

PEMETAAN RISET PENGEMBANGAN MODEL KOPLING PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR DENGAN SISTEM DESALINASI AIR LAUT MENGGUNAKAN AI-BASED LITERATURE MAPPING

Research Mapping of Model Development of Coupling Nuclear Power Plants with Seawater Desalination Systems Using AI-Based Literature Mapping

Arman Raditya Pramana^{1,*}

¹Program Studi Elektronika Instrumentasi, Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia – BRIN, Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb, Yogyakarta 55281

*E-mail korespondensi: armanpramana5@gmail.com

ABSTRAK

PEMETAAN RISET PENGEMBANGAN MODEL KOPLING PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR DENGAN SISTEM DESALINASI AIR LAUT MENGGUNAKAN AI-BASED LITERATURE MAPPING. Kelangkaan air bersih dan kebutuhan energi rendah karbon mendorong pengembangan sistem kopling Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dengan sistem desalinasi air laut. Makalah ini menyajikan pemetaan riset (research mapping) terhadap perkembangan model kopling PLTN-desalinasi menggunakan pendekatan AI-based literature mapping. Tujuan penelitian adalah memetakan tren pemodelan, teknik kopling, dan celah riset pada bidang ini. Metodologi menggunakan tinjauan pustaka sistematis yang dipercepat dengan bantuan Rabbit AI untuk memetakan hubungan sitasi antar publikasi (citation mapping) dan ChatGPT untuk menganalisis isi literatur, mengelompokkan jurnal, serta menyusun mind map menggunakan Xmind. Hasil pemetaan terhadap sepuluh publikasi inti yang mewakili enam pilar tema riset — optimasi, pemodelan dinamis, pengembangan alat simulasi, termodinamika, teknologi kopling, dan sistem hibrida — menunjukkan bahwa penelitian kopling PLTN-desalinasi masih didominasi oleh pemodelan termodinamika kondisi tunak (steady-state) dan optimasi dasar, sementara pemodelan dinamis pada kondisi transien, konfigurasi hibrida lintas-teknologi, integrasi ekonomi-keselamatan, kecerdasan buatan, dan digital twin masih menjadi celah riset yang terbuka. Kontribusi utama makalah ini adalah menyediakan peta riset yang sistematis serta menunjukkan penerapan AI-assisted literature mapping sebagai pendekatan baru dalam tinjauan pustaka pada bidang kopling PLTN-desalinasi. Kesimpulannya, arah riset ke depan perlu diarahkan pada integrasi AI/machine learning, pengembangan digital twin reaktor, dan penerapan sistem kendali prediktif waktu-nyata untuk mendukung efisiensi, fleksibilitas, dan keselamatan sistem kopling PLTN-desalinasi di masa depan.

Kata kunci: desalinasi nuklir, kopling reaktor, pemodelan dinamis, optimasi termodinamika, sistem hibrida, pemetaan riset, kecerdasan buatan.

ABSTRACT

RESEARCH MAPPING OF MODEL DEVELOPMENT OF COUPLING NUCLEAR POWER PLANTS WITH DESALINATION SYSTEMS. Freshwater scarcity and the demand for low-carbon energy are driving the development of coupled Nuclear Power Plant (NPP)-seawater desalination systems. This paper presents a research mapping of model development for NPP-desalination coupling using an AI-based literature mapping approach. The objective is to map modelling trends, coupling techniques, and research gaps in this field. The methodology uses a systematic literature review accelerated by Rabbit AI, which maps citation relationships between publications (citation mapping), and ChatGPT, which analyses the content of the literature, classifies journals, and helps build a mind map using Xmind. The mapping of ten core publications, representing six research pillars — optimisation, dynamic modelling, simulation-tool development, thermodynamics, coupling technology, and hybrid systems — shows that research on NPP-desalination coupling remains dominated by steady-state thermodynamic modelling and basic optimisation, while dynamic modelling, cross-technology hybrid configurations, integrated safety-economic analysis, artificial intelligence, and digital twins remain open research gaps. The main contribution of this paper is to provide a systematic research map and to demonstrate the application of AI-assisted literature mapping as a new approach to literature review in the field of NPP-desalination coupling. In conclusion, future research should focus on integrating AI/machine learning, developing reactor digital twins, and applying real-time predictive control to support the efficiency, flexibility, and safety of future NPP-desalination coupling systems.

Keywords: nuclear desalination, reactor coupling, dynamic modeling, thermodynamic optimization, hybrid systems, research mapping, artificial intelligence.

PENDAHULUAN

Krisis ketersediaan air bersih yang layak konsumsi terus meningkat sejalan dengan pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan perubahan iklim, sementara desalinasi air laut konvensional yang mengandalkan bahan bakar fosil menimbulkan beban emisi karbon dan biaya energi yang tinggi. Di sisi lain, Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) menghasilkan energi dalam jumlah besar dan stabil, baik dalam bentuk panas proses maupun listrik, sehingga kopling PLTN dengan sistem desalinasi dipandang sebagai solusi strategis untuk menyediakan air bersih sekaligus energi rendah karbon secara bersamaan [1].

Konsep kopling nuklir-desalinasi telah dikaji sejak awal 2000-an melalui berbagai laporan International Atomic Energy Agency (IAEA), namun perkembangan pemodelan dan simulasinya terus berevolusi dari pendekatan termodinamika sederhana menuju pemodelan dinamis, alat simulasi terintegrasi, hingga analisis teknoekonomi sistem hibrida [1], [4], [5]. Perkembangan yang tersebar pada berbagai jurnal dan laporan teknis ini perlu dipetakan secara sistematis agar tren, metode yang dominan, serta celah riset yang belum terjawab dapat diidentifikasi dengan jelas.

Secara sederhana, yang dimaksud dengan kopling PLTN-desalinasi (nuclear-desalination coupling) adalah keterpaduan reaktor nuklir dengan unit desalinasi air laut dalam satu sistem terintegrasi, sehingga panas sisa (waste heat) dan/atau listrik yang dihasilkan reaktor dimanfaatkan langsung untuk memproduksi air tawar tanpa menambah emisi karbon. Konfigurasi kopling yang umum dikaji meliputi tiga bentuk utama, yaitu kopling termal langsung (panas reaktor dialirkan langsung ke unit distilasi termal seperti MED atau MSF), kopling termal tidak langsung (panas disalurkan melalui penukar panas perantara untuk menjaga isolasi keselamatan antara sistem nuklir dan sistem desalinasi), serta kopling berbasis listrik (listrik hasil pembangkitan PLTN digunakan untuk menggerakkan pompa tekanan tinggi pada sistem reverse osmosis). Ketiga konfigurasi inilah yang menjadi objek pemetaan pada makalah ini.

Ruang lingkup kajian ini difokuskan pada Pengembangan Model Kopling Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir dengan Sistem Desalinasi (Model Development of Coupling Nuclear Power Plants with Desalination Systems), yaitu aspek pemodelan, simulasi, optimasi, dan konfigurasi kopling — bukan pembahasan desalinasi nuklir secara umum. Makalah ini bertujuan untuk: (1) memetakan publikasi-publikasi kunci terkait model kopling PLTN-desalinasi menggunakan metode tinjauan pustaka yang dipercepat dengan kecerdasan buatan (AI-assisted literature mapping); (2) mengklasifikasikan publikasi tersebut ke dalam tema/pilar riset; dan (3) mengidentifikasi kesenjangan riset (research gap) sebagai dasar arah pengembangan riset selanjutnya.

Tinjauan pustaka menunjukkan bahwa penelitian terdahulu mencakup optimasi konfigurasi kopling [1], pemodelan dinamis proses MED-TVC [2], pengembangan alat evaluasi termodinamika DE-TOP [3], simulator APROS untuk berbagai skema kopling [4], hingga analisis teknoekonomi sistem hibrida [5], serta kajian teknologi kopling langsung, tidak langsung, dan elektrik [6]–[9], dan optimasi energi sistem MSF [10]. Pemetaan atas kumpulan pustaka tersebut menjadi dasar analisis pada bagian hasil dan pembahasan.

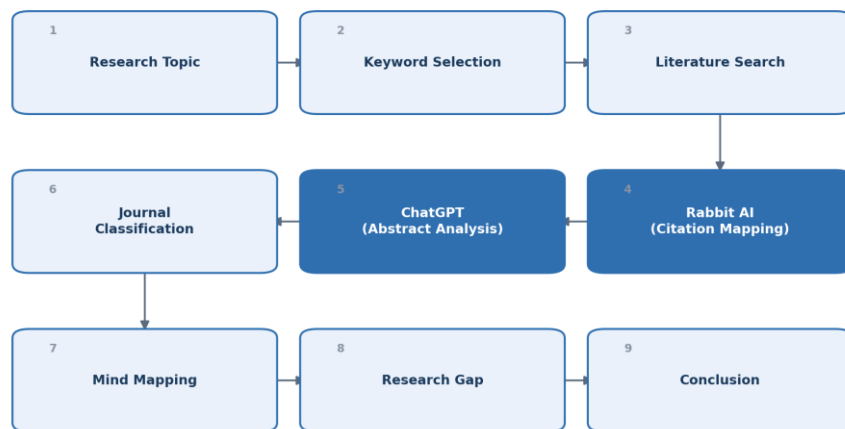
Seiring meningkatnya jumlah publikasi ilmiah mengenai sistem kopling Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dengan sistem desalinasi, dibutuhkan metode yang mampu memetakan hubungan antar penelitian secara sistematis. Pemanfaatan Artificial Intelligence (AI), seperti Rabbit AI untuk analisis keterkaitan sitasi dan ChatGPT untuk analisis isi literatur, memberikan pendekatan baru dalam melakukan research mapping sehingga perkembangan penelitian dapat divisualisasikan dalam bentuk mind mapping yang lebih mudah dipahami.

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode tinjauan pustaka sistematis (systematic literature review) yang dipercepat dengan bantuan perangkat berbasis kecerdasan buatan, mengikuti alur kerja empat fase: (1) Pencarian, (2) Penyaringan, (3) Strukturisasi, dan (4) Sintesis.

A. Alur Kerja Penelitian

Keseluruhan tahapan penelitian ini, mulai dari penentuan topik hingga penarikan kesimpulan, dirangkum dalam sebuah alur kerja (workflow) sebagaimana disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur kerja (workflow) penelitian pemetaan riset model kopling PLTN-desalinasi berbasis AI.

Alur kerja tersebut menggambarkan sembilan tahapan berurutan: penentuan topik penelitian (research topic), pemilihan kata kunci (keyword selection), penelusuran literatur (literature search), pemetaan sitasi menggunakan Rabbit AI (citation mapping), analisis isi abstrak menggunakan ChatGPT (abstract analysis), klasifikasi jurnal (journal classification), penyusunan peta pemikiran (mind mapping), identifikasi kesenjangan riset (research gap), hingga penarikan kesimpulan (conclusion). Alur kerja ini memastikan bahwa proses pemetaan riset berlangsung secara sistematis dan dapat ditelusuri ulang (traceable) pada setiap tahapannya.

B. Penentuan Topik dan Kata Kunci

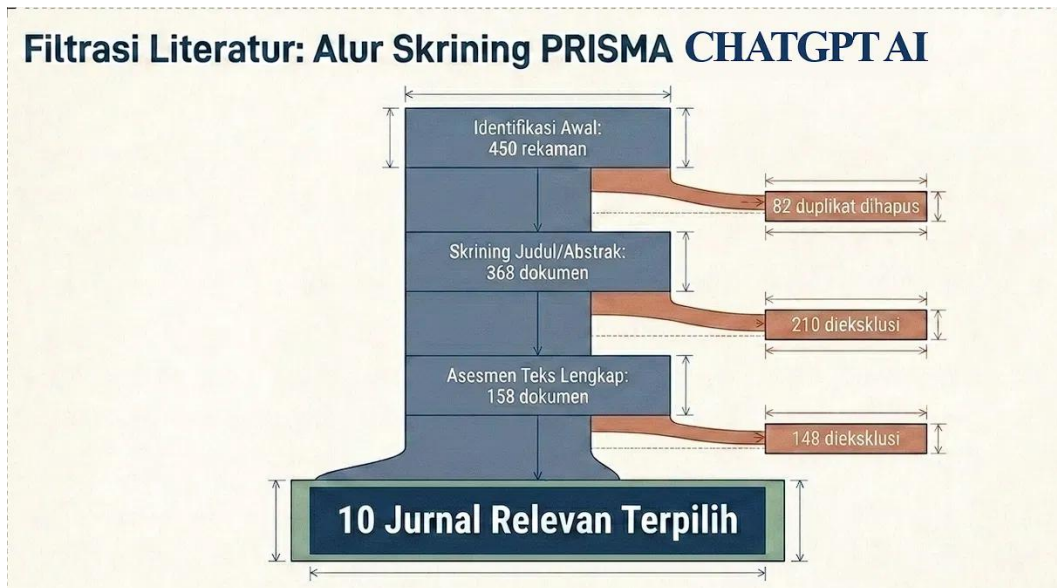
Topik penelitian ditentukan dan dipersempit menjadi “Model Development of Coupling Nuclear Power Plants with Desalination Systems” agar berfokus pada aspek pemodelan, simulasi, dan optimasi. Kata kunci pencarian yang digunakan meliputi: nuclear desalination, coupling nuclear reactors, model development, dynamic simulation, thermodynamic modeling, MED & MSF, reverse osmosis (RO), hybrid desalination, dan nuclear cogeneration.

C. Penelusuran Literatur

Literatur relevan dikumpulkan dari basis data ilmiah bereputasi, yaitu ScienceDirect sebagai basis literatur utama, IAEA Publications untuk laporan teknis spesifik nuklir, serta jurnal Applied Thermal Engineering dan Desalination sebagai sumber teknis pendukung. Proses penelusuran dipercepat menggunakan perangkat berbasis AI seperti Rabbit AI, Connected Papers, Elicit, dan ChatGPT untuk membantu identifikasi awal publikasi yang relevan. Pemilihan ketiga sumber tersebut didasarkan pada reputasi dan cakupan tema yang relevan: ScienceDirect dipilih karena cakupannya yang luas terhadap publikasi bidang teknik dan energi, IAEA Publications dipilih karena memuat laporan teknis resmi yang menjadi rujukan utama pengembangan teknologi kopling nuklir-desalinasi, sedangkan Applied Thermal Engineering dan Desalination dipilih karena merupakan jurnal terindeks yang secara khusus memuat penelitian termodinamika dan teknologi desalinasi.

D. Kriteria Inklusi dan Penyaringan

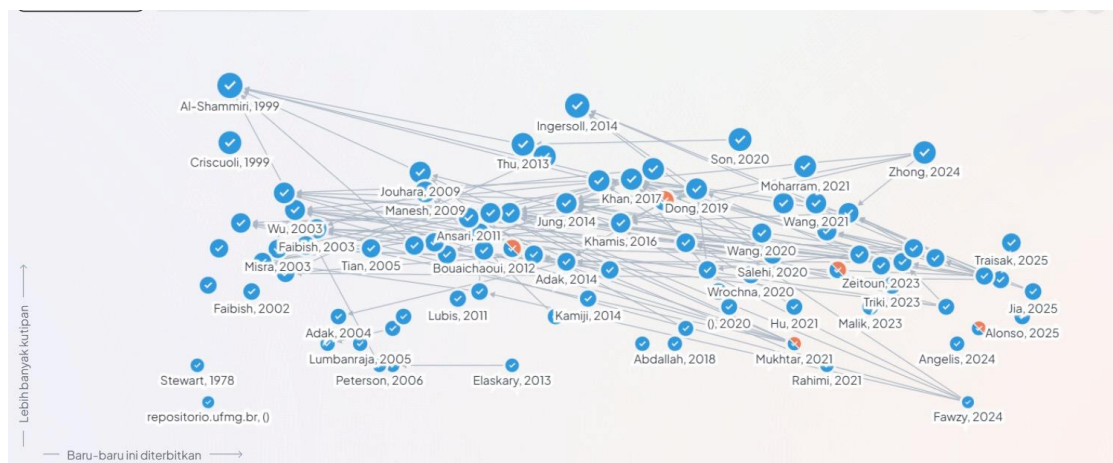
Setiap publikasi disaring berdasarkan kriteria: (1) berkaitan langsung dengan kopling PLTN-desalinasi, (2) mengandung model matematika atau termodinamika, (3) berbasis simulasi digital, dan (4) bertujuan pada studi optimasi atau analisis performa operasional. Proses penyaringan mengikuti alur bergaya PRISMA dengan bantuan ChatGPT AI: dari 450 rekaman awal, 82 duplikat dihapus sehingga tersisa 368 dokumen pada tahap skrining judul/abstrak; 210 dokumen dieksklusi pada tahap ini sehingga tersisa 158 dokumen untuk asesmen teks lengkap. Pada tahap akhir, 148 dokumen kembali dieksklusi karena tidak memenuhi kriteria inklusi secara penuh, sehingga diperoleh 10 jurnal relevan terpilih sebagai inti pembahasan (Gambar 2).



Gambar 2. Alur skrining literatur bergaya PRISMA menggunakan ChatGPT AI (450 → 368 → 158 → 10 jurnal relevan terpilih).

E. Analisis Keterkaitan Menggunakan Rabbit AI

Publikasi yang telah lolos proses penyaringan selanjutnya dianalisis menggunakan Rabbit AI. Fitur Research Map digunakan untuk memvisualisasikan hubungan sitasi antar publikasi, mengidentifikasi jurnal yang menjadi penelitian dasar (foundational papers), serta mengetahui perkembangan penelitian dari waktu ke waktu.



Gambar 3. Research Map of Nuclear Power Plant–Desalination Publications Generated Using Rabbit AI.

F. Peran Rabbit AI dan ChatGPT dalam Analisis

Pemilihan dan analisis publikasi pada penelitian ini dibantu oleh dua perangkat berbasis kecerdasan buatan yang memiliki peran berbeda dan saling melengkapi. Rabbit AI digunakan pada tahap analisis keterkaitan sitasi (citation mapping); melalui fitur Research Map, Rabbit AI memvisualisasikan hubungan sitasi antar publikasi, mengidentifikasi jurnal yang menjadi penelitian dasar (foundational papers), serta menelusuri perkembangan penelitian dari waktu ke waktu, sehingga proses pemilihan jurnal utama dapat dilakukan secara lebih objektif dan sistematis

Setelah hubungan antar jurnal diperoleh menggunakan Rabbit AI sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4, hasil pemetaan tersebut selanjutnya dianalisis lebih lanjut menggunakan ChatGPT. Rabbit AI berperan sebagai alat pemetaan hubungan sitasi (citation mapping tool), sedangkan ChatGPT digunakan sebagai alat bantu analisis isi literatur (content analysis tool). Secara rinci, ChatGPT digunakan untuk membantu: (1) membaca dan merangkum abstrak setiap jurnal; (2) mengidentifikasi fokus riset masing-masing

publikasi; (3) mengelompokkan jurnal berdasarkan kesamaan tema; (4) menentukan kontribusi utama setiap studi; (5) menyusun kerangka pemetaan riset (research mapping); (6) membantu penyusunan visualisasi mind mapping; dan (7) mengidentifikasi kesenjangan riset (research gap) yang masih terbuka. Dengan demikian, kedua perangkat AI tersebut saling melengkapi: Rabbit AI menunjukkan bagaimana publikasi-publikasi saling terhubung, sedangkan ChatGPT menjelaskan mengapa dan bagaimana keterhubungan tersebut relevan dengan topik penelitian.

G. Penyusunan Mind Map

Peta pemikiran (mind map) yang disajikan pada bagian Hasil dan Pembahasan tidak disusun secara langsung, melainkan merupakan hasil akhir dari rangkaian proses bertahap, yaitu: (1) menentukan topik penelitian; (2) menentukan kata kunci; (3) mencari jurnal pada basis data yang telah ditentukan; (4) menyeleksi jurnal berdasarkan kriteria inklusi; (5) menganalisis keterhubungan antar publikasi menggunakan Rabbit AI; (6) menganalisis isi setiap publikasi menggunakan ChatGPT; (7) mengelompokkan jurnal berdasarkan kesamaan tema; dan (8) menyusun visualisasi akhir menggunakan perangkat lunak Xmind. Dengan alur tersebut, setiap entri pada mind map memuat informasi identitas (judul dan tahun), orientasi (fokus riset), esensi (ringkasan abstrak), dan nilai tambah (kontribusi utama) dari masing-masing publikasi.

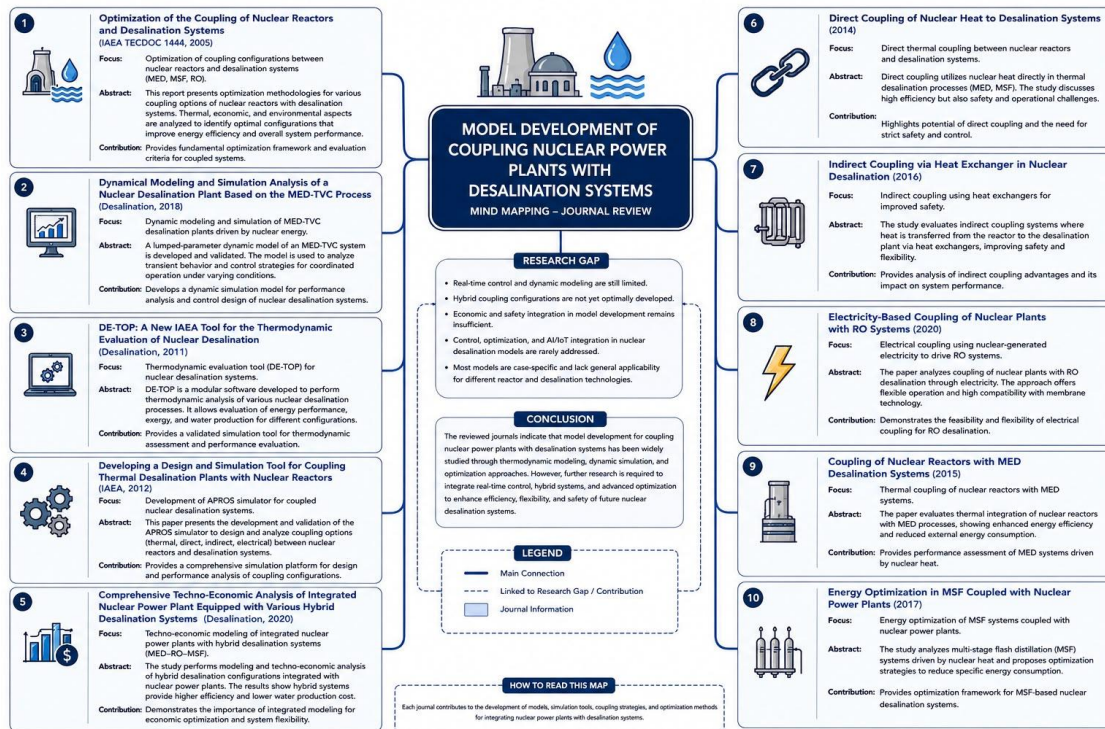
H. Sintesis dan Identifikasi Kesenjangan Riset

Tahap akhir adalah sintesis atas seluruh publikasi yang telah dipetakan untuk mengidentifikasi tren riset, teknologi kopling yang paling banyak dikaji, metode yang umum digunakan, serta kesenjangan riset yang masih terbuka, yang menjadi dasar penyusunan bagian hasil dan pembahasan serta kesimpulan pada makalah ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Umum Peta Riset

Hasil pemetaan menghasilkan sepuluh publikasi inti yang merepresentasikan perkembangan model kopling PLTN-desalinasi dari tahun 2005 hingga 2020. Publikasi-publikasi tersebut mencakup laporan teknis IAEA, jurnal Desalination, serta kajian teknologi kopling langsung, tidak langsung, dan elektrik. Setiap entri pada peta memuat identitas (judul dan tahun), orientasi (fokus riset), esensi (ringkasan abstrak), dan nilai tambah (kontribusi utama), sehingga memudahkan penelusuran kontribusi tiap studi terhadap topik kopling PLTN-desalinasi secara keseluruhan. Setelah seluruh jurnal dianalisis menggunakan Rabbit AI dan ChatGPT, hasil identifikasi kemudian dikelompokkan berdasarkan kesamaan fokus penelitian, metode yang digunakan, serta kontribusi ilmiah masing-masing publikasi. Pengelompokan tersebut menjadi dasar penyusunan visualisasi mind mapping sebagaimana disajikan pada Gambar 5, sehingga hubungan antar penelitian dapat dipahami secara sistematis.



Gambar 5. Peta pemikiran (mind map) hasil kajian sepuluh publikasi inti model kopling PLTN-desalinasi.

Setiap entri pada peta memuat identitas (judul dan tahun), orientasi (fokus riset), esensi (ringkasan abstrak), dan nilai tambah (kontribusi utama). Ringkasan dari kesepuluh publikasi inti tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan publikasi inti hasil pemetaan riset kopling PLTN-desalinasi.

No	Judul & Sumber (Tahun)	Fokus Utama	Kontribusi Utama
1	Optimization of the Coupling of Nuclear Reactors and Desalination Systems (IAEA TECDOC 1444, 2005)	Optimasi konfigurasi kopling antara reaktor nuklir dan sistem desalinasi (MED, MSF, RO).	Menyusun kerangka optimasi dan kriteria evaluasi dasar bagi sistem kopling.
2	Dynamical Modeling and Simulation Analysis of a Nuclear Desalination Plant Based on the MED-TVC Process (Desalination, 2018)	Pemodelan dan simulasi dinamis pabrik desalinasi MED-TVC yang digerakkan energi nuklir.	Mengembangkan model simulasi dinamis untuk analisis performa dan desain kontrol.
3	DE-TOP: A New IAEA Tool for the Thermodynamic Evaluation of Nuclear Desalination (Desalination, 2011)	Perangkat lunak evaluasi termodinamika (DE-TOP) untuk sistem desalinasi nuklir.	Menyediakan alat simulasi tervalidasi untuk penilaian performa termodinamika.
4	Developing a Design and Simulation Tool for Coupling Thermal Desalination Plants with Nuclear Reactors (IAEA, 2012)	Pengembangan simulator APROS untuk sistem desalinasi nuklir terkopling.	Menghasilkan platform simulasi komprehensif untuk berbagai opsi kopling (termal, langsung, tak langsung, elektrik).
5	Comprehensive Techno-Economic Analysis of Integrated Nuclear Power	Pemodelan teknoekonomi PLTN terintegrasi dengan sistem desalinasi hibrida (MED-RO-MSF).	Menunjukkan pentingnya pemodelan terintegrasi untuk optimasi ekonomi dan fleksibilitas sistem.

	Plant Equipped with Various Hybrid Desalination Systems (Desalination, 2020)		
6	Direct Coupling of Nuclear Heat to Desalination Systems (2014)	Kopling termal langsung antara reaktor nuklir dan proses desalinasi (MED, MSF).	Menyoroti potensi efisiensi tinggi sekaligus kebutuhan kendali keselamatan yang ketat.
7	Indirect Coupling via Heat Exchanger in Nuclear Desalination (2016)	Kopling tak langsung menggunakan penukar panas (heat exchanger) untuk keselamatan yang lebih baik.	Menganalisis keunggulan kopling tak langsung terhadap performa dan keselamatan sistem.
8	Electricity-Based Coupling of Nuclear Plants with RO Systems (2020)	Kopling elektrik menggunakan listrik hasil pembangkitan nuklir untuk menggerakkan sistem RO.	Menunjukkan kelayakan dan fleksibilitas kopling elektrik untuk desalinasi RO.
9	Coupling of Nuclear Reactors with MED Desalination Systems (2015)	Kopling termal reaktor nuklir dengan sistem MED.	Menyediakan evaluasi performa sistem MED yang digerakkan oleh panas nuklir.
10	Energy Optimization in MSF Coupled with Nuclear Power Plants (2017)	Optimasi energi sistem MSF yang dikopling dengan PLTN.	Menyusun kerangka optimasi untuk menurunkan konsumsi energi spesifik sistem MSF.

B. Klasifikasi Konfigurasi Kopling

Berdasarkan Tabel 1, konfigurasi kopling PLTN-desalinasi dapat dikelompokkan menjadi tiga pendekatan utama. Pertama, kopling termal langsung (direct coupling), yaitu pemanfaatan panas proses reaktor secara langsung untuk menggerakkan proses desalinasi termal seperti MED dan MSF [6], [9]; pendekatan ini menawarkan efisiensi tinggi namun menuntut sistem keselamatan dan kendali yang ketat karena adanya kontak yang lebih dekat antara sistem nuklir dan sistem desalinasi. Kedua, kopling tidak langsung (indirect coupling) melalui penukar panas (heat exchanger), yang memisahkan sistem primer nuklir dari sistem desalinasi sehingga meningkatkan keselamatan dan fleksibilitas operasi meskipun dengan sedikit penurunan efisiensi termal [7]. Ketiga, kopling berbasis listrik (electricity-based coupling), yaitu pemanfaatan listrik hasil pembangkitan PLTN untuk menggerakkan sistem reverse osmosis (RO); pendekatan ini menawarkan kompatibilitas tinggi dengan teknologi membran dan fleksibilitas penempatan lokasi [8].

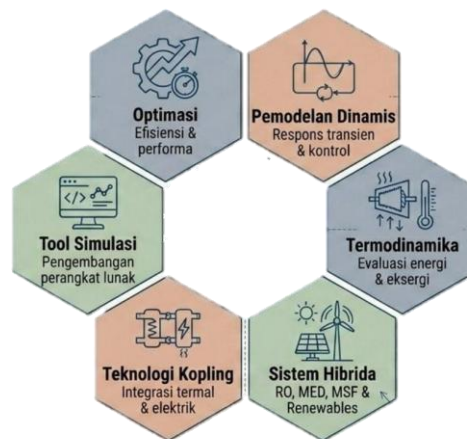
Selain ketiga pendekatan dasar tersebut, tren riset yang berkembang mengarah pada sistem hibrida yang menggabungkan lebih dari satu teknologi desalinasi (MED-RO-MSF) dalam satu PLTN terintegrasi, dengan tujuan meningkatkan efisiensi keseluruhan sekaligus menurunkan biaya produksi air per unit volume [5]. Perangkat lunak dan alat simulasi seperti DE-TOP [3] dan APROS [4] dikembangkan untuk mendukung evaluasi teknis dari berbagai konfigurasi kopling tersebut secara lebih sistematis dan tervalidasi.

C. Enam Pilar Tema Riset

Berdasarkan hasil pengelompokan seluruh jurnal menggunakan Rabbit AI dan ChatGPT, teridentifikasi enam kelompok penelitian utama yang paling sering muncul. Keenam kelompok tersebut merepresentasikan arah perkembangan penelitian model kopling PLTN dengan sistem desalinasi.

Analisis keterkaitan sitasi antar publikasi yang telah disajikan pada Gambar 3 dan Gambar 4 (bagian Metodologi) menunjukkan bahwa publikasi-publikasi terdahulu (misalnya Faibish 2003, Jung 2014, dan Khan 2017) menjadi rujukan penting bagi publikasi-publikasi yang lebih baru, seperti terlihat pada studi Fawzy (2024) mengenai analisis termal PLTN reaktor air bertekanan (PWR) untuk desalinasi. Pola keterhubungan ini menegaskan bahwa perkembangan model kopling PLTN-desalinasi bersifat kumulatif, di mana studi-studi baru banyak membangun dan menyempurnakan model-model termodinamika dan simulasi yang telah dikembangkan sebelumnya.

Berdasarkan hasil klasifikasi, publikasi-publikasi yang dipetakan dapat dikelompokkan ke dalam enam pilar tema riset: (1) Optimasi — efisiensi dan performa sistem; (2) Pemodelan Dinamis — respons transien dan kendali; (3) Termodinamika — evaluasi energi dan eksergi; (4) Tool Simulasi — pengembangan perangkat lunak; (5) Teknologi Kopling — integrasi termal dan elektrik; dan (6) Sistem Hibrida — kombinasi RO, MED, MSF, dan energi terbarukan. Keenam pilar ini saling melengkapi dan membentuk kerangka pengetahuan yang menyeluruh mengenai model kopling PLTN-desalinasi.



Gambar 6. Pemetaan pengetahuan: enam pilar tema riset hasil klasifikasi Rabbit AI dan ChatGPT.

D. Kesenjangan Riset (Research Gap)

Perbandingan menyeluruh terhadap seluruh publikasi yang dipetakan mengungkapkan lima kesenjangan riset yang masih terbuka, diurutkan berdasarkan tahapan perkembangan penelitian, yaitu:

1. Dynamic Modeling — pemodelan dinamis dan kendali waktu-nyata (real-time control) pada kondisi transien, seperti start-up dan shut-down, masih terbatas dan merupakan kesenjangan paling kritis karena berpengaruh langsung terhadap desain sistem kendali dan fleksibilitas operasi, terutama pada skenario operasi mengikuti beban (load-following).
2. Hybrid Coupling Configuration — konfigurasi kopling hibrida lintas-teknologi (MED-RO-MSF) belum dikembangkan secara optimal dan belum mencapai titik ekuilibrium performa terbaik.
3. Integrated Safety-Economic Analysis — integrasi aspek ekonomi dan keselamatan ke dalam satu kerangka pemodelan masih belum memadai; aspek teknoekonomi dan keselamatan nuklir masih cenderung dievaluasi secara terpisah.
4. Artificial Intelligence Based Optimization — integrasi kendali, optimasi, dan kecerdasan buatan/IoT ke dalam model kopling PLTN-desalinasi masih jarang dibahas, meskipun berpotensi besar meningkatkan akurasi prediksi performa sistem.
5. Digital Twin and Predictive Control — pengembangan teknologi digital twin bagi reaktor dan fasilitas desalinasi, serta penerapan sistem kendali prediktif secara real-time, masih berada pada tahap awal dan belum diterapkan secara luas pada sistem kopling PLTN-desalinasi.

Di antara kelima kesenjangan tersebut, keterbatasan pemodelan dinamis pada kondisi transien (Dynamic Modeling) merupakan kesenjangan paling kritis karena berpengaruh langsung terhadap desain sistem kendali dan fleksibilitas operasi PLTN yang dikopling dengan sistem desalinasi, terutama seiring meningkatnya penetrasi energi terbarukan dalam bauran energi.

E. Keterbatasan Penelitian (Limitations)

Penelitian ini menggunakan Artificial Intelligence sebagai alat bantu dalam proses pencarian, pemetaan, dan analisis literatur. Hasil research mapping masih bergantung pada ketersediaan jurnal yang berhasil diidentifikasi melalui basis data ilmiah dan Rabbit AI. Oleh karena itu, hasil penelitian ini masih dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menggunakan perangkat lunak bibliometrik seperti VOSviewer, CiteSpace, atau Scopus Bibliometric Analysis untuk memvalidasi dan memperluas cakupan pemetaan riset.

F. Sintesis dan Arah Riset ke Depan

Secara keseluruhan, status riset saat ini masih didominasi oleh pemodelan termodinamika kondisi tunak (steady-state) dan teknik optimasi dasar. Arah pengembangan riset ke depan diproyeksikan bergerak menuju tiga fokus utama, yaitu: integrasi kecerdasan buatan (AI) dan machine learning untuk mendukung optimasi dan prediksi performa sistem; pengembangan teknologi digital twin bagi reaktor dan fasilitas desalinasi untuk simulasi dan pemantauan yang lebih presisi; serta penerapan sistem kendali prediktif secara real-time guna meningkatkan fleksibilitas dan keandalan operasi sistem kopling PLTN-desalinasi pada berbagai kondisi operasi, termasuk kondisi transien.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menyusun research mapping mengenai Model Development of Coupling Nuclear Power Plants with Desalination Systems menggunakan pendekatan AI-Assisted Literature Mapping. Rabbit AI digunakan untuk memetakan hubungan sitasi antar publikasi, sedangkan ChatGPT digunakan untuk membantu analisis isi literatur, pengelompokan jurnal, serta penyusunan mind mapping. Hasil pemetaan menunjukkan bahwa penelitian masih didominasi oleh thermodynamic modeling, dynamic simulation, dan optimization. Sementara itu, integrasi Artificial Intelligence, Digital Twin, dan Predictive Control masih menjadi peluang penelitian di masa mendatang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Anhar R. Antariksawan selaku dosen pembimbing/pengampu mata kuliah atas bimbingan dan arahan dalam penyusunan makalah ini, serta kepada Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia – BRIN atas dukungan fasilitas dan literatur yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Atomic Energy Agency, "Optimization of the Coupling of Nuclear Reactors and Desalination Systems," IAEA-TECDOC-1444, IAEA, Vienna, 2005.
- [2] Z. Dong, M. Liu, X. Huang, Y. Zhang, Z. Zhang, and Y. Dong, "Dynamical modeling and simulation analysis of a nuclear desalination plant based on the MED-TVC process," *Desalination*, vol. 456, pp. 121–135, 2019, doi: 10.1016/j.desal.2019.01.020.
- [3] I. G. Sánchez-Cervera, K. C. Kavvadias, and I. Khamis, "DE-TOP: A new IAEA tool for the thermodynamic evaluation of nuclear desalination," *Desalination*, vol. 321, pp. 103–109, 2013, doi: 10.1016/j.desal.2011.10.005.
- [4] K. Agha, K. Al Fared, A. Rashed, and S. Ghurbal, "Developing a design and simulation tool for coupling thermal desalination plants with nuclear reactors by using Apros simulator," presented at the IAEA Technical Meeting, Daejeon, Republic of Korea, 3–6 March 2009.
- [5] K. Sadeghi, S. H. Ghazaie, E. Sokolova, E. Fedorovich, and A. Shirani, "Comprehensive techno-economic analysis of integrated nuclear power plant equipped with various hybrid desalination systems," *Desalination*, vol. 493, art. 114623, 2020, doi: 10.1016/j.desal.2020.114623.

- [6] "Direct Coupling of Nuclear Heat to Desalination Systems," 2014. (Jenis sumber: artikel jurnal ilmiah, diperkirakan pada bidang teknologi desalinasi nuklir; hasil ringkasan pemetaan Rabbit AI — nama penulis, nama jurnal, volume, dan halaman belum teridentifikasi dan perlu ditelusuri penulis dari basis data ScienceDirect/IAEA sebelum makalah disubmit.)
- [7] "Indirect Coupling via Heat Exchanger in Nuclear Desalination," 2016. (Jenis sumber: artikel jurnal ilmiah, diperkirakan pada bidang teknik nuklir/desalinasi; hasil ringkasan pemetaan Rabbit AI — metadata lengkap perlu ditelusuri dan dilengkapi penulis sebelum makalah disubmit.)
- [8] "Electricity-Based Coupling of Nuclear Plants with RO Systems," 2020. (Jenis sumber: artikel jurnal ilmiah, diperkirakan pada bidang teknologi reverse osmosis (RO); hasil ringkasan pemetaan Rabbit AI — metadata lengkap perlu ditelusuri dan dilengkapi penulis sebelum makalah disubmit.)
- [9] "Coupling of Nuclear Reactors with MED Desalination Systems," 2015. (Jenis sumber: artikel jurnal ilmiah, diperkirakan pada bidang teknologi desalinasi termal MED; hasil ringkasan pemetaan Rabbit AI — metadata lengkap perlu ditelusuri dan dilengkapi penulis sebelum makalah disubmit.)
- [10] "Energy Optimization in MSF Coupled with Nuclear Power Plants," 2017. (Jenis sumber: artikel jurnal ilmiah, diperkirakan pada bidang teknologi desalinasi MSF; hasil ringkasan pemetaan Rabbit AI — metadata lengkap perlu ditelusuri dan dilengkapi penulis sebelum makalah disubmit.)