

Bitkisel Yağların Sıcaklığa ve Frekansa Bağlı Dielektrik Özelliklerinin Benzetim Yoluyla Değerlendirilmesi

Emine AVŞAR AYDIN*

Çukurova Üniversitesi, Müh. Mim. Fak., Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Adana

Özet

Bu çalışmanın ana amacı bitkisel yağların sıcaklığa (20-80°C) ve frekansa (1 MHz-1 GHz) bağlı dielektrik özelliklerinin benzetim yoluyla (CST Microwave Studio) değerlendirilmesidir. Bu görevi yerine getirmek için bir prob matematiksel olarak karakterize edildi ve iyi bilinen dielektrik özelliklere sahip üç farklı saf sıvı ile test edildi. Probun yansıma katsayısının bir matematiksel modeli iletim hattı teorisi ve koaksiyel kablonun bilinen devre parametrelerini birleştirerek elde edildi. Matematiksel modeldeki tek değişkenler Cole-Cole parametreleridir. Herhangi bir sıvının Cole-Cole parametreleri matematiksel modeli ile benzetim programından ölçülen yansıma katsayısına yaklaştırılarak elde edilir.

Anahtar Kelimeler: Koaksiyel iletim-hattı, Dielektriksel özellikler, Cole-Cole parametreleri, Yansıma katsayısı

Evaluation of Temperature and Frequency Dependent Dielectric Properties of Vegetable Oils by Simulation

Abstract

The main purpose of this study is evaluation of temperature (20-80 °C) and frequency (1 MHz -1 GHz) dependent dielectric properties of vegetable oils by simulation (CST Microwave Studio). In order to accomplish this task a probe is mathematically characterized and tested with three different pure liquids with well-known dielectric properties. A mathematical model of the probe reflection coefficient is derived combining TL theory and known circuit parameters of the coaxial cable. The only variables in the mathematical model are the Cole-Cole parameters. The Cole-Cole parameters of any liquid/oil are obtained by fitting of the measured reflection coefficient from simulation with the mathematical model.

Keywords: Coaxial transmission-line, Dielectric properties, Cole-Cole parameters, Reflection coefficient

* Yazışmaların yapılacağı yazar: Emine AVŞAR AYDIN, Ç.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Adana. avshare@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Mikrodalga teknolojisi 2. Dünya Savaşı sırasında askeri ekipmanların üretimi ve dizaynı üzerine yapılan çalışmalarda keşfedilmiştir [1]. Mikrodalga enerjisinin pek çok endüstriyel ve tıbbi uygulamalarda kullanımı bulunmaktadır. Örneğin, metal işleme ve gıda sanayi işlemlerinde malzemelerin mikrodalga tedavisi ve kimyasal reaksiyonların verimini hızlandırmak ve arttırmak için kullanılmaktadır [2, 3]. Tıpta, mikrodalga hipertermi kötü huylu tümörleri tedavi etmek için kullanılır [4-6]. Mikrodalga enerjisinin uygulandığı başka yeni bir alan da ham petrolün işlenmesidir [7-9].

Yağ içinde su emülsiyonlarının mikrodalga destekli ayrılması önceden incelenmiş ve deneysel olarak birçok yazar tarafından doğrulanmıştır [7,8]. Hatta bu emülsiyonların mikrodalga destekli ayrılmalarının ticari sistemleri günümüzde mevcuttur [9].

Dielektrik spektroskopisi birçok malzemenin özelliklerinin incelenmesi için güçlü bir yaklaşım olarak kurulmuştur. Gerçekten, bir elektromanyetik alanın uygulamasına bir malzemenin nasıl tepki verdiğinin analizi bir numunenin özellikleri hakkında büyük bir fikir sağlayabilir. Alınan bilgi, dielektrik davranışı ile ilgili olsa da, numunenin çeşitli niteliksel özellikleri ile ilişkili olabilir. Doğrudan bir sonuç olarak, dielektrik karakterizasyon çeşitli araştırma ve izleme amaçları için, hem temel araştırma hem de endüstriyel uygulamalarda, cazip bir çözüm olarak kanıtlanmıştır [10, 11]. Bu amaç için, frekansa bağımlı dielektrik (ϵ^*) bir malzemenin dielektrik davranışını tam olarak açıklayan önemli bir parametre olarak kabul edilebilir. Malzemelerin dielektrik özelliklerini tanımlamak için kullanılan çeşitli matematiksel modeller (ya teorik olarak elde edilen ya da deneysel) vardır. Özellikle, daha genel Havriliak-Negami rahatlatma modelinin özel bir durumu olan Cole-Cole modelin, çeşitli malzemelerin frekansa bağlı dielektrik özelliklerini açıklamakta başarılı olduğu kanıtlanmıştır [12]. Cole-Cole model, statik geçirgenlik, yüksek frekanslarda geçirgenlik, statik elektriksel iletkenlik, rahatlatma frekansı ve dispersiyon

parametresi olmak üzere beş parametre ile karakterize edilir. Gerçek şu ki, bu tür parametrelerin değerlendirilmesi her zaman kolay bir görev değildir, özellikle karmaşık malzemeler söz konusu olduğunda. Bununla birlikte, mikrodalga reflektometre-tabanlı teknikler dielektrik parametrelerinin hesaplanması için etkili bir yöntem haline gelmiştir.

Bu tip bir temel üzerinde, Cole-Cole modelin birçok malzemelerin özelliklerini tarif etmek için uygun olduğu kanıtlanmıştır [13,14]. Özellikle, gıdaların Cole-Cole parametrelerinin tahmini kalite kontrol açısından oldukça dikkat çekmiştir [15-20]. Buna ek olarak, bitkisel ya da sanayi yağlarının kalite kontrolü yasalarla birlikte daha sıkı hale geldiğinden beri, bu dielektrik parametrelerin tahmini yağların kalitesinin güvenilir bir göstergesi olarak kullanılabilir.

Benzetim programında sırasıyla üç farklı saf sıvının (propanol, etanol ve etil asetat) Cole-Cole parametreleri belirlendi. Literatürdeki veriler ile karşılaştırıldı. Karşılaştırma sonuçları tutarlı olduğundan aynı işlem farklı frekans ve sıcaklıklarda ayçiçeği ve zeytinyağı için yapıldı. Sonuçlar, farklı sıvıların, özellikle rahatlatma frekansı açısından, farklı dielektrik özellikleri olduğunu göstermektedir. Rahatlatma frekansı yağların kalite kontrolü için dielektrik spektroskopisi uygunluğunu ve performansını test etmek için tutarlı parametre sağlar.

2. UYGULANAN YÖNTEM

Koaksiyel yansımali ölçüm problemleri düşük kayıplı sıvıların dielektrik özelliklerinin karakterizasyonu için uygundur [21, 22]. Bu çalışmanın temel amacı, farklı yağların sıcaklık ve frekansa bağlı dielektrik özelliklerinin ölçülmesidir. Elde edilen sıcaklık ve frekans bağlı modeller kesme yağlarının etkili dielektrik özelliklerinin FEM benzetimlerinde ve EM alanlara maruz kalan yağların davranışlarının sayısal çalışmalarında kullanılacaktır.

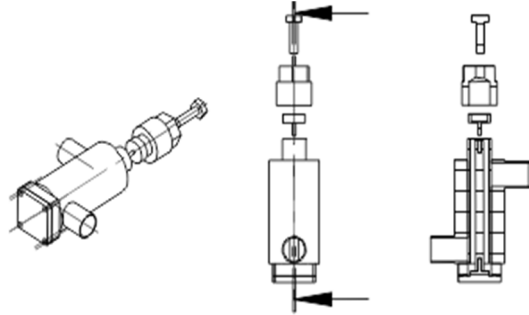
Ölçülen verilerden Cole-Cole parametrelerinin doğrudan çıkarımında Cataldo ve arkadaşlarından

esinlenilmiştir [21]. Cataldo ve ark. [21] ile karşılaştırıldığında, bu projede kullanılan geometri, eşdeğer devre ve ölçüm yöntemindeki ana farklılıklar aşağıdaki gibidir:

1. Burada kullanılan probun kesit boyutları SMA yerine 5/10 koaksiyel standart olarak verilmektedir. Bu durum, yüksek viskoziteli sıvılarla probun doldurulmasını/boşaltılmasını ve ölçüme başlamadan önce sıvının olası hava kabarcıklarının kaldırılmasına olanak sağlar.
2. Probon eşdeğer devresi, iletim hattı modeli ve kısa devre bir eşdeğer modelinden oluşur. Cataldo ve ark. [21]'de olduğu gibi ek devre elemanları probun başında kullanılır.
3. Cataldo ve ark. [21]'de deneysel çalışma kısmı da olduğundan "TDR (Time Domain Reflectometry)" kullanarak yansımaya katsayısı ölçüldü.
4. Ayrıca, farklı referans düzleminde kalibrasyon gerçekleştirildi. İki adaptör ve ölçüm/kalibrasyon referans düzlemi ve prob girişi arasında yer alan bir bağlayıcının etkisi standart çıkarım (de-embedding) prosedürü kullanarak ölçümlerden çıkarıldı.
5. Burada sunulan prob yüksek sıcaklıklardaki ölçümlere olanak sağlar. İç ve dış iletkenin olası bir saf teması, özellikle kısa devre metal düzlem ve dış iletken arasındaki bağlantı noktası boyunca, ölçüm probunda yüksek dereceden kiplerin uyarılmasına yol açabilir.
2. Bu probun 3-boyutlu şekli, iletim hattı modeli ve bir kısa devreden oluşur.
3. Çizimden sonra, frekans aralığı ayarlanmıştır ve benzetimler için frekans alan çözücü kullanılmıştır. S-parametreleri elde edildi.
4. Öte yandan, eşdeğer devre modeli ve S_{11} analitik formülü MATLAB programında uygulanmıştır [25]. Çıkarım (De-embedding) metoduyla S-parametrelerinden etkisi kaldırılan adaptör analitik formülde yer almaz.
5. Saf sıvıların (propanol, etanol ve etil asetat) bilinen Cole-Cole parametreleri matematik modeline yerleştirilmiştir. Yaklaşırma yöntemi kullanılarak R_1 , R_2 ve L_2 değerleri bulundu.
6. Probon ayçiçeği ve zeytinyağı ile dolu olduğu düşünüldü. Ayçiçeği ve zeytinyağının sıcaklığa ve frekansa bağlı Cole-Cole parametreleri elde edildi.

2.1. Ölçüm Probonun Geometrisi

Prob, SMA dan N'e ve N'den 5/10'luk konnektöre bağlı seri iki adaptörden oluşan, koaksiyel bir iletim hattı parçasının test sıvısı ile doldurulmuş olduğu tek portlu bir devredir. Basitleştirilmiş bir teknik çizimi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. SolidWorks programında demonte ölçüm probunun teknik çizimi [29].

2.2. Ölçüm Probonun Eşdeğer Devresi

Seçilen ölçüm probunun eşdeğer devre modelinin S_{11} için analitik formülü iyi bilinen iletim hattı teorisi ve L' , C' , R' , G' gibi koaksiyel kablo parametrelerinin matematiksel ifadeleri kullanılarak türetilmiştir. Z_0 ve γ Pozar 2004 [24]'den bulundu.

Çalışmada, iyi bir temas sağlamak amacıyla kısa devre geometrisi verildi.

Çalışmanın başında, yansımaya katsayısından gelen Cole-Cole parametrelerinin çıkarımının tüm işlemi iyi kanıtlanmış ticari 3-boyutlu tam dalga elektromanyetik CST Mikrodalga Stüdyo benzetimi ile hesaplanan probun yansımaya katsayısını kullanarak doğrulandı [23].

Çalışma şu şekilde düzenlendi:

1. Burada kullanılan probun kesit boyutları SMA yerine 5/10 koaksiyel standart olarak verilmektedir. Bu probun 3-boyutlu şekli CST Mikrodalga Stüdyo benzetim programında buradaki boyutlar kullanılarak çizildi [23].

$$L' = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad (1)$$

$$C' = \frac{2\pi\epsilon'}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (2)$$

$$R' = \frac{R_s}{2\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (3)$$

$$G' = \frac{2\pi\omega\epsilon''}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (4)$$

$$\underline{Z}_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5)$$

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{LC} \quad (6)$$

Eşdeğer devrenin giriş empedansı, ideal olmayan kısa devrenin empedansı ve yansıma katsayısı sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\underline{Z}_{in} = \underline{Z}_0 \frac{\underline{Z}_L + \underline{Z}_0 \tanh(\gamma l)}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_L \tanh(\gamma l)} \quad (7)$$

$$\underline{Z}_L = \frac{R_1 R_2^2 + R_1 \omega^2 L_2^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + \frac{R_2 \omega^2 L_2^2 + j\omega L_2 R_2^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (8)$$

$$\underline{S}_{11} = \frac{Z_{in} - Z'_0}{Z_{in} + Z'_0} \quad (9)$$

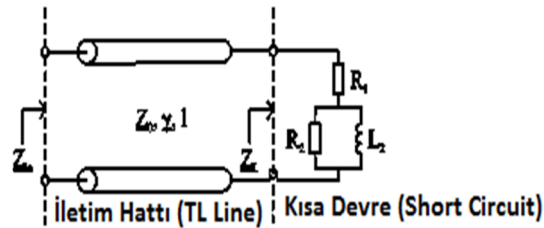
Z'_0 referans empedanstır ve $Z'_0 = 50\Omega$.

The Cole-Cole model (10)'da verilmektedir:

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (i\frac{f}{f_r})^{1-\beta}} - i \frac{\sigma_s}{2\pi f \epsilon_0} \quad (10)$$

ϵ_s , ϵ_∞ , f_r , β ve σ_s sırasıyla statik dielektrik, yüksek frekanslarda dielektrik, rahatlama frekansı, dağılım değişkeni ve statik elektriksel iletkenliktir.

Eşdeğer devre modeli Şekil 2'de gösterilmektedir ve S_{11} 'in analitik formülü MATLAB'da uygulanmıştır [25].



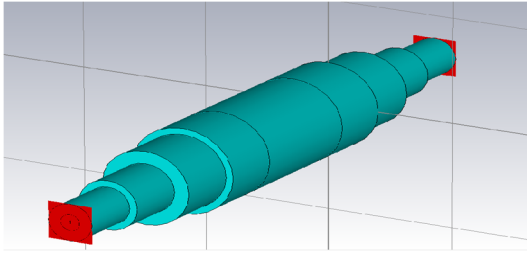
Şekil 2. Ölçüm probunun eşdeğer devre modeli, l , \underline{Z}_0 , $\underline{\gamma}$ sırasıyla fiziksel uzunluğu, kompleks karakteristik empedans ve iletim hattının kompleks propagasyon sabiti

Eşdeğer devre modeli iki kısımdan oluşur. İletim hattı kısmı test altındaki sıvı ile doldurulmuş sıvıyı temsil eder. R_1 , R_2 ve L_2 probun sonundaki ideal olmayan kısa devreyi göstermektedir.

İdeal olmayan kısa devre elemanlarının değerlerinin bulunması iki aşamalı işlemle yapılmıştır. İlk aşamada, benzetim programında sırasıyla üç farklı saf sıvı (2-propanol, etanol ve etil asetat) proba doldurulmuştur. Elde edilen yansıma katsayısı ile matematiksel modelin yakınlştırılması sonucunda, ideal olmayan kısa devrenin R_1 , R_2 ve L_2 eşdeğer devre elemanlarının değerleri bulunmuştur. Bu amaçla, standart sıvıların [27, 28] bilinen Cole-Cole parametreleri matematik modelinin içerisine yerleştirilmiş ve sadece R_1 , R_2 ve L_2 değişken yapılmıştır. Şekil 3'te ölçüm probunun benzetim programındaki çizimi gösterilmiştir.

R_1 , R_2 ve L_2 değerleri bulunduktan sonra, ikinci aşamada, bu değerler sabit tutulup benzetim programı tekrar ayarlanmıştır. Programda sırasıyla üç farklı saf sıvı (2-propanol, etanol ve etil asetat) proba tekrar doldurulmuştur. Üç farklı saf sıvının Cole-Cole parametrelerine ilişkin tablolar literatürde verilmiştir [27, 28]. Bu tablolardan faydalanılarak

elde edilen yansıma katsayısı ile matematiksel modelin yakınlaştırılması sonucunda, ϵ_s , ϵ_∞ , f_r , β ve σ_s Cole-Cole parametrelerinin değerleri ve sıcaklığa bağlı denklemleri bulunmuştur (Çizelge 1). Aynı işlem farklı frekans ve sıcaklıklarda ayçiçeği ve zeytinyağı için yapıldı. Çizelge 2 ve 3'te sonuçlar, farklı yağların, özellikle rahatlama frekansı açısından, farklı dielektrik özellikleri olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Benzetim programında ölçüm probunun çizimi

Çizelge 1. Propanol, etanol ve etil asetat için sıcaklığa bağlı Cole-Cole denklemleri

Sıvı Türü	Sıcaklığa Bağlı Cole-Cole Denklemleri
Propanol	$\epsilon_s(T)=0,0001173*T^2$ $+(-0,1623)*T+23,4241$ $\epsilon_\infty(T)=0,00001351*T^2$ $+(-0,001704)*T+3,4757$ $f_r(T)=(0,0005119*T^2$ $+(-0,004212)*T+0,2271)*10^9$
Etanol	$\epsilon_s(T)=0,0003472*T^2$ $+(-0,1704)*T+28,4417$ $\epsilon_\infty(T)=0,00003589*T^2$ $+(-0,01009)*T+4,6785$ $f_r(T)=(0,0004600*T^2$ $+0,007660*T+0,48853)*10^9$
Etil Asetat	$\epsilon_s(T)=0,000008232*T^2$ $+(-0,021195)*T+6,4627$ $\epsilon_\infty(T)=248+0*T$ $f_r(T)=(0,002306*T^2$ $+0,1841*T+32,5457)*10^9$

Çizelge 1'den de görüldüğü üzere propanol, etanol ve etil asetat için hangi sıcaklıkta dielektrik özelliklerinin nasıl bir değer alacağı hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla dielektrik özellikleri bulunmaktadır. Bu durum bize literatürde var olan ölçüm sonuçları ile karşılaştırma olanağı sunarak yöntemimizin doğru yolda olduğunu göstermektedir.

Çizelge 2. Ayçiçek yağı için sıcaklığa ve frekansa bağlı Cole-Cole parametreleri

T(°C)	ϵ_s	ϵ_∞	$f_r(\text{Hz})$	β
20	3,329	2,284	2,807e8	0,539
40	3,190	2,233	7,075e8	0,541
60	3,158	2,200	1,565e9	0,550
70	2,945	2,329	1,225e9	0,419

Çizelge 3. Zeytinyağı için sıcaklığa ve frekansa bağlı Cole-Cole parametreleri

T(°C)	ϵ_s	ϵ_∞	$f_r(\text{Hz})$	β
20	3,144	2,555	3,561e8	0,529
40	3,081	2,268	6,342e8	0,505
60	2,940	2,275	9,674e8	0,457
70	2,900	2,305	1,118e9	0,436

3. SONUÇ

Uygulanan yöntemde sırasıyla üç farklı saf sıvının (2-propanol, etanol ve etil asetat) Cole-Cole parametreleri elde edilmiştir. Sonuçlar literatürdeki değerler ile karşılaştırıldığında oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu doğrulamadan sonra ayçiçek ve zeytinyağının sıcaklığa ve frekansa bağlı Cole-Cole parametreleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, farklı yağların, özellikle rahatlama frekansı açısından, farklı dielektrik özellikleri olduğunu göstermektedir. Bu dielektrik özelliklerin sıcaklığa ve frekansa bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Rahatlama frekansı yağların kalite kontrolü için dielektrik spektroskopisi uygunluğunu ve performansını test etmek için tutarlı parametredir. Bu nedenle, rahatlama frekansına bakılarak, değişik türdeki yağları belirleyecek, güvenilir, gerçek zamanlı ve yerinde

kalite kontrolü sağlayacak bir sistem dizayn edilebilir.

4. KAYNAKLAR

1. Konak Ü. İ., Certel M., Helhel S., 2009. "Gıda Sanayisinde Mikrodalga Uygulamaları," Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt: 4, No: 3, Sayfa: 12.
2. Metaxas A. C., Meredith R. J., 1983. "Industrial Microwave Heating," London, United Kingdom, Peter Peregrinus Ltd.,
3. Loupy A., 2006. "Microwaves in Organic Synthesis, 2nd, ed.," Weinheim, Germany, Wiley-VCH,
4. Hand J., 1986. "Physical Techniques in Clinical Hypertermie," New York, USA, John Wiley and sons Inc.,
5. Gautherie M., 1990. "Biological Basis of Oncologic Thermotherapy," Berlin, Germany, Springer-Verlag.
6. Vrba J. Et al., 1993. "Evanescent Mode Applicators for Subcutaneous Hyperthermia," IEEE Trans. on BME, vol. 40, no. 5, pp. 397-407, May
7. Wolf N. O., 1986. "Use of Microwave Radiation in Separating Emulsions and Dispersions of Hydrocarbons and Water," U.S. Patent 4,582,629, April 15.
8. Peter M. C. Lai C. S. Fang, 1991. "Temperature profiles of Water-in -Oil Emulsions and Water Separation Induced by Microwave Radiation," AIChE 1991 Spring National Meeting.
9. Imperial Petroleum Recovery Corporation, 2000. "Exxonmobil Finds Multiple Uses for Emulsion-Treatment Technology," Oil&Gas Journal.
10. Folgero K., Friiso T., Hilland J., and Tjomsland T., 1995. "A Broad-Band and High-Sensitivity Dielectric Spectroscopy Measurement System for Quality Determination of Low-Permittivity Fluids," Measure. Sci. Technol., vol. 6, pp. 995-1008.
11. Kaatz U., Feldman Y., 2006. "Broadband Dielectric Spectrometry of Liquids and Biosystems," Measure. Sci. Technol., vol. 17, pp. 17-35.
12. Axelrod, N., Axelrod E., Gutina A., Puzenko A., Ishai P. B., and Feldman Y., 2004. "Dielectric Spectroscopy Data Treatment: I. Frequency domain," Measure. Sci. Technol., vol. 15, pp. 755-764,
13. Hayashi Y., Oshige I., Katsumoto Y., Omori S., Yasuda A., and Asami K., 2008. "Temporal Variation of Dielectric Properties of Preserved Blood," Phys. Med. Biol., vol. 53, pp. 295-304,
14. Hager N. A., III, Domszy R. C., 2004. "Monitoring of Cement Hydration by Broadband Time – Domain - Reflectometry Dielectric Spectroscopy," J. Appl. Phys., vol. 96, pp. 5117-5128.
15. Nelson S. O. and Trabelsi S., 2006. "Dielectric Spectroscopy of Wheat From 10 MHz to 1.8 GHz," Measure. Sci. Technol., vol. 17, pp. 2294-2298.
16. Nelson S. O., Guo W., Trabelsi S., Kays S. J., 2007. "Dielectric Spectroscopy of Watermelons for Quality Sensing," Measure. Sci. Technol., vol. 18, pp. 1887-1892.
17. Nelson S. O., Bartley P. G., 2002. "Measuring Frequency and Temperature Dependent Permittivities of Food Materials," IEEE Trans. Instrument. Measure., vol. 51, pp. 589-592,
18. Miura N., Yagihara S., Mashimo S., 2003. "Microwave Dielectric Properties of Solid and Liquid Foods Investigated by Time-Domain Reflectometry," JFS: Food Engineering and Physical Properties, vol. 68, pp. 1396-1403,
19. Fenske K., Misra D., 2000. "Dielectric Materials at Microwave Frequencies," Appl. Microw. Wireless, vol. 12, pp. 92-100.
20. Venkatesh M. S. and Raghavan G. S. V., 2004. "An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-Food Materials," Biosyst. Eng., vol. 88, pp. 1-18.
21. Cataldo A., PiuZZi E., Cannazza G., and Egidio D. B., 2009. "Dielectric Spectroscopy of Liquids Through a Combined Approach: Evaluation of the Metrological Performance and Feasibility Study on Vegetable Oils," IEEE sensors journal., vol. 9, no. 10, pp. 1226-1233.
22. Nyrfos E., Vainikainen P., 1989. Industrial Microwave Sensors. Norwood, MA: Artech House,

23. CST Microwave Studio 2010-Workflow and Solver Overview. CST AG.
24. Pozar D. M., 2004. Microwave Engineering, 3rd ed. Wiley John + Sons,
25. Matlab 7, 2010. Program and User's Manual. The Mathworks, Inc.,
26. Cole K. S., Cole R. H., 1941. "Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics," The Journal of Chemical Physics, vol. 9, no. 4, p. 341.
27. Gregory A. P., Clarke R. N., 2001. "Tables of Complex Permittivity of Dielectric Reference Liquids at Frequencies Up To 5 GHz," NPL Rep. CETM, no. 33.
28. Buckley F., Maryott A. A., 1958. "Tables of Dielectric Dispersion Data for Pure Liquids and Dilute Solutions." National Bureau of Standards Circular.
29. SolidWorks 2010, Program and User's Manual. Dassault Systemes SolidWorks Corp.

