

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik sampel limbah bioetanol yang diambil dari sentra industri bioetanol Sukoharjo adalah COD sebesar 263.500 mg/L, BOD sejumlah 59.100 mg/L, TSS sebesar 11.400 mg/L, gas sulfida sebanyak 4,13 mg/L dan pH 4,4. Kemudian limbah asli diencerkan sampai diperoleh pH limbah 6,5 dan konsentrasi limbah menjadi 0,5%. Hal ini dikarenakan *Azolla sp.* hidup pada pH 5,5 – 6,5 (Maulana dan Haniswita 2016) dan *Pseudomonas aeruginosa* hidup pada pH 6,5-7,5 (Maslahat et al. 2010). Karakteristik limbah yang diencerkan adalah COD (1360 mg/L), BOD (647 mg/L), TSS (70 mg/L), gas sulfida (0,0694 mg/L) dan pH 6,5. Hasil pengujian limbah sebelum perlakuan dan sesudah perlakuan disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Pengurangan Kadar Parameter Limbah

Perlakuan (kg, cfu/ml)	TSS		COD		BOD		H ₂ S (mg/L)	pH
	C* (mg/L)	R* (%)	C* (mg/L)	R* (%)	C* (mg/L)	R* (%)		
A0.1	70	7.14	596	56.16	134	79.24	0.17	8.1
A0.15	72	7.62	565	58.49	115	82.23	0.14	8
A0.2	81	26.67	564	58.55	138	78.70	0.15	7.7
A0.1 P10 ⁸	133	90.48	620	54.45	172	73.36	0.27	7.7
A0.15 P10 ⁸	56	19.52	532	60.88	147	77.23	0.09	7.8
A0.2 P10 ⁸	64	9.05	508	62.66	129	80.01	0.14	7.9
A0.1 P10 ⁹	70	1.90	553	59.35	134	79.29	0.14	7.9
A0.15 P10 ⁹	59	16.19	570	58.13	138	78.62	0.28	7.9
A0.2 P10 ⁹	48	31.90	536	60.59	181	82.38	0.12	8.1
A0.1 P10 ¹⁰	59	17.14	542	60.15	182	71.87	0.11	7.9
A0.15 P10 ¹⁰	59	16.67	557	59.04	181	71.92	0.45	7.8
A0.2 P10 ¹⁰	68	6.19	572	57.94	191	70.48	0.31	7.9
Limbah asli	11.400		263.500		59.100		4.13	4.4
Limbah yang diencerkan	70		1360		647		0.0694	6.5

Keterangan:

A = Biomassa *Azolla microphylla*

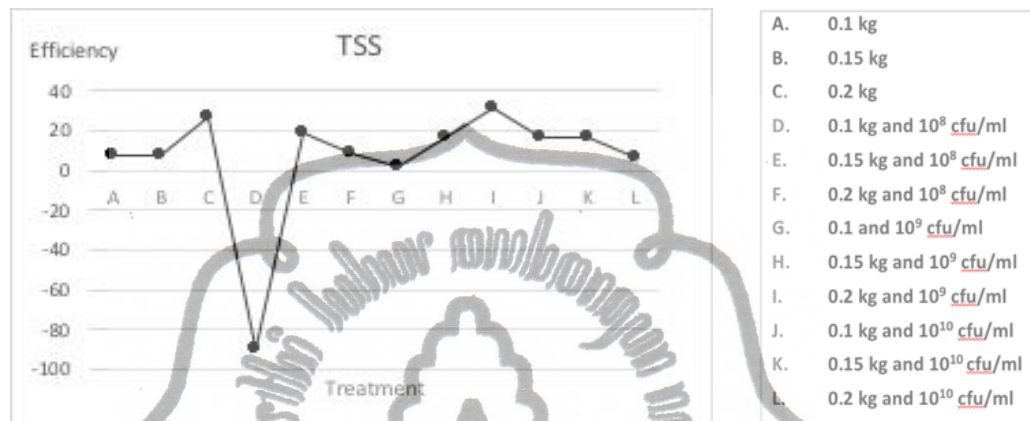
P = Kepadatan *Pseudomonas aeruginosa*

C = Rata-rata konsentrasi limbah

R = Pengurangan limbah

A. Pengurangan TSS

Hasil uji menunjukkan bahwa penurunan kadar TSS tertinggi terjadi pada perlakuan I (0,2 kg dan 10^9 cfu/ml) sebanyak 31,9 % dan terendah pada perlakuan D (0,1 kg dan 10^8 cfu/ml) sebesar -90,48 % (Gambar 3). Uji Anova menunjukkan ada perbedaan berarti pada kelompok perlakuan.



Gambar 3. Efektivitas pengurangan TSS dalam limbah bioetanol

Nilai TSS menyatakan banyaknya zat tersuspensi dalam limbah cair. Banyaknya zat padat yang tersuspensi dalam limbah dipengaruhi oleh proses penyerapan unsur hara oleh akar (Padmaningrum et al. 2014). Penurunan kadar TSS terjadi karena *Azolla microphylla* memiliki kemampuan biofilter (Xin et al. 2008), sehingga dapat menyerap dan mengakumulasi unsur hara di akar (Ekyastuti W et al. 2018; Parbo AP et al. 2019). *Azolla microphylla* memiliki kemampuan *phytoaccumulation*, sehingga dapat mengakumulasi zat kontaminan dalam jumlah besar ke dalam biomasnya (Arora et al. 2006). Penelitian Sheena dan Harsha (2018) juga menunjukkan bahwa pengurangan zat padat yang tinggi disebabkan oleh kemampuan akar tumbuhan untuk mengakumulasi materi organik dalam limbah cair yang mendukung pertumbuhannya. Tumbuhan air menyerap polutan melalui kontak langsung akar dengan air yang terkontaminasi (Sood et al. 2011).

Limbah bioetanol kaya akan bahan organik karena proses pembuatannya melalui fermentasi dengan bahan baku tetes tebu yang tinggi karbohidrat. Puspawati et al. (2010) menyatakan bahwa karbohidrat dihidrolisis menjadi gula dalam proses fermentasi. Hidrolisis gula menghasilkan asam piruvat, lalu diubah menjadi asam organik, ester, CO_2 , dan asetaldehid (Prativi, 2013). Hal ini sesuai

dengan pernyataan Nurcahyani (2015) yang menyatakan bahwa limbah cair bioetanol mengandung banyak bahan organik, yaitu sebesar 1,3285 %. *Azolla microphylla* cocok digunakan dalam pengolahan limbah cair bioetanol karena *Azolla microphylla* mengurangi bahan organik sebesar 33,3% dan karbon organik sebanyak 50% pada limbah cair (Soman et al. 2018).

Kapang, jamur, bakteri dan mikroorganisme lain mencerna bahan organik yang terkandung dalam limbah. *Pseudomonas sp.* menguraikan protein (Wahyudi et al. 2019), selulosa, hemiselulosa, pati, kitin, pektin, inulin, lignin (Rao 1994) menjadi senyawa yang lebih sederhana dengan enzim protease, lipase, katalase, kitinase dan amilase (Sutanto 2011; Mardhiana et al. 2017). Oleh karena itu, zat padat yang tersuspensi dalam limbah menjadi berkurang.

Proses remediasi terjadi dengan menggunakan enzim yang terdapat pada tumbuhan itu sendiri (Varghese dan Jacob 2016). Mekanisme dalam fitoremediasi limbah terjadi melalui berbagai tahap menurut DalCorso et al. (2019), meliputi a) penyerapan partikel bahan pencemar melalui dinding sel yang diinduksi metabolisme rhizosfer dan menyimpannya dalam vakuola di sel akar, mencegah transport ke batang, b) akumulasi bahan pencemar di aerial organ seperti vakuola atau trikoma di sepanjang akar hingga batang melalui transport xilem, c) metabolisme daun memungkinkan penguapan partikel penyusun bahan pencemar.

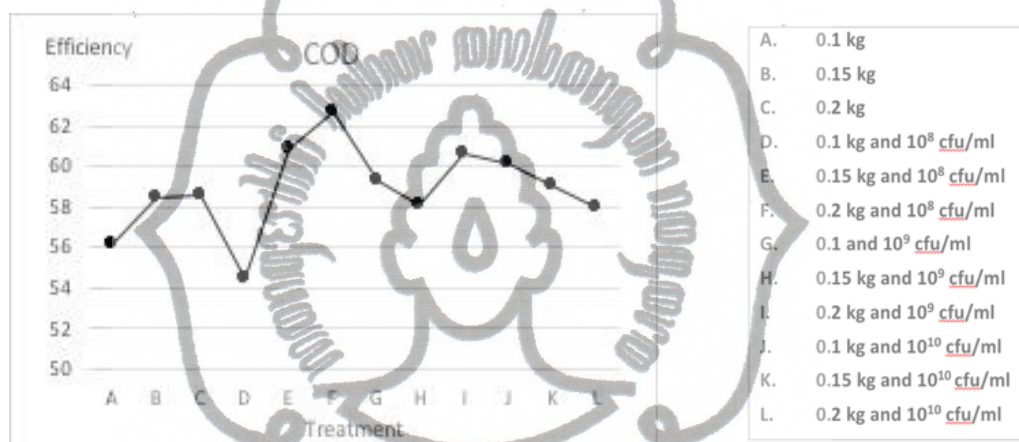
Proses fitoremediasi bahan organik antara lain *phytoextraction*, *phytofiltration*, *phytostabilization* dan *phytovolatilization* (Nwoko, 2010). Mekanisme *phytoextraction* meliputi proses ekstraksi dan akumulasi polutan dari situs tercemar ke bagian-bagian tumbuhan melalui translokasi. *Phytofiltration* adalah proses akar tumbuhan menyerap dan mengkonsentrat polutan dari *effluent*. Mekanisme yang terlibat dalam *phytofiltration* antara lain a) penyerapan bahan pencemar di permukaan akar dan pengeluaran bahan pencemar yang terkandung dalam limbah, b) penyerapan bahan pencemar melalui intraseluler dan translokasi ke batang, c) bahan pencemar yang tidak ikut terlepas akan mengalami pelepasan melalui akar dalam bentuk zat yang tidak larut dalam air.

Phytostabilization terjadi ketika tumbuhan menstabilkan polutan dan mengurangi kebahayaannya. *Phytovolatilization* adalah proses tumbuhan menyerap polutan dan mengubahnya menjadi gas dan dikeluarkan melalui transpirasi

(Nwoko, 2010). Bahan pencemar diuraikan menjadi bahan yang aman dalam bentuk gas yang diuapkan selama transpirasi. *Phytovolatilization* menyebabkan laju transpirasi meningkat dan pencegahan penutupan stomata di daun.

B. Pengurangan COD

Hasil uji menunjukkan bahwa penurunan kadar COD tertinggi terjadi pada perlakuan F (0,2 kg dan 10^8 cfu/ml) sebanyak 62,66 % dan terendah pada perlakuan D (0,1 kg dan 10^8 cfu/ml) sebesar 54,45 % (Gambar 4). Uji Anova menunjukkan tidak ada perbedaan berarti pada kelompok perlakuan.



Gambar 4. Efektivitas pengurangan COD dalam limbah bioetanol

Nilai COD menyatakan banyaknya oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik dalam limbah secara kimia. COD menunjukkan indikasi kasar kandungan organik dalam limbah (Jenie dan Rahayu 1996). Penurunan kadar COD dikarenakan tumbuhan mengoksidasi zat pencemar di dalam jaringan tubuhnya dan melakukan biokonsentrasi terhadap zat tersebut (Varghese dan Jacob 2016). Penelitian Arora et al. (2006) menunjukkan bahwa *Azolla microphylla* memiliki potensi biokonsentrasi paling tinggi dibandingkan genus *Azolla* lainnya. Kapasitas absorpsi *Azolla microphylla*, yaitu 11,17 ppm TSS/100 gram biomassa, 426 ppm COD/100 gram biomassa, 354,67 ppm BOD/100 gram biomassa, dan 0,05 ppm H_2S /100 gram biomassa. Keberadaan tumbuhan di limbah cair mengurangi CO_2 selama proses fotosintesis dan peningkatan DO air membuat kondisi aerob di limbah cair yang berakibat pada pengurangan BOD dan COD (Sheena dan Harsha 2018). Penelitian yang dilakukan Nuraini dan Felani (2015)

juga menunjukkan bahwa penggunaan tumbuhan pada remediasi limbah cair tapioka dapat menurunkan kadar COD, BOD dan TSS. Tumbuhan berkontribusi dalam menghilangkan komponen organik sebagaimana proses degradasi materi organik oleh mikrobia (Zimmo et al. 2005).

Karbohidrat dihidrolisis menjadi gula dalam proses fermentasi bioetanol dan diuraikan menjadi senyawa sederhana seperti, asam asetat (asam etanoat), asam propionat dan etil alkohol oleh bakteri. Pembentukan asam asetat terjadi melalui fermentasi glukosa menjadi etil alkohol, dilanjutkan oksidasi alkohol menjadi asam asetat. *Pseudomonas aeruginosa* mampu mengoksidasi glukosa (Jawetz 2010) yang banyak terkandung dalam limbah bioetanol (Nurcahyani 2015), sehingga bahan pencemar menjadi terurai. Materi organik dalam limbah cair bioetanol menjadi sumber nutrisi bagi mikroba yang kemudian mengubahnya menjadi senyawa lebih sederhana (Tangahu et al. 2019).

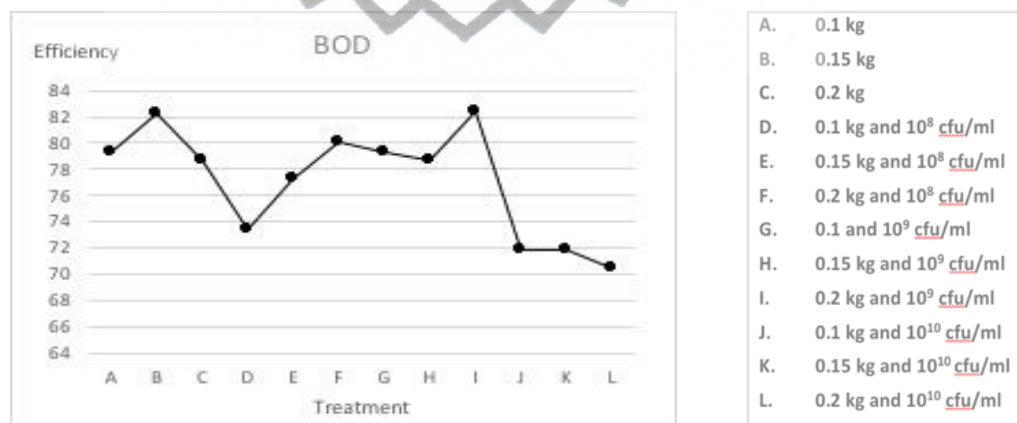
Peneliti lain juga mengkonfirmasi bahwa pengurangan COD dapat disebabkan oleh oksidasi materi organik pada sistem lahan basah yang dapat menyediakan energi bagi metabolisme mikroba. Reduksi komponen organik berlangsung melalui proses dekomposisi biologis oleh mikroorganisme. Pengurangan nilai COD disebabkan oleh pertumbuhan mikroorganisme di zona akar tumbuhan. Prinsip kerja phyto-treatment adalah simbiosis antara tumbuhan dan mikroorganisme dan tumbuhan di media sekitar sistem akar (Hayati 1992). Fitoremediasi dipengaruhi oleh pertumbuhan tumbuhan dan mikroorganisme yang berasosiasi dengan rizosfer (Sheena dan Harsha 2018). Rhizosfer pada tumbuhan menstimulasi aktivitas mikroba dan kepadatan komunitas dengan menyediakan luas permukaan akar untuk pertumbuhan mereka (Tanner 2001; Vymazal dan Kropfelov 2009). Metabolisme di rhizosfer menginduksi penyerapan partikel bahan pencemar melalui dinding sel dan menyimpannya dalam vakuola di sel akar. Proses tersebut termasuk dalam salah satu mekanisme *phytoextraction*. Nwoko (2010) menyatakan bahwa *phytoextraction* merupakan salah satu tahap dalam fitoremediasi, yaitu proses ekstraksi dan akumulasi polutan dari situs tercemar ke bagian-bagian tumbuhan.

Proses fitoremediasi lainnya yang terjadi antara lain *phytoreduction*, *phytodegradation* dan *rhizodegradation*. *Phytoreduction* adalah proses tumbuhan melakukan metabolisme, pengeluaran dan degradasi materi polutan di lingkungan.

Phytoreduction merupakan proses alamiah yang dilakukan tumbuhan sebagai cara untuk mengurangi stress di lingkungan toksik (Suhendrayatna et al. 2012). *Phytodegradation* merupakan proses pemecahan materi organik dengan rantai molekul kompleks oleh tumbuhan menjadi molekul sederhana menggunakan enzim oxygenase, reduktase dan dehalogenase. Molekul sederhana yang telah dihilangkan kebahayaannya kemudian masuk ke jaringan tumbuhan seperti akar, batang dan daun. Molekul hasil degradasi digunakan dalam proses pertumbuhan tumbuhan itu sendiri. *Rhizodegradation* adalah pemecahan bahan organik melalui aktivitas mikroba di rhizosfer yang prosesnya lebih lambat dibanding *phytodegradation*. Kapang, jamur, bakteri dan mikroorganisme lain mencerna substansi organik yang terkandung dalam limbah. Mikroorganisme mendekomposisi materi organik untuk mendapat nutrisi disamping itu tumbuhan juga menghasilkan zat yang mengandung karbon organik seperti gula yang juga dapat digunakan mikroba sebagai nutrisi.

C. Pengurangan BOD

Hasil uji menunjukkan bahwa penurunan kadar BOD tertinggi terjadi pada perlakuan B (0,15 kg) sebanyak 82,23 % dan terendah pada perlakuan L (0,2 kg dan 10^{10} cfu/ml) sebesar 70,48 % (Gambar 5). Uji Anova menunjukkan terdapat perbedaan berarti pada kelompok perlakuan.



Gambar 5. Efektivitas pengurangan BOD dalam limbah bioetanol

Nilai BOD menyatakan jumlah O_2 yang dibutuhkan untuk menguraikan senyawa organik dalam limbah secara biologi. BOD menunjukkan indikasi kasar kandungan organik dalam limbah (Jenie dan Rahayu 1996). Penurunan kadar BOD

terjadi karena terjadi penguraian bahan organik oleh *Azolla microphylla*. Bahan organik menguap dari batang dan daun melalui mekanisme *phytovolatilization* langsung atau dari tanah melalui aktivitas akar yang disebut mekanisme *phytovolatilization* tidak langsung (Limmer dan Burken 2016; Ekta dan Modi 2018). *Phytovolatilization* adalah proses tumbuhan mengubah polutan menjadi komponen gas dan dikeluarkan melalui transpirasi. Bahan pencemar diuraikan menjadi bahan yang lebih aman (tidak berbahaya) dalam bentuk gas yang diuapkan di daun melalui transpirasi. Agen fitoremediasi seperti *Azolla microphylla* menyerap komponen dari lingkungan yang selanjutnya diolah dalam proses metabolisme jaringan untuk mengeluarkan polutan (Alkorta et al. 2004; Tulod et al. 2012; Varghese dan Jacob 2016; Napaldet et al. 2019). Proses remediasi terjadi dengan menggunakan enzim yang terdapat pada tumbuhan itu sendiri (Varghese dan Jacob 2016).

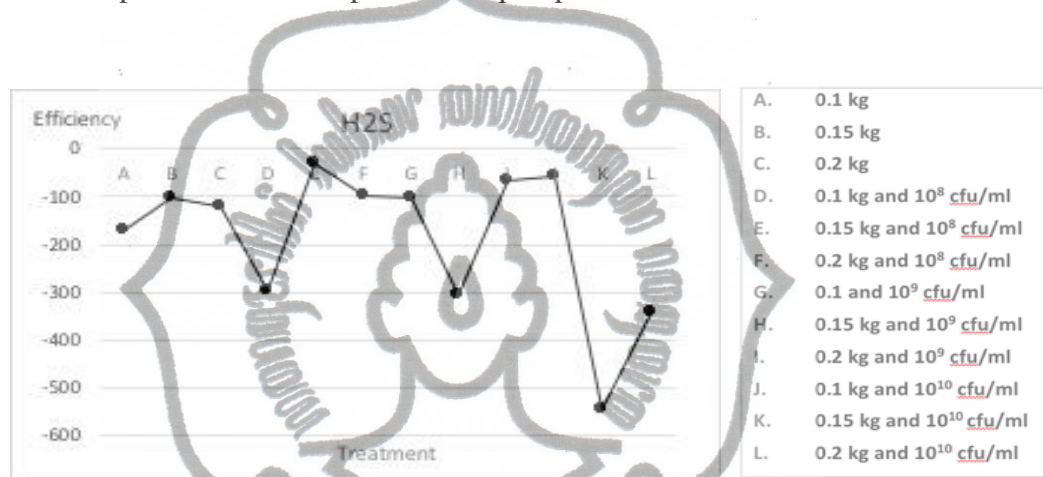
Penurunan BOD juga dikarenakan kebutuhan oksigen bagi mikroorganisme dalam mendekomposisi materi organik mengalami penurunan dengan meningkatnya oksigen terlarut atau *Dissolved Oxygen* (DO) di air karena aktivitas fotosintesis (Morrice et al. 2008) yang menghasilkan oksigen (Effendi, 2003). Bakteri *Pseudomonas aeruginosa* juga berperan dalam penguraian bahan organik limbah cair bioetanol. Mikroorganisme mendekomposisi materi organik untuk mendapat nutrisi (Suhendrayatna et al. 2012). Rahardja et al (2010) menyatakan bakteri *Pseudomonas* mampu menguraikan bahan organik protein dan karbohidrat menjadi senyawa yang lebih sederhana dengan enzim protease, lipase dan amilase.

Puspawati *et al.* (2010) menyatakan bahwa pertumbuhan bakteri fermentatif dapat terus berlangsung apabila karbohidrat, asam amino dan nutrisi lainnya tersedia. Hidrolisis gula menghasilkan asam piruvat, kemudian diubah menjadi asam organik, ester, CO₂, dan asetaldehid (Prativi, 2013). Asetaldehid diubah menjadi etanol dengan enzim alkohol dehidrogenase. Proses fermentasi juga menghasilkan asam etanoat selain etanol dan CO₂. Materi organik yang terkandung dalam limbah menyediakan substrat untuk metabolisme mikroba dan lamanya waktu kulturisasi dapat menurunkan konsentrasi BOD pada limbah cair (Prabu 2007). Pengurangan COD dan BOD banyak diakibatkan oleh aktivitas organisme dan kapabilitas tumbuhan menyerap nutrisi (Dhamayanthie 2000). Hal ini

menunjukkan bahwa pengurangan konsentrasi BOD dipengaruhi oleh aktivitas tumbuhan air dan mikroorganisme yang memecah komponen organik pada proses remediasi.

D. Pengurangan Gas Sulfida

Hasil uji menunjukkan bahwa pengurangan kadar gas H_2S tertinggi terjadi pada perlakuan E (0,15 kg dan 10^8 cfu/ml) sebesar -29% dan terendah pada perlakuan K (0,15 kg dan 10^{10} cfu/ml) sebanyak -544% (Gambar 6). Uji Anova menunjukkan tidak ada perbedaan berarti pada kelompok perlakuan.



Gambar 6. Efektivitas pengurangan Gas H_2S dalam limbah bioetanol

Hidrogen sulfida berasal dari penguraian senyawa yang mengandung belerang oleh bakteri. Gas H_2S bersifat korosif terhadap logam, membentuk gas rumah kaca (SO_2 atau SO_3) jika dibakar dan pada konsentrasi tertentu bersifat racun. Gas H_2S antara lain terdapat di dalam limbah, galian tambang, dan minyak mentah (Qaisar et al. 2007; Alwathan et al. 2013). pH dan oksigen berpengaruh terhadap pembentukan sulfida, yaitu pada $pH < 7$ dapat membentuk gas H_2S , $pH 7-9$ membentuk HS^- dan $pH > 8$ membentuk S^{2-} (Markl, 1999; Sanchez et al. 2005; Qaisar et al. 2007).

Penambahan kadar gas sulfida dalam limbah cair disebabkan bakteri *Pseudomonas aeruginosa* membentuk gas H_2S (Rahmadian et al. 2018). Limbah cair dimanfaatkan oleh mikroorganisme sebagai nutrisi pertumbuhannya (Shah et al. 2013) dan menghasilkan senyawa seperti gas H_2S . Puspawati et al. (2010) menyatakan bahwa pertumbuhan bakteri fermentatif dapat terus berlangsung apabila karbohidrat, asam amino dan nutrisi lainnya tersedia. Karbohidrat

dihidrolisis menjadi gula dalam proses fermentasi bioetanol dan diuraikan menjadi senyawa sederhana seperti, asam asetat (asam etanoat), asam propionat dan etil alkohol oleh bakteri. Komposisi bahan pada proses produksi mengindikasikan limbah bioetanol mengandung banyak zat organik, asetaldehid, asam etanoat, ester dan sedikit sulfida. *Pseudomonas aeruginosa* mampu mengoksidasi bahan organik seperti glukosa (Jawetz 2010) yang banyak terkandung dalam limbah bioetanol (Nurcahyani 2015), sehingga bahan pencemar menjadi terurai.

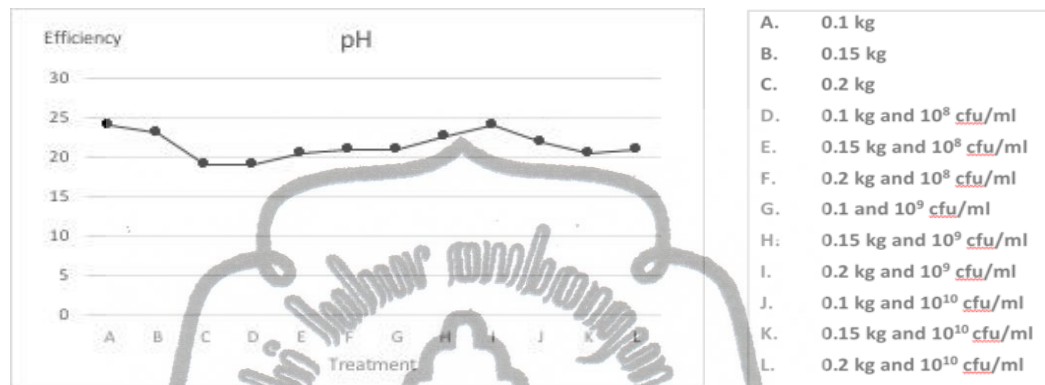
Bakteri pereduksi sulfur dan bakteri metanogen dapat ditambahkan dalam proses remediasi limbah. Bakteri sulfur mereduksi sulfat dan kandungan sulfur lainnya dalam limbah menjadi gas H_2S atau hidrogen sulfida. Bakteri metanogen kemudian mengubah hidrogen menjadi gas metan. Contoh bakteri sulfur, yaitu *Desulfovibrio desulfuricans* dan *Desulfomonas pigra* (Suhartanti, 2006), sedangkan contoh bakteri metanogen antara lain, *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanococcus* (Noor, 2014).

Peningkatan kadar sulfida juga disebabkan penambahan sodium meta bisulfit ($Na_2S_2O_5$) pada proses produksi bioetanol. Sodium meta bisulfit digunakan sebagai nutrisi mikroba pada proses fermentasi. Bakteri pereduksi sulfat memanfaatkan ion sulfur dalam bentuk sulfat, tiosulfat dan sulfit yang kemudian direduksi menjadi sulfida (Arnol et al. 2018). Bakteri pereduksi sulfat lebih banyak ditemukan di bagian bawah sedimen. Jorgensen (1982) melaporkan bahwa jumlah dan aktivitas bakteri pereduksi sulfat meningkat dengan semakin tebalnya lapisan sedimen. Limbah cair yang mengandung padatan tersuspensi maupun terlarut mengalami perubahan fisik, kimia dan hayati yang akan menghasilkan zat beracun atau menciptakan media untuk tumbuhnya bakteri (Rohmah et. al, 2019).

Akar tumbuhan air seperti *Azolla microphylla* dapat mengikat nutrisi dan membentuk sedimentasi polutan (Arora et al. 2018), sehingga meningkatkan aktivitas bakteri pereduksi sulfat dan kadar sulfida. Salah satu mekanisme *phytofiltration* adalah bahan pencemar yang tidak ikut terlepas akan mengalami pelepasan melalui akar dalam bentuk sedimen yang tidak larut dalam air. *Phytofiltration* merupakan proses penyerapan polutan dari situs yang terkontaminasi melalui akar tumbuhan.

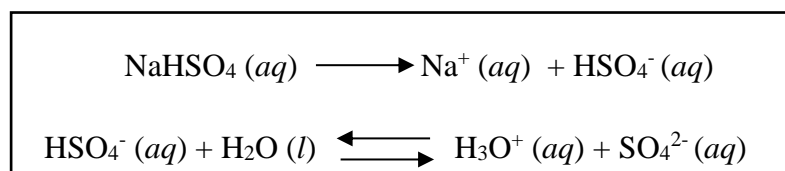
E. Penambahan pH

Hasil uji menunjukkan bahwa kenaikan pH tertinggi terjadi pada perlakuan A (0,1 kg) dan I (0,2 kg dan 10^9 cfu/ml) sebanyak 24,1 % dan terendah pada perlakuan C (0,2 kg) dan F (0,2 kg dan 10^8 cfu/ml) sebesar 18,97 % (Gambar 7). Uji Anova menunjukkan ada perbedaan berarti pada kelompok perlakuan.



Gambar 7. Efektivitas penambahan pH dalam limbah bioetanol

Sifat asam limbah cair bioetanol disebabkan kandungan sodium meta bisulfite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) dan NaHSO_4 yang ditambahkan dalam proses produksi. Penambahan zat tersebut dimaksudkan sebagai nutrisi mikroba pada proses fermentasi (Arimby et al. 2014). Penambahan NaHSO_4 yang merupakan garam elektrolit lemah menyebabkan pH menjadi asam (Sanna et al. 2017). Sifat asam terbentuk karena penguraian molekul pada garam elektrolit lemah terjadi secara tidak sempurna. Ion HSO_4^- hasil disosiasi dari NaHSO_4 akan menghasilkan pH asam bila bereaksi dengan air menyebabkan pH limbah bioetanol cenderung asam (Kurniawati et al. 2015) (Gambar 8).



Gambar 8. Reaksi penguraian NaHSO_4

Kenaikan pH limbah cair setelah perlakuan disebabkan tumbuhan air seperti *Azolla microphylla* dapat meningkatkan pH (Ng dan Chan 2017; Qin et al. 2016). Peningkatan pH terjadi karena kemampuan *Azolla microphylla* dalam mengikat asam yang berada dalam limbah cair. Proses pengikatan asam dalam limbah terjadi pada tahap *phytoextraction* dan *phytostabilization*. ion H^+ diikat melalui dinding sel dan diakumulasi di organ aerial seperti vakuola dan trikoma pada tahap *phytoextraction*. *Phytoextraction* merupakan proses ekstraksi dan akumulasi polutan dengan konsentrasi tinggi dari situs tercemar ke bagian tumbuhan (Sabir et. al, 2014). *Phytostabilization* adalah proses tumbuhan menstabilkan polutan dan mengurangi kebayaannya untuk kemudian ditranslokasi ke batang.

Peningkatan pH terjadi karena proses fotosintesis oleh tumbuhan. Pengambilan ion H^+ dalam air untuk proses fotosintesis menyebabkan kandungan ion H^+ menjadi berkurang sehingga pH air menjadi meningkat. Kenaikan pH juga berkorelasi positif dengan penurunan kadar BOD dan COD (Ugya et al. 2019).

Peningkatan pH turut disebabkan penguraian bahan organik dalam air oleh mikroorganisme. Proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisme akan menghasilkan ion OH^- sehingga menunjang peningkatan pH. Limbah bioetanol kaya akan bahan organik karena proses pembuatannya melalui fermentasi dengan bahan baku tetes tebu yang tinggi karbohidrat. Puspawati *et al.* (2010) menyatakan bahwa karbohidrat dihidrolisis menjadi gula dalam proses fermentasi. Hidrolisis gula menghasilkan asam piruvat, lalu diubah menjadi asam organik, ester, CO_2 , dan asetaldehid (Prativi, 2013). Hal ini sesuai dengan pernyataan Nurcahyani (2015) yang menyatakan bahwa limbah cair bioetanol mengandung banyak bahan organik, yaitu sebesar 1,3285 %.

Aktivitas mikroorganisme mendekomposisi materi organik dalam limbah juga berhubungan dengan aktivitas fotosintesis yang mengambil CO_2 terlarut dalam bentuk H_2CO_3 sehingga berakibat pada peningkatan pH (Morrice et al. 2008). Disamping itu, bakteri *Pseudomonas sp* menghasilkan suasana alkalis atau basa (Sulistiyaningsih 2010; Rahmadian et al. 2018).

Berdasarkan metode Borda, perlakuan yang paling baik dalam menurunkan bahan pencemar di limbah cair bioetanol adalah 0,2 kg biomassa dengan kepadatan bakteri 10^{10} . Perlakuan dengan biomassa dan kepadatan bakteri tertinggi

memberikan hasil terbaik dalam penurunan kadar polutan limbah bioetanol. Semakin besar biomassa, maka semakin banyak penguraian bahan organik oleh tumbuhan. Perlakuan berupa kombinasi tumbuhan dan bakteri dalam bioremediasi limbah menunjukkan hasil yang lebih baik. Tumbuhan dapat bekerjasama dengan mikroorganisme dalam pengolahan limbah di berbagai media (Etim 2012). Penelitian Germaine et al. (2015) menunjukkan bahwa tumbuhan dan mikroorganisme berasosiasi untuk reklamasi lahan yang tercemar bahan kontaminan organik. Interaksi antara tumbuhan dan bakteri di area yang terkontaminasi limbah dapat meningkatkan pertumbuhan tumbuhan dan efektivitas proses fitoremediasi (Khan et al. 2015; Furini et al. 2015).

Adanya tumbuhan air berkontribusi pada pertumbuhan mikroba yang akan mendegradasi komponen organik (Qu et al. 2017, Riaz et al. 2017). Tumbuhan menyediakan nutrisi bagi mikroba di rhizosfer yang meningkatkan proses degradasi limbah (Vymazal 2007). Pertumbuhan *Azolla microphylla* juga dapat diinduksi dengan rhizobakteri *Pseudomonas sp.* yang berperan sebagai biofertilizer dan biostimulan. Fosfat merupakan unsur makro yang sangat dibutuhkan untuk pertumbuhan *Azolla microphylla* (Utama et al. 2015).

F. Nilai ekonomis *Azolla microphylla*

Azolla microphylla selain digunakan dalam pengolahan limbah juga memiliki nilai ekonomis, sehingga banyak dibudidayakan. *Azolla sp.* mudah dikembangbiakkan dan laju pertumbuhannya cepat, yaitu 0,144-0,890 gram per hari di lahan (Vidhya et al. 2014). *Azolla microphylla* dapat dimanfaatkan sebagai pakan ternak organik konsumsi sendiri, dijual dalam bentuk segar maupun dijual dalam bentuk pelet.

a. *Azolla microphylla* sebagai pakan ternak organik konsumsi sendiri

Pemanfaatan *Azolla microphylla* sebagai pakan ternak organik akan meningkatkan kualitas ternak sebagai produk organik dan mempercepat pertumbuhan hewan ternak. Raras et. al (2017) menyatakan bahwa pemberian *Azolla microphylla* pada ayam kampung meningkatkan konsumsi pakan dan bobot badan. *Azolla microphylla* praktis untuk

digunakan sebagai pakan ternak organik dan kaya nutrisi karena mengandung protein yang cukup tinggi, yaitu 13-30% berat kering (Sudadi dan Suryono, 2016; Wardani et. al, 2017). Hal inilah yang mendorong pemanfaatan *Azolla microphylla* sebagai pakan alternatif, sehingga dapat mengurangi biaya pakan.

Biaya pakan yang dapat dihemat setiap harinya berkisar antara 10-50 ribu per hari. Nominal tersebut jika dikalikan 30 hari (1 bulan) maka diperoleh angka 300 ribu hingga 1,5 juta rupiah biaya yang dapat dihemat dalam satu bulan. Menurut responden, penggunaan *Azolla microphylla* menghemat biaya pakan hingga 50% dari pakan pabrikan yang dihargai 8-10 ribu rupiah per kg dengan kebutuhan pakan harian 1-30 kg per hari.

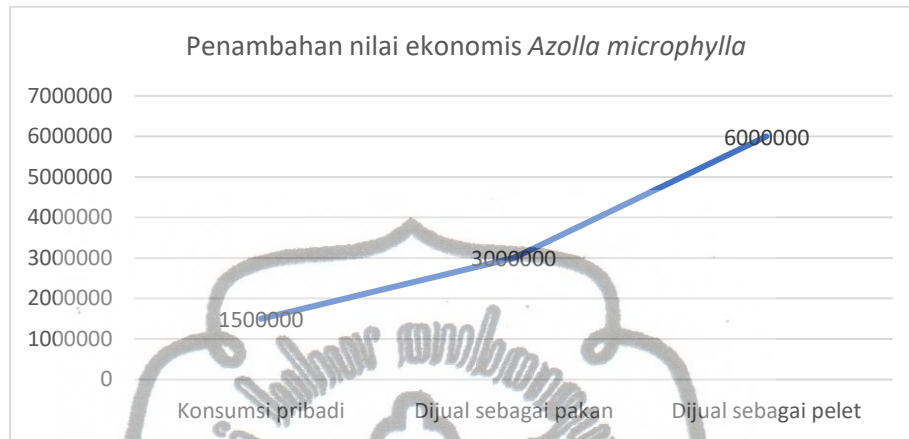
b. *Azolla microphylla* dijual dalam bentuk segar

Azolla microphylla selain digunakan untuk konsumsi pakan ternak pribadi, dapat juga dijual dalam bentuk segar sebagai bibit budidaya *Azolla* ataupun pakan ternak peternak lain. 45,5% responden yang menjual *Azolla microphylla* menyatakan bahwa dalam sebulan rata-rata mereka menjual 20-500 kg *Azolla* dengan harga jual bervariasi, mulai dari 5 ribu sampai 30 ribu per kg. Berdasarkan uraian tersebut diketahui bahwa pendapatan tiap bulan (30 hari) yang diperoleh dari penjualan rata-rata 100 kg *Azolla microphylla* adalah 500 ribu hingga 3 juta rupiah. Hasil ini lebih besar disbanding saat *Azolla* dijadikan pakan ternak konsumsi pribadi.

c. *Azolla microphylla* dijual dalam bentuk pelet

Nilai tambah *Azolla microphylla* meningkat dengan diolah menjadi pelet untuk kemudian dijual sebagai pakan ternak. Pelet organik ini biasanya digunakan sebagai pakan ikan dan kelinci yang dijual dengan harga 8 – 10 ribu rupiah per kg. Rata-rata kebutuhan pakan ternak adalah 1-30 kg per hari. Jika penjual dapat menjual 10 sampai 20 kg per hari, maka dalam satu bulan (30 hari) pendapatan yang diperoleh dari penjualan pelet ialah 2,4 juta hingga 6 juta rupiah. Nilai ini paling besar dibandingkan jika *Azolla microphylla* digunakan untuk pakan ternak konsumsi sendiri ataupun dijual dalam bentuk segar. Namun demikian, keterampilan dan teknologi dibutuhkan dalam pembuatan pelet pakan ikan dan ternak.

Berdasarkan uraian diatas, dibuat grafik yang menunjukkan pertambahan nilai ekonomis *Azolla microphylla* jika dijadikan pakan ternak konsumsi pribadi, dijual dalam bentuk segar maupun dijual dalam bentuk pelet (Gambar 9).



Gambar 9. Penambahan nilai ekonomis *Azolla microphylla*

Penelitian Noferdiman (2018) menunjukkan bahwa penggunaan ransum yang mengandung *Azolla microphylla* meningkatkan pendapatan kotor yang diperoleh. Gambaran peningkatan keuntungan yang diperoleh yaitu, apabila harga pakan dapat ditekan 2% maka keuntungan peternak meningkat hingga 8% (Behrends, 1990) karena berkurangnya biaya produksi.

Azolla microphylla selain dapat menyerap kandungan limbah, biomasanya dapat dimanfaatkan sebagai pupuk hijau (Maulana dan Haniswita 2016; Lestari 2018; Soman et al. 2018; Lestari et al. 2019; Rohmah et al. 2019) pada budidaya padi (Syamsiyah et al. 2016; Setiawati et al. 2018). *Azolla microphylla* digunakan sebagai pupuk hijau karena dapat memfiksasi N_2 dari udara bersimbiosis dengan *Anabaena azollae*, sehingga meningkatkan suplai unsur N dalam tanah (Carrapico 2017). *Azolla microphylla* mengandung banyak unsur hara yang dibutuhkan tumbuhan meliputi C 42,95%, N 3,94%, P 1,21%, K 4,88%, Mn, logam Cu, dan logam Zn (Lestari et al. 2019). Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan tumbuhan seperti *Azolla microphylla* termasuk *eco-friendly*, *sustainable* dan *efficient technologies* dalam proses pengolahan limbah (Noorjahan CM, Jamuna S 2015; Sharma A, Sachdeva S 2015; Limmer dan Burken 2016; Varghese dan Jacob 2016) terutama pada limbah bioetanol.

G. Partisipasi Masyarakat dalam Pengelolaan Limbah

Minimnya pengetahuan mengenai pengolahan limbah menjadi penyebab rendahnya kesadaran dan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan limbah. Pengolahan limbah dengan *Azolla microphylla* dan *Pseudomonas aeruginosa* menjadi salah satu solusi yang dinilai mampu mengolah limbah secara efektif dengan biaya terjangkau. *Azolla microphylla* selain digunakan dalam pengolahan limbah juga banyak dimanfaatkan sebagai pakan ternak konsumsi sendiri, dijual dalam bentuk segar maupun dijual dalam bentuk pelet. *Azolla microphylla* dapat dijual oleh pengrajin bioetanol sebagai tambahan biaya operasional pengolahan limbah ataupun diberikan kepada petani dan peternak sebagai kompensasi. Pemberian pupuk hijau dan pakan ternak organik dari *Azolla microphylla* dapat mengurangi biaya produksi, sehingga meningkatkan pendapatan petani dan peternak.

Manfaat yang diperoleh dari *Azolla microphylla* meningkatkan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan limbah. Partisipasi seseorang semestinya didasarkan atas kesadaran sendiri, keyakinan serta kemauan karena adanya kebermanfaatan bagi dirinya. Masyarakat menjadi tidak terpaksa dan sukarela dalam mengolah limbah maupun memelihara unit instalasi pengolahan limbah.

Pengolahan limbah tidak hanya menghasilkan limbah yang aman dibuang ke lingkungan, tetapi juga memiliki nilai ekonomis dengan budidaya *Azolla* sebagai bahan baku pengolahan limbah. Masyarakat lebih tertarik untuk membudidayakan *Azolla*, sehingga pengelolaan limbah dapat lebih mudah berjalan karena ketersediaan bahan. Pengelolaan limbah tidak hanya berpusat pada teknologi dan bangunan fisik unit instalasi pengolahan limbah, melainkan juga masyarakat sebagai pelaku maupun partisipan.

Partisipasi masyarakat sangat dibutuhkan dalam pengelolaan limbah. Masyarakat yang aktif terlibat dalam pembangunan dan pengelolaan limbah bioetanol meningkatkan kesadaran dan tanggung jawab masyarakat dalam pengelolaan limbah. Penggunaan *Azolla microphylla* yang merupakan sumber daya lokal berbasis masyarakat menyokong keberlanjutan program-program yang direncanakan dalam pengelolaan limbah.