# EUTLDING A STMULATION MODEL DESCRIBING MICROWAVE ASSISTED DRYING OF FRUIT AND VEGETABLES

# LOREDANA MALAFRONTE



### UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

### Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Alimentare

# Building a simulation model describing microwave assisted drying of fruit and vegetables

### Tesi in Principi di Ingegneria Chimica e Impianti Chimici

Relatori:

Prof. Ing. Gaetano Lamberti

Candidata:

Loredana Malafronte

Prof. Ing. Anna Angela Barba

matricola 0620600032

Prof. Lilia Arhné

Anno Accademico 2010/2011



Part of this thesis work has been developed during the Erasmus project at the Chalmers Technical University, in Gothenburg, Sweden.

It has been performed at the Department of Process and Technology Development of SIK – The Swedish Institute for Food and Biotechnology, under the supervision of Prof. Lilia Arnhé and Lic. Emma Holtz.



Parte del lavoro di tesi è stata sviluppata nell'ambito del progetto Erasmus presso la Chalmers Technical University, in Gothenburg, Svezia.

In particolare, le attività di ricerca sono state svolte presso il Dipartimento di Process and Technology Development dello SIK – The Swedish Institute for Food and Biotechnology, sotto la supervision della Prof.ssa Lilia Arnhé e dell'Ing. Emma Holtz.

Ai miei genitori

Questo testo è stato stampato in proprio, in Times New Roman La data prevista per la discussione della tesi è il 25 marzo 2011 Fisciano, 21 marzo 2011

# Contents

Contents	I
Figures Index	III
Tables Index	VII
Riassunto	IX
Introduction	1
1.1 Preservation by Drying <sup>[1]</sup>	2
1.2 Classification of dryers <sup>[1]</sup>	3
1.2.1 Heating methods	4
1.3 State of the art	8
1.3.1 Convective drying	8
1.3.2 Microwave drying	11
1.3.3 Microwave convective drying	12
1.4 Objective and outline of the thesis	18
1.4.1 Outline	18
Materials, apparatus and methods	19
2.1 Materials	20
2.1.1 Potato	20
2.2 Experimental results	20
2.2.1 Microwave-convective dryer	20
2.2.2 Drying experiments	21

Pag. II	Simulation model for microwave drying	L. Malafronte
2.3 Hardw	are	21
2.4 Softwa	ure	22
2.4.1 CO	MSOL Multiphysics® 3.5a	22
Mathemat	ical model	
3.1 Introdu	action	28
3.2 Transp	oort properties	29
3.3 Heat a	nd Mass Transfer Coefficients	30
3.4 Mass 7	Fransport	32
3.5 Heat T	ransport	34
3.6 Electro	omagnetic field	35
3.6.1 Rel	ative permittivity	36
Results an	d discussions	
4.1 Experi	mental results	40
4.1.1 Mo	isture content	40
4.1.2 Ten	nperature	43
4.2 Valida	tion of electromagnetic field	48
4.3 Valida	tion of mass transfer models	49
4.4 Simula	ated results	50
Conclusion	ns	67
Notation		71
Reference	S	75

# **Figures Index**

Figure 1 The Electromagnetic spectrum
Figure 2 Mechanism of convective drying
Figure 3 Microwave convective drying equipment. Schematic image and dimensions of the dryer (applicator)
Figure 4 Schematization of drying system
Figure 5 Experimental moisture content profile of the whole sample of potato 40
Figure 6 Experimental moisture content profile of heated part of potato sample 41
Figure 7 Comparison of experimental moisture content profiles of the whole and heated part of potato samples normalized with the initial moisture content
Figure 8 Experimental drying rate profile of potato
Figure 9 Drying rate, surface temperature and microwave absorbed power profiles for microwave assisted drying of silica-alumina gel, gelatin, polyacrylamide gel
Figure 10 Experimental temperature data measured in the potato using infrared camera
Figure 11 Experimental temperature profile as function of distance in the potato at 90s
Figure 12 Experimental temperature profile as function of distance in the potato at 180s
Figure 13 Experimental temperature profile as function of distance in the potato at 270s
Figure 14 Experimental temperature profile as function of distance in the potato at 360s
Figure 15 Experimental temperature profile as function of distance in the potato at 450s
Figure 16 Comparison of simulated
Figure 17 Comparison of experimental data and fitting curves of temperature 49

Figure 18 Comparison of simulated moisture content profiles and experimental data for different values of $k_c$ parameters (1, 10, 50)
Figure 19 Comparison of experimental data and simulated moisture content profile in the whole sample for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content
Figure 20 Comparison of experimental data and simulated moisture content profile in the heated sample for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content
Figure 21 Comparison of experimental data and simulated temperature profile at 90 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content
Figure 22 Comparison of experimental data and simulated temperature profile at 180 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content
Figure 23 Comparison of experimental data and simulated temperature profile at 270 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content
Figure 24 Comparison of experimental data and simulated temperature profile at 360 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content
Figure 25 Comparison of experimental data and simulated temperature profile at 450 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content
Figure 26 Simulated moisture content profile as function of distance and time parametric for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content
Figure 27 Simulated resistive heating as function of distance and time parametric for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content
Figure 28 Comparison of experimental data and simulated moisture content profile in the whole sample for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content and temperature
Figure 29 Comparison of experimental data and simulated moisture content profile in the heated sample for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content and temperature
Figure 30 Comparison of experimental data and simulated temperature profile at 90 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content and temperature
Figure 31 Comparison of infrared map and simulated temperature surface plot at 90 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content and temperature

Figure 32 Comparison of experimental data and simulated temperature profile at 180 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content and temperature
Figure 33 Comparison of infrared map and simulated temperature surface plot at 180 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content and temperature
Figure 34 Comparison of experimental data and simulated temperature profile at 270 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content and temperature
Figure 35 Comparison of infrared map and simulated temperature surface plot at 270 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content and temperature
Figure 36 Comparison of experimental data and simulated temperature profile at 360 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content and temperature
Figure 37 Comparison of infrared map and simulated temperature surface plot at 360 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content and temperature
Figure 38 Comparison of experimental data and simulated temperature profile at 450 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content and temperature
Figure 39 Comparison of infrared map and simulated temperature surface plot at 450 s for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content and temperature
Figure 40 Simulated moisture content profile as function of distance and time parametric for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content and temperature
Figure 41 Simulated resistive heating as function of distance and time parametric for the model that uses dielectric permittivity depending on moisture content and temperature

# **Tables Index**

Table 1 Classification of dryers	
Table 2 COMSOL Multiphysics solvers	23
Table 3 Classification of linear system solvers	24
Table 4 Transport properties of potato	29
Table 5 Operating conditions for convective heating	30
Table 6 Properties of air at operating conditions	31

## Riassunto

L'essiccamento è uno dei più antichi metodi di conservazione degli alimenti. Il processo di essiccamento consiste nel trasporto simultaneo di calore e materia: l'alimento è riscaldato per permettere l'evaporazione dell'umidità. La rimozione del contenuto di umidità è fondamentale per ridurre o rallentare lo sviluppo di specie microbiche, causa di alterazioni sia del profilo nutrizionale che di quello sanitario dell'alimento. L'essiccamento, inoltre, minimizza le reazioni di degradazione mediate dall'acqua. Diversi sono i metodi che possono essere applicati per condurre il processo di essiccamento. L'essiccamento assistito dalle microonde è un particolare processo che combina il riscaldamento indotto da onde elettromagnetiche di frequenza definita e quello convettivo per migliorare l'efficienza dei fenomeni di trasporto. Combinando i due metodi è possibile usufruire dei vantaggi di entrambi. In particolare è possibile utilizzare i vantaggi del riscaldamento a microonde che avviene in assenza di mezzi fluidi o superfici conduttive riscaldanti e che, in genere, ha cinetiche di riscaldamento veloci.

Il lavoro di tesi è incentrato sulla costruzione di un modello fisicomatematico per la descrizione dell'essiccamento assistito dalle microonde di un alimento modello (patata), condotto in una guida d'onda a sezione rettangolare, utilizzando il software COMSOL Multiphysics 3.5a.

I dati sperimentali usati per la validazione del modello provengono da Holtz E., Ahrné L., Rittenauer M. and Rasmuson A., *The influence of material properties on drying behaviour and energy efficiency during microwave convective drying of foods and other porous materials*, Journal of Food Engineering, 2010, VOL 97; NUMBER 2, pages 144-153. Pag. X

Il modello fisico-matematico proposto è costituito da un bilancio di energia, due bilanci di materia per l'acqua in fase liquida e in fase vapore, e dalle equazioni di Maxwell per la valutazione del campo elettromagnetico propagantesi nella guida d'onda dove è posto l'alimento da essiccare. Il modello è, in particolare, un modello *multi-fisico* perché tutti i bilanci sono accoppiati e le proprietà fisiche dell'alimento sono funzioni dell'evoluzione delle grandezze fisiche di interesse: temperatura e contenuto di umidità.

Inizialmente è stata effettuata la validazione del campo elettromagnetico e dei modelli di trasporto di materia. Le equazioni di fitting dei profili di temperatura sperimentali sono stati implementate, mentre le equazioni di bilancio di materia sono state risolte allo scopo di ottimizzare il parametro utilizzato nel termine descrittivo della portata di acqua evaporata.

Successivamente si è proceduto alla simulazione completa del modello, risolvendo simultaneamente i bilanci di materia e di energia nonché le equazioni di Maxwell, ottenendo i profili simulati per la temperatura e per il contenuto di umidità. Nel riscaldamento assistito dalle microonde fondamentale è il ruolo giocato dalle proprietà dielettriche (permettività dielettrica) che esprime quanto la radiazione elettromagnetica interagisce con la materia. I profili simulati sono stati ottenuti utilizzando due diverse correlazioni sperimentali della permettività dielettrica derivanti da studi di letteratura. Con la prima correlazione, specifica per la matrice studiata, la patata, si è tenuto conto della dipendenza delle proprietà dielettriche dal contenuto di umidità. Con la seconda si è considerata anche la dipendenza dalla temperatura, facendo riferimento ad una correlazione sviluppata per matrici vegetali in generale.

In entrambi i casi i profili di umidità simulati approssimano in maniera sufficiente quelli sperimentali. I profili di temperatura simulati invece non sono approssimati perfettamente.

Quando si considerano le proprietà dielettriche funzione solo del contenuto di umidità, le temperature simulate assumono valori più elevati rispetto a quelli rilevati sperimentalmente poiché si sovrastimano le proprietà dissipative della matrice irradiata.

Quando, invece, le proprietà dielettriche, più correttamente, sono legate anche alla variazione della temperatura, le temperature simulate assumono valori più prossimi ai dati sperimentali. E' stato riscontrato che la variazione delle proprietà dielettriche dipende più fortemente dalla temperatura e meno dal contenuto di umidità.

I risultati del lavoro svolto possono essere così sintetizzati:.

- l'andamento dei profili termici e di contenuto di umidità simulati è in accordo con i dati sperimentali disponibili, confermando la corretta descrizione dei fenomeni fisici che si verificano nella realtà.
- l'analisi di sensitività fatta, in particolare, per le proprietà dielettriche ha messo in evidenza la robustezza del modello sviluppato.

Quest'ultimo risultato suggerisce che lo sviluppo di correlazioni sperimentali più accurate delle proprietà dielettriche della patata, che tengano conto della dipendenza dalla temperatura e del contenuto di umidità, possa migliorare le proprietà predittive del modello. Infine, la possibilità di disporre di uno strumento modellistico affidabile permetterebbe di approntare protocolli di trattamenti di essiccamento ottimizzati e di costo ridotto.

# Notation

Symbol	Description	Unit
Latin alphabet		
Α	ash content	%
С	Speed of light	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$
C <sub>ext</sub>	Water concentration in air	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Cv	Vapor water concentration in the potato	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$
<i>Cl</i>	Liquid water concentration in the potato	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
C <sub>sat</sub>	Water concentration of saturation	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$C_p$	Specific heat of potato	J K kg
C <sub>pair</sub>	Specific heat of air	J K kg
$D_l$	Diffusivity of water in the potato	$\frac{m^2}{s}$
$D_{v}$	Diffusivity of water in the air	$\frac{m^2}{s}$

Pag. 72	Simulation model for microwave drying	L. Malafronte
Symbol	Description	Unit
Dp	Penetration depth	m
Ε	Amplitude of the electric field	$\frac{V}{m}$
f	Frequency	Hz
h	Convective heat transfer coefficient	$\frac{W}{m^2K}$
k	Thermal conductivity of potato	$\frac{W}{mK}$
$k_0$	Free-space wave number	-
k <sub>air</sub>	Thermal conductivity of air	W mK
k <sub>m</sub>	Mass transfer coefficient in the air	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$
k <sub>c</sub>	Mass transfer coefficient in the potato	$\frac{kg}{m^2s}$
L	Length of the tube	m
М	Molecular weight of water	$\frac{g}{mol}$
No	Evaporation rate of water on the surface	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^2\mathrm{s}}$
Nu	Dimensionless number of Nusselt	-
P <sub>IN</sub>	Power level	W
$P_c$	Critical pressure	Pa
$P_{v}$	Vapour pressure of air	Pa
Pr	Dimensionless number of Prandtl	-
Re	Dimensionless number of Reynolds	-

#### Notation.

Symbol	Description	Unit
$R_h$	Hydraulic radius	m
R	Evaporation rate of water in the sample	$\frac{kg}{m^2s}$
S	Cross section	m
Sc	Dimensionless number of Schmit	-
Sh	Dimensionless number of Sherwood	-
Т	Temperature of potato	K
T <sub>air</sub>	Temperature of air	K
$T_c$	Critical temperature	K
t	Time	s
U <sub>%_air</sub>	Relative humidity of air	%
U <sub>potato</sub>	Humidity of potato	$\frac{kg_{water}}{kg_{dried matter}}$
Vair	Velocity of air	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$
Ζ	Wetted perimeter	m
Greek alphabet		
ε <sub>0</sub>	Permittivity of free space	$\frac{F}{m}$
٤"	Imaginary part of the complex permittivity of potato	-
٤'	Real part of the complex permittivity of potato	-
ε <sub>r</sub>	Relative permittivity	-
λ	Latent heat	$\frac{J}{kg}$

Symbol	Description	Unit
$\lambda_{air}$	Wave length in the air	m
$\lambda_{c}$	Critical wave length	m
$\lambda_{potato}$	Wave length in the potato	m
$\mu_{air}$	Viscosity of air	kg ms
ρ	Density of potato	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Pair	Density of air	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
σ	Conductivity	$\frac{S}{m}$
ω	Angular frequency	$\frac{1}{s}$

## References

- 1. Mujumdar A.S., *Handbook of industrial drying*, 3th edition, CRC Press (2006)
- Migliori M., Gabriele D., de Cindio B., Pollini C. M., Modelling of high quality pasta drying: mathematical model and validation, Journal of Food Engineering 69 (2005) 387-397
- Chemkhi S., Zagrouba F. and Bellagi A., *Modelling and Simulation of drying phenomena with rheological behaviour*, Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 22, No 02, pp. 153-163, April June, (2005)
- Yang H., Sakai N. and Watanable M., Drying model with nonisotropic shrinkage deformation undergoing simultaneous heat and mass transfer, Drying technology, 19(7), 1441-1460, (2001)
- Karim M. A. and Hawlader M.N.A., Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation, Journal of Food Engineering, 70, 35-45, (2005)
- 6. Law C. L. et al., *A new variable diffusion drying model for the second falling rate period of paddy dried in a rapid bin dryer*, Drying technology, Vol. 21 No. 9, pp 1699-1718, (2003)
- Costant T., Moyne C. and Perré P., Drying with Internal Heat Generation: Theoretical aspects and Application to Microwave Heating, AIChE Journal, Vol. 42 No. 2 (1996)

- 8. James W. and van der Wekken B., *Modelling dielectrically* assisted drying, Journal of Microwave power and Electromagnetic Energy, Vol. 26 no 4, (1991)
- Chen P. and Pei D.C.T., A mathematical model for drying processes, Int. J. Heat Mass Transfer, 32(2) pp.297-310, (1989)
- Perré P. and Tuner I. W., *Microwave Drying Softwood in an* Oversized Waveguide: Theory and Experiment, AIChE Journal, Vol.43 No.10, 2579-2595 (1997)
- 11. Turner I. and Jolly P., *The effect of dielectric properties on microwave drying kinetics*, Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, Vol. 25 No.4, 212-223 (1990)
- 12. Ranjan R., Irudayaraj J. and Mahaffy J., *Modelling* simultaneous heat and mass transfer using the control-volume method, Numerical Heat Transfer, Part B, 41:463-476, (2002)
- Kowalski S. J., Musielak G. and Banaszak J., *Heat and Mass Transfer During Microwave-Convective Drying*, AIChE Journal, Vol. 56 No.1, (2010)
- Soysa Y., Öztekin S., Eren Ö., Microwave Drying of Parsley: Modelling, Kinetics, and Energy Aspects, Biosystems Engineering, 93 (4), 403-413, (2006)
- 15. McMinn W.A.M., Khraisheh M.A.M. and Magee T.R.A., Modelling the mass transfer during convective, microwave and combined microwave-convective drying of solid slabs and cylinders, Food Research International, 36, 977-983, (2003)
- 16. Raskesh V. and Datta A.K., Coupled Electromagnatics-Multiphase Porous Media Model for Microwave Combination Heating, Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference Boston (2008)

- 17. Renshaw R., *Multiphysics Modelling of Food Dehydration during RF Exposure*, Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference Milan (2009)
- 18. Holtz E., Ahrné L., Rittenauer M. and Rasmuson A., The influence of material properties on drying behaviour and energy efficiency during microwave convective drying of foods and other porous materials, Journal of Food Engineering, vol 97; number 2, pages 144-153, (2010)
- Holtz E., Ahrné L., Karlsson T. H., Rittenauer M., Rasmuson A., *The role of processing parameters on energy efficiency during microwave convective drying of porous materials*, Drying Technology, 27:2, 173-185, (2009)
- 20. Wang N. and Brennan J.G., The Influence of Moisture content and temperature on the Specific Heat of Potato Measured by Differential Scanning Calorimetry, Journal of Food Engineering, Vol 19, pp 303-310 (1993)
- Wang N and Brennan J.G., *Thermal Conductivity of Potato as* a Function of Moisture Content, Journal of Food Engineering, Vol. 17, pp. 153-160, (1992)
- 22. Jia L.W. at al., A Simulation Study on Convection and Microwave Drying of Different Food Products, Drying Technology, Vol. 21, No 8, pp 1549-1574, (2003)
- 23. Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill (1998)
- 24. J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott, Introduction to Chemical Engineering Thermodinamics, 6<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill (2000)
- 25. O. Sipahioglu and S. A. Barringer, *Dielectric Properties of Vegetables and Fruits as a Function of Temperature, Ash, and*

*Moisture Content*, Journal of food science, 68(1), 234-239 (2003)

- 26. J. R. Welty, C. E. Wicks, R. E. Wilson and G. Rorrer, *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc. (2000)
- 27. Roques M.A. and Zagrouba F., *The four phases of micro-wave and convective combined drying*, Drying '92 edited by A.S. Mujumdar, Elsevier Science Publisher B.V., (1992)
- 28. T. V. Chow Ting Chan and H. C. Reader, *Understanding microwave heating cavities*, Artech House, Inc (2000)

This thesis work would not have been possible without the essential and gracious support of many individuals. Many thanks to Lilia Arhné, Emma Holtz and Birgitta Raaholt and the whole SIK for having given me the possibility to work with them, it was a honor for me.

Ringrazio sentitamente i miei relatori italiani per aver permesso la realizzazione di questo lavoro di tesi. Ringrazio la Prof.ssa Anna Angela per la sua grande disponibilità e cortesia e per tutto l'aiuto fornito durante la stesura. Ringrazio di cuore il Prof. Gaetano Lamberti per avermi seguita e consigliata durante la mia carriera Universitaria, essendo stato un punto di riferimento, per questo le sarò per sempre grata.

Ringrazio i miei genitori per aver sempre assecondato le mie scelte, che in questi ultimi due anni sono state veramente significative, permettendomi, quindi, di raggiungere con serenità uno dei miei più importanti traguardi. Ringrazio le mie sorelle Luisa e Ludovica perché mi sono sempre vicine e lo saranno sempre, sono fiera di avervi al mio fianco. Ringrazio i miei nonni e tutta la mia famiglia per credere sempre in me.

Ringrazio la mia Rox, non avrei potuto trovare una compagna di studi e di vita migliore di te, grazie per esserci sempre stata. Spero con tutto il cuore di non perderti mai. Ringrazio Pietro per aver reso ogni giorno universitario divertentissimo, è grazie a te che abbiamo superato tutti i momenti di tensione e nervosismo sempre con il sorriso. Ringrazio Antonio, Elena e tutti i miei amici della vecchia Prima...Vera Asi e della nuova StudentIngegneria, in particolare tutti i Nerd perché grazie a voi ho "vissuto Unisa" sempre con immenso piacere.

Ringrazio la mia amichetta Azzurra perché "caspita...ci sei sempre", ti voglio un bene infinito.

Many thanks to Vicky for your infinite patience, I never met someone special like you.

Ringrazio Giuseppe per avermi sempre ascoltata e sopportata soprattutto in questo ultimo mese, buon per te che ci siamo conosciuti da poco!

*Ringrazio Dario per la magnifica copertina ma soprattutto per aver rallegrato tutti i miei pranzi e i "post".* 

Ringrazio, infine, le persone che mi sono sempre state vicino e che adesso sono un po' più lontane e tutte quelle persone che sono al mio fianco da meno tempo.

Loredana