

Peningkatan Degradasi Larutan Metilen Biru Menggunakan Lapisan TiO₂ pada Reaktor “Calma” Melalui Bentuk Penataan Substrat

Clarisca Putri Rusyda Nabillah, Gatut Yudoyono, dan Bachtera Indarto

Departemen Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: g Yudoyono@physics.its.ac.id

Abstrak—Industri tekstil menjadi salah satu upaya penyejahteraan hidup manusia dengan jumlah produksi tekstil yang tinggi. Hal ini kemudian menjadikan industri tekstil sebagai salah satu penyumbang terbesar limbah pencemaran air karena mengandung zat-zat polutan. Dalam beberapa tahun terakhir banyak penelitian difokuskan pada fotokatalisis untuk degradasi polutan air organik menggunakan material semikonduktor. Penelitian ini mempelajari pengaruh peletakan substrat dan debit pada reaktor terhadap degradasi fotokatalisis polutan metilen biru menggunakan TiO₂ sebagai fotokatalis. Fotodegradasi dilakukan dalam reaktor “Calma” yang dilengkapi dengan lampu ultraviolet-C (UV-C). Hasil penelitian menunjukkan penurunan konsentrasi larutan sebesar 6,08 ppm dengan persentase degradasi sebesar 53,64% selama 24 jam *treatment* dilakukan. Peletakan substrat dengan bentuk lembaran secara seri tegak lurus menghadap lampu ultraviolet dengan pelapisan menggunakan metode *spray* diketahui lebih efektif dilakukan jika dibandingkan dengan substrat yang digulung dan hanya diletakkan di dalam reaktor tanpa disusun. Selain itu, pengaturan debit sebesar 35 ml/s pada reaktor turut berpengaruh terhadap tingkat fotodegradasi larutan metilen biru.

Kata Kunci—Debit, Fotokatalisis, Peletakan Substrat, *Spray*.

I. PENDAHULUAN

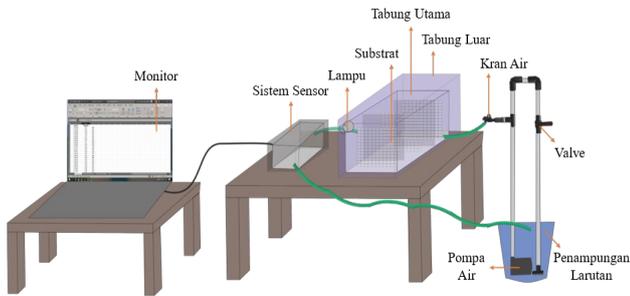
Salah satu upaya manusia untuk meningkatkan kesejahteraan hidupnya adalah dengan mengembangkan industri tekstil [1]. Kebutuhan tekstil yang tinggi di dunia, menyebabkan industri tekstil dan garmen semakin berkembang, sehingga produksi dan penggunaan bahan pewarna ikut meningkat [2]. Industri tekstil merupakan salah satu penyumbang terbesar limbah pencemaran air karena mengandung zat-zat yang menjadi polutan air seperti suspensi padat, zat warna, pelumas, minyak, *chemical oxygen demand* (COD), garam, dan zat kimia lain yang larut dalam air baik yang tidak dapat terdegradasi maupun yang sukar terdegradasi [3]. Metilen biru merupakan salah satu zat warna yang sering digunakan dalam industri tekstil dan garmen dikarenakan harganya ekonomis dan mudah diperoleh [4]. Dosis metilen biru yang berlebihan dalam penggunaannya dapat membahayakan kelangsungan hidup makhluk hidup di sekitar sungai dengan efek samping yang ditimbulkan di antaranya iritasi kulit, iritasi saluran pencernaan, dan sianosis [2],[5]. Dalam beberapa tahun terakhir banyak penelitian difokuskan pada fotokatalisis untuk degradasi polutan air organik menggunakan material semikonduktor seperti fotokatalisis dengan katalis titanium dioksida (TiO₂) [6-7]. Penggunaan TiO₂ serbuk membutuhkan pemisahan setelah penjernihan agar dapat digunakan kembali, sehingga penelitian dilakukan dengan melapiskan material TiO₂ pada suatu media (substrat) [8].

TiO₂ merupakan semikonduktor yang memiliki fotoaktivitas dan stabilitas kimia tinggi serta tahan terhadap fotokorosi [9]. Katalis TiO₂ memiliki 3 jenis struktur kristal, yang mana struktur rutil dan anatase cukup stabil keberadaannya dibandingkan dengan struktur brookite dan bisa digunakan sebagai fotokatalis [10]. TiO₂ anatase ini memiliki ukuran partikel yang lebih kecil dan permukaan yang lebih luas sehingga sifat katalitiknya lebih baik [11]. Fotokatalisis merupakan suatu kombinasi antara proses fotokimia dan katalis [12]. Sedangkan semikonduktor adalah bahan dengan ciri-ciri terisinya pita valensi dan kosongnya pita konduksi serta tidak ada elektron pada *band gap* di antara pita konduksi dan pita valensi [13]. Bila semikonduktor dikenai cahaya dengan energi yang sama atau lebih besar dari energi *band gap*-nya, maka elektron (e⁻) pada pita valensi akan tereksitasi ke pita konduksi menghasilkan hole (h⁺) pada pita valensi [14].

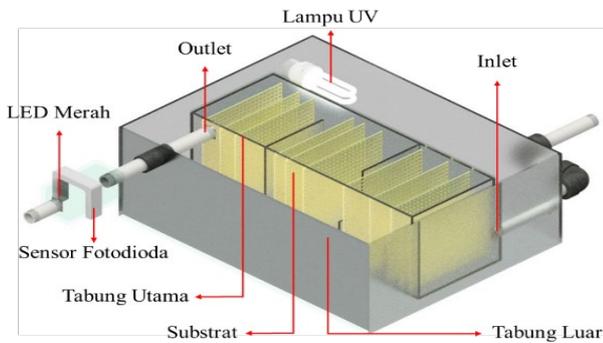
TiO₂ adalah semikonduktor tipe-n yang digunakan sebagai fotokatalis untuk menguraikan polutan di udara dan air, salah satunya metilen biru [13]. Metilen biru merupakan suatu senyawa dengan rumus kimia C₁₆H₁₈N₃SCl yang banyak digunakan pada industri tekstil [15]. Kandungan metilen biru pekat dapat menghalangi penetrasi sinar matahari ke dalam perairan dan mengganggu kehidupan ekosistem lingkungan. Sedangkan pada manusia, metilen biru dapat menyebabkan mata terbakar, sulit bernapas, mual, muntah, keringat berlebihan kebingungan mental [16].

Arduino merupakan papan elektronik berbasis mikrokontroler ATmega yang memenuhi sistem minimum mikrokontroler agar dapat bekerja secara mandiri (*stand alone controller*) [17]. Komponen utama pada papan Arduino adalah sebuah mikrokontroler 8-bit dengan merk ATmega yang dibuat oleh Atmel Corporation. Berbagai papan Arduino menggunakan tipe Atmega yang berbeda-beda tergantung dari spesifikasinya, sebagai contoh Arduino Uno menggunakan *chip* mikrokontroler ATmega328 sedangkan Arduino Mega 2560 yang lebih canggih menggunakan ATmega2560 [18]. Arduino dapat digunakan untuk berbagai hal, salah satunya untuk mengontrol sensor seperti sensor fotodiode. Fotodiode merupakan piranti semikonduktor dengan struktur sambungan p-n dengan prinsip kerja ketika sebuah foton diserap dari sumber cahaya, hal tersebut membangkitkan satu elektron dan menghasilkan sepasang pembawa muatan tunggal, sebuah elektron, dan sebuah *hole* (bagian yang kehilangan elektron). Fotodiode yang menangkap cahaya akan menghasilkan tegangan sekitar 0,5 volt dengan besar arus yang dihasilkan bergantung dari intensitas cahaya yang diterima oleh fotodiode.

Spektrofotometer cahaya tampak atau sering disebut



Gambar 1. Perancangan reaktor fotokatalisis dan sistem sensor fotodegradasi.



Gambar 2. Bagian utama reaktor fotokatalisis.

visible spectrophotometer adalah sebuah alat yang digunakan untuk mengukur jumlah cahaya yang diserap atau ditransmisikan dengan fungsi panjang gelombang. Gelombang yang digunakan merupakan gelombang cahaya tampak (400-800 nm) dengan energi sebesar 299-149 kJ/mol. Cahaya yang dilihat manusia biasa disebut sebagai warna komplementer dan berbeda dengan cahaya yang diserap suatu benda. Berdasarkan turunan Hukum Beer, diketahui bahwa nilai absorbansi akan berbanding lurus dengan konsentrasi larutan. Hal ini didapatkan dari persamaan sebagai berikut.

$$A = a \cdot b \cdot c \tag{1}$$

Dengan A adalah absorbansi, a adalah tetapan absorptivitas (konsentrasi dalam ppm), b (atau l) adalah tebal larutan (tebal *cuvet* biasanya 1 cm), dan c adalah konsentrasi larutan yang diukur.

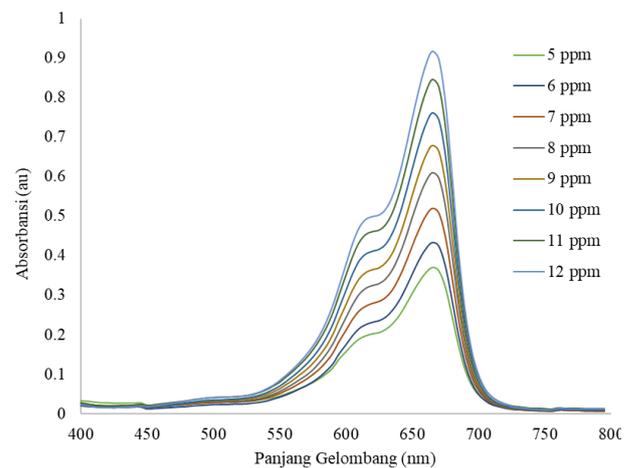
II. METODOLOGI

A. Alat dan Bahan

Dalam penelitian yang dilakukan, bahan utama yang digunakan adalah serbuk TiO₂ (Merck) berfasa anatase beserta kasa nilon untuk pembuatan substrat dan serbuk metilen biru untuk pembuatan larutan polutan. Peralatan utama yang digunakan adalah kotak akrilik sebagai tabung reaktor, LED merah sensor fotodioda untuk pembuatan sistem sensor fotodegradasi, dan *visible spectrophotometer* N2S untuk uji absorbansi.

B. Pembuatan Substrat

Pembuatan substrat dilakukan dengan menyampurkan 2 gram serbuk TiO₂, 120 ml aquades, dan 80 ml cat bening (Propan woodstain) lalu diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 10 rps selama 60 menit. Kemudian kasa nilon digunting dengan ukuran 13 x 15 cm sebanyak 12 lembar. Pelapisan TiO₂ pada kasa dilakukan dengan penyemprotan (*spray coating*) agar hasil yang didapatkan lebih merata dan lubang kasa tidak tertutup lapisan TiO₂.



Gambar 3. Kurva uji absorbansi larutan standar metilen biru.

Selanjutnya substrat dijahit pada kerangka kawat agar dapat berdiri tegak.

C. Pembuatan Larutan Metilen Biru

Dibuat larutan metilen biru berkonsentrasi 12 ppm dengan mencampurkan 195,6 mg serbuk metilen biru dan 16,3 L aquades. Selanjutnya larutan diencerkan agar mendapatkan konsentrasi larutan standar 12 ppm, 11 ppm, 10 ppm, 9 ppm, 8 ppm, 7 ppm, 6 ppm, dan 5 ppm masing-masing sebanyak 130 ml menggunakan persamaan berikut.

$$M1 \times V1 = M2 \times V2 \tag{2}$$

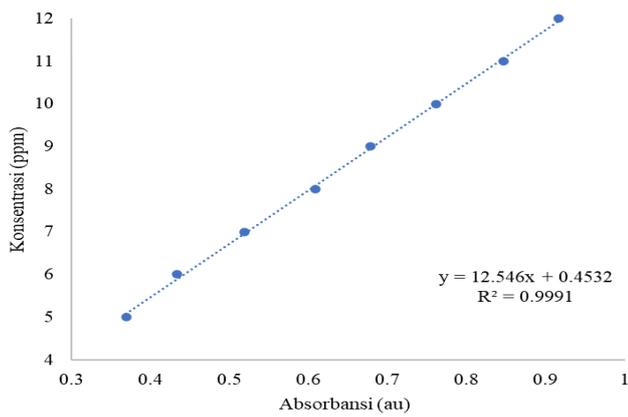
Larutan standar digunakan untuk kebutuhan kalibrasi menggunakan *visible spectrophotometer* dan sistem sensor fotodegradasi, sehingga didapatkan nilai absorbansi dan tegangan masing-masing larutan. *Treatment* larutan yang dilakukan sebanyak 16 L dengan konsentrasi awal 11,34 ppm.

D. Perancangan Reaktor dan Sistem Sensor Fotodegradasi

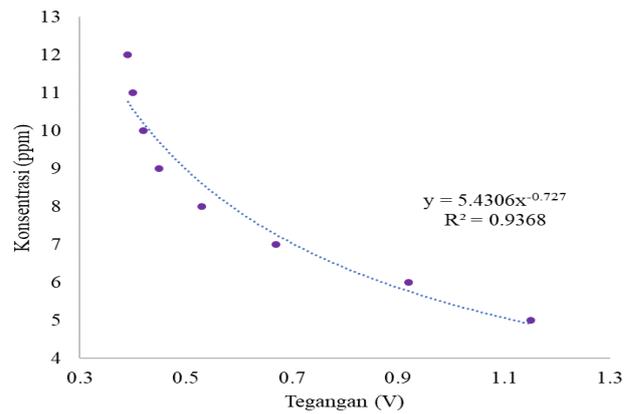
Perancangan reaktor dan sistem sensor ditunjukkan oleh Gambar 1. Larutan metilen biru yang digunakan sebagai polutan dialirkan melalui ember menuju ke tabung utama dengan pompa. Kran air dan *valve* difungsikan untuk mengatur debit pada inlet tabung sebesar 35 ml/d. Tabung utama dibuat dengan akrilik berukuran 15 x 40 x 15 cm untuk diletakkan substrat, kemudian diberi selubung luar berukuran 35 x 45 x 17 cm untuk dipasang lampu UV-C dan reflektor di bagian dalam. Dari tabung utama, larutan dialirkan menuju kotak akrilik berukuran 5 x 10 x 5 cm untuk tempat sensor dan LED merah dan kembali menuju ember. Bagian utama reaktor ditunjukkan oleh Gambar 2. Pada sistem sensor fotodegradasi digunakan Arduino Uno sebagai mikrokontroler sensor fotodioda dan LED merah. Sistem sensor disambungkan pada *software* PLX-DAQ sebagai monitor (sekaligus penyimpanan data) fotodegradasi secara *realtime* dan voltmeter sebagai pembanding nilai yang terbaca PLX-DAQ. Hasil yang didapatkan dari sistem sensor berupa nilai tegangan larutan.

E. Pengambilan Data dan Pengujian Fotodegradasi

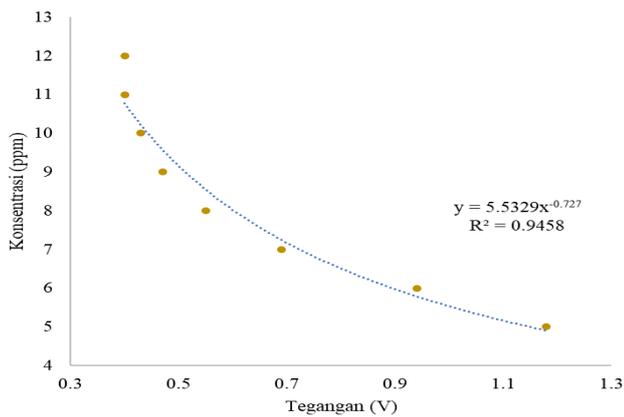
Pengambilan data penelitian dilakukan dengan perlakuan *treatment* pada larutan metilen biru selama 24 jam dalam reaktor dengan pengambilan sampel larutan tiap jam. Masing-masing sampel larutan dipindahkan pada *cuvet* steril lalu dimasukkan ke dalam *visible spectrophotometer* yang



Gambar 4. Kurva linieritas puncak absorbansi larutan standar metilen biru.



Gambar 6. Kurva kalibrasi tegangan voltmeter larutan standar metilen biru.



Gambar 5. Kurva kalibrasi tegangan PLX-DAQ larutan standar metilen biru.

diatur pada panjang gelombang 400-800 nm untuk dilakukan uji absorbansi. Selama 24 jam *treatment* dicatat pula nilai tegangan dari voltmeter pada sistem sensor karena nilai tegangan dari PLX-DAQ secara otomatis terekam pada Microsoft Excel.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kalibrasi Larutan Metilen Biru

Kalibrasi dilakukan pada larutan metilen biru 12 ppm, 11 ppm, 10 ppm, 9 ppm, 8 ppm, 7 ppm, 6 ppm, dan 5 ppm yang sudah dibuat sebelumnya. Kalibrasi dilakukan dengan melakukan uji absorbansi dan tegangan. Pada kalibrasi tegangan didapatkan hasil absorbansi pada Gambar 3 yang menunjukkan kesesuaian antara hasil pengujian dengan teori Hukum Beer bahwa nilai konsentrasi sebanding dengan absorbansi larutan. Dari Gambar 3 dapat diketahui bahwa puncak absorbansi setiap konsentrasi larutan metilen biru terletak saat panjang gelombang berada pada 665 nm. Artinya, spektrum cahaya tampak yang dapat diabsorpsi dengan baik oleh larutan metilen biru berada pada spektrum cahaya tampak warna merah, di mana spektrum cahaya merah sendiri berada pada rentang 625-740 nm [19]. Dari kurva absorbansi didapatkan nilai puncak absorbansi yang kemudian dijadikan sebagai kurva standar yang digunakan dalam menentukan konsentrasi larutan hasil pengujian [20]. Kurva standar kalibrasi absorbansi ditunjukkan Gambar 4. Dari kurva standar kemudian diketahui nilai regresi linier, yaitu.

$$y = 12.546x + 0.4532 \tag{3}$$

Tabel 1.
Data kalibrasi larutan standar metilen biru

Konsentrasi (ppm)	Absorbansi (au)	PLX-DAQ (V)	Voltmeter (V)
15	1.12	0.32	0.31
14	1.055	0.38	0.37
13	0.996	0.4	0.38
12	0.916	0.4	0.39
11	0.846	0.4	0.4
10	0.761	0.43	0.42
9	0.678	0.47	0.45
8	0.609	0.55	0.53
7	0.519	0.69	0.67
6	0.433	0.94	0.92

Dengan nilai R^2 sebesar 0,9991.

Selanjutnya dibuat kurva standar hasil kalibrasi tegangan yang ditunjukkan Gambar 5 dan Gambar 6. Pada Gambar 5 dan Gambar 6 dapat dilihat bahwa nilai tegangan yang terukur berbanding terbalik dengan konsentrasi larutan. Penyebabnya adalah pada saat larutan metilen biru memiliki konsentrasi yang tinggi, warna larutan akan menjadi pekat dan sulit untuk ditembus oleh cahaya. Sehingga cahaya yang dideteksi oleh sensor fotodiode hanya sedikit dan akhirnya menghasilkan tegangan yang kecil, dan berlaku sebaliknya. Dari kedua kurva standar uji tegangan didapatkan regresi power yakni. Pertama, regresi kurva standar uji tegangan dengan PLX-DAQ.

$$y = 5.5329x^{-0.727} \tag{4}$$

Dengan R^2 sebesar 0,9458. Kedua, regresi kurva standar uji tegangan dengan voltmeter.

$$y = 5.4306x^{-0.727} \tag{5}$$

Dengan R^2 sebesar 0,9458.

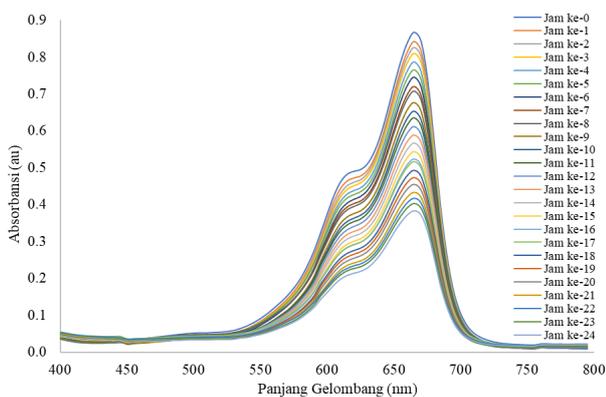
Selain data tegangan yang berada pada kedua kurva standar, diambil juga data tegangan maksimum yang dapat terukur pada sensor fotodiode dan voltmeter saat konsentrasi larutan metilen biru 0 ppm (aquades), yakni sebesar 4,71 volt pada PLX-DAQ dan 4,68 volt pada voltmeter. Data kalibrasi larutan standar metilen biru ditunjukkan Tabel 1 pada Lampiran.

B. Uji Absorbansi Larutan Metilen Biru dengan Visible Spectrophotometer

Uji absorbansi dilakukan setiap satu jam selama proses fotokatalisis pada reaktor metilen biru dalam kurun waktu 24 jam. Pengujian sampel dimulai dari konsentrasi awal (pada

Tabel 2.
Data hasil uji absorbansi larutan metilen biru

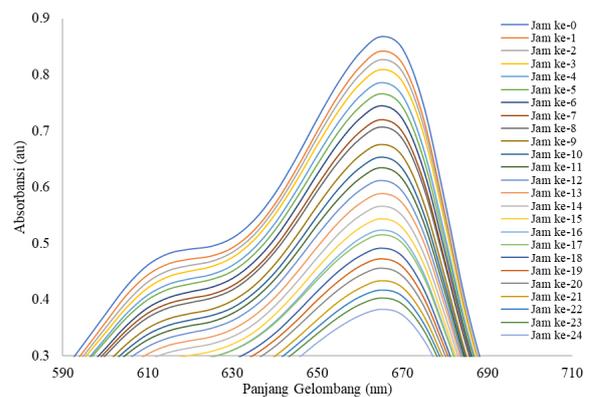
Waktu (Jam ke-)	Absorbansi (au)	Konsentrasi (ppm)	Persentase
0	0.868	11.343	0.000%
1	0.843	11.029	2.765%
2	0.827	10.829	4.535%
3	0.810	10.615	6.415%
4	0.787	10.327	8.959%
5	0.766	10.063	11.282%
6	0.745	9.800	13.604%
7	0.721	9.493	16.314%
8	0.707	9.323	17.807%
9	0.677	8.941	21.181%
10	0.654	8.658	23.669%
11	0.635	8.420	25.771%
12	0.612	8.131	28.315%
13	0.590	7.849	30.803%
14	0.567	7.567	33.292%
15	0.544	7.278	35.836%
16	0.524	7.027	38.048%
17	0.516	6.927	38.933%
18	0.493	6.632	41.532%
19	0.473	6.387	43.689%
20	0.456	6.174	45.569%
21	0.434	5.898	48.002%
22	0.417	5.685	49.883%
23	0.403	5.509	51.431%
24	0.383	5.258	53.643%



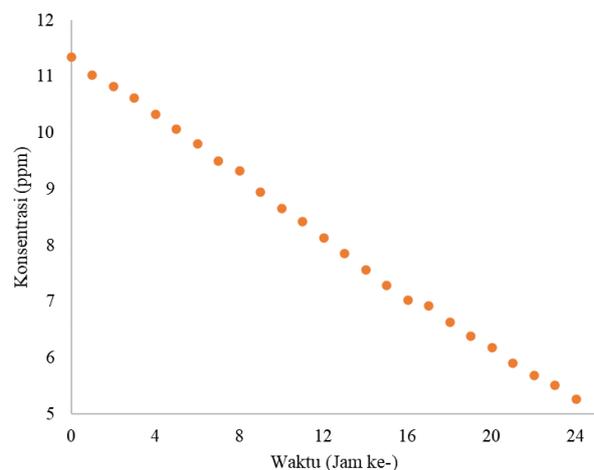
Gambar 7. Kurva absorbansi larutan metilen biru.

jam ke-0) sebesar 11,34 ppm dengan debit yang masuk ke dalam reaktor adalah 35 ml/d dan kapasitas total larutan sebesar 16 liter. Pada proses pengujian absorbansi, alat yang digunakan adalah *Visible Spectrophotometer*, yang mana alat ini menguji absorbansi suatu larutan hanya menggunakan spektrum cahaya tampak. Kurva absorbansi sampel larutan ditunjukkan Gambar 7. Kemudian diambil perbesaran pada daerah puncak absorbansi yang ditunjukkan Gambar 8. Dari Gambar 8 dapat diketahui bahwa terjadi penurunan nilai absorbansi pada setiap jam selama pengujian berlangsung. Nilai absorbansi pada saat kondisi awal (jam ke-0) adalah 0,868 au yang kemudian menjadi 0,383 au pada akhir pengujian (jam ke-24). Hal tersebut memberikan tanda bahwa proses fotodegradasi telah terjadi pada larutan metilen biru. Berdasarkan kalibrasi yang sudah dilakukan sebelumnya, puncak absorbansi pada kondisi awal berada pada rentang 11-12 ppm, sedangkan nilai puncak absorbansi pada kondisi akhir pengujian berada pada rentang 5-6 ppm. Hasil uji absorbansi ini selanjutnya dikonversikan menjadi nilai konsentrasi larutan metilen biru melalui perhitungan berdasarkan (3).

Konsentrasi larutan metilen biru yang dimasukkan ke dalam reaktor saat pengujian fotodegradasi dilakukan adalah 11,34 ppm, sedangkan konsentrasi akhir dari larutan metilen



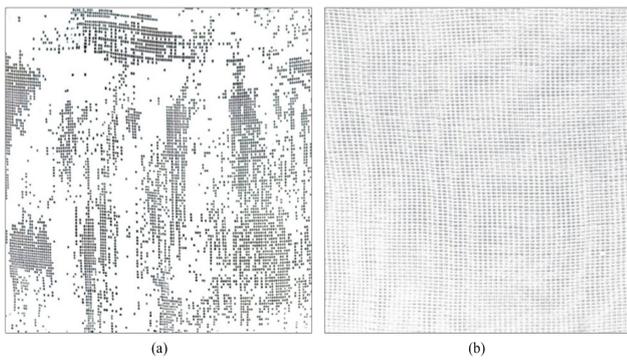
Gambar 8. Kurva perbesaran puncak absorbansi larutan metilen biru.



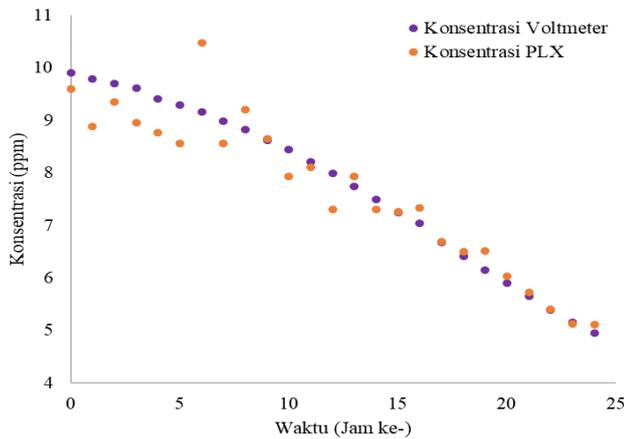
Gambar 9. Kurva penurunan konsentrasi larutan metilen biru.

biru yang keluar dari reaktor adalah 5,26 ppm. Penurunan total konsentrasi larutan metilen biru yang terjadi pada penelitian ini adalah sebesar 6,08 ppm dengan penurunan rata-rata konsentrasi larutan metilen biru setiap jamnya sebesar 0,25 ppm. Kurva penurunan konsentrasi larutan ditunjukkan Gambar 9. Setelah didapatkan nilai konsentrasi larutan, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai persentase fotodegradasi larutan metilen biru. Dalam penelitian ini, didapatkan nilai persentase fotodegradasi sebesar 53,64%. Nilai degradasi ini cukup stabil (linier) di setiap jamnya dengan rata-rata persentase fotodegradasinya sebesar 2,24% tiap jam selama 24 pengujian. Nilai absorbansi hingga persentase fotodegradasi ditunjukkan oleh Tabel 2 pada Lampiran.

Cara pelapisan TiO₂ pada kasa nilon yang digunakan sebagai substrat dapat dilakukan dengan berbagai metode, dua di antaranya yang pernah dilakukan adalah menggunakan metode oles dan metode *spray*. Pada penelitian yang dilakukan Rosul (2020) dan Assegaf (2021), pembuatan substrat dilakukan dengan melapiskan TiO₂ dan resin yang dioleskan menggunakan kuas [23-24]. Sedangkan pada penelitian yang dilakukan saat ini, pembuatan substrat dilakukan dengan melapiskan TiO₂ dan cat bening yang disemprotkan (*spray*) menggunakan *sprayer*. Saat dilakukan metode yang sama untuk pembuatan substrat (dengan cara dioles), pelapisan TiO₂ pada kasa nilon tampak tidak rata dan banyak bagian lubang kasa nilon yang tertutup lapisan TiO₂ dan resin. Hasil yang berbeda didapatkan ketika metode yang digunakan untuk melapisi kasa nilon adalah metode *spray*. Dengan menggunakan metode *spray*, secara kasat mata TiO₂



Gambar 10. Perbedaan hasil pelapisan substrat (a) oles; (b) *spray*.



Gambar 11. Kurva penurunan konsentrasi hasil uji tegangan.

melapisi kasa nilon dengan rata di setiap sisi, sehingga setiap lubang pada kasa nilon tidak tertutup oleh lapisan TiO₂ yang ditunjukkan Gambar 10.

Pada pelapisan kasa nilon menggunakan metode oles, lapisan menebal di beberapa bagian kasa nilon dengan tidak merata. Hal tersebut membuat TiO₂ yang terperangkap di dalam tumpukan lapisan (*layer*) resin juga semakin banyak jika dibandingkan dengan pelapisan menggunakan metode *spray*. Semakin banyak TiO₂ yang berinteraksi dengan polutan, maka tingkat fotodegradasinya juga akan semakin tinggi, sehingga dapat mempercepat waktu fotodegradasi larutan metilen biru. Untuk itu dipilih penggunaan metode *spray* agar pelapisan TiO₂ pada kasa nilon menghasilkan fotodegradasi yang lebih optimum.

Pada penelitian ini, penataan substrat dilakukan dengan menyusun substrat dalam bentuk lembaran yang diikat pada kawat sehingga berdiri dengan tegak secara seri di dalam reaktor. Hal ini dapat menjadi salah satu faktor yang dapat dipertimbangkan saat melakukan penelitian karena adanya perbedaan luas permukaan substrat yang dapat berinteraksi dengan larutan metilen biru sebagai polutan. Pada metode oles dan substrat yang digulung (*spiral*), luas permukaan TiO₂ yang berinteraksi dengan polutan bisa jadi lebih kecil dibandingkan dengan metode *spray* dan substrat dibiarkan dalam bentuk lembaran dan tersusun secara seri. Selain luas permukaan substrat, interaksi antara larutan metilen biru dengan substrat juga bergantung pada intensitas cahaya UV yang menyinari substrat. Cahaya dari lampu UV diperkirakan menyebar rata ke seluruh tabung karena di luar tabung reaktor dibuat selubung yang didalamnya dilapisi dengan reflektor, sehingga cahaya dapat terpantul ke segala arah di sekeliling tabung reaktor. Berbeda halnya saat substrat diletakkan dalam posisi tergulung, bagian dalam gulungan substrat tidak

Tabel 3.
Data hasil uji tegangan PLX-DAQ larutan metilen biru

Waktu (Jam ke-)	Tegangan (V)	Konsentrasi (ppm)	Persentase
0	0.450	9.597	0.000%
1	0.504	8.878	7.490%
2	0.468	9.342	2.658%
3	0.498	8.952	6.726%
4	0.514	8.759	8.731%
5	0.532	8.555	10.863%
6	0.396	10.478	-9.179%
7	0.532	8.555	10.863%
8	0.478	9.207	4.062%
9	0.524	8.644	9.931%
10	0.594	7.931	17.365%
11	0.576	8.100	15.599%
12	0.670	7.301	23.925%
13	0.594	7.931	17.365%
14	0.670	7.301	23.925%
15	0.676	7.257	24.389%
16	0.665	7.339	23.532%
17	0.762	6.683	30.361%
18	0.794	6.497	32.301%
19	0.790	6.520	32.066%
20	0.886	6.026	37.213%
21	0.956	5.719	40.409%
22	1.038	5.405	43.684%
23	1.122	5.123	46.616%
24	1.127	5.109	46.768%

terkena cahaya UV karena terhalang oleh lapisan TiO₂ yang tidak merata pada substrat, atau terhalang lapisan substrat di luarnya. Sedangkan penataan substrat yang dilakukan dengan melilitkan substrat mengelilingi tabung lampu ultraviolet. Hal ini dapat menyebabkan interaksi antara polutan dengan substrat berkurang karena lapisan substrat saling bersentuhan dan hanya berada di bagian tengah tabung, sehingga larutan yang berada di dekat dinding tabung tidak berinteraksi dengan substrat.

Menurut Husna (2018) semakin lama penyinaran yang dilakukan maka akan membuat proses degradasi juga meningkat [22]. Debit atau aliran larutan metilen biru yang terlalu besar tentu akan melewati tabung reaktor lebih cepat, yang artinya interaksi antara sinar foton dengan TiO₂ semakin singkat pula, sehingga *hole* yang bereaksi dengan H₂O untuk membentuk •OH juga semakin sedikit. •OH digunakan untuk mendegradasi zat warna metilen biru menjadi mineralnya, jika •OH yang dihasilkan sedikit, maka proses fotodegradasi semakin lama. Pada penelitian yang dilakukan oleh Assegaf (2021), debit yang digunakan dalam reaktor sebesar 100 ml/d dan menghasilkan fotodegradasi sebesar 34,41% dengan waktu penyinaran sampel selama 24 jam. Sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Rosul (2020) menggunakan debit sebesar 4,4 ml/d dan menghasilkan fotodegradasi sebesar 38,53% dengan waktu penyinaran sampel selama 20 jam. Namun penurunan konsentrasi larutan pada keduanya berbeda karena persentase fotodegradasi menunjukkan perbandingan berapa banyak konsentrasi larutan terdegradasi terhadap konsentrasi awal larutan yang di-*treatment*. Penurunan konsentrasi penelitian Assegaf (2021) dan Rosul (2020) secara berturut-turut adalah sebesar 7,08 ppm dan 4,68 ppm. Pada penelitian ini digunakan waktu penyinaran yang sama (24 jam) namun dengan debit reaktor yang berada di antara 4,4 ml/d dengan 100 ml/d, yakni sebesar 35 ml/d. Mula-mula pengaturan debit pada reaktor yang dibuat sebesar 40 ml/d namun aliran dalam reaktor mengalami aliran vortex yang membuat air dapat meluap dari dalam kotak reaktor dan terdapat gelembung udara di bagian *box* sensor sehingga

Tabel 4.
Data hasil uji tegangan voltmeter larutan metilen biru

Waktu (Jam ke-)	Tegangan (V)	Konsentrasi (ppm)	Persentase
0	0.419	9.899	0.000%
1	0.426	9.787	1.130%
2	0.432	9.694	2.074%
3	0.437	9.618	2.844%
4	0.451	9.412	4.923%
5	0.460	9.285	6.203%
6	0.469	9.162	7.442%
7	0.483	8.979	9.291%
8	0.495	8.830	10.805%
9	0.513	8.616	12.964%
10	0.529	8.436	14.779%
11	0.551	8.204	17.128%
12	0.573	7.986	19.324%
13	0.599	7.747	21.743%
14	0.628	7.500	24.240%
15	0.660	7.248	26.780%
16	0.688	7.045	28.837%
17	0.743	6.682	32.494%
18	0.790	6.407	35.276%
19	0.840	6.143	37.944%
20	0.890	5.904	40.357%
21	0.947	5.658	42.844%
22	1.015	5.395	45.499%
23	1.083	5.160	47.870%
24	1.152	4.946	50.033%

mengganggu pembacaan sensor. Kemudian valve dan kran diatur untuk menurunkan debit reaktor agar aliran air dalam reaktor lebih stabil dan tidak ada gelembung dalam box sensor dan didapatkan debit sebesar 35 ml/d. Dari pengaturan debit reaktor yang digunakan pada penelitian ini didapatkan persentase fotodegradasi sebesar 53,64% dengan konsentrasi larutan terdegradasi 6,08 ppm.

C. Hasil Uji Tegangan Larutan Metilen Biru pada Sistem Sensor Fotodegradasi

Pengujian kedua dan ketiga dari proses fotokatalisis larutan metilen biru pada penelitian ini dilakukan menggunakan sensor fotodiode yang secara *realtime* ditampilkan pada *software* PLX-DAQ dan secara manual dicatat menggunakan voltmeter. Nilai tegangan diambil setiap 1 jam sekali bersamaan dengan pengambilan sampel larutan metilen biru yang akan dilakukan uji absorbansi. Pengambilan data tegangan dilakukan di dalam kotak akrilik kecil yang terhubung dengan reaktor. Sensor fotodiode beserta LED diletakkan di bagian luar akrilik bening, namun tertutup di dalam box yang digunakan untuk menangkis cahaya dari luar. Hal ini dimaksudkan agar tidak ada cahaya lain selain LED yang ditangkap oleh sensor fotodiode karena adanya cahaya lain dapat menyebabkan bias pada sensor fotodiode dan hasilnya menjadi tidak akurat. Hasil uji tegangan dari sistem sensor ditunjukkan Tabel 3 dan Tabel 4.

Dari data yang didapatkan pada Tabel 3 dan Tabel 4 dilakukan perhitungan berdasarkan (4) dan (5), kemudian didapatkan hasil yang ditunjukkan Gambar 11. Konsentrasi larutan metilen biru dari hasil uji tegangan PLX-DAQ mengalami penurunan sebesar 4,49 ppm, yakni dari 9,57 ppm menjadi 5,11 ppm. Sehingga didapatkan persentase fotodegradasi sebesar 46,768%. Sedangkan konsentrasi larutan metilen biru hasil uji tegangan voltmeter mengalami penurunan sebesar 4,95 ppm, yakni dari 9,9 ppm menjadi 4,95 ppm dengan persentase fotodegradasi yang terukur adalah sebesar 50,03%. Pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa nilai tegangan yang dihasilkan lebih stabil jika menggunakan

voltmeter dibandingkan dengan menggunakan *software* PLX-DAQ. Hal ini dapat terjadi pembacaan sinyal menggunakan arduino lebih sensitif dibandingkan dengan voltmeter.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diperoleh adalah sebagai berikut. Pertama, peletakan substrat dengan bentuk lembaran secara seri tegak lurus menghadap lampu ultraviolet dengan pelapisan TiO₂ pada substrat menggunakan metode *spray* diketahui lebih efektif jika dibandingkan dengan peletakan substrat spiral tanpa disusun dan mengelilingi tabung lampu dalam reaktor dengan metode pelapisan TiO₂ oles pada substrat. Hal ini disebabkan proses fotokatalisis dapat terjadi secara merata pada seluruh bagian substrat.

Kedua, pengaturan debit sebesar 35 ml/d pada reaktor larutan metilen biru berpengaruh terhadap tingkat fotodegradasi larutan metilen biru. Debit larutan yang tepat (tidak terlalu cepat maupun lambat) mengoptimalkan fotodegradasi yang terjadi akibat adanya waktu kontak yang cukup antara polutan dengan TiO₂.

Ketiga, hasil pengujian absorbansi larutan metilen biru mengalami penurunan sebanyak 6,08 ppm dari konsentrasi awal sebesar 11,34 ppm dengan penurunan rata-rata konsentrasi setiap jam sebesar 0,25 ppm. Dari hasil tersebut didapatkan persentase fotodegradasi larutan metilen biru sebesar 53,64% dengan rata-rata persentase degradasi setiap jam sebesar 2,24%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. P. Diantariani, I. A. G. Widhiati, and I. G. A. A. R. Megasari, "Fotodegradasi metilen biru dengan sinar ultraviolet dan katalis ZnO," *J. Chem.*, vol. 8, no. 1, pp. 137–143, 2014, doi: 10.24843/JCHEM.2014.v08.i01.p21.
- [2] I. K. Sumerta, K. Wijaya, and I. Tahir, "Fotodegradasi Metilen Biru Menggunakan Katalis TiO₂-Montmorilonit dan Sinar UV," in *Seminar Nasional Pendidikan Kimia, an Kimia FMIPA*, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, 2002, pp. 1–7.
- [3] S. R. D. Astuti, A. R. P. Sari, and Karlinda, "Perbandingan aktivitas reaksi fotodegradasi Remazol Red dengan TiO₂ Anatas 50%-Rutil50% dan TiO₂ Anatas tersupport AgI," *Walisongo J. Chem.*, vol. 4, no. 1, pp. 32–44, 2021, doi: 10.21580/wjc.v4i1.7587.
- [4] S. Budiman, D. Suryasaputra, and D. Ristianti, "Fotodegradasi Zat Warna Tekstil dengan Fotokatalis TiO₂, Al₂O₃ dan H₂O₂," in *Prosiding Seminar Nasional Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK)*, Universitas Jendral Ahmad Yani, Cimahi, 2014, pp. 284–288.
- [5] I. A. G. Widhiati, N. P. Diantariani, and Y. F. Nikmah, "Fotodegradasi metilen biru dengan sinar uv dan katalis Al₂O₃," *J. Chem.*, vol. 5, no. 1, pp. 31–42, 2011.
- [6] N. Hindryawati, *Fotokatalis dalam Pengolahan Limbah Tekstil*. Sleman: Deepublish, 2020.
- [7] K. M. Joshi and V. S. Shrivastava, "Removal of hazardous textile dyes from aqueous solution by using commercial activated carbon with TiO₂ and ZnO as photocatalyst," *Int. J. ChemTech Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 427–435, 2010.
- [8] S. Malato, J. Blanco, A. Vidal, and C. Richter, "Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale: an overview," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 37, no. 1, pp. 1–15, 2002, doi: 10.1016/S0926-3373(01)00315-0.
- [9] G. N. Brown, J. W. Birks, and C. A. Koval, "Development and characterization of a titanium dioxide-based semiconductor photoelectrochemical detector," *Anal. Chem.*, vol. 64, no. 4, pp. 427–434, 1992, doi: 10.1021/ac00028a018.
- [10] B. C. Gates, *Catalytic Chemistry*. New York: Wiley, 1992.
- [11] J. Gunlazuardi, "Fotokatalisis pada Permukaan TiO₂: Aspek Fundamental dan Aplikasinya," in *Seminar Nasional Kimia Fisika II, Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Indonesia, Depok*, 2001, pp. 88–

- 92.
- [12] F. Bere, "Pengaruh Ion Logam Cu (II) Terhadap Efektivitas Fotodegradasi Zat Warna Metilen Biru Terkatalis TiO₂," Departemen Kimia, UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta, 2013.
- [13] E. Palupi, "Degradasi Methylene Blue dengan Metode Fotokatalisis dan Fotoelektrokatalisis Menggunakan Film TiO₂," Departemen Fisika, Institut Pertanian Bogor, 2006.
- [14] Ismunandar, *Padatan Oksida Logam: Struktur, Sintesis dan Sifat-Sifatnya*. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional, 2004.
- [15] Z. Derakhshan, M. A. Baghapour, M. Ranjbar, and M. Faramarzian, "Adsorption of methylene blue dye from aqueous solutions by modified pumice stone: kinetics and equilibrium studies," *Heal. Scope*, vol. 2, no. 3, pp. 136–144, 2013, doi: 10.17795/jhealthscope-12492.
- [16] I. A. W. Tan, A. L. Ahmad, and B. H. Hameed, "Adsorption of basic dye on high-surface-area activated carbon prepared from coconut husk: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies," *J. Hazard. Mater.*, vol. 154, no. 1–3, pp. 337–346, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.10.031.
- [17] H. S. W, *Mudah Belajar Mikrokontroler dengan Arduino*. Bandung: Widya Media, 2015.
- [18] F. Djuandi, *Pengenalan Arduino*. Jakarta: Penerbit Elexmedia, 2011.
- [19] P. Handoko and Y. Fajariyanti, "Pengaruh spektrum cahaya tampak terhadap laju fotosintesis tanaman air *Hydrilla Verticillata*," *Semin. Nas. X Pendidik. Biol. FKIP UNS*, vol. 10, no. 2, pp. 1–9, 2013.
- [20] H. Sastrohamidjojo, *Dasar-Dasar Spektroskopi*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2018.
- [21] C. Assegaf, "Peningkatan Kemampuan Reaktor Fotokatalisis 'Zuiverious' Tipe Seri Bertingkat Dalam Mendegradasi Metilen Biru Dengan Penataan Substrat Tio₂ Melapisi Tabung Lampu UV," Departemen Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2021.
- [22] I. Husna, A. A. Umar, and M. A. Ramli, "Aplikasi sintesis TiO₂ nanopartikel dalam degradasi fotokatalitik metil jingga," *Sainstek J. Sains dan Teknol.*, vol. 10, no. 1, pp. 5–9, 2018.