



Analisis pengaruh pH dan suhu pada desinfeksi air menggunakan *microbubble* dan karbondioksida bertekanan

The effect of pH and temperature on disinfection process using microbubble and pressurized carbon dioxide

Evi Kurniati^a, Vo T. Huy^b, Fajri Anugroho^a, Akhmad A. Sulianto^a, Nadia Amalia^a, Amira R. Nadhifa^a

^aProgram Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Jl. Veteran, Malang, 65145, Indonesia [+62-341-580106]

^bDepartment of Urban Infrastructural Engineering, Mien Trung University of Civil Engineering, Tuy Hòa, Phú Yên, Vietnam [+84-257-3823371]

Article Info:

Received: 08 - 12 - 2019

Accepted: 06 - 06 - 2020

Keywords:

Disinfection, *Escherichia coli*, pressurized carbon dioxide

Corresponding Author:

Evi Kurniati

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya;

Tel. +62-341-580106

Email:

evikurniati@ub.ac.id

Abstract. Addressing the problem of surface water biological criteria due to pathogen bacteria such as *Escherichia coli* (*E. coli*). *E. coli* disinfection using pressurized microbubble carbon dioxide (CO_2) began to be developed as an alternative disinfection method. This study aims to examine the effect of pH and temperature differences on *E. coli* disinfection using a pressurized CO_2 microbubble and assess the effectiveness of pH in *E. coli* disinfection using a pressurized CO_2 microbubble. Experiments were carried out two stages i.e. variations of initial pH (4, 7 and 9) continued with variation of initial temperature of water (20, 25, 30, 35, and 40°C), operated for 25 minutes in triplicate. The reactor pressure was 0.2 MPa. The calculation of *E. coli* was using Total Plate Count (TPC). Microbicide effect reacted most effectively on treatment with pH 4 in amount of 73% decreasing. The average temperature tended to increase, while pH and number of *E. coli* decreased. The most effective temperature for disinfecting *E. coli* was 40°C with a temperature and final pH at 55°C and 5.0. The amount of *E. coli* which was originally 1.5×10^6 CFU/ml, reduced to 0.2×10^6 CFU/ml and the effectiveness of disinfection was 86.7%.

How to cite (CSE Style 8th Edition):

Kurniati E, Huy VT, Anugroho F, Sulianto AA, Amalia N, Nadhifa AR. 2020. Analisis pengaruh pH dan suhu pada desinfeksi air menggunakan *microbubble* dan karbondioksida bertekanan. JPSL 10(2): 247-256. <http://dx.doi.org/10.29244/jpsl.10.2.247-256>.

PENDAHULUAN

Ketersediaan air bersih yang layak minum menjadi salah satu tujuan dalam SDGs. Bagi daerah yang mengalami krisis air, keberadaan kualitas air yang aman untuk dikonsumsi masih menjadi persoalan tersendiri (Estika *et al.*, 2017). Air permukaan merupakan sumber yang paling tersedia untuk pemenuhan air minum di kota besar (Djoharam *et al.*, 2018), namun secara kualitas seringkali sangat kurang memenuhi syarat sehingga membutuhkan upaya yang besar untuk dapat memanfaatkannya. Diantara kualitas air yang kurang memenuhi adalah pada parameter biologis. Bakteri *Escherichia coli* adalah bakteri yang banyak digunakan sebagai indikator sanitasi karena bakteri ini adalah bakteri komensal pada usus manusia. Bakteri patogen *E. coli* dapat tumbuh pada suhu 7 hingga 44°C dan tumbuh lebih optimal pada suhu 37°C. pH optimum 7 hingga 7.5, dengan pH minimum 4 dan pH maksimum 9. Selain itu, *E. coli* dapat hidup di tempat lembab, relatif sensitif terhadap

panas, dan akan mati dengan pasteurisasi atau proses pemasakan makanan dengan suhu yang relatif tinggi (Tangahu, 2014).

Desinfeksi banyak digunakan untuk menghilangkan patogen dan mencegah terjadinya berbagai penyakit yang timbul akibat air yang tercemar (*waterborne diseases*). Desinfeksi merupakan tindakan membunuh mikroorganisme selain bakteri berspora (Pfafflin dan Ziegler, 2006). Desinfeksi umumnya dilakukan dengan cara fisik maupun kimia terhadap medium yang bukan merupakan makhluk hidup. Pemilihan metode desinfeksi bergantung pada faktor-faktor seperti efikasi proses terhadap penghilangan patogen, tingkat akurasi *monitoring* dan kontrol proses, kemudahan penanganan residu proses, estetika hasil proses, dan ketersediaan dan adoptivitas teknologi. Dalam perkembangannya, desinfeksi air yang paling umum dilakukan untuk menghilangkan *E. coli* yaitu menggunakan desinfektan Klorin dan Kloramin (klorinasi), Ozon (ozonasi), Iodin, Bromin, *Ferrate*, Hidrogen peroksida, radiasi pengion, Kalium Permanganat, Silver, dan sinar ultraviolet (National Research Council, 1986). Namun, metode desinfeksi konvensional tersebut memiliki beberapa kekurangan diantaranya menghasilkan senyawa yang karsinogenik dan mutagenik berupa *Disinfection by Product* (DBP) ataupun aplikasi yang mahal (Komala, 2013).

Desinfeksi *E. coli* menggunakan karbondioksida (CO₂) bertekanan mulai dikembangkan sebagai metode desinfeksi alternatif oleh Kobayashi *et al.* (2009) dimana tekanan superkritis hingga 10 MPa dan suhu tinggi (>55°C) mampu menginaktivasi *E. coli* dan Koliform. Menurut Vo *et al.* (2013), desinfeksi menggunakan *microbubbles* CO₂ bertekanan, berpotensi menjadi teknologi alternatif yang menjanjikan dan dapat menonaktifkan patogen secara efektif. Karbondioksida bertekanan telah banyak digunakan dalam proses pengawetan makanan dan sterilisasi. Aplikasi CO₂ bertekanan lebih efektif di media dengan kandungan air yang tinggi. Selain itu, kelarutan CO₂ dalam air menjadi lebih mudah dan cepat jika didukung oleh sistem tekanan. Dengan menggunakan teknik *microbubble*, dinilai dapat memungkinkan efisiensi kontak yang tinggi antara air dan gas.

Tekanan, suhu dan pH merupakan faktor penting dalam proses desinfeksi. Karakteristik *E. coli* memiliki daur hidup yang sangat dipengaruhi oleh suhu (Anggraeni, 2012). Penggunaan suhu tinggi dinilai efektif untuk melemahkan ataupun mematikan bakteri dengan cara mengkoagulasikan protein-proteinya. Namun, perlakuan suhu tinggi membutuhkan energi yang besar. Peningkatan suhu juga membuat kelarutan CO₂ dalam air menurun. Sedangkan tekanan mampu meningkatkan kelarutan CO₂ di air. Sehingga, peningkatan suhu dan tekanan perlu dipertimbangkan agar proses desinfeksi dapat berjalan dengan optimal (Kobayashi *et al.*, 2009). Derajat keasaman juga merupakan faktor pembatas dalam pertumbuhan *E. coli* (Lee *et al.*, 2015). Sehingga diperlukan observasi pH untuk menemukan pH awal yang paling efektif dalam proses disinfeksi *E. coli* menggunakan *microbubble* ini. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *microbubble* dan CO₂ bertekanan pada disinfeksi *E. coli* pada pH awal dan suhu yang berbeda-beda. Dengan metode *microbubble* CO₂ bertekanan ini diharapkan dapat menghasilkan alat disinfeksi alternatif yang mudah dan efisien untuk mereduksi *E. coli* di air tanpa meninggalkan limbah berupa senyawa eksek yang karsinogenik dan mutagenik.

METODE

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Maret hingga Juni 2019 di Laboratorium Teknik Sumber Daya Alam dan Lingkungan dan pengujian sampel dilakukan di Laboratorium Biondustri, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang.

Metode Pengumpulan Data

Penelitian merupakan penelitian eksperimental laboratorium. Alat disinfeksi yang digunakan berupa suatu reaktor *stainless steel* yang di dalamnya terdapat *difuser* untuk membentuk *microbubble* dan selama operasi dialiri CO₂ dari tabung gas CO₂, tekanan dalam reaktor dijaga pada 0.2 MPa (Gambar 1). Alat tersebut

dibangun menggunakan dasar rancangan sesuai penelitian Kobayashi *et al.* (2007a; 2007b), dimodifikasi oleh Imai dan Dang (2017) dan diadopsi untuk penelitian ini. Alat dilengkapi dengan *heater* untuk mengkondisikan larutan awal, sensor suhu yang berfungsi mengukur suhu, termokopel untuk mengatur suhu, dan pompa untuk sirkulasi larutan. Bakteri *E. coli* diperoleh dalam bentuk *slant* dari Laboratorium Biomedis, Fakultas Kedokteran, Universitas Brawijaya. Bakteri diremajakan terlebih dahulu sebelum digunakan untuk penelitian. Media pembiakan *E. coli* menggunakan *Buffered Peptone Water* (BPW). Seluruh rangkaian pengamatan dan perlakuan mikroba dilaksanakan secara aseptis. Sterilisasi peralatan menggunakan *autoclave* pada suhu 121°C, 15 menit.



Gambar 1 Rangkaian alat desinfeksi *microbubble* dan CO₂ bertekanan

Pembuatan larutan induk *E. coli* yang digunakan sebagai bahan perlakuan adalah sebagai berikut: 1 ose *E. coli* dilarutkan ke dalam 1000 ml BPW steril dan diaduk menggunakan vortex. Campuran kemudian dimasukkan ke dalam inkubator pada suhu 37°C selama 24 jam dan dihitung jumlah koloninya. Campuran air dan larutan induk *E. coli* untuk proses desinfeksi memiliki perbandingan 70:1. *Hydrobatt* yang digunakan sebanyak 4000 ml, sehingga volume larutan induk *E. coli* yang dibutuhkan adalah sebanyak 57 ml untuk mencapai jumlah koloni awal 1.5x10⁶ CFU/ml. Pengkondisian pH dilakukan pada *Hydrobatt* menggunakan HCl steril sebelum ditambahkan larutan induk *E. coli*. Suhu awal yang ditetapkan pada suhu 25°C yakni merepresentasikan suhu air di lingkungan. Operasional alat berlangsung selama 25 menit, setiap menit diambil sampel sebanyak 50 ml untuk pengamatan pH serta pada menit ke-25 untuk pengamatan jumlah *E. coli*. Pada pelaksanaan dengan variasi suhu, pH diatur pada pH netral, yaitu pH 7. *Heater* diatur pada suhu 20°C. Gas CO₂ dimasukkan ke dalam reaktor dan *pressure meter* diamati hingga mencapai tekanan 0.2 MPa kemudian pompa dinyalakan. Suhu dan pH diukur setiap menit. Percobaan dilakukan selama 25 menit. Sampel diambil sebanyak 50 ml dari *discharge valve* dan disimpan didalam kulkas. Air dalam reaktor dikeluarkan dan reaktor dibersihkan dengan alkohol 70%. Dilakukan tahap yang sama untuk pH maupun suhu 25, 30, 35, dan 40°C dengan 3 kali ulangan. Perhitungan jumlah koloni menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) dengan media *Nutrient Agar* (NA). Untuk menghitung efektivitas desinfeksi pada tiap variasi suhu dan pH digunakan persamaan:

$$\text{Efektivitas} = \left[\frac{\text{jumlah } E. coli \text{ awal} - \text{jumlah } E. coli \text{ akhir}}{\text{jumlah } E. coli \text{ awal}} \right] \times 100\%$$

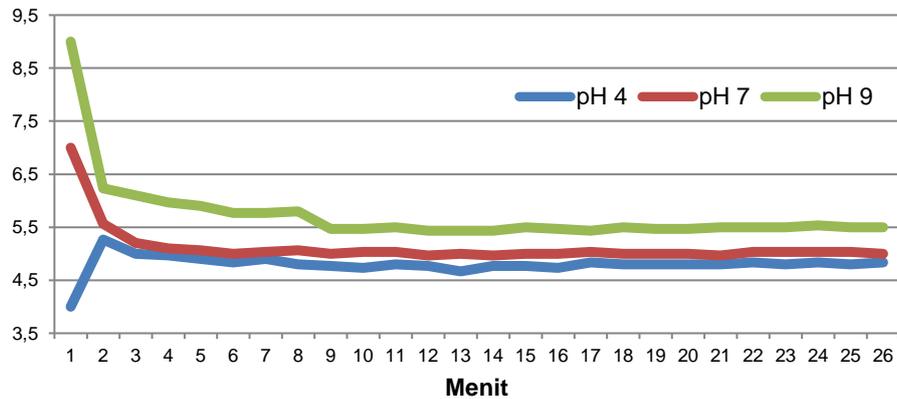
Metode Analisis Data

Metode analisis data dilakukan secara kuantitatif menggunakan analisis diskriptif berupa tampilan data serta pendekatan pengolahan data melalui metode statistik menggunakan *One way ANOVA*.

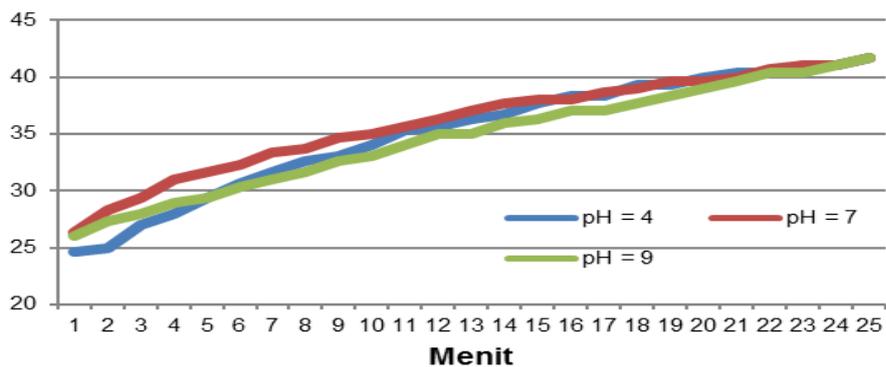
HASIL DAN PEMBAHASAN

Perubahan pH Selama Proses

Selama pengoperasian alat, terdapat perubahan pH dan suhu larutan. Proses desinfeksi yang berlangsung cenderung mengkondisikan pH operasional pada rentang 4.8 hingga 5.5. Larutan dengan pH awal 4 akan meningkat dan stabil pada pH 4.8 sejak menit ke-8 (Gambar 2 dan Gambar 3). Rentang pH tersebut masih berada pada rentang pH yang dapat ditoleransi oleh bakteri *E. coli*.



Gambar 2 Hubungan pH dan waktu pada perlakuan pH



Gambar 3 Hubungan suhu ($^{\circ}\text{C}$) dan waktu pada perlakuan pH

Selama proses desinfeksi nilai rata-rata pH cenderung mengalami penurunan. Menurut Zhang *et al.* (2006), penurunan nilai pH disebabkan oleh karbondioksida (CO_2) yang larut di dalam air (H_2O) akan menjadi asam karena pembentukan dan disosiasi asam karbonat (H_2CO_3), yang membebaskan ion H^+ . Hal ini kemudian dapat menurunkan nilai pH. Berdasarkan Barat (2011), karbondioksida yang terlarut dalam air membentuk beberapa kesetimbangan. Pada dasarnya keberadaan karbondioksida di air terdapat dalam bentuk karbondioksida bebas (CO_2), asam karbonat (H_2CO_3), ion bikarbonat (HCO_3^-), dan ion karbonat (CO_3^{2-}). Asam karbonat yang terurai akan membentuk beberapa ion, yaitu ion bikarbonat (HCO_3^-), ion karbonat (CO_3^{2-}), dan ion hidrogen (H^+). Pada penelitian yang dilakukan oleh Huy (2014), dijelaskan bahwa ion-ion yang terurai dari H_2CO_3 memiliki daya tarik yang kuat terhadap molekul yang berada di dalam air. Ion H_3O^+ yang terurai karena suhu dan tekanan, bereaksi dengan HCO_3^- dan membentuk asam karbonat yang bersifat asam lemah sehingga nilai pH yang ada pada larutan juga akan mengikuti asam lemah yang lebih dominan.

Takahashi (2007) menyatakan bahwa pada larutan dengan kondisi asam, *microbubble* juga dapat menghasilkan ion hidroksida (OH^-) yang bersifat basa sehingga nilai pH larutan dapat menjadi naik. Menurut Wang (2016), larutan dengan suhu tinggi mengandung H_2CO_3 yang terbentuk lebih banyak apabila nilai CO_2 yang masuk stabil. Pada penelitian, nilai suhu yang terus meningkat dan CO_2 ditentukan pada tekanan 0.2 MPa

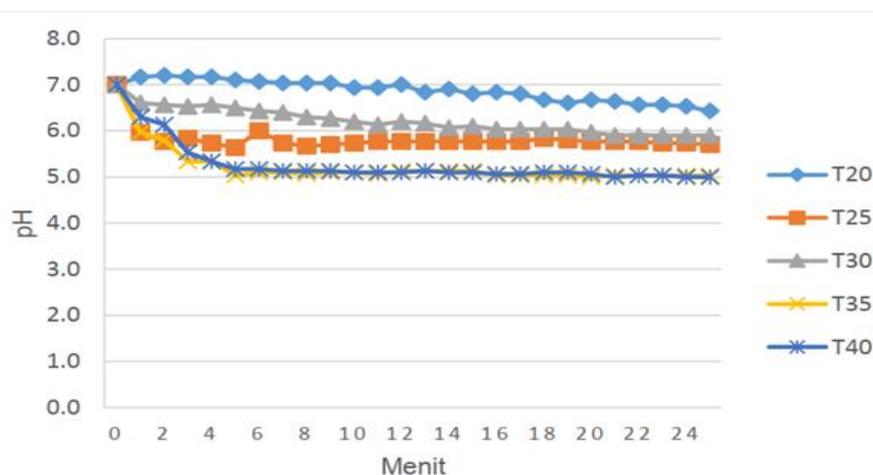
selama penelitian. Perlakuan tersebut dapat memproduksi H_2CO_3 yang lebih banyak pula, sehingga pH larutan juga dapat berubah mengikuti kondisi asam dan basa larutan. Hal-hal tersebut menyebabkan keadaan asam pada sampel pH 4 memiliki pH akhir yang lebih tinggi yaitu 4.8.

Berdasarkan Abuzar (2012), saat gas CO_2 kontak dengan air terjadi peristiwa transfer gas yang menyebabkan berpindahnya suatu senyawa dari fase gas ke fase cair. Mekanisme transfer gas ini terjadi secara difusi. Pada percobaan yang dilakukan Serin (2012), pada tekanan 0.2 MPa gas CO_2 masih bisa terlarut dalam air hingga suhu $100^\circ C$. Pada penelitian ini, gas CO_2 dimasukkan ke dalam reaktor dalam sistem tertutup. Molekul-molekul gas dalam suatu ruangan yang dibatasi dinding, bergerak ke segala arah dengan tidak beraturan. Tabrakan molekul ke dinding ruangan tersebut terjadi secara terus menerus, yang menimbulkan efek tekanan gas di dalam ruangan tersebut. Menurut Xue (2014), *microbubble* dapat mempercepat kelarutan gas CO_2 ke dalam air. Berdasarkan Susana (1988), saat air mengandung gelembung, maka gas CO_2 akan masuk ke dalam gelembung tersebut sehingga menimbulkan tekanan parsial CO_2 yang sebanding dengan tekanan parsial yang ditimbulkan oleh air.

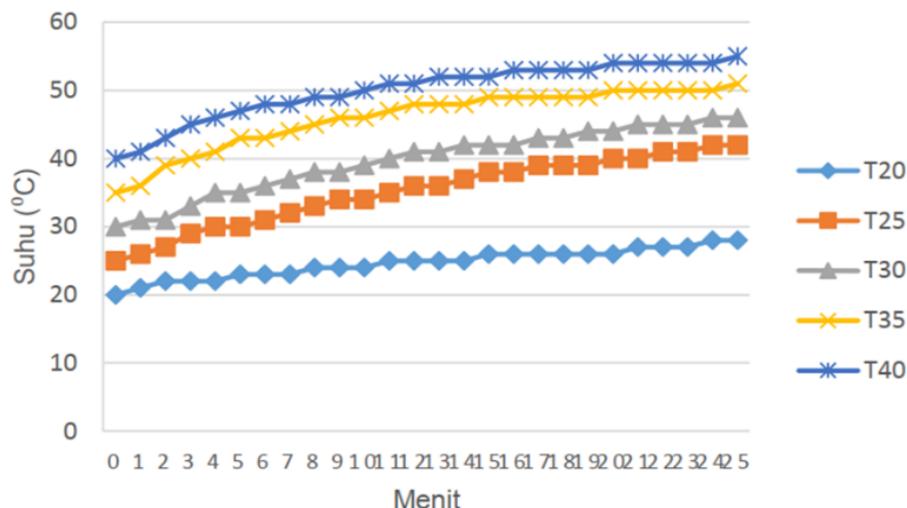
Tekanan parsial yang ditimbulkan oleh air ini akan semakin tinggi dengan semakin rendahnya pH air. Gas CO_2 yang masuk ke dalam reaktor didasarkan pada batas tekanan reaktor sebesar 0.2 MPa atau 2 kg/cm^2 . Menurut Tangahu (2014), pH optimum untuk pertumbuhan *E. coli* adalah 7 hingga 7.5, dengan pH minimum 4 dan pH maksimum 9. Sedangkan berdasarkan hasil penelitian, pH terendah yang terukur adalah 5. Konstannya nilai pH ini juga terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh Huy (2014), penambahan CO_2 pada air dengan tekanan 0.7 MPa dapat menurunkan pH pada menit 1 dari 8.0 menjadi hampir 5.0 dan terus turun hingga menit ke-5 menjadi 4.5, lalu konstan dari menit ke-10 hingga 25 pada nilai 4.7. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa keberadaan *microbubble* dapat menggantikan fungsi tekanan dalam memberi efek meningkatkan kelarutan CO_2 . Sehingga operasional alat desinfeksi tidak memerlukan tekanan tinggi menyebabkan biaya pembuatan reaktornya menjadi lebih rendah. Baku mutu efluen untuk dapat dibuang ke lingkungan adalah pH 6 hingga 9, maka suhu awal larutan yang sebaiknya digunakan adalah pada suhu $25^\circ C$.

Perubahan Suhu Selama Proses

Pada perlakuan variasi suhu, suhu awal yang tinggi cenderung pada pH operasional rendah (pH 5), sedangkan suhu awal rendah cenderung berlangsung pada pH yang lebih tinggi (pH 6-7), seperti pada Gambar 4. Selama proses desinfeksi 25 menit, suhu terus mengalami peningkatan pada perlakuan suhu awal (Gambar 5). Hal ini diduga merupakan efek *nozzle microbubble* dan pompa sirkulasi. *Nozzle microbubble* berfungsi untuk menghasilkan gelembung udara berukuran mikro dalam air. Mekanisme fisik tersebut ternyata memberi efek peningkatan suhu larutan. Menurut Anggraeni (2012), hancurnya *microbubble* dalam air dapat meningkatkan suhu dan tekanan.



Gambar 4 Perubahan pH selama proses desinfeksi pada perlakuan suhu



Gambar 5 Perubahan suhu selama proses pada perlakuan suhu awal

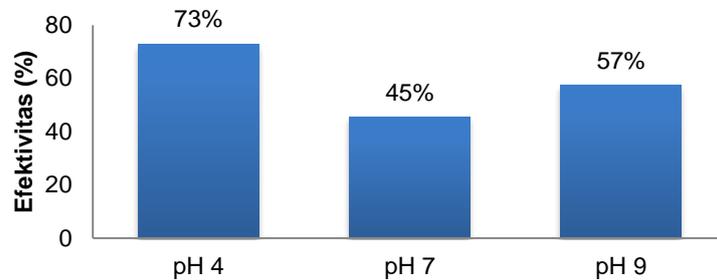
Hal ini sesuai dengan teori *hotspot* yang menyatakan bahwa pecahnya *microbubble* menyebabkan kompresi dari gas dan uap di dalam gelembung terjadi secara adiabatik. Sedangkan pompa dapat mengubah energi listrik menjadi energi kinetik dalam bentuk putaran *impeller* yang menyebabkan peningkatan kecepatan fluida yang mengalir di dalamnya. Selain itu, juga terdapat kerja yang merupakan hasil samping dari efek mekanis yang terjadi di dalam pompa. Kerja tersebut merupakan pemanasan yang terjadi baik pada fluida yang mengalir di dalam pompa maupun keadaan sekitarnya. Proses inilah yang menyebabkan terjadinya gesekan yang amat besar antara fluida sehingga suhu air mengalami peningkatan. Suhu juga dapat semakin meningkat karena air terus disirkulasi, sehingga tidak dimungkinkan terjadinya perpindahan panas yang dapat menurunkan suhu air tersebut.

Penelitian yang dilakukan oleh Imai dan Dang (2017), menunjukkan hasil bahwa metode desinfeksi dengan menggunakan *microbubble* yang dilakukan mengalami peningkatan suhu sebesar 11 hingga 28°C dan dapat mempengaruhi efektivitas terlarutnya CO₂ seiring dengan naiknya suhu. Kelarutan CO₂ dan suhu ini akan mempengaruhi proses inaktivasi *E. coli* yang terjadi pada penelitian. Pada sampel, suhu tertinggi adalah 42°C pada menit ke-25, dimana menunjukkan bahwa suhu masih berada di batas ambang kehidupan *E. coli*. Berdasarkan Tangahu (2014), *E. coli* tumbuh pada suhu antara 7 sampai dengan 44°C, dengan suhu optimum 37°C. Sehingga apabila suhu air melebihi 44°C, *E. coli* akan mengalami inaktivasi. Menurut Isholawati (2014), dijelaskan bahwa *E. coli* tumbuh pada suhu 15 sampai dengan 45°C dan suhu optimal yaitu 37°C. *E. coli* dapat bertahan hingga suhu 60°C selama 15 menit dan pada 55°C selama 60 menit.

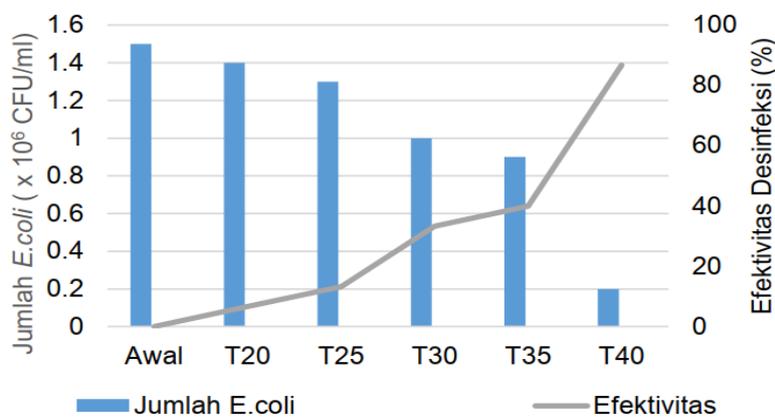
Dari hasil pengamatan diketahui bahwa suhu dan waktu berbanding lurus, dimana semakin lama waktu operasi maka semakin besar pula nilai suhu. Suhu meningkat karena adanya proses difusi dan sirkulasi air, serta peningkatan suhu dapat mempengaruhi kelarutan CO₂ di dalam air. Suhu yang meningkat pada penelitian masih berada pada ambang kehidupan *E. coli* dan dapat membantu CO₂ masuk ke dalam sitoplasma bakteri untuk menginaktivasi bakteri. Mekanisme kematian bakteri akibat proses pemanasan yaitu sel-sel bakteri setelah mengalami cedera akan memperlihatkan hilangnya permeabilitas dan meningkatkan kepekaan terhadap beberapa senyawa yang bakteri biasanya tahan. Sel-sel yang cedera secara sublethal mengalami kerusakan pada membran sel, dinding sel, *deoxyribonucleic acid* (DNA), *ribonucleid acid* (RNA) ribosom (degradasi), dan beberapa enzim penting (denaturasi). Kematian terjadi karena adanya kerusakan pada beberapa komponen fungsional dan struktural penting dari sel (Mirnawati *et al.*, 2016).

Konsentrasi *E. coli* dan Efektivitas Desinfeksi

Bakteri *E. coli* merupakan salah satu bakteri yang hidup di alam terbuka dalam tanah dan berkembang biak dengan cepat. Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan No.492/Menkes/Per/IV/2010, kadar maksimum yang diperbolehkan untuk *E. coli* untuk air minum adalah 0 CFU/100ml. Perlakuan pH awal rendah (pH 4) memberikan efektivitas desinfeksi paling besar dan berbeda nyata (Gambar 6) berdasarkan Uji Tukey pada $\alpha=0.05$. Sedangkan apabila pH awal merupakan pH netral (pH 7), maka suhu 40°C memberikan efektivitas terbesar (Gambar 7) berdasarkan Uji Tukey pada $\alpha=0.05$. Efektivitas desinfeksi terbesar dicapai oleh T₄₀ sebesar 86.7% dengan jumlah *E. coli* awal 1.5×10^6 CFU/ml dan jumlah *E. coli* akhir 2×10^5 CFU/ml atau 2×10^3 CFU/100ml. Meskipun efektivitas desinfeksi cukup tinggi, namun masih belum dapat memenuhi baku mutu yang ditetapkan. Hal ini dikarenakan selama proses berlangsung, terjadi peningkatan suhu yang cukup tinggi sehingga mempengaruhi kelarutan CO₂ (Imai dan Dang, 2017) yang berdampak pada berkurangnya kemampuan inaktivasinya. Kenaikan suhu diduga karena spesifikasi pompa yang digunakan terlalu besar sehingga sirkulasi air terjadi terlalu cepat. Penelitian selanjutnya perlu dilakukan dengan menggunakan spesifikasi pompa yang lebih kecil.



Gambar 6 Efektivitas desinfeksi pada perlakuan pH



Gambar 7 Perubahan jumlah *E. coli* dan efektivitas desinfeksi pada perlakuan suhu

Menurut Brooks *et al.* (2010), pertumbuhan *E. coli* dapat dipengaruhi oleh pH lingkungan, stabilitas mikroba, besar mikroba, masa inkubasi, dan aktivitas mikroba. Respati *et al.* (2017) menjelaskan bahwa pertumbuhan bakteri dibagi menjadi 4 fase, yaitu fase lag, eksponensial, stationer, dan penurunan populasi. Menurut Kusniadi dan Sunariah (2013), pada saat dilakukan biakan rutin dapat mengakibatkan penurunan kecepatan pertumbuhan sehingga jumlah sel yang hidup berbeda-beda dapat berpindah dari fase stationer menjadi penurunan populasi. Derajat keasaman rendah ternyata memberikan efek inaktivasi yang lebih baik yaitu sebesar 73% dan yang paling rendah adalah pH 7 sebesar 45%. Penelitian yang dilakukan oleh Wright *et al.* (2018), juga membuktikan bahwa semakin rendah pH maka semakin tinggi kelarutan CO₂ pada air sehingga efek mikrobisidal yang terjadi lebih besar, dimana dengan pH 3, 7 dan 9 mampu menurunkan jumlah

mikroba hingga sebesar 70%, 55%, dan 30%. Sehingga semakin rendah nilai pH juga akan semakin membantu berlangsungnya efek mikrobisidal oleh CO₂ dan menginaktivasi bakteri. Hasil penelitian Cheng *et al.* (2011), juga menunjukkan bahwa sampel dengan pH 4 menggunakan tekanan CO₂ sebesar 0.3 MPa dan suhu ruangan selama 20 menit berhasil menginaktivasi *E. coli* sebesar 78% atau 0.65 log reduksi.

Larutan dengan konsentrasi yang lebih tinggi memiliki efisiensi inaktivasi yang lebih tinggi daripada larutan dengan konsentrasi yang lebih rendah karena suspensi bakteri yang berputar dapat mempengaruhi dan dipengaruhi oleh kondisi hidrolis proses (Cheng *et al.*, 2011). Dijelaskan oleh Zhang (2016), bahwa kondisi hidrolis yang meningkat dapat menyebabkan kelarutan tinggi dan mempermudah larutnya CO₂ dalam air yang merupakan faktor penting yang dapat meningkatkan proses inaktivasi. Menurut Imai dan Dang (2016), adanya tekanan dan CO₂ yang terlarut secara bersamaan, maka pH yang rendah mendorong sel *E. coli* menjadi lebih permeabel, sehingga memudahkan proses masuknya CO₂ ke dalam sel.

Kenaikan suhu yang terlalu tinggi akan menyebabkan terjadinya denaturasi enzim yaitu kerusakan struktur protein enzim, terutama kerusakan pada ikatan ion dan ikatan hidrogennya. Denaturasi enzim di atas suhu optimum akan menyebabkan terjadinya kematian pada sel organisme. Aktivitas enzim dipengaruhi juga oleh pH lingkungan tempat enzim bekerja. Perubahan pH dapat menyebabkan berhentinya aktivitas enzim akibat proses denaturasi pada struktur tiga dimensi enzim (Purwandani, 2012). Semakin banyak jumlah *E. coli* yang tereduksi maka semakin tinggi pula efektivitas desinfeksi.

Penggunaan alat ini, masih memerlukan penelitian lebih lanjut karena dari hasil penelitian belum dapat memenuhi baku mutu air minum sesuai Peraturan Menteri Kesehatan No.492/Menkes/Per/IV/2010. Namun, dapat mendekati pemenuhan baku mutu kualitas air kelas III atau IV berdasarkan Lampiran Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air yang diperuntukan bagi kegiatan peternakan yaitu kadar *Fecal Coliform* maksimum diijinkan adalah sebesar 2 000 MPN/100ml, sedangkan perlakuan terbaik penelitian memberikan kadar *E. coli* akhir sebesar 2×10^3 CFU/100ml atau setara 1.63×10^3 MPN/100ml (perhitungan berdasarkan Cho *et al.*, 2010). Jumlah bakteri *E. coli* di alam umumnya lebih kecil karena merupakan bagian dari *Fecal Coliform*. Berdasarkan Lusandika *et al.* (2017), adanya kontaminasi bakteri *E. coli* yang terdapat di tempat minum ternak, serta sanitasi kandang yang buruk, dan terdapat banyak debu dapat memicu ancaman kesehatan hewan ternak. Hal ini sesuai dengan pendapat yang menyatakan bahwa lingkungan dan kandang yang kotor serta berdebu dan sumber air minum yang terkontaminasi feses mempunyai kandungan *E. coli* yang tinggi.

KESIMPULAN

Nilai pH awal mempengaruhi efek mikrobisidal pada CO₂ yaitu bahwa pada pH rendah, efektivitas inaktivasi *E. coli* mencapai 73%, 57% untuk pH tinggi dan 45% untuk pH netral. Variasi suhu awal air dapat mempengaruhi rata-rata suhu, pH, dan jumlah *E. coli* selama proses desinfeksi. Rata-rata suhu cenderung mengalami peningkatan, rata-rata pH cenderung mencapai stabil pada pH 4.8 hingga 5.5 dan jumlah *E. coli* cenderung mengalami penurunan. Reduksi jumlah *E. coli* disebabkan oleh efek mekanis dari aktivitas pompa dan *nozzle microbubble*, efek kimia dari adanya gas CO₂ dan tekanan, serta efek panas dari peningkatan suhu. Suhu yang paling efektif untuk mendesinfeksi *E. coli* adalah 40°C (T₄₀). Pada T₄₀ dengan suhu dan pH akhir sebesar 55°C dan 5.0, jumlah *E. coli* yang semula 1.5×10^6 CFU/ml, tereduksi menjadi 0.2×10^6 CFU/ml atau 2×10^3 CFU/100ml serta efektivitas desinfeksi sebesar 86.7%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Dekan Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya atas dukungan pendanaan penelitian melalui Hibah Penelitian Doktor (Non Lektor Kepala) dengan Nomor: 2604/UN10.F10/PN/2019.

DAFTAR PUSTAKA

- Abuzar SS, Putra DY, Emargi RE. 2012. Koefisien transfer gas (KLa) pada proses aerasi menggunakan tray aerator bertingkat 5 (Lima). *Jurnal Teknik Lingkungan UNAND*. 9(2): 155-163.
- Anggraeni MD. 2012. *Uji Disinfeksi Bakteri Escherichia Coli Menggunakan Kavitas Water Jet*. Depok (ID): Universitas Indonesia.
- Barat WOB. 2011. Pemanfaatan karbondioksida (CO₂) untuk optimalisasi pertumbuhan rumput laut *Kappaphycus alvarezii* [skripsi]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Brooks GF, Carroll KC, Butel JS, Morse SA. 2010. *Medical Microbiology 26th Edition (1)*. New York (US): Mc. Graw Hill.
- Cheng X, Imai T, Teeka J, Yamaguchi J, Hirose M, Higuchi T, Sekine M. 2011. Inactivation of *Escherichia coli* and bacteriophage T4 by high levels of dissolved CO₂. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 90: 1493-1500.
- Cho KH, Han DK, Park YG, Lee SW, Cha SM, Kang JH, Kim JH. 2010. Evaluation of the relationship between two different methods for enumeration fecal indicator bacteria: Colony-forming unit and most probable number. *Journal of Environmental Sciences*. 22(6) 846-850.
- Djoharam V, Riani V, Yani M. 2018. Analisis kualitas air dan daya tampung beban pencemaran Sungai Pesanggrahan di wilayah Provinsi DKI Jakarta. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*. 8(1): 127-133.
- Estika N, Suprihatin, Yanib M. 2017. Analisis dan formulasi strategi ketersediaan air bersih di lokasi transmigrasi (Studi kasus: Kecamatan Lasalimu Selatan, Kabupaten Buton). *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*. 7(2): 114-121.
- Huy VT. 2014. *Study on Novel Disinfection Method of Water and Treated Wastewater by Using Pressurized Carbon Dioxide*. Yamaguchi (JP): Yamaguchi University
- Imai T, Dang TLT. 2017. *Escherichia coli* inactivation using pressurized carbon dioxide as an innovative method for water disinfection. *Recent Advances on Physiology, Pathogenesis, and Biotechnological Applications*. London (GB): Intechopen.
- Isholawati D, Karamah EF, Zufri ZA, Hidayat AN. 2014. Disinfeksi bakteri *Escherichia coli* menggunakan proses kavitas hidrodinamika water-jet dengan kombinasi karbon aktif dan zeolit. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi 5*. 10-15. ISBN 978-602-99334-3-7. P 10-15.
- Kobayashi F, Hayata Y, Kohara K, Muto N, Osajima Y. 2007a. Application of supercritical CO₂ bubbling to inactivate *E. coli* and coliform bacteria in drinking water. *Food Sci. Technol. Res*. 13(1): 20-22.
- Kobayashi F, Hayata Y, Muto N, Osajima Y. 2007b. Effect of the pore size of microfilters in supercritical CO₂ bubbling on the dissolved CO₂ concentration. *Food Sci. Technol. Res*. 13(2): 118-120.
- Kobayashi F, Hayata Y, Ikeura H, Tamaki M, Muto N, Osajima Y. 2009. Inactivation of *Escherichia coli* by CO₂ microbubbles at a lower pressure and near room temperature. *Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 52(5): 1621-1626.
- Komala PS, Agustina F. 2013. Pengaruh pengganggu pada proses disinfeksi terhadap penyisihan bakteri *escherichia coli* pada air pengolahan PDAM Gunung Panglun. *PROSIDING STNK TOPI 2013*. ISSN. 1907-0500.
- Kusniadi, Sunariah NS. 2013. *Mikrobiologi*. Bandung (ID): Universitas Pendidikan Indonesia.
- Lee JY, Kim SS, Kang DH. 2015. Effect of pH for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella typhimurium* and *Listeria monocytogenes* in orange juice by ohmic heating. *LWT - Food Science and Technology*. 62: 83-88.
- Lusandika EH., Suarjana IGG., Suada IK. 2017. *Kualitas Air Peternakan Ayam Broiler Ditinjau dari Jumlah Bakteri Coliform dan Escherichia coli*. Denpasar (ID): Universitas Udayana.
- Mirnowati BS, Hadri L, Saimah. 2016. *Dekontaminasi Bakteri Escherichia coli dan Staphylococcus aureus pada Sarang Burung Walet dengan Perlakuan Pemanasan*. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.

- National Research Council. 1986. *Drinking Water and Health*. Washington DC (US): National Academy Press.
- Pfafflin JR, Ziegler EN. 2006. *Encyclopedia of Environmental Science and Engineering*. Finlandia (FI): Boca Raton.
- Purwandani LF. 2012. *Isolasi dan Uji Aktivitas Enzim Amilase dari Isolat Bakteri Termofilik Amilolitik Pasca Erupsi Merapi pada Berbagai Variasi Suhu dan pH*. Yogyakarta (ID): Universitas Negeri Yogyakarta.
- Respati NY, Yulianti E, Rakhmawati A. 2017. Optimasi suhu dan pH media pertumbuhan bakteri pelarut fosfat dari isolat bakteri termofilik. *Jurnal Prodi Biologi*. 6(7): 423-430.
- Serin JP, Arpentinier P, Agbomson DH. 2012. *Solubility of Carbon Dioxide in Water and Aqueous Solution Containing Sodium Hydroxide at Temperatures from (293.15 to 393.15) K and Pressure up to 5 MPa: Experimental Measurements*. Pau (FR): Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- Susana T. 1988. *Karbondioksida*. Jakarta (ID): Pusat Penelitian dan Pengembangan Oseanologi-Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
- Takahashi M, Chiba K, Li P. 2007. Formation of hydroxyl radicals by collapsing ozone microbubbles under strongly acidic conditions. *J. Phys. Chem.* 111(39): 11443-11446.
- Tangahu Y. 2014. *Uji Kuantitatif Cemaran Bakteri pada Makanan Siomay di Kota Gorontalo*. Gorontalo: Universitas Gorontalo.
- Vo TH, Imai T, Yamamoto H, Le TV, Higuchi T, Kanno A, Yamamoto K, Sekine M. 2013. Disinfection using pressurized carbon dioxide microbubbles to inactivate *Escherichia coli*, bacteriophage MS2 and T4. *Journal of Water and Environment Technology*. 11(6): 497-505.
- Wang H, Zeuschner J, Eremets M, Troyan I, Willams J. 2016. Stable Solid and Aqueous H₂CO₃ from CO₂ and H₂O at High Pressure and High Temperature. *Sci. Rep.* 1-8. doi: 10.1038/srep19902.
- Wright A, Marsha A, Ricciotti F, Shaw A, Izac F, Holdich R, Bandulasena H. 2018. Microbubble-enhanced dielectric barrier discharge pretreatment of microcrystalline cellulose. *Journals of Biomass and Bioenergy*. 118: 46-54.
- Xue Z, Nishio S, Hagiwarab N. 2014. *Microbubble Carbon Dioxide Injection for Enhanced Dissolution in Geological Sequestration and Improved Oil Recovery*. Kyoto (JP): Kyoto University.
- Zhang J, Thomas AD, Michael AM, Michael JD, Martine L, Yuehuei HA. 2006. *Sterilization Using High Pressure Carbon Dioxide*. Columbia (US): University of South California.