



Dopan Nanopartikel Perak dari Air Limbah Radiofotografi yang Diembankan pada Fotokatalis TiO_2 : Material Antijamur dan Antibakteri Masa Depan

Nahzim Rahmat^{a*}, Prisca Caesa Moneteringtyas^a, Novianti Dwi Lestari^b, Trisno Afandi^c, Sukma Wahyu Wijayanti^d, Muhammad Faisal^e

^aProgram Studi Teknologi Rekayasa Kimia Industri, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jalan Almamater No. 1 Kampus USU, Medan, 20155, Indonesia

^bDepartemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, Jalan Sekip Utara, Yogyakarta, 55281, Indonesia

^cProgram Studi Teknik Kimia, Politeknik Teknologi Kimia Industri, Jalan Medan Tenggara VII, Medan, 20228, Indonesia

^dProgram Studi Pendidikan Kimia, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Terbuka, Jalan Cabe Raya, Tangerang Selatan, 15437, Indonesia

^eDepartemen Farmakologi, Fakultas Kedokteran, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Jalan Kapten Mukhtar Basri No. 3, Medan, 20238, Indonesia

*Penulis korespondensi at: nahzimrahmat@polmed.ac.id (N. Rahmat) Tel.: +62877-8059-8252

Sorotan

- Dopan Ag berasal dari air limbah radiofotografi
- $\text{TiO}_2/\text{AgNPs}$ dapat berperan sebagai material antijamur dan antibakteri
- Organisme uji yang digunakan yaitu *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, dan *Candida albicans*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 27 Maret 2025
Direvisi pada 11 April 2025
Disetujui pada 08 Mei 2025
Tersedia daring pada 09 Mei 2025

Kata kunci:

Fotokatalis, nanopartikel, radiofotografi.

Keywords:

Photocatalyst, nanoparticles, radiophotography.

ABSTRAK

Air limbah radiofotografi mengandung ion kompleks perak tiosulfat $[\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$ yang berpotensi dimanfaatkan kembali. Ion Ag^+ dari kompleks tersebut dapat direduksi menjadi logam perak dan digunakan sebagai dopan untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik titanium dioksida (TiO_2). Review artikel ini bertujuan untuk membandingkan tiga penelitian yang memanfaatkan perak hasil ekstraksi dari limbah fixing radiofotografi sebagai dopan dalam sintesis fotokatalis $\text{TiO}_2/\text{AgNPs}$. Aspek yang dibandingkan meliputi konsentrasi $\text{Ag}(\text{I})$ yang diperoleh dari limbah, metode sintesis fotokatalis, karakterisasi material menggunakan instrumen seperti TEM dan XRD serta hasil uji aktivitas fotokatalitik secara *in vitro* terhadap organisme uji. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa variasi metode sintesis dan kadar dopan Ag memberikan pengaruh signifikan terhadap morfologi, struktur kristal, dan efektivitas fotokatalis. Pemanfaatan perak dari limbah radiofotografi tidak hanya memberikan nilai tambah pada limbah, tetapi juga mendukung pengembangan teknologi fotokatalis yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Artikel ini diharapkan menjadi referensi awal untuk riset lanjutan dalam bidang daur ulang logam berat untuk aplikasi material fungsional.

ABSTRACT

Radiophotographic wastewater contains the silver thiosulfate complex ion $[\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$, which has the potential to be recovered

and reutilized. The Ag^+ ion from this complex can be reduced to metallic silver and used as a dopant to enhance the photocatalytic activity of titanium dioxide (TiO_2). This review article aims to compare three studies that utilized silver extracted from radiophotographic fixing waste as a dopant in the synthesis of $\text{TiO}_2/\text{AgNPs}$ photocatalysts. The comparison focuses on the concentration of Ag(I) obtained from the waste, the synthesis methods of the photocatalysts, material characterization using instruments such as TEM and XRD, and the *in vitro* photocatalytic activity test results against target organisms. The comparison results indicate that variations in synthesis methods and Ag dopant concentrations significantly affect the morphology, crystal structure, and photocatalytic effectiveness. Utilizing silver from radiophotographic waste not only adds value to the waste itself but also supports the development of environmentally friendly and sustainable photocatalyst technologies. This article is expected to serve as an initial reference for further research in the field of heavy metal recycling for functional material applications.

1. Pendahuluan

Sebagai sebuah unsur dalam tabel periodik, perak (Ag) merupakan salah satu logam transisi yang dapat digunakan sebagai dopan pada fotokatalis TiO_2 . Hal ini dikarenakan perak (Ag) telah memenuhi beberapa persyaratan, diantaranya: memiliki elektronegativitas yang lebih besar dari Ti (1,54 skala Pauling), memiliki jari-jari ion yang sesuai dengan Ti (0,68 Å) atau selisih yang tidak berbeda jauh, dan dalam bentuk oksida logam memiliki energi celah pita yang lebih kecil dibandingkan TiO_2 [1]. Penggunaan dopan pada TiO_2 berfungsi untuk menurunkan energi celah pita (*band gap energy*) yang dimiliki oleh TiO_2 , sehingga dapat bertindak lebih efektif sebagai fotokatalis. Selain fotokatalis ini aktif di daerah UV, daya serapan cahaya TiO_2 juga akan melebar hingga ke daerah cahaya tampak.

Peningkatan aktivitas fotokatalitik TiO_2 tentu akan sejalan dengan berhasilnya pembentukan nanopartikel perak (AgNPs) yang dibuat menggunakan metode fotoreduksi [2]. Selain itu, sebaran AgNPs di permukaan TiO_2 yang merata dan terhindar dari aglomerasi [3], serta masuknya AgNPs ke dalam kisi kristal TiO_2 juga memberikan efek ganda, yaitu material ini, fotokatalis TiO_2 yang ter-*doping* nanopartikel Ag ($\text{TiO}_2/\text{AgNPs}$), memiliki sifat baru yaitu sifat antibakteri dan antijamur [4, 5].

Selama ini, dopan Ag biasanya bersumber dari AgNO_3 [6, 7], namun untuk mendukung terwujudnya pembangunan yang berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*) dan 12 prinsip kimia hijau (*12 principles of green chemistry*), maka terdapat 3 referensi artikel terindeks Scopus yang memanfaatkan air limbah radiofotografi (*radiophotography wastewater*) sebagai sumber Ag [8-10]. Data ini diperoleh dari mesin pencarian google scholar dan *scientific database* yang telah melalui proses *peer-reviewed* seperti ScienceDirect, Springer, Wiley Online Library, PubMed, and IEEE Xplore dari Januari 2015 hingga Januari 2025, dengan kata kunci " $\text{TiO}_2/\text{AgNPs}$

antibacterial/antifungal activity”, “*Silver ion from radiophotography wastewater*”, dan “*TiO₂/AgNPs and radiophotography wastewater*”.

Limbah radiofotografi berasal dari proses fotografi berbasis perak yang digunakan untuk mendeteksi dan memantau masalah kesehatan manusia yang terdapat pada bagian dada, tulang belakang, dan anggota gerak lainnya. Ada 4 tahap proses yang terjadi yaitu *imaging*, *development*, *fixing*, dan *toning* [11]. Tahap *fixing* adalah tahapan yang paling banyak menghasilkan limbah yaitu $\pm 80\%$ dari keseluruhan limbah yang terbentuk [12].

Limbah ini mengandung ion kompleks perak tiosulfat $[\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$ yang dapat mengalami ionisasi menjadi kation Ag^+ dan anion $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ seperti yang ditunjukkan pada persamaan (1).



Kedua ion inilah yang berbahaya bila dibuang langsung ke lingkungan perairan, karena kation Ag^+ dapat membunuh bakteri pembusuk yang diperlukan dan anion $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ dapat meningkatkan kesadahan air karena bereaksi dengan kation Ca^{2+} membentuk CaSO_4 [13]. Senyawa kompleks $[\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$ juga dapat teroksidasi menjadi sulfat yang dapat menghasilkan reaksi di dalam air. Reaksi oksidasi anion tiosulfat ditunjukkan pada persamaan (2).



Dalam larutan, ion Ag^+ dalam limbah dapat tereduksi dengan mudah karena memiliki harga potensial reduksi standar (E°) yang relatif besar yaitu $E^\circ = +0,79$ Volt. Reaksi reduksi ion Ag^+ ditunjukkan pada persamaan (3). Ion kompleks $[\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$ dapat mengalami reduksi meskipun sangat lemah yang ditandai dengan nilai potensial reduksi standar (E°) yang sangat rendah yaitu $+0,017$ Volt. Reaksi reduksi ion kompleks $[\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$ ditunjukkan pada persamaan (4). Logam perak atau $\text{Ag}_{(s)}$ yang merupakan produk dari reaksi reduksi ion Ag^+ pada persamaan (3) dapat menjadi sumber Ag yang digunakan sebagai dopan untuk memodifikasi fotokatalis TiO_2 agar aktif di daerah cahaya tampak.



Tujuan utama dari *review paper* ini adalah untuk membandingkan hasil yang diperoleh 3 referensi yang telah disebutkan, baik dari segi konsentrasi Ag(I) yang diperoleh dari air limbah radiofotografi, metode pembuatan fotokatalis $\text{TiO}_2/\text{AgNPs}$, karakterisasi yang dilakukan pada berbagai instrumen, dan hasil pengujian *in vitro* pada organisme uji.

2. Metode

2.1 Analisis Sampel Air Limbah Radiofotografi

Sampel air limbah radiofotografi dianalisis menggunakan instrumen AAS untuk mengetahui konsentrasi Ag(I), baik sebelum maupun setelah aktivitas fotoreduksi. Jumlah Ag yang tereduksi dan masuk ke dalam struktur TiO₂ dihitung menggunakan persamaan (5) berikut:

$$C_r = (C_0 - C_1)/W \times V \quad (5)$$

Keterangan:

C_r = Konsentrasi Ag(I) yang tereduksi (mg/g)

C_0 = Konsentrasi Ag(I) dalam air limbah sebelum fotoreduksi (mg/L)

C_1 = Konsentrasi Ag(I) dalam air limbah setelah fotoreduksi (mg/L)

W = Berat TiO₂ yang digunakan dalam fotoreduksi (mg)

V = Volume air limbah (L)

2.2 Pembuatan Fotokatalis TiO₂/AgNPs

Fotokatalis TiO₂/AgNPs dibuat dengan menggunakan metode fotoreduksi. Tabel 1 berikut menguraikan langkah-langkah atau prosedur yang dilakukan berdasarkan 3 referensi terpilih.

Tabel 1. Perbandingan langkah-langkah dalam pembuatan fotokatalis TiO₂/AgNPs [8-10]

Langkah-langkah	Wahyuni, dkk. (2019)	Lestari, dkk. (2021)	Rahmat, dkk. (2021)
Setiap labu Erlenmeyer diisi dengan air limbah <i>fixing</i> radiofotografi yang telah melalui 5 kali pengenceran.	Volume 250 mL (50 mL limbah + 200 mL air)	Volume 250 mL (50 mL limbah + 200 mL air)	Volume 250 mL (50 mL limbah + 200 mL air)
Ditambahkan lagi serbuk TiO ₂ ke tiap labu dengan jumlah massa yang bervariasi	500 mg, 1 gram, 1,5 gram, 2 gram, dan 3 gram	500 mg	150, 300, dan 450 mg
Ditambahkan HCl agar larutannya ber-pH 4 lalu diaduk.	Ya, dilakukan	Tidak dilakukan	Tidak dilakukan
Disonikasi selama 1 jam	Tidak dilakukan	Ya, dilakukan	Ya, dilakukan
Diaduk selama 30 menit	Tidak dilakukan	Ya, dilakukan	Tidak dilakukan
Dimasukkan ke dalam reaktor UV untuk disinari selama 24 jam sambil diaduk	Ya, dilakukan	Ya, dilakukan	Ya, dilakukan
Didiamkan di ruang gelap selama 24 jam	Tidak dilakukan	Ya, dilakukan	Tidak dilakukan
Disaring menggunakan kertas saring Whatman #42	Ya, dilakukan	Ya, dilakukan	Ya, dilakukan
Padatan dikeringkan menggunakan oven	Pada suhu 110 °C	Tidak dilakukan	Pada suhu 60 °C
Filtrat dianalisis menggunakan AAS	Ya, dilakukan	Ya, dilakukan	Ya, dilakukan
Dilakukan prosedur yang sama untuk variasi pH	pH 2, 4, 6, 8, dan 10	Tidak dilakukan	Tidak dilakukan

Langkah-langkah	Wahyuni, dkk. (2019)	Lestari, dkk. (2021)	Rahmat, dkk. (2021)
Dilakukan prosedur yang sama untuk variasi waktu penyinaran di dalam reaktor UV	(1,5 gram TiO ₂ , 50 mL limbah, 200 mL air) 5, 10, 15, 25, dan 50 jam	Tidak dilakukan	Tidak dilakukan
Dilakukan prosedur yang sama untuk variasi konsentrasi awal Ag(I)	(1,5 gram TiO ₂ , 50 mL limbah, 200 mL air, pH 4) Tidak dilakukan	31,12; 62,28; 155,7; 778.5 mg/L (500 mg TiO ₂ , 50 mL limbah, 200 mL air)	Tidak dilakukan

2.3 Karakterisasi Fotokatalis TiO₂/AgNPs

Tabel 2 berikut ini menunjukkan perbandingan jenis instrumen yang digunakan untuk karakterisasi fotokatalis TiO₂/AgNPs berdasarkan 3 referensi terpilih.

Tabel 2. Perbandingan jenis instrumen yang digunakan untuk karakterisasi fotokatalis TiO₂/AgNPs [8-10]

Jenis Instrumen	Wahyuni, dkk. (2019)	Lestari, dkk. (2021)	Rahmat, dkk. (2021)
DRUV	Ya, digunakan	Tidak digunakan	Tidak digunakan
FTIR	Ya, digunakan	Tidak digunakan	Ya, digunakan
EDS	Tidak digunakan	Tidak digunakan	Ya, digunakan
SRUV	Tidak digunakan	Ya, digunakan	Ya, digunakan
TEM	Ya, digunakan	Ya, digunakan	Ya, digunakan
XRD	Ya, digunakan	Ya, digunakan	Ya, digunakan
SAED	Tidak digunakan	Ya, digunakan	Tidak digunakan

Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa hanya 2 instrumen yang digunakan oleh 3 referensi terpilih, yaitu XRD dan TEM, sehingga kedua instrumen ini yang akan dibandingkan hasilnya.

2.4 Pengujian Antijamur/Antibakteri pada Fotokatalis TiO₂/AgNPs

Tahapan ini membandingkan metode pengujian antijamur/antibakteri pada TiO₂/AgNPs, organisme uji yang digunakan, dan variasi perlakuan yang diberikan pada fotokatalis TiO₂/AgNPs berdasarkan 3 referensi terpilih. Tabel 3 berikut merangkum hal tersebut.

Tabel 3. Perbandingan metode pengujian antijamur/antibakteri, organisme uji, dan variasi perlakuan pada fotokatalis TiO₂/AgNPs [8-10]

Referensi	Metode Pengujian	Organisme Uji	Variasi Perlakuan
Wahyuni, dkk. (2019)	<i>Most Probable Number (MPN)</i>	<i>Escherichia coli</i>	variasi kandungan Ag, variasi dosis TiO ₂ /AgNPs, dan variasi waktu penyinaran cahaya tampak
Lestari, dkk. (2021)	<i>Total Plate Count</i>	<i>Staphylococcus aureus</i>	variasi dosis TiO ₂ /AgNPs, dan variasi waktu penyinaran cahaya tampak
Rahmat, dkk. (2021)	<i>Disc diffusion</i>	<i>Candida albicans</i>	variasi dosis TiO ₂ /AgNPs, dan variasi waktu penyinaran UV dan variasi waktu penyinaran cahaya tampak

Berdasarkan Tabel 3, dapat disimpulkan bahwa: *pertama*, dari 3 referensi terpilih, metode yang digunakan dalam pengujian antibakteri/antijamur sangat berbeda antara referensi yang satu dengan yang lainnya. *Kedua*, organisme uji yang digunakan juga berbeda. *Ketiga*, perlakuannya juga berbeda, perlakuan yang sama hanya terdapat pada variasi dosis $\text{TiO}_2/\text{AgNPs}$ dan variasi waktu penyinaran cahaya tampak (*visible light*). Dengan demikian, hanya 2 perlakuan ini yang akan disinggung pada pembahasan selanjutnya.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Sampel Air Limbah Radiofotografi

Berdasarkan hasil analisis menggunakan instrumen AAS, lalu dihitung menggunakan persamaan (5), maka dapat disimpulkan bahwa konsentrasi Ag(I) dalam sampel air limbah radiofotografi adalah sebagai berikut:

Tabel 4. Konsentrasi Ag(I) pada sampel air limbah radiofotografi berdasarkan analisis AAS [8-10]

Referensi	Hasil (mg/L)	Sumber Air Limbah
Wahyuni, dkk. (2019)	4.405	RSI Yogyakarta PDHI, Indonesia
Lestari, dkk. (2021)	1.557	RSI Yogyakarta PDHI, Indonesia
Rahmat, dkk. (2021)	1.502	RSU Mitra Paramedika, Kabupaten Sleman, Indonesia

Berdasarkan Tabel 4 terlihat bahwa konsentrasi untuk referensi No. 1 lebih banyak dibandingkan referensi lainnya, dengan selisih sebesar 2.848 mg/L untuk No. 2 dan 2.903 mg/L untuk No. 3. Hal ini dapat dimaklumi, sebab selain sumber air limbahnya berbeda, waktu pengambilan sampel air limbah juga berbeda, sehingga jenis *batch* antara satu referensi dengan referensi lainnya tidak akan sama.

3.2 Pembuatan Fotokatalis $\text{TiO}_2/\text{AgNPs}$

Pada subbab 2.2, disimpulkan bahwa 3 referensi terpilih menggunakan metode yang sama yaitu metode fotoreduksi. Namun, ada beberapa langkah yang tidak dilakukan oleh satu referensi, tetapi dilakukan oleh referensi lainnya. Sebagai contoh, penambahan HCl agar larutan ber-pH 4 hanya dilakukan oleh referensi no. 1. Proses sonikasi selama 1 jam dan pengeringan padatan menggunakan oven, tidak dilakukan oleh referensi no. 1. Lalu, proses pengadukan selama 30 menit dan pengondisian agar sampel didiamkan dalam ruang gelap hanya dilakukan oleh referensi no. 2. Adanya perbedaan langkah-langkah ini, akan berefek pada hasil yang diperoleh. Misalnya banyak sedikitnya jumlah Ag yang terbentuk menjadi nanopartikel, besarnya konsentrasi nanopartikel Ag yang masuk ke dalam kisi kristal TiO_2 , dan meratanya penyebaran nanopartikel Ag di permukaan TiO_2 [14, 15]. Namun, pembentukan fotokatalis $\text{TiO}_2/\text{AgNPs}$ tetap terwujud. Hal ini dibuktikan dengan hasil karakterisasi yang dilakukan.

3.3 Hasil Karakterisasi Fotokatalis TiO₂/AgNPs

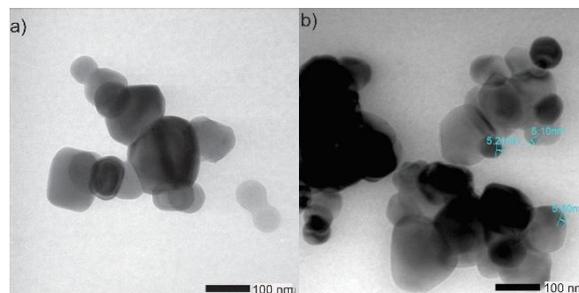
3.3.1 Citra TEM

Karakterisasi menggunakan TEM bertujuan untuk mengetahui morfologi dan ukuran partikel dari TiO₂/Ag. Berdasarkan referensi terpilih, diperoleh berbagai ukuran yang bervariasi. Terlihat pada Tabel 5, ukuran partikel berkisar dari 3 hingga 10 nm pada sampel terpilih. Hal ini menunjukkan bahwa nanopartikel Ag telah terbentuk. Data ini diperoleh dengan cara mengukur bulatan kecil hitam (Ag) yang menempel pada permukaan bulatan besar yang bersih berwarna abu-abu (TiO₂) menggunakan perangkat lunak *Simple Measure*.

Tabel 5. Ukuran partikel terbaik pada sampel TiO₂/AgNPs berdasarkan citra TEM [8-10]

Referensi	Ukuran partikel TiO ₂ /AgNPs	Jenis Sampel
Wahyuni, dkk. (2019)	5 - 10 nm	TiO ₂ /AgNPs (1,5)
Lestari, dkk. (2021)	3 - 8 nm	TiO ₂ /AgNPs (2)
Rahmat, dkk. (2021)	5,10 - 5,50 nm	TiO ₂ /AgNPs (1)

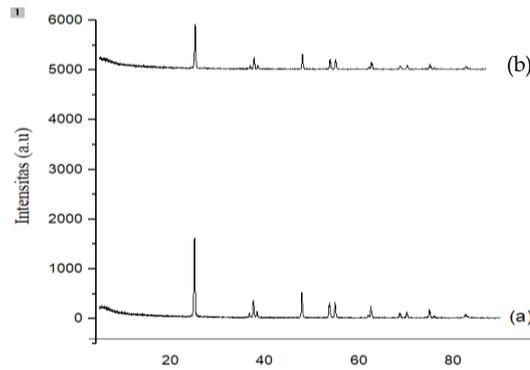
Gambar 1 berikut adalah contoh citra TEM yang menunjukkan perbedaan antara TiO₂ dan TiO₂/AgNPs. Gambar 1(b) ini juga menunjukkan adanya bulatan kecil hitam yang merupakan Ag [16]. Hal ini menunjukkan bahwa berhasilnya pembentukan nanopartikel Ag pada permukaan TiO₂. Gambar ini bersumber dari data eksperimen [10]. Hasil yang serupa juga ditunjukkan oleh referensi lainnya.



Gambar 1. Citra TEM (a) TiO₂, (b) TiO₂/AgNPs (1)

3.3.2 Data XRD

Struktur dan kristalisasi dari TiO₂ dan TiO₂/Ag nanopartikel dikonfirmasi dengan menggunakan alat XRD. Puncak karakteristik TiO₂ anatase dan pola difraktogram TiO₂/AgNPs dibandingkan dengan JCPDS Card. Untuk pola difraktogram TiO₂ anatase yang digunakan, semua referensi terpilih merujuk nilai 2θ pada 25,13°; 37,59°; 47,86°; 53,69°; 54,90°; 62,54°; 68,59°; 70,16°; dan 74,88° (seperti yang terlihat pada Gambar 2 (a)). Hal ini sesuai dengan TiO₂ anatase standar. Gambar 2 berikut ini diambil dari data eksperimen Rahmat [10]. Gambar ini menunjukkan perbedaan puncak dan pola difraktogram antara TiO₂ dengan TiO₂/AgNPs.



Gambar 2. Pola difraktogram (a) TiO₂, (b) TiO₂/AgNPs (1)

Pada Gambar 2 (b), tidak menunjukkan adanya puncak khas dari logam Ag yaitu pada sudut 38,12°, 44,27°, 64,42°, 77,47° (sesuai JCPDS No. 04-0783). Hal ini menunjukkan bahwa logam Ag yang berada pada permukaan TiO₂ adalah logam Ag berbentuk amorf [8]. Jika ditinjau dari aspek intensitas puncak difraksi, Gambar 2 (b) menunjukkan adanya penurunan yang drastis. Penurunan intensitas ini disebabkan oleh terjadinya penurunan kristalinitas TiO₂ [17], akibat menempelnya logam Ag pada TiO₂. Kemungkinan telah terjadi interaksi antara logam Ag dengan atom O dari TiO₂ secara elektrostatik [10].

Selain itu, untuk menunjukkan adanya penyisipan logam Ag ke dalam kisi kristal TiO₂, dapat dilihat dari adanya pergeseran nilai 2θ pada puncak khas TiO₂. Pergeseran ini terjadi akibat terjadinya pelebaran jarak antar kisi kristal (d) TiO₂ [10]. Semua referensi terpilih menunjukkan hasil yang serupa.

3.4 Hasil Pengujian Antibakteri/Antijamur pada Fotokatalis TiO₂/AgNPs

Pada pengujian antibakteri/antijamur, semua referensi terpilih menunjukkan adanya perbedaan pada metode pengujian yang digunakan (seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3). Oleh karenanya, *review paper* ini tidak membandingkan hasil dari 3 referensi itu lalu menyimpulkan mana metode pengujian yang terbaik, sebab 3 referensi ini memiliki ciri khas masing-masing, karena organisme uji yang digunakan juga berbeda. Maka, *review paper* ini ingin menunjukkan bahwa dopan perak (Ag) telah berukuran nano, yang disebut nanopartikel perak dan mampu teremban pada TiO₂ (Ag-doped TiO₂), sehingga membentuk material TiO₂/AgNPs yang memberikan sifat antibakteri [18] dan antijamur [19]. Tabel 6 merangkum hasil yang diperoleh 3 referensi tersebut.

Tabel 6. Hasil pengujian aktivitas antibakteri/antijamur pada fotokatalis TiO₂/AgNPs [8-10]

Referensi	Metode Pengujian	Organisme Uji	Hasil	
			Dosis teroptimal TiO ₂ /AgNPs	Waktu penyinaran cahaya tampak teroptimal
Wahyuni, dkk. (2019)	<i>Most Probable Number (MPN)</i>	<i>Escherichia coli</i>	0,25 g/L	1 jam
Lestari, dkk. (2021)	<i>Total Plate Count</i>	<i>Staphylococcus aureus</i>	0,1 g/L	3 jam
Rahmat, dkk. (2021)	<i>Disc diffusion</i>	<i>Candida albicans</i>	0,5 g/L	5 jam

Berdasarkan Tabel 6, material yang dihasilkan pada penelitian [8] diaplikasikan pada air sumur yang terinfeksi bakteri *Escherichia coli* sebesar 1800 cfu. Dengan dosis TiO₂/AgNPs sebesar 0,25 g/L dalam waktu 1 jam, mampu membunuh bakteri tersebut secara tuntas. Material yang dihasilkan pada penelitian [9] mampu menghambat pertumbuhan bakteri *Staphylococcus aureus* sebesar 58% pada dosis 0,1 g/L dalam waktu 3 jam dengan kateori bakteriostatik. Material yang dihasilkan pada penelitian [10] menunjukkan adanya diameter zona hambat pada media yang diaplikasikan seluas 4,05 mm. Menurut Davis dan Scout, meskipun terkategori lemah, hal tersebut cukup membuktikan bahwa fotokatalis TiO₂/AgNPs telah aktif di daerah cahaya tampak (*visible region*), sehingga mampu menghambat pertumbuhan jamur *Candida albicans* [20].

4. Kesimpulan

Berdasarkan uraian di atas, maka dapat disimpulkan bahwa konsentrasi Ag(I) yang diperoleh dari air limbah radiofotografi berdasarkan referensi [8-10] berturut-turut yaitu 4.405 mg/L, 1.557 mg/L, dan 1.502 mg/L. Metode pembuatan fotokatalis TiO₂/AgNPs menggunakan metode fotoreduksi, meskipun ada beberapa langkah yang membedakan antara satu referensi dengan referensi lainnya. Instrumen yang sama yang digunakan oleh 3 referensi terpilih tersebut adalah TEM dan XRD. Dari hasil citra TEM, semua referensi memperlihatkan adanya bulatan hitam kecil yang menunjukkan adanya Ag yang menempel di permukaan TiO₂. Dari data XRD menunjukkan adanya penurunan intensitas puncak serapan TiO₂ dan pergeseran nilai 2θ pada puncak khas TiO₂. Hal ini menunjukkan adanya Ag yang tersisip ke dalam kisi kristal TiO₂. Hasil pengujian *in vitro* pada organisme uji menunjukkan adanya daya hambat sebesar 100% [8], 58% [9], dan diameter zona hambat yang terkategori lemah seluas 4,05 mm [10].

Kontribusi Penulis

N. Rahmat: melakukan review terhadap referensi, melakukan proses pengeditan, penerjemahan abstrak, komparasi ketiga referensi dan penyesuaian dengan format jurnal. **PP.C. Moneteringtyas:** melakukan review terhadap artikel. **N.D. Lestari:** melakukan review terhadap artikel referensi. **T. Afandi:** melakukan review terhadap aspek pembuatan fotokatalis. **S.W. Wijayanti:** melakukan review terhadap aspek pengelolaan limbah radiofotografi. **M. Faisal:** melakukan review terhadap aspek pengujian aktivitas antijamur dan antibakteri.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan, baik secara finansial, akademik, maupun pribadi, yang dapat memengaruhi hasil penelitian dan penulisan artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] G. Liu *et al.*, "The Preparation of Zn²⁺ doped TiO₂ Nanoparticles by Sol-gel and Solid Phase Reaction Methods respectively and their Photocatalytic Activities," *Chemosphere*, vol. 59, pp. 1367–1371, 2005, doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.11.072.
- [2] PP. V. Viet *et al.*, "Silver Nanoparticle loaded TiO₂ Nanotubes with High Photocatalytic and Antibacterial Activity Synthesized by Photoreduction Method," *J. Photochem*, vol. 352, pp. 106–112, 2018, doi: 10.1016/j.jphotochem.2017.10.051.
- [3] V. Uthiravel *et al.*, "Green Synthesis and Characterization of TiO₂ and Ag-doped TiO₂," *Inorg. Chem. Commun*, vol. 170, 113327, 2024, doi: 10.1016/j.inoche.2024.113327.
- [4] R. Augustine *et al.*, "Electrospun PCL Membranes incorporated with Biosynthesized Silver Nanoparticles as Antibacterial Wound Dressings," *Appl.Nanosci.*, vol. 6, pp. 337–344, 2016, doi: 10.1007/s13204-015-0439-1.
- [5] PP. A. Nevado-Velasquez *et al.*, "Synthesis and Application of Ag-doped TiO₂ Nanoparticles with Antifungal Activity and Ethylene Inhibition in Postharvest of *Avocado cv. Hass*," *Biocatal. Agric. Biotechnol*, vol. 54, 102901, 2023, doi: 10.1016/j.bcab.2023.102901.
- [6] V. H. Rathi *et al.*, "Green Synthesis of Ag/CuO and Ag/Nanoparticles for Enhanced Photocatalytic Dye Degradation, Antibacterial, and Antifungal Properties," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 18, 100476, 2023, doi: 10.1016/j.apsadv.2023.100476.
- [7] E. T. Wahyuni *et al.*, "Antibacterial Activity of TiO₂-Ag Nanoparticle under Visible Light," *Mater. Sci. Forum*, vol. 948, pp. 33–42, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.948.33.
- [8] E.T. Wahyuni *et al.*, "Preparation of TiO₂/AgNPs by Photodeposition Method using Ag(I) present in Radiophotography Wastewater and their Antibacterial Activity in Visible Light Illumination," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol.7, 103178, 2019, doi: 10.1016/j.jece.2019.103178.
- [9] N. D. Lestari *et al.*, "Visible Light Antibacterial Activity of TiO₂-Ag prepared from Radiophotography Wastewater," *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, vol. 40, no. 3, pp. 866–871, 2021, doi: 10.30492/ijcce.2020.38101.
- [10] N. Rahmat *et al.*, "Antifungal Activity of TiO₂/Ag Nanoparticles under Visible Irradiation," *Indones. J. Chem.*, vol. 21, no. 1, pp. 14 – 23, 2021, doi: 10.22146/ijc.49150.
- [11] McCharty and Mmerritt, *Chemistry of Photography*. London: Chemical Heritage Foundation, 1999.
- [12] T. PP. Cribbs, and T.J. Dagon, *Disposal of Small Volumes of Photographic Processing Solutions*. New York: Kodak Publication, 1986.
- [13] PP. R. Anderson *et al.*, *Photocatalytic Process for Silver Recovery and Wash Water Reuse*. Illinois: Illinois Institute Technology of Chicago, 2000.
- [14] C.J. Alarc´on-Hern´andez *et al.*, "Comparison of Thin Films of TiO₂ doped with Ag or Zn on Silicon Substrates by Green Synthesis and Chemical Condensation Route," *Appl. Mater. Today*, vol. 41, 102480, 2024, doi: 10.1016/j.apmt.2024.102480.
- [15] T. Z. Liza *et al.*, "Effect of Ag-doping on Morphology, Structure, Band Gap and Photocatalytic Activity of Bio-mediated TiO₂ Nanoparticles," *Results Mater*, vol. 22, 100559, 2024, doi: 10.1016/j.rinma.2024.100559.
- [16] O. Bakina *et al.*, "Using of Electrical Explosion of Two Twisted Wires to Obtain TiO₂(rutile)/TiO₂(anatase)-Ag Nanoparticles with High Visible-light Photochemical Activity," *J. Mol. Struct.*, vol. 1329, 141327, 2025, doi: 10.1016/j.molstruc.2025.141327.

- [17] S. N. Yahya *et al.*, "Photodegradation of Organic Water Pollutants using Magnetically Separable and Reusable Novel Ag-doped Fe₃O₄/TiO₂ Nanocomposites Synthesized by Green Route," *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 173, 113749, 2025, doi: 10.1016/j.inoche.2024.113749.
- [18] G. S. Jaber *et al.*, "Enhancing the Prodigiosin Pigment by adding Ag\TiO₂ Synergism for Antibacterial Activity," *Biocatal Agric Biotechnol*, vol. 54, 102900, 2023, doi: 10.1016/j.bcab.2023.102900.
- [19] O. A. Madkhali, "A Comprehensive Review on Potential Applications of Metallic Nanoparticles as Antifungal Therapies to Combat Human Fungal Diseases," *Saudi Pharm. J.*, vol. 31, 101733, 2023, doi: 10.1016/j.jsps.2023.101733.
- [20] W. W. Davis and T.R. Stout, "Disc Plate Method of Microbiological Antibiotic Assay. I. Factors Influencing Variability and Error," *Appl. Microbiol*, vol. 22, pp. 659–665, 1971, doi: 10.1128/am.22.4.659-665.1971.