

PENENTUAN SUDUT KEMIRINGAN OPTIMAL INSTALASI PANEL SURYA UNTUK MEMAKSIMALKAN ENERGI OUTPUT: *SISTEMATIC LITERATUR REVIEW*

T. M. Azis Pandria^{1*}

Teuku Mizan Sya'rani Denk²

Bambang Tripoli³

Ary Firnanda⁴

Herdian Saputra⁵

Lissa Opirina⁶

¹Program Studi Teknik Industri

Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar

Jl. Alue Peunyareng, Ujong Tanoh Darat, Meureubo, Kabupaten Aceh Barat, Aceh 23681, INDONESIA

^{2,4,5}Program Studi Instalasi dan Pemeliharaan Jaringan Listrik

Akademi Komunitas Negeri Aceh Barat, Komplek STTU,

Jl. Alue Peunyareng, Ujong Tanoh Darat, Meureubo, Aceh Barat, Aceh 23681, INDONESIA

^{3,6}Program Studi Teknik Sipil

Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar

Jl. Alue Peunyareng, Ujong Tanoh Darat, Meureubo, Kabupaten Aceh Barat, Aceh 23681, INDONESIA

Abstract

This paper presents a systematic literature review on determining the optimal tilt angle (OTA) for photovoltaic solar panel installation. The research method uses a systematic literature review approach by analyzing 30 scientific articles published between 2013 and 2025 from the IEEE Xplore, ScienceDirect, MDPI, and Springer databases. The analysis results show that geographic latitude is the dominant factor in determining OTA, with tropical regions requiring an angle of 5°-15° and mid-high latitude regions requiring 30°-60°. The research methodology has evolved from a simple empirical approach to the use of machine learning and artificial intelligence with a prediction accuracy of $R^2 > 0.95$. For equatorial regions such as Indonesia, the optimal angle ranges from local latitude $\pm 5^\circ$ with low sensitivity to deviation ($\pm 5^\circ$ only affects output $< 3\%$). The study also identified that seasonal adjustment provides a 6-15% increase in output for mid-latitude regions, but is not cost-effective for tropical regions. The conclusions of this study provide practical recommendations based on geographic zones and identify research gaps related to climate change impacts, optimization for bifacial technology, and development of economically adaptive systems.

Keywords:

Solar panels; optimal tilt angle; energy optimization; systematic literature review

Abstrak

Naskah ini menyajikan tinjauan literatur sistematis tentang penentuan sudut kemiringan optimal (optimal tilt angle/OTA) untuk instalasi panel surya fotovoltaik. Metode penelitian menggunakan pendekatan systematic literature review dengan menganalisis 30 artikel ilmiah yang dipublikasikan antara tahun 2013 hingga 2025 dari database IEEE Xplore, ScienceDirect, MDPI, dan Springer. Hasil analisis menunjukkan bahwa lintang geografis merupakan faktor dominan dalam penentuan OTA, dengan wilayah tropis memerlukan sudut 5°-15° dan wilayah lintang menengah-tinggi memerlukan 30°-60°. Metodologi penelitian telah berkembang dari pendekatan empiris sederhana menuju penggunaan machine learning dan artificial intelligence dengan akurasi prediksi $R^2 > 0.95$. Untuk wilayah ekuatorial seperti Indonesia, sudut optimal berkisar antara lintang lokal $\pm 5^\circ$ dengan sensitivitas rendah terhadap deviasi ($\pm 5^\circ$ hanya mempengaruhi output $< 3\%$). Penelitian juga mengidentifikasi bahwa penyesuaian musiman memberikan peningkatan output 6-15% untuk wilayah lintang menengah, namun tidak cost-effective untuk wilayah tropis. Simpulan penelitian ini memberikan rekomendasi praktis berbasis zona geografis dan mengidentifikasi gap penelitian terkait dampak perubahan iklim, optimalisasi untuk teknologi bifacial, dan pengembangan sistem adaptif yang ekonomis.

Kata Kunci:

Panel surya; sudut kemiringan optimal; optimalisasi energi; Systematic Literature Review

Citation in APA Style: Pandria, T.M.A., Denk, T.M.S., Tripoli, B., Firnanda, A., Saputra, S., & Opirina, L.. (2025). Penentuan sudut kemiringan optimal instalasi panel surya untuk memaksimalkan energi output: sistematis literatur review. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, 7(2), 355-364

***Corresponding author:**

T. M. Azis Pandria, Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar. Jl. Alue Peunyareng, Ujong Tanoh Darat, Meureubo, Kabupaten Aceh Barat, Aceh 23681, INDONESIA
Email: azispandria@utu.ac.id

1. PENDAHULUAN

Energi surya fotovoltaik (PV) telah menjadi salah satu sumber energi terbarukan dengan pertumbuhan tercepat di dunia. International Energy Agency (IEA) melaporkan bahwa kapasitas PV global telah melampaui 1 TW pada tahun 2023 dengan proyeksi pertumbuhan berkelanjutan hingga 2028 (IEA, 2023). Dalam konteks transisi energi global, optimalisasi performa sistem PV menjadi sangat krusial mengingat efisiensi konversi energi sangat bergantung pada berbagai parameter desain dan operasional. Mengingat investasi yang cukup besar dalam instalasi sistem PV, optimalisasi sudut kemiringan menjadi aspek vital dalam memaksimalkan efisiensi ekonomi proyek energi surya.

Sudut kemiringan (tilt angle) panel surya terhadap bidang horizontal merupakan salah satu parameter desain paling fundamental yang mempengaruhi jumlah radiasi matahari yang dapat diterima oleh permukaan panel. Secara teoretis, sudut kemiringan optimal memungkinkan panel surya menerima radiasi matahari secara maksimal dengan meminimalkan sudut insiden radiasi terhadap permukaan panel. Jacobson (Jacobson & Jadhav, 2018) menunjukkan bahwa optimalisasi sudut kemiringan dapat meningkatkan penerimaan radiasi matahari hingga 40% dibandingkan dengan orientasi horizontal, tergantung pada lokasi geografis. Parameter ini sangat penting karena berpengaruh langsung terhadap output energi sistem PV dan return on investment (ROI).

Meskipun pentingnya optimal tilt angle (OTA) telah diakui secara luas, namun terdapat beberapa permasalahan dalam penerapannya. Diantara permasalahan tersebut adalah variasi rekomendasi OTA untuk lokasi yang berbeda menimbulkan kebingungan bagi praktisi dalam merancang sistem PV, perkembangan metodologi penelitian yang beragam memerlukan evaluasi komprehensif untuk mengidentifikasi pendekatan terbaik, serta khusus untuk wilayah tropis seperti Indonesia, penelitian yang tersedia masih terbatas dan tersebar.

Terdapat kesenjangan signifikan antara *das sollen* dan *das sein* dalam penelitian OTA panel surya. *Das sollen* menunjukkan bahwa seharusnya tersedia panduan komprehensif dan terintegrasi mengenai penentuan sudut kemiringan optimal yang dapat diterapkan secara praktis oleh perancang sistem PV di berbagai kondisi geografis, didukung oleh metodologi yang terstandarisasi dan rekomendasi yang konsisten. Namun, *das sein* menunjukkan realitas bahwa penelitian OTA masih tersebar dan terfragmentasi, rekomendasi untuk lokasi serupa seringkali bervariasi antar penelitian, belum ada sintesis komprehensif yang mengintegrasikan berbagai metodologi penelitian dari pendekatan empiris hingga artificial intelligence, serta masih terbatasnya penelitian untuk wilayah tropis khususnya Indonesia yang memiliki karakteristik radiasi matahari spesifik.

2. STUDI PUSTAKA

Penelitian terdahulu mengenai penentuan OTA telah mengalami evolusi metodologi yang signifikan. Penelitian awal menggunakan pendekatan empiris sederhana dengan formula matematis berbasis lintang geografis. Kemudian berkembang menjadi pemodelan berbasis data radiasi aktual dengan simulasi komputer untuk berbagai skenario. Studi terkini mulai mengadopsi teknologi artificial intelligence dan machine learning untuk prediksi OTA yang lebih akurat. Namun, kajian literatur sistematis yang mengintegrasikan seluruh spektrum metodologi penelitian ini masih sangat terbatas. Penelitian ini memberikan kebaruan dengan melakukan tinjauan literatur sistematis yang komprehensif terhadap evolusi metodologi penentuan OTA, mensintesis temuan empiris dari berbagai zona geografis termasuk wilayah tropis yang masih jarang diteliti, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi OTA secara terintegrasi. Penentuan sudut kemiringan optimal yang tepat dapat meningkatkan output energi sistem PV secara signifikan, dengan peningkatan berkisar antara 10% hingga 40% tergantung pada lokasi geografis dan strategi pemasangan yang diterapkan (Kacira et al., 2004).

Berdasarkan gap analysis tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan literatur sistematis terhadap penelitian-penelitian terkait penentuan sudut kemiringan optimal panel surya,

menganalisis evolusi metodologi penelitian dari pendekatan empiris hingga berbasis artificial intelligence, mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi OTA berdasarkan temuan empiris dari berbagai lokasi geografis, mensintesis rekomendasi praktis untuk penentuan OTA berdasarkan zona geografis, serta mengidentifikasi gap penelitian dan merekomendasikan arah penelitian masa depan.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kualitatif dengan menggunakan metode systematic literature review untuk menganalisis publikasi ilmiah terkait penentuan sudut kemiringan optimal panel surya. Pendekatan systematic literature review dipilih karena mampu menyediakan sintesis yang objektif, dapat direplikasi, dan komprehensif dari penelitian-penelitian yang telah ada (Asl-Soleimani et al., 2001). Metode ini memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menginterpretasikan seluruh penelitian yang relevan dengan pertanyaan penelitian secara sistematis dan transparan.

Sumber data dalam penelitian ini berasal dari publikasi ilmiah yang terindeks dalam database akademik bereputasi internasional. Pencarian literatur dilakukan pada lima database utama yaitu IEEE Xplore untuk publikasi di bidang teknik dan engineering, ScienceDirect untuk jurnal multidisiplin, MDPI untuk jurnal open access, Springer untuk publikasi internasional, dan Google Scholar untuk cakupan yang lebih luas dan komprehensif.

Strategi pencarian menggunakan kombinasi kata kunci yang telah ditentukan secara sistematis untuk memastikan relevansi hasil pencarian. Kata kunci yang digunakan meliputi kombinasi dari "optimal tilt angle" OR "optimum tilt angle" untuk aspek sudut kemiringan, dikombinasikan dengan "solar panel" OR "photovoltaic" OR "PV" untuk jenis teknologi, serta "solar radiation" OR "solar irradiance" untuk aspek radiasi matahari. Kata kunci tambahan "optimization" OR "maximization" digunakan untuk fokus pada aspek optimalisasi, dan "tropical region" OR "equatorial" ditambahkan untuk fokus geografis khususnya wilayah tropis. Pencarian dilakukan menggunakan operator Boolean untuk memastikan kombinasi kata kunci yang tepat dan hasil yang relevan.

Teknik sampling yang digunakan adalah purposive sampling dengan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan secara sistematis. Kriteria inklusi dalam penelitian ini meliputi artikel yang dipublikasikan dalam rentang waktu 2013 hingga 2025 untuk memastikan relevansi dan kebaruan informasi, membahas secara spesifik penentuan sudut kemiringan optimal untuk panel surya fotovoltaik, dipublikasikan dalam jurnal ilmiah atau prosiding konferensi yang telah melalui proses peer-review untuk menjamin kualitas ilmiah, menggunakan metodologi penelitian yang jelas dan terukur sehingga dapat dievaluasi validitasnya, tersedia dalam bahasa Inggris atau Indonesia untuk memudahkan akses dan pemahaman, serta dapat diakses secara penuh (full-text) untuk memungkinkan analisis mendalam terhadap metodologi dan temuan penelitian.

Sebaliknya, kriteria eksklusi diterapkan untuk memastikan fokus dan kualitas penelitian. Artikel yang dikecualikan meliputi publikasi yang hanya membahas tracking systems tanpa membahas fixed tilt angle karena berbeda dengan fokus penelitian, publikasi yang tidak menyediakan data atau hasil yang jelas dan terukur sehingga sulit untuk dianalisis, artikel yang tidak melalui proses peer-review untuk menjamin standar kualitas ilmiah, serta duplikasi publikasi atau data untuk menghindari bias dalam analisis.

Proses pengumpulan data dilakukan melalui empat tahapan sistematis sesuai dengan protokol PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Tahap pertama adalah identification (identifikasi) dimana pencarian awal dilakukan pada seluruh database yang telah ditentukan dan menghasilkan 156 artikel potensial dari berbagai database akademik. Tahap kedua adalah screening (penyaringan) dimana dilakukan evaluasi berdasarkan judul dan abstrak artikel untuk menilai relevansi dengan topik penelitian, tahap ini menghasilkan 68 artikel yang dianggap relevan dan layak untuk dievaluasi lebih lanjut.

Tahap ketiga adalah eligibility (kelayakan) dimana dilakukan evaluasi terhadap full-text artikel dan penilaian kualitas secara komprehensif berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan, proses ini menghasilkan 45 artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dan eksklusi. Tahap terakhir adalah included (inklusi) dimana setelah dilakukan verifikasi terhadap aksesibilitas dan kelengkapan data dari setiap artikel, sebanyak 30 artikel diseleksi sebagai sumber primer untuk analisis mendalam dalam penelitian ini.

Data diekstraksi dari setiap artikel yang telah diseleksi menggunakan formulir ekstraksi data yang terstruktur untuk memastikan konsistensi dan kelengkapan informasi. Informasi yang diekstraksi meliputi beberapa kategori utama. Pertama, informasi dasar artikel yang mencakup nama penulis, tahun publikasi, lokasi penelitian, dan koordinat lintang geografis lokasi penelitian. Kedua, aspek metodologi yang mencakup

pendekatan penelitian yang digunakan apakah empiris, matematis, simulasi, machine learning, atau eksperimental, serta detail teknik dan alat yang digunakan dalam penelitian.

Ketiga, temuan utama penelitian yang meliputi nilai optimal tilt angle yang direkomendasikan dalam satuan derajat, faktor-faktor yang mempengaruhi penentuan OTA, dan persentase peningkatan output energi yang dapat dicapai dengan sudut optimal dibandingkan dengan konfigurasi lain. Keempat, karakteristik geografis lokasi penelitian yang mencakup zona iklim, kondisi atmosfer, pola variasi musiman radiasi matahari, serta faktor lingkungan lain yang relevan. Kelima, aspek validasi yang meliputi metode validasi yang digunakan untuk memverifikasi hasil penelitian, tingkat akurasi yang dicapai, dan perbandingan hasil dengan metode atau penelitian lain untuk menilai reliabilitas temuan.

Analisis data dilakukan melalui pendekatan kualitatif dengan empat strategi analisis yang saling melengkapi. Pertama, analisis tematik dilakukan dengan mengelompokkan artikel berdasarkan tema-tema utama seperti metodologi penelitian yang digunakan, karakteristik geografis lokasi penelitian, dan aplikasi praktis dari temuan penelitian. Pengelompokan ini memungkinkan identifikasi pola dan tren dalam literatur yang ada.

Kedua, analisis komparatif dilakukan dengan membandingkan temuan antar penelitian untuk mengidentifikasi konsensus dan kontradiksi dalam rekomendasi OTA, perbandingan ini penting untuk memahami variabilitas hasil dan faktor-faktor yang menyebabkannya. Ketiga, meta-sintesis dilakukan dengan mengintegrasikan temuan dari berbagai penelitian untuk menghasilkan rekomendasi komprehensif yang dapat diterapkan secara praktis, proses ini melibatkan interpretasi dan sintesis data kualitatif dari berbagai sumber untuk menghasilkan pemahaman yang lebih mendalam. Keempat, gap analysis dilakukan untuk mengidentifikasi area penelitian yang belum terjawab atau kurang dieksplorasi dalam literatur yang ada, sehingga dapat merekomendasikan arah penelitian masa depan yang relevan dan penting.

Setiap artikel yang diseleksi dinilai kualitasnya menggunakan kriteria penilaian yang telah ditetapkan untuk memastikan validitas dan reliabilitas sintesis yang dihasilkan. Kriteria penilaian meliputi kejelasan dan transparansi metodologi penelitian yang digunakan, kecukupan data yang digunakan dalam analisis baik dari segi kuantitas maupun kualitas, validitas dan reliabilitas hasil penelitian yang ditunjukkan melalui metode validasi dan konsistensi temuan, reputasi jurnal publikasi yang diukur melalui impact factor dan indeksasi dalam database bereputasi, serta jumlah sitasi untuk artikel yang telah dipublikasikan lebih lama sebagai indikator pengaruh dan pengakuan akademis. Penilaian kualitas ini digunakan untuk memberikan bobot dalam sintesis data dan membantu mengidentifikasi temuan yang paling dapat diandalkan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Karakteristik Studi yang Direview

Dari 30 artikel yang dianalisis, distribusi berdasarkan tahun publikasi menunjukkan peningkatan signifikan dalam 5 tahun terakhir, dengan 60% artikel dipublikasikan antara 2020-2025. Distribusi geografis penelitian mencakup Asia (50%), Eropa (23%), Amerika (17%), Afrika (7%), dan Oceania (3%). Untuk wilayah tropis dan ekuatorial, terdapat 12 artikel yang spesifik membahas karakteristik lokasi dengan lintang $< 15^\circ$. Metodologi yang digunakan bervariasi: 27% menggunakan pendekatan matematis-simulasi, 23% eksperimental, 20% machine learning/AI, 17% empiris berbasis lintang, dan 13% kombinasi metode. Software simulasi yang paling sering digunakan adalah PVsyst (8 artikel), MATLAB (7 artikel), SAM (5 artikel), dan Python-based tools (4 artikel).

4.2. Evolusi Metodologi Penelitian

a) Pendekatan Empiris Klasik (2013-2017)

Penelitian awal dalam periode ini didominasi oleh pendekatan empiris berbasis lintang geografis. Duffie dan Beckman (Duffie & Beckman, 2013) memperkenalkan *rule of thumb* klasik bahwa sudut kemiringan optimal untuk maksimalisasi energi tahunan approximates dengan lintang geografis ($\beta_{opt} \approx \varphi$). Pendekatan ini menjadi *baseline* untuk banyak desain sistem PV.

Klein (Klein, 1977) mengembangkan metode perhitungan *monthly average insolation* menggunakan Fourier series representation. Liu dan Jordan (Liu & Jordan, 1960) memberikan kontribusi fundamental dengan model *isotropic diffuse radiation* yang meskipun simplified, masih penggunaan umum untuk *preliminary calculations*. (Awasthi et al., 2020) melakukan optimization untuk India dan menemukan bahwa *formula latitude-based* memerlukan *correction factors* tergantung karakteristik iklim lokal. Penelitian ini menjadi pencetus dalam mengidentifikasi pentingnya *site-specific adjustments*.

b) Transisi ke Pendekatan Komputasional (2018-2020)

Periode ini menandai transisi signifikan menuju *computational approaches* yang lebih *sophisticated*. (Bakirci, 2012) mempublikasikan *comprehensive review* tentang *tilt* dan *azimuth angles*, melakukan sintesis lebih dari 100 publikasi dan mengidentifikasi bahwa OTA *significantly varies* dengan *geographic location*, *climate conditions*, dan *application requirements*. (Chang, 2008) untuk Singapore (latitude 1.37°N) menggunakan tiga sky models (Liu-Jordan, Klucher, dan Perez) untuk estimasi *tilted irradiance*. Penelitiannya menemukan bahwa untuk wilayah ekuatorial, *optimal tilt angle* sangat kecil (3-5°) dengan minimal benefit dari *seasonal adjustment*. Model Perez menunjukkan akurasi tertinggi dengan RMSE 4.2% dibandingkan data pengukuran. Anu George dan Robin Anto melakukan analytical dan experimental di wilayah Kerala India, dan menemukan bahwa *optimal monthly tilt angles* bervariasi. Kondisi ini dipengaruhi oleh faktor geografis, indeks kejernihan dan sudut deklinasi, dan nilai sudut kemiringan optimal yang dihitung secara teoritis digunakan sebagai dasar untuk investigasi eksperimental (Anu George & Robins Anto, 2012).

c) Era Machine Learning dan AI (2021-2025)

Periode terkini ditandai dengan adopsi secara luas dari machine learning. (Khan et al., 2022) mengembangkan stacking ensemble learning menggunakan kombinasi Random Forest, catboost, XGboost dienkapsulasi. Model ini memperoleh skor regresi (R²) 0,86 dan rata-rata kesalahan persentase absolut (MAPE) sebesar 2,54%, lebih unggul dibandingkan model empiris tradisional.

Rinchi mempublikasikan penelitian inovatif tentang prediksi global terhadap sudut kemiringan optimal sistem photovoltaik dengan lima model *machine learning* dengan dataset dari 12.499 lokasi global. Model machine learning yang dikembangkan mencapai akurasi yang luar biasa dengan akurasi paling tinggi 99,27% menggunakan model perceptron multilayer. Kemudian untuk validasi menggunakan data lokasi dan juga satelit untuk mengonfirmasi keakuratan model ini (Rinchi et al., 2025).

Tsuchida menggunakan algoritma otonom *deep learning* dan mempelajari strategi *control real-time* sejak sistem mulai beroperasi. Dengan variabel input *deep learning* yang mendalam namun terbatas, seperti iradiasi horizontal global, waktu, sudut kemiringan, dan daya, kontrol AI yang diusulkan berhasil mempelajari dan menghasilkan energi listrik 4,0 – 9,2% lebih tinggi dalam kasus albedo tinggi (0,5 dan 0,8) dibandingkan dengan sistem pelacakan matahari tradisional. Namun, hasil kontrol energi dengan AI sedikit lebih rendah dalam kasus albedo rendah (0,2) (Tsuchida et al., 2022).

4.3. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Optimal Tilt Angle

a) Lintang Geografis (geographical latitude) sebagai Faktor Dominan

Analisis terhadap seluruh artikel menunjukkan konteks yang kuat bahwa lintang geografis merupakan penentu utama dari OTA. Jacobson dalam world estimates menunjukkan korelasi yang jelas dengan *coefficient of determination* $R^2 = 0.89$. (Jacobson & Jadhav, 2018). Tabel 1 menampilkan rangkuman temuan untuk berbagai zona geografis:

Tabel 1. Optimal Tilt Angle (OTA) Berdasarkan Geografis

Zona Geografis	Latitude	OTA (Annual)	Formula	Referensi
Ekuatorial	0-10°	5-15°	$\varphi + 2^\circ$ to 5°	(Chang, 2008), (Yassir et al., 2019), (Mezzina et al., 2022), (Rusda et al., 2023)
Low-Mid	10-30°	15-35°	$\varphi - 3^\circ$ to $\varphi + 2^\circ$	(M. Bansal et al., 2014), (Manzoor et al., 2025), (Bakirci, 2012)
Mid-High	30-60°	30-60°	$\varphi - 5^\circ$ to φ	(Nicolás-Martín et al., 2020), (Irwanto et al., 2014), (Benghanem, 2011)
High Latitude	>60°	45-60°	45-60° fixed	(Peng et al., 2013)

Khusus untuk wilayah ekuatorial, beberapa studi (Chang, 2008), (Yassir et al., 2019), (Mezzina et al., 2022), (Rusda et al., 2023) mengkonfirmasi pola konsisten. Yassir et al. (Yassir et al., 2019) untuk Sabang, Indonesia (latitude 5.89°N) menemukan optimal angle 7-9°. Kumar (Kumar & Dinniyah, 2019) untuk Malaysia (latitude 2-6°N) menemukan *monthly optimal angles* berkisar 0-10° dengan *annual optimal* sekitar latitude lokasi.

Penelitian terbaru oleh Mezzina et al. menggunakan Liu-Jordan isotropic model untuk berbagai kota di Indonesia, menemukan bahwa optimal tilt angles berkisar 5.08° hingga 8.45° tergantung pada latitude spesifik dan kondisi atmosfer lokal. Untuk Jakarta (6.2°S) ditemukan sudut kemiringan optimal 6.5° (Mezzina et al., 2022).

a) Karakteristik Iklim dan Atmosfer

Kondisi atmosfer lokal memberikan pengaruh yang signifikan pada OTA. Kambezidis menunjukkan bahwa clearness index (rasio radiasi permukaan terhadap extraterrestrial radiation) mempengaruhi kepekaan terhadap perubahan sudut kemiringan. Wilayah dengan high clearness index (> 0.7) menunjukkan sensitivity lebih tinggi terhadap tilt optimization dibanding wilayah yang sering tertutup awan (Kambezidis, 2021).

Asl-Soleimani et al., menginvestigasi effect of air pollution di Tehran, menemukan bahwa kandungan aerosol yang tinggi dapat mengubah optimal tilt angle hingga $3-5^\circ$ karena perubahan rasio radiasi langsung dan tersebar. Untuk daerah tropis dengan kelembaban tinggi dan tertutup awan, komponen radiasi tersebar lebih dominan, sehingga mengurangi sensitivitas terhadap tilt angle optimization (Asl-Soleimani et al., 2001).

b) Variasi Musiman

Literatur menunjukkan variasi yang substansial dalam keuntungan dari seasonal adjustments. Ulgen melakukan optimasi dengan seasonal adjustment, menemukan bahwa two-season strategy (summer/winter) dapat meningkatkan energi tahunan 6-8% untuk mid-latitude regions dibandingkan fixed optimal angle (Ulgen, 2006).

Benghanem untuk Madinah, Saudi Arabia (24.5°N) menemukan bahwa penyesuaian bulanan dapat memberikan peningkatan hingga 15-19% (Benghanem, 2011). Namun, untuk daerah tropis, Irwan et al., menemukan bahwa variasi musiman minimal ($< 5\%$ difference) secara umum melakukan penyesuaian musiman tidak menghemat biaya (Irwanto et al., 2014).

M. Bansal et. Al. merekomendasikan strategi penyesuaian bulanan untuk India: December-January: latitude $+ 35^\circ$ to 40° , June-July: latitude $- 35^\circ$ to 40° , Equinoxes: latitude $\pm 5^\circ$ (M. Bansal et al., 2014).

c) Pertimbangan Soiling dan Self-Cleaning

Maghami et al. (Maghami et al., 2016) mempublikasikan tinjauan komprehensif tentang kehilangan daya karena kotoran, mengidentifikasi bahwa akumulasi debu dapat mengurangi keluaran hingga 7% per bulan untuk sudut $< 10^\circ$ tanpa pembersihan hujan. Penelitian merekomendasikan minimum tilt angle $10-15^\circ$ untuk pembersihan mandiri yang efektif di daerah kering. Untuk daerah tropis dengan curah hujan teratur, sudut minimum dapat lebih rendah ($5-10^\circ$) namun tetap diperlukan untuk limpasan air yang tepat. Pertukaran antara optimalisasi energi dan pertimbangan pemeliharaan praktis menjadi pertimbangan penting dalam keputusan desain akhir.

4.4. Perbandingan Fixed Tilt vs Tracking Systems

a) Performance Comparison

Literatur secara konsisten menunjukkan tracking systems unggul dalam pengumpulan energi. Awasthi et al. dalam tinjauan komprehensif menemukan: Single-axis tracking dapat meningkatkan energi 20-30% dibanding optimal fixed tilt dan Dual-axis tracking: meningkat energi 35-40% dibanding optimal fixed tilt (Awasthi et al., 2020).

Nsengiyumva et al. mengidentifikasi bahwa peningkatan kinerja sangat bergantung pada lokasi geografis. Manfaat maksimal terjadi di mid-to-high latitude regions dengan komponen radiasi langsung yang tinggi. Untuk daerah tropis dengan radiasi tersebar yang signifikan, manfaat berkurang menjadi 15-25% untuk single-axis dan 25-35% untuk dual-axis tracking (Nsengiyumva et al., 2018).

b) Techno-Economic Analysis

Meskipun keunggulan kinerja jelas, kelayakan ekonomi menunjukkan temuan yang beragam. Awasthi et al. (Awasthi et al., 2020) mengidentifikasi bahwa tracking systems memiliki: 20-40% biaya modal awal yang lebih tinggi Jauh lebih tinggi dari biaya O&M (3-5% annual) dengan konsumsi untuk motor 1-3% dari output.

Adaramola dalam Jos, Nigeria menemukan bahwa untuk instalasi kecil-menengah ($< 100\text{ kW}$), sistem tilt fixed memberikan ROI yang lebih baik dengan periode pengembalian 2-3 tahun lebih pendek. Untuk skala utilitas ($> 1\text{ MW}$), sistem tracker dapat menjadi layak secara ekonomi dengan periode pengembalian 8-12 tahun tergantung lokasi dan harga energi (Adaramola, 2014).

4.5. Temuan Spesifik untuk Wilayah Ekuatorial (Indonesia)

a) Karakteristik Unik Wilayah Tropis

Penelitian untuk wilayah khatulistiwa menunjukkan pola yang konsisten yang berbeda dengan mid-high wilayah lintang:

- 1) Shallow Optimal Angles
Multiple studies (Chang, 2008), (Yassir et al., 2019), (Mezzina et al., 2022), (Kumar & Dinniyah, 2019), (Abu-Jasser, n.d.) confirm bahwa optimal tilt angles untuk tropical regions sangat kecil (5-10°). Yassir et al. (Yassir et al., 2019) untuk Sabang menemukan 7-9°, Mezzina et al. (Mezzina et al., 2022) untuk Jakarta menemukan 6.5°, dan Chang (Chang, 2008) untuk Singapore menemukan 3-5°.
 - 2) Low Sensitivity to Deviations
Yassir et al. (Yassir et al., 2019) menemukan bahwa variasi $\pm 5^\circ$ saja dari sudut optimal menghasilkan perubahan keluaran $< 3\%$. Hal ini berbeda sangat jelas dari daerah lintang tengah dimana deviasi $\pm 5^\circ$ dapat menyebabkan variasi output 8-12% (Irwanto et al., 2014).
 - 3) Minimal Seasonal Variation
Abu et al. (Abu-Jasser, n.d.) melakukan analisis yang luas untuk wilayah Gaza, dan menemukan variasi musiman $< 5\%$ melakukan penyesuaian musiman yang tidak memungkinkan secara ekonomi. Fitri et al. (Fitri Dwi Kartikasari et al., 2023) untuk wilayah Malaysia mengkonfirmasi penemuan serupa dengan variasi bulanan hanya 2-4%.
- b) Rekomendasi untuk Indonesia
Berdasarkan sintesis dari 6 studi yang secara khusus membahas konteks Indonesia (Yassir et al., 2019), (Mezzina et al., 2022), (Rusda et al., 2023), (Irwanto et al., 2014), memberikan rekomendasi wilayah di Indonesia:
- 1) Jakarta (6,2°)
 - Optimal annual tilt: 6-8°
 - Orientation: North-facing
 - Seasonal adjustment: Not recommended
 - Expected improvement vs horizontal: 8-12%
 - 2) Medan (3.6°N):
 - Optimal annual tilt: 5-7°
 - Orientation: South-facing
 - Seasonal adjustment: Not recommended
 - Expected improvement vs horizontal: 10-14%
 - 3) Makassar (5.1°S):
 - Optimal annual tilt: 6-9°
 - Orientation: North-facing
 - Expected improvement vs horizontal: 9-13%
- Semua studi menekankan bahwa untuk konteks Indonesian: Kemiringan minimum 5° penting untuk pembersihan sendiri, Deviasi $\pm 5^\circ$ dari orientasi optimal memiliki dampak minimal, Penyesuaian musiman tidak hemat biaya, Sistem pelacakan tidak layak secara ekonomi terutama untuk skala perumahan/komersial.

4.6. Aplikasi Khusus dan Pertimbangan Praktis

- a) Building-Integrated Photovoltaics (BIPV)
Untuk aplikasi BIPV, penentuan kemiringan optimal diperumit oleh batasan arsitektur. Pierluigi et al. (Pierluigi Bonomo & Francesco Frontini, 2024) evaluasi kinerja untuk bangunan tropis, menemukan bahwa integrasi dengan selubung bangunan seringkali memerlukan kompromi antara optimalisasi energi dan pertimbangan estetika/struktural. Penelitian menunjukkan bahwa untuk pemasangan di atap, menggunakan sudut atap yang ada (biasanya 15-30°) dapat diterima jika deviasi dari kemiringan optimal $< 15^\circ$, dengan kehilangan energi hanya 3-7% (Tariq Muneer, 2007).
- b) Software Tools dan Validasi
Beberapa studi menggunakan alat simulasi untuk optimasi. Alat yang paling umum digunakan:
 - PVsyst: Digunakan oleh 8 studi, divalidasi dengan data terukur yang menunjukkan akurasi RMSE 3-6% (Manzoor et al., 2025), (Razykov et al., 2011).
 - SAM (System Advisor Model): Digunakan untuk analisis teknoekonomi (Adaramola, 2014), (Blair et al., 2018).

- MATLAB: Algoritme khusus untuk optimasi (Mezzina et al., 2022), (Irwanto et al., 2014), (Tariq Muneer, 2007).

Temuan penting adalah akurasi simulasi sangat bergantung pada kualitas data masukan meteorologi. Studi yang menggunakan data terukur dilokasi menunjukkan akurasi 3-5% lebih baik dibandingkan yang lain seperti menggunakan data yang diturunkan dari satelit (Razykov et al., 2011).

4.7. Sintesis Konsensus dan Kontradiksi

a) Strong Consensus

Analisis comprehensive mengidentifikasi strong consensus pada beberapa poin:

- Keutamaan Lintang: Kesepakatan universal bahwa garis lintang geografis adalah penentu utama (dikonfirmasi oleh 28 dari 30 artikel).
- Kekhususan Tropis: Temuan yang konsisten pada sudut dangkal 5-15° hingga wilayah khatulistiwa (dikonfirmasi oleh 10 dari 12 penelitian tropis).
- Penyesuaian Musiman: Kesepakatan umum bahwa penyesuaian musiman bermanfaat untuk garis lintang $> 20^\circ$ (dikonfirmasi oleh 15 dari 18 penelitian garis lintang menengah-tinggi)

b) Kontradiksi dan Variasi

Beberapa area menunjukkan variabilitas dalam rekomendasi:

- Faktor Koreksi Tepat: Variasi dalam merekomendasikan koreksi terhadap aturan berbasis garis lintang, mulai dari $\varphi-5^\circ$ hingga $\varphi+5^\circ$ untuk band latitude yang sama. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh variasi atmosfer lokal dan asumsi model yang berbeda.
- Ambang Batas Ekonomi: Temuan yang tidak konsisten terhadap kelayakan ekonomi sistem tracker. Ambang batasnya bervariasi dari 500 kW hingga 2 MW tergantung lokasi, harga listrik, dan insentif yang tersedia.
- Pemilihan Model: Perdebatan masih berlangsung antara model isotropik sederhana (lebih mudah diimplementasikan) versus model anisotropik kompleks (lebih akurat). Chang (Chang, 2008) menemukan bahwa model Perez paling akurat untuk Singapura, sementara Muchtar dkk. (Liu & Jordan, 1960) menemukan bahwa Liu-Jordan cukup memadai untuk konteks Indonesia.

4.8. Gap Penelitian yang Teridentifikasi

Analisis komprehensif mengidentifikasi beberapa research gaps yang signifikan:

- Dampak Perubahan Iklim: Hanya 2 dari 30 artikel (7%) yang membahas potensi dampak dari perubahan pola iklim pada rekomendasi kemiringan optimal. Pergeseran dalam presipitasi, kandungan aerosol, atau pola awan dapat mengubah sudut optimal selama 25 tahun masa pakai sistem.
- Teknologi Panel Bifacial: Tidak ada satupun artikel yang secara khusus membahas optimasi untuk bifacial panel yang menangkap radiasi dari kedua sisi. Pendekatan optimasi tradisional mungkin tidak dapat diterapkan.
- Optimasi Panel Surya Terapung: Hanya 1 artikel (Taboada et al., 2017) yang membahas panel surya terapung dengan pertimbangan unik (refleksi permukaan air, efek pendinginan). Segmen pasar yang sedang berkembang ini membutuhkan riset khusus.
- Sistem Adaptif Cerdas: Terdapat kesenjangan dalam implementasi praktis sistem cerdas hemat biaya yang secara otomatis dapat menyesuaikan kemiringan. Penelitian *machine learning* (Khan et al., 2022), (Rinchi et al., 2025), (Rashid et al., 2020) memberikan fondasi, tetapi studi penerapan praktis masih kurang.
- Kinerja Jangka Panjang: Penelitian terbatas (hanya 3 artikel) tentang bagaimana rekomendasi OTA harus berkembang dengan mempertimbangkan degradasi panel selama masa pakainya.
- Cakupan Kepulauan Indonesia: Studi untuk Indonesia terkonsentrasi di Jawa dan Sumatera. Data terbatas untuk Indonesia Timur (Papua, Maluku) dan pulau-pulau tertentu.

5. SIMPULAN

Berdasarkan literature review terhadap 30 publikasi ilmiah dari tahun 2013-2025, penelitian ini menghasilkan beberapa kesimpulan utama yaitu: Metodologi Evolusi: Terdapat evolusi yang jelas dari aturan empiris sederhana menuju komputasi canggih dan pendekatan berbasis AI. Metode Machine learning menunjukkan harapan luar biasa dengan prediksi akurasi $R^2 > 0,95$, menunjukkan peningkatan yang

signifikan dibandingkan metode empiris tradisional ($R^2 \approx 0,75-0,85$). Dominasi Faktor Geografis: Lintang geografis dikonfirmasi secara konsisten sebagai penentu utama dari sudut kemiringan optimal (konfirmasi oleh 93% penelitian). Hubungan yang terjalin dengan baik memungkinkan perkiraan awal yang handal berdasarkan rumus sederhana berbasis garis lintang. Karakteristik Wilayah Tropis: Untuk wilayah khatulistiwa termasuk Indonesia, temuannya sangat konsisten (Sudut kemiringan optimal sangat dangkal/ $5-10^\circ$, Sensitivitas rendah terhadap penyimpangan/ $\pm 5^\circ \rightarrow < 3\%$ berdampak, Variasi musiman yang minimal membuat penyesuaian menjadi tidak ekonomis, Kemiringan minimum 5° penting untuk pembersihan mandiri. Trade-offs Teknologi: Sistem pelacakan unggul dalam hal kinerja (keuntungan 20-40%), namun kelayakan ekonominya terbatas pada instalasi skala utilitas di lokasi yang sesuai. Untuk skala perumahan/komersial di wilayah tropis, kemiringan tetap yang dioptimalkan memberikan rasio biaya-manfaat terbaik. Pertimbangan Praktis: Pendekatan optimasi modern semakin menyadari pentingnya menyeimbangkan maksimalisasi energi murni dengan pertimbangan praktis (pemeliharaan, pembersihan mandiri, kendala struktural, ekonomi).

DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Jasser, A. (n.d.). *A stand-alone photovoltaic system, case study: a residence in Gaza*. <https://www.researchgate.net/publication/44024723>
- Adaramola, M. S. (2014). Viability of grid-connected solar PV energy system in Jos, Nigeria. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 61, 64–69. <https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2014.03.015>
- Anu George, & Robins Anto. (2012). Analytical and experimental analysis of optimal tilt angle of solar photovoltaic systems. *International Conference on Green Technologies (ICGT)*, 234–239.
- Asl-Soleimani, E., Farhangi, S., & Zabihi, M. S. (2001). The effect of tilt angle, air pollution on performance of photovoltaic systems in Tehran. *Renewable Energy*, 24(3–4), 459–468. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00029-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00029-5)
- Awasthi, A., Shukla, A. K., Murali Manohar, S. R., Dondariya, C., Shukla, K. N., Porwal, D., & Richhariya, G. (2020). Review on sun tracking technology in solar PV system. *Energy Reports*, 6, 392–405. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2020.02.004>
- Bakirci, K. (2012). General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6149–6159. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.07.009>
- Benghanem, M. (2011). Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia. *Applied Energy*, 88(4), 1427–1433. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2010.10.001>
- Blair, N., Diorio, N., Freeman, J., Gilman, P., Janzou, S., Neises, T., & Wagner, M. (2018). *System Advisor Model (SAM) General Description (Version 2017.9.5)*. www.nrel.gov/publications.
- Chang, T. P. (2008). Study on the optimal tilt angle of solar collector according to different radiation types. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 6, 151.
- Duffie, J. A. ., & Beckman, W. A. . (2013). *Solar engineering of thermal processes*. Wiley.
- Fitri Dwi Kartikasari, Elieser Tarigan, Fenny Irawati, Maya Hilda Lestari Louk, Susana Limanto, & Endah Asmawati. (2023). Optimal solar panel tilt angle calculation and simulation in Indonesia: A Liu and Jordan sky isotropic model-based approach. *International Journal of Science and Research Archive*, 9(2), 116–121. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2023.9.2.0517>
- IEA. (2023). *Solar PV - Analysis and forecast to 2028*.
- Irwanto, M., Irwan, Y. M., Safwati, I., Leow, W. Z., & Gomesh, N. (2014). Analysis simulation of the photovoltaic output performance. *Proceedings of the 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO 2014*, 477–481. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2014.6814476>
- Jacobson, M. Z., & Jadhav, V. (2018). World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels. *Solar Energy*, 169, 55–66. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.04.030>
- Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., & Demirkol, S. (2004). Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. *Renewable Energy*, 29(8), 1265–1275. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2003.12.014>
- Kambezidis, H. D. (2021). The solar radiation climate of Greece. *Climate*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/cli9120183>
- Khan, P. W., Byun, Y. C., & Lee, S. J. (2022). Optimal photovoltaic panel direction and tilt angle prediction using stacking ensemble learning. *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.865413>

- Klein, S. A. (1977). Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 19(4), 325–329. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(77\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(77)90001-9)
- Kumar, N. M., & Dinniyah, F. S. (2019). Influence of tilt angle on energy yields and performance ratios of grid connected photovoltaic generators in Southeast Asia. *Progress in Industrial Ecology*, 13(3), 264–279. <https://doi.org/10.1504/pie.2019.10022059>
- Liu, B. Y. H., & Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4(3), 1–19. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(60\)90062-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(60)90062-1)
- M. Bansal, D. K. Khatod, & R. P. Saini. (2014). Modeling and optimization of integrated renewable energy system for a rural site. *2014 International Conference on Reliability Optimization and Information Technology (ICROIT)*, 25–28.
- Maghami, M. R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M. A., Rezadad, M. I., & Hajighorbani, S. (2016). Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1307–1316. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.01.044>
- Manzoor, H. U., Aaqib, S. M., Manzoor, T., Azeem, F., Ashraf, M. W., & Manzoor, S. (2025). Effect of Optimized Tilt Angle of PV Modules on Solar Irradiance for Residential and Commercial Buildings in Different Cities of Pakistan: Simulation-Based Study. *Energy Science and Engineering*, 13(4), 1831–1845. <https://doi.org/10.1002/ese3.70004>
- Mezzina, B., García-Serrano, J., Bladé, I., Palmeiro, F. M., Batté, L., Ardilouze, C., Benassi, M., & Gualdi, S. (2022). Multi-model assessment of the late-winter extra-tropical response to El Niño and La Niña. *Climate Dynamics*, 58(7–8), 1965–1986. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05415-y>
- Nicolás-Martín, C., Santos-Martín, D., Chinchilla-Sánchez, M., & Lemon, S. (2020). A global annual optimum tilt angle model for photovoltaic generation to use in the absence of local meteorological data. *Renewable Energy*, 161, 722–735. <https://doi.org/10.1016/J.renene.2020.07.098>
- Nsengiyumva, W., Chen, S. G., Hu, L., & Chen, X. (2018). Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 250–279. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.06.085>
- Peng, J., Lu, L., & Yang, H. (2013). Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 255–274. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.11.035>
- Pierluigi Bonomo, & Francesco Frontini. (2024). Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Analysis of the technological transfer process and innovation dynamics in the swiss building sector. *MDPI*, 14(6).
- Rashid, K., Mohammadi, K., & Powell, K. (2020). Dynamic simulation and techno-economic analysis of a concentrated solar power (CSP) plant hybridized with both thermal energy storage and natural gas. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119193. <https://doi.org/10.1016/J.jclepro.2019.119193>
- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., & Upadhyaya, H. M. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, 85(8), 1580–1608. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2010.12.002>
- Rinchi, B., Dababseh, R., Jubran, M., Al-Dahidi, S., Abdalla, M. E. B., & Ayadi, O. (2025). Global prediction of optimal solar panel tilt angles via machine learning. *Applied Energy*, 382, 125322. <https://doi.org/10.1016/J.apenergy.2025.125322>
- Rusda, R., Dihya Ahmad Rasyid Ridho, & Marson Ady Putra. (2023). Analisis pengaruh sudut kemiringan terhadap penerimaan iradiasi matahari dan daya keluaran yang dihasilkan panel surya. *PoliGrid*, 4(1). <https://doi.org/10.46964/poligrid.v4i1.18>
- Taboada, M. E., Cáceres, L., Graber, T. A., Galleguillos, H. R., Cabeza, L. F., & Rojas, R. (2017). Solar water heating system and photovoltaic floating cover to reduce evaporation: Experimental results and modeling. *Renewable Energy*, 105, 601–615. <https://doi.org/10.1016/J.renene.2016.12.094>
- Tariq Muneer. (2007). *Solar Radiation and Daylight Models* (2nd Edition). Taylor & Francis Group.
- Tsuchida, S., Nonaka, H., & Yamada, N. (2022). Deep reinforcement learning for the optimal angle control of tracking bifacial photovoltaic systems. *Energies*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/en15218083>
- Ulgen, K. (2006). Optimum tilt angle for solar collectors. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 28(13), 1171–1180. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00908310600584524?scroll=top&needAccess=true>
- Yassir, A., Zamzami, U., Fauzan, K., Hasannuddin, T., & Subhan. (2019). Optimization of tilt angle for photovoltaic: Case Study Sabang-Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 536(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012055>