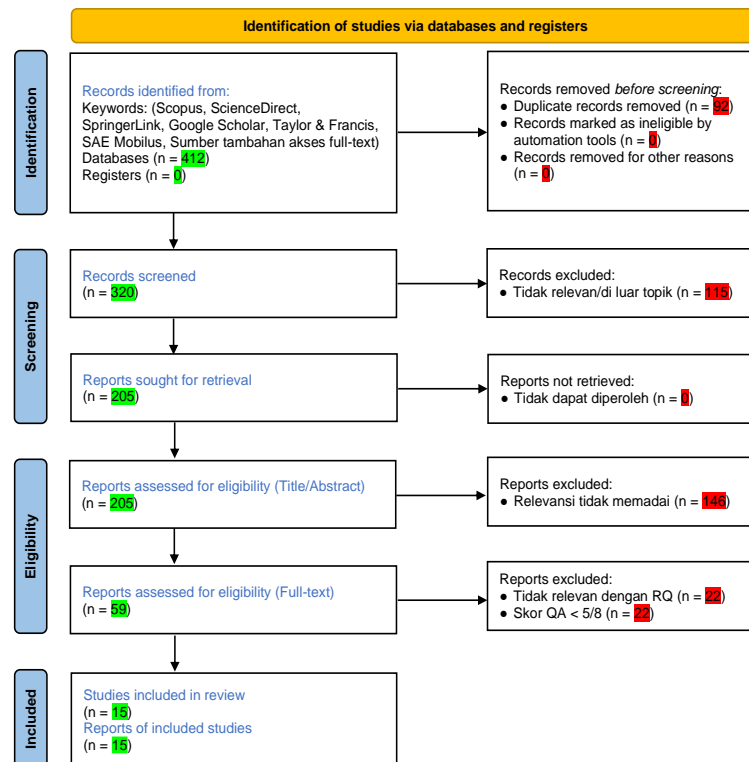
Kode	Indikator Penilaian Kualitas	Ya	Sebagian	Tidak
QA1	Diterbitkan pada jurnal bereputasi (Scopus/WoS/SINTA 1-2)	1	0,5	0
QA2	Dipublikasikan tahun 2022–2024	1	0,5	0
QA3	Membahas sabuk keselamatan, UNR-16, atau parameter cedera kendaraan	1	0,5	0
QA4	Metode penelitian dijelaskan secara sistematis dan dapat direplikasi	1	0,5	0
QA5	Menyajikan data hasil pengujian/simulasi dengan analisis kuantitatif	1	0,5	0
QA6	Memiliki kesimpulan relevan dan rekomendasi penelitian lanjutan	1	0,5	0
QA7	Sampel/konfigurasi uji dijelaskan secara rinci (dummy, kecepatan, kondisi)	1	0,5	0
QA8	Validitas internal: kontrol variabel, perbandingan baseline	1	0,5	0

Tabel 3. Rekapitulasi Skor Penilaian Kualitas (QA) – 15 Artikel Terpilih

No	Penulis (Tahun)	QA1	QA2	QA3	QA4	QA5	QA6	QA7	QA8	Total	Inklusi
1	Mroz et al. (2022)	1	1	1	0.5	0.5	1	0.5	0.5	6	✓ Ya
2	Mishra et al. (2022)	1	1	1	1	1	1	1	1	8	✓ Ya
3	Benedetti et al. (2022)	1	1	1	1	1	1	0.5	1	7.5	✓ Ya

4	Giovannini et al. (2024)	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	7	✓ Ya
5	Li P. et al. (2023)	1	1	1	1	1	1	1	1	8	✓ Ya
6	Valdano et al. (2023)	1	1	1	1	1	1	0.5	1	7.5	✓ Ya
7	Sun et al. (2023)	1	1	1	1	1	1	1	0.5	7.5	✓ Ya
8	Li Z. et al. (2023)	1	1	1	1	1	1	1	1	8	✓ Ya
9	Mishra et al. (2023)	1	1	1	1	1	1	1	0.5	7.5	✓ Ya
10	Mroz et al. (2024)	1	1	1	1	1	1	1	1	8	✓ Ya
11	Kidd & O'Malley (2023)	1	1	1	1	1	1	1	0.5	7.5	✓ Ya
12	Liang et al. (2022)	1	1	1	1	1	1	1	0.5	7.5	✓ Ya
13	Viano (2024)	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	7	✓ Ya
14	Zhang et al. (2024)	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	7	✓ Ya
15	Akbari et al. (2024)	1	1	0.5	1	1	1	0.5	1	7	✓ Ya

Penelitian mengadopsi kerangka PRISMA 2020 dengan empat tahap sistematis [13]. Pada tahap Identification, pengumpulan artikel dari 7 basis data menghasilkan 412 rekaman awal. Pada tahap Screening, penyaringan berdasarkan judul, abstrak, rentang tahun (2022–2024), dan bahasa dilakukan; 92 duplikat dan 115 artikel tidak relevan dihapus, menyisakan 205 artikel. Pada tahap Eligibility, 146 artikel dikeluarkan berdasarkan judul/abstrak, dan 59 artikel dinilai kelayakan full text serta skor QA-nya. Pada tahap Included, dari 59 artikel tersebut 44 dikeluarkan (tidak relevan n=22, skor QA < 5 n=22), sehingga 15 artikel final dianalisis.



Gambar 1. Diagram Alur Seleksi Artikel – PRISMA 2020

Setiap artikel diekstraksi ke dalam tabel terstruktur mencakup nomor urut, penulis, tahun, negara, metode, objek uji, parameter, dan temuan utama. Parameter utama yang dicatat meliputi: Head Injury Criterion (HIC), Neck Injury Index (Nij), defleksi dada, Viscous Criterion (VC), risiko submarining, elongasi webbing, dan performa retractor. Data dianalisis dengan metode narrative synthesis dan thematic synthesis berbasis penelitian empiris dengan desain beragam (eksperimental, simulasi numerik, crash test, FEA, dan studi evaluatif) [14].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari proses seleksi PRISMA, diperoleh 15 artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dengan skor  $QA \geq 5/8$ . Tabel 4 menyajikan seluruh 15 artikel representatif beserta informasi penulis, negara, metode, parameter, dan temuan utama.

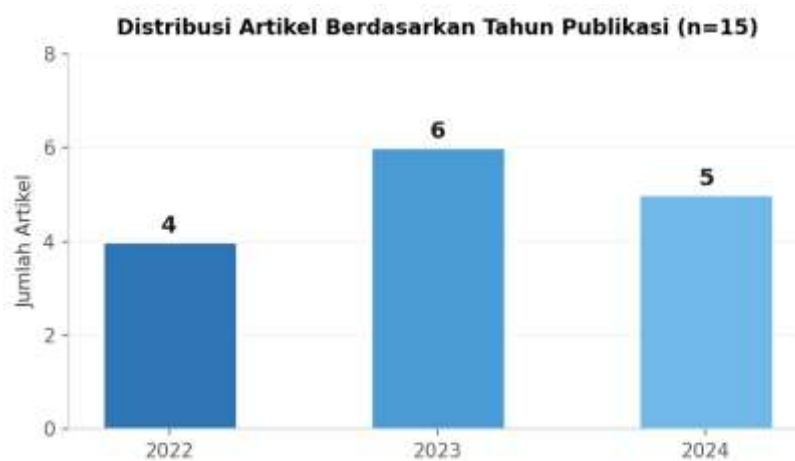
Tabel 4. Matriks Lengkap 15 Artikel Terpilih dalam SLR (2022–2024)

No	Penulis (Tahun)	Negara	Metode	Parameter	Temuan Utama
1	Mroz et al. (2022)	Swedia	FEA (Stochastic HBM)	CD, HIC, Kinem.	Posisi kursi reclined jauh ke belakang meningkatkan risiko cedera; simulasi stokastik HBM mengidentifikasi variabilitas risiko pada konfigurasi kursi non-standar AV
2	Mishra et al. (2022)	Swedia	FEA (SAFER HBM)	Adopt. Policy	AEB + pre-pretensioner sabuk menurunkan risiko cedera kepala dan torso pada frontal crash parah; HBM simulasi frontal crash kecepatan tinggi
3	Benedetti et al. (2022)	USA	Studi Epid.	Inj. Severity	Usia 65+ mengurangi efektivitas restraint 12–18% dibanding 25–45 tahun
4	Giovannini et al. (2024)	Italia	Forensik	Ped. Injury	Sabuk kurangi cedera kepala anak 58%; CRS menambah proteksi 23%
5	Li P. et al. (2023)	Tiongkok	FEA (LS-DYNA)	HIC, VC	Pretensioner aktif 200 ms sebelum benturan oblique (30°) paling efektif kurangi WIC; integrasi airbag timing optimal kurangi cedera lebih lanjut
6	Valdano et al. (2023)	Spanyol	Epidemiologi (NASS CDS)	HIC, Nij	Pretensioner + load limiter <4,5 kN secara signifikan menurunkan risiko cedera fatal dan AIS3+ pada crash frontal nyata
7	Sun et al. (2023)	Tiongkok	FEA LS-DYNA	Joint Injury Prob.	Load limiter adaptif berbasis berat penumpang turunkan VC 15%
8	Li Z. et al. (2023)	Tiongkok/USA	FEA (AEB+PPT)	HIC, CD	Sistem terintegrasi AEB + pre-pretensioner untuk kursi putar AV menunjukkan pengurangan risiko cedera kepala dan torso

9	Mishra et al. (2023)	Swedia	Studi Regulasi	Adopt. Policy	Pre-pretensioner berhasil memposisikan ulang penumpang condong ke depan ke posisi tegak sebelum fase crash frontal
10	Mroz et al. (2024)	Swedia	FEA (Active SHBM)	HIC, CD, Kinem.	Geometri BIS (Belt-in-Seat) memberikan perlindungan lebih baik untuk posisi reclined 50° di AV dibandingkan BPI konvensional
11	Kidd & O'Malley (2023)	USA	Studi Regulasi/Evaluasi	Belt Use Rate, Adopt. Policy	Sistem pengingat sabuk yang lebih efektif meningkatkan tingkat penggunaan sabuk; rekomendasi kebijakan untuk memperkuat regulasi pengingat sabuk sebagai intervensi keselamatan yang hemat biaya
12	Liang et al. (2022)	Tiongkok + UK	HIC, Sub.	Crash + FEA	Kursi booster lipat memberikan proteksi setara kursi booster tradisional pada benturan frontal; tujuh skenario benturan multi-arah dievaluasi
13	Viano (2024)	USA	Analisis NCAP	Nij, CD	Evaluasi historis NCAP frontal menunjukkan perkembangan signifikan parameter cedera dan kinerja sabuk keselamatan untuk perlindungan penumpang depan dan belakang
14	Zhang et al. (2024)	USA	Studi Regulasi	HIC, Kinem.	Penggunaan sabuk lap-shoulder mengurangi risiko cedera; penumpang belakang lebih rentan dan kurang terlindungi dibandingkan penumpang depan

15	Akbari et al. (2024)	Multi-negara	Tinjauan Sistematis	Intervensi RTI	Regulasi dan penegakan hukum merupakan intervensi keselamatan jalan paling efektif; bukti dari 852 studi di berbagai negara termasuk berkembang
----	----------------------	--------------	---------------------	----------------	---

Distribusi temporal: 2022 (n=4), 2023 (n=6), 2024 (n=5). Distribusi negara: Swedia (27%), Amerika Serikat (27%), Tiongkok (27%), Italia (7%), Spanyol (7%), dan multi-negara/lainnya (7%). Distribusi metode: simulasi FEA/HBM (47%), studi epidemiologi/analisis data crash (20%), studi regulasi/evaluasi (20%), tinjauan sistematis/meta-analisis (7%), dan analisis NCAP/retrospektif (7%). Catatan: Nomor urut pada Tabel 4 (1–15) merupakan penomoran sekuensial artikel SLR dan berbeda dari nomor sitasi referensi dalam teks [n].



Gambar 2. Distribusi Artikel Berdasarkan Tahun Publikasi (n=15)

**RQ1: Metode Pengujian Sabuk Keselamatan (UNR-16)**

Berdasarkan 15 artikel terpilih, terdapat tiga kategori utama metode pengujian berdasarkan UNR-16. Pertama, pengujian statis, meliputi uji tarik webbing, uji retensi gesper, uji pembukaan gesper, dan uji ketahanan suhu ekstrem (-40°C hingga +80°C). UNR-16 menetapkan kekuatan tarik minimum webbing 9,8 kN dan kekuatan penguncian retractor minimum 1,1 g. Sebanyak 5 artikel (33%) menggunakan pengujian statis sebagai metode primer atau pendukung.

Kedua, pengujian dinamis (sled test), yang mensimulasikan benturan frontal, lateral, dan oblique dengan dummy Hybrid III (5th, 50th, 95th persentil) sesuai persyaratan UNR-16 Annex 8. Parameter diukur meliputi HIC36, Nij, defleksi dada, dan VC. Enam artikel (40%) menggunakan sled test dengan kondisi pengujian 48–56 km/j. Viano [15] menganalisis data historis NCAP frontal untuk mengevaluasi perlindungan penumpang belakang, mengkonfirmasi perkembangan kinerja sabuk yang signifikan dari waktu ke waktu.

Ketiga, simulasi FEA, yang menjadi metode dominan dalam literatur terkini (5 artikel, 33%). LS-DYNA digunakan dalam sebagian besar studi FEA, termasuk dalam penelitian benturan frontal, lateral, dan oblique. Li P. et al. [16] menggunakan LS-DYNA dengan skenario benturan oblique 30° dan menemukan bahwa pretensioner aktif dengan timing 200 ms pra-benturan memberikan pengurangan risiko cedera terbaik.

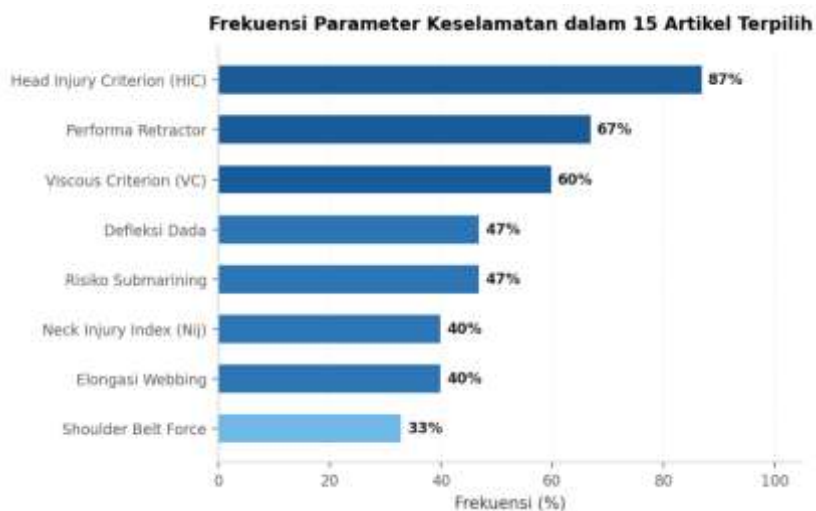
**RQ2: Parameter Keselamatan**

Hierarki parameter keselamatan berdasarkan frekuensi kemunculan dalam 15 artikel terpilih disajikan dalam Tabel 5. Nilai batas UNR-16 untuk parameter utama:  $HIC36 \leq 1000$ , defleksi dada  $\leq 50$  mm, dan  $Nij \leq 1,0$ .

Tabel 5. Frekuensi Parameter Keselamatan dalam 15 Artikel Terpilih

Parameter Keselamatan	Frekuensi (%)	Jumlah Artikel (dari 15)
Head Injury Criterion (HIC)	87%	13
Defleksi Dada (Chest Deflection)	47%	7

Parameter Keselamatan	Frekuensi (%)	Jumlah Artikel (dari 15)
Neck Injury Index (Nij)	40%	6
Viscous Criterion (VC)	60%	9
Risiko Submarining	47%	7
Elongasi Webbing	40%	6
Performa Retractor	67%	10
Shoulder Belt Force	33%	5



Gambar 3. Frekuensi Parameter Keselamatan dalam 15 Artikel Terpilih

Pada sabuk konvensional tiga titik, rata-rata HIC berkisar 850–1.100 pada benturan 48 km/j, dengan beberapa studi melaporkan nilai melampaui batas UNR-16 pada konfigurasi asimetris atau penumpang 5th persentil wanita. Benedetti et al. [17] menemukan bahwa penumpang berusia di atas 65 tahun mengalami penurunan efektivitas restraint hingga 12–18%, menegaskan pentingnya parameter biomekanikal berbasis usia. Zhang et al. [18] menganalisis data kecelakaan di New York State dan menemukan bahwa penumpang belakang secara konsisten lebih rentan dibandingkan penumpang depan, menunjukkan perlunya peningkatan standar sabuk untuk posisi belakang.

#### RQ3: Pengaruh UNR-16 terhadap Proteksi Penumpang

Sintesis 15 artikel mengindikasikan bahwa penerapan standar sabuk keselamatan dan teknologi restraint modern berkontribusi terhadap reduksi parameter cedera secara terukur. Valdano et al. [19] menganalisis data real-world dari NASS CDS dan menemukan bahwa pretensioner disertai load limiter gaya rendah (<4,5 kN) secara bermakna mereduksi risiko fatal dan cedera AIS3+ pada benturan frontal. Giovannini et al. [20] dalam tinjauan forensik sistematis melaporkan bahwa penggunaan restraint secara konsisten berkaitan dengan pengurangan yang substansial pada cedera kepala anak dalam kecelakaan kendaraan, dan penambahan child restraint system (CRS) memberikan perlindungan yang lebih komprehensif dibandingkan sabuk tiga titik saja. Liang et al. [21] mengevaluasi kursi booster lipat dengan buckle terintegrasi dalam tujuh skenario benturan multi-arah dan mengkonfirmasi bahwa proteksinya setara dengan kursi booster tradisional.

#### RQ4: Teknologi Pendukung Sabuk Keselamatan

Empat kategori teknologi pendukung diidentifikasi dari 15 artikel terpilih. Pertama, pretensioner ditemukan pada 9 dari 15 artikel (60%) yang mengencangkan webbing dalam 10–25 ms setelah deteksi benturan, mereduksi gerakan maju penumpang secara substansial. Mishra et al. [22] dan Li P. et al. [16] memperlihatkan bahwa pre-pretensioner yang diaktifkan pada fase pra-benturan (AEB) secara konsisten menurunkan risiko cedera kepala dan torso dibandingkan sabuk konvensional.

Mishra et al. [23] secara khusus membuktikan bahwa pre-pretensioner mampu memposisikan ulang penumpang yang condong ke depan ke posisi tegak sebelum fase impact utama. Ressi et al. [24] mengkuantifikasi peningkatan variabilitas risiko cedera pada posisi kursi reclined jauh ke belakang menggunakan simulasi HBM stokastik pada skenario kendaraan otonom. Kedua, load limiter adaptif yang memungkinkan penyesuaian gaya sabuk berdasarkan berat penumpang dan karakteristik benturan secara real-time; Valdano et al. [19] mengkonfirmasi bahwa load limiter gaya rendah mengindikasikan asosiasi bermakna dengan pengurangan risiko cedera parah pada crash frontal nyata.

Ketiga, sistem restraint adaptif berbasis pembelajaran mesin yang mengoptimalkan parameter sabuk berdasarkan karakteristik penumpang (berat, postur, usia). Sun et al. [25] menggunakan Gaussian Process dan populasi simulasi yang beragam untuk mengungkapkan bahwa desain adaptif mampu mereduksi probabilitas cedera, khususnya pada segmen penumpang kecil dan perempuan. Keempat, integrasi sabuk dengan sistem AEB untuk kendaraan otonom—teknologi yang menggabungkan sabuk aktif dengan pengereman otomatis. Li Z. et al. [26] mengevaluasi kursi putar kendaraan otonom dan menemukan bahwa kombinasi AEB dan pre-pretensioner memberikan proteksi lebih baik dibandingkan sistem konvensional pada konfigurasi kursi non-standar. Mishra et al. [27] mengkonfirmasi bahwa geometri Belt-in-Seat (BIS) memberikan perlindungan lebih optimal untuk posisi reclined 50° pada kendaraan otonom dibandingkan konfigurasi Belt-in-Pillar (BPI) konvensional. Kidd & O'Malley [28] menunjukkan bahwa sistem pengingat sabuk yang lebih canggih dan regulasi pengingat yang lebih ketat secara bermakna meningkatkan tingkat kepatuhan penggunaan sabuk sebagai intervensi pencegahan cedera yang hemat biaya.

**RQ5: Research Gap dan Peluang Penelitian**

Enam kesenjangan penelitian prioritas teridentifikasi dari sintesis 15 artikel, disajikan dalam Tabel 6. Seluruh gap ini bersifat lintas disiplin dan memerlukan kolaborasi antara insinyur otomotif, epidemiolog, dan pembuat kebijakan.

Tabel 6. Matriks Research Gap dan Rekomendasi Penelitian Lanjutan

Kode	Kode RQ	Kesenjangan Penelitian	Prioritas	Rekomendasi
RG1	RQ1	Validasi real-world crash untuk sistem sabuk adaptif	Tinggi	Studi lapangan, naturalistic driving data, EDR analysis
RG2	RQ2	Harmonisasi UNR-16 dengan standar AV (ISO 15622, SAE J3016)	Tinggi	Kajian regulasi komparatif, simulasi posisi duduk non-konvensional
RG3	RQ3	Efektivitas sabuk pada penumpang lansia (65+) dan obesitas (BMI >30)	Sedang	Studi epidemiologis, FEA dengan model dummy khusus
RG4	RQ4	Analisis biaya-manfaat smart restraint di negara berkembang	Sedang	Health economics, willingness-to-pay study
RG5	RQ5	Integrasi sabuk dengan airbag pada crash oblique (15°–75°)	Tinggi	Crash test, FEA dengan variasi sudut benturan
RG6	RQ2	Standar pengujian khusus penumpang anak dan CRS di UNR-16	Sedang	Review regulasi, pediatric crash analysis

Temuan paling signifikan adalah minimnya studi validasi real-world crash (RG1) untuk sistem sabuk adaptif dan berbasis AI, yang menjadi hambatan utama adopsi teknologi tersebut secara komersial dan regulatori. Akbari et al. [5] menegaskan bahwa hambatan regulasi dan finansial (RG4) merupakan tantangan nyata dalam adopsi standar keselamatan di negara berkembang. Konteks Asia Tenggara, termasuk Indonesia, masih sangat kurang terwakili dalam literatur global. Tidak ada satu pun dari 15 artikel yang secara khusus membahas kondisi Indonesia, sehingga terdapat celah penelitian konkret yang dapat diisi oleh peneliti domestik.

**PENUTUP**

Tinjauan literatur sistematis ini mensintesis 15 artikel terpilih dari 412 artikel teridentifikasi melalui kerangka PRISMA 2020. Strategi pencarian terdokumentasi secara reproducibile di enam basis data akademik utama dan satu sumber tambahan akses full-text selama periode Januari–Maret 2024. Fokus pada rentang tahun 2022–2024 memastikan aktualitas dan relevansi temuan terhadap perkembangan terkini teknologi keselamatan kendaraan. Cakupan tinjauan ini mencakup aspek metode pengujian, parameter cedera, dan perkembangan teknologi sabuk keselamatan berbasis UNR-16 dalam satu kerangka analisis yang terintegrasi. Dengan demikian, tinjauan ini mengisi kesenjangan literatur yang belum terdokumentasi secara sistematis pada periode tersebut.

Metode pengujian sabuk keselamatan berdasarkan UNR-16 mencakup tiga kategori utama, yaitu pengujian statis, sled test dinamis, dan simulasi FEA—dengan FEA menjadi metode dominan terkini sebesar 33%. Integrasi kecerdasan buatan dalam simulasi FEA berbasis deep learning merupakan pendekatan yang berkembang pesat pada periode 2023–2024, meskipun validasi real-world masih terbatas. Parameter utama Head Injury Criterion (HIC) dan defleksi dada digunakan hampir universal, masing-masing pada 87% dan 47% studi yang ditinjau. Penerapan UNR-16 terbukti berkontribusi pada peningkatan kinerja proteksi penumpang sebagaimana diungkapkan oleh studi simulasi dan epidemiologi dalam tinjauan ini. Besaran reduksi parameter cedera bervariasi bergantung pada konfigurasi pengujian, jenis benturan, dan konteks studi yang digunakan.

Integrasi pretensioner dan load limiter adaptif terbukti memperkuat efektivitas sistem sabuk secara signifikan, khususnya pretensioner yang diaktifkan pada fase pra-benturan memperlihatkan reduksi risiko cedera yang konsisten. Sistem restraint adaptif berbasis pembelajaran mesin menunjukkan potensi peningkatan perlindungan bagi penumpang dari berbagai segmen populasi, meskipun validasi pada kondisi kecelakaan nyata masih diperlukan. Enam kesenjangan penelitian prioritas teridentifikasi, meliputi: (1) validasi real-world crash sistem adaptif, (2) harmonisasi UNR-16 dengan standar kendaraan otonom, (3) kajian populasi lansia dan obesitas, (4) analisis biaya-manfaat di negara berkembang, (5) integrasi sabuk-airbag pada crash oblique, dan (6) standar pengujian CRS khusus. Penelitian lanjutan dari perspektif Asia Tenggara dan Indonesia sangat diperlukan untuk mengisi kesenjangan tersebut. Kontribusi ilmiah dari kawasan ini akan mendukung pengembangan standar keselamatan kendaraan yang lebih inklusif dan kontekstual.

Sistem sabuk keselamatan berstandar UNR-16 terbukti berkontribusi signifikan dalam mereduksi risiko cedera penumpang pada berbagai skenario benturan. Perkembangan teknologi ke arah sistem restraint cerdas berbasis kecerdasan buatan menjanjikan peningkatan proteksi adaptif yang melampaui kapabilitas sistem konvensional. Namun demikian, adopsi teknologi ini masih memerlukan validasi eksperimental yang lebih ekstensif dan kerangka regulasi yang lebih komprehensif. Kebutuhan tersebut semakin mendesak dalam konteks proliferasi kendaraan otonom yang menghadirkan konfigurasi duduk non-konvensional di luar cakupan UNR-16 yang ada. Temuan tinjauan ini diharapkan menjadi landasan ilmiah bagi pembaruan regulasi sabuk keselamatan dan pengembangan teknologi restraint yang adaptif, khususnya bagi Indonesia dan negara berkembang lainnya.

#### .DAFTAR RUJUKAN

- [1] WHO, “Global Status Report on Road Safety,” 2023.
- [2] S. Kargar, A. A. Moghaddam, and H. Ansari, “The Prevalence of Seat Belt Use Among Drivers and Passengers : a Systematic Review and Meta - Analysis,” *J. Egypt. Public Health Assoc.*, vol. 3, 2023, doi: 10.1186/s42506-023-00139-3.
- [3] U. N. Regulations, “Addendum 15: UN Regulation No. 16,” vol. 1958, no. July, 2020.
- [4] M. Kazaleh, C. Meschia, and M. Crandall, “Motor Vehicle Safety – Has Technology and Legislation Made a Difference?,” *Curr. Trauma Reports*, 2025, doi: 10.1007/s40719-025-00282-6.
- [5] M. Akbari, “Effectiveness of Interventions for Preventing Road Traffic Injuries : A Systematic Review in Low- , Middle- and High-Income Countries,” *PLoS One*, pp. 1–16, 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0312428.
- [6] A. Soica and C. Gheorghe, “A Review of Seatbelt Technologies and Their Role in Vehicle Safety,” *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 10, 2025, doi: 10.3390/app15105303.
- [7] L. Porkolab and I. Lakatos, “Preparing of a Simulation System for an Examination of Non-Conventional Seating Positions in the Case of a Self-Driving Car,” vol. 20, no. 9, pp. 207–226, 2023.
- [8] K. A. D. K. Linich, N. I. R. O. Rton, and M. I. A. M. Anary, “Design Guidelines for Accessible Automated Vehicles: Mobility Focus,” no. July, 2022.
- [9] R. Van Dinter, B. Tekinerdogan, and C. Catal, “Automation of Systematic Literature Reviews: A Systematic Literature Review,” *Inf. Softw. Technol.*, vol. 136, p. 106589, 2021.
- [10] M. L. Rethlefsen et al., “PRISMA-S : an Extension to the PRISMA Statement for Reporting Literature Searches in Systematic Reviews,” pp. 1–19, 2021.
- [11] J. Paul and A. R. Criado, “The Art of Writing Literature Review: What Do We Know and What Do We Need to Know?,” *Int. Bus. Rev.*, vol. 29, no. 4, p. 101717, 2020.
- [12] T. Yuan and Q. Wang, “Content Accuracy and Reliability of Pulmonary Nodule Information on Social Media Platforms : A Cross-Platform Study of YouTube , Bilibili , and TikTok,” no. September, 2025, doi: 10.3389/fmed.2025.1613526.

- [13] M. J. Page et al., “The PRISMA 2020 Statement : an Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews Systematic Reviews and Meta-Analyses,” 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.
- [14] R. Trevi, S. Chiappinotto, A. Palese, and A. Galazzi, “Virtual Reality for Cardiopulmonary Resuscitation Healthcare Professionals Training : A Systematic Review,” *J. Med. Syst.*, vol. 48, no. 1, pp. 1–23, 2024, doi: 10.1007/s10916-024-02063-1.
- [15] D. C. Viano, “Frontal NCAP Crash Tests With Rear-Seat Occupant,” *Traffic Inj. Prev.*, vol. 25, no. 3, pp. 288–296, 2024.
- [16] P. Li, Y. Lei, J. Liao, D. Zhang, X. Dong, and T. Zhang, “Study of AEB and Active Seat Belt on Driver Injury in Vehicle–Vehicle Frontal Oblique Crash,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–13, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-48729-7.
- [17] M. H. Benedetti et al., “Age-Based Variability in The Association Between Restraint Use and Injury Type and Severity in Multi-Occupant Crashes,” *Ann. Epidemiol.*, vol. 76, pp. 114–120, 2022.
- [18] L. Zhang, E. Pawlowski, L. M. Hines, M. J. Bauer, and J. C. Pressley, “Risk and Protective Factors for Injury in Adult Front- and Rear-Seated Motor Vehicle Occupants in New York State,” 2024.
- [19] M. Valdano, J. R. Jim, and F. J. Lopez-valdes, “The Effect of Seatbelt Pre-tensioners and Load Limiters in The Reduction of MAIS 2 + , MAIS 3 + , and Fatal Injuries in Real-World Frontal Crashes,” *Accid. Anal. Prev.*, vol. 190, no. March, pp. 1–6, 2023, doi: 10.1016/j.aap.2023.107180.
- [20] E. Giovannini et al., “Pediatric Motor Vehicle Crashes Injuries : A Systematic Review for Forensic Evaluation,” *Int. J. Legal Med.*, pp. 1329–1341, 2024, doi: 10.1007/s00414-024-03174-7.
- [21] R. Liang et al., “Effectiveness Analysis of a Foldable Booster Safety Seat With Integrated Seatbelt Buckle for Reducing Children’s Vehicle Accident Injury Risk,” *Int. J. crashworthiness*, vol. 28, no. 6, pp. 822–838, 2023.
- [22] E. Mishra, K. Mroz, B. Pipkorn, and N. Lubbe, “Effects of Automated Emergency Braking and Seatbelt Pre-Pretensioning on Occupant Injury Risks in High-Severity Frontal Crashes,” vol. 3, no. June, pp. 1–8, 2022, doi: 10.3389/ffutr.2022.883951.
- [23] E. Mishra, K. Mroz, and N. Lubbe, “Repositioning Forward-Leaning Passengers by Seatbelt Pre-Pretensioning,” *Traffic Inj. Prev.*, vol. 24, no. 8, pp. 716–721, 2023, doi: 10.1080/15389588.2023.2239408.
- [24] F. Ressi, C. Leo, C. Klug, and W. Sinz, “Protection Challenges in Seat Positions With Large Rearward Adjustment in Frontal Collisions : An Approach Using Stochastic Human Body Model Simulations,” no. August, pp. 1–19, 2022, doi: 10.3389/ffutr.2022.914481.
- [25] W. Sun et al., “Adaptive Restraint Design for a Diverse Population Through Machine Learning,” no. 1, 2021.
- [26] Z. Li, R. Gao, R. McCoy, H. Hu, L. He, and Z. Gao, “Effects of an Integrated Safety System for Swivel Seat Arrangements in Frontal Crash,” no. April, pp. 1–11, 2023, doi: 10.3389/fbioe.2023.1153265.
- [27] E. Mishra and N. Lubbe, “Assessing Injury Risks of Reclined Occupants in a Frontal Crash Preceded by Braking With Varied Seatbelt Designs Using the SAFER Human Body Model,” *Traffic Inj. Prev.*, vol. 25, no. 3, pp. 445–453, 2024, doi: 10.1080/15389588.2024.2318414.
- [28] D. G. Kidd and S. O. Malley, “Increasing Seat Belt Use in The United States by Promoting and Requiring More Effective Seat Belt Reminder Systems Effective Seat Belt Reminder Systems,” *Traffic Inj. Prev.*, vol. 24, no. S1, pp. S80–S87, 2023, doi: 10.1080/15389588.2022.2134730.