

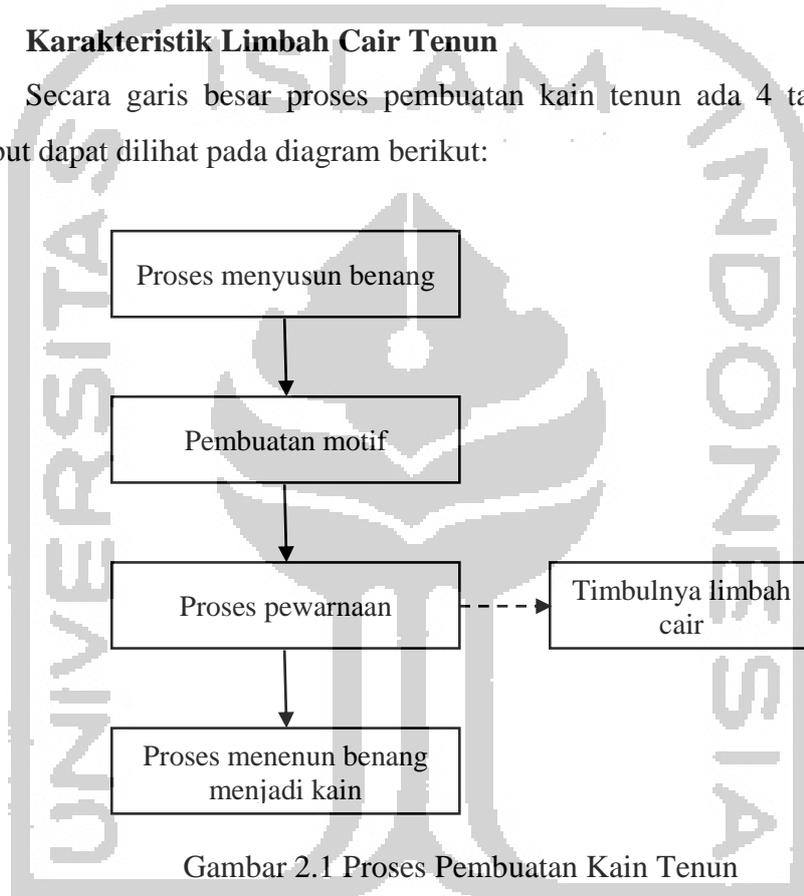
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Limbah Cair Tenun

##### 2.1.1 Karakteristik Limbah Cair Tenun

Secara garis besar proses pembuatan kain tenun ada 4 tahapan, proses tersebut dapat dilihat pada diagram berikut:



Gambar 2.1 Proses Pembuatan Kain Tenun

Pertama, proses ngeteng yaitu proses menyusun benang pada alat segi empat yang disebut plangkan. Setelah benang tersusun, tahapan kedua yaitu pembuatan motif. Motif digambarkan pada plangkan dengan tinta, kemudian benang pada plangkan diikat dengan tali rafia sesuai dengan motifnya. Tahapan ketiga yaitu proses pewarnaan pada benang yang sudah diikat sebelumnya yang disebut dengan proses menter. Pada proses pewarnaan, sebagian besar pengrajin menggunakan pewarna sintetis seperti naptol, direct, sulfur, dan lain-lain. Proses menter ini dilakukan dengan mencelupkan benang ke dalam pewarna. Pencelupan ini dapat dilakukan berulang kali sesuai dengan jumlah warna yang digunakan. Pada proses

inilah yang menghasilkan limbah cair tenun dan menimbulkan potensi pencemaran. Setelah proses menter selesai, benang dijemur sampai kering dan tali rafia yang mengikat benang dilepas. Tahapan keempat yaitu proses menenun benang dengan alat tenun bukan mesin (ATBM) menjadi kain.



Gambar 2.2 Proses Pewarnaan pada Industri Tenun di Troso  
(Sumber: dokumentasi lapangan)

Proses pewarnaan memiliki teknik yang berbeda-beda tergantung dengan jenis zat pewarnanya. Pada industri tenun Troso, zat pewarna yang sering digunakan adalah zat warna naphtol. Tahapan pewarnaan dengan zat warna naphtol adalah sebagai berikut:

- Langkah pertama membuat larutan TRO (Turkish Red Oil) sebagai zat pelarut + Naphtol dan kaustik (NaOH) dalam air panas.
- Benang yang sudah dibasahi dengan larutan (teepol)/sabun, masukkan ke dalam larutan (TRO+Naphtol+NaOH) tadi, lalu direndam beberapa menit, kemudian diperas.
- Membuat larutan Garam Diazo/ pembangkit warna naphtol dengan air dingin
- Masukkan lagi benang ke dalam larutan (Garam diazo), maka warna akan segera muncul.



Gambar 2.3 Proses Pemberian Zat Warna pada Benang  
(Sumber: dokumentasi lapangan)

Limbah cair pencelupan zat warna reaktif umumnya mempunyai pH tinggi (>9), berwarna tua dan COD yang cukup tinggi. Hal ini disebabkan karena proses pencelupan tersebut digunakan alkali untuk proses fiksasi warna, sehingga pH larutan menjadi tinggi. Warna limbah cair yang masih pekat disebabkan karena tidak semua zat yang digunakan dapat berdiskasi dengan serat, sedangkan COD yang cukup tinggi disebabkan oleh adanya zat-zat organik yang terkandung dalam limbah cair tersebut, seperti sisa zat warna, zat pembasah, dan pembantu yang digunakan (Hidayat, 2014).

### 2.1.2 Penggolongan Zat Warna

Pada tahun 1876 Witt menyatakan bahwa molekul zat warna merupakan gabungan dari zat organik yang tidak jenuh, kromofor sebagai pembawa warna dan auksokrom sebagai pengikat antara warna dengan serat. Zat organik yang tidak jenuh misalnya golongan aromatik, seperti hidrokarbon aromatik dan turunannya, fenol dan turunannya, dan senyawa yang mengandung nitrogen. Gugus kromofor misalnya gugus azo, gugus nitroso, gugus nitro, dan gugus karbonil. Sedangkan gugus auksokrom yaitu golongan kation seperti  $-\text{NH}_2$  dan golongan anion seperti  $-\text{SO}_3\text{H}$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{COOH}$ , dan lain-lain (Gitopadmojo, 1978).

Zat warna dapat digolongkan berdasarkan konstitusi (struktur molekul) dan berdasarkan atas aplikasi (cara pewarnaannya) pada bahan, misalnya di dalam pencelupan dan pencapan bahan tekstil, kulit, kertas, dan bahan lapis. Kedua cara

ini sebetulnya tidak menggolongkan zat warna secara tuntas karena masih ada kemungkinan antara dua golongan atau lebih, masih terdapat zat warna dengan kromofor yang sama, tetapi cara pencelupan atau pewarnaan yang berbeda (Gitopadmojo, 1978).

Penggolongan berdasarkan konstitusi atau sistem kromofor yang berbeda misalnya yaitu nitroso, nitro, golongan azo, xantena, akridin, azina, lakton, antraknon, indigoida, tioindigo, dan lain-lain. Sedangkan penggolongan zat warna berdasarkan cara pewarnaan bahan yaitu zat warna basa, asam, direk, mordan (beitsa), azoat (naftol), belerang (sulfur), hidron, bejana, bejana larut, dispersi, reaktif, dan pigmen (Gitopadmojo, 1978).

Jenis zat warna yang sering digunakan adalah zat warna sintesis seperti naftol, direct, sulfur, dan lain-lain. Zat warna naftol adalah suatu zat warna yang dapat dipakai untuk mencelup secara cepat dan mempunyai warna yang kuat. Zat warna naftol adalah suatu senyawa yang tidak larut dalam air yang terdiri dari dua komponen dasar yaitu berupa golongan naftol AS (Anilis acid) yang terdiri dari naftol itu sendiri dan komponen basa naftol yang disebut amina aromatik primer dan komponen pembangkit warna, yaitu golongan diazonium yang biasanya disebut garam. Kedua komponen tersebut bergabung menjadi senyawa berwarna jika sudah dilarutkan. Zat warna naftol tidak larut dalam air karena senyawa yang terjadi mempunyai gugus azo (Laksono, 2012).

Pewarna azo adalah salah satu pewarna sintesis yang paling penting dan dominan (sekitar 80%) digunakan dalam industri tekstil. Kehadiran pewarna azo dan produknya yang terdegradasi (amina tidak berwarna) di reservoir alami atau buatan dapat menyebabkan masalah lingkungan dan kesehatan yang parah (Tara et al, 2019).

## **2.2 Bioremediasi**

Bioremediasi adalah penggunaan sistem biologi untuk mengurangi polusi udara, air, atau sistem terestrial. Pemanfaatan mikroorganisme sebagai agen bioremediasi memiliki prospek yang menjanjikan karena mikroorganisme diketahui dapat memecah molekul polutan melalui jalur metabolisme yang biasanya digunakan organisme untuk pasokan energi dan pertumbuhannya (Marimuthu et al.,

2013). Pada saat bioremediasi berlangsung, enzim-enzim yang diproduksi oleh mikroorganisme memodifikasi struktur polutan beracun menjadi tidak kompleks sehingga menjadi metabolit yang tidak beracun dan berbahaya (Priadie, 2012).

Pengolahan air tercemar secara biologi pada prinsipnya adalah meniru proses alami *self purification* di sungai dalam mendegradasi polutan melalui peranan mikroorganisme. Proses *self purification* ini pada prinsipnya ada dua yaitu pertumbuhan mikroorganisme menempel dan tersuspensi. Pertumbuhan mikroorganisme menempel adalah mikroorganisme yang keberadaannya menempel pada suatu permukaan misalnya pada batuan ataupun tanaman air. Selanjutnya diaplikasikan pada IPAL misalnya dengan sistem trickling filter. Sedangkan pertumbuhan mikroorganisme tersuspensi yaitu mikroorganisme yang keberadaannya dalam bentuk suspensi di dalam air tercemar. Selanjutnya diaplikasikan pada IPAL misalnya dengan sistem lumpur aktif konvensional menggunakan bak aerasi maupun sistem SBR (*Sequence Batch Reactor*) dan sistem lainnya. Peniruan proses alami *self purification* di sungai dalam mendegradasi polutan memerlukan beberapa tahapan seperti isolasi bakteri, pengujian bakteri dalam mendegradasi zat pencemar, identifikasi, dan perbanyakan bakteri (Priadie, 2012).

Bioremediasi dapat dilakukan dengan melibatkan proses degradasi secara aerobik dan anaerobik oleh mikroorganisme. Pengolahan limbah pewarna tekstil secara anaerobik akan menghasilkan pemotongan reduktif ikatan seyawa pewarna, sedangkan pengolahan secara aerobik akan mendegradasi produk yang terbentuk pada langkah pertama dan menghasilkan produk akhir yang tidak berbahaya lagi (Ratna and Padhi, 2012).

Sebagai contoh, dalam pengolahan limbah berbasis mikroba yang mengandung pewarna tekstil jenis azo, mekanisme degradasi yang banyak digunakan melibatkan pemotongan ikatan azo ( $-N=N-$ ) dengan bantuan enzim *azoreductase* dalam kondisi anaerob. Pemotongan ikatan azo tersebut langsung dalam dua tahap. Dalam setiap tahap, dua elektron akan ditransfer ke pewarna azo yang bertindak sebagai akseptor elektron terakhir sehingga pewarna terdekolorisasi.

Metabolit yang dihasilkan, misalnya berupa amina aromatik, selanjutnya akan didegradasi lebih lanjut baik secara aerobik maupun anaerobik (Shah, 2014).

Salah satu karakteristik khas yang terdapat pada mikroorganisme yang mampu mendekolorisasi pewarna tekstil adalah kemampuan mikroorganisme tersebut untuk mensekresikan enzim-enzim seperti *azoreductase*, *laccase* atau *peroxidase*. Enzim-enzim tersebut diketahui dapat mendegradasi struktur kimia pewarna tekstil dan menghasilkan produk yang tidak berwarna, lebih tidak beracun, dan aman untuk dibuang ke badan-badan air dengan berbagai mekanisme, tergantung pada struktur kimia dari masing-masing pewarna (Sudha *et al.*, 2014).

### **2.3 Teknik Isolasi Bakteri**

Isolasi bakteri yang baik dan benar dapat menentukan bakteri yang cocok dalam proses remediasi air limbah yang diinginkan. Oleh karena itu prinsip pemilihan bakteri hasil isolasi dapat memberikan kinerja penurunan kadar polutan yang optimal (Thompson *et al.*, 2005). Karena secara alami jumlah bakteri yang diinginkan terdapat dalam jumlah sedikit dibandingkan dengan bakteri yang tidak diinginkan, maka diperlukan proses isolasi untuk memperbanyak bakteri yang diinginkan. Tujuan mengisolasi bakteri adalah untuk mendapatkan bakteri yang diinginkan dengan cara mengambil sampel mikroba dari lingkungan yang ingin diteliti. Dari sampel tersebut kemudian dikultur/dibiakkan dengan menggunakan media universal atau media selektif, tergantung tujuan yang ingin dicapai. Bahan nutrisi dipersiapkan untuk pertumbuhan bakteri di laboratorium yang disebut kultur media. Beberapa bakteri dapat tumbuh dengan baik pada hampir semua media kultur; lainnya memerlukan media kultur khusus yang pada akhirnya akan ada suatu pertumbuhan yang disebut inokulum. Untuk tujuan tersebut diperlukan media yang diperkaya (*enrichment culture*) untuk memperbanyak bakteri yang dimaksud. Pada medium yang diperkaya, termasuk juga media selektif, biasanya menyediakan nutrisi dan kondisi lingkungan yang mendukung pertumbuhan mikroba yang diinginkan tetapi menghambat bakteri lainnya (Priadie, 2012).

Setelah itu, media yang mengandung mikroorganisme diinginkan tersebut selanjutnya diinkubasi selama beberapa hari, kemudian sejumlah kecil inokulum dipindahkan ke lain media dengan komposisi media yang sama. Setelah

serangkaian transfer tersebut, mikroorganisme yang masih hidup akan terdiri dari bakteri yang mampu melakukan metabolisme bahan organik. Setelah populasi bakteri bertambah dilakukan isolasi pada medium agar yang diinkubasi selama 3 hari. Dari hasil inkubasi tersebut diperoleh koloni-koloni bakteri untuk selanjutnya akan diambil koloni yang dominan untuk diamati dan dibuat sub kultur murninya untuk digunakan dalam penurunan zat pencemar (Priadie, 2012).

#### **2.4 Endophytic Bacteria**

Istilah “endofit” berasal dari kata Yunani “*endon*” yang berarti di dalam, dan “*phyton*” yang berarti tanaman. Endofit, didefinisikan sebagai mikroorganisme seperti bakteri dan jamur yang mendiami endosfer tanaman selama seluruh atau sebagian siklus hidupnya tanpa menyebabkan kerusakan nyata pada tanaman inang (Kandel et al, 2017). Tumbuhan dan mikroba yang terkait, khususnya bakteri endofit yang berinteraksi satu sama lain untuk saling menguntungkan dan interaksi ini dapat dimanfaatkan dalam meningkatkan remediasi tanah dan air yang tercemar. Tanaman menyediakan nutrisi kepada bakteri endofit. Sebagai gantinya, bakteri endofit menurunkan toksisitas dan evapotranspirasi dari polutan karena aktifitas degradasi oleh bakteri tersebut. Tanaman dapat mengambil dan mengakumulasi polutan organik di akar, pucuknya, dan daun. Dalam aktifitas pertumbuhan tanaman, seperti fiksasi nitrogen, produksi siderofor, dan pelarutan fosfor, bakteri endofit memainkan peran penting selama pertumbuhan tanaman di lingkungan yang tercemar (Shehzadi et al, 2016).

##### **2.4.1 Rekrutmen Bakteri Endofit oleh Tanaman Inang**

Rizhosfer merupakan zona dimana akar dan tanah berada dan terjadi interaksi yang kompleks antara tanaman dengan mikroorganisme. Telah diteliti bahwa tanaman dapat melepaskan fotosintat atau eksudat dalam jumlah besar dari akarnya yang memengaruhi populasi mikroba di rizhosfer. Eksudat akar termasuk asam organik, asam amino, dan protein dapat terlibat dalam merekrut endofit bakteri dari rizhosfer. Eksudat akar kemungkinan mengandung substrat yang memulai komunikasi awal antara tanaman inang dan bakteri endofit, dan akibatnya mengarahkan proses kolonisasi. Sebagai contoh, bukti keterlibatan oksalat dalam

perekrutan strain bakteri menguntungkan *Burkholderia phytofirmans* PsJN oleh tanaman inang telah dilaporkan (Kost et al, 2014). Dalam penelitian ini, strain *Burkholderia phytofirmans* yang rusak atau kurang baik dalam pemanfaatan oksalat digunakan untuk menginokulasi tanaman lupin dan jagung yang masing-masing mengeluarkan tingkat oksalat sedang dan rendah (Kost et al, 2014).

Komposisi tanah asli dan genotip tanaman inang juga dianggap penting dalam rekrutmen bakteri endofit oleh tanaman inang. Sebuah studi terperinci tentang endofit akar tanaman *Arabidopsis* yang ditanam di tanah yang berbeda menyimpulkan bahwa jenis tanah memengaruhi komposisi populasi bakteri endofit yang ditemukan di akar. Hal ini menunjukkan bahwa jenis tanah yang berbeda dapat dihuni oleh variabel populasi bakteri yang berfungsi sebagai inokula awal (Kandel et al, 2017).

#### **2.4.2 Pelekatan Bakteri Endofit ke Permukaan Tanaman Inang**

Penempelan atau adhesi sel bakteri ke permukaan tanaman adalah langkah pertama dari proses kolonisasi. Bakteri sekitar akar tanaman kemungkinan besar bergerak ke arah akar menggunakan afinitas kemotaksis untuk eksudat akar. Hal ini diikuti oleh pelekatan pada permukaan akar yang mendapatkan akses masuk di daerah munculnya akar lateral atau lubang lainnya yang disebabkan oleh luka atau cedera mekanis. *Exopolysaccharides* (EPS) yang disintesis oleh sel-sel bakteri dapat memfasilitasi pelekatan sel-sel bakteri ke permukaan akar dan penting pada tahap awal kolonisasi endofit (Kandel et al, 2017).

#### **2.5 Tanaman Vetiver (*Vetiveria zizanioides*)**

Tanaman vetiver memiliki sistem akar yang berlimpah, kompleks, panjang, dan vertikal. Akar tumbuh hampir lurus ke bawah dengan sedikit akar permukaan lateral, sehingga tidak mengganggu pertumbuhan tanaman yang lain. Sistem akar vetiver dapat mencapai 3-4 m pada tahun pertama penanaman. Dalam penelitian terdahulu (Lavania et al, 2004) meneliti bahwa akar dapat tumbuh sampai 7 m setelah 36 bulan. Akar sangat kuat dengan kekuatan tarik rata-rata antara 75 dan 85 Mpa. Daunnya tipis dan memiliki tepi yang tajam, dan bisa tumbuh hingga 2 m. Rumput vetiver yang dewasa memiliki dedaunan yang kuat dan kasar, yang

memungkinkannya tetap di tempat selama bertahun-tahun (Oshunsanya and Aliku, 2017).

Karakteristik yang menjadikan tanaman vetiver sebagai spesies ideal untuk pengolahan limbah:

- a. Batang kaku dan tegak yang membentuk pagar lebat saat ditanam berdekatan. Pagar ini dapat bertahan terhadap aliran air yang relatif dalam, mengurangi kecepatan aliran dan sebagai perangkap sedimen.
- b. Resistensi yang tinggi terhadap hama dan penyakit.
- c. Toleransi tinggi terhadap keasaman, alkalinitas, salinitas, sodisitas, dan magnesium.
- d. Toleransi tinggi terhadap Al, Mn, As, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, Se, dan Zn di dalam tanah.
- e. Toleransi tinggi terhadap herbisida dan pestisida.
- f. Efisiensi tinggi dalam menyerap N, P, Hg, Cd, dan Pb terlarut dalam air tercemar.
- g. Kemampuan untuk tumbuh kembali dengan sangat cepat setelah dipengaruhi oleh kondisi buruk dan pertumbuhan tanaman membaik setelah amelioran tanah ditambahkan (Siagian, 2018).

## **2.6 Floating Treatment Wetland (FTW)**

*Floating treatment wetland* (FTW) merupakan sistem remediasi oleh makrofita akuatik yang ditanam pada rakit apung buatan sehingga memungkinkan tanaman tumbuh secara hidroponik di badan air. Akar tanaman menggantung ke zona pelagik di kolom air dan terdapat penyaringan secara mekanis dan biologis. Penyaringan mekanis terjadi melalui proses fisik dari akar tanaman seperti sedimentasi, adsorpsi, filtrasi, dan lain-lain. Sedangkan penyaringan biologis adalah hasil dari degradasi bakteri dan peyerapan tanaman (Tara et al, 2019).

Mekanisme reduksi polutan oleh FTW yaitu sebagai berikut:

1. Tanaman langsung menyerap polutan, terutama nutrisi dari air menggunakan proses yang dikenal dengan serapan biologis.
2. Mikroorganisme tumbuh di rakit apung dan akar tanaman yang mengonsumsi bahan organik di air melalui dekomposisi mikroba.

### 3. Sistem akar menyaring sedimen dan polutan. (Sample and Fox, 2013)

FTW secara tradisional digunakan untuk mengolah berbagai air limbah seperti air hujan, limbah domestik, limbah industri, limbah tambang, dan lain-lain. Namun, sistem ini terbatas pada konteks tertentu, seperti stabilitas yang buruk dan proses pemurnian yang kurang efisien. Kurangnya efisiensi bakteri dalam mendegradasi senyawa organik beracun dan kemampuan metabolisme tanaman yang lemah adalah masalah yang menonjol dalam FTW. Untuk meningkatkan efisiensi pengolahan pada FTW, pendekatan tambahan yang direkomendasikan di antaranya inokulasi *plant growth promotig* (PGP) dan bakteri pendegradasi polutan (Tara et al, 2019).

Tanaman memiliki kemampuan mendekontaminasi air dengan bantuan hormon dan enzim tertentu, tetapi efisiensi tanaman dapat dipengaruhi oleh adanya kontaminan dalam air, terutama polutan organik. Pertumbuhan tanaman dan proses fitoremediasi dapat distimulasi dengan augmentasi bakteri endofit dan/atau bakteri rhizosfer yang dapat mendegradasi polutan. Tanaman menyediakan habitat dan nutrisi bagi bakteri dan sebagai gantinya bakteri membantu dalam mengatasi stres pada tanaman dan mendegradasi polutan. Sejumlah bakteri dari air dapat berkoloni pada akar dan dapat disebut sebagai biofilm dengan prosedur perbanyakan berulang. Beberapa bakteri penghuni akar yang masuk ke akar, berkoloni di dalamnya, dan/atau menyebar ke bagian tanaman lainnya, bakteri ini disebut sebagai bakteri endofit. Populasi bakteri di permukaan akar dan di dalam jaringan tanaman meningkatkan degradasi kontaminan di air. Spesies tanaman yang berbeda dapat digunakan dalam FTW, tergantung pada beberapa faktor seperti kemampuan dalam beradaptasi dengan lingkungan tertentu yang tercemar dan efisiensi degradasinya (Rehman et al, 2019).

Salah satu metode yang biasa digunakan untuk menilai kinerja FTW adalah dengan menggunakan *mesocosms*, kolam skala kecil. Kolam tersebut dapat dibuat dengan tangki dan rakit apung dilapisi dengan aluminium foil untuk menghindari kerusakan dari radiasi ultraviolet. Rakit apung tersebut dibor untuk membuat lubang-lubang yang akan ditanami tanaman. Untuk menopang pertumbuhan

tanaman, setiap lubang diisi serabut kelapa, kerikil, tanah, dan pasir (Tara et al, 2019).

FTW memiliki kelebihan yaitu makrofit menghambat pertumbuhan alga karena adanya persaingan dalam memperoleh nutrisi dan sinar matahari yang menguntungkan dalam segi estetika, menyediakan sejumlah besar biomassa yang digunakan untuk kebutuhan bioenergi, memiliki biaya perawatan yang rendah dan konsumsi energi yang rendah, serta memungkinkan remediasi polutan in situ tanpa membutuhkan area yang luas untuk operasinya (Tara et al, 2019; Rehman et al, 2019).

## 2.7 Penelitian Terdahulu

Berikut beberapa penelitian terdahulu tentang pengolahan limbah tekstil dengan sistem FTW menggunakan kombinasi tanaman dan bakteri:

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Hipotesa
1	<i>Ecology of bacterial endophytes associated with wetland plants growing in textile effluent for pollutant-degradation and plant growth –promotion potentials</i>	- M. Shezadi - K. Fatima - A. Imran - M. S. Mirza - Q. M. Khan - M. Afzal	2015	Sebanyak 41 bakteri pendegradasi air limbah tekstil diisolasi dari 3 jenis tanaman <i>wetland</i> ( <i>Typha domingensis</i> , <i>Pistia stratiotes</i> , dan <i>Eichhornia crassipes</i> ). Bakteri endofit ini memiliki kemampuan degradasi air limbah tekstil dan mendorong aktivitas pertumbuhan tanaman sehingga meningkatkan produksi biomassa tanaman.
2	<i>Treatment of textile industry effluent in a pilot-scale vertical flow constructed wetland system augmented with bacterial endophytes</i>	- Z. Hussain - M. Arslan - M. H. Malik - M. Mohsin - S. Iqbal - M. Afzal	2018	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistem <i>vertical flow constructed wetland</i> (VFCW) mampu menghilangkan sebagian besar polutan dari air limbah tekstil, tetapi sistem VFCW dengan augmentasi bakteri dapat meningkatkan efisiensi remediasi.</li> <li>• Air limbah yang diolah dengan VFCW yang ditambah dengan bakteri menunjukkan sifat yang tidak toksik.</li> </ul>

No	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Hipotesa
				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bakteri yang diinokulasi menunjukkan persistensi di bagian akar dan pucuk tanaman.</li> </ul>
3	<i>On-site performance of floating treatment wetland macrocosms augmented with dye-degrading bacteria for the remediation of textile industry wastewater</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- N. Tara</li> <li>- M. Arslan</li> <li>- Z. Hussain</li> <li>- M. Iqbal</li> <li>- Q. M. Khan</li> <li>- M. Afzal</li> </ul>	2019	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FTW dengan Kombinasi tanaman dan bakteri menunjukkan degradasi polutan tertinggi.</li> <li>• Bakteri menunjukkan presistensi dalam air serta akar dan pucuk tanaman yang menunjukkan potensial kemitraan antara bakteri dengan tanaman dalam degradasi polutan.</li> <li>• Sistem ini dioperasikan selama dua tahun yang menunjukkan potensi jangka panjang untuk praktik remediasi di lapangan.</li> </ul>