

Rancang Bangun *Conductivity Meter* Menggunakan *Probe* Pipa Kapiler untuk Memantau Kualitas Susu

Dicky Zulfikridin^{1,a)}, Hendro^{2,b)}

¹Pusat Pengembangan Sumber Daya Kemetrolgian – Kementerian Perdagangan,
Jl. Daeng M. Ardiwinata km.3,4 Cihanjuang – Parongpong, Bandung Barat, Indonesia, 40559

²Kelompok Keilmuan Fisika Teoritik Energi Tinggi dan Instrumentasi,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)}dicky.zulfikridin@gmail.com (corresponding author)

^{b)}hendro@fi.itb.ac.id

Abstrak

Telah dilakukan rancang bangun instrumentasi untuk memantau kualitas susu murni menggunakan metode pengukuran konduktivitas listrik. Pada penelitian ini, *conductivity meter* dirancang menggunakan metode empat probe pada pipa kapiler. Pengukuran konduktivitas listrik menggunakan sumber arus DC konstan yang dihubungkan pada dua buah elektroda dan elektroda lain sebagai pengukur tegangan listrik dari sampel susu murni melalui mikrokontroler Arduino ATmega 2560 yang telah terintegrasi dengan rangkaian ADC. Nilai cell constant hasil pengukuran adalah $2311,24 \text{ m}^{-1}$. Kalibrasi cell constant pada empat buah probe menggunakan larutan standar KCl 0,1 M dan 0,01 M yang sudah diketahui nilai konduktivitas listriknya berdasarkan dokumen kalibrasi OIML R56 edisi tahun 1981 dan ASTM D1125-95. Hasil kalibrasi diperoleh nilai cell constant sebesar $3884,50 \text{ m}^{-1}$ (KCl 0,1 M) dan $3358,70 \text{ m}^{-1}$ (KCl 0,01 M). Data rekaman konduktivitas listrik susu murni menurun dalam pemantauan selama 1 – 2 hari. Pada nilai dibawah 0,460 S/m diduga susu murni sudah mulai mengalami penurunan kualitas. Perubahan nilai konduktivitas listrik yang sangat cepat terjadi pada 3 jam awal pengukuran dan mencapai saturasi ketika pemantauan dilakukan lebih dari 24 jam. Kurva mulai terlihat mendatar pada waktu 16 jam setelah pemantauan. Parameter lain yang mendukung data rekaman konduktivitas listrik adalah pH. Hasil pemantauan menunjukkan bahwa pH berpengaruh terhadap penurunan kualitas susu dimana pH susu murni dalam kondisi awal diperoleh nilai pH 5,8 – 6,22 dan menurun sampai pH 3,5 - 3,7. Adanya nilai penurunan dan saturasi pada pemantauan data rekaman konduktivitas listrik dapat dikaitkan dengan adanya dugaan aktivitas bakteri yang mempengaruhi kandungan lemak, protein dan garam susu murni melalui proses tertentu. Diharapkan alat ini dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai alat uji fisis dalam menentukan kualitas bahan pangan lain yang ada di pasaran.

Kata-kata kunci: Konduktivitas listrik, Pipa kapiler, Pemantauan susu

PENDAHULUAN

Susu merupakan salah satu bahan pangan yang sangat penting bagi pemenuhan gizi masyarakat. Susu termasuk salah satu bahan pangan yang memiliki karakteristik fisis terutama

sifat kelistrikkannya. Karakteristik konduktivitas listrik sangat penting dipelajari untuk memahami sifat fisis bahan pangan susu. Susu termasuk konduktor listrik intrinsik dan termasuk elektrolit karena terdiri atas 0,7% garam inorganik dan fraksi protein bermuatan [1]. Karakteristik ini kemudian dimanfaatkan oleh peneliti untuk mempelajari sifat fisis dari susu.

Indonesia memiliki potensi dalam pemanfaatan rekaman data konduktivitas listrik sebagai upaya pengawasan selama peredaran (*post-market control*) terhadap produk susu. Hal ini dapat dilakukan oleh lembaga yang berwenang dalam melakukan kontrol kualitas produk bahan pangan susu. Permintaan terhadap kebutuhan susu tumbuh sangat cepat yang meningkat dari tahun ke tahun. Konsumsi susu sapi pada tahun 2016 sebesar 972,62 ribu ton. Pada tahun 2017 – 2018, prediksi proyeksi konsumsi susu sapi untuk konsumsi cenderung meningkat rata-rata 4,1% per tahun, sehingga total kebutuhan susu sapi untuk konsumsi pada tahun 2017 sebesar 1,01 juta ton dan prediksi untuk tahun 2018 sebesar 1,05 juta ton [2].

Rekaman konduktivitas listrik susu telah banyak dikaji. Namun, sejauh ini rekaman data konduktivitas listrik pada susu cair dilakukan melalui alat ukur *conductivity meter* dengan penggunaan dua dan empat *probe* elektroda. Publikasi yang dilakukan oleh Galvi dkk. (2015) menunjukkan rekaman konduktivitas listrik pada susu sapi melalui pengukuran dua *probe* elektroda. Jika dikaji lebih lanjut, konfigurasi *probe* meliputi jenis *probe* elektroda, jarak antar *probe* elektroda, dan kontak area permukaan *probe* elektroda dapat mempengaruhi data rekaman konduktivitas listrik terhadap sampel cairan khususnya susu [3].

Beberapa studi mengenai rekaman konduktivitas listrik susu tidak selalu disertai dengan perhitungan yang spesifik mengenai geometri *probe* elektroda yang dicelupkan ke dalam susu cair dalam penentuan nilai konduktivitas listriknya. Sejauh ini hanya ada satu publikasi tentang studi *probe* elektroda untuk pengukuran konduktivitas listrik pada cairan yaitu publikasi oleh Schiefelbein dkk. (1998) yang mengkaji teknik pengukuran konduktivitas listrik cairan dengan akurasi rendah dan akurasi tinggi [4]. Namun dalam publikasi ini, studi pengukuran konduktivitas listrik dilakukan dalam tahap pemodelan saja dan pada penelitian ini salah satu teknik pengukuran direalisasikan dalam bentuk eksperimen. Teknik kapiler relatif memiliki lintasan arus yang panjang dan sempit sehingga biasanya digunakan pada cairan konduktif tinggi, namun dalam penelitian ini teknik kapiler digunakan pada larutan cair berupa susu murni. Selain itu, deteksi sampel menggunakan empat *probe* elektroda dan penentuan *cell constant* dari *probe* yang dianggap sebagai titik juga dikembangkan pada penelitian ini.

Pada dasarnya pabrik susu sudah mencantumkan informasi batas pemakaian susu yang masih layak dikonsumsi (tanggal kadaluarsa). Namun demikian, masa pemakaian susu kemasan tersebut bisa berkurang bilamana perlakuan terhadap susu kemasannya tidak baik. Misal, disimpan pada ruangan yang panas, lembab, atau terdapat cacat pada kemasannya. Akibatnya, susu akan lebih cepat menjadi basi sebelum tanggal kadaluarsa tersebut. Penurunan kualitas susu dapat disebabkan oleh adanya pertumbuhan bakteri dan mikroba sehingga susu menjadi lebih mudah rusak atau basi. Ketika disimpan pada temperatur ruang, susu dengan kandungan protein memudahkan pertumbuhan bakteri dan mikroba. Pertumbuhan bakteri yang pesat ini membuat umur simpan susu menjadi lebih singkat [5].

Data rekaman pemantauan susu banyak dimanfaatkan untuk menentukan tingkat kesegaran dan kualitas susu. Kajian tingkat kesegaran susu sudah pernah diteliti juga menggunakan teknik *spektroskopi fluorens* menggunakan *Light Emitting Diode* dengan panjang gelombang 380 nm pada kondisi waktu penyimpanan susu yang berbeda [5]. Kajian serupa juga dilakukan oleh Joshi dkk. (2016) yang melakukan pemantauan kualitas susu menggunakan sensor gelombang elektromagnet [6].

Dalam penelitian ini dilakukan karakterisasi kondisi susu dengan menggunakan metode konduktivitas listrik. Dari penelitian sebelumnya, terdapat perbedaan dalam hal teknik deteksi, jenis sampel, dan rentang waktu pengukuran. Pemantauan dilakukan tidak dalam rentang waktu

yang lama untuk mengkaji degradasi kualitas dan tingkat kesegaran susu. Dari kajian tersebut maka pemantauan tidak dapat menjadi indikator kapan susu tersebut mengalami degradasi kualitas.

Rekaman data yang akan diolah pada penelitian ini dibatasi hanya sampai pada penentuan nilai konduktivitas listrik susu yang reliabel, didukung oleh data konduktivitas listrik susu dan bahan pangan selain susu yang dikerjakan oleh peneliti lain. Rekaman data konduktivitas listrik susu yang diperoleh, selanjutnya digunakan sebagai penanda terjadinya penurunan kualitas susu yang ada di pasaran.

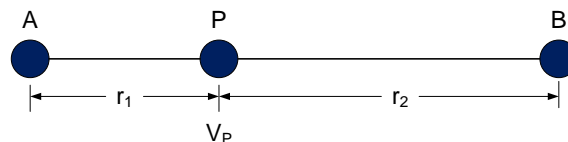
Berdasarkan karakteristik fisis susu, kebaruan teknik pengukuran dan pengawasan terhadap produk susu tersebut, dalam penelitian ini akan dilakukan kajian rekaman data konduktivitas listrik susu cairan dengan metode empat *probe* elektroda pada pipa kapiler. Hal tersebut diwujudkan dalam bentuk rancangan alat ukur yang mampu memantau perubahan kualitas susu ditinjau dari data rekaman konduktivitas listrik.

PEMANFAATAN KONDUKTIVITAS LISTRIK UNTUK MEMANTAU DEGRADASI SUSU

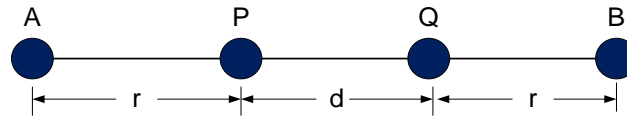
Konduktivitas listrik merupakan ukuran kemampuan bahan untuk mengalirkan arus listrik. Dalam cairan atau suatu larutan, arus listrik dibawa oleh kation dan anion, sedangkan pada logam dibawa oleh elektron. Konduktivitas listrik suatu larutan tergantung pada beberapa faktor diantaranya konsentrasi, mobilitas ion, ion valensi dan temperatur.

Nilai konduktivitas listrik memiliki rentang nilai dari 10^{-18} sampai dengan 10^7 Sm^{-1} , tergantung pada bahan. Konduktivitas sistem cairan seperti susu terletak diantara rentang nilai ini. Konduktivitas listrik normal *whole milk* adalah sekitar $0,460 \text{ Sm}^{-1}$ [5]. Konduktivitas listrik susu murni menurun dengan bertambahnya kandungan lemak susu [7]. Rekaman data konduktivitas listrik susu cair sangat penting untuk dikaji karena dapat memberikan informasi adanya pertumbuhan mikroba dan bakteri [8].

Menurut Schifelbein dkk. (1998), terdapat beberapa teknik dalam penentuan konduktivitas listrik pada cairan. Teknik pengukuran yang digunakan yaitu teknik *two-wire*, teknik *four-wire*, teknik cincin (*ring*) dan teknik dua toroida. Publikasi yang dilakukan oleh Schifelbein dkk (1998) menyatakan bahwa teknik pengukuran tersebut termasuk pada teknik dengan akurasi rendah. Hal ini didasarkan pada sebaran arus listrik dan pemodelan persamaannya. Pada teknik pengukuran dengan akurasi tinggi seperti teknik kapiler, teknik *interdigitated* dan teknik berkelok-kelok (*meandering winding*) dapat digunakan pada sampel cairan. Teknik kapiler relatif memiliki lintasan arus yang panjang dan sempit sehingga cocok juga digunakan untuk cairan konduktif tinggi seperti cairan NaCl. Teknik dengan desain elektroda *interdigitated* memiliki karakteristik lintasan arus yang lebar dan pendek sehingga cocok digunakan pada cairan dengan resistivitas tinggi. Sementara itu, teknik *meandering winding* dapat digunakan pada cairan dan konduktivitas listrik logam padatan atau cairan konduktif [4].



(a)



(b)

Gambar 1. Probe tetrapolar (4-elektroda) untuk pengukuran resistivitas [9].

Jakosky (1940) pada Littwitz, dkk. (1990) menyelesaikan persamaan Laplace untuk menunjukkan bahwa potensial di tiap titik dalam medium yang homogen dan isotropik tak hingga disebabkan oleh sumber arus kecil yang diberikan melalui persamaan [9]:

$$V = \frac{I\rho}{4\pi r} \tag{1}$$

dimana ρ adalah resistivitas bahan dan r adalah jarak dari sumber arus ke titik pengukuran. Potensial listrik V_P dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$V_P = \frac{I\rho}{4\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \tag{2}$$

Jika elektroda kedua Q diletakkan secara simetri pada jarak d cm dari elektroda P pada garis AB seperti pada gambar, maka dapat ditentukan kemungkinan potensial ($V_P - V_Q$) yang timbul diantara elektroda P dan Q . Beda potensial diberikan melalui persamaan:

$$V_{PQ} = V_P - V_Q = \frac{I\rho}{4\pi} \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{r+d} - \frac{1}{r+d} + \frac{1}{r} \right]$$

$$V_P - V_Q = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{r+d} \right] \tag{3}$$

Hambatan R , yang terjadi antara potensial yang mengukur elektroda P, Q berasal dari sumber arus konstan diperoleh persamaan:

$$R = \frac{V_P - V_Q}{I} = \frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{r+d} \right] \tag{4}$$

Untuk probe simetri seperti pada gambar 1, maka: $r = (L-d)/2$, dimana L adalah panjang probe AB . Dari hasil substitusi ke persamaan 4, maka diperoleh:

$$R = \frac{\rho}{\pi} \left(\frac{1}{L-d} - \frac{1}{L+d} \right) \tag{5}$$

Asumsikan $d/L = \alpha$, sehingga diperoleh persamaan:

$$R = \frac{2\rho}{\pi L} \left(\frac{\alpha}{1-\alpha^2} \right) \tag{6}$$

Potensial yang diukur tidak hanya tergantung pada resistivitas elektrolit tetapi juga karakteristik geometri dari sel konduktivitas [9]. Potensial V yang diukur diantara elektroda

sama dengan perkalian arus yang mengalir dan hambatan R yang terjadi diantara elektroda. Hambatan R tergantung pada geometri sel dan dihubungkan ke resistivitas elektrolit melalui persamaan:

$$R = k \rho \quad (7)$$

Parameter *cell constant* k merupakan parameter yang menentukan karakteristik setiap sel konduktivitas. Jadi dengan melakukan substitusi persamaan (7) ke persamaan (6) maka diperoleh nilai *cell constant* k :

$$k = \frac{2}{\pi L} \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha^2} \right) \quad (8)$$

Nilai *cell constant* k bergantung pada jarak L yaitu jarak antara elektroda pembawa arus dan rasio d/L dimana d adalah jarak antara elektroda pengukur tegangan atau potensial listrik. Nilai konduktivitas listrik selanjutnya diperoleh dari hasil substitusi sehingga menghasilkan persamaan:

$$\sigma = \frac{2}{\pi RL} \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha^2} \right) \quad (9)$$

METODE EKSPERIMEN RANCANG BANGUN CONDUCTIVITY METER

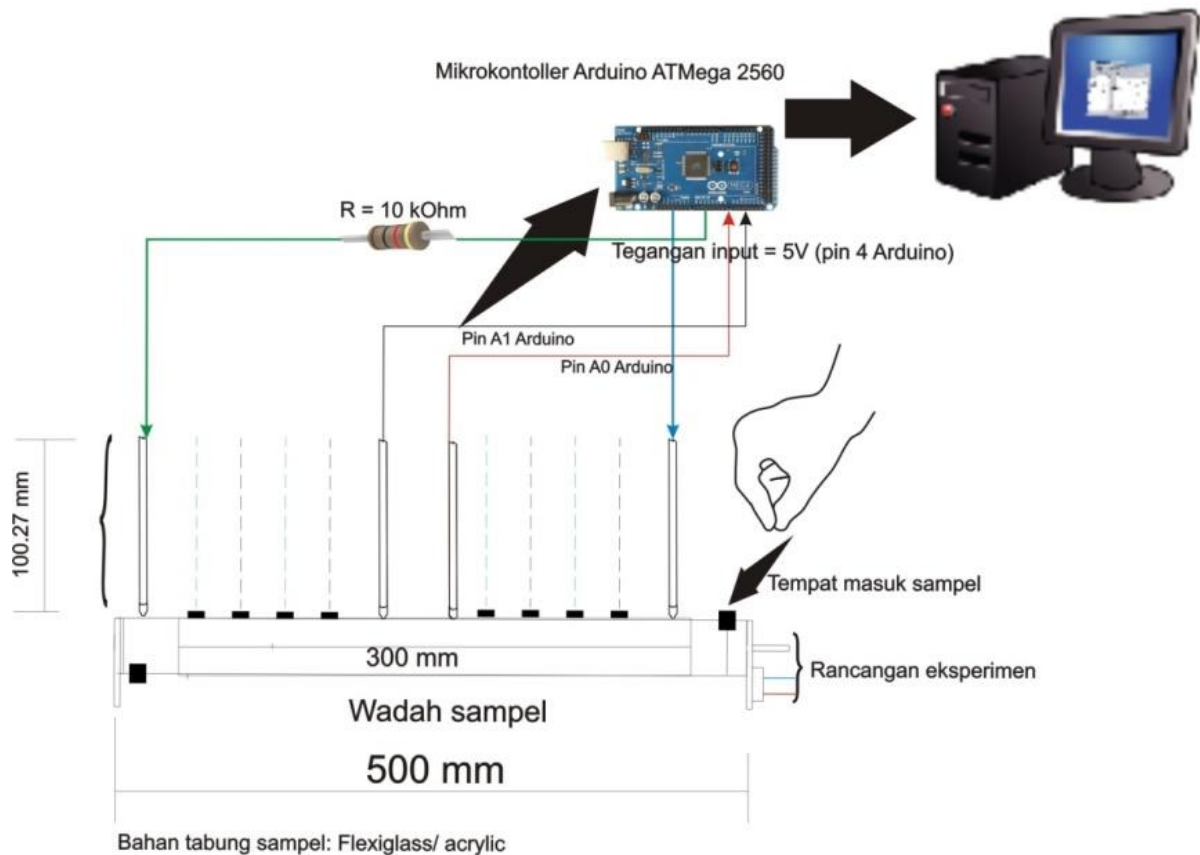
Metode Pengukuran konduktivitas listrik

Metode konduktivitas listrik yang digunakan dalam penelitian ini menguji sampel dalam wadah yang diberi sumber arus listrik DC sedemikian rupa sehingga tegangan listrik pada elektroda dapat memberikan rekaman data sifat fisis susu. Tegangan listrik yang dihasilkan dari sampel dideteksi oleh mikrokontroler dan ditampilkan data rekamannya di komputer. Tegangan DC 5 V diperoleh dari pin 4 mikrokontroler Arduino ATmega 2560 dan hambatan sumber R_s sebesar 10 k Ω . Untuk menghindari terjadinya polarisasi, maka sumber arus listrik DC yang dialirkan ke *probe* elektroda diatur sedemikian rupa sehingga pengukuran dilakukan setiap 5 detik dengan mengatur *power* di arduino sebagai saklar *On-Off* untuk menghindari terjadinya polarisasi.

Pengamatan dilakukan dalam rentang waktu yang cukup lama. Jika alat ini dapat dikembangkan, maka pemantauan tidak hanya digunakan untuk mengetahui kondisi susu tetapi juga dapat dimanfaatkan untuk mengkarakterisasi mikroba dan bakteri pada susu.

Sumber arus listrik yang digunakan adalah arus konstan yang diperoleh dari pengaturan tegangan sumber DC serta hambatan sumber. Pada konsep sumber arus, hambatan sumber yang digunakan lebih besar daripada hambatan beban. Sampel susu memiliki nilai konduktansi (I/R), yang diperoleh dari hasil penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya digunakan sebagai referensi untuk hambatan beban. Sampel susu diberi sumber arus konstan kemudian dideteksi oleh detektor *probe* pada pipa kapiler. Sinyal keluaran kemudian masuk ke mikrokontroler yang telah terintegrasi dengan rangkaian ADC mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital. Pengolahan sinyal tersebut ditampilkan di komputer (PC) menggunakan perangkat lunak Arduino.

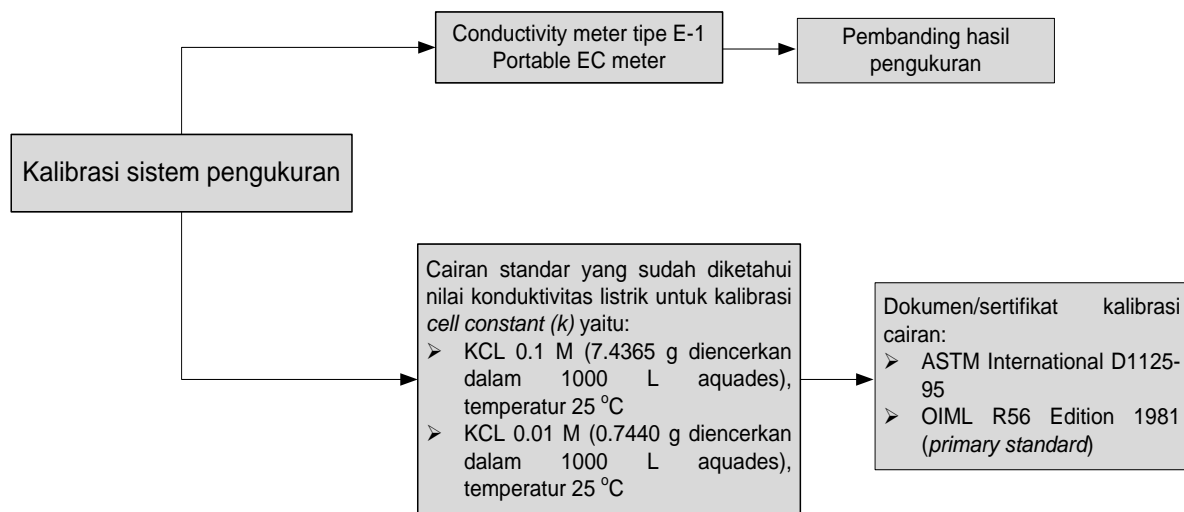
Alat dan bahan yang digunakan dalam eksperimen pada sistem instrumentasi ini adalah mikrokontroler Arduino ATmega 2560, sensor temperatur DS18B20 (*Waterproof*), Piranti Antarmuka *LabQuest Mini* merk *Vernier*, sensor temperature merk *Vernier*, Sensor pH *Vernier*, tabung sampel (bahan *acrylic*), pipa kapiler bahan kaca *borosilikat*, sumbat karet 1 lubang, jepit buaya bersteker, kabel *jumper*, *breadboard*, resistor 10 k Ω dan komputer. Bahan yang digunakan adalah susu murni (3,6 % kandungan lemak), *aquades*, Cairan kalibrasi KCl 0.1 M dan 0.01 M, cairan pH *buffer* dan kawat (tembaga).



Gambar 2. Rangkaian desain alat ukur konduktivitas listrik untuk memantau kualitas susu

Kalibrasi rancang bangun Conductivity Meter

Pada tahap kalibrasi rancang bangun alat ukur konduktivitas listrik, metode yang digunakan yaitu dengan membandingkan data rekaman konduktivitas listrik yang diperoleh terhadap alat ukur konduktivitas listrik standar pabrikan yaitu *portable EC-meter* tipe E-1. Dalam hal ini kalibrasi dilakukan untuk menentukan penyimpangan pengukuran atau daya ulang pengukuran. Kalibrasi lain yang digunakan yaitu dalam menentukan *cell constant* (k) hasil pengukuran terhadap cairan atau larutan yang memiliki standar. Larutan atau cairan standar yang dijadikan acuan memiliki nilai konduktivitas listrik yang sudah diketahui. Cairan standar dapat ditelusur melalui dokumen atau sertifikat kalibrasi OIML (*Organisation Internationale de Metrologie Legale*) R56 edisi tahun 1981 mengenai larutan standar untuk konduktivitas elektrolit atau dokumen acuan untuk metode standar pengujian konduktivitas listrik air melalui dokumen kalibrasi ASTM (*American Standard Testing and Material*) D1125-95.



Gambar 3. Kalibrasi rancang bangun alat *Conductivity meter*

Cairan yang digunakan dalam kalibrasi ini adalah larutan KCl 0,1 M dan 0,01 M dengan nilai konduktivitas listrik masing-masing adalah 12856 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dan 1408,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pada temperatur standar 25 °C. Kalibrasi yang digunakan pada sistem pengukuran ini menggunakan referensi cairan B dan C dimana sebanyak 7,4365 g dan 0.7440 g Potasium Klorida (KCl) dengan tingkat *ProAnalysis* (PA) ditimbang di udara menggunakan neraca analitik Ohaus dan diencerkan pada temperatur 20 °C sehingga menghasilkan konsentrasi sebesar 0,1 M dan 0,001 M. Tahap preparasi larutan KCl 0,1 M dan 0.01 M dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik, Departemen Kimia, ITB. Larutan yang diperoleh selanjutnya digunakan pada tahap kalibrasi awal menggunakan *script* kalibrasi Arduino.

Dari hasil pengukuran kalibrasi diperoleh nilai *cell constant* sebesar 3884.50 m^{-1} pada larutan KCl 0,1 M dan 3358,70 m^{-1} pada larutan KCl 0,01 M. Jika dibandingkan dengan nilai *cell constant* k hasil pengukuran pada sampel susu yaitu 2311,24 m^{-1} , maka terdapat perbedaan yang signifikan. Namun dengan asumsi bahwa susu murni mengandung sekitar 87,10 % [10], maka jika nilai *cell constant* yang diperoleh dari pengukuran dibandingkan dengan dokumen kalibrasi menurut ASTM D1125-95 masih dapat direkomendasikan karena pada jangkauan konduktivitas listrik dengan nilai 5000 – 10⁶ $\mu\text{S}/\text{cm}$, nilai *cell constant* yang diizinkan adalah 10 – 100 cm^{-1} atau sekitar 1000 – 10⁴ m^{-1} . Demikian pula jika dibandingkan dengan dokumen kalibrasi OIML R-56, maka nilai *cell constant* hasil kalibrasi dengan larutan KCl 0,1 M dan 0,01 M ditelusur ke standar primer dengan nilai yang hampir sama.

Data rekaman konduktivitas listrik selanjutnya dibandingkan juga terhadap alat ukur konduktivitas listrik (EC meter) tipe E-1 *Portable EC meter* dengan jangkauan pengukuran konduktivitas listrik: 0 – 9999 $\mu\text{S}/\text{cm}$, temperatur: 0.1 – 80.0 ° serta akurasi sebesar $\pm 2\%$.

Penentuan Sampel Susu Murni

Susu segar yang digunakan diperoleh dari kawasan penjualan susu murni di daerah Ijan, Jl. Pungkur, Kebon Kalapa, Bandung. Susu diperoleh dari daerah peternakan sapi perah di Pangalengan Kabupaten Bandung. Susu murni (*raw milk*) sangat baik dijadikan objek penelitian mengenai konduktivitas listrik bahan pangan karena memiliki masa konsumsi yang singkat sehingga mudah dalam pemantauan karakteristik listriknya. Pengambilan sampel dilakukan sebanyak 1-2 hari sekali dan sampel yang diperoleh disimpan terlebih dahulu pada suhu 4 °C. Untuk mempersiapkan sampel yang diuji, maka sampel susu murni disiapkan

sebanyak 100 ml. Sampel susu diukur langsung setelah pembelian dan sampel lain disimpan dan dijaga pada suhu 4-8 °C di kulkas untuk menghindari adanya kerusakan pada sifat sampel karena lingkungan luar. Kontrol ini digunakan karena nilai data rekaman konduktivitas listrik diduga dapat dipengaruhi oleh faktor temperatur.

Tabel 1. Sampel susu murni yang digunakan pada penelitian

Sampel Susu Murni	Tanggal Pembelian	Tanggal Penyimpanan	Tanggal Pengukuran
Sampel #1	30 April 2018 (pagi)	30 April – 1 Mei 2018 (1 hari)	1 – 3 Mei 2018 (23 jam)
Sampel #2	4 Mei 2018 (sore)	4 – 5 Mei 2018 (1 hari)	5 – 7 Mei 2018 (27 jam)
Sampel #3	7 Mei 2018 (pagi)	7 – 9 Mei 2018 (2 hari)	9 Mei 2018 (12 jam)
Sampel #4	9 Mei 2018 (sore)	-	9 – 12 Mei 2018 (50 jam)
Sampel #5	11 Mei 2018 (pagi)	-	11 – 13 Mei 2018 (50 jam)
Sampel #6	15 Mei 2018 (pagi)	-	15 – 17 Mei 2018 (40 jam)

HASIL EKSPERIMEN DAN PERBANDINGAN DENGAN DATA REFERENSI

Hasil dan Analisa Eksperimen Konduktivitas Listrik Susu

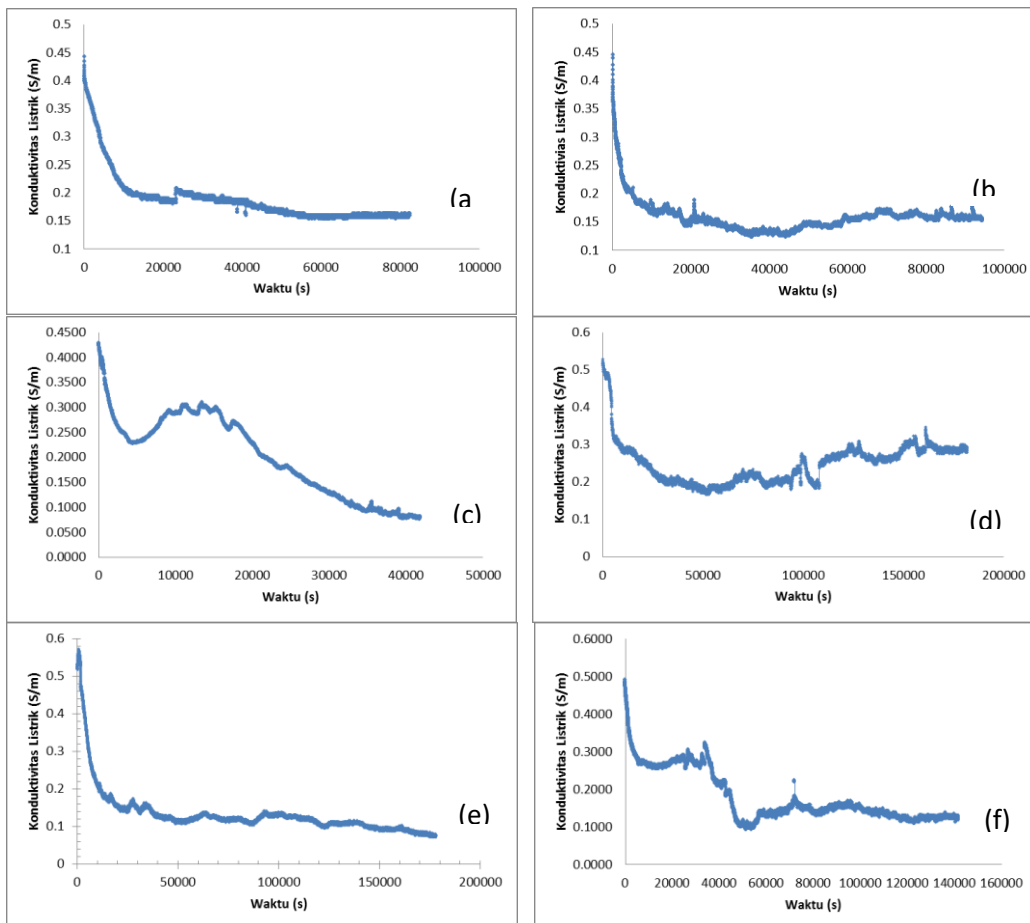
Pada saat diberi sumber arus listrik pada kedua ujung elektroda dalam pipa kapiler yang dicelupkan ke dalam sampel susu murni, maka arus listrik yang mengalir melalui kawat tembaga dibawa oleh elektron. Ketika dicelupkan dalam sampel susu cair, arus listrik dibawa oleh ion-ion, yaitu muatan positif kation dan muatan negatif anion. Medan listrik yang dihasilkan mempengaruhi arah pergerakan kation dan anion dalam arah yang saling berlawanan pada elektroda yang diberi muatan listrik dalam cairan susu. Data rekaman konduktivitas listrik yang diperoleh tergantung dari konsentrasi semua ion-ion yang ada, ketika konduktivitas listriknya menurun, maka konsentrasi ion-ionnya berkurang. Seluruh ion-ion yang ada dalam susu murni seperti potasium, kalsium, klorida dan laktosa bergerak dengan kecepatan atau mobilitas yang berbeda melalui cairan susu sehingga mempengaruhi nilai konduktivitas listrik.

Gambar 4 menunjukkan diagram pemantauan kualitas susu murni melalui pengukuran konduktivitas listrik. Kurva pemantauan konduktivitas listrik susu murni untuk sampel-sampel yang mewakili tanggal pembelian yang berbeda diperoleh dari pemantauan selama 24 jam dan lebih. Variasi dari pemantauan konduktivitas listrik susu murni terhadap waktu beberapa memiliki pola yang sama dari beberapa sampel.

Pada gambar 4, kurva sampel 1, sampel 2 dan sampel 3 menunjukkan data rekaman konduktivitas listrik diawal pemantauan mulai menunjukkan penurunan kualitas dengan nilai konduktivitas listrik kurang dari 0,460 S/m. Pemantauan sampel 1, sampel 2 dan sampel 3, menunjukkan bahwa pada awal pengukuran nilai konduktivitas listrik tidak berada pada rentang nilai normal susu yang baik. Jika dibandingkan terhadap data referensi, susu murni yang sehat memiliki nilai konduktivitas listrik normal pada rentang dari 4,6 – 5,7 mS/cm [1]. Ketika nilai konduktivitas listrik susu tidak berada dalam rentang ini, maka susu dapat dianggap dalam keadaan tidak normal. Hal ini mengindikasikan adanya konsistensi yang baik pada rekaman konduktivitas listrik jika sampel susu disimpan selama 1 – 2 hari pada suhu 4 – 8 °C. Jadi penyimpanan pada suhu tersebut belum menjamin susu murni yang dibeli masih dalam keadaan baik.

Analisis ini merupakan tahap awal dalam menganalisa konduktivitas listrik pada sampel sebelum dilakukan analisa selanjutnya. Pada setiap diagram, terdapat proses perubahan yang cepat di fase awal yang terekam selama proses pemantauan. Secara fisis, ada keterkaitan antara hasil rekaman konduktivitas listrik yang terukur. Data rekaman konduktivitas listrik susu murni menurun hingga mencapai nilai yang menunjukkan bahwa kualitas susu murni mulai mengalami penurunan kualitas. Perubahan nilai konduktivitas listrik yang sangat cepat terjadi pada fase awal pada waktu 3 jam awal saat pengukuran dan mencapai saturasi ketika pemantauan dilakukan lebih dari 24 jam seperti pada gambar 4(a), 4(b) dan 4(f). Kurva terlihat mendatar mulai pada waktu 60000 detik atau 16 jam setelah pemantauan. Adanya nilai saturasi pada pemantauan data rekaman konduktivitas listrik dapat dikaitkan dengan adanya dugaan telah terjadi pelepasan asam lemak bebas yang disebabkan proses penggumpalan yang dihasilkan dari gangguan pada membran tipis gumpalan lemak [8].

Berdasarkan gambar 4, penurunan data rekaman konduktivitas listrik ini sesuai dengan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya dimana penurunan konduktivitas listrik disebabkan oleh bertambahnya kandungan lemak susu [8]. Pada saat yang sama, proses pengasaman pada susu mulai aktif oleh adanya dugaan mikroba sehingga ion-ion kalsium dibebaskan yang pada akhirnya mempengaruhi nilai rekaman konduktivitas listrik susu.



Gambar 1. Variasi rekaman data konduktivitas listrik susu murni dengan pemantauan yang berbeda: (a) sampel #1_23 jam, (b) sampel #2_27 jam, (c) sampel #3_12 jam (d) sampel #4_50 jam, (e) sampel #5_50 jam, dan (f) sampel #6_40 jam.

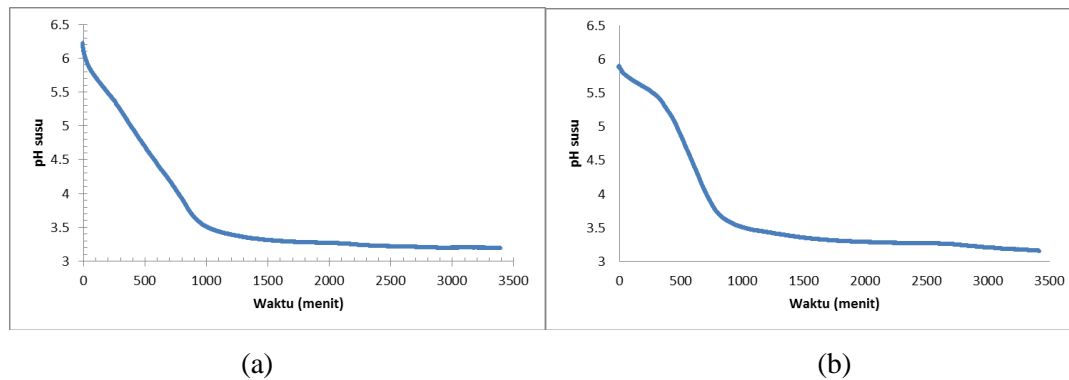
Fitur yang hampir serupa dari masing-masing rekaman konduktivitas listrik juga dipengaruhi oleh kandungan garam seperti klorida, fosfat, karbonat, sitrat, potasium, kalsium, sodium dan magnesium [8]. Meskipun kandungan garam dalam susu hanya sekitar 0,7% w/v (berat volume), namun konsentrasi relatif setiap berbagai ion dapat berubah dan dipengaruhi oleh karakteristik dari susu itu sendiri seperti umur sapi, waktu pemerahan, keragaman akibat musim atau makanan ternak [10]. Faktor ini dapat mempengaruhi distribusi kalsium, magnesium dan fosfat diantara fase larut dan koloid serta jumlah ion konduksi bebas dalam susu.

Hambatan listrik cairan semakin lama menjadi semakin besar sehingga menghambat mobilitas ion-ion. Konduktivitas listrik susu murni menurun dengan naiknya hambatan susu juga karena diduga kadar lemak meningkat yang disebabkan oleh gumpalan lemak (non-konduktif) menempati volume yang seharusnya diisi dengan fase cairan konduktif susu, yang selanjutnya menghambat mobilitas ion konduksi dan menambah jarak perpindahan ion yang harus ditempuh [8]. Gumpalan lemak ini diduga menutupi seluruh membran tipis non-konduktif pada susu. Gumpalan lemak dapat terlihat dari adanya endapan di bagian permukaan atas susu pada penyimpanan susu di temperatur ruang. Secara kasat mata, dari hasil eksperimen menunjukkan gumpalan lemak ini berbeda variasi diameternya karena tergantung pada karakteristik dari susu murni itu sendiri.

Selain pengaruh lemak dan kandungan garam, protein dalam susu yaitu *casein*, diduga dapat juga mempengaruhi nilai konduktivitas listrik susu. *Casein* ini terdapat dalam bentuk fase koloid. Garam yang tak larut seperti kalsium fosfat terikat dengan *casein micelles* (partikel kompleks koloid) pada fase koloid ini. Prosentase kecil dari ion sodium dan potasium terikat dengan *casein* sebagai ion yang berlawanan dengan kelompok protein fosfat organik yang bermuatan negatif [1]. Garam-garam ini berperilaku seperti jembatan antara bagian-bagian kecil *casein micelles* dan menjaga kondisi susu agar tetap stabil. Ketika terjadi kerusakan pada susu, maka ikatan ini yang diduga menjadi terputus. Gambar 4(d), pada fase akhir menunjukkan fitur yang sedikit berbeda dimana nilai konduktivitas listrik mengalami kenaikan. Pada kondisi tertentu garam-garam ini dapat dilepaskan ke dalam larutan sehingga diduga dapat meningkatkan konduktivitas listrik susu. Data rekaman konduktivitas listrik pada fase tertentu menunjukkan nilai yang meningkat dikarenakan diduga adanya proses tertentu yang tidak hanya tergantung pada perubahan bentuk gumpalan lemak tetapi juga disebabkan karena terputusnya ikatan antara bagian-bagian terkecil *casein micelles* dalam protein susu dan melepaskan ion-ion bebas terutama kalsium.

Hasil dan Analisa Pengukuran pH Susu Murni

Pada rekaman pemantauan pH yang ditunjukkan pada gambar 5, terdapat tren yang hampir serupa saat terjadi penurunan nilai pH. Pada kondisi awal, pH susu segar berada pada nilai pH 6,6 dan setelah dilakukan pemantauan pada temperatur ruang maka terjadi penurunan nilai pH secara nyata. Penurunan pH dapat disebabkan karena terjadinya pengasaman yang diduga adanya aktivitas bakteri. Proses pengasaman susu oleh kegiatan bakteri dapat juga menyebabkan mengendapnya protein susu yaitu *casein*. Bila terdapat cukup asam yang dapat mengubah pH susu murni menjadi kira-kira 5,2 – 5,3 akan terjadi pengendapan disertai dengan melarutnya garam-garam kalsium dan fosfor yang semula terikat pada protein secara berangsur-angsur.



Gambar 5. Kurvapemantauan pH susu murni: (a) sampel #4, (b) sampel #5

Pada rekaman nilai pH susu murni, diduga bahwa faktor distribusi muatan protein sangat penting untuk dikaji. Ketika pH susu menurun pada waktu mencapai 10000 detik atau hampir 1 hari, distribusi muatan protein ini diduga dapat berubah. Pada pH susu murni dalam kondisi awal dari eksperimen diperoleh nilai pH 5,84 – 6,22 pada sampel 4 dan sampel 5. Hal ini menunjukkan bahwa molekul protein memiliki muatan total negatif. Molekul protein pada nilai pH ini tetap terpisah karena muatan yang identik saling tolak menolak. Gambar 5 juga menunjukkan bahwa pada pH sekitar 3,5 – 3,7 diduga sudah terjadi penggumpalan oleh asam dimana ion-ion hidrogen bertambah dan diserap oleh protein. Distribusi muatan positif dan negatif protein menjadi sama sehingga muatan totalnya menjadi nol. Molekul-molekul protein tidak saling tolak menolak tetapi muatan positif pada satu molekul terhubung dengan muatan negatif pada molekul tetangga sehingga membentuk kelompok protein besar. Partikel *casein* berada pada titik isoelektris pada nilai pH ini, dimana afinitas partikel terhadap air menurun sehingga terjadi pengendapan [10].

Timbulnya rasa masam pada susu yang disimpan selama satu sampai dua hari pada temperatur ruang menunjukkan bahwa nilai pH semakin menurun dan dugaan adanya laktosa yang diuraikan oleh bakteri asam laktat. Laktosa difermentasikan menjadi asam laktat karena enzim dari bakteri memecah laktosa menjadi glukosa dan galaktosa yang diubah melalui reaksi tertentu menjadi asam laktat. Akibatnya pH susu mengalami penurunan dan rasa susu menjadi asam.

KESIMPULAN

Rancang bangun sistem elektronik melalui konsep sumber arus listrik untuk memantau kualitas susu murni dengan metode empat *probe* pipa kapiler ternyata dapat merekam data perubahan konduktivitas listrik susu murni. Melalui sejumlah pemantauan pada susu murni, metode empat *probe* dengan pipa kapiler merupakan salah satu metode yang dapat digunakan dalam mengukur data rekaman konduktivitas listrik karena lintasan arus yang panjang dan sempit. Bila dibandingkan dengan metode pengukuran langsung dengan dua *probe* elektroda, metode pipa kapiler dapat menunjukkan rekaman kualitas pemantauan susu yang dapat dipercaya dan berlaku umum. Rancang bangun *conductivity meter* yang dapat dipercaya dalam pemantauan susu murni dibuktikan dengan terekamnya kurva data konduktivitas listrik susu murni yang memiliki fitur yang hampir serupa.

Parameter yang dapat digunakan untuk memantau kualitas susu yaitu data rekaman konduktivitas listrik dan pH. Proses yang kompleks pada cairan susu berpotensi memberi pengaruh terhadap data rekaman konduktivitas listrik. Data rekaman konduktivitas listrik menggambarkan konsentrasi ion-ion yang ada, muatannya serta mobilitasnya. Pemantauan

susu murni menunjukkan semakin lama waktu pengujian, konsentrasi ion menjadi semakin sedikit sehingga nilai konduktivitas listrik menjadi menurun. Penelitian ini menunjukkan bahwa ion-ion garam pada susu diduga berpengaruh terhadap data rekaman konduktivitas listrik susu. Selain itu adanya gumpalan lemak dan distribusi protein susu juga dapat mempengaruhi data rekaman konduktivitas listrik susu. Hal ini diduga karena adanya aktivitas bakteri yang selanjutnya dapat menurunkan nilai pH susu menjadi lebih asam. Setiap sampel susu murni yang diuji memiliki karakteristik tertentu. Hal ini tergantung dari waktu pengambilan sampel, waktu penyimpanan, dan karakteristik dari susu murni.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Hendro atas masukan dan sarannya sertaberbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini.

REFERENSI

1. McSweeney, P. L. H., & Fox, P. F., *Advanced Dairy Chemistry (Vol. 3)*, <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84865-5>(2009).
2. Outlook Susu, *Komoditas Pertanian Subsektor Peternakan hasil reanalisis dari Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian Tahun 2016 Sekretariat Jenderal-Kementerian Pertanian*, data diperoleh melalui situs internet: <http://pusdatin.setjen.pertanian.go.id/>. Diunduh pada tanggal 3 Januari 2018.
3. Galfi, A., Radinovic, M., Milanov, D., Bobos, S., Pajic, M., Savic, S., & Davidov, I., *Electrical conductivity of milk and bacteriological findings in cows with subclinical mastitis*. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 31(4), 533–541, <https://doi.org/10.2298/BAH1504533G> (2015).
4. Schiefelbein, S. L., Fried, N. A., Rhoads, K. G., & Sadoway, D. R. *A high-accuracy, calibration-free technique for measuring the electrical conductivity of liquids*. *Review of Scientific Instruments*, <https://doi.org/10.1063/1.1149095>(1998).
5. Ding, W., Gao, F., & Yan, C. *LED-induced Fluorescence Spectroscopy Technique for Milk Freshness Detection Technologies*, *State Key Laboratory Modern Optical*, 16–18. (2016).
6. Joshi, K. H., Mason, A., Shaw, A., Korostynska, O., Cullen, J. D., & Al-Shamma'a, A. *Online monitoring of milk quality using electromagnetic wave sensors*. *Proceedings of the International Conference on Sensing Technology, ICST, 2016–March*, 700–705. <https://doi.org/10.1109/ICSensT.2015.7438487>. (2016).
7. McCarthy, O.J., *Milk | Physical and Physico-Chemical Properties of Milk*. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 3, 467-477. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00311-3> (2002).
8. Mabrook, M.F., & Petty, M.C., *Effect of composition on the electrical conductance of milk*, *Journal of Food Engineering*, 60(3), 321-325, [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00054-2)(2003).
9. Littwitz, C., Ragheb, T., Geddes, L., A., *Cell constant of the tetrapolar conductivity cell*, *Medical & Biology Engineering and Computer*, 28, 587 (1990).
10. Buckle, K.A., Edwards, R.A., Fleet, G.H., Wootton, M., diterjemahkan oleh Purnomo, H., Adiono.: *Ilmu Pangan*, UI-Press (1987).