

PENERAPAN TEKNOLOGI MEDAN PULSA LISTRIK TEGANGAN TINGGI DALAM PROSES PASTEURISASI BAHAN PANGAN CAIR : SEBUAH KAJIAN TEORITIS

Budi Hariono^{*)} Sutrisno^{**)} Kudang Boro Seminar^{**)} Rarah Ratih A Maheswari^{**)}

Abstract

One of the challenges of food industry in the 21st century is to control microbes for preservation purposes. Various food preservation technologies have been developed, including the pasteurization technology. Basically food pasteurization is a process of microbial inactivation. A microbial inactivation process with a traditional pasteurization technology affects color, flavor, textures, nutritional and functional ingredients food. On the other hand, consumers need food fresh. High pulsed electrical field of method is more effective, easier, cheaper, and safer. Level of freshness of food products, will be fully guaranteed and the physical appearance is not significantly affected. Therefore quality standards achieved a better product. This method is based on two main theories, namely the theory of electrical breakdown and electroporation of membrane cell. Basic design used of constant microbial inactivation kinetics models that have been developed by Peleg (1995) and Hulshelger (1983).

Keyword : Pasteurization Non Thermal, High Pulsed Electric Field

PENDAHULUAN

Metode pengawetan bahan pangan terdiri atas pengawetan bahan pangan secara tradisional dan modern. Pengawetan bahan pangan tradisional meliputi: metode penggaraman, pengasapan, konsentrat gula, fermentasi dan pengasaman, pengeringan, pengalengan serta dengan penambahan bahan kimia (Desrosier, N.W 2008; Buckle *et al.*, 2009).

Teknologi pengawetan bahan pangan modern dibagi atas 2 yaitu: metode yang melibatkan panas (*preservation of foods with thermal methods*) dan metode tanpa melibatkan panas (*preservation of foods with non-thermal methods*) (Ohlsson, T dan Nils, B 2002). Jenis pengawetan bahan pangan yang melibatkan panas meliputi: a) penerapan gelombang elektromagnetik (*induction heating, RF heating, microwave heating, infrared heating*), b) *ohmic heating* serta c) pasteurisasi dan sterilisasi.

Cara pengawetan bahan pangan dengan panas dapat menimbulkan efek yang kurang menguntungkan terhadap mutu bahan pangan, antara lain berupa penurunan

kadar nutrisi, kualitas sensoris (bau, rasa dan warna). Untuk mengatasi permasalahan tersebut maka dipelopori oleh Zang *et al.*, (1988), di Ohio State University telah dikembangkan suatu metode baru dengan teknologi pengawetan pangan tanpa panas, khususnya untuk bahan pangan cair, yaitu teknologi Medan Pulsa Listrik Tegangan Tinggi (*High Pulsed Electric Field/HPEF*).

Teknologi HPEF memiliki beberapa keunggulan dibanding dengan teknologi lainnya, karena pada cara ini bahan pangan hanya dikenakan kejutan medan listrik tegangan tinggi dengan waktu yang sangat singkat (berkisar beberapa mikrodetik), sehingga tidak menyebabkan perubahan atau pengurangan kualitas dan kandungan nutrisi bahan pangan yang bersangkutan.

Teknologi Medan Pulsa Listrik Tegangan Tinggi (HPEF)

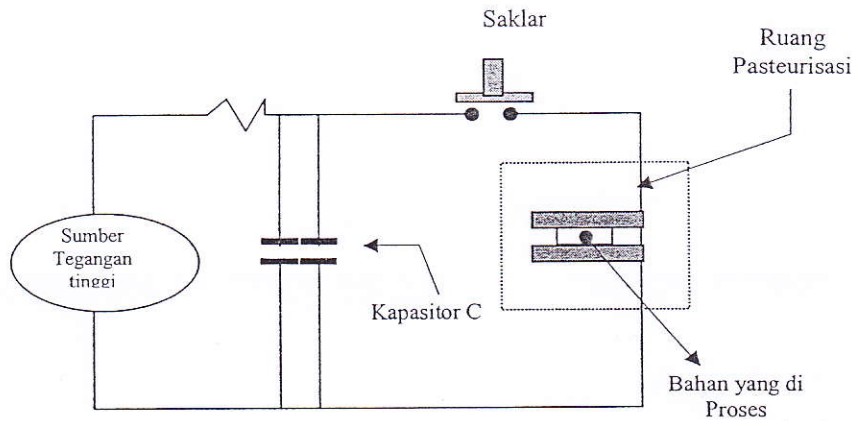
Pada dasarnya prinsip kerja teknologi HPEF menggunakan media bahan pangan cair yang dikenakan medan pulsa listrik dengan intensitas tertentu yang dibangkitkan dari sebuah generator tegangan (*coil*). Berbagai jenis pembangkit dapat

^{*)}Mahasiswa Program Doktor, Ilmu Keteknikan Pertanian, Sekolah Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor

^{**)}Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680

dipilih sesuai dengan kebutuhannya, sebagai contoh telah digunakan *Pearson Coil* untuk membangkitkan tegangan tinggi oleh Zhang

et al. (1999). Prinsip kerja dari teknologi pasteurisasi dengan medan pulsa listrik tegangan tinggi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Rangkaian Teknologi Pasteurisasi Medan Pulsa Listrik Tegangan Tinggi

Rangkaian ini terdiri atas rangkaian R dan C, muatan listrik mengalir dari sumber tegangan tinggi E melalui R dan selanjutnya tersimpan dalam kapasitor C. Ketika saklar terhubung maka muatan listrik tegangan tinggi akan mengisi ruang prosesing sebesar muatan yang disimpan dalam kapasitor C. Pada saat saklar diputus maka muatan listrik yang ada di ruang prosesing akan dikosongkan yang akan digunakan untuk menginaktivasi mikroba.

Model Mekanisme Inaktivasi Mikroba

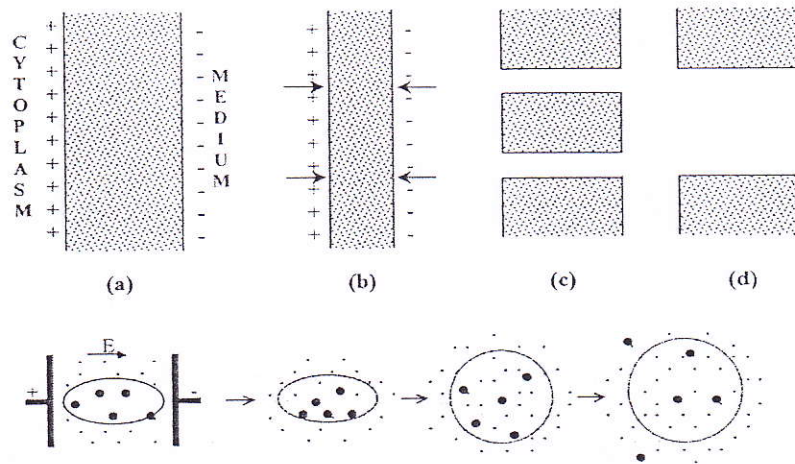
Mekanisme inaktivasi mikroba dengan teknologi medan pulsa tegangan tinggi secara umum dapat didekati dengan dua teori utama, yaitu teori *electrical breakdown*, yang dikembangkan Zimmermann (1986), dan teori *electroporation* yang dikemukakan oleh Castro *et al.* (1993).

a. Teori *Electrical Breakdown*

Zimmermann (1986), menjelaskan mekanisme inaktivasi mikroba yang disebabkan oleh pengaruh medan listrik dalam teori *electrical breakdown*, sebagai berikut : membran sel dapat diumpamakan

sebagai sebuah kapasitor yang terisi oleh larutan dielektrikum. Pada kondisi normal, beda potensial diantara celah tersebut adalah V' , dimana dengan adanya pengaruh medan listrik sebesar E maka beda potensial antara keduanya meningkat. Hal ini akan mengakibatkan ketebalan dinding sel semakin menipis. Mikroorganisme yang diinaktivasi dengan lebar pulsa 10 – 300 μs dan kuat medan listrik sebesar 15 – 60 $kV.cm^{-1}$ yang menyebabkan perbedaan potensial pada membran sel mikroba, yang akan menyebabkan terbentuknya pori pada membran dan akhirnya menginaktivasi seluruh mikroorganisme (Chang *et al.* 1982). Kerusakan membran sel terjadi apabila beda potensial antara keduanya mencapai titik kritis sebesar V_c , hal ini dapat terjadi bila terdapat intervensi pengaruh medan listrik yang mencukupi sebesar E. Pada tahap ini kerusakan dinding sel masih bersifat dapat pulih (reversible), akan tetapi dengan terus bertambahnya pengaruh medan listrik maka akan menyebabkan kerusakan permanen (d) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

¹⁾Mahasiswa Program Doktor, Ilmu Keteknikan Pertanian, Sekolah Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor
²⁾Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680



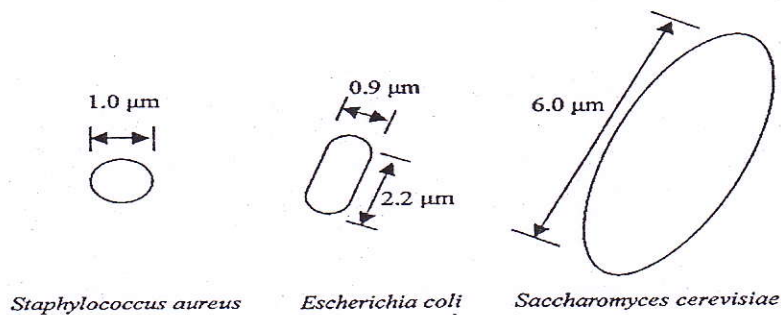
Gambar 2 Diagram skematik kerusakan elektrik (*electrical breakdown*)

Pada kondisi (a) membran sel dengan beda potensial V' , (b) bertambahnya beda potensial menjadi V (dimana $V \gg V'$) mengakibatkan menipisnya dinding sel, (c) kerusakan dinding sel - *reversible breakdown* - terjadinya celah pada dinding sel akan tetapi pada tahap ini kerusakan masih dapat pulih kembali, (d) bertambahnya intensitas medan listrik E menyebabkan celah yang terbentuk semakin membesar sehingga kerusakan pada membran sel bersifat tak pulih atau *irreversible* (Zimmermann, 1986).

Schoenbach *et al.* (1997), menyatakan bahwa besarnya nilai kuat medan kritis untuk dapat menginaktivasi mikroba dinyatakan dengan persamaan:

$$E_c = \frac{V_c}{f_a} \quad (1)$$

dimana E_c adalah kuat medan kritis, V_c adalah tegangan puncak kritis dan f_a adalah tetapan yang berhubungan dengan bentuk sel yang bergantung pada bentuk sel. Untuk sel yang berbentuk bulat, f adalah 1,5; untuk sel berbentuk silinder dengan panjang l dan diameter hemisphere pada kedua ujungnya adalah d , maka f adalah $= l(l - d)/3$ seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Menurut Schoenbach *et al.* (1997), kuat medan listrik kritis sebesar 10 kV/cm dapat menyebabkan terjadinya lysis pada bakteri dengan diameter 1 μm , sedangkan menurut Teissie and Tsong (1980), kuat medan listrik sebesar 2 kV/cm dapat menyebabkan lysis pada membran sel.

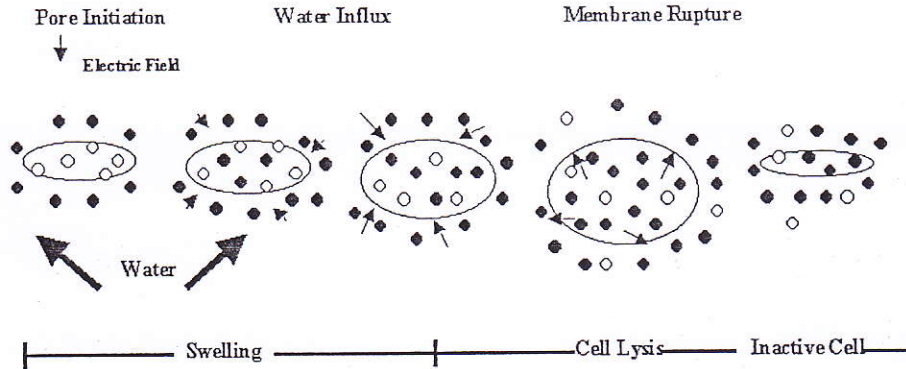


Gambar3. Beberapa bentuk sel

b. Elektroporasi

Elektroporasi adalah peristiwa destabilisasi membran sel karena adanya pengaruh medan pulsa tegangan listrik sesaat (Castro *et al.*, 1993). Sedangkan menurut Vega-Mercado *et al.*, (1996)

destabilisasi dinding sel diawali dari terjadinya gejala meningkatnya permeabilitas dinding sel – diikuti oleh penggelembungan dinding sel – dan akhirnya kerapuhan membran sel seperti ditunjukkan Gambar 4.



(Gambar 4. Elektroporasi membran sel)

Beberapa hasil penelitian dari penerapan HPEF dalam menginaktivasi mikroba khususnya pada produk susu telah banyak dilakukan. Proses HPEF dapat merusak (menghancurkan) mikroorganisme dalam susu dan produknya (Dunn dan Pearlman., 1987; Zang *et al.*, 1995; Pothakamuri *et al.*, 1995; Qin *et al.*, 1998) mempertahankan flavour asli dan kandungan nutrisi (Qin *et al.*, 1995); Granhl dan Markel, 1996, sehingga sebagian besar riset HPEF ini difokuskan untuk mempelajari kelayakan penggunaan teknologi pasteurisasi susu dan produk susu. Tingkat inaktivasi mikroba yang dicapai dengan perlakuan HPEF tergantung pada kuat medan dan waktu (Qin *et al.*, 1995; Martin *et al.*, 1997; Riena *et al.*, 1998).

Model Kinetika Inaktivasi Mikroorganisme

Model kinetika inaktivasi mikroba karena pengaruh medan listrik tegangan tinggi pertama kali diungkapkan oleh Hülshager dan Niemann (1980), model ini didasarkan atas *survival ratio* S (N/N_0), yaitu nilai perbandingan antara jumlah

mikroorganisme awal (cfu/ml) (N_0) dan akhir (N) setelah dikenakan medan tegangan tinggi E, yang dinyatakan dengan persamaan:

$$\ln(S) = -b_E(E-E_c) \quad (2)$$

dimana nilai b_E adalah koefisien regresi, E besarnya nilai kuat medan listrik, dan E_c adalah kuat medan listrik kritis. Secara teoritis kuat medan listrik kritis merupakan fungsi dari ukuran sel dan lebar pulsa (yaitu, lebar pulsa > 50 μ s, $E_c = 4.9$ kV/cm; lebar pulsa > 2 μ s, $E_c = 40$ kV/cm). Hülshager *et al.* (1981) mengajukan sebuah model kinetika sebuah hubungan fraksi mikrobia yang hidup (S) dengan waktu perlakuan (t), dalam pengaruh sebuah medan tegangan tinggi sebagai berikut :

$$\ln(S) = -b_t \ln(t/t_c) \quad (3)$$

dimana b_t adalah koefisien regresi, t adalah waktu perlakuan, dan t_c waktu kritis perlakuan. Model dapat juga dituliskan sebagai :

^{*)}Mahasiswa Program Doktor, Ilmu Keteknikan Pertanian, Sekolah Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor
^{**)}Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680

$$S = \left(\frac{t}{t_c} \right) - \frac{(E - E_c)}{K} \quad (4)$$

dengan t waktu perlakuan, t_c waktu perlakuan kritis, E_c adalah intensitas tegangan medan listrik kritis, dan K adalah konstanta kinetika, pada Tabel 1 disajikan

nilai tetapan K yang diperoleh dari data percobaan (Hülshager 1983). Nilai K yang kecil menunjukkan rendahnya sensitivitas mikroba terhadap pengaruh medan listrik tegangan tinggi, sedangkan nilai E_c yang rendah menunjukkan sensitivitas yang tinggi terhadap pengaruh medan listrik tegangan tinggi seperti tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Konstanta model kinetika Hülshager untuk berbagai jenis mikroorganisme dalam suspensi larutan $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{KH}_2\text{PO}_4$ pada pH 7.0.

Jenis Mikroorganisme	E	T	E_c	t_c	K	r
	(kV/cm)	(μs) (kV/cm)	(μs)	(kV/cm)	(%)	
Escherichia coli (4 h) ¹	4 - 20	0.07 - 1.1	0.7	11	8.1	97.7
E.coli (30 h) ¹	10 - 20	0.07 - 1.1	8.3	18	6.3	97.6
Klebsiella pneumonia	8 - 20	0.07 - 1.1	7.2	29	6.6	95.7
Pseudomonas auriginosa	8 - 20	0.07 - 1.1	6.0	35	6.3	98.4
Staphylococcus aureus	14 - 20	0.07 - 1.1	13.0	58	2.6	97.7
Listeria monocytogenes I	12 - 20	0.07 - 1.1	10.0	63	6.5	97.2
L. monocytogenes II	10 - 20	0.07 - 1.1	8.7	36	6.4	98.5
Candida albicans	10 - 20	0.14 - 1.1	8.4	110	2.2	96.6

E, medan listrik; t, waktu perlakuan; E_c , medan listrik kritis; t_c , waktu kritis; K, konstanta kinetik; r, koefisien regresi; ¹ waktu inkubasi

Tabel 1 menunjukkan bahwa E_c untuk bakteri gram negatif lebih rendah dari pada bakteri gram positif. Konstanta kinetika untuk ragi *C. albicans* lebih kecil dari pada bakteri gram negatif dan bakteri gram positif, berarti ragi lebih tahan terhadap proses inaktivasi dengan metode PEF daripada bakteri.

Model kinetika inaktivasi mikroba yang kedua diajukan oleh Peleg (1995), yang menunjukkan persentase ketahanan hidup organisme sebagai fungsi dari besarnya medan listrik tegangan tinggi dan jumlah pulsa yang dikenakan, mengikuti kurva sigmoid dengan persamaan berikut.

$$\ln(S) = -b \ln(t/t_c) \quad (3)$$

Model ini didefinisikan sebagai intensitas medan tegangan tinggi yang menyebabkan 50% mikroorganisme mampu bertahan hidup (E_d) dan sebuah konstanta kinetika (K_n) yang merupakan fungsi dari jumlah pulsa:

$$S = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_d}{K}}} \quad (6)$$

Nilai konstanta [K (n) atau K] yang kecil menunjukkan kurang-pekaan mikroba terhadap medan listrik, dan demikian pula hal sebaliknya. Nilai E_d yang rendah menunjukkan sensitivitas mikroba terhadap medan listrik tegangan tinggi yang ditunjukkan Tabel 2.

¹Mahasiswa Program Doktor, Ilmu Keteknikan Pertanian, Sekolah Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor
²Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680

Tabel 2. Konstanta model kinetika dari Peleg

Organism	Jumlah Pulsa	E_d (kV/cm)	K (kV/cm)	r^2
Lactobacillus brevis	-	11.4	1.6	0.973
Saccaromyces cerevisiae	-	13.2	2.3	0.994
Staphylococcus aureus	-	14.1	2.0	0.991
Candida albicans 21.2	2			
	3.1	0.999		
	4	15.3	3.1	0.993
	10	10.1	1.3	0.997
	30	7.5	1.2	0.999
Listeria monocytogenes	2	14.9	2.8	0.981
	4	12.7	2.0	0.994
	10	10.3	2.4	0.99
	30	8.5	2.0	0.999
Pseudomonas aeruginosa	2	12.9	2.6	0.982
	4	10.6	2.4	0.994
	10	8.3	2.1	0.99
	30	6.7	1.8	0.999

E_d , medan listrik ketika populasi mikroba berkurang 50 %; K konstanta kinetika; r^2 koefisien regresi

Perkembangan Teknologi PEF

Beberapa penelitian skala laboratorium telah dilakukan oleh peneliti luar negeri yang bertujuan untuk mengetahui fenomena inaktivasi mikroba dalam pengaruh medan pulsa listrik tegangan tinggi, pada berbagai media, antara lain, sebagai berikut:

(a) Simpon *et al.* (1995) melaporkan bahwa sari buah apel yang dikenakan medan pulsa listrik tegangan tinggi pada 50 kV/cm, 10 pulsa, lebar pulsa 2 μ s dengan suhu proses 45 °C mempunyai daya simpan 28 hari. Produknya tidak mengalami perubahan secara fisika dan kimiawi terutama kandungan asam ascorbat, gula dan sifat sensorinya. Sementara itu Vega-Mercado (1997) menyatakan bahwa sari apel juga mempunyai masa simpan

38-56 hari pada suhu 22-25°C dan tidak mengalami perubahan secara fisikokimia dan sensori setelah dikenakan perlakuan HPEF.

- (b) Sitzmann (1995) melaporkan terjadinya penurunan jumlah mikroba sebesar 3-log pada sari buah jeruk dengan aplikasi medan pulsa listrik tegangan tinggi 15 kV/cm. Produk yang dihasilkan mempunyai masa simpan 90 hari pada suhu 4°C dan 15 hari jika disimpan pada suhu 37 °C.
- (c) Untuk produk susu pasteurisasi telah banyak dikembangkan menggunakan metode ini karena telah banyak terbukti mempunyai keunggulan. Dunn dan Pearlman (1987) melakukan percobaan susu yang diinokulasi *Salmonella* dan dikenai medan pulsa listrik tegangan tinggi 36,7 kV/cm, jumlah 40 pulsa,

^{*)}Mahasiswa Program Doktor, Ilmu Keteknikan Pertanian, Sekolah Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor

^{**)}Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680

lebar pulsa 36 mikro-detik, dan frekuensi 27,8 kHz. Susu setelah disimpan selama 8 hari pada suhu 7-9 °C tidak terdapat *Salmonella*. Susu yang tidak dipasteurisasi jumlah total mikroba meningkat 10^7 cfu/ml dan susu yang dipasteurisasi mempunyai jumlah mikroba 4×10^2 cfu/ml. Hal ini berarti mampu mengurangi jumlah mikroba 5-log siklus .

- (d) Fernandez-Molina *et. al.* (1999) melaporkan susu segar yang dipasteurisasi dengan medan pulsa listrik tegangan tinggi sebesar 50

kV/cm, 30 pulsa, lebar pulsa 2 μ s, frekuensi 500 kHz dan suhu proses tidak lebih dari 28 °C mempunyai masa simpan 22 hari dengan kandungan total mikroba $3,6 \times 10^2$ cfu/ml dan coli form negatip.

Berikut disajikan resume beberapa hasil penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh berbagai kondisi proses, bentuk ruang perlakuan (reaktor atau *treatment chamber*), media, jenis mikroba, terhadap inaktivasi mikroba yang ditunjukkan oleh nilai log reduksinya seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Inaktivasi mikroba dalam pengaruh medan pulsa listrik tegangan tinggi, pada berbagai media

Sumber	Mikroba	Media	Log reduksi (max)	Bentuk Ruang Perlakuan	Kondisi Proses
Fernandez-Molina <i>et al.</i> , (1999)	Listeria innocua	Raw skim milk (0.2% milkfat)	2.6	C, coaxial, 29 ml, d = 0.63,	15 - 28°C, 0.5 l/min, 100 pulses, 50 kV/cm, 0.5 μ F, 2 μ sec, 3.5 Hz
Reina, <i>et al.</i> , (1998)	Listeria monocytogenes (scott A)	Pasteurized whole milk (3.5% milkfat), 2% milk (2% milkfat), skim milk (0.2%)	3.0-4.0	C, cofield flow, 20 ml,	10 - 50°C, 0.07l/s 30 kV/cm 1.5 μ sec, 1,700 Hz, bipolar pulses, t = 600 μ sec
Dunn dan Pearlman (1987)	Lactobacillus brevis	Yogurt	2.0	B, parallel plates	50°C, 1.8 V/ μ m
Pothakamury (1995)	Lactobacillus delbrueckii ATCC 11842	SMUF	4.0-5.0	B, 1 ml, d= 0.1cm	<30°C, 1.6V/ μ m, 200-300 μ sec 40 pules exponential decay, t=10,000 μ sec
Zhang <i>et al.</i> , (1994b)	Saccharomyces cerevisiae	Potato dextrose agar (PDA)	5.5	62 J/ml, B, 14 ml	15 & plusmin; 1°C, 4.0 V/ μ m, 3 μ sec, 16 Pulses
Qin, <i>et al.</i> , (1994)	Saccharomyces cerevisiae	Apple juice	4.2	270 J/pulse, B, parallel plate	<30°C, 1.2 V/ μ m, 20 pulses, Square wave
Zhang <i>et al.</i> , (1994a)	Saccharomyces cerevisiae	Apple juice	4	260 J/pulse, B, parallel plate,	4-10°C, 1.2 V/ μ m, 90 μ sec, 6 pulses, exponential decay

^{*)}Mahasiswa Program Doktor, Ilmu Keteknikan Pertanian, Sekolah Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor
^{**)}Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680

Lanjutan					
Zhang et al., (1994a)	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Apple juice	3-4	558 J/pulse, B, Parallel plate, 25.7 ml, d= 0.95 cm	<25°C, 2.5 V/μm, 5 pulses
Qin et al., (1995a)	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Apple juice	7	C, coaxial, 29 ml, d= 0.6 cm, 0.2 μF, 1 Hz	<30°C, 2.5 V/μm, 2-20μsec, &plusminus; 150 pulses, exponential decay
Qin et al., (1995a)	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Apple juice	6	28 J/ml, C, coaxial, 30 ml, 2-10 l/min	22-29.6°C, 5.0 V/μm, 2.5μsec, 2 pulses

^a B, batch, C, continuous, d, gap between electrodes ^bT Temperature, peak electric field, pulse width, number of pulses and shape, and t, total treatment time (sec).

KESIMPULAN

- (1) Teknologi medan pulsa listrik tegangan tinggi bisa menjadi teknologi alternative untuk digunakan sebagai metode pasteurisasi yang efektif, seperti yang telah ditunjukkan oleh berbagai peneliti walaupun masih dalam skala laboratorium.
- (2) Teknologi pasteurisasi dengan menggunakan medan pulsa listrik tegangan tinggi sangat prospektif untuk dikembangkan pada skala komersial, hal ini disebabkan karena berbagai keunggulan dibandingkan metode pasteurisasi konvensional.
- (3) Perlu kajian lebih lanjut untuk pengembangan metode HPEF ini dari aspek tekno-ekonomi dengan kinerja fungsional yang tetap memadai untuk standar pasteurisasi.

DAFTAR PUSTAKA

Buckle K.A, Edwards R.A, Fleet G.H dan Wooton M. 2009. Ilmu Pangan. Penerjemah; Jakarta; Hari Purnomo dan Adiono; UI Pres. Terjemahan dari Food Science.

Castro, A. J., Barbosa-Cánovas, G. V. and Swanson, B. G. 1993. Microbial inactivation of foods by pulsed electric fields. *J Food Process Pres.* 17:47-73

Desrosier, N.W. 2008. Teknologi Pengawetan Pangan. Penerjemah; Jakarta; Muchji Miljohardjo; UI Pres. Terjemahan dari The Technology of Food Preservation.

Dunn, J. E. and Pearlman, J. S. 1987. Methods and apparatus for extending the shelf-life of fluid food products. Maxwell Laboratories, Inc. U. S. Patent 4,695,472.

Fernandez-Molina, J. J., Barkstrom, E., Torstensson, P., Barbosa-Cánovas, G. V. and Swanson, B. G. 1999. Shelf-life extension of raw skim milk by combining heat and pulsed electric fields. *Food Res Int.*

Grahl, T. and Maerkl, H. 1996. Killing of microorganisms by pulsed electric fields. *Applied Microbiol Biotechnol.* 45(1/2):148-157

Hülshager, H. and Nieman, E. G. 1980. Lethal effect of high-voltage pulses on e. coli K12. *Radiat Environ Biophys* 18(4):281-8

Hülshager, H., Pottel, J. and Niemann, E. G. 1981. Killing of bacteria with electric pulses of high field strength. *Radiat Environ Biophys.* 20:53-65

Hülshager, H., Pottel, J. and Niemann, E. G. 1983. Electric field effects on bacteria and yeast cells. *Radiat Environ Biophys.* 22:149-162

^{*)}Mahasiswa Program Doktor, Ilmu Keteknikan Pertanian, Sekolah Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor
^{**)}Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680

- Martin-Belloso, O., Qin, B. L., Chang, F. J., Barbosa-Cánovas, G. V. and Swanson, B. 1997. Inactivation of *Escherichia coli* in skim milk by high intensity pulsed electric fields. *J Food Process Eng.* 20:317-336
- Peleg, M. 1995. A model of microbial survival after exposure to pulse electric fields. *J Sci Food Agric.* 67(1):93-99
- Pothakamury, U. R. 1995. High voltage pulsed electric field inactivation of *Bacillus subtilis* and *Lactobacillus delbrueckii*. *Rev Esp C T.* 35(1):101-107
- Pothakamury, U. R., Monsalve-Gonzalez, A., Barbosa-Cánovas, G. V. and Swanson, B. G. 1995. Inactivation of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* in model foods by pulsed electric field technology. *Food Res Int.* 28(2):167-171
- Qin, B. L., Zhang, Q., Barbosa-Cánovas, G. V., Swanson, B. G. and Pedrow, P. D. 1994. Inactivation of microorganisms by pulsed electric fields with different voltage waveforms. *IEEE Trans Dielec Insul.* 1(6):1047-1057
- Qin, B., Pothakamury, U. R., Vega, H., Martin, O., Barbosa-Cánovas, G. V. and Swanson, B. G. 1995. Food pasteurization using high intensity pulsed electric fields. *J Food Technol.* 49(12):55-60
- Qin, B.-L., Barbosa-Cánovas, G. V., Swanson, B. G. and Pedrow, P. D. 1998. Inactivating microorganism using a pulsed electric field continuous treatment system. *IEEE Trans Indus Applic.* 34(1):43-49
- Qin, B.-L., Chang, F.-J., Barbosa-Cánovas, G. V. and Swanson, B. G. 1995. Nonthermal inactivation of *S. cerevisiae* in apple juice using pulsed electric fields. *Lebensm Wiss Technol.* 28(6):564-568
- Reina, L. D., Jin, Z. T., Yousef, A. E. and Zhang, Q. H. 1998. Inactivation of *Listeria monocytogenes* in milk by pulsed electric field. *J Food Protect.* 61(9):1203-1206
- Schoenbach, K. H., Peterkin, F. E., Alden, R. W. and Beebe, S. J. 1997. The effect of pulsed electric fields on biological cells: Experiments and applications. *IEEE Trans Plasma Sci.* 25(2):284-292
- Simpson, M. V., Barbosa-Cánovas, G. V. and Swanson, B. G. 1995. The Combined inhibitory effect of lysozyme and high voltage pulsed electric fields on the growth of *Bacillus subtilis* spores. IFT Annual Meeting: Book of Abstracts. 267.
- Sitzmann, V. 1995. High voltage pulse techniques for food preservation. G. W. Gould. *New methods for food preservation.* London, UK. Blackie Academic and Professional. 236-252
- Teissie, J., and Tsong, T. Y. (1980). Evidence of voltage induced channel opening in Na, K-ATPase of human erythrocytes membranes. *J. Membr. Biol.* 55, 133-140.
- Tsong, T. Y. 1990. Electrical modulation of membrane proteins: Enforced conformational oscillations and biological energy signals. *Annu Rev Biophys Chem.* 19:83-106
- Vega-Mercado, H., Pothakamury, U. R., Chang, F.-J., Barbosa-Cánovas, G. V. and Swanson, B. G. 1996. Inactivation of *Escherichia coli* by combining pH, ionic strength and pulsed electric fields hurdles. *Food Res Int.* 29(2):117-121
- Zhang, Q. H., Chang, F.-J. and Barbosa-Cánovas, G. V. 1994. Inactivation of microorganisms in a semisolid model food using high voltage pulsed electric fields. *Lebensm Wiss Technol.* 27(6):538-543
- Zhang, Q. H., Monsalve-Gonzalez, A., Barbosa-Cánovas, G. V. and Swanson, B. G. 1994. Inactivation of *E. coli* and *S. cerevisiae* by pulsed electric fields under controlled temperature conditions. *Transactions of the ASAE.* 37(2):581-587
- Zhang, Q. H., Qin, B.-L., Barbosa-Cánovas, G. V. and Swanson, B. G. 1995. Inactivation of *E. coli* for food pasteurization by high-strength pulsed electric fields. *J Food Process Preserv.* 19(2):103-118
- Zimmermann, U. 1986. Electrical breakdown, electropermeabilization and electrofusion. *Rev Physiol Biochem Pharmacol.* 105:175-256