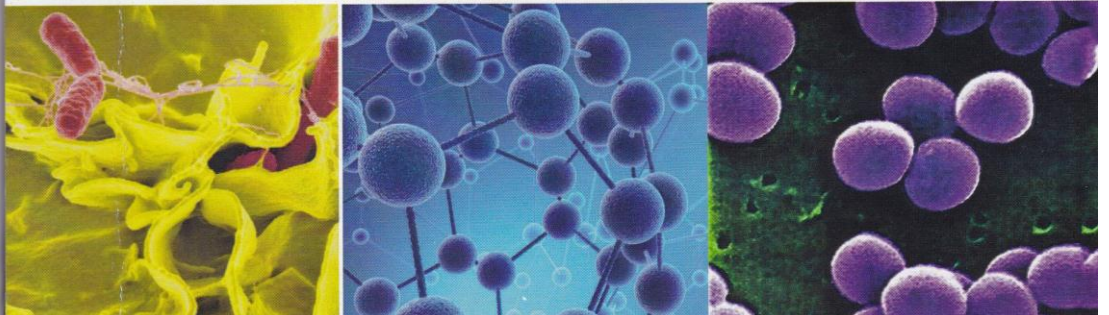


**OPTIMASI MEDAN LISTRIK BERPULSA
UNTUK MENURUNKAN JUMLAH BAKTERI
Staphylococcus aureus, *Salmonella Sp.*,
DAN *Escherichia coli* PADA SUSU**

**(Strategi Sanitasi Bahan Pangan Sebagai Upaya
Meningkatkan Ketahanan Pangan dan Penghematan
Energi Listrik)**



Mokhammad Tirono, Ahmad Abtokhi, Farid Samsu H.



DAFTAR ISI

Abtrak	1
I. Pendahuluan	2
II. Kajian Pustaka	5
2.1 Medan listrik	5
2.2 Bakteri	16
III METODE PENELITIAN	19
3.1 Jenis Penelitian	19
3.2 Alat dan Bahan	19
3.3 desain Rangkaian Alat	19
3.4 Langkah-Langkah Penelitian	20
3.5 Teknik Analisis Data	21
IV. HASIL DAN PEMBAHSAN	22
4.1. Efek medan listrik terhadap penurunan jumlah bakteri	22
4.2 Efek waktu paparan terhadap penurunan jumlah bkateri	25
4.3 Efek Paparan Medan Listrik terhadap Kandungan Protein dan Lemak	29
4.4 Pembahasa.....	30
Y. KESIMPULAN	31
DAFTAR PUSTAKA	31

**OPTIMASI MEDAN LISTRIK BERPULSA
UNTUK MENURUNKAN JUMLAH BAKTERI *Staphylococcus aureus*,
Salmonella Sp., DAN *Escherichia coli* PADA SUSU
(Strategi Sanitasi Bahan Pangan Sebagai Upaya
Meningkatkan Ketahanan Pangan dan Penghematan Energi Listrik)**

Mokhammad Tirono, Ahmad Abtokhi, Farid Samsu H.

Jurusan Fisika UIN Maulana Malik Ibrahim Malang

ABSTRAK

Susu adalah produk makanan yang dibutuhkan oleh masyarakat karena memiliki kandungan nutrisi yang lengkap. Memproses susu yang kurang higienis menyebabkan terkontaminasi oleh bakteri. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan intensitas medan listrik minimum dan waktu paparan yang masih dapat digunakan untuk sterilisasi dan pengaruhnya terhadap kadar protein dan lemak susu. Penelitian ini juga menyelidiki pengaruh ukuran bakteri terhadap penurunan jumlah bakteri, karena paparan medan listrik. Sampel penelitian adalah bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella sp.*, dan *Escherichia coli* yang tumbuh di susu sapi segar. Kuat medan listrik untuk paparan adalah 2,0 - 4,5 kV/cm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sterilisasi menggunakan medan listrik 2,0 - 3,5 kV / cm tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap bakteri kontaminan. Paparan medan listrik 4,0 kV / cm selama 25 menit dapat mengurangi jumlah koloni bakteri sebesar 7,61, 9,19, dan 9,24 log berturut-turut untuk bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella sp.*, dan *Escherichia coli*. Sterilisasi menggunakan medan listrik 4,5 kV / cm selama 15 menit menurun sebesar 8,05, 8,65, dan 8,96 log berturut-turut untuk bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella sp.*, dan *Escherichia coli*. Sterilisasi menggunakan medan listrik tidak menyebabkan penurunan kandungan protein susu tetapi menurunkan jumlah lemak. Temuan penelitian ini adalah bahwa medan listrik minimum yang masih dapat digunakan untuk sterilisasi adalah 4,0 kV / cm dengan waktu paparan minimal 25 menit. Ukuran bakteri yang lebih kecil membutuhkan waktu sterilisasi yang lebih lama dan intensitas medan listrik yang lebih besar daripada yang besar. Paparan menggunakan medan listrik di atas 2,5 kV / cm dapat menurunkan kandungan lemak pada susu.

Kata Kunci: Medan, listrik, bakteri, *staphylococcus aureus*, *salmonella sp.*, *escherichia coli*, susu

1. PENDAHULUAN

Pemenuhan kebutuhan gizi menjadi salah satu skala prioritas pemerintah dalam mensejahterakan masyarakat. Setiap negara, termasuk Indonesia kebutuhan gizi dapat terpenuhi melalui penyediaan bahan pangan, salah satunya adalah susu. Kebutuhan susu di Indonesia diperkirakan 3,3 juta ton per tahun, nilai tersebut tergolong kecil jika dibandingkan dengan jumlah penduduk dan kebutuhan susu di negara-negara ASEAN lainnya (Sukma Indah Permana, detikfinance; Kamis, 17/09/2015). Sekitar akhir tahun 2015, Indonesia telah mengimpor hampir 83% dari kebutuhan susu dalam negeri. Peternak rakyat hanya mampu memenuhi 17% dari kebutuhan nasional (Lani Pujiastuti, detikfinance; Jumat, 11/09/2015). Kondisi tersebut diperparah dengan kualitas susu dari para peternak yang belum optimal.

Susu umumnya mengandung nutrisi yang lengkap, antara lain lemak, protein, laktosa, vitamin, mineral, dan enzim. Sebagai produk pangan yang kaya nutrisi, pH mendekati netral, dan kandungan airnya tinggi, susu sangat mudah mengalami kerusakan yang disebabkan adanya pencemaran mikroba (Frank dalam Handayani dan Purwanti, 2010). Sindurejo dalam Tricahyadi dkk (2007) menyebutkan bahwa salah satu ciri fisis susu sapi yang baik adalah memiliki warna putih kekuningan, dan tidak tembus cahaya. Hal ini berarti bahwa jika kondisi susu tidak memenuhi kriteria tersebut, maka dapat dimungkinkan terdapat sesuatu yang bisa jadi diakibatkan adanya infeksi oleh jenis bakteri tertentu.

Pencemaran pada susu bisa terjadi sejak proses pemerahan yang berasal dari berbagai sumber, seperti kulit sapi, air, tanah, debu, manusia, peralatan, dan udara. Air susu yang masih di dalam kelenjar susu dapat dikategorikan steril, namun setelah keluar dari sapi dapat terjadi kontaminasi. Kontaminasi dapat terjadi dari mana-mana diantaranya dari ambing sapi, tubuh sapi, debu di udara, peralatan yang kotor, dan manusia yang melakukan pemerahan (Dwidjoseputro D., 2005).

Pada susu yang telah dipanaskan, kontaminasi bakteri masih sangat mungkin terjadi baik disebabkan oleh kontaminasi silang dari peralatan yang digunakan, air proses pencucian, dan dari bahan yang lain, termasuk lingkungan sekitar proses tersebut berjalan. Kelompok bakteri *coliform* dapat digunakan sebagai indikator sanitasi penanganan susu. Jika bakteri *coliform* mengkontaminasi susu maupun bahan pangan yang lain akan menimbulkan gangguan kesehatan pada manusia. Badan Standar Nasional Indonesia (SNI) tahun 2000 telah menetapkan batas maksimum cemaran mikroba dalam susu segar dan susu pasteurisasi adalah 1×10^6 CFU per ml untuk total bakteri pada susu segar, dan pada susu pasteurisasi tidak boleh melebihi 3×10^4 CFU per ml.

Susu yang dikonsumsi manusia dapat menjadi sumber penularan penyakit apabila telah tercemar oleh mikroba, dan tidak dikelola secara higienis. Beberapa cemaran mikroba patogen yang banyak dijumpai pada susu adalah bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella sp.*, dan *Campylobacter sp* (Djaafar dkk, 2007).

Beberapa penyakit pada manusia yang diakibatkan oleh infeksi bakteri *Staphylococcus aureus* diasosiasikan dengan beberapa kondisi patologi, diantaranya bisul, jerawat, pneumonia, meningitis, dan arthritis (Madigan MT, Martinko JM, Dunlap PV, Clark DP.: 2008). *Salmonella Sp.* adalah penyebab utama dari penyakit yang disebarkan melalui makanan (*foodborne diseases*). Pada umumnya, serotipe *Salmonella* menyebabkan penyakit pada organ pencernaan. Penyakit yang disebabkan oleh *Salmonella* disebut salmonellosis. Ciri-ciri orang yang mengalami salmonellosis adalah diare, keram perut, dan demam dalam waktu 8-72 jam setelah memakan makanan yang terkontaminasi oleh *Salmonella*. Gejala lainnya adalah demam, sakit kepala, mual dan muntah-muntah (FSIS: 2006). Selain kedua bakteri yang tersebut di

atas, bakteri *Escherichia coli* merupakan bakteri yang dijumpai menjadi penyebab kerusakan pada susu sebagai akibat enterotoksin yang diproduksinya (Utami P.S.: 2012), bakteri ini dapat mengakibatkan keracunan makanan yang serius pada manusia yaitu diare berdarah karena eksotoksin yang dihasilkan bernama verotoksin, toksin tersebut bekerja dengan cara menghilangkan satu basa adenin dari unit 28S rRNA, sehingga menghentikan sintesis protein (Levinson W: 2008).

Berdasarkan penjelasan di atas, perlu dilakukan usaha sanitasi makanan, utamanya pada susu sebagai upaya yang ditujukan untuk menjaga kebersihan dan keamanan makanan agar tidak menimbulkan bahaya keracunan dan penyakit pada manusia (Chandra, 2006). Sanitasi ini dilakukan sebagai upaya pencegahan terhadap kemungkinan tumbuh dan berkembang biaknya jasad renik pembusuk dan patogen dalam makanan yang dapat merusak makanan dan membahayakan kesehatan manusia (Oginawati, 2008).

Proses sanitasi susu yang biasa dilakukan oleh masyarakat adalah pendinginan, dan pasteurisasi susu, cara lain yang belum dilakukan yaitu melalui proses paparan atau radiasi oleh medan listrik berpulsa. Prinsip dari cara ini adalah dengan memberikan paparan medan listrik berpulsa pada benda atau obyek paparan.

Penelitian tentang sterilisasi bakteri menggunakan medan listrik berpulsa telah dilakukan oleh Zhao W. *et al.*,(2008), Bonetta S. *et al.* (2010), Monfort S. *et al.* (2012) dan Pillet F. *et al* (2016). Penelitian umumnya menggunakan medan listrik diatas 18 kV/cm dengan durasi pulsa kurang dari 2 μ s, kecuali yang dilakukan oleh Pillet F. *et.al* (2016) menggunakan medan listrik 2 -7,5 kV/cm dengan durasi pulsa 5 μ s. Kondisi ini membuat biaya peralatan menjadi mahal ketika diaplikasikan pada kemasan susu yang berukuran besar, karena dibutuhkan tegangan yang jauh lebih tinggi.

Berdasarkan penjelasan di atas, akan dilakukan penelitian tentang medan listrik berpulsa untuk menghambat pertumbuhan bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella Sp.*, dan *Escherichia coli* pada susu dengan kuat medan listrik yang lebih rendah. Hal ini dilakukan sebagai upaya sanitasi bahan pangan yang diharapkan mampu meningkatkan ketahanan pangan, dan penghematan energi listrik nasional. Penelitian ini bertujuan untuk: menentukan kuat medan listrik minimum yang dapat digunakan untuk menurunkan jumlah koloni bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella Sp.*, dan *Escherichia coli* pada susu.

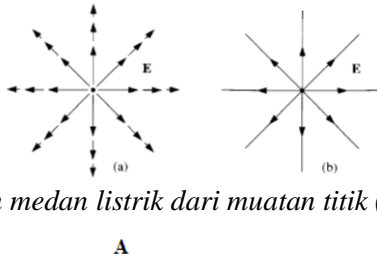
II KAJIAN PUSTAKA

2.1. Medan listrik

Medan Listrik merupakan daerah atau ruang di sekitar benda yang bermuatan listrik, dimana jika sebuah benda bermuatan lainnya diletakkan pada daerah itu masih mengalami gaya elektrostatis. Medan listrik pada muatan uji q didefinisikan sebagai gaya listrik pada muatan per besarnya muatan tersebut dan dirumuskan $E = F/q$, dimana E adalah medan listrik, F adalah gaya listrik, dan q adalah muatan listrik (Griffith D. J., 1999). Jika sumber bermuatan positif, maka arah medan listrik adalah keluar muatan dan jika muatan sumber negatif, maka arah medan listrik adalah masuk menuju muatan, seperti terlihat pada Gambar 2.1 (Griffith D. J., 1999). Andaikan ada sebuah muatan titik q , maka besar medan listrik di titik P yang berjarak r dari muatan q tersebut adalah (Griffith D. J., 1999)

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} \tag{2.1}$$

Dimana ϵ_0 adalah permitivitas ruang hampa yaitu $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{N/m}^2$, dan \hat{r} adalah vektor satuan dari r .



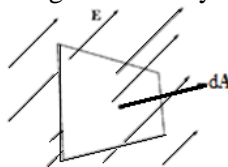
Gambar 2.1. Arah medan listrik dari muatan titik (Griffith D. J., 1999)

2.1.1. Hukum Gauss

Fluks listrik adalah ukuran kuantitatif dari jumlah garis medan listrik yang lewat melalui luasan A . Fluks listrik diilustrasikan pada Gambar 2.2 dan didefinisikan dengan persamaan (Griffith D. J., 1999)

$$\Phi_E = \int E \cdot dA \tag{2.2}$$

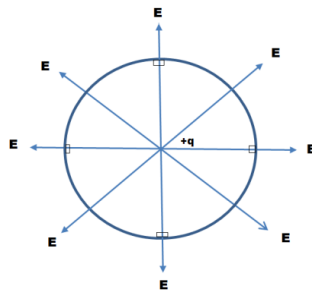
Yang punya makna mengukur jumlah garis medan yang melalui suatu permukaan.



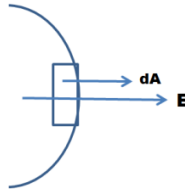
Gambar 2.2. Ilustrasi Flux Listrik

Suatu misal sejumlah fluks listrik yang berasal dari muatan titik positif seperti Gambar 2.3. Fluks listrik dikelilingi oleh permukaan bola imajiner yang disebut permukaan *Gaussian*. Arah medan listrik E berbeda di setiap titik, sehingga persamaan 2.2 tidak dapat digunakan. Penyelesaiannya, permukaan bola dipecah menjadi beberapa permukaan yang sangat kecil dA , seperti Gambar 2.3 (B), dan sebagian fluks $d\Phi_E$ melewati masing-masing luasan kecil, sehingga dapat dihitung dengan

$$d\Phi_E = E \cdot dA \tag{2.3}$$



(A)



(B)

Gambar 2.3. Hukum Gauss untuk medan listrik

Fluks total dari permukaan *Gaussian* menjadi integral dari semua fluks yang sangat kecil $d\Phi_E$ melalui semua luasan tertutup yang sangat kecil dA , sehingga

$$\Phi_E = \oint d\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} \quad 2.4$$

Simbol integral \oint berarti integrasi dilakukan pada permukaan tertutup seluruh luasan yang dilewati fluks. Vektor medan listrik \mathbf{E} dan luasan permukaan $d\mathbf{A}$ adalah radial disetiap lokasi dari muatan titik q , sehingga

$$\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q}{r^2} \hat{r} \right) (r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi \, \hat{r}) = \frac{1}{\epsilon_0} q \quad 2.5$$

Dengan demikian flux melalui permukaan tertutup muatannya adalah q/ϵ_0 . Suatu misal muatan tunggal q diganti dengan beberapa muatan yang tersebar, maka medan listrik total adalah jumlah dari semua medan listrik individual, sehingga

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i$$

Dengan demikian total flux yang melalui permukaan tertutup adalah

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \sum_{i=1}^n \oint \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{A} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\epsilon_0} q_i$$

Untuk beberapa permukaan tertutup menjadi (Griffith D. J., 1999)

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{1}{\epsilon_0} q_{total} \quad 2.6a$$

Dimana q_{total} adalah muatan total yang tertutup dalam permukaan. Bentuk ini adalah ungkapan kuantitatif dari Hukum Gauss. Hukum Gauss adalah persamaan integral, tetapi dapat diubah dalam bentuk diferensial dengan menerapkan teori divergensi (Griffith D. J., 1999) yaitu

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \int_V (\nabla \cdot \mathbf{E}) \, dV \quad 2.6b$$

Dimana muatan total q_{total} dalam bentuk rapat muatan dirumuskan sebagai

$$q_{total} = \int_V \rho \, dV \quad 2.7$$

sehingga Hukum Gauss menjadi

$$\int_V (\nabla \cdot \mathbf{E}) \, dV = \int_V \frac{\rho}{\epsilon_0} \, dV \quad 2.8a$$

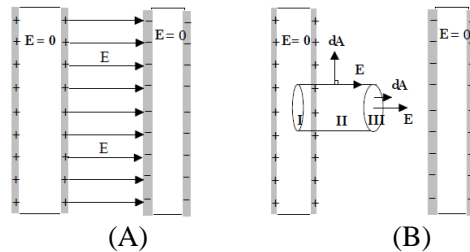
Jika volume yang dilingkupi sama, maka kedua integran adalah sebanding (Griffith D. J., 1999) yaitu

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad 2.8b$$

Persamaan ini disebut dengan Hukum Gauss dalam bentuk diferensial.

2.1.2. Medan Listrik Diantara Keping Sejajar

Intensitas medan listrik E diantara keping konduktor bermuatan seperti Gambar 2.4 dapat ditentukan menggunakan Hukum Gauss. Perhitungan kuat medan Listrik antara dua keping konduktor menggunakan Hukum Gauss dapat digambarkan sebagai permukaan imajiner berbentuk silinder seperti Gambar 2.4B. Salah satu ujung permukaan terletak pada salah satu sisi keping sejajar sedangkan ujung yang lain terletak pada daerah antara dua keping. Dimana daerah antara dua keping akan digunakan sebagai tempat pemaparan bakteri.. Sesuai dengan Hukum Gauss, maka medan listrik diantara keping sejajar dapat ditentukan sebagai (Griffith D. J., 1999)



Gambar 2.4. Medan listrik diantara dua keping konduktor bermuatan

$$\Phi_E = \oint E \cdot dA = \frac{q}{\epsilon_0} \quad 2.9$$

Dalam kasus ini permukaan dapat dibentuk permukaan virtual sebagai silinder menjadi tiga permukaan. Permukaan I disisi kiri silinder, permukaan II adalah permukaan silinder utama, dan permukaan III adalah disisi kanan silinder seperti yang ditunjukkan Gambar 2.4 (B). Total fluks Φ yang melalui permukaan *Gaussian* adalah jumlah fluks melalui setiap permukaan individu, sehingga

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_{II} + \Phi_{III} \quad 2.10$$

Dimana:

Φ_I adalah fluks listrik permukaan I

Φ_{II} adalah fluks listrik permukaan II

Φ_{III} adalah fluks listrik permukaan III

maka Hukum Gauss menjadi

$$\Phi_E = \oint E \cdot dA = \int_I E \cdot dA + \int_{II} E \cdot dA + \int_{III} E \cdot dA = \frac{q}{\epsilon_0} \quad 2.11$$

Karena keping adalah konduktor, maka semua muatan berada pada permukaan luarnya, sehingga di dalam konduktor $E = 0$. Ketika permukaan *Gaussian I* terletak dalam konduktor, maka medan listriknya adalah nol.

Pada permukaan II silinder, dimana-mana dA tegak lurus ke permukaan, seperti Gambar 2.4 (B). Medan listrik E terletak pada permukaan silinder, mengarah ke kanan, dan di setiap posisi tegak lurus terhadap vektor permukaan dA , oleh karena itu $\theta = 90^\circ$ dan fluks listrik melalui permukaan II adalah nol.

Permukaan III adalah sisi akhir kanan silinder dan seperti Gambar 2.4 (B) arah E ke kanan dan sejajar vektor luas permukaan dA yang menunjuk ke arah luar kanan. Oleh karena itu pada permukaan III E dan θ membentuk sudut 0° , sehingga flux listriknya

$$\Phi_{III} = \int_{III} E \cdot dA = \int_{III} E dA \cos 0^\circ = \int_{III} E dA \quad 2.12$$

Total fluks melalui permukaan *Gaussian* adalah sama dengan jumlah dari fluks melalui permukaan individu. Oleh karena itu, hukum Gauss menjadi

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_{II} + \Phi_{III}$$

$$\Phi_E = 0 + 0 + \int_{III} E dA = \frac{q}{\epsilon_0} \quad 2.13$$

Akan tetapi E adalah konstan sepanjang integral III dan dapat diperhitungkan dari

$$\Phi_E = E \int dA = \frac{q}{\epsilon_0} \quad 2.14$$

Dimana integral $\oint dA = A$, sehingga

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 A} \quad 2.15$$

Pada kapasitor keping sejajar berlaku persamaan (Young H. D., dan Freedman R. A., 2008)

$$C = \frac{q}{\Delta V} = \epsilon_0 \frac{A}{d}, \quad 2.16a$$

Ketika dalam kapasitor diberi dielektrik dengan permitivitas relatif ϵ_r , maka

$$C = \frac{q}{\Delta V} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad 2.16b$$

Substitusi persamaan 2.16a dan 2.16b ke 2.15. berturut-turut didapatkan (Griffith D. J., 1999)

$$E = \frac{\Delta V}{d} \quad 2.17a$$

dan

$$E = \frac{\Delta V}{\epsilon_r d} \quad 2.17b$$

Dimana E adalah medan listrik diantara keping sejajar, d jarak antara keping, dan ΔV adalah beda potensial diantara keping.

Pada penelitian ini digunakan dua keping sejajar yang masing-masing diberi muatan positif dan negatif. Pemberian muatan dilakukan dengan menyambungkan *power supply* tegangan tinggi. Besar kecilnya medan listrik diantara dua keping dapat diatur dengan merubah beda potensial atau jarak antara kedua keping sesuai persamaan 2.17.

Tegangan tinggi pada penelitian ini dihasilkan dari *power supply* dengan tegangan keluaran 0 - 10 kV. Bentuk pulsa dihasilkan dengan cara menyambungkan saklar ke *power supply* tegangan tinggi, sehingga keluarannya berbentuk pulsa persegi. Energi listrik yang tersimpan dapat dihitung dengan persamaan

$$W = \frac{1}{2} C \Delta V^2 \quad 2.18$$

Dimana C adalah kapasitansi kapasitor, ΔV adalah beda tegangan antara dua keping. Kapasitansi kapasitor pada keping sejajar dirumuskan

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad 2.19$$

Dimana V adalah volume susu yang melekat. Substitusi persamaan 2.19 ke 2.18 diperoleh

$$W = \epsilon_0 \frac{A}{d} \Delta V^2 \quad 2.20$$

Dimana A luas permukaan keping konduktor dan d adalah jarak antar konduktor.

2.1.3. Paparan Medan Listrik terhadap Bakteri

Bakteri bagian luarnya terdapat membran sel yang menjadi batas antara interior sel dengan lingkungan luar. Peran utama membran sel adalah untuk mengatur transportasi ion, nutrisi, metabolit, peptida, dan protein ke dalam dan keluar dari sel. Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk mengungkapkan gerakan ion logam penting menembus transmembran seperti Na^+ , Ca^+ , K^+ , Cl^- serta nutrisi organik seperti asam amino, gula, dan nukleoida (Dunlop J. and Butera J.A., 2006)

Sifat non-isotropik ditunjukkan oleh bakteri (Mushenheim P. C. *et al.*, 2014). Lipid bilayer bakteri memiliki sifat sangat non-isotropik (Pogozheva I.D. *et al.* 2013; Huh K. *et al.*, 2016), sehingga sifat optik mikroskopiknya tergantung dari arah. Pada medium non-isotropik sifat makroskopik materi diatur oleh sifat mikroskopis dari bentuk dan orientasi molekul individu serta organisasi pusatnya dalam ruang. Selain itu bakteri memiliki sifat elektro-optik (Bunin V. D. *et al.*, 2005; Ignatov O.V. *et al.* 1997), sehingga cahaya yang melewati akan terjadi polarisasi.

Bilamana medan listrik dikenakan pada bahan non-isotropik elektro-optik, maka akan merubah indeks bias (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007). Ketergantungan indeks bias pada medan listrik yang dikenakan akan mengambil salah satu dari dua bentuk yaitu :

- a) Perubahan indeks bias sebanding dengan medan listrik yang diterapkan, dimana kasus efek ini dikenal sebagai efek elektro-optik linier atau efek Pockels.
- b) Perubahan indeks bias sebanding dengan kuadrat dari medan listrik yang diterapkan, dalam hal ini efeknya dikenal sebagai efek elektro-optik kuadrat atau efek Kerr

Indeks bias suatu medium elektro-optik akan mengalami perubahan sebagai fungsi kuat medan listrik $n(\mathbf{E})$, jika dikenakan medan listrik luar. Fungsi ini hanya berubah sedikit dengan paparan \mathbf{E} , sehingga dapat diperluas dalam bentuk Deret Taylor sekitar $\mathbf{E} = 0$ yaitu (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007)

$$n(\mathbf{E}) = n + \alpha_1 \mathbf{E} + \frac{1}{2} \alpha_2 \mathbf{E}^2 + \dots \quad 2.21$$

Dimana $n(\mathbf{E})$ adalah indeks bias ketika diberi medan listrik \mathbf{E} , n adalah indeks bias ketika medan listrik $\mathbf{E}=0$, dan $\alpha_1 \alpha_1 = \left(\frac{dn}{dE} \right)_{E=0}$. Sementara itu koefisien $r = -2\alpha_1/n^3$ dan $\mathfrak{K} = -\alpha_2/n^3$, dengan demikian persamaan 2.21 dapat dituliskan sebagai

$$n(\mathbf{E}) = n - \frac{1}{2} r n^3 \mathbf{E} - \frac{1}{2} \mathfrak{K} n^3 \mathbf{E}^2 + \dots \quad 2.22$$

Dimana \mathbf{E} adalah medan listrik. Dalam kebanyakan bahan, suku ketiga dari persamaan 2.22 diabaikan. Dengan demikian

$$n(\mathbf{E}) = n - \frac{1}{2} r n^3 \mathbf{E} \quad 2.23$$

Medium yang memenuhi persamaan 2.23 sering disebut sebagai medium Pockels. Koefisien r disebut koefisien Pockels atau koefisien elektro-optik linear (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007).

Jika bahan bersifat *centrosymmetric*, seperti halnya gas, cairan, dan kristal tertentu, $n(\mathbf{E})$ menjadi fungsi simetris. Oleh karena itu harus invarian untuk pembalikan \mathbf{E} dan derivatif pertama menghilang, sehingga koefisien r harus nol, dengan demikian persamaan 2.2. menjadi

$$n(\mathbf{E}) = n - \frac{1}{2} \mathfrak{K} n^3 \mathbf{E}^2 \quad 2.24$$

Medium ini dikenal sebagai medium Kerr dan \mathfrak{K} adalah koefisien Kerr atau koefisien elektro-optik kuadrat.

Pada penelitian ini bakteri memiliki sifat non-isotropik dan belum ada referensi yang didapat tentang sifat *centrosymmetric*. Oleh karena itu yang menjadi tinjauan pada penelitian ini adalah efek Pockels. Menurut Hajj B. *et al.*, (2009) koefisien elektro-optik membran sel adalah 2,6 pm/V.

Polarisasi elektronik

Akibat adanya medan listrik yang mengenai bakteri maka terjadi polarisasi elektronik. Polarisasi elektronik terjadi karena perpindahan pusat awan elektron bermuatan negatif relatif terhadap inti yang bermuatan positif dari atom karena efek medan listrik. Bilamana diantara keping sejajar seperti pada Gambar 2.4 diletakkan bahan dielektrik atau bakteri, maka total muatan yang terbentuk dalam ruang adalah $q_{total} = \int \rho_{total} d\mathbf{v}$, sehingga persamaan 2.8a menjadi (Griffith D. J., 1999)

$$\int \mathbf{E} d\mathbf{A} = \frac{\int \rho_{total} d\mathbf{v}}{\epsilon_0} \quad 2.25$$

Rapat muatan yang ada meliputi rapat muatan batas dan rapat muatan bebas $\rho_{total} = \rho_{batas} + \rho_{bebas}$, sehingga

$$\int \mathbf{E} d\mathbf{A} = \frac{\int (\rho_{batas} + \rho_{bebas}) d\mathbf{v}}{\epsilon_0} \quad 2.26$$

Dimana $\rho_{batas} = -\nabla \cdot \mathbf{P}$, sehingga persamaan 2.26 dapat dituliskan sebagai

$$\int \mathbf{E} d\mathbf{A} = \frac{\int (-\nabla \cdot \mathbf{P} + \rho_{bebas}) d\mathbf{v}}{\epsilon_0} \quad 2.27$$

Dimana \mathbf{P} adalah polarisasi dari dielektrik atau bakteri. Lebih lanjut persamaan 2.27 dapat ditulis sebagai

$$\int (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) d\mathbf{A} = \int \rho_{bebas} d\mathbf{v} \quad 2.28$$

Dalam kurung sisi kiri disebut pergeseran listrik D yang diungkapkan sebagai (Martín R.G., 2007)

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad 2.29$$

Tabel 2.1. Konstanta dielektrik dari beberapa material

No	Material	Konstanta Dielektrik	Sumber
1	Udara	1,0	
2	Membran sel	2,0	
3	Tanah	2,8	
4	Air	10,0	
5	Bakteri Gram-poistif	18-19	(Ferrer D.E, 2014)
6	Bakteri Gram-negatif	6-7	(Ferrer D.E, 2014)

Setiap komponen dari vektor polarisasi pada basis ortonormal dapat ditulis sebagai (Born M. dan Wolf E, 2003)

$$P = \varepsilon_0 \chi E \quad 2.30$$

Dengan demikian persamaan 2.29 akan menjadi

$$D = \varepsilon_0 E + \varepsilon_0 \chi E \quad 2.31$$

Dengan χ adalah *susceptibility* normal. Persamaan 2.31 dapat juga ditulis sebagai (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007).

$$D = \varepsilon_0 (1 + \chi) E \quad 2.32a$$

atau

$$D = \varepsilon_{ij} E \quad 2.32b$$

Dengan $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_0 (1 + \chi_{ij}) = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, dimana ε_{ij} adalah permitivitas dielektrik dari bakteri, χ_{ij} adalah supsepbilitas dari material atau bakteri, dan ε_0 adalah permitivitas ruang hampa yang besarnya $8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m. Tabel 2.1 adalah harga pemitivitas dielektrik beberapa bahan. Merujuk pada Tabel 2.1, maka pada penelitian ini, diasumsikan bahwa nilai konstanta dielektrik sel bakteri adalah 6,5 untuk Gram-negatif dan 18 untuk Gram-positif.

Sumbu dan indeks prinsipial

Bakteri bersifat non-isotropik, sehingga hubungan antara perpindahan listrik dan medan listrik bersifat tensorial, seperti yang diungkapkan pada persamaan 2.32b. Oleh karena itu vektor D dan E tidak lagi sejajar seperti diungkapkan Gambar 2.5. dan dapat diasumsikan bahwa efek dispersif dapat diabaikan. Dalam kasus ini hubungan antara D dan E dinyatakan dalam persamaan 2.32b dan dapat diungkapkan kembali dalam bentuk

$$D = \sum_j \varepsilon_{ij} E \quad 2.33$$

dimana $i, j = 1, 2, 3$ yang masing-masing menunjukkan komponen x, y , dan z . Oleh karena itu sifat-sifat dielektrik dari material ditandai dengan matrik 3 x 3 atau sembilan koefisien $\{\varepsilon_{ij}\}$ yaitu (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007)

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad 2.34$$

Tensor dielektrik $[\varepsilon]$ adalah simetris dan riel. Oleh karena Bakteri bersifat non-isotropik, maka berlaku basis ortonormal (x, y, z) . Dengan demikian pada saat $i \neq j$, maka $\varepsilon_{ij} = 0$, sehingga tensor dielektrik diwakili oleh matriks diagonal yaitu (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007)

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad 2.35$$

Dimana ε_x , ε_y , dan ε_z adalah *eigen value* dari ε . Arah ditentukan oleh x , y , dan z yang diketahui sebagai sumbu prinsipial dari material. Setiap material yang non-isotropik dapat dijelaskan oleh indeks ellipsoid yang berisi informasi mengenai indeks bias yang memungkinkan untuk menentukan sebaran material.

Hubungan antara tensor medan listrik \mathbf{E} dan perpindahan \mathbf{D} dalam material non-isotropik telah diperkenalkan di persamaan 2.33, sehingga inversinya dirumuskan sebagai

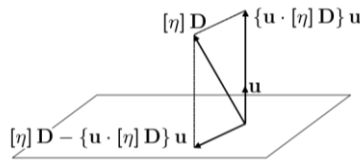
$$\mathbf{E} = \varepsilon^{-1} \mathbf{D} \quad 2.36$$

dimana ε^{-1} adalah inversi dari tensor ε . Dari sini dapat memperkenalkan tensor impermeabilitas $[\eta]$ yang merupakan kebalikan tensor dielektrik relatif yang didefinisikan sebagai (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007)

$$\eta = \varepsilon_0 \varepsilon^{-1} \quad 2.37$$

Sehingga persamaan 2.36 menjadi

$$\varepsilon_0 \mathbf{E} = \eta \mathbf{D} \quad 2.38$$



Gambar 2.5. Ilustrasi konfigurasi relatif dari vektor dalam

Ketika $[\varepsilon]$ simetris, $[\eta]$ juga simetris dan kedua tensor memiliki sumbu utama yang sama. Dalam basis ortonormal (x, y, z) dimana $[\varepsilon]$ adalah diagonal, sehingga $[\eta]$ juga diagonal, sehingga dapat dinyatakan sebagai (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007)

$$\eta = \begin{pmatrix} \frac{1}{n_x^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_y^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{n_z^2} \end{pmatrix} \quad 2.39$$

Sistem koordinat x, y, z diasumsikan terletak di sepanjang sumbu utama medium. Substitusi persamaan 2.39 ke dalam persamaan 2.37, diperoleh hubungan permitivitas dengan indeks bias dan dirumuskan :

$$n_x = \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}\right)^{1/2}, \quad n_y = \left(\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_0}\right)^{1/2}, \quad n_z = \left(\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_0}\right)^{1/2} \quad 2.40$$

Dimana n_x, n_y , dan n_z diketahui sebagai indeks bias prinsipial dan ε_0 adalah permitivitas ruang hampa.

Pada penelitian ini diasumsikan bahwa bakteri memiliki sifat non-isotropik uniaxial. Asumsi ini diambil karena bakteri khususnya pada selulosa memiliki sifat mekanik uniaxial seperti yang diungkapkan dalam Röhrnbauer and Mazza (Son, H. J. *et al.*, 2003; Botton, S. *et al.*, 2014). Pada medium uniaxial, indeks biasnya merupakan $n_x = n_y = n_o$ dan $n_z = n_e$ (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007). Lebih jelasnya n_o dan n_e berturut-turut merupakan indeks *ordinary* dan *extraordinary*. Medium dikatakan uniaxial positif jika $n_e > n_o$ dan dikatakan uniaxial negatif bilamana $n_e < n_o$ (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007). Sumbu z dari medium uniaxial disebut sumbu optik.

Indeks ellipsoid

Indeks ellipsoid yang sering disebut *optical indicatrix* adalah representasi kwadrat dari tensor impermeabilitas listrik $\eta = \varepsilon_0 \varepsilon^{-1}$, seperti diungkapkan pada Gambar 2.6. sehingga (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007)

$$\sum_{ij} \eta_{ij} x_i x_j = 1 \quad 2.41$$

Substitusi persamaan 2.39 ke dalam persamaan 2.38 diperoleh

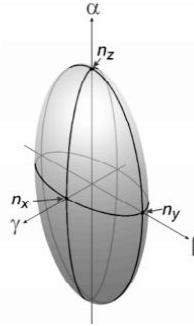
$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} n_x & 0 & 0 \\ 0 & n_y & 0 \\ 0 & 0 & n_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad 2.42$$

Bilamana medan listrik searah yang dikenakan, maka dipol listrik diinduksi dan resultan gaya listrik menggerakkan torsi pada molekul. Molekul-molekul berputar searah, sehingga energi elektrosatis bebasnya memenuhi (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007)

$$U = \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} \quad 2.43$$

Substitusi persamaan 2.42 ke dalam persamaan 2.43 diperoleh kerapatan energi

$$U = \frac{1}{2} \left(\frac{D_x^2}{\varepsilon_0 n_x^2} + \frac{D_y^2}{\varepsilon_0 n_y^2} + \frac{D_z^2}{\varepsilon_0 n_z^2} \right) \quad 2.44$$



Gambar 2.6. Definisi indeks ellipsoid

yang dapat ditulis ulang sebagai

$$\frac{\left(\frac{D_x}{\sqrt{2\varepsilon_0 U}} \right)^2}{n_x^2} + \frac{\left(\frac{D_y}{\sqrt{2\varepsilon_0 U}} \right)^2}{n_y^2} + \frac{\left(\frac{D_z}{\sqrt{2\varepsilon_0 U}} \right)^2}{n_z^2} = 1 \quad 2.45$$

Dengan demikian didapat *optical indicatrix* (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007)

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad 2.46$$

Dimana $1/n_x^2$, $1/n_y^2$, dan $1/n_z^2$ adalah harga prinsipial dari permeabilitas (η). Nilai indeks bias utama sepenuhnya dijelaskan oleh indeks ellipsoid (Gambar. 2.6). Indeks ellipsoid dari kristal uniaksial adalah ellipsoid yang berasal dari perubahan medium optik isotropik yang berbentuk bola.

Pada penelitian ini diasumsikan bahwa arah medan listrik yang dikenakan pada bakteri searah dengan sumbu-z. Agar posisi ini tercapai, maka posisi bakteri dibuat sejajar dengan arah medan listrik. Oleh karena itu perubahan indeks bias yang menjadi acuan dalam perhitungan adalah arah n_e atau n_z .

Perubahan indeks bias

Bakteri khususnya selulosa merupakan medium uniaksial (Galdiero S., *et.al*, 2013; Chen G. Q., 2010; Tang M. *et al.*, 2008), sehingga mempunyai indeks bias $n_x = n_y = n_o$ dan $n_z = n_e$ (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007). Anggap bahwa medan listrik mengarah pada sumbu z, sehingga $\mathbf{E}(x,y,z) = (0,0,E)$ seperti Gambar 2.7. Oleh karena itu dapat dilakukan modifikasi indeks ellipsoid menjadi (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007)

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13} \mathbf{E} \right) (x^2 + y^2) + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33} \mathbf{E} \right) z^2 = 1 \quad 2.47$$

Dengan demikian indeks bias biasa (n_o) dan luar biasanya (n_e) berturut-turut berubah menjadi (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007)

$$\frac{1}{n_o^2(\mathbf{E})} = \frac{1}{n_o^2} + r_{13} \mathbf{E} \quad 2.48$$

$$\frac{1}{n_e^2(\mathbf{E})} = \frac{1}{n_e^2} + r_{33} \mathbf{E} \quad 2.49$$

Oleh karena suku $r_{13} \mathbf{E}$ dan $r_{33} \mathbf{E}$ sangat kecil, maka berlaku deret

$$(1 + \theta)^{-1/2} = 1 - \frac{1}{2}\theta \quad 2.50$$

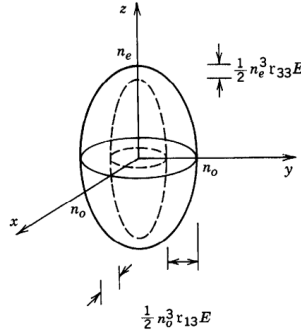
Dengan θ sangat kecil, maka didapatkan

$$\begin{aligned} n_o(E) &= n_o(0) - \frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E \\ n_e(E) &= n_e(0) - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E \end{aligned} \quad 2.51$$

Jika medan listrik berubah sebesar ΔE , maka perubahan indeks bias yang terjadi adalah

$$\Delta n_e = -\frac{1}{2} n_e^3 r_{33} \Delta E \quad 2.52$$

Dimana Δn_e adalah perubahan indeks bias ke arah sumbu z. Hal ini dapat disimpulkan bahwa ketika medan listrik diarahkan sepanjang sumbu optik bakteri yang uniaksial, maka akan tetap uniaksial dengan sumbu utama yang sama, tetapi indeks bias dimodifikasi sesuai dengan persamaan 2.52.



Gambar 2.7. Modifikasi indeks ellipsoid material trigonal yang disebabkan oleh medan listrik dalam arah sumbu optik

Pada penelitian ini medan listrik diberikan searah dengan sumbu z. Oleh karena itu perubahan indeks bias yang menjadi fokus penelitian adalah n_e . Semakin rendah indeks bias berarti kerapatan massanya juga semakin rendah (Liu Y dan Daum P. H., 2008). Semakin rendah rapat massa, maka porositasnya semakin besar dan permeabilitasnya semakin meningkat (Rahmouni A. *et al.*, 2004). Peningkatan permeabilitas akan meningkatkan difusi air dan ion ke dalam membran sel.

Difusi air dan ion pada membran sel

Paparan medan listrik pada bakteri akan menginduksi tegangan transmembran pada bagian membran sel yang memenuhi $\Delta\psi = 1,5 ER \cos \theta$ dimana R adalah radius sel (Palvin M. *et al.*, 2005). Bilamana tegangan membran $\Delta\psi$ melebihi tegangan kristis, maka membran menjadi sangat permeabel. Kondisi ini membuat difusi air dan ion ke dalam membran semakin besar. Perubahan permeabilitas membran karena pengaruh medan listrik diungkapkan sebagai (Saleh B.E.A dan Theich M.C, 2007)

$$\Delta\eta(E) = r\Delta E \quad 2.53$$

Dimana $\Delta\eta$ adalah perubahan permeabilitas akibat dikenai medan listrik, ΔE adalah perubahan medan listrik, dan n indeks bias lipid sebelum ada medan listrik.

Dengan substitusi persamaan 2.52 ke 2.53, maka diperoleh hubungan antara perubahan permeabilitas dengan perubahan indeks bias sebagai

$$\Delta\eta = -\frac{2\Delta n_e}{n_e^3} \quad 2.54$$

Akibat peningkatan permeabilitas membran sel, maka terjadi peningkatan difusi air dan ion pada membran. Hubungan perubahan indeks bias dengan difusi air dan ion pada membran sel diungkapkan (Kakorin S., dan Neumann E., 2002) sebagai

$$\Delta n_e = -\Delta f_{IW} n_e + \Delta f_{IW} n_a \quad 2.55$$

Substitusi persamaan 2.54 dengan 2.55 didapatkan

$$-\frac{1}{2} \Delta\eta n_e^3 = -\Delta f_{IW} n_e + \Delta f_{IW} n_a \quad 2.56a$$

Substitusi persamaan 2.53 ke dalam persamaan 2.56 didapatkan

$$\frac{1}{2} n_e^3 r \Delta E = (n_e - n_a) \Delta f_w \quad 2.56b$$

Dengan merubah medan listrik dari $E=0$ menjadi $E=E$, maka $\Delta E = E$, sehingga perubahan difusi air dan ion yang ke dalam daerah antarmuka kelompok lipid dalam membran sel menjadi

$$\Delta f_w = \frac{\frac{1}{2} n_e^3 r E}{n_e - n_a} \quad 2.57a$$

Dengan memakai persamaan $k_n = \frac{n_e^3 r}{n_e - n_a}$, maka diperoleh

$$\Delta f_w = \frac{1}{2} k_n E \quad 2.57b$$

Dimana $\Delta f_w = f_w(E) - f_w(0)$ adalah fraksi peningkatan volume aliran air dan ion dalam membran, n_a adalah indeks bias air, dimana untuk larutan sukrosa $M=0,33$ maka $n_a = 1.3639$ (Kakorin S., dan Neumann E., 2002). sementara itu n_e adalah indeks bias membran sel sebelum dikenai medan listrik yaitu = 1.5958 (data oleh Griese T., Doctoral Thesis, Bielefeld). Paparan dengan kuat medan listrik $E = 7,5 \text{ MV/m}$ dan durasi pulsa 10 μs diperoleh perubahan $\Delta f_w = 0,094$ (Kakorin S., dan Neumann E., 2002). Peningkatan permeabilitas membran sel khususnya bagian lipoprotein (lipid/lemak dan protein) dan karbohidrat melebihi batas ambang akan merusak membran dan dinding sel, sedangkan difusi air dan ion melalui membran yang berlebih akan merusak sitoplasma (Pillet F. *et al.*, 2016). Kerusakan membran sel membuat bakteri menjadi tidak aktif (Pagan R. dan Mackey B., 2000).

2.1.4. Konduktivitas Membran Sel

Dalam suspensi sel bakteri, elektroporasi adalah fungsi kompleks dari orientasi dan distribusi ukuran sel yang dapat dipengaruhi oleh agregasi sel, pengaturan, densitas sel lokal dan konsentrasi zat terlarut, serta distribusi medan listrik lokal (Canatella *et al.* 2004; Pucihar *et al.* 2007; Pavlin *et al.* 2007). Selain itu, medan listrik luar dapat mempengaruhi orientasi (Lebovka N.I. dan Vorobiev, 2007) dan agregasi sel (Toepfl S. *Et al.*, 2006) di suspensi. Redistribusi dari medan lokal di dalam jaringan biologis mungkin juga terjadi selama pemberian medan listrik (Lebovka N.I. *et al.* 2000a.; Lebovka N.I. *et al.*, 2001).

Konduktivitas membran sel bakteri khusus pada daerah yang permeable dapat didekati dengan jumlah konduktansi pori yang permeable (m) dan mempunyai radius r yaitu (Palvin M. *et al.*, 2005)

$$\sigma = m \pi r^2 \frac{\sigma_s}{d} = S_{por} \frac{\sigma_s}{d} \quad 2.58$$

Dimana σ_s adalah konduktivitas perpori, d adalah tebal membran sel dan S_{por} mengungkapkan luas permukaan semua pori yang berkonduksi. Akibat paparan medan listrik, maka terjadi peningkatan difusi air dan ion ke dalam membran, sehingga konduktivitas membran sel meningkat. Peningkatan konduktivitas $\Delta\sigma$ akibat paparan medan listrik dapat ditentukan

$$\Delta\sigma \approx \sigma(E) - \sigma(0) \quad 2.59a$$

atau

$$\sigma(E) = \sigma(0) + \Delta\sigma \quad 2.59b$$

Dimana $\sigma(0)$ adalah konduktivitas pada saat difusi air dan ion $f_w(0)$, sedangkan $\sigma(E)$ adalah konduktivitas pada saat difusi air dan ion $f_w(E)$. Dengan demikian konduktivitas membran sel pada saat medan listrik E adalah

$$\sigma(E) = S_{por} \frac{\sigma_s}{d} (1 + \Delta f_w) \quad 2.60$$

Dengan mensubstitusi persamaan 2.57b dan 2.58 kedalam persamaan 2.60 didapatkan

$$\sigma(E) = \sigma \left(1 + \frac{1}{2} k_n E \right) \quad 2.61$$

Dimana $\sigma(E)$ adalah konduktivitas membran sel ketika diberi medan listrik luar. Akibat meningkatnya konduktivitas membran sel, maka terjadi kerusakan membran, sehingga menyebabkan kematian bakteri (Pagan R. dan Mackey B., 2000)..

2.1.5. Penurunan Jumlah Bakteri

Jumlah bakteri yang masih bertahan selama perlakuan ditentukan dengan memodifikasi model distribusi *Weibull*. Model *Weibull* pertama kali berperan sebagai fungsi probabilitas seperti berikut (Couvert O. *et al.*, 2005)

$$f(t) = \frac{\rho}{\delta} \left[\frac{t}{\delta} \right]^{\rho-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\delta} \right)^\rho \right] \quad 2.62$$

Parameter ρ memiliki efek yang ditandai dengan tingkat kegagalan yang diperkirakan dari distribusi *Weibull*. Nilai ρ , sesuai dengan hukum normal ($\rho = 1$), hukum eksponensial ($\rho > 1$) atau hukum asimtotik ($\rho < 1$). Perubahan dari parameter skala δ memiliki efek yang sama pada distribusi yaitu sebagai perubahan dari skala absis. Jika δ meningkat, distribusi akan membentang keluar dan tingginya menurun sambil mempertahankan bentuknya.

Distribusi kumulatif dari fungsi *Weibull* adalah (Bevilacqua A. *et al.*, 2015)

$$F(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\delta} \right)^\rho \right] \quad 2.63$$

atau diterapkan untuk kurva survival kinetika (Bevilacqua A. *et al.*, 2015)

$$\log S(t) = - \left(\frac{t}{\delta} \right)^\rho \quad 2.64$$

dimana $S(t)$ adalah rasio N/N_0 pada waktu t , δ dan ρ adalah dua parameter kepadatan probabilitas *Weibull*. Dimana N dan N_0 berurut-turut adalah jumlah bakteri sebelum dan sesudah perlakuan. Jumlah bakteri yang bertahan hidup pada waktu t tergantung dari faktor eksternal yang dikenakan. Seperti yang dikemukakan pada persamaan 2.64 bahwa akibat dari paparan medan listrik, maka terjadi peningkatan difusi air dan ion melewati membran sel. Dengan demikian kematian bakteri dipengaruhi oleh energi listrik yang digunakan, sehingga distribusi *Weibull* dapat dimodifikasi menjadi (Puértolas E. *et al.*, 2009)

$$\log S(t) = - \left(\frac{W}{\delta} \right)^\rho \quad 2.65$$

Dengan mengganti $S(t) = N/N_0$, maka

$$\log \frac{N(t)}{N_0} = - \left(\frac{W}{\delta} \right)^\rho \quad 2.66$$

Dimana $N(t)$ adalah jumlah bakteri yang masih bertahan setelah dipapar selama t , N_0 adalah jumlah bakteri sebelum dipapar, dan W adalah besar energi listrik yang digunakan. Besarnya energi listrik yang digunakan untuk menonaktifkan bakteri dirumuskan (Monfort S., *et al.*, 2012)

$$W = \int \sigma(E) E^2 dt \quad 2.67$$

sehingga

$$W = \sigma(E) E^2 t \quad 2.68$$

Sementara itu parameter kepadatan probabilitas *Weibull* δ ditentukan menggunakan model persamaan yang didasarkan pada fungsi Gompertz (Puértolas E. *et al.*, 2009)

$$\delta = a - b e^{e^{c(K-d)}} \quad 2.69$$

Dimana δ adalah dimensi energi yang diperlukan untuk in-aktivasi pertama, K adalah kuat medan listrik, a , b dan c adalah tetapan dan d adalah parameter model. Data penelitian *Dekker anomala* dalam anggur memiliki nilai δ dari 30.29 ± 7.91 sampai 9.82 ± 7.23 untuk paparan dengan medan listrik antara 16 – 31 kV/cm (Puértolas E. *et al.*, 2009).

Penurunan jumlah bakteri sebagai fungsi waktu dapat disederhanakan dengan mensubstitusi persamaan 2.61 dan 2.68 ke dalam persamaan 2.66, sehingga diperoleh

$$\log \frac{N(t)}{N_0} = \frac{\sigma \left(1 + \frac{1}{2} k_n E \right) E^2 t}{\delta} \quad 2.70$$

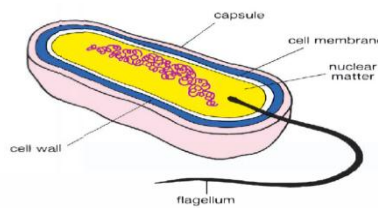
Kondisi ini menunjukkan bahwa penurunan jumlah bakteri ditentukan oleh kuat medan listrik dan waktu paparan.

2.2 Bakteri

2.2.1 Struktur Sel Bakteri

Struktur sel bakteri dibedakan atas struktur dalam dan struktur luar. Hampir semua bakteri memiliki dinding sel yang mengelilingi membran plasma. Dalam membran plasma terletak sitoplasma yaitu zat yang terdiri dari air, protein, dan molekul lainnya. Rantai melingkar tunggal DNA merupakan molekul kompleks yang membawa semua informasi tentang bagaimana makhluk hidup akan terlihat dan keberadaannya mengapung bebas di sitoplasma. Pada beberapa spesies, kapsul gelatin membungkus dinding sel (Hollar S., 2012).

Paparan medan listrik pada bakteri diharapkan akan menaikkan potensial transmembran dari membran plasma. Kenaikan potensial transmembran akan menyebabkan kenaikan permeabilitas membran plasma. Peningkatan permeabilitas membran plasma memungkinkan terjadinya aliran material intraseluler.



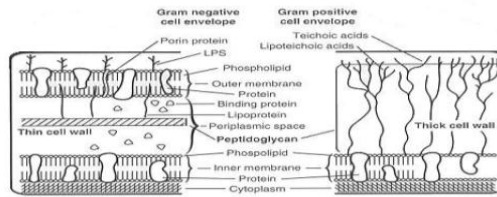
Gambar 2.4 Struktur sel bakteri (Hollar S., 2012)

2.2.2 Struktur Membran Plasma

Sel adalah unit fungsional dan struktural dalam makhluk hidup. Sebagai unit fungsional, pada sel berlangsung reaksi kimia dan berbagai proses metabolisme serta sebagai unit struktural (Hollar S., 2012). Membran plasma adalah suatu lembaran tipis yang memisahkan sel dengan dunia luarnya. Bakteri Gram-positif memiliki dinding sel yang terdiri dari membran tunggal dan lapisan tebal *peptidoglikan*. Bakteri Gram-negatif memiliki dinding sel yang terdiri dari dua membran yang mengapit ruang *periplasmic* (Chatterjee S.N. dan Chaudhuri K., 2012) seperti terlihat pada Gambar 2.4. Membran terluar disebut membran luar dan yang paling dalam disebut sebagai membran dalam. Dalam *periplasmic* terletak lapisan *peptidoglikan* yang tipis, yang terkait dengan membran lapisan luar

Membran plasma bakteri sebagian besar terbentuk dari fosfolipid. Pada bakteri Gram-positif dan membrane bagian dalam dari bakteri Gram-negatif fosfolipid tersusun cukup merata di kedua "leaflet" membran. Sebaliknya, membran luar bakteri Gram-negatif adalah asimetris terkait dengan susunan fosfolipid. Sebagian besar fosfolipid terletak di leaflet dari membran. Leaflet luar berisi beberapa fosfolipid, dan juga protein serta lemak yang disebut lipopolisakarida.

Susunan asimetris dari membrane Gram-negatif luar memberikan berbagai fungsi untuk bakteri. Protein memungkinkan terjadinya difusi senyawa melewati membran luar, selama mereka bisa masuk ke dalam pori yang melalui pusat protein. Selain itu, protein lain berfungsi khusus mengangkut senyawa ke bagian dalam bakteri. Komponen lipopolisakarida membran luar mampu mengatur berbagai reaksi kimia dan dapat mempengaruhi kemampuan bakteri untuk menghindari pertahanan kekebalan tubuh inang.



Gambar 2.5 Struktur membran plasma bakteri Gram-negatif dan Gram-positif (Rockel C.T, 2009)

Kebanyakan sel menggunakan proses pernapasan untuk mendapatkan energi. Selama respirasi, senyawa organik atau anorganik yang mengandung elektron energi tinggi dipecah dan melepaskan elektron untuk melakukan aktivitas. Elektron mengarah ke membran dan elektron dilewatkan oleh pembawa elektron serta selama proses ini proton diangkut ke luar sel. Dengan demikian bagian luar membran menjadi bermuatan positif dan didalam menjadi bermuatan negatif (Cohen G.N, 2011).

Adanya muatan positif di bagian luar dan negatif di bagian dalam membran plasma, maka terbentuklah potensial transmembran. Pemberian medan listrik luar membuat muatan positif akan mendekati elektroda negatif, sedangkan muatan negatif menuju elektroda positif. Pergeseran muatan membran plasma ini akan meningkatkan potensial transmembran di elektroda negatif dan menurunkan disisi elektroda positif. Bertambah dan berkurangnya potensial transmembran akan meningkatkan permeabilitas dan konduktivitas membran plasma.

2.2.3 Bakteri Pada Susu

Beberapa cemaran mikroba patogen yang banyak dijumpai pada susu yang sudah teridentifikasi, dan sering dijumpai susu antara lain *Staphylococcus aureus*, *Salmonella sp.*, dan *Campylobacter sp* (Djaafar dkk, 2005), selain ketiga bakteri yang tersebut, bakteri *Escherichia coli* merupakan bakteri yang dijumpai menjadi penyebab kerusakan pada susu sebagai akibat enterotoksin yang diproduksinya (Utami P.S.: 2012., 1980).

A. *Staphylococcus aureus*

Staphylococcus aureus (*S. aureus*) adalah bakteri gram positif yang menghasilkan pigmen kuning, bersifat aerob fakultatif, tidak menghasilkan spora dan tidak motil, umumnya tumbuh berpasangan maupun berkelompok, dengan diameter sekitar 0,8-1,0 μm (Madigan MT, Martinko JM, Dunlap PV, Clark DP., 2008). *S. aureus* tumbuh dengan optimum pada suhu 37°C dengan waktu pembelahan 0,47 jam (Prescott LM, Harley JP, Klein DA., 2002). *S. aureus* merupakan mikroflora normal manusia (Prescott LM, Harley JP, Klein DA., 2002). Bakteri ini biasanya terdapat pada saluran pernapasan atas dan kulit (Honeyman AL, Friedman H, Bendinelli M., 2001). Keberadaan *S. aureus* pada saluran pernapasan atas dan kulit pada individu jarang menyebabkan penyakit, individu sehat biasanya hanya berperan sebagai karier. Infeksi serius akan terjadi ketika resistensi inang melemah karena adanya perubahan hormon; adanya penyakit, luka, atau perlakuan menggunakan steroid atau obat lain yang memengaruhi imunitas sehingga terjadi pelemahan inang (Madigan MT, Martinko JM, Dunlap PV, Clark DP., 2008).

Infeksi *S. aureus* diasosiasikan dengan beberapa kondisi patologi, diantaranya bisul, jerawat, pneumonia, meningitis, dan artritis (Madigan MT, Martinko JM, Dunlap PV, Clark DP., 2008).

B. *Salmonella*

Salmonella adalah suatu genus bakteri enterobakteria gram-negatif berbentuk tongkat yang menyebabkan tifoid, paratifod, dan penyakit *foodborne* (Ryan KJ, Ray CG, 2004).

Salmonella adalah penyebab utama dari penyakit yang disebarkan melalui makanan (*foodborne diseases*). Pada umumnya, serotipe *Salmonella* menyebabkan

penyakit pada organ pencernaan. Penyakit yang disebabkan oleh *Salmonella* disebut salmonellosis. Ciri-ciri orang yang mengalami salmonellosis adalah diare, keram perut, dan demam dalam waktu 8-72 jam setelah memakan makanan yang terkontaminasi oleh *Salmonella*. Gejala lainnya adalah demam, sakit kepala, mual dan muntah-muntah (FSIS, 2006). *S. typhi* menyebabkan penyakit demam tifus (Typhoid fever), karena invasi bakteri ke dalam pembuluh darah dan gastroenteritis, yang disebabkan oleh keracunan makanan/intoksikasi. Gejala demam tifus meliputi demam, mual-mual, muntah dan kematian (Maloy S., 1999). Infeksi *Salmonella* dapat berakibat fatal kepada bayi, balita, ibu hamil dan kandungannya serta orang lanjut usia. Hal ini disebabkan karena kekebalan tubuh mereka yang menurun. (CDC., 2006).

C. *Escherichia coli*

Escherichia coli, atau biasa disingkat *E. coli*, adalah salah satu jenis spesies utama bakteri gram negatif. Beberapa tipe *E. coli* seperti O157:H7 dapat mengakibatkan keracunan makanan yang serius pada manusia yaitu diare berdarah karena eksotoksin yang dihasilkan bernama verotoksin. Toksin ini bekerja dengan cara menghilangkan satu basa adenin dari unit 28S rRNA, sehingga menghentikan sintesis protein (Levinson W., 2008).

III METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini yaitu penelitian eksperimental. Penelitian eksperimental bertujuan untuk memperoleh data pengamatan tentang pengaruh medan listrik serta waktu pemaparan terhadap penurunan jumlah koloni bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella Sp.*, dan *Escherichia coli* pada susu. Penelitian ini dilakukan sebagai upaya sanitasi bahan pangan yang diharapkan mampu meningkatkan ketahanan pangan, dan penghematan energi listrik nasional.

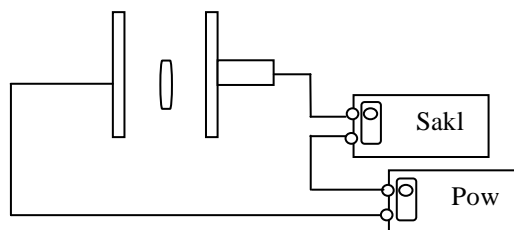
3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah: Set medan listrik, Mikropipet 1 buah, Cawan petri 27 buah, Jarum oose 1 buah, Erlenmeyer 250 ml 2 buah, Tabung reaksi 4 buah, LAF (Laminar Air Flow) 1 unit, Vortex, Bunsen 1 buah, Kapas 1 pack, Tisu 1 pack, Timbangan analitik 1 buah, Hot Plate, Stirrer, Inkubator 1 buah, Plastik wrap 1 buah, Aluminium Foil 1 buah, Speritus, Korek api, Gelas ukur 50 ml 1 buah, Blue tip 100 buah, Pinset 1 buah, Beaker glass 2 buah, Botol flakon 60 buah, Autoklaf 1 buah, Botol semprot 1 buah, Colony counter, Ultrasonic Milk Analyzers.

Pada penelitian ini bahan yang digunakan adalah: bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella Sp.*, dan *Escherichia coli*, Aquades, NaCl, Media NA (Nutrien Agar), Media NB (Nutrien Broth), Alkohol, Susu Sapi murni sebagai media uji

3.3 Desain Rangkaian Alat

Peralatan yang telah disiapkan dirangkai seperti gambar 3.1. Sumber tegangan tinggi berasal dari power supply. Tegangan positif power supply disambungkan ke saklar otomatis agar berbentuk pulsa. Keluaran dan saklar dan ground dari power supply disambungkan ke plat parallel yang terbuat dari tembaga.



Gambar 3.1 Desain Rangkaian Alat

3.4 Rancangan Penelitian

Penelitian ini adalah penelitian eksperimen laboratorik dengan pendekatan *Post Test Control Group Design*. Sampel penelitian adalah bakteri yaitu *Staphylococcus aureus*, *Salmonella Sp.*, dan *Escherichia coli*. Penentuan bakteri dilakukan dengan mempertimbangkan bahwa bakteri tersebut banyak tumbuh pada susu.

Penonaktifan bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella Sp.*, dan *Escherichia coli*, dilakukan menggunakan medan listrik berpulsa dan temperatur 30°C. Medan listrik berpulsa dihasilkan dari *Power Supply* tegangan tinggi dan disambungkan ke saklar dan berikutnya disambungkan pada plat sejajar. Paparan medan listrik berpulsa pada bakteri dilakukan dengan variasi kuat medan listrik dan lama paparan. Variabel yang diukur pada penelitian ini adalah jumlah bakteri yang masih aktif dan kerusakan membran. Pengukuran jumlah bakteri yang masih aktif dihitung dengan *colony counter* dan kerusakan protein susu.

3.5 Langkah-Langkah Penelitian

3.6.1 Penumbuhan Bakteri

Langkah untuk menumbuhkan bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella Sp.*, dan *Escherichia coli* antara lain:

1. Sterilisasi alat dengan cara dibungkus dengan plastik tahan panas kemudian dimasukkan ke dalam autoklaf.
2. Diambil 1 ose biakan murni bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella Sp.*, dan *Escherichia coli* dan digoreskan secara zigzag kedalam media NA miring dalam tabung reaksi kemudian diinkubasi selama 24 jam.
3. Langkah kedua diulangi terus sampai diperoleh biakan murni.

3.6.2 Penumbuhan Bakteri pada Susu

Langkah-langkah penumbuhan bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella Sp.*, dan *Escherichia coli* antara lain:

1. Dicuci dan disterilkan tabung tempat penumbuhan bakteri pada susu.
2. Mengisi tabung dengan susu sebanyak 10 ml.
3. Diambil 1 ose bakteri dari media NA dan dimasukkan ke dalam tabung berisi susu.
4. Diinkubasi selama 24 jam pada incubator dengan suhu 37°C.

3.6.3. Paparan Medan Listrik

Langkah-langkah dalam pemberian perlakuan medan listrik antara lain:

1. Susu yang terkontaminasi dengan bakteri (tiap-tiap percobaan menggunakan satu jenis bakteri) dipapar dengan medan listrik.
2. Dilakukan perhitungan jumlah bakteri yang masih hidup dan kandungan protein susu.
3. Mengulangi langkah 1 sampai 3 dengan waktu paparan dan kuat medan yang berbeda (masing-masing waktu paparan dengan kuat medan diulangi 3 kali).
4. Menentukan waktu paparan optimum dengan persamaan 2.13
5. Mengulangi langkah 1 sampai 3 dengan waktu paparan optimum.
6. Menghitung penggunaan energy listrik dengan persamaan 2.35

3.6.4 Penghitungan Bakteri

Langkah-langkah untuk menghitung bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella Sp.*, dan *Escherichia coli* yang telah nonaktif melalui proses pengenceran antara lain:

1. Cawan petri dan botol flakon yang telah berisi aquades dimasukkan ke dalam autoklaf untuk disterilisasi.
2. Diambil 1 ml suspensi dari botol flakon yang sudah dipapari medan listrik kemudian dimasukkan kedalam botol flakon steril yang berisi 9 ml aquades.
3. Diambil kembali 1 ml dari kemudian dimasukkan ke dalam botol flakon steril yang berisi 9 ml aquades.

4. Dan seterusnya sampai diperoleh perhitungan yang sesuai.
5. Dilakukan semua proses diatas secara aseptis yaitu di dekat api bunsen.
6. Diambilkan 1 ml aquades yang ada bakterinya dan dituang pada cawan petri yang sudah berisi media PCA.
7. Dimasukkan ke dalam inkubator dengan posisi terbalik (bagian tutup berada dibawah) setelah media tersebut membeku.
8. Diinkubasi selama 24 jam.
9. Dihitung jumlah koloni yang terbentuk.
10. Selain diukur jumlah bakteri yang masih hidup juga dilakukan pengukuran kadar lemak, kerapatan, Protein, laktosa, dan PH

3.7 Teknik Analisis Data

Analisis deskriptif, dihitung jumlah bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella Sp.*, dan *Escherichia coli* setelah diberi paparan medan listrik. Jumlah bakteri yang hidup tersebut dibandingkan dengan jumlah bakteri pada kontrol (tanpa paparan nmedan listrik). Kemudian data yang diperoleh tersebut akan disajikan dalam bentuk grafik.

Analisis berikutnya dilakukan dengan cara membandingkan grafik yang diperoleh dari persamaan empiris dengan hasil pemodelan persamaan 2.33. Dari grafik pemodelan ditentukan waktu paparan optimum pada masing masing kuat medan listrik. Data hasil waktu paparan optimum berikutnya dilakukan analisis kebutuhan energi listrik pada masing-masing paparan menggunakan persamaan 2.35. dan di plot dalam bentuk grafik. Dengan demikian dapat diketahui kebutuhan energi listrik untuk penonaktifan bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella Sp.*, dan *Escherichia coli*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dengan sampel bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella sp.*, dan *Escherichia coli*. yang telah ditumbuhkan pada susu sapi segar dan diinkubasi selama 24 jam dengan suhu 37°C. Susu sapi diambil dari peternak sapi perah yang ada di kota Batu Malang. Pemerahan dilakukan secara manual sesuai dengan standart yang telah ditetapkan.

Pemaparan dilakukan dengan kuat medan listrik 2.0 – 4.0 kV/cm dengan lama pemaparan 5.0 – 25.0 menit. Pemaparan dilakukan pada suhu lingkungan 27°C dan kelembaban udara 60%. Perhitungan jumlah bakteri dilakukan sebelum dan sesudah dilakukan pemaparan serta setiap pemaparan dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali. Papan medan listrik dalam susu menyebabkan jumlah bakteri kontaminan pada susu mengalami penurunan. Bentuk logaritmik dari penurunan jumlah koloni bakteri dihitung menggunakan persamaan:

$$Decrease (log) = -\log \frac{N_t}{N_0}$$

Dimana N_0 adalah jumlah koloni bakteri sebelum terpapar dan N_t adalah jumlah koloni bakteri setelah terkena medan listrik.

4.1. Efek medan listrik terhadap penurunan jumlah bakteri

Data penelitian

4.1 Data ffeq medan listrik dan waktu paparan terhadap penurunan jumlah koloni bakteri *Staphylococcus aureus*

Medan Listrik kV/cm	Penurunan jumlah bakteri (log)				
	5 Menit	10 menit	15 menit	20 menit	25 menit
2	0.05683	0.13436	0.19122	0.21378	0.22806
2.5	0.24686	0.27327	0.29019	0.30298	0.3426
3	0.44391	0.46482	0.50621	0.57033	0.59053
3.5	0.64324	0.75996	0.88067	0.89851	0.93048
4	1.06149	2.50527	3.31069	4.12663	7.61172

Jumlah koloni bakteri dalam susu sapi sebelum dipapari menggunakan medan listrik adalah 49×10^8 , 89×10^8 , dan 215×10^7 CFU / ml berturut-turut untuk bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella sp.*, dan *Escherichia coli*. Paparan susu dengan medan listrik menyebabkan penurunan jumlah koloni bakteri yang mengkontaminasi. Paparan menggunakan medan listrik 2,0 kV / cm selama 25 menit mengurangi jumlah bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella sp.*, dan *Escherichia coli* berturut-turut sebesar 0,23, 0,28, dan 1,14 log. Paparan dengan durasi waktu yang sama dengan medan listrik 4.0 kV / cm terjadi penurunan berturut-turut sebesar 7,61, 9,19, dan 9,24 log. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 4.1 – 4.3.

4.2 Data ffeq medan listrik dan waktu paparan terhadap penurunan jumlah koloni bakteri *Salmonella sp*

Medan Listrik kV/cm	Penurunan jumlah bakteri (log)				
	5 Menit	10 menit	15 menit	20 menit	25 menit
2	0,034	0,067	0,11	0.18	0.28
2.5	0.07972	0.11422	0.1942	0.21206	0.2655
3	0.26215	0.34352	0.40415	0.58676	0.80027
3.5	0.91347	0.99953	1.42388	1.50287	1.81505
4	5.44619	6.93079	7.66727	8.61077	9.18546

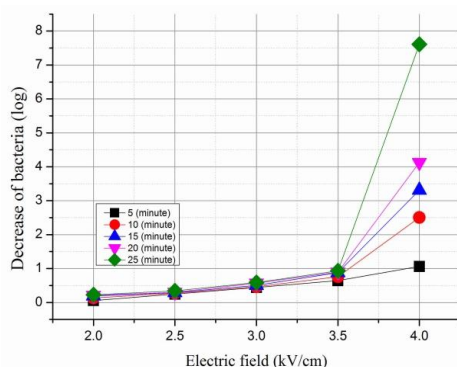
4.3 Data efek medan listrik dan waktu paparan terhadap penurunan jumlah koloni bakteri *Escherichia coli*

Medan Listrik kV/cm	Penurunan jumlah bakteri (log)				
	5 Menit	10 menit	15 menit	20 menit	25 menit
2	0.09524	0.28656	0.48593	0.7908	1.13987
2.5	0.41362	0.89133	1.14904	1.64788	1.90041
3	1.00724	1.3944	1.56233	1.9513	2.38616
3.5	3.29121	3.90255	4.63495	5.05516	5.90795
4	6.57099	7.71067	8.60692	8.90795	9.24284

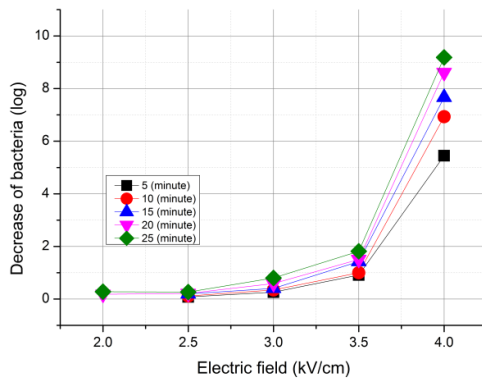
Analisis data

Data pada table 4.1-4.3 apabila diplot dalam bentuk grafik terlihat pada Gambar 4.1-4.3. Gambar 4.1-4.3 menunjukkan bahwa paparan medan listrik 2,0 - 3,5 kV / cm belum menunjukkan penurunan jumlah koloni bakteri yang signifikan. Keadaan ini terjadi karena perubahan indeks bias membran yang disebabkan oleh pemaparan medan listrik 2,0 - 3,5 kV / cm masih kecil, sehingga permeabilitas membran sel masih dibawah ambang batas. Perhitungan perubahan indeks bias menggunakan persamaan (2.52) diperoleh $0,69 \times 10^{-6}$ - $1,2 \times 10^{-6}$. Besarnya perubahan indeks bias diperoleh dengan mengasumsikan bahwa indeks bias lipid (Wal, 1997) adalah 1,384, indeks bias susu 1,3451 dan linear koefisien lipid elektro-optik 2,6 pm / V (Hajj, 2009).. Perubahan indeks bias yang terjadi masih cukup kecil, sehingga belum membuat terjadinya elektroporasi irreversible.

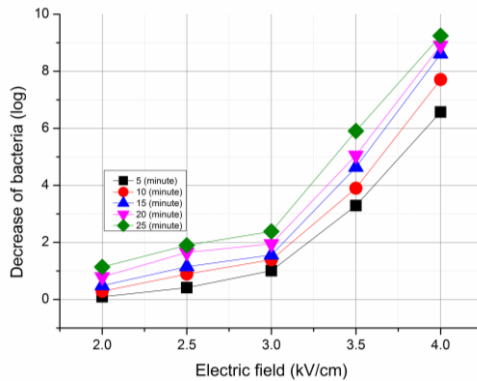
Paparan menggunakan medan listrik 4,0 kV / cm jumlah koloni bakteri mulai berkurang secara signifikan. Kondisi ini terjadi karena perubahan indeks bias yang terjadi telah mampu meningkatkan permeabilitas membran sel bakteri diatas ambang batas. Perubahan indeks bias membran sel dihitung menggunakan persamaan (2.52) dan diperoleh perubahan $1,38 \times 10^{-6}$. Perubahan permeabilitas membran sel di atas ambang menghasikanl peningkatan difusi air dan ion yang melewati membran sel. Fraksi meningkatkan volume difusi air dan ion yang terjadi di membran sel dihitung menggunakan persamaan (2.57b), dan diperoleh hasil 0,0000354. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada membrane sel telah terjadi elektroporasi irreversible, sehingga terjadi kerusakan membrane sel.



Gambar 4.1 Grafik pengaruh paparan medan listrik terhadap penurunan jumlah koloni bakteri *Staphylococcus aureus*



Gambar 4.2 Grafik pengaruh paparan medan listrik terhadap penurunan jumlah koloni bakteri *Salmonella sp*



Gambar 4.3 Grafik pengaruh paparan medan listrik terhadap penurunan jumlah koloni bakteri *Escherichia coli*

Table. 4.4 Penurunan jumlah bakteri dengan pemaparan selama 15 menit.

Field Strength kV/cm	Decreasing number of bacteria (log)		
	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Salmonella sp.</i> ,	<i>Escherichia coli</i>
2.0	0.19 ± 0.00309	0.11 ± 0.0024	0.49 ± 0.000890
2.5	0.29 ± 0.00085	0.19 ± 0.0063	1.15 ± 0.000061
3.0	0.51 ± 0.00187	0.40 ± 0.0071	1.56 ± 0.005900
3.5	0.88 ± 0.04090	1.42 ± 0.0440	4.63 ± 0.025000
4.0	3.31 ± 0.04782	7.67 ± 0.1776	8.61 ± 0.021000
4.5	8.05 ± 0.22421	8.65 ± 0.2120	8.96 ± 0.120000

Meningkatkan intensitas medan listrik setelah melewati ambang batas permeabilitas menyebabkan penurunan jumlah bakteri yang terjadi sangat signifikan. Kondisi ini dapat dilihat pada tabel 4.4, dimana penurunan jumlah bakteri akibat paparan medan listrik 4,0 kV / cm dibandingkan 4,5 kV / cm memiliki perbedaan yang signifikan. Penurunan jumlah bakteri karena paparan selama 15 menit dengan medan listrik 4,0 kV / cm adalah 3,31, 7,67, dan 8,61 log berturut-turut untuk bakteri

Staphylococcus aureus, *Salmonella sp.*, dan *Escherichia coli*. Ketika intensitas medan listrik adalah 4,5 kV / cm, akan terjadi penurunan berturut-turut sebesar 8,05, 8,65, dan 8,96 log. Informasi lebih lengkap terlihat pada Tabel. 4.4..

4.2 Pengaruh Ukuran Bakteri Pada Penurunan Jumlah Bakteri

Data penelitian

Ukuran bakteri berpengaruh terhadap jumlah penurunan koloni yang terjadi. Pada pemaparan dengan kuat medan listrik 3,0 kV/cm selama 25 menit terjadi penurunan jumlah bakteri sebesar 0.59053, 0.80027, 2.38616 log berturut turut untuk bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella sp.*, dan *Escherichia coli*. Pemaparan dengan kuat medan listrik 3,5 kV/cm dengan waktu yang sama diperoleh penurunan sebesar 0.64, 0.91, 3.29 log berturut turut untuk bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella sp.*, dan *Escherichia coli*. Pemaparan dengan kuat medan listrik dengan intensitas yang lebih tinggi yaitu 4,0 kV/cm terjadi penurunan jumlah bakteri sebesar 1.06149, 5.44619, 6.57099 log berturut turut untuk bakteri *Staphylococcus aureus*, *Salmonella sp.*, dan *Escherichia coli*. Data lebih lengkap dapat dilihat pada Tabel 4.5-4.7.

Tabel 4.5 Data pengaruh ukuran bakteri terhadap penurunan jumlah koloni bakteri. Pemaparan dilakukan dengan kuat medan listrik 3.0 kV/cm

Waktu Papanan (menit)	Decreasing number of bacteria (log)		
	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Salmonella sp.</i> ,	<i>Escherichia coli</i>
5	0.44391	0.26215	1.00724
10	0.46482	0.34352	1.3944
15	0.50621	0.40415	1.56233
20	0.57033	0.58676	1.9513
25	0.59053	0.80027	2.38616

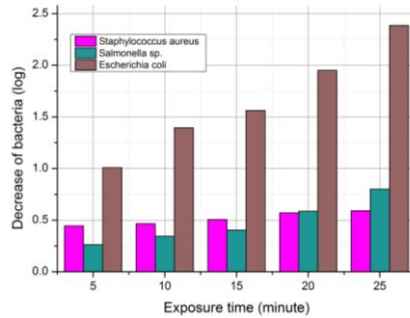
Tabel 4.6 Data pengaruh ukuran bakteri terhadap penurunan jumlah koloni bakteri. Pemaparan dilakukan dengan kuat medan listrik 3,5 kV/cm

Waktu Papanan (menit)	Decreasing number of bacteria (log)		
	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Salmonella sp.</i> ,	<i>Escherichia coli</i>
5	0.64	0.91	3.29
10	0.76	0.99	3.9
15	0.88	1.42	4.63
20	0.9	1.5	5.06
25	0.93	1.82	5.91

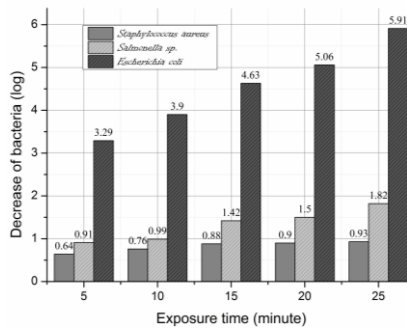
Tabel 4.7 Data pengaruh ukuran bakteri terhadap penurunan jumlah koloni bakteri. Pemaparan dilakukan dengan kuat medan listrik 4.0 kV/cm

Waktu Papanan (menit)	Decreasing number of bacteria (log)		
	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Salmonella sp.</i> ,	<i>Escherichia coli</i>
5	1.06149	5.44619	6.57099
10	2.50527	6.93079	7.71067
15	3.31069	7.66727	8.60692
20	4.12663	8.61077	8.90795
25	7.61172	9.18546	9.24284

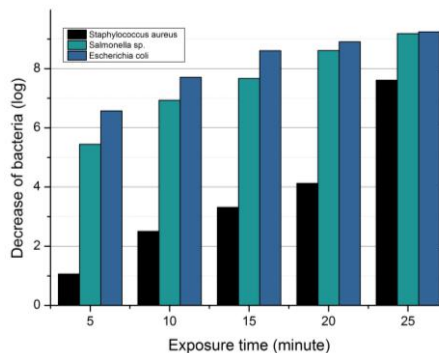
Analisis



Gambar 4.4 Grafik pengaruh ukuran bakteri terhadap penurunan jumlah koloni bakteri. Pemaparan dilakukan dengan kuat medan listrik 3.0 kV/cm



Gambar 4.5 Grafik pengaruh ukuran bakteri terhadap penurunan jumlah koloni bakteri. Pemaparan dilakukan dengan kuat medan listrik 3.5 kV/cm



Gambar 4.6 Grafik pengaruh ukuran bakteri terhadap penurunan jumlah koloni bakteri. Pemaparan dilakukan dengan kuat medan listrik 4.0 kV/cm

Data pada Tabel 4.5 – 4.7 apabila diungkapkan dalam bentuk grafik berturut-turut terlihat pada Gambar 4.4-4.6. Gambar menunjukkan bahwa paparan medan listrik terhadap bakteri *Escherichia coli* menyebabkan jumlah reduksi yang lebih besar bila dibandingkan dengan bakteri *Salmonella sp* dan *Staphylococcus aureus*. Kondisi ini terjadi karena ukuran bakteri *Escherichia coli* lebih besar daripada bakteri *Salmonella sp* dan *Staphylococcus aureus*. Dimana bakter *Staphylococcus aureus* adalah bakteri gram positif dengan diameter 0,5 - 1,5 μm (Harris, L.G., et al., 2002), *Salmonella sp.* adalah bakteri gram negatif berbentuk batang dengan ukuran 2-3 x 0,4-0,6 μm (Montville dan Matthews, 2008), dan *Escherichia coli* adalah bakteri gram negatif dengan ukuran $\sim 1 \mu\text{m}$ dengan panjang $\sim 2,5 \mu\text{m}$ (Palchaudhuri S. et al., 2017). Ukuran bakteri lebih besar, luas permukaan juga lebih besar, jadi jika diberi medan listrik

eksternal, medan listrik internal yang dihasilkan juga lebih besar. Gambar 4.4-4.7. menunjukkan bahwa paparan medan listrik selama 25 menit mengakibatkan penurunan jumlah koloni bakteri *Escherichia coli* sebesar, 2.38616 5,91, dan 9.24284 log berturut turut untuk kuat medan listrik 3,0; 3,5; dan 4,0 kV/cm, sementara *Staphylococcus aureus* dan *salmonella sp.* Lebih kecil dari itu (terlihat pada table 4.4 – 4.6

4.3 Efek Waktu Paparan terhadap Penurunan Jumlah Bakteri

Tabel 4.8 Data pengaruh waktu paparan terhadap penurunan jumlah bakter (paparan dengan medan listrik 2,5 kV/cm)

Medan Listrik kV/cm	Penurunan jumlah bakteri (log)				
	5 Menit	10 menit	15 menit	20 menit	25 menit
<i>Staphylococcus aureus</i>	0.25	0.27	0.29	0.3	0.34
<i>Salmonella sp.</i>	0.08	0.11	0.19	0.21	0.27
<i>Escherichia coli</i>	0.41	0.89	1.15	1.66	1.9

Durasi pemaparan bakteri menggunakan medan listrik 2,5 kV/cm dan 3,5 kV/cm untuk bakteri *Staphylococcus aureus* dan *Salmonella sp.* tidak membawa dampak yang signifikan terhadap penurunan jumlah bakteri, karena kuat medan listrik tersebut belum menyebabkan terjadinya elektroporasi yang irreversible. Sementara itu pada kuat medan listrik 4,0 kV/cm derjadi perubahan penurunan jumlah bakteri yang signifikan seperti terlihat pada Tabel 4.10. Berbeda dengan pemaparan pada bakteri *Escherichia coli* dimana pemaparan pada kuat medan listrik 2,5 kV/cm sudah menyebabkan peningkatan jumlah penurunan koloni bakteri. Perubahan menjadi lebih besar ketika dipapar menggunakan medan listrik 3,5 dan 4,0 kV/cm seperti terlihat pada Tabel 4.8 – 4.10.

Tabel 4.9 Data pengaruh waktu paparan terhadap penurunan jumlah bakter (paparan dengan medan listrik 3,5 kV/cm)

Medan Listrik kV/cm	Penurunan jumlah bakteri (log)				
	5 Menit	10 menit	15 menit	20 menit	25 menit
<i>Staphylococcus aureus</i>	0.64	0.76	0.88	0.90	0.93
<i>Salmonella sp.</i>	0.91	1.00	1.42	1.50	1.82
<i>Escherichia coli</i>	3.29	3.90	4.63	5.06	5.91

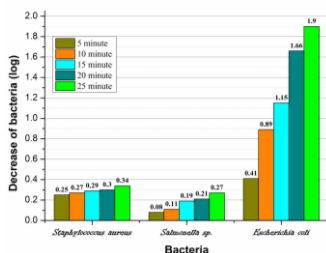
Tabel 4.10 Data pengaruh waktu paparan terhadap penurunan jumlah bakter (paparan dengan medan listrik 4,0 kV/cm)

Medan Listrik kV/cm	Penurunan jumlah bakteri (log)				
	5 Menit	10 menit	15 menit	20 menit	25 menit
<i>Staphylococcus aureus</i>	1.06	2.51	3.31	4.13	7.61
<i>Salmonella sp.</i>	5.45	6.93	7.67	8.61	9.19
<i>Escherichia coli</i>	6.57	7.71	8.61	8.91	9.24

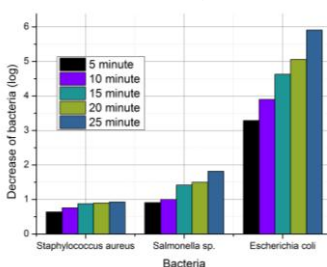
Analisis

Penurunan jumlah bakteri juga dipengaruhi oleh durasi paparan. Lama pemaparan hanya memainkan peran penting ketika medan listrik yang digunakan telah melampaui batas ambang permeabilitas membran. Kondisi ini dapat dilihat pada Gambar 4.7-4.9, di

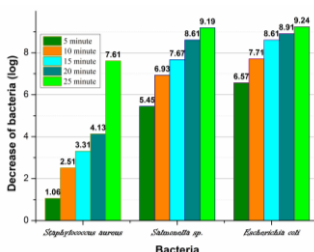
mana paparan menggunakan medan listrik 2,5 kV / cm bakteri *Staphylococcus aureus* menurun sebesar 0,25 log dan 0,34 log selama 5 menit dan 25 menit waktu paparan, masing-masing. Sementara itu, paparan medan listrik adalah 4,0 kV / cm, bakteri *Staphylococcus aureus* menurun sebesar 1,06 log dan 7,61 log selama 5 menit dan 25 menit, masing-masing. Ketika permeabilitas membran sel telah melampaui ambang batas, penambahan waktu paparan menghasilkan peningkatan jumlah difusi air dan ion. Difusi air dan ion dalam membran yang melebihi batas membuat membran dan sitoplasma rusak, sehingga meningkatkan jumlah bakteri yang tidak



Gambar 4.7 Data pengaruh waktu paparan terhadap penurunan jumlah bakter (paparan dengan medan listrik 2,5 kV/cm)



Gambar 4.8 Data pengaruh waktu paparan terhadap penurunan jumlah bakter (paparan dengan medan listrik 3,5 kV/cm)



Gambar 4.9 Data pengaruh waktu paparan terhadap penurunan jumlah bakter (paparan dengan medan listrik 4,0 kV/cm)

4.3. Efek Paparan Medan Listrik terhadap Kandungan Protein dan Lemak Data penelitian

Paparan medan listrik selama 25 menit pada susu tidak mempengaruhi kadar protein, akan tetapi mempengaruhi kadar lemak. Dimana kadar proten susu sebelum dipapari medan listrik terukur sebesar 2,48% dan setelah dipapari medan listrik 4,0 kV/cm terukur 4,7%, sementara itu kadar lemak sebelum dipapari terukur sebesar 3,65% dan setelah dipapari medan listrik 4,0 kV/cm menjadi 3,29%. Data lebih lengkap terlihat pada Tabel 4.11.

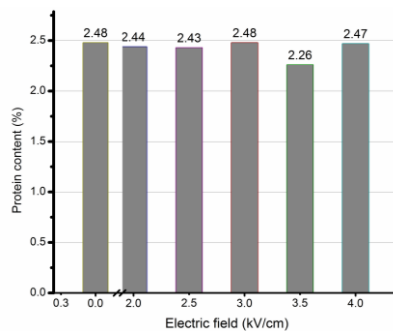
Tabel 4.11 Data pengaruh kuat medan listrik terhadap kadar protein dan lemak susu.

Kuat Medan	Protein (%)	Lemak (%)
0	2.48	3.65
2	2.44	3.6
2.5	2.43	3.55
3	2.48	3.43
3.5	2.26	3.32
4	2.47	3.29

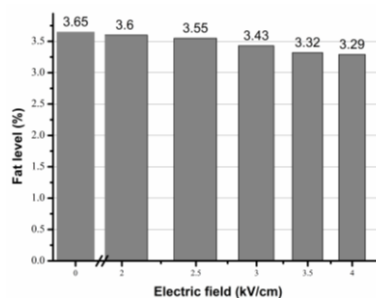
Analisis data

Paparan medan listrik dalam susu tidak menyebabkan denaturasi protein. Kandungan protein susu sebelum terpapar diukur pada 2,48% dan setelah terkena medan listrik 4,0 kV / cm selama 25 menit diukur 2,47%, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10. Gambar 4.10 menunjukkan bahwa kandungan protein berfluktuasi sekitar 4,47% baik. sebelum paparan dan sesudahnya, sehingga dapat disimpulkan bahwa paparan medan listrik tidak mempengaruhi tingkat protein.

Paparan medan listrik mengurangi tingkat lemak dalam susu. Awalnya, kandungan lemak susu yang terukur adalah 3,65%, setelah terkena medan listrik 4,0 kV / cm selama 25 menit, kandungan lemak susu menurun hingga 3,29% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11. Secara umum, susu memiliki kandungan lemak total. sekitar 3,4% dan memiliki komposisi asam lemak yang paling kompleks. Akibatnya, paparan medan listrik, ada peningkatan permeabilitas seluler, sehingga membuat lemak lebih banyak cairan (De Vito, 2006). Akibatnya, ada penurunan kadar air.



Gambar 4.10 Efek paparan medan listrik terhadap kadar protein susu (lama pemaparan 25 menit)



Gambar 4.11 Efek paparan medan listrik terhadap kadar lemak susu (lama pemaparan 25 menit)

4.4 Pembahasan

Bakteri luar adalah membran sel yang merupakan batas antara bagian dalam sel dan lingkungan eksternal. Peran utama membran sel adalah mengatur pengangkutan ion, nutrisi, metabolit, peptida, dan protein ke dalam dan keluar sel. Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk mengungkap pergerakan ion logam penting melalui transmembran seperti Na⁺, Ca⁺, K⁺, Cl⁻ serta nutrisi organik seperti asam amino, gula, dan nukleotida (Dunlop & Butera, 2006).

Bakteri memiliki sifat non-isotropik (Mushenheim *et al.*, 2014) terutama pada bakteri lipid bilayer (Pogozheva *et al.*, 2013; Huh *et al.*, 2016) sehingga sifat optik mikroskopis bergantung pada arah. Selain itu, bakteri memiliki sifat elektro-optik (Bunin *et al.*, 2005; Ignatov *et al.*, 1997).. Oleh karena itu, jika medan listrik dibebankan pada bakteri, itu akan mengubah indeks bias (Saleh & Teich, 2007).

Paparan medan listrik yang tidak terlalu tinggi adalah sekitar 2.0 - 4.0 kV / cm perhitungan menggunakan persamaan (52) diperoleh dengan mengubah indeks bias sebesar 0.69×10^{-5} - 1.38×10^{-5} . Paparan medan listrik 2,0 - 3,5 kV / cm menyebabkan perubahan indeks bias yang masih tidak dapat meningkatkan permeabilitas membran sel melebihi ambang batas sehingga peningkatan air dan difusi ion di membran sel belum terjadi. Paparan medan listrik 4,0 kV / cm dan di atas menyebabkan perubahan indeks bias yang mampu membuat permeabilitasnya melebihi ambang batas. Kondisi ini menyebabkan jumlah difusi air dan ion melalui membran sel melebihi batas, dimana fraksi meningkatkan volume aliran air dan ion yang terjadi adalah 0,000035. Meningkatnya jumlah aliran ionik di membran sel meningkatkan konduktivitas membran sel (Gehl, 2003). Karena peningkatan konduktivitas membran sel, merusak membran (Pillet, 2016) akhirnya menyebabkan bakteri menjadi tidak aktif.

Ketika medan listrik di atas ambang batas, durasi paparan memiliki efek pada penurunan jumlah bakteri. Durasi paparan dapat meningkatkan jumlah air dan ion yang berdifusi pada membran sel. Sebagai akibat dari paparan yang lebih lama, semakin banyak air dan ion menyebar keluar dari sel atau sebaliknya. Keadaan ini akan merusak sitoplasma dan membran sel dan akhirnya, bakteri menjadi tidak aktif.

Paparan medan listrik dalam susu tidak menyebabkan suhu meningkat. Karena itu tidak berdampak pada protein. Persentase protein dalam susu sebelum terpapar diukur pada 2,48%, tetapi setelah susu terkena medan listrik, kadar protein berfluktuasi sekitar 2,48%. Penyimpanan susu dalam 12 jam atau lebih pada suhu 27oC menyebabkan perubahan warna, sementara penyimpanan pada suhu 18oC tekstur susu masih terlihat bagus.

Lemak susu terbentuk dari emulsi globul antara minyak dan air. Lemak terdiri dari trigliserida yang merupakan kombinasi gliserol dan asam lemak. Medan listrik memukul lemak menyebabkan peningkatan permeabilitas seluler dan menghasilkan berkurangnya kadar air (De Vito, 2006). Peningkatan medan listrik akan menyebabkan peningkatan permeabilitas seluler sehingga kehilangan kadar air meningkat. Karena itu kandungan lemak dalam susu menurun.

V. KESIMPULAN

Pulsa Medan Listrik dengan intensitas sedang dapat digunakan sebagai cara sterilisasi susu. Intensitas medan listrik minimum yang dapat digunakan adalah 4,0 kV / cm dengan waktu paparan lebih dari 25 menit. Medan listrik di bawah 4,0 kV / cm belum mempengaruhi kontaminasi bakteri dari susu meskipun itu dilakukan cukup lama. Peningkatan medan listrik di atas 4,0 kV / cm menyebabkan penurunan jumlah koloni bakteri yang signifikan. Waktu paparan yang dibutuhkan dipengaruhi oleh intensitas medan listrik dan ukuran bakteri. Sterilisasi susu dengan medan listrik tidak mengurangi kandungan protein tetapi menurunkan kadar lemak dalam susu. Meskipun susu telah disterilkan, penyimpanan untuk jangka waktu yang lama membutuhkan suhu rendah yaitu di bawah 20°C sehingga warna susu tidak banyak mengalami perubahan

DAFTAR PUSTAKA

- Bonetta S., Bonetta Si., Cortese E. C. P, Dellacasab G., Motta R. G. F., Paganonic M., Pizzichem M., 2010, A Pulsed Electric Field (PEF) Bench Static System to Study Bacteria Inactivation, 12th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors - 1Siena, Italy
- Born, M. dan Wolf, E, 2003, Principles of Optic, Electromagnetic Theory of Propagation Interferences and diffraction of light, Cambridge University Press
- Bunin V. D., Ignatov O. V., Gulyi O. I., Zaitseva I. S., Neil D. O., dan Ivnikskii D., 2005, The electrooptical parameters of suspensions of *Escherichia coli* XL-1 cells interacting with helper phage M13K07, *Microbiology March*, Volume 74, Issue 2, pp 164–168
- Chatterjee S.N., dan Chaudhuri K., 2012, *Outer Membrane Vesicles of Bacteria*, SpringerBriefs in Microbiology.
- Chen,G.Q., 2010, Plastics Completely Synthesized by Bacteria: Polyhydroxyalkanoates, Department of Biological Sciences and Biotechnology, Tsinghua University, Beijing, 100084, China
- Cohen G.N., 2011, *Chapter 2 The Outer Membrane of Gram-negative Bacteria and the Cytoplasmic Membrane*, Microbial Biochemistry Springer Science&Business Media B.V
- Djaafar, T.F dan S. Rahayu.2007.Cemaran Mikroba Pada Produk pertanian, Penyakit yang Ditimbulkan dan Pencegahannya.26(2) : 67-75.Jurnal Litbang Pertanian Balai Pengkajian Teknologi Pertanian. Yogyakarta.
- Dwidjoseputro D., 2005, Dasar-Dasar Mikrobiologi, Djambatan, Jakarta
- Dwijoseputro. 1982. *Dasar-dasar Mikrobiologi*. Penerbit Djambatan. Jakarta.
- FSIS. 2006. foodborne illness and disease. [terhubung berkala] http://www.fsis.usda.gov/Fact_Sheets/Foodborne_Illness_&_Disease_Fact_Sheets/index.asp (diunduh Pebruari 2017)
- Utami P.S.: 2012, Penanganan Susu Segar Dalam Menjaga Kualitas Pasca Pemerahan. Karakteristik Kualitas, Universitas Bengkulu
- Galdiero S., Falanga A., Cantisani M., Vitiello M., Morelli G. dan Galdiero M., 2013, Peptide-Lipid Interactions: Experiments and Applications *International Journal of Molecular Sciences*14, 18758-18789
- Griffith D. J., 1999, Introduction of Electrodynamics, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey
- Handayani KS dan Purwanti M. 2010. *Kesehatan Ambing dan Higiene Pemerahan di Peternakan Sapi Perah Desa Pasir Buncir Kecamatan Caringin*. [www.stpp-bogor.ac.id/userfiles/file/05-Cici Edited-1.pdf](http://www.stpp-bogor.ac.id/userfiles/file/05-Cici%20Edited-1.pdf). Jurnal Penyuluhan Pertanian Vol. 5 No. 1, Mei 2010
- Huh K., Darong Oh, Son S.Y., Yoo H.J., Song B., Dong, Cho D., Seo J. M., dan Kim S.J., 2016, *Laminar flow assisted anisotropic bacteria absorption for chemotaxis delivery of bacteria-attached microparticle*. *Micro and Nano Systems Letters Springer open*
- Hollar S., 2012, A closer look at bacteria, algae, and protozoa (Introduction to biology), Britannica Educational Publishing 29 East 21st Street, New York, NY 10010
- Honeyman AL, Friedman H, Bendinelli M. 2001. Staphylococcus aureus Infection and Disease. New York: Plenum Publishers.
- <https://finance.detik.com/berita-ekonomi-bisnis/d-3016314/83-kebutuhan-susu-dipasok-dari-impor>. 83% Kebutuhan Susu Dipasok dari Impor. Lani Pujiastuti – detikFinance
- Ignatov O.V, IShorkinab N.A., Shchyogoleva S.Y., 1997, Electra-optical properties of microbial cells as affected by acrylamide metabolisms, *Analytica Chimica Acta* 347

- Kakorin S, dan Neumann E., 2002, Electrooptical relaxation spectrometry of membrane electroporation in lipid vesicles, A: *Physicochemical and Engineering Aspects* 209
- Levinson W. 2008. Review of Medical Microbiology. Amerika: The McGraw-Hill Companies.
- Madigan MT, Martinko JM, Dunlap PV, Clark DP. 2008. Biology of Microorganisms 12th edition. San Francisco: Pearson.
- Maloy S. 1999. Salmonella Information. [terhubung berkala].
<http://www.Salmonella.org/info.html> (diunduh Pebruari 2016)
- Monfort S., Saldaña G., Condón S., Raso J., dan Álvarez I., 2012, Inactivation of Salmonella spp. in Liquid Whole Egg Using Pulsed Electric Fields, Heat, And Additives, *Food Microbiology* 30 393-399
- Oginawati, K. 2008. Penentuan Total Asupan Harian Unsur Gizi Mikrodalam Makanan Anak-Anak Sekolah Asar Di Bandung Dengan Menggunakan Metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA). ITS
- Pagan R. dan Mackey B.2000, Relationship between Membrane Damage and Cell Death in Pressure-Treated Escherichia coli Cells: Differences between Exponential- and Stationary-Phase Cells and Variation among Strains, *Applied And Environmental Microbiology*
- Pavlin M., Kanduser M., Rebers M., Pucihar G., Hart F. X., Magjarevic R., dan Miklavc D., 2005, Effect of Cell Electroporation on the Conductivity of a Cell Suspension, *Biophysical Journal* Volume 88 4378–4390
- Pillet F., Dague C. F., Baaziz H., Etienne Dague dan Rols M. P. 2016, Cell wall as a target for bacteria inactivation by pulsed electric fields, *Scientific Reports* 6:19778 | DOI: 10.1038/srep 19778
- Pogozheva I.D., Nagle S. T., Mosberg H.I., dan Lomize A. L., 2013, Structural adaptations of proteins to different biological membranes, *Biochimica et Biophysica Acta*
- Prescott LM, Harley JP, Klein DA. 2002. Microbiology. 5th Ed. Boston: McGraw-Hill.
- Puértolas E., López N., Condón S., Raso J., Álvarez L., 2009, Pulsed Electric Fields Inactivation of Wine Spoilage Yeast and Bacteria, *International Journal of Food Microbiology* 130 : 49–55
- Rockel C.T., 2009, Comparative evaluation of Gram-positive membrane components in activating the innate immune system, Konstanzer Online-Publikations-System (KOPS)
- Ryan KJ, Ray CG (editors) (2004). *Sherris Medical Microbiology* (4th ed. ed.). McGraw Hill. ISBN 0-8385-8529-9.
- Saleh B. E. A. dan Teich M.C., 2007, Fundamentals of Photonics, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken New Jersey, Canada
- Stoodley L. H., Costerton J.W., dan Stoodley P., 2004, Bacterial Biofilms: From The Natural Environment To Infectious Diseases, Nature Reviews Microbiology Volume 2
- Tang M., Waring A.J., Robert, dan Lehrer, 2008, Effects of Guanidinium-Phosphate Hydrogen Bonding on the Membrane-Bound Structure and Activity of an Arginine-Rich Membrane Peptide from Solid-State NMR, *Wiley-VCH* 69451 Weinheim, Germany
- Tricahyadi W, Megawati O, dan Soetarto AES. 2007. *Upaya Peningkatan Kualitas Susu Sapi Segar dengan Monitoring Parameter Fisik, Kimia, dan Biologi.* www.fisika.ub.ac.id/bss-ub/PDF_FILES/BSS_116_1.pdf.
- Wang Z., 2009, Electromagnetic Field Interaction with Biological Tissues and Cells, School of Electronic Engineering and Computer Science, Queen Mary, University of London

- Zhao W., Yang R., Lu R., Wang M., Qian P., Yang W., 2008, Effect of PEF on microbial inactivation and physical–chemical properties of green tea extracts, *LWT* 41 (2008) 425–431
- Zhao, W., Ruijin Yang, The Effect of Pulsed Electric Field on Inactivation and Structure of Lysozyme, *Food Chemistry* 110, 2008; 334-343