ABSTRACT

Food plays an important role in human life and it is very much essential for the survival of mankind. Due to this reason, preservation of food is necessary to meet the demand of the current world population. Preservation is also important to store the seasonal fruits and vegetables and make it available throughout the year in different parts of the world. For preservation of any food material, the knowledge of its drying and shrinkage characteristics are essential. Convective drying is one of the most popular and widely used preservation method in various food industries for drying of different food materials. Convective drying of food is a very complex phenomenon which involves three main time dependent processes which occurs simultaneously during the drying process. These processes are heat transfer, mass transfer and shrinkage of the food, along with several other rate processes. These rate processes involve changes in odour, color, texture, shape, size, crystallization, glass transition etc. which may cause changes in the mechanism of shrinkage and heat and mass transfer. In the first process, heat is transferred from the surrounding air to the surface of the food material, which occurs by convection and/or radiation, and from the surface to the interior through conduction. In the second process, moisture from the core of the food is first transferred to the surface of the solid by diffusion and then from the surface to the surrounding air through evaporation. Along with the transient heat and moisture transfer, the shrinkage and resultant deformation of the food material is the third important phenomenon which occurs when the water is evaporated from the food material, an unbalance pressure is created inside of food and the surrounding air. Due to this unbalance pressure gradient, a contracting stress is developed inside the food which results the shrinkage in volume. Drying of food materials help to enhance shelf life, maintain nutritional value, retain original flavor, enhance appearance, lower packing cost, and reduce shipping cost.

In this work, an innovative convective dryer is designed and developed to study drying and shrinkage characteristics of food materials at different drying conditions. The setup has several advance features such as continuous weight measurement and continuous capturing of images of the food sample used for the determination of drying and shrinkage characteristics. The dryer is capable of working in both equilibrium controlled regime (ECR) and kinetically controlled regime (KCR). The design of the setup is similar to a wind tunnel with an additional feature to produce uniform inlet air velocity and temperature inside the test section, which is undisturbed by external factors. The experiments are performed at three different inlet air velocities of 2, 4

and 6 m/s and air temperature of 313, 323 and 333 K. Cylindrical shaped elephant foot yam (EFY) having 4 cm diameter and 1 cm thickness is used as the food sample in the present work. A higher thickness of 1 cm is used to minimize the distortion of the sample during the drying process. It is observed from the preliminary experiments that for thin samples, bending is more prominent as drying proceeds and with the distorted shaped samples, quantifying the shrinkage is difficult. The uncertainty in air velocity and temperature are determined inside the test section where the food sample is to be hanged. The repeatability of the experiments is done to show the accuracy of the setup. The experimental results are validated with the results available in literature.

The drying characteristics of food material includes transient variation of moisture content, variation of drying rate with moisture content, and effective moisture diffusivity (EMD). The transient moisture content is determined by the change in weight of the sample measured by hanging type weighing balance. The drying rate is determined by the rate of change of moisture content. The EMD of cylindrical food sample is determined by the experimental data and analytical solution of diffusion equation. The shrinkage characteristics of food include change in bulk volume and bulk density of sample during convective drying. An image processing code is developed in MATLAB for processing and analysing the top and side view images which are captured during the convective drying process. With the top view images, the change in diameter is determined and the thickness of sample is determined from the side view images. Once the diameter and thickness are known, the volume of the sample is determined. The density of sample is calculated from the measurements of weight and volume.

Convective drying of food is a highly energy-intensive and slow process and it takes long time, to complete the drying process depending upon the drying conditions. Based on the energy consumption data available, the countries like USA, France and UK consume 10 to 15% of total national industrial energy in drying process and in case of Denmark and Germany, it is 20 to 25%. So, a detailed performance analysis of the convective dryer is very much essential to meet the energy demand. The performance of the dryer is systematically determined in both the regime namely equilibrium controlled regime (ECR) and kinetically controlled regime (KCR). The convective dryer operated with single EFY sample under the KCR is important to understand the physics behind the complex drying phenomenon and is helpful to compare different food materials in different drying conditions. However, running the convective dryer with single EFY sample does not utilise the full capacity of drying air and is not practised in

any food industry. In most of the drying industries, the drying operation is performed under ECR where multiple food samples are placed in the dryer so that the outlet air is nearly saturated.

In this work, thermophysical properties namely thermal conductivity, specific heat, density and thermal diffusivity of EFY material are determined using temperature dependent composition-based models and proximate analysis. These properties are essential in many areas of food processing, e.g. (a) estimating the processing time for various operations like freezing, melting, cooling and heating or drying, (b) selecting packaging materials to minimise the heat and moisture transfer and finally increasing the shelf life of food.

Two different experimental setups are developed to determine the sorption isotherm of EFY. In the first setup, sorption isotherm is determined using the most popular gravimetric method which uses different saturated salt solutions. The second method is the fast sorption method which uses AquaLab 4TE instruments which is based upon the chilled mirror dew point temperature. The sorption isotherm of food material is important to control most of the biochemical and microbiological reaction in food to predict its stability and shelf life. The rate and amount of moisture transfer from the food material during drying process and from packaging material or edible coating during storage can be determined using sorption isotherm.

In the last part of the thesis, numerical model of the convective drying is discussed to gain more physical insight in the complex drying process. Numerical modelling of convective drying of food is a difficult task because of the various complex phenomena that occurs simultaneously in the process. The complexity is further aggravated because food itself is a complex porous moist material which consists of multi-phase and multi-component matrix. In the present work, a 3-D conjugate numerical model is developed in COMSOL Multiphysics commercial software to solve simultaneous heat and mass transport in the air and the porous food domain. Full continuity is assumed for vapour mass and temperature through the interface surfaces of porous food material domain and drying air domain to solve for vapour concentrations and temperature seamlessly across the interface. The model is capable to predict the temperature and moisture distribution inside any food material.

Keywords: Convective drying; Drying and Shrinkage characteristics; Elephant Foot Yam; Energy consumption; Drying and Thermal efficiency; Sorption isotherm; Gravimetric method;

Fast sorption method; Thermo-physical properties; Proximate analysis; Numerical modelling; Heat and Mass transfer.

सार

मानव जीवन में भोजन महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है और यह मानव जाति के अस्तित्व के लिए बहुत जरूरी है। इस कारण से, वर्तमान विश्व आबादी की मांग को पूरा करने के लिए भोजन का संरक्षण आवश्यक है। मौसमी फलों और सब्जियों को स्टोर करने और इसे दुनिया के विभिन्न हिस्सों में साल भर उपलब्ध कराने के लिए भी संरक्षण महत्वपूर्ण है । किसी भी खाद्य सामग्री के संरक्षण के लिए इसके सूखने और सिकुड़न विशेषताओं का ज्ञान जरूरी है। संवहनी सुखाने (convective drying) विभिन्न खाद्य सामग्री के सुखाने के लिए विभिन्न खाद्य उद्योगों में सबसे लोकप्रिय और व्यापक रूप से इस्तेमाल किया संरक्षण विधि में से एक है। भोजन का संवहनी सुखाने एक बहुत ही जटिल घटना है जिसमें तीन मुख्य समय निर्भर प्रक्रियाएं शामिल हैं जो सुखाने की प्रक्रिया के दौरान एक साथ होती हैं। ये प्रक्रियाएं कई अन्य दर प्रक्रियाओं के साथ-साथ गर्मी हस्तांतरण, बड़े पैमाने पर हस्तांतरण और भोजन का सिकुड़न हैं। इन दर प्रक्रियाओं में गंध, रंग, बनावट, आकार, आकार, क्रिस्टलीकरण, ग्लास संक्रमण आदि में परिवर्तन शामिल हैं जो सिकुड़न और गर्मी और बड़े पैमाने पर हस्तांतरण के तंत्र में परिवर्तन का कारण बन सकते हैं। पहली प्रक्रिया में, गर्मी को आसपास की हवा से खाद्य सामग्री की सतह में स्थानांतरित कर दिया जाता है, जो संवहन और/या विकिरण द्वारा होता है, और सतह से चालन के माध्यम से इंटीरियर में । दूसरी प्रक्रिया में, भोजन के मूल से नमी को पहले प्रसार द्वारा ठोस की सतह पर स्थानांतरित किया जाता है और फिर वाष्पीकरण के माध्यम से सतह से आसपास की हवा में स्थानांतरित किया जाता है। क्षणिक गर्मी और नमी हस्तांतरण के साथ-साथ खाद्य सामग्री का सिकुड़न और परिणामी विरूपण तीसरी महत्वपूर्ण घटना है जो तब होती है जब पानी खाद्य सामग्री से सुखाया जाता है, भोजन और आसपास की हवा के अंदर एक असंतुलित दबाव बनाया जाता है। इस असंतुलित दबाव ढाल के कारण, भोजन के अंदर एक अनुबंध तनाव विकसित किया जाता है जिसके परिणामस्वरूप मात्रा में सिकुड़न होती है। खाद्य सामग्री के सूखने से शेल्फ जीवन को बढ़ाने, पोषण मूल्य बनाए रखने, मूल स्वाद बनाए रखने, उपस्थिति बढ़ाने, कम पैकिंग लागत और शिपिंग लागत को कम करने में मदद मिलती है।

इस काम में, एक अभिनव संवहनी ड्रायर को विभिन्न सुखाने की स्थितियों में खाद्य सामग्रियों की सुखाने और सिकुड़न विशेषताओं का अध्ययन करने के लिए डिज़ाइन और विकसित किया गया है। सेटअप में कई अग्रिम विशेषताएं हैं जैसे निरंतर वजन माप और सुखाने और सिकुड़न विशेषताओं के निर्धारण के लिए उपयोग किए जाने वाले खाद्य नमूने की छवियों को निरंतर कैप्चर करना। ड्रायर संतुलन नियंत्रित शासन (ईसीआर) और गतिजिक रूप से नियंत्रित शासन (केसीआर) दोनों में काम करने में

सक्षम है । सेटअप का डिजाइन परीक्षण अनुभाग के अंदर एक समान इनलेट हवा वेग और तापमान का उत्पादन करने के लिए एक अतिरिक्त सुविधा के साथ एक पवन सुरंग के समान है, जो बाहरी कारकों से परेशान नहीं है। प्रयोग 2, 4 और 6 m/s के तीन अलग-अलग इनलेट हवा वेग और 313, 323 और 333 K हवा के तापमान पर किया जाता है बेलनाकार आकार के हाथी पैर यम (EFY) जिसमें 4 सेमी व्यास और 1 सेमी मोटाई वर्तमान काम में भोजन के रूप में प्रयोग किया जाता है। सुखाने की प्रक्रिया के दौरान नमूने की विकृति को कम करने के लिए 1 सेमी की उच्च मोटाई का उपयोग किया जाता है। प्रारंभिक प्रयोगों से यह देखा जाता है कि पतले नमूनों के लिए, झुकने की आय सूखने के रूप में अधिक प्रमुख है और विकृत आकार के नमूनों के साथ, सिकुड़न की मात्रा बताना मुश्किल है। हवा के वेग और तापमान में अनिश्चितता परीक्षण अनुभाग के अंदर निर्धारित की जाती है जहां भोजन के नमूने को लटकाया जाना है। सेटअप की सटीकता दिखाने के लिए प्रयोगों की पुनरावृत्ति की जाती है। प्रायोगिक परिणामों को साहित्य में उपलब्ध परिणामों के साथ मान्य किया जाता है।

खाद्य सामग्री की सुखाने की विशेषताओं में नमी की मात्रा में क्षणिक भिन्नता, नमी की मात्रा के साथ सुखाने की दर में भिन्नता और प्रभावी नमी डिफ्फुसिविटी (ईएमडी) शामिल हैं। क्षणिक नमी की मात्रा प्रकार वजन संतुलन लटकाकर द्वारा मापा नमूना के वजन में परिवर्तन से निर्धारित होता है। सुखाने की दर नमी की मात्रा के परिवर्तन की दर से निर्धारित होती है। बेलनाकार खाद्य नमूने का ईएमडी प्रयोगात्मक डेटा और प्रसार समीकरण के विश्लेषणात्मक समाधान द्वारा निर्धारित किया जाता है। भोजन की सिकुड़न विशेषताओं में संवहनी सुखाने के दौरान थोक मात्रा और नमूने के थोक घनत्व में परिवर्तन शामिल है। मटलैब में शीर्ष और साइड व्यू छवियों के प्रसंस्करण और विश्लेषण के लिए एक छवि प्रसंस्करण कोड विकसित किया गया है जो संवहनी सुखाने की प्रक्रिया के दौरान कैप्चर किए जाते हैं। शीर्ष दृश्य छवियों के साथ, व्यास में परिवर्तन निर्धारित किया जाता है और नमूना की मोटाई पक्ष दृश्य छवियों से निर्धारित किया जाता है। एक बार व्यास और मोटाई ज्ञात हो जाने के बाद, नमूने की मात्रा निर्धारित की जाती है। नमूने के घनत्व की गणना वजन और मात्रा के माप से की जाती है।

भोजन का संवहनी सुखाने एक अत्यधिक ऊर्जा-गहन और धीमी प्रक्रिया है और सुखाने की स्थिति के आधार पर सुखाने की प्रक्रिया को पूरा करने में लंबा समय लगता है। उपलब्ध ऊर्जा खपत के आंकड़ों के आधार पर अमेरिका, फ्रांस और ब्रिटेन जैसे देश सुखाने की प्रक्रिया में कुल राष्ट्रीय औद्योगिक ऊर्जा का 10 से 15% खपत करते हैं और डेनमार्क और जर्मनी के मामले में यह 20 से 25% है । इसलिए, ऊर्जा की मांग को पूरा करने के लिए संवहनी ड्रायर का विस्तृत प्रदर्शन विश्लेषण बहुत आवश्यक है। ड्रायर का प्रदर्शन व्यवस्थित रूप से दोनों शासन अर्थात् संतुलन नियंत्रित शासन (ईसीआर) और गतिजिक रूप से

नियंत्रित शासन (केसीआर) में निर्धारित किया जाता है । केसीआर के तहत एकल EFY नमूने के साथ संचालित संवहनी ड्रायर जटिल सुखाने की घटना के पीछे भौतिकी को समझने के लिए महत्वपूर्ण है और विभिन्न सुखाने की स्थिति में विभिन्न खाद्य सामग्रियों की तुलना करने के लिए उपयोगी है। हालांकि, एकल EFY नमूने के साथ संवहनी ड्रायर चलाने से हवा सुखाने की पूरी क्षमता का उपयोग नहीं होता है और यह किसी भी खाद्य उद्योग में प्रचलित नहीं है। अधिकांश सुखाने वाले उद्योगों में, सुखाने का संचालन ईसीआर के तहत किया जाता है जहां ड्रायर में कई खाद्य नमूने रखे जाते हैं ताकि आउटलेट की हवा लगभग संतृप्त हो।

इस काम में, थर्मोफिजिकल गुणों जैसे थर्मल चालकता, विशिष्ट गर्मी, घनत्व और ईएफवाई सामग्री की थर्मल डिफ्यूजनता तापमान निर्भर संरचना-आधारित मॉडल और समीपस्थ विश्लेषण का उपयोग करके निर्धारित की जाती है। ये गुण खाद्य प्रसंस्करण के कई क्षेत्रों में आवश्यक हैं, उदाहरण के लिए (क) ठंड, पिघलने, ठंडा करने और हीटिंग या सुखाने जैसे विभिन्न कार्यों के लिए प्रसंस्करण समय का आकलन करते हैं, (ख) गर्मी और नमी हस्तांतरण को कम करने और अंत में भोजन के शेल्फ जीवन को बढ़ाने के लिए पैकेजिंग सामग्री का चयन करते हैं।

ईएफवाई के सॉर्प्शन आइसोथर्म को निर्धारित करने के लिए दो अलग-अलग प्रयोगात्मक सेटअप विकसित किए जाते हैं। पहले सेटअप में, सॉर्प्शन आइसोथर्म सबसे लोकप्रिय ग्रेविमेट्रिक विधि का उपयोग करके निर्धारित किया जाता है जो विभिन्न संतृप्त नमक समाधानों का उपयोग करता है। दूसरी विधि तेजी से सॉर्प्शन विधि है जो एक्वालैब 4TE उपकरणों का उपयोग करती है जो ठंडा दर्पण ओस पॉइंट तापमान पर आधारित है। खाद्य सामग्री का सॉर्प्शन इस्ऑपरम भोजन में अधिकांश जैव रासायनिक और माइक्रोबायोलॉजिकल प्रतिक्रिया को नियंत्रित करने के लिए महत्वपूर्ण है ताकि इसकी स्थिरता और शेल्फ जीवन की भविष्यवाणी की जा सके। सुखाने की प्रक्रिया के दौरान और भंडारण के दौरान पैकेजिंग सामग्री या खाद्य कोटिंग से खाद्य सामग्री से नमी हस्तांतरण की दर और मात्रा को सोरशन आइसोथर्म का उपयोग करके निर्धारित किया जा सकता है।

थीसिस के पिछले हिस्से में, जटिल सुखाने की प्रक्रिया में अधिक भौतिक अंतर्दृष्टि प्राप्त करने के लिए संवहनी सुखाने के संख्यात्मक मॉडल पर चर्चा की जाती है। भोजन के संवहनी सुखाने की संख्यात्मक मॉडलिंग एक कठिन कार्य है क्योंकि इस प्रक्रिया में एक साथ होने वाली विभिन्न जटिल घटनाएं होती हैं। जटिलता और बढ़ जाती है क्योंकि भोजन अपने आप में एक जटिल असुरक्षित नम सामग्री है जिसमें बहु-चरण और बहु-घटक मैट्रिक्स होते हैं। वर्तमान कार्य में, हवा में एक साथ गर्मी और बड़े पैमाने पर परिवहन

और छिद्रपूर्ण खाद्य डोमेन को हल करने के लिए COMSOL मल्टीफिजिक्स वाणिज्यिक सॉफ्टवेयर में 3-डी संयोजित संख्यात्मक मॉडल विकसित किया गया है। पूर्ण निरंतरता वाष्प द्रव्यमान और तापमान के लिए असुरक्षित खाद्य सामग्री डोमेन की इंटरफेस सतहों के माध्यम से माना जाता है और हवा डोमेन सुखाने के लिए वाष्प सांद्रता और तापमान के लिए निर्बाध रूप से इंटरफेस भर में हल करने के लिए । यह मॉडल किसी भी खाद्य सामग्री के अंदर तापमान और नमी वितरण का अनुमान लगाने में सक्षम है ।

मुख्य शब्द: संवहनी सुखाने; सुखाने और सिकुड़न विशेषताओं; हाथी पैर यम; ऊर्जा की खपत; सुखाने और थर्मल दक्षता; सॉर्प्शन आईसोथर्म; ग्रेविमेट्रिक विधि; तेजी से सोरेपेशन विधि; थर्मो-भौतिक गुण; समीपस्थ विश्लेषण; संख्यात्मक मॉडलिंग; गर्मी और बड़े पैमाने पर हस्तांतरण।