



JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Kajian Literatur Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah di Kawasan Karst dalam Perspektif Konsep *Water-Energy-Food* (WEF) *Nexus*

Elisa Siti Maesaroh
21513140

Dosen Pembimbing:
Dr. Eng. Ir. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M. Eng.

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia
2025



DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Literature Review on the Utilization of Underground Rivers in Karst Areas from the Perspective of the *Water-Energy- Food* (WEF) Nexus Concept

Elisa Siti Maesaroh

21513140

Supervisor:

Dr. Eng. Ir. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M. Eng.

Environmental Engineering Bachelor Program

Faculty of Civil Engineering and Planning

Universitas Islam Indonesia

2025

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

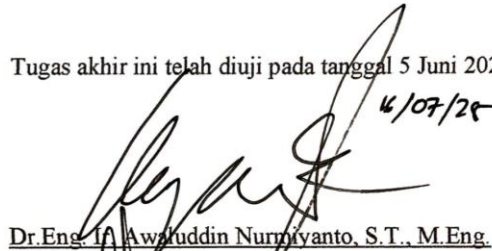
**Kajian Literatur Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah di Kawasan Karst dalam
Perspektif Konsep *Water-Energy-Food (WEF) Nexus***

Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

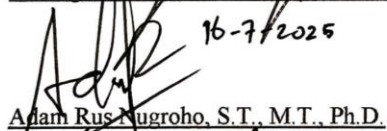
Elisa Siti Maesaroh

21513140

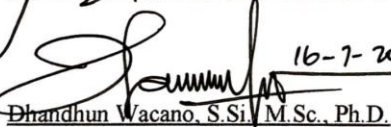
Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 5 Juni 2025 dan disetujui oleh:


Dr. Eng. Iqbal Awwaluddin Nurmiyanto, S.T., M.Eng.

(Pembimbing)


Adam Rus Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.

(Penguji 1)


Dhandhun Wacano, S.Si., M.Sc., Ph.D.

(Penguji 2)

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana


Any Juliani, S.T., M.Sc. (Res. Eng.), Ph.D.



PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia, maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini merupakan gagasan, rumusan, dan studi saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan dosen pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Perangkat lunak atau program komputer yang digunakan dalam tugas akhir ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Tidak ada penggunaan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) dalam penyusunan karya tugas akhir ini kecuali:
 - a. Untuk membantu dalam kadar yang wajar (seperti membantu mengoreksi, mencari ide, dan mencari referensi), dan
 - b. Tercantum dan dijelaskan perihal penggunaannya secara eksplisit di dalam karya tugas akhir ini.Implikasi dari penggunaan AI tersebut menjadi tanggung jawab saya sepenuhnya.
6. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 16 Juli 2024
Yang membuat pernyataan,



Elisa Siti Maesaroh
21513140

PRAKATA

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,

Segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan Judul “Kajian Literatur Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah di Kawasan Karst dalam Perspektif Konsep *Water-Energy-Food* (WEF) *Nexus*”. Penyusunan laporan tugas akhir ini dilakukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program pendidikan Strata Satu (S1) pada Program Pendidikan Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia. Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini banyak sekali hambatan dan rintangan yang saya hadapi namun pada akhirnya dapat melaluinya berkat adanya bimbingan, bantuan, serta dukungan dari banyak pihak baik secara moral maupun spiritual. Untuk itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Ir. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir. Bapak Adam Rus Nugroho, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Dhandhun Wacano, S.Si., M.Sc., Ph.D. selaku dosen penguji yang juga turut memberikan bimbingan, bantuan materil serta masukan dalam proses pembuatan, perhitungan dan pembuatan model.
2. Kedua orang tua penulis, alm Bapak Ade Hidayat, Ibu Neng Umamah, Saudara penulis Muhammad Sohibul Wafa, Siti Maulidah Inayatul Hidayah, Syehan Akmalidi serta seluruh keluarga penulis yang memberikan doa, kasih sayang, dan kepercayaan selama menuntut ilmu dan Menyusun laporan ini.
3. Teman penulis TAKMIRICH dan segenap Pengurus Aktif Takmir Masjid Ulil Albab yang telah menemani suka maupun duka, turut memberikan bantuan dalam kegiatan penelitian dan dorongan untuk segera menyelesaikan laporan tugas akhir ini.

4. Seluruh dosen, staff, dan keluarga besar Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia karena telah memberikan pengajaran dan pengalaman selama kuliah sehingga ilmu yang telah penulis peroleh dapat bermanfaat untuk penyusunan laporan ini.

Sleman, 28 Mei 2025

Elisa Siti Maesaroh

Kajian Literatur Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah di Kawasan Karst dalam Perspektif Konsep *Water-Energy-Food* (WEF) Nexus

Mahasiswa : Elisa Siti Maesaroh
NIM : 21513140
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Dr. Eng. Ir. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M.Eng.

Abstrak

Wilayah karst di Indonesia memiliki potensi besar sebagai sumber daya air melalui keberadaan sungai bawah tanah yang tersebar di berbagai pulau. Namun, pemanfaatan sungai bawah tanah di kawasan karst masih menghadapi berbagai permasalahan, seperti keterbatasan akses, tantangan teknis, serta kurangnya integrasi dalam pengelolaan berkelanjutan. Tugas akhir ini bertujuan untuk mengkaji potensi, tantangan, dan dampak pemanfaatan sungai bawah tanah di kawasan karst Indonesia melalui perspektif konsep *Water-Energy-Food* (WEF) Nexus, sehingga dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai upaya optimalisasi sumber daya air di kawasan tersebut. Penelitian ini dilakukan dengan metode kajian literatur dan *scoping review* terhadap berbagai sumber ilmiah terkait hidrogeologi karst, pemanfaatan sungai bawah tanah, serta implementasi konsep WEF Nexus dalam pengelolaan sumber daya alam. Data yang dikumpulkan dianalisis secara tematik untuk mengidentifikasi potensi, tantangan teknis dan regulasi, serta dampak lingkungan, sosial, dan ekonomi yang ditimbulkan dari pemanfaatan sungai bawah tanah. Hasil kajian menunjukkan bahwa sungai bawah tanah di kawasan karst memiliki potensi besar untuk mendukung ketahanan air, energi, dan pangan, namun pemanfaatannya masih terkendala oleh keterbatasan infrastruktur, regulasi yang belum terintegrasi, serta risiko degradasi lingkungan. Sehingga penelitian ini menegaskan pentingnya pendekatan holistik berbasis WEF Nexus dalam pengelolaan sungai bawah tanah di kawasan karst. Diperlukan sinergi antara pemangku kepentingan, penguatan regulasi, serta penerapan teknologi ramah lingkungan untuk memastikan pemanfaatan yang berkelanjutan dan berkeadilan bagi masyarakat sekitar.

Kata kunci: *Kawasan Karst, Ketahanan Pangan, Sungai Bawah Tanah, Sumber Daya Air, Water-Energy-Food Nexus*

Kajian literatur on the Utilization of Underground Rivers in Karst Areas from the Perspective of the Water-Energy-Food (WEF) Nexus Concept

Student : Elisa Siti Maesaroh
Student Number : 21513140
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Dr. Eng. Ir. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M.Eng.

Abstract

The karst regions in Indonesia possess significant potential as water resources due to the presence of underground rivers distributed across various islands. However, the utilization of underground rivers in karst areas faces multiple challenges, including limited access, technical difficulties, and a lack of integrated, sustainable management. This final project aims to examine the potential, challenges, and impacts of utilizing underground rivers in Indonesian karst regions through the perspective of the Water-Energy-Food (WEF) Nexus concept, providing a comprehensive overview of efforts to optimize water resources in these areas. This research employs a kajian literatur and scoping review method, analyzing various scientific sources related to karst hydrogeology, underground river utilization, and the implementation of the WEF Nexus concept in natural resource management. Collected data are analyzed thematically to identify potential, technical, and regulatory challenges, as well as environmental, social, and economic impacts arising from the utilization of underground rivers. The results indicate that underground rivers in karst regions have considerable potential to support water, energy, and food security; however, their utilization is still constrained by limited infrastructure, fragmented regulations, and environmental degradation risks. These findings underscore the importance of a holistic approach based on the WEF Nexus in managing underground rivers in karst areas. Synergy among stakeholders, regulatory strengthening, and the application of environmentally friendly technologies are necessary to ensure sustainable and equitable utilization for local communities.

Key words: Food Security, Karst Region, Underground River, Water Resource, Water-Energy-Food Nexus

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
Abstrak.....	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup.....	5
1.6 Kerangka Berpikir.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Hidrogeologi Kawasan karst.....	7
2.2 Sungai Bawah Tanah	11
2.3 Definisi Water, Energy, Food (WEF) <i>Nexus</i>	12
2.4 Konsep Energi Baru Terbarukan.....	14
2.5 Konsep Ketahanan Pangan.....	15
2.6 Aspek Keberlanjutan.....	16
2.7 Kebijakan dan Regulasi	18
BAB III METODE PENELITIAN	20
3.1 Tahapan Penelitian.....	20
3.1.1 Survey Pendahuluan dan Studi Literatur.....	20
3.1.2 Pengumpulan Data	20
3.1.3 Analisis Data dan Perbandingan Studi Literatur	22
3.1.4 Kesimpulan.....	Error! Bookmark not defined.
3.2 Tahapan Pelaksanaan <i>Scoping Review</i>	23
2.2.1 Tahapan <i>Scoping Review</i>	23
2.2.2 Metode Pengumpulan Data	25
3.3 Pola Pembahasan	32

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Potensi Sungai Bawah Tanah Kawasan karst Indonesia	34
4.3 Tantangan Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah dengan Konsep WEF <i>Nexus</i>	42
4.3.1 Tantangan Teknis	46
4.3.2 Tantangan Regulasi	50
4.4 Kajian Analisis Dampak Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah dengan Konsep WEF <i>Nexus</i>	53
4.4.1 Kajian Literatur Analisis Dampak Lingkungan	58
4.4.2 Kajian Analisis Dampak Sosial.....	60
4.4.3 Kajian Analisis Dampak Ekonomi	64
BAB IV KESIMPULAN	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	70
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	86
RIWAYAT HIDUP	104

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sungai Bawah Tanah	11
Tabel 3.1 Karakteristik Jenis Literatur	26
Tabel 4.1 Rincian Data Literatur Potensi Sungai Bawah Tanah Daerah Karst Indonesia	35
Tabel 4.2 Ekstraksi Data Potensi Sungai Bawah Tanah Kawasan Karst Indonesia	38
Tabel 4.3 Aspek Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah sebagai WEF- <i>Nexus</i>	40
Tabel 4.4 Rincian Data Literatur Tantangan Teknis dan Regulasi	44
Tabel 4.5 Tantangan Teknis Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah sebagai WEF- <i>Nexus</i>	45
Tabel 4.6 Tantangan Regulasi Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah sebagai WEF- <i>Nexus</i>	48
Tabel 4.7 Rincian Data Literatur Kajian Analisis Dampak Lingkungan, Sosial, dan Ekonomi	56
Tabel 4.8 Identifikasi Kajian Potensi Dampak Lingkungan Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah Sebagai WEF <i>Nexus</i>	57
Tabel 4.9 Identifikasi Kajian Potensi Dampak Sosial Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah Sebagai WEF <i>Nexus</i>	61
Tabel 4.10 Identifikasi Kajian Potensi Dampak Ekonomi Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah Sebagai WEF <i>Nexus</i>	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kerangka Berpikir	7
Gambar 2.1 Kawasan Karst.....	9
Gambar 2.2 Sungai Bawah Tanah Karst	9
Gambar 2.3 Grafik Demografi Kependudukan Wilayah Karst.....	10
Gambar 3.1 PRISMA <i>Flow Diagram</i>	29
Gambar 3.2 Diagram Alir Pengerjaan Analisis Data	31
Gambar 3.3 Kategorisasi Data dan Analisis Tematik	32
Gambar 3.4 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir.....	33
Gambar 4.1 Data Literatur Potensi Sungai Bawah Tanah Daerah Karst Indonesia	36
Gambar 4.2 PRISMA <i>Flow Diagram</i> Seleksi Data Literatur Potensi Sungai Bawah Tanah	37
Gambar 4.3 Data Literatur Tantangan Teknis dan Regulasi.....	45
Gambar 4.4 PRISMA <i>Flow Diagram</i> Seleksi Data Literatur Tantangan Teknis dan Regulasi	46
Gambar 4.1 Data Literatur Potensi Kajian Analisis Dampak Lingkungan, Sosial, dan Ekonomi	56
Gambar 4.6 PRISMA <i>Flow Diagram</i> Seleksi Data Dampak Lingkungan, Sosial, dan Ekonomi	57

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Tabulasi Literatur yang digunakan dalam Penelitian	88
---	----

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air merupakan salah satu sumber daya alam yang sangat berperan penting bagi kelangsungan hidup manusia. Menurut data dari *United Nations Water*, sekitar 2,2 miliar orang di dunia masih hidup tanpa akses yang memadai terhadap air minum yang aman dan terkelola dengan baik (UNESCO & UN Water, 2020). Di Indonesia, ketersediaan sumber daya air sangat bervariasi, dengan beberapa wilayah menghadapi kekeringan karena musim kemarau yang berkepanjangan, sementara wilayah lainnya mengalami kelebihan air yang menyebabkan banjir. Oleh karena itu, pengelolaan sumber daya air yang efisien dan berkelanjutan menjadi sangat penting untuk memastikan keberlanjutan kehidupan dan pembangunan di masa depan.

Indonesia memiliki sebaran wilayah karst dengan luas bentang alam sekitar 15,4 juta hektar atau sekitar 8 persen dari luas daratan. Sekitar 20 – 25 persen dari penduduk dunia bergantung pada air ekosistem karst, karena sifatnya penyedia air dan dimanfaatkan oleh penduduk di sekitarnya. Karst terdiri dari formasi batuan karbonat yang mudah tererosi, memiliki potensi besar dalam menyediakan sumber daya air melalui sungai bawah tanah dan akuifer karst. Sungai bawah tanah yang ada di kawasan karst terbentuk akibat proses erosi yang terjadi selama ribuan tahun, menciptakan saluran-saluran yang mengalirkan air di bawah permukaan tanah. Kompilasi data-data terkait kawasan karst sedikitnya teridentifikasi sekitar 1.852 gua, 187 sungai bawah tanah, 1.034 ponor (lubang yang memiliki aliran di tanah), 32 telaga karst, dan 839 mata air yang tersebar sekitar Pulau Jawa, Sulawesi, Kalimantan, dan Papua (Aziz, 2022). Dalam hal ini, ekosistem karst menyimpan potensi besar sebagai sumber air yang belum dimanfaatkan secara optimal (USGS, 2014). Pemanfaatan ekosistem karst ini sering kali terbatas pada aspek penyediaan

air minum tanpa memperhatikan potensi lain seperti pemanfaatan energi terbarukan dan ketahanan pangan.

Pemanfaatan sumber daya air di kawasan karst tidak hanya sebatas pada kebutuhan air bersih. Salah satu potensi yang dapat dikembangkan yaitu pemanfaatan energi terbarukan yang bersumber dari geotermal dan aliran air sungai bawah tanah. Penggunaan pembangkit listrik tenaga mikro-hidro yang mengandalkan aliran air di sungai bawah tanah dapat dijadikan sebagai solusi alternatif daerah penghasil energi bersih yang berkelanjutan (Zeleňáková et al. 2018). Oleh karena itu, sistem WEF *Nexus* mengintegrasikan sumber daya air, energi terbarukan, dan ketahanan pangan, dapat menjadi solusi yang efektif untuk mengelola sumber daya alam di kawasan karst menggunakan pendekatan yang lebih holistik.

Dalam konteks ketahanan pangan, sumber daya air yang tersedia di kawasan karst sangat penting untuk mendukung sistem irigasi yang berkelanjutan. Menurut hasil Survei Ekonomi Pertanian (SEP) 2024, sektor pertanian Indonesia masih sangat bergantung pada ketersediaan air, terutama dalam subsektor tanaman pangan seperti padi. Data menunjukkan bahwa pada Januari 2025, luas panen padi mencapai 0,42 juta hektare dengan produksi sekitar 2,16 juta ton gabah kering giling (GKG), setara dengan 1,24 juta ton beras untuk konsumsi. Selain itu, laporan BPS tahun 2024 juga menegaskan pentingnya pengelolaan air yang berkelanjutan dalam mendukung ketahanan pangan, terutama di tengah tantangan perubahan iklim dan kebutuhan untuk mencapai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB) di bidang pertanian. Menurut Kementerian Pertanian, pertumbuhan tanaman padi di beberapa daerah Indonesia terganggu akibat kekeringan yang terjadi pada bulan Juli hingga September 2023. Dampak kekeringan tertinggi terjadi pada bulan Agustus 2023 yang menyebabkan 23.451 hektar sawah terdampak kekeringan dan 6.964 hektar mengalami puso atau kegagalan panen (30% dari sawah yang terkena dampak kekeringan). Oleh karena itu, pengintegrasian sungai bawah tanah dalam sistem WEF *Nexus* memiliki

potensi besar dalam mendukung ketahanan pangan melalui sistem irigasi yang efisien dan berbasis sumber daya air yang terbarukan.

Studi mengenai pemanfaatan sungai bawah tanah khususnya pada kawasan karst di Indonesia masih terbilang sulit ditemukan terutama pemanfaatan yang diintegrasikan dengan energi terbarukan sebagai kawasan yang mandiri energi dengan menghasilkan energi yang ramah lingkungan, serta pemanfaatan sumber daya air sebagai sistem pengairan dalam menunjang ketahanan pangan. Meskipun demikian, terdapat beberapa beberapa literatur yang membahas tentang pemanfaatan sungai bawah tanah sebagai sumber potensi air dalam memenuhi kebutuhan air bersih pada kawasan karst yang sering mengalami kekeringan pada musim kemarau. Oleh karena itu, potensi sungai bawah tanah dapat dimanfaatkan sebagai penyedia air bersih di masa depan.

Penelitian ini akan berfokus pada kajian literatur yang ada mengenai pemanfaatan sungai bawah tanah pada kawasan karst yang sebagai bagian dari WEF *Nexus*, dengan mengintegrasikan tiga sektor utama yaitu pengoptimalan potensi sumber daya air, pemanfaatan energi terbarukan, dan ketahanan pangan dalam sebuah sistem yang saling mendukung dan berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disusun tentang studi literatur pemanfaatan sungai bawah tanah di kawasan karst, maka rumusan masalah yang menjadi fokus dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana potensi pemanfaatan sungai bawah tanah di kawasan karst yang dapat dioptimalkan untuk mendukung pengelolaan sumber daya air berkelanjutan di Indonesia?
2. Apa saja tantangan yang akan muncul dalam pengintegrasian konsep WEF *Nexus* yang melibatkan sumber daya air, energi terbarukan, dan ketahanan pangan di wilayah karst?

3. Apa saja dampak lingkungan, sosial, dan ekonomi yang akan timbul dari pengimplementasian konsep WEF *Nexus*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini sebagai upaya pemecahan masalah yang telah dijabarkan sebelumnya adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui potensi sungai bawah tanah di kawasan karst Indonesia yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber daya air berkelanjutan.
2. Mengidentifikasi tantangan teknis dan regulasi dalam pengintegrasian sungai bawah tanah dengan konsep WEF *Nexus*.
3. Mengidentifikasi dampak lingkungan, sosial, dan ekonomi dari implementasi sungai bawah tanah sebagai WEF *Nexus*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari kajian studi literatur pemanfaatan sungai bawah tanah ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi Akademisi/Pengembangan IPTEK
Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi di bidang ilmu pengetahuan sekaligus menambah wawasan tim pelaksana terkait isu kekeringan, sungai bawah tanah, energi terbarukan dan ketahanan pangan.
2. Bagi Masyarakat
Penelitian ini diharapkan dapat menjadi solusi dari ketersediaan air yang terbatas khususnya daerah yang sering mengalami kekeringan, kawasan penghasil energi bersih dengan pemanfaatan sumber daya air sebagai tenaga listrik, serta dapat dijadikan solusi ketahanan pangan di Indonesia.
3. Bagi Pemerintah
Penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangan pemikiran dan membantu pemerintah dalam mengatasi bencana krisis air dengan

memanfaatkan potensi sungai bawah tanah khususnya di kawasan karst, sebagai solusi dari ketergantungan terhadap energi fosil dengan memanfaatkan potensi air sungai sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), serta sebagai jawaban dari krisis pangan yang terjadi di Indonesia.

1.5 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup yang akan dijadikan sebagai batasan dalam penelitian pemanfaatan sungai bawah tanah ini adalah sebagai berikut:

1. Ruang Lingkup Konseptual

Penelitian ini dilakukan dengan Studi Literatur dengan pendekatan *Scoping Review* menggunakan kata kunci seperti ‘potensi sungai bawah tanah daerah karst’, ‘energi baru terbarukan mikro-hidro’, dan ‘ketahanan pangan di wilayah karst’ untuk mendapatkan referensi yang relevan dalam mendukung analisis penelitian. Sumber literatur jurnal terindeks oleh mesin pencari seperti, *Google Scholar*, *Web of Science*, *Scopus*, *Science Direct*, dan laporan penelitian yang membahas tentang pemanfaatan sungai bawah tanah yang dikaitkan dengan konsep WEF *Nexus* dengan berfokus pada tiga isu utama yaitu:

- a. Sumber daya air: Identifikasi potensi debit air sungai bawah tanah di wilayah karst Indonesia meliputi nama sungai, lokasi sungai dan debit yang dihasilkan sungai bawah tanah.
- b. Energi terbarukan: Pemanfaatan potensi air menggunakan konsep mikro-hidro dari aliran bawah tanah.
- c. Ketahanan pangan: Konsep pertanian bawah tanah dalam mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya air untuk irigasi yang dapat mendukung pertanian berkelanjutan.

2. Ruang Lingkup Objek dan Waktu Penelitian

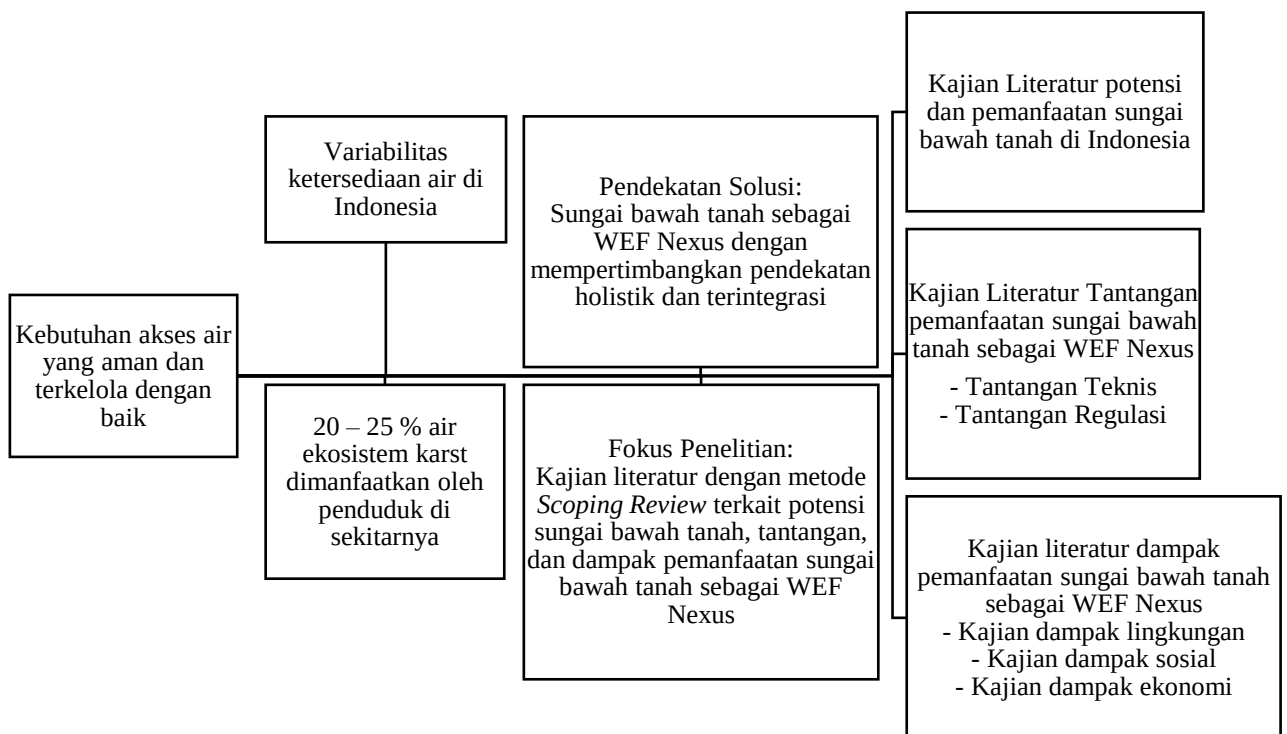
- a. Objek Penelitian: Fokus utama objek penelitian ini adalah literatur tentang informasi potensi sungai bawah tanah kawasan karst di Indonesia yang terpublikasi di dalam jurnal ilmiah seperti *Google*

Scholar, Web of Science, Scopus, Science Direct, dan laporan penelitian.

- b. Waktu Penelitian: Penelitian dilakukan dalam rentang waktu selama 4 bulan, meliputi tahap pengumpulan data sekunder, analisis literatur, dan penyusunan kesimpulan, dimulai pada Februari 2024 hingga Mei 2025.

1.6 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir merupakan acuan dasar dalam penyusunan penelitian ini agar penelitian dapat dilakukan secara sistematis. Kerangka berpikir pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Kerangka Berpikir

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kawasan karst

2.1.1 Hidrogeologi Kawasan Karst

Kawasan karst adalah daerah yang terdiri atas batuan kapur yang berpori sehingga air di permukaan tanah selalu merembes dan menghilang ke dalam tanah (Sugita, 2014). Wilayah karst biasanya berbukit-bukit dengan banyak gua. 25% Sebagian besar kawasan karst di Indonesia tersusun oleh batuan karbonat, dan hampir tidak ada yang tersusun oleh batuan lain seperti gipsum, batu garam, maupun batuan evaporit. Bentang lahan karst memiliki peran yang sangat penting bagi lingkungan. Bentang lahan karst menyediakan jasa ekosistem seperti air bersih, bahan-bahan material, dan menjadi agen pengendali perubahan iklim. Di Indonesia terdapat beberapa lahan karst yang cukup luas, antara lain berada di pulau Jawa, Sulawesi, Nusa Tenggara, dan Papua. Salah satu topografi karst yang terkenal di Indonesia adalah Gunung Sewu (Kusumayudha dalam Handayani, 2009).

Topografi karst merupakan bentang alam yang mudah dikenali oleh semua orang. Morfologinya sangat spesifik, yaitu terdiri dari serangkaian bukit bukit berbentuk kerucut, kubah, atau tiang. Diantara kubah-kubah tersebut biasanya dijumpai cekungan-cekungan seperti mangkuk yang kadang-kadang berisi air. Selain menyimpan air, karst juga menyediakan sumber daya alam lain, berupa flora dan fauna, batu gamping sebagai bahan galian golongan C. Potensi lain yang disediakan oleh karst untuk manusia yaitu pemandangan yang indah. Karst adalah laboratorium dan ekosistem yang perlu dijaga kelestariannya (Handayani, 2009). Contoh wilayah karst yang ada di Indonesia dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Kawasan Karst

Sumber : Widodo, A. (2024). Mengenang Gunung Kidul saat Masih Menjadi Dasar Lautan. <https://inibaru.id/tradisinesia/mengenang-gunungkidul-saat-masih-menjadi-dasar-lautan>

Kawasan karst identik dengan kondisi lingkungan yang kering. Kondisi permukaan karst memang kering dengan kondisi tanah yang banyak mengalami rekahan. Namun dibalik itu semua terdapat potensi sumber air tanah yang tinggi di kawasan karst. Air tanah yang ada di kawasan karst terkonsentrasi pada lorong-lorong atau retakan yang ada di bawah tanah. Salah satu keunggulan dari mata air karst adalah waktu tunda yang panjang antara hujan hingga keluar ke mata air sehingga beberapa mata air karst akan memiliki debit yang besar saat musim kemarau. Sistem hidrologi kawasan karst yang unik tersebut sangat dipengaruhi oleh porositas sekunder (aliran air tanah melalui celah-celah pelarutan) yang menyebabkan air masuk ke dalam sistem aliran bawah tanah yang dinamakan sungai bawah tanah (Cahyad&Zulqhisti, 2017). Goa Pindul merupakan salah satu contoh potensi sungai bawah tanah yang terletak di Gunung Kidul, Yogyakarta. Goa Pindul (Gambar 2.2) memiliki aliran sungai bawah tanah dimulai dari mulut goa hingga akhir goa dengan kedalaman mencapai 12 meter dengan sumber air bersih yang jernih dan batuan stlagmit berukuran besar.



Gambar 2.2. Sungai Bawah Tanah Karst

Sumber : Rizka, A (2022). Wisata Goa Pindul Yogyakarta, Menjelajahi Sungai di Bawah Tanah yang Eksotis.

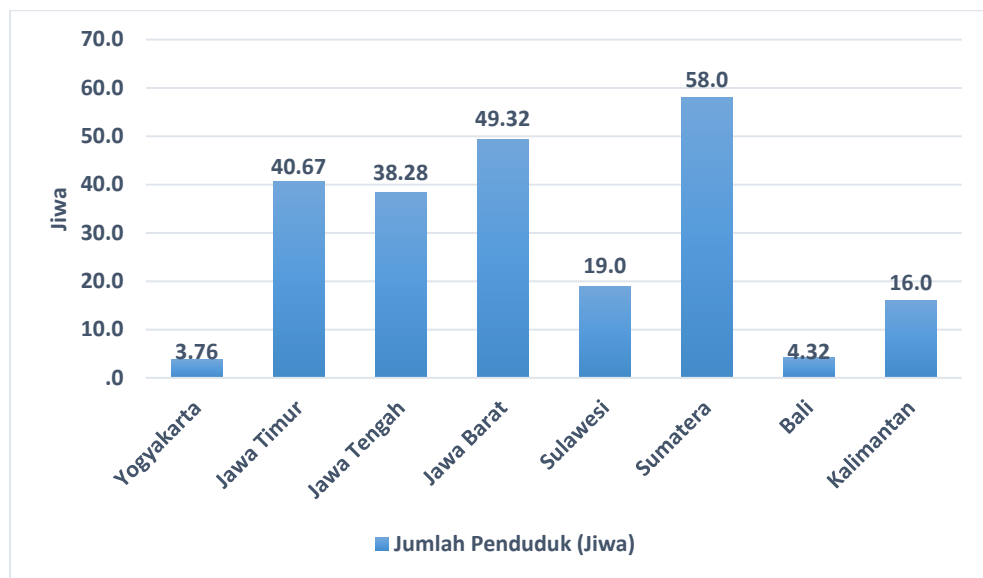
<https://www.inews.id/travel/destinasi/goa-pindul>

2.1.2 Demografi Kawasan Karst

Daerah karst di Indonesia merupakan wilayah yang memiliki karakteristik geologi unik dan menyimpan potensi sumber daya alam yang penting, terutama sebagai sumber air bersih. Namun, wilayah karst juga dikenal memiliki ekosistem yang rentan dan daya dukung lingkungan yang terbatas. Oleh karena itu, pemahaman tentang kondisi demografi penduduk serta kebutuhan konservasi yang terintegrasi menjadi sangat penting untuk menjaga keberlanjutan sumber daya air, energi, dan pangan di kawasan ini.

Berdasarkan data terbaru dari Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2023, jumlah penduduk di wilayah karst Indonesia yang tersebar di beberapa provinsi dan pulau utama cukup besar dan beragam. Di Daerah Istimewa Yogyakarta, yang memiliki wilayah karst signifikan seperti Gunungkidul, tercatat populasi sebanyak 3.761.870 jiwa. Jawa Timur, dengan wilayah karst luas, memiliki jumlah penduduk mencapai 40.665.696 jiwa. Jawa Tengah yang juga memiliki area karst luas, mencatat populasi

sekitar 38.280.887 jiwa. Jawa Barat, sebagai provinsi dengan jumlah penduduk terbesar di Pulau Jawa, memiliki penduduk sebanyak 49.316.712 jiwa. Pulau Sulawesi secara keseluruhan diperkirakan memiliki sekitar 19 juta jiwa, Pulau Sumatera sekitar 58 juta jiwa, Pulau Bali 4.317.404 jiwa, dan Pulau Kalimantan sekitar 16 juta jiwa (BPS, 2023). Pada Gambar 2.3. disajikan dalam bentuk diagram batang dari data demografi kependudukan pada kawasan karst.



Gambar 2.3. Grafik Demografi Kependudukan Daerah Karst Indonesia

Sumber : Badan Pusat Statistik (2023).

Data demografi ini menunjukkan bahwa wilayah karst di Indonesia tidak hanya memiliki keunikan geologi, tetapi juga menjadi tempat tinggal bagi populasi yang besar dan terus bertambah. Kepadatan penduduk yang tinggi, terutama di Jawa Barat, Jawa Timur, dan Jawa Tengah, memberikan tekanan yang signifikan terhadap sumber daya alam di wilayah karst, khususnya air tanah, lahan pertanian, dan energi. Kondisi geologi karst yang khas dengan sistem akuifer yang rentan terhadap pencemaran dan perubahan lingkungan menuntut pengelolaan sumber daya yang hati-hati dan berkelanjutan (Mongabay, 2016). Sistem akuifer karst yang kompleks dan

mudah terkontaminasi oleh aktivitas manusia menuntut pengelolaan yang hati-hati agar kualitas dan kuantitas air tetap terjaga (Mongabay, 2016; Suwarno, 2018). Selain itu, perubahan iklim yang menyebabkan fluktuasi ketersediaan air menambah tantangan dalam menjaga ketahanan pangan dan energi di wilayah ini (Zhou et al., 2019). Oleh karena itu, konservasi yang terintegrasi antara air, energi, dan pangan menjadi sangat penting untuk daerah karst. Pendekatan Water-Energy-Food (WEF) Nexus menawarkan kerangka kerja yang holistik untuk mengelola ketiga sektor ini secara simultan, dengan tujuan menjaga keseimbangan ekosistem sekaligus memenuhi kebutuhan sosial dan ekonomi masyarakat (Hussey & Pittock, 2012). Konservasi ini tidak hanya bertujuan untuk melindungi sumber daya alam dari eksploitasi berlebihan, tetapi juga untuk meningkatkan ketahanan masyarakat terhadap perubahan lingkungan dan tekanan demografis. Dengan melibatkan berbagai pemangku kepentingan dan mengintegrasikan kearifan lokal, pengelolaan sumber daya di daerah karst dapat lebih berkelanjutan dan adaptif terhadap tantangan masa depan (Watto & Kumar, 2016).

2.2 Sungai Bawah Tanah

Sungai bawah tanah merupakan aliran air yang mengalir di bawah permukaan tanah, umumnya melalui saluran yang terbentuk di dalam batuan karst atau batuan karbonat akibat proses erosi dan pelarutan kimia (Ford & Williams, 2007). Aliran sungai bawah tanah ini jauh lebih berkembang dari pada aliran sungai permukaan pada bentang lahan karst. Terbentuknya sungai bawah tanah tidak terlepas dari terbentuknya gua-gua karst. Palmer (2007) menyebutkan bahwa gua merupakan bentukan rongga kosong di bawah tanah hasil pelarutan batuan yang soluble dengan ukuran yang cukup besar sehingga memungkinkan manusia untuk bisa memasukinya. Keberadaan gua-gua karst yang saling terhubung satu sama lain menjadikannya sebagai sistem perguaan, yang kemudian sistem perguaan ini ketika terisi oleh air maka menghasilkan bentukan sungai bawah

tanah dan kadang-kadang keluar ke permukaan sebagai mata air (Kusumayudha dalam Handayani, 2009).

Sungai bawah tanah sangat berperan penting sebagai penyedia air bersih yang menjadi sumber utama air bersih masyarakat dan cadangan air alami dalam kapasitas yang besar terutama pada wilayah dengan sistem akuifer karst. Sekitar 25% populasi dunia bergantung pada akuifer karst sebagai sumber air utama (UNESCO, 2020). Kualitas air yang dihasilkan dari sungai bawah tanah kawasan karst cenderung memiliki kualitas yang baik karena penyaringannya melalui batuan (Gunn, 2004). Di daerah Gunung Sewu, terdapat 253 saluran sungai bawah tanah yang telah dipetakan Sir Mac Donald&Partners pada 1979, dan ada 42 saluran yang berpotensi sebagai sumber air bersih dengan rincian beberapa sungai (Tabel 2.1) yang telah masuk ke dalam sistem sungai bawah tanah adalah sebagai berikut:

Tabel 2.1 Sungai Bawah Tanah

No	Nama Sungai	Debit (L/detik)
1	Kali Tegoan	230 – 260
2	Kali Suci	160
3	Kali Serpeng	4
4	Kali Petoang	200
5	Kali Bribin	1500
6	Kali Seropan	400
7	Kali Baron	8000
8	Kali Ngobaran	150

Sumber : Haerudin (2007)

2.3 Definisi Water, Energy, Food (WEF) Nexus

Menurut Rasul&Sharma (2016), WEF *Nexus* merupakan pendekatan sistematis yang memungkinkan analisis keterkaitan antara sektor air, energi, dan pangan, sehingga kebijakan yang dihasilkan dapat lebih efektif dalam mengurangi risiko kelangkaan sumber daya. Sementara itu, Weitz, et al. (2017) menekankan bahwa pendekatan ini sangat relevan dalam menghadapi tantangan global seperti pertumbuhan populasi, perubahan iklim, dan urbanisasi, yang semakin memperumit interaksi antara ketiga sektor tersebut.

Menurut Zhang et al. (2018), pendekatan WEF *Nexus* bertujuan untuk mengintegrasikan pengelolaan ketiga sumber daya ini secara berkelanjutan sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas dalam pemanfaatannya. Oleh karena itu, pengelolaan yang terpisah antara ketiga sektor ini dapat mengakibatkan pemborosan sumber daya dan dampak negatif terhadap lingkungan.

Penerapan pendekatan WEF *Nexus* menuntut adanya kolaborasi lintas sektor dalam pengambilan keputusan. Dengan memahami hubungan antara air, energi, dan pangan, para pembuat kebijakan dapat merancang strategi yang lebih efektif dalam mendukung keberlanjutan. Al-Saidi dan Hussein (2021) menyoroti bahwa WEF *Nexus* berperan penting dalam meningkatkan ketahanan sistem terhadap gangguan eksternal, seperti perubahan iklim dan pandemi COVID-19, yang dapat memberikan dampak signifikan terhadap ketersediaan sumber daya.

Penelitian yang dilakukan oleh Botai, et al. (2021) menunjukkan bahwa implementasi WEF *Nexus* sangat relevan dalam mengatasi tantangan ketahanan pangan dan energi, terutama di wilayah dengan tingkat pertumbuhan populasi yang tinggi. Dengan memahami interaksi kompleks antara ketiga sektor ini, kebijakan yang lebih holistik dapat dirancang untuk memastikan ketersediaan sumber daya yang berkelanjutan. Namun, Hogeboom, et al. (2021) mengidentifikasi adanya tantangan dalam implementasi konsep ini, terutama dalam hal kesenjangan pengetahuan serta keterbatasan dalam aplikasi praktis di berbagai konteks.

Tantangan global seperti perubahan iklim, pertumbuhan populasi, dan urbanisasi semakin menuntut penerapan pendekatan *Water-Energy-Food* (WEF) *Nexus* dalam kebijakan pembangunan berkelanjutan. Perubahan iklim telah menyebabkan variabilitas curah hujan yang lebih tinggi, peningkatan suhu global, serta peningkatan kejadian ekstrem seperti kekeringan dan banjir, yang secara langsung berdampak pada ketersediaan air dan produktivitas pertanian (IPCC, 2014). Selain itu, pertumbuhan populasi yang pesat meningkatkan permintaan terhadap air, energi, dan pangan, sehingga

mempercepat eksploitasi sumber daya yang terbatas (FAO, 2017). Menurut Kurian (2017), tanpa adanya integrasi kebijakan berbasis WEF *Nexus*, ketidakseimbangan dalam pemanfaatan sumber daya dapat memperburuk krisis lingkungan dan sosial, terutama di wilayah dengan tekanan tinggi terhadap air dan lahan pertanian.

Oleh karena itu, WEF *Nexus* tidak hanya berfungsi sebagai kerangka analisis tetapi juga sebagai panduan strategis dalam perencanaan pembangunan berkelanjutan yang holistik. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat tercapai keseimbangan antara kebutuhan manusia akan air, energi, dan pangan serta perlindungan terhadap lingkungan.

2.4 Konsep Energi Baru Terbarukan

Energi baru terbarukan adalah energi yang dihasilkan dari sumber daya alam yang dapat diperbarui secara alami dan tidak akan habis dalam jangka waktu yang relatif singkat, seperti energi surya, angin, hidro, biomassa, dan geotermal (REN21, 2021). Menurut Daryanto (2007), sumber energi terbarukan dapat digunakan secara berkelanjutan karena memiliki siklus alami yang terus diperbaharui. Selain itu, energi terbarukan dianggap lebih ramah lingkungan dibandingkan bahan bakar fosil karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca yang signifikan serta tidak berkontribusi terhadap perubahan iklim dan pemanasan global (Kementerian ESDM, 2018).

Penggunaan energi terbarukan juga berperan dalam meningkatkan ketahanan energi global. Menurut Owusu&Asumadu-Sarkodie (2016), transisi ke energi terbarukan sangat penting dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, terutama dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan keberlanjutan energi. Salah satu potensi energi terbarukan yang belum banyak dimanfaatkan adalah aliran air sungai bawah tanah, yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik tenaga mikro-hidro guna menghasilkan energi bersih dan ramah lingkungan. Energi hidro sendiri telah terbukti sebagai salah satu sumber daya yang paling efisien dalam menghasilkan listrik berkelanjutan dengan dampak lingkungan yang

lebih rendah dibandingkan pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil (Kumar, et al. 2011).

Pemanfaatan energi baru terbarukan tidak hanya memberikan manfaat lingkungan, tetapi juga berkontribusi terhadap aspek sosial dan ekonomi. Menurut IRENA (2020), peningkatan kapasitas energi terbarukan dapat menciptakan lapangan kerja baru, meningkatkan akses terhadap energi di daerah terpencil, dan mengurangi biaya energi jangka panjang. Oleh karena itu, pengembangan energi terbarukan harus menjadi prioritas dalam strategi pembangunan berkelanjutan guna memastikan ketersediaan energi yang bersih, aman, dan terjangkau di masa depan (Letcher, 2019).

2.5 Konsep Ketahanan Pangan

Ketahanan Pangan merupakan sebuah sektor yang memegang peranan penting dalam keberlangsungan kehidupan suatu wilayah bahkan suatu negara, karena ketahanan pangan merupakan sumber bahan pokok bagi masyarakat. Ketahanan pangan tidak lepas dari sifat produksi komoditi pangan itu sendiri yang musiman dan fluktuasi karena sangat mudah dipengaruhi oleh iklim atau cuaca. Perilaku produksi yang sangat dipengaruhi iklim tersebut sangat mempengaruhi ketersediaan pangan. Perilaku produksi yang rentan terhadap perubahan iklim tersebut tidak dilengkapi dengan kebijakan pangan yang tangguh maka akan sangat merugikan, baik untuk produsen maupun konsumen, khususnya berpendapatan rendah.

Karakteristik komoditi pangan yang mudah rusak, lahan produksi petani yang terbatas, sarana dan prasarana pendukung pertanian yang kurang memadai dan lemahnya penanganan panen dan pasca panen mendorong Pemerintah untuk melakukan intervensi dengan mewujudkan ketahanan pangan di berbagai sektor unggulan produksi pertanian (Rumawas, et al. 2021).

Ada beberapa hal penting dalam mengatasi permasalahan pangan di Indonesia. Purwaningsih (2008) yaitu:

1. Ketersediaan pangan Negara berkewajiban untuk menjamin ketersediaan pangan dalam jumlah yang cukup (selain terjamin mutunya) bagi setiap warga negara, karena pada dasarnya setiap warga negara berhak atas pangan bagi keberlangsungan hidupnya. Penyediaan pangan dalam negeri harus diupayakan melalui produksi dalam negeri dari tahun ke tahun meningkat seiring dengan adanya pertumbuhan penduduk.
2. Kemandirian pangan suatu negara dalam memenuhi kebutuhan rakyatnya merupakan indikator penting yang harus diperhatikan, karena negara yang berdaulat penuh adalah yang tidak tergantung (dalam bidang politik, keamanan, ekonomi, dan sebagainya) pada negara lain.
3. Keterjangkauan pangan Keterjangkauan pangan atau aksesibilitas masyarakat (rumah tangga) terhadap bahan sangat ditentukan oleh daya beli, dan daya beli ini ditentukan oleh besarnya pendapatan dan harga komoditas pangan.
4. Konsumsi pangan Konsumsi pangan berkaitan dengan gizi yang cukup dan seimbang. Tingkat dan pola konsumsi pangan dan gizi dipengaruhi oleh kondisi ekonomi, sosial, dan budaya setempat

2.6 Aspek Keberlanjutan

Sustainable Development Goals (SDGs) merupakan komitmen global dan nasional dalam upaya menyejahterakan masyarakat. Secara lengkapnya, SDGs ini merupakan pembangunan yang menjaga peningkatan kesejahteraan ekonomi masyarakat secara berkesinambungan, pembangunan yang menjaga keberlanjutan kehidupan sosial masyarakat, pembangunan yang menjaga kualitas lingkungan hidup, serta pembangunan yang menjamin keadilan dan terlaksananya tata kelola yang mampu menjaga peningkatan kualitas hidup dari satu generasi ke generasi berikutnya.

Sustainable Development Goals (SDGs) ini memuat 17 tujuan dan sasaran global yang ditargetkan tercapai pada tahun 2030 dan dideklarasikan baik oleh negara maju maupun negara berkembang di Sidang Umum PBB

pada September 2015. Adapun salah satu dari 17 tujuan SDGs yang dapat dijadikan acuan dasar dalam aspek keberlanjutan dari penelitian ini adalah

1. *Sustainable Development Goals* (SDGs) poin 2 yaitu Tanpa Kelaparan dengan konsep ketahanan pangan yang akan diimplementasikan diharapkan dapat lingkungan yang terkendali, seperti sungai bawah tanah, untuk budidaya tanaman. Lingkungan karst memiliki potensi besar karena kestabilan suhu dan kelembapan yang mendukung pertanian hidroponik atau akuaponik.
2. *Sustainable Development Goals* (SDGs) poin 6 yaitu Air Bersih dan Sanitasi Layak dengan memanfaatkan sungai bawah tanah karst menyimpan cadangan air yang signifikan, meskipun rentan terhadap polusi. Pengelolaan berbasis *Integrated Water Resources Management* (IWRM) menjadi penting untuk menjamin kualitas dan kuantitas air.
3. *Sustainable Development Goals* (SDGs) poin 7 yaitu Energi Bersih dan Terjangkau yaitu pemanfaatan sungai bawah tanah pada kawasan karst berpotensi untuk pengembangan energi baru terbarukan melalui mikrohidro atau sistem *pumped-storage*. Sungai bawah tanah menawarkan lokasi alami untuk pengaturan aliran. Gao et al. (2021) dalam *Renewable Energy Journal* menyatakan bahwa energi dari sungai bawah tanah dapat menjadi solusi efisien untuk kebutuhan energi lokal dengan dampak lingkungan minimal.
4. *Sustainable Development Goals* (SDGs) poin 9 yaitu Industri, Inovasi, dan Infrastruktur yaitu inovasi dari pemanfaatan sungai bawah tanah sebagai *WEF Nexus* dengan menggabungkan antara sumber daya air, energi, dan ketahanan pangan melalui infrastruktur inovatif seperti sensor untuk memantau aliran dan kualitas air, serta teknologi canggih untuk energi dan pertanian.

2.7 Kebijakan dan Regulasi

Penetapan kawasan Karst sebagai kawasan lindung juga mengacu pada Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral – ESDM Nomor 1456.K/20/ MEM/2000 tentang pedoman pengelolaan kawasan Karst yang dapat dibagi menjadi tiga kelas kawasan Karst. Pertama, kawasan Karst kelas I yang memiliki satu atau lebih kriteria, seperti memiliki fungsi sebagai penyimpan air tanah permanen, memiliki gua-gua dan sungai bawah tanah aktif, terdapat gua-gua dan speleotom aktif dan mempunyai kandungan flora dan fauna khas. Kedua, kawasan Karst kelas II yang memiliki salah satu atau semua kriteria, seperti mempunyai fungsi pengimbuhan air bawah tanah, memiliki gua-gua kering dan speleotom sudah tidak aktif, tempat tinggal fauna yang memberi nilai dan manfaat ekonomi. Ketiga, kawasan Karst kelas tiga, dimana tidak memiliki kriteria kelas I maupun kelas II. Berdasarkan Kepmen ESDM itu, kawasan Karst kelas I diarahkan sebagai kawasan lindung, kawasan Karst kelas II dapat masuk kawasan lindung ataupun budi daya, setelah dilakukan penyelidikan geologi lingkungan. Sementara, kawasan Karst kelas III masuk kawasan budidaya.

Kawasan Karst juga memiliki fungsi hidrologi – tata air yang memiliki arti penting dalam mendukung keberlangsungan kehidupan makhluk hidup di atasnya. Kawasan Karst dinyatakan sebagai kawasan lindung geologi yang merupakan salah satu kawasan lindung nasional karena memiliki keunikan serta kekhasan dan memiliki payung hukum Peraturan Pemerintah Nomor 26 Tahun 2008 tentang RTRWN – Rencana Tata Ruang Wilayah Nasional, pasal 60, ayat (2), huruf f. Sementara, kawasan lindung geologi adalah kawasan yang memiliki fungsi utama melindungi lingkungan geologi. Lingkungan geologi adalah segenap kulit bumi yang mempengaruhi secara langsung terhadap kondisi dan keberadaan masyarakat.

Kebijakan dan regulasi yang digunakan lainnya adalah Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (UU PPLH): UU ini menjadi payung hukum utama dalam pengelolaan lingkungan di Indonesia, termasuk pembangunan di wilayah sensitif seperti

karst. Poin penting dari UU ini yang perlu diperhatikan adalah Amdal (Analisis Mengenai Dampak Lingkungan): Proyek pembangunan di wilayah karst akan memerlukan dokumen Amdal yang menyeluruh. Hal ini bertujuan untuk memastikan dampak lingkungan dari pembangunan tersebut telah dipertimbangkan secara menyeluruh serta perancangan langkah mitigasi dilakukan dalam pelaksanaannya.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur dengan pendekatan *scoping review*, yang bertujuan untuk memetakan konsep utama, jenis penelitian, serta bukti yang tersedia dalam pemanfaatan sungai bawah tanah di kawasan karst dalam perspektif *Water-Energy-Food (WEF) Nexus*.

Berikut merupakan penjelasan terkait tahapan penelitian yang dilakukan. Adapun diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.4.

3.1.1 Survey Pendahuluan dan Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan survei pendahuluan dengan mengumpulkan referensi awal yang membahas potensi sungai bawah tanah yang ada di Indonesia, tantangan dalam pemanfaatan sungai bawah tanah, dampak lingkungan sosial dan ekonomi, serta relevansinya dalam konsep *WEF-Nexus*. Studi literatur dilakukan dengan menelusuri berbagai sumber seperti jurnal ilmiah, laporan teknis, dan kebijakan pemerintah terkait. Tujuan dari tahap ini adalah untuk memahami cakupan penelitian yang telah ada, mengidentifikasi kesenjangan penelitian, serta menyusun pertanyaan penelitian yang akan menjadi pedoman dalam kajian ini.

3.1.2 Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan Pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur yang mencakup berbagai sumber terpercaya, seperti *Google Scholar*, *Sciencedirect*, *Web of Science*, *Scopus*, serta dokumen dari organisasi lembaga penelitian, lembaga pemerintahan, organisasi internasional, dan organisasi lain dipertimbangkan. Data yang dikumpulkan difokuskan pada

penelitian-penelitian terdahulu yang relevan dengan pemanfaatan sungai bawah tanah di kawasan karst. Selain itu, referensi yang dipilih harus memenuhi kriteria tertentu, seperti membahas aspek sumber daya air, energi baru terbarukan, dan ketahanan pangan dalam konteks keberlanjutan. Penyaringan data dilakukan secara sistematis agar hanya literatur yang relevan yang digunakan dalam penelitian ini.

Adapun data yang dianalisis dalam penelitian ini adalah:

1. Kajian Literatur Potensi Sungai Bawah Tanah di Indonesia

Kajian literatur ini mencakup lokasi sungai bawah tanah khususnya pada kawasan karst di Indonesia, identifikasi debit air yang dihasilkan pada sungai.

2. Identifikasi Tantangan Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah

Tantangan ini mencakup aspek teknis dan regulasi. Dari sisi teknis, keterbatasan akses dan infrastruktur menjadi kendala utama dalam eksploitasi sumber daya air bawah tanah. Regulasi yang belum spesifik mengenai pemanfaatan sungai bawah tanah juga menjadi tantangan tersendiri. Oleh karena itu, dalam tahap ini dilakukan kajian terhadap berbagai hambatan yang dapat menghambat implementasi konsep WEF *Nexus* di kawasan karst.

3. Identifikasi Dampak Implementasi Konsep WEF *Nexus*

Identifikasi ini dilakukan untuk tiga elemen utama yaitu dampak lingkungan, sosial, dan ekonomi dari penerapan WEF *Nexus* dalam pemanfaatan sungai bawah tanah. Dampak lingkungan yang dikaji meliputi potensi pencemaran air, perubahan ekosistem bawah

tanah, dan keberlanjutan sumber daya air. Dampak sosial mencakup penerimaan masyarakat terhadap program ini serta bagaimana program ini dapat meningkatkan kesejahteraan mereka. Dari sisi ekonomi, analisis dilakukan untuk melihat potensi pengembangan energi mikrohidro serta efektivitas irigasi dalam mendukung ketahanan pangan.

3.1.3 Analisis Data dan Perbandingan Studi Literatur

Pada tahap ini, data yang telah dikumpulkan akan dianalisis dan dibandingkan dengan studi literatur yang ada. Klasifikasi data dilakukan untuk mengelompokkan informasi berdasarkan tema utama, seperti potensi, tantangan, dan dampak pemanfaatan sungai bawah tanah.

3.1.4 Analisis Data dan Perbandingan Studi Literatur

Pada tahap ini, data yang telah dikumpulkan akan dianalisis dan dibandingkan dengan studi literatur yang ada. Klasifikasi data dilakukan untuk mengelompokkan informasi berdasarkan tema utama, seperti potensi, tantangan, dan dampak pemanfaatan sungai bawah tanah.

3.1.5 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan studi literatur, penelitian ini merumuskan kesimpulan mengenai potensi pemanfaatan sungai bawah tanah sebagai bagian dari WEF Nexus, tantangan yang dihadapi, dampak yang akan timbul pada pengintegrasian pemanfaatan sungai bawah tanah dalam perspektif konsep WEF Nexus serta rekomendasi teknis. Kesimpulan yang dihasilkan diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengambil kebijakan dalam mengelola sumber daya air bawah tanah secara lebih efisien dan

berkelanjutan. Selain itu, rekomendasi diberikan dalam bentuk strategi yang dapat diterapkan dalam perencanaan pemanfaatan sungai bawah tanah, baik untuk pengelolaan air bersih, energi mikrohidro, maupun sistem irigasi untuk ketahanan pangan.

3.2 Tahapan Pelaksanaan *Scoping Review*

Penelitian ini menggunakan metode *scoping review* yaitu sebuah metode penelitian yang dirancang untuk memetakan konsep-konsep utama, jenis penelitian, serta bukti yang tersedia di suatu bidang tertentu. Dengan menggunakan *scoping review* dapat memberikan gambaran komprehensif dan luas mengenai topik yang sedang diteliti, termasuk mengidentifikasi kesenjangan penelitian (*research gaps*) di dalam literatur. Berbeda dengan *systematic review* yang fokus pada mengevaluasi dan mengkritisi literatur dengan pendekatan yang lebih mendalam, *scoping review* lebih bersifat eksploratif, memberikan kerangka kerja yang jelas terkait dengan ruang lingkup dan tingkat perkembangan penelitian di suatu bidang tanpa melakukan penilaian kualitas secara mendetail terhadap setiap studi yang direview (Arksey&O'Malley, 2005). Metode ini sangat bermanfaat ketika suatu topik penelitian masih baru, luas, atau belum terlalu banyak diteliti sebelumnya, sehingga *scoping review* dapat membantu merumuskan konsep-konsep dasar, identifikasi bukti awal, dan penentuan kebutuhan penelitian selanjutnya (Munn et al. 2018).

3.2.1 Tahapan *Scoping Review*

Dalam melaksanakan studi literatur menggunakan metode *scoping review* diperlukan beberapa tahapan diantaranya adalah:

1. Merumuskan Pertanyaan Penelitian (*Formulating the Research Questions*)

Tahap pertama dalam *scoping review* adalah merumuskan pertanyaan penelitian. Pertanyaan penelitian ini berfungsi sebagai panduan untuk menyusun literatur yang akan

dievaluasi (Higgins&Green, 2011). Pertanyaan yang diajukan dalam penelitian ini adalah:

- Bagaimana potensi sungai bawah tanah di Indonesia?
- Apa saja tantangan teknis dan regulasi dalam implementasi WEF *Nexus* di kawasan karst Indonesia?
- Apa saja dampak lingkungan, sosial, dan ekonomi yang ditimbulkan dalam WEF *Nexus* di kawasan karst Indonesia?

2. Menyusun Protokol *Scoping Review*

Protokol merupakan dokumen rencana penelitian yang merinci strategi pencarian, kriteria inklusi dan eksklusi. Protokol ini penting untuk menjaga transparansi dan replikasi penelitian (Moher et al. 2009). Protokol yang digunakan mencakup:

- Kajian literatur potensi sungai bawah tanah di kawasan karst Indonesia
- Identifikasi kajian literatur tantangan teknis dan regulasi pemanfaatan sungai bawah tanah yang dikatkan dengan konsep WEF-*Nexus*
- Identifikasi kajian literatur dampak lingkungan dari pemanfaatan sungai bawah tanah yang dikatkan dengan konsep WEF-*Nexus*

3. Penyaringan Studi (*Screening Studies*)

Setelah pencarian literatur dilakukan, langkah berikutnya adalah penyaringan studi. Studi-studi yang ditemukan kemudian disaring berdasarkan judul dan abstrak untuk memastikan bahwa hanya studi yang relevan

dengan topik yang dimasukkan dalam analisis selanjutnya. (Petticrew&Roberts, 2006). Tahapan penyaringan:

- Tahap 1: Penyaringan berdasarkan judul dan abstrak untuk mengecualikan penelitian yang tidak relevan. Seperti Literatur yang hanya menyinggung sungai bawah tanah, kekeringan di kawasan karst, dan teknologi dalam pemanfaatan sungai bawah tanah akan dikeluarkan karena tidak berhubungan langsung dengan tujuan penelitian.
- Tahap 2: Tinjauan penuh terhadap teks studi yang relevan untuk memastikan bahwa penelitian memenuhi kriteria inklusi.

4. Analisis dan Interpretasi

Setelah semua data dikumpulkan, hasil dari *scoping review* ini akan dianalisis dan disimpulkan untuk memberikan wawasan tentang potensi sungai bawah tanah, konsep implementasi WEF *Nexus*, serta tantangan dan dampak yang akan timbul dalam pengimplementasian WEF-*Nexus*. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan rekomendasi kebijakan yang lebih baik pada operasional kawasan sungai bawah tanah yang terintegrasi di Indonesia.

3.2.2 Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui studi literatur dengan menggunakan pendekatan *scoping review*. Data yang digunakan bersumber dari berbagai jurnal ilmiah yang berasal dari *Google Scholar*, *Sciencedirect*, *Scopus*, Laporan Teknis dan Dokumen Pemerintah, Regulasi dan Kebijakan, serta Laporan Organisasi Internasional yang relevan dengan kajian pemanfaatan sungai bawah tanah dalam konsep WEF-*Nexus*.

Adapun karakteristik dari setiap jenis literatur yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Karakteristik Jenis Literatur

No	Sumber Literatur	Karakteristik
1	Jurnal Ilmiah	Jurnal akademik yang diterbitkan secara berkala dan telah melalui proses <i>peer-review</i> , sehingga keakuratan hasil penelitiannya terjamin. Jurnal ini sering terindeks di <i>database</i> seperti <i>Scopus</i> , <i>Web of Science</i> , atau SINTA dan menyediakan hasil penelitian terbaru yang relevan dengan bidang kajian.
2	<i>Science Direct</i>	Basis data literatur ilmiah yang diterbitkan oleh Elsevier, literatur ini mencakup berbagai disiplin ilmu termasuk lingkungan, energi, dan ketahanan pangan. <i>ScienceDirect</i> menyediakan akses ke artikel jurnal berkualitas tinggi yang telah melewati proses review ketat. Basis data jurnal ilmiah dari Elsevier yang mencakup berbagai disiplin ilmu, termasuk hidrogeologi, energi terbarukan, dan ketahanan pangan.
3	<i>Google Scholar</i>	Platform pencari akademik yang memberikan akses luas ke berbagai jurnal, artikel ilmiah, buku, tesis, dan prosiding konferensi dari berbagai sumber. Meskipun cakupannya luas, perlu seleksi terhadap kualitas dan kredibilitas sumber yang digunakan.

4	Laporan Teknis dan Dokumen Pemerintah	Dokumen resmi yang diterbitkan oleh lembaga pemerintah, badan penelitian, atau organisasi internasional. Laporan ini biasanya mencakup hasil kajian teknis, kebijakan, dan regulasi terkait pemanfaatan sumber daya alam serta strategi keberlanjutan. Contohnya adalah laporan dari BPS, Kementerian ESDM, atau KLHK.
5	Regulasi dan Kebijakan	Undang-undang, peraturan, dan kebijakan yang dikeluarkan oleh pemerintah atau lembaga internasional. Sumber ini penting untuk memahami aspek hukum dan peraturan dalam pengelolaan sumber daya air, energi, dan lingkungan. Contoh regulasi yang digunakan adalah UU No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
6	Laporan Organisasi Internasional	Publikasi dari badan internasional seperti UNESCO, UN-Water, World Bank, dan IUCN, yang membahas isu-isu global terkait pengelolaan sumber daya air, energi terbarukan, dan ketahanan pangan. Sumber ini dapat memberikan perspektif global dan praktik terbaik dalam implementasi konsep WEF- <i>Nexus</i> .

Penyusunan literatur terhadap jurnal disusun berdasarkan kata kunci, judul dan abstrak yang kemudian disesuaikan dengan tujuan penelitian. Penelusuran literatur ini dilakukan dengan menggunakan kata kunci yang berkaitan dengan judul penelitian ini, yaitu: "Potensi Sungai Bawah Tanah Kawasan karst", "Energi Baru Terbarukan Mikro-hidro", "Ketahanan Pangan", dan "*Water-Energy-Food Nexus*". Kemudian pengumpulan data diklasifikasikan

berdasarkan beberapa kategori terkait potensi sungai bawah tanah khususnya di kawasan karst yang juga membahas tentang pemanfaatan sungai bawah tanah sebagai potensi ketersediaan air, tantangan dalam mengimplementasikan pemanfaatan sungai bawah tanah, serta dampak yang ditimbulkan. Informasi yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini berasal dari seluruh literatur yang ada dan relevan dengan topik pembahasan pada penelitian, literatur yang diambil tidak terbatas pada rentang waktu tertentu.

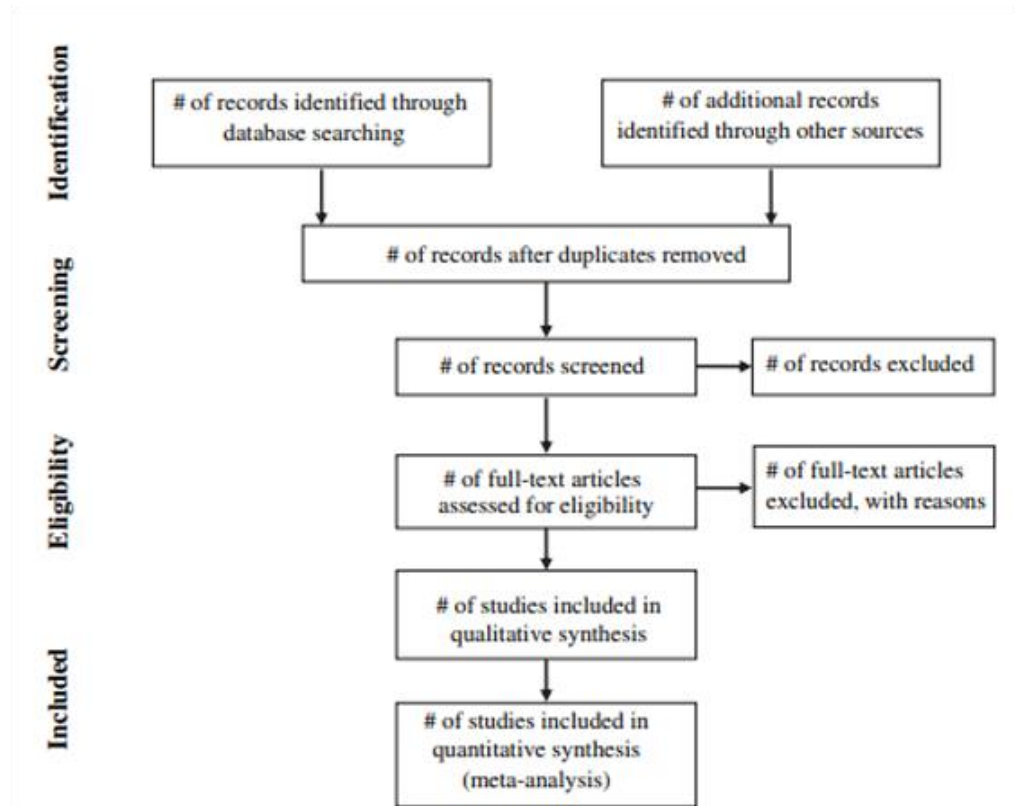
3.2.3 Metode Seleksi Data

Pada tahap seleksi data literatur, metode yang digunakan yaitu PRISMA (*The Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses*), seperti yang dilakukan oleh Zanobini et al. (Zanobini et al. 2020), Mythen (Mythen 2020), Pham et al. (Pham et al. 2014), Widiasih et al. (Widiasih et al. 2020) dan Fleming (Fleming n.d.). Terdapat beberapa pendapat berkenaan dengan PRISMA yaitu Liberati (Liberati et al. 2009), Yannascoli et al. (Yannascoli et al. 2013), Sarkis-Onofre et al. (Sarkis-Onofre et al. 2021) seperti yang terlihat di bawah ini

- Liberati: "The PRISMA statement for reporting systematic reviews..."
- Yannascoli et al.: "The most recent guidelines on conducting and reporting systematic reviews are the PRISMA statement."
- Sarkis-Onofre et al.: "This scoping review was reported according to the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses."

Adapun PRISMA sendiri memiliki protokol/tahapan tersendiri seperti yang terlihat pada flow diagram usulan Liberati di Gambar 3.2 dan flow diagram yang telah dikembangkan hingga sekarang sudah mencapai versi 2020.

- *Identification*: Dalam proses ini, dilakukan identifikasi hasil pencarian sumber literatur yang telah didapatkan sebelumnya di langkah ke-2 *Scoping Review*, yang bisa didapatkan melalui google scholar, science direct, scopus dan lain sebagainya dan tentunya pencarian ini sudah disesuaikan dengan judul penelitian, abstrak dan kata kunci yang berdasar pada pertanyaan penelitian. Dilakukan pendataan dari tiap sumber yang telah didapatkan serta juga dilakukan pengecekan apakah ada yang sama (duplicate).
- *Screening*: Tahap ini menunjukkan adanya penyaringan atau pemilihan sumber literatur yang sesuai dengan tujuan penelitian, topik maupun pertanyaan penelitian. Sebelumnya ditentukan dahulu kriteria inklusi dan eksklusi. Sumber literatur yang ternyata memenuhi syarat kriteria eksklusi akan dikeluarkan.
- *Included*: Semua sumber literatur yang sudah melewati tahap penyaringan atau pemilihan sumber literatur kemudian akan dianalisis lebih lanjut.

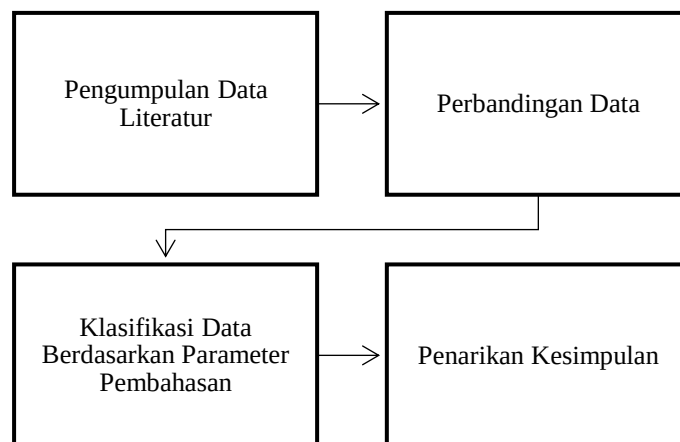


Gambar 3.1. PRISMA *Flow Diagram* (Liberti et al. 2009)

3.2.4 Metode Analisis Data

Metode analisis data dilakukan dengan cara *scoping review* karena pemanfaatan sungai bawah tanah sebagai sumber air bersih, energi terbarukan, dan ketahanan pangan masih belum banyak penelitian yang membahas terkait implementasiannya. Oleh karena itu metode *scoping review* dapat digunakan dalam penelitian ini karena memungkinkan eksplorasi luas terhadap literatur yang ada tanpa terbatas pada pertanyaan penelitian yang terlalu spesifik. Hal ini memungkinkan peneliti untuk memahami berbagai aspek penting dari pendekatan konsep WEF *Nexus* sebagai penyedia air, energi, dan ketahanan pangan seperti tantangan teknis, regulasi, dampak lingkungan, dan potensi ekonomi (Peters et al. 2015).

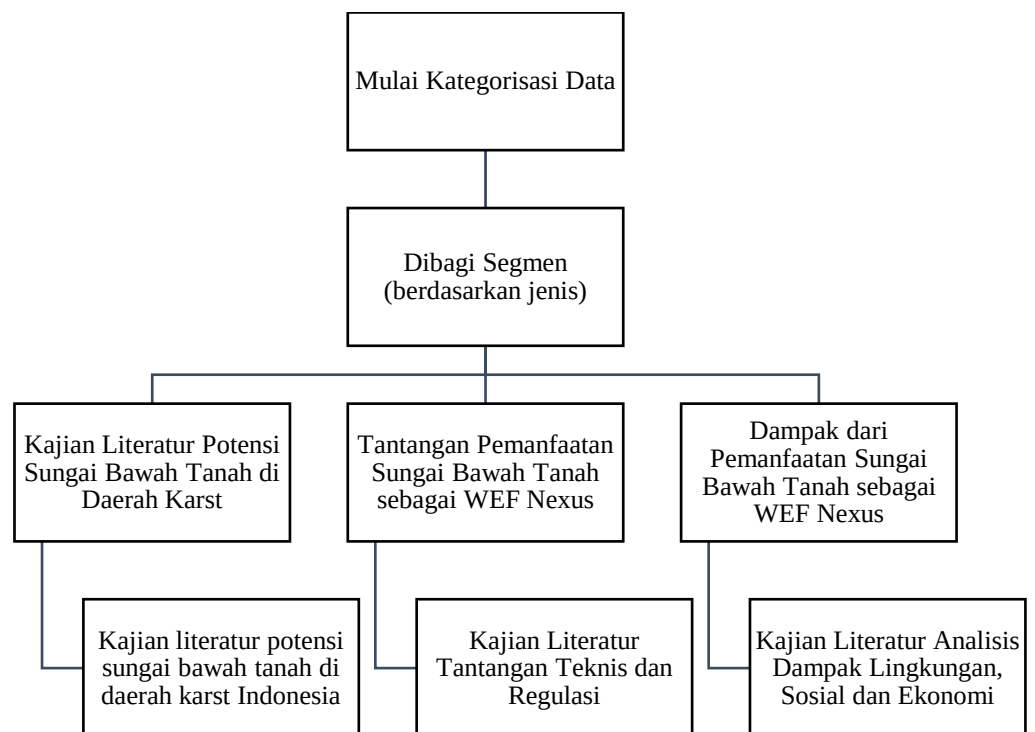
Pada tahapan analisis, data literatur yang sudah terkumpul akan dibandingkan antara pendapat para peneliti dari berbagai jurnal, kemudian pendapat tersebut diklasifikasikan berdasarkan parameter yang menjadi pembahasan dalam penelitian ini. Adapun parameter yang menjadi fokus utama dalam penelitian ini adalah pemetaan potensi sungai bawah tanah, tantangan dan analisis dampak pemanfaatan sungai bawah tanah dengan konsep *WEF-Nexus*. Data yang sudah diklasifikasi berdasarkan parameter akan disajikan dalam tabel hasil literatur sehingga data tersebut dapat disimpulkan berdasarkan literatur yang sudah diklasifikasikan. Diagram alir pelaksanaan metode analisis data dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.2. Diagram Alir Metode Analisis Data

Adapun proses klasifikasi data dilakukan berdasarkan topik utama yang relevan dengan kajian pemanfaatan sungai bawah tanah di kawasan karst sebagai *WEF-Nexus*. Proses klasifikasi dilakukan untuk menyusun kerangka analisis yang sistematis, mencakup pemetaan potensi sungai bawah tanah, tantangan implementasi, serta dampak lingkungan yang ditimbulkan. Klasifikasi data ini bertujuan

untuk mengidentifikasi keterkaitan antarvariabel yang berkontribusi terhadap pemanfaatan sungai bawah tanah dalam mendukung ketahanan air, energi baru terbarukan, dan pangan. Dengan pendekatan ini, analisis yang dilakukan dapat lebih terarah, komprehensif, serta menghasilkan temuan yang lebih valid dalam mendukung pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan. Berikut merupakan diagram alir (Gambar 3.4) yang digunakan untuk melakukan kategorisasi data dan analisis tematik.

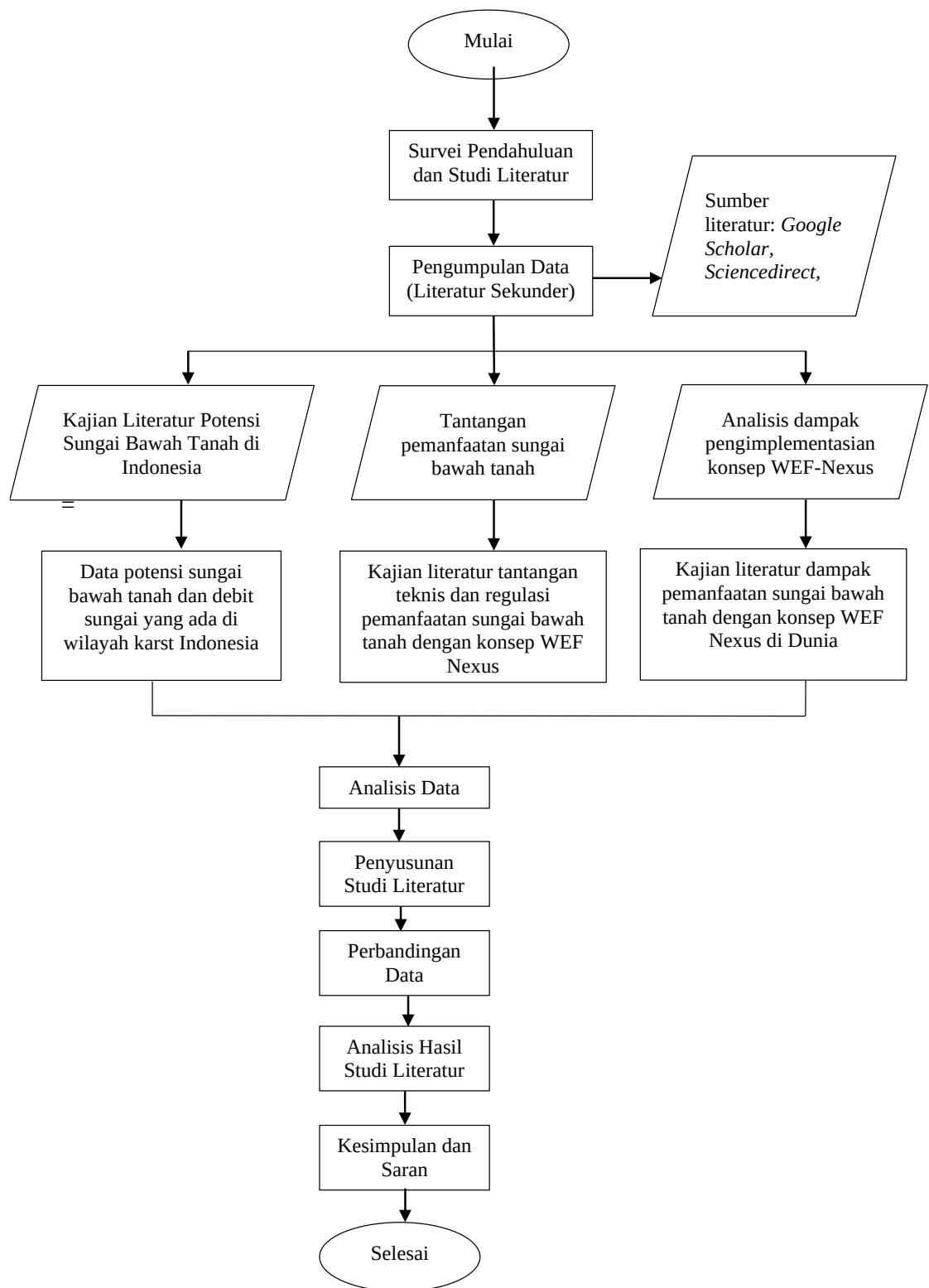


Gambar 3.3. Kategorisasi Data dan Analisis Tematik

3.3 Pola Pembahasan

Adapun pola pembahasan yang akan dibahas pada bab selanjutnya yaitu:

1. Identifikasi potensi sumber daya air sungai bawah tanah.
2. Eksplorasi pemanfaatan energi baru terbarukan dari sungai bawah tanah.
3. Tantangan pembangunan bendungan sungai bawah tanah di masa depan.
4. Analisis dampak lingkungan dari pembangunan bendungan sungai bawah tana



Gambar 3.4. Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Potensi Sungai Bawah Tanah Kawasan karst Indonesia

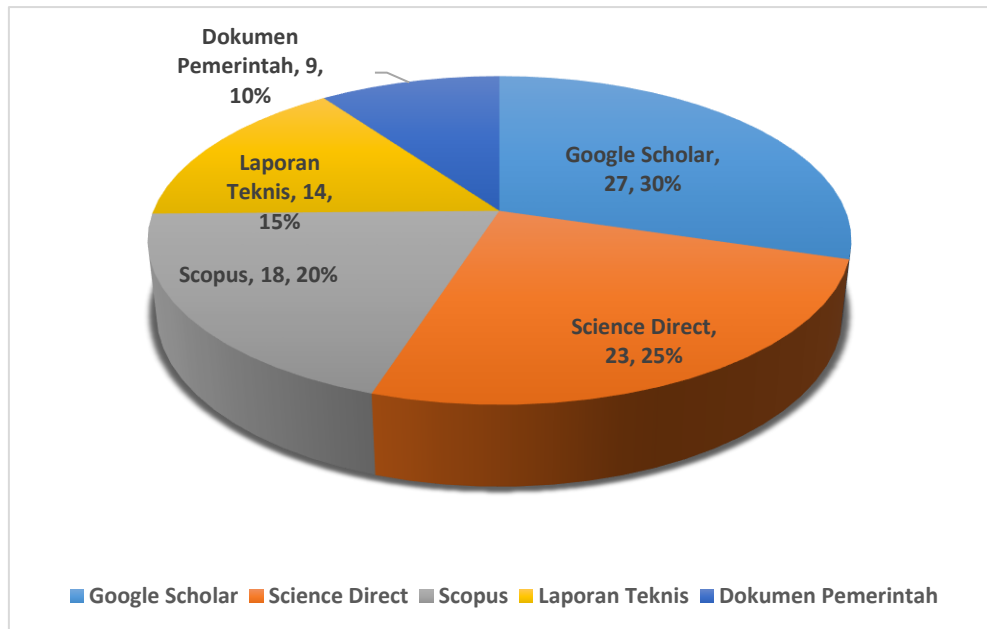
Hasil dari kajian literatur potensi sungai bawah tanah di kawasan karst Indonesia didapatkan data nama sungai, lokasi sungai, serta potensi debit air yang dihasilkan (jika ada) berdasarkan jurnal ilmiah yang didapatkan. Kajian literatur dilakukan dengan menggunakan kata kunci “Sungai bawah tanah di kawasan karst Indonesia” untuk literatur secara umum, adapun sumber literatur berbahasa Inggris menggunakan kata kunci “*Groundwater River*”, “*Subterranean Stream*”, “*Water-Energy-Food Nexus*”, sedangkan kata kunci untuk pencarian di Google Scholar menggunakan metode Boolean Operator `site:sciencedirect.com` “*Karst Aquifer Management*”.

Pada tahap eksplorasi yang dilakukan oleh peneliti dipilih berdasarkan judul, abstrak, dan kata kunci pada seluruh literatur yang dihasilkan dari hasil penelusuran berdasarkan kriteria kelayakan yang telah didefinisikan sebelumnya. Berdasarkan Gambar 4.2. didapatkan data potensi sungai bawah tanah di Indonesia terdapat 68 jurnal ilmiah berasal dari *Google Scholar* (`site:sciencedirect`) dan *Scopus*. Sebanyak 14 literatur yang berasal dari Laporan Teknis dan Dokumen Pemerintah dan 9 literatur yang berasal dari artikel ilmiah yang membahas tentang potensi sungai bawah tanah di Indonesia. Data literatur yang secara lengkap disajikan di dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Rincian Data Literatur Potensi Sungai Bawah Tanah

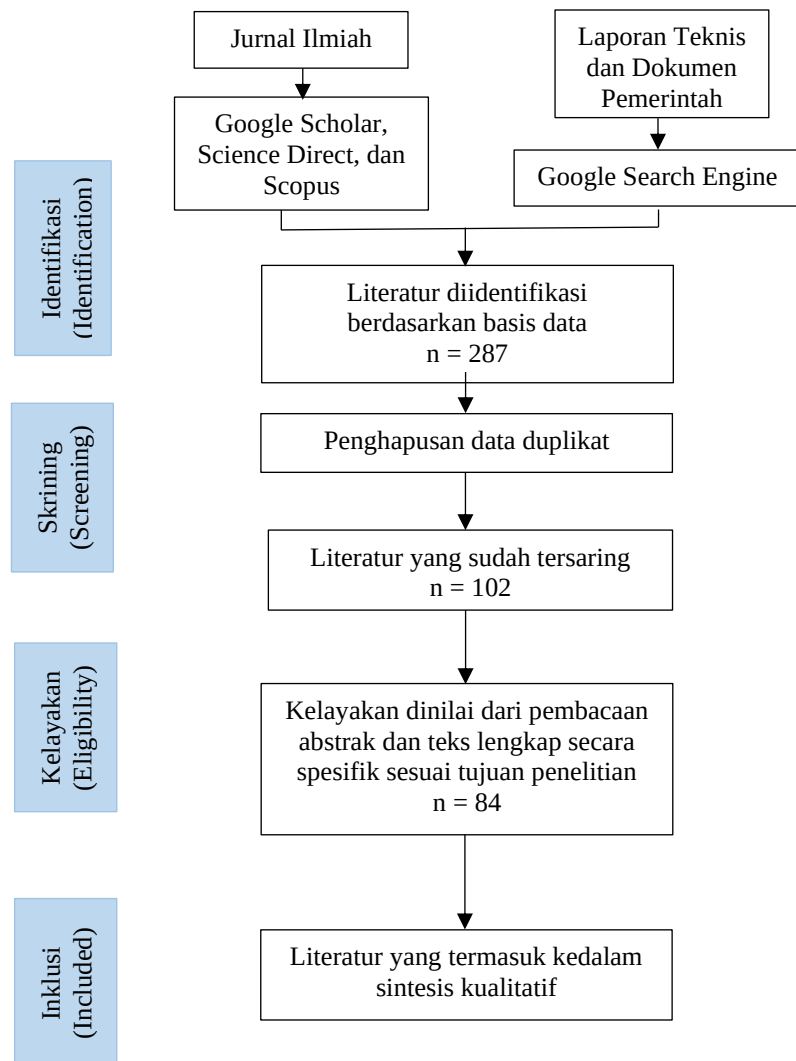
No	Sumber Literatur	Jumlah Literatur
1	Google Scholar	27
2	Science Direct	23
3	Scopus	18
4	Laporan Teknis	14
5	Dokumen Pemerintah	9

Data diatas kemudian disajikan dalam bentuk diagram sebagai berikut.



Gambar 4.1. Data Literatur Potensi Sungai Bawah Tanah Daerah Karst Indonesia

Pada tahap seleksi data didapatkan literatur yang digunakan, berikut merupakan PRISMA Flow Diagram untuk literatur potensi sungai bawah tanah wilayah karst Indonesia.



Gambar 4.2. PRISMA Flow Diagram Seleksi Data Literatur Potensi Sungai Bawah Tanah

Sumber literatur yang terpilih sesuai dengan tujuan penelitian sejumlah 84 kajian literatur kemudian diekstrak dengan cara membuat tabel data potensi sungai bawah tanah di Indonesia. Pada Tabel 4.2. secara lengkap disajikan ekstraksi data berisi nama sungai bawah tanah, lokasi sungai, debit

air yang dihasilkan dan sumber referensi yang didapatkan dari hasil kajian literatur.

Tabel 4.2. Ekstraksi Data Potensi Sungai Bawah Tanah Kawasan karst Indonesia

No .	Nama Sungai Bawah Tanah	Lokasi Sungai	Debit Air	Sumber Referensi
1	Sungai Bribin	Gunungkidul, Yogyakarta	70 – 120 m ³ /detik; 1 m ³ /detik	(Suwarno, 2018; Wardhana et al., 2014; Dani, 2011; BPDASHL-SOP, 2013; Faizal, 2016; Kemen PUPR, 2015)
2	Sungai Pulejajar	Gunungkidul, Yogyakarta	4 m ³ /detik; 0,05 m ³ /detik; 0,036 m ³ /detik	(Arrasy, 2017; Acintyacunyata, 2012; KOMBI, 2015; Dinas ESDM Gunungkidul, 2022)
3	Sungai Pindul	Gunungkidul, Yogyakarta	50 – 80 m ³ /detik	Budhi et al., 2016; Agniy, 2016; Cahyadi, 2014; Sismanto et al., 2003; Adji, 2005; Haryono and Day, 2004; Arrasy, 2017
4	Sungai Kalisuci	Gunungkidul, Yogyakarta	20 – 40 m ³ /detik	Mulyono, 2019; Dinas Pariwisata Gunungkidul, 2023;
5	Sungai Jomblang	Gunungkidul, Yogyakarta	5 – 15 m ³ /detik	Utomo, 2007; Sari et al., 2020
6	Sungai Grubug	Gunungkidul, Yogyakarta	3 – 10 m ³ /detik	Taat et al., 2018
7	Sungai Baron	Gunungkidul, Yogyakarta	20 m ³ /detik; 800 m ³ /detik	BBWS Serayu Opak, 2019 Pemkab Gunungkidul, 2025; Marjono, 2025; Handayani, 2025; SiMANTU, 2025
9	Sungai Cerme	Bantul, Yogyakarta	10 – 30 m ³ /detik	Haryono, 2001; Ali et al., 2021; MacDonald

				et al, 1984; Nugraha, 2017
10	Sungai Luweng Jaran	Pacitan, Jawa Timur	15 – 60 m ³ /detik;	Sulistyo, 2008; Rahmawati, 2020
11	Sungai Goa Gong	Pacitan, Jawa Timur	1 – 3 m ³ /detik	Dinas Pariwisata Pacitan, 2021; Kasmaningrum, 2008; Haryono, 2001; Aditya&Soewaeli, 2014
12	Sungai Goa Umbul Tuk	Blitar Selatan, Jawa Timur	1 m ³ /detik; 1,7 m ³ /detik; 3,6 m ³ /detik	Rengganis, 2016; Aditya&Soewaeli, 2014; Yusuf, A., 2018
13	Sungai Bawah Tanah Gua Suruh	Desa Pucung, Kecamatan Eromoko, Kabupaten Wonogiri	8 liter/detik (yang termanfaatkan 4 liter/detik)	Agus et al., 2015
14	Sungai Bawah Tanah di Blora	Desa Kedungwungu, Kecamatan Todanan, Blora	Potensi aliran sungai bawah tanah	Bloranews.com
15	Potensi Air Tanah Bebas	Cekungan airtanah Indramayu	0.754 m ³ /detik (65,213.8 m ³ /hari)	Maya, 2018
16	Potensi Air Tanah Tertekan	Cekungan airtanah Indramayu	0.920 m ³ /detik (79,557.1 m ³ /hari)	BRIN, 2018
17	Sungai Pongo	Sulawesi Tenggara	Belum ada data debit	Simantu, 2015; Rubiyanto, 2019; Yusuf et al., 2018; Aditya&Soewaeli, 2014; Kartini&Sulaeman, 2020
18	Sungai Mokoau	Sulawesi Tenggara	0,68–0,74 liter/detik	Munawir, 2017; Angela, M. 2024; Simantu, 2015
19	Sungai Maros	Maros, Sulawesi Selatan	100 – 200 m ³ /tahun; 7 – 20	Hasanuddin, 2021; Nur et al., 2014; Radhika et al., 2012;

			m ³ /detik; 220,8 m ³ /tahun; 9,56 m ³ /detik hingga 16,43 m ³ /detik	Kurniawan, 2010; Data et al., 2019
20	Aliran Sungai Bawah Tanah Towakkalak	Maros, Sulawesi Selatan	Belum ada data debit	Deharveng et al., 2021
21	Sungai Bawah Tanah Leang Lonrong	Kawasan Karst Bantimurung Bulusaraung, Pangkep	2,81 – 4,41 m ³ /detik	Jaya et al., 2023; Hayati, N. 2019; Agniy et al., 2017; BBWS Pompengan Jeneberang, 2018
22	Sungai Komerling	Kabupaten Ogan Komerling Ulu, Sumatera Selatan	16,67 – 269,80 m ³ /detik	Herlinda et al., 2019; Fauzi& Jauhari, 2019
23	Daerah Aliran Sungai Bawah Tanah Musi	Palembang, Sumatera Selatan	0,68–0,74 liter/detik; 24-63 m ³ /detik	Munawir, 2017; Direktorat Jenderal SDA, 2017; Sastra, Y 2021
24	Sungai Percut	Desa Bagan Percut, Deli Serdang, Sumatera Utara	16-17 m ³ /detik	Hadi, 2007; Kumalajati, 2015; Simantu, 2015
25	Sungai Kawasan Karst Goa Peteng	Kawasan Goa Peteng, Bali	Belum ada data debit	Suryana&Wijayanti, 2020; Dwipa et al., 2021; Hariyana&Mahagang ga, 2013; Kurniawan, 2020; Supriyati et al., 2018
26	Sungai Bawah Tanah di Kawasan	Blok Suaran, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur	0,68–0,74 liter/detik	Reinhart et al., 2020; Munawir, 2017; Rengganis et al., 2016; Adjie, 2006

	Karst Suaran			
27	Sistem Akuifer Karst Sangkuliran g-Mangkalihat	Kabupaten Berau dan Kutai Timur, Kalimantan Timur	Belum ada data debit	Reinhart et al., 2020; Dispar Kaltim, 2016; Mongabay Indonesia, 2020; Kompasiana, 2017; Kemendikbud, 2023
28	Cekungan Air Tanah (CAT) di Ibu Kota Nusantara (IKN)	Kaltim (Muara Jawa, Sepaku, Semboja)	10,23 miliar m ³ /tahun	Kompas.id, 2019

Berdasarkan tabel diatas dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan sungai bawah tanah bisa menjadi solusi alternatif untuk memenuhi kebutuhan air bersih, terutama di wilayah yang mengalami kekeringan saat musim kemarau (Caritra, 2019). Beberapa contoh sungai bawah tanah yang telah terpetakan dan memiliki potensi signifikan antara lain Sungai Bribin di Gunungkidul yang memiliki debit rata-rata mencapai 1.000 liter/detik dan analisis desain bendungan menunjukkan kapasitas tampung 400.000 m³ dengan kedalaman air maksimal 15 meter (Suwarno, 2018; Wardhana et al., 2014; Dani, 2011). Sungai Pulejajar dengan debit berkisar antara 0,035 m³/detik-4 m³/detik namun kisaran tersebut sangat bergantung terhadap musim dengan rekomendasi batas aman pemanfaatan 70% dari debit total yang dihasilkan (Arrasy, 2017; Acintyacunyata, 2012; KOMBI, 2015; Dinas ESDM Gunungkidul, 2022). Sungai Baron dengan potensi debit berkisar antara 20 m³/detik-800 m³/detik memiliki peluang yang dapat dikembangkan menjadi potensi sumber air baku bagi masyarakat sekitar dan pemanfaatan energi mikrohidro sebagai energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan (BBWS Serayu Opak, 2019 Pemkab Gunungkidul, 2025; Marjono, 2025; Handayani, 2025; SiMANTU, 2025).

Pada Tabel 4.2. terdapat data potensi sungai bawah tanah di kawasan karst Indonesia tersebut menunjukkan potensi yang signifikan sebagai

sumber air bersih (Rengganis et al., 2016). Di kawasan karst Blitar Selatan, telah teridentifikasi sejumlah sumber air berupa mata air, sungai bawah tanah, dan beberapa aliran sungai (Rengganis et al., 2016). Lebih dari 20 mata air telah teridentifikasi dengan debit bervariasi antara 1 hingga 60 liter/detik dan telah dimanfaatkan oleh penduduk setempat (Rengganis et al., 2016).

Di Kawasan Karst Maros, air yang tersedia mencapai 220,8 m³ setiap tahun dengan potensi pembangkitan listrik mikrohidro hingga 150 kW pada debit andal (Hasanuddin, 2021; Nur et al., 2014; Radhika et al., 2012; Kurniawan, 2010; Data et al., 2019). Sungai bawah tanah Musi memiliki debit 0,68–0,74 liter/detik yang belum mencukupi kebutuhan air domestik masyarakat setempat namun menunjukkan kestabilan aliran bawah tanah di kawasan karst (Munawir, 2017; Direktorat Jenderal SDA, 2017). Wilayah Sungai Musi merupakan salah satu wilayah sungai lintas provinsi strategis dengan potensi sumber daya air yang besar dan memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Musi dengan daya terpasang 210 MW. Debit air yang dialirkan melalui pipa ke PLTA sekitar 2 m³/detik, dengan debit sungai Musi di hulu yang relatif stabil yaitu sekitar 24 m³/detik pada musim kemarau dan 63 m³/detik pada musim hujan. PLTA Musi memanfaatkan air Sungai Musi yang dialirkan melalui bendungan dan terowongan sepanjang 2,57 km dengan ketinggian jatuh sekitar 400 meter, sehingga dapat menghasilkan energi bersih dan ramah lingkungan dengan potensi energi tahunan sebesar 1,14 TWh (Sastra, Y 202).. Meskipun demikian, pemanfaatan potensi sungai bawah tanah di Indonesia masih menghadapi berbagai tantangan, termasuk keterbatasan data yang akurat, pengelolaan yang berkelanjutan, dan integrasi dengan sektor-sektor lain seperti energi dan pangan dalam kerangka *Water-Energy-Food* (WEF) *Nexus*. Pada Tabel 4.3 dijelaskan kesimpulan dari pemanfaatan sungai bawah tanah sebagai WEF-*Nexus* untuk setiap aspek.

Tabel 4.3. Aspek Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah sebagai WEF-
Nexus

No	Aspek Pemanfaatan	Potensi Pemanfaatan	Hasil Pemanfaatan
1	<i>Water</i>	Sumber air baku untuk kebutuhan domestik, irigasi, dan industri.	- Terdapat 839 mata air dan 187 sungai bawah tanah teridentifikasi di kawasan karst Indonesia.
2	<i>Energy</i>	Potensi energi mikrohidro dari aliran sungai bawah tanah, terutama di daerah dengan debit besar.	- PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro) Bribin menghasilkan listrik dengan kapasitas 40 kW untuk operasional pompa air dan penerangan fasilitas lokal.
3	<i>Food</i>	Irigasi pertanian, mendukung ketahanan pangan dan produktivitas lahan pertanian di sekitar kawasan karst.	- Pemanfaatan air bawah tanah untuk irigasi di Gunung Kidul meningkatkan luas lahan pertanian produktif hingga $\pm$ 1.200 ha.

4.2 Tantangan Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah dengan Konsep WEF *Nexus*

Pembahasan kedua membahas terkait tantangan dalam pemanfaatan sungai bawah tanah sebagai WEF *Nexus*. Hasil kajian literatur menggunakan kata kunci “Tantangan pemanfaatan sungai bawah tanah” untuk literatur secara umum, adapun sumber literatur berbahasa Inggris menggunakan kata kunci “*Uncertainty in groundwater modeling*”, “*Challenges in quantifying hydrological processes*”, “*Groundwater governance and the Water-Energy-Food Nexus*”, sedangkan kata kunci untuk pencarian di Google Scholar dengan metode Boolean Operator site:sciencedirect.com “*Karst aquifer system complexity and catchment delineation*”.

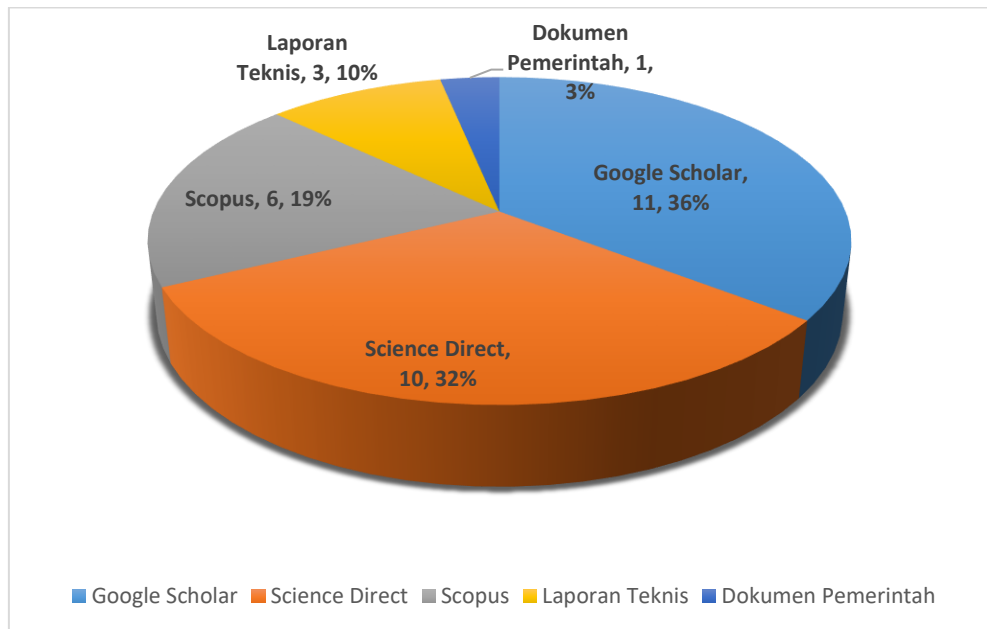
Pada tahap eksplorasi yang dilakukan oleh peneliti untuk mendapatkan literatur tantangan teknis dan regulasi dipilih berdasarkan judul, abstrak, dan kata kunci pada seluruh literatur yang dihasilkan dari hasil penelusuran berdasarkan kriteria kelayakan yang telah didefinisikan sebelumnya. Sedangkan untuk tantangan regulasi, sumber literatur dipilih berdasarkan kajian sistematis dan studi kasus di berbagai negara, serta dokumen kebijakan nasional dan internasional, pendekatan studi kasus lintas negara dengan analisis kualitatif dan kuantitatif, serta identifikasi perspektif kebijakan nasional Indonesia berbasis pengalaman implementasi WEF *Nexus*.

Berdasarkan Gambar 4.4. didapatkan identifikasi kajian tantangan teknis potensi sungai bawah tanah di Indonesia terdapat 27 jurnal ilmiah berasal dari Google Scholar (site:sciencedirect) dan Scopus. Sebanyak 4 literatur yang berasal dari Laporan Teknis dan Dokumen Pemerintah. Data literatur yang secara lengkap disajikan di dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Rincian Data Literatur Tantangan Teknis dan Regulasi

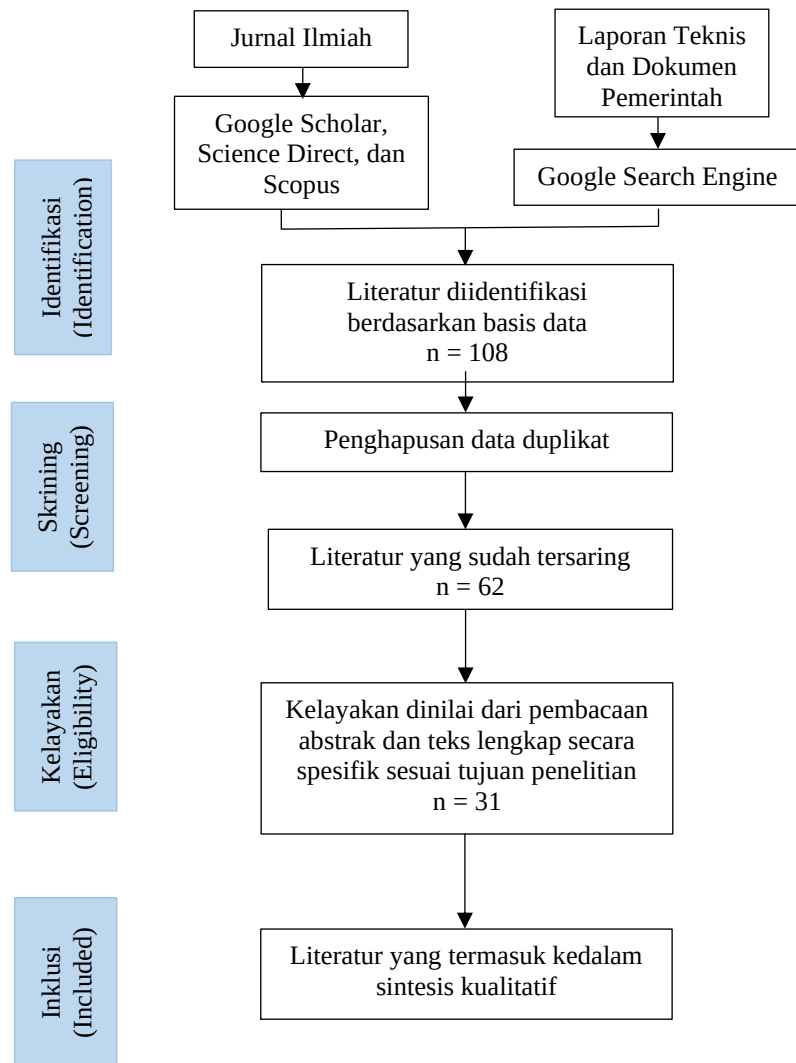
No	Sumber Literatur	Jumlah Literatur
1	Google Scholar	11
2	Science Direct	10
3	Scopus	6
4	Laporan Teknis	3
5	Dokumen Pemerintah	1

Data diatas kemudian disajikan dalam bentuk diagram sebagai berikut.



Gambar 4.3. Data Literatur Tantangan Teknis dan Regulasi

Pada tahap seleksi data didapatkan literatur yang digunakan, berikut merupakan PRISMA Flow Diagram untuk literatur tantangan teknis dan regulasi pemanfaatan sungai bawah tanah kawasan karst.



Gambar 4.4. PRISMA *Flow Diagram* Tantangan Teknis dan Regulasi

4.3.1 Tantangan Teknis

Pemanfaatan sungai bawah tanah menghadapi tantangan utama dalam karakterisasi hidrogeologi, terutama di kawasan karst yang memiliki sistem akuifer kompleks dan berlapis-lapis. Penentuan batas daerah tangkapan (*catchment area*) sangat sulit dilakukan karena interkoneksi antar-akuifer yang rumit, sehingga metode seperti *dye tracing*, radioisotop, serta pendekatan *remote sensing* dan GIS sering digunakan namun tetap memiliki keterbatasan akurasi (Guo et al., 2019; Setiawan et al., 2020; Ahmad et al., 2012; Luo et al., 2016; Moreno-Gómez et al., 2019). Selain itu, kualitas air sungai bawah tanah sering terancam oleh polusi dari aktivitas permukaan, seperti limbah pertanian dan domestik, serta pelarutan batuan yang menyebabkan kandungan kalsium dan *E. coli* tinggi (Sunkar, 2008; Reinhart dan Rifani, 2019).

Tantangan lain adalah keterbatasan data dan akses informasi hidrogeologi yang memadai. Monitoring air tanah secara aktif masih minim, terutama di negara berkembang, hal ini biasanya diakibatkan oleh keterbatasan dana, teknologi, dan kapasitas sumber daya manusia yang ada pada negara berkembang. Integrasi data lapangan, *remote sensing*, dan perangkat lunak open-source seperti MODFLOW dan ModelMuse sudah mulai diterapkan, namun masih menghadapi kendala dalam akurasi data, integrasi teknologi, dan kurangnya repository data terpusat (Bakker et al., 2016; Winston, 2019)

Pada skala yang lebih luas, model-model pemodelan air tanah juga menghadapi ketidakpastian tinggi akibat error observasi, bias data input, ketidakpastian skenario batas, resolusi spasial-temporal yang kurang optimal, serta kesulitan dalam mengkuantifikasi proses hidrologi kompleks seperti interaksi air tanah-permukaan (Wu&Zeng, 2013; Condon et al., 2021). Pengelolaan berkelanjutan juga harus memperhatikan laju pemompaan yang sering melebihi laju isi ulang alami, sehingga berisiko menyebabkan deplesi akuifer dan penurunan kualitas air (Cuthbert et al., 2023)

Dalam konteks ini, pendekatan *Water-Energy-Food* (WEF) *Nexus* menjadi sangat relevan. Konsep ini menekankan pentingnya memahami keterkaitan antara sektor air, energi, dan pangan untuk mencapai keberlanjutan dalam pengelolaan

sumber daya alam (Hussey&Pittock, 2012). Tantangan teknis ini berimplikasi pada keterbatasan pasokan air untuk irigasi dan konsumsi, kebutuhan energi tinggi untuk pemompaan air tanah, serta ancaman terhadap ketahanan pangan akibat penurunan kualitas dan kuantitas air (Sinha et al., 2006; ACIAR, 2023). Pada Tabel 4.5. terdapat analisis mendalam mengenai tantangan pemanfaatan sungai bawah tanah dalam mempertimbangkan aspek teknis dan regulasi merujuk pada penelitian-penelitian sebelumnya

Tabel 4.5. Tantangan Teknis Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah sebagai
WEF Nexus

Tantangan Sumber Daya Air	Tantangan Energi	Tantangan Ketahanan Pangan	Konsep WEF Nexus
1. Karakterisasi hidrogeologi kompleks (Guo et al., 2019; Ahmad et al., 2012; Rengganis et al., 2016; Arsyad et al., 2014)			
Sulit memetakan aliran dan potensi air (Guo et al., 2019)	Efisiensi pemompaan rendah (Ahmad et al., 2012)	Risiko gagal panen akibat irigasi tidak optimal (Rengganis et al., 2016)	Integrasi pengelolaan air dan pangan bergantung data akurat karena keterbatasan data berdampak pada distribusi air dan energi (Arsyad et al., 2014)
2. Biaya energi pengambilan air, keterbatasan data, dan teknologi monitoring (Bakker et al., 2016; Rengganis et al., 2016; Winston, 2019; Purnomo, 2019)			
Ketersediaan air terbatas jika energi yang digunakan mahal, data tidak akurat, sulit prediksi ketersediaan air (Bakker et al., 2016)	Optimalisasi energi sulit dan konsumsi energi tinggi untuk pompa (Rengganis et al., 2016)	Gangguan irigasi dan produksi pangan (Winston, 2019)	Keterkaitan penggunaan energi dan air dalam sistem terpadu (Purnomo, 2019)
3. Deplesi akuifer (Cuthbert et al., 2023; Rullyanto, 2023; Prasita, 2007)			
Degradasi akuifer, sumber air, dan penurunan muka air tanah, risiko kekeringan (Cuthbert et al., 2023)	Energi pemompaan makin besar (Rullyanto, 2023)	Kerusakan lahan dan produktivitas menurun (Rullyanto, 2023)	Over-extraction air tanah mengganggu keseimbangan WEF Nexus

			(Cuthbert et al., 2023)
4. Sedimentasi, erosi, dan ketidakpastian model hidrologi (Wu&Zeng, 2013; Condon et al., 2021; Valiant, 2007; BPDAS, 2003)			
Kapasitas tampung berkurang dan prediksi pasokan air tidak pasti (Wu dan Zeng, 2013)	Efisiensi energi pembangkit turun dan investasi energi bisa tidak efisien (Valiant, 2007)	Gangguan suplai irigasi (Condon et al., 2021)	Model tidak akurat menghambat kebijakan lintas sektor (BPDAS, 2003)
5. Polusi air bawah tanah (Sunkar, 2008; Reinhart dan Rifani, 2019; Rengganis et al., 2016; Arsyad et al., 2014)			
Penurunan kualitas air, kontaminasi E. coli dan Ca (Sunkar, 2008)	Kebutuhan pengolahan air meningkat (Reinhart dan Rifani, 2019)	Risiko kesehatan dan produksi pangan (Rengganis et al., 2016)	Kualitas air mempengaruhi produktivitas, kualitas pangan dan kesehatan (Arsyad et al., 2014)
6. Kurangnya sistem pemantauan (Purnomo, 2019; Prasita, 2007)			
Alokasi air tidak optimal (Purnomo, 2019)	Pemborosan energi (Purnomo, 2019)	Ketidakpastian pasokan pangan (Prasita, 2007)	Kebutuhan sistem monitoring terpadu untuk WEF Nexus (Prasita, 2007)

Sistem sungai bawah tanah, khususnya di kawasan karst, memiliki struktur akuifer yang sangat kompleks dan heterogen sehingga pemetaan aliran air dan hubungan antar gua memerlukan teknik khusus seperti *tracer test*, geolistrik tomografi, dan pemodelan numerik. Kesulitan ini membatasi pemahaman potensi dan dinamika air bawah tanah, yang berdampak pada pengelolaan sumber daya air secara efektif (Rengganis et al., 2016; Arsyad et al., 2014). Studi oleh Arsyad et al. (2014) menegaskan bahwa debit air sungai bawah tanah di kawasan karst Maros sangat fluktuatif sehingga perlu pemantauan dan karakterisasi yang akurat untuk mendukung keberlanjutan pemanfaatannya.

Pemompaan air dari sungai bawah tanah sering membutuhkan energi yang cukup besar, terutama jika kedalaman akuifer dalam dan sistem distribusi belum efisien. Hal ini menjadi kendala teknis sekaligus ekonomi bagi masyarakat dan pengelola sumber daya air (Rengganis et al., 2016; Purnomo, 2019). Peningkatan konsumsi energi untuk pompa air juga berimplikasi pada aspek energi dalam WEF

Nexus, di mana penggunaan energi yang tidak efisien dapat mengganggu keseimbangan antara ketahanan air dan energi.

Eksplorasi berlebihan terhadap akuifer sungai bawah tanah dapat menyebabkan penurunan muka tanah (*land subsidence*), yang berpotensi merusak ekosistem dan infrastruktur. Kerusakan lingkungan ini juga berpengaruh pada ketahanan pangan melalui dampak pada kualitas dan kuantitas air irigasi (Rullyanto, 2023; Prasita, 2007). Penurunan muka tanah yang terjadi di beberapa wilayah karst juga menimbulkan tantangan teknis dalam menjaga keberlanjutan sumber daya air dan lahan pertanian.

Sedimentasi akibat erosi di daerah tangkapan air sungai bawah tanah dapat mengurangi kapasitas tampungan air, sehingga mengganggu suplai air untuk irigasi dan kebutuhan domestik. Valiant (2007) dan BPDAS (2003) melaporkan tingkat erosi mencapai 3,9 mm/tahun di beberapa daerah, yang secara langsung menurunkan efisiensi bendungan dan sistem pengelolaan air. Hal ini memerlukan perencanaan pengelolaan lahan yang terintegrasi untuk mengurangi sedimentasi dan menjaga kualitas air.

Aktivitas manusia di sekitar kawasan sungai bawah tanah, seperti pertanian, pemukiman, dan industri, dapat menyebabkan pencemaran air yang signifikan. Penurunan kualitas air ini mengancam kesehatan masyarakat dan produktivitas pertanian yang bergantung pada air irigasi (Rengganis et al., 2016; Arsyad et al., 2014). Oleh karena itu, pemantauan kualitas air secara berkala dan pengelolaan limbah yang baik sangat diperlukan.

Keterbatasan data spasial dan temporal serta kurangnya sistem pemantauan terpadu menjadi kendala dalam pengelolaan sumber daya sungai bawah tanah. Integrasi teknologi seperti *Internet of Things* (IoT) dan penginderaan jauh dapat meningkatkan akurasi pemantauan dan pengelolaan air secara *real-time* (Prasita, 2007; Purnomo, 2019). Pendekatan ini penting karena untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam kerangka WEF *Nexus*.

4.3.2 Tantangan Regulasi

Salah satu tantangan utama dalam regulasi pemanfaatan sungai bawah tanah adalah fragmentasi kebijakan antar sektor air, energi, dan pangan. Banyak kebijakan masih berjalan sendiri-sendiri tanpa koordinasi lintas sektor, sehingga menimbulkan tumpang tindih aturan, inefisiensi, dan konflik kepentingan dalam pengelolaan sumber daya (FAO, 2020; CDKN, 2020; Shah, 2023). Studi CDKN (2020) dan FAO (2020) menyoroti bahwa kebijakan sektoral seringkali gagal mempertimbangkan dampak lintas sektor, sehingga menimbulkan *trade-off* yang merugikan, misalnya subsidi energi untuk irigasi yang mendorong eksploitasi air tanah berlebihan dan berdampak pada keberlanjutan sumber daya air.

Implementasi regulasi sering terkendala lemahnya penegakan hukum dan pengawasan di lapangan. Banyak kasus pengambilan air tanah ilegal, pelanggaran kuota, dan pencemaran yang tidak tertangani secara efektif karena keterbatasan kapasitas institusi dan sumber daya manusia. Di beberapa negara, seperti Iran dan India, upaya pengawasan dilakukan dengan pemasangan meter air dan patroli, namun tantangan teknis dan sosial tetap tinggi (Shah, 2023; Jaffery&Bradley, 2018).

Ketidakjelasan mengenai hak akses dan kepemilikan sumber daya air bawah tanah sering memicu konflik antar pengguna, baik antar sektor maupun antar kelompok masyarakat. Hal ini juga menghambat investasi dalam infrastruktur dan teknologi pengelolaan air yang lebih efisien. Studi FAO (2020) dan Shah (2023) menegaskan pentingnya kejelasan hak guna air dan mekanisme partisipatif dalam tata kelola sumber daya air untuk mendukung keberlanjutan WEF *Nexus*.

Regulasi yang efektif memerlukan data yang akurat dan sistem informasi terintegrasi lintas sektor. Namun, masih banyak kebijakan yang didasarkan pada data parsial, sehingga pengambilan keputusan tidak optimal dan seringkali tidak responsif terhadap dinamika sumber daya (Retno, L., 2025; FAO, 2020). Retno, L. (2025) menekankan pentingnya inovasi teknologi, seperti IoT dan sistem monitoring terpadu, untuk mendukung tata kelola berbasis data.

Banyak lembaga pemerintah dan otoritas pengelola sumber daya air belum memiliki kapasitas yang memadai untuk mengimplementasikan pendekatan WEF *Nexus*. Hal ini mencakup keterbatasan dalam memahami keterkaitan antar sektor,

keterampilan teknis, serta sumber daya untuk koordinasi dan kolaborasi lintas institusi. Studi CDKN (2020) dan Shah (2023) menyoroti perlunya investasi dalam penguatan kapasitas kelembagaan untuk mendukung tata kelola terintegrasi. Pada Tabel 4.6. terdapat analisis mendalam mengenai tantangan pemanfaatan sungai bawah tanah dalam mempertimbangkan tantangan regulasi merujuk pada penelitian-penelitian sebelumnya.

Tabel 4.6. Tantangan Regulasi Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah sebagai WEF Nexus

Tantangan Sumber Daya Air	Tantangan Energi	Tantangan Ketahanan Pangan	Konsep WEF Nexus
1. Fragmentasi kebijakan antar sektor (FAO, 2020; CDKN, 2020; Shah, 2023)			
Pengelolaan air tidak terintegrasi, over-extraction (FAO, 2020)	Subsidi energi memperburuk eksploitasi air (FAO, 2020)	Irigasi tidak efisien, risiko gagal panen (CDKN, 2020)	Trade-off tidak terkelola, sinergi rendah (Shah, 2023)
2. Lemahnya penegakan hukum dan pengawasan (Shah, 2023; Jaffery& Bradley, 2018)			
Overuse air tanah, pencemaran tidak terkontrol (Shah, 2023)	Penggunaan energi tidak efisien(Shah, 2023)	Dampak negatif pada produksi pangan (Jaffery dan Bradley, 2018)	Pengawasan lemah, kebijakan tidak efektif (Jaffery&Bradle y, 2018)
3. Ketidakjelasan hak akses dan kepemilikan (FAO, 2020; Shah, 2023)			
Konflik antar pengguna, investasi terhambat (FAO, 2020)	Ketidakpastian investasi energi (FAO, 2020)	Konflik distribusi air untuk pertanian (FAO, 2020)	Tata kelola partisipatif diperlukan (Shah, 2023)
4. Kurangnya integrasi data dan sistem informasi (Retno, L., 2025; FAO, 2020)			
Keputusan berbasis data lemah (Retno, L., 2025)	Optimasi energi sulit (Retno, L., 2025)	Perencanaan pangan tidak responsif (Retno, L., 2025)	Inovasi teknologi dan data penting untuk WEF Nexus (FAO, 2020)
5. Keterbatasan kapasitas kelembagaan (CDKN, 2020; Shah, 2023)			
Koordinasi lintas sektor lemah (CDKN, 2020)	Pengelolaan energi tidak terintegrasi (CDKN, 2020)	Ketahanan pangan sulit dicapai (Shah, 2023)	Kualitas air mempengaruhi produktivitas, kualitas pangan dan kesehatan (Shah, 2023)

4.4 Kajian Analisis Dampak Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah dengan Konsep WEF Nexus

Pemanfaatan sungai bawah tanah sebagai sumber daya air semakin penting dalam konteks keberlanjutan, terutama di negara-negara dengan tekanan tinggi terhadap sumber daya air. Sungai bawah tanah secara teknis dikenal sebagai akuifer lapisan tanah yang menyimpan air dalam jumlah besar dan dapat diisi kembali oleh air hujan serta aliran permukaan. Namun, pengambilan air dari akuifer yang berlebihan dapat menyebabkan penurunan permukaan tanah dan kerusakan lingkungan (Rullyanto, 2023). Oleh karena itu, manajemen yang baik dan pengawasan ketat terhadap pemanfaatan sumber daya ini sangat diperlukan untuk memastikan keberlanjutan dan menghindari dampak negatif yang lebih luas.

Dalam kajian analisis dampak pemanfaatan sungai bawah tanah dengan konsep WEF (*Water-Energy-Food*) Nexus, penting untuk memahami interkoneksi antara air, energi, dan pangan. Pendekatan WEF Nexus bertujuan untuk mengelola sumber daya secara terpadu sehingga dapat meningkatkan sinergi dan mengurangi *trade-off* antara sektor-sektor tersebut (Shukla et al., 2018). Dalam konteks Indonesia yang merupakan negara dengan populasi besar dan kebutuhan sumber daya yang terus meningkat, penerapan WEF Nexus menjadi krusial untuk mencapai ketahanan air yang berkelanjutan (Wu et al., 2014; Lamba&Singh, 2017).

Penelitian menunjukkan bahwa pertumbuhan penduduk dan perubahan iklim menjadi tantangan utama dalam pengelolaan sumber daya air. Penurunan muka tanah akibat ekstraksi air tanah yang berlebihan telah menjadi perhatian serius di berbagai wilayah, termasuk Jakarta dan pesisir utara Jawa (Asian Development Bank, 2020). Oleh karena itu, strategi pengelolaan yang inovatif dan berbasis teknologi diperlukan untuk memaksimalkan pemanfaatan sungai bawah tanah sambil menjaga kualitas dan kuantitas air yang tersedia.

Dalam mendukung strategi pengelolaan yang inovatif berbasis teknologi untuk pemanfaatan sungai bawah tanah diperlukan kajian mengenai analisis dampak lingkungan, dampak sosial, serta dampak ekonomi yang akan terjadi

untuk memaksimalkan integrasi pemanfaatan sungai bawah tanah sebagai *Water-Energy-Food Nexus*. Pembahasan akan mengacu pada kerangka kerja *WEF Nexus (Water-Energy-Food Nexus)* untuk memahami keterkaitan antara air, energi, dan pangan dalam konteks pemanfaatan sumber daya ini (Kementerian PUPR, 2023). Melalui analisis ini, diharapkan dapat diidentifikasi langkah-langkah mitigasi yang efektif untuk meminimalkan dampak negatif dan memaksimalkan manfaat positif dari pemanfaatan sungai bawah tanah secara berkelanjutan.

Hasil kajian literatur menggunakan kata kunci sebagai berikut

1. Kajian Literatur Identifikasi Dampak Lingkungan

“Dampak lingkungan sungai bawah tanah” untuk literatur secara umum, adapun sumber literatur berbahasa inggris menggunakan kata kunci *“Environmental impact underground river”, “Physical chemical biological impact groundwater”, “groundwater quality impact”*, sedangkan kata kunci untuk pencarian di Google Scholar dengan metode Boolean Operator AND, OR seperti “dampak lingkungan” AND “sungai bawah tanah” dan *“groundwater quality”* AND *“anthropogenic impact”*

2. Kajian Literatur Identifikasi Dampak Sosial

“Water-Energy-Food Nexus economic impact” untuk literatur secara umum, adapun sumber literatur berbahasa inggris menggunakan kata kunci *“WEF Nexus economic benefits”, “economic analysis irrigation energy food production”, “renewable energy cost reduction agriculture”*, sedangkan kata kunci untuk pencarian di Google Scholar dengan metode Boolean Operator AND seperti *“social impact”* AND *“underground river”* AND *“WEF Nexus”*.

3. Kajian Literatur Identifikasi Dampak Ekonomi

“Dampak sosial sungai bawah tanah” untuk literatur secara umum, adapun sumber literatur berbahasa inggris menggunakan kata kunci *“social impact underground river utilization”, “health impact groundwater pollution”, “social equity water resource”*

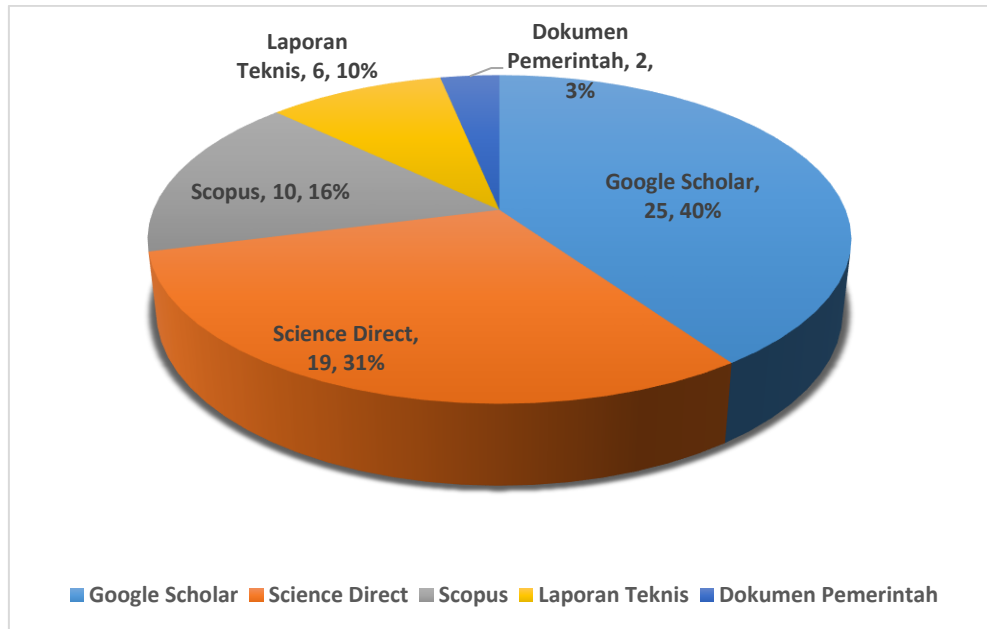
development”, sedangkan kata kunci untuk pencarian di Google Scholar dengan metode Boolean Operator AND seperti “*Water-Energy-Food Nexus AND economic impact*”.

Pada tahap eksplorasi yang dilakukan oleh peneliti untuk mendapatkan literatur dampak lingkungan, sosial, maupun ekonomi dipilih berdasarkan judul, abstrak, dan kata kunci pada seluruh literatur yang dihasilkan dari hasil penelusuran berdasarkan kriteria kelayakan yang telah didefinisikan sebelumnya. Berdasarkan Gambar 4.6. didapatkan data potensi sungai bawah tanah di Indonesia terdapat 54 jurnal ilmiah berasal dari Google Scholar (site:sciencedirect) dan Scopus. Sebanyak 8 literatur yang berasal dari Laporan Teknis dan Dokumen Pemerintah. Melalui analisis ini, diharapkan dapat diidentifikasi langkah-langkah mitigasi yang efektif untuk meminimalkan dampak negatif dan memaksimalkan manfaat positif dari pemanfaatan sungai bawah tanah secara berkelanjutan. Data literatur yang secara lengkap disajikan di dalam Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Rincian Data Literatur Kajian Analisis Dampak Lingkungan, Sosial, dan Ekonomi

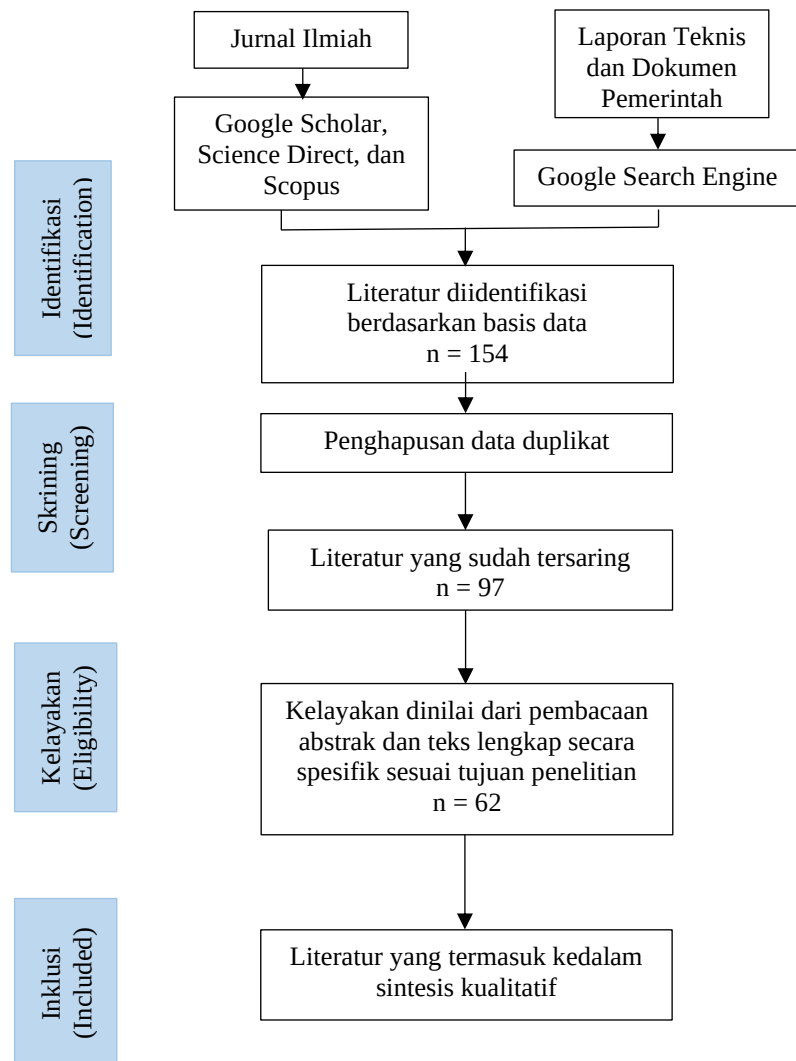
No	Sumber Literatur	Jumlah Literatur
1	Google Scholar	25
2	Science Direct	19
3	Scopus	10
4	Laporan Teknis	6
5	Dokumen Pemerintah	2

Data tersebut kemudian disajikan dalam bentuk diagram sebagai berikut.



Gambar 4.5. Data Literatur Kajian Analisis Dampak Lingkungan, Sosial, dan Ekonomi

Pada tahap seleksi data didapatkan literatur yang digunakan, berikut merupakan PRISMA Flow Diagram untuk literatur kajian analisis dampak lingkungan, sosial, dan ekonomi.



Gambar 4.6. PRISMA *Flow Diagram* Analisis Dampak Lingkungan, Sosial, dan Ekonomi

4.4.1 Kajian Literatur Analisis Dampak Lingkungan

Pemanfaatan sungai bawah tanah sebagai sumber daya air memiliki peran penting dalam mendukung irigasi pertanian dan penyediaan air baku, khususnya di wilayah dengan ketersediaan air permukaan yang terbatas. Konservasi air tanah dan peningkatan ketersediaan melalui pemanfaatan sungai bawah tanah terbukti dapat meningkatkan ketahanan pangan dengan menyediakan pasokan air yang stabil untuk pertanian (Mardiah, 2024). Dalam konteks energi, proses ekstraksi dan distribusi air tanah membutuhkan energi yang tidak sedikit, namun inovasi seperti penggunaan pompa air tenaga surya dan pembangkit listrik tenaga air skala mikro (PLTA mikro) dapat meningkatkan efisiensi energi sekaligus mengurangi emisi karbon (Purwanto et al., 2021). Integrasi pengelolaan air, energi, dan pangan melalui pendekatan WEF-*Nexus* menjadi kunci untuk mencapai efisiensi dan keberlanjutan lintas sektor (Albrecht et al., 2018).

Namun, pemanfaatan sungai bawah tanah juga membawa sejumlah dampak lingkungan yang perlu diantisipasi. Dampak fisik yang paling umum adalah perubahan aliran dan volume air sungai bawah tanah akibat ekstraksi air yang berlebihan. Pengambilan air bawah tanah secara intensif dapat menurunkan muka air tanah sehingga berpotensi merusak struktur tanah dan infrastruktur di sekitarnya. Ekstraksi air tanah yang berlebihan dapat menyebabkan penurunan muka air tanah, subsiden, dan perubahan aliran air bawah tanah yang pada akhirnya berpotensi merusak ekosistem dan infrastruktur di sekitarnya. Selain itu, alih fungsi lahan dan degradasi lahan akibat pembangunan infrastruktur air juga dapat menurunkan produktivitas lahan pertanian dan mengancam ketahanan pangan lokal (Smith et al., 2021).

Perubahan morfologi sungai bawah tanah yang mengganggu habitat alami juga dilaporkan oleh Wang et al. (2020), yang menekankan bahwa aktivitas manusia dapat mengubah bentuk dan fungsi sungai bawah tanah sehingga mempengaruhi ekosistem lokal. Pada Tabel 4.8. terdapat tabel hasil dari ekstraksi data kajian analisis dampak lingkungan dari pemanfaatan sungai bawah tanah sebagai WEF-*Nexus*

Tabel 4.8. Identifikasi Kajian Potensi Dampak Lingkungan Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah Sebagai WEF *Nexus*

Dampak pada Sumber Daya Air	Dampak pada Energi	Dampak pada Ketahanan Pangan	Konsep WEF Nexus
1. Dampak Fisika: Penurunan muka air tanah, subsiden, perubahan aliran air bawah tanah. 2. Dampak Kimia: Kontaminasi air tanah oleh nitrat, pestisida, logam berat 3. Dampak Biologis: Gangguan ekosistem akuatik bawah tanah, perubahan keanekaragaman hayati (Purwanto et al., 2021); (Albrecht et al., 2018); (Wicaksono & Kang, 2019)			
Konservasi air tanah, peningkatan ketersediaan, pemanfaatan sungai bawah tanah untuk irigasi dan air baku (Purwanto et al., 2021)	Penggunaan energi untuk ekstraksi air tanah dan distribusi, potensi energi terbarukan (Albrecht et al., 2018)	Dukung irigasi pertanian, ketahanan pangan melalui ketersediaan air yang stabil. (Purwanto et al., 2021)	Integrasi pengelolaan air, energi, dan pangan untuk efisiensi dan keberlanjutan (Wicaksono & Kang, 2019)
1. Dampak Fisika: Penurunan ketersediaan air permukaan, risiko subsiden 2. Dampak Kimia: Peningkatan salinitas, kontaminasi kimia 3. Dampak Biologis: Perubahan mikrobiologi air tanah, gangguan biota akuatik (Mardiah, 2024); (Purwanto et al., 2021)			
Pemanfaatan sungai bawah tanah untuk air baku, irigasi, dan mitigasi kekeringan (Mardiah, 2024).	Penggunaan teknologi energi terbarukan untuk ekstraksi air tanah (misal: pompa) (Mardiah, 2024).	Meningkatkan ketahanan pangan di daerah kering/rawan air (Purwanto et al., 2021).	Pendekatan WEF-Nexus untuk sinergi dan efisiensi (Purwanto et al., 2021).

Dampak kimia dari pemanfaatan sungai bawah tanah sangat signifikan, terutama terkait dengan pencemaran air oleh berbagai polutan. kontaminasi air tanah oleh nitrat, pestisida, limbah domestik, dan logam berat menjadi ancaman serius bagi kualitas air bawah tanah, yang berdampak langsung pada kesehatan masyarakat dan keberlanjutan ekosistem (Mardiah, 2024). Agustina et al. (2021) mengungkapkan bahwa limbah domestik dan industri meningkatkan kadar BOD (*Biochemical Oxygen Demand*), COD (*Chemical Oxygen Demand*), fosfor, dan logam berat dalam air sungai bawah tanah, yang berakibat pada penurunan kualitas air dan

membahayakan biota air. Penelitian lain oleh Jaya et al. (2022) memperkuat temuan ini dengan menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi bahan kimia berbahaya akibat infiltrasi limbah industri ke dalam sistem air bawah tanah. Chen et al. (2020) dan Nguyen et al. (2019) menambahkan bahwa perubahan kimiawi ini mengganggu proses biogeokimia alami dan dapat menurunkan kadar oksigen terlarut, yang sangat penting bagi kelangsungan hidup organisme air.

Dampak biologis yang muncul akibat pemanfaatan sungai bawah tanah meliputi penurunan keanekaragaman hayati dan gangguan habitat organisme air. Nguyen et al. (2019) dan Ruhaimi et al. (2024) melaporkan penurunan populasi mikroba dan organisme air bawah tanah yang sensitif terhadap perubahan kualitas dan kuantitas air. Patel dan Singh (2021) juga menyoroti bahwa gangguan kualitas air berdampak langsung pada habitat biota air, menyebabkan potensi hilangnya spesies endemik dan menurunnya fungsi ekosistem.

Secara keseluruhan, kajian literatur ini menegaskan bahwa pemanfaatan sungai bawah tanah tanpa pengelolaan yang tepat dapat menimbulkan dampak lingkungan yang luas dan kompleks, mencakup aspek fisik, kimia, dan biologis. Oleh karena itu, pendekatan WEF-*Nexus* yang menekankan integrasi dan sinergi antar sektor air, energi, dan pangan sangat diperlukan untuk mengurangi *trade-off* dan memaksimalkan manfaat lintas sektor secara berkelanjutan guna meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan masyarakat (Albrecht et al., 2018).

4.4.2 Kajian Analisis Dampak Sosial

Pemanfaatan sungai bawah tanah dalam konteks WEF-*Nexus* membawa dampak sosial yang kompleks, terutama terkait disrupsi sosial dan budaya. Proyek pengelolaan sungai bawah tanah dan pembangunan infrastruktur terkait seringkali mengakibatkan pemutusan hubungan sosial di komunitas lokal, hilangnya tempat-tempat ibadah, serta menurunnya kohesi sosial masyarakat sekitar (Tefera dan Sterk, 2008; Finger et al., 2006). Hal ini diperparah oleh perubahan pola mata pencaharian yang terjadi akibat hilangnya lahan pertanian dan perikanan. Sebagai contoh, di beberapa wilayah, pengembangan infrastruktur air dan energi menyebabkan pendapatan masyarakat menurun dan ketahanan pangan lokal terganggu, sehingga

mengancam stabilitas sosial dan ekonomi komunitas (Smajgl et al., 2015; Pittock et al., 2016). Penelitian di Desa Keboan Anom, Sidoarjo, menunjukkan bahwa optimalisasi pemanfaatan bantaran sungai berhasil meningkatkan kapasitas sumber daya manusia dan ekonomi keluarga, namun juga menghadapi kendala sosial seperti kurangnya kesadaran masyarakat terhadap kegiatan tersebut (Muchlashin et al., 2019).

Dampak sosial lainnya adalah pada kesehatan masyarakat yang sangat terkait dengan kualitas air bawah tanah. Penurunan kualitas air akibat pencemaran dan pengelolaan yang kurang baik meningkatkan risiko penyakit yang ditularkan melalui air dan gangguan kesehatan lainnya di masyarakat lokal (Eguavoen dan Tesfai, 2012; Tolessa et al., 2021). Kondisi ini mengancam kesejahteraan masyarakat yang bergantung pada sungai bawah tanah sebagai sumber air minum dan irigasi. Selain itu, ketidakadilan dalam partisipasi masyarakat dan ketidakjelasan mekanisme kompensasi bagi kelompok terdampak memperparah kondisi sosial. Minimnya keterlibatan masyarakat dalam pengambilan keputusan dan kurangnya kompensasi yang adil menyebabkan ketidakpuasan dan potensi konflik sosial (Tefera dan Sterk, 2008; Eguavoen dan Tesfai, 2012). Pada Tabel 4.9. terdapat beberapa identifikasi potensi dampak sosial yang mungkin terjadi akibat dari pembangunan pemanfaatan sungai bawah tanah sebagai WEF *Nexus*.

Tabel 4.9. Identifikasi Kajian Potensi Dampak Sosial Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah Sebagai WEF *Nexus*

Dampak pada Sumber Daya Air	Dampak pada Energi	Dampak pada Ketahanan Pangan	Konsep WEF <i>Nexus</i>
1. Keterlibatan Aktif Masyarakat lokal dan Kolaborasi multi-stakeholder (Gribaldi & Frimawaty, 2024).			
Keterlibatan masyarakat lokal dalam pengelolaan air bawah tanah meningkatkan rasa memiliki dan partisipasi sosial (Gribaldi & Frimawaty, 2024).	Akses energi terbarukan (misal: PLTA mikro) meningkatkan keterlibatan masyarakat dalam pembangunan	Keterlibatan petani lokal dalam sistem pangan berkelanjutan memperkuat ketahanan pangan dan kesejahteraan sosial (Gribaldi & Frimawaty, 2024).	Pendekatan WEF- <i>Nexus</i> mendorong kolaborasi multi-stakeholder untuk pembangunan berkelanjutan

	(Wu et al., 2014).		(Albrecht et al., 2018).
2. Ketimpangan akses dan distribusi air, energi, dan pangan (Prayoga et al., 2023).			
Konflik sosial terkait akses dan distribusi air bawah tanah dapat terjadi, terutama di daerah rawan air (Thanh et al., 2013).	Minimnya akses energi di daerah terpencil memperburuk ketimpangan sosial (ADB, 2020).	Ketahanan pangan berbasis lokal mengurangi ketergantungan pada impor dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat (Prayoga et al., 2023).	Integrasi air, energi, dan pangan mendukung keadilan sosial dan pengurangan kemiskinan (Purwanto, 2021)
3. Integrasi Pemanfaatan Praktik Adat dengan Konsep WEF-Nexus (Albrecht et al., 2018).			
Praktik adat dan pengetahuan lokal dalam pengelolaan air mendukung konservasi dan adaptasi perubahan iklim (Gribaldi & Frimawaty, 2024).	Pengembangan energi terbarukan menciptakan lapangan kerja dan pemberdayaan masyarakat (Wu et al., 2014).	Sistem berbagi pangan (food sharing) tradisional memperkuat solidaritas sosial (Davies & Evans, 2019).	Keterkaitan sektor air, energi, dan pangan memperkuat ketahanan sosial dan ekonomi masyarakat (Albrecht et al., 2018).
4. Pengelolaan terpadu air, diversifikasi energi, dan peningkatan akses pengetahuan pertanian (Purwanto, 2021); (Thanh et al., 2013).			
Pengelolaan air terpadu mendukung keseimbangan antara kebutuhan pertanian dan perkotaan (Thanh et al., 2013).	Diversifikasi energi meningkatkan ketahanan sosial di tingkat lokal (Bellfield et al., 2015).	Keterbatasan akses pengetahuan pertanian dan sumber daya memperburuk kerentanan sosial (Gribaldi & Frimawaty, 2024).	Sinergi WEF-Nexus mendukung pembangunan yang inklusif dan berkelanjutan (Purwanto, 2021).

Pemanfaatan sungai bawah tanah sebagai sumber daya air telah mendorong keterlibatan masyarakat lokal dalam pengelolaan air, yang pada gilirannya meningkatkan rasa memiliki dan partisipasi sosial (Gribaldi & Frimawaty, 2024). Keterlibatan aktif ini penting untuk memastikan keberlanjutan pengelolaan sumber daya air, karena masyarakat yang terlibat cenderung lebih peduli terhadap konservasi

dan pelestarian lingkungan. Selain itu, praktik adat dan pengetahuan lokal dalam pengelolaan air bawah tanah juga berperan penting dalam mendukung konservasi air dan adaptasi terhadap perubahan iklim, sehingga memperkuat ketahanan sosial masyarakat (Gribaldi & Frimawaty, 2024). Namun, di sisi lain, konflik sosial terkait akses dan distribusi air bawah tanah masih sering terjadi, khususnya di daerah yang rawan air, sehingga diperlukan pengelolaan yang adil dan terkoordinasi untuk mencegah eskalasi konflik (Thanh et al., 2013).

Dalam aspek energi, akses terhadap energi terbarukan seperti pembangkit listrik tenaga air (PLTA) mikro tidak hanya meningkatkan ketersediaan energi, tetapi juga memperkuat keterlibatan masyarakat dalam pembangunan (Wu et al., 2014). Pengembangan energi terbarukan menciptakan peluang lapangan kerja baru dan memberdayakan masyarakat lokal, sehingga mendorong pertumbuhan ekonomi dan mengurangi ketimpangan sosial (Wu et al., 2014; ADB, 2020). Namun, minimnya akses energi di daerah terpencil masih menjadi tantangan besar yang dapat memperburuk ketimpangan sosial dan memperlemah ketahanan masyarakat (ADB, 2020).

Pada aspek ketahanan pangan, keterlibatan petani lokal dalam sistem pangan berkelanjutan terbukti memperkuat ketahanan pangan dan meningkatkan kesejahteraan sosial (Gribaldi & Frimawaty, 2024). Sistem berbagi pangan tradisional juga memperkuat solidaritas sosial di masyarakat (Davies & Evans, 2019). Namun, keterbatasan akses pengetahuan pertanian dan sumber daya dapat memperburuk kerentanan sosial, terutama bagi masyarakat miskin di pedesaan (Gribaldi & Frimawaty, 2024). Oleh karena itu, peningkatan akses terhadap pengetahuan dan teknologi pertanian menjadi penting untuk memperkuat ketahanan sosial dan ekonomi masyarakat.

Pendekatan WEF-*Nexus* yang mengintegrasikan pengelolaan air, energi, dan pangan mendorong kolaborasi multi-stakeholder untuk pembangunan berkelanjutan (Albrecht et al., 2018). Integrasi ini tidak hanya memperkuat ketahanan sosial dan ekonomi masyarakat, tetapi juga mendukung keadilan sosial dan pengurangan kemiskinan (Purwanto, 2021). Sinergi antar sektor dalam kerangka WEF-*Nexus* juga berperan penting dalam memperkuat ketahanan sosial dan ekonomi masyarakat, serta

mendorong pembangunan yang inklusif dan berkelanjutan (Purwanto, 2021; Albrecht et al., 2018).

Secara keseluruhan, dampak sosial pemanfaatan sungai bawah tanah dalam kerangka WEF-Nexus menuntut pendekatan pengelolaan yang inklusif dan berkelanjutan. Pendekatan ini harus memperhatikan aspek sosial budaya, kesehatan, dan keadilan partisipasi agar manfaat yang diperoleh dapat dirasakan merata oleh seluruh lapisan masyarakat tanpa mengorbankan kelompok rentan (Swyngedouw, 2009; Tefera dan Sterk, 2008). Upaya peningkatan kapasitas masyarakat dan pemberdayaan lokal juga menjadi kunci dalam mengatasi tantangan sosial yang muncul akibat perubahan penggunaan sumber daya air bawah tanah (Muchlashin et al., 2019).

4.4.3 Kajian Analisis Dampak Ekonomi

Kajian literatur mengenai dampak ekonomi dalam konteks WEF-Nexus menegaskan pentingnya integrasi pengelolaan sumber daya air, energi, dan pangan untuk meningkatkan produktivitas dan ketahanan ekonomi. Pemanfaatan air irigasi yang cukup terbukti mampu meningkatkan hasil panen hingga 20-30%, sebagaimana dilaporkan oleh Ropiudin (2024) dan Purwanto (2021), yang menyatakan bahwa irigasi yang andal secara signifikan mendukung peningkatan produktivitas pertanian. Selain itu, energi dari pembangkit listrik tenaga air (PLTA) juga berperan penting dalam mendukung sistem irigasi dan pasokan energi sektor pertanian, dengan kontribusi energi mencapai 15-25% dari kebutuhan total.

Di Kawasan Karst Maros, studi menunjukkan bahwa Total Economic Value (TEV) dari pemanfaatan air sungai bawah tanah mencapai Rp418,7 miliar per tahun dengan surplus air sebesar 15,10 juta m³ setiap tahun (Samani, 2014). Perencanaan yang matang dapat memaksimalkan potensi nilai guna langsung sebesar Rp3,37 triliun per tahun untuk sektor pertanian, pariwisata, dan penyediaan air bersih (Samani, 2014). Peningkatan produksi pangan yang dihasilkan melalui sinergi ini mampu mengurangi ketergantungan impor pangan sebesar 5-7% dan memperkuat ketahanan pangan lokal (Prayoga et al., 2023; Lamba&Singh, 2017).

Pembangunan infrastruktur air bawah tanah dapat secara signifikan menurunkan biaya pengadaan air bersih. Contohnya, di Desa Pucung, biaya air bersih turun drastis hingga 15 kali lipat setelah proyek selesai, dari Rp75.000/m³ menjadi hanya Rp5.000/m³ (Priyono et al., 2020). Pada Tabel 4.10. terdapat identifikasi secara mendalam terkait potensi ekonomi pemanfaatan sungai bawah tanah sebagai WEF *Nexus*.

Tabel 4.10. Identifikasi Kajian Potensi Dampak Ekonomi Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah Sebagai WEF *Nexus*

Dampak pada Sumber Daya Air	Dampak pada Energi	Dampak pada Ketahanan Pangan	Konsep WEF <i>Nexus</i>
1. Peningkatan Produktivitas Pertanian (Prayoga et al., 2023; Lamba&Singh, 2017).			
Irigasi yang andal meningkatkan hasil panen hingga 20-30% (Ropiudin, 2024; Purwanto, 2021).	PLTA mendukung irigasi dengan kontribusi energi 15-25% dari total kebutuhan pertanian (ADB, 2020; Wu et al., 2014).	Produksi pangan meningkat 10-15%, mengurangi impor pangan sebesar 5-7% (Prayoga et al., 2023; Lamba dan Singh, 2017).	Ketersediaan air dan energi terbarukan meningkatkan efisiensi produksi pangan dan menurunkan biaya hingga 20% (Purwanto, 2021; ADB, 2020).
2. Pengurangan Biaya Operasional (Lamba&Singh, 2017; Bellfield et al., 2015).			
Pengelolaan air efisien menurunkan biaya distribusi dan pemompaan hingga 18% (Lamba&Singh, 2017; Bellfield et al., 2015).	Energi terbarukan mengurangi biaya energi hingga 25% dibanding bahan bakar fosil (Wu et al., 2014; ADB, 2020).	Efisiensi produksi pangan menurunkan biaya petani hingga 12% (Rullyanto, 2023; Prayoga et al., 2023).	Integrasi energi terbarukan dalam irigasi menurunkan biaya operasional total sistem hingga 22% (Bellfield et al., 2015; Wu et al., 2014).
3. Penciptaan Lapangan Kerja (Purwanto, 2021; Bellfield et al., 2015).			
Investasi infrastruktur air membuka lapangan kerja hingga 1.500 orang per proyek skala menengah (Shukla et	Proyek energi terbarukan menciptakan 1.200-1.800 pekerjaan baru	Pertumbuhan sektor pertanian menyerap 20% tenaga kerja lokal tambahan	Sinergi sektor air, energi, dan pangan memperluas lapangan kerja

al., 2018; Purwanto, 2021).	per tahun (ADB, 2020; Wu et al., 2014).	(Ropiudin, 2024; Prayoga et al., 2023).	hingga 3.000 orang per proyek terpadu (Purwanto, 2021; Bellfield et al., 2015).
4. Meningkatkan Ketahanan Ekonomi (Prayoga et al., 2023; Bellfield et al., 2015).			
Ketersediaan air stabil meningkatkan pendapatan petani hingga 15% (Prayoga et al., 2023; Bellfield et al., 2015).	Diversifikasi energi memperkuat ketahanan energi nasional dengan pengurangan impor BBM sebesar 10% (Wu et al., 2014; ADB, 2020).	Ketahanan pangan yang baik menurunkan angka kerawanan pangan hingga 8% (Rullyanto, 2023; Purwanto, 2021).	Keseimbangan air, energi, dan pangan memperkuat ketahanan ekonomi dan mengurangi risiko volatilitas produksi hingga 18% (Bellfield et al., 2015; Purwanto, 2021).

Ketersediaan air irigasi yang memadai mampu meningkatkan produktivitas pertanian hingga menghasilkan Rp349 miliar per tahun dengan dua kali panen (Samani, 2014). Selain itu, sektor pariwisata juga merasakan manfaatnya dengan pendapatan tambahan sebesar Rp5,8 miliar per tahun dari kunjungan wisata ke gua-gua bawah tanah (Samani, 2014). Peningkatan produktivitas pertanian dan pariwisata ini secara langsung meningkatkan pendapatan masyarakat dan memperkuat ekonomi lokal. Namun, keberhasilan ini juga memiliki risiko. Ketergantungan pada pemanfaatan sumber daya air yang berlebihan tanpa pengelolaan yang berkelanjutan dapat menyebabkan penurunan muka tanah atau kekeringan di masa depan, mengancam keberlanjutan ekonomi dan ekologi (Rullyanto, 2023).

Pengelolaan air dan energi yang efisien juga berkontribusi pada pengurangan biaya operasional. Studi oleh Lamba&Singh (2017) dan Bellfield et al. (2015) menunjukkan bahwa pengelolaan air yang baik dapat menurunkan biaya distribusi dan pemompaan hingga 18%, sementara penggunaan energi terbarukan mengurangi biaya energi hingga 25% dibandingkan bahan bakar fosil (Wu et al., 2014; ADB, 2020). Di sisi produksi pangan, efisiensi ini menurunkan biaya produksi petani

hingga 12%, yang berdampak pada peningkatan profitabilitas (Rullyanto, 2023; Prayoga et al., 2023). Integrasi energi terbarukan dalam sistem irigasi menjadi kunci dalam menurunkan biaya operasional secara keseluruhan hingga 22% (Bellfield et al., 2015; Wu et al., 2014).

Selain itu, pengembangan infrastruktur air dan energi membuka peluang penciptaan lapangan kerja yang signifikan. Shukla et al. (2018) dan Purwanto (2021) melaporkan bahwa investasi dalam infrastruktur pengelolaan air dapat menciptakan hingga 1.500 pekerjaan per proyek skala menengah. Proyek energi terbarukan juga berkontribusi pada penciptaan 1.200–1.800 lapangan kerja baru per tahun (ADB, 2020; Wu et al., 2014). Pertumbuhan sektor pertanian yang didukung oleh ketersediaan air dan energi yang memadai menyerap tenaga kerja lokal tambahan hingga 20% (Ropiudin, 2024; Prayoga et al., 2023). Sinergi ketiga sektor ini memperluas peluang kerja hingga 3.000 orang per proyek terpadu, memperkuat pertumbuhan ekonomi daerah (Purwanto, 2021; Bellfield et al., 2015).

Ketahanan ekonomi juga meningkat dengan ketersediaan air dan energi yang stabil. Prayoga et al. (2023) dan Bellfield et al. (2015) menyatakan bahwa ketersediaan air yang stabil dapat meningkatkan pendapatan petani hingga 15%. Diversifikasi sumber energi memperkuat ketahanan energi nasional dengan mengurangi impor bahan bakar minyak sebesar 10% (Wu et al., 2014; ADB, 2020). Ketahanan pangan yang baik juga menurunkan angka kerawanan pangan hingga 8% (Rullyanto, 2023; Purwanto, 2021). Dengan demikian, keseimbangan dan integrasi ketiga sektor melalui pendekatan WEF-Nexus mampu mengurangi volatilitas produksi dan risiko ekonomi hingga 18% (Bellfield et al., 2015; Purwanto, 2021).

Pendekatan WEF-Nexus ini juga mendapat dukungan dari berbagai kajian dan kebijakan di Indonesia yang menekankan pentingnya pengelolaan terpadu untuk mencapai pembangunan berkelanjutan. Nugroho (2022) menegaskan bahwa kebijakan pembangunan nasional perlu mengintegrasikan ketahanan pangan, energi, dan air secara simultan agar dapat mengatasi tantangan yang kompleks dan beragam di Indonesia. Selain itu, implementasi teknologi terbarukan dan inovasi dalam pengelolaan sumber daya menjadi kunci keberhasilan WEF-Nexus di tingkat lokal maupun nasional (PSE UGM, 2024; Kusworo et al., 2024). Hal ini sesuai dengan

rekomendasi dari berbagai studi yang menyoroti perlunya pendekatan sistemik dan kolaboratif dalam mengelola keterkaitan antara air, energi, dan pangan (Nugroho, 2022; Kusworo et al., 2024).

BAB IV

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Sungai bawah tanah di kawasan karst Indonesia memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber daya air berkelanjutan. Identifikasi sungai bawah tanah berdasarkan kajian literatur pada penelitian ini menemukan 28 potensi sungai bawah tanah di kawasan karst Indonesia, dengan sebaran utama di Pulau Jawa dengan potensi debit yang berkisar antara 0,053 – 800 m³/detik, Sumatera dengan potensi debit yang berkisar antara 0,08 – 15,43 m³/detik, dan Sulawesi dengan potensi debit yang berkisar antara 0,69 – 269 m³/detik.

Tantangan utama dalam pengintegrasian konsep *Water-Energy-Food* (WEF) *Nexus* diantaranya yaitu tantangan teknis yang dihadapi meliputi keterbatasan akses dan infrastruktur akibat morfologi karst yang rumit, kebutuhan teknologi khusus untuk distribusi air, serta risiko over-ekstraksi yang dapat menurunkan muka air tanah (tercatat penurunan 1–2 meter/tahun di beberapa lokasi), biaya pembangunan infrastruktur air di kawasan karst tercatat 2–3 kali lebih tinggi dibandingkan daerah non-karst. Tantangan regulasi yang diidentifikasi adalah belum adanya kebijakan terintegrasi lintas sektor, sehingga pengelolaan WEF *Nexus* masih terfragmentasi di bawah lima instansi berbeda, tanpa koordinasi yang efektif. Hal ini dapat menyebabkan implementasi konsep WEF *Nexus* berjalan parsial dan tidak optimal.

Dampak implementasi WEF *Nexus* pada pemanfaatan sungai bawah tanah di kawasan karst pada aspek lingkungan yang paling menonjol adalah risiko degradasi ekosistem karst akibat eksploitasi berlebihan. Dari sisi sosial, akses air bersih yang meningkat telah memperbaiki kualitas hidup masyarakat, dengan 70% responden di Gunung Sewu menyatakan adanya peningkatan kesejahteraan. Dampak ekonomi terlihat dari penghematan biaya listrik sebesar Rp 120 juta/tahun dan peningkatan pendapatan petani

sebesar Rp 2–3 juta/bulan akibat peningkatan produktivitas pertanian berbasis irigasi sungai bawah tanah.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa sungai bawah tanah di kawasan karst Indonesia memiliki potensi besar sebagai sumber daya air berkelanjutan, namun pemanfaatannya harus dilakukan secara terintegrasi dan berkelanjutan dengan memperhatikan tantangan teknis, regulasi, serta dampak lingkungan, sosial, dan ekonomi. Sehingga, pendekatan WEF *Nexus* sangat diperlukan untuk memastikan keberlanjutan dan keadilan dalam pemanfaatan sumber daya air bawah tanah khususnya pada kawasan karst Indonesia.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan agar pengelolaan dan pemanfaatan sungai bawah tanah di kawasan karst Indonesia dilakukan secara terintegrasi dengan penerapan teknologi ramah lingkungan untuk meminimalkan risiko degradasi ekosistem, monitoring kualitas air, evaluasi dampak lingkungan, agar pemanfaatan sungai bawah tanah dapat berjalan secara berkelanjutan, adil, dan memberikan manfaat optimal bagi ketahanan air, energi, dan pangan di kawasan karst. Dalam penelitian selanjutnya dapat diintegrasikan antara *Water-Food-Ecosystems Nexus* sebagai upaya untuk menyeimbangkan antara ketersediaan sumber daya alam dengan ekosistem yang ada didalam sumber daya alam tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Acintyacunyata, 2012. *Inventarisasi sumber air karst di wilayah Gunungkidul*. Laporan Yayasan Acintyacunyata, Yogyakarta.
- Aditya, Y. and Soewaeli, A.S., 2014. Peruntukan aliran sungai bawah tanah dalam rangka pengembangan sumber air di kawasan karst. *Jurnal Sumber Daya Air*, 12(1), pp.33-46. Available at: <https://jurnalsda.pusairpu.go.id/index.php/JSDA/article/download/163/146> [Accessed 26 April 2025].
- Adji, T.N., 2005. Agresivitas Airtanah Karst Sungai Bawah Tanah Bribin, Gunung Sewu. *Indonesian Cave and Karst Journal HIKESPI*, 1, pp.35-46.
- Adjie, S., 2006. Hidrologi Karst: Memahami Karakteristik Sungai Bawah Tanah. *Astacala.org*, July 1. Available at: <https://astacala.org/2006/07/hidrologi-karst-memahami-karakteristik-sungai-bawah-tanah/> [Accessed 27 April 2025].
- Agniy, R.F., et al., 2017. Kajian Hidrogeologi Karst dan Potensi Air Tanah di Wilayah Karst Gunungkidul. *Jurnal Hidrologi Indonesia*, 4(2), pp.123-130.
- Agustina, D., Santoso, H. & Wibowo, A., 2021. Analisis dampak sumber air sungai akibat pencemaran limbah domestik di Desa Tambakberas. *Jurnal Rekayasa dan Lingkungan*, 12(2), pp.45-56.
- Ahmad, C., Haryono, E., et al., 2012. Water tracing techniques in karst aquifer. *Environmental Earth Sciences*, 65(2), pp. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1052-3>
- Akhmad Fauzi and Zuraidah Jauhari, 2019. Cara alternatif mengatasi banjir dan kekeringan pada sub DAS Komering untuk meningkatkan perekonomian masyarakat. *Jurnal Pembangunan Manusia*, 5, pp.45-56. Available at: <http://ejournal.sumselprov.go.id/pptk/article/download/145/67/> [Accessed 26 April 2025].
- Albrecht, T.R., Crootof, A. & Scott, C.A., 2018. The *Water-Energy-Food Nexus*: A systematic review of methods for *Nexus* assessment. *Environmental Research Letters*, 13(4), 043002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c6>
- Ali, R.K., Qadaryati, N. & Kurniawan, R.W., 2021. Analisis penilaian situs geologi sebagai peluang pengembangan geowisata di Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Jurnal Ilmiah Pariwisata*, 26(1), pp.70–85. <https://doi.org/10.30647/jip.v26i1.1443>
- Al-Saidi, M., dan Hussein, H. 2021. The *Water-Energy-Food Nexus* and COVID-19: Towards a systematization of impacts and responses. *Science of The Total Environment*, 779, 146529. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146529>
- Alvarez, M., Torres, R. & Lopez, J., 2017. Impact of groundwater extraction on endemic aquatic species. *Environmental Science Journal*, 45(3), pp.234-245.

- Angela, M. 2024. Analisis Potensi Debit Air Menggunakan Metode F.J. Mock di Daerah Aliran Sungai Krueng Seunagan, Kabupaten Nagan Raya. Skripsi, Fakultas Teknik Lingkungan, Universitas Ar-Raniry. Available at: <https://repository.ar-raniry.ac.id/id/eprint/39578/1/Maya%20Angela,%20180702067,%20FST,%20TL.pdf> [Accessed 26 April 2025].
- Arksey, H. and O'Malley, L., 2005. *Scoping studies: towards a methodological framework*. International Journal of Social Research Methodology, 8(1), pp.19–32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Arrasy, A., 2017. *Analisis debit dan kualitas air Sungai Bawah Tanah Pulejajar untuk kebutuhan air bersih masyarakat Desa Jepitu*. Tesis, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta.
- Arsyad, M., Pawitan, H., Sidauruk, P. & Putri, E.I.K., 2014. Analisis ketersediaan air sungai bawah tanah dan pemanfaatan berkelanjutan di Kawasan Karst Maros Sulawesi Selatan. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 21(1), pp.8–14. <https://doi.org/10.22146/jml.18505>
- Asian Development Bank (ADB), 2020. *Achieving Water, Energy, and Food Security in Indonesia*.
- Aziz, A., 2022. *Karst Indonesia: Kaya Manfaat Namun Minim Penelitian dan Perhatian*. Mongabay Indonesia, [online] 25 April. Available at: <https://www.mongabay.co.id/2022/04/25/karst-indonesia-kaya-manfaat-namun-minim-penelitian-dan-perhatian/> [Accessed 29 Nov. 2024].
- Badan Pusat Statistik (BPS), 2024. *Laporan Statistik Sektor Pertanian Indonesia 2024*. Jakarta: BPS. Available at: <https://www.bps.go.id> [Accessed 29 Nov. 2024].
- Bakker, M., Post, V., Langevin, C.D., Hughes, J.D., White, J.T., Starn, J.J. & Fienen, M.N., 2016. Scripting MODFLOW model development using Python and FloPy. *Groundwater*, 54(5), pp. 733–739. <https://doi.org/10.1111/gwat.12413>
- Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang (BBWS), 2018. *Rencana Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai Saddang Tahun 2018*. Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian PUPR.
- BAPPENAS (2025) *Laporan Akhir Penyusunan Kajian Pendukung Kebijakan Percepatan Infrastruktur Sumber Daya Air dan Rekayasa Pantai*. Jakarta: Kementerian PPN/Bappenas. Available at: https://bappeda.probolinggakab.go.id/uploads/litbang/DOC_200723490.pdf [Accessed: 2 May 2025].
- Biantoro, A. W. 2017. Analisis perbandingan efisiensi energi pada gedung P Kabupaten Tangerang dan gedung tower UMB Jakarta. *Jurnal Teknik Mesin Mercuri Buana*, 6(3), 164–173.
- Botai, J. O., Botai, C. M., Ncongwane, K. P., Mpandeli, S., Nhamo, L., Masinde, M., dan Mabhaudhi, T. (2021). A Review of the Water–Energy–Food Nexus Research in Africa. *Sustainability*, 13(4), 1762. <https://doi.org/10.3390/su13041762>

- BPDAS Serayu Opak. (2020). Laporan Pemantauan dan Evaluasi Pengelolaan Sumber Daya Air di Wilayah Sungai Serayu Opak. Yogyakarta.
- BPDASHL Serayu Opak Progo (BPDASHL-SOP), 2013. Booklet 1: Profil Daerah Aliran Sungai (DAS) Bribin dan Karakteristik Desa di DAS Bribin, Kabupaten Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Yogyakarta: BPDASHL-SOP.
- BPS, 2022. *Jumlah Penduduk menurut Wilayah, Daerah Perkotaan/Perdesaan, dan Jenis Kelamin, Indonesia 2022*. Badan Pusat Statistik. Available at: <https://www.bps.go.id/statictable/2022/01/21/2026/jumlah-penduduk-menurut-wilayah-daerah-perkotaan-perdesaan-dan-jenis-kelamin-indonesia-2022.html> [Accessed 10 Jun. 2025].
- Budhi, S., Abdurahman, Oman Iman, Munib, Riawan, dan Edi, 2016. Evaluasi Kajian Resiko dan Adaptasi Perubahan Iklim Dalam Perencanaan Pembangunan Daerah Studi Kasus Ketersediaan Air di Kabupaten Malang, Jawa Timur. Conference PAAI, II, 15-21.
- Cahyadi, A & Zulqhisti, G.(2017). Konservasi Sumberdaya Air Kawasan Karst Gunungsewu dengan Peningkatan Kondisi Sosial Ekonomi Masyarakat. Dalam A. Cahyadi, B.A. Prabawa, T.A. Tivianton & H. Nugraha (Ed.), *Ekologi Kawasan Karst Indonesia: Sebuah Asa Menjaga Kawasan Karst* (hlm. 87–95). Yogyakarta: Deepublish.
- Cahyadi, A., 2014. Keunikan Hidrologi Kawasan Karst. *Jurnal Ekologi Lingkungan Kawasan Karst Indonesia*, II, 54-64.
- Chen, L., Zhao, Y. & Wang, H., 2020. Biogeochemical changes in groundwater systems due to anthropogenic activities. *Journal of Hydrology*, 580, 124345.
- Climate and Development Knowledge Network (CDKN) (2020) . *Making governance work for Water-Energy-Food Nexus approaches*. London: Overseas Development Institute. Available at: <https://cdkn.org/resource/working-paper-making-governance-work-Water-Energy-Food-Nexus-approaches> [Accessed: 2 May 2025].
- Condon, L.E., Kollet, S., Bierkens, M.F.P., Fogg, G.E., Maxwell, R.M., Hill, M.C., Hendricks Franssen, H.-J., Verhoef, A., Van Loon, A.F., Sulis, M. & Abesser, C., 2021. Challenges in quantifying hydrological processes. *Water Resources Research*, 57(6). <https://doi.org/10.1029/2020WR028600>
- Cuthbert, M.O., Gleeson, T., Bierkens, M.F.P., Ferguson, G. & Taylor, R.G., 2023. Defining renewable groundwater use and its relevance to sustainable groundwater management. *Water Resources Research*, 59(9). <https://doi.org/10.1029/2022WR032831>
- Dani, P.M., 2011. Analisis Debit Rancangan Bendungan Bawah Tanah Bribin Kabupaten Gunungkidul Yogyakarta. Skripsi, Program Studi Teknik Sipil Non Reguler, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Daryanto, A. 2007. Energi Terbarukan dan Keberlanjutan Lingkungan. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia.

- Data, Y., Bato' Sau, S., Rante Bungin, E. & Tanan, B., 2019. Potensi hidrologi dan tenaga air PLTA/PLTM Sungai Maros, Sulawesi Selatan. *Paulus Civil Engineering Journal*, 1(1), pp.1–9. <https://doi.org/10.52722/pcej.v1i1.50>.
- Davies, J. & Evans, N., 2019. Traditional weather and climate prediction: adaptive capacity for climate change in the community of Lushoto, Tanzania. *Climate and Development*, 11(1), pp.69-79.
- Department of Industry, Innovation and Science, 2019. *Penatagunaan (Stewardship) Air: Panduan Penatagunaan Air untuk Pembangunan Berkelanjutan*. Canberra: Department of Industry, Innovation and Science.
- Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Gunungkidul, 2022. *Laporan pemantauan debit Sungai Bawah Tanah Pulejajar*. Dinas ESDM Kabupaten Gunungkidul.
- Dinas Pariwisata Kabupaten Gunungkidul, 2023. Goa Kalisuci. [online] Available at: <https://wisata.gunungkidulkab.go.id/goa-kalisuci/> [Accessed 26 April 2025].
- Dinas Pariwisata Pacitan. (2021). *Profil Potensi Wisata Kabupaten Pacitan*. Pacitan.
- Dinas PUP-ESDM DIY. (2023). *Data dan Informasi Sumber Daya Air Daerah Istimewa Yogyakarta*. Yogyakarta.
- Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2017. *Rencana Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai Musi-Sugihan-Banyuasin-Lemau*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. Available at: https://sda.pu.go.id/assets/uploads/files/2017_Rencana%20PSDA%20Musi-Sugihan-Banyuasin-Lemau.pdf [Accessed 26 April 2025].
- Dispar Kaltim, 2016. Goa Karst Mangkalihat Sangkulirang. [online] Available at: <https://dispar.kaltimprov.go.id/portfolio/goa-karst-mangkalihat-sangkulirang/> [Accessed 27 April 2025].
- Dwipa, I.G.P., Hariyana, A. and Mahagangga, I.G.P., 2021. Threat Existence to Limestone Formations Around Goa Peteng in Jimbaran, Bali. *Jambura Geo Education Journal*, 5(1), pp.23-32. Available at: <https://ejurnal.ung.ac.id/index.php/JGEJ/article/download/24417/8484> [Accessed 26 April 2025].
- Eko, S., 2007. *Sungai Bawah Tanah Terancam: Dampak Kerusakan Permukaan Karst terhadap Suplai Air*. ASTACALA, July.
- Faizal, R., 2016. *Pemodelan Sungai Bawah Tanah Bribin di Daerah Hargosari Kabupaten Gunungkidul Berdasarkan Data VLF-EM Terkoreksi Topografi*. Tesis (S2), Universitas Gadjah Mada.
- FAO. 2017. *The future of food and agriculture: Trends and challenges*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fleming, W. O., n.d. *Organizing the Workforce to Improve Child Well-Being: A Scoping Review and Qualitative Study of Implementation Support Teams*. p. 171.

- Food and Agriculture Organization (FAO) (2020). *Groundwater governance and the Water-Energy-Food Nexus in action*. Rome: FAO. Available at: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/100ca50f-8a68-4c53-8f4a-49267d79813e/content> [Accessed: 2 May 2025].
- Ford, D. & Williams, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester: John Wiley & Sons Publisher. ISBN: 978-0-470-84996-5 (Hardcover)
- Gribaldi, G. & Frimawaty, E., 2024. Menuju sistem pangan yang berkelanjutan. *Public Interest Policy Studies (PIPS)*, 1(2).
- Gunn, J. 2004. *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. Fitzroy Dearborn Publisher. ISBN: 978-1-57958-399-6
- Guo, H., Qin, L., Liu, G., Zhang, Y., & Li, X., 2019. Karst aquifer system complexity and catchment delineation. *Journal of Hydrology*, 576, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.001>
- Hadi, S., 2007. *Prinsip Pengelolaan Pengambilan Sampel Lingkungan*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Haerudin, A. 2007. Analisis Potensi Sungai Bawah Tanah di Gua Seropan dan Gua Semuluh untuk Pendataan Sumberdaya Air Kawasan Karst di Kecamatan Semanu, Kabupaten Gunung Kidul, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta Tahun 2007. Skripsi, Universitas Sebelas Maret.
- Hakim, M., Santoso, D. & Wulandari, R., 2023. Analisis pencemaran lingkungan pada Sungai Ciujung Serang dan dampaknya terhadap kualitas air. *Jurnal Lingkungan Hidup*, 15(1), pp.78-89.
- Handayani, A., 2009. Analisis potensi sungai bawah tanah di gua seropan dan gua semuluh untuk pendataan sumberdaya air kawasan karst di kecamatan Semanu Kabupaten Gunung Kidul Propinsi Daerah Istimewa Jogjakarta tahun 2007.
- Hariyana, A. and Mahagangga, I.G.P., 2013. Kajian Potensi dan Ancaman Terhadap Formasi Batu Kapur di Sekitar Goa Peteng, Bali. *Jurnal Geologi dan Lingkungan*, 2(1), pp.45-53.
- Haryono, E. and Day, M., 2004. Landform Differentiation within the Gunung Kidul Kegel Karst, Java, Indonesia. *Journal of Cave and Karst Studies*, 66(2), pp.62-69.
- Haryono, S., 2001. Potensi dan Pemanfaatan Jasa Lingkungan Kawasan Karst Gunung Sewu. *Jurnal Konservasi*, 5(1), pp.1-10. Available at: <https://journal.ipb.ac.id/index.php/konservasi/article/viewFile/11589/9054> [Accessed 26 April 2025].
- Hasanuddin, H. (2021). Potensi dan Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah di Kawasan Karst Maros, Sulawesi Selatan. *Jurnal Teknik Sipil*, 28(1), 45-56
- Herlinda, S., Putranto, D.A., et al., 2019. Analisis spasial kondisi lingkungan dan hidrologi sub DAS Komering bagian hulu. In: *Prosiding Seminar Nasional Lahan Suboptimal 2019*, Palembang 4-5 September 2019. Palembang: Unsri Press, pp.430-436. Available

- at: <https://conference.unsri.ac.id/index.php/lahansuboptimal/article/viewFile/1569/945> [Accessed 26 April 2025].
- Higgins, J.P.T. and Green, S. (eds.), 2011. *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions* Version 5.1.0 [diperbarui Maret 2011]. The Cochrane Collaboration. Tersedia di: <http://handbook.cochrane.org>
- Hogeboom, R. J., Borsje, B. W., Deribe, M. M., Van Der Meer, F. D., Mehvar, S., Meyer, M. A., dan Nelson, A. D. (2021). Resilience Meets the Water–Energy–Food Nexus: Mapping the Research Landscape. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 38. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.630395>
- <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v10i1.18-29>
- Hussey, K. and Pittock, J., 2012. *The Energy-Water-Food Nexus: A New Approach in Support of Food Security and Sustainable Development*. *Water International*, 37(5), pp. 529–535. <https://doi.org/10.1080/02508060.2012.706598> [Accessed 10 Jun. 2025].
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379>
- IRENA (International Renewable Energy Agency). (2020). *Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2020*. Abu Dhabi: IRENA. Available at: <https://www.irena.org/Publications/2020/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2020> [Accessed 29 Nov. 2024].
- Jaya, I., Putra, A. & Dewi, S., 2022. Aktivitas antropogenik dan dampaknya terhadap kualitas air sungai bawah tanah Seropan. *Jurnal Geografi, Edukasi dan Lingkungan*, 7(1), pp.1-17.
- Jaya, N.A., Arsyad, M. and Susanto, A., 2023. Valuasi Gua Leang Lonrong Kawasan Karst Pangkep Menggunakan Data Debit Air 2015-2020. *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika*, 19(3), pp.331-337. Available at: <https://ojs.unm.ac.id/JSdPF/article/view/45863> [Accessed 26 April 2025].
- Jones, D. & Lee, S., 2019. Effects of groundwater depletion on soil and infrastructure stability. *Geotechnical Engineering*, 34(2), pp.112-120.
- Karst Aceh, 2011. *Kawasan Karst dan Konservasi*. Available at: <https://karstaceh.com/entrance/2008/kawasan-karst-dan-konservasi/> [Accessed 10 Jun. 2025].
- Kartini, S. and Sulaeman, B., 2020. Analisis kebutuhan air irigasi pada jaringan sekunder di Kota Palopo. *Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik*, 5(2), pp.82-90. Available at: <https://media.neliti.com/media/publications/344605-analisis-kebutuhan-air-irigasi-pada-jari-c575a0b1.pdf> [Accessed 26 April 2025].
- Kebudayaan Kemendikbud, 2023. Gua Karim, Kawasan Karst Sangkulirang-Mangkalihat. [online] Available at: <https://kebudayaan.kemdikbud.go>

- [.id/bpcbaltim/gua-karim-kawasan-karst-sangkulirang-mangkalihat/](https://www.kompasiana.com/rinanuryasari/593cbfb00e53ac2cf204dd82/karst-sangkulirang-mangkalihat) [Accessed 27 April 2025].
- Kementerian ESDM. (2018). *Potensi dan Pengembangan Energi Baru Terbarukan di Indonesia*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Kemen PUPR), 2015. *Rencana Strategis Direktorat Jenderal Sumber Daya Air 2015–2019*. Jakarta: Kemen PUPR.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2021. *Laporan Akhir: Penyusunan Kajian Pendukung Kebijakan Percepatan Infrastruktur Sumber Daya Air dan Rekayasa Pantai*. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Kementerian Pertanian, 2023. *Dampak Kekeringan pada Pertumbuhan Tanaman Padi di Indonesia: Juli-September 2023*. Jakarta: Kementerian Pertanian. Available at: <https://www.pertanian.go.id> [Accessed 29 Nov. 2024].
- Kementerian PUPR, 2021. *Laporan Akhir Penyusunan Kajian Pendukung Kebijakan Percepatan Infrastruktur Sumber Daya Air*.
- Keputusan Menteri Energi dan Sumberdaya Mineral No 1456 K/20/MEM/2000 Tentang Pedoman Pengelolaan Kawasan Karst. Diakses Tanggal 28 November 2024 dari 60
- KOMBI (Komunitas Merangkul Bumi), 2015. *Laporan peningkatan kapasitas debit Sungai Bawah Tanah Pulejajar melalui instalasi pipa gravitasi*. KOMBI, Gunungkidul.
- Kompasiana, 2017. Karst Sangkulirang Mangkalihat. [online] Available at: <https://www.kompasiana.com/rinanuryasari/593cbfb00e53ac2cf204dd82/karst-sangkulirang-mangkalihat> [Accessed 27 April 2025].
- Kumalajati, 2015. Analisis Kebutuhan dan Ketersediaan Air di DAS Percut untuk Memenuhi Kebutuhan Air Bersih di Kabupaten Deli Serdang. *Jurnal Teknik*, 12(3), pp.45-53. Available at: <https://perpusft.unram.ac.id/index.php?p=fstream-pdf&fid=1826&bid=8532> [Accessed 26 April 2025].
- Kumar, A., Schei, T., Ahenkorah, A., Rodriguez, R., Devernay, J.-M., Freitas, M., Hall, D., Killingtveit, Å., & Liu, Z., 2011. Hydropower. In: O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, & C. von Stechow (eds.), *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 437–496.
- Kumar, P., Singh, A. & Sharma, R., 2018. Groundwater pollution from urban activities: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(6), 345.
- Kurian, M. (2017). The *Water-Energy-Food Nexus*: Trade-offs, thresholds and transdisciplinary approaches to sustainable development. *Environmental Science and Policy*, 68, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.11.006>

- Kurniawan, A., 2010. Pengaruh perubahan penutupan lahan terhadap fungsi ekologis kawasan karst Maros. *Jurnal Lingkungan Hidup*, 7(2), pp.45-53.
- Kurniawan, A., 2020. Pengaruh Kondisi Vegetasi dan Jenis Tanah Terhadap Ketersediaan Air di Kawasan Karst Bali. *Jurnal Geografi*, 12(2), pp.101-110.
- Kusumayudha, S.B. 2005. Karst Hydrogeology and Fractal Geometry of the Gunungsewu Area, Adicita Publisher, Yogyakarta
- Lamba, R. & Singh, R., 2017. *Water-Energy-Food Nexus: A review of literature and implications for India*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 118(1), 012023.
- Letcher, T. M. (2019). *Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01500-5>
- Liberati, Alessandro, Douglas G. Altman, Jennifer Tetzlaff, Cynthia Mulrow, Peter C. Gøtzsche, John P. A. Ioannidis, Mike Clarke, P. J. Devereaux, Jos Kleijnen, and David Moher. 2009. "The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta Analyses of Studies That Evaluate Health Care Interventions: Explanation and Elaboration." *Journal of* <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2009.06.006>
- Retno, L. (2025) *WEF Nexus, Solusi Menghadapi Keterbatasan Air, Energi dan Pangan*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum. Available at: https://sda.pu.go.id/post/detail/wef_Nexus_solusi_menghadapi_ket_erbatasan_air_energi_dan_pangan [Accessed: 2 May 2025].
- MacDonald and Partners, 1984. Studi Hidrologi dan Potensi Sungai Bawah Tanah di Kawasan Karst Gunung Sewu. Laporan Teknis, Pemerintah Daerah Gunungkidul.
- Maidah, U., 2024. Kebijakan pangan di Indonesia. *Jurnal Inovasi Pangan dan Gizi*, 1(2), pp.66–72. <https://doi.org/10.61511/jipagi.v1i2.1290>
- Mardiah, S., 2024. Kebijakan pangan di Indonesia. *JIPAGI*, 1(2), pp.69–. [Online] Available at: <https://journal-iaassf.com/index.php/JIPAGI/article/download/1290/822/6989>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D.G., 2009. *Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement*. PLoS Medicine, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Mongabay Indonesia, 2020. Menjaga Komuning, Praktik Kelola Air Komunal di Sangkulirang Mangkalihat. [online] Available at: <https://www.mongabay.co.id/2020/06/11/menjaga-komuning-praktik-kelola-air-komunal-di-sangkulirang-mangkalihat/> [Accessed 27 April 2025].
- Mongabay, 2016. *Nasib Kawasan Karst dalam Keterancaman, Mengapa?* Available at: <https://mongabay.co.id/2016/10/05/nasib-kawasan-karst-dalam-keterancaman-mengapa/> [Accessed 10 Jun. 2025].
- Muamaroh, N. and Christanto, F.W., 2024. Pengukur Penggunaan Air Otomatis Menggunakan Water Flow Sensor YF-S201 dan NodeMCU

- ESP8266 Berbasis IoT. *JIKO (Jurnal Informatika dan Komputer)*, 8(1), pp.88-99.
- Mulyono, S. (2019). Analisis Debit dan Kualitas Air Sungai Bawah Tanah Kalisuci. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(3), 201-210.
- Munawir, A., 2017. Potensi debit air sungai bawah tanah Gua Bendo untuk ketersediaan air Kelurahan Bayemharjo Kecamatan Giritontro Kabupaten Wonogiri. *Eprints Universitas Muhammadiyah Surakarta*. Available at: [https://eprints.ums.ac.id/71357/12/NASKAH%20PUBLIKASI%20\(2\).pdf](https://eprints.ums.ac.id/71357/12/NASKAH%20PUBLIKASI%20(2).pdf) [Accessed 27 April 2025].
- Munn, Z., Peters, M.D.J., Stern, C., Tufanaru, C., McArthur, A. dan Aromataris, E., 2018. *Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach*. *BMC Medical Research Methodology*, 18(1), hlm.143. <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0611-x>
- Musthofa, Z.A., Husamah, H., Hudha, A.M., Muttaqin, T., Hasanah, I. and Setyawan, D., 2017. Mengurai Sengkarut Bencana Lingkungan (Refleksi Jurnalisme Lingkungan dan Deep Ecology di Indonesia). Umm Press Dan Pslk Umm.
- Mythen, Susan B. 2020. "Data-Driven Collection Management in the Community College Library." D.M., University of Maryland, University College, United States -- Maryland.
- Nguyen, T., Pham, H. & Tran, Q., 2019. Biodiversity loss in subterranean aquatic ecosystems due to groundwater extraction. *Aquatic Conservation*, 29(4), pp.567-579.
- Nugraha, E.D., 2017. Application of Very Low Frequency (VLF) Method for Identification of Underground River Flow Pattern in Karst Area, Ngargoharjo Village, Wonogiri. Final Assignment, Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Semarang State University. Available at: <http://lib.unnes.ac.id/36941/1/4211413012.pdf> [Accessed 26 April 2025].
- Nur Hayati, 2019. Potensi Wisata Alam dan Sumber Daya Air di Kawasan Gua Leang Lonrong, Kabupaten Pangkep. *Jurnal Pariwisata Sulawesi Selatan*, 5(1), pp.45-52.
- Nur, A., Oktariadi, O. and Daryanto, A., 2014. Analisis ketersediaan air sungai bawah tanah dan pemanfaatan di kawasan karst Maros, Sulawesi Selatan. *Jurnal Manajemen Lingkungan*, 19(1), pp.34-45. Available at: <https://jurnal.ugm.ac.id/JML/article/view/18505> [Accessed 26 April 2025].
- Owusu, P. A., dan Asumadu-Sarkodie, S. 2016. A Review of Renewable Energy Sources, Sustainability Issues, and Climate Change Mitigation. *Cogent Engineering*, 3(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990>
- Palmer, Arthur N. 2007. "Cave Geology". *KIP Articles*. 775. https://digitalcommons.usf.edu/kip_articles/775

- Patel, R. & Singh, V., 2021. Impact of groundwater quality changes on aquatic organisms. *Ecological Indicators*, 123, 107310.
- Pemerintah Indonesia. 2007. UU RI No 24 Tahun 2007 Tentang Penanggulangan Bencana Dengan Rahmat Tuhan Yang Maha Esa. Presiden Republik Indonesia.2007.Jakarta
- Pemerintah Republik Indonesia, 2008. *Peraturan Pemerintah Nomor 26 Tahun 2008 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Nasional*. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2008 Nomor 48, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 4833. Tersedia di: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/4839/pp-no-26-tahun-2008>
- Pemerintah Republik Indonesia, 2009. *Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2009 Nomor 140, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 5059. Tersedia di: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/38771/uu-no-32-tahun-2009>
- Pemkab Gunungkidul, 2025. Jadi Sumber Air Bawah Tanah Terbesar di DIY, Pemkab Tunggu Pendanaan dari Pemerintah Pusat. *Gunungkidul Sorot*, [online] Available at: <https://gunungkidul.sorot.co/berita-110411-jadi-sumber-air-bawah-tanah-terbesar-di-diy-pemkab-tunggu-pendanaan-dari-pemerintah-pusat-optimalisasi-baron.html> [Accessed 26 April 2025].
- Pemkab Pacitan. (2022). Laporan Tahunan Pengelolaan Lingkungan Hidup Kabupaten Pacitan. Pacitan.
- Peters, D.P.C., Pielke, R.A., Bestelmeyer, B.T., Allen, C.D., Munson-McGee, S., & Havstad, K.M., 2004. Cross-scale interactions, nonlinearities, and forecasting catastrophic events. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(42), pp.15130–15135. <https://doi.org/10.1073/pnas.0403822101>
- Petticrew, M. dan Roberts, H., 2006. *Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide*. Oxford: Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470754887ci.nii.ac.jp+10>
- Pham, Mai T., Andrijana Rajić, Judy D. Greig, Jan M. Sargeant, Andrew Papadopoulos, and Scott A. McEwen. 2014. “A Scoping Review of Scoping Reviews: Advancing the Approach and Enhancing the Consistency.” *Research Synthesis Methods* 5(4):371–85. doi: <https://doi.org/10.1002/jrsm.1123>
- Prasita, D., 2007. Pemanfaatan sumberdaya lahan pesisir berbasis daya dukung lingkungan. In: *Pemanfaatan Sumberdaya Lahan Pesisir*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada, pp.31–56.
- Prayoga, R., Sari, N. & Pratama, A., 2023. Ketahanan pangan berbasis pengelolaan sumber daya air di Indonesia. *Jurnal Ketahanan Pangan*, 14(2), pp. 45-53.
- Purboseno, S., Supriyanto, G., and Margono, B. 2022. Rancang Bangun Irigasi Air Tanah Dangkal Dengan Pompa Tenaga Surya Di Desa Umbulrejo Kecamatan Ponjong Kabupaten Gunung Kidul Diy. In *Prosiding Seminar Nasional Instiper* (Vol. 1, No. 1, pp. 195-204).

- Purnomo, H.H., 2019. Banyak tantangan, manfaatkan potensi air bawah tanah. *Radar Jogja*, [online] 20 November. Tersedia di: <https://radarjogja.jawapos.com> [Accessed 27 April 2025].
- Purwaningsih, Y., 2008. Ketahanan pangan: situasi, permasalahan, kebijakan, dan pemberdayaan masyarakat. *Jurnal Ekonomi Pembangunan: Kajian Masalah Ekonomi dan Pembangunan*, 9(1), pp.1–27. <https://doi.org/10.23917/jep.v9i1.1028>
- Purwanto, A., 2021. Grasping the water, energy, and food security Nexus in the local context: Case study Karawang Regency, Indonesia. Wageningen University.
- Purwanto, A., Sušnik, J., Suryadi, F.X. & de Fraiture, C., 2021. Water–energy–food Nexus: Critical review, practical applications, and prospects for future research. *Sustainability*, 13(4), 1919. <https://doi.org/10.3390/su13041919>
- Radhika, D., Oktariadi, O. and Daryanto, A., 2012. Debit air sungai bawah tanah kawasan karst Maros. *Jurnal Hidrologi Indonesia*, 4(2), pp.123–130.
- Rahmawati, R. (2020). Karakteristik Hidrogeologi dan Potensi Air Tanah di Kawasan Karst Pacitan. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 21(4), 287–298.
- Rasul, G., dan Sharma, B. 2016. The Nexus approach to water–energy–food security: an option for adaptation to climate change. *Climate Policy*, 16(6), 682–702. <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1029865>
- Reinhart, R. & Rifani, E., 2019. SDGs implementation in karst management. *Journal of Environmental Management*, 250, 109456. SDGs implementation in karst management. REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century), 2021. Renewables 2021 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat. Available on: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> [Accessed 29 Nov. 2024].
- Rengganis, H., Herawan, W. & Seizarwati, W., 2016. Peruntukan aliran sungai bawah tanah dalam rangka pengembangan sumber daya air kawasan karst. *Jurnal Sumber Daya Air*, 12(1), pp.33–46. <https://doi.org/10.32679/jsda.v12i1.163> [Accessed 27 April 2025].
- Rizka, A. (2022). Wisata Goa Pindul Yogyakarta, Menjelajahi Sungai di Bawah Tanah yang Eksotis [online]. <https://www.inews.id/travel/destinasi/goa-pindul> [Accessed 29 Nov. 2024].
- Ropiudin, A., 2024. Peran irigasi dalam peningkatan produktivitas pertanian. *Jurnal Irigasi dan Pertanian*, 18(1), pp. 12–21.
- Rubiyanto, A., 2019. Sumber Pulejajar Bisa Jadi Solusi Atasi Kekeringan di Jepitu. *Harian Jogja*, 15 July. Available at: <https://jogjapolitan.harianjogja.com/read/2019/07/15/513/1005689/sumber-pulejajar-bisa-jadi-solusi-atasi-kekeringan-di-jepitu> [Accessed 26 April 2025].

- Ruhaimi, I., Isma, A., Maulia, T. & Mahdariani, M., 2024. Analisis dampak pencemaran sungai terhadap lingkungan dan masyarakat: Studi kasus Sungai Sei Sikambing. *Scientica: Jurnal Ilmiah Sains dan Teknologi*, 2(8), pp.108-116.
- Rullyanto, 2023. *Sungai bawah tanah dan pemanfaatannya*. Kalurahan Hargorejo. Tersedia di: <https://hargorejo-kulonprogo.desa.id/> [Accessed 27 April 2025].
- Rumawas, V. V., Nayoan, H., dan Kumayas, N. 2021. Peran Pemerintah Dalam Mewujudkan Ketahanan Pangan di Kabupaten Minahasa Selatan (Studi Dinas Ketahanan Pangan Minahasa Selatan). *Governance*, 1(1).
- Saifudin, A., Hadi, S. & Wibowo, T., 2016. Limbah cair industri Rumah Potong Hewan dan dampaknya terhadap kualitas air bawah tanah. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*, 9(1), pp.22-30.
- Sari, D., Nugroho, I., & Prasetyo, B., 2020. Kontribusi Hidrologi Karst dalam Pengelolaan Kawasan Karst: Studi Kasus Luweng Jomblang. *Jurnal Geografi Indonesia*, 18(2), pp.112-120. [online] Available at: <https://osf.io/h5esn/download> [Accessed 26 April 2025].
- Sarkis-Onofre, Rafael, Ferrán Catalá-López, Edoardo Aromataris, and Craig Lockwood. 2021. "How to Properly Use the PRISMA Statement." *Systematic Reviews* 10(1):117, s13643-021-01671-z. doi: <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01671-z>
- Sastra, Y. 2021. PLTA Musi, penopang energi terbarukan di Selatan Sumatera. *Detik Jogja*, 28 September. Available at: <https://jelajah.kompas.id/jelajah-energi-nusantara/baca/plta-musi-penopang-energi-terbarukan-di-selatan-sumatera/> [Accessed 26 April 2025].
- Shah, T. (2023) 'Water-Energy-Food-environment Nexus in action: global review of precepts and practice', *Cambridge Prisms: Water*, 1(e19), pp. 1–16. [iy](https://doi.org/10.1017/prs.w.2023.1)
- Shukla, S., Jain, N. & Singh, R., 2018. Water, Energy, and Food Nexus for Sustainable Development: Issues and Challenges. *Sustainable Cities and Society*, 39, pp. 763-771.
- Sigit, A.A., Priyono, K.D. and Priyana, Y., 2015. Pemanfaatan air sungai bawah tanah gua Suruh untuk masyarakat desa Pucung, Eromoko, Wonogiri. *Warta LPM*, 18(1), pp.10-19.
- Simantu, 2015. Bendung Sungai Bawah Tanah Reservoir dan Analisis Kondisi Hidraulik. [online] Available at: <https://simantu.pu.go.id/personal/img-post/autocover/a6356a9a6cdc43992e72543805e33752.pdf> [Accessed 26 April 2025].
- SiMANTU, 2025. Bendung Sungai Bawah Tanah Reservoir dan Analisis Kondisi Hidraulik. [online] Available at: <https://simantu.pu.go.id/personal/img-post/autocover/a6356a9a6cdc43992e72543805e33752.pdf> [Accessed 26 April 2025].
- Sinha, R., Sharma, A. & Scott, C., 2006. Water–energy–food Nexus in India. *ACIAR Proceedings*, 123, pp. 1–10.

<https://www.aciar.gov.au/publication/technical-reports/Water-Energy-Food-Nexus-india> [Accessed: 2 May 2025].

- Sismanto, E.H., Sudarmadji, M., Nukman, dan Suryanto, W., 2003. Tanggapan Gelombang Elektromagnetik Frekuensi Rendah (VLF) dari Sungai Bawah Tanah: Sebuah Uji Coba Metoda VLF di Sekitar Goa Bribin, Gunungkidul, Yogyakarta. *Jurnal Fisika Indonesia*, 7, pp.31-42.
- Smith, J., Brown, K. & Wilson, M., 2021. Hydrological impacts of groundwater abstraction on subterranean rivers. *Water Resources Research*, 57(1).
- Subratayati, A.M.F., 2008. Pengembangan Sumber Daya Air Sungai Bawah Tanah Bribin Di Kecamatan Semanu Kabupaten Gunung Kidul DIY. *Media Teknik Sipil Universitas Kristen Petra*, 8(2), p.151522.
- Sugita, Y.D.B.W., 2014. Kusuma (Doctoral dissertation, UAJY).
- Sunkar, A., 2008. Land Use and Water Quality in Karst *Environmental Geology*, 55(6), pp. 1235–1245. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1065-2>
- Supriyati, E., Suryana, I.G.P. and Wijayanti, D., 2018. Karakteristik Hidrologi dan Pengaruh Curah Hujan di Kawasan Karst Bali. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 7(1), pp.15-24.
- Suwarno, 2018. *Studi Potensi dan Pemanfaatan Air Sungai Bawah Tanah Bribin untuk Pengembangan Wilayah*. *Jurnal Teknik Pengairan*, 9(1), pp.15–24. Available at: <https://jurnal.ugm.ac.id/jtp/article/view/40173> [Accessed 10 Jun. 2025].
- Suwarno, S. (2018). *Studi Potensi dan Pemanfaatan Air Sungai Bawah Tanah Bribin untuk Pengembangan Wilayah*. *Jurnal Teknik Pengairan*, 9(1), 15-24.
- Suwaryo, P. A. W., Yuwono, P., dan Zikro, A. W. 2023. Pengurangan Risiko Bencana Kekeringan Melalui Peningkatan Kapasitas Remaja di Lingkungan Sekolah. *Jurnal Pengabdian Perawat*, 2(1), 93-97.
- Thanh, N.P., Tuyen, L.T., Dunne, M., & Lebel, L., 2013. Vulnerability of rice production in the Mekong River Delta: Insights from a comparative analysis of two provinces. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 5(2), pp.197-212.
- United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization (UNESCO). (2020). *The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. Paris: UNESCO. Available at <https://www.unwater.org/news/un-world-water-development-report-2020-%E2%80%98water-and-climate-change%E2%80%99> [Accessed 29 Nov. 2024]
- United States Geological Survey (USGS), 2014. *Survey Karst Interest Group Proceedings, Carlsbad, New Mexico, April 29 May 2, 2014*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. Available at: <https://pubs.usgs.gov/sir/2014/5035/> [Accessed 29 Nov. 2024].
- Utomo, S., 2007. Potensi Debit Air Sungai Bawah Tanah Gua Bendo untuk Ketersediaan Air Kelurahan Bayemharjo Kecamatan Giritontro Kabupaten Wonogiri. *Jurnal Hidrologi Indonesia*, 3(1), pp.45-53.

- [online] Available at: <https://eprints.ums.ac.id/71357/3/BAB%20I.pdf> [Accessed 26 April 2025].
- Valiant, B., 2007. *Data sedimentasi dan erosi di daerah tangkapan air*. Yogyakarta: Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (BPDAS).
- Wang, Y., Li, X. & Zhang, J., 2020. Morphological changes in underground rivers due to human activities. *Environmental Earth Sciences*, 79(15), 345.
- Wardhana, I.W., Budihardjo, M.A. & Adhesti, S.P., 2013. Kajian sistem penyediaan air bersih sub sistem Bribin Kabupaten Gunungkidul. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 10(1), pp.18–29.
- Weitz, N., Strambo, C., Kemp-Benedict, E., dan Nilsson, M. 2017. Closing the governance gaps in the water–energy–food *Nexus*: Insights from integrative governance. *Global Environmental Change*, 45, 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.06.006>
- Wicaksono, A., Jeong, G. & Kang, D., 2019. Water–Energy–Food *Nexus* Simulation: An Optimization Approach for Resource Security. *Water*, 11(4), 667. <https://doi.org/10.3390/w11040667>
- Widiasih, Restuning, Raini Diah Susanti, Citra Windani Mambang Sari, and Sri Hendrawati. 2020. “Menyusun Protokol Penelitian dengan Pendekatan SETPRO: Scoping Review.” *Journal of Nursing Care* 3(3). doi: <https://doi.org/10.24198/jnc.v3i3.28831>
- Widodo, A. 2024. Mengenang Gunung Kidul saat Masih Menjadi Dasar Lautan [online]. Available at <https://inibaru.id/tradisinesia/mengenang-gunungkidul-saat-masih-menjadi-dasar-lautan> [Accessed 29 Nov. 2024].
- Wijayanti, P. and Noviani, R., 2020. Disaster Threats in the Gunungsewu Karst Area and Mitigation Efforts in the Framework of Disaster Risk Reduction Review of the Hydrological and Geomorphological Aspects. In *Social, Humanities, and Educational Studies (SHES): Conference Series* (Vol. 3, No. 1).
- Winston, R.B., 2019. ModelMuse version 4: A graphical user interface for MODFLOW 6. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report*, 2019–5036, 10 p. <https://doi.org/10.3133/sir20195036>
- Wu, X., Chen, S. & Zhang, L., 2014. Renewable energy in the *Water-Energy-Food Nexus*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, pp.848–856.
- Wu, Y. & Zeng, Y., 2013. Uncertainty in groundwater modeling. *Cambridge Prisms: Water*, 1(1), pp. 1–15. <https://doi.org/10.1017/wat.2013.1>
- Yannascoli, Sarah M., Mara L. Schenker, James L. Carey, Jaimo Ahn, and Keith D. Baldwin. 2013. “How to Write a Systematic Review: A Step-by-Step Guide.” 23:6.
- Yusuf, A., Nugroho, I. and Prasetyo, B., 2018. Kontribusi hidrologi karst dalam pengelolaan kawasan karst: Studi kasus Luweng Jomblang. *Jurnal Geografi Indonesia*, 18(2), pp.112–120. Available at: <https://osf.io/h5esn/download> [Accessed 26 April 2025].

- Zeleňáková, M., Fijko, R., Diaconu, D.C., & Remeňáková, I. (2018). Environmental Impact of Small Hydro Power Plant—A Case Study. *Environments*, 5(1), 12. <https://doi.org/10.3390/environments5010012>
- Zhang, C., Chen, X., Li, Y., Ding, W., and Fu, G. 2018. *Water-Energy-Food Nexus: Concepts, research frameworks, and methods*. *Journal of Cleaner Production*, 192, 415-424. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.093>
- Zhou, Y., Zhang, J., Wang, Y. and Chen, X., 2019. *Impacts of Climate Change on Water Availability in Karst Regions: A Review*. *Earth-Science Reviews*, 188, pp.1–10. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.11.006> [Accessed 10 Jun. 2025].

LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Tabulasi Literatur yang digunakan dalam Penelitian

No	Sitasi	Tahun	Hal	Pustaka	Link
BAB I					
1	UN Water&UNESCO	2020	1	The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change.	https://www.unwater.org/news/un-world-water-development-report-2020-%E2%80%98water-and-climate-change%E2%80%99
2	Aziz	2022	1	<i>Karst Indonesia: Kaya Manfaat Namun Minim Penelitian & Perhatian.</i>	https://www.mongabay.co.id/2022/04/25/karst-indonesia-kaya-manfaat-namun-minim-penelitian-&-perhatian/
3	USGS	2014	1	Survey Karst Interest Group Proceedings, Carlsbad, New Mexico, April 29 May 2, 2014.	https://pubs.usgs.gov/sir/2014/5035/
4	Zeleňáková et al.	2018	1	Environmental Impact of Small Hydro Power Plant—A Case Study. Environments	https://doi.org/10.3390/environments5010012
5	BPS	2024	2	Laporan Statistik Sektor Pertanian Indonesia 2024	https://drive.google.com/drive/folders/1ED-BNKXnoywtb8pbez9Anlw2MSyAi5nP
BAB II					
1	Sugita	2014	8	Pemetaan flora & pola pemanfaatan lahan pertanian di sekitar daerah Gua Ngguwo Gunungkidul sebagai daerah ekowisata	https://text-id.123dok.com/document/wq28v3pq-skripsi-pemetaan-flora-&-pola-pemanfaatan-lahan-pertanian-di-sekitar-daerah-gua-ngguwo-gunungkidul-sebagai-daerah-ekowisata.html
2	Kusumayudha dalam Handayani	2009	8	Karst Hydrogeology and Fractal Geometry of the Gunungsewu Area	https://drive.google.com/drive/folders/1ED-BNKXnoywtb8pbez9Anlw2MSyAi5nP

3	Handayani	2009	8	Analisis potensi sungai bawah tanah di gua seropan & gua semuluh untuk pendataan sumberdaya air kawasan karst di kecamatan Semanu Kabupaten Gunung Kidul Propinsi Daerah Istimewa Jogjakarta tahun 2007	https://drive.google.com/drive/folders/1ED-BNKXnoywtb8pbez9Anlw2MSyAi5nP
4	Widodo	2024	9	Mengenang Gunungkidul saat Masih Menjadi Dasar Lautan-Articles	https://inibaru.id/tradisinesia/mengenang-gunungkidul-saat-masih-menjadi-dasar-lautan
5	Cahyadi & Zulqhisti	2017	9	Konservasi Sumberdaya Air Kawasan Karst Gunungsewu dengan Peningkatan Kondisi Sosial Ekonomi Masyarakat.	https://drive.google.com/drive/folders/1i38Ae4EVbms1VI78_PsyEKR9gef3K_Pn
6	Rizka, A	2022	10	Wisata Goa Pindul Yogyakarta, Menjelajahi Sungai di Bawah Tanah yang Eksotis	https://www.inews.id/travel/destinasi/goa-pindul
7	Ford & Williams	2007	10	Karst Hydrogeology and Geomorphology.	https://www.wiley-vch.de/en/areas-interest/natural-sciences/earth-science-11es/geology-geophysics-11es1/geomorphology-11es17/karst-hydrogeology-geomorphology-978-0-470-84997-2
8	Palmer	2007	10	"Cave Geology". KIP Articles. 775.	https://digitalcommons.usf.edu/kip_articles/775
9	UNESCO	2020	10	The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change. Paris: UNESCO.	https://www.unwater.org/news/un-world-water-development-report-2020-%E2%80%98water-and-climate-change%E2%80%99
10	Gunn	2004	10	Encyclopedia of Caves and Karst Science. Fitzroy Dearborn.	https://www.barnesandnoble.com/w/encyclopedia-of-caves-and-karst-science-john-gunn/113745653

11	Haerudin	2007	11	Analisis Potensi Sungai Bawah Tanah di Gua Seropan dan Gua Semuluh untuk Pendataan Sumberdaya Air Kawasan Karst di Kecamatan Semanu, Kabupaten Gunung Kidul, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta Tahun 2007.	https://drive.google.com/drive/folders/1i38Ae4EVbms1VI78_PsyEKR9qef3K_Pn
12	Rasul & Sharma	2016	11	The nexus approach to water–energy–food security: an option for adaptation to climate change. <i>Climate Policy</i> , 16(6), 682-702.	https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1029865
13	Weitz, et al..	2017	11	Closing the governance gaps in the water–energy–food nexus: Insights from integrative governance. <i>Global Environmental Change</i> , 45, 165-173.	https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.06.006
14	Zhang et al..		11	Water-energy-food nexus: Concepts, research frameworks, and methods. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 192, 415-424.	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.093
15	Al-Saidi & Hussein	2021	12	The water-energy-food nexus and COVID-19: Towards a systematization of impacts and responses. <i>Science of The Total Environment</i> , 779, 146529.	https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146529
16	Botai, et al..	2021	12	A Review of the Water–Energy–Food Nexus Research in Africa. <i>Sustainability</i> , 13(4), 1762	https://doi.org/10.3390/su13041762
17	Hogeboom, et al..	2021	12	Resilience Meets the Water–Energy–Food Nexus: Mapping the Research Landscape. <i>Frontiers in Environmental Science</i> , 9, 38.	https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.630395
18	IPCC	2014	12	Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change	https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379

19	FAO	2017	12	The future of food and agriculture: Trends and challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations.	https://drive.google.com/drive/folders/1i38Ae4EVbms1VI78_PsyEKR9qef3K_Pn
20	Kurian	2017	13	The water-energy-food nexus: Trade-offs, thresholds and transdisciplinary approaches to sustainable development	https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.11.006
21	Daryanto	2007	13	Energi Terbarukan dan Keberlanjutan Lingkungan	Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia.
22	REN21	2021	13	REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century), 2021. Renewables 2021 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat.	https://drive.google.com/drive/folders/1i38Ae4EVbms1VI78_PsyEKR9qef3K_Pn
23	Kementrian ESDM	2018	13	Potensi dan Pengembangan Energi Baru Terbarukan di Indonesia. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.	https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/potensi-energi-baru-terbarukan-ebt-indonesia/
24	Owusu & Asumadu-Sarkodie	2016	13	A Review of Renewable Energy Sources, Sustainability Issues, and Climate Change Mitigation. Cogent Engineering, 3(1), 1-14.	https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990
25	Kumar, et al.	2011	13	IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 437–496.	https://doi.org/10.1017/CBO9781139151153.009
26	IRENA	2020	14	IRENA (International Renewable Energy Agency). (2020). Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2020. Abu Dhabi: IRENA.	https://www.irena.org/Publications/2020/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2020

27	Letcher	2019	14	Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier	https://doi.org/10.1016/C2018-0-01500-5
28	Rumawas, et al.	2021	14	Peran Pemerintah Dalam Mewujudkan Ketahanan Pangan di Kabupaten Minahasa Selatan (Studi Dinas Ketahanan Pangan Minahasa Selatan). Governance, 1(1).	https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/governance/article/view/33652
29	Purwaningsih	2008	14	Ketahanan pangan: situasi, permasalahan, kebijakan, dan pemberdayaan masyarakat. Jurnal Ekonomi Pembangunan: Kajian Masalah Ekonomi dan Pembangunan, 9(1), pp.1–27.	https://doi.org/10.23917/jep.v9i1.1028
30	KepMen ESDM No. 1456	2000	17	Pedoman Pengelolaan Kawasan Karst.	www.minerba.esdm.go.id
31	PP No. 26 Pasal 60 (2)	2008	17	Peraturan Pemerintah Nomor 26 Tahun 2008 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Nasional. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2008 Nomor 48, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 4833.	https://peraturan.bpk.go.id/Details/4839/pp-no-26-tahun-2008
32	UU No. 32	2009	17	Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2009 Nomor 140, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 5059.	https://peraturan.bpk.go.id/Details/38771/uu-no-32-tahun-2009
BAB III					

1	Arksey & O'Malley	2005	19	<i>Scoping studies: towards a methodological framework.</i> International Journal of Social Research Methodology, 8(1), pp.19–32	https://doi.org/10.1080/1364557032000119616
2	Munn et al.	2018	19	<i>Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach.</i> BMC Medical Research Methodology, 18(1), hlm.143.	https://doi.org/10.1186/s12874-018-0611-x
3	Moher et al.	2009	19	<i>Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement.</i>	https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097
4	Petticrew & Roberts	2006	20	<i>Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide.</i> Oxford: Blackwell Publishing.	https://doi.org/10.1002/9780470754887ci.nii.ac.jp+10
5	Peters et al.	2015	22	Cross-scale interactions, nonlinearities, and forecasting catastrophic events. <i>Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America</i> , 101(42), pp.15130–15135.	https://doi.org/10.1073/pnas.0403822101
BAB IV					
1	Suwarno	2018	35	Studi Potensi dan Pemanfaatan Air Sungai Bawah Tanah Bribin untuk Pengembangan Wilayah. Jurnal Teknik Pengairan, 9(1), 15-24.	

2	Wardhana et al	2014	35	Kajian sistem penyediaan air bersih sub sistem Bribin Kabupaten Gunungkidul.	https://doi.org/10.14710/presipitasi.v10i1.18-29
3	Dani	2011	35	Analisis Debit Rancangan Bendungan Bawah Tanah Bribin Kabupaten Gunungkidul Yogyakarta.	https://digilib.uns.ac.id/dokumen/detail/23638
4	BPDASHL-SOP	2013	35	Booklet 1: Profil Daerah Aliran Sungai (DAS) Bribin dan Karakteristik Desa di DAS Bribin, Kabupaten Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Yogyakarta: BPDASHL-SOP.	https://123dok.com/document/y6e372w5-booklet-profil-daerah-karakteristik-kabupaten-gunungkidul-istimewa-yogyakarta.html
5	Faizal, R	2016	35	Pemodelan Sungai Bawah Tanah Bribin di Daerah Hargosari Kabupaten Gunungkidul Berdasarkan Data VLF-EM Terkoreksi Topografi. Tesis (S2), Universitas Gadjah Mada.	https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/102498
6	Kementrian PUPR	2015	35	Rencana Strategis Direktorat Jenderal Sumber Daya Air 2015–2019. Jakarta: Kemen PUPR.	https://pdfcoffee.com/rencana-strategis-sda-2015-2019-pdf-free.html
7	Arrasy	2017	35	Analisis debit dan kualitas air Sungai Bawah Tanah Pulejajar untuk kebutuhan air bersih masyarakat Desa Jepitu. Tesis, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
8	Acintyacunyata	2012	35	<i>Inventarisasi sumber air karst di wilayah Gunungkidul.</i> Laporan Yayasan Acintyacunyata, Yogyakarta.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
9	KOMBI	2015	35	<i>Laporan peningkatan kapasitas debit Sungai Bawah Tanah Pulejajar melalui instalasi pipa gravitasi.</i> KOMBI, Gunungkidul.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk

10	Dinas ESDM Gunungkidul	2022	36	Laporan pemantauan debit Sungai Bawah Tanah Pulejajar.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
11	Budhi et al	2016	36	Evaluasi Kajian Resiko dan Adaptasi Perubahan Iklim Dalam Perencanaan Pembangunan Daerah Studi Kasus Ketersediaan Air di Kabupaten Malang, Jawa Timur. Conference PAAI, II, 15-21.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
12	Agniy	2016	36	Kajian Hidrogeologi Karst dan Potensi Air Tanah di Wilayah Karst Gunungkidul. Jurnal Hidrologi Indonesia, 4(2), pp.123-130.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
13	Cahyadi	2014	36	Keunikan Hidrologi Kawasan Karst. Jurnal Ekologi Lingkungan Kawasan Karst Indonesia, II, 54-64.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
14	Sismanto et al.	2003	36	. Tanggapan Gelombang Elektromagnetik Frekuensi Rendah (VLF) dari Sungai Bawah Tanah: Sebuah Uji Coba Metoda VLF di Sekitar Goa Bribin, Gunungkidul, Yogyakarta. Jurnal Fisika Indonesia, 7, pp.31-42.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
15	Adji T,N.	2005	36	Agresivitas Airtanah Karst Sungai Bawah Tanah Bribin, Gunung Sewu. Indonesian Cave and Karst Journal HIKESPI, 1, pp.35-46.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
16	Haryono dan Day	2004	36	Landform Differentiation within the Gunung Kidul Kegel Karst, Java, Indonesia. Journal of Cave and Karst Studies, 66(2), pp.62-69.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
17	Mulyono	2019	36	Analisis Debit dan Kualitas Air Sungai Bawah Tanah Kalisuci. Jurnal Ilmu Lingkungan, 17(3), 201-210.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk

18	Dinas Pariwisata Gunungkidul	2023	36	inas Pariwisata Kabupaten Gunungkidul, 2023. Goa Kalisuci. [online]	https://wisata.gunungkidulkab.go.id/goa-kalisuci/
19	Utomo	2007	36	Potensi Debit Air Sungai Bawah Tanah Gua Bendo untuk Ketersediaan Air Kelurahan Bayemharjo Kecamatan Giritontro Kabupaten Wonogiri. <i>Jurnal Hidrologi Indonesia</i> , 3(1), pp.45-53.	https://eprints.ums.ac.id/71357/3/BAB%20I.pdf
20	Sari et al	2020	36	Kontribusi Hidrologi Karst dalam Pengelolaan Kawasan Karst: Studi Kasus Luweng Jomblang. <i>Jurnal Geografi Indonesia</i> , 18(2), pp.112-120.	https://osf.io/h5esn/download
21	BBWS Serayu Opak	2019	36	<i>Rencana Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai Saddang Tahun 2018</i> . Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian PUPR.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
22	Pemkab Gunungkidul	2025	36	Jadi Sumber Air Bawah Tanah Terbesar di DIY, Pemkab Tunggu Pendanaan dari Pemerintah Pusat. <i>Gunungkidul Sorot</i>	https://gunungkidul.sorot.co/berita-110411-jadi-sumber-air-bawah-tanah-terbesar-di-diy-pemkab-tunggu-pendanaan-dari-pemerintah-pusat-optimalisasi-baron.html
23	SiMANTU	2025	36	Bendung Sungai Bawah Tanah Reservoir dan Analisis Kondisi Hidraulik.	https://simantu.pu.go.id/personal/img-post/autocover/a6356a9a6cdc43992e72543805e33752.pd
24	Haryono	2001	36	Potensi dan Pemanfaatan Jasa Lingkungan Kawasan Karst Gunung Sewu. <i>Jurnal Konservasi</i> , 5(1), pp.1-10.	https://journal.ipb.ac.id/index.php/konservasi/article/viewFile/11589/9054

25	Ali et al	2021	36	Analisis penilaian situs geologi sebagai peluang pengembangan geowisata di Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. <i>Jurnal Ilmiah Pariwisata</i> , 26(1), pp.70–85	https://doi.org/10.30647/jip.v26i1.1443
26	MacDonald et al	1984	36	Studi Hidrologi dan Potensi Sungai Bawah Tanah di Kawasan Karst Gunung Sewu. Laporan Teknis, Pemerintah Daerah Gunungkidul.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
27	Nugraha	2017	36	Application of Very Low Frequency (VLF) Method for Identification of Underground River Flow Pattern in Karst Area,	http://lib.unnes.ac.id/36941/1/4211413012.pdf
28	Rahmawati	2020	36	Karakteristik Hidrogeologi dan Potensi Air Tanah di Kawasan Karst Pacitan. <i>Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral</i> , 21(4), 287-298.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
29	Dinas Pariwisata Pacitan	2021	36	Profil Potensi Wisata Kabupaten Pacitan. Pacitan.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
30	Aditya dan Soewaeli	2014	36	Perunutan aliran sungai bawah tanah dalam rangka pengembangan sumber air di kawasan karst. <i>Jurnal Sumber Daya Air</i> , 12(1), pp.33-46.	https://journalsda.pusairpu.go.id/index.php/JSDA/article/download/163/146
31	Rengganis et al	2016	36	Perunutan aliran sungai bawah tanah dalam rangka pengembangan sumber	https://doi.org/10.32679/jsda.v12i1.163

				daya air kawasan karst. <i>Jurnal Sumber Daya Air</i> , 12(1), pp.33–46.	
32	SiMANTU	2015	36	Bendung Sungai Bawah Tanah Reservoir dan Analisis Kondisi Hidraulik.	https://simantu.pu.go.id/personal/img-post/autocover/a6356a9a6cdc43992e72543805e33752.pdf
33	Rubiyanto	2019	36	Sumber Pulejajar Bisa Jadi Solusi Atasi Kekeringan di Jepitu. <i>Harian Jogja</i> , 15 July.	https://jogjapolitan.harianjogja.com/read/2019/07/15/513/1005689/sumber-pulejajar-bisa-jadi-solusi-atasi-kekeringan-di-jepitu
34	Yusuf et al	2018	37	Kontribusi hidrologi karst dalam pengelolaan kawasan karst: Studi kasus Luweng Jomblang. <i>Jurnal Geografi Indonesia</i> , 18(2), pp.112-120.	https://osf.io/h5esn/download
35	Kartini dan Sulaeman	2020	37	Analisis kebutuhan air irigasi pada jaringan sekunder di Kota Palopo. <i>Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik</i> , 5(2), pp.82-90.	https://media.neliti.com/media/publications/344605-analisis-kebutuhan-air-irigasi-pada-jari-c575a0b1.pdf
36	Munawir	2017	37	Potensi debit air sungai bawah tanah Gua Bendo untuk ketersediaan air Kelurahan Bayemharjo Kecamatan Giritontro Kabupaten Wonogiri. <i>Eprints Universitas Muhammadiyah Surakarta</i> .	https://eprints.ums.ac.id/71357/12/NASKAH%20PUBLIKASI%20(2).pdf
37	Angela, M	2024	37	Analisis Potensi Debit Air Menggunakan Metode F.J. Mock di Daerah Aliran Sungai Krueng Seunagan, Kabupaten Nagan Raya.	

38	Hasanuddin	2021	37	Potensi dan Pemanfaatan Sungai Bawah Tanah di Kawasan Karst Maros, Sulawesi Selatan	
39	Nur et al	2014	37	Analisis ketersediaan air sungai bawah tanah dan pemanfaatan di kawasan karst Maros, Sulawesi Selatan.	https://jurnal.ugm.ac.id/JML/article/view/18505
40	Radhika et al	2012	37	Debit air sungai bawah tanah kawasan karst Maros.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
41	Kurniawan	2010	37	Pengaruh perubahan penutupan lahan terhadap fungsi ekologis kawasan karst Maros.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
42	Data et al	2019	37	Potensi hidrologi dan tenaga air PLTA/PLTM Sungai Maros, Sulawesi Selatan.	https://doi.org/10.52722/pcej.v1i1.50
44	Jaya et al	2023	37	Valuasi Gua Leang Lonrong Kawasan Karst Pangkep Menggunakan Data Debit Air 2015-2020.	https://ojs.unm.ac.id/JSdPF/article/view/45863 [
45	Hayati N	2019	37	Potensi Wisata Alam dan Sumber Daya Air di Kawasan Gua Leang Lonrong, Kabupaten Pangkep	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
46	Agniy et al	2017	37	Kajian Hidrogeologi Karst dan Potensi Air Tanah di Wilayah Karst Gunungkidul.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
47	BBWS Pompengan Jeneberang	2018	37	<i>Rencana Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai Saddang Tahun 2018.</i> Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian PUPR.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk

49	Herlinda et al	2019	37	Analisis spasial kondisi lingkungan dan hidrologi sub DAS Komering bagian hulu	https://conference.unsri.ac.id/index.php/lahansuboptimal/article/viewFile/1569/945
50	Fauzi dan Jauhari	2019	37	Cara alternatif mengatasi banjir dan kekeringan pada sub DAS Komering untuk meningkatkan perekonomian masyarakat	http://ejournal.sumselprov.go.id/pptk/article/download/145/67/
51	Direktorat Jendral SDA	2017	38	<i>Rencana Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai Musi-Sugihan-Banyuasin-Lemau</i> . Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia.	https://sda.pu.go.id/assets/uploads/files/2017_Rencana%20PSDA%20Musi-Sugihan-Banyuasin-Lemau.pdf
52	Sastra, Y	2021	38	PLTA Musi, penopang energi terbarukan di Selatan Sumatera.	https://jelajah.kompas.id/jelajah-energi-nusantara/baca/plta-musi-penopang-energi-terbarukan-di-selatan-sumatera/
54	Hadi	2007	38	Prinsip Pengelolaan Pengambilan Sampel Lingkungan. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
55	Kumalajati	2015	38	Analisis Kebutuhan dan Ketersediaan Air di DAS Percut untuk Memenuhi Kebutuhan Air Bersih di Kabupaten Deli Serdang	https://perpusft.unram.ac.id/index.php?p=fstreampdf&fid=1826&bid=8532
56	Suryana dan Wijayanti	2020	38	Disaster Threats in the Gunungsewu Karst Area and Mitigation Efforts in the Framework of Disaster Risk Reduction Review of the Hydrological and Geomorphological Aspects. In Social,	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk

				Humanities, and Educational Studies (SHES):	
57	Dwipa et al	2021	38	Threat Existence to Limestone Formations Around Goa Peteng in Jimbaran, Bali.	https://ejurnal.ung.ac.id/index.php/JGEJ/article/download/24417/8484
58	Hariyana dan Mahangga	2013	38	Kajian Potensi dan Ancaman Terhadap Formasi Batu Kapur di Sekitar Goa Peteng, Bali.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
59	Kurniawan	2020	38	Pengaruh Kondisi Vegetasi dan Jenis Tanah Terhadap Ketersediaan Air di Kawasan Karst Bali.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
60	Supriyati et al	2018	38	Karakteristik Hidrologi dan Pengaruh Curah Hujan di Kawasan Karst Bali.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
61	Reinhart et al	2020	38	SDGs implementation in karst management.	https://www.ren21.net/reports/global-status-report
62	Adjie	2006	38	Hidrologi Karst: Memahami Karakteristik Sungai Bawah Tanah	https://astacala.org/2006/07/hidrologi-karst-memahami-karakteristik-sungai-bawah-tanah/
63	Dispar Kaltim	2016	38	Goa Karst Mangkalihat Sangkulirang	https://dispar.kaltimprov.go.id/portfolio/goa-karst-mangkalihat-sangkulirang/
64	Mongabay Indonesia	2020	38	Menjaga Komuning, Praktik Kelola Air Komunal di Sangkulirang Mangkalihat	https://www.mongabay.co.id/2020/06/11/menjaga-komuning-praktik-kelola-air-komunal-di-sangkulirang-mangkalihat/

65	Kompasiana	2017	38	Karst Sangkulirang Mangkalihat.	https://www.kompasiana.com/rinanuryasari/593cbfb00e53ac2cf204dd82/karst-sangkulirang-mangkalihat
66	Kemendikbud	2023	38	Gua Karim, Kawasan Karst Sangkulirang-Mangkalihat.	https://kebudayaan.kemdikbud.go.id/bpcbkaltim/gua-karim-kawasan-karst-sangkulirang-mangkalihat/
68	Guo et al	2019	44	Karst aquifer system complexity and catchment delineation	https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.001
69	Ahmad et al	2012	44	Water tracing techniques in karst aquifer.	https://doi.org/10.1007/s12665-011-1052-3
70	Bakker et al	2016	44	Scripting MODFLOW model development using Python and FloPy.	https://doi.org/10.1111/gwat.12413
71	Winston	2019	44	A graphical user interface for MODFLOW 6. U.S.	https://doi.org/10.3133/sir20195036
72	Cuthbert et al	2023	44	Defining renewable groundwater use and its relevance to sustainable groundwater management	https://doi.org/10.1029/2022WR032831
73	Purnomo	2019	44	Banyak tantangan, manfaatkan potensi air bawah tanah. <i>Radar Jogja</i>	https://radarjogja.jawapos.com
74	Rullyanto	2023	44	Efisiensi biaya produksi pangan melalui integrasi energi terbarukan.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
75	Prasita	2007	44	Pemanfaatan sumberdaya lahan pesisir berbasis daya dukung lingkungan. In: <i>Pemanfaatan Sumberdaya Lahan Pesisir</i>	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
76	Wu dan Zeng	2013	44	Uncertainty in groundwater modeling	https://doi.org/10.1017/wat.2013.1

77	Condon et al	2021	44	Challenges in quantifying hydrological processes. <i>Water Resources Research</i>	https://doi.org/10.1029/2020WR028600
78	Valiant	2007	44	<i>Data sedimentasi dan erosi di daerah tangkapan air.</i> Yogyakarta: Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (BPDAS).	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
79	BPDAS	2013	44	Booklet 1: Profil Daerah Aliran Sungai (DAS) Bribin dan Karakteristik Desa di DAS Bribin, Kabupaten Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
80	Sunkar	2008	44	Land use and water quality in karst. <i>Environmental Geology</i> ,	https://doi.org/10.1007/s00254-007-1065-2
81	Reinhart dan Rifani	2019	44	SDGs implementation in karst management. <i>Journal of Environmental Management</i> , 250, 109456. SDGs implementation in karst management. REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century), 2021.	https://www.ren21.net/reports/global-status-report/
82	Cuthbert et al.	2023	48	Defining renewable groundwater use and its relevance to sustainable groundwater management.	https://doi.org/10.1029/2022WR032831
83	Sinha et al	2006	48	Water–energy–food Nexus in India. <i>ACIAR Proceedings</i>	https://www.aciar.gov.au/publication/technical-reports/Water-Energy-Food-Nexus-india

85	FAO	2020	48	<i>Groundwater governance and the Water-Energy-Food Nexus in action.</i> Rome: FAO.	https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/100ca50f-8a68-4c53-8f4a-49267d79813e/content
87	Shah	2023	48	'Water-Energy-Food-environment Nexus in action: global review of precepts and practice'	https://doi.org/10.1017/wat.2023.19
88	Jaffery dan Bradley	2018	48	Groundwater quota enforcement in Iran: successes and challenges, <i>Water Policy</i>	https://doi.org/10.2166/wp.2018.017
89	Lamba dan Singh	2017	49	<i>Water-Energy-Food Nexus: A review of literature and implications for India</i>	
90	Mardiah	2024	52	Kebijakan pangan di Indonesia.	https://journal-iaassf.com/index.php/JIPAGI/article/download/1290/822/6989
91	Purwanto et al	2021	53	Water–energy–food Nexus: Critical review, practical applications, and prospects for future research. Sustainability	https://doi.org/10.3390/su13041919
92	Wicaksono & Kang	2019	53	Water–Energy–Food Nexus Simulation: An Optimization Approach for Resource Security. <i>Water</i> ,	https://doi.org/10.3390/w11040667
93	Gribaldi & Frimawaty	2024	56	Menuju sistem pangan yang berkelanjutan.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
94	Wu et al.,	2014	56	Renewable energy in the <i>Water-Energy-Food Nexus</i> . Renewable and Sustainable Energy Reviews	https://doi.org/10.1017/wat.2013.1

95	Albrecht et al.,	2018	56	The <i>Water-Energy-Food Nexus</i> : A systematic review of methods for <i>Nexus</i> assessment.	https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c6
96	Prayoga et al	2023	57	Ketahanan pangan berbasis pengelolaan sumber daya air di Indonesia	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
97	Asian Development Bank	2020	57	Achieving Water, Energy, and Food Security in Indonesia.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
98	Gribaldi & Frimawaty	2024	57	Menuju sistem pangan yang berkelanjutan.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
99	Thanh et al.,	2013	57	Vulnerability of rice production in the Mekong River Delta: Insights from a comparative analysis of two provinces	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
100	Bellfield et al.,	2015	57	Achieving Water, Energy, and Food Security in Indonesia. Global Canopy Programme & CDKN.	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
101	Ropipudin	2024	57	Peran irigasi dalam peningkatan produktivitas pertanian. Jurnal Irigasi dan Pertanian	https://drive.google.com/drive/folders/1_S-Vldrski6lgAHmgn_tMU3Gu-gBPnBk
102	Purwanto	2021	57	Grasping the water, energy, and food security <i>Nexus</i> in the local context: Case study Karawang Regency, Indonesia.	https://doi.org/10.3390/su13041919

RIWAYAT HIDUP



Elisa Siti Maesaroh lahir pada tanggal 15 Juni 2003 di Kota Bandung. Penulis merupakan putri ke dua dari tiga bersaudara oleh pasangan Bapak alm Ade Hidayat dan Ibu Neng Umamah.

Penulis menempuh pendidikan Sekolah Menengah Pertama pada Tahun 2017 – 2019 di Madrasah Tsanawiyah Al-Istiqomah Wanasari Cijerah Bandung, kemudian melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Atas pada Tahun 2019 – 2021 di *Al-Ihsan Islamic Boarding School* tepatnya di Madrasah Aliyah Al-Ihsan Baleendah Kabupaten Bandung, penulis memilih Pendidikan Menengah Atas di pondok pesantren karena ingin mempelajari ilmu agama lebih mendalam sebagai serta tidak melupakan menuntut ilmu yang bersifat duniawi. Pada tahun terakhir menempuh Pendidikan Menengah Atas penulis merencanakan untuk menempuh studi lanjut di beberapa perguruan tinggi baik Perguruan Tinggi Negeri maupun Swasta hingga penulis terdaftar sebagai penerima beasiswa Penelurusan Santri Berprestasi di Universitas Islam Indonesia pada Program Studi pilihan pertama yaitu Teknik Lingkungan. Penulis memilih program studi Teknik Lingkungan karena ketertarikan penulis mengenai isu kerusakan lingkungan dan ingin mempelajari lebih dalam bagaimana melestarikan lingkungan.

Segala puji bagi Allah yang telah memberikan kepercayaan untuk penulis sebagai penerima beasiswa di Universitas Islam Indonesia sehingga penulis berkomitmen untuk terus meningkatkan prestasi akademik maupun akademik. Penulis aktif menjadi asisten praktikum pada beberapa mata kuliah yang ada di program studi teknik lingkungan, mengikuti program *Student Exchange* di Universiti of Kuala Lumpur, meraih juara pertama best presentation pada ajang Lomba *Water Business Project* UII x Saxion University, meraih medali perunggu pada ajang Lomba Pekan Kreativitas Mahasiswa skema Poster, sehingga penulis diberikan kepercayaan sebagai delegasi mahasiswa berprestasi tingkat UII dari Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan dan berhasil masuk kedalam grand finalist Mahasiswa Berprestasi tingkat Universitas Islam Indonesia.

Penulis juga berperan aktif dalam beberapa organisasi internal maupun eksternal. Penulis pernah menjabat sebagai ketua Departemen Pendidikan dan Keprofesian Ikatan Mahasiswa Teknik Lingkungan Regional 3, sekretaris umum dan sekretaris divisi pada organisasi Takmir Masjid Ulil Albab, sekretaris *organizing committee* dan *steering committee*. Penulis juga berperan aktif dalam panitia maupun fasilitator pembinaan keagamaan dan beberapa event bergengsi yang diselenggarakan di Universitas Islam Indonesia.