

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Isolasi Bakteri Endofit dari Akar Tanaman yang Terkontaminasi Limbah Cair Tenun

Limbah cair tenun mengandung konsentrasi polutan yang tinggi yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman dan mempengaruhi remediasi. Untuk mendukung pertumbuhan dan daya tahan hidup tanaman, maka aplikasi gabungan bakteri dan tanaman pendegradasi kontaminan dibutuhkan. Tumbuhan menyediakan nutrisi bagi bakteri dan bakteri membantu inangnya untuk mendapatkan lebih banyak biomassa dengan mengurangi polutan dan mendukung pertumbuhan tanaman (Hussain et al, 2018).

Bakteri endofit telah menerima banyak perhatian dalam konteks fitoremediasi karena dapat mengembangkan hubungan yang erat dengan tanaman inangnya dibandingkan dengan rhizobakter (Hussain et al, 2018). Bakteri endofit merupakan bakteri yang mendiami endosfer tanaman selama seluruh atau sebagian siklus hidupnya tanpa menyebabkan kerusakan nyata pada tanaman inang (Kandel et al, 2017).


Dalam penelitian ini, bakteri endofit diisolasi dari 4 sampel akar tanaman yang terkontaminasi limbah cair tenun di desa Troso. Tanaman yang diambil adalah padi (*Oryza sativa*), talas (*Colocasia esculenta*), rumput jariji (*Digitaria sanguinalis*), dan kremah air (*Alternanthera philoxeroides*). Isolasi menggunakan teknik *pour plate* pada media *Nutrient Agar* (NA) dan *Tryptic Soy Agar* (TSA) yang telah ditambah limbah cair tenun 7% sebagai media selektif untuk mendapatkan bakteri yang memiliki potensi mendegradasi limbah tersebut. Berikut ini adalah hasil dari isolasi bakteri endofit setelah diinkubasi selama 24 jam:

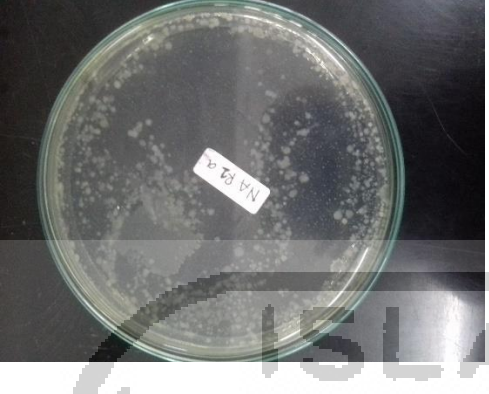

Tabel 4.1 Hasil Isolasi Bakteri Endofit

Media Isolasi	Sumber Akar Tanaman	Kode Cawan	Keterangan
NA	<i>Oryza sativa</i>	NA R1	Tumbuh bakteri
	<i>Colocasia esculenta</i>	NA R2	Tumbuh bakteri
	<i>Digitaria sanguinalis</i>	NA R3	Tidak tumbuh bakteri
	<i>Alternanthera philoxeroides</i>	NA R4	Tumbuh bakteri
TSA	<i>Oryza sativa</i>	TSA R1	Tumbuh bakteri
	<i>Colocasia esculenta</i>	TSA R2	Tumbuh bakteri
	<i>Digitaria sanguinalis</i>	TSA R3	Tumbuh bakteri
	<i>Alternanthera philoxeroides</i>	TSA R4	Tumbuh bakteri

Setelah bakteri tumbuh, selanjutnya bakteri dikulturisasi untuk memperbanyak kultur bakteri dan bisa diinokulasikan pada FTW untuk mendukung tanaman dalam mendegradasi limbah cair tenun. Kultur bakteri yang diinokulasikan pada FTW adalah kultur NA R1, NA R2, dan NA R4. Berikut ini adalah ciri-ciri morfologi bakteri yang dipilih untuk diinokulasikan pada tanaman:

Tabel 4.2 Ciri-ciri Morfologi pada Koloni Bakteri Terpilih

Koloni	Keterangan
NA R1 c 	Koloni 1 <ul style="list-style-type: none"> • Berbentuk lingkaran • Elevasi koloni <i>convex</i> • Tidak transparan • Berwarna putih Koloni 2 <ul style="list-style-type: none"> • Berbentuk <i>filamentous</i> • Elevasi koloni <i>raised</i> • Tidak transparan • Berwarna putih Koloni 3 <ul style="list-style-type: none"> • Bentuk <i>irregular</i> • Elevasi koloni <i>raised</i> • Tidak transparan • Berwarna putih
NA R2 a	Secara keseluruhan koloni hampir serupa <ul style="list-style-type: none"> • Berbentuk lingkaran • Elevasi koloni <i>raised</i>

	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak transparan • Berwarna light yellow
<p>NA R4 a</p> 	<p>Koloni 1</p> <ul style="list-style-type: none"> • Berbentuk lingkaran • Elevasi koloni <i>flat</i> • Transparan • Berwarna putih susu <p>Koloni 2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Berbentuk <i>rhizoid</i> • Elevasi koloni <i>raised</i> • Tidak transparan • Berwarna <i>buff pigment</i> <p>Koloni 3</p> <ul style="list-style-type: none"> • Berbentuk <i>filamentous</i> • Transparan • Elevasi koloni <i>flat</i> • Berwarna putih susu <p>Koloni 4</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bentuk <i>irregular</i> • Elevasi koloni <i>raised</i> • Tidak transparan • Berwana putih

Isolasi dan karakterisasi dari bakteri endofit pendegradasi polutan dianggap penting untuk meningkatkan efisiensi sistem fitoremediasi (Shehzadi et al, 2016). Namun pada penelitian ini tidak dilakukan identifikasi bakteri lanjutan dan langsung diuji pada bak FTW sehingga tidak diketahui jenis bakteri yang diperoleh.

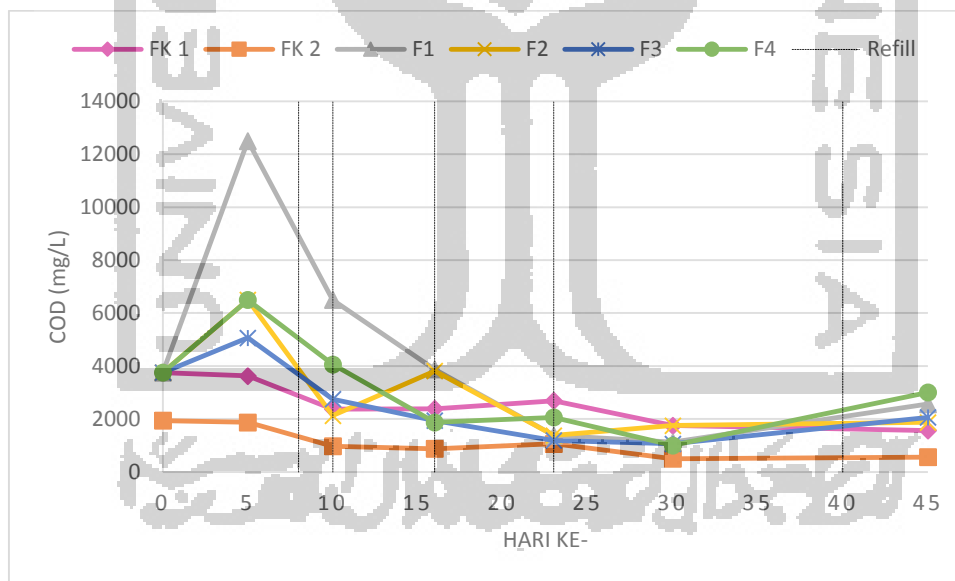
4.2 Kemampuan *Floating Treatment Wetland* dalam Mengolah Limbah

Pengolahan limbah cair tenun oleh FTW dilakukan dengan waktu detensi selama 45 hari dengan sistem *batch*. Pada penelitian sebelumnya, konsentrasi limbah pewarna batik memiliki konsentrasi COD 3855 mg/L, TSS 1180 mg/L, dan

warna 152,83 Pt-Co. Pada rentang tersebut, tingkat konsentrasi air limbah pewarna mempengaruhi tingkat efek kematian tanaman. Pada tingkat konsentrasi limbah 10% dan 20% tidak memiliki efek kematian tanaman, sedangkan pada konsentrasi limbah 30%, 40%, dan 50% memiliki tingkat efek kematian berturut-turut sebesar 25%, 50%, dan 87,5% (Ningsih, 2017). Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan air limbah yang diolah adalah limbah cair tenun dengan konsentrasi 25%. Reaktor FTW dibuat sebanyak 6 kombinasi (Tabel 3.2); 4 reaktor kombinasi tanaman vetiver dengan bakteri dan 2 reaktor kontrol. Jadwal sampling untuk uji parameter dan pengisian kembali air limbah pada reaktor FTW dapat dilihat pada Tabel 3.3.

4.2.1 Kemampuan Penurunan *Chemical Oxygen Demand* (COD)

Konsentrasi COD mengalami penurunan dan ada beberapa kenaikan, tetapi kinerja FTW dalam mengolah COD memiliki tren penurunan konsentrasi selama pengolahan (gambar 4.1).



Keterangan:

FK 1 : Kontrol

FK 2 : Kontrol tanaman

F1 : Tanaman + bakteri R1

F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

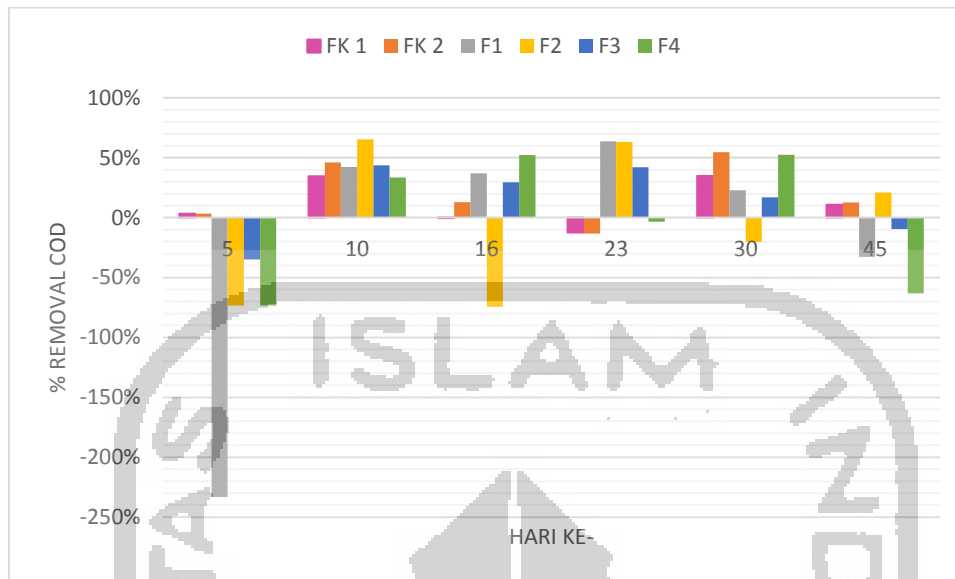
F4 : Tanaman + bakteri mix R1, R2, dan R4

Gambar 4.1 Hasil Konsentrasi COD selama Pengolahan

Konsentrasi COD pada limbah cair tenun 25% sebelum pengolahan adalah 3750 mg/L (reaktor FK1, F1, F2, F3, F4) dan 1937,5 mg/L (reaktor FK 2). Pada

reaktor kontrol tanaman (FK 2) memiliki konsentrasi COD yang lebih rendah dari reaktor yang lain yaitu dengan konsentrasi awal 1937,5 mg/L, karena pengujian reaktor FK 2 dilakukan di waktu yang berbeda, tetapi reaktor FK 2 diberi perlakuan yang sama dengan reaktor yang lain seperti jumlah refill dan waktu sampling yang sama. Selain itu, pengambilan limbah cair dari tempat pewarnaan industri tenun dilakukan pada waktu yang berbeda sehingga konsentrasinya berbeda dan setelah diuji memiliki konsentrasi yang lebih rendah dari sebelumnya.

Pada 5 hari pertama, konsentrasi COD mengalami kenaikan hampir pada semua reaktor yaitu pada reaktor F1, F2, F3, dan F4 dengan konsentrasi awal 3750 mg/L dan pada hari ke 5 masing-masing reaktor berubah menjadi 12500 mg/L; 6500 mg/L; 5062,5 mg/L; dan 6500 mg/L. Hal ini dikarenakan bakteri dan aktivitas kimia sangat aktif sehingga kebutuhan oksigen naik untuk menguraikan zat organik (Dewi dkk, 2016). Sedangkan untuk reaktor kontrol FK 1 dan FK 2 mengalami penurunan sebesar 3%, FK 1 dengan konsentrasi awal COD 3750 mg/L menjadi 3625 mg/L dan FK 2 dengan konsentrasi awal COD 1937,5 mg/L menjadi 1875%. Hal ini menunjukkan bahwa bakteri endofit membutuhkan waktu penyesuaian dalam mengolah COD dan dapat dilihat hari ke 10 konsentrasi mengalami tren penurunan meskipun ada beberapa reaktor FTW yang mengalami kenaikan dan penurunan COD. Hal ini karena faktor penambahan kembali limbah cair pada reaktor FTW.



Keterangan:

FK 1 : Kontrol

FK 2 : Kontrol tanaman

F1 : Tanaman + bakteri R1

F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix R1, R2, dan R4

Gambar 4.2 Efisiensi Removal COD

Reaktor kontrol FK 1 (tanpa tanaman) mengalami penurunan konsentrasi COD dengan efisiensi penurunan terbesarnya adalah 35% yang terjadi pada hari ke 30. Reaktor FK 1 memiliki konsentrasi awal 3750 mg/L dan setelah 45 hari dapat menurun menjadi 1562,5 mg/L, hal ini dikarenakan senyawa organik mudah terurai yang diasosiasikan dengan padatan tersuspensi yang dapat mengendap lebih banyak daripada yang terlarut. Pada umumnya 60% dari padatan tersuspensi dalam air limbah adalah padatan yang dapat mengendap (Metcalf and Eddy, 2003). Pada reaktor ini tidak ada penambahan kembali limbah cair sehingga jika dilihat dari jumlah limbah yang diolah dapat disimpulkan bahwa konsentrasi COD pada limbah cair tenun dapat menurun tetapi dengan efisiensi yang kecil dan dalam jangka waktu yang lama.

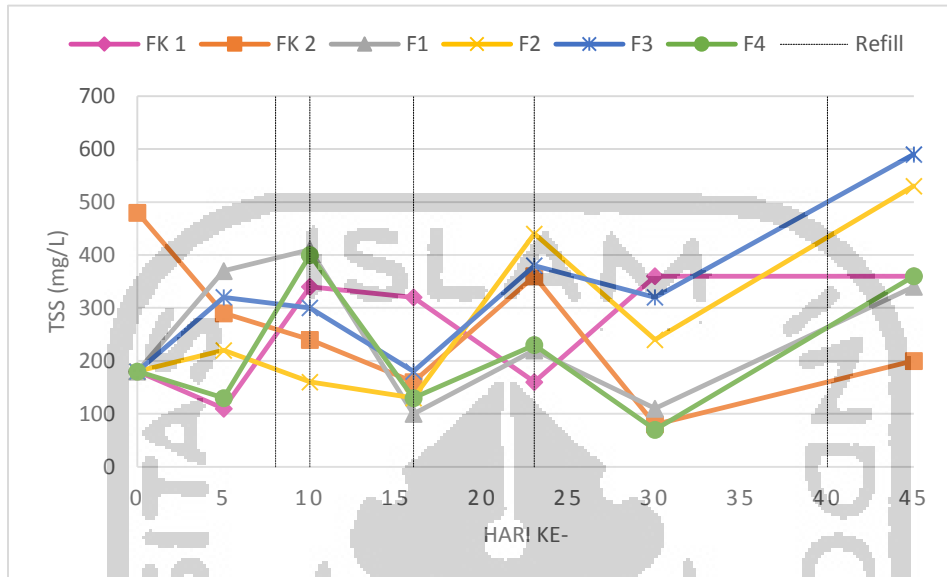
Reaktor kontrol tanaman FK 2 juga mengalami penurunan konsentrasi, efisiensi penurunan yang diperoleh yaitu 46% pada hari ke 10 dan efisiensi terbesarnya adalah 55% yang terjadi pada hari ke 30. Bak FK 2 dapat mereduksi COD dengan konsentrasi awal pengolahan adalah 1937,5 mg/L dan pada akhir pengolahan adalah 562,5 mg/L.

Efisiensi penurunan COD terbesar terjadi pada reaktor F2 dengan efisiensi penurunan mencapai 65% pada hari ke 10. Pada reaktor F2, konsentrasi COD dapat menurun dari 3750 mg/L menjadi 1875 mg/L di akhir pengolahan. Kinerja reaktor F1 juga hampir sama dengan reaktor F2 dengan efisiensi terbesarnya adalah 64% dan konsentrasi COD pada akhir pengolahan adalah 2562,5 mg/L. Pada reaktor F3 memiliki efisiensi terbesarnya adalah 44% dengan menurunkan konsentrasi menjadi 2062,5% pada akhir pengolahan dan pada reaktor F4 sebesar 52% dengan konsentrasi pada akhir pengolahan yaitu 3000 mg/L.

Penurunan COD dialami pada semua reaktor, tetapi efisiensi penurunan pada reaktor yang diinokulasikan bakteri lebih besar daripada reaktor yang tidak diinokulasikan bakteri. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya seperti yang dilakukan oleh Tara et al dan Hussain et al. Hasil dari konsentrasi COD selama pengolahan masih melebihi baku mutu dengan kadar maksimum COD yang diperbolehkan adalah 150 mg/L menurut Peraturan Daerah Jawa Tengah No. 5 Tahun 2012 mengenai baku mutu air limbah untuk kegiatan industri tekstil dan batik.

Banyak penelitian mengungkapkan bahwa bakteri endofit mampu mendegradasi polutan organik yang ada di lingkungan akuatik dan terestrial (Shehzadi, 2016). Studi sebelumnya juga menunjukkan pengurangan polutan air limbah tekstil yang tinggi ketika tanaman dan bakteri bekerja secara sinergis. Pengurangan ini bisa disebabkan oleh aktifitas enzimatik gabungan dari bakteri dan tanaman untuk mengubah bahan organik menjadi metabolit sederhana. Polutan organik ini mudah diambil oleh tanaman sebagai bagian dari proses asimilasi nutrisi atau dihilangkan dari sistem dalam bentuk gas; CO₂ dan NO₂ (Tara et al, 2019). Mikroorganisme memiliki peran yang sangat penting dalam penghilangan bahan organik yang penguraiannya membutuhkan oksigen. Oksigen tersebut mengalir ke akar melalui batang setelah berdifusi dari atmosfer melalui pori-pori daun (Vymazal, 2008).

4.2.2 Kemampuan Penurunan *Total Suspended Solid (TSS)*



Keterangan:

FK 1 : Kontrol

FK 2 : Kontrol tanaman

F1 : Tanaman + bakteri R1

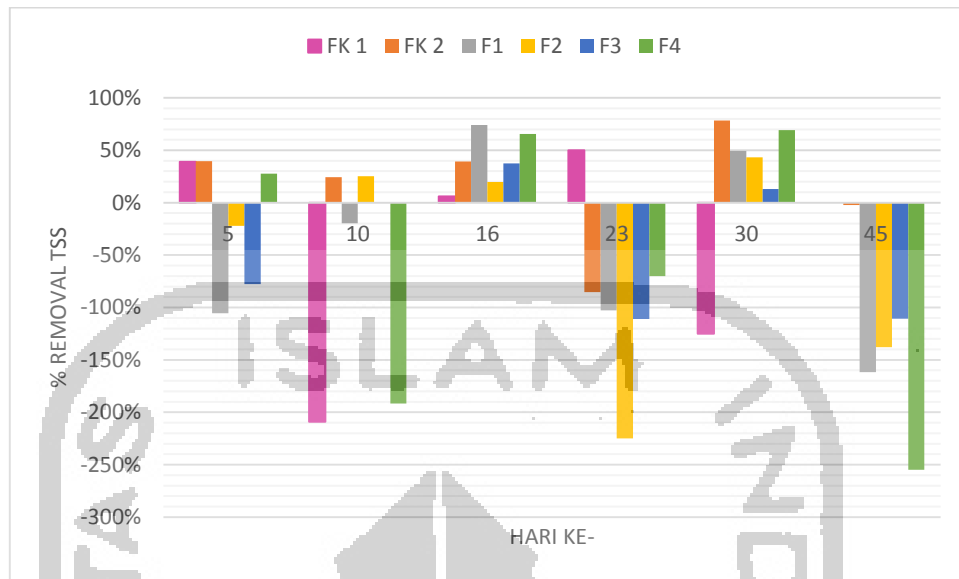
F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix R1, R2, dan R4

Gambar 4.3 Hasil Konsentrasi TSS selama Pengolahan

Secara keseluruhan, konsentrasi TSS mengalami kenaikan dan penurunan dengan konsentrasi awal 180 mg/L (reaktor FK1, F1, F2, F3, F4) dan 480 mg/L (reaktor FK 2). Perbedaan konsentrasi awal dikarenakan perbedaan waktu pengujian dan perbedaan pengambilan sampel limbah cair. Grafik di bawah ini menunjukkan bahwa kinerja FTW tidak signifikan dalam menurunkan kadar TSS. Selain itu juga faktor penambahan air limbah yang menyebabkan beban pengolahan bertambah.



Keterangan:

FK 1 : Kontrol

FK 2 : Kontrol tanaman

F1 : Tanaman + bakteri R1

F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix R1, R2, dan R4

Gambar 4.4 Efisiensi Removal TSS

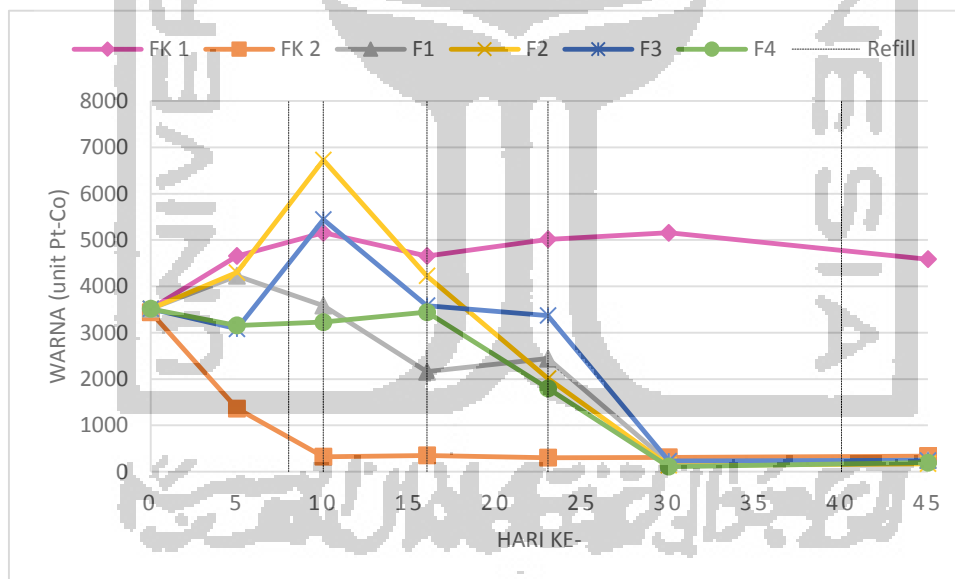
Semua reaktor mengalami penurunan konsentrasi TSS di beberapa waktu tetapi tidak konsisten. Pada reaktor kontrol tanpa tanaman FK 1 mengalami penurunan pada hari ke 5 dengan efisiensi 39% yaitu dari konsentrasi TSS 180 mg/L menjadi 110 mg/L, sedangkan penurunan terbesar terjadi pada hari ke 23 yaitu efisiensi sebesar 50% dengan konsentrasi 160 mg/L. reaktor FK 1 dapat menurunkan TSS yang disebabkan oleh beban pengolahan lebih kecil dari bak yang lain karena tidak adanya penambahan kembali limbah cair pada bak tersebut.

Untuk reaktor kontrol tanaman (FK 2) efisiensi penurunan terbesarnya yaitu pada hari ke 30 dengan efisiensi 78% dan konsentrasi sebesar 80 mg/L dan ini merupakan efisiensi penurunan TSS terbesar dari semua bak FTW. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa efisiensi penurunan TSS oleh tanaman vetiver yaitu sebesar 71% hingga 95% (Darajeh et al, 2019). Pada reaktor F1 juga memiliki efisiensi terbesar yang hampir sama dengan reaktor FK 2 yaitu sebesar 74% pada hari ke 16 dengan konsentrasi 100 mg/L, tetapi penurunan tidak konsisten yakni penurunan hanya terjadi pada hari ke 16 dan 30 saja. Efisiensi penurunan TSS pada reaktor F2 dan F3 kurang baik dengan efisiensi terbesar yang dicapai oleh reaktor

F2 sebesar 43% pada hari ke 30 dengan konsentrasi 240 mg/L dan reaktor F3 sebesar 38% pada hari ke 16 dengan konsentrasi 180 mg/L. Sedangkan untuk reaktor F4 memiliki efisiensi terbesarnya pada hari ke 30 yaitu sebesar 69% dengan konsentrasi 70 mg/L.

Penelitian ini sesuai dengan penelitian sebelumnya bahwa tanaman yang diinokulasi dengan bakteri juga menurunkan konsentrasi TSS (Tara et al, 2019). Selain itu, pada reaktor FTW juga terdapat partikel yang mengendap seperti studi sebelumnya yang melaporkan bahwa penurunan TSS terjadi karena pengendapan padatan tersuspensi (Tara et al, 2018). Hasil dari konsentrasi TSS selama pengolahan masih melebihi baku mutu dengan kadar maksimum TSS yang diperbolehkan menurut Peraturan Daerah Jawa Tengah No. 5 Tahun 2012 mengenai baku mutu air limbah untuk kegiatan industri tekstil dan batik adalah 50 mg/L.

4.2.3 Kemampuan Penurunan Warna



Keterangan:

FK 1 : Kontrol

FK 2 : Kontrol tanaman

F1 : Tanaman + bakteri R1

F2 : Tanaman + bakteri R2

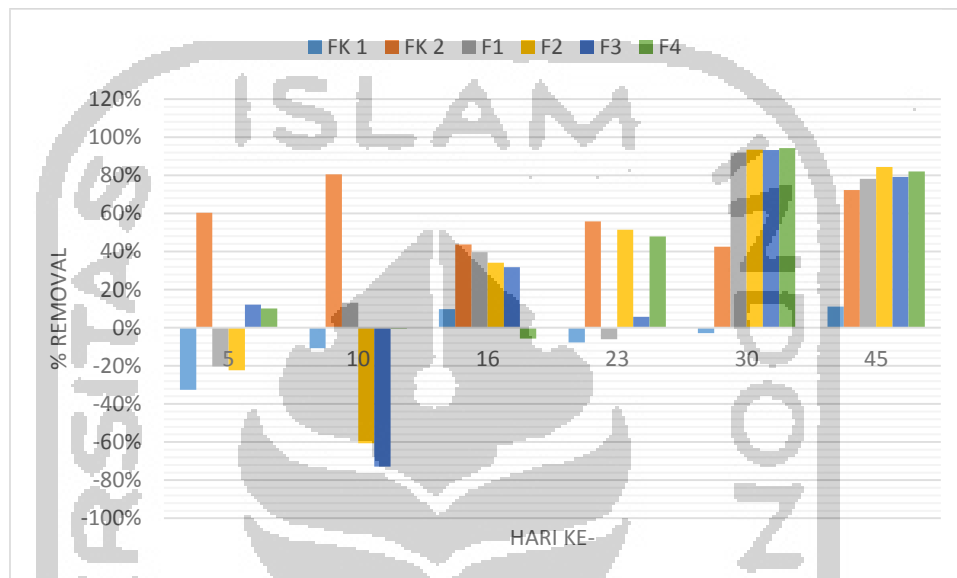
F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix R1, R2, dan R4

Gambar 4.5 Hasil Konsentrasi Warna selama Pengolahan

Pengujian zat warna menunjukkan konsentrasi awal 3514,29 unit Pt-Co (reaktor FK 1, F1, F2, F3, dan F4) dan 3442,86 unit Pt-Co (reaktor FK 2). Hasil

pengujian zat warna terjadi penurunan yang signifikan selama pengolahan. Secara keseluruhan reaktor FTW kombinasi tanaman dan bakteri (F1, F2, F3, dan F4) memiliki kinerja yang baik dalam menurunkan zat warna, namun reaktor kontrol tanaman FK 2 juga memiliki penurunan konsentrasi warna.



Keterangan:

FK 1 : Kontrol

FK 2 : Kontrol tanaman

F1 : Tanaman + bakteri R1

F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix R1, R2, dan R4

Gambar 4.6 Efisiensi Removal Warna

Hasil data yang diperoleh pada hari ke 5 dan hari ke 10 menunjukkan bahwa efisiensi penurunan warna pada reaktor tanaman yang diinokulasikan bakteri (F1, F2, F3, dan F4) tidak signifikan. Kinerja bakteri dalam penurunan konsentrasi warna menunjukkan setelah hari ke, 10 pada hari ke 16 terlihat penurunan konsentrasi warna mulai signifikan, seperti pada reaktor F1 mengalami efisiensi penurunan terbesarnya adalah 92% dengan konsentrasi warna 201,43 unit Pt-Co, efisiensi reaktor F2 sebesar 93% dengan konsentrasi warna 137,14 unit Pt-Co, efisiensi reaktor F3 sebesar 93% dengan konsentrasi warna 230 unit Pt-Co, dan efisiensi reaktor F4 sebesar 94% dengan konsentrasi warna 108,57 unit Pt-Co. Dalam studi lain, kombinasi tanaman dengan bakteri menunjukkan potensi besar untuk menghilangkan zat warna. Hal ini karena aktivitas enzimatis dari tanaman dan bakteri untuk mengubah zat warna menjadi metabolit sederhana (Tara et al,

2018). Selain itu, pada hari ke 30 terlihat bahwa padatan tersuspensi yang mengendap sehingga terjadi penurunan konsentrasi zat warna yang signifikan.

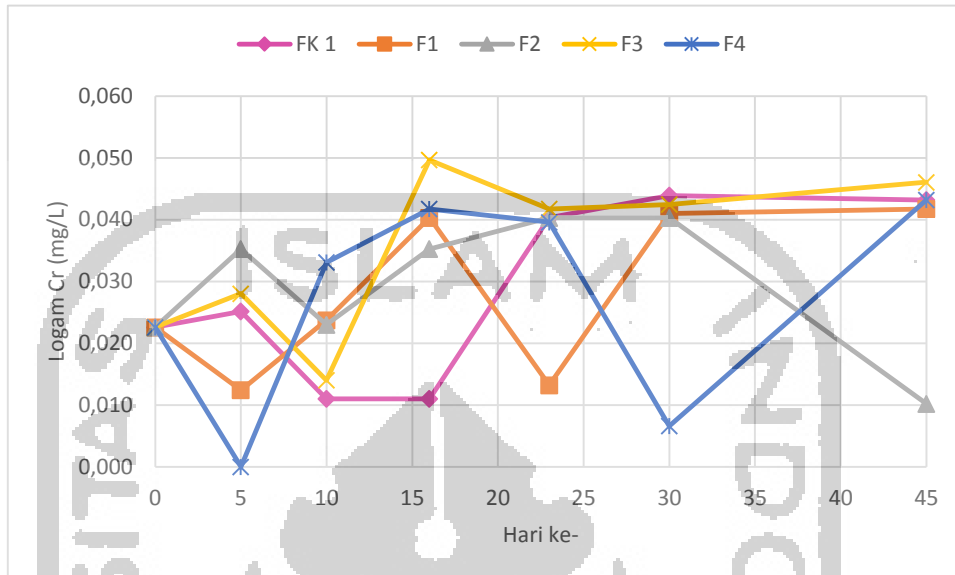
FK 2 juga bisa menurunkan konsentrasi warna lebih konsisten meskipun tidak ada inokulasi bakteri. Efisiensi penurunan warna terbesar pada reaktor FK 2 mencapai 81% pada hari ke 10 dan pada akhir pengolahan efisiensinya mencapai 72% dengan konsentrasi akhir 337,14 mg/L. Hal ini serupa dengan penelitian dari penelitian Diah Wahyu et al, efisiensi penurunan konsentrasi warna menggunakan sistem seperti FTW dengan tanaman eceng gondok (tanpa ada penambahan bakteri) mencapai 93,15%. Tetapi jika dilihat secara fisik, reaktor FK 2 mengalami pengendapan padatan tersuspensi yang lebih banyak dibandingkan dengan bak yang lain sehingga warna air limbah menjadi lebih bening.

Untuk reaktor kontrol tanpa tanaman (FK 1) tidak mengalami penurunan yang signifikan dan terdapat beberapa kenaikan konsentrasi pada beberapa waktu. Efisiensi penurunan zat warna terbesarnya adalah sebesar 11% dengan konsentrasi akhir pengolahan adalah 4585,71 unit Pt-Co.

Dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.16 Tahun 2019, baku mutu warna air limbah dalam kegiatan industri tekstil adalah 200 Pt-Co. Sehingga dari hasil yang diperoleh, reaktor yang memenuhi baku mutu adalah reaktor F2 dengan hasil 172,86 Pt-Co dan F4 194,29 Pt-Co. Sedangkan reaktor yang melebihi dari baku mutu adalah bak FK1 sebesar 4585,71 Pt-Co; FK2 337,14 Pt-Co; F1 251,43 Pt-Co; dan F3 244,29 Pt-Co.

Hasil konsentrasi warna dari pengolahan ini dapat disimpulkan bahwa reaktor kontrol dapat mengalami penurunan tetapi efisiensinya kecil. Untuk reaktor tanaman yang diinokulasi dengan bakteri memiliki efisiensi yang lebih besar dari pada reaktor tanaman yang tidak diinokulasi dengan bakteri, hal ini serupa pada penelitian sebelumnya (Tara et al, 2018; Hussain et al, 2018).

4.2.4 Kemampuan Pengolahan Logam Berat



Keterangan:

FK 1: Kontrol

F1 : Tanaman + bakteri R1

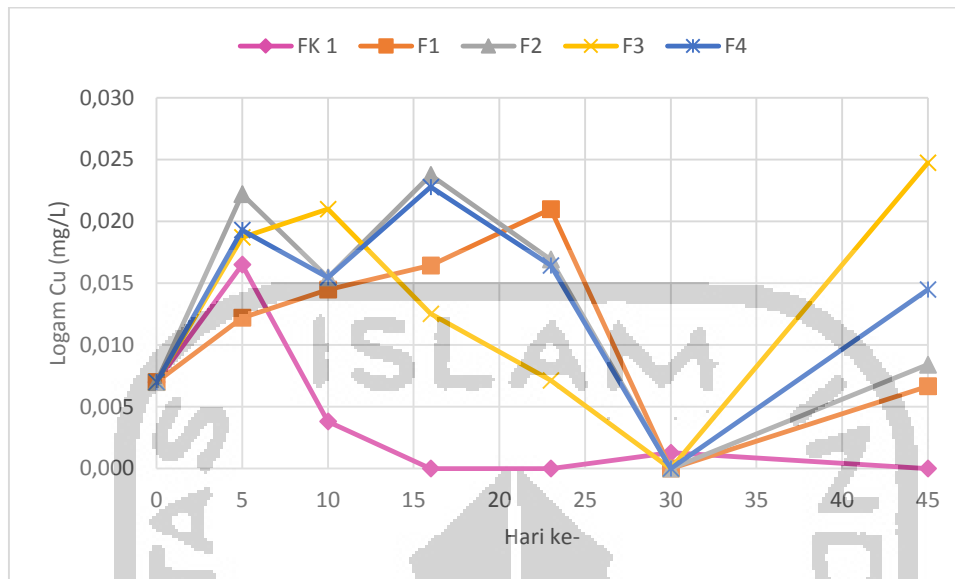
F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix R1, R2, dan R4

Gambar 4.7 Konsentrasi Logam Cr selama Pengolahan

Pada gambar 4.7 menunjukkan hasil konsentrasi logam Cr selama pengolahan. Logam Cr menunjukkan hasil yang fluktuatif. Konsentrasi awal logam Cr dari limbah 25% adalah 0,023 mg/L. Hasil konsentrasi yang berfluktuasi dan semakin meningkat diakibatkan oleh penambahan kembali air limbah pada bak FTW. Hasil konsentrasi akhir pada reaktor FK1, F1, F2, F3, dan F4 berturut-turut adalah 0,043 mg/L; 0,042 mg/L; 0,010 mg/L; 0,046 mg/L; dan 0,043 mg/L. Hasil tersebut masih dibawah baku mutu dari Peraturan Daerah Jawa Tengah No. 5 Tahun 2012 tentang Baku Mutu Air Limbah Industri Tekstil dan Batik yaitu dengan kadar maksimum sebesar 1 mg/L.



Keterangan:

FK 1: Kontrol

F1 : Tanaman + bakteri R1

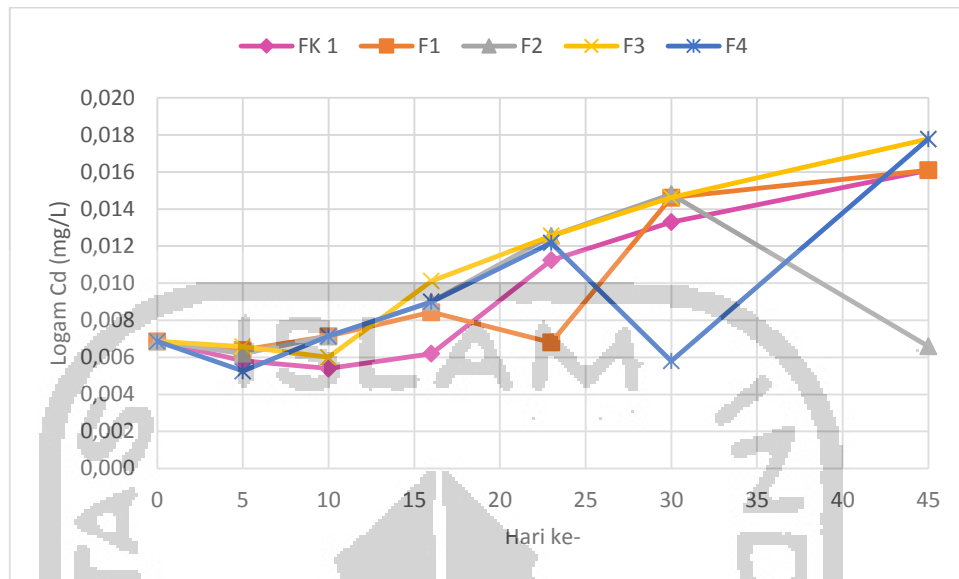
F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix R1, R2, dan R4

Gambar 4.8 Konsentrasi Logam Cu selama Pengolahan

Pada gambar 4.8 menunjukkan hasil konsentrasi logam Cu selama pengolahan. Logam Cu menunjukkan hasil yang fluktuatif. Konsentrasi awal logam Cu dari limbah 25% adalah 0,007 mg/L. Hasil konsentrasi yang berfluktuasi dan terjadi peningkatan diakibatkan oleh penambahan kembali air limbah pada reaktor FTW. Pada hari ke 30, hasil konsentrasi untuk reaktor F1, F2, F3, dan F4 tidak terbaca oleh karena itu hasil yang diperoleh kurang dari *limit of detection* yaitu $<0,0002$. Hasil konsentrasi akhir pada reaktor FK1, F1, F2, F3, dan F4 berturut-turut adalah $<0,0002$ mg/L; 0,007 mg/L; 0,008 mg/L; 0,025 mg/L; dan 0,014 mg/L. Hasil tersebut masih di bawah baku mutu dari Peraturan Pemerintah No. 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air (Kelas IV) yaitu dengan kadar maksimum sebesar 0,2 mg/L.



Keterangan:

FK 1: Kontrol

F1 : Tanaman + bakteri R1

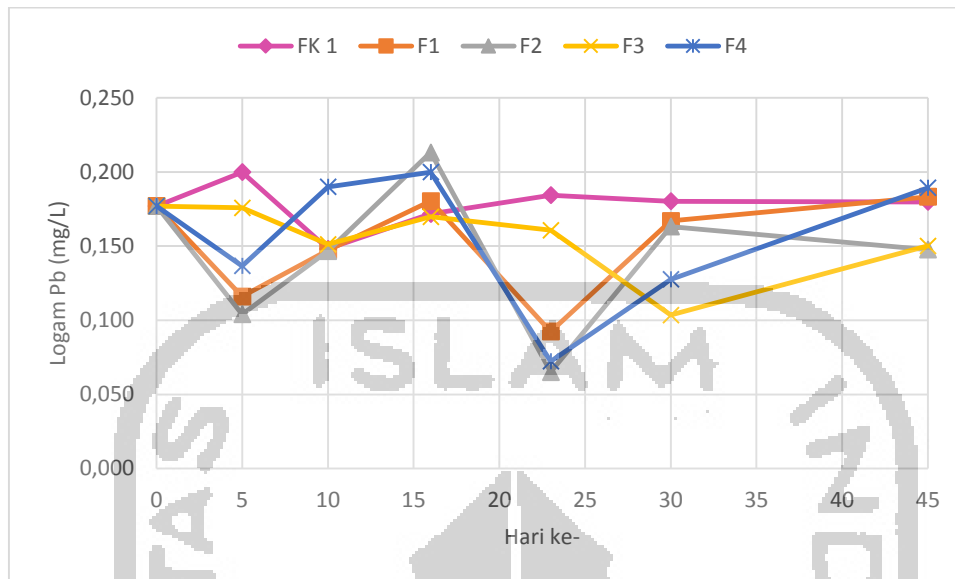
F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix R1, R2, dan R4

Gambar 4.9 Konsentrasi Logam Cd selama Pengolahan

Pada gambar 4.9 menunjukkan hasil konsentrasi logam Cd selama pengolahan. Konsentrasi awal logam Cd dari limbah 25% adalah 0,007 mg/L. Hasil konsentrasi yang berfluktuasi dan semakin meningkat diakibatkan oleh penambahan kembali air limbah pada reaktor FTW sehingga beban pengolahan logam berat semakin meningkat. Hasil konsentrasi akhir pada reaktor FK1, F1, F2, F3, dan F4 berturut-turut adalah 0,016 mg/L; 0,016 mg/L; 0,007 mg/L; 0,018 mg/L; dan 0,018 mg/L. Hasil tersebut masih melebihi baku mutu (kecuali reaktor F2) dari Peraturan Pemerintah No. 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air (Kelas IV) yaitu dengan kadar maksimum sebesar 0,01 mg/L.



Keterangan:

FK 1: Kontrol

F1 : Tanaman + bakteri R1

F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix R1, R2, dan R4

Gambar 4.10 Konsentrasi Logam Pb selama Pengolahan

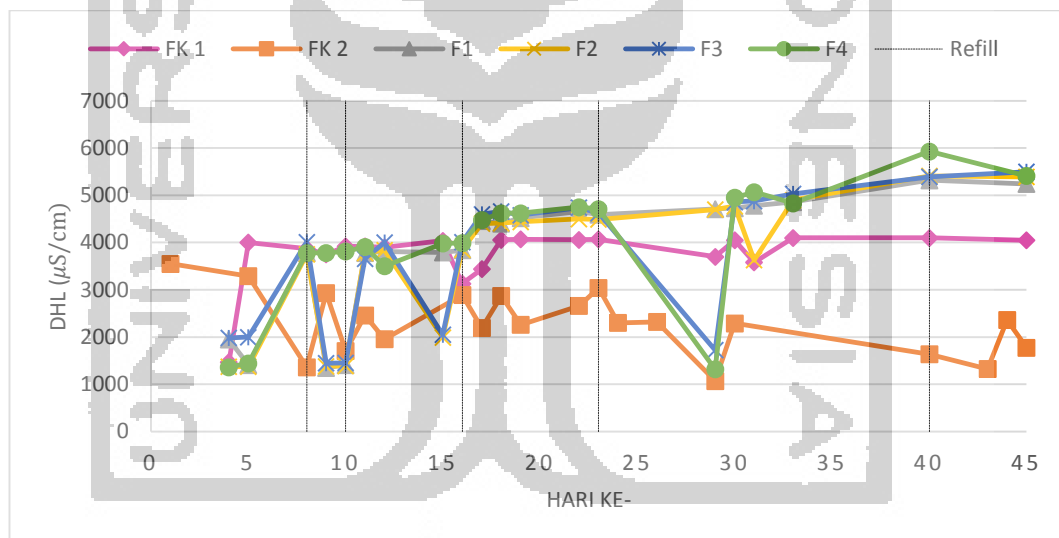
Pada gambar 4.10 menunjukkan hasil konsentrasi logam Pb selama pengolahan. Konsentrasi awal logam Pb dari limbah 25% adalah 0,177 mg/L. Hasil konsentrasi yang berfluktuasi dan semakin meningkat diakibatkan oleh penambahan kembali air limbah pada reaktor FTW sehingga beban pengolahan logam berat semakin meningkat. Pada hari ke 23 terdapat penurunan konsentrasi logam dari reaktor F1, F2, F3, dan F4. Hal ini menunjukkan bahwa reaktor FTW yang diinokulasi dengan tanaman dapat mereduksi logam Pb. Sedangkan untuk reaktor kontrol FK 1 memiliki hasil konsentrasi logam yang stagnan karena pada reaktor ini tidak ada penambahan kembali air limbah sehingga beban pengolahan tidak bertambah. Hasil konsentrasi akhir pada reaktor FK1, F1, F2, F3, dan F4 berturut-turut adalah 0,180 mg/L; 0,183 mg/L; 0,148 mg/L; 0,150 mg/L; dan 0,189 mg/L. Hasil tersebut masih di bawah baku mutu dari Peraturan Pemerintah No. 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air (Kelas IV) yaitu dengan kadar maksimum sebesar 1 mg/L.

4.3 Karakteristik Parameter Fisik pada Air Limbah pada FTW

Parameter fisik yang diuji pada pengolahan air limbah tenun dengan sistem FTW ini adalah daya hantar listrik (DHL), *Total Dissolved Solid* (TDS), suhu, dan pH. Parameter ini diuji setiap hari selama proses pengolahan.

4.3.1 Daya Hantar Listrik (DHL)

Daya hantar listrik (DHL) atau *electrical conductivity* (EC) menunjukkan gambaran numerik dari kemampuan air untuk menghantarkan aliran listrik berdasarkan banyaknya garam terlarut yang terionisasi (APHA, 1976). Konduktivitas berkaitan langsung dengan konsentrasi ion dalam air. Ion konduktif ini berasal dari garam terlarut dan bahan anorganik seperti alkali, klorida, sulfida, dan senyawa karbonat (Miller et al, 1988).



Keterangan:

FK 1 : Kontrol

FK 2 : Kontrol tanaman

F1 : Tanaman + bakteri R1

F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix R1, R2, dan R4

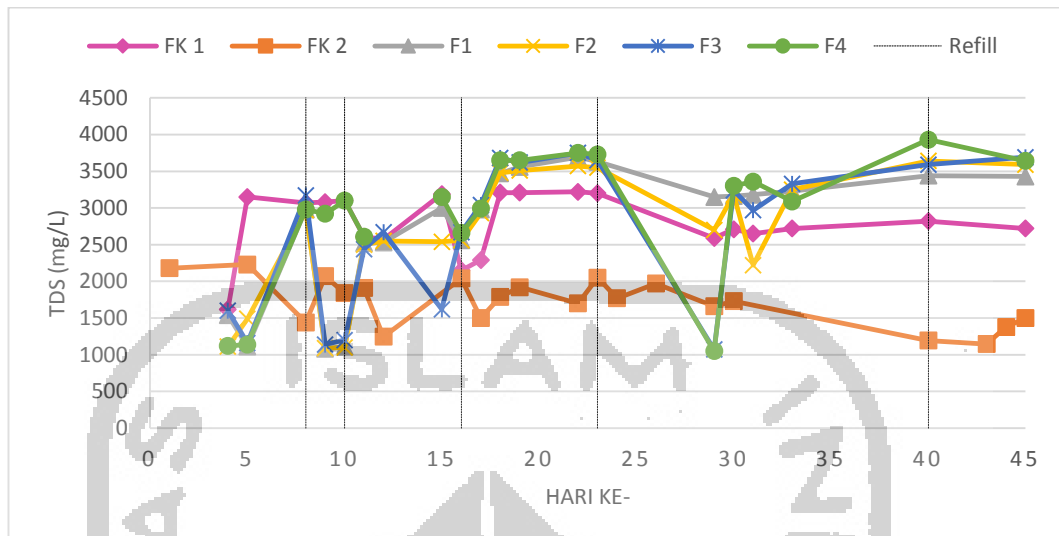
Gambar 4.11 Hasil Pengukuran Daya Hantar Listrik selama Pengolahan

Grafik hasil pengukuran DHL sangat berfluktuasi karena adanya penambahan limbah pada beberapa waktu ke reaktor FTW. Meskipun pada beberapa data banyak yang mengalami kenaikan nilai DHL, tetapi ada beberapa data yang mengalami penurunan.

Semakin banyak ion yang hadir, semakin tinggi konduktivitas air. Demikian juga, semakin sedikit ion yang ada di dalam air, semakin sedikit nilai konduktivitasnya. Peningkatan atau penurunan konduktivitas yang tiba-tiba dalam badan air dapat mengindikasikan polusi. Pencemaran air limbah akan meningkatkan konduktivitas karena adanya penambahan ion klorida, fosfat, dan nitrat (EPA, 2012). Hal ini sejalan dengan data yang diperoleh pada penelitian ini seperti pada hari ke 5, hasil uji DHL berturut-turut reaktor F1, F2, F3, F4 adalah 1408, 1373, 2000, 1442 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dan setelah adanya penambahan limbah cair ke dalam reaktor pada hari ke 8, nilai DHL mengalami kenaikan menjadi 3780, 3750, 4010, dan 3780 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Kemudian pada hari ke 10 setelah pengolahan, ada beberapa reaktor yang mengalami penurunan seperti pada reaktor F1, F2, F3 dengan nilai DHL berturut-turut yaitu 1409, 1389, 1452 $\mu\text{S}/\text{cm}$, namun pada reaktor F4 mengalami kenaikan dari 3780 $\mu\text{S}/\text{cm}$ menjadi 3810 $\mu\text{S}/\text{cm}$, hal ini menunjukkan bahwa pada waktu tersebut reaktor F4 memiliki kinerja yang kurang baik dalam mengolah limbah cair tenun. Selain itu, pada reaktor kontrol tanaman FK 2 juga mengalami penurunan dari 3550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pada awal pengolahan menjadi 1776 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pada akhir pengolahan. Sedangkan pada reaktor kontrol tanpa tanaman (FK 1), konsentrasi DHL cenderung stabil karena tidak adanya pengolahan dan penambahan limbah cair. Dapat dilihat dari data bahwa konsentrasi DHL pada hari ke 5, 23, 45 berturut-turut adalah 4000, 4070, dan 4050 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

4.3.2 Total Dissolved Solid (TDS)

Total dissolved solid (TDS) merupakan jumlah semua partikel ion yang lebih kecil dari 2 mikron (0,0002 cm), termasuk semua elektrolit yang dipisahkan yang membentuk konsentrasi salinitas, serta senyawa lain seperti bahan organik terlarut (Thompson, 2006). Dalam penelitian terdahulu, karakteristik limbah cair tekstil menunjukkan konsentrasi TDS mulai dari 2469 mg/L sampai 7295 mg/L (Imtiazuddin et al, 2012).



Keterangan:

FK 1 : Kontrol

FK 2 : Kontrol tanaman

F1 : Tanaman + bakteri R1

F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix R1, R2, dan R4

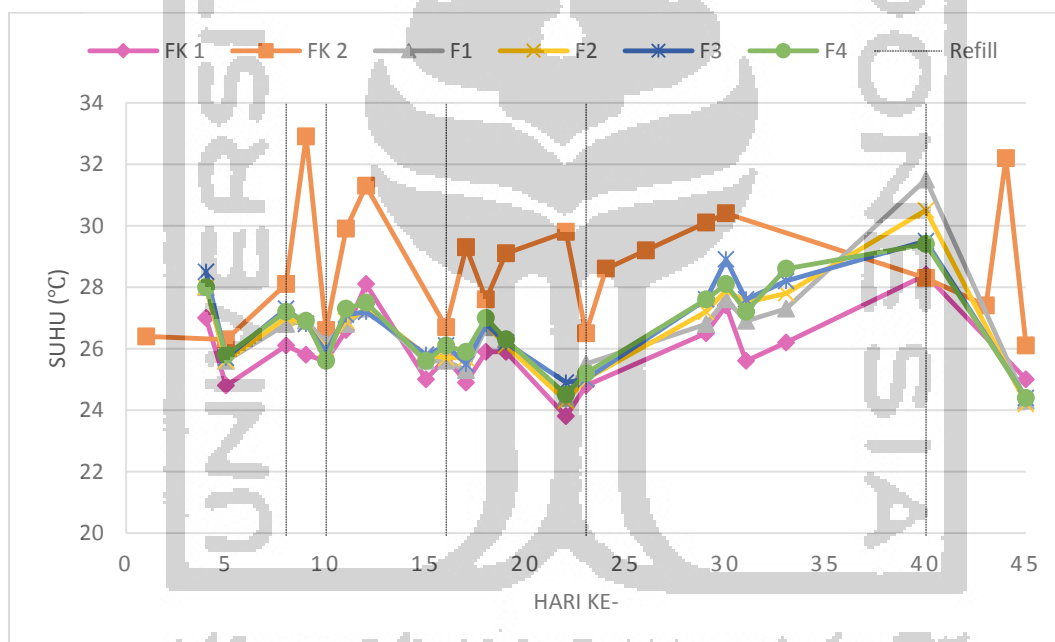
Gambar 4.12 Hasil Konsentrasi TDS selama Pengolahan

Grafik konsentrasi TDS menunjukkan hasil yang berfluktuasi, konsentrasi mengalami kenaikan saat adanya penambahan air limbah pada reaktor FTW dan penurunan pada beberapa hari setelah pengolahan. Kenaikan konsentrasi TDS dapat dilihat pada hari ke-5 reaktor F1, F2, F3, dan F4 memiliki konsentrasi berturut-turut 1110, 1490, 1160, 1140 mg/L, kemudian pada hari ke-8 terdapat penambahan limbah dan konsentrasi reaktor berturut-turut menjadi 2980, 2970, 3170, dan 2980 mg/L. Selama waktu pengolahan reaktor FTW (baik yang ditambahkan bakteri maupun tidak) mengalami penurunan konsentrasi seperti pada hari ke 23 reaktor FK 2, F1, F2, F3, F4 memiliki konsentrasi berturut turut 2050, 3630, 3550, 3650, 3730 mg/L dan pada hari ke 30 mengalami penurunan konsentrasi menjadi 1730, 3160, 3180, 3240, 3300 mg/L. Penelitian sebelumnya juga menguji konsentrasi TDS yang mengalami penurunan dengan sistem FTW baik yang ditambahkan bakteri maupun yang tidak, tetapi kinerja FTW yang diinokulasi dengan bakteri lebih baik dalam menurunkan TDS. Selain karena degradasi polutan organik oleh bakteri, TDS juga bisa menurun karena adanya pengendapan padatan tersuspensi (Tara et al, 2018). Sedangkan pada reaktor kontrol tanpa tanaman (FK 1), konsentrasi TDS cenderung stabil karena tidak adanya pengolahan dan penambahan

limbah cair. Dapat dilihat dari data bahwa konsentrasi TDS stabil pada kisaran 2000 – 3000 mg/L, seperti pada hari ke 5, 23, 45 berturut-turut adalah 3150, 3200, dan 2720 $\mu\text{S/cm}$.

4.3.3 Suhu

Hasil penelitian menunjukkan nilai suhu limbah cair tenun dalam reaktor FTW berfluktuasi, hal ini disebabkan karena adanya perbedaan cuaca harian dari awal penelitian sampai akhir penelitian. Apabila terjadi kenaikan suhu yang tajam, maka dapat menyebabkan terjadinya peningkatan dekomposisi bahan organik dalam air (Effendi, 2003). Berikut ini adalah hasil dari nilai suhu selama pengolahan 45 hari.



Keterangan:

FK 1 : Kontrol

FK 2 : Kontrol tanaman

F1 : Tanaman + bakteri R1

F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix R1, R2, dan R4

Gambar 4.13 Hasil Pengukuran Suhu selama Pengolahan

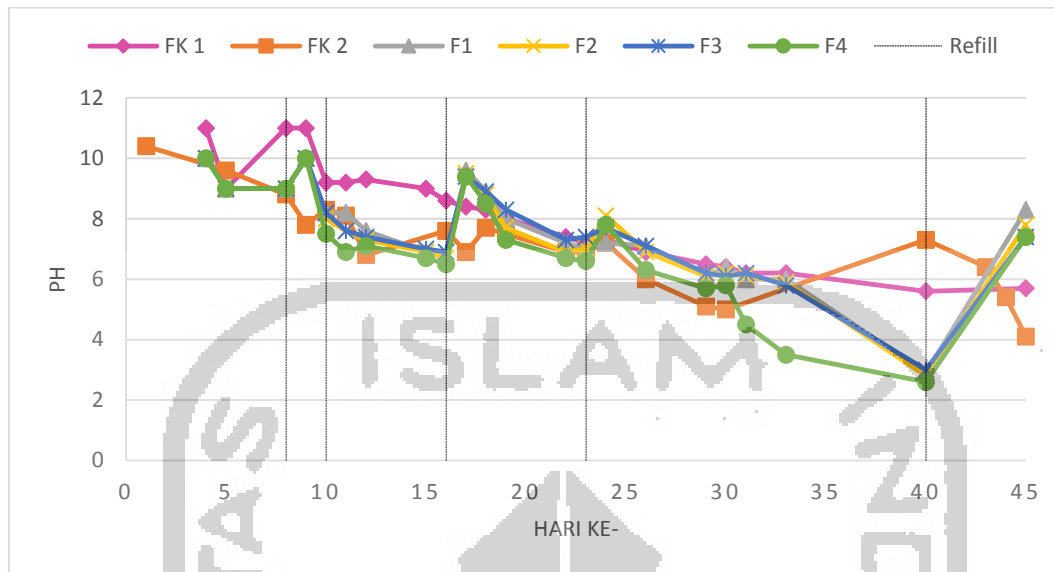
Pada penelitian yang dilakukan oleh Singh et al, suhu dengan variasi dari 20°C ke 40°C mempengaruhi aktivitas bakteri dalam mendegradasi warna. Suhu optimum untuk mendegradasi warna yaitu 35°C dengan efisiensi degradasi warna 92,38% yang diuji sampai 60 jam. Selain itu, Moosvi et al juga mengungkapkan

bahwa bakteri dapat mendegradasi warna sampai 93% pada suhu 37°C. Dari data penelitian ini, suhu limbah cair pada reaktor mempunyai rentang dari 23,8°C sampai 32,9°C dan reaktor FTW yang diinokulasi bakteri dapat mendegradasi warna sampai 94%. Mereka juga melaporkan bahwa kenaikan atau penurunan suhu dari suhu optimum, menurunkan laju dekolonisasi pewarna. Dalam banyak sistem bakteri, laju dekolonisasi pewarna azo meningkat dengan meningkatnya suhu hingga suhu optimum. Selain itu ada batas efisiensi penurunan dalam aktivitas dekolonisasi. Penurunan laju dekolonisasi pada suhu yang lebih tinggi dapat dikaitkan dengan suhu penonaktifan dari enzim pendegradasi atau matinya sel bakteri (Singh et al, 2014).

Reaktor kontrol tanaman FK 2 memiliki suhu rata-rata yang lebih tinggi dari reaktor FTW lainnya yaitu 28,7°C, sedangkan reaktor FTW lainnya memiliki rentang suhu yang sama yaitu 25,96°C - 26,75°C. Oleh karena itu laju proses bioremediasi lebih tinggi pada reaktor FK2. Suhu air merupakan parameter penting karena memiliki dampak terhadap reaksi kimia dan laju reaksi. Bakteri akan menghasilkan enzim yang lebih banyak pada suhu optimum. Suhu juga menentukan efisiensi bioremediasi. Pada suhu yang rendah, viskositas akan meningkat dan volatilitas senyawa toksik akan menurun sehingga akan menghambat proses bioremediasi. Secara umum, laju biodegradasi akan meningkat sejalan dengan peningkatan suhu sampai batas tertentu (Moenir, 2010).

4.3.4 Derajat Keasaman (pH)

Grafik berikut merupakan hasil uji pH selama 45 hari pengolahan. Pada grafik terlihat bahwa konsentrasi pH memiliki tren penurunan.



Keterangan:

FK 1 : Kontrol

FK 2 : Kontrol tanaman

F1 : Tanaman + bakteri R1

F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix R1, R2, dan R4

Gambar 4.14 Hasil Pengukuran pH selama Pengolahan

Pada awal pengolahan semua reaktor memiliki pH yang basa, nilai pH reaktor FK 1, FK 2, F1, F2, F3, F4 berturut-turut adalah 11; 10,4; 10; 10; 10; 10. Penelitian sebelumnya tentang karakteristik pada air limbah tekstil menunjukkan bahwa nilai pH berkisar antara 7,5 sampai 11,3 (Imtiazuddin et al, 2012). Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik pH pada limbah cair tenun bersifat basa. Selain itu, pH juga dipengaruhi kandungan zat warna. Nilai pH mengalami perubahan dari kondisi basa ke netral atau mendekati netral. Seperti pada penelitian ini memiliki karakteristik basa pada awal pengolahan dan setelah penambahan limbah cair pada reaktor FTW, nilai pH mengalami penurunan seperti pada akhir pengolahan reaktor F1, F2, F3, F4, berturut-turut memiliki nilai pH 8,3; 7,8; 7,4; dan 7,4. Hal ini berkaitan dengan proses degradasi zat warna oleh bakteri dan tanaman. Dengan demikian, sejumlah besar fenol, klorida, dan sulfat direduksi dari air limbah (Tara et al, 2019). Fenol merupakan zat organik yang terdapat dalam warna. Nilai pH fenol dalam larutan air kisaran pada 8 – 12 yang berada dalam kesetimbangan dengan anion fenolat $C_6H_5O^-$ atau fenoksida (Smith and March, 2007). Sehingga jika pH menurun maka ada indikasi fenol juga berkurang.

Terdapat beberapa pH yang memiliki pH asam atau pH di bawah 7, hal ini disebabkan oleh pelepasan asam organik oleh akar tanaman dan juga karena degradasi bahan organik oleh bakteri. Pada penelitian sebelumnya, pH sebagian besar direduksi oleh FTW dengan kombinasi tanaman dan bakteri daripada FTW tanpa inokulasi bakteri (Tara et al, 2018). Menurut Singh et al, selama penelitiannya pH berkisar 8,13 hingga 9,34. Tumbuhan vetiver menunjukkan kemampuan penyerapan yang lebih baik pada pH 6 – 9. Semakin basa pHnya, efektivitas penyerapannya cenderung menurun (Singh et al, 2015). Sedangkan pada reaktor kontrol FK 1, pH mengalami perubahan dari awal pengolahan yang bernilai 11 menjadi 5,7 pada akhir pengolahan yang cenderung asam.

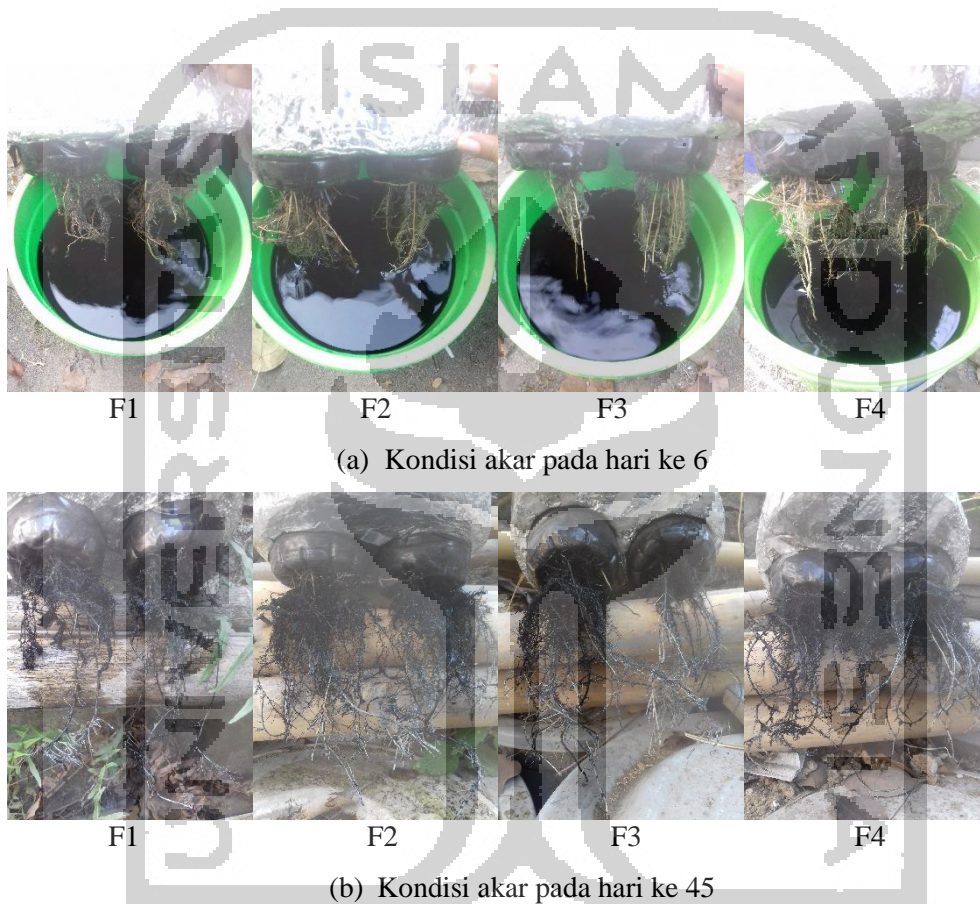
Nilai pH yang diperbolehkan menurut Peraturan Daerah Jawa Tengah No. 5 Tahun 2012 mengenai baku mutu air limbah untuk kegiatan industri tekstil dan batik adalah 6 – 9. Hasil akhir nilai pH pada bak FK 1, FK 2, F1, F2, F3, dan F4 berturut-turut adalah 5,7; 4,1; 8,3; 7,8; 7,4; dan 7,4. Berdasarkan peraturan tersebut, hasil akhir dari bak FK 1 dan FK 2 tidak memenuhi standar karena nilai pH < 6. Sedangkan untuk bak F1, F2, F3, dan F4 memenuhi standar nilai pH dalam rentang 6 – 9.

pH adalah faktor penting untuk kinerja fisiologis yang optimal dari kultur mikroba dan dekolonisasi warna. Faktor ini mempengaruhi pertumbuhan sel dan berbagai mekanisme biokimia dan enzimatis. Singh et al meneliti dekolonisasi warna oleh mikroba pada kisaran pH 6 – 8 dan hasil yang diperoleh adalah pH 7 menunjukkan dekolonisasi yang terbaik dalam dekolonisasi warna yang mencapai 94% (Singh et al, 2014). Selain itu, penelitian oleh Shah et al melaporkan bahwa dekolonisasi warna ditemukan dalam rentang pH 5 – 8 (Shah et al, 2013). pH optimum untuk dekolonisasi zat warna seringkali pada nilai pH netral atau sedikit asam/basa. Laju dekolonisasi zat warna cenderung menurun dengan cepat pada nilai pH asam atau basa kuat (Singh et al 2014).

4.4 Biomassa dan Pertumbuhan Tanaman

Parameter penting dalam efisiensi fitoremediasi adalah toleransi dan daya tahan hidup tanaman terhadap keberadaan polutan. Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa limbah tekstil mengandung berbagai bahan kimia

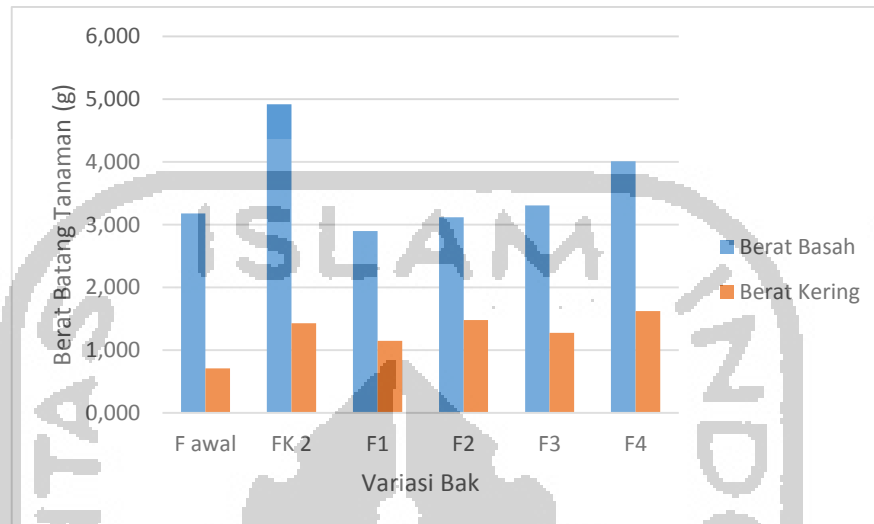
organik dan anorganik yang berbahaya bagi organisme hidup dan dapat mengurangi pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Tara et al, 2018). Tanaman vetiver diaklimatisasi selama satu bulan dan rata-rata tinggi tanaman 64 m. Pertumbuhan tanaman vetiver mengalami peningkatan seiring berjalannya proses pengolahan dengan tinggi rata-rata tanaman 80,35 m.



Gambar 4.15 Kondisi Pertumbuhan Akar selama Pengolahan

Dari gambar 4.15 dapat dilihat bahwa pada setiap reaktor akar mengalami pertumbuhan dan berubah warna menjadi hitam karena terjadi penyerapan air limbah oleh akar. Dari pertumbuhan ini menunjukkan bahwa tanaman vetiver dapat bertahan dan tumbuh dalam kondisi terpapar air limbah.

Berikut ini adalah hasil dari uji biomassa tanaman yang terdiri dari batang (*shoot*) dan akar (*root*).



Keterangan:

F awal : Tanaman setelah aklimatisasi

FK 1 : Kontrol

FK 2 : Kontrol tanaman

F1 : Tanaman + bakteri R1

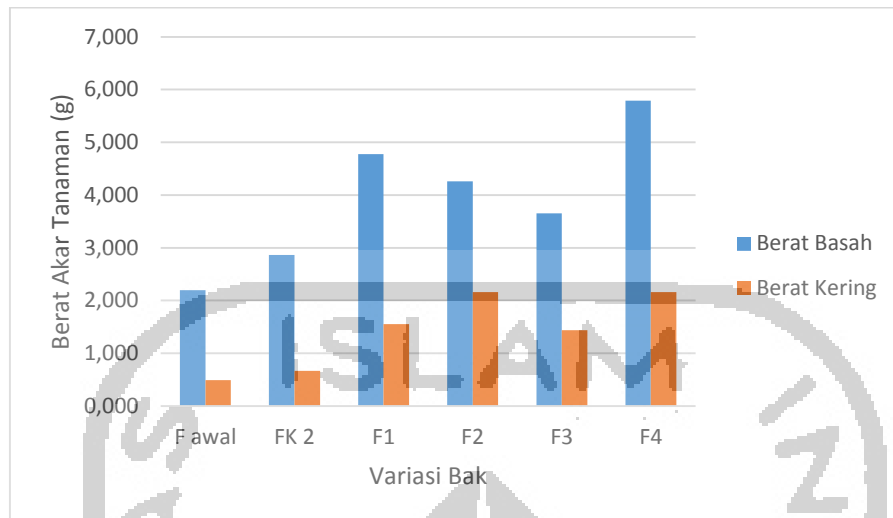
F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix (R1, R2, dan R4)

Gambar 4.16 Nilai Biomassa Batang Tanaman setelah 45 Hari Pengolahan

Biomassa pada batang tanaman vetiver diukur setelah 45 hari reaktor FTW mengolah limbah cair tenun. Hasil dari analisis ANOVA menunjukkan bahwa biomassa pada berat basah batang tanaman tidak ada perbedaan rata-rata di antara variasi reaktor FTW dan pada biomassa berat kering batang tanaman juga menunjukkan tidak ada perbedaan di antara variasi reaktor FTW. Data yang diperoleh dari berat basah batang tanaman FK 2, F1, F2, F3, F4 berturut-turut yaitu 4,917 g, 2,897 g, 3,116 g, 3,304 g, 4,009 g dan berat kering batang tanaman berturut-turut yaitu 1,430 g, 1,150 g, 1,481 g, 1,275 g, 1,624 g.



Keterangan:

F awal : Tanaman setelah aklimatisasi

FK 1 : Kontrol

FK 2 : Kontrol tanaman

F1 : Tanaman + bakteri R1

F2 : Tanaman + bakteri R2

F3 : Tanaman + bakteri R4

F4 : Tanaman + bakteri mix (R1, R2, dan R4)

Gambar 4.17 Nilai Biomassa Akar Tanaman setelah 45 Hari Pengolahan

Sedangkan hasil dari analisis ANOVA biomassa pada akar tanaman vetiver menunjukkan bahwa biomassa berat basah akar vetiver tidak ada perbedaan rata-rata di antara variasi reaktor FTW dan pada biomassa berat kering akar menunjukkan ada perbedaan di antara variasi reaktor FTW. Hal ini menunjukkan bahwa sistem perakaran pada reaktor FTW terdapat perbedaan. Biomassa berat basah dan berat kering akar tanaman tanpa inokulasi bakteri (FK 2) menunjukkan hasil yang lebih kecil daripada akar tanaman yang diinokulasi bakteri. Data yang diperoleh dari berat basah akar tanaman FK 2, F1, F2, F3, F4 berturut-turut yaitu 2,866 g, 4,777 g, 4,260 g, 3,652 g, 5,792g dan berat kering akar berturut-turut yaitu 0,669 g, 1,555 g, 2,162 g, 1,437 g, 2,162 g.

Berat kering pada biomassa akar dalam reaktor F2 dan F4 menunjukkan nilai yang paling besar yaitu 2,162 g. Hal ini berhubungan dengan penurunan parameter warna dan COD. Pada reaktor F2 dan F4 dapat menurunkan zat warna di bawah baku mutu dengan konsentrasi berturut-turut yaitu 172,86 Pt-Co dan 194,29 Pt-Co, sedangkan pada reaktor lainnya masih melebihi standar baku mutu. Untuk

parameter COD, reaktor F2 juga memiliki efisiensi terbesar dari bak lainnya yaitu sebesar 65%.

Tabel 4.3 Kondisi Fisik Tanaman setelah 45 Hari Pengolahan

Kode Reaktor FTW	Jumlah Tanaman	Daun yang Layu (Keseluruhan)	Daun yang Layu (Ujung)	Tumbuh Tunas	Tanaman yang Mati
FK 1	6	7	6		1
F1	5	1	7	2	-
F2	6	2	7	4	-
F3	5	-	8	5	-
F4	5	4	5	3	-

Pada akhir pengolahan terlihat beberapa daun dari tanaman mengering, ini bisa dikaitkan dengan efek penuaan. Dilihat dari data Tabel 4.3, tanaman yang tidak diinokulasi dengan bakteri (reaktor FK 2), jumlah tanaman yang layu atau kering lebih banyak dari pada reaktor yang diinokulasi dengan bakteri selain itu juga terdapat 1 tanaman yang mati pada reaktor FK 2. Hal ini dapat dikaitkan bahwa air limbah menghambat biomassa tanaman secara signifikan dan mencerminkan efek toksik dari air limbah tekstil pada metabolisme tanaman (Tara et al, 2019). Dilihat dari biomassa berat kering akar juga menunjukkan hasil yang lebih kecil dari tanaman yang diinokulasi dengan bakteri.

Tanaman memelihara ekosistem yang kompleks di mana komunitas bakteri berinteraksi dan bersaing untuk mendapatkan nutrisi dan air di rhizosfer dan endosfer tanaman inang. Banyak penelitian yang mengungkapkan bahwa bakteri endofit yang diisolasi dari akar dan bagian atas tanaman (*shoot*) dapat meningkatkan kesehatan dan pertumbuhan tanaman dalam lingkungan yang terkontaminasi melalui beberapa mekanisme yang melibatkan mineralisasi polutan organik, produksi hormon pertumbuhan, dan hormon penghilang stres, dan peningkatan penyerapan air dan nutrisi mineral (Shehzadi, 2016).



"Halaman ini sengaja dikosongkan"

جامعة الإسلام في إندونيسيا