Vol 6 No 2 Tahun 2024 E-ISSN: 2715-9469

PEMANFAATAN TEKNOLOGI MEDAN PULSA LISTRIK TEGANGAN TINGGI PADA PROSES PENGOLAHAN SUSU SEGAR

M. Ari Fahril[1], Ida Ratna Nila[1], Afrahun Naziah[1], Radhiyullah Armi[2],
[1]Program Studi Geofisika, Fakulas Teknik, Universitas Samudra, Langsa, Aceh, Indonesia
[2] Program Studi Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Samudra, Langsa, Aceh, Indonesia
*Email : muhammadarifahril@unsam.ac.id
(Received: Desember 2024 / Revised: Desember 2024 / Accepted: Desember 2024)

ABSTRAK

Susu adalah salah satu bahan pangan dengan kandungan gizi tinggi, tetapi juga mudah rusak dan rentan terkontaminasi mikroorganisme berbahaya. Selama proses pemerahan, susu dapat tercemar oleh mikroorganisme dari hewan ternak, lingkungan kandang, peralatan, dan proses penyimpanan. Jika tidak ditangani dengan baik, jumlah mikroorganisme dapat meningkat dan memengaruhi kualitas serta keamanan susu. Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk mengatasi masalah ini adalah elektroporasi, sebuah metode yang memanfaatkan pembangkit listrik tegangan tinggi untuk menghasilkan medan listrik kuat. Medan listrik ini bekerja dengan membuka pori-pori pada membran sel mikroorganisme secara sementara, sehingga mikroorganisme dapat dikendalikan atau dihilangkan tanpa merusak kandungan nutrisi susu.Penelitian ini bertujuan untuk menguji efektivitas elektroporasi dalam mengurangi jumlah mikroorganisme pada susu segar. Hasilnya menunjukkan bahwa metode ini mampu menurunkan total mikroba hingga dari $<1x10^6$ cfu/ml menjadi $30x10^4$ cfu/ml. Selain itu, elektroporasi terbukti mempertahankan kandungan gizi seperti protein dan lemak, sekaligus lebih hemat energi dibandingkan metode pasteurisasi konvensional yang menggunakan panas. Kualitas bahan baku susu menjadi faktor utama keberhasilan penerapan teknologi pasteurisasi susu metode medan pulsa listrik tegangan tinggi. Metode yang digunakan untuk menghitung jumlah mikroba adalah Total Plate Count (TPC) sesuai SNI 3141.1.2011. Teknologi ini berpotensi menjadi solusi inovatif dalam pengolahan susu, karena dapat meningkatkan keamanan dan kualitas tanpa mengorbankan efisiensi energi.
Kata Kunci: *Pengolahan susu, keamanan pangan, efisiensi energi, mikroorganisme, Teknologi HPEF*

1. PENDAHULUAN

Susu dikenal sebagai bahan pangan yang sangat bergizi, bahkan lebih unggul dibandingkan produk pangan lainnya[1]. Namun, susu juga mudah rusak jika disimpan pada suhu ruang dan rentan terhadap kontaminasi, sehingga dikategorikan sebagai makanan yang mudah rusak (perishable food) dan berpotensi berbahaya (potentially hazardous food). Susu mengandung berbagai komponen penting seperti protein, lemak, vitamin, mineral, laktosa, enzim, dan sejumlah mikroorganisme[2]. Kualitas susu biasanya diukur berdasarkan kandungan protein dan lemaknya semakin tinggi kandungannya, semakin tinggi pula nilai jual susu tersebut.

Susu adalah media yang sangat mendukung pertumbuhan mikroorganisme karena kandungan nutrisinya yang ideal. Sebagai contoh, susu yang berasal dari ternak sehat tetap mengandung mikroorganisme, dengan jumlah sekitar 500 organisme per mililiter. Jika ternak mengalami infeksi, jumlah ini bisa meningkat hingga 20.000 organisme per mililiter [3]. Puting susu pada ternak sering menjadi sumber pencemaran karena mikroorganisme dapat tumbuh di dalam puting, terutama jika tidak tertutup dan dalam kondisi basah. Ketika susu diperah, bagian pertama pemerahan biasanya dibuang karena kandungan mikroorganismenya dapat mencapai hingga 50.000 organisme per mililiter.

Susu rentan terhadap pencemaran yang dapat berasal dari berbagai sumber, seperti lingkungan kandang (lantai, udara, debu, dan air), tubuh dan kotoran ternak, pakan, peralatan pemerahan, pekerja, serta selama proses penyimpanan dan pemasaran. Jumlah mikroorganisme dalam susu dipengaruhi oleh waktu dan cara penanganannya. Penanganan yang tidak higienis akan menentukan jenis mikroorganisme yang mencemari susu, sedangkan suhu penyimpanan berpengaruh pada kecepatan pertumbuhan mikroorganisme[3]. Karena kandungan mikroorganisme pada susu umumnya sangat tinggi, diperlukan tindakan dan persyaratan khusus agar susu aman untuk dikonsumsi.

Kerusakan pada susu dapat menimbulkan kerugian besar dan menjadi tantangan dalam memastikan susu yang dipasteurisasi aman untuk dikonsumsi sebagai susu segar[4]. Oleh karena itu, kualitas susu harus dijaga dan dipastikan hingga siap dikonsumsi. Salah satu indikator utama kualitas susu adalah tingkat pencemaran mikroorganisme di dalamnya. Berdasarkan Undang-Undang Pangan No. 7 Tahun 1996, keamanan pangan mencakup upaya mencegah bahan pangan dari kontaminasi biologis, kimia, atau benda lain yang dapat membahayakan kesehatan manusia.

Dalam industri susu modern, parameter kualitas tidak hanya dinilai dari kandungan protein dan lemak, tetapi juga dari aspek mikrobiologi, seperti kandungan mikroorganisme. Oleh karena itu, penting untuk menjaga kualitas susu segar dari aspek fisik, kimia, dan mikrobiologi. Kualitas susu yang baik akan menghasilkan produk berkualitas tinggi, terutama jika diproses menggunakan metode High-Performance Electric Field (HPEF).

Metode HPEF bekerja pada suhu yang jauh lebih rendah dibandingkan pasteurisasi tradisional, dengan memanfaatkan pulsa tegangan tinggi di antara dua elektroda untuk menciptakan medan listrik intensif dalam waktu singkat. Metode ini memiliki banyak keunggulan, termasuk proses pasteurisasi yang lebih efektif, sederhana, hemat biaya, dan aman. Selain itu, metode HPEF dapat mempertahankan kesegaran susu, tanpa mengubah penampilan fisik secara signifikan, sehingga meningkatkan standar kualitas produk. Dengan kualitas yang lebih baik, produk susu mampu bersaing lebih unggul di pasar.

Penelitian yang dilakukan oleh Barashkov [5] berhasil membuktikan bahwa penerapan arus listrik pada media yang mengandung mikroba dapat meningkatkan metabolisme mikroba tersebut, yang diikuti dengan tingkat kematian yang signifikan hanya dalam beberapa detik setelah perlakuan. Fenomena yang terjadi akibat paparan arus listrik terhadap mikroba ini meliputi:

a. Panas: Panas dihasilkan dari aplikasi berbagai jenis energi listrik pada media, yang dapat mempengaruhi aktivitas metabolik mikroba.

b. Elektrolisis Produk: Terjadi elektrolisis produk akibat pengaruh bahan elektroda sel yang digunakan, yang dapat mengubah lingkungan kimia tempat mikroba berada.

c. Destruksi Membran Sel: Penghancuran atau kerusakan membran sel terjadi karena efek listrik langsung dan kejutan, yang dapat menyebabkan perubahan fisik pada sel-sel mikroba.

Pemberian kejutan listrik dengan tegangan tinggi diketahui menyebabkan perubahan pada permukaan sel mikroba. Berdasarkan pengamatan menggunakan mikroskop elektron, ditemukan adanya lubang pada dinding sel mikroba yang terkena arus listrik, sementara pada sel yang tidak terkena perlakuan listrik tidak ditemukan perubahan seperti itu. Lebih lanjut, pengamatan mikroskop elektron terhadap sel-sel kapang yang mengalami perlakuan arus listrik menunjukkan adanya perbedaan fisik yang jelas dibandingkan dengan sel-sel kapang yang tidak terkena perlakuan. Hal ini menunjukkan bahwa kejutan listrik dengan tegangan tinggi memiliki dampak yang signifikan terhadap kerusakan fisik dan struktur seluler mikroba [6]

Kematian spora dengan perlakuan pengaliran listrik dibatasi oleh kekuatan medan listrik yang dihasilkan, lama kejutan, jumlah kejutan yang diterapkan dan ukuran sel. Pengaliran listrik dengan tegangan tinggi dalam waktu lama dan jumlah pulsa yang diberikan setiap detik memberikan pengaruh yang lebih besar dalam menurunkan jumlah spora yang terkandung dalam media [7]

Ketahanan mikroba dari kejutan listrik dipengaruhi oleh nutrisi dari media, pengaliran listrik dengan media yang kaya protein menyebabkan terjadinya penurunan nilai efektivitas kematian dari mikroba yang terkandung. Faktor lain yang memberi pengaruh pada kematian mikroba yaitu keberadaan protein yang memberikan pengaruh perlindungan kepada mikroba dari kejutan listrik. Semakin lama kejutan listrik diterapkan maka nilai efektivitas pembunuhan mikroba akan semakin besar, hal ini diduga karena komponen nutrisi susu semakin menurun dalam memberikan perlindungan terhadap mikroba. Terjadi koagulasi protein pada elektroda dengan semakin meningkat dan semakin lama kejutan listrik, sehingga semakin tinggi tingkat persentasi koagulasi maka akan sebanding pula dengan tingkat kematian dari mikroba.

Semakin besar kejutan listrik yang diberikan pada proses pasteurisasi maka semakin besar pula penurunan jumlah total mikroorganisme yang dihasilkan [8] bahwa besar penurunan jumlah total mikroorganisme berbanding lurus dengan banyaknya/lamanya kejutan listrik yang diberikan, jumlah sinyal pulsa-pulsa listrik dan waktu pasteurisasi susu. Hal ini disebabkan karena adanya peningkatan aktivitas metabolisme yang terlalu tajam sehingga mengganggu kerja dan fungsi fisiologis mikroorganisme.

Kematian mikroba akibat kejutan listrik tegangan tinggi diduga dipengaruhi oleh kerusakan struktur sel, seperti rusaknya membran sitoplasma sel (elektroforesis). Meskipun secara alamiah membran sitoplasma mampu disintesa kembali tetapi dengan tegangan tinggi, kerusakan berbentuk lubang pada membran luar dari sel tidak mampu diperbaiki lagi.

2. METODE PENELITIAN

High-Performance Electric Field (HPEF) adalah teknologi pasteurisasi modern yang tidak menggunakan panas, berbeda dari metode sterilisasi tradisional. Pada metode ini, perlakuan panas berlangsung pada suhu yang jauh lebih rendah, sehingga lebih ramah terhadap kualitas produk. HPEF memanfaatkan pulsa tegangan tinggi di antara dua elektroda untuk menciptakan medan listrik berintensitas tinggi. Medan listrik ini efektif dalam membunuh mikroorganisme (inaktivasi mikroba) tanpa mengurangi kandungan nutrisi maupun sifat organoleptik produk.

Keunggulan utama metode HPEF adalah kemampuannya mempertahankan sifat organoleptik seperti aroma, rasa, warna, dan tekstur, sehingga produk yang dihasilkan tetap memiliki kualitas yang mendekati produk segar. Selain itu, nilai nutrisinya tetap terjaga, menjadikan teknologi ini pilihan inovatif dalam pengolahan bahan pangan cair, termasuk susu.

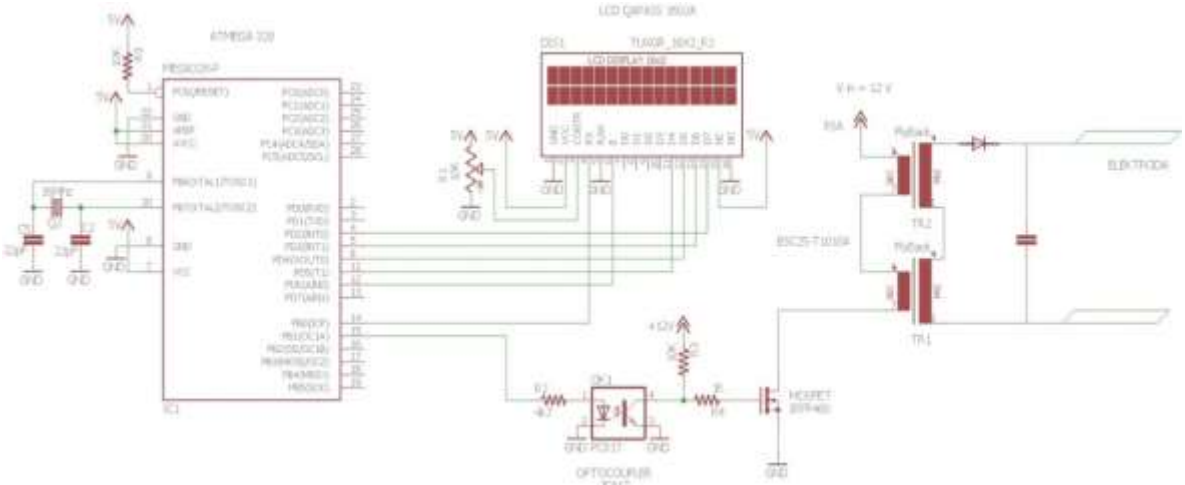
Pengujian pulsa medan elektrik ini dilakukan dengan cairan susu sapi segar yang dianggap mempunyai sejumlah mikroorganisme, berdasarkan hubungan medan elektrik E terhadap penurunan mikroorganisme, maka mikroorganisme akan berkurang jika diberi tegangan tinggi pada medan elektrik. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi Universitas Sumatera Utara. Pada pengujian ini tegangan yang dihasilkan oleh pembangkit tegangan

tinggi sebesar 38,58 kV yang disesuaikan dengan kapasitas dari alat ukur tegangan tinggi dan menggunakan treatment chamber dengan volume 518,75 cm^3 dan diisi dengan susu sebanyak 350 ml serta jarak elektroda sphere gap yaitu 1 cm. Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi waktu pada cairan susu.

3. HASIL dan PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Rangkaian Keseluruhan Pembangkit listrik tegangan tinggi

Prinsip kerja dari sistem ini adalah menaikkan tegangan rendah yang berasal dari PSA (Power Supply Adaptor) sampai menjadi tegangan tinggi. Dimulai dengan pengaturan tegangan DC dari PSA, yang akan diteruskan ke Driver, yaitu Mosfet. Frekuensi yang sudah diatur atau diprogram di Mikrokontroler ATMega 328 akan diteruskan ke Optocoupler dan akan masuk ke Driver Mosfet yang selanjutnya akan menghasilkan Frekuensi yang diinginkan. Untuk Duty Cycle akan diatur oleh alat inputan analog yaitu Potensiometer yang sudah terhubung ke Mikrokontroler ATMega 328. Frekuensi masukan yang sudah didapat driver Mosfet dari komponen optocoupler akan diteruskan dari kaki Drain Mosfet ke Flyback Transformer BSC25-T1010A sebagai alat utama untuk menaikkan tegangan menjadi tegangan tinggi. Flyback Transformer juga harus diberi lilitan luar untuk memicu tejadinya induksi didalam lilitan dalam flyback transformer. Untuk menghasilkan tegangan tinggi dalam bentuk DC, diperlukan komponen tambahan yaitu dioda dan kapasitor. Dua jenis komponen ini harus dalam bentuk dioda dan kapasitor high voltage, untuk mencegah terjadinya kerusakan apabila menggunakan dioda dan kapasitor yang biasa. Karena output flyback yang dihasilkan sudah dalam mode tegangan tinggi. Selanjutnya akan dilakukan pengukuran tegangan tinggi dari flyback transformer untuk mengetahui berapa kilovolt yang mampu dihasilkan dari rangkaian sistem, dengan menggunakan probe HV Lutron 40 KV [9].



Gambar 1. Rangkaian Keseluruhan

3.2 Pengujian pulsa Medan Elektrik pada medium Susu

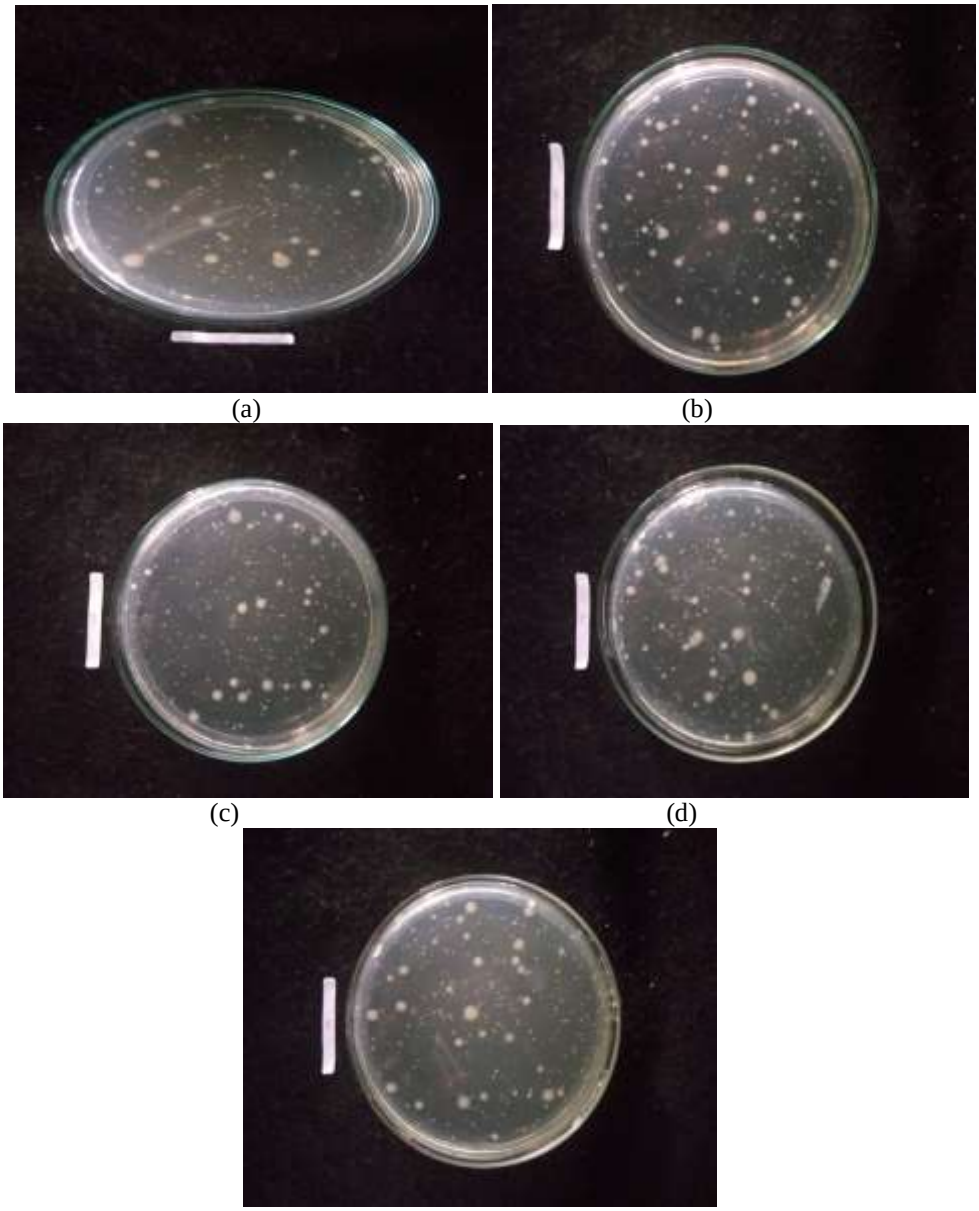
Pengujian susu sapi dengan metode pasteurisasi HPEF menggunakan metode TPC (Total Plate Count) dengan dengan SNI 3141.1.2011 yang dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi Universitas Sumatera Utara. Hasil perhitungan total mikroba dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 1. Pengujian Pulsa Medan Elektrik pada susu untuk Pengurangan Mikroorganisme Menggunakan Metode Total Plate Count

Lama waktu Pemaparan (detik)	Total jumlah Mikroorganisme (Cfu/ml)	Total jumlah Mikroorganisme (Cfu/ml) SNI 3141.1.2011
0	$45x10^4$	$<1x10^6$
100	$42x10^4$	$<1x10^6$
200	$39x10^4$	$<1x10^6$
300	$37x10^4$	$<1x10^6$
400	$30x10^4$	$<1x10^6$

Pada tabel, jumlah total mikroorganisme susu segar sebagai bahan uji awal sebelum dilakukan pengujian dengan medan elektrik sekitar $45x10^4$ Cfu/ml dan sesudah diberi tegangan tinggi selama 100 detik terjadi penurunan total bakteri sekitar $42x10^4$ Cfu/ml, pada waktu 200 detik terjadi penurunan sebesar $39x10^4$ Cfu/ml, pada waktu 300 detik terjadi penurunan sebesar $37x10^4$ Cfu/ml, pada waktu 400 detik terjadi penurunan sebesar $30x10^4$ Cfu/ml. Data di atas memberikan gambaran bahwa pemberian kejutan listrik tegangan tinggi pada susu dapat menyebabkan terjadinya penurunan jumlah mikroorganisme tanpa adanya efek panas. Hal ini karena adanya peningkatan aktivitas metabolisme yang terlalu tajam sehingga menggangu kerja dan fungsi fisiologis mikroorganisme. Semakin besar kejutan listrik yang diberikan pada proses pasteurisasi maka semakin besar pula penurunan jumlah total mikroorganisme yang dihasilkan[8].

Untuk hasil gambar dari proses HPEF, dapat dilihat dibawah ini :

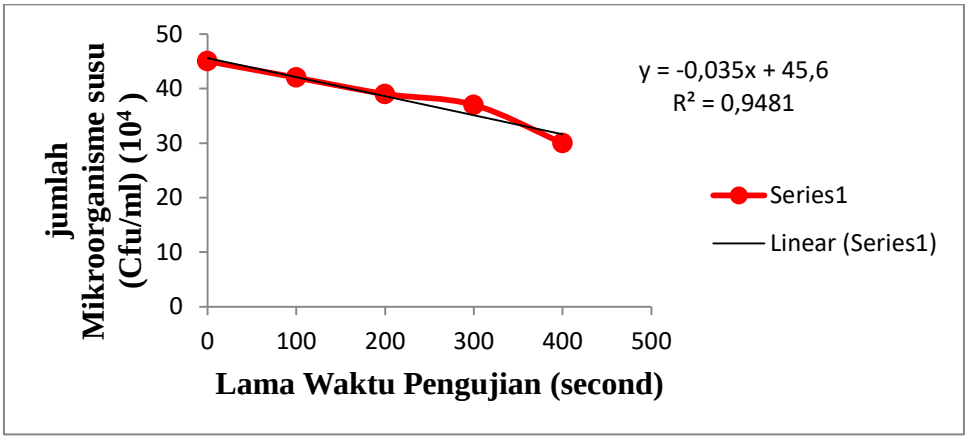


Gambar 2. Hasil Pengujian Total Mikroorganisme Pada Susu (a) 0 detik (b) 100 detik (c) 200 detik (d) 300 detik (e) 400 detik

Proses High-Performance Electric Field (HPEF) mampu mengurangi mikroorganisme. Efek inaktivasi mikroba ini dijelaskan melalui teori Electrical Breakdown [10] dan teori Electroporation[11] . Dalam teori Electrical Breakdown, membran sel dianalogikan sebagai kapasitor yang diisi larutan dielektrik.

Pada kondisi normal, terdapat beda potensial (V') di antara membran sel. Ketika medan listrik (E) diterapkan, beda potensial meningkat, menyebabkan ketebalan dinding sel berkurang. Jika beda potensial mencapai titik kritis (Vc), kerusakan mulai terjadi pada membran sel. Pada tahap ini, kerusakan masih bersifat sementara (reversible). Namun, jika medan listrik terus meningkat, kerusakan akan menjadi permanen, sehingga mikroorganisme tidak dapat pulih. Proses ini menjadi mekanisme utama dalam inaktivasi mikroba pada metode HPEF, memungkinkan kontrol mikroorganisme secara efektif tanpa merusak kualitas produk yang diproses.

Gambar di bawah menunjukkan bahwa terjadi penurunan jumlah bakteri pada cairan susu dengan metode total plate count (TPC). Kematian mikroba akibat kejutan listrik tegangan tinggi diduga dipengaruhi oleh kerusakan struktur sel, seperti rusaknya membran sitoplasma sel (elektroforesis). Berikut grafiknya :



Gambar 3. Grafik Jumlah Mikroorganisme susu (Cfu/ml)-VS-Lama waktu pengujian (second)

Berdasarkan grafik diatas terlihat jelas bahwa jumlah mikroorganisme yang diuji pada medan elektrik dengan variasi lama waktu pengujian mengalami penurunan. Semakin lama pengujian, semakin berkurang pula mikroorganisme pada susu. Grafik diatas memiliki nilai slope y = - 0,035x+45,6 dan koefisien korelasi nya R^2 = 0,9481

4. KESIMPULAN

Dari hasil perancangan sistem hingga pengujian dan pembahasan sistem maka penulis dapat menarik kesimpulan yaitu pengujian langsung medan elektrik pada susu juga diperoleh data awal susu segar yaitu $45x10^4$ Cfu/ml dan sesudah diberi tegangan tinggi selama 100 detik terjadi penurunan total bakteri sekitar $42x10^4$ Cfu/ml, pada waktu 200 detik terjadi penurunan sebesar $39x10^4$ Cfu/ml, pada waktu 300 detik terjadi penurunan sebesar $37x10^4$ Cfu/ml, pada waktu 400 detik terjadi penurunan sebesar $30x10^4$ Cfu/ml detik. Kondisi ini bisa terjadi akibat ketebalan dinding sel mengecil. Kerusakan membran sel terjadi apabila beda potensial mencapai titik kritis, hal ini terjadi bila terdapat intervensi pengaruh medan listrik yang mencukupi sebesar. Pada tahap ini kerusakan dinding sel masih bersifat dapat pulih (inaktivasi), akan tetapi dengan terus bertambahnya pengaruh medan listrik maka akan menyebabkan kerusakan permanen.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang sudah terlibat dalam penelitian ini yaitu Universitas Samudra dan juga Universitas Sumatera Utara.

6. DAFTAR PUSTAKA

[1] Sudono .1983. Produksi Sapi Perah, Depeartemen Ilmu Produksi Ternak,.Fakultas peternakan IPB. Bogor.

[2] Lampert, M L. 1980. Modern Dairy Product. New York: New York Publishing , Co. Inc.

[3] Buckle, K. A., R A Edwards G H Fleet dan M Wooton. 2009. Ilmu Pangan. Terjemahan Hari Purnomo dan Adiono. Jakarta: UI Press

[4] Muchtadi, T R dan Sugiyono. 1992. Ilmu Pengetahuan Bahan Pangan. Departemen Pendidikan dan Kebudayaan. Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi. Pusat Antar Universitas. Institut Pertanian Bogor. Bogor.

[5] Barashkov. 2010, Electrochemical Chlorine Free AC Disinfectionof Water Contaminated with Salmonella Typhimurium Bacteria', Journal of Electrochemical vol 46, no. 3, pp. 578 – 586.

[6] Setiabudi, 2010, Pengaruh Gradien Medan Listrik Terhadap Kecepatan SelTelur Ikan pada Proses Dielektroforesis, Prosiding Fisika Berkala, vol. 7, hlm. 323-327.

[7] Jay, M 1996, Modern Food Microbiology, 4th edn, International Thomson Publishing, Melbourne, pp. 469 - 471.

[8] Barbosa. Canovas,G.B Pothakamury,E. Palau and B.G. Swanson, 1997. Non Thermal Preservation Of Food. Marcel dekker : New York.

[9] Fahril, M. A., & Naziah, A. (2023). Pembuatan Alat Pembangkit Listrik Tegangan Tinggi Dengan Metode Flyback Transformator (Fbt) Dengan Menggunakan Pengaturan Jarak Bola (Sphere Gap). Jurnal Hadron, 5(2), 34-40.

[10] Zimmermann U. 1986. Electrical breakdown, electropermeabilization and electrofusion. Rev Physiol Biochem Pharmacol. 105:175-256

[11] Castro AJ, Barbosa-Cánovas GV dan Swanson BG. 1993. Microbial inactivation of foods by pulsed electric fields. J Food Proc Pr. 17:47-73.