

**KARSA: REKAYASA BIOADSORBEN BERBASIS BIOCHAR LIMBAH
KULIT KOPI ARABIKA LINTONG UNTUK REDUKSI RESIDU
ANTIBIOTIK DALAM AIR SEBAGAI UPAYA MITIGASI RISIKO
RESINTENSI ANTIMIKROBA MELALUI EKONOMI SIRKULAR DI
SUMATERA UTARA**



Karya Ini Disusun Untuk Mengikuti Lomba Karya Tulis Ilmiah
SPARK-G BPOM MEDAN 2026

Disusun Oleh:
Safrijon Naibaho/0088699163

SMAN 2 LINTONG NIHUTA

Lintong Nihuta

2026



PEMERINTAH PROVINSI SUMATERA UTARA

DINAS PENDIDIKAN

SMA NEGERI 2 LINTONGNIHUTA

Jalan Letjend. TB. Simatupang, Desa Siponjot – Silaban, Kec. Lintongnihuta,
Kab. Humbang Hasundutan, Cabdisdik Wil. IX Kode Pos 22475

Pos-el sman2lintongnihuta@gmail.com Laman : www.sman2lintongnihuta.sch.id

SURAT PENUGASAN MENGIKUTI LOMBA

NOMOR : 400.3.8/579/SMA N 2 LH/X/2026

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Sahala Sinaga, S.Pd., M.Pd.
NIP : 19741106 200604 1 008
Jabatan : Kepala Sekolah
Asal Sekolah : SMA Negeri 2 Lintongnihuta
NPSN : 10263550
Telepon/Handphone : 081264163240

Dengan ini menugaskan dan menunjuk peserta didik berikut sebagai perwakilan sekolah untuk mengikuti kegiatan **SPARK-G Festival Tahun 2026** yang diselenggarakan oleh Balai Besar POM di Medan:

No.	Nama Peserta Didik	Kelas	Kategori/Lomba
1	Safrijon Naibaho	XII IPS-1	Karya Tulis Ilmiah

Peserta didik tersebut merupakan utusan resmi sekolah dan diberikan izin untuk mengikuti seluruh rangkaian lomba sesuai ketentuan panitia. Sekolah mendukung peserta untuk mematuhi tata tertib, jadwal, serta ketentuan teknis yang ditetapkan dalam pelaksanaan SPARK-G Festival Tahun 2026.

Demikian surat penunjukan ini dibuat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Pembimbing


Gopli Sibuea ST
NIP. 197509302009041003

Lintongnihuta, 22 Oktober 2026

Kepala Sekolah


SAHALA SINAGA, S.Pd., M.Pd.
NIP. 19741106 200604 1 008

Abstrak

Resistensi antimikroba (Antimicrobial Resistance/AMR) merupakan tantangan kesehatan yang dapat mengancam efektivitas pengobatan akibat meningkatnya kemampuan mikroorganisme untuk bertahan terhadap antimikroba. Salah satu faktor yang perlu diperhatikan ialah keberadaan residu antibiotik di lingkungan perairan yang berpotensi memberikan tekanan seleksi terhadap mikroorganisme resisten. Kondisi ini menegaskan pentingnya pengelolaan residu antibiotik sebagai bagian dari upaya mendukung keamanan penggunaan obat dan melindungi kesehatan generasi mendatang. Penelitian ini bertujuan mengembangkan KARSA (Kulit kopi Arabika sebagai Rekayasa bioadsorben Senyawa antibiotik dalam Air), yaitu inovasi bioadsorben berbasis biochar dari limbah kulit Kopi Arabika Lintong di Sumatera Utara untuk mengurangi residu antibiotik dalam air. Gagasan ini didukung penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa biochar berbahan ampas kopi mampu mengadsorpsi sulfametoksazol dengan kapasitas maksimum 130,1 µg/g pada kondisi pengujian tertentu (Zhang et al., 2020). Penelitian KARSA dirancang menggunakan metode eksperimen dengan variasi kondisi adsorpsi dan pengukuran konsentrasi antibiotik sebelum serta sesudah perlakuan melalui analisis laboratorium. Parameter yang diamati meliputi kapasitas adsorpsi dan persentase reduksi konsentrasi antibiotik. Hasil yang ditargetkan berupa bioadsorben berbasis potensi lokal dengan kinerja adsorpsi terukur. KARSA diharapkan menjadi pendekatan pendukung pengelolaan residu antibiotik yang berkontribusi pada mitigasi risiko AMR, penggunaan obat yang lebih bertanggung jawab, dan terwujudnya generasi yang lebih sehat.

Kata kunci: *keamanan obat, resistensi antimikroba, residu antibiotik, biochar, Kopi Arabika Lintong.*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan Rahmat-Nyalah sehingga penulis dapat menyelesaikan proposal penelitian yang berjudul “KARSA: REKAYASA BIOADSORBEN BERBASIS BIOCHAR LIMBAH KULIT KOPI ARABIKA LINTONG UNTUK REDUKSI RESIDU ANTIBIOTIK DALAM AIR SEBAGAI UPAYA MITIGASI RISIKO RESINTENSI ANTIMIKROBA MELALUI EKONOMI Sirkular Di Sumatera Utara” tepat pada waktunya.

Penulisan proposal penelitian ini dilakukan dalam rangka mengikuti lomba SPARK-G sebagai salah satu syarat untuk lolos menuju babak selanjutnya dan mendapatkan juara 1 dalam lomba tersebut.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan moril maupun materiil sehingga proposal penelitian ini dapat selesai. Ucapan terima kasih ini penulis tujukan kepada :

- a.Kedua orang tua tercinta, yang tiada hentinya memberikan cinta, kasih sayang, doa, motivasi, dan dukungan baik moral maupun materiil.
- b.GOPLIP SIBUEA S.T sebagai guru pembimbing yang memiliki peran yang sangat besar dalam proses penyusunan penelitian ini dan telah membimbing penulis dengan sabar.
- c.Teman-teman tersayang yang telah membantu dalam penyusunan penelitian ini dan juga memberikan motivasi, doa dan dukungan.

Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari para pembaca guna untuk penelitian selanjutnya. Penulis ucapkan terima kasih, semoga Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan dari semua pihak yang telah membantu. Penulis berharap semoga karya tulis ilmiah penelitian ini berguna bagi para pembaca dan pihak pihak lain yang berkepentingan

DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
LEMBAR PENGESAHAN	vi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah.....	2
C. Tujuan Penelitian	2
D. Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	3
A. Antibiotik dan Resistensi Antrimikroba.....	3
B. Mekanisme Resistensi Mikroba	3
C. Regulasi Penggunaan Antibiotik.....	4
D. Biokar Sebagai Material	4
E. Potensi Limbah Kulit Kopi Lintong	5
F. Penelitian Terdahulu	5
G. Kerangka Penelitian	6
BAB III METODOLOGI PENULISAN	8
A. Jenis dan Pendekatan Penelitian	8
B. Metode Pengumpulan Data.....	8
C. Variabel Penelitian	9
D. Teknik Analisi Data.....	9
E. Tahapan Penelitian	9
F. Luaran yang Diharapkan.....	10
BAB IV PEMBAHASAN	11
A. Analisis Permasalahan Residu Antibiotik.....	11
B. Gagasan Inovasi Karsa.....	11

C. Mekanisme Kerja Dan Parameter Karsa.....	12
D. Keunggulan, Keterbatasan Dan Kebaharuan Gagasan	12
E. Strategi Implementasi	13
F. Kontribusi Karsa Terhadap Keamanan Obat	13
BAB V PENUTUP.....	15
A. Kesimpulan	15
B. Saran	15
DAFTAR PUSTAKA	17
LAMPIRAN.....	19

Surat Pernyataan Orisinalitas

Saya yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Safrijon Naibaho

Asal Sekolah : SMAN 2 Lintong Nihuta

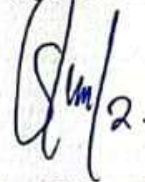
Dengan ini saya menyatakan bahwa karya yang berjudul :

(KARSA: Rekayasa Bioadsorben Berbasis Biochar Limbah Kulit Kopi Arabika Lintong untuk Reduksi Residu Antibiotik dalam Air sebagai Upaya Mitigasi Risiko Resistensi Antimikroba di Sumatera Utara)

Adalah benar karya saya sendiri, tidak melakukan plagiarisme atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika pembuatan karya tulis yang berlaku dan merupakan karya orisinal. Atas pernyataan ini saya siap menerima sanksi yang dijatuhkan kepada saya apabila dikemudian hari ditemukan pelanggaran dalam pembuatan karya ini.

Dolok sanggul, 23 Oktober 2026

Yang membuat pernyataan



(safrijon naibaho)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Obat merupakan komponen penting dalam pelayanan kesehatan, terutama antibiotik yang digunakan untuk mengatasi infeksi bakteri. Namun, efektivitas pengobatan tersebut semakin terancam oleh resistensi antimikroba (Antimicrobial Resistance/AMR), yaitu kondisi ketika mikroorganisme tidak lagi merespons obat antimikroba secara efektif. World Health Organization (WHO, 2025) melaporkan bahwa sekitar satu dari enam infeksi bakteri terkonfirmasi di laboratorium secara global pada 2023 telah resisten terhadap antibiotik yang digunakan untuk mengobatinya. Kondisi ini dapat mempersulit penanganan infeksi, meningkatkan risiko kegagalan terapi, serta menjadi tantangan serius bagi terwujudnya generasi yang sehat pada masa depan.

Resistensi antimikroba tidak hanya berkaitan dengan penggunaan antibiotik yang tidak tepat, tetapi juga perlu ditinjau melalui pendekatan One Health, yang menghubungkan kesehatan manusia, hewan, dan lingkungan. Residu antibiotik yang masuk ke perairan melalui berbagai jalur pembuangan dapat memberikan tekanan seleksi terhadap mikroorganisme dan berpotensi mendukung perkembangan serta penyebaran resistensi. Oleh karena itu, pengelolaan residu antibiotik dalam air menjadi salah satu aspek yang perlu diperhatikan dalam upaya mitigasi risiko AMR. Upaya ini melengkapi penggunaan antibiotik secara bertanggung jawab dan tidak menggantikan pengawasan keamanan obat maupun pengendalian infeksi (WHO, 2025).

Di sisi lain, Sumatera Utara memiliki potensi sumber daya lokal berupa kopi Arabika. Berdasarkan data statistik perkebunan yang bersumber dari Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi Sumatera Utara, produksi kopi di Kabupaten Humbang Hasundutan mencapai 9.683 ton pada 2020. Angka tersebut menunjukkan besarnya aktivitas komoditas kopi di wilayah tersebut, meskipun tidak secara langsung menggambarkan jumlah limbah kulit kopi yang dihasilkan. Pengolahan buah kopi berpotensi menghasilkan limbah kulit yang dapat dikembangkan menjadi bahan bernilai tambah apabila diolah melalui proses yang tepat.

Salah satu alternatif pemanfaatannya adalah mengolah limbah kulit kopi menjadi biochar, yaitu material kaya karbon yang dihasilkan melalui pemanasan biomassa dalam kondisi oksigen terbatas. Potensi biochar sebagai adsorben didukung penelitian Zhang et al. (2020), yang melaporkan kapasitas adsorpsi maksimum biochar dari ampas kopi sebesar 130,1 $\mu\text{g/g}$ terhadap sulfametoksazol, salah satu jenis antibiotik, pada kondisi pengujian tertentu. Temuan tersebut memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan material berbasis kopi untuk pengolahan air. Namun, ampas kopi berbeda dari kulit kopi, sehingga efektivitas biochar berbahan kulit Kopi Arabika Lintong masih perlu dibuktikan melalui pengujian eksperimental.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan KARSA (Kulit kopi Arabika sebagai Rekayasa bioadsorben Senyawa antibiotik dalam Air), yaitu inovasi pemanfaatan biochar dari limbah kulit Kopi Arabika Lintong untuk mengurangi residu antibiotik dalam air. Penelitian ini diarahkan untuk menguji kapasitas adsorpsi dan persentase reduksi konsentrasi antibiotik melalui variasi kondisi pengujian dan analisis laboratorium. Melalui pemanfaatan sumber daya lokal, KARSA diharapkan dapat menghasilkan alternatif material adsorben yang bernilai guna sekaligus mendukung pengelolaan residu antibiotik sebagai bagian dari mitigasi risiko resistensi antimikroba. Inovasi ini sejalan dengan semangat tema “Obat dan Makanan Aman, Generasi Sehat Masa Depan Hebat” melalui kontribusi pada aspek keamanan obat, kesehatan lingkungan, dan pencegahan risiko kesehatan masyarakat.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik biochar yang dihasilkan dari limbah kulit Kopi Arabika Lintong sebagai material adsorben residu antibiotik dalam air?
2. Bagaimana pengaruh variasi kondisi adsorpsi terhadap kapasitas adsorpsi dan persentase reduksi konsentrasi antibiotik menggunakan biochar kulit Kopi Arabika Lintong?
3. Bagaimana potensi pemanfaatan biochar kulit Kopi Arabika Lintong sebagai alternatif pengolahan air yang mengandung residu antibiotik dalam mendukung mitigasi risiko resistensi antimikroba?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengidentifikasi karakteristik biochar berbahan limbah kulit Kopi Arabika Lintong yang berpotensi digunakan sebagai adsorben residu antibiotik dalam air.
2. Menganalisis pengaruh variasi kondisi adsorpsi terhadap kapasitas adsorpsi dan persentase reduksi konsentrasi antibiotik.
3. Mengevaluasi potensi KARSA sebagai alternatif pengolahan air yang mengandung residu antibiotik sekaligus meningkatkan nilai guna limbah kulit kopi melalui pendekatan ekonomi sirkular.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Manfaat ilmiah

Memberikan informasi mengenai potensi biochar dari limbah kulit Kopi Arabika Lintong sebagai material adsorben untuk mengurangi residu antibiotik dalam air serta menjadi dasar bagi penelitian lanjutan mengenai pengolahan air dan mitigasi risiko resistensi antimikroba.

2. Manfaat lingkungan

Mendorong pemanfaatan limbah kulit kopi menjadi material bernilai guna dan mendukung pengembangan alternatif pengolahan air yang mengandung residu antibiotik.

3. Manfaat bagi masyarakat

Memberikan wawasan mengenai keterkaitan antara pengelolaan residu antibiotik, kesehatan lingkungan, dan upaya mitigasi risiko resistensi antimikroba, sekaligus memperkenalkan potensi pemanfaatan limbah pertanian lokal.

4. Manfaat ekonomi dan inovasi

Mendorong pengembangan inovasi berbasis sumber daya lokal Sumatera Utara melalui pendekatan ekonomi sirkular yang mengubah limbah kulit kopi menjadi material fungsional berpotensi guna.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Antibiotik dan Resistensi Antimikroba

Antibiotik merupakan kelompok obat yang digunakan untuk mengatasi infeksi akibat bakteri melalui mekanisme menghambat pertumbuhan atau membunuh bakteri. Antibiotik tidak digunakan untuk mengobati infeksi yang disebabkan oleh virus, seperti influenza. Penggunaannya harus berdasarkan indikasi medis agar manfaat pengobatan dapat diperoleh secara optimal dan risiko resistensi dapat diminimalkan (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2021).

Resistensi antimikroba (Antimicrobial Resistance/AMR) adalah kondisi ketika mikroorganisme, termasuk bakteri, virus, jamur, dan parasit, mengalami perubahan sehingga tidak lagi merespons obat antimikroba secara efektif. Dalam konteks antibiotik, resistensi terjadi ketika bakteri mampu bertahan terhadap antibiotik yang sebelumnya dapat menghambat pertumbuhan atau membunuhnya. Akibatnya, infeksi dapat menjadi lebih sulit ditangani dan pilihan pengobatan menjadi terbatas (World Health Organization, 2025).

AMR menjadi persoalan kesehatan masyarakat karena dapat meningkatkan risiko kegagalan terapi, memperpanjang masa sakit, dan meningkatkan kebutuhan terhadap pelayanan kesehatan. WHO melaporkan bahwa sekitar satu dari enam infeksi bakteri terkonfirmasi di laboratorium secara global pada 2023 resisten terhadap antibiotik yang digunakan untuk mengobatinya. Temuan tersebut menunjukkan pentingnya penggunaan antibiotik secara bertanggung jawab dan pengendalian faktor yang berpotensi mempercepat perkembangan resistensi (WHO, 2025).

2.2 Mekanisme Terjadinya Resistensi Mikroba

Resistensi bakteri terhadap antibiotik dapat terjadi melalui perubahan genetik atau perolehan gen resistensi dari bakteri lain. Sifat tersebut dapat diwariskan kepada generasi bakteri berikutnya atau menyebar antarbakteri melalui perpindahan materi genetik. Beberapa mekanisme utama resistensi antibiotik meliputi:

1. Inaktivasi antibiotik. Bakteri menghasilkan enzim yang dapat merusak atau menonaktifkan antibiotik sehingga obat kehilangan efektivitasnya.
2. Perubahan target antibiotik. Bakteri mengalami perubahan pada struktur sasaran yang seharusnya dikenali antibiotik, sehingga kemampuan obat untuk bekerja berkurang.
3. Penurunan permeabilitas membran. Perubahan pada membran bakteri membatasi masuknya antibiotik ke dalam sel.
4. Pompa efluks. Bakteri memiliki mekanisme yang mengeluarkan senyawa antibiotik dari dalam sel sehingga konsentrasi obat di dalam bakteri berkurang.
5. Pembentukan biofilm. Sebagian bakteri membentuk komunitas yang terlindungi oleh matriks, sehingga dapat meningkatkan toleransi terhadap antimikroba dan membantu bakteri bertahan dalam kondisi tertentu.

Perkembangan AMR dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain penggunaan antibiotik yang tidak tepat, lemahnya pencegahan infeksi, keterbatasan sanitasi, serta penyebaran mikroorganisme resisten melalui manusia, hewan, makanan, dan lingkungan. Keberadaan residu antibiotik di lingkungan perairan juga perlu diperhatikan karena dapat memberikan tekanan seleksi terhadap mikroorganisme. Namun, keberadaan residu antibiotik tidak secara otomatis berarti bahwa air tersebut telah menyebabkan resistensi; pengaruhnya bergantung pada konsentrasi, durasi paparan, karakteristik mikroorganisme, dan kondisi lingkungan.

Dengan demikian, pengendalian AMR memerlukan pendekatan terpadu yang tidak hanya berfokus pada penggunaan obat, tetapi juga pada pengawasan infeksi, keamanan pangan, sanitasi, serta pengelolaan pencemaran lingkungan.

2.3 Regulasi Penggunaan Antibiotik di Indonesia

Penggunaan antibiotik di Indonesia diatur melalui kebijakan yang bertujuan menjamin ketepatan terapi, keamanan pasien, dan pencegahan resistensi antimikroba. Salah satu regulasi yang relevan adalah Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 28 Tahun 2021 tentang Pedoman Penggunaan Antibiotik. Peraturan tersebut menjadi pedoman bagi tenaga kesehatan dan fasilitas pelayanan kesehatan dalam menggunakan antibiotik secara rasional sesuai indikasi, pemilihan obat, dosis, cara pemberian, dan durasi terapi yang tepat.

Kementerian Kesehatan menegaskan bahwa antibiotik termasuk golongan obat keras yang penggunaannya harus berdasarkan resep dokter. Antibiotik tidak boleh digunakan sembarangan, misalnya untuk mengatasi penyakit yang disebabkan oleh virus atau berdasarkan sisa obat dari pengobatan sebelumnya. Penggunaan yang tidak tepat dapat meningkatkan tekanan seleksi terhadap bakteri dan berkontribusi terhadap perkembangan resistensi antibiotik (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2024).

Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM) juga berperan dalam pengawasan obat, termasuk aspek keamanan, mutu, dan peredaran obat sesuai ketentuan yang berlaku. Edukasi BPOM kepada masyarakat menekankan pentingnya menggunakan antibiotik sesuai petunjuk dokter dan menghindari penggunaan tanpa resep. Pengawasan peredaran serta penggunaan obat yang bertanggung jawab merupakan bagian penting dalam menjaga efektivitas antibiotik.

Meskipun demikian, pengendalian AMR tidak cukup hanya melalui regulasi penggunaan obat. Pengelolaan residu antibiotik dari berbagai sumber juga perlu diperhatikan agar pencemaran lingkungan tidak menjadi faktor tambahan yang berpotensi mendukung penyebaran resistensi. Dalam konteks ini, penelitian KARSA diarahkan sebagai upaya pendukung pengelolaan residu antibiotik di air, bukan sebagai pengganti regulasi penggunaan obat atau tindakan medis.

2.4 Biochar sebagai Material Adsorben

Biochar merupakan material kaya karbon yang dihasilkan melalui pemanasan biomassa pada kondisi dengan ketersediaan oksigen terbatas. Bahan bakunya dapat berasal dari berbagai jenis limbah organik, seperti sisa pertanian dan biomassa tumbuhan. Karakteristik biochar dipengaruhi oleh jenis bahan baku, suhu dan durasi pemanasan, serta proses pembuatannya.

Biochar berpotensi digunakan sebagai adsorben karena memiliki permukaan yang dapat berinteraksi dengan senyawa tertentu. Adsorpsi atau penyerapan merupakan proses menempelnya molekul atau ion pada permukaan suatu material. Dalam pengolahan air, proses ini dapat dimanfaatkan untuk mengurangi konsentrasi kontaminan terlarut, termasuk senyawa antibiotik tertentu.

Kinerja adsorpsi dipengaruhi oleh luas permukaan dan struktur pori material, gugus fungsi permukaan, pH larutan, konsentrasi awal kontaminan, dosis adsorben, serta waktu kontak. Oleh karena itu, kemampuan adsorpsi suatu biochar tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan jenis bahan bakunya, tetapi perlu diuji melalui eksperimen.

Dalam penelitian KARSA, biochar direncanakan berasal dari limbah kulit Kopi Arabika Lintong. Karakteristik biochar tersebut perlu dievaluasi untuk mengetahui potensinya sebagai adsorben residu antibiotik. Efektivitasnya dapat dinilai melalui perubahan konsentrasi antibiotik sebelum dan sesudah perlakuan serta perhitungan kapasitas adsorpsi berdasarkan jumlah antibiotik yang terjerap per satuan massa adsorben.

2.5 Potensi Limbah Kulit Kopi Arabika Lintong

Kopi Arabika Lintong merupakan salah satu komoditas perkebunan yang dikenal berasal dari kawasan Humbang Hasundutan, Sumatera Utara. Pengolahan buah kopi menghasilkan produk utama berupa biji kopi serta hasil samping berupa kulit dan bagian buah lainnya. Limbah tersebut berpotensi dimanfaatkan kembali sebagai bahan baku material fungsional sehingga nilai gunanya meningkat.

Berdasarkan data BPS Provinsi Sumatera Utara yang dikutip dalam publikasi statistik terkait, produksi kopi di Kabupaten Humbang Hasundutan mencapai 9.683 ton pada 2020. Data tersebut menunjukkan besarnya aktivitas produksi kopi di wilayah tersebut, tetapi tidak dapat digunakan secara langsung untuk menyimpulkan jumlah kulit kopi yang dihasilkan karena besarnya limbah bergantung pada varietas, metode pengolahan, dan karakteristik bahan baku.

Pemanfaatan limbah kulit kopi sebagai bahan biochar menawarkan pendekatan ekonomi sirkular, yaitu pemanfaatan kembali sumber daya agar limbah dapat diolah menjadi produk yang memiliki nilai guna. Namun, kelayakan penggunaannya sebagai adsorben tetap bergantung pada karakteristik material, proses produksi, efektivitas adsorpsi, serta keamanan pengelolaan adsorben setelah digunakan.

Atas dasar tersebut, limbah kulit Kopi Arabika Lintong berpotensi dikembangkan menjadi bahan baku biochar dalam penelitian KARSA. Inovasi ini menghubungkan pemanfaatan sumber daya lokal dengan upaya mengurangi residu antibiotik dalam air melalui pengujian ilmiah yang terukur.

2.6 Penelitian Terdahulu yang Relevan

Penelitian terdahulu menjadi dasar ilmiah untuk mengembangkan KARSA dan menentukan aspek yang masih perlu diteliti.

2.6.1 Penelitian Zhang et al. (2020)

Zhang et al. (2020) melakukan penelitian berjudul *Characterization and sulfonamide antibiotics adsorption capacity of spent coffee grounds based biochar and hydrochar* yang diterbitkan dalam jurnal *Science of the Total Environment*, volume 716, artikel 137015.

Penelitian tersebut mengolah ampas kopi bekas seduhan menjadi biochar melalui pirolisis dan hidrochar melalui karbonisasi hidrotermal. Material yang dihasilkan kemudian diuji untuk mengetahui karakteristik dan kapasitas adsorpsinya terhadap antibiotik golongan sulfonamida.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa biochar dari ampas kopi memiliki kapasitas adsorpsi maksimum sebesar 121,5 µg/g untuk sulfadiazin dan 130,1 µg/g untuk sulfametoksazol pada suhu 25°C dengan konsentrasi awal antibiotik 500 µg/L. Pada kondisi pengujian tersebut, kapasitas adsorpsi biochar lebih tinggi daripada hidrochar yang dihasilkan dari bahan baku serupa.

Temuan ini menunjukkan bahwa limbah berbasis kopi berpotensi dikembangkan menjadi material adsorben bagi senyawa antibiotik tertentu. Namun, penelitian tersebut menggunakan ampas kopi bekas seduhan, bukan kulit Kopi Arabika Lintong. Oleh sebab itu, angka kapasitas adsorpsi tersebut hanya menjadi pembandingan ilmiah dan tidak dapat dianggap sebagai hasil yang akan diperoleh KARSA.

2.6.2 Relevansi terhadap Pengembangan KARSA

Berdasarkan penelitian Zhang et al. (2020), terdapat dasar ilmiah untuk mengevaluasi biochar berbahan limbah kopi sebagai adsorben antibiotik. KARSA mengembangkan arah penelitian tersebut dengan memanfaatkan kulit Kopi Arabika Lintong, yaitu jenis limbah dan sumber bahan baku yang berbeda.

Perbedaan bahan baku dapat menghasilkan karakteristik permukaan, struktur pori, dan gugus fungsi yang berbeda, sehingga kinerja adsorpsinya juga dapat berbeda. Oleh karena itu, penelitian KARSA perlu menguji karakteristik biochar kulit kopi serta efektivitasnya dalam mengurangi konsentrasi antibiotik target melalui pengujian laboratorium.

Kebaruhan yang diajukan dalam KARSA terletak pada pengembangan dan evaluasi biochar dari limbah kulit Kopi Arabika Lintong sebagai adsorben residu antibiotik dalam air dengan pendekatan pemanfaatan sumber daya lokal. Klaim kebaruan tersebut tetap perlu diperkuat melalui penelusuran literatur yang lebih luas untuk memastikan apakah bahan dan penerapan yang sama telah diteliti sebelumnya.

2.7 Kerangka Pemikiran

KARSA dikembangkan berdasarkan hubungan antara persoalan residu antibiotik, potensi material biochar, dan pemanfaatan limbah kulit kopi. Kerangka pemikirannya adalah sebagai berikut:

1. Residu antibiotik dalam air merupakan salah satu aspek pencemaran yang perlu dikelola karena berpotensi memberikan tekanan seleksi terhadap mikroorganisme.
2. Biochar dari bahan organik tertentu telah menunjukkan potensi untuk mengadsorpsi antibiotik pada kondisi laboratorium.
3. Limbah kulit Kopi Arabika Lintong berpotensi diolah menjadi biochar bernilai guna.
4. Biochar kulit kopi diuji melalui eksperimen untuk mengetahui karakteristik dan kapasitas adsorpsinya terhadap antibiotik target.

5. Hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi potensi KARSA sebagai alternatif pengolahan air yang mengandung residu antibiotik.

Dengan demikian, KARSA diharapkan memberikan dasar ilmiah bagi pemanfaatan limbah kulit kopi sebagai material adsorben. Pengurangan residu antibiotik menjadi indikator utama kinerja material, sedangkan kontribusinya terhadap pengendalian AMR harus dipahami sebagai upaya mitigasi risiko dan tidak dapat disimpulkan hanya dari pengukuran penurunan konsentrasi antibiotik.

BAB III

METODOLOGI PENULISAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian KARSA (Kulit kopi Arabika sebagai Rekayasa bioadsorben Senyawa antibiotik dalam Air) dirancang menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen yang didukung studi literatur. Pendekatan ini bertujuan mengevaluasi potensi biochar berbahan limbah kulit Kopi Arabika Lintong sebagai adsorben untuk mengurangi konsentrasi residu antibiotik dalam air. Studi literatur digunakan untuk membangun dasar teori, menentukan variabel penelitian, serta membandingkan hasil pengujian dengan penelitian terdahulu.

3.2 Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data direncanakan melalui dua metode, yaitu studi literatur dan eksperimen laboratorium.

3.2.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan menelaah artikel jurnal ilmiah, buku, laporan lembaga resmi, dan peraturan pemerintah yang berkaitan dengan resistensi antimikroba, karakteristik antibiotik, pencemaran residu antibiotik, produksi biochar, serta mekanisme adsorpsi. Sumber literatur diperoleh melalui basis data ilmiah, seperti Google Scholar, PubMed, dan ScienceDirect, serta situs resmi World Health Organization (WHO), Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM), dan Badan Pusat Statistik (BPS).

Literatur dipilih berdasarkan relevansi topik, kredibilitas penerbit, tahun publikasi, dan ketersediaan informasi metodologis. Data yang dikumpulkan mencakup karakteristik bahan baku, faktor yang memengaruhi adsorpsi, kapasitas adsorpsi biochar, serta kebijakan penggunaan antibiotik dan pengendalian AMR.

3.2.2 Eksperimen Laboratorium

Eksperimen dirancang untuk menguji kemampuan biochar dari limbah kulit Kopi Arabika Lintong dalam mengadsorpsi residu antibiotik pada air. Penelitian diawali dengan persiapan dan pengolahan kulit kopi menjadi biochar menggunakan prosedur pirolisis yang sesuai dengan fasilitas laboratorium. Material kemudian dikarakterisasi sesuai ketersediaan instrumen dan kebutuhan penelitian.

Pengujian adsorpsi dilakukan menggunakan satu jenis antibiotik target yang ditetapkan berdasarkan ketersediaan standar analitik, fasilitas laboratorium, dan pertimbangan keselamatan. Sampel air yang mengandung antibiotik diuji sebelum dan sesudah kontak dengan biochar. Penelitian menggunakan kontrol tanpa penambahan biochar serta variasi kondisi adsorpsi yang ditetapkan berdasarkan studi pendahuluan dan hasil kajian literatur.

Konsentrasi antibiotik dianalisis menggunakan metode laboratorium tervalidasi yang sesuai dengan senyawa target, misalnya kromatografi cair kinerja tinggi (High-Performance Liquid Chromatography/HPLC) apabila tersedia. Seluruh pengujian dilaksanakan dengan prosedur keselamatan laboratorium dan pengelolaan limbah yang sesuai.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel penelitian direncanakan sebagai berikut.

1. Variabel bebas: kondisi adsorpsi, seperti dosis biochar, waktu kontak, atau pH larutan, yang dipilih sesuai rancangan eksperimen.
2. Variabel terikat: kapasitas adsorpsi dan persentase reduksi konsentrasi antibiotik setelah perlakuan.
3. Variabel kontrol: jenis dan konsentrasi awal antibiotik, volume larutan, suhu pengujian, serta kondisi lain yang perlu dijaga tetap sama dalam setiap perbandingan.

Pemilihan jumlah variasi dan rentang pengujian ditetapkan setelah mempertimbangkan hasil studi literatur, ketersediaan fasilitas, dan studi pendahuluan.

3.4 Teknik Analisis Data

Data eksperimen dianalisis secara kuantitatif dengan membandingkan konsentrasi antibiotik sebelum dan sesudah perlakuan. Persentase reduksi konsentrasi dihitung menggunakan persamaan.

Hasil pengukuran disajikan dalam tabel dan grafik untuk membandingkan kinerja biochar pada setiap kondisi pengujian. Apabila pengujian dilakukan dengan pengulangan yang memadai, data dapat disajikan sebagai nilai rata-rata dan simpangan baku. Analisis statistik lanjutan digunakan apabila jumlah data dan rancangan eksperimen mendukung penerapannya.

3.5 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian KARSA meliputi:

1. Mengidentifikasi permasalahan AMR dan pencemaran residu antibiotik melalui studi literatur.
2. Menentukan jenis antibiotik target, variabel penelitian, kontrol, dan metode analisis.
3. Menyiapkan limbah kulit Kopi Arabika Lintong dan mengolahnya menjadi biochar melalui prosedur laboratorium yang sesuai.
4. Melakukan karakterisasi material sesuai fasilitas yang tersedia.
5. Melaksanakan eksperimen adsorpsi dengan kontrol dan variasi kondisi yang telah ditetapkan.
6. Mengukur konsentrasi antibiotik sebelum dan sesudah perlakuan menggunakan metode analisis yang sesuai.
7. Menghitung kapasitas adsorpsi dan persentase reduksi konsentrasi.
8. Membandingkan hasil eksperimen dengan kontrol serta literatur terdahulu.

9. Menarik kesimpulan mengenai potensi dan keterbatasan KARSA berdasarkan data yang diperoleh.

3.6 Luaran yang Diharapkan

Luaran penelitian berupa data karakteristik biochar kulit Kopi Arabika Lintong, nilai kapasitas adsorpsi, persentase reduksi konsentrasi antibiotik, serta identifikasi kondisi pengujian yang memberikan kinerja terbaik. Hasil tersebut diharapkan menjadi dasar evaluasi potensi KARSA sebagai alternatif pengolahan air yang mengandung residu antibiotik. Penurunan konsentrasi antibiotik tidak secara langsung membuktikan penurunan tingkat resistensi mikroba; klaim tersebut memerlukan pengujian mikrobiologis tersendiri.

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Analisis Permasalahan Residu Antibiotik dan Resistensi Antimikroba

Resistensi antimikroba (Antimicrobial Resistance/AMR) merupakan permasalahan kesehatan ketika mikroorganisme tidak lagi merespons obat antimikroba secara efektif. Salah satu aspek yang perlu diperhatikan ialah keberadaan residu antibiotik di lingkungan perairan. Paparan residu dalam kondisi tertentu dapat memberikan tekanan seleksi terhadap mikroorganisme dan berpotensi mendukung perkembangan resistensi.

Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) melaporkan bahwa sekitar satu dari enam infeksi bakteri yang terkonfirmasi melalui pemeriksaan laboratorium secara global pada 2023 telah resistan terhadap antibiotik yang digunakan untuk mengobatinya. Kondisi ini menunjukkan pentingnya pengendalian AMR melalui penggunaan antibiotik yang bertanggung jawab dan pengelolaan pencemaran lingkungan.

Upaya mengatasi masalah tersebut tidak cukup hanya melalui edukasi penggunaan antibiotik secara tepat. Pengelolaan residu yang berpotensi masuk ke lingkungan perairan juga perlu mendapat perhatian. Air limbah dari berbagai sumber dapat membawa senyawa farmasi menuju badan air apabila pengolahannya tidak memadai. Namun, keberadaan residu antibiotik tidak secara otomatis menyebabkan resistensi karena dampaknya dipengaruhi oleh konsentrasi, durasi paparan, kondisi lingkungan, dan karakteristik mikroorganisme.

Di sisi lain, Kabupaten Humbang Hasundutan memiliki potensi komoditas kopi yang dapat dikembangkan sebagai sumber bahan baku inovasi lingkungan. Data Badan Pusat Statistik Kabupaten Humbang Hasundutan mencatat produksi kopi sebesar 9.683 ton pada 2020. Angka tersebut merupakan data historis produksi kopi, bukan jumlah limbah kulit kopi yang tersedia. Oleh karena itu, ketersediaan bahan baku KARSA saat ini masih perlu dikaji lebih lanjut.

Permasalahan ini membuka peluang pengembangan inovasi yang menghubungkan pengelolaan residu antibiotik dengan pemanfaatan limbah pertanian lokal. Meskipun demikian, bahan berbasis limbah tidak otomatis efektif sebagai pengolah air. Karakteristik material, kemampuan adsorpsi, keamanan, dan potensi dampak sekundernya tetap harus diuji sebelum diterapkan.

4.2 Gagasan Inovasi KARSA

KARSA merupakan singkatan dari Kulit kopi Arabika sebagai Rekayasa bioadsorben Senyawa antibiotik dalam Air. Inovasi ini dirancang menggunakan biochar dari limbah kulit Kopi Arabika Lintong sebagai material untuk mengadsorpsi senyawa antibiotik tertentu dalam air.

Biochar diperoleh melalui pemanasan biomassa pada kondisi oksigen terbatas. Material ini berpotensi memiliki struktur pori dan karakteristik permukaan yang mendukung penjerapan molekul pencemar. Ketika air yang mengandung senyawa antibiotik berkontak dengan biochar, sebagian molekul berpotensi terikat pada permukaan material sehingga konsentrasi antibiotik dalam air dapat berkurang.

Dasar pengembangan KARSA didukung oleh penelitian Zhang et al. (2020), yang menunjukkan bahwa biochar berbahan ampas kopi mampu mengadsorpsi antibiotik golongan sulfonamida dalam kondisi pengujian tertentu. Namun, penelitian tersebut menggunakan

ampas kopi, bukan kulit kopi Arabika Lintong. Dengan demikian, hasil penelitian terdahulu hanya menjadi dasar ilmiah awal dan tidak dapat dianggap sebagai bukti bahwa KARSA memiliki efektivitas yang sama.

Keunggulan yang ditawarkan KARSA terletak pada pemanfaatan potensi lokal, peluang pengurangan limbah organik, serta pengembangan material alternatif untuk mendukung pengolahan air. Gagasan ini juga mengusung prinsip ekonomi sirkular dengan mengubah limbah pertanian menjadi bahan yang berpotensi memiliki nilai guna.

4.3 Mekanisme dan Tahapan Implementasi KARSA

Pengembangan KARSA direncanakan melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan.

Pertama, pengumpulan dan persiapan bahan baku. Limbah kulit Kopi Arabika Lintong dikumpulkan dari sumber yang dapat ditelusuri, kemudian dibersihkan dan dikeringkan. Tahap ini bertujuan memperoleh bahan baku yang lebih seragam untuk proses pengolahan.

Kedua, pembuatan dan karakterisasi biochar. Kulit kopi diolah melalui proses pirolisis dengan kondisi yang terkendali. Biochar yang dihasilkan kemudian perlu diperiksa karakteristiknya, terutama sifat permukaan dan pori yang berkaitan dengan kemampuan adsorpsi. Proses pemanasan harus dilakukan menggunakan peralatan yang sesuai dan oleh pihak yang memiliki kompetensi.

Ketiga, pengujian kemampuan adsorpsi. Biochar diuji menggunakan air yang mengandung senyawa antibiotik sasaran dengan konsentrasi yang diketahui. Pengujian dilakukan pada beberapa kondisi, seperti jumlah biochar, lama kontak, dan tingkat keasaman air. Sampel pembanding tanpa biochar diperlukan agar perubahan konsentrasi tidak keliru dianggap seluruhnya sebagai akibat adsorpsi.

Keempat, evaluasi hasil pengujian. Konsentrasi antibiotik sebelum dan sesudah perlakuan dibandingkan menggunakan metode analisis laboratorium yang sesuai. Pengujian berulang diperlukan untuk menilai konsistensi hasil. Selain itu, material bekas pakai perlu diperiksa agar antibiotik yang terikat tidak kembali terlepas ke lingkungan.

Kelima, evaluasi kelayakan penerapan. Jika hasil laboratorium menunjukkan kinerja yang menjanjikan, KARSA dapat dikaji lebih lanjut untuk pengembangan sistem pengolahan air skala kecil. Penerapan tidak boleh dilakukan langsung pada air minum atau air yang digunakan masyarakat sebelum keamanan, efektivitas, dan kesesuaiannya dengan standar pengolahan air dibuktikan.

4.4 Analisis Potensi Efektivitas dan Keterbatasan KARSA

Efektivitas KARSA perlu dinilai berdasarkan bukti pengujian, bukan hanya berdasarkan karakteristik bahan bakunya. Beberapa aspek penting yang perlu diperhatikan adalah kemampuan biochar mengurangi konsentrasi antibiotik, kestabilan kinerjanya, kebutuhan bahan, lama kontak, serta biaya pengolahan.

Penggunaan kulit kopi sebagai bahan baku berpotensi menekan kebutuhan material komersial dan meningkatkan nilai guna limbah pertanian. Akan tetapi, efektivitasnya dapat berbeda bergantung pada kondisi pembuatan biochar, karakteristik antibiotik, dan komposisi air yang diolah. Kandungan bahan organik atau zat pencemar lain juga dapat memengaruhi proses adsorpsi.

Keterbatasan lainnya adalah proses adsorpsi tidak selalu menghancurkan senyawa antibiotik, melainkan dapat memindahkannya dari air ke permukaan biochar. Karena itu, biochar bekas tidak boleh langsung dibuang ke lingkungan. Diperlukan pengelolaan lanjutan yang sesuai agar pencemar yang terikat tidak terlepas kembali.

Selain itu, keberhasilan menurunkan konsentrasi residu antibiotik belum membuktikan bahwa KARSA secara langsung menurunkan tingkat resistensi antimikroba. Pembuktian tersebut memerlukan penelitian tambahan mengenai mikroorganisme dan indikator resistensi. Oleh sebab itu, kontribusi KARSA terhadap mitigasi AMR harus dipahami sebagai potensi tidak langsung melalui pengurangan residu antibiotik di lingkungan.

4.5 Strategi Implementasi dan Pengembangan KARSA

Implementasi KARSA perlu dilakukan secara bertahap agar inovasi dapat dikembangkan berdasarkan bukti ilmiah dan kondisi lokal.

Tahap awal berfokus pada studi literatur, identifikasi sumber limbah kulit kopi, serta kerja sama dengan perguruan tinggi atau laboratorium yang memiliki fasilitas analisis antibiotik. Kolaborasi ini penting untuk memastikan bahwa proses pembuatan biochar dan pengujian dilakukan secara aman serta menghasilkan data yang dapat dipertanggungjawabkan.

Tahap berikutnya adalah pengujian laboratorium untuk mengetahui karakteristik biochar dan kemampuannya mengurangi konsentrasi antibiotik sasaran. Apabila hasilnya menjanjikan, penelitian dapat dilanjutkan dengan pengujian pada karakteristik air yang lebih beragam, evaluasi penggunaan berulang, dan pengelolaan biochar bekas.

Pada tahap pengembangan, KARSA juga dapat diperkenalkan melalui kegiatan edukasi lingkungan di sekolah dan masyarakat. Edukasi dapat memuat informasi tentang penggunaan antibiotik sesuai resep tenaga kesehatan, bahaya membuang obat sembarangan, serta pentingnya pengelolaan limbah yang benar. Dengan demikian, inovasi material dan edukasi masyarakat dapat saling melengkapi tanpa menempatkan KARSA sebagai pengganti pengobatan atau sistem pengolahan air yang telah memenuhi standar.

Keberhasilan implementasi dapat dinilai melalui tersedianya data laboratorium yang konsisten, kemampuan menurunkan konsentrasi antibiotik pada kondisi pengujian, keamanan pengelolaan biochar bekas, dan kelayakan biaya. Untuk program edukasi, evaluasi dapat dilakukan melalui perbandingan pemahaman peserta sebelum dan sesudah kegiatan. Indikator tersebut membantu menentukan apakah inovasi layak dikembangkan lebih lanjut.

4.6 Kontribusi KARSA terhadap Keamanan Obat dan Kesehatan Generasi Mendatang

KARSA menawarkan pendekatan yang menghubungkan keamanan obat, perlindungan lingkungan, dan pemanfaatan potensi lokal. Inovasi ini tidak hanya menempatkan residu antibiotik sebagai persoalan pencemaran, tetapi juga sebagai bagian dari tantangan yang lebih luas dalam pengendalian resistensi antimikroba.

Pemanfaatan limbah kulit Kopi Arabika Lintong menjadi biochar berpotensi memberikan nilai tambah pada sumber daya lokal sekaligus membuka peluang penelitian berbasis kebutuhan daerah. Namun, manfaat tersebut baru dapat dinyatakan secara lebih kuat setelah tersedia bukti mengenai efektivitas, keamanan, dan kelayakan penerapannya.

Dengan pengembangan yang bertahap dan berbasis bukti, KARSA berpotensi menjadi salah satu pendekatan pendukung pengelolaan residu antibiotik. Inovasi ini perlu berjalan bersama penggunaan antibiotik secara bertanggung jawab, pengawasan pencemaran, dan edukasi masyarakat. Sinergi tersebut diharapkan mendukung lingkungan yang lebih aman serta upaya menjaga kesehatan generasi mendatang.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Resistensi antimikroba (Antimicrobial Resistance/AMR) merupakan tantangan kesehatan yang memerlukan penanganan melalui penggunaan antibiotik secara bertanggung jawab dan pengelolaan residu antibiotik di lingkungan. Salah satu upaya pendukung yang dapat dikembangkan adalah pemanfaatan material berbasis limbah pertanian sebagai bioadsorben untuk mengurangi konsentrasi residu antibiotik dalam air.

KARSA (Kulit kopi Arabika sebagai Rekayasa bioadsorben Senyawa antibiotik dalam Air) merupakan gagasan inovasi biochar berbahan limbah kulit Kopi Arabika Lintong yang berpotensi digunakan untuk mengadsorpsi residu antibiotik. Pemanfaatan bahan baku lokal ini juga membuka peluang peningkatan nilai guna limbah pertanian dan penerapan prinsip ekonomi sirkular.

Karakteristik dan efektivitas KARSA perlu dibuktikan melalui pengujian laboratorium yang mencakup karakterisasi biochar, pengukuran konsentrasi antibiotik sebelum dan sesudah perlakuan, serta evaluasi keamanan pengelolaan material bekas. Penelitian terdahulu mengenai biochar dari ampas kopi memberikan dasar ilmiah awal, tetapi belum membuktikan efektivitas biochar dari kulit Kopi Arabika Lintong.

Dengan demikian, KARSA berpotensi menjadi pendekatan pendukung pengelolaan residu antibiotik dan mitigasi risiko AMR melalui perlindungan lingkungan. Namun, kontribusinya terhadap pengurangan resistensi antimikroba tidak dapat dipastikan hanya dari penurunan konsentrasi antibiotik, sehingga diperlukan penelitian lanjutan untuk menilai efektivitas, keamanan, dan kelayakan penerapannya.

5.2 Saran

1. Bagi sekolah, KARSA dapat dikembangkan sebagai proyek penelitian ilmiah berbasis potensi lokal melalui kegiatan Karya Ilmiah Remaja dan kolaborasi dengan perguruan tinggi atau laboratorium. Sekolah juga dapat memperkuat edukasi mengenai penggunaan antibiotik sesuai resep tenaga kesehatan dan pengelolaan limbah obat yang benar.
2. Bagi masyarakat dan petani kopi, limbah kulit kopi dapat mulai dipandang sebagai bahan yang berpotensi memiliki nilai guna lebih tinggi. Pengolahannya menjadi biochar perlu dilakukan dengan prosedur yang aman dan tidak disertai klaim efektivitas sebelum melalui pengujian ilmiah.
3. Bagi Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM), edukasi kepada masyarakat mengenai penggunaan antibiotik secara tepat, pembelian obat sesuai ketentuan, serta bahaya penggunaan antibiotik tanpa pengawasan tenaga kesehatan perlu terus diperkuat. Koordinasi dengan instansi kesehatan dan lingkungan juga penting untuk meningkatkan pemahaman mengenai risiko residu obat. Pengawasan pencemaran air perlu melibatkan lembaga yang memiliki kewenangan terkait lingkungan dan pengelolaan air.
4. Bagi peneliti dan perguruan tinggi, diperlukan penelitian eksperimental untuk menguji karakteristik biochar kulit Kopi Arabika Lintong, kemampuan adsorpsinya terhadap antibiotik tertentu, konsistensi hasil, biaya produksi, serta pengelolaan biochar setelah digunakan.

Penelitian lanjutan juga diperlukan untuk menilai keamanan air hasil perlakuan dan kemungkinan penerapan pada kondisi nyata.

5. Bagi pemerintah daerah dan pemangku kepentingan, kolaborasi antara sektor pertanian, kesehatan, pendidikan, dan lingkungan perlu dikembangkan untuk mendukung penelitian berbasis potensi lokal. Apabila hasil pengujian menunjukkan kinerja yang memadai, KARSA dapat dipertimbangkan untuk pengembangan lebih lanjut sebagai teknologi pendukung pengolahan air, bukan sebagai pengganti sistem pengolahan yang telah memenuhi standar.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajala, O. A., Akinnawo, S. O., Bamisaye, A., Adedipe, D. T., Adesina, M. O., Okon-Akan, O. A., Adebuseyi, T. A., Ojedokun, A. T., Adegoke, K. A., & Bello, O. S. (2023). Adsorptive removal of antibiotics from wastewater using biomass/biochar-based adsorbents. *RSC Advances*, 13, 4678–4712. <https://doi.org/10.1039/D2RA06436G>
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Humbang Hasundutan. (2021). Kabupaten Humbang Hasundutan dalam Angka 2021. BPS Kabupaten Humbang Hasundutan.
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Humbang Hasundutan. (2024). Peraturan Bupati Humbang Hasundutan Nomor 15 Tahun 2024, bagian data luas areal dan produksi tanaman perkebunan tahun 2019–2023. Pemerintah Kabupaten Humbang Hasundutan. <https://peraturan.bpk.go.id/Download/406496/Perbup%20Humbahas%20No%2015%20Tahun%202024.pdf>
- Ding, P., Lu, J., Xu, L., Zhou, Q., Jiang, M., Yan, Z., & Yang, P. (2026). Recent advances in modified biochars for the adsorptive removal of typical antibiotics from water: A comparative review of performance, influencing factors, and underlying mechanisms. *RSC Advances*, 16, 49616–49634. <https://doi.org/10.1039/D6RA06945B>
- El-Shafie, A. S., Mahmoud, R., Ahsan, I., El-Azazy, M., Hamdi, H., & Shibl, M. F. (2024). Removal of antibiotics from aqueous solutions: Insights of competitive adsorption onto Ni-impregnated biochar of spent coffee grounds. *Applied Water Science*, 14, 209. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02238-8>
- Hamid, I., Ahmadipour, M., Ahmed, M. J., Rizvi, M. A., Shalla, A. H., & Khanday, W. A. (2025). Emerging antibiotic pollution and its remedy by waste based biochar adsorbents: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(14), 8643–8669. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40085389/>
- Harrower, J., McNaughtan, M., Hunter, C., Hough, R., Zhang, Z., & Helwig, K. (2021). Chemical fate and partitioning behavior of antibiotics in the aquatic environment—A review. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(12), 3275–3298. <https://doi.org/10.1002/etc.5191>
- Kang, L.-L., Zeng, Y.-N., Wang, Y.-T., Li, J.-G., Wang, F.-P., Wang, Y.-J., Yu, Q., Wang, X.-M., Ji, R., Gao, D., & Fang, Z. (2022). Removal of pollutants from wastewater using coffee waste as adsorbent: A review. *Journal of Water Process Engineering*, Article 103178. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103178>
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2021). Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 28 Tahun 2021 tentang Pedoman Penggunaan Antibiotik. <https://jdih.kemkes.go.id/documents/peraturan-menteri-kesehatan-nomor-28-tahun-2021>
- Peiris, C., Gunatilake, S. R., Mlsna, T. E., Mohan, D., & Vithanage, M. (2017). Biochar based removal of antibiotic sulfonamides and tetracyclines in aquatic environments: A critical review. *Bioresource Technology*, 246, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.150>
- World Health Organization. (2025). Global antibiotic resistance surveillance report 2025. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240116337>
- World Health Organization. (2025). Global antibiotic resistance surveillance report 2025: Summary. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/B09585>

Zhang, X., Zhang, Y., Ngo, H. H., Guo, W., Wen, H., Zhang, D., Li, C., & Qi, L. (2020). Characterization and sulfonamide antibiotics adsorption capacity of spent coffee grounds based biochar and hydrochar. *Science of the Total Environment*, 716, 137015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137015>

Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>

Inyang, M., & Dickenson, E. (2015). The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review. *Chemosphere*, 134, 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.072>

LAMPIRAN

