



Penggunaan Electrical Impedance Spectroscopy (EIS) untuk Mengidentifikasi Kerusakan Mekanis pada Buah Apel

Application of Electrical Impedance Spectroscopy (EIS) for Identifying Mechanical Damage in Apple fruit

Cicih Sugianti^{1*}, Zana Azalia Maktub¹

¹Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung

*Corresponding Author: cicih.sugianti@fp.unila.ac.id

Abstract. Mechanical damage is a common issue that affects the quality and marketability of apples during postharvest handling and storage. This study aims to identify mechanical damage in apples using Electrical Impedance Spectroscopy (EIS) as a non-destructive evaluation method. EIS measurements were conducted to analyze the electrical properties of both damaged and intact apples. Results showed that damaged apples exhibited lower extracellular resistance (7.8 k Ω) compared to intact apples (44.67 k Ω), indicating increased electrolyte leakage due to cell membrane disruption. Cole-Cole plot analysis further revealed significant differences in the impedance characteristics of apples, reflecting the extent of tissue damage. These findings demonstrate that EIS effectively detects mechanical damage by assessing changes in cellular integrity. The method provides a rapid, accurate, and non-invasive approach for quality control in apple handling and storage processes.

Keywords: Apple, Cell Membrane Integrity, Extracellular Resistance, Electrical Impedance Spectroscopy (EIS), Mechanical Damage.

1. Pendahuluan

Distribusi dari petani hingga ke pemasaran buah-buahan menyebabkan kerusakan mekanis seperti abrasi dan memar pada permukaan buah. kerusakan mekanis merupakan masalah umum pada buah selama rantai pasok yang dapat dipicu oleh berbagai faktor, seperti karakteristik hasil panen segar, sifat kemasan, karakteristik suspensi kendaraan, kecepatan kendaraan, dan kekasaran jalan (Singh et al., 2006; Jones et al., 1991; Fernando et al., 2018). Buah-buahan seperti pisang dan apel sangat sensitif terhadap kerusakan mekanis seperti memar, cutting, tekanan pada saat transportasi

(Sugianti, et al., 2022). Bahkan kerusakan mekanis pada buah dapat terjadi pada perkebunan luas dengan kondisi transportasi yang belum maksimal, dimana belum menerapkan penanganan pascapanen yang baik dan benar (Sugianti, et al., 2024)

Buah apel merupakan salah satu komoditas hortikultura yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan banyak diminati oleh konsumen di seluruh dunia. Kualitas apel sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk penanganan pascapanen yang melibatkan proses panen, pengangkutan, dan penyimpanan. Salah satu masalah utama yang dihadapi dalam penanganan apel adalah kerusakan mekanis (*bruise*) yang dapat terjadi akibat tekanan, benturan, atau gesekan. Kerusakan mekanis ini tidak hanya menurunkan penampilan buah, tetapi juga dapat mempercepat proses pembusukan, sehingga mengurangi umur simpan dan nilai jual apel.

Deteksi dini terhadap kerusakan mekanis pada apel sangat penting untuk memastikan kualitas produk yang sampai ke konsumen. Metode konvensional untuk mendeteksi kerusakan mekanis, seperti inspeksi visual, memiliki keterbatasan, terutama dalam mendeteksi kerusakan internal yang tidak terlihat dari luar. Oleh karena itu, diperlukan metode yang lebih akurat, cepat, dan non-destruktif untuk mendeteksi kerusakan mekanis pada apel. Deteksi browning pada apel dilakukan dengan menggunakan image processing dengan mengkuantifikasi besaran area browning pada buah apel *honey crisp*, *Granny smith*, dan *Golden delicious* apel (Subhashree, et al., 2017). Namun penelitian terkait kondisi internal tissue pada saat memar belum ditemukan. Hu et al (2018) melaporkan kerusakan mekanis pada buah blueberry dapat diklasifikasikan menggunakan *imaging* spektroskopi. Memar pada buah longan juga dapat diklasifikasikan menggunakan *visible* spektroskopi (Pholpho et al., 2011). Kuantifikasi ketahanan memar pada buah apel telah dihitung sebagai rasio antara tekanan permukaan terhadap volume memar tergantung pada ketinggian jatuh, dengan model daya *Bruise Resistance Index* (BRI) pada apel telah ditemukan oleh Stopa et al., (2018).

Electrical Impedance Spectroscopy (EIS) merupakan salah satu teknik yang menjanjikan untuk aplikasi ini. EIS adalah metode non-destruktif yang mengukur sifat listrik suatu material pada berbagai frekuensi. Teknik ini mampu memberikan informasi tentang perubahan sifat dielektrik dan konduktivitas jaringan apel yang disebabkan oleh kerusakan mekanis. Kerusakan mekanis pada buah apel dapat memengaruhi struktur jaringan sel, termasuk kerusakan membran sel, yang kemudian dapat memengaruhi respons impedansi listrik.

Perkembangan penelitian EIS menunjukkan bahwa teknik ini telah berhasil diterapkan pada berbagai jenis buah-buahan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa EIS dapat digunakan untuk menilai kematangan buah, mendeteksi kerusakan mekanis, mengukur kadar air, serta memonitor kualitas selama penyimpanan. Sebagai contoh, pada buah mangga dan pisang, EIS digunakan untuk mendeteksi tingkat kematangan melalui perubahan sifat dielektrik. Pada apel dan pear, EIS terbukti mampu membedakan buah yang utuh dari yang mengalami kerusakan mekanis. Selain itu, teknik ini juga digunakan untuk mendeteksi infeksi atau penyakit pada buah, seperti pisang dan jeruk, sebelum gejala terlihat secara visual.

Integrasi EIS dengan teknologi modern, seperti pembelajaran mesin, telah meningkatkan akurasi dan efisiensi teknik ini. Pengembangan alat portabel berbasis EIS semakin memungkinkan penggunaannya secara real-time di lapangan. Dengan potensi yang besar, EIS menawarkan solusi inovatif untuk menjaga kualitas dan nilai ekonomis produk hortikultura.

Penelitian ini bertujuan untuk menduga kerusakan mekanis pada buah apel menggunakan teknik *Electrical Impedance Spectroscopy*. Dengan memanfaatkan teknik ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih baik tentang hubungan antara kerusakan mekanis dan perubahan sifat listrik apel. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode deteksi kualitas apel yang lebih efektif, sehingga dapat mendukung industri hortikultura dalam menjaga kualitas dan nilai ekonomis produk.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan buah apel dengan 3 kali ulangan. Perlakuan *bruise* pada apel dilakukan dengan cara menjatuhkan apel dengan ketinggian 30 cm. Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah IM 3536 LCR Tester, *Nondestructive Measurement of Apple Bruise*.



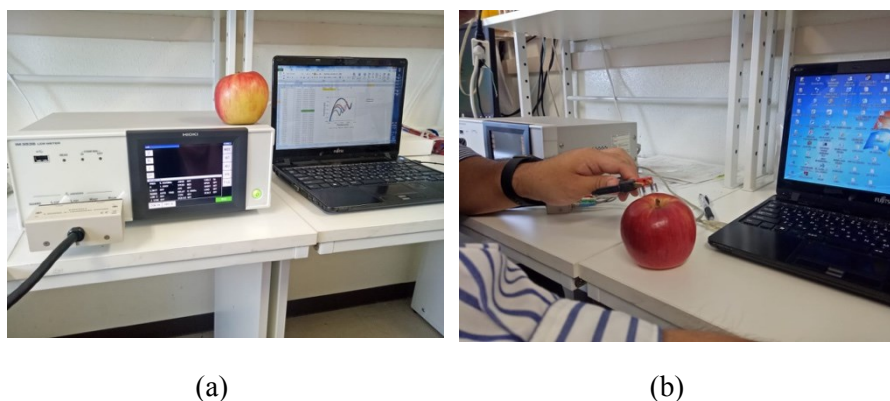
2.1 Prosedur Penelitian

Buah apel segar dengan ukuran dan varietas yang seragam dipilih untuk penelitian. Apel dibagi menjadi dua kelompok, yaitu apel utuh tanpa kerusakan mekanis (kontrol) dan apel yang diberi perlakuan kerusakan mekanis secara terkontrol (*bruise*). Perlakuan kerusakan mekanis dilakukan dengan penjatuhan buah apel pada ketinggian 30 cm diatas permukaan lantai.

Pengukuran dilakukan menggunakan perangkat EIS yang terdiri atas elektroda, generator sinyal AC, dan alat pencatat data impedansi. Elektroda ditempatkan pada permukaan apel, memastikan kontak yang baik tanpa merusak jaringan kulit. Impedansi diukur pada rentang frekuensi tertentu, misalnya 1 Hz hingga 1 MHz, untuk mendapatkan respons listrik pada berbagai frekuensi. Data impedansi direkam dalam bentuk resistansi (ΔR) dan reaktansi (ΔX), yang kemudian dianalisis.

Data impedansi dari apel yang utuh dan yang mengalami kerusakan dianalisis menggunakan perangkat lunak khusus. Perbedaan sifat listrik (seperti resistansi dan kapasitansi) dianalisis untuk mengidentifikasi pola yang khas pada apel yang mengalami memar. Data diolah menggunakan model sirkuit ekivalen untuk menggambarkan perubahan pada jaringan internal apel akibat kerusakan mekanis.

Hasil penelitian disajikan dalam bentuk grafik atau tabel yang menjelaskan hubungan antara kerusakan mekanis dan perubahan sifat listrik pada buah apel. Kemudian data dianalisis dengan statistik.



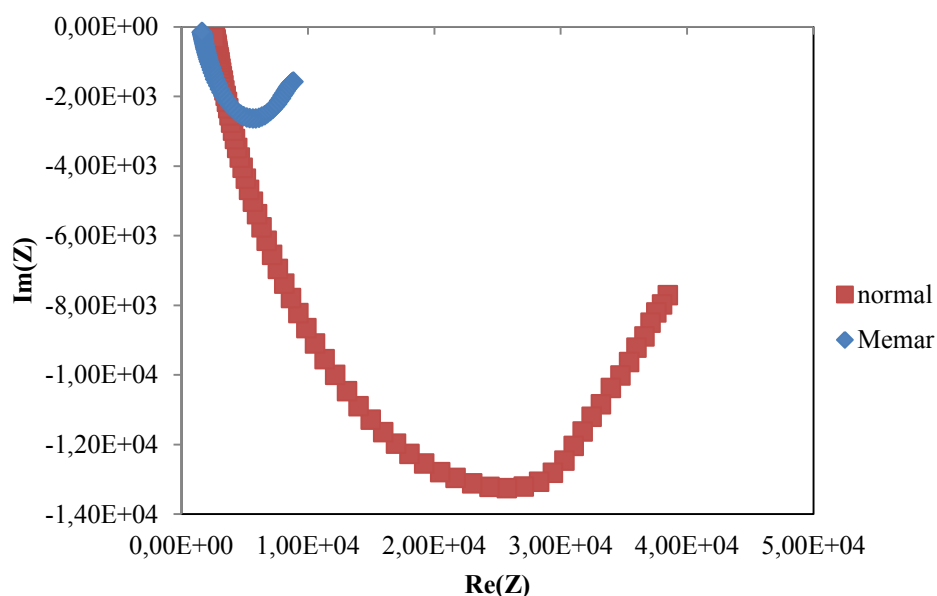
Gambar 2. (a) Komponen penelitian meliputi LCR Meter, apel dan komputer dan (b) Pengukuran impedance pada buah apel

3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 3 menunjukkan Cole-Cole plot, merepresentasikan dari impedansi listrik dalam domain kompleks, yang sering digunakan untuk menganalisis sifat listrik material biologis, termasuk buah-buahan seperti apel. Bentuk khas Cole-Cole plot adalah semi-lingkar, yang menggambarkan hubungan antara hambatan listrik (resistansi) dan respons kapasitif jaringan. Dalam konteks penelitian ini, Cole-Cole plot digunakan untuk mengevaluasi perubahan sifat listrik jaringan apel akibat kerusakan mekanis.

Pada apel yang rusak, semi-lingkar pada plot menjadi lebih kecil atau berpindah ke arah resistansi yang lebih rendah pada sumbu x. Hal ini disebabkan oleh kerusakan membran sel, yang mengakibatkan kebocoran cairan elektrolit ke ruang antar sel, sehingga resistansi menurun. Perubahan kapasitansi, yang direpresentasikan oleh tinggi busur semi-lingkar pada sumbu y, dapat menggambarkan degradasi integritas membran sel. Penurunan kapasitansi menunjukkan bahwa membran sel tidak lagi mampu menyimpan muatan listrik secara optimal.

Dalam penelitian ini, analisis plot ini menunjukkan potensi EIS sebagai alat untuk menilai kerusakan jaringan internal pada apel, yang dapat diterapkan pada kontrol kualitas dalam rantai pasok buah-buahan. Dengan memanfaatkan Cole-Cole plot, tidak hanya kerusakan mekanis yang dapat terdeteksi, tetapi juga dinamika perubahan sifat listrik selama penyimpanan atau proses pascapanen lainnya.



Gambar 3. Cole-cole plot untuk menunjukkan perbandingan kondisi buah apel yang memar dan normal

Hasil pengukuran menggunakan EIS menunjukkan bahwa parameter resistansi intraseluler (*intracellular resistance*), resistansi ekstraseluler (*extracellular resistance*), dan resistansi membran sel (*cell membrane resistance*) memberikan perbedaan signifikan antara apel yang mengalami kerusakan mekanis dan apel utuh.

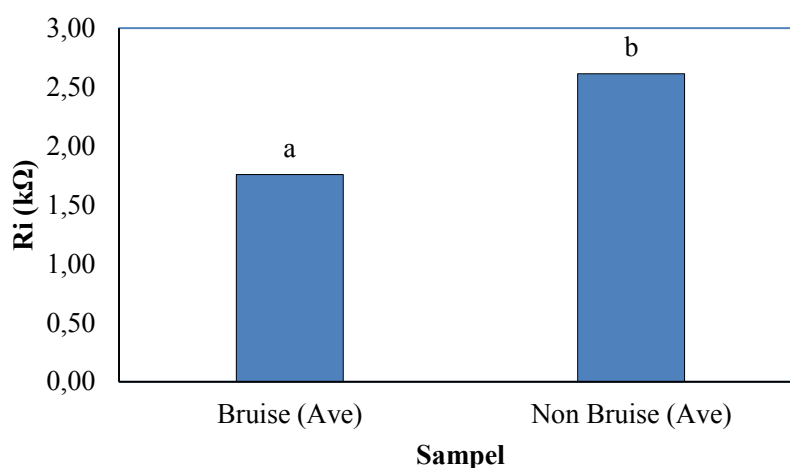
3.1 Resistansi Intraseluler

Apel yang mengalami kerusakan mekanis menunjukkan penurunan resistansi intraseluler yang signifikan dibandingkan dengan apel utuh. Penurunan ini disebabkan oleh disintegrasi membran sel, yang memungkinkan ion-ion bergerak lebih bebas di dalam jaringan seluler. Buah apel yang

mengalami memar memiliki nilai resistansi intraseluler sebesar 1,7 k Ω dan buah apel normal yang tidak memiliki memar mempunyai nilai resistansi intraseluler sebesar 2,6 k Ω . Penurunan resistansi ini menjadi indikator utama adanya kerusakan jaringan internal. Berdasarkan Tabel 1 menunjukkan bahwa perbedaan kondisi buah mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik resistansi intraseluler buah apel. Selanjutnya perbedaan resistansi intraseluler buah apel dapat dilihat pada Gambar 4.

Tabel 1. Hasil Uji Ragam pada resistansi intraseluler antara buah apel memar dan normal

ANOVA Ri						
<i>Sumber Keragaman</i>	<i>JK</i>	<i>db</i>	<i>KT</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Perlakuan	0.73	1	0.73	71.24	0.013	18.51
Error	0.02	2	0.01			
Total	0.56	3				



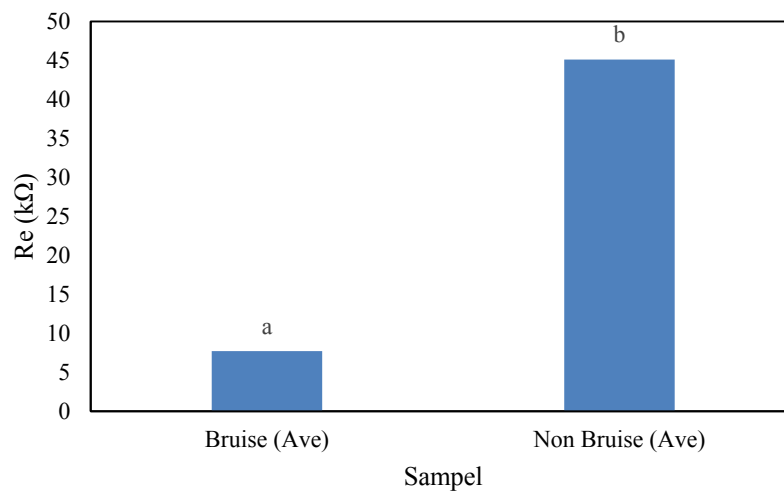
Gambar 4. Perbandingan nilai resistansi intraseluler

3.2 Resistansi Ekstraseluler

Resistansi ekstraseluler pada apel yang mengalami kerusakan cenderung lebih rendah dibandingkan dengan apel utuh. Hal ini terjadi karena peningkatan cairan elektrolit di ruang antar sel akibat kerusakan membran sel. Apel dengan memar memiliki resistansi ekstraseluler sebesar 7,8 k Ω , sedangkan apel normal tanpa memar memiliki resistansi intraseluler sebesar 44,67 k Ω . Penurunan resistansi ini menjadi indikator utama adanya kerusakan jaringan internal. Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa kondisi buah secara signifikan memengaruhi karakteristik resistansi ekstraseluler. Perbedaan resistansi tersebut juga dapat diamati pada Gambar 5, di mana peningkatan konduktivitas di ruang ekstraseluler menyebabkan resistansi yang terukur menurun.

Tabel 2. Hasil Uji Ragam pada resistansi ekstraseluler antara buah apel memar dan normal

ANOVA Re						
<i>Sumber Keragaman</i>	<i>JK</i>	<i>db</i>	<i>KT</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Perlakuan	1398.38	1	1398.38	188.11	0.00527	18.5128
Error	14.86	2	7.43			
Total	1413.25	3				



Gambar 5. Perbandingan nilai resistansi intraseluler

3.3 Resistansi Membran Sel

Kerusakan mekanis pada apel menyebabkan penurunan resistansi membran sel secara signifikan. Penurunan ini mencerminkan degradasi struktur membran, yang biasanya berfungsi sebagai penghalang dielektrik antara ruang intra- dan ekstraseluler. Apel dengan memar dan tanpa memar memiliki resistansi membran sel yang hampir sama yaitu sebesar 2,57 nF. Berdasarkan hasil uji Anova yang ditunjukkan pada Tabel 2, terlihat bahwa kondisi buah tidak mempengaruhi karakteristik resistansi sel membran.

Tabel 3. Hasil uji ragam pada resistansi membran sel (Cm) antara buah apel memar dan normal

ANOVA Cm						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	9.65E-05	1	9.64955E-05	0.00135	0.97407	18.51282
Within Groups	0.1434159	2	0.071707946			
Total	0.1435124	3				

Hasil ini konsisten dengan teori bahwa kerusakan mekanis pada buah apel memengaruhi integritas jaringan seluler. Kerusakan pada membran sel meningkatkan permeabilitas ion, yang pada gilirannya memengaruhi sifat listrik jaringan. Analisis data menunjukkan bahwa EIS dapat membedakan dengan jelas antara apel yang utuh dan yang rusak melalui perubahan resistansi pada tiga parameter utama tersebut. Ando, et al (2014) menggunakan spektroskopi impedansi listrik (EIS) untuk mengeksplorasi perubahan status fisiologis sel jaringan kentang selama proses pengeringan dengan udara panas pada suhu 50–80°C, dimana menunjukkan perilaku status fisiologis sel jaringan kentang selama pengeringan dan potensi EIS sebagai metode untuk mengevaluasi kerusakan pada sel biologis. menganalisis plot Cole-Cole yang diperoleh dari pengukuran impedansi listrik pada buah apel selama penyimpanan. Perubahan plot Cole-Cole dievaluasi pada lima varietas apel, Panjang koordinat pada puncak busur melingkar dari titik asal sampel berkurang selama penyimpanan 1–4 minggu akibat penurunan integritas membran sel. Sifat listrik yang tidak seragam ini disebabkan oleh variasi ukuran sel, yang berbeda antar varietas dan berubah selama penyimpanan (Watanabe et al., 2018).

Selain itu, analisis model sirkuit ekivalen menunjukkan bahwa perubahan impedansi lebih

dominan pada frekuensi rendah, yang mencerminkan respons membran sel. Pada frekuensi tinggi, perubahan impedansi lebih banyak terkait dengan cairan intraseluler dan ekstraseluler. Penelitian ini menunjukkan bahwa EIS adalah metode yang efektif untuk mendeteksi kerusakan mekanis secara non-destruktif pada buah apel. Dengan optimasi lebih lanjut, teknik ini dapat diterapkan dalam sistem pengendalian kualitas pada industri hortikultura.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa spektroskopi impedansi listrik (EIS) merupakan metode yang efektif untuk mengidentifikasi kerusakan mekanis pada buah apel. Parameter impedansi listrik, seperti resistansi ekstraseluler dan intraseluler, dapat digunakan sebagai indikator utama untuk mendeteksi perubahan fisiologis akibat kerusakan jaringan. Resistansi ekstraseluler yang lebih rendah pada apel yang rusak dibandingkan apel utuh menunjukkan peningkatan cairan elektrolit di ruang antar sel, yang diakibatkan oleh kerusakan membran sel. Selain itu, analisis Cole-Cole plot memberikan informasi tentang perubahan integritas jaringan seluler selama penyimpanan. Hasil penelitian ini membuktikan potensi EIS sebagai alat non-destruktif untuk mengevaluasi kualitas dan integritas buah apel secara cepat dan akurat.

Daftar Pustaka

- Singh, J., Singh, S. P. & Joneson, E. 2006. Measurement and analysis of US truck vibration for leaf spring and air ride suspensions, and development of tests to simulate these conditions. *Packaging Technology Science* 19, 309–323. <https://doi.org/10.1002/pts.732>
- Jones, C. S., Holt, J. E. & Schoorl, D. 1991. *A model to predict damage to horticultural produce during transport*. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 50, 259–272. [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(05\)80019-8](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(05)80019-8).
- Fernando, I., Fei, J., Stanley, R. & Enshaei, H. 2018. Measurement and evaluation of the effect of vibration on fruits in transit—Review. *Packaging Technology Science*. **31**, 723–738. <https://doi.org/10.1002/pts.2409>.
- Sugianti, C., Imaizumi, T., Thammawong, M., Nakano, K. 2022. Recent Postharvest Technologies in the Banana Supply Chain. *Reviews in Agricultural Science*, 10: 123–137, 2022. https://doi.org/10.7831/ras.10.0_123.
- Sugianti, C., Imaizumi, T., Thammawong, M., Tsuta, M., Nagata, M., Nakano, K. 2024. Time–temperature tolerance of harvested green bananas exposed to high temperatures. *Scientia Horticulturae* 329 (2024) 112970. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112970>.
- Subhashree, SN., Sunoj, S., Xue, J., Bora, GC. Quantification of browning in apples using colour and textural features by image analysis. *Food Quality and Safety*, 2017, 1(3), 221–226. <http://dx.doi.org/10.1093/fqsafe/fyx021>.
- Meng-Han Hu, Qing-Li Don, Bao-Lin Liu. 2016. Classification and characterization of blueberry mechanical damage with time evolution using reflectance, transmittance and interactance imaging spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture* 122:19–28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.015>
- Pholpho, T., Pathaveerat, S., Sirisomboon, P. 2011. Classification of longan fruit bruising using visible spectroscopy. *Journal of Food Engineering* 104:169–172. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.011>
- Stopaa, R., Szyjewicza, D., Komarnickia, P., Kutab, U. 2018. Determining the resistance to mechanical damage of apples under impact loads. *Postharvest Biology and Technology* 146: 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.08.016>.
- Ando, Y., Mizutani, K., Wakatsuki, N. 2014. Electrical impedance analysis of potato tissues during drying. *Journal of Food Engineering* 121:24–

31.<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.008>.

Watanabe, T., Ando, Y., Orikasa, T., Kasai, S., Shiina, T. 2018. Electrical impedance estimation for apple fruit tissues during storage using Colee Cole plots. *Journal of Food Engineering* 221:29-34. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.09.028>.