

Vestibular Dysfunction in Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Systematic Review of Diagnostic Challenges and Clinical Perspectives

Seikha Cheany Fitriansyah^{1*}, Azizah Tasyarani Khairunnisa¹, Danda Ananda¹,
Lalu Muhammad Nuriel Akbar¹, Mufidah Radwah Ja'faruddin¹, Ni Luh Putu
Faniacetta Dahayu Wedantari¹, Ilsa Hunaifi²

¹Program Studi Pendidikan Dokter, Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan, Universitas
Mataram, Mataram, Indonesia

²Departemen Neurologi, Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan, Universitas Mataram,
Mataram, Indonesia

Article History

Received : August 16th, 2026

Revised : September 10th, 2026

Accepted : September 16th, 2026

*Corresponding Author:

Seikha Cheany Fitriansyah,
Program Studi Pendidikan
Dokter, Fakultas Kedokteran dan
Ilmu Kesehatan, Universitas
Mataram, Mataram, Indonesia;
Email:
seikhafitriansyah@gmail.com

abstract: Adolescent Idiopathic Scoliosis (AIS) has traditionally been managed purely as a biomechanical structural deformity of the spine. However, recent evidence highlights the involvement of the central nervous system, particularly vestibular and sensorimotor dysfunction, in its pathogenesis. This systematic review aims to synthesize current literature on vestibular impairments and their impact on postural control in adolescents with AIS. A systematic literature search was conducted across electronic databases, including PubMed, ScienceDirect, and SpringerLink, to identify relevant studies. The inclusion criteria focused on articles evaluating vestibular function, sensorimotor integration, and postural control in patients with AIS, compared to either healthy controls or internal clinical parameters. The methodological quality and risk of bias of the included studies were appraised using the Joanna Briggs Institute (JBI) critical appraisal tools. Out of 137 initially screened records, 8 studies met the final inclusion criteria. Data synthesis reveals that AIS patients can actually maintain normal balance during simple static tasks due to a high-level of sensory compensation. However, their stability limits drop drastically when visual and proprioceptive inputs are manipulated. This instability strongly correlates with the severity of the Cobb angle. Structurally, imaging and neuro-otological evidence confirm the presence of anatomical asymmetries, such as abnormal lateral semicircular canal orientation and white matter disruptions in the corpus callosum. Furthermore, trials of neuromodulation interventions (combining peripheral and cortical stimulation) have proven effective in instantly reducing postural sway. AIS is a complex neurosensory syndrome driven by vestibular anatomical asymmetry and impaired central sensory integration, rather than purely a mechanical bone issue. Therefore, standard orthopedic management, such as bracing, should be complemented with routine neuro-otological screening and sensorimotor rehabilitation programs to address the root cause of postural instability.

Keywords: adolescent idiopathic scoliosis; vestibular dysfunction; sensory integration; postural control;

Pendahuluan

Adolescent Idiopathic Scoliosis (AIS) merupakan deformitas tulang belakang tiga dimensi paling umum pada masa pertumbuhan yang ditandai oleh deviasi kurva di bidang koronal dengan sudut Cobb lebih dari 10°, rotasi

korpus vertebra pada bidang transversal, serta reduksi kelengkungan fisiologis di bidang sagital (Chen et al., 2026; Paramento et al., 2024; Vlădăreanu et al., 2024). Kelainan ini memengaruhi 1% hingga 4% populasi remaja di seluruh dunia dengan progresi yang signifikan pada perempuan (Chen et al., 2026; Paramento et

al., 2024; Wu et al., 2026). Secara konvensional, tatalaksana klinis AIS didominasi oleh paradigma muskuloskeletal murni, yang berfokus pada pemantauan radiologis berkala, pemakaian korset ortotik (*bracing*), atau tindakan bedah korektif pada kurva yang progresif (Chen et al., 2026; Paramento et al., 2024; Vlădăreanu et al., 2024). Namun, intervensi ortopedi struktural tersebut sering kali tidak sepenuhnya mengatasi gangguan stabilitas postural maupun risiko kekambuhan deformitas, sehingga mengindikasikan adanya mekanisme neurofisiologis yang belum terintegrasi ke dalam tatalaksana standar (Chen et al., 2026; Paramento et al., 2024).

Dalam beberapa dekade terakhir, investigasi etiologi AIS bergeser dari anomali biomekanik lokal menuju keterlibatan sistem saraf pusat, khususnya disregulasi kontrol postural (Chen et al., 2026; Paramento et al., 2024). Pemeliharaan orientasi tubuh tegak menuntut integrasi multisensorik yang dinamis dan terkoordinasi antara input visual, proprioseptif, dan vestibular (Chen et al., 2026; Vlădăreanu et al., 2026). Di antara ketiga sistem tersebut, aparatus vestibular yang terdiri atas kanalis semisirkularis dan organ otolit memegang peran sebagai referensi gravitasi absolut untuk persepsi vertikalitas tubuh serta modulasi tonus otot aksial antipersistensi melalui jaras vestibulospinal (Chen et al., 2026; Cyr et al., 2025; Vlădăreanu et al., 2024). Temuan klinis menunjukkan bahwa remaja dengan AIS memperlihatkan peningkatan goyangan postur (*postural sway*), berkurangnya batas stabilitas, serta ketergantungan visual dan proprioseptif yang eksekutif untuk mempertahankan keseimbangan (Chen et al., 2026; Paramento et al., 2024; Wu et al., 2026). Defisit integrasi sensorimotor ini paling nyata terungkap saat input visual ditiadakan atau permukaan tumpuan dimanipulasi, suatu kondisi di mana sistem saraf dipaksa mengandalkan informasi vestibular (Chen et al., 2026).

Keterkaitan langsung antara disfungsi vestibular dan patogenesis AIS didukung oleh bukti translasi dari model hewan, di mana lesi labirin unilateral atau asimetri input vestibular terbukti menginduksi deformitas rotasional tulang belakang yang menyerupai gambaran skoliosis pada manusia (Chen et al., 2026; Cyr et al., 2025). Pada populasi klinis remaja, studi

neuro-otologi dan pencitraan modern secara konsisten mengidentifikasi anomali struktural maupun fungsional pada sistem vestibular (Chen et al., 2026; Vlădăreanu et al., 2024; Vlădăreanu et al., 2026; Wu et al., 2026). Pemeriksaan klinis dan instrumental seperti *Fukuda Stepping Test* (FST), *video-nystagmography* (VNG), serta platform stabilometri dinamis membuktikan bahwa keberadaan disfungsi vestibular perifer dan riwayat kinetosis (*motion sickness*) berkorelasi erat dengan magnitudo sudut Cobb yang lebih parah (Vlădăreanu et al., 2024; Vlădăreanu et al., 2026). Secara anatomis, studi *Magnetic Resonance Imaging* (MRI) resolusi tinggi mengungkap adanya remodelisasi geometris pada kanalis semisirkularis lateral dengan orientasi yang lebih vertikal dan asimetri labirin dominan sisi kiri, yang disertai alterasi integritas traktus sensorimotor sentral pada korpus kalosum dan lobus parietal (Chen et al., 2026; Paramento et al., 2024; Wu et al., 2026).

Meskipun anomali vestibular perifer maupun sentral semakin banyak didokumentasikan, literatur yang ada masih terfragmentasi dan menyisakan kesenjangan konseptual (Paramento et al., 2024; Wu et al., 2026). Sebagian besar studi terdahulu meneliti parameter vestibular, proprioseptif, atau biomekanik postural secara terpisah tanpa menghubungkannya secara terpadu dengan derajat keparahan kurva radiologis (Paramento et al., 2024; Wu et al., 2026). Kontroversi juga masih terjadi, di mana sejumlah laporan mengeklaim stabilitas postural remaja AIS tidak berbeda signifikan dari kontrol sehat pada tugas harian statis (Bayattork et al., 2024), sementara studi eksperimental neurostimulasi terkini (*stochastic/noisy vestibular stimulation*) justru menunjukkan adanya peningkatan respons motorik (*hyper-responsiveness*) dan modulasi *gain* vestibulomotor yang abnormal pada pasien AIS (Chen et al., 2026; Cyr et al., 2025; Yamawaki et al., 2024). Selain itu, belum ada sintesis sistematis mutakhir yang menelaah secara kritis apakah disfungsi vestibular ini berperan sebagai pemicu primer deformitas, mekanisme kompensasi fungsional, atau penanda klinis risiko progresi kurva yang memerlukan integrasi strategi rehabilitasi vestibular (Cyr et al., 2025; Vlădăreanu et al., 2024; Vlădăreanu et al., 2026).

Oleh karena itu, tinjauan literatur terstruktur ini bertujuan untuk menyintesis secara komprehensif bukti ilmiah terkini mengenai peran disfungsi sistem vestibular perifer dan sentral serta keterkaitannya dengan gangguan kontrol postural pada remaja dengan AIS (Chen et al., 2026; Paramento et al., 2024; Vlădăreanu et al., 2024; Vlădăreanu et al., 2026; Wu et al., 2026). Tinjauan ini secara khusus mengevaluasi korelasi antara modalitas penilaian fungsi vestibular (klinis, instrumen stabilometri, neurofisiologi, dan pencitraan) terhadap parameter derajat keparahan kurva radiologis (Chen et al., 2026; Cyr et al., 2025; Paramento et al., 2024; Vlădăreanu et al., 2024; Vlădăreanu et al., 2026; Wu et al., 2026). Melalui sintesis kritis yang terbebas dari bias pelaporan murni deskriptif, tinjauan ini diharapkan dapat memperjelas patofisiologi neurosensori AIS serta memberikan rasional ilmiah bagi pengembangan modalitas skrining dan intervensi rehabilitasi integrasi sensorimotor di masa depan (Chen et al., 2026; Paramento et al., 2024; Vlădăreanu et al., 2026).

Bahan dan Metode

1. Desain Studi dan Pedoman Pelaporan

Tinjauan ini disusun dengan pendekatan terstruktur yang mematuhi pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA 2020) guna mengevaluasi keterlibatan disfungsi vestibular dan gangguan integrasi sensorimotor pada pasien *Adolescent Idiopathic Scoliosis* (AIS).

2. Strategi Penelusuran Literatur

Pencarian literatur dilakukan pada tiga basis data utama: PubMed, SpringerLink, dan ScienceDirect. Pemilihan artikel dibatasi pada terbitan 5 tahun terakhir (Januari 2021 hingga Februari 2026) agar literatur yang diulas relevan dengan perkembangan medis terkini. Proses pencarian disusun menggunakan panduan *Medical Subject Headings* (MeSH) serta kombinasi operator Boolean (AND, OR) yang diterapkan pada judul dan abstrak. Berikut adalah susunan kata kunci yang digunakan: ("Adolescent Idiopathic Scoliosis" OR "AIS" OR "idiopathic scoliosis") AND ("vestibular" OR "vestibular dysfunction" OR "vestibulomotor" OR "sensorimotor integration" OR "sensory

reweighting" OR "postural control" OR "balance")

3. Kriteria Kelayakan (PICOS Framework)

Populasi (P): Pasien remaja usia 10–18 tahun dengan diagnosis klinis dan radiologis AIS terkonfirmasi (sudut Cobb $\geq 10^\circ$).

Intervensi/Paparan (I): Pemeriksaan fungsi vestibular, pengujian integrasi sensorimotor, atau stimulasi neuromodulasi vestibular (seperti VEMP, video-nystagmography [VNG], uji Romberg, Fukuda Stepping Test [FST], *Computerized Dynamic Posturography* [CDP], *Stochastic/Noisy Galvanic Vestibular Stimulation* [SVS/nGVS], atau pemetaan MRI neuro-otologi).

Pembanding (C): Individu sehat seusia (*age-matched healthy controls*) atau analisis komparasi internal antarkarakteristik kurva/derajat disfungsi pada pasien AIS.

Luaran (O): Parameter fungsi vestibular perifer/sentral, stabilitas postur (*Center of Pressure* / COP), *gain* respons vestibulomotor, koordinasi neuromuskular, atau penanda neuromorfologi vestibular.

Desain Studi (S): Artikel penelitian orisinal (*randomized controlled trial*, kasus-kontrol, kohort, potong lintang) dan tinjauan sistematis berbasis metode terstandarisasi.

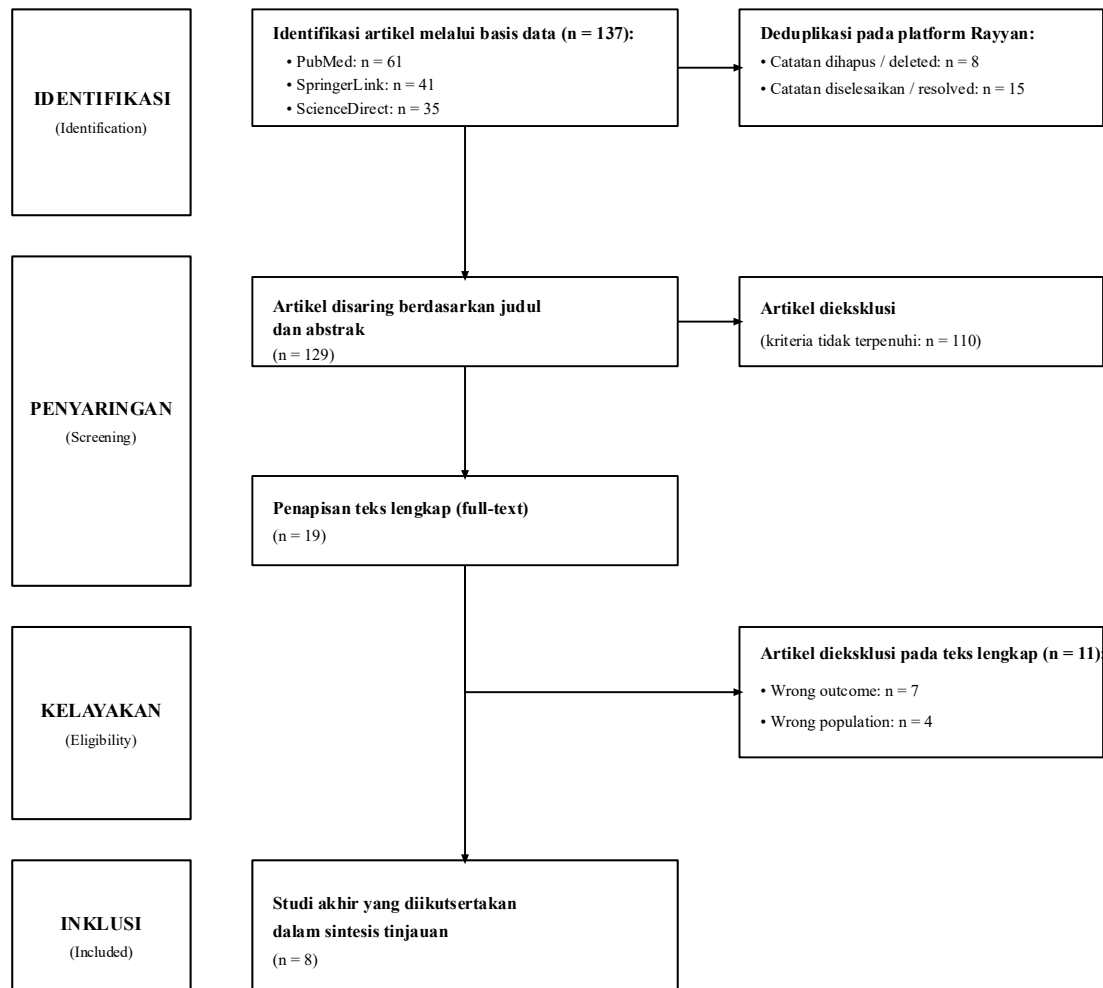
Kriteria Eksklusi: Skoliosis non-idiopatik (kongenital, neuromuskular, atau sindromik), riwayat operasi fusi tulang belakang, tidak menyertakan luaran fungsi vestibular atau keseimbangan sensorimotor (*wrong outcome*), artikel berupa abstrak konferensi, korespondensi, editorial, laporan kasus tunggal, dan publikasi berbahasa selain Inggris.

4. Prosedur Seleksi Data

Seluruh catatan bibliografi hasil penelusuran diimpor ke aplikasi Rayyan (*Rayyan Systems Inc.*) untuk deduplikasi dan penapisan literatur. Penelusuran menghasilkan 137 artikel (PubMed: 61, SpringerLink: 41, ScienceDirect: 35). Melalui evaluasi otomatis dan manual di Rayyan, 8 artikel duplikat dihapus secara permanen (*deleted*), dan 15 artikel diselesaikan (*resolved*) sebagai catatan berbeda, menyisakan 129 artikel unik untuk penapisan judul dan abstrak. Penapisan judul dan abstrak dilakukan secara independen oleh dua penelaah. Sebanyak 110 artikel dieksklusi karena tidak memenuhi kriteria

kelayakan, sehingga 19 artikel berlanjut ke tahap evaluasi teks lengkap (*full-text screening*). Pada tahap ini, 11 artikel dieksklusi dengan alasan spesifik: 7 artikel tidak menyajikan luaran vestibular atau integrasi sensorimotor (*wrong outcome*), dan 4 artikel melibatkan populasi

subjek di luar kriteria inklusi (*wrong population*). Secara kumulatif, 8 artikel teks lengkap memenuhi seluruh kriteria kelayakan dan diinklusi ke dalam sintesis tinjauan pustaka ini (Gambar 1).



Gambar 1. Diagram alir seleksi studi berdasarkan pedoman PRISMA

5. Penilaian Risiko Bias (*Risk of Bias Assessment*)

Penilaian kualitas metodologis dan risiko bias terhadap seluruh 8 studi terpilih dievaluasi menggunakan instrumen telaah kritis terstandarisasi dari Joanna Briggs Institute (JBI) sesuai desain masing-masing studi (*Checklist for Systematic Reviews, Analytical Cross-Sectional*

Studies, Case-Control Studies, Cohort Studies, dan Randomized Controlled Trials). Hasil telaah kritis diklasifikasikan secara langsung di dalam platform Rayyan menggunakan label kustom (*Low Risk* untuk pemenuhan kriteria $\geq 70\%$, *Moderate Risk* untuk 50--69%, dan *High Risk* untuk $< 50\%$).

Tabel 1. Karakteristik literatur dan hasil penilaian risiko bias

Penulis & Tahun	Desain Studi	Sampel Partisipan	Modalitas Evaluasi Vestibular / Sensorik	Temuan Kunci Terkait Disfungsi Vestibular	Skor JBI & Risiko Bias
Paramento dkk. (2024)	<i>Systematic Review</i>	61 studi primer ($n = 1693$ AIS)	Evaluasi multimodal: stabilometri, EMG, EEG, fMRI	Bukti defisit kontrol postur statis-dinamis, peningkatan ketergantungan visual, dan asimetri morfologi kanalis semisirkularis.	Low Risk
Bayattork dkk. (2024)	<i>Cross-Sectional Analitik</i>	95 AIS vs 26 Kontrol Sehat	<i>Computerized Dynamic Posturography</i> (CDP), SOT 1–6	Keseimbangan dasar terpelihara pada tugas harian, namun batas stabilitas terganggu saat input visual/somatosensorik dimanipulasi.	Low Risk
Vlădăreanu dkk. (2024)	Observasional Retrospektif	$n = 159$ AIS	<i>Fukuda Stepping Test</i> (FST), Framiral Platform	Disfungsi vestibular perifer terbukti berhubungan signifikan dengan derajat sudut Cobb yang lebih tinggi dan riwayat <i>motion sickness</i> .	Moderate Risk
Yamawaki dkk. (2024)	<i>Cross-Sectional</i>	$n = 50$ AIS perempuan	Stabilometri dinamis (Gravicorder GW-5000)	Batas stabilitas dinamis dipengaruhi signifikan oleh <i>coronal balance</i> dan lokasi kurva utama, independen dari sudut Cobb.	Moderate Risk
Cyr dkk. (2025)	Kasus-Kontrol Eksperimental	15 AIS vs 15 Kontrol Sehat	<i>Stochastic Vestibular Stimulation</i> (SVS), <i>Force Platform</i>	Pasien AIS menunjukkan peningkatan gain vestibulomotor terhadap SVS (<i>hyper-responsiveness</i>) tanpa asimetri orientasi frontal.	Low Risk
Chen dkk. (2026)	<i>Sham-Controlled RCT</i>	$n = 40$ AIS	nGVS bilateral, HD-tDCS kortikal, sEMG, fNIRS	Kombinasi stimulasi vestibular perifer dan kortikal menghasilkan reduksi goyangan postur terbesar via reorganisasi motorik-parietal.	Low Risk
Vlădăreanu dkk. (2026)	<i>Kohort Retrospektif</i>	$n = 177$ AIS	FST, VNG kursi putar, Romberg permukaan labil	Keterlibatan multikanal vestibular (kombinasi anterior-horizontal) berkorelasi linear dengan keparahan kurva dan instabilitas postural.	Moderate Risk
Wu dkk. (2026)	<i>Systematic Review</i>	15 studi MRI ($n = 1270$)	Pemetaan MRI struktural / DTI traktus sensorimotor	Terdapat deformitas struktural vestibular (kanalis semisirkularis lateral lebih vertikal sisi kiri) dan gangguan traktus somatosensorik.	Low Risk

Hasil dan Pembahasan

Sintesis kuantitatif dan kualitatif dari 8 artikel inklusi memetakan spektrum disfungsi neurosensori pada remaja dengan *Adolescent Idiopathic Scoliosis* (AIS) ke dalam empat temuan utama:

1. Karakteristik Kontrol Postural dan Integrasi Sensorik

Evaluasi stabilitas postural mengonfirmasi eksistensi mekanisme kompensasi fungsional pada remaja AIS. Bayattork et al., (2024) melaporkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik pada parameter keseimbangan dasar antara pasien AIS ($n = 95$) dan kontrol sehat ($n = 26$) saat kondisi stabil. Skor *Sensory Organization Test* (SOT) kondisi 1 ($p = 0,964$), kondisi 2 ($p = 0,733$), dan kondisi 3 ($p = 0,057$) menunjukkan performa yang setara antarkelompok. Namun, batas stabilitas pasien AIS menurun ketika input visual dan proprioseptif dimanipulasi (SOT kondisi 5 dan 6). Temuan ini didukung oleh Yamawaki et al., (2024) dan Paramento et al., (2024), yang mencatat bahwa batas stabilitas dinamis sangat

dipengaruhi oleh ketergantungan visual dan parameter keseimbangan koronal, independen dari derajat sudut Cobb.

2. Disfungsi Vestibular dan Manifestasi Neuro-otologi

Abnormalitas vestibular perifer terekam secara konsisten dan memiliki korelasi absolut dengan keparahan kurva. Vlădăreanu et al., (2026) membuktikan bahwa pasien dengan hasil positif pada *Fukuda Stepping Test* (FST) memiliki sudut Cobb awal yang jauh lebih besar dibandingkan pasien dengan FST negatif ($28,2^\circ \pm 17,4^\circ$ vs $12,7^\circ \pm 5,0^\circ$, $p < 0,001$). Melalui pemeriksaan *video-nystagmography* (VNG), keterlibatan disfungsi multikanal terutama kombinasi kanalis anterior dan horizontal pada telinga kanan menghasilkan deviasi kurva tertinggi dengan rata-rata sudut Cobb $62,5^\circ \pm 21,9^\circ$ ($p < 0,001$). Lebih lanjut, uji Romberg pada platform yang tidak stabil (*unstable platform* / ECU) menunjukkan bahwa defisit stabilitas berkorelasi positif secara signifikan dengan keparahan sudut Cobb ($r = 0,390$, $p < 0,001$). Di sisi lain, eksperimen Cyr et al., (2025) menemukan bahwa pasien AIS memiliki respons vestibulomotor

yang hiper-reaktif terhadap *Stochastic Vestibular Stimulation* (SVS), menandakan peningkatan *gain* sentral.

3. Alterasi Neuromorfologi dan Asimetri Anatomi

Disfungsi sensorimotor pada AIS terbukti berakar pada basis struktural anatomis. Tinjauan sistematis dari 15 studi *Magnetic Resonance Imaging* (MRI) ($n = 1270$) oleh Wu et al., (2026) mengungkap asimetri kanalis semisirkularis lateral yang memiliki orientasi lebih vertikal pada sisi kiri tubuh. Selain itu, ditemukan insiden ektopia tonsil serebelar (penurunan tonsil 0,9–2,8 mm di bawah garis basion-opisthion) dengan tingkat prevalensi 34,5% hingga 48,0%. Prevalensi ektopia ini melonjak hingga 62,5% pada pasien dengan kurva torakal ganda dan 27,3% pada pasien dengan sudut Cobb $> 40^\circ$. Pada tingkat jaringan otak, terdeteksi pelebaran volume *white matter* dominan kiri serta terganggunya integritas mikrostruktur pada korpus kalosum (penurunan *fractional anisotropy* / FA) yang menghambat konektivitas interhemisferik.

4. Efektivitas Intervensi Neuromodulasi Vestibular

Uji klinis acak (*sham-controlled RCT*) oleh Chen et al., (2026) pada 40 pasien AIS mendemonstrasikan efektivitas stimulasi neurosensori. Intervensi neuromodulasi hibrida yang menggabungkan stimulasi vestibular perifer (*noisy Galvanic Vestibular Stimulation* / nGVS) dan kortikal (*High-Definition Transcranial Direct Current Stimulation* / HD-tDCS) mampu mereduksi *COP path length* secara signifikan ($p < 0,001$, ukuran efek parsial $\eta^2p = 0,505$) serta *sway area* ($p = 0,018$). Pemantauan fNIRS membuktikan perbaikan ini diikuti oleh peningkatan aktivasi kortikal pada *right inferior parietal lobule* (IPL) ($p = 0,032$) dan peningkatan konektivitas fungsional (FC) secara instan antara lobus parietal kanan dan *supplementary motor area* (SMA) ($p = 0,028$).

Pembahasan

1. Mekanisme Kompensasi dan Penurunan Batas Stabilitas

Ada perbedaan temuan dalam beberapa literatur mengenai apakah pasien AIS benar-benar memiliki masalah keseimbangan.

Berdasarkan hasil tinjauan ini, pasien AIS sebenarnya memiliki strategi kompensasi yang mampu menutupi masalah kontrol postural mereka saat melakukan aktivitas sederhana. Hal ini sejalan dengan studi Bayattork et al., (2024), yang tidak menemukan perbedaan bermakna pada skor dasar *Sensory Organization Test* (SOT) kondisi 1 hingga 3; $p > 0,05$) antara pasien AIS dan individu sehat. Namun, keseimbangan ini sebenarnya rapuh jika lingkungan sekitarnya berubah. Ketika input visual dan proprioseptif dikurangi atau dimanipulasi misalnya saat berdiri di atas alas yang tidak stabil, pasien mulai kehilangan keseimbangan. Pada kondisi ini, defisit vestibular pada pasien AIS menjadi terlihat jelas dan berhubungan kuat dengan tingkat keparahan sudut Cobb ($r = 0,390$, $p < 0,001$) (Vlădăreanu et al., 2026).

Mengapa penurunan stabilitas ini bisa terjadi? Studi dari Cyr et al., (2025) menjelaskan bahwa sistem saraf pasien AIS terlalu sensitif (hiper-responsif) dalam merespons sinyal vestibular. Untuk mempertahankan posisi tulang belakangnya yang bengkok, otak pasien melakukan pembobotan ulang sensorik (*sensory reweighting*) secara berlebihan. Strategi ini mungkin berhasil di kondisi stabil, tetapi saat pasien dihadapkan pada tantangan sensorik yang lebih berat, kapasitas kompensasi ini habis sehingga pasien tampak kehilangan keseimbangan.

2. Kelainan Anatomi sebagai Penyebab Gangguan Keseimbangan

Gangguan sensorimotor pada pasien AIS tidak hanya berupa masalah kebiasaan postur yang buruk, tetapi didukung oleh perubahan struktural secara anatomi. Tinjauan pencitraan MRI oleh Wu et al., (2026) memperlihatkan bahwa pasien AIS memiliki bentuk aparatus vestibular yang asimetris, khususnya letak kanalis semisirkularis lateral yang lebih vertikal di sisi kiri. Temuan anatomi ini sejalan dengan hasil uji klinis fungsional VNG dari Vlădăreanu et al., (2026). Mereka menemukan bahwa pasien yang mengalami gangguan pada lebih dari satu kanalis (khususnya anterior dan horizontal di telinga kanan) memiliki lengkungan skoliosis yang jauh lebih parah, dengan rata-rata sudut Cobb mencapai $62,5^\circ$ ($p < 0,001$).

Selain kelainan di telinga dalam, Wu et al., (2026) juga menemukan bahwa hingga 48,0%

pasien AIS mengalami penurunan posisi tonsil serebelar (ektopia) dan adanya kerusakan serabut saraf (*white matter*) di area korpus kalosum. Artinya, sinyal keseimbangan yang masuk dari telinga dalam sudah terdistorsi sejak awal karena masalah anatomi, lalu mengalami hambatan tambahan saat sinyal tersebut ditransmisikan dan diproses di antara kedua belahan otak. Temuan ini membuktikan bahwa masalah vestibular adalah bagian dari penyebab utama (etiologi) AIS, dan bukan sekadar akibat dari lengkungan tulang belakang.

3. Implikasi Klinis: Potensi Terapi Neuromodulasi

Adanya korelasi yang kuat antara keparahan sudut Cobb dan gangguan vestibular menunjukkan perlunya penyesuaian dalam cara tenaga medis menangani pasien AIS. Terapi konservatif standar seperti pemakaian korset (*bracing*) memang penting untuk mencegah tulang semakin bengkok secara mekanis, tetapi terbukti tidak memperbaiki kemampuan skema proprioseptif sentral di otak (Bayattork et al., 2024).

Kelemahan terapi fisik ini dapat diatasi dengan pendekatan neurorehabilitasi. Uji klinis acak dari Chen et al., (2026) membuktikan bahwa penggunaan terapi neuromodulasi hibrida yakni gabungan stimulasi saraf vestibular perifer (nGVs) dan stimulasi otak (HD-tDCS) mampu secara signifikan memperbaiki kestabilan postur pasien ($p < 0,001$, ukuran efek parsial $\eta^2p = 0,505$). Peningkatan keseimbangan ini seiring dengan meningkatnya aktivitas di bagian otak yang mengatur integrasi sensorik (*right inferior parietal lobule*, $p = 0,032$) serta penguatan koneksi dengan area perencanaan gerak motorik ($p = 0,028$).

Temuan-temuan ini memberikan bukti yang jelas bahwa tatalaksana AIS ke depan tidak bisa hanya berfokus pada tulang dan otot saja. Praktik klinis perlu menyertakan tes skrining vestibular dasar secara rutin (seperti *Fukuda Stepping Test*) dan menggabungkannya dengan terapi yang dapat melatih kembali integrasi sensorik di otak pasien.

Keterbatasan Studi

Tinjauan sistematis ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam menginterpretasikan hasil sintesis. Pertama,

mayoritas literatur yang diinklusi memiliki desain observasional, potong lintang (*cross-sectional*), dan retrospektif yang membatasi kemampuan untuk menarik kesimpulan sebab-akibat secara pasti (Bayattork et al., 2024). Berdasarkan bukti saat ini, masih sulit untuk menentukan secara absolut apakah disfungsi vestibular dan asimetri neuromorfologi merupakan faktor etiologi primer yang memicu deformitas tulang belakang, ataukah sebuah adaptasi sekunder akibat beban biomekanis dan postur tubuh yang asimetris dalam jangka panjang.

Kedua, terdapat heterogenitas metodologi yang sangat tinggi dalam instrumen evaluasi di antara kedelapan studi. Pengukuran parameter neurosensori bervariasi mulai dari pencitraan MRI struktural (Wu et al., 2026), uji neurotologi klinis seperti VNG (Vlădăreanu et al., 2026), stabilometri dan posturografi dinamis (Bayattork et al., 2024), hingga intervensi eksperimental neuromodulasi (Chen et al., 2026; Cyr et al., 2025). Perbedaan metrik luaran yang sangat beragam ini mencegah dilakukannya penggabungan data secara statistik untuk meta-analisis kuantitatif. Oleh karena itu, kekuatan pembuktian tinjauan ini mengandalkan pendekatan sintesis kualitatif.

Ketiga, beberapa studi primer memiliki ukuran sampel yang terbatas atau berfokus pada demografi subkelompok pasien tertentu, seperti dominasi signifikan pasien perempuan atau spesifik pada kurva torakal kanan. Distribusi populasi yang tidak sepenuhnya merata ini dapat membatasi kemampuan generalisasi temuan terhadap seluruh spektrum pasien AIS, terutama pada pasien laki-laki atau individu dengan lengkungan kurva atipikal.

Untuk memecahkan batasan-batasan tersebut, penelitian di masa depan memerlukan desain studi kohort longitudinal berskala besar dengan protokol evaluasi sensorimotor yang seragam. Pemantauan jangka panjang diperlukan untuk memvalidasi urutan waktu (*temporal sequence*) munculnya defisit vestibular ini terhadap progresivitas sudut Cobb, serta untuk menguji kemanjuran terapi neurorehabilitasi dalam memodifikasi perjalanan klinis pasien AIS secara permanen.

Kesimpulan

Tinjauan sistematis ini menyimpulkan

bahwa *Adolescent Idiopathic Scoliosis* (AIS) bukan sekadar deformitas biomekanis pada tulang belakang, melainkan sebuah sindrom neurosensori kompleks yang berakar pada disfungsi vestibular dan kegagalan integrasi multisensorik sentral. Bukti pencitraan dan evaluasi fungsional secara konsisten menunjukkan adanya kelainan asimetri anatomi pada telinga dalam serta hambatan transmisi saraf antar-hemisfer di otak. Kondisi struktural ini memaksa sistem saraf pasien AIS untuk melakukan kompensasi pembobotan sensorik secara berlebihan (hiper-responsif) demi menjaga keseimbangan postur. Meskipun strategi kompensasi tingkat tinggi ini berhasil menutupi defisit keseimbangan pada aktivitas harian yang stabil, batas stabilitas pasien terbukti runtuh ketika beban sensorik dimanipulasi. Kegagalan kompensasi postural ini berkorelasi langsung dengan tingkat keparahan sudut Cobb.

Temuan ini membawa implikasi krusial bagi pergeseran paradigma tatalaksana AIS di masa depan. Pendekatan ortopedi konservatif yang murni berfokus pada fiksasi mekanika tulang, seperti pemakaian korset, terbukti tidak memperbaiki defisit proprioseptif di otak dan perlu segera diperluas. Skrining neuro-otologi dasar sudah seharusnya diintegrasikan ke dalam evaluasi klinis rutin untuk mengidentifikasi pasien dengan risiko instabilitas tinggi sedini mungkin. Lebih jauh lagi, intervensi neurorehabilitasi baik melalui latihan adaptasi sensorimotor maupun teknologi neuromodulasi vestibular-kortikal menawarkan potensi terapeutik yang sangat menjanjikan. Dengan mengkalibrasi ulang bias integrasi sensorik langsung di sistem saraf pusat, pendekatan neuro-ortopedi ini diharapkan tidak hanya mampu memulihkan fungsi kontrol postural pasien, tetapi juga secara efektif memutus rantai progresivitas deformitas tulang belakang secara permanen.

Referensi

- Bayattork, M., Yaghoubitajani, Z. and Bettany-Saltikov, J., 2024. Do adolescents with different types and degrees of idiopathic scoliosis curves differ in postural control compared to their healthy peers? A cross-sectional study. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 25(1), p.1071. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12891-024-08210-6>
- Chen, H., Zhao, L., Li, Y., Yu, Q., Shen, L., Tong, R.K.Y., Li, S., Chen, C., Wu, H., Xie, D., Zhang, G., Chan, Y.S., Hu, X.Q. and Wang, C., 2026. Peripheral and central vestibular neuromodulation improve postural control in adolescent idiopathic scoliosis: a randomized, sham-controlled, multi-arm intervention study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, Available at: <https://doi.org/10.1186/s12984-026-02056-w>
- Cyr, J.P., Crepin, R., Mercier, P., Blouin, J.S. and Simoneau, M., 2025. Enhanced vestibular-evoked balance responses in adolescents with idiopathic scoliosis. *Journal of Neurophysiology*, 134, pp.856-865. Available at: <https://doi.org/10.1152/jn.00238.2025>
- Paramento, M., Passarotto, E., Maccarone, M.C., Agostini, M., Contessa, P., Rubega, M., Formaggio, E. and Masiero, S., 2024. Neurophysiological, balance and motion evidence in adolescent idiopathic scoliosis: A systematic review. *PLoS ONE*, 19(5), p.e0303086. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303086>
- Vlădăreanu, L., Amaricai, E., Minea, M., Dantes, E., Andronache, I.T. and Iliescu, M.G., 2026. Peripheral vestibular dysfunction and postural control impairments in adolescents with idiopathic scoliosis: A multimodal clinical and instrumental analysis. *Medicina*, 62(6), p.1067. Available at: <https://doi.org/10.3390/medicina62061067>
- Vlădăreanu, L., Iliescu, M.G., Andronache, I.T. and Dantes, E., 2024. Incidence and importance of peripheral vestibular dysfunction in adolescent idiopathic scoliosis. *Children*, 11(6), p.723. Available at: <https://doi.org/10.3390/children11060723>
- Wu, Q., Chen, Z., Chen, K., Li, X., Guo, H., Zhou, X., Liang, J. and Du, Q., 2026. Neuromorphological alterations in the somatosensory system of adolescent

idiopathic scoliosis: A systematic review of magnetic resonance imaging studies. *Children*, 13(4), p.499. Available at: <https://doi.org/10.3390/children13040499>

Yamawaki, R., Oda, Y., Yamane, S., Uotani, K., Misawa, H., Katayama, Y., Hamada, M. and Ozaki, T., 2024. Factors affecting dynamic postural control ability in adolescent idiopathic scoliosis. *Acta Medica Okayama*, 78(5), pp.357-362. Available at: <https://doi.org/10.18926/amo/67655>