ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ IV: ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΧΗΜΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΩΣΜΩΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ΑΦΥΔΑΤΩΜΕΝΟΥ ΛΕΥΚΟΥ ΤΥΡΙΟΥ ΜΕ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΜΑΚΡΑ ΔΙΑΤΗΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΟΥΜΑΝΔΡΑΚΗ ΧΑΡΙΚΛΕΙΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΑΟΥΚΗΣ ΠΕΤΡΟΣ

ΑΘΗΝΑ, 2017

Ευχαριστίες…

Η εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου, κύριο Ταούκη Πέτρο, για την ανάθεση της εν λόγω διπλωματικής καθώς και για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης των πειραμάτων και της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

Θα ήταν παράληψη όμως να μην ευχαριστήσω θερμά και τη Διδάκτορα Γιαννόγλου Μαριάννα, η οποία υπήρξε σημαντική βοήθεια για εμένα καθ΄ όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, με τις γνώσεις, την υποστήριξη και την καθοδήγησή της. της. Ιδιαίτερα πολύτιμη υπήρξε και η βοήθεια του Δρ. Κατσαρού Γιώργου καθώς και των υποψήφιων Διδακτόρων Ανδρέου Βάνα και Δημόπουλου Γιώργου, και για αυτό τους οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές, τους υποψήφιους Διδάκτορες, τους Διδάκτορες καθώς και τους συμφοιτητές μου στο Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων, για τη βοήθεια που , ο καθένας με τον τρόπο του, μου προσέφεραν καθώς και για το κλίμα συνεργασίας σε όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης της διπλωματικής μου εργασίας. Τα θερμά μου ευχαριστώ οφείλω να εκφράσω και στην εταιρία Μινέρβα για τη δωρεάν παροχή της Φέτας προκειμένου να πραγματοποιηθούν τα πειράματα της εν λόγω διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, μεγάλη ευγνωμοσύνη κι ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου η οποία αποτέλεσε σημαντικό στήριγμα σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου αλλά και όλης της ζωής μου μέχρι σήμερα. Βέβαια δεν πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω και τους φίλους και δικούς μου ανθρώπους που στάθηκαν στο πλάι μου αυτή την περίοδο αλλά και σε κάθε εύκολη ή δύσκολη στιγμή της ζωής μου είναι εκεί.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της ωσμωτικής αφυδάτωσης ως προκατεργασία της συμβατικής ξήρανσης με αέρα σε τυρί Φέτα, και η εφαρμογή της για την παραγωγή ενός καινοτόμου προϊόντος αφυδατωμένου λευκού τυριού, με βέλτιστη οργανοληπτική ποιότητα και μακρά διατηρησιμότητα.

Το τυρί είναι ένα ευαλλοίωτο τρόφιμο με περιορισμένη διάρκεια ζωής. Η ωσμωτική αφυδάτωση των τροφίμων είναι μία φυσική μέθοδος επεξεργασίας που έχει ως στόχο τη βελτίωση των θρεπτικών, φυσικοχημικών και λειτουργικών ιδιοτήτων τους με ταυτόχρονη ελάττωση της ενεργότητας νερού (a_w). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού ανάπτυξης των μικροοργανισμών αλλά και όλων των δράσεων υποβάθμισης των τροφίμων. Η ξήρανση με αέρα είναι μια διεργασία που εφαρμόζεται ευρέως στη Βιομηχανία Τροφίμων. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, η ξήρανση έχει εφαρμοστεί με σκοπό την περαιτέρω μείωση της ενεργότητας νερού του τροφίμου, σε επίπεδα κάτω του 0,6, με σκοπό την αναστολή όλων των μικροβιακών και ενζυμικών δράσεων στο τρόφιμο. Αντικείμενο επομένως της παρούσας μελέτης υπήρξε η συνδυαστική εφαρμογή ώσμωσης και ξήρανσης, με βάση τις αρχές της τεχνολογίας εμποδίων (hurdle technology), με στόχο την παράταση της ζωής των τροφίμων (αύξηση διατηρησιμότητας). Η διεξαγωγή των πειραμάτων χωρίστηκε σε 3 Θεματικές Ενότητες.

Κατά την **Πρώτη Θεματική Ενότητα**, πραγματοποιήθηκε μελέτη της επίδρασης της ωσμωτικής επεξεργασίας στην ενεργότητα νερού, στα φαινόμενα μεταφοράς νερού και στερεών, καθώς και στα οργανοληπτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά τυριού Φέτας σε κύβους, με σκοπό τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών επεξεργασίας (θερμοκρασία, συγκέντρωση ωσμωτικού διαλύματος, αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο, χρόνος ωσμωτικής επεξεργασίας). Τα 2 ωσμωτικά διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν περιελάμβαναν 55-65% γλυκερόλη, 16% ξύδι, 10% μαλτοδεξτρίνη, 5% αλάτι, 1,5% $CaCl_2$ και 12,5- 2,5% H_2O αντίστοιχα. Μέσω της εφαρμογής του 2^{ου} νόμου του Fick για τη μεταφορά μάζας, έγινε προσδιορισμός των συντελεστών διάχυσης νερού και στερεών από και προς το τρόφιμο, αντίστοιχα. Επιπλέον, μετρήθηκαν η ενεργότητα νερού του τροφίμου και προσδιορίστηκαν ποιοτικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του (χρώμα, σκληρότητα, οργανοληπτική αρέσκεια) στις εκάστοτε συνθήκες. Λαμβάνοντας υπόψιν την ενεργότητα νερού του τελικού τροφίμου, τα ποιοτικά και οργανοληπτικά του χαρακτηριστικά καθώς και το εκτιμώμενο κόστος της διεργασίας, επιλέχθηκαν ως βέλτιστες συνθήκες επεξεργασίας, θερμοκρασία 15˚C, αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο 1:4, συγκέντρωση ωσμωτικού μέσου 65% και χρόνος ωσμωτικής επεξεργασίας 30 min. Στις δεδομένες συνθήκες επεξεργασίας, επιτεύχθηκε απώλεια νερού (WL) από τα δείγματα Φέτας 0,28 g H_2O/ g ξηρής βάσης και πρόσληψη στερεών (SG) κατά 0,1035 g στερεών/ g ξηρής βάσης, ενώ η τελική υγρασία των δειγμάτων ήταν 40% και η ενεργότητα νερού 0,88. Με επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την κινητική μελέτη, προσδιορίστηκε ένα συνολικό μαθηματικό μοντέλο το οποίο δείχνει την εξάρτηση των συντελεστών διάχυσης (D_{ew}, D_{es}), από τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση του ωσμωτικού μέσου καθώς και την αναλογία ωσμωτικού μέσου προς τρόφιμο. Μέσω του συγκεκριμένου μαθηματικού μοντέλου προσδιορίστηκαν οι συντελεστές διάχυσης (D_{ew}, D_{es}), σε όλες τις συνθήκες επεξεργασίας.

Κατά τη **Δεύτερη Θεματική Ενότητα**, μελετήθηκε η επίδραση της ξήρανσης με αέρα σε ωσμωτικά προκατεργασμένα δείγματα Φέτας στις βέλτιστες συνθήκες ώσμωσης (θερμοκρασία 15˚C, συγκέντρωση γλυκερόλης 65%, αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο 1:4 και χρόνος ωσμωτικής επεξεργασίας 30 min) καθώς και σε ανεπεξέργαστα δείγματα (control), με σκοπό την επιλογή των βέλτιστων συνθηκών ξήρανσης που να επιτυγχάνουν διατήρηση της ποιότητας και των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών του τροφίμου και ταυτόχρονα όσο το δυνατόν ηπιότερες συνθήκες επεξεργασίας. Αρχικά, προσδιορίστηκαν οι καμπύλες ξήρανσης των ωσμωτικά προκατεργασμένων και των ανεπεξέργαστων δειγμάτων σε θερμοκρασίες, 40, 55 και 67°C. Με χρήση του 2^{ου} νόμου του Fick, υπολογίστηκε ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης των δειγμάτων (D_{eff}) στην εκάστοτε θερμοκρασία ξήρανσης. Η εξάρτηση του ρυθμού διάχυσης από τη θερμοκρασία εκφράστηκε με την τιμή ενέργειας ενεργοποίησης της εξίσωσης Arrhenius. Μετά από υπολογισμό του χρόνου ξήρανσης των ωσμωτικά προκατεργασμένων δειγμάτων για 5% εναπομένουσα υγρασία, εμφανής ήταν η επίδραση της ωσμωτικής προκατεργασίας στο χρόνο ξήρανσης. Συγκεκριμένα, στους 40°C η ωσμωτική επεξεργασία μειώνει το χρόνο ξήρανσης κατά 35%, στους 55°C κατά 51% και στους 67°C κατά 65%. Ως βέλτιστη θερμοκρασία ξήρανσης για το τελικό προϊόν επιλέχθηκαν οι 67°C, καθώς για την επίτευξη ενεργότητας νερού κάτω από 0,6, ο χρόνος ξήρανσης που απαιτούνταν σε μικρότερες θερμοκρασίες ήταν πολύ μεγαλύτερος. Αυτό θα καταστούσε τη διεργασία οικονομικά ασύμφορη αλλά και πολύ χρονοβόρα για χρήση της σε βιομηχανική κλίμακα. Επομένως, για την παρασκευή του τελικού προϊόντος, εφαρμόστηκε ξήρανση για 4 h στους 67°C.

Κατά την **Τρίτη Θεματική Ενότητα**, μελετήθηκε η διατηρησιμότητα και παράμετροι ποιότητας των τελικών αφυδατωμένων προϊόντων λευκού τυριού τύπου Φέτας (ωσμωτικά προκατεργασμένων και ξηραμένων στις βέλτιστες συνθήκες που επιλέχθηκαν για την εκάστοτε διεργασία), κατά την αποθήκευσή τους σε θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C. Για χρόνο αποθήκευσης έξι μηνών, το τυρί φάνηκε μικροβιολογικά σταθερό σε όλες τις θερμοκρασίες αποθήκευσης. Στις χαμηλές θερμοκρασίες δεν παρατηρήθηκε μεταβολή της ενεργότητας νερού (σταθερή a_w) ενώ στις υψηλότερες θερμοκρασίες (35-40°C) παρατηρήθηκε μείωσή της λόγω της περαιτέρω αφυδάτωσης του τυριού. Το χρώμα και τα οργανοληπτικά του χαρακτηριστικά παρουσίασαν ελαφρά μεταβολή, κυρίως στις υψηλές θερμοκρασίες αποθήκευσης και αυτό που τελικά καθόρισε τη διάρκεια ζωής του προϊόντος ήταν ο οξειδωτικός ταγγισμός που υπέστη με βάση την οργανοληπτική του αξιολόγηση. Τελικά, ως χρόνος ζωής του προϊόντος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ορίστηκαν οι 6 μήνες.

Συμπερασματικά, φάνηκε ότι η ωσμωτική προκατεργασία είχε σημαντική επίδραση στο χρόνο ξήρανσης με αποτέλεσμα μικρότερες απαιτήσεις χρόνου και ενέργειας. Επιπλέον, ο συνδυασμός της ωσμωτικής αφυδάτωσης και της ξήρανσης με αέρα είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός καινοτόμου προϊόντος αφυδατωμένου λευκού τυριού με βέλτιστη οργανοληπτική ποιότητα και μακρά διατηρησιμότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Abstract

The aim of the present thesis was to apply and study the effect of osmotic dehydration as a pretreatment of the conventional air drying in Feta cheese, in order to produce an innovative dehydrated white cheese product with optimum sensory quality and long durability.

In general, cheese is a perishable food with limited self life. The osmotic dehydration is a natural method of food treatment that aims to improve its nutritional, physicochemical and functional properties while decreasing its water activity (aw). This results in reducing the growth rate of microorganisms and all degradation actions in food. Air drying is a process widely applied in food industry. Within this thesis, drying has been applied to further reduce the water activity of the food, below 0.6, in order to inhibit all the microbial and enzymatic activities in Feta cheese. Therefore, the object of this study was the combined application of osmosis and air drying, according to the principles of hurdle technology, in order to extend the self life of the cheese. Experiments were divided into three sets.

At the **First Set of experiments**, a study of the effect of osmotic pretreatment on the water activity and the transport phenomena of water and solids was conducted, while at the same time the organoleptic and qualitative characteristics of Feta cheese cubes were measured, in order to determine the best pretreatment conditions (temperature, concentration of osmotic solution , food to osmotic agent ratio, osmotic pretreatment time). The two osmotic agents that were used, included 55-65% glycerol, 16% vinegar, 10% maltodextrin, 5% salt, 1,5% $CaCl_2$ and 12,5- 2,5% H_2O respectively. Through Fick's Second Law for mass transfer, diffusion coefficients of water and solids from and to the food, were determined. Moreover, the water activity and the quality and organoleptic characteristics of the cheese (color, hardness, sensory characteristics) were determined, under the particular conditions. The optimal processing conditions were selected taking into consideration the water activity of the final product, the qualitative and organoleptic characteristics and the estimated cost of the process. Hence, the optimal processing conditions are: temperature 15˚C, food to osmotic agent ratio 1: 4, concentration of osmotic agent 65% and time for osmotic pretreatment 30min. With these processing conditions, the water loss (WL) that was achieved in samples of Feta cheese was 0,28 g H_2O / g of dry mass and the solid gain (SG) was 0,1035 g of solid / g of dry mass, while the final moisture of the samples was 40% and the water activity was 0.88. Making use of the results obtained from the kinetic study, an overall mathematical model was developed, which shows the dependence of the diffusion coefficients (Dew, Des) from temperature, concentration of the osmotic agent and from food to osmotic agent ratio. Through the particular mathematical model, the diffusion coefficients (Dew, Des) to all processing conditions were determined.

At the **Second Set of experiments**, the effect of air-drying in osmotically pretreated samples of Feta cheese in the optimal conditions of osmotic dehydration (temperature 15˚C, concentration of glycerol 65%, food to osmotic agent ratio 1: 4, 30 min of osmotic treatment) was studied. The same study was also performed in untreated samples (control), in order to select the best drying conditions that maintain the quality and the organoleptic characteristics of the food and at the same time achieve as milder processing conditions as possible. Initially, the drying curves of osmotically pretreated and untreated samples at

temperatures of 40, 55 and 67 ° C were identified. Using the Fick's Second law, the apparent diffusion coefficient of the samples (D_{eff}) was calculated in each drying temperature. The dependence of the diffusion rate from the temperature, was expressed by the activation energy which was calculated using the Arrhenius equation. After the calculation of the drying time of osmotically pretreated and untreated samples for 5% residual moisture, the influence of osmotic pretreatment on drying time, was evident. More specifically, at 40°C the osmotic pretreatment reduced the drying time for 35%, at 55°C for 51% and 67°C for 65%. For the final product, 67°C were chosen as an optimal drying temperature, because the drying time at lower temperatures was much longer. This would make the process uneconomical and too time consuming for use on an industrial scale. Thus, for the preparation of the final product, the air- drying was applied for 4 h at 67 ° C.

At the **Third Set of experiments,** the sustainability and the quality parameters of the final dehydrated white cheese product (osmotic pretreated and dried in optimal conditions selected for each process) were studied, during storage at temperatures of 15, 25, 35 and 40 ° C. For storage time of six months, the cheese was microbiologically stable at all storage temperatures. At lower temperatures, no change in water activity (constant aw) was observed, while at higher temperatures (35-40°C) a decrease was observed due to further dehydration of the cheese. A change in the colour and the organoleptic characteristics was measured, particularly at the high storage temperatures and the characteristic that determined the self-life of the product was its oxidative rancidity according to the sensory evaluation. Finally, the self-life of the product stored at ambient temperature, was determined to be 6 months.

In conclusion, it seemed that the osmotic pretreatment had a significant effect on drying time, resulting in less time and energy requirements. Furthermore, the combination of osmotic dehydration and air drying resulted in the creation of an innovative dehydrated white cheese product, with optimal organoleptic quality and long durability to ambient temperature.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες... 3
Περίληψη... 5
Abstract ... 7
1.Τυρί- Φέτα ... 13
1.1 Το τυρί-Ορισμός ... 13
1.2 Η Ιστορία του τυριού ... 13
1.3 Παρασκευή τυριού ... 15
1.3.1 Πρώτες Ύλες... 15
1.3.2 Παραγωγική διαδικασία ... 22
1.4 Θρεπτική αξία και ασφάλεια τυριού ... 24
1.5 Είδη τυριών ... 25
1.5.1 Τυριά άλμης... 28
2. Μικροβιολογία τυριού- Μέθοδοι συντήρησης... 33
2.1 Γενικά... 33
2.2 Παράγοντες ανάπτυξης μικροοργανισμών στα τρόφιμα ... 33
2.2.1 Θρεπτικά συστατικά υποστρώματος ... 33
2.2.2 Θερμοκρασία... 34
2.2.3 Υγρασία- Ενεργότητα νερού... 34
2.2.4 Το pH ... 35
2.2.5 Δυναμικό οξειδοαναγωγής ... 36
2.2.6 Άλλοι παράγοντες ... 36
2.3 Ομάδες μικροοργανισμών στο τυρί... 36
2.4 Μεταβολές της μικροβιακής χλωρίδας κατά την ωρίμανση ... 37
2.4.1 Οξυγαλακτική χλωρίδα ... 37
2.4.2 Χλωρίδα επιμόλυνσης... 37
2.4.3 Παθογόνα είδη ... 38
2.5 Κινητική μικροβιακής ανάπτυξης... 39
2.5.1 Φάσεις ανάπτυξης μικροβιακού πληθυσμού ... 39
2.5.2 Μοντέλο Monod... 41
2.6 Μέθοδοι συντήρησης τυριού... 41
2.6.1 Ωσμωτική αφυδάτωση... 42
2.6.2 Υπερυψηλή πίεση... 42

2.6.3 Παλλόμενα Ηλεκτρικά Πεδία 42
2.6.4 Ακτινοβόληση 43
3. Ωσμωτική αφυδάτωση- Ξήρανση 45
3.1 Ωσμωτική αφυδάτωση 45
3.1.1 Μηχανισμός ωσμωτικής αφυδάτωσης 45
3.1.2 Φαινόμενα μεταφοράς μάζας κατά την ωσμωτική αφυδάτωση 46
3.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ωσμωτική αφυδάτωση 48
3.1.4 Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα ωσμωτικής αφυδάτωσης 51
3.1.5 Διαχείριση ωσμωτικού διαλύματος 52
3.1.6 Ωσμωτική αφυδάτωση και τεχνολογία εμποδίων 53
3.2 Ξήρανση 54
3.2.1 Ξήρανση τροφίμων 54
3.2.2 Μέθοδοι ξήρανσης 55
3.2.3 Μαθηματική μοντελοποίηση ξήρανσης 61
3.2.4 Ωσμωτική αφυδάτωση ως προεπεξεργασία της ξήρανσης 63
4. Υλικά και Μέθοδοι 67
4.1 Εισαγωγή 67
4.2 Ωσμωτική αφυδάτωση δειγμάτων Φέτας 67
4.2.1 Μέτρηση παραμέτρων ώσμωσης 68
4.2.2 Μέτρηση φυσικοχημικών χαρακτηριστικών Φέτας κατά την ώσμωση 70
4.2.3 Μαθηματική μοντελοποίηση ωσμωτικής προκατεργασίας 73
4.3 Ξήρανση δειγμάτων Φέτας 75
4.3.1 Υπολογισμός παραμέτρων κατά τη ξήρανση 75
4.3.2 Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής h 76
4.4 Μελέτη διατηρησιμότητας δειγμάτων Φέτας 77
4.4.1 Μικροβιολογικός έλεγχος Φέτας 77
4.4.2 Οργανοληπτικός έλεγχος Φέτας 78
5. Αποτελέσματα- Συζήτηση Αποτελεσμάτων 79
5.1 Πρώτη Θεματική Ενότητα: Ωσμωτική προκατεργασία δειγμάτων Φέτας 79
5.1.1 Σκοπός 79
5.1.2 Επίδραση θερμοκρασίας, χρόνου, συγκέντρωσης και αναλογίας του ωσμωτικού διαλύματος. 79
5.2 Δεύτερη Θεματική Ενότητα: Ξήρανση ωσμωτικά προκατεργασμένων δειγμάτων Φέτας 107

6.2.1 Σκοπός 107
6.2.2 Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής στον ξηραντήρα 107
6.2.3 Προσδιορισμός καμπυλών ξήρανσης και φαινόμενων συντελεστών διάχυσης. 107
5.3 Τρίτη Θεματική Ενότητα: Μελέτη διατηρησιμότητας των δειγμάτων Φέτας 112
5.3.1 Σκοπός 112
5.3.2 Μέτρηση μικροβιακού φορτίου 112
5.3.3 Μέτρηση ενεργότητας νερού 113
5.3.4 Υπολογισμός μεταβολής χρώματος 114
5.3.5 Μέτρηση σκληρότητας 115
5.3.6 Οργανοληπτική Αξιολόγηση 116
5.4 Υπολογισμός κόστους προϊόντος 121
6. Συμπεράσματα- Προτάσεις 122
6.1 Συμπεράσματα 122
6.2 Προτάσεις 125
7. Βιβλιογραφία 126
8.Παράρτημα 130

1.Τυρί- Φέτα

1.1 Το τυρί-Ορισμός

Σύμφωνα με τον ορισμό του Codex Alimentarius (FAO/WHO, 1973) «Τυρί είναι το νωπό ή ώριμο προϊόν που προέρχεται από τη στράγγιση, ύστερα από πήξη του πλήρους, μερικώς αποβουτυρωμένου ή άπαχου γάλακτος ή βουτυρογάλακτος ή μίγματος ορισμένων ή όλων αυτών των προϊόντων» (Μάντης, 2000).

Ο Ελληνικός Κώδικας Τροφίμων και Ποτών (Κ.Τ.Π.) ορίζει τα τυριά που παράγονται από γάλα και ωριμάζουν ως «τα προϊόντα ωρίμανσης του πήγματος (στάλπης) που είναι απαλλαγμένα από το τυρόγαλα στον επιθυμητό κάθε φορά βαθμό και τα οποία παρασκευάστηκαν, με την επενέργεια πυτιάς ή άλλων ενζύμων που δρουν ανάλογα σε γάλα (νωπό ή παστεριωμένο, αγελάδος, προβάτου, κατσίκας, βουβάλου και μίγματα αυτών) ή σε μερικώς αποβουτυρωμένο γάλα ή σε μίγμα αυτών ή/και σε μίγματα αυτών με κρέμα γάλακτος (αφρόγαλα).

1.2 Η Ιστορία του τυριού

Το τυρί, ή τυρός στην αρχαία διάλεκτο, πιθανόν να προέρχεται από το ρήμα τορέω, που σημαίνει τρυπώ, αναφερόμενο στις τρύπες του προϊόντος. Μία άλλη πιθανή εξήγηση είναι ότι προέρχεται από το ρήμα τορεύω που σημαίνει καλουπώνω. Είναι γεγονός ότι ο άνθρωπος έφτιαχνε τυρί από τα πανάρχαια χρόνια αφού ήταν ο μόνος τρόπος για να διατηρηθεί μία αξιόλογη ζωική τροφή όπως το γάλα, σε εποχές χωρίς ψύξη.

Ενώ η γεωργία και η κτηνοτροφία φαίνεται να απασχολούσαν τον άνθρωπο ήδη από τα πρώτα χρόνια της παρουσίας του στη γη, η παραγωγή τυριού καθυστέρησε λίγο καθώς έλειπαν δύο βασικές προϋποθέσεις που θα την καθιστούσαν δυνατή: η διαθεσιμότητα πλεονάσματος γάλακτος καθώς και κατάλληλων δοχείων για τη συλλογή, αποθήκευση και πήξη του γάλακτος. Παρόλο που η εξημέρωση προβάτων και αιγών γινόταν ήδη πριν από το 7000 π.Χ., η ανατροφή τους έως τότε γινόταν μόνο για το κρέας τους κι όχι για τη παραγωγή γάλακτος. Η πρώτη μαρτυρία που υποδηλώνει ουσιαστικές αλλαγές από το κρέας στη παραγωγή γάλακτος χρονολογείται γύρω στο 6500 π.Χ.

Από τότε κι έπειτα, το γάλα φαίνεται ότι αποτελούσε βασικό στοιχείο της διατροφής των ανθρώπων κατά τη βρεφική και την παιδική ηλικία, όχι όμως και των ενηλίκων. Αυτό συνέβαινε εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας του γάλακτος σε λακτόζη, η πέψη της οποίας απαιτεί τη παραγωγή του ενζύμου της λακτάσης στο έντερο. Όλα τα θηλαστικά, συμπεριλαμβανομένων και των ανθρώπων, παράγουν λακτάση κατά τη γέννηση και κατά τα πρώτα χρόνια της βρεφικής τους ηλικίας, με τη παραγωγή του ενζύμου όμως να μειώνεται μετά τον απογαλακτισμό των βρεφών και να σταματάει τελείως κατά την ενηλικίωσή τους. Επομένως, η λακτόζη δε μπορεί να χωνευτεί από τον οργανισμό των ενηλίκων προκαλώντας έτσι διάφορα προβλήματα όπως διάρροια, πρήξιμο και φούσκωμα. Βέβαια σήμερα πολλοί ενήλικες παραμένουν ανεκτικοί στη λακτόζη επειδή οι πρόγονοί τους κατάφεραν να αποκτήσουν τη γενετική ικανότητα της παραγωγής λακτάσης και στην ενηλικίωση. Σύμφωνα όμως με πρόσφατες έρευνες, η ανεκτικότητα των ενηλίκων στη λακτάση δεν είχε αναπτυχθεί πριν από το 5500 π.Χ. Επομένως η παραγωγή του τυριού ήταν ένας τρόπος να καταστεί προσιτή η διατροφική αξία του γάλακτος και στους ενήλικες.

Ήδη από τα πρώτα χρόνια της κατανάλωσης του γάλακτος, έκανε την εμφάνισή της στη νοτιοανατολική Ασία η μέθοδος παραγωγής τυριού. Σε αυτό βοήθησε η ανάπτυξη της κεραμικής που είχε ως αποτέλεσμα την αποθήκευση του γάλακτος σε κεραμικά δοχεία, καθώς και το θερμό κλίμα της νοτιοδυτικής Ασίας. Χάρη σε αυτό και στα φυσικώς υπάρχοντα βακτήρια στο περιβάλλον του γάλακτος, το αποθηκευμένο γάλα ζυμωνόταν κι έπηζε γρήγορα εξαιτίας της παραγωγής του γαλακτικού οξέος από τα ευρισκόμενα σε αυτό βακτήρια. Η σταθερότητα του πηγμένου γάλακτος και η τάση του να διαχωρίζεται σε ορό γάλακτος και τυρόπηγμα ήταν εμφανείς και διαπιστώθηκε ότι το τυρόπηγμα μπορούσε να καταναλωθεί και από τους ενήλικες χωρίς τη πρόκληση των ανωτέρω προβλημάτων από το γάλα. Με τον τρόπο αυτό παρήχθη η πρώτη μορφή τυριού της νεολιθικής εποχής που φημολογείται ότι ήταν αρκετά μαλακό και ότι έμοιαζε με τις παραδοσιακές ποικιλίες τυριού που παράγονται ακόμα και σήμερα στην Εγγύς Ανατολή.

Η χρήση της πυτιάς για τη πήξη του γάλακτος και τη παραγωγή τυριού έκανε την εμφάνισή της αργότερα. Υπάρχουν δύο πιθανές θεωρίες με το πώς αυτό ξεκίνησε. Η πρώτη υποστηρίζει ότι οι κτηνοτρόφοι της νεολιθικής εποχής παρατήρησαν ότι τα στομάχια των αιγών, των μοσχαριών και των αρνιών που πέθαιναν από φυσικά αίτια ή που σφάζονταν κατά το θηλασμό γέμιζαν με πηγμένο γάλα. Έτσι δοκιμάστηκε η προσθήκη του υλικού του στομάχου σε γάλα το οποίο είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της πήξης. Μετά την αναγνώριση λοιπόν της πηκτικής αξίας του στομάχου, έγινε προσπάθεια διατήρησης των στομάχων των ζώων για μελλοντική χρήση αλατίζοντάς τα, κι έτσι αναπτύχθηκε η γνωστή ως σήμερα «πυτιά».

Μία άλλη θεωρία, λιγότερο ωστόσο πιθανή καθώς προϋποθέτει την κατανάλωση του φρέσκου γάλακτος και από ενήλικες, υποστηρίζει ότι ένας ταξιδιώτης που γέμισε το δερμάτινο ασκί του, κατασκευασμένο από το στομάχι κάποιου θηλαστικού, με γάλα, κατά την έναρξη του ταξιδιού του, διαπίστωσε λίγο αργότερα ότι αυτό είχε πήξει και είχε μετατραπεί σε τυρί. Όπως και να έχει όμως, η ανακάλυψη της παραγωγής τυριού αποτέλεσε ένα τεράστιο βήμα για το νεολιθικό άνθρωπο, καθώς μπόρεσε να καταστήσει προσιτά τα διατροφικά χαρακτηριστικά του γάλακτος και στους ενήλικες, καθώς και να τα διατηρήσει για μετέπειτα χρήση και κατανάλωση (Evershed et al., 2008; Kindstedt & Paul, 2012). Στον πίνακα 1.1 παρατίθενται οι ημερομηνίες εμφάνισης για διάφορες ποικιλίες τυριού ανά τον κόσμο.

Πίνακας 1.1 Χρονολογία εμφάνισης διαφόρων ποικιλιών τυριού

Ποικιλία	Χρονολογία
Gorgonzola	897
Schabzieger	1000
Roquefort	1070
Maroilles	1174
Schwangenkase	1178
Grana	1200
Taleggio	1282
Cheddar	1500
Parmesan	1579
Gouda	1697
Gloucester	1783
Stilton	1785
Camembert	1791
St. Paulin	1816

[Πηγή: Fox ,2000]

1.3 Παρασκευή τυριού

1.3.1 Πρώτες Ύλες

Οι βασικές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για τη παρασκευή τυριού είναι το γάλα, η πυτιά, η καλλιέργεια εκκίνησης και το αλάτι. Ανάλογα με το είδος του παραγόμενου τυριού πιθανόν να απαιτείται και η προσθήκη κάποιων δευτερευόντων συστατικών, όπως είναι ορισμένες χρωστικές ουσίες, αρωματικές ύλες κ.α.

1.3.1.1 Γάλα

Το γάλα είναι το πρωτεύον συστατικό για τη παραγωγή του τυριού. Η σύστασή του έχει τεράστια επίδραση στην απόδοση και στη σύνθεση του παραγόμενου τυριού. Είναι γεγονός ότι η σύσταση του φρέσκου γάλακτος αλλάζει ανάλογα με την προέλευσή του (είδος γαλακτοφόρου ζώου), την περίοδο της άμελξης, τη διατροφή και την υγεία του ζώου, τη μικροβιακή του χλωρίδα καθώς και άλλους παράγοντες (Ανυφαντάκης, 1981). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα κύρια συστατικά του γάλακτος καθώς και μία μέση τιμή της % περιεκτικότητά τους σε γάλα αγελάδος.

Πίνακας 1.2 Κύρια Συστατικά γάλακτος

Συστατικό	Μέση περιεκτικότητα σε γάλα αγελάδος (% w/w)
Νερό	87,1
Στερεά μη λιπαρά	8,9
Λιπαρά επί ξηρής μάζας	31
Λακτόζη	4,6
Λιπίδια	4
Πρωτεΐνες	3,3
Καζεΐνες	2,6
Ανόργανα Συστατικά	0,7
Οργανικά Οξέα	0,17
Λοιπά Συστατικά	0,15

[Fox, 2003]

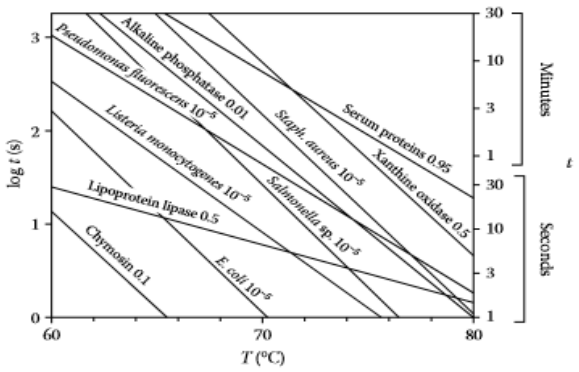
Για την παρασκευή τυριού ικανοποιητικής ποιότητας, απαιτείται η ρύθμιση της παραγωγικής διαδικασίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται τυποποίηση του γάλακτος έτσι ώστε η περιεκτικότητα σε λιπαρά του παραγόμενου τυριού να είναι η επιθυμητή. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα σημαντικά στοιχεία της σύστασης του γάλακτος που επηρεάζουν άμεσα το παραγόμενο τυρί:

- Η περιεχόμενη στο γάλα καζεΐνη και τα λιπαρά είναι αυτά που καθορίζουν την απόδοση του γάλακτος σε τυρί.
- Η αναλογία του λίπους προς καζεΐνη καθορίζει την περιεκτικότητα της ξηρής μάζας του τυριού σε λιπαρά. Επηρεάζει επίσης σε κάποιο βαθμό τη συναίρεση και επομένως την περιεκτικότητα του παραγόμενου τυριού σε νερό.
- Η περιεκτικότητα του γάλακτος σε λακτόζη καθορίζει το δυναμικό παραγωγής γαλακτικού οξέος και επομένως επηρεάζει άμεσα το pH καθώς και το περιεχόμενο νερό του τυριού.
- Το pH του παραγόμενου προϊόντος εξαρτάται επιπλέον από τη ρυθμιστική ικανότητα.
- Η πήξη του γάλακτος και η ικανότητά του να παρουσιάζει συναίρεση, πιθανόν να ποικίλλει, κυρίως εξαιτίας της μεταβαλλόμενης ενεργότητας του Ca^{2+} .
- Το γάλα, προερχόμενο από ζώα που πάσχουν από κάποια σοβαρή μορφή μαστίτιδας, έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε λακτόζη, που έχει σαν συνέπεια την καθυστέρηση της πήξης, με το τυρόπηγμα να παρουσιάζει κακή συναίρεση.
- Οι παράγοντες που αναστέλλουν τη βακτηριακή ανάπτυξη μπορούν να επιβραδύνουν την παραγωγή γαλακτικού οξέος. Έτσι, η παρουσία αντιβιοτικών στο γάλα, μπορεί να είναι επιζήμια για την παραγωγή γαλακτικού οξέος καθώς και για την ωρίμανσή του.
- Το γάλα δε πρέπει να έχει χαλάσει, να έχει παρουσιάσει για παράδειγμα ταγγισμό ή άλλα ελαττώματα γεύσης.

1.3.1.1.1 Προκατεργασία γάλακτος τυροκόμησης

Προτού γίνει χρήση του γάλακτος προς τυροκόμηση, απαιτείται προκατεργασία του. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά απαιτούμενα στάδια:

1. Βακτηριοκάθαρση. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται ορισμένες φορές με σκοπό να μειώσει τον αριθμό των σπορίων του *Clostridium tyrobutyricum*. Η απομάκρυνση όμως του λαμβανόμενου ιζήματος από τα σπόρια, προκαλεί μείωση 6% περίπου της απόδοσης σε τυρί. Ως εκ τούτου, τα σπόρια, αφού επεξεργαστούν με υπερυψηλή θερμοκρασία (UHT), προστίθενται ξανά στο γάλα προς τυροκόμηση.
2. Παστερίωση του γάλακτος, συνήθως στους 65°C για 20 s εάν αυτό πρόκειται να διατηρηθεί δροσερό για κάποιο χρονικό διάστημα. Αυτό αποσκοπεί στην παρεμπόδιση του σχηματισμού μεγάλων ποσοτήτων θερμοανθεκτικών λιπασών και πρωτεϊνασών. Μέσω της διεργασίας αυτής, μπορεί επίσης να μειωθεί ο αριθμός ορισμένων επιβλαβών βακτηρίων.
3. Απομάκρυνση των σωματιδίων ρύπων. Πραγματοποιείται με τη χρήση φίλτρου ή με φυγοκέντρηση.
4. Τυποποίηση των περιεχόμενων λιπαρών του γάλακτος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτό πραγματοποιείται μέσω της ψύξης του γάλακτος στους 5°C έτσι ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητικός διαχωρισμός της κρέμας και του αποβουτυρωμένου γάλακτος. Στη συνέχεια η κρέμα που λαμβάνεται παστεριώνεται και μέρος αυτής προστίθεται στο αποβουτυρωμένο γάλα έτσι ώστε να αποκτήσει την επιθυμητή περιεκτικότητα λιπαρών. Η παραπάνω διαδικασία επιτρέπει την επίτευξη ακριβούς τυποποίησης καθώς και βελτιώνει τη βακτηριακή του ποιότητα ακόμα περισσότερο.
5. Ρύθμιση της περιεκτικότητας του γάλακτος σε πρωτεΐνη. Πολλές φορές πραγματοποιείται αύξηση της συγκέντρωσης της πρωτεΐνης στο γάλα, με σκοπό την αύξηση της απόδοσής του σε τυρί. Επιπλέον, η τυποποίηση των περιεχόμενων πρωτεϊνών, μπορεί να προσφέρει καλύτερο έλεγχο των συνολικών διεργασιών.
6. Παστερίωση, ικανή να απενεργοποιήσει την αλκαλική φωσφατάση. Χρησιμοποιείται για την εξάλειψη παθογόνων και επιβλαβών μικροοργανισμών από το γάλα. Μια πιο έντονη παστερίωση, μπορεί ακόμα να οδηγήσει σε αύξηση της απόδοσης σε τυρί καθώς και σε μείωση της συναίρεσης. Στην εικόνα 1.1 παρουσιάζεται ο απαιτούμενος χρόνος για την απενεργοποίηση ορισμένων ενζύμων και τη θανάτωση κάποιων βακτηρίων κατά τη παστερίωση του γάλακτος, συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Εικόνα 1.1 Χρόνος απενεργοποίησης ενζύμων και θανάτωσης βακτηρίων κατά την παστερίωση του γάλακτος, συναρτήσει της θερμοκρασίας T.

7. Ψύξη του γάλακτος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, μετά την παστερίωσή του ακολουθεί ψύξη του γάλακτος στους 30°C περίπου.
8. Ομογενοποίηση του γάλακτος. Επιτυγχάνεται με ειδικά μηχανήματα (ομογενοποιητές), με την εφαρμογή υψηλών πιέσεων στο γάλα, για την επίτευξη μικρότερου μεγέθους λιποσφαιρίων και ομοιόμορφης κατανομής της λιπαρής φάσης στο γάλα. Επιπλέον, η εφαρμογή της πετυχαίνει στη συνέχεια ταχύτερη πήξη του γάλακτος με πυτιά.
9. Προσθήκη ουσιών, όπως:

α) Χλωριούχο ασβέστιο: Επιταχύνει τη πήξη ή μειώνει τη ποσότητα της απαιτούμενης πυτιάς.

β) Νιτρικό νάτριο ή νιτρικό κάλιο: Καταστέλλουν τη ζύμωση του βουτυρικού οξέος και των κολοβακτηριδίων, εάν αυτό απαιτείται.

γ) Χρωστικές ουσίες: Συνήθως χρησιμοποιείται ανάτο ή καροτένιο (Walstra et al., 2005).

1.3.1.1.2 Μικροβιολογική κατάσταση γάλακτος τυροκόμησης

Η χημική και μικροβιολογική ποιότητα του γάλακτος που λαμβάνεται προς τυροκόμηση επηρεάζει άμεσα την ποιότητα του παραγόμενου τυριού, γι' αυτό και είναι απαραίτητο να ελέγχεται. Το γάλα περιέχει πάντοτε ένα μεγάλο αριθμό μικροοργανισμών, ωστόσο ύψιστης σημασίας είναι η κατηγορία των μικροοργανισμών αυτών και όχι ο αριθμός τους. Σύμφωνα με το Π.Δ.56/95 της νομοθεσίας, το οποίο αποτελεί συμμόρφωση της Ελληνικής νομοθεσίας προς τις οδηγίες 95/46/ΕΟΚ και 92/47/ΕΟΚ του συμβουλίου περί των υγειονομικών κανόνων που διέπουν την παραγωγή γάλακτος και προϊόντων με βάση το γάλα, η μικροχλωρίδα του γάλακτος πρέπει να τηρεί τα όρια που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.3 Προδιαγραφές νωπού γάλακτος για παραγωγή προϊόντων του

Είδος γάλακτος	**ΟΜΧ (Ολική Μικροβιακή Χλωρίδα)**	**Σωματικά κύτταρα**	***Staphylococcus aureus***
Προϊόντα με θερμική επεξεργασία			
Αγελαδινό	<100.000	<400.000	-
Αιγοπρόβειο	<1.000.000	-	-
Προϊόντα νωπού γάλακτος			
Αγελαδινό	<100.000	<400.000	m=500/ M=2000
			n=5/ c=2[1]
Αιγοπρόβειο	<500.000	-	m=500/ M=2000
			n=5/ c=2[1]

[Πηγή: Ζερφυρίδης ,2001]

Οι παράμετροι m, M, n, c :

m: Τιμή κατωφλίου του αριθμού των βακτηρίων. Το αποτέλεσμα θεωρείται ικανοποιητικό εάν σε καμία μονάδα δειγματοληψίας ο αριθμός των βακτηρίων δεν υπερβαίνει το m.

M: Οριακή τιμή των βακτηρίων. Το αποτέλεσμα θεωρείται μη ικανοποιητικό εάν σε μία ή σε περισσότερες μονάδες δειγματοληψίας ο αριθμός βακτηρίων είναι τουλάχιστον ίσος προς το M.

n: Αριθμός μονάδων δειγματοληψίας που αποτελούν το δείγμα.

c: Αριθμός μονάδων δειγματοληψίας των οποίων ο αριθμός των βακτηρίων μπορεί να κυμαίνεται από m έως M. Το δείγμα θεωρείται ακόμα αποδεκτό εάν στις άλλες μονάδες δειγματοληψίας, ο αριθμός των βακτηρίων δεν υπερβαίνει το m.

1.3.1.2 Πηκτικά ένζυμα

Το σημαντικότερο στάδιο για την παρασκευή του τυριού είναι η διάσπαση της καζεΐνης του γάλακτος, που προκαλεί την πήξη του. Η πήξη γίνεται κατά κύριο λόγο με ένζυμα αλλά μπορεί να πραγματοποιηθεί και με οξίνιση ή θέρμανση (π.χ. τυρί Ricotta από πλήρες γάλα). Υπεύθυνη για την πήξη του γάλακτος με τον πρώτο τρόπο είναι η παραδοσιακά χρησιμοποιούμενη πυτιά. Πρόκειται για μία ουσία που εμφανίζεται στο γαστρικό υγρό νεαρών ζώων στο τέταρτο στομάχι αυτών, γνωστό ως ήνυστρον. Η παρασκευή του γίνεται με εκχύλιση, με τη χρήση διαλύματος χλωριούχου νατρίου. Το λαμβανόμενο εκχύλισμα περιέχει διάφορα ένζυμα όπως χυμοσίνη, πεψίνη και άλλες πρωτεϊνάσες.

1.3.1.2.1 Μηχανισμός σχηματισμού πήγματος

Η παρασκευή του τυριού από το γάλα βασίζεται στο σχηματισμό του πήγματος. Για να γίνει κατανοητή η διαδικασία αυτή, θα πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί η μονάδα του 'καζεϊνικού μικκυλίου' που αποτελεί τη βάση του πήγματος.

Η μονάδα λοιπόν του καζεϊνικού μικκυλίου μπορεί να προσδιοριστεί ως μια σφαιροειδής κατασκευή πού αποτελείται και από τους τέσσερεις τύπους καζεϊνών (α_{s1}-, α_{s2}-, β-, κ-), με τις υδρόφιλες γλυκοπεπτιδικές αλυσίδες της κ-καζεΐνης τοποθετημένες στην επιφάνεια της σφαίρας. Περιέχει ακόμη φωσφορικό ασβέστιο στην κολλοειδή μορφή του. Σύμφωνα με την επικρατέστερη θεωρία μέχρι σήμερα, η πήξη του γάλακτος με την επίδραση πυτιάς πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση γίνεται με την επίδραση της χυμοσίνης ή ρεννίνης, η οποία διασπά την κ-καζεΐνη μεταξύ της θέσεως 105 (Phen) και της 106 (Meth) οπότε παράγεται αδιάλυτη παρα-κ-καζεΐνη και ένα διαλυτό γλυκομακροπεπτίδιο. Η φάση αυτή δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μπορεί να γίνει ακόμα και σε θερμοκρασία ψύξεως. Η δεύτερη φάση είναι η φάση της πήξεως του γάλακτος και γίνεται μόνο εάν η θερμοκρασία είναι ευνοϊκή και υπάρχουν σε επάρκεια ιόντα ασβεστίου. Με τη βοήθεια των ιόντων Ca^{+2}, τα αποσταθεροποιημένα λόγω της διάσπασης της κ-καζεΐνης μικκύλια, συνενώνονται και σχηματίζουν ένα πρωτεϊνικό πλέγμα, όπου παγιδεύονται τα υπόλοιπα συστατικά του γάλακτος με αποτέλεσμα όλο το γάλα να αποκτήσει τη μορφή πήγματος (Μάντης, 2000).

1.3.1.2.2 Χυμοσίνη

Το βασικό ένζυμο στο οποίο οφείλεται η πηκτική ικανότητα της πυτιάς, είναι η χυμοσίνη (88-94% της πηκτικής δραστηριότητας στο γάλα) (Sousa et al., 2001). Πρόκειται για μία ενδοπεπτιδάση με ισοηλεκτρικό σημείο 4,6-4,7 που είναι διαλυτή σε υδατικό περιβάλλον. Στο ήνυστρο των νεαρών μηρυκαστικών συντίθεται μία πρόδρομη ένωση που ονομάζεται προρενίνη ή προχυμοσίνη, σε ανενεργή μορφή. Στη συνέχεια μετατρέπεται στη δραστική του μορφή με τη βοήθεια αυτοκαταλυόμενης πρωτεόλυσης. Όσο το νεογνό μεγαλώνει το ήνυστρο παράγει όλο και περισσότερη πεψίνη, σε αντίθεση με τη χυμοσίνη που η παραγωγή της μειώνεται έως ότου σταματήσει. Η πεψίνη όμως, σε αντίθεση με τη χυμοσίνη, δε μπορεί να μεταβολίσει τις ανοσογλοβουλίνες του πρωτογάλακτος. Η δράση

της χυμοσίνης λοιπόν είναι να υδρολύσει τα μόρια των πρωτεϊνών του γάλακτος σε πεπτίδια, τα οποία και είναι υπεύθυνα για τα ιδιαίτερα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά κάθε τυριού (γεύση και άρωμα). Η ενεργότητα της χυμοσίνης μειώνεται με την αύξηση του pH, με την καλύτερη τιμή pH για την πλήρη πρωτεόλυση να είναι το 3,8. Όμως στο τυρί το βέλτιστο pH δράσης της χυμοσίνης είναι μεγαλύτερο από ότι θα ήταν όταν το ένζυμο βρισκόταν σε υδατικό περιβάλλον. Σημαντικό ρόλο στην ενεργότητα του ενζύμου παίζει ακόμα η θερμοκρασία, αφού σε θερμοκρασία πάνω από τους 40˚C η χυμοσίνη αδρανοποιείται. Τα χρησιμοποιούμενα άλατα όμως προστατεύουν τη χυμοσίνη από το να αδρανοποιηθεί, γι' αυτό και οι πυτιές του εμπορίου περιλαμβάνουν μεγάλη αναλογία αυτών. Εκτός από την κ-καζεΐνη που παίζει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία του πήγματος, η καθεμία από τις υπόλοιπες καζεΐνες διασπώνται σε διαφορετικούς χρόνους, σύμφωνα με την παρακάτω σειρά: αs1->β->αs2-. Το αλάτι παρεμποδίζει την πρωτεολυτική δράση του ενζύμου, ιδίως πάνω στη β- καζεΐνη (Walstra & Jenness, 1984).

1.3.1.2.3 Πεψίνη- Ανασυνδυασμένη χυμοσίνη

Ένα ακόμη ένζυμο που περιέχεται στο στομάχι των νεαρών μηρυκαστικών είναι, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η πεψίνη. Η δραστικότητά της είναι συγκρίσιμη με αυτή της χυμοσίνης, παρόλο που η περιεκτικότητα της πυτιάς σε πεψίνη αποτελεί περίπου το 25% της περιεκτικότητάς της σε χυμοσίνη. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και διάφορα άλλα ένζυμα, όπως είναι επί παραδείγματι η πεψίνη χοίρου. Δρα όπως η βόεια χυμοσίνη, με τη διαφορά ότι, για την επίτευξη ταχείας πήξης, το pH του γάλακτος πρέπει να μειωθεί ελαφρά.

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει η προσπάθεια παραγωγής εναλλακτικής πυτιάς λόγω του υψηλού της κόστους αλλά και διαφόρων θρησκευτικών ιδεολογιών που δεν επιτρέπουν τη κατανάλωση τυριών που προέρχονται από ζωική πυτιά. Έχουν αναπτυχθεί λοιπόν αρκετά είδη φυτικής πυτιάς προερχόμενη από διάφορα φυτά ή από μύκητες. Ο πιο σύγχρονος τρόπος παραγωγής πυτιάς που έχει εφαρμοστεί είναι η τεχνολογία γονιδίων. Σύμφωνα με αυτή, το γονίδιο των βοοειδών εισάγεται στο DNA διαφόρων μικροοργανισμών (βακτηρίων, ζυμών ή μυκήτων), οι οποίοι στη συνέχεια παράγουν το απαιτούμενο ένζυμο και το εκκρίνουν στο περιβάλλον. Σε πολλές χώρες, αυτή η ανασυνδυασμένη μορφή χυμοσίνης αποτελεί το βασικό πηκτικό μέσο που χρησιμοποιείται για την παρασκευή τυριών.

Όλες οι εναλλακτικές μορφές πυτιάς έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό την ικανότητά τους να διασπούν τον Phe–Met δεσμό των κ-καζεϊνών, διαφέρουν όμως στις επί μέρους ιδιότητές τους. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τους παράγοντες που επηρεάζουν τη σταθερότητά τους, την εξάρτηση τους από τη θερμοκρασία και το pH, την ιοντική τους ισχύ καθώς και την πρωτεολυτική τους δραστηριότητα κατά την ωρίμανση του τυριού (Walstra et al., 2005).

1.3.1.3 Οξυγαλακτικά βακτήρια εκκίνησης

Ένα ακόμη απαραίτητο συστατικό για την παρασκευή του τυριού είναι τα οξυγαλακτικά βακτήρια. Προστίθενται τις περισσότερες φορές στο γάλα ως καλλιέργειες εκκίνησης καθώς με αυτά ξεκινάει η ζύμωση του γάλακτος, δηλαδή η μετατροπή της λακτόζης σε γαλακτικό οξύ. Παράλληλα παράγονται ορισμένα παραπροϊόντα όπως είναι το διακετύλιο, το διοξείδιο του άνθρακα και ορισμένοι εξωπολυσακχαρίτες. Αυτά επηρεάζουν τη γεύση, την υφή, το άρωμα καθώς και τη συνοχή του τελικού προϊόντος. Επομένως τα οξυγαλακτικά

βακτήρια είναι υπεύθυνα για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του κάθε τυριού. Η επιλογή του τύπου και της ποσότητας των βακτηρίων που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από το τύπο του τυριού που πρόκειται να παρασκευαστεί. Κάποιοι από τους κυριότερους μικροοργανισμούς που χρησιμοποιούνται στην τυροκομία είναι τα γένη Streptococcus, Lactobacillus, Lactococcus και Leuconostocs, καθώς και ορισμένες προπιονικές καλλιέργειες. Στον πίνακα 1.4 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων από τη βιομηχανία οξυγαλακτικών βακτηρίων.

Πίνακας 1.4 Χαρακτηριστικά συνηθέστερων οξυγαλακτικών βακτηρίων

Μικροοργανισμός	**Ιδανική T (°C)**	**pH μετά την επώαση**	**Παραγωγή αρώματος**	**Παραγωγή αρώματος και οξέος**
Str. thermophilus	35-40	4,6	-	-
Lb. bulgaricus	40-45	3,8	-	+
Lc. cremoris	20-25	4,8	-	-
Lc. lactis	40	4,5	-	+
Lb. helveticus	40-45	4,4	-	+
Str. diacetylactis	25-30	4,6	+	-
Leuconostoc citrovorum	20-25	5,2	+	-

[Πηγή: Walstra et al., 2005; Ζερφυρίδης, 2001]

1.3.1.4 Αλάτι

Το αλάτισμα αποτελεί στοιχειώδες βήμα της τυροκόμησης. Το αλάτι που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι καθαρό εφόσον χρησιμοποιείται για τη παραγωγή βρώσιμων προϊόντων ώστε να μην εισέλθει στο τρόφιμο άγνωστη μικροχλωρίδα και επικίνδυνα ξένα σώματα. Σύμφωνα με τον ΚΤΠ, η επιτρεπόμενη περιεκτικότητά του σε αρσενικό και μόλυβδο είναι 3 και 10 ppm αντίστοιχα, ενώ ο σίδηρος δε πρέπει να υπερβαίνει τα 10 ppm γιατί δημιουργεί κόκκινα στίγματα στο τυρί, ενώ ο χαλκός τα 2 ppm καθώς έχει σημαντική επίδραση στη μικροχλωρίδα, τις ενζυμικές δράσεις και τα οξειδωτικά φαινόμενα στο τυρί (Ζερφυρίδης, 2001).

Οι βασικές λειτουργίες που επιτελεί το αλάτι είναι η διατηρησιμότητα του παραγόμενου τυριού καθώς και η επίδρασή του στο άρωμα, τη γεύση, τη συνεκτικότητα και την ωρίμανση του τυριού. Επιπλέον, αναστέλλει την ανάπτυξη οξυγαλακτικών βακτηρίων. Οι περισσότερες ποικιλίες τυριού περιέχουν αλάτι σε ποσοστό περίπου 2%, με αυτό βέβαια να διαφοροποιείται από τη μία στην άλλη.

Ανάλογα με το είδος του τυριού μεταβάλλεται και ο τρόπος αλατίσματός του. Οι βασικοί τρόποι αλατίσματος είναι οι ακόλουθοι:

- *Άμεση ανάμιξη αλατιού με τυρόπηγμα*: Στη μέθοδο αυτή, το αλάτι προστίθεται απευθείας στο τυρόπηγμα, προτού αυτό μπει στα καλούπια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής του είναι το τυρί Cheddar.
- *Ξηρό ή επιφανειακό αλάτισμα*: Σε αυτή τη μέθοδο, χονδρόκοκκο αλάτι τρίβεται στη πάνω επιφάνεια του τυριού, το οποίο στη συνέχεια διασκορπίζεται και στις πλάγιες επιφάνειές του. Προς το παρόν η εφαρμογή της μεθόδου αυτής περιορίζεται σε τυριά που αναπτύσσουν μια μικροβιακή κηλίδα στην επιφάνειά τους. Πολλές φορές το ξηρό αλάτισμα συνδυάζεται και με τη μέθοδο αλατίσματος σε άλμη.
- *Αλάτισμα σε άλμη*: Το τυρί βυθίζεται εντός πυκνού διαλύματος NaCl (άλμη) μέχρις ότου απορροφηθεί η επιθυμητή ποσότητα αλατιού.

Πολλές φορές μπορεί να εφαρμοστεί και συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η γραβιέρα, η οποία αφού αλατιστεί πρώτα σε άλμη, στη συνέχεια αλατίζεται και επιφανειακά με τη προσθήκη ξηρού αλατιού.

Το αλάτισμα έχει αντίκτυπο και στην απόδοση σε τυρί. Κατά τη διαδικασία αυτή, το αλάτι εισχωρεί στο εσωτερικό του τυριού ενώ ταυτόχρονα μια μεγαλύτερη ποσότητα νερού απεγκλωβίζεται απ' αυτό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια σημαντική απώλεια βάρους που ανέρχεται περίπου στο 3% του βάρους του τυριού (Walstra et al., 2005).

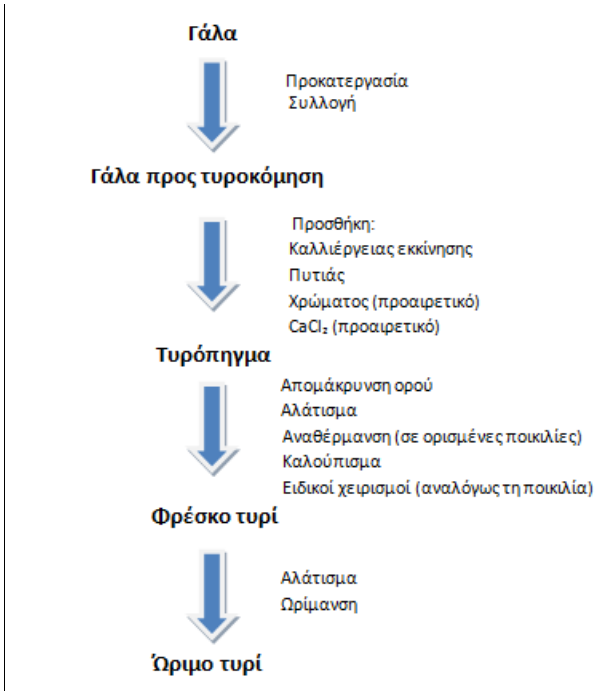
1.3.2 Παραγωγική διαδικασία

Η διαδικασία που ακολουθείται για την παρασκευή του τυριού διαφέρει ανάλογα με το είδος του. Υπάρχουν ωστόσο ορισμένα βασικά στάδια τα οποία ακολουθούνται για την παρασκευή των περισσότερων τύπων τυριού:

1. *Προκατεργασία του γάλακτος*: Στο βήμα αυτό ανήκουν όλες οι διεργασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω και πραγματοποιούνται μετά τη παραλαβή της πρώτης ύλης. Ενδεικτικές αυτών είναι η παστερίωση καθώς και η τυποποίησή του σε λιπαρά.
2. *Προσθήκη οξυγαλακτικής καλλιέργειας*: Έπειτα από την παστερίωση το γάλα φέρεται σε θερμοκρασία ευνοϊκή για την ανάπτυξη των στελεχών της οξυγαλακτικής καλλιέργειας και εμβολιάζεται με την κατάλληλη ποσότητα από αυτή. Η ποσότητα που προστίθεται συνήθως κυμαίνεται από 0,5 έως 3,0% (v/v) αναλόγως και με το είδος του τυριού. Το γάλα με την προστιθέμενη καλλιέργεια, αφήνεται για επώαση για 30 min ώστε να αυξηθεί η οξύτητά του (pH= 6,2- 6,4) (Μάντης 2000).
3. *Πήξη του γάλακτος*: Η πήξη του γάλακτος επιτυγχάνεται με τη χρήση οξέων ή ενζύμων (ή με συνδυασμό και των δύο). Στην περίπτωση της χρήσης οξέων, λαμβάνει χώρα η οξίνιση του γάλακτος που προκαλεί την πτώση του pH του έως το ισοηλεκτρικό σημείο των καζεϊνών (pI=4,6), όπου και επιτυγχάνεται η πήξη του γάλακτος. Στην περίπτωση χρήσης πυτιάς, η χυμοσίνη της πυτιάς προσβάλλει αρχικά την καζεΐνη με αποτέλεσμα τον σχηματισμό παρα-κ-καζεΐνης και στη συνέχεια παρουσία ιόντων ασβεστίου ακολουθεί η πήξη του γάλακτος μέσω του μηχανισμού που αναπτύχθηκε παραπάνω.
4. *Διαίρεση του πήγματος*: Το πήγμα που έχει σχηματιστεί τεμαχίζεται με ειδικούς τυροκόπτες, με σκοπό την αύξηση της επιφάνειάς του, που θα αυξήσει και την αποβολή του ορού γάλακτος. Όσο πιο ξηρό είναι το τυρόπηγμα, τόσο πιο ανθεκτικό γίνεται το παραγόμενο τυρί.

5. *Αναθέρμανση τυροπήγματος*: Λαμβάνει χώρα σε ορισμένες ποικιλίες τυριού, κυρίως στα σκληρά τυριά και αποσκοπεί στην απομάκρυνση μεγαλύτερης ποσότητας τυρογάλακτος. Με τη θέρμανση επέρχεται περαιτέρω συρρίκνωση του πήγματος και αποβάλλεται έτσι περισσότερο τυρόγαλα. Πρόκειται για βραδεία θέρμανση υπό συνεχή ανάδευση η οποία, ανάλογα με το είδος του τυριού, πραγματοποιείται σε θερμοκρασία 38-45°C για χρόνο 30-60 min ή για ορισμένα τυριά σε θερμοκρασία 50-53°C. Η θέρμανση αυτή τονώνει τη μεταβολική δραστηριότητα των οξυγαλακτικών στελεχών με αποτέλεσμα τη παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας γαλακτικού οξέος. Αυτό προκαλεί συρρίκνωση των κόκκων του πήγματος και έξοδο επιπλέον τυρογάλακτος (Μάντης 2000).
6. *Τοποθέτηση του τυροπήγματος σε καλούπια*: Σε αυτό το στάδιο αποβάλλεται μεγαλύτερο μέρος του ορού και το τυρόπηγμα παίρνει τη μορφή του καλουπιού.
7. *Αλάτισμα του τυριού*: Το αλάτισμα αποτελεί βασικό στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας του τυριού, καθώς το αλάτι επηρεάζει τόσο τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του τυριού, όπως είναι το χρώμα και η γεύση, όσο και την ανθεκτικότητα και συνεκτικότητά του. Επιπλέον, το αλάτισμα έχει επίδραση και στη ζύμωση του τυριού.
8. *Ωρίμανση του τυριού*: Το στάδιο της ωρίμανσης είναι ένα από τα βασικότερα στάδια για την παρασκευή του τυριού. Είναι αυτό που καθορίζει και διαμορφώνει το τελικό άρωμα, τη γεύση και την υφή της κάθε ποικιλίας τυριού. Για να επιτευχθεί αυτό, το τυρί θα πρέπει να αποθηκευτεί για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα κάτω από κατάλληλες συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές καθώς και ο χρόνος αποθήκευσης του τυριού προς ωρίμανση, διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος του τυριού.

Στην εικόνα 1.1 δίνονται συνολικά τα βήματα παρασκευής του τυριού.



[Πηγή: Fox, 2000]

Εικόνα 1.2 Διαδικασία παρασκευής τυριού

1.4 Θρεπτική αξία και ασφάλεια τυριού

Το τυρί αποτελεί ένα προϊόν υψηλής διατροφικής αξίας. Περιέχει υψηλής ποιότητας πρωτεΐνες καθώς και μεγάλη περιεκτικότητα σε λιπαρά. Η περιεκτικότητά του σε ασβέστιο κυμαίνεται σε ένα μεγάλο εύρος τιμών και εξαρτάται από τη μέθοδο παρασκευής του. Μπορεί να ξεκινάει από 1 g/Kg και να φτάνει μέχρι και τα 10 g/Kg σε τυρί τύπου Gouda. Η συγκέντρωση των υδατοδιαλυτών βιταμινών Β δεν είναι συνήθως πολύ υψηλή, ενώ η περιεκτικότητά του σε βιταμίνη B_{12} είναι συνήθως πιο υψηλή. Ένα αρνητικό στοιχείο της σύνθεσης του τυριού είναι η υψηλή περιεκτικότητά του σε αλάτι. Στον Πίνακα 1.5 παρουσιάζονται τα διατροφικά στοιχεία ορισμένων ειδών τυριού ανά μερίδα 30g.

Πίνακας 1.5 Διατροφική αξία διαφόρων ποικιλιών τυριού

Τυρί	Πρωτεΐνες (g)	Λίπη (g)	Χοληστερίνη (mg)	Ασβέστιο (mg)	Νάτριο (mg)	Θερμίδες (Kcal)
Φέτα	4,3	6,4	27	140	335	79
Γραβιέρα	8,9	9,7	33	287	101	124
Χαλούμι	6,2	7,5	23	260	290	94
Cheddar	7,6	9,9	32	204	186	121
Ροκφόρ	6,5	9,2	27	198	543	111
Παρμεζάνα	10,7	7,8	20	336	481	118
Μυζήθρα Κρήτης	3,6	4,9	14	71	57	62
Μοτσαρέλα	6,7	6,7	24	143	188	90
Μετσοβόνε	8,6	8,7	24	244	191	113
Μασκαρπόνε	0,9	14,6	37	30	8	119
Λαδοτύρι Μυτιλήνης	7,8	9,7	27	346	181	119
Κεφαλογραβιέρα	8,1	8	23	320	128	105
Κασέρι	7,6	8,9	24	265	253	111
Καλαθάκι Λήμνου	4,9	5,8	21	76	193	83
Edam	7,5	8,3	27	207	290	107
Emmental	8,1	8,3	28	300	58	114
Gouda	6,9	8,4	34	198	246	103
Ανθότυρο	3,5	4,2	17	70	35	54
Regato	8,7	25	22	282	156	107
Cottage	3,3	1,3	5	19	109	29

[Πηγή: USDA, Food and Agricultural Organization,Cheese Statistics]

Ως προς την ασφάλεια του τυριού, τα περιεχόμενα νιτρώδη και νιτρικά είναι πολύ χαμηλότερα από το ανώτατο επιτρεπτό όριο, ακόμη και όταν κατά τη διαδικασία παρασκευής του προστίθεται επιπλέον νιτρικό. Η συγκέντρωση του D(-) γαλακτικού οξέος βρίσκεται πάντα κάτω από τα κατώτατα όρια τοξικότητας, με αυτή όμως να διαφέρει ανάλογα με την ποικιλία τυριού. Επιπλέον, οι περισσότερες ποικιλίες τυριού, περιέχουν λίγο ή και καθόλου λακτόζη, γι' αυτό και μπορούν να καταναλωθούν και από άτομα που πάσχουν από δυσανεξία στη λακτόζη.

Ορισμένες φορές μπορούν να βρεθούν στο τυρί χαμηλές συγκεντρώσεις νιτροζαμινών [R1–N(–N=O)–R2]. Υπεύθυνη, αρχικά, είχε θεωρηθεί η προσθήκη νιτρικών, αλλά αυτή η θεώρηση αποδείχτηκε λανθασμένη. Οι ενώσεις αυτές ωστόσο είναι ελαφρώς

μεταλλαξιογόνες, και μόνο εάν ενεργοποιηθούν. Ως εκ τούτου, η καρκινογένεσή τους παραμένει πολύ αμφίβολη (Walstra et al., 2005).

Στο τυρί μπορούν ακόμη να σχηματιστούν αμίνες, λόγω της αποκαρβοξυλίωσης των αμινοξέων. Ορισμένες από αυτές τις αμίνες μπορεί να είναι τοξικές. Η αποκαρβοξυλίωση των αμινοξέων μπορεί να προκληθεί από ορισμένα είδη βακτηρίων και πιθανώς και κάποιους μικροοργανισμούς. Επομένως, για την αποφυγή σχηματισμού αμινών στο τυρί, σημαντική είναι η θερμική κατεργασία (συνήθως παστερίωση) του καθώς και η κατάλληλη επιλογή των καλλιεργειών εκκίνησης, ώστε να μην είναι υπεύθυνα για την παραγωγή αμινών κι άλλων ειδών μικροχλωρίδας (Loizzo et al., 2013).

Περιστασιακά, μπορούν να βρεθούν ορισμένοι παθογόνοι μικροοργανισμοί στο τυρί , αλλά οι περισσότεροι που μπορεί να βρεθούν στο γάλα δεν εμφανίζονται σε αυτό. Σε αυτό βοηθά η παστερίωση του γάλακτος, μέσω της οποίας σκοτώνονται όλοι οι πιθανώς επιβλαβείς μικροοργανισμοί. Επιπλέον, οι περισσότεροι δε μπορούν να αναπτυχθούν στο τυρί λόγω της υψηλής του οξύτητας και της μεγάλης περιεκτικότητάς του σε αλάτι. Τα περισσότερα προβλήματα εμφανίζονται σε τυριά που παρασκευάζονται από νωπό γάλα αν οι κανόνες υγιεινής κατά τη διαδικασία παρασκευής του δεν εφαρμόζονται. Στο μαλακό τυρί μπορεί να εμφανιστούν ορισμένες φορές παθογόνα κολοβακτηρίδια. Η *Salmonella* σπάνια εμφανίζεται σε ποσότητες που μπορούν να καταστήσουν το τρόφιμο επιβλαβές. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτεί ο μικροοργανισμός *Listeria monocytogenes*, επειδή μπορεί να αναπτυχθεί στην επιφάνεια του τυριού, ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπου και μπορεί να επιβιώσει για ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα (Walstra et al., 2005).

1.5 Είδη τυριών

Ο μεγάλος αριθμός τυριών που παρασκευάζονται σήμερα ανά τον κόσμο, οι διαφορετικές ποικιλίες ανάμεσα στα είδη τους καθώς και το γεγονός ότι δε χρησιμοποιούνται κοινά κριτήρια από τις διάφορες χώρες, καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη την ύπαρξη ενός γενικά αποδεκτού τρόπου ταξινόμησής τους. Χρησιμοποιούνται επομένως διάφορα σχήματα ταξινόμησής τους ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται κάθε φορά ως κριτήριο (Belitz et al.,2009; Μάντης, 2000).

Με βάση τη δομή και τη συνεκτικότητά τους τα τυριά διακρίνονται σε :

a) Μαλακά (π.χ. Mozzarella, Cottage, Cream Cheese, Φέτα κ.α.)
b) Ημίσκληρα (π.χ. Gouda, Edam κ.α.)
c) Σκληρά (π.χ. Provolone, Emmental, Κασέρι κ.α.)
d) Πολύ σκληρά (π.χ. Parmigiano, Pecorino κ.α.)

Με κριτήριο την απαίτηση και τον τρόπο ωρίμανσης διακρίνονται σε :

a) Τυριά που δεν ωριμάζουν (Cottage, Ricotta κ.α.)
b) Τυριά που ωριμάζουν με βακτήρια που αναπτύσσονται σε όλη τη μάζα τους. Στη κατηγορία αυτή υπάγονται τα περισσότερα είδη τυριών.
c) Τυριά που ωριμάζουν με εσωτερική ανάπτυξη μυκήτων (Roquefort, Danablu κ.α.)
d) Τυριά που ωριμάζουν με επιφανειακή ανάπτυξη μυκήτων ή βακτηρίων (π.χ. Camembert, Limburger κ.α.)

Με βάση τη λιποπεριεκτικότητά τους ταξινομούνται σε:

a) Τυρί διπλής κρέμας : 60-85% λίπος

b) Τυρί κρέμας : ≥50%
c) Ολόπαχο τυρί : ≥ 45%
d) Τυρί με λίπος : ≥40%
e) Ημίπαχο τυρί : ≥20%
f) Αποβουτυρωμένο τυρί : μέγιστο 10%

Στους Πίνακες 1.6 και 1.7 παρουσιάζονται τα κύρια είδη τυριών που δεν ωριμάζουν καθώς κι αυτά που ωριμάζουν με βακτήρια και ορισμένα χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 1.6 Κύρια είδη τυριών που δεν ωριμάζουν

Είδος τυριού	Χώρα προέλευσης	Είδος γάλακτος	Οξυγαλακτική καλλιέργεια	pH	Υγρασία %	Λίπος %	Πρωτεΐνες %	NaCl
Από Γάλα								
Cottage	Η.Π.Α	AA	LL.LC, LS, LD	5,0	80	0,4	14	1,0
Baker's	Αγγλία	A	LL.LC, LS, LD	4,4	74	0,2	19	1,0
Cream Cheese	-	A	LL.LC, LS, LD	4,6	54	33	10	0,7
Quarg	Κεν. Ευρ.	AA	SD, SC, LDx	4,5	60	0-12	15	0,7
Mozzarella		AB	ST, LB	5,2	56	18	22	0,7
Ricotta	Η.Π.Α	A	LB, ST	5,9	72	12	11	<0,5
Χαλούμι	Κύπρος	Π.ΑΠ.	Άνευ	6,0	42	28	25	4-5
Από Τυρόγαλα								
Ricotta	Ιταλία	Τυρόγαλα	Άνευ	4,9	73	0,5	11	<0,5
Μυζήθρα(νωπή)	Ελλάδα	Τυρόγαλα	Άνευ	5,8	65-70	5-10	10-14	1,2
Μανούρι	Βαλκάνια	Τυρόγαλα	Άνευ	5,9	42-50	30-40	10-12	1,4
Ανθότυρος	Ελλάδα	Τυρόγαλα	Άνευ	5,8	65-70	20-21	10-12	1,0

Πίνακας 1.7 Κύρια είδη τυριών που ωριμάζουν με βακτήρια

Είδος τυριού	Χώρα προέλευσης	Είδος γάλακτος	Οξυγαλακτική καλλιέργεια	Χρόνος Ωρίμανσης (μήνες)	pH	Υγρασία (%)	Λίπος (%)	Πρωτεΐνες (%)	NaCl (%)
Πολύ Σκληρά									
Παρμεζάνα	Ιταλία	Α	ST,LB	24-48	5,5	30	28	34	2,3
Pecorino	Ιταλία	Π	ST,LH	8-12	5,3	36	32	26	4,7
Σκληρά									
Cheddar	Αγγλία	Α	LC,LL,LD	4-12	5,5	37	32	25	1,5
Κεφαλοτύρι	Ελλάδα	Π,ΠΑ,Α	ST,LB	3-5	5,1	35	31	24	5,0
Λαδοτύρι	Ελλάδα	Π,ΑΠ	ST,LB	2-3	5,3	34	31	26	1,8
Σκληρά (με οπές)									
Emmental	Ελβετία	Α	LH,ST,PS	6-12	5,6	35	30	30	1,2
Γραβιέρα	Ελλάδα	Π	LC,LC	2-3	5,0	-	-	-	-
Κεφαλογραβιέρα	Ελλάδα	Α+ΑΠ	LB,ST	2-3	5,2	36	36	31	-
Σκληρά τύπου pasta filata									
Provolone	Ιταλία	Α	LB	2-3	5,4	42	27	25	3,0
Κασέρι	Ελλάδα	Π,ΑΠ	ST,LB	2-3	6,0	38	28	27	2,2
Μετσοβόνε	Ελλάδα	Α	ST,LB	2-3	5,8	32	33	27	3,2
Ημίσκληρα με οπές									
Edam	Ολλανδία	Α	LL,LD,LC	1-2	5,7	42	24	26	2,0
Gouda	Ολλανδία	Α	LL,LD,LC	1-2	5,8	40	28	26	2,0
Άλμης									
Φέτα	Ελλάδα	Π,ΑΠ	ST,LB	1,5-2	4,3	52	24	20	2,5
Τελεμές	Ρουμανία	Π,ΑΠ	ST,LB	1,5-2	4,2	54	22	18	3,0

[Πηγή:Μάντης, 2000]

ΑΑ= Αγελαδινό Αποβουτυρωμένο, Α=Αγελαδινό, Π= Πρόβειο, ΑΠ= Αιγοπρόβειο, Β= Βουβαλινό, ST= *S. thermophilus,* LL= *L. lactis,* LC= *L. cremoris,* LD= *L. diacetilactis,* LB= *L. bulgaricus,* LH= *L. helveticus,* LC= *Leuc. citrovorum,* LDx= *Leuc. dextranicum,* BLN= *Brev. linens,* PS= *Propionibacterium shermanii,* LCa= *Lactobacillus casei.*

Όπως φαίνεται και από τους παραπάνω πίνακες, τα τυριά τα οποία ωριμάζουν με βακτήρια, στην οποία κατηγορία ανήκουν και τα περισσότερα είδη τυριών, μπορούν να διακριθούν σε άλλες επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με τη δομή και τη συνεκτικότητά τους. Αξίζει να γίνει μια ιδιαίτερη αναφορά στα τυριά άλμης, στα οποία και εστιάζει η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

1.5.1 Τυριά άλμης

Τα τυριά άλμης είναι από τις παλιότερες ποικιλίες τυριών. Η προέλευσή τους χρονολογείται γύρω στα 8000 χρόνια πριν στις περιοχές της Μέσης Ανατολής και της Μεσογείου. Μέχρι και σήμερα στις περιοχές αυτές, η παρασκευή και η εμπορία τέτοιων τυριών παραμένει σε αρκετά υψηλά ποσοστά, κατατάσσοντας τα τυριά άλμης περίπου στο 6% της παγκόσμιας παραγωγής τυριού (Tamime, 2006). Τα τυριά της κατηγορίας αυτής έχουν κοινό χαρακτηριστικό το ότι ωριμάζουν και διατηρούνται σε άλμη. Αντιπροσωπεύονται κυρίως από την ελληνική Φέτα, τον Τελεμέ, το Χαλούμι Κύπρου και το Αιγυπτιακό Domiati. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται και ορισμένα ακόμα λευκά τυριά άλμης που καταναλώνονται σε διάφορες χώρες (Μάντης, 2000).

Πίνακας 1.8 Κύρια είδη τυριών που ωριμάζουν με βακτήρια

Χώρα Προέλευσης	Ονομασία
Αίγυπτος	Beda, Kariesch
Βουλγαρία	Bjalo salamureno sirene ('feta'), Telemea bulgarsca
Ελλάδα	Φέτα, Τελεμές
Ισραήλ	Djibne
Ρουμανία	Telemea sarata (brinsa de Braila)
Συρία	Sirena
Τουρκία	Beyaz peynir, Teleme

1.5.1.1 Η Φέτα

Η Φέτα είναι ένα ελληνικό τυρί που παρασκευάζεται στη χώρα μας από αρχαιοτάτων χρόνων (Εικόνα 1.3). Πρόκειται για ένα τυρί το οποίο έχει αναγνωριστεί ως Π.Ο.Π. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει αρχικά μία αναφορά στη σημασία της έννοιας «Τυρί Π.Ο.Π. (Προστατευόμενης Ονομασίας Προέλευσης)».

Εικόνα 1.3 Παραδοσιακή Φέτα

Σύμφωνα με τον Κ.Τ.Π., ως «Προστατευόμενη Ονομασία Προέλευσης (Π.Ο.Π.)» νοείται το όνομα μιας περιοχής, ενός συγκεκριμένου τόπου ή σε εξαιρετικές περιπτώσεις μιας χώρας, το οποίο χρησιμοποιείται στην περιγραφή ενός γεωργικού προϊόντος ή ενός τροφίμου που κατάγεται από αυτήν την περιοχή, το συγκεκριμένο τόπο ή τη χώρα και του οποίου η ποιότητα ή τα χαρακτηριστικά οφείλονται κυρίως ή αποκλειστικά στο γεωγραφικό περιβάλλον που περιλαμβάνει τους φυσικούς και ανθρώπινους παράγοντες και του οποίου η παραγωγή, η μεταποίηση και η επεξεργασία λαμβάνουν χώρα στην οριοθετημένη γεωγραφική περιοχή. Ορισμένα ελληνικά τυριά που έχουν αναγνωριστεί ως Π.Ο.Π. είναι η Γραβιέρα Νάξου, η Γραβιέρα Κρήτης, η Κεφαλογραβιέρα, το Λαδοτύρι Μυτιλήνης, το Κασέρι, η Σφέλα, το Μετσοβόνε, η Κοπανιστή, το Καλαθάκι Λήμνου, το Κατίκι Δομοκού, η Ξινομυζήθρα Κρήτης και η Φέτα η οποία αποτελεί το πιο διαδεδομένο τυρί .

Η αναγνώριση της Φέτας ως Π.Ο.Π. προϊόν υπήρξε ιδιαίτερα δύσκολη λόγω του ενδιαφέροντος που υπάρχει για το εν λόγω τυρί σε διεθνές επίπεδο. Πολλές χώρες της Ευρώπης έχουν ιστορία πολλών ετών στη παραγωγή λευκού τυριού με το όνομα Φέτα. Ακόμη και σήμερα συνεχίζει να βάλλεται με προσφυγές στο ευρωπαϊκό δικαστήριο για άρση της αναγνώρισης. Τελευταία κατοχύρωση του ονόματός της πραγματοποιήθηκε στις 15/10/2002, ύστερα από προσφυγή της Δανίας και της Γερμανίας κατά του κανονισμού και μέχρι και σήμερα συνεχίζει να αναγνωρίζεται ως Π.Ο.Π τυρί (Ζερφυρίδης, 2001).

Ως Π.Ο.Π. τυρί λοιπόν έχει αυστηρές προδιαγραφές παρασκευής. Σύμφωνα με τον Κ.Τ.Π., το γάλα που χρησιμοποιείται για την παρασκευή της Φέτας είναι κατά βάση πρόβειο ή αιγοπρόβειο, με το γίδινο γάλα όμως να μη ξεπερνάει σε ποσοστό το 30%. Επιπλέον, πρέπει να προέρχεται αποκλειστικά από τις περιοχές Μακεδονίας, Θράκης, Ηπείρου, Θεσσαλίας, Στερεάς Ελλάδας, Πελοποννήσου και του νομού Λέσβου. Είναι επίσης επιβεβλημένο η λιποπεριεκτικότητά του να είναι τουλάχιστον 6% κατά βάρος. Η πήξη του γάλακτος πρέπει να γίνεται εντός 48 ωρών από την άμελξη με χρήση παραδοσιακής πυτιάς ή άλλων ενζύμων με ανάλογη δράση. Επιπροσθέτως απαγορεύεται η συμπύκνωση, η προσθήκη σκόνης ή συμπυκνώματος γάλακτος, πρωτεϊνών γάλακτος, καζεϊνικών αλάτων καθώς και χρωστικών και συντηρητικών ουσιών.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά ποιοτικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά της Φέτας, όπως δίνονται από τον Κ.Τ.Π.

- ✓ Μέγιστη Υγρασία: 56%
- ✓ Ελάχιστη λιποπεριεκτικότητα επί ξηρού: 43%
- ✓ Συνεκτικότητα: Μαλακό τυρί που μπορεί να κόβεται σε φέτες
- ✓ Σχήμα: Σφηνοειδές ή ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου
- ✓ Διαστάσεις: Διάφορες
- ✓ Βάρη: Διάφορα
- ✓ Υφή: Συμπαγής με λίγες μηχανικές σχισμές
- ✓ Χρώμα: Καθαρό λευκό
- ✓ Οπές: Καθόλου ή λίγες
- ✓ Σχήμα οπής: Ακανόνιστο
- ✓ Γεύση: Λιπόλυσης, ευχάριστη, ελαφρά όξινη, πλούσιο άρωμα

1.5.1.1.1 Παρασκευή Φέτας

Για την παρασκευή της παραδοσιακής Φέτας ακολουθείται κατά βάση η διαδικασία που παρουσιάστηκε παραπάνω, ωστόσο αξίζει να αναφερθούμε λίγο πιο εκτενώς σε καθένα από τα βήματα αυτής.

Προκατεργασία Γάλακτος

Το λαμβανόμενο γάλα για την παρασκευή Φέτας πρέπει να πληροί όλες τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Μετά τη συλλογή του ακολουθεί η παστερίωσή του και κατόπιν φυλάσσεται για ένα εγκεκριμένο, από τον ΚΤΠ, διάστημα σε κατάλληλες συνθήκες. Επιπλέον ορισμένες φορές, όταν καθίσταται αναγκαίο, γίνεται προσθήκη σε αυτό χλωριούχου ασβεστίου, μέχρι 20 g/ 100 kg γάλακτος, για αύξηση της συνεκτικότητας του πήγματος.

Προσθήκη οξυγαλακτικής καλλιέργειας

Η προσθήκη της σωστής καλλιέργειας φαίνεται να έχει καθοριστικό ρόλο στην επιτυχία του παραγόμενου τυριού. Αφού λοιπόν το γάλα ψυχθεί, μετά το πέρας της παστερίωσής του, προστίθεται σε αυτό οξυγαλακτική καλλιέργεια εκκίνησης. Συνήθως πρόκειται για μίγμα *Streptococcus thermophilus* και *Lactobacillus bulgaricus* σε αναλογία 1-2% , καθώς φαίνεται ότι ο συνδυασμός αυτών των βακτηρίων είναι ο πιο οξυπαραγωγός στις συνθήκες παρασκευής της Φέτας. Ορισμένες φορές μπορεί να γίνει χρήση γιαούρτης αντί της καθαρής καλλιέργειας σε μια αναλογία 0,3-0,5%, λόγω του ότι η προετοιμασία και η διατήρησή της είναι ευκολότερη. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε βιομηχανίες μικρής κλίμακας.

Πήξη του γάλακτος

Η πήξη του γάλακτος πραγματοποιείται με τη χρήση πυτιάς. Σε ό,τι αφορά στην ποσότητα της προστιθέμενης πυτιάς, αυτή εξαρτάται από την πηκτική της δύναμη καθώς και τον επιδιωκόμενο χρόνο πήξης. Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει επίσης η οξύτητα και η θερμοκρασία του γάλακτος κατά την πήξη. Χαμηλή θερμοκρασία και οξύτητα γάλακτος οδηγούν σε πήγμα με μικρή συνεκτικότητα που δίνει τυρί με υψηλή υγρασία, ενώ όταν το γάλα είναι όξινο και η θερμοκρασία υψηλή λαμβάνεται το αντίθετο αποτέλεσμα. Η θερμοκρασία που συνήθως επιλέγεται για την πήξη του γάλακτος είναι οι 32°C.

Διαίρεση πήγματος

Μετά από 30-60 min από την πήξη του γάλακτος, το τυρόπηγμα διαιρείται με τη χρήση του τυροκόπτη σε κύβους ακμής 1-2 cm. Τα κομμάτια που δημιουργούνται από τον τυροκόπτη πρέπει να είναι ομοιόμορφα ώστε να μη δημιουργούνται τρίμματα που θα απομακρυνθούν με το τυρόγαλα και θα μειώσουν την απόδοση της τυροκόμησης. Στη συνέχεια απορρίπτεται από το τυρόπηγμα το τυρόγαλα.

Καλούπιασμα τυροπήγματος

Εν συνεχεία το τυρόπηγμα τοποθετείται σε ειδικά διαμορφωμένα καλούπια για φυσική στράγγιση. Τα καλούπια είναι μεταλλικά ανοξείδωτα ή πλαστικά, σε ορθογώνιο ή κυλινδρικό σχήμα, με μεγάλο αριθμό οπών σε όλη τους την επιφάνεια για να διευκολύνεται η στράγγιση του τυροπήγματος (Εικόνα 1.4). Όταν το τυρί πρόκειται να συσκευαστεί σε βαρέλια χρησιμοποιούνται τα κυλινδρικά καλούπια, ενώ, αν η συσκευασία γίνει σε δοχεία, τα ορθογώνια.

Μετά την τοποθέτηση του τυροπήγματος στα καλούπια, αυτά αφήνονται με κλίση πάνω σε τυροτράπεζα και περιστρέφονται περιοδικά για να διευκολυνθεί η απομάκρυνση του τυρογάλακτος. Ανά 2-3 ώρες τα καλούπια αναστρέφονται για να επιτευχθεί καλύτερη απομάκρυνση του ορού. Αφού επαναληφθεί αυτό για 2-3 φορές, η τυρομάζα εξάγεται από τα καλούπια και αφού τεμαχιστεί κατάλληλα τοποθετείται πάνω στην τυροτράπεζα για να ακολουθήσει το αλάτισμα.

Εικόνα 1.4 Ορθογώνιο καλούπι για το στράγγισμα της Φέτας

Αλάτισμα

Το αλάτισμα της Φέτας πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση περιλαμβάνει το ξηρό αλάτισμα του τυριού ενώ η δεύτερη την εμβάπτισή του σε άλμη. Σε πρώτη φάση λοιπόν, το αλάτισμα γίνεται με χονδρόκοκκο αλάτι , σε ποσότητα περίπου 3% του βάρους του τυριού. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται 2-3 φορές σε διάστημα 3-5 ημερών. Στη συνέχεια τα τεμάχια αφού εκπλυθούν με άλμη, τοποθετούνται σε ειδικά δοχεία ή βαρέλια, καλύπτονται με άλμη 5-7% και παραμένουν έτσι για δέκα περίπου μέρες. Στο τέλος του σταδίου αυτού, η συγκέντρωση άλατος μέσα στο τυρί να είναι 5-6%.

Ωρίμανση

Το τελευταίο στάδιο της παρασκευής της Φέτας είναι αυτό της ωρίμανσης (Εικόνα 1.5). Σύμφωνα με τον Κ.Τ.Π., η ωρίμαση θα πρέπει να πραγματοποιείται σε δύο στάδια, το πρώτο εκ των οποίων διαρκεί 10-15 ημέρες και περιλαμβάνει την εμβάπτιση του τυριού σε άλμη σε θερμοκρασία 16-18°C. Το δεύτερο στάδιο ωρίμανσης πραγματοποιείται υπό ψύξη σταθερής θερμοκρασίας 2-4°C και σε σχετική υγρασία τουλάχιστον 85%. Το τυρί παραμένει εκεί έως ότου συμπληρωθεί ο ελάχιστος συνολικός χρόνος ωρίμανσης της Φέτας που είναι δύο μήνες (Ανυφαντάκης, 1981; Μάντης, 2000).

Εικόνα 1.5 Ωρίμανση Φέτας σε ξύλινα βαρέλια

2. Μικροβιολογία τυριού- Μέθοδοι συντήρησης

2.1 Γενικά

Τα τρόφιμα λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε θρεπτικά συστατικά και της ευκολίας μολύνσεώς τους, θεωρούνται πάντοτε φορείς μικροβίων. Ο όρος «μικρόβιο» ή «μικροοργανισμός» είναι τεχνολογικός όρος και αφορά σε ένα σύνολο έμβιων όντων από διάφορες ταξινομικές ομάδες με ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά. Οι μικροοργανισμοί είναι αόρατοι με γυμνό οφθαλμό, με μικροσκοπικές διαστάσεις μεγαλύτερες από τη διακριτική ικανότητα του μικροσκοπίου (0,16 μ). Πρόκειται για μονοκύτταρους οργανισμούς ή κοινοκυτταρικούς χωρίς εγκάρσια τοιχώματα, ή ακόμα και πολυκυτταρικούς χωρίς όμως διαφοροποίηση των κυττάρων για σχηματισμό οργάνων ή ιστών. Τα μικρόβια αυτά συμμετέχουν στις φυσικοχημικές και βιολογικές μεταβολές που συμβαίνουν στα τρόφιμα.
Ανάλογα με την πηγή άνθρακα, αζώτου και ενέργειας, τα μικρόβια διαιρούνται σε τέσσερις ομάδες: τα φωτοαυτότροφα, τα φωτοετερότροφα, τα χημειοαυτότροφα και τα χημειοετερότροφα. Η ομάδα μικροβίων που ενδιαφέρει κυρίως τη μικροβιολογία τροφίμων είναι τα χημειοετερότροφα, τα οποία χρησιμοποιούν ως πηγή άνθρακα οργανικές ουσίες και αντλούν ενέργεια από οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις οργανικών ουσιών.

2.2 Παράγοντες ανάπτυξης μικροοργανισμών στα τρόφιμα

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το μεταβολισμό και κατ' επέκταση τον πολλαπλασιασμό των μικροβίων στα τρόφιμα διακρίνονται σε: α) ενδογενείς, που σχετίζονται με τη σύσταση του τροφίμου (pH, a_w, θρεπτικά συστατικά κ.α.) και β) εξωγενείς, που σχετίζονται με τις συνθήκες συντήρησης (T, RH, P κ.α.).

2.2.1 Θρεπτικά συστατικά υποστρώματος

Η σημασία της χημικής σύστασης του υποστρώματος για την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό των μικροβίων είναι προφανής, δεδομένου ότι τα μικρόβια που προκαλούν αλλοιώσεις στα τρόφιμα είναι ετερότροφοι οργανισμοί και έχουν ανάγκη από έτοιμη τροφή. Τα μικρόβια επομένως που θα αναπτυχθούν θα πρέπει να βρουν στο υπόστρωμα όλα τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξή τους.

Γενικά τα τρόφιμα, αλλά και ειδικότερα τα γαλακτοκομικά προϊόντα, είναι πλούσια σε θρεπτικά συστατικά κι αυτό τα καθιστά ικανά να υποστηρίξουν την ανάπτυξη πολλών ειδών μικροβίων. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που τα τρόφιμα είναι τόσο ευαίσθητα σε αλλοιώσεις. Τα θρεπτικά συστατικά που θα πρέπει να περιέχονται στο υπόστρωμα ανάπτυξης των μικροβίων είναι:

- ✓ Μία ή περισσότερες πηγές άνθρακα.
- ✓ Μία πηγή αζώτου.
- ✓ Επιβοηθητικούς τροφικούς παράγοντες (βιταμίνες).
- ✓ Ανόργανα άλατα και ανόργανα συστατικά.

2.2.2 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας ανάπτυξης των μικροβίων. Για κάθε είδος μικροβίου υπάρχει ελάχιστη, άριστη και μέγιστη θερμοκρασία ανάπτυξης. Σε όλο το εύρος της διακύμανσης μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης θερμοκρασίας, λαμβάνει χώρα κανονική σύνθεση πρωτοπλάσματος, αύξηση του μικροβιακού κυττάρου και πολλαπλασιασμός, με διαφορετικό όμως ρυθμό. Σε θερμοκρασία κατώτερης της ελάχιστης για ανάπτυξη του μικροβίου και ανώτερης της μέγιστης, ο πολλαπλασιασμός διακόπτεται, ενώ σε μεγαλύτερες της μέγιστης θερμοκρασίες επέρχεται ο θάνατος του κυττάρου.

Οι μικροοργανισμοί, ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία μπορούν να αναπτυχθούν διακρίνονται σε:

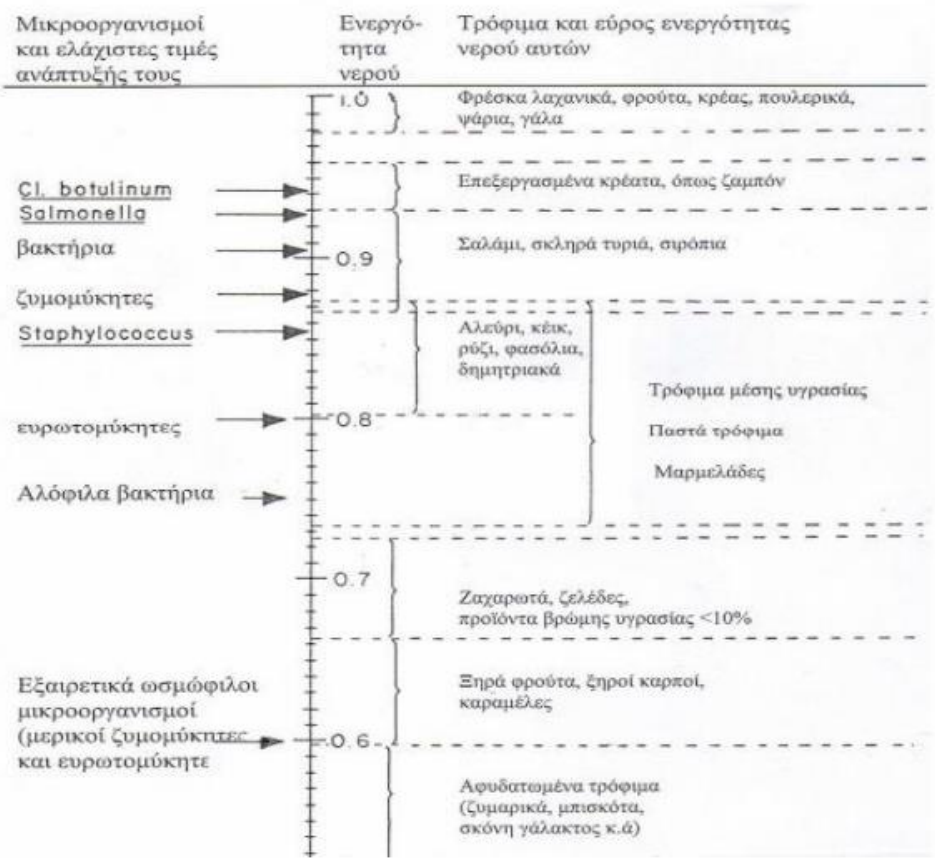
- ✓ *Ψυχρόφιλους*: Αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες μεταξύ -5 και 20°C.
- ✓ *Ψυχρότροφους*: Αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 0 και 30°C.
- ✓ *Μεσόφιλους*: Αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 5 και 40°C.
- ✓ *Θερμόφιλους*: Αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 35 και 60°C. (Ταούκης κ.α., 2009)

2.2.3 Υγρασία- Ενεργότητα νερού

Κάθε γνωστή μορφή ζωής, για να επιβιώσει έχει ανάγκη από νερό. Το ίδιο συμβαίνει και με τα μικρόβια, τα οποία για να αναπτυχθούν, να δραστηριοποιηθούν και να πολλαπλασιαστούν έχουν ανάγκη ορισμένης ποσότητας νερού, που το λαμβάνουν από το περιβάλλον στο οποίο ζουν. Το νερό στα τρόφιμα βρίσκεται υπό μορφή δεσμευμένου και ελεύθερου. Το χημικώς δεσμευμένο νερό δεν έχει καμία σπουδαιότητα για την ανάπτυξη των μικροβίων, αφού δεν είναι διαθέσιμο για χημικές ή ενζυμικές δράσεις και έχει διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες από εκείνες του καθαρού νερού. Το νερό αυτό επομένως δε συμβάλλει στην ανάπτυξη των μικροβίων.
Αντίθετα, το «ελεύθερο νερό» έχει πολύ μεγάλη σημασία για την ανάπτυξη των μικροβίων, γιατί διατηρεί τις φυσικοχημικές ιδιότητες του καθαρού νερού. Συνεπώς, η αφαίρεση ή η δέσμευση ενός μεγάλου μέρους του νερού αυτού, μπορεί να επιφέρει την αναστολή της ανάπτυξης των μικροβίων. Η αρχή αυτή βρίσκει εφαρμογή σε πολλές μεθόδους επεξεργασίες των τροφίμων με σκοπό τη συντήρησή τους, όπως είναι η αφυδάτωση, η κατάψυξη, καθώς και η συντήρηση τους με χημικές ουσίες (με προσθήκη άλατος ή ζάχαρης) (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009).
Το μέγεθος το οποίο καθορίζει το ελάχιστο όριο του διαθέσιμου νερού για μικροβιακή ανάπτυξη και δράση, είναι η ενεργότητα του νερού, a_w. Πρόκειται για μία θερμοδυναμική ιδιότητα που ορίζεται ως ο λόγος της τάσης ατμών του νερού στο τρόφιμο προς τη τάση ατμών του καθαρού νερού (Rahman M.S. & Labuza T.P. 2007). Γενικά, οι μικροοργανισμοί, δεν αναπτύσσονται σε τιμές ενεργότητας νερού μικρότερες από 0,65- 0,70. Πιο συγκεκριμένα:

- ✓ Τα αρνητικά κατά Gram βακτήρια, ψευδομονάδες και εντεροβακτήρια, αναπτύσσονται σε τιμές a_w άνω των 0,96 και 0,93 αντίστοιχα.
- ✓ Τα περισσότερα γαλακτοβακτήρια και εντεροβακτήρια αναπτύσσονται μέχρι τιμής a_w ίσης προς 0,94, με εξαίρεση ορισμένους μικρόκοκκους που αναπτύσσονται σε τιμή a_w 0,90 ή και κατώτερης.
- ✓ Τα περισσότερα είδη βακίλλων αναπτύσσονται σε τιμές a_w μεταξύ 0,89 και 0,94.
- ✓ Οι μύκητες αναπτύσσονται με βραδύτερο ρυθμό απ' ότι τα βακτήρια σε υποστρώματα με υψηλές τιμές a_w, διατηρούν όμως την αποκλειστικότητα για ανάπτυξη σε υποστρώματα και τρόφιμα με ασυνήθιστα χαμηλές τιμές ενεργότητας νερού (Ταούκης κ.α, 2009).

Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζονται οι ελάχιστες τιμές ενεργότητας νερού για την ανάπτυξη ορισμένων μικροοργανισμών.



Εικόνα 2.1 Ελάχιστες τιμές ενεργότητας νερού για την ανάπτυξη ορισμένων μικροοργανισμών και τυπικό εύρος ενεργότητας νερού μερικών τροφίμων

2.2.4 Το pH

Τα μικρόβια που αναπτύσσονται στα τρόφιμα ή τα θρεπτικά υποστρώματα με αλκαλικό pH είναι περιορισμένα και είναι κυρίως βακτήρια. Τα ίδια αναπτύσσονται και σε ουδέτερο ή ελαφρά όξινο pH μαζί με ομο- και ετεροζυμωτικά γαλακτοβακτήρια, βακίλλους, μικρόκκοκους κ.α. Στα όξινα τρόφιμα αναπτύσσονται τα γαλακτοβακτήρια, τα ζαχαρολυτικά κλωστηρίδια, οι ζύμες και οι μύκητες.

Η περιοχή τιμών pH στο οποίο μπορούν να αναπτυχθούν τα μικρόβια είναι 4-8, ενώ υπάρχουν και ιδιαιτέρως ανθεκτικά μικρόβια, όπως οι ζύμες και οι μύκητες, ορισμένα των οποίων αναπτύσσονται και σε τιμές pH κατώτερες του 4.

2.2.5 Δυναμικό οξειδοαναγωγής

Το δυναμικό οξειδοαναγωγής είναι μέτρο της τάσεως του οξυγόνου στο χώρο του τροφίμου ή του υποστρώματος, όπου αναπτύσσονται οι μικροοργανισμοί. Με βάση τις απαιτήσεις σε τιμές Eh, οι μικροοργανισμοί μπορούν να διακριθούν σε:

- ✓ *Αερόβιους*: Στην ομάδα αυτή ανήκουν πολλά μικρόβια που συναντώνται στη φύση. Αυτά είναι σε θέση να διασπάσουν τις οργανικές ουσίες μόνο όταν υπάρχει διαθέσιμο μοριακό οξυγόνο. Την απαιτούμενη ενέργεια λαμβάνουν διαμέσου της αναπνοής, καθώς με τη βοήθεια του οξυγόνου οξειδώνουν τις διάφορες ουσίες.
- ✓ *Αναερόβιους:* Μερικά είδη μικροοργανισμών ζουν χωρίς οξυγόνο. Για αυτούς τους μικροοργανισμούς το οξυγόνο που υπάρχει στη φυσική ατμόσφαιρα είναι βλαβερό ή θανατηφόρο. Τα αναερόβια μικρόβια λαμβάνουν την απαραίτητη γι' αυτά ενέργεια από τη ζύμωση οργανικών ουσιών, ενώ ταυτόχρονα παράγουν μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα, οργανικά οξέα, αιθυλική αλκοόλη και άλλες χημικές ουσίες, σαν προϊόντα του μεταβολισμού τους. Στα αναερόβια μικρόβια ανήκουν, μεταξύ άλλων, βακτήρια του γένους Clostridium. Αρκετά από τα αναερόβια είναι παθογόνα, όπως επίσης και πρωτεολυτικά.
- ✓ *Προαιρετικώς αναερόβιοι/μικροαερόφιλοι*: Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα οξυγαλακτικά βακτήρια, τα οποία παίζουν σπουδαίο ρόλο στην παραγωγή του τυριού, μετατρέποντας τη λακτόζη σε γαλακτικό οξύ.

2.2.6 Άλλοι παράγοντες

Εκτός από αυτούς που αναφέρθηκαν, υπάρχει και μια σειρά άλλων παραγόντων που επηρεάζουν τη μικροβιακή ανάπτυξη, ορισμένοι εκ των οποίων είναι:

- ✓ Η αεριώδης ατμόσφαιρα στο χώρο ανάπτυξης του μικροοργανισμού, και ειδικότερα η περιεκτικότητα σε οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα.
- ✓ Τα προϊόντα μεταβολισμού των ίδιων των μικροβίων, τα οποία επηρεάζουν την τιμή του pH ή είναι τοξικά για τα ίδια τα κύτταρα.
- ✓ Η προσβολή των μικροβίων από φάγους που παρεμποδίζει ή μηδενίζει τον πολλαπλασιασμό των κυττάρων.

2.3 Ομάδες μικροοργανισμών στο τυρί

Το τυρί, όπως και τα περισσότερα τρόφιμα, δεν είναι στείρο προϊόν. Όλα τα είδη που ωριμάζουν φέρουν, σε σχετικά μεγάλους πληθυσμούς, τα οξυγαλακτικά βακτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για τη ζύμωση και ωρίμανσή τους. Παράλληλα, και ανάλογα με τις συνθήκες υγιεινής που επικρατούν κατά τα διάφορα στάδια της παραγωγής τους, προστίθενται κι άλλα βακτήρια, ζύμες ή μύκητες. Ο πληθυσμός αυτός δε μένει σταθερός αλλά μεταβάλλεται ποιοτικά και ποσοτικά. Η πορεία της μεταβολής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το βαθμό οξύτητας, τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση του NaCl, την ενεργότητα νερού κ.α. Υπό ομαλές συνθήκες εξέλιξης της ζύμωσης, το αρχικό μικροβιακό φορτίο του τυριού μειώνεται σταθερά και με το πέρας της ωρίμανσης πολλά είδη βακτηρίων, μεταξύ των οποίων και ορισμένα παθογόνα, δεν ανευρίσκονται πλέον.

Αμέσως μετά την παρασκευή του τυριού, η μικροχλωρίδα του αποτελείται από:

α) *Οξυγαλακτικά στελέχη εκκίνησης* που προστέθηκαν για τη ζύμωση της λακτόζης και στη συνέχεια για την ωρίμανση του τυριού. Συνήθως πρόκειται για συνδυασμό ειδών των γενών Streptococcus, Lactococcus, Lactobacillus και Leuconostoc.
β) *Θερμοάντοχα είδη βακτηρίων* τα οποία επιζούν της παστερίωσης του γάλακτος τυροκόμησης. Πρόκειται για είδη που προϋπήρχαν στο γάλα και ανήκουν κυρίως στα γένη Bacillus, Clostridium, Micrococcus, Lactobacillus και Streptococcus. Τα βακτήρια αυτά βρίσκονται σε μικρό πληθυσμό και υπό κανονικές συνθήκες δεν μπορούν να εκτρέψουν την πορεία της ζύμωσης.
γ) *Βακτήρια επιμολύνσεως,* τα οποία προέρχονται από το αλάτι, την πυτιά, τα υπόλοιπα πρόσθετα καθώς και τα σκεύη, τα μηχανήματα και γενικά το περιβάλλον.

Σε αυτή τη φάση υπεισέρχονται σε μικρούς αριθμούς κυρίως αρνητικά κατά Gram είδη (κολοβακτηριοειδή, είδη Pseudomonas κ.α.) καθώς και ζυμομύκητες και ευρωτομύκητες. Αν οι συνθήκες υγιεινής όμως δεν είναι καλές, είναι πιθανή και η επιμόλυνση με παθογόνους μικροοργανισμούς (Salmonella, Staphylococcus κ.α.).

Εάν το προς τυροκόμηση γάλα δεν παστεριώνεται, τότε η πλούσια σε είδη και αριθμό μικροβιακή χλωρίδα του μεταφέρεται στο τυρόπηγμα. Σε αυτή την περίπτωση, το γάλα μπορεί να περιέχει και παθογόνους μικροοργανισμούς που προέρχονται από το ζώο και αυτό μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τη Δημόσια Υγεία γιατί οι μεταβολές της μικροβιακής χλωρίδας κατά τη φάση της ωρίμανσης δεν είναι σταθερές και δεν εξασφαλίζουν την εξυγίανση του τυριού.

Τα τυριά που δεν ωριμάζουν και ιδιαίτερα αυτά που παρασκευάζονται χωρίς την προσθήκη οξυγαλακτικής καλλιέργειας (μυζήθρα, μανούρι κ.α.), έχουν μικρό πληθυσμό οξυγαλακτικών βακτηρίων, η δε χλωρίδα τους είναι κυρίως αποτέλεσμα επιμολύνσεων. Τα ψυχρότροφα είδη από τη χλωρίδα αυτή πολλαπλασιάζονται κατά τη συντήρηση του προϊόντος και τελικά επιφέρουν την αλλοίωσή του (Μάντης, 2000).

2.4 Μεταβολές της μικροβιακής χλωρίδας κατά την ωρίμανση

2.4.1 Οξυγαλακτική χλωρίδα

Από τα οξυγαλακτικά βακτήρια, αυτά που πολλαπλασιάζονται έντονα κατά τα πρώτα στάδια της πήξης όταν η οξύτητα είναι σχετικά μικρή (pH 6,4- 5,8) και εντός λίγων ωρών φτάνουν πληθυσμούς της τάξης του 10^8-10^9/g, είναι ο *Streptococcus thermophilus* και τα είδη Lactococcus (*L. lactis, L. cremoris, L. diacetylactis*). Στη συνέχεια όμως, καθώς η οξύτητα αυξάνεται και το pH μειώνεται κάτω του 5,8, σταματά ο πολλαπλασιασμός και αρχίζει η μείωση του πληθυσμού τους με ρυθμό ανάλογο με το είδος του τυριού και το είδος του βακτηρίου. Ο *L. cremoris* είναι περισσότερο ευαίσθητος από τους *S. thermophilus* και *L. lactis*.

2.4.2 Χλωρίδα επιμόλυνσης

Η χλωρίδα επιμόλυνσης αποτελείται κυρίως από είδη των γενών Bacillus, Clostridium, Micrococcus, Lactobacillus, Streptococcus, Pseudomonas, Achromobacter, Proteus κ.α., όπως επίσης και από ζύμες και μύκητες. Αυτά τα είδη δε δημιουργούν σημαντικά προβλήματα Δημόσιας Υγείας, αλλά εάν επικρατήσουν μπορούν να προκαλέσουν τεχνολογικά προβλήματα και αλλοιώσεις.

Οι μικρόκοκκοι (*M. luteus, M. varians*) πολλαπλασιάζονται κατά τα πρώτα στάδια της τυροκόμησης, αλλά στη συνέχεια ο πληθυσμός τους μειώνεται. Επιβιώνουν από 1 έως 6 μήνες. Τα ψυχρότροφα, αρνητικά κατά Gram είδη, μπορούν να πολλαπλασιαστούν στα αρχικά στάδια αλλά αργότερα, καθώς αυξάνεται η οξύτητα, ο πληθυσμός τους μειώνεται. Τα κολοβακτηριοειδή επιβιώνουν στα τυριά άλμης (Φέτα, Τελεμέ), ανάλογα με τον αρχικό πληθυσμό τους και την πορεία της οξύτητας, από λίγες εβδομάδες έως και τρεις μήνες.

2.4.3 Παθογόνα είδη

Εάν τα τυριά παρασκευάζονται από απαστερίωτο γάλα, τότε είναι πιθανόν να περιέχουν παθογόνους μικροοργανισμούς, που προέρχονται από το ζώο και μπορούν να προκαλέσουν στον άνθρωπο σοβαρή νόσο. Μπορούν επίσης να επιμολυνθούν με παθογόνα βακτήρια από το περιβάλλον ή τους ανθρώπους φορείς. Η πορεία των παθογόνων μικροοργανισμών, ανεξάρτητα εάν αυτοί προέρχονται από το ζώο ή είναι αποτέλεσμα επιμολύνσεων, δεν είναι γνωστή με βεβαιότητα. Ορισμένοι εξ' αυτών θνήσκουν κατά την ωρίμανση, άλλοι υφίστανται απλώς μείωση του πληθυσμού τους, ενώ κάποιοι επιβιώνουν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα για τη χώρα μας, η Φέτα από αιγοπρόβειο γάλα είναι το κυριότερο είδος τυριού που καταναλώνεται, γι'αυτό και ορισμένες εργασίες που έχουν γίνει αναφέρονται σε αυτή (Μάντης, 2000).

Εντεροπαθογόνα στελέχη Escherichia coli

Ο πληθυσμός τους μειώνεται σταθερά κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης, αλλά στα σκληρά και ημίσκληρα τυριά είναι ανιχνεύσιμα και μετά την ωρίμανση. Στη Φέτα διαπιστώθηκε ότι εφ' όσον η οξύτητα του τυριού εξελιχθεί ομαλά, τότε ακόμη και πληθυσμοί της τάξης του 10^6/g μειώνονται σε <10/g σε διάστημα 3-4 εβδομάδων.

Σαλμονέλλες

Κατά τις πρώτες ώρες από την πήξη, όταν ακόμη δεν έχει αναπτυχθεί ικανοποιητική οξύτητα, μπορούν να πολλαπλασιαστούν, αλλά με την αύξηση της οξύτητας (pH< 4,5) ο πληθυσμός τους μειώνεται. Η *Salmonella typhimurium* επιβίωσε σε τυρί Φέτα από 20-120 ημέρες, η *S. typhi* σε τυρί Domiati από 15-36 ημέρες, ανάλογα με το αρχικό φορτίο που εμβολιάστηκε και την πορεία της οξύτητας.

Λιστέρια

Το βακτήριο αυτό είναι ανθεκτικό στις συνθήκες ωρίμανσης. Σε λευκό τυρί άλμης πολλαπλασιάστηκε κατά τις πρώτες ημέρες και την $28^η$ ημέρα αριθμήθηκαν $1,3x10^5$ βακτήρια/ g τυριού. Στη Φέτα επιβιώνει έως 3 μήνες ενώ στα τυριά γαλοτύρι και τουλουμοτύρι βρέθηκε να επιβιώνει 27 και 40 ημέρες αντίστοιχα (Παπαγεωργίου κ.α.,1998).

Εντεροτοξινογόνοι σταφυλόκοκκοι

Ανεξάρτητα από το είδος του τυριού, μεγάλο πλήθος εντεροτοξινογόνων στελεχών σταφυλόκοκκων στο γάλα πριν από την πήξη, οδηγεί στην παραγωγή εντεροτοξίνης. Το ίδιο συμβαίνει και όταν η πορεία της οξύτητας του τυριού δεν είναι ικανοποιητική κατά τις πρώτες 24 ώρες. Εφ' όσον παραχθεί εντεροτοξίνη, αυτή παραμένει δραστική για πολλούς μήνες, ενώ οι σταφυλόκοκκοι καταστρέφονται σε χρόνο που κυμαίνεται από μία εβδομάδα έως δύο μήνες, ανάλογα με τον αρχικό πληθυσμό τους και το είδος του τυριού.

Στρεπτόκοκκοι

Οι παθογόνοι στρεπτόκοκκοι επιβιώνουν στα τυριά από 2 έως 5 μήνες. Οι στρεπτόκοκκοι της ομάδας D (εντερόκοκκοι) επιβιώνουν για εβδομάδες έως μήνες, ενώ στα αρχικά στάδια παρασκευής μπορεί να πολλαπλασιαστούν και να φτάσουν πληθυσμούς που θεωρούνται ικανοί να προκαλέσουν τροφική δηλητηρίαση.

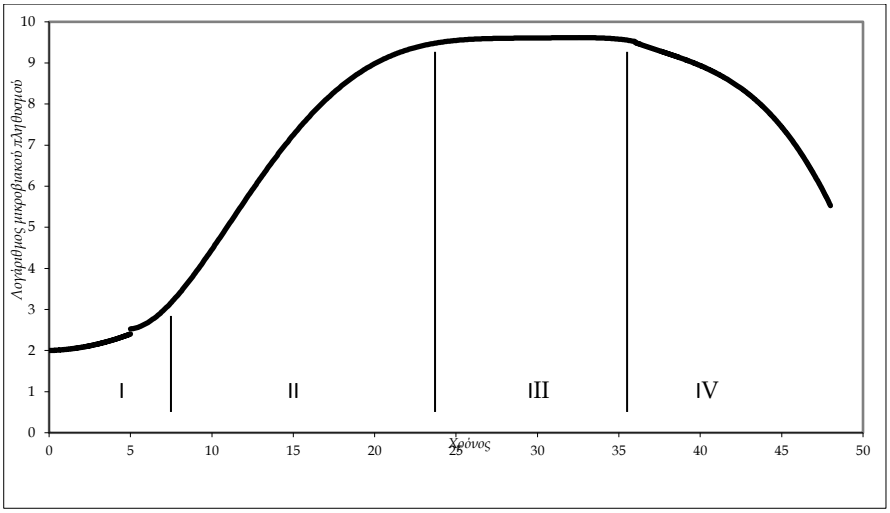
Μυκοβακτηρίδια

Τα μυκοβακτηρίδια φονεύονται κατά την παστερίωση αλλά ως οξεάντοχα δε βλάπτονται από την οξύτητα που αναπτύσσεται στα τυριά και επιβιώνουν για χρόνο που υπερβαίνει το χρόνο ωρίμανσης των περισσότερων τυριών. Έχει διαπιστωθεί χρόνος επιβίωσης 220 ημερών σε τυρί Cheddar, 300 ημερών σε Tilsit και 90 ημερών σε Camembert. Εξαίρεση αποτελούν τα τυριά με προπιονική ζύμωση, στα οποία βρέθηκε ότι ο βάκκιλος της φυματίωσης καταστρέφεται εντός 20-40 ημερών (Chapman & Sharpe, 1981).

2.5 Κινητική μικροβιακής ανάπτυξης

2.5.1 Φάσεις ανάπτυξης μικροβιακού πληθυσμού

Σε ένα περιβάλλον στο οποίο τα θρεπτικά συστατικά δεν αποτελούν περιοριστικό παράγοντα, ένα βακτήριο ή ένας μικροβιακός πληθυσμός θα αναπαραχθεί και θα αυξηθεί σε αριθμό. Γενικά, για οποιονδήποτε ομοιογενή μικροβιακό πληθυσμό, κάτω από συνθήκες σταθερής κατάστασης, η ανάπτυξη σ' ένα θρεπτικό μέσο ή σ' ένα πραγματικό σύστημα τροφίμου, μπορεί να τυποποιηθεί από την καμπύλη της Εικόνας 2.2, η οποία προκύπτει αν κανείς σχεδιάσει το λογάριθμο του πληθυσμού των βακτηρίων συναρτήσει του χρόνου. Όπως φαίνεται, υπάρχει ένας αρχικός αργός ρυθμός αύξησης του λογαρίθμου της πυκνότητας των κυττάρων, που αυξάνεται σε έναν σχεδόν σταθερό ρυθμό ανάπτυξης, μειώνεται ξανά στο μηδέν και τελικά ο ρυθμός γίνεται αρνητικός. Αυτές οι τέσσερις φάσεις της καμπύλης ανάπτυξης αναφέρονται αντίστοιχα ως: Λανθάνουσα φάση, εκθετική φάση, φάση στασιμότητας και φάση κάμψης ή θανάτου.



Εικόνα 2.2 Τυπική καμπύλη μικροβιακής ανάπτυξης

Η λανθάνουσα φάση είναι μια χρονική περίοδος κατά την οποία τα κύτταρα προσαρμόζουν τη φυσιολογία και τη βιοχημεία τους στο καινούριο περιβάλλον που βρίσκονται, ενώ κατά τη διάρκεια της εκθετικής φάσης τα κύτταρα αναπτύσσονται όσο πιο γρήγορα είναι δυνατό σε αυτό το περιβάλλον. Κατά την εκθετική φάση τα κύτταρα επιδεικνύουν εξισορροπημένη ανάπτυξη, κατά την οποία ο ρυθμός σύνθεσης κάθε συστατικού του κυττάρου (ένζυμα, δομικά μόρια, DNA) είναι τέτοιος ώστε να μην γίνεται μεγαλύτερη σύνθεση από αυτήν που απαιτείται για την παραγωγή νέων κυττάρων. Δηλαδή ολόκληρη η μεταβολική δραστηριότητα των κυττάρων κατευθύνεται στην αναπαραγωγή. Στην εκθετική φάση όλα τα συστατικά των κυττάρων βρίσκονται σε σταθερές αναλογίες και τα κύτταρα θεωρούνται, για πρακτικούς σκοπούς φυσιολογικά ταυτόσημα (πανομοιότυπα).

Καθώς ο πληθυσμός συνεχίζει να αυξάνεται, η συσσώρευση των μεταβολιτών μέσα στο περιβάλλον γίνεται αρκετά παρεμποδιστική, ώστε να προκαλεί μείωση στο ρυθμό πολλαπλασιασμού των κυττάρων. Κατά τη διάρκεια της φάσης στασιμότητας, οι συνθήκες μπορεί να γίνουν τόσο απαγορευτικές, ώστε να οδηγήσουν στο θάνατο και στη λύση των κυττάρων, οπότε ο καθαρός ρυθμός αύξησης του πληθυσμού μειώνεται συνεχώς και τελικά μηδενίζεται.

Η διάρκεια της φάσης στασιμότητας ποικίλλει, αλλά τελικά καθώς όλο και περισσότερες τοξίνες συσσωρεύονται, ο ρυθμός θανάτου των κυττάρων γίνεται μεγαλύτερος από την ικανότητα του περιβάλλοντος να υποστηρίξει την κυτταρική διαίρεση, με αποτέλεσμα τη μείωση του μεγέθους βακτηριακής πυκνότητας και την είσοδο των μικροβίων σε μια νέα φάση, που αναγνωρίζεται ως φάση θανάτου. Η σύνθεση του τροφίμου, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η ηλικία και η κατάσταση των μικροβίων μπορεί να επηρεάσουν τη μορφή της καμπύλης ανάπτυξης. Η καμπύλη ανάπτυξης μπορεί να μην περιλαμβάνει λανθάνουσα φάση, πράγμα που συμβαίνει όταν οι μικροοργανισμοί μεταφέρονται στις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες, σε έναν σχετικά υψηλό πληθυσμό και κατά τη διάρκεια της εκθετικής φάσης.

Για τα βακτήρια, τα τρόφιμα αποτελούν ένα νέο περιβάλλον το οποίο μπορούν να εκμεταλλευτούν. Θα αναπτυχθούν και θα αναπαραχθούν στο περιβάλλον αυτό, όπως και σε ένα εργαστηριακό υπόστρωμα. Για το λόγο αυτό έχει μεγάλη σημασία η κινητική της ανάπτυξης των βακτηρίων, ιδιαίτερα κατά τη λανθάνουσα και την εκθετική φάση. Αν οι μικροοργανισμοί σε ένα τρόφιμο αναγκαστούν να παραμείνουν στη λανθάνουσα φάση, τότε ο χρόνος ζωής του τροφίμου θα επιμηκυνθεί. Αν τελικά φθάσουν στην εκθετική φάση, τότε ο ρυθμός ανάπτυξης κάτω από

συγκεκριμένες συνθήκες αποθήκευσης, θα καθορίσει τη διατηρησιμότητα του προϊόντος. Η φάση στασιμότητας είναι λιγότερο άμεσου ενδιαφέροντος, γιατί τα περισσότερα τρόφιμα θα έχουν είδη αλλοιωθεί και θα είναι μη αποδεκτά πριν το μικροβιακό τους φορτίο φτάσει στη φάση στασιμότητας.
Έχει προταθεί μεγάλος αριθμός μαθηματικών συναρτήσεων, οι οποίες περιγράφουν σιγμοειδείς καμπύλες και έχουν χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία μοντέλων ανάπτυξης μικροβίων. Τα σημαντικότερο ίσως εξ' αυτών, καθώς κι αυτό που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία, είναι το μοντέλο Monod.

2.5.2 Μοντέλο Monod

Ο Monod δήλωσε ότι ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται ο μικροβιακός πληθυσμός είναι ανάλογος με τον αριθμό των μελών του πληθυσμού, δηλαδή ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης ή ο χρόνος διπλασιασμού θεωρείται σταθερός για σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτό είναι αποτελεσματικό μέσα σε ένα μικρό χρονικό διάστημα, πριν δηλαδή αρχίσει να μειώνεται σημαντικά το διαθέσιμο υπόστρωμα ή να μεταβάλλεται το περιβάλλον (π.χ. μείωση του pH). Η ολοκληρωμένη μορφή του μοντέλου Monod είναι:

$$N = N_o \cdot e^{k\cdot(t-t_L)}$$ Εξίσωση 2.1

όπου N ο αριθμός των μικροοργανισμών σε χρόνο t, N_o το αρχικό φορτίο, k ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης και t_L ο χρόνος λανθάνουσας φάσης.
Το μοντέλο αυτό είναι απλό και αρκετά ακριβές και έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά, ακόμα και για μεικτούς πληθυσμούς (Ταούκης κ.α., 2009).

2.6 Μέθοδοι συντήρησης τυριού

Η ευαίσθητη φύση των τροφίμων σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις των καταναλωτών για τρόφιμα μεγάλης διάρκειας ζωής, καθιστούν απαραίτητη τη συντήρησή τους με διάφορες φυσικές ή χημικές μεθόδους. Σύμφωνα με τον Volpato, (2007), οι βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη συντήρηση τροφίμων είναι:

- ✓ Αλάτισμα
- ✓ Αφυδάτωση
- ✓ Θερμική επεξεργασία, (π.χ. αποστείρωση, παστερίωση, κονσερβοποίηση)
- ✓ Κάπνιση
- ✓ Μαρινάρισμα
- ✓ Τροποποίηση της ατμόσφαιρας (π.χ. MAP, CAP)
- ✓ Υπερυψηλή υδροστατική πίεση
- ✓ Ακτινοβολία, (π.χ. ακτινοβόληση με μικροκύματα, υπεριώδης ακτινοβόληση, ιοντίζουσα ακτινοβόληση)
- ✓ Αποθήκευση σε χαμηλή θερμοκρασία (ψύξη, κατάψυξη)
- ✓ Χρήση αντιμικροβιακών και άλλων μεθόδων
- ✓ Ωσμωτική αφυδάτωση
- ✓ Παλλόμενα Ηλεκτρικά πεδία (PEF)

Συγκεκριμένα για τη συντήρηση του τυριού, συνήθεις πρακτικές αποτελούν το αλάτισμα, η κάπνιση, η ψύξη και η κατάψυξη καθώς και η θερμική επεξεργασία και ιδιαίτερα η παστερίωση.

Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει σε ορισμένες καινοτόμες μεθόδους συντήρησης που έχουν αναπτυχθεί. Πρόκειται για την ωσμωτική αφυδάτωση, την Υπερυψηλή Υδροστατική Πίεση, τα Παλλόμενα Ηλεκτρικά Πεδία (PEF) και την Ακτινοβόληση.

2.6.1 Ωσμωτική αφυδάτωση

Η ωσμωτική αφυδάτωση είναι μία μέθοδος μερικής απομάκρυνσης του νερού που περιέχεται σε ένα τρόφιμο μέσω της εμβάπτισης του σε ένα υπερτονικό μέσο, όπως ένα διάλυμα σακχάρου ή άλατος με υψηλή συγκέντρωση. Λόγω της διαφοράς της ωσμωτικής πίεσης εκατέρωθεν της μεμβράνης των τροφίμων, λαμβάνουν χώρα δύο κύριες ροές αντίθετης κατεύθυνσης: νερό διαφεύγει από το εσωτερικό του τροφίμου αραιώνοντας το ωσμωτικό διάλυμα, ενώ ταυτόχρονα, στερεά ωσμωτικού διαλύματος εισρέουν στα κύτταρα του τροφίμου, εμπλουτίζοντας με αυτόν τον τρόπο επιλεκτικά τη σύσταση του. Η ωσμωτική αφυδάτωση επομένως επιφέρει μια διπλή τροποποίηση στο τρόφιμο, με μείωση της περιεχόμενης υγρασίας του και ταυτόχρονο εμπλουτισμό του με επιλεγμένα συστατικά, που ενδέχεται να οδηγήσει σε μεταβολή της θρεπτικής αξίας και των λειτουργικών ή οργανοληπτικών του ιδιοτήτων (Giraldo et al, 2003; Torreggiani et al, 2001). Η μέθοδος της ωσμωτικής αφυδάτωσης δεν έχει εφαρμοστεί βιβλιογραφικά σε τυρί, αποτελεί όμως το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η μέθοδος αυτή αναλύεται εκτενώς στο κεφάλαιο 3.

2.6.2 Υπερυψηλή πίεση

Η διεργασία της υπερυψηλής πίεσης (ΥΠ), παρά το γεγονός ότι αποτελεί μία νέα μέθοδο συντήρησης τροφίμων, είναι από τις πιο ευρέως μελετημένες μεθόδους. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, η εφαρμογή πιέσεων στην περιοχή 400-600 MPa προκαλεί αδρανοποίηση των περισσότερων αλλοιογόνων μικροοργανισμών και μειώνει τη δραστηριότητα των ενζύμων, με αποτέλεσμα ένα παστεριωμένο προϊόν να μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλο χρονικό διάστημα στους 4-6°C. Η ΥΠ δρα κυρίως στους μη ομοιοπολικούς δεσμούς, όπως οι ιοντικοί δεσμοί και οι δεσμοί υδρογόνου, και προωθεί τις αντιδράσεις κατά τις οποίες προκύπτει μία συνολική μείωση σε όγκο. Μπορεί επίσης να επιφέρει εμφανή αποτελέσματα σε δομικές και λειτουργικές πρωτεΐνες. Η ΥΠ δρα επιπλέον στην κυτταρική μεμβράνη. Οι διπλοστιβάδες λιπιδίων έχει φανεί ότι συμπιέζονται κατά την ΥΠ, πράγμα το οποίο μεταβάλλει τη διαπερατότητά τους (Adams & Moss, 2000). Η εφαρμογή της ΥΠ έχει ερευνηθεί σε συνδυασμό με ακτινοβολία και άλλες τεχνολογίες όπως θερμότητα, χαμηλό pH, αντιμικροβιακές ενώσεις, τροποποιημένη ατμόσφαιρα και διοξείδιο του άνθρακα. Έχει επίσης παρατηρηθεί ότι ο συνδυασμός αντιμικροβιακών με ΥΠ μπορεί να αυξήσει τη μικροβιακή αδρανοποίηση και να επεκτείνει το χρόνο ζωής των τροφίμων. Η διεργασία της ΥΠ έχει μελετηθεί και σε τυρί, όπου έχει βρεθεί ότι πέρα από τη μικροβιακή καταστροφή που προκαλεί, η χρήση της μεθόδου αυτής βελτιώνει την πήξη του γάλακτος αυξάνοντας την απόδοσή του σε τυρί (Trujillo, et al., 2000).

2.6.3 Παλλόμενα Ηλεκτρικά Πεδία

Τα παλλόμενα ηλεκτρικά πεδία (ΠΗΠ) αποτελούν μία από τις πιο ελκυστικές μη θερμικές τεχνολογίες, λόγω των σύντομων χρόνων επεξεργασίας και τη μειωμένη ενέργεια θέρμανσης που απαιτείται συγκριτικά με άλλες. Πρόκειται για μια διεργασία που περιλαμβάνει την εφαρμογή παλμών τάσης συνεχούς ρεύματος για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, στην περιοχή μεταξύ μικροδευτερολέπτων έως χιλιοστών του δευτερολέπτου, μέσα από ένα υλικό τοποθετημένο μεταξύ δύο ηλεκτροδίων. Αυτή η τάση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου, η ένταση του οποίου εξαρτάται από το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων και

της τάσης που εφαρμόζεται. Αν και δεν υπάρχει επίσημος ορισμός, η ένταση πεδίου E < 0,1 $kV \cdot cm^{-1}$ μπορεί να θεωρηθεί ότι δημιουργεί χαμηλής έντασης ηλεκτρικό πεδίο, εκείνη στην περιοχή από 0,1 έως 1 $kV \cdot cm^{-1}$ μέτριο ηλεκτρικό πεδίο, και εκείνη με E> 1 $kV \cdot cm^{-1}$ υψηλής έντασης ηλεκτρικό πεδίο. Οι παράμετροι της διαδικασίας που χαρακτηρίζουν την τεχνολογία των ΠΗΠ είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, το σχήμα του παλμού, το πλάτος παλμού, ο αριθμός των παλμών, η συγκεκριμένη ενέργεια παλμών, και η συχνότητα. Ο χρόνος κατεργασίας για μια εφαρμογή Π.Η.Π. ορίζεται ως συνάρτηση του πλάτους παλμού και του αριθμού των παλμών που εφαρμόζονται. Τέλος, η συχνότητα υποδεικνύει τον αριθμό των παλμών που εφαρμόζονται στη μονάδα του χρόνου, και συνήθως μετριέται σε Hz (παλμοί ανά δευτερόλεπτο). Όταν η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στην παραγωγή γαλακτοκομικών προϊόντων, επηρεάζει το μέγεθος των καζεϊνικών μικκυλίων καθώς και την πήξη της καζεΐνης. Μπορεί να θεωρηθεί μια πιθανή τεχνολογία για την επεξεργασία γάλακτος και την παρασκευή τυριού (Kelly & Zeece, 2009a; 2009b). Πρόσφατες μελέτες έχουν αποδείξει ότι υπάρχει μια βελτίωση στις ιδιότητες πήξης του γάλακτος, όπως η σταθερότητα της γέλης και ο χρόνος πήξης κατά την παραγωγή τυριού (Ju et. al., 2009).

2.6.4 Ακτινοβόληση

Η επεξεργασία με ιοντίζουσα ακτινοβολία αποτελεί όλο και συνηθέστερη επιλογή προκειμένου να κατασταθούν τα τρόφιμα στείρα από μικροοργανισμούς. Είναι μία ασφαλής, αποτελεσματική, περιβαλλοντικά καθαρή και ενεργειακά αποδοτική διαδικασία, κυρίως ως μέθοδος επεξεργασίας τελικών προϊόντων (Badr, 2003). Διατροφικές μελέτες έχουν δείξει ότι χαμηλής δόσης ακτινοβολία δεν προκαλεί αξιοσημείωτες μειώσεις στη θρεπτική αξία των τροφίμων κι ότι μακρομόρια όπως πρωτεΐνες, υδατάνθρακες και λίπη, παραμένουν σχετικά σταθερά. Επίσης, η αλλαγή στη θρεπτικότητα εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους όπως το είδος του τροφίμου και τις συνθήκες επεξεργασίας και συσκευασίας (θερμοκρασία και έκθεση στον αέρα κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης και χρόνος αποθήκευσης) (Crawford & Ruff, 1996). Η ιοντίζουσα ακτινοβολία μπορεί να επηρεάσει άμεσα τους μικροοργανισμούς αλληλεπιδρώντας με μόρια κλειδιά μέσα στο κύτταρο, ή έμμεσα μέσω ελευθέρων ριζών οι οποίες παράγονται κατά τη ραδιόλυση του νερού (Adams & Moss, 2000). Υψηλές δόσεις ακτινοβολίας αποστειρώνουν το τρόφιμο, εξοντώνοντας όλους τους μικροοργανισμούς εκτός από τους ιούς. Τέλος, η δημιουργία ελευθέρων ριζών προκαλεί ανησυχία για την ασφάλεια των ακτινοβολημένων τροφίμων, όμως επιστημονικές μελέτες τα τελευταία 30 χρόνια όπου απομονώθηκαν προϊόντα ραδιόλυσης, έδειξαν ότι δε βρέθηκε καμία ουσία τοξικολογικής σημασίας που να παρουσιάζει μοναδικότητα στα ακτινοβολημένα τρόφιμα (Crawford & Ruff, 1996).

3. Ωσμωτική αφυδάτωση- Ξήρανση

3.1 Ωσμωτική αφυδάτωση

Τα τελευταία χρόνια, η ζήτηση των καταναλωτών για προϊόντα που διατηρούνται περισσότερο από τις αρχικές τους προδιαγραφές, έχει αυξηθεί. Σε βιομηχανικούς όρους, αυτό απαιτεί την ανάπτυξη διεργασιών που να ελαχιστοποιούν τις ανεπιθύμητες μεταβολές που επιφέρει η επεξεργασία των προϊόντων. Επομένως, όλες οι τεχνικές και οι διεργασίες, παραδοσιακές και καινοτόμες, θα πρέπει να ενισχύουν τη θρεπτική αξία και την οργανοληπτική ποιότητα των τροφίμων και να βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά τόσο των πρώτων υλών όσο και των τελικών προϊόντων, λαμβάνοντας πάντα υπόψιν τους οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι πιο συνήθεις διεργασίες που χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση των τροφίμων είναι οι παραδοσιακές τεχνικές, μερικές εκ των οποίων αποτελούν η ψύξη, η κατάψυξη, η παστερίωση και η αποστείρωση. Παρ' όλα αυτά κοινό χαρακτηριστικό όλων των ανωτέρω τεχνικών είναι η υποβάθμιση των τροφίμων ως προς την οργανοληπτική τους ποιότητα καθώς και την περιεκτικότητά τους σε βιταμίνες και άλλα θρεπτικά συστατικά. Έτσι, τα τελευταία χρόνια εμφανίστηκε έντονη η ανάγκη χρήσης νέων μεθόδων για τη συντήρηση των τροφίμων, που δε θα έχουν αντίστοιχες επιπτώσεις σε αυτά (Fito et al., 2001).

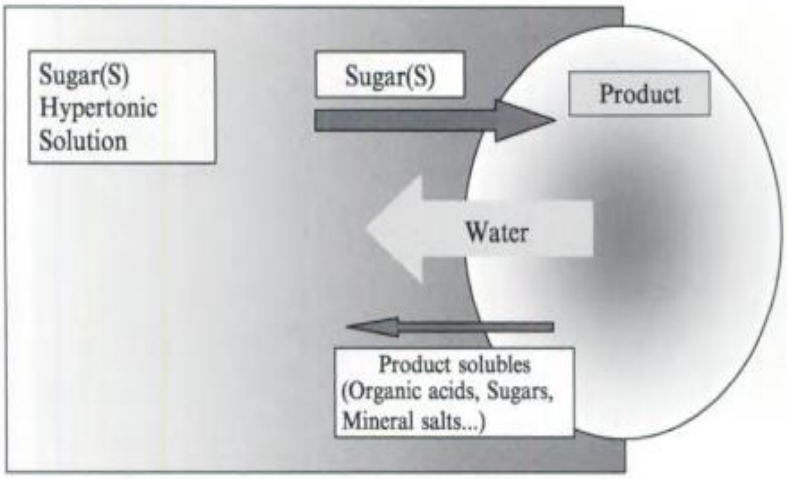
Για το λόγο αυτό, η ωσμωτική αφυδάτωση γίνεται τελευταία αντικείμενο έντονης μελέτης κι ενδιαφέροντος, παρόλο που η αφυδάτωση αποτελεί την παλαιότερη γνωστή στον άνθρωπο μέθοδο συντήρησης (Nastaj & Witkiewicz, 2004). Το νερό είναι ο κύριος παράγοντας που επιδρά στη χημική και μικροβιολογική σταθερότητα των τροφίμων. Η ενεργότητα νερού είναι μία θερμοδυναμική ιδιότητα που ορίζεται ως ο λόγος της τάσης ατμών του νερού στο τρόφιμο προς τη τάση ατμών του καθαρού νερού (Rahman & Labuza, 2007). Μειώνοντας την ενεργότητα νερού, η διάρκεια ζωής και η σταθερότητα ενός τροφίμου αυξάνονται καθώς περιορίζεται η ανάπτυξη μικροοργανισμών και η δράση των ενζύμων (Moreno et al., 2013; Castro-Giraldez et al., 2010). Η οσμωτική αφυδάτωση είναι μια διεργασία που έχει σκοπό τη μείωση της ενεργότητας νερού στο τρόφιμο με στόχο την αύξηση της διάρκειας ζωής του. Εφαρμόζεται πολλές φορές ως προκατεργασία κάποιας άλλης μεθόδου, όπως είναι η ξήρανση, η κατάψυξη ή η παστερίωση.

3.1.1 Μηχανισμός ωσμωτικής αφυδάτωσης

Η ωσμωτική αφυδάτωση συνίσταται στην απομάκρυνση μέρους του νερού ενός τροφίμου μέσω της εμβάπτισής του σε ένα υπερτονικό διάλυμα (Rahman, 2008). Χρησιμοποιούνται διάφορα ωσμωτικά μέσα όπως η γλυκόζη, το σιρόπι καλαμποκιού, το χλωριούχο νάτριο, η φρουκτόζη και η σακχαρόζη, ανάλογα με το τελικό προϊόν. Η κινητήρια δύναμη για τη διάχυση του νερού από το τρόφιμο εντός του διαλύματος, παρέχεται από την υψηλότερη ωσμωτική πίεση του υπερτονικού διαλύματος. Η διάχυση του νερού συνοδεύεται από ταυτόχρονη διάχυση των διαλυμένων ουσιών από το ωσμωτικό διάλυμα μέσα στο κύτταρο. Δεδομένου ότι η μεμβράνη δεν είναι απολύτως επιλεκτική και άλλες διαλυμένες ουσίες που υπάρχουν στα κύτταρα του τροφίμου μπορούν επίσης να περάσουν στο ωσμωτικό διάλυμα (Rastogi et al., 2002; Ciurzyńska et al. 2016).

Κατά την ωσμωτική επεξεργασία σε διάλυμα σακχάρων/αλάτων η πρόσληψη διαλυμένων ουσιών έχει ως συνέπεια τη δημιουργία ενός στρώματος στερεών συστατικών κάτω από την επιφάνεια του τροφίμου. Το στρώμα αυτό μειώνει τη διαφορά ωσμωτικής πίεσης κατά μήκος της

διεπιφάνειας τροφίμου-διαλύματος, δημιουργώντας έτσι ένα επιπλέον εμπόδιο στη μεταφορά μάζας, ενώ το άλας φαίνεται να διεισδύει στον ιστό σε μεγαλύτερο βάθος. Η παρουσία του άλατος στο ωσμωτικό διάλυμα παρεμποδίζει το σχηματισμό αυτού του επιπρόσθετου στρώματος, οδηγώντας σε μεγαλύτερους ρυθμούς απώλειας νερού και πρόσληψης στερεών (Rastogi et al., 2002). Επομένως, καθίστανται διακριτές δύο φάσεις απώλειας νερού κατά την ωσμωτική αφυδάτωση. Η πρώτη φάση χαρακτηρίζεται από υψηλό ρυθμό απώλειας του νερού και διαρκεί περίπου δύο ώρες, ενώ στη δεύτερη, με διάρκεια έως και τέσσερις ώρες, ο ρυθμός απώλειας νερού μειώνεται έως ότου το σύστημα φτάσει σε ισορροπία.



Εικόνα 3.1 Αναπαράσταση των φαινομένων μεταφοράς μάζας κατά την ωσμωτική αφυδάτωση (Πηγή: Giannibertolo & Torreggiand, 2004)

Κατά συνέπεια, μέσω της ωσμωτικής αφυδάτωσης το τρόφιμο υφίσταται διπλή τροποποίηση: μείωση της περιεχόμενης υγρασίας του και ταυτοχρόνως εμπλουτισμό με επιλεγμένα συστατικά.

3.1.2 Φαινόμενα μεταφοράς μάζας κατά την ωσμωτική αφυδάτωση

Κατά τη διεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης, το τρόφιμο έρχεται σε επαφή με ένα υπερτονικό διάλυμα χαμηλής ενεργότητας νερού. Καθ' όλη τη διάρκεια της ώσμωσης πραγματοποιούνται τρεις διαδικασίες μεταφοράς μάζας:

- ✓ Διάχυση νερού από το τρόφιμο στο ωσμωτικό διάλυμα λόγω διαφοράς στη βαθμίδα της πίεσης.
- ✓ Διάχυση διαλυμένης ουσίας από το ωσμωτικό διάλυμα στο τρόφιμο.
- ✓ Περιορισμένη διάχυση διαλυμένων ουσιών από το τρόφιμο (σακχάρων, βιταμινών κ.α.) (Lazarides et al., 2012).

Για την ποσοτικοποίηση της απώλειας νερού του τροφίμου (water loss (WL)) και της πρόσληψης στερεών (solid gain (SG)), χρησιμοποιούνται οι παρακάτω αριθμητικές σχέσεις:

$$WL = \frac{(M_0 - m_0) - (M - m)}{m_0} \qquad Εξίσωση\ 3.1$$

$$SG = \frac{m - m_0}{m_0} \qquad Εξίσωση\ 3.2$$

όπου:

M_0 είναι η αρχική μάζα του φρέσκου τροφίμου,

M είναι η μάζα του τροφίμου μετά από χρόνο t ωσμωτικής επεξεργασίας,

m είναι η ξηρή μάζα του τροφίμου μετά από χρόνο t ωσμωτικής επεξεργασίας και

m_0 είναι η ξηρή μάζα του φρέσκου τροφίμου

Τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή της ωσμωτικής αφυδάτωσης βασίζονται σε δύο προσεγγίσεις, τη μακροσκοπική και τη μικροσκοπική θεώρηση. Σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεώρηση, δε λαμβάνονται υπόψη μηχανισμοί που παρατηρούνται σε κυτταρικό επίπεδο καθώς γίνεται παραδοχή ότι ο ιστός του τροφίμου είναι ομοιογενής και το φαινόμενο της ώσμωσης προσεγγίζεται μέσα από μακροσκοπικές-φαινομενολογικές σχέσεις που εκφράζουν μακροσκοπικά μεγέθη, όπως η απώλεια νερού και η πρόσληψη στερεών. Αντίθετα, σύμφωνα με τη μικροσκοπική θεώρηση του φαινομένου λαμβάνεται η ετερογενής φύση του ιστού και η ιδιαιτερότητα του εκάστοτε κυτταρικού συστήματος, καθιστώντας αυτό ιδιαίτερα πολύπλοκο αν και ακριβέστερο.

Τα περισσότερα μαθηματικά μοντέλα μεταφοράς μάζας κατά τη διαδικασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης, βασίζονται στην υπόθεση της ανεξάρτητης διάχυσης του νερού και των διαλυμένων ουσιών στη στερεή φάση και στο ότι το στερεό υλικό είναι ισοτροπικό και δε συρρικνώνεται (Shi et al., 2002). Η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος προσέγγισης των φαινομένων μεταφοράς μάζας, βάσει της μακροσκοπικής προσέγγισης του φαινομένου, βασίζεται στον 2^{ο} νόμο διάχυσης του Fick, που περιγράφει τη διάχυση σε μη μόνιμη κατάσταση. Ο νόμος αυτός, στην περίπτωση της γεωμετρίας πλάκας, περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad Εξίσωση\ 3.3$$

όπου C είναι η συγκέντρωση

D είναι ο συντελεστής διάχυσης

x είναι η χαρακτηριστική απόσταση της διάχυσης και

t είναι ο χρόνος.

Με τη θεώρηση ότι τα τρόφιμα είναι πορώδη στερεά, ο νόμος του Fick μπορεί να προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αρχικά υπολογίζεται η συγκέντρωση των στερεών και του νερού για κάθε χρονική στιγμή και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας ως αρχικές συνθήκες τις:

$C = C_0$ όταν t=0, $-1 < x < +1$ και $C=C_1$ όταν $t > 0$, x=1

ακολουθεί ολοκλήρωση στις συνθήκες αυτές. Η λύση της παραπάνω γενικευμένης εξίσωσης εξαρτάται από τη γεωμετρία του τροφίμου και καταλήγει στον προσδιορισμό των συντελεστών

διάχυσης του νερού και των στερεών, D_{ew} και D_{es}, αντίστοιχα. Σκοπός της περιγραφής των φαινομένων μεταφοράς νερού και στερεών μέσω των συντελεστών διάχυσης D_{ew} και D_{es}, είναι η συσχέτιση των φαινομένων αυτών με εύκολα μετρήσιμα μεγέθη όπως η συγκέντρωση και η θερμοκρασία του ωσμωτικού διαλύματος και ο προσδιορισμός των τελικών συνθηκών για τη διεργασία ο χρόνος διεργασίας και το επιθυμητό ποσοστό αφυδάτωσης.

3.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ωσμωτική αφυδάτωση

Οι κυριότερες παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της διεργασίας της ωσμωτικής αφυδάτωσης αφορούν στα χαρακτηριστικά του τροφίμου και του ωσμωτικού μέσου, στις παραμέτρους της διεργασίας (συγκέντρωση ωσμωτικού διαλύματος, αναλογία βάρους ωσμωτικού διαλύματος προς βάρος τροφίμου, χρόνος και θερμοκρασία διεργασίας) καθώς και στην ταυτόχρονη εφαρμογή άλλων τεχνολογιών (υπέρηχοι, υπερυψηλή υδροστατική πίεση, παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο υψηλής έντασης). Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η επίδραση κάθε παραμέτρου στην εν λόγω διεργασία.

Προκατεργασία τροφίμου

Διάφορες μέθοδοι προεπεξεργασίας, όπως είναι το ζεμάτισμα, η υπερυψηλή υδροστατική πίεση, η αλκαλική εμβάπτιση και η θείωση, έχουν χρησιμοποιηθεί από διάφορους ερευνητές σε συνδυασμό με την ωσμωτική αφυδάτωση, με σκοπό τη μείωση των μη επιθυμητών μεταβολών στα τρόφιμα, που προκαλούνται από τις συμβατικές τεχνικές ξήρανσης (Ade-Omowaye et al., 2001; Pokharkar, 2001). Ο συνδυασμός ζεματίσματος και ωσμωτικής αφυδάτωσης πριν από τη ξήρανση σε φέτες καρότου, είχε ως αποτέλεσμα τελικά προϊόντα περισσότερο αποδεκτά οργανοληπτικά και με καλύτερη διατροφική ποιότητα (Tadesse et al., 2015). Η εφαρμογή του ζεματίσματος σε φέτες λαχανικών σε θερμοκρασία 100°C για χρόνο 10-30 sec οδήγησε σε αύξηση των συντελεστών διάχυσης νερού και σακχαρόζης (Escobar et al., 2007). Η βύθιση παπάγιας και μάνγκο για 30 min σε διάλυμα ασκορβικού οξέος 0,4% προτού αυτά επεξεργαστούν με ωσμωτική αφυδάτωση, έδωσε ένα άκρως αποδεκτό προϊόν. Τέλος, η ενζυμική αμαύρωση φρούτων και λαχανικών αποτράπηκε με εμβάπτισή τους σε διάλυμα κιτρικού οξέος 1% πριν από την ωσμωτική αφυδάτωση (Sunkja & Raghavan, 2004).

Ωσμωτικό διάλυμα

Η διαδικασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης επηρεάζεται από τις φυσικοχημικές ιδιότητες, το μοριακό βάρος, τη διαλυτότητα και την ιοντική κατάσταση του ωσμωτικού μέσου (Ahmed et al., 2016). Το ωσμωτικό μέσο χρησιμεύει ως κινητήρια δύναμη για τις ροές της διαλυμένης ουσίας και του νερού. Επιπλέον επηρεάζει σημαντικά τις φυσικές και οργανοληπτικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος, γι’ αυτό πρέπει να εξετάζεται η συμβατότητά του με τα συστατικά των τροφίμων (Tortoe, 2010). Ένα ωσμωτικό μέσο με χαμηλό μοριακό βάρος μπορεί εύκολα να διεισδύσει στα κύτταρα των τροφίμων, σε σύγκριση με ουσίες με μεγαλύτερο μοριακό βάρος (Phisut, 2012). Γενικά για να είναι ένα ωσμωτικό μέσο πετυχημένο θα πρέπει να επιφέρει αποτελεσματική ώσμωση, δηλαδή μεγάλο ρυθμό απώλειας νερού (WL) και χαμηλή τελική τιμή ενεργότητας (aw), να προσδίδει στο τρόφιμο καλές φυσικοχημικές και λειτουργικές ιδιότητες, βελτιωμένα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και καλές διατροφικές ιδιότητες καθώς και να έχει αποδεκτό κόστος. Έχουν δοκιμαστεί πολλές ουσίες, μόνες τους ή σε συνδυασμούς, σε ωσμωτικά διαλύματα. Τα πιο κοινά ωσμωτικά μέσα είναι το NaCl, η γλυκερόλη, οι μαλτροδεξτρίνες, η γλυκόζη και η φρουκτόζη.

- ***Γλυκερόλη***

Η γλυκερόλη είναι μία αλκοόλη, η επιστημονική ονομασία της οποίας είναι προπανοτριόλη **($C_3H_5(OH)_3$).** Πρόκειται για ένα άχρωμο, άοσμο, παχύρρευστο υγρό με γλυκιά γεύση, που προέρχεται τόσο από φυτικές όσο και από πετροχημικές πρώτες ύλες. Η ακατέργαστη γλυκερόλη έχει καθαρότητα 70-80% ενώ η γλυκερόλη που προορίζεται για εμπορική χρήση φτάνει σε καθαρότητα 95,5 έως 99%. Έχει σημείο τήξης τους 17°C, και σημείο ζέσεως τους 290°C, ενώ η ειδική της βαρύτητα είναι 1,261 g/mL. Το μοριακό της βάρος είναι 92,09382 g/mol και η πυκνότητά της 1,26 g/cm^3.

Παρουσιάζει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, μεταξύ των οποίων ως διαλύτης, μέσο διαβροχής, πλαστικοποιητής, καθώς και ως πρώτη ύλη στην παραγωγή φαρμάκων, καλλυντικών, βερνικιών, σαπώνων και εκρηκτικών υλών. Στη βιομηχανία των τροφίμων και ποτών χρησιμοποιείται επίσης και ως γλυκαντικό, ως διαλύτης και ως συντηρητικό. Σε ό,τι αφορά στην ωσμωτική αφυδάτωση, η γλυκερόλη χρησιμοποιείται, λόγω του χαμηλού μοριακού της βάρους, για μείωση της ενεργότητας του νερού στο τρόφιμο. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο τροφίμων για τη βελτίωση της υφής τους καθώς και ως μικροβιολογικό προστατευτικό.

- ***Μαλτοδεξτρίνες***

Οι μαλτοδεξτρίνες είναι άγλυκοι πολυσακχαρίτες, οι οποίοι αποτελούνται από μόρια D-γλυκόζης ενωμένα κυρίως με α 1-4 δεσμούς. Αποτελεί μερικώς υδρολυμένο προϊόν αμύλου και χαρακτηρίζεται κυρίως από το βαθμό υδρόλυσης, ο οποίος εκφράζεται ως ισοδύναμο δεξτρόζης (dextrose Equivalen, DE), δηλαδή το επί τοις εκατό ποσοστό των αναγωγικών σακχάρων, υπολογιζόμενο ως βάρος δεξτρόζης επί ξηρού βάρους. Υψηλές τιμές DE παρέχουν αυξημένη λειτουργικότητα, που οδηγεί σε ταπείνωση του σημείου κατάψυξης, ανύψωση του σημείου βρασμού, της ενεργότητας νερού και άλλες ιδιότητες όπως για παράδειγμα υγροσκοπικότητα, γλυκύτητα, διαλυτότητα και ιξώδες. Οι μαλτοδεξτρίνες χρησιμοποιούνται για την υποκατάσταση λιπών και ως μέσα ελέγχου της κατάψυξης για την αποφυγή ανακρυστάλλωσης (Herrera et al., 2000).

Διάρκεια ωσμωτικής αφυδάτωσης

Η αύξηση του χρόνου βύθισης οδηγεί σε μεγαλύτερη απώλεια υγρασίας κατά τη διάρκεια της ωσμωτικής αφυδάτωση (Mundada et al, 2011). Προηγούμενες μελέτες έδειξαν ότι η πρόσληψη στερεών και η απώλεια του περιεχόμενου νερού των προϊόντων κατά την ωσμωτική αφυδάτωση, φτάνουν σε κατάσταση ισορροπίας με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον, τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας πραγματοποιούνται με μεγαλύτερο ρυθμό τις δύο πρώτες ώρες της διεργασίας και ακολουθεί μία μείωση του ρυθμού της ξήρανσης κατά τη διάρκεια του περαιτέρω χρόνου επεξεργασίας. Επομένως, η αρχική περίοδος της ώσμωσης είναι κρίσιμη δεδομένου ότι τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας είναι ταχεία και έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην περαιτέρω εξέλιξη της ωσμωτικής διαδικασίας (Tortoe, 2010).

Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει το ρυθμό των φαινομένων μεταφοράς μάζας κατά την ωσμωτική διαδικασία (Tortoe, 2010). Η αύξηση της θερμοκρασίας της διεργασίας επιταχύνει την απώλεια νερού, γεγονός που οφείλεται στη διόγκωση των κυτταρικών μεμβρανών, και οδηγεί σε ταχύτερη διείσδυση του νερού στο προϊόν και σε καλύτερες ιδιότητες μεταφοράς μάζας νερού στην επιφάνεια λόγω και του χαμηλότερου ιξώδους του ωσμωτικού μέσου. Κάτι αντίστοιχο όμως δε συμβαίνει και με την πρόσληψη στερεών η οποία επηρεάζεται λιγότερο από τη θερμοκρασία. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαφορά κατά την διάχυση του νερού και των υδατανθράκων. Οι Raoult-Wack et al. (1989), περιγράφουν ως ανταγωνιστικά τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας, νερού και στερεών, πιθανότατα λόγω του γεγονότος ότι αφενός μεν οι υδατάνθρακες εισχωρούν με διάχυση, αφετέρου δε μεταφέρονται με το ρεύμα του νερού. Παρ' όλα αυτά, η πολύ υψηλή θερμοκρασία μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στο τρόφιμο ως προς τη δομή και τα θρεπτικά του συστατικά (Segui et al., 2010) καθώς και ως προς το χρώμα, την υφή και τη γεύση του (Barat et al., 2001). Σε κάθε περίπτωση όμως, η βέλτιστη θερμοκρασία της διεργασίας εξαρτάται από το είδος του τροφίμου.

Χρήση ανάδευσης

Μία επιπλέον παράμετρος που επηρεάζει την απώλεια νερού, την πρόσληψη στερεών, καθώς και τη χρονική διάρκεια επίτευξης των επιθυμητών αποτελεσμάτων, είναι η χρήση ανάδευσης. Πολλές φορές, η χρήση ωσμωτικών διαλυμάτων μεγάλης συγκέντρωσης, και ως εκ τούτου υψηλού ιξώδους, δημιουργεί προβλήματα επίπλευσης του τροφίμου. Με τον τρόπο αυτό εμποδίζεται η επαφή μεταξύ αυτού και του ωσμωτικού διαλύματος, μειώνοντας έτσι τους ρυθμούς μεταφοράς μάζας (Phisut, 2012; Moreira et al., 2007). Έτσι, για να ενισχυθεί η μεταφορά μάζας, μπορεί να εφαρμοστεί η διαδικασία της ανάδευσης κατά τη διάρκεια της ώσμωσης. Σε πολλές βιβλιογραφικές πηγές γίνεται λόγος για τη σημαντική επίδραση της ανάδευσης στην απώλεια νερού του τροφίμου. Ο Moreira et al. (2007), μελέτησε το ρυθμό μεταφοράς μάζας δειγμάτων ωσμωμένων με και χωρίς ανάδευση. Τα δείγματα στα οποία πραγματοποιήθηκε ώσμωση με τη χρήση ανάδευσης, παρουσίασαν μεγαλύτερη απώλεια βάρους από αυτά που υπόκειντο σε ώσμωση χωρίς ανάδευση. Η διαδικασία αυτή δημιουργεί στο διάλυμα αναταραχές που έχουν ως αποτέλεσμα υψηλότερο βαθμό διάχυσης κατά τη διεργασία. Μεγαλύτερη μάλιστα απώλεια νερού παρατηρήθηκε στη τυρβώδη ροή παρά στη στρωτή (Shi & Xue, 2009; Moreira et al., 2007).

Αναλογία τροφίμου- ωσμωτικού μέσου

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη διεργασία, είναι η αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο. Πολλοί ερευνητές εξέτασαν την επίδραση διαφορετικών αναλογιών (1:1 έως 1:5) στα φαινόμενα μεταφοράς μάζας. Υψηλότερες αναλογίες, από 1:10 έως 1:60, χρησιμοποιήθηκαν για την αποφυγή της αραίωσης του ωσμωτικού μέσου, που μπορεί να προκύψει εξαιτίας της πρόσληψης νερού και απώλειας στερεών, και προκαλεί μείωση της ωσμωτικής ικανότητας του μέσου. Ωστόσο, για πρακτικούς σκοπούς και συνυπολογίζοντας και τον παράγοντα του κόστους, η βέλτιστη αναλογία που συνήθως επιλέγεται είναι 1:2 με 1:3 (Ahmed et al., 2016).

Επιφάνεια επαφής τροφίμου με ωσμωτικό μέσο

Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα της ωσμωτικής προκατεργασίας σχετίζονται άμεσα με τη διαφορά διαλυτότητας νερού και ωσμωτικού μέσου, γίνεται αντιληπτό ότι με έλεγχο της επιφάνειας επαφής μέσω του μεγέθους των δειγμάτων, μπορεί να καθοριστεί ο βαθμός απώλειας νερού και πρόσληψης στερεών (Nieuwenhuijzen et al., 2001). Μέχρι ένα συγκεκριμένο λόγο A/L (ολική επιφάνεια προς το ήμισυ του πάχους), δείγματα με μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια, υφίστανται μεγαλύτερη απώλεια νερού και πρόληψης στερεών σε σύγκριση με άλλες γεωμετρίες. Σχήματα με υψηλή τιμή ειδικής επιφάνειας, όπως κύβοι, ευνοούν την πρόσληψη στερεών εις βάρος της απώλειας νερού. Οι Islam & Flink (1982), ανέφεραν ότι το μέγεθος και το σχήμα του τροφίμου καθορίζει την τελική συγκέντρωσή του σε στερεά, όταν πρόκειται για μικρούς χρόνους ώσμωσης, όπου και η αφυδάτωση οφείλεται κατά κύριο λόγο στα φαινόμενα μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια.

Συγκέντρωση ωσμωτικού μέσου

Μία ακόμη παράμετρος προς αξιολόγηση είναι η συγκέντρωση του ωσμωτικού μέσου, που μπορεί να επηρεάσει τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας. Κατά τη διάρκεια παρατεταμένης ωσμωτικής προκατεργασίας, η αύξηση της συγκέντρωσης του διαλύματος, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού απώλειας νερού και πρόσληψης στερεών. Οι Mundada et al. (2011), μελέτησαν την επίδραση της συγκέντρωσης σουκρόζης στα φαινόμενα μεταφοράς μάζας κατά την ωσμωτική αφυδάτωση σπορίων ροδιού. Πραγματοποιήθηκε ωσμωτική αφυδάτωση σε διαλύματα τριών διαφορετικών συγκεντρώσεων σουκρόζης (40%, 50% και 60%). Παρατηρήθηκε αύξηση της απώλειας νερού και της πρόσληψης στερεών με αύξηση της συγκέντρωσης, με τα σπόρια ροδιού που εμβαπτίστηκαν σε ωσμωτικό διάλυμα 60% σουκρόζης, να παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές. Οι Ispir & Togrul (2009), μελέτησαν τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας κατά την ωσμωτική αφυδάτωση βερίκοκου. Το τρόφιμο εμβαπτίστηκε σε διαλύματα διαφορετικής συγκέντρωσης σακχαρόζης (40%, 50% και 60%). Ανέφεραν ότι η αύξηση της συγκέντρωσης της σακχαρόζης είχε ως αποτέλεσμα αύξηση της βαθμίδας της ωσμωτικής πίεσης και ως εκ τούτου υψηλότερες τιμές απώλειας νερού και πρόσληψης στερεών. Αντίστοιχα αποτελέσματα ελήφθησαν και από άλλους ερευνητές (Falade et al. (2007)-καρπούζι; Lazarides et al. (1995)-μήλο). Παρ' όλα αυτά, σε ορισμένες περιπτώσεις η πολύ υψηλή συγκέντρωση διαλύματος θα μπορούσε να έχει τα αντίθετα αποτελέσματα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο φαινόμενο σχηματισμού κρούστας στην επιφάνεια του τροφίμου (case hardening). Όταν το εξωτερικό διάλυμα έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση, η διείσδυση του υγρού στο τρόφιμο περιορίζεται από το ιξώδες. Επομένως η ακαμψία των εξωτερικών κυτταρικών στιβάδων του τροφίμου αυξάνεται πιο γρήγορα λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσής τους (case hardening) (Giraldo et al., 2003).

3.1.4 Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα ωσμωτικής αφυδάτωσης

Η διεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης παρουσιάζει πολλά οφέλη για τη βιομηχανία τροφίμων. Τα πιο σημαντικά εξ' αυτών είναι τα ακόλουθα:

- Παράταση της διάρκειας ζωής των τροφίμων με ταυτόχρονη διατήρηση σε μεγάλο βαθμό των οργανοληπτικών και ποιοτικών τους χαρακτηριστικών (Yetenayet & Hosahalli, 2010; Maestrelli et al., 2001)
- Μικρότερες απαιτήσεις σε ενέργεια συγκριτικά με τη συμβατική ξήρανση, αφού πραγματοποιείται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (Tortoe, 2010).

- Μείωση του κόστους συσκευασίας, αποθήκευσης και διανομής.
- Αποφυγή ενζυμικής και οξειδωτικής αμαύρωσης χωρίς την απαίτηση για χημική επεξεργασία. Τα σάκχαρα του ωσμωτικού διαλύματος βοηθούν στην αποτελεσματική αναστολή της πολυφαινολοξειδάσης που καταλύει την οξειδωτική αμαύρωση.

Παρά όμως τα πολυάριθμα πλεονεκτήματά της, η ωσμωτική αφυδάτωση παρουσιάζει και ορισμένα τεχνικά προβλήματα, τα οποία και καθιστούν ακόμη δύσκολη τη βιομηχανική της εφαρμογή. Τα προβλήματα αυτά είναι:

- Η διαχείριση του ωσμωτικού διαλύματος. Τα προβλήματα που σχετίζονται με το συγκεκριμένο θέμα έχουν να κάνουν με τη σύνθεση, την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίησή του, καθώς και με τη διαχείριση αποβλήτων και το κόστος του. Εκτενέστερη αναφορά στο ζήτημα της διαχείρισης του ωσμωτικού διαλύματος γίνεται και στη συνέχεια.
- Τη δυσκολία ελέγχου της διαδικασίας. Ο έλεγχος της πρόσληψης μεγάλων ποσοτήτων διαλυμένων ουσιών από το τρόφιμο είναι δύσκολος, κάτι το οποίο μπορεί να προκαλέσει ελάττωση του ρυθμού αφυδάτωσης λόγω της μειωμένης βαθμίδας ωσμωτικής πιέσεως στη διεπιφάνεια τροφίμου-μέσου. Η υψηλή πρόσληψη διαλυμένων ουσιών μπορεί επιπλέον να επιδράσει στο θρεπτικό προφίλ καθώς και στα ποιοτικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Επιπλέον, υπάρχει έλλειψη πληροφοριών για το σχεδιασμό και τον έλεγχο της ωσμωτικής αφυδάτωσης σε βιομηχανική κλίμακα.

3.1.5 Διαχείριση ωσμωτικού διαλύματος

Η σημαντικότερη ίσως παράμετρος που επηρεάζει και αναστέλλει την ευρύτερη εφαρμογή της μεθόδου αυτής είναι η δυσκολία διαχείρισης του ωσμωτικού διαλύματος. Η απομάκρυνση νερού από το εσωτερικό του τροφίμου προς το διάλυμα έχει σαν αποτέλεσμα την αραίωση του ωσμωτικού διαλύματος και επομένως τη μειωμένη δυνατότητα απομάκρυνσης νερού. Επιπλέον κατά την ωσμωτική αφυδάτωση επηρεάζεται η γεύση και το άρωμα του διαλύματος λόγω της μετακίνησης συστατικών από το τρόφιμο, η έκταση της οποίας εξαρτάται από τον τύπο του τροφίμου. Για την επαναχρησιμοποίηση λοιπόν του ωσμωτικού διαλύματος, πρωτεύον θέμα αποτελεί η απαλλαγή του από τα σωματίδια που πιθανώς να έχουν διασπαρθεί από το τρόφιμο σε αυτό, κάτι το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με συνεχή διήθηση. Επόμενο βήμα για την επαναχρησιμοποίησή του αποτελεί η αποκατάσταση της συγκέντρωσής του. Για το σκοπό αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί οι παρακάτω διεργασίες:

1. Εξάτμιση (ατμοσφαιρική σε υψηλή θερμοκρασία ή υπό κενό σε μέτρια θερμοκρασία).
2. Προσθήκη ωσμωτικού διαλύματος (χωρίς αλλαγή φάσης).
3. Συμπύκνωση μέσω μεμβράνης (χωρίς αλλαγή φάσης).
4. Συμπύκνωση μέσω ψύξης.
5. Προσθήκη διαλυτών συστατικών.

Η εξάτμιση αποτελεί την πλέον δημοφιλή τεχνική για βιομηχανική εφαρμογή με σκοπό την ανάκτηση της αρχικής συγκέντρωσης του ωσμωτικού διαλύματος. Βιβλιογραφικά, η εξάτμιση υπό κενό έχει χρησιμοποιηθεί από μεγάλο αριθμό ερευνητών. Προκειμένου όμως να γίνει ορθή εκτίμηση του συνολικού κόστους, πρέπει να συνεκτιμηθεί το κόστος αυτής. Από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, έχει υπολογιστεί ότι η κατανάλωση ενέργειας της συμβατικής ξήρανσης

είναι 2-3 φορές υψηλότερη από τη μέθοδο της ωσμωτικής αφυδάτωσης, συμπεριλαμβανομένου και του κόστους ανάκτησης της αρχικής συγκέντρωσης του διαλύματος (Dalla Rosa et al., 2001).

Η επαναχρησιμοποίηση του ωσμωτικού διαλύματος μπορεί να πραγματοποιηθεί 5-20 φορές, ανάλογα πάντα με το τρόφιμο. Η εφαρμογή της ανακύκλωσης του ωσμωτικού διαλύματος σε τρόφιμα απαιτεί επιπλέον την εξυγίανση και καθαρισμό του με χρήση συνδυαστικών επεξεργασιών, όπως φιλτράρισμα και παστερίωση σε συνδυασμό με προσθήκη στερεών–σακχάρων, προκειμένου το ωσμωτικό διάλυμα να επανέλθει στην αρχική του σύσταση. Στην περίπτωση ωσμωτικών διαλυμάτων με πολλά συστατικά, η ανακύκλωση είναι πιο δύσκολη, καθώς στον υπολογισμό της απαιτούμενης ποσότητας πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα ποσοστά των συστατικών. Ανεξάρτητα βέβαια της σύνθεσης του ωσμωτικού διαλύματος, η διαδικασία ανακύκλωσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη της τη μικροβιακή σταθερότητα του διαλύματος (Raoult-Wack, 1994).

Όταν το ωσμωτικό διάλυμα φτάσει σε σημείο όπου όλες οι μέθοδοι ανάκτησης και εξυγίανσής του δεν είναι πλέον εφαρμόσιμες, το διάλυμα θα πρέπει να απομακρυνθεί από τη γραμμή παραγωγής και εφόσον δεν υπάρχει άλλος τρόπος για περαιτέρω χρήση του, να απορριφθεί ως υγρό απόβλητο.

3.1.6 Ωσμωτική αφυδάτωση και τεχνολογία εμποδίων

Η τεχνολογία εμποδίων έχει αναπτυχθεί εδώ και αρκετά χρόνια ως μια νέα ιδέα για την παραγωγή ασφαλών, θρεπτικών, οικονομικών και σταθερών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος τροφίμων. Εκμεταλλεύεται τη χρήση συνδυασμού διαφορετικών τεχνικών συντήρησης, με σκοπό την επιβολή μιας σειράς παραμέτρων ανάσχεσης της αλλοίωσης, οι οποίες καλούνται εμπόδια (hurdles). Αυτά τα εμπόδια μπορεί να είναι η θερμοκρασία, η ενεργότητα νερού (a_w), το pH, το δυναμικό οξειδοαναγωγής καθώς και η χρήση συντηρητικών (Leistner et al., 1995). Η τεχνολογία εμποδίων επιτρέπει την παραγωγή σταθερών προϊόντων με συνδυαστική χρήση ήπιων μεθόδων επεξεργασίας. Λόγω της συνεργιστικής δράσης των επιμέρους παραμέτρων, τα εμπόδια μπορούν να εφαρμοστούν σε χαμηλότερη ένταση απ’ ότι θα απαιτούνταν στην περίπτωση που θα εφαρμόζονταν μεμονωμένα ως μέθοδοι συντήρησης. Η χρήση της τεχνολογίας εμποδίων θεωρείται επιτυχημένη, εάν ο συνδυασμός των εμποδίων αναστέλλει τη μικροβιακή ανάπτυξη στο τρόφιμο, σταθεροποιώντας τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και τη θρεπτικότητά του.

Η ωσμωτική αφυδάτωση, παρά τα πολύ θετικά αποτελέσματα που μπορεί να προσδώσει στο τρόφιμο, δε μπορεί από μόνη της να θεωρηθεί ως μέθοδος συντήρησης. Αντ’ αυτού αποτελεί μια προκατεργασία πριν από την κυρίως επεξεργασία του τροφίμου. Ο σκοπός της εφαρμογής της μεθόδου αυτής πριν από μία παραδοσιακή μέθοδο συντήρησης, είναι η βελτίωση κάποιων θρεπτικών, οργανοληπτικών και λειτουργικών ιδιοτήτων ή η μεγαλύτερη σταθερότητα του προϊόντος κατά την αποθήκευση. Στη συνέχεια ανάλογα με το είδος και την αρχική ποσότητα των μικροοργανισμών του τροφίμου, επιλέγονται οι παράγοντες που θα χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό της διαδικασίας σε συνδυασμό με την ωσμωτική αφυδάτωση. Τελικά, μέσω αυτής της συνεργιστικής δράσης των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων, παράγονται προϊόντα τα οποία είναι μικροβιολογικά σταθερά, έχοντας υποστεί ελάχιστη επεξεργασία, μειώνοντας το pH και την ενεργότητα του νερού, εφαρμόζοντας μία ήπια θερμική επεξεργασία και πιθανώς προσθέτοντας και μικρές ποσότητες αντιμικροβιακών παραγόντων (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996).

3.2 Ξήρανση

Ο όρος ξήρανση (drying) αναφέρεται στην αφαίρεση νερού από στερεά ή ημιστερεά υλικά. Η ξήρανση αποτελεί μια διεργασία ταυτόχρονης μεταφοράς θερμότητας και μάζας, μεταξύ στερεών σωμάτων και αδρανών αερίων ή κενού. Ο ρυθμός απομάκρυνσης της πτητικής ουσίας από το στερεό (ρυθμός ξήρανσης) επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες οι οποίοι μπορούν να ομαδοποιηθούν ως εξής:

- Παράγοντες που συνδέονται με τις συνθήκες ξήρανσης
- Παράγοντες που συνδέονται με τη φύση του στερεού
- Παράγοντες που συνδέονται με το σχεδιασμό της συσκευής ξήρανσης (ξηραντήρας)

Η ωθούσα δύναμη για τη μεταφορά θερμότητας είναι η βαθμίδα της θερμοκρασίας, ανάμεσα στην επιφάνεια του υλικού και στον περιβάλλοντα αέρα, ενώ επίσης εξαρτάται από τις εξωτερικές συνθήκες, υγρασία αέρα, ρυθμός ροής του αέρα στην επιφάνεια έκθεσης και πίεση. Όσον αφορά στη μεταφορά της μάζας, η διάχυση της υγρασίας οδηγείται από τη βαθμίδα συγκέντρωσης του νερού στο εσωτερικό του υλικού και την επιφάνεια του υλικού, ενώ εξαρτάται και από τη φύση του στερεού και τη θερμοκρασία. Η μεταφορά της ενέργειας σε μορφή θερμότητας από το περιβάλλον στο υγρό στερεό μπορεί να επιτευχθεί με συναγωγή, αγωγή και ακτινοβολία, ενώ η μεταφορά μάζας με μοριακή διάχυση, τριχοειδή ροή, ροή κατά Knudsen κλπ. Ο ρυθμός της ξήρανσης εξαρτάται από το ρυθμό που ακολουθούν οι δύο προαναφερθείσες διαδικασίες. Παρόλα αυτά, κατά τη διάρκεια της ξήρανσης καθεμία από αυτές μπορεί να είναι ο περιοριστικός παράγοντας που καθορίζει το ρυθμό ξήρανσης, αν και οι δυο προχωρούν ταυτόχρονα.

3.2.1 Ξήρανση τροφίμων

Η ξήρανση είναι ίσως η παλαιότερη και πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος συντήρησης των τροφίμων. Αποτελεί μια ευέλικτη και ευρέως διαδεδομένη τεχνική στη βιομηχανία τροφίμων καθώς και αντικείμενο συνεχούς ενδιαφέροντος στον κλάδο της έρευνας. Ο όρος ξήρανση αναφέρεται στην απομάκρυνση της υγρασίας από ένα υλικό με πρωταρχικό στόχο τη μείωση της μικροβιακής δραστηριότητας και της υποβάθμισης του προϊόντος, καθώς ο περιορισμός της ανάπτυξης και δράσης των μικροοργανισμών μπορεί να επιτευχθεί με μείωση του διαθέσιμου νερού. Εκτός από τα οφέλη της διατηρησιμότητας και του μειωμένου βάρους και όγκου που προσφέρει, η ξήρανση μειώνει το κόστος συσκευασίας, χειρισμού και μεταφοράς. Επιπλέον, η ξήρανση οδηγεί στην εύκολη παραγωγή προϊόντων σε σκόνη, με αποτέλεσμα να βοηθάει στην παρασκευή προϊόντων κατάλληλων για χρήση π.χ. μίγματα για κέικ, για σούπες κ.ά. (Araya-Farias & Ratti, 2009).

Ο όρος ξήρανση (drying) στη βιομηχανία τροφίμων χρησιμοποιείται για τη διεργασία στην οποία η απομάκρυνση νερού από το τρόφιμο γίνεται κυρίως με εξάτμιση. Διαφέρει από τη συμπύκνωση (concentration) ως προς το τελικό περιεχόμενο νερό στο τρόφιμο, το οποίο είναι χαμηλότερο στην περίπτωση της ξήρανσης. Αντί του όρου ξήρανση πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος αφυδάτωση (dehydration), αν και ο όρος αυτός αποδίδει καλύτερα την πλήρη απομάκρυνση νερού από το τρόφιμο. Η ξήρανση των περισσότερων τροφίμων γίνεται με θέρμανση. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται μεταφορά μάζας (νερού) από το τρόφιμο προς το περιβάλλον και μεταφορά θερμότητας από το μέσο θέρμανσης προς το τρόφιμο. Γίνεται σε ξηραντήρες διαφόρων τύπων, στους οποίους ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας προς το

προϊόν και μεταφοράς μάζας από το προϊόν, διαφέρει. Στην ξήρανση των τροφίμων ισχύουν οι βασικές αρχές που διέπουν την ξήρανση οποιουδήποτε άλλου προϊόντος. Οι ιδιαιτερότητες των τροφίμων σχετίζονται με το ρόλο του νερού σε αυτά και την ευαισθησία των συστατικών και των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους στις θερμικές διεργασίες (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009).

3.2.2 Μέθοδοι ξήρανσης

Η τεχνολογία της ξήρανσης έχει εξελιχθεί εντυπωσιακά με την πάροδο των χρόνων, φτάνοντας από την απλή χρήση της ηλιακής ενέργειας μέχρι τις σημερινές μεθόδους. Η μεγάλη ποικιλία προϊόντων διατροφής γέννησε την ανάγκη χρήσης διαφορετικών τύπων ξηραντήρων στη βιομηχανία. Τόσο οι ξηραντήρες όσο και οι μέθοδοι ξήρανσης μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Οι Kudra & Mujumdar (2002), Mujumdar & Menon (1995) και Vega-Mercado et al. (2001), έχουν δώσει λεπτομερή σχεδιαγράμματα για την κατηγοριοποίηση των βιομηχανικών ξηραντήρων, βασιζόμενα σε πολλά διαφορετικά κριτήρια. Μεταξύ αυτών, τα σημαντικότερα για την αξιολόγηση ενός συστήματος ξήρανσης, είναι τα ακόλουθα:

1. Τρόπος λειτουργίας (διαλείποντος ή συνεχούς έργου).
2. Πίεση λειτουργίας (υπό κενό, ατμοφαιρική ή υπερυψηλή πίεση).
3. Τρόπος μεταφοράς θερμότητας (αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία και συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων).
4. Κατάσταση του προς ξήρανση τροφίμου (σταθερό, υπό κίνηση, ρευστοποιημένο, κονιορτοποιημένο).
5. Χρόνος παραμονής (μικρός= κάτω από 1min, μεσαίος= 1-60min, μεγάλος= πάνω από 60min) (Araya-Farias & Ratti, 2009).

Ανάλογα με τη μέθοδο αφαίρεσης του νερού που εφαρμόζεται, οι διεργασίες ξήρανσης μπορούν να ταξινομηθούν σε

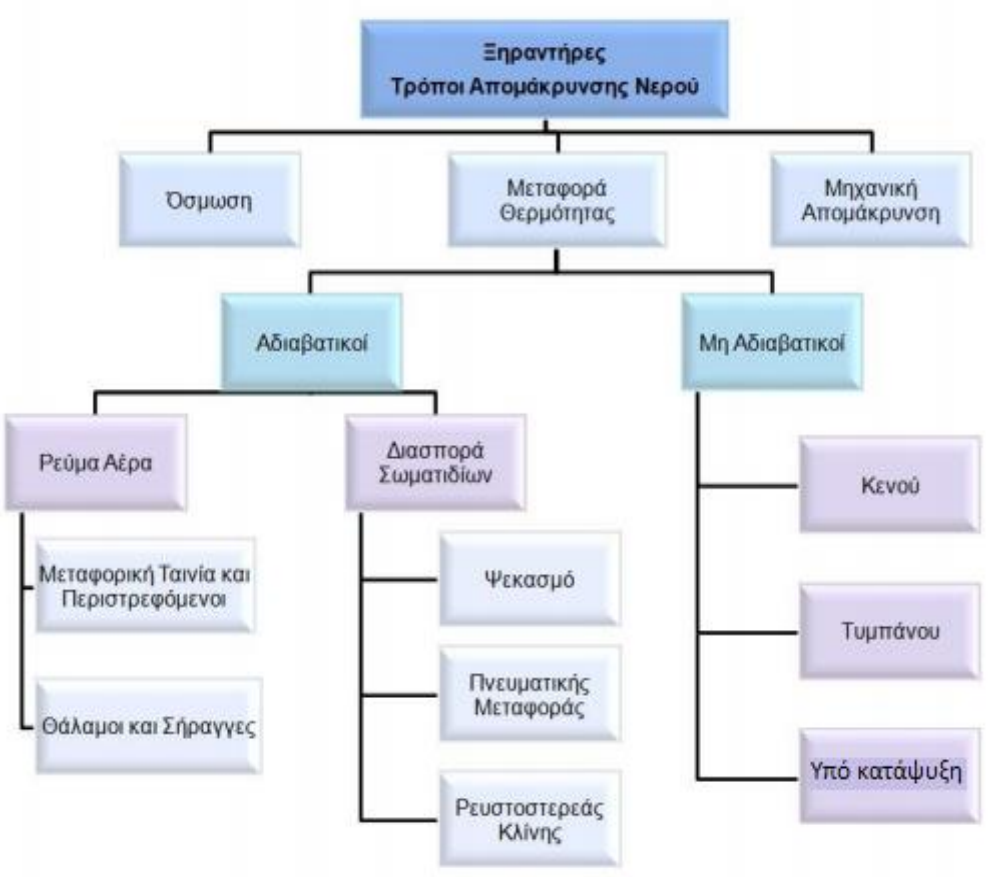
- θερμική ξήρανση
- οσμωτική αφυδάτωση και
- μηχανική αφυδάτωση.

Η θερμική ξήρανση είναι μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους ξήρανσης τροφίμων. Στην ξήρανση αυτή, ένα αέριο ή κενό μέσο χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του νερού από το υλικό. Οι ξηραντήρες μεταφοράς θερμότητας μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικούς τύπους: τους αδιαβατικούς και τους μη αδιαβατικούς.

- Στους αδιαβατικούς ξηραντήρες, ρεύμα αέρα παρέχει την απαιτούμενη θερμότητα εξάτμισης απομακρύνοντας ταυτόχρονα την εξατμιζόμενη υγρασία.
- Στους μη αδιαβατικούς ξηραντήρες η θερμότητα παρέχεται στο προϊόν με ακτινοβολία ή με αγωγή μέσω επαφής με μία επιφάνεια (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009).

Η θερμοκρασία της επιφάνειας του προϊόντος που βρίσκεται σε επαφή με την πηγή θερμότητας αυξάνει και οι παραγόμενοι υδρατμοί απομακρύνονται με κενό ή με κάποιο αέριο. Τύποι αδιαβατικών ξηραντήρων αποτελούν οι ξηραντήρες με ρεύμα αέρα, το οποίο διέρχεται πάνω από την επιφάνεια του προς ξήρανση τροφίμου και οι ξηραντήρες με αιώρηση σταγονιδίων υγρών τροφίμων (π.χ. διασπορών) σε ρεύμα αέρα. Στους ξηραντήρες με ρεύμα αέρα το προϊόν βρίσκεται είτε ακίνητο σε ράφια (θάλαμοι ξήρανσης, σήραγγες ξήρανσης), είτε μετακινείται

συνεχώς δια μέσου του ξηραντήρα (ξηραντήρες με μεταφορική ταινία, περιστρεφόμενοι ξηραντήρες). Ξηραντήρες με αιώρηση σε αέρα αποτελούν οι ξηραντήρες ψεκασμού (spray dryers), οι ξηραντήρες πνευματικής μεταφοράς και οι ξηραντήρες ρευστοστερεάς κλίνης. Οι κύριοι μη αδιαβατικοί ξηραντήρες που χρησιμοποιούνται για ξήρανση τροφίμων είναι οι ξηραντήρες τυμπάνου, οι ξηραντήρες κενού και οι θάλαμοι ξήρανσης υπό κατάψυξη (λυοφιλιωτές - freeze dryers). Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα (Εικόνα 3.2) παρουσιάζονται οι κύριοι τύποι ξηραντήρων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τροφίμων κατηγοριοποιημένοι ανάλογα με τον τρόπο απομάκρυνσης του νερού.



Εικόνα 3.2 Κατηγοριοποίηση ξηραντήρων με βάση τον τρόπο απομάκρυνσης νερού

Στη βιομηχανία τροφίμων χρησιμοποιούνται ποικίλες διεργασίες ξήρανσης, όπως ξήρανση υπό κατάψυξη, ξήρανση σε ρεύμα αέρα, ξήρανση υπό κενό, ξήρανση με υπερήχους, ξήρανση με τη βοήθεια μικροκυμάτων, ξήρανση σε υπερκρίσιμες συνθήκες, ξήρανση με ψεκασμό, ξήρανση χαμηλής πίεσης υπέρθερμου ατμού κ.λπ. ή και συνδυασμός τους, με στόχο την παραγωγή αφυδατωμένων προϊόντων υψηλής διατροφικής αξίας και λειτουργικότητας. Η επιλογή της εκάστοτε μεθόδου εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως είναι τα χαρακτηριστικά των φρέσκων προϊόντων (φυσικές ιδιότητες, περιεχόμενη υγρασία, κατανομή μεγέθους σωματιδίων κ.λπ.), το επιθυμητό τελικό επίπεδο υγρασίας, η ποιότητα, οι προδιαγραφές και οι ιδιότητες των τελικών προϊόντων, η τελική τους χρήση («έτοιμα» προϊόντα ή μερικώς επεξεργασμένα), οι οικονομικές απαιτήσεις και η ενεργειακή κατανάλωση.

3.2.2.1 Ξήρανση σε ρεύμα αέρα

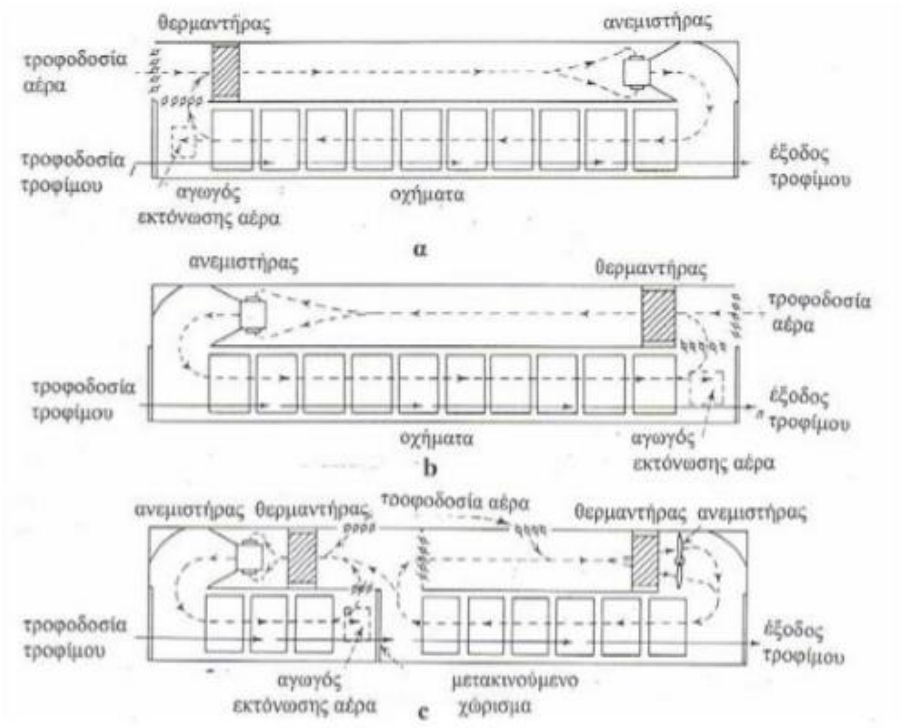
Η ξήρανση σε ρεύμα αέρα είναι μία διεργασία ταυτόχρονης μεταφοράς θερμότητας, μάζας και ορμής. Στην περίπτωση της ξήρανσης με αέρα, η ατμόσφαιρα χρησιμοποιείται ως το μέσο ξήρανσης και θερμότητας, αλλά θα μπορούσαν να εφαρμοστούν διαφορετικοί τρόποι για τη διαδικασία.

Θάλαμοι ξήρανσης

Οι θάλαμοι ξήρανσης χρησιμοποιούνται για την ξήρανση τροφίμων σε στερεά μορφή τα οποία απλώνονται σε λεπτή στρώση σε δίσκους που τοποθετούνται σε ράφια διατεταγμένα κατακόρυφα μέσα στο θάλαμο. Η ξήρανση γίνεται με ρεύμα θερμού αέρα που διοχετεύεται ανάμεσα στους δίσκους παράλληλα με την επιφάνεια του τροφίμου ή κάθετα προς αυτή. Το κύριο πρόβλημα σε αυτούς τους ξηραντήρες είναι η ανομοιόμορφη ξήρανση του προϊόντος λόγω ανομοιόμορφης ροής του αέρα δια μέσου αυτού και διαφορετικής υγρασίας του αέρα που έρχεται αρχικά σε επαφή με το τρόφιμο με τον αέρα στην έξοδο από τους δίσκους. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με περιστροφή των δίσκων ή αναστροφή του ρεύματος του αέρα. Η ταχύτητα του αέρα κυμαίνεται μεταξύ 2,5 και 5 m/s.

Σήραγγες ξήρανσης

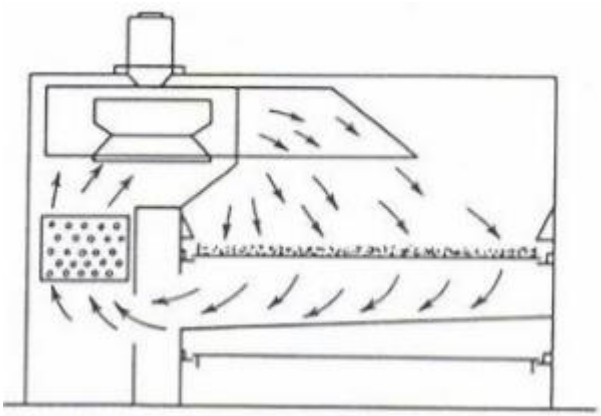
Οι σήραγγες ξήρανσης είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος στη βιομηχανική αφυδάτωση στερεών τροφίμων, καθώς και αυτή που έχει εφαρμοστεί στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Πρόκειται για μια επέκταση των θαλάμων ξήρανσης σε μεγαλύτερη κλίμακα. Αποτελούνται βασικά από ένα τούνελ (ως θάλαμος ξήρανσης), που περιέχει τους δίσκους των προϊόντων που τοποθετούνται σε κινητά καρότσια που κινούνται κατά μήκος της σήραγγας, έναν ανεμιστήρα για να κυκλοφορεί το θερμό αέρα, και μία μονάδα θέρμανσης για την προθέρμανση του αέρα πριν διοχετευτεί στο προϊόν και στη συνέχεια στην εξάτμιση. Ο κυκλοφορούμενος αέρας θερμαίνεται απευθείας συνήθως από έναν καυστήρα αερίου και ο θερμός αέρας ωθείται μέσα στη σήραγγα από έναν ανεμιστήρα. Στην ξήρανση μέσω σήραγγας, οι πρώτες ύλες φορτώνονται στα καρότσια των δίσκων τα οποία τροφοδοτούνται συνεχώς και ανά τακτά χρονικά διαστήματα μέσα στη σήραγγα ξήρανσης στο ένα της άκρο ενώ το αποξηραμένο προϊόν εκφορτώνεται στο άλλο άκρο της σήραγγας. Οι αποξηραντές λειτουργούν σε διάφορες διαμορφώσεις, όπως αντιρροής, παράλληλης ροής και μικτής ροής (Εικόνα 3.3). Η επιλογή των ρυθμίσεων της σήραγγας εξαρτάται από την ευαισθησία του προϊόντος σε υψηλές θερμοκρασίες σε διαφορετικά ποσοστά υγρασίας.



Εικόνα 3.3 Σήραγγες ξήρανσης α: αντιρροής, b: ομορροής, c: μικτής ροής με απομάκρυνση του αέρα στο μέσο.

Ξηραντήρες με μεταφορική ταινία

Οι αποξηραντές με ιμάντα μεταφοράς, χρησιμοποιούνται συχνά για τις μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές ξήρανσης. Αυτό το είδος της αφυδάτωσης λειτουργεί σε συνεχή βάση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ξήρανση πολλών προϊόντων τροφίμων. Αποτελείται από μια μονάδα θέρμανσης, ανεμιστήρα για τον εξαερισμό του αέρα, ένα θάλαμο ξήρανσης και έναν ιμάντα μεταφοράς. Το προϊόν τοποθετείται σε ένα μεταφορέα και κινείται συνεχώς μέσω του θαλάμου ξήρανσης με την ταχύτητα του μεταφορέα από την είσοδο τροφοδοσίας στην έξοδο του ξηραντήρα (Εικόνα 3.4). Ο επιθυμητός χρόνος ξήρανσης επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση της ταχύτητας του μεταφορέα. Εάν απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος ξήρανσης, χρησιμοποιείται ξηραντήρας με πολλαπλό στάδιο μεταφορέων, το οποίο αποτελείται από μια σειρά από μεταφορείς που στοιβάζονται οριζόντια ή κάθετα. Η μεταφορά-μετακίνηση μεταξύ των σταδίων των μεταφορέων επιτρέπει τον αναπροσανατολισμό και την ανάμειξη του προϊόντος για τη βελτίωση της ομοιομορφίας της ξήρανσης (Tang & Yang, 2004). Ο ξηραντήρας μπορεί να αποτελείται από διάφορα τμήματα σε σειρά για κάθε στάδιο, στο οποίο μπορεί να ελέγχεται η θερμοκρασία, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του αέρα, καθώς και η ταχύτητα του μεταφορέα για κάθε τμήμα για να μεγιστοποιηθεί η ταχύτητα ξήρανσης και να βελτιστοποιηθεί η ενεργειακή απόδοση. Αποξηραντές με μεταφορείς συνήθως παρέχουν υψηλότερη απόδοση και πιο σταθερή ποιότητα προϊόντων, αλλά είναι πιο κοστοβόροι σε σύγκριση με τους ξηραντήρες με σήραγγα.



Εικόνα 3.4 Ξηραντήρας μεταφορικής ταινίας με διαβίβαση του αέρα δια μέσου του προϊόντος.

3.2.2.2 Ξήρανση με διασπορά σωματιδίων

Ξηραντήρες με ψεκασμό

Η διεργασία ξήρανσης με την καλύτερη ίσως εφαρμογή σε υγρά τρόφιμα είναι η ξήρανση με ψεκασμό (spray drying). Πρόκειται για μία μέθοδο όπου το υγρό διασκορπίζεται σε μικρά σταγονίδια σε ένα ζεστό μέσο συναγωγής τα οποία μετατρέπονται σε λεπτά στερεά σωματίδια. Στα βασικά πλεονεκτήματα αυτού του τύπου ξήρανσης περιλαμβάνεται ο μικρός χρόνος παραμονής στον ξηραντήρα και η διατήρηση του τροφίμου σε θερμοκρασία όχι υψηλότερη από τη θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου του αέρα ξήρανσης. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζονται εξαιρετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά των ξηρών προϊόντων. Η διαδικασία έχει βρει πολλές εφαρμογές στην επεξεργασία τροφίμων και ιδιαίτερα στην παραγωγή της στιγμιαίας σκόνης τροφίμων (Chegini & Ghobadian, 2005; Goula & Adamopoulos, 2008). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως για να ληφθούν σκόνες από γάλα, ορό γάλακτος, μαγιά και άλλα πολύτιμα προϊόντα λόγω των καλής τελικής ποιότητάς τους (Ratti, 2013). Οι ξηραντήρες με ψεκασμό είναι διαφόρων τύπων όσον αφορά στη ροή του αέρα σε σχέση με τα σταγονίδια του αέρα. Στους τύπους αυτούς περιλαμβάνονται οι ξηραντήρες αντιρροής, ομορροής με βαλβίδα, ομορροής με περιστρεφόμενο ψεκαστήρα και μικτής ροής (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009).

Ξηραντήρες πνευματικής μεταφοράς

Χρησιμοποιούνται για τρόφιμα σε μορφή κόκκων, νιφάδων ή σκόνης που μπορούν να μεταφερθούν σε ρεύμα θερμού αέρα. Το ρεύμα αέρα κινείται με υψηλή ταχύτητα (10-30 m/s) και οι χρόνοι παραμονής του τροφίμου στον ξηραντήρα είναι της τάξης 1-10 s. Αυτοί οι ξηραντήρες είναι κατάλληλοι για τρόφιμα που η αρχική υγρασία τους δεν υπερβαίνει το 80% επί υγρής βάσης και όταν το μεγαλύτερο μέρος της υγρασίας που πρόκειται να απομακρυνθεί, απομακρύνεται με σταθερό ρυθμό ξήρανσης.

Ξηραντήρες ρευστοστερεάς κλίνης

Χρησιμοποιούνται για παρόμοια τρόφιμα με τους ξηραντήρες πνευματικής μεταφοράς και επιτυγχάνεται και σε αυτούς πολύ καλή επαφή των σωματιδίων και του αέρα. Ο αέρας διαβιβάζεται μέσω κλίνης σωματιδίων σε αρκετά μεγάλη ταχύτητα ώστε να διατηρήσει τα σωματίδια σε αιώρηση. Η ταχύτητα εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων και την πυκνότητά τους, αλλά συνήθεις τιμές είναι μεταξύ 0,05 και 0,75 m/s. Για μεγαλύτερα ή πυκνότερα σωματίδια που δύσκολα ρευστοποιούνται χρησιμοποιείται συμπληρωματική ανακίνηση του ιμάντα μεταφοράς αυτών. Με τη ρευστοποίηση επιτυγχάνεται ομοιόμορφη ξήρανση και οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας αέρα/ σωματιδίων είναι της τάξης των 250 W/m^2K. Οι ξηραντήρες αυτοί είναι συνεχούς ή ασυνεχούς λειτουργίας.

3.2.2.3 Ξήρανση υπό κενό

Η ξήρανση υπό κενό χρησιμοποιείται κυρίως για την προστασία του υλικού από αυξημένες θερμοκρασίες και οξειδώσεις. Χρησιμοποιείται ακόμη για λόγους ευκολίας, όπως για παράδειγμα στην ανάκτηση μιας οργανικής ουσίας από εκχυλισμένο στερεό. Εφαρμόζεται σε πολλές περιπτώσεις για την ξήρανση τροφίμων και συγκεκριμένα έχει εφαρμοστεί για την ξήρανση ορισμένων λαχανικών, προϊόντων γάλατος, χυμών φρούτων κ.α. Βασίζεται στο γεγονός ότι το σημείο βρασμού του νερού είναι μικρότερο από 100°C καθώς η πίεση μειώνεται κάτω από την ατμοσφαιρική. Είναι γνωστή ως έμμεση μέθοδος επειδή γίνεται χρήση μικρής ποσότητας ή και καθόλου αέρα. Η μεταφορά θερμότητας γίνεται μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας. Σε σύγκριση με τις άμεσες μεθόδους, η ξήρανση υπό κενό έχει μικρότερη μέγιστη θερμοκρασία ξήρανσης. Οι περισσότεροι ξηραντήρες κενού χρησιμοποιούν απόλυτη πίεση περίπου 7 kPa, που χαμηλώνει το σημείο βρασμού του νερού στους 39°C (Barbosa-Cánovas et al., 1996). Όταν χρησιμοποιείται κενό, σημαντικό μέρος του συστήματος αποτελεί ο συμπυκνωτής, ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ του ξηραντήρα και της αντλίας κενού. Ο κύριος όγκος του διαλύτη συλλέγεται στον συμπυκνωτή. Μια ποσότητα διαλύτη χάνεται στην αντλία κενού, γιατί τα μη-συμπυκνωμένα αέρια που εξέρχονται είναι κορεσμένα με τον διαλύτη. Για να επιτευχθεί ο περιορισμός των απωλειών σε αυτό το σημείο, το νερό ψύξης του συμπυκνωτή πρέπει να περιέλθει στην χαμηλότερη πρακτικά θερμοκρασία. Αν είναι αναγκαίο, η περίσσεια του διαλύτη στα μη-συμπυκνωμένα αέρια συλλέγεται με κατάλληλο προσροφητικό μέσο.

3.2.2.4 Ξήρανση με κατάψυξη

Στην ξήρανση με κατάψυξη, το κατεψυγμένο υλικό υποβάλλεται σε μία πίεση κάτω από το τριπλό σημείο και θερμαίνεται για να προκληθεί η εξάχνωση του πάγου σε ατμό. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως για υψηλής ποιότητας αποξηραμένα προϊόντα, τα οποία περιέχουν θερμοευαίσθητα συστατικά, όπως βιταμίνες, αντιβιοτικά και μικροβιακή καλλιέργεια. Η απουσία αέρος και χαμηλής θερμοκρασίας αποτρέπει την υποβάθμιση λόγω της οξείδωσης ή τη χημική τροποποίηση του προϊόντος. Δίνει επίσης πολύ πορώδη προϊόντα, τα οποία οδηγούν σε υψηλούς ρυθμούς ενυδάτωσης. Ωστόσο, η ξήρανση με κατάψυξη είναι μια αργή και δαπανηρή διαδικασία. Παράλληλα με το χρόνο επεξεργασίας απαιτείται πρόσθετη ενέργεια για να λειτουργεί ο συμπιεστής και οι μονάδες ψύξης, γεγονός που καθιστά το κόστος της διαδικασίας πολύ υψηλό για εμπορική χρήση. Έτσι, χρησιμοποιείται κυρίως για προϊόντα υψηλής αξίας.

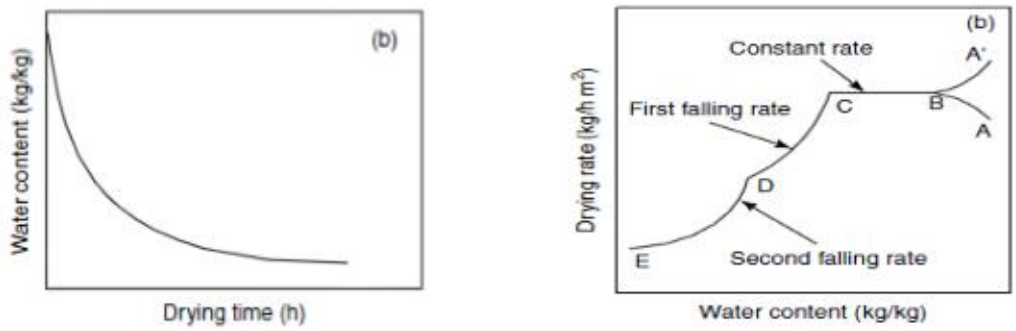
3.2.2.5 Ξήρανση τυμπάνου

Η ξήρανση τυμπάνου είναι μία ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος για την ξήρανση ιλύος, πουρέ ή υγρού υλικού. Η χρήση των ξηραντήρων τυμπάνου είναι μια κοινή πρακτική στη βιομηχανία τροφίμων για την ξήρανση ποικίλων προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των γαλακτοκομικών προϊόντων, παιδικών τροφών, δημητριακών, πολτού φρούτων και λαχανικών, πουρέ πατάτας, μαγειρεμένου αμύλου κ.λπ. (Rodriguez et al., 1996). Οι ξηραντήρες τυμπάνου αποτελούνται από τύμπανο που περιστρέφεται περί οριζόντιο άξονα. Το τύμπανο θερμαίνεται εσωτερικά με ατμό και το υγρό τρόφιμο κατανέμεται σε λεπτό στρώμα στην εξωτερική επιφάνεια όπου και κολλά καθώς ξηραίνεται. Το ξηρό τρόφιμο απομακρύνεται με μαχαίρια. Η θερμότητα για την ξήρανση μεταφέρεται με αγωγή από την επιφάνεια του κυλίνδρου προς το τρόφιμο. Υπάρχουν δύο τύποι ξηραντήρων τυμπάνου, με μονό και διπλό τύμπανο. Στους ξηραντήρες διπλού τυμπάνου οι κύλινδροι περιστρέφονται σε αντίθετη φορά και το μεταξύ τους διάκενο ρυθμίζεται ώστε να αντιστοιχεί στο διπλάσιο του επιθυμητού πάχους του στρώματος του υγρού. Η τροφοδοσία του προς ξήρανση τροφίμου γίνεται υπεράνω των κυλίνδρων ή σε ανοικτό δοχείο στο οποίο εμβαπτίζονται οι κύλινδροι (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009). Ο εξοπλισμός και η λειτουργία ωστόσο των ξηραντήρων τυμπάνου κενού είναι υψηλού κόστους, γεγονός που περιορίζει αυτή την τεχνική σε προϊόντα μόνο υψηλής αξίας (Tang et al., 2004).

3.2.3 Μαθηματική μοντελοποίηση ξήρανσης

3.2.3.1 Καμπύλες ξήρανσης- Ρυθμός ξήρανσης

Οι καμπύλες ξήρανσης κατασκευάζονται με βάση τα πειραματικά δεδομένα υγρασίας- χρόνου που λαμβάνονται κατά την ξήρανση υλικών συνήθως σε ρεύμα αέρα. Κατά την ξήρανση προσδιορίζεται η υγρασία του τροφίμου, εκφρασμένη συνήθως σε ξηρή βάση, σε διάφορες χρονικές στιγμές και η υγρασία ισορροπίας. Με βάση αυτά τα δεδομένα, κατασκευάζεται η καμπύλη ξήρανσης με τεταγμένη την υγρασία του τροφίμου ή την ελεύθερη υγρασία αυτού και τετμημένη το χρόνο ξήρανσης. Με αριθμητική διαφόρηση των πειραματικών δεδομένων προκύπτει ο ρυθμός ξήρανσης δηλαδή η μεταβολή της υγρασίας ως προς το χρόνο ξήρανσης (dw/dt) και η καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης δίνει τη μεταβολή του ρυθμού ξήρανσης ως συνάρτηση της υγρασίας ή της ελεύθερης υγρασίας. Τυπικές μορφές αυτών των καμπυλών δίνονται στην Εικόνα 3.5. Σ’ αυτή φαίνεται ο αρχικός σταθερός ρυθμός ξήρανσης που ακολουθούν τα περισσότερα προϊόντα, ακολουθούμενος από μειωνόμενο ρυθμό ξήρανσης. Το σημείο στο οποίο παρατηρείται αυτή η μεταβολή του ρυθμού ξήρανσης καλείται κρίσιμη περιεκτικότητα σε υγρασία. Η καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης μπορεί να εμφανίσει ένα αρχικό τμήμα αυξανόμενου ρυθμού εάν το προϊόν εισέρθει στον ξηραντήρα σε χαμηλή θερμοκρασία. Όσο η υγρασία πλησιάζει προς την υγρασία ισορροπίας του προϊόντος, ο ρυθμός ξήρανσης μειώνεται περισσότερο τείνοντας στην τιμή 0.



Εικόνα 3.5 Καμπύλες (α)ξήρανσης και (β)ρυθμού ξήρανσης.

Κατά την περίοδο του σταθερού ρυθμού ξήρανσης, η επιφάνεια του προϊόντος είναι κορεσμένη με νερό και η απομάκρυνση της υγρασίας ελέγχεται από το ρυθμό εξάτμισης του νερού από την επιφάνεια προς τον περιβάλλοντα χώρο. Η θερμοκρασία του προϊόντος είναι συνήθως η θερμοκρασία υγρού βολβού του αέρα ξήρανσης. Η περίοδος αυτή διαρκεί όσο η μεταφορά υγρασίας προς την επιφάνεια είναι ταχύτερη από την εξάτμιση από αυτήν. Ο ρυθμός ξήρανσης σε επαφή με ρεύμα θερμού αέρα εξαρτάται από τη μεταφορά θερμότητας από τον αέρα προς την επιφάνεια του τροφίμου και από τη μεταφορά μάζας από την επιφάνεια προς τον αέρα. Κατά την περίοδο αυτή, ο ρυθμός ξήρανσης είναι ανεξάρτητος από την επιφάνεια του υλικού και καθορίζεται από τις εξωτερικές συνθήκες. Ορισμένα τρόφιμα δεν παρουσιάζουν περίοδο σταθερού ρυθμού ξήρανσης. Για τα τρόφιμα όπου η κίνηση του υγρού ελέγχεται από τριχοειδείς δυνάμεις και δυνάμεις βαρύτητας, έχει βρεθεί η ύπαρξη περιόδου σταθερού ρυθμού ξήρανσης. Αντίθετα, σε δομημένα συστήματα τροφίμων, όπου η κίνηση της υγρής φάσης γίνεται με διάχυση, δεν έχει βρεθεί η ύπαρξη της περιόδου αυτής (Rizvi, 2005).

Κατά την περίοδο του μειούμενου ρυθμού ξήρανσης, η μεταφορά υγρασίας προς την επιφάνεια του τροφίμου είναι το ελέγχον στάδιο και η επιφάνεια δεν είναι πια κορεσμένη με νερό. Η περίοδος αυτή ξεκινάει σε υγρασία χαμηλότερη από την κρίσιμη και ο ρυθμός ξήρανσης σε αυτή μπορεί να μειώνεται γραμμικά με την υγρασία. Ορισμένα τρόφιμα εμφανίζουν περισσότερες από μία περιόδους μειούμενου ρυθμού ξήρανσης, συνήθως δύο ή και τρεις. Η ύπαρξη μίας ή περισσοτέρων τέτοιων περιόδων αποδίδεται στη διαφορετικότητα στη συμπεριφορά υγροσκοπικών και μη υγροσκοπικών υλικών. Σύμφωνα με τη θεώρηση αυτή, μη υγροσκοπικά υλικά είναι εκείνα στα οποία η μερική πίεση του νερού στο υλικό είναι ίση με την τάση ατμών του νερού και εμφανίζουν μία μόνο περίοδο ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης. Υγροσκοπικά είναι τα υλικά στα οποία η μερική πίεση του νερού στο υλικό γίνεται χαμηλότερη από τη τάση ατμών του νερού σε ορισμένη τιμή υγρασίας. Αυτά τα υλικά εμφανίζουν δύο ή και τρεις περιόδους μειούμενου ρυθμού ξήρανσης (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009; Araya-Farias & Ratti, 2009).

3.2.3.2 Περιγραφή της ξήρανσης με μαθηματικά μοντέλα

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η διεργασία της ξήρανσης, κατά την περίοδο του ελαττούμενου ρυθμού, ελέγχεται από το μηχανισμό της διάχυσης του υγρού ή/και του ατμού. Τα μοντέλα ξήρανσης λεπτής στιβάδας που περιγράφουν το φαινόμενο αυτό, εμπίπτουν κυρίως σε τρεις κατηγορίες, τα θεωρητικά, ημι-θεωρητικά και εμπειρικά. Το πρώτο λαμβάνει υπόψη μόνο την

εσωτερική αντίσταση στη μεταφορά της υγρασίας, ενώ τα άλλα δύο εξετάζουν την εξωτερική αντίσταση στη μεταφορά υγρασίας μεταξύ του προϊόντος και του αέρα (Panchariya et al.,2002).

Η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος προσέγγισης των φαινομένων μεταφοράς μάζας και θερμοκρασίας, βάση της μακροσκοπικής προσέγγισης της ξήρανσης, βασίζεται στον 2ο νόμο διάχυσης του Fick, που περιγράφει τη διάχυση της υγρασίας προς την εξωτερική επιφάνεια του στερεού λόγω διαφοράς συγκέντρωσης. Στην περίπτωση της γεωμετρίας πλάκας η σχέση αυτή περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{\partial w}{\partial \mathrm{t}} = D\frac{\partial^2 w}{\partial \mathrm{r}^2} \qquad Εξίσωση\ 3.4$$

όπου w είναι η υγρασία,

D είναι ο συντελεστής διάχυσης,

r είναι η χαρακτηριστική απόσταση της διάχυσης και

t είναι ο χρόνος.

Ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, D, θεωρείται σταθερός, αν και στην πραγματικότητα ο συντελεστής διάχυσης συνήθως μειώνεται με μείωση της υγρασίας. Εξαρτάται επίσης από τη θερμοκρασία του στερεού και τη μεταβολή του ακολουθεί την εξίσωση Arrhenius, στην οποία υπεισέρχεται η ενέργεια ενεργοποίησης για τη διάχυση. Επειδή τα τρόφιμα αποτελούνται από ένα πολύπλοκο σύστημα τριχοειδών πόρων διαφορετικών διαμέτρων, η τριχοειδής μεταφορά υγρασίας είναι δύσκολο να διατυπωθεί σε μορφή εξίσωσης. Επίσης είναι δύσκολο να διαφοροποιηθεί η ροή λόγω τριχοειδών φαινομένων από τη ροή λόγω διαφοράς συγκέντρωσης. Έτσι συνήθως χρησιμοποιείται ανεξάρτητα από το μηχανισμό μεταφοράς μάζας στο εσωτερικό του τροφίμου η εμπειρική εξίσωση:

$$\frac{dw}{dt} = k \cdot \omega \qquad Εξίσωση\ 3.5$$

όπου k η εμπειρική σταθερά ξήρανσης και

ω η αδιάστατη υγρασία

Η Εξίσωση 3.5 υποδηλώνει ότι ο ρυθμός ξήρανσης μεταβάλλεται γραμμικά με την εναπομένουσα ελεύθερη υγρασία του τροφίμου. Αυτό στην πραγματικότητα συμβαίνει σε πολλά πορώδη τρόφιμα. Η ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης δίνει τον χρόνο της περιόδου μειούμενου ρυθμού ξήρανσης εάν η τιμή του k παραμένει σταθερή:

$$t = -ln\omega k \qquad Εξίσωση\ 3.6$$

3.2.4 Ωσμωτική αφυδάτωση ως προεπεξεργασία της ξήρανσης

Η ωσμωτική αφυδάτωση έχει προταθεί ευρέως ως προκατεργασία της ξήρανσης, λόγω της πληθώρας πλεονεκτημάτων που μπορεί να προσφέρει ο συνδυασμός των δύο αυτών τεχνολογιών. Η χρήση της ωσμωτικής αφυδάτωσης μπορεί να αυξήσει την απόδοση του ξηραντήρα κατά 2-3 φορές μειώνοντας το βάρος και τον όγκο του τροφίμου. Επιπλέον, μπορεί να αλλάζει τη δομή του τροφίμου με αποτέλεσμα τη βελτίωση ορισμένων οργανοληπτικών

ιδιοτήτων στο τελικό τρόφιμο. Αυτή η μέθοδος προκατεργασίας μπορεί ακόμη να αποτρέψει ορισμένες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την απευθείας ξήρανση των τροφίμων. Τέτοιες αντιδράσεις μπορεί να είναι οι αντιδράσεις αμαύρωσης, ενζυμικές και μη ενζυμικές, που οφείλονται κυρίως στην επιβολή υψηλής θερμοκρασίας κατά τη ξήρανση, καθώς και η σκλήρυνση του φλοιού ή αλλιώς ο σχηματισμός κρούστας (case hardening). Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, η συγκέντρωση της υγρασίας στα εξωτερικά στρώματα των τροφίμων είναι μικρότερη από το εσωτερικό και σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να δημιουργηθεί ένας φλοιός πρακτικά αδιαπέραστος από την υγρασία, ο οποίος περικλείει τον όγκο του υλικού, έτσι ώστε η εσωτερική υγρασία να μην μπορεί να αφαιρεθεί. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σκλήρυνση φλοιού. Με τη χρήση επομένως της ωσμωτικής αφυδάτωσης πριν από το στάδιο της ξήρανσης, τα φαινόμενα αυτά μπορούν να μειωθούν αισθητά ή ακόμη και να εξαλειφθούν.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένες βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με τη συνδυαστική εφαρμογή ωσμωτικής αφυδάτωσης και ξήρανσης.

Πίνακας 3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση συνδυαστικής εφαρμογής ωσμωτικής προκατεργασίας και ξήρανσης

Είδος τροφίμου	**Πλεονεκτήματα ωσμωτικής προκατεργασίας**	**Βιβλιογραφική αναφορά**
Μανιτάρι	Μικρότερος χρόνος ξήρανσης Πιο ομοιογενής θέρμανση Μείωση συρρίκνωσης	Torringa et al. 2001
Μήλο	Μεγαλύτερο πορώδες Καλύτερη διατήρηση χρώματος	Mandala et al. 2005
Κολοκύθα	Ενίσχυση μεταφοράς μάζας κατά την ξήρανση Μεγάλη μείωση όγκου τροφίμου προς ξήρανση	Garcia et al. 2007
Μπανάνα/ Παπάγια/ Πεπόνι	Μείωση χρόνου ξήρανσης	Fernandes et al. 2006a; Fernandes et al. 2006b; Rodrigues et al. 2007,
Μάνγκο	Μείωση όγκου τροφίμου Τροποποίηση αντίστασης κυτταρικού τοιχώματος στη ροή νερού	Nieto et al. 2001
Αχλάδι	Μεγαλύτερος ρυθμός ξήρανσης για υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία Αύξηση ικανότητας διάχυσης θερμότητας στο τρόφιμο	Park et al. 2003
Τομάτα-Αγγούρι	Μείωση χρόνου ξήρανσης Μικρότερες απαιτήσεις χρόνου και ενέργειας	Διπλωματική Παντελεάκη-Τουρκοδημήτρη, Καλλιρρόη, 2016

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 3.1), η συνδυαστική εφαρμογή ωσμωτικής αφυδάτωσης και ξήρανσης με αέρα δεν έχει μελετηθεί σε τυρί. Ύστερα από εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση, διαπιστώθηκε ότι η διεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης έχει εφαρμοστεί κατά κύριο λόγο σε φρούτα και λαχανικά και λιγότερο σε κρέας. Το τυρί αποτελεί μία ομάδα τροφίμων στην οποία η συγκεκριμένη μέθοδος δεν έχει μελετηθεί. Πέραν τούτου, το τυρί, και ιδιαίτερα η Φέτα, η οποία αποτελεί και ΠΟΠ ελληνικό προϊόν, είναι ένα τρόφιμο ιδιαίτερα δημοφιλές στο καταναλωτικό κοινό, με το μειονέκτημα όμως της μικρής διάρκειας ζωής.

Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψιν τα παραπάνω, θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει μια μελέτη της ωσμωτικής αφυδάτωσης πάνω σε τυρί, και συγκεκριμένα τυρί Φέτα, μελετώντας τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας πάνω στο συγκεκριμένο τρόφιμο. Στη συνέχεια, και μέσω της βιβλιογραφικής μελέτης διαπιστώθηκε ότι ο συνδυασμός της ωσμωτικής αφυδάτωσης και της ξήρανσης με αέρα θα μπορούσε να επιφέρει θετικά αποτελέσματα ως προς την παράταση του χρόνου ζωής του τροφίμου. Αποφασίστηκε λοιπόν να μελετηθεί η ωσμωτική αφυδάτωση σε συνδυασμό με την ξήρανση με αέρα σε τυρί Φέτα, ώστε να διαπιστωθεί η αύξηση της διατηρησιμότητας του τροφίμου αλλά και να μελετηθεί η επίδραση των συγκεκριμένων μεθόδων στα ποιοτικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του.

Αυτά πραγματεύεται επομένως η παρούσα διπλωματική εργασία, τα οποία και μελετώνται παρακάτω.

4. Υλικά και Μέθοδοι

4.1 Εισαγωγή

Τα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν σε τρεις Θεματικές Ενότητες.

Κατά την Πρώτη Θεματική Ενότητα μελετήθηκαν τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας κατά την ωσμωτική αφυδάτωση δειγμάτων Φέτας από και προς το ωσμωτικό διάλυμα, καθώς και η επίδραση που έχει η ωσμωτική προκατεργασία των δειγμάτων σε διάφορα φυσικοχημικά και οργανοληπτικά μεγέθη του τροφίμου. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικές συνθήκες κατά την διεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης (συγκέντρωση ωσμωτικού μέσου, θερμοκρασία, χρόνος προκατεργασίας και αναλογία ωσμωτικού μέσου προς τρόφιμο). Τα 2 ωσμωτικά διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν περιελάμβαναν 55-65% γλυκερόλη, 16% ξύδι, 10% μαλτοδεξτρίνη, 5% αλάτι, 1,5% $CaCl_2$ και 12,5- 2,5% H_2O αντίστοιχα.Κύριος στόχος των πειραμάτων ήταν η επιλογή των βέλτιστων συνθηκών προκατεργασίας με ωσμωτική αφυδάτωση.

Κατά τη Δεύτερη Θεματική Ενότητα, διερευνήθηκε η επίδραση διαφόρων θερμοκρασιών ξήρανσης υπό αέρα(40, 55 και 67°C) στις βέλτιστες συνθήκες ωσμωτικής προκατεργασίας που προηγήθηκαν. Στόχος και της συγκεκριμένης ενότητας ήταν η επιλογή των βέλτιστων συνθηκών επεξεργασίας με ξήρανση(βέλτιστη θερμοκρασία ξήρανσης) έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μείωση του χρόνου ξήρανσης των ωσμωτικά προκατεργασμένων δειγμάτων, σε όσο το δυνατόν ηπιότερες συνθήκες επεξεργασίας (εξοικονόμηση ενέργειας).

Κατά την Τρίτη Θεματική Ενότητα μελετήθηκε η ποιοτική υποβάθμιση και υπολογίστηκε η διάρκεια ζωής Φέτας επεξεργασμένης στις βέλτιστες συνθήκες ωσμωτικής αφυδάτωσης και ξήρανσης, μετά από αποθήκευση προϊόντος σε διάφορες θερμοκρασίες και μελέτη δεικτών όπως το μικροβιακό φορτίο, τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, το χρώμα, η σκληρότητα και η ενεργότητα νερού (a_w) του τροφίμου.

4.2 Ωσμωτική αφυδάτωση δειγμάτων Φέτας

Για το σύνολο των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η Φέτα «Χωριό» της εταιρίας Μινέρβα, η οποία υπήρξε μια προσφορά της εταιρίας προς το Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων της Σχολής Χημικών Μηχανικών. Ο λόγος που επιλέχθηκε η εν λόγω Φέτα ήταν η υψηλή της τυποποίηση. Το τυρί ήταν συσκευασμένο σε πλαστικούς περιέκτες των 400 g. Τα δείγματα που προέκυψαν μετά τον τεμαχισμό της Φέτας, ήταν κύβοι διαστάσεων 1,5x1,5x1,5 cm^3 και βάρους 3± 0,7 g.

Για την ωσμωτική επεξεργασία των δειγμάτων επιλέχθηκαν για μελέτη δύο συνταγές ωσμωτικού διαλύματος, με συγκεντρώσεις γλυκερόλης 55% και 65%, τρεις αναλογίες ωσμωτικού μέσου προς το τρόφιμο (1/3, 1/4 και 1/5) και τέσσερις θερμοκρασίες ώσμωσης (5°C, 15°C, 25°C και 35°C). Παρακάτω παρουσιάζονται τα δύο ωσμωτικά διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 4.1 Σύσταση ωσμωτικών διαλυμάτων

Ωσμωτικό Διάλυμα 1	Ωσμωτικό Διάλυμα 2
65% Γλυκερόλη	55% Γλυκερόλη
16% Ξύδι	16% Ξύδι
10% Μαλτοδεξτρίνη	10% Μαλτοδεξτρίνη
5% Αλάτι	5% Αλάτι
1,5% $CaCl_2$	1,5% $CaCl_2$
2,5% H_2O	12,5% H_2O

Η γλυκερόλη (Glykerin EP 212, Oleogen SRL, U.S) είναι μια ουσία με μικρό μοριακό βάρος. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε ως βασικό συστατικό του ωσμωτικού διαλύματος, με σκοπό να επιφέρει μείωση της ενεργότητας του νερού στο τρόφιμο.

Η μαλτοδεξτρίνη (GLUCIDEX®47, Roquette, France) επιλέχθηκε καθώς παρουσιάζει αμελητέα γλυκύτητα και σχετικά μικρό μοριακό βάρος (περίπου 300 kDa) σε σχέση με άλλους υδατάνθρακες που χρησιμοποιούνται, οδηγώντας σε αποτελεσματική αφυδάτωση με ικανοποιητική απώλεια νερού και πρόσληψη στερεών.

Η χρήση NaCl στο ωσμωτικό διάλυμα είχε ως σκοπό τη αύξηση της απόδοσης της ωσμωτικής διεργασίας και τη βελτίωση της οργανοληπτικής αποδοχής του τελικού ωσμωτικά προκατεργασμένου προϊόντος, εξισορροπώντας τη γλυκύτητα των υδατανθράκων.

Το χλωριούχο ασβέστιο χρησιμοποιήθηκε ως βελτιωτικό της υφής του τροφίμου και βελτιωτικό γεύσης.

Το ξύδι προστέθηκε προς μείωση του pH του ωσμωτικού διαλύματος και βελτίωση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών του τροφίμου.

Μετά από τεμαχισμό του τυριού στις συγκεκριμένες διαστάσεις που επιλέχθηκαν, πραγματοποιούνταν ζύγιση με σκοπό να ληφθεί η ποσότητα που αντιστοιχούσε στο επιθυμητό βάρος (συνήθως 200 g). Συγκεκριμένα, για την αναλογία 1:3 χρησιμοποιήθηκαν 200 g τυριού και 400 g ωσμωτικού διαλύματος, για την αναλογία 1:4 200 g τυριού και 600 g ωσμωτικού διαλύματος και για την αναλογία 1:5 200 g τυριού και 800 g ωσμωτικού διαλύματος. Στη συνέχεια, το τυρί εμβαπτιζόταν στο ωσμωτικό διάλυμα και ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα λαμβάνονταν δείγμα προς μελέτη. Τα χρονικά αυτά διαστήματα ήταν 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60 και 90 min. Ο χρόνος 0 min αναφέρεται σε εμβάπτιση του τυριού για 10 sec στο ωσμωτικό διάλυμα και είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως δείγματα control. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η ωσμωτική αφυδάτωση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε υπό ανάδευση, καθώς βοηθάει την ώσμωση να πραγματοποιηθεί πιο γρήγορα και ομοιόμορφα.

4.2.1 Μέτρηση παραμέτρων ώσμωσης

4.2.1.1 Προσδιορισμός απώλειας νερού και πρόσληψης στερεών

Για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της ωσμωτικής προκατεργασίας στα δείγματα Φέτας, υπολογίστηκαν οι παρακάτω δείκτες:

- Ο δείκτης **WL** (εκφρασμένος σε g νερού/100 g αρχικού ξηρού βάρους), αντιστοιχεί στο ποσό του νερού που διαχέεται από το τρόφιμο στο διάλυμα και εξαρτάται από τη βαθμίδα της ωσμωτικής πίεσης.
- Ο δείκτης **SG** (εκφρασμένος σε g ολικών στερεών/100 g αρχικού ξηρού βάρους), αντιστοιχεί στα στερεά συστατικά που προσέλαβαν τα δείγματα από το ωσμωτικό διάλυμα.

Για τον υπολογισμό των δύο αυτών δεικτών, τα δείγματα ζυγίστηκαν πριν την είσοδο τους στο ωσμωτικό διάλυμα. Μετά τη παραμονή τους για διαφορετικούς χρόνους σε αυτό, αφέθηκαν προς στράγγιση και ακολούθησε ζύγισή τους. Κατόπιν τοποθετήθηκαν σε κλίβανο (WTB BINDER 7200, Type E53, Tuttlingen, Germany) στους 110°C για τουλάχιστον 24 ώρες, ώστε να προσδιοριστεί το ξηρό τους βάρος.

Ο υπολογισμός των δεικτών πραγματοποιήθηκε με βάσει τις παρακάτω σχέσεις :

$$WL = \frac{(M_0 - m_0) - (M - m)}{m_0} \qquad Εξίσωση\ 4.1$$

$$SG = \frac{m - m_0}{m_0} \qquad Εξίσωση\ 4.2$$

όπου,

M_0 είναι η αρχική μάζα του φρέσκου τροφίμου,

M είναι η μάζα του τροφίμου μετά από χρόνο t ωσμωτικής επεξεργασίας,

m είναι η ξηρή μάζα του τροφίμου μετά από χρόνο t ωσμωτικής επεξεργασίας και

m_0 είναι η ξηρή μάζα του φρέσκου προϊόντος.

4.2.1.2 Μέτρηση ενεργότητας νερού

Για τον προσδιορισμό της ενεργότητας νερού (a_w) των δειγμάτων Φέτας, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Aqua lab 4TEV, Decagon Devices, USA.

Η αρχή λειτουργίας του μετρητή ενεργότητας βασίζεται στο σημείο δρόσου. Μια μικρή ποσότητα δείγματος τοποθετείται στο μετρητή ενεργότητας, έως ότου επιτευχθεί ισορροπία ατμών. Για μη-πτητικά δείγματα, μια υπέρυθρη δέσμη εστιάζει σε ένα μικροσκοπικό καθρέφτη και καθορίζει την ακριβή θερμοκρασία του σημείου δρόσου του δείγματος. Η θερμοκρασία του σημείου δρόσου στη συνέχεια, μεταφράζεται σε ενεργότητα του νερού.

Για τη μέτρηση της ενεργότητας νερού της Φέτας, το δείγμα κοβόταν σε περίπου τέσσερα ίσα κομμάτια και τοποθετούνταν στο μετρητή ενεργότητας, έτσι ώστε η πιθανή σκλήρυνση φλοιού του τυριού να μην επηρεάσει τη μέτρηση δίνοντας μία μη αληθή τιμή της ενεργότητάς του.

Εικόνα 4.1 *Ενεργόμετρο Aqua lab 4TEV, Decagon Devices, USA.*

4.2.2 Μέτρηση φυσικοχημικών χαρακτηριστικών Φέτας κατά την ώσμωση

4.2.2.1 Μέτρηση του pH

Το pH όλων των τυριών σε όλους τους χρόνους, μετρήθηκε με χρήση του pH-μέτρου AMEL (pH-meter 338, AMEL Instruments, Milan, Italy). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τυρί μετά από ομογενοποίηση σε απιονισμένο νερό σε αναλογία 1:1, στους 25°C. Παράλληλα μετρούνταν και το pH του ωσμωτικού διαλύματος στον εκάστοτε χρόνο.

4.2.2.2 Μέτρηση ολικών στερεών (TS) οσμωτικού διαλύματος

Για την αξιολόγηση της πορείας της ώσμωσης, μετρούνταν τα ολικά στερεά του ωσμωτικού διαλύματος ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η μέτρηση αυτή έγινε με χρήση του μηχανήματος ABBE Refractometer. Μία μικρή ποσότητα ωσμωτικού διαλύματος τοποθετούνταν κάθε φορά στην υποδοχή του μηχανήματος και λαμβάνονταν 2 διαδοχικές μετρήσεις.

4.2.2.3 Προσδιορισμός χρώματος

Το χρώμα των τυριών προσδιορίστηκε με τη βοήθεια του χρωματόμετρου Minolta CR-200.

Εικόνα 4.2 Χρωματόμετρο Minolta CR-200.

Οι μετρήσεις ήταν εκφρασμένες στην κλίμακα CIELAB (Commission International de l' Eclairage) (L, a, b), η οποία εκφράζει τη μαθηματική προσέγγιση της μη γραμμικής απόκρισης του ματιού. Το χρωματόμετρο φέρει στο άκρο του οπή 8 mm. Η βαθμονόμηση του οργάνου πραγματοποιούνταν με τη βοήθεια λευκής πλάκας (Calibration plate CR-200, L = 97.5, a = -0.31, b

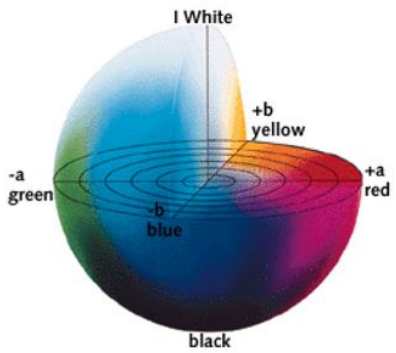
= -3.83). Οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε αντιπροσωπευτικά σημεία των δειγμάτων λευκού τυριού Φέτας, αποφεύγοντας τις χαρακτηριστικές σχισμές.

Το μέγεθος L εκφράζει τη φωτεινότητα του χρώματος. Μια χαμηλή τιμή (0-50) υποδηλώνει ότι το χρώμα του δείγματος τείνει προς το μαύρο, ενώ μια υψηλή τιμή (51-100) προς το λευκό. Μια θετική τιμή της παραμέτρου a υποδεικνύει κόκκινο χρώμα (redness), ενώ μια αρνητική τιμή πράσινο χρώμα (greenness). Αντίστοιχα, μια θετική τιμή της παραμέτρου b υποδεικνύει κίτρινο χρώμα (yellowness), ενώ μια αρνητική τιμή μπλε χρώμα (blueness). Οι δύο τελευταίες παράμετροι είναι οι ορθογώνιες συντεταγμένες του χρώματος (χρωματικότητα) πάνω στο επίπεδο διατομής του χρώματος, κάθετο στον άξονα μαύρου-άσπρου (Εικόνα 4.16).

Η ολική μεταβολή του χρώματος συναρτήσει του χρόνου προσδιορίστηκε από την Εξίσωση 4.3.

$$\Delta E = \sqrt{(L - Lo)^2 + (a - ao)^2 + (b - bo)^2} \qquad \text{Εξίσωση 4.3}$$

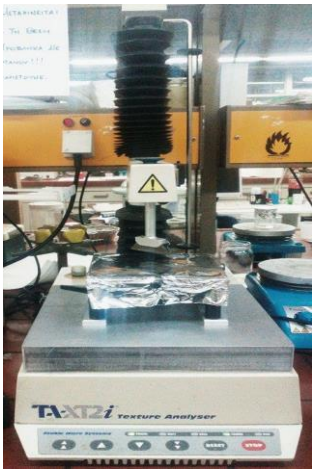
όπου L_o, a_o, b_o, οι τιμές των L, a, b για t=0.



Εικόνα 4.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση της κλίμακας CIELAB

4.2.2.4 Ανάλυση υφής

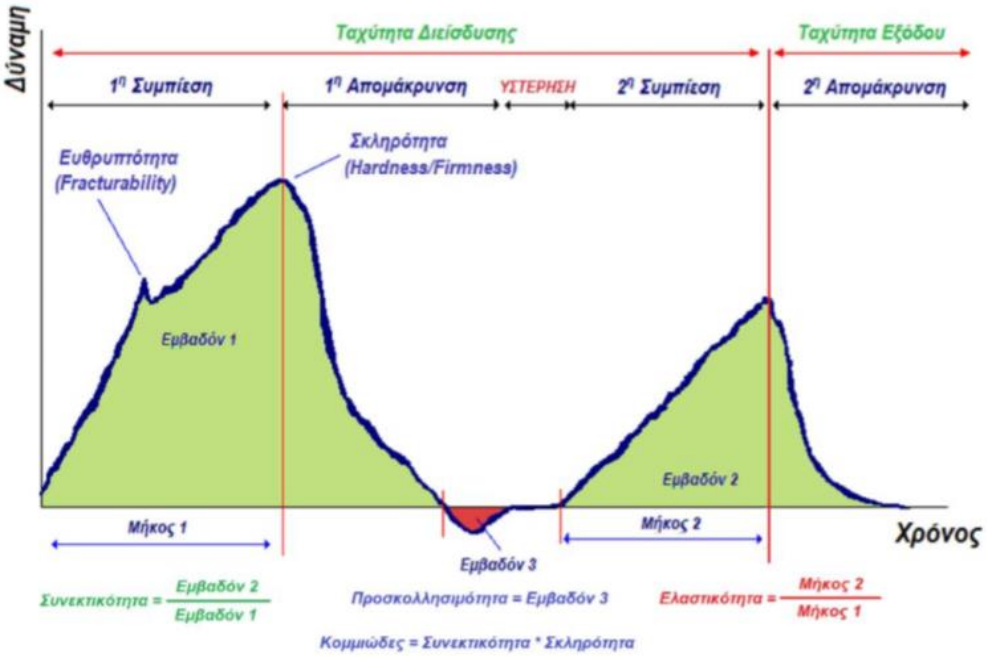
Τα δείγματα υποβλήθηκαν σε ανάλυση υφής με χρήση του αναλυτή υφής TA-XT2i Plus Texture Analyzer (Stable Micro Systems Ltd., UK).



Εικόνα 4.3 Αναλυτής υφής TA-XT2i Plus Texture Analyzer (Stable Micro Systems Ltd., UK).

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα διπλής διείσδυσης με χρήση στελέχους λεπίδας.

Με τη βοήθεια κατάλληλου προγράμματος (Texture Exponent 32, Stable Micro Systems Ltd., UK) προσδιορίστηκε η σκληρότητα του τυριού για κάθε χρόνο ωσμωτικής προκατεργασίας που εξετάστηκε, η οποία αντιστοιχεί στην υψηλότερη κορυφή του διαγράμματος Δύναμης-Χρόνου. Ένα τυπικό διάγραμμα διπλής διείσδυσης του αναλυτή υφής, παρουσιάζεται παρακάτω.

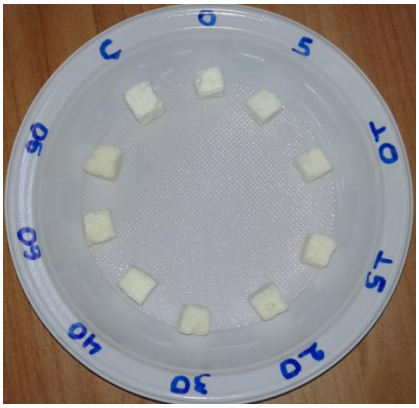


Εικόνα 4.4 Διάγραμμα διπλής διείσδυσης αναλυτή υφής.

4.2.2.5 Οργανοληπτικός έλεγχος

Η οργανοληπτική αξιολόγηση των δειγμάτων είναι απαραίτητη για τη συνολική εκτίμηση της ποιότητάς τους. Η σημασία του οργανοληπτικού ελέγχου είναι μεγάλη και ουσιαστικά αφορά την αναγνώριση των επιθυμητών για τον καταναλωτή χαρακτηριστικών όπως και των ελαττωμάτων και την περιγραφική απόδοσή τους, την ενσωμάτωση αυτών στο προϊόν και τον έλεγχο του αποτελέσματος. Η επιτυχία του οργανοληπτικού ελέγχου ολοκληρώνεται με τη συσχέτιση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των τροφίμων με τα αντίστοιχα φυσικά, φυσικοχημικά, βιοχημικά και τεχνολογικά χαρακτηριστικά τους (συστατικά και ποσότητες αυτών, συνθήκες παραγωγής και συντήρησης).

Η οργανοληπτική αξιολόγηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε στη δεδομένη φάση της πειραματικής διαδικασίας, αξιολογώντας τα δείγματα ως προς τη συνολική αρέσκεια. Για το σκοπό αυτό, τα δείγματα εξετάστηκαν από μια εκπαιδευμένη ομάδα έξι δοκιμαστών. Τα τυριά βαθμολογούνταν από τους δοκιμαστές με κλίμακα 1-9 βαθμών.



Εικόνα 4.5 Οργανοληπτικός έλεγχος Φέτας ωσμωμένης σε διάφορους χρόνους (c=control, t σε min).

4.2.3 Μαθηματική μοντελοποίηση ωσμωτικής προκατεργασίας

Για τη μαθηματική περιγραφή της ωσμωτικής προκατεργασίας και την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των βασικών παραμέτρων, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ωσμωτική προκατεργασία της Φέτας στις διάφορες θερμοκρασίες, συγκεντρώσεις γλυκερόλης, αναλογίες ωσμωτικού μέσου-τροφίμου, καθώς και χρόνους, προσαρμόστηκαν στο 2° Νόμο του Fick που περιγράφει τη διάχυση σε μη μόνιμη κατάσταση (Εξίσωση 5.3).

$$\frac{\partial \mathrm{C}}{\partial \mathrm{t}} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial \mathrm{x}^2} \qquad Εξίσωση\ 4.4$$

όπου C είναι η συγκέντρωση,

D_e είναι ο συντελεστής διάχυσης,

x είναι η χαρακτηριστική απόσταση της διάχυσης και

t είναι ο χρόνος.

Η λύση της παραπάνω γενικευμένης εξίσωσης εξαρτάται από τη γεωμετρία του τροφίμου. Για άπειρη πλάκα (infinite flat plate) που υποβάλλεται σε ωσμωτική αφυδάτωση από τις δύο κύριες πλευρές και υποθέτοντας ότι υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή αρχικής υγρασίας, αμελητέα εξωτερική αντίσταση σε μεταφορά μάζας και μη συρρίκνωση κατά τη διάρκεια της ωσμωτικής αφυδάτωσης και με αρχικές οριακές συνθήκες:

Για t=0 $C=C_o$, $-1<x_0$ $C=C_1$,

Για t>0 $C=C_1$ x=1,

η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$M = \frac{W_t - W_\infty}{W_0 - W_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp[-(n+\frac{1}{2})^2 \pi^2 F_{ow}] \qquad Εξίσωση\ 4.5$$

$$M = \frac{S_t - S_\infty}{S_0 - S_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp[-(n+\frac{1}{2})^2 \pi^2 F_{os}] \qquad Εξίσωση\ 4.6$$

Όπου, W και S είναι η περιεχόμενη υγρασία και τα περιεχόμενα στερεά συστατικά, αντίστοιχα, οι δείκτες 0, t και ∞ αντιπροσωπεύουν τις συγκεντρώσεις αρχικά για τυχαία χρονική στιγμή και κατά την ισορροπία, αντίστοιχα και F_{ow}, F_{os} είναι οι αριθμοί Fourier για τη διάχυση υγρασίας και στερεών, αντίστοιχα, που δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$F_{ow} = \frac{D_{ew}}{l^2} t \qquad Εξίσωση\ 4.7$$

$$F_{os} = \frac{D_{es}}{l^2} t \qquad Εξίσωση\ 4.8$$

όπου D_{ew} και D_{es} είναι οι δραστικοί συντελεστές διάχυσης για την υγρασία και τα στερεά, αντίστοιχα,

t είναι ο χρόνος εμβάπτισης του τροφίμου στο ωσμωτικό διάλυμα,

ℓ είναι το πάχος του τροφίμου κατά το ήμισυ.

Οι τιμές των F_{ow} και F_{os} υπολογίζονται ως συνάρτηση των τιμών M και S και παριστάνονται γραφικά ως προς τις αντίστοιχες τιμές t, λαμβάνοντας υπόψιν τον πρώτο όρο της σειράς. Από την κλίση των ευθειών που λαμβάνονται υπολογίζονται οι συντελεστές D_{ew} και D_{es}.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε και η κινητική Arrhenius για την περιγραφή του ρυθμού ώσμωσης με τη θερμοκρασία. Η αύξηση της θερμοκρασίας είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού των δράσεων. Η επίδραση αυτή εξηγείται από τη σχέση Arrhenius (Εξίσωση 4.9), η οποία είναι η πιο διαδεδομένη σχέση που περιγράφει την επίδραση της θερμοκρασίας στον ρυθμό της διάχυσης:

$$D_{ew} = k_A \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) \qquad Εξίσωση\ 4.9$$

$$lnD_{ew} = lnk_A - \frac{E_A}{R} \cdot \left(\frac{1}{T}\right) \qquad Εξίσωση\ 4.10$$

όπου k η σταθερά του ρυθμού της διάχυσης,

k_A ο συντελεστής ή σταθερά Arrhenius,

E_A η ενέργεια ενεργοποίησης (J/mol),

R η παγκόσμια σταθερά των αερίων (8,314 J/mol) και

T η απόλυτη θερμοκρασία.

Για να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους της εξίσωσης Arrhenius (Εξ. 4.10), γνωρίζοντας τις τιμές του k σε διαφορετικές θερμοκρασίες, με απεικόνιση του lnk ως προς 1/T, προσαρμόζεται ευθεία με κλίση $-E_A/R$.

Έτσι, μελετώντας κανείς μια διαδικασία υποβάθμισης της ποιότητας με τη μέτρηση του ρυθμού απώλειας σε δύο-τρεις θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία αποθήκευσης, μπορεί με προεκβολή σε ένα διάγραμμα Arrhenius να προβλέψει το ρυθμό σε οποιαδήποτε θερμοκρασία αποθήκευσης (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009).

Η εξίσωση (4.9) μπορεί να μετασχηματιστεί, εισάγοντας την παράμετρο της θερμοκρασίας αναφοράς T_{ref}.

$$k = k_{ref} \exp\left[\frac{-E_A}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \quad Εξίσωση\ 4.11$$

4.3 Ξήρανση δειγμάτων Φέτας

Με το πέρας των πειραμάτων της πρώτης Θεματικής Ενότητας, έγινε επιλογή των βέλτιστων συνθηκών ωσμωτικής προκατεργασίας, με σκοπό τη διατήρηση της ποιότητας και των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών του τροφίμου σε όσο το δυνατόν ηπιότερες συνθήκες. Στη συνέχεια, τα προκατεργασμένα στις βέλτιστες συνθήκες δείγματα Φέτας, ξηράνθηκαν σε ξηραντήρα Biosec σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες, 40°C, 55°C και 67°C. Επιπλέον, ξηράνθηκαν και φρέσκα δείγματα Φέτας, τα οποία δεν είχαν υποστεί ωσμωτική προκατεργασία, με σκοπό την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Ο ξηραντήρας που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα της ξήρανσης ήταν Biosec, ο οποίος περιείχε 6 θέσεις για ράφια στο εσωτερικό του (Εικόνα 4.6). Αφού όλα τα ωσμωμένα δείγματα τοποθετήθηκαν στα ράφια του ξηραντήρα, ζυγίστηκαν πριν την έναρξη της ξήρανσης και στη συνέχεια ζυγίζονταν ανά 10 min κατά τη διάρκεια αυτής. Η ξήρανση συνεχίστηκε έως ότου το βάρος των δειγμάτων να σταθεροποιηθεί, να φτάσουν δηλαδή σε ισορροπία. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, χρησιμοποιήθηκαν 3 ράφια στο εσωτερικό του ξηραντήρα και μετρήθηκε ο μέσος όρος για τους υπολογισμούς, αφού ο ρυθμός ξήρανσης στο καθένα είχε κάποιες μικρές αποκλίσεις.

Εικόνα 4.6 Ξηραντήρας τύπου Biosec

4.3.1 Υπολογισμός παραμέτρων κατά τη ξήρανση

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων ξήρανσης, το μαθηματικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε ήταν ο 2^{ος} νόμος του Fick, που περιγράφεται από τον τύπο:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left[\frac{-(2n+1)^2\pi^2 Dt}{4L^2}\right] \quad Εξίσωση\ 4.12$$

όπου MR είναι η κλασματική αναλογία υγρασίας,

M_0 είναι η αρχική υγρασία,

M είναι η μέση υγρασία στο χρόνο t,

M_e είναι η υγρασία σε ισορροπία και

L είναι το ήμισυ του πάχους της Φέτας για την ξήρανση

Για την περιγραφή του ρυθμού ξήρανσης από τη θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκε ο νόμος του Arrhenius που εκφράζει την εξάρτηση θερμοκρασίας από τον συντελεστή διάχυσης:

$$D_{eff} = D_\infty \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) \quad Εξίσωση\ 4.13$$

Όπου D_∞ είναι μια σταθερά ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία,

E_a η ενέργεια ενεργοποίησης,

R η σταθερά των αερίων και

T η θερμοκρασία σε βαθμούς K.

Η εξίσωση (4.13) μπορεί να μετασχηματιστεί, εισάγοντας την παράμετρο της θερμοκρασίας αναφοράς T_{ref}. Έτσι προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$D_{eff} = D_{eff_{ref}} exp\left[-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \quad Εξίσωση\ 4.14$$

όπου $D_{eff_{ref}}$ είναι η σταθερά του συντελεστή διάχυσης στη θερμοκρασία αναφοράς T_{ref}.

4.3.2 Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής h

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής h, τοποθετήθηκε ένα θερμοστοιχείο στο κέντρο πλάκας αλουμινίου. Αρχικά η πλάκα αλουμινίου βρισκόταν στο θάλαμο ψύξης και στη συνέχεια τοποθετήθηκε στον ξηραντήρα και καταγράφηκε η θερμοκρασία της με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού (PC208W Datalogger, Campbell Scientific, UK).

Ο υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής βασίζεται στη θεώρηση ότι πραγματοποιείται θέρμανση με τρόπο ώστε η αντίσταση από την επιφάνεια να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την εσωτερική αντίσταση (ομοιόμορφη θερμοκρασία στο αντικείμενο). Το ισοζύγιο ενέργειας που ισχύει για αυτή την περίπτωση (θέρμανση σε μη μόνιμη κατάσταση) θα είναι:

$$c_p \cdot \rho \cdot V \cdot dt = h \cdot A_s \cdot (T - T_M) \cdot dt \quad Εξίσωση\ 4.15$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να μετασχηματιστεί στην ακόλουθη:

$$\frac{T - T_M}{T_0 - T_M} = exp\left(-\frac{hA_s}{c_p m} t\right) \quad Εξίσωση\ 4.16$$

όπου h ο συντελεστής συναγωγής ($W/m^2 \cdot K$)

T η θερμοκρασία της πλάκας στο χρόνο t (K)

T_M η θερμοκρασία του ξηραντήρα (K)

T_0 η αρχική θερμοκρασία της πλάκας (K)

t ο χρόνος θέρμανσης της πλάκας (s)

ρ η πυκνότητα της πλάκας αλουμινίου (Kg/m ^{3})

V ο όγκος της πλάκας αλουμινίου (m ^{3})

A_s η επιφάνεια της πλάκας αλουμινίου ίση με 0,044 m ^{2}

c_p η ειδική θερμότητα του υλικού ίση με 897 J/ Kg·K

m η μάζα της πλάκας αλουμινίου ίση με 0,795 Kg

4.4 Μελέτη διατηρησιμότητας δειγμάτων Φέτας

Με χρήση της βέλτιστης θερμοκρασίας ξήρανσης που επιλέχθηκε, παρασκευάστηκε μεγάλη ποσότητα προϊόντος (ωσμωτικά προκατεργασμένο και ξηραμένο στις βέλτιστες συνθήκες ώσμωσης και ξήρανσης) με σκοπό την αποθήκευσή του σε διαφορετικές θερμοκρασίες και τη μελέτη της διατηρησιμότητάς του. Τα δείγματα αποθηκεύτηκαν σε ειδικούς θαλάμους σταθερής θερμοκρασίας 15, 25, 35 και 40°C. Ως δείκτες ποιότητας των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν το μικροβιακό φορτίο, το αντικειμενικό χρώμα, η αντικειμενική σκληρότητα και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά (Παρ. 4.4.2). Επίσης γινόταν μέτρηση και της ενεργότητας νερού. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ανάλογα με τη θερμοκρασία αποθήκευσης. Για T=40°C λαμβάνονταν ανά ~3 μέρες, για T=35°C ανά 5, για T=25°C ανά 7 μέρες, ενώ για T=15°C ανά 15. Οι μετρήσεις σε χρώμα, σκληρότητα και ενεργότητα νερού πραγματοποιήθηκαν με τον τρόπο που αναλύθηκε κατά την πρώτη Θεματική Ενότητα των πειραμάτων (Παρ. 4.2.1, 4.2.2).

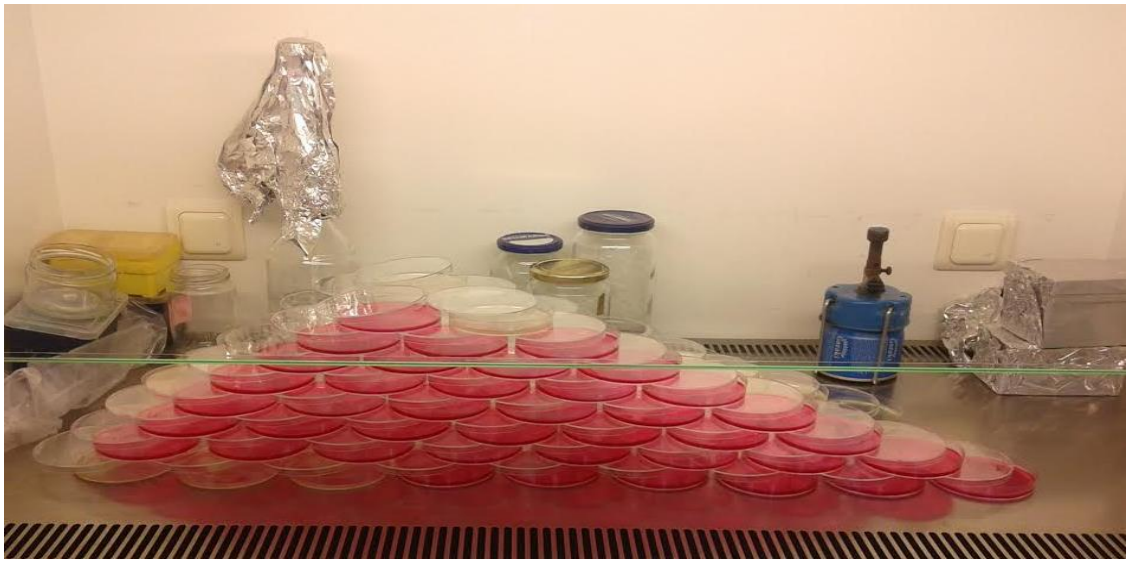
4.4.1 Μικροβιολογικός έλεγχος Φέτας

Κατά τον μικροβιολογικό έλεγχο των δειγμάτων, προσδιορίστηκαν η ολική μικροβιακή χλωρίδα καθώς και οι ζύμες- μύκητες, με χρήση της τεχνικής της επιφανειακής ανάπτυξης σε τρυβλία (spread plate count).

Για τον έλεγχο της ολικής μικροβιακής χλωρίδας (total viable count) χρησιμοποιήθηκε το μη επιλεκτικό θρεπτικό υπόστρωμα Plate Count Agar (PCA, Merk, Darmstadt, Germany).

Για τον έλεγχο σε ζύμες-μύκητες χρησιμοποιήθηκε το επιλεκτικό θρεπτικό υπόστρωμα Rose-Bengal Chloramphenicol Agar (RBC, Merk, Darmstadt, Germany).

Όλα τα τρυβλία επωάζονταν στους 30°C για τουλάχιστον 72 h.



Εικόνα 4.7 Μικροβιολογική ανάλυση δειγμάτων σε θάλαμο μικροβιολογικών αναλύσεων (MN 120, nuve).

4.4.2 Οργανοληπτικός έλεγχος Φέτας

Η οργανοληπτική αξιολόγηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε εκ νέου από μία ομάδα εκπαιδευμένων δοκιμαστών, αποτελούμενη από 6 άτομα. Τα δείγματα αξιολογήθηκαν και βαθμολογήθηκαν ως προς την αρέσκεια σε εμφάνιση-χρώμα, υφή-δομή και γεύση-οσμή καθώς και ως προς την ένταση σε εμφάνιση- χρώμα (λευκό, ομοιογενές χρώμα),σε υφή-δομή (σκληρή, εύθρυπτη) και σε γεύση-οσμή (όξινη, ταγγισμένη, αλμυρή). Τα δείγματα βαθμολογούνταν από τους δοκιμαστές με κλίμακα 1-9 βαθμών. Το έντυπο της οργανοληπτικής αξιολόγησης των τυριών παρουσιάζεται στο Παράρτημα Ι.

5. Αποτελέσματα- Συζήτηση Αποτελεσμάτων

5.1 Πρώτη Θεματική Ενότητα: Ωσμωτική προκατεργασία δειγμάτων Φέτας

5.1.1 Σκοπός

Στην Πρώτη Θεματική ενότητα των πειραμάτων, έγινε ωσμωτική προκατεργασία σε δείγματα Φέτας, με σκοπό τον εντοπισμό των βέλτιστων συνθηκών θερμοκρασίας και χρόνου προκατεργασίας, συγκέντρωσης και αναλογίας του ωσμωτικού διαλύματος ως προς το τρόφιμο.

5.1.2 Επίδραση θερμοκρασίας, χρόνου, συγκέντρωσης και αναλογίας του ωσμωτικού διαλύματος.

Πραγματοποιήθηκε ωσμωτική προκατεργασία των δειγμάτων σε ωσμωτικό διάλυμα 55% και 65% γλυκερόλης, σε αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο 1:3, 1:4 και 1:5, και σε θερμοκρασίες 5°C, 15°C, 25°C και 35°C.

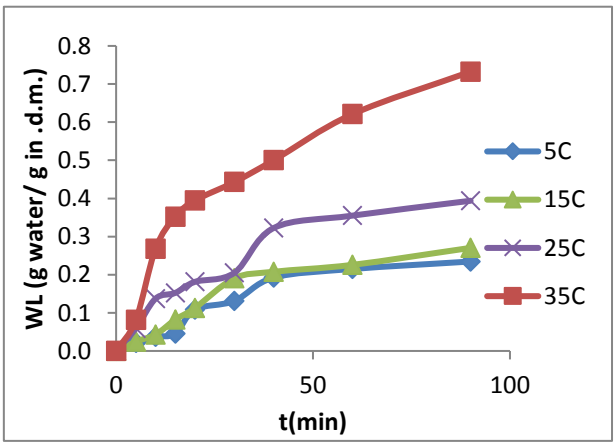
Τα δείγματα ζυγίστηκαν πριν και μετά την ωσμωτική προκατεργασία και υπολογίστηκαν οι παράμετροι απώλειας νερού (WL) και πρόσληψης στερεών (SG) του ωσμωτικά προκατεργασμένου τροφίμου. Επίσης μετρήθηκε η ενεργότητα (aw) του νερού των δειγμάτων. Στα παρακάτω διαγράμματα παρατίθενται οι παραπάνω παράμετροι σε συνάρτηση με το χρόνο προκατεργασίας για ωσμωτικά διαλύματα με 55% και 65% γλυκερόλη σε θερμοκρασίες 5°C, 15°C, 25°C και 35°C και αναλογίες τροφίμου προς τρόφιμο 1:3, 1:4 και 1:5.

5.1.2.1 Υπολογισμός απώλειας νερού

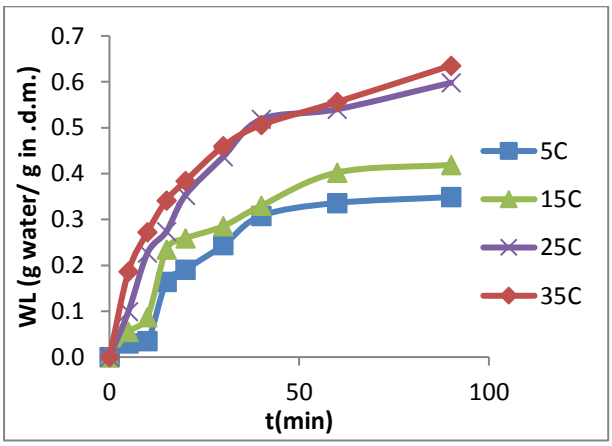
Η απώλεια νερού στα δείγματα Φέτας υπολογίστηκε μέσω της εξίσωσης (4.1). Η αρχική υγρασία των δειγμάτων ήταν κατά μέσο όρο 1,2 g H_2O/ g αρχικής ξηρής μάζας. Στα σχήματα 5.1 α, β, γ και 5.2 α, β, γ, παρουσιάζεται η απώλεια νερού συναρτήσει του χρόνου ωσμωτικής επεξεργασίας των δειγμάτων Φέτας για θερμοκρασία ώσμωσης 5, 15, 25 και 35°C, συγκέντρωση γλυκερόλης 65 και 55% και αναλογία τροφίμου ως προς ωσμωτικό μέσο 1:3, 1:4 και 1:5, αντίστοιχα.

65% Γλυκερόλη

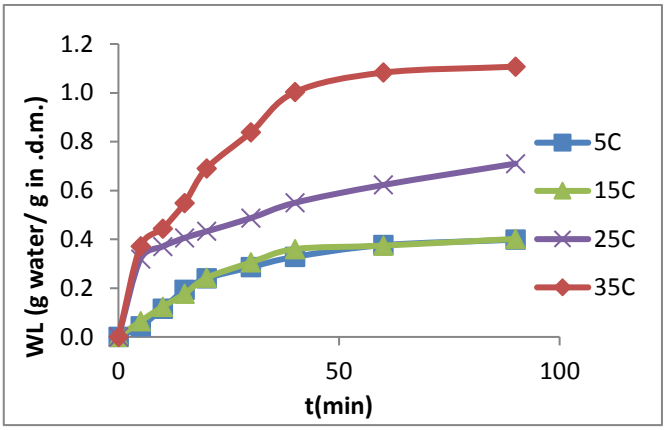
α)1:3



β)1:4



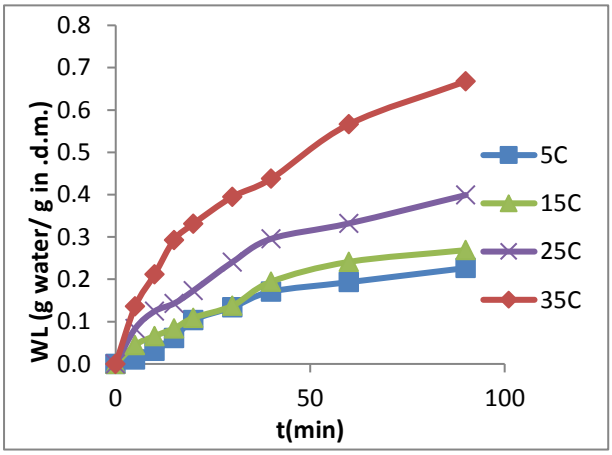
γ)1:5



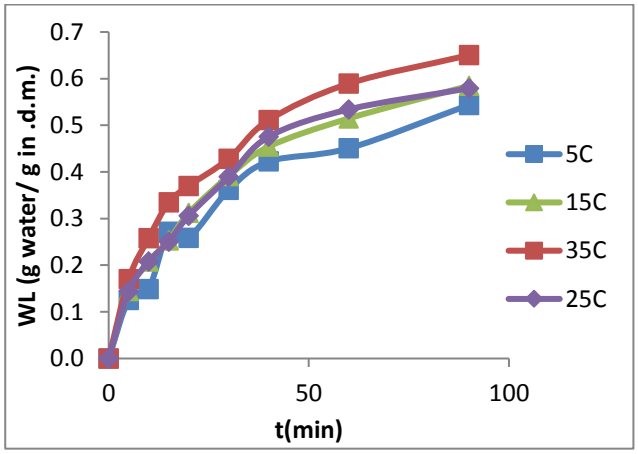
Σχήμα 5.1 Απώλεια νερού (g νερού/ g αρχικού ξηρού βάρους) Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 65% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C με αναλογία α)1:3, β)1:4, γ)1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

55% Γλυκερόλη

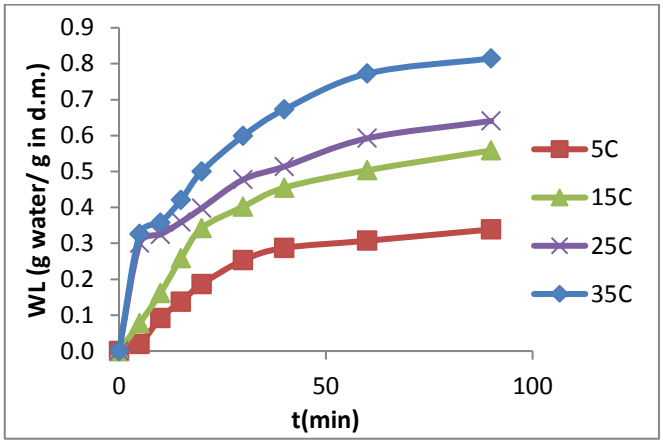
α)1:3



β)1:4



γ)1:5



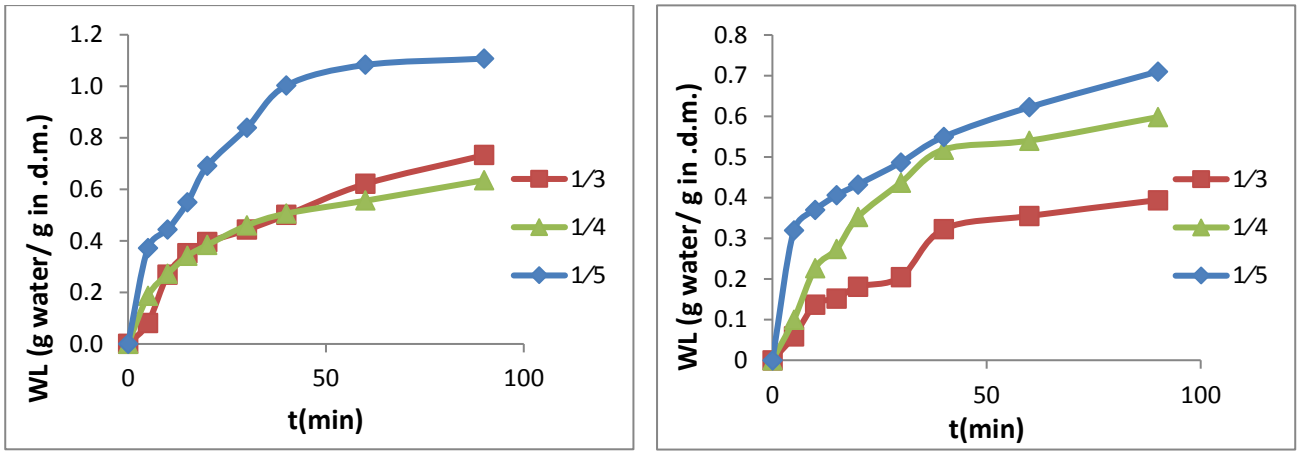
Σχήμα 5.2 Απώλεια νερού (g νερού/ g αρχικού ξηρού βάρους) Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 55% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C με αναλογία α)1:3, β)1:4, γ)1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

Από τα παραπάνω Σχήματα παρατηρείται ότι η απώλεια υγρασίας αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας και μάλιστα, στις περισσότερες περιπτώσεις, σε θερμοκρασία 35°C παρουσιάζεται σημαντική διαφορά συγκριτικά με τις άλλες θερμοκρασίες ($p<0.05$). Αντίθετα, στις χαμηλότερες θερμοκρασίες παρατηρείται αρκετά μικρότερη επίδραση της θερμοκρασίας στην απώλεια νερού του τροφίμου. Η απώλεια νερού στα δείγματα Φέτας φάνηκε να μεταβάλλεται μέχρι τα πρώτα 40 min περίπου, με υψηλότερο ρυθμό ενώ με την πάροδο του χρόνου τείνει να σταθεροποιηθεί.

Στα Σχήματα 5.3 α, β και 5.4 α, β, παρουσιάζεται η επίδραση του χρόνου ώσμωσης στην απώλεια νερού του τροφίμου για αναλογίες ωσμωτικού μέσου/τρόφιμο 1:3, 1:4 και 1:5, συγκέντρωση ωσμωτικού διαλύματος σε γλυκερόλη 65 και 55% και για θερμοκρασίες ώσμωσης 25 και 35°C, αντίστοιχα.

65% Γλυκερόλη

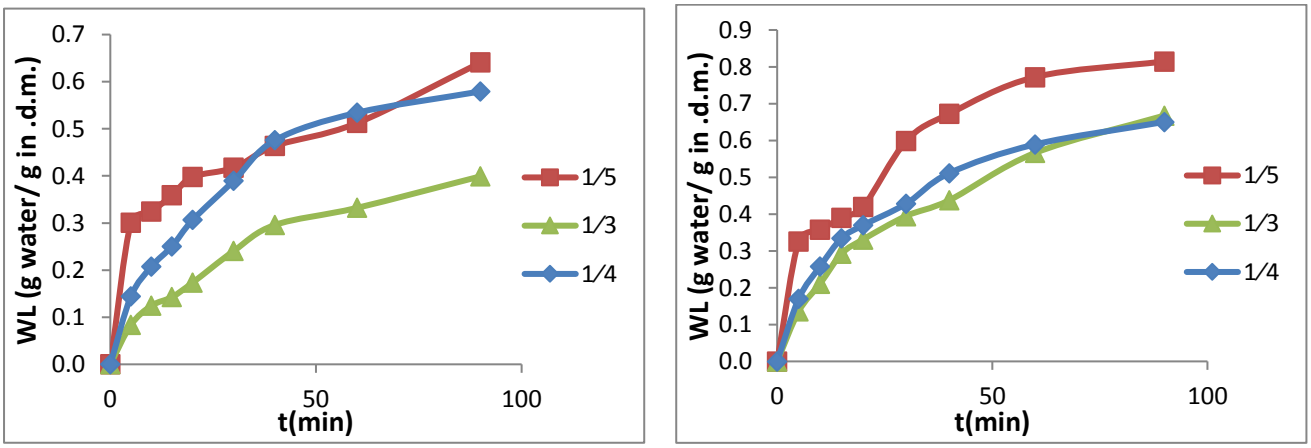
α)T=25°C β)T=35°C



Σχήμα 5.3 Απώλεια νερού (g νερού/ g αρχικού ξηρού βάρους) Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 65% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες α)25 και β)35°C με αναλογία 1:3, 1:4 και 1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

55% Γλυκερόλη

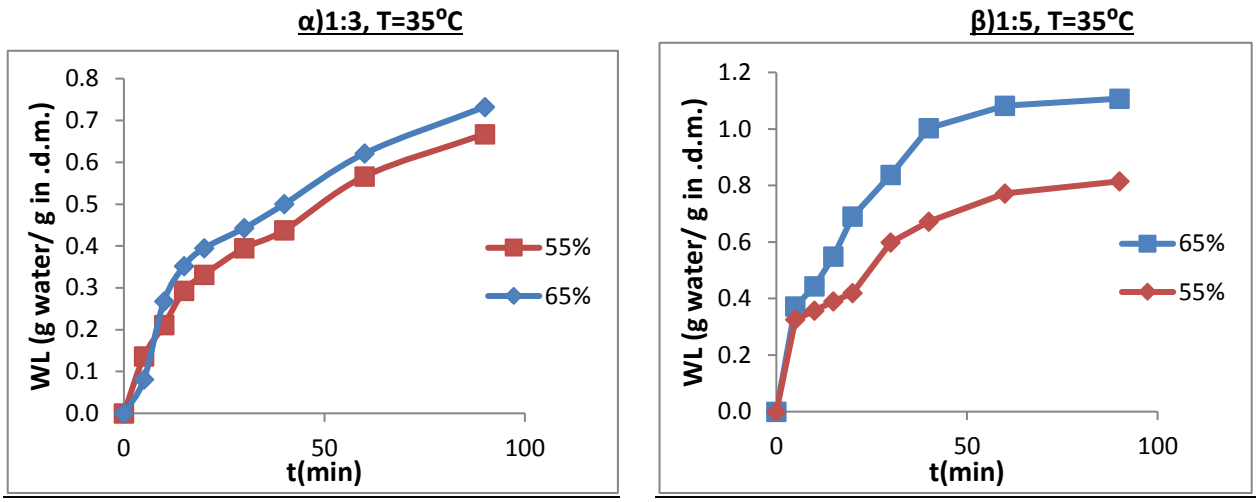
α)T=25°C β)T=35°C



Σχήμα 5.4 Απώλεια νερού (g νερού/ g αρχικού ξηρού βάρους) Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 55% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες α)25 και β)35°C με αναλογία 1:3, 1:4 και 1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

Από τα παραπάνω Σχήματα παρατηρείται ότι, με αύξηση της αναλογίας ωσμωτικού μέσου προς τρόφιμο, αυξάνεται η απώλεια νερού από το τρόφιμο, τόσο σε συγκέντρωση γλυκερόλης 65%, όσο και σε 55%.

Στα Σχήματα 5.5 α, β, παρατίθεται η επίδραση του χρόνου ώσμωσης στην απώλεια νερού του τροφίμου για συγκεντρώσεις ωσμωτικού διαλύματος σε γλυκερόλη 55 και 65%, αναλογία ωσμωτικού μέσου προς τρόφιμο 1:3 και 1:5, αντίστοιχα και σε θερμοκρασία ώσμωσης 35 °C.



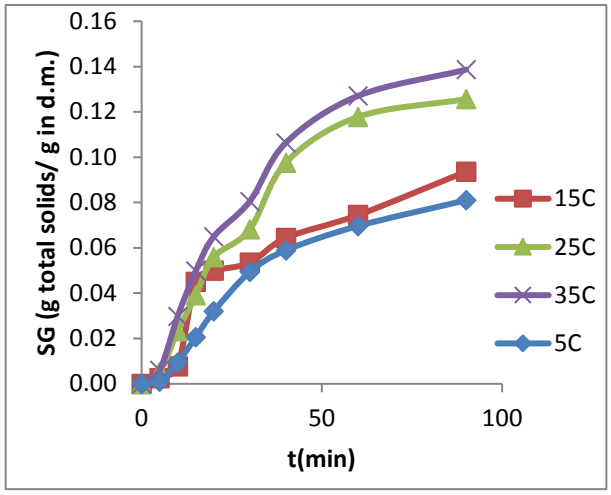
Σχήμα 5.5 Απώλεια νερού (g νερού/ g αρχικού ξηρού βάρους) Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 55% και 65% γλυκερόλης και σε θερμοκρασία 35°C με αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο α) 1:3, β) 1:5.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω Σχήματα, η αύξηση της συγκέντρωσης της γλυκερόλης ενισχύει τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας, έχοντας σαν αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη απώλεια νερού του τροφίμου.

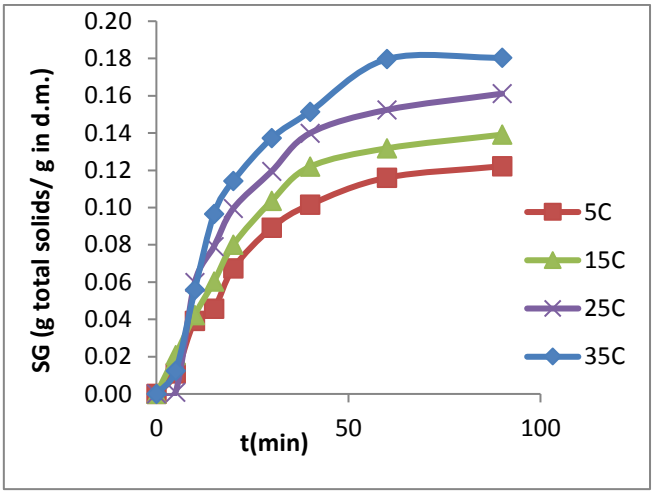
5.1.2.2 Υπολογισμός πρόσληψης στερεών

Η πρόσληψη στερεών των δειγμάτων Φέτας υπολογίστηκε μέσω της εξίσωσης (4.2). Στα σχήματα 5.6 α, β, γ και 5.7 α, β, γ, παρουσιάζεται η πρόσληψη στερεών συναρτήσει του χρόνου ωσμωτικής επεξεργασίας των δειγμάτων Φέτας για θερμοκρασία 5, 15, 25 και 35°C, συγκέντρωση γλυκερόλης 55 και 65% και αναλογία τροφίμου ως προς ωσμωτικό μέσο 1:3, 1:4 και 1:5, αντίστοιχα.

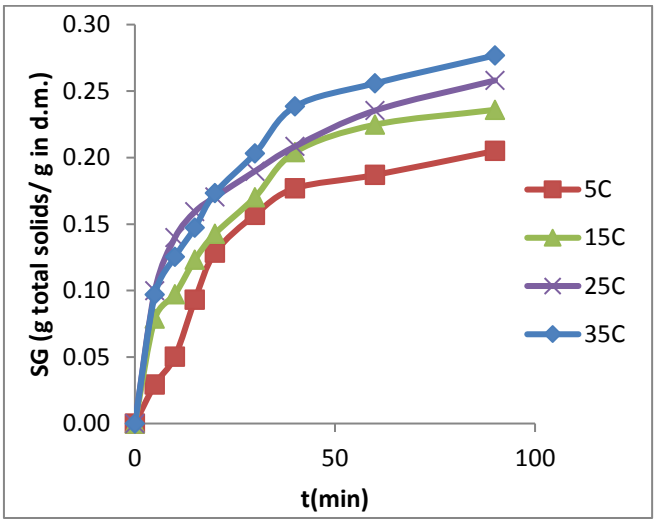
α) 1:3



β) 1:4

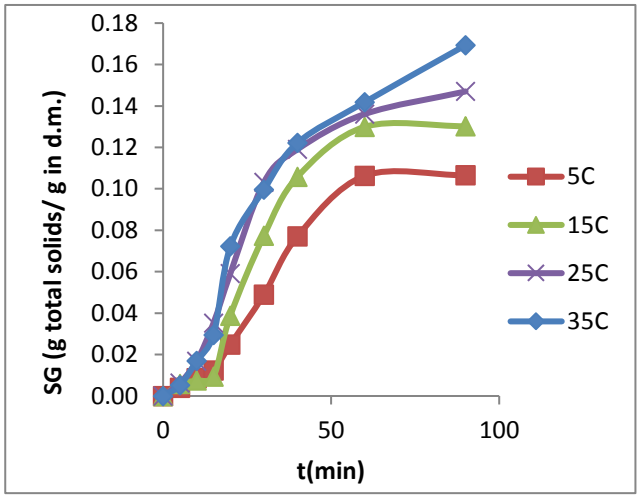


γ) 1:5

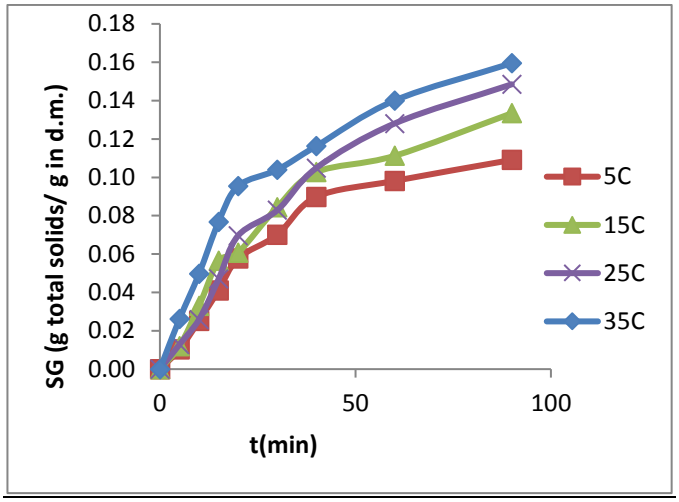


Σχήμα 5.6 Πρόσληψη στερεών (g στερεού/ g αρχικού ξηρού βάρους) Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 65% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C με αναλογία α)1:3, β)1:4, γ)1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

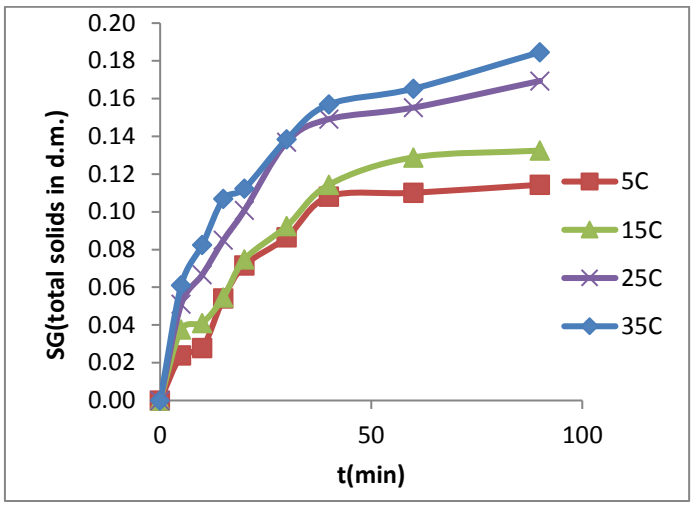
α) 1:3



β) 1:4



γ)1:5



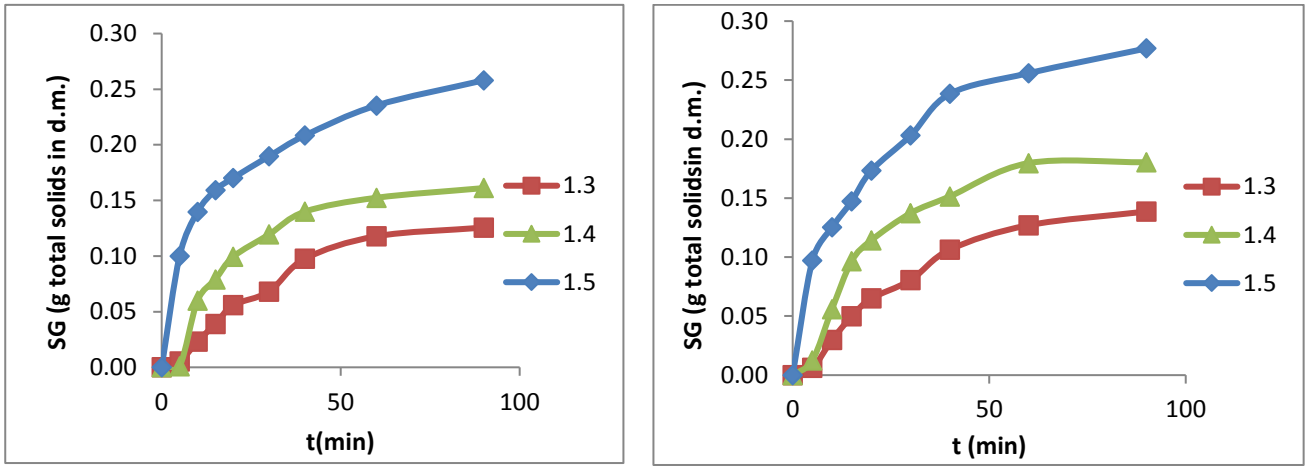
Σχήμα 5.7 Πρόσληψη στερεών (g στερεού/ g αρχικού ξηρού βάρους) Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 55% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C με αναλογία α)1:3, β)1:4, γ)1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

Από τα παραπάνω Σχήματα παρατηρείται ότι η πρόσληψη στερεών αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Οι ρυθμοί πρόσληψης στερεών όμως παρουσιάζουν μικρότερη αύξηση από τους ρυθμούς απώλειας νερού. Μπορεί επιπλέον να παρατηρηθεί ότι η πρόσληψη στερεών είναι αρχικά πιο έντονη (έως ~40 min) και με την πάροδο του χρόνου τείνει να σταθεροποιηθεί.

Στα Σχήματα 5.8 α, β και 5.9 α, β, παρατίθεται η επίδραση του χρόνου ώσμωσης στην πρόσληψη στερεών του τροφίμου, για αναλογία ωσμωτικού μέσου/τρόφιμο 1:3, 1:4 και 1:5, συγκέντρωση ωσμωτικού διαλύματος σε γλυκερόλη 65 και 55% και θερμοκρασία ώσμωσης 25 και 35°C, αντίστοιχα.

65% Γλυκερόλη

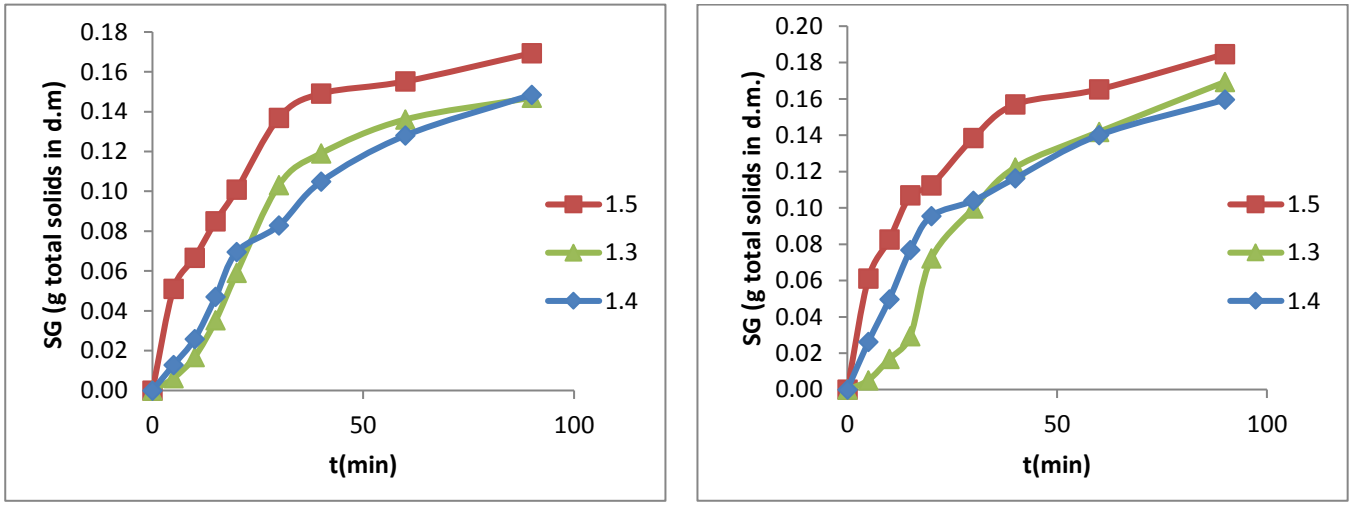
α)T=25°C **β)T=35°C**



Σχήμα 5.8 Πρόσληψη στερεών (g στερεού/ g αρχικού ξηρού βάρους) Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 65% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες α)25 και β)35°C με αναλογία 1:3, 1:4 και 1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

55% Γλυκερόλη

α)T= 25°C **β)T=35°C**

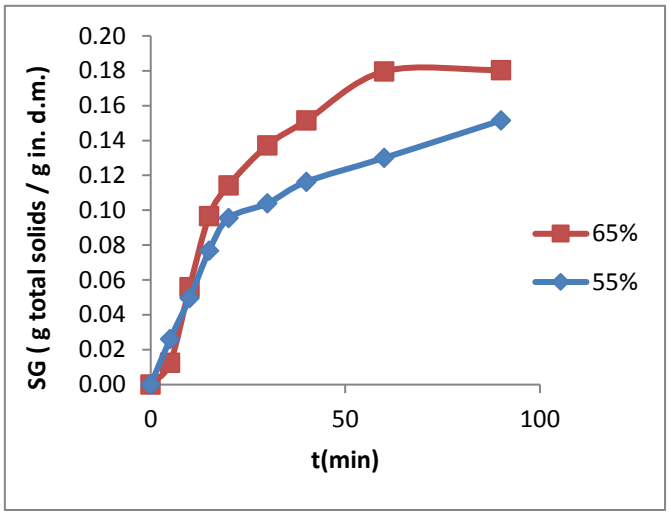


Σχήμα 5.9 Πρόσληψη στερεών (g στερεού/ g αρχικού ξηρού βάρους) Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 55% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες α)25 και β)35°C με αναλογία 1:3, 1:4 και 1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

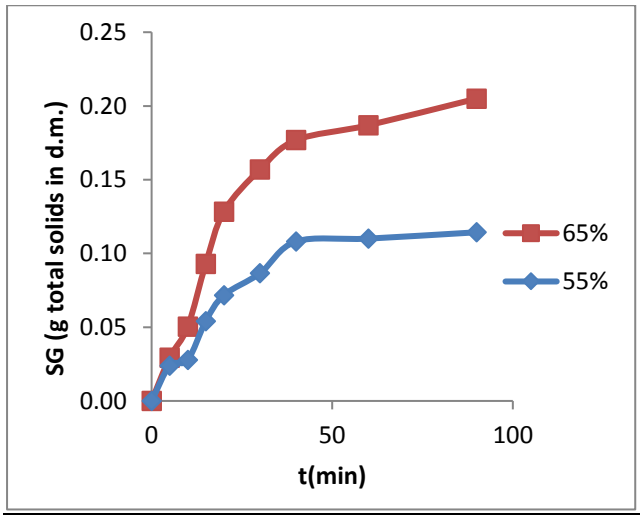
Απότα παραπάνω Σχήματα παρατηρείται ότι με αύξηση της αναλογίας ωσμωτικού μέσου προς τρόφιμο, αυξάνεται και η πρόσληψη στερεών από το τρόφιμο, αντίστοιχα με την απώλεια νερού, τόσο σε συγκέντρωση 65% γλυκερόλης, όσο και σε 55%.

Στα Σχήματα 5.10 α, β, παρατίθεται η επίδραση του χρόνου ώσμωσης στην πρόσληψη στερεών του τροφίμου, για συγκέντρωση ωσμωτικού διαλύματος σε γλυκερόλη 55 και 65%, αναλογία ωσμωτικού μέσου προς τρόφιμο 1:4 και 1:5 και σε θερμοκρασίες ώσμωσης 35 και 5°C, αντίστοιχα.

α)1:4, 35°C



β)1:5, 5°C



Σχήμα 5.10 Απώλεια νερού (g νερού/ g αρχικού ξηρού βάρους) Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 55% και 65% γλυκερόλης και α)σε θερμοκρασία 35°C με αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο 1:4 και β) σε θερμοκρασία 5°C με αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο 1:5.

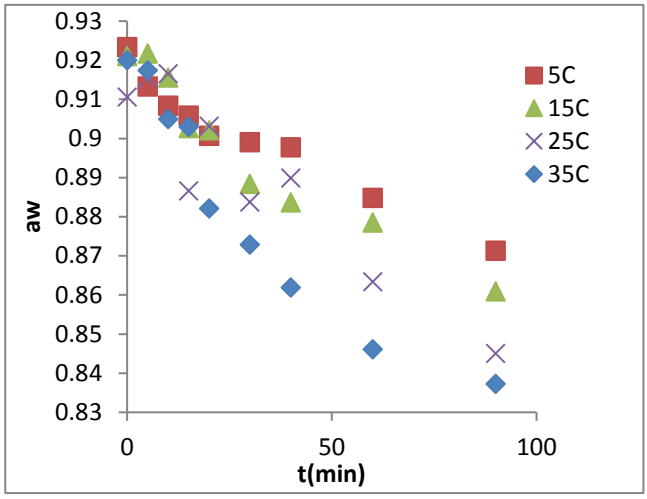
Από τα παραπάνω Σχήματα προκύπτει ότι αντίστοιχα προς την απώλεια νερού, η πρόσληψη στερεών από τα δείγματα Φέτας επηρεάζεται κι αυτή από τη συγκέντρωση γλυκερόλης του ωσμωτικού διαλύματος..

5.1.2.3 Ενεργότητα νερού, a_w

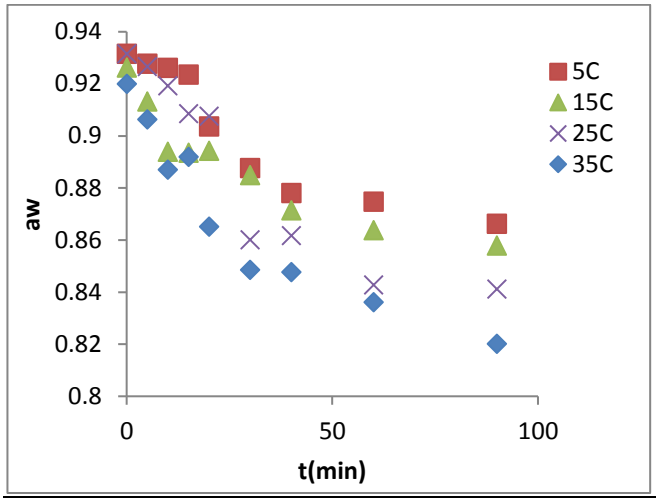
Στα σχήματα 5.11 α, β, γ και 5.12 α, β, γ, παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής της ενεργότητας νερού με το χρόνο για τα δείγματα Φέτας, ύστερα από ωσμωτική προκατεργασία σε θερμοκρασίες 5°C, 15°C, 25°C και 35°C, σε συγκεντρώσεις γλυκερόλης 65% και 55% και σε αναλογία τροφίμου-ωσμωτικού μέσου 1:3, 1:4 και 1:5, αντίστοιχα.

65% Γλυκερόλη

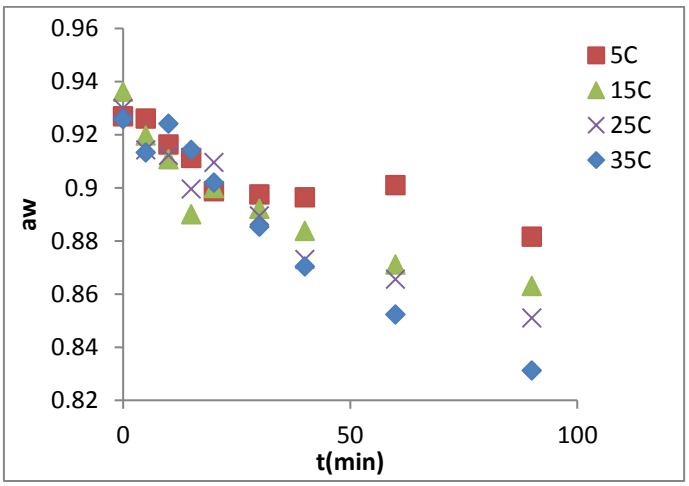
α)1:3



β)1:4



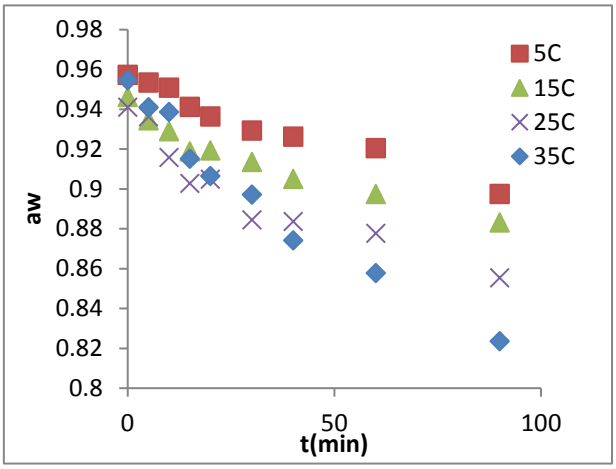
γ)1:5



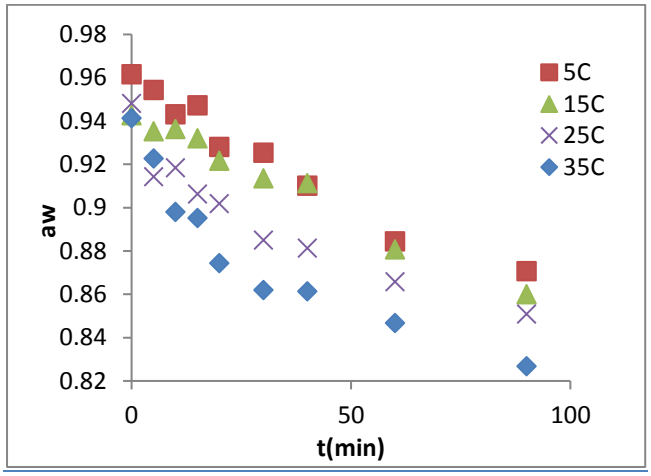
Σχήμα 5.11 Ενεργότητα νερού (a_w) Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 65% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35^oC με αναλογία α)1:3, β)1:4, γ)1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

55% Γλυκερόλη

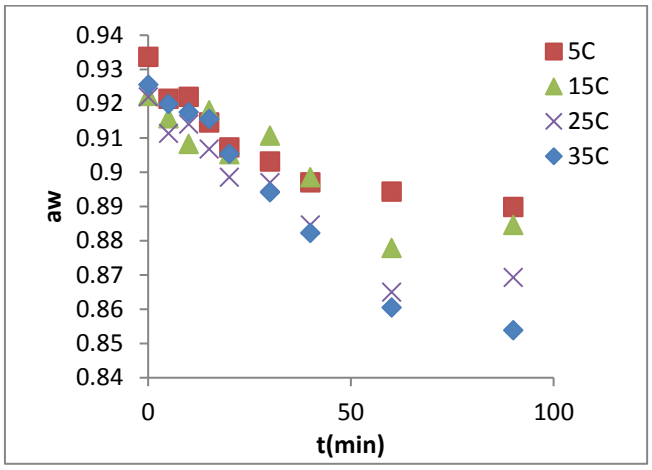
α)1:3



β)1:4



γ)1:5



Σχήμα 5.12 Ενεργότητα νερού (a_w) Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 55% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C με αναλογία α)1:3, β)1:4, γ)1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω Σχήματα, κατά τη διάρκεια της ωσμωτικής προκατεργασίας η ενεργότητα του νερού των δειγμάτων Φέτας που εμβαπτιστήκαν στο ωσμωτικό διάλυμα γλυκερόλης παρουσιάζει σημαντική μείωση ($p<0.05$). Είναι φανερό ότι και στη συγκεκριμένη περίπτωση, η ενεργότητα του νερού επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση του ωσμωτικού διαλύματος σε γλυκερόλη και την αναλογία ωσμωτικού διαλύματος/τροφίμου. Συγκεκριμένα είναι φανερό ότι σε υψηλότερες θερμοκρασίες και συγκεντρώσεις ωσμωτικού διαλύματος, αλλά και σε μεγαλύτερη αναλογία (1:5) ο ρυθμός ελάττωσης της ενεργότητας του νερού είναι μεγαλύτερος.

5.1.2.4 Μέτρηση ποιοτικών-φυσικοχημικών μεγεθών

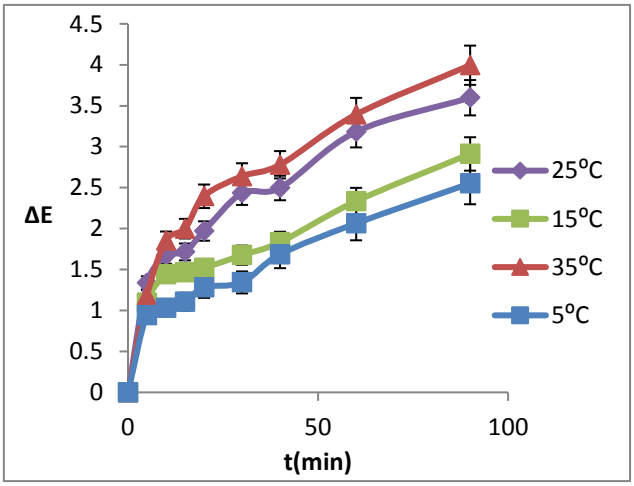
Κατά τη διάρκεια της ωσμωτικής προεπεξεργασίας πραγματοποιήθηκε μέτρηση ποιοτικών-φυσικοχημικών μεγεθών του τυριού, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στις παρακάτω υποπαραγράφους.

5.1.2.4.1 Υπολογισμός μεταβολής χρώματος

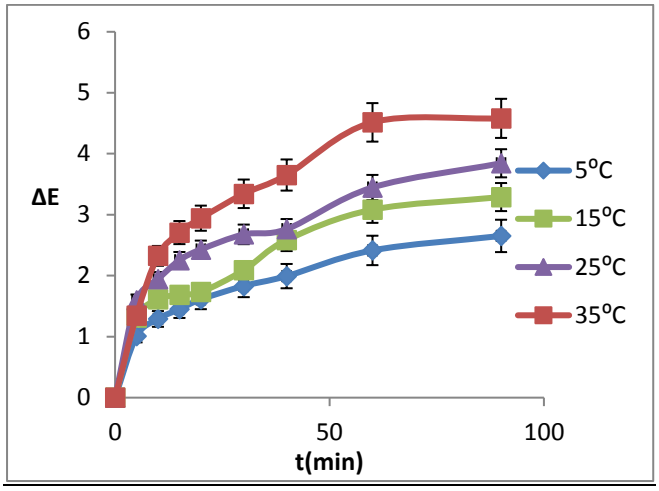
Η μεταβολή χρώματος του τυριού υπολογίστηκε μέσω της εξίσωσης (4.3). Στα παρακάτω Σχήματα (5.13 α, β, γ και 5.14 α, β, γ), παρουσιάζεται η μεταβολή χρώματος (ΔΕ) των δειγμάτων με το χρόνο ώσμωσης για θερμοκρασίες ώσμωσης 5-25°C, αναλογία ωσμωτικού διαλύματος/τροφίμου 1:3, 1:4 και 1:5 και συγκεντρώσεις ωσμωτικού διαλύματος σε γλυκερόλη 65 και 55%, αντίστοιχα..

65% Γλυκερόλη

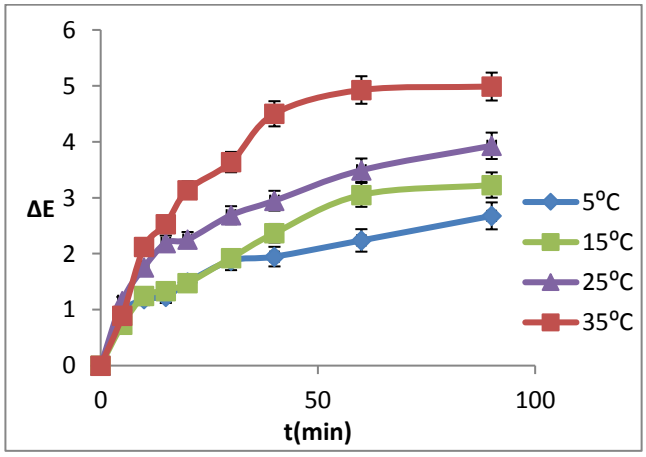
α)1:3



β)1:4



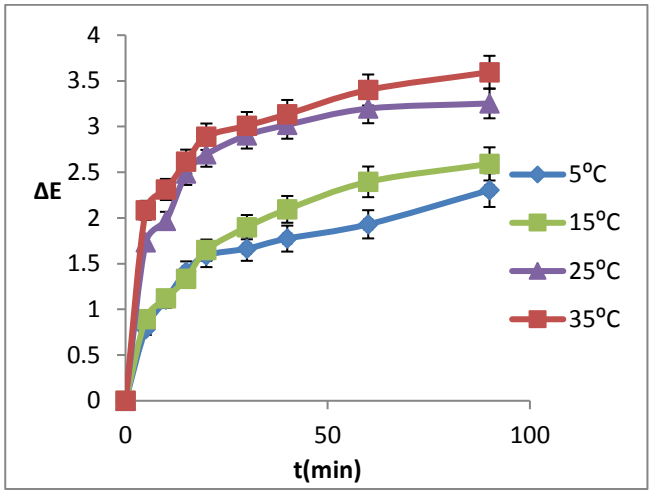
γ)1:5



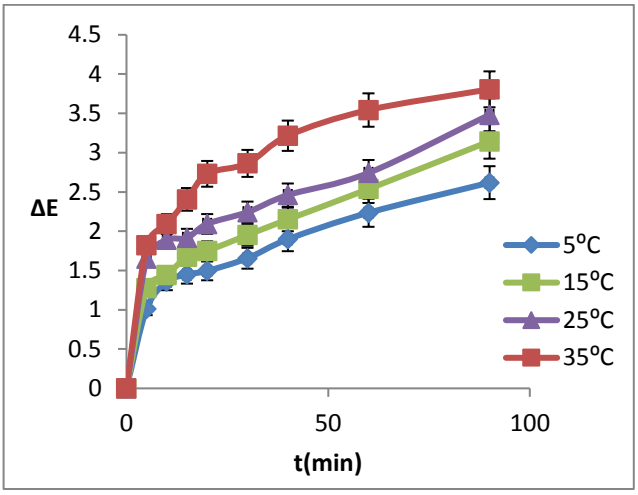
Σχήμα 5.13 Μεταβολή χρώματος Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 65% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C με αναλογία α)1:3, β)1:4, γ)1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

55% Γλυκερόλη

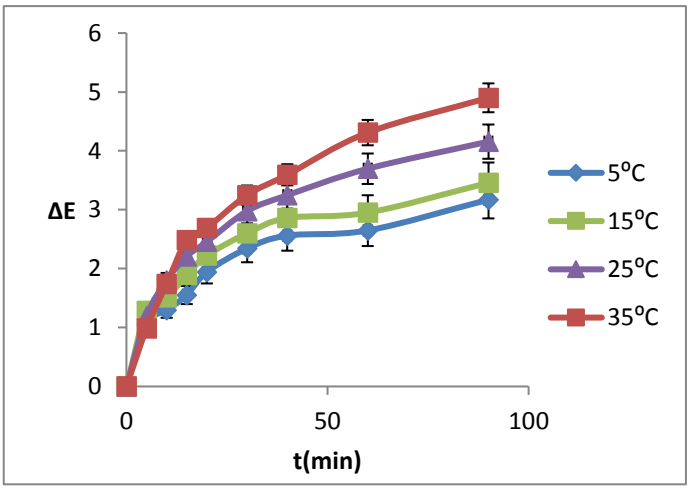
α)1:3



β)1:4



γ)1:5



Σχήμα 5.14 Μεταβολή χρώματος Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 55% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C με αναλογία α)1:3, β)1:4, γ)1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

Από τα παραπάνω Σχήματα είναι εμφανής η επίδραση της ωσμωτικής επεξεργασίας στη μεταβολή του χρώματος των δειγμάτων της Φέτας. Μεγαλύτερος χρόνος επεξεργασίας συνεπάγεται και μεγαλύτερη μεταβολή του χρώματος του τυριού καθώς αυτό υφίσταται κιτρινισμό. Εμφανής είναι επίσης η επίδραση της θερμοκρασίας στη μεταβολή του χρώματός του. Γενικά όσο πιο έντονες είναι οι συνθήκες που πραγματοποιείται η ώσμωση (θερμοκρασία, συγκέντρωση γλυκερόλης, αναλογία ωσμωτικού μέσου προς τρόφιμο), τόσο μεγαλύτερη μεταβολή χρώματος παρατηρείται στη Φέτα. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ότι για συγκέντρωση γλυκερόλης 65%, αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο 1:5 και θερμοκρασία 35°C (εντονότερες συνθήκες πραγματοποίησης του πειράματος) η μεταβολή του χρώματος στα 90 min ώσμωσης ήταν 4,99 , ενώ για συγκέντρωση γλυκερόλης 55%, αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό

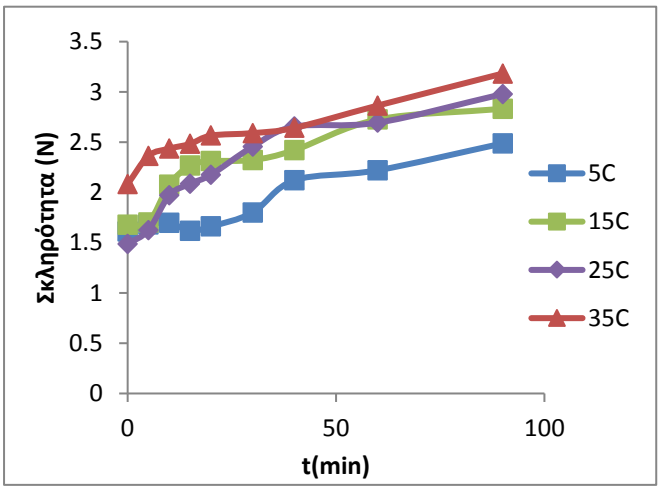
μέσο 1:3 και θερμοκρασία 5°C (ηπιότερες συνθήκες πραγματοποίησης του πειράματος) η μεταβολή του χρώματος στα 90 min ώσμωσης ήταν περίπου υποδιπλάσια σε τιμή 2,3.

5.1.2.4.2 Μέτρηση σκληρότητας

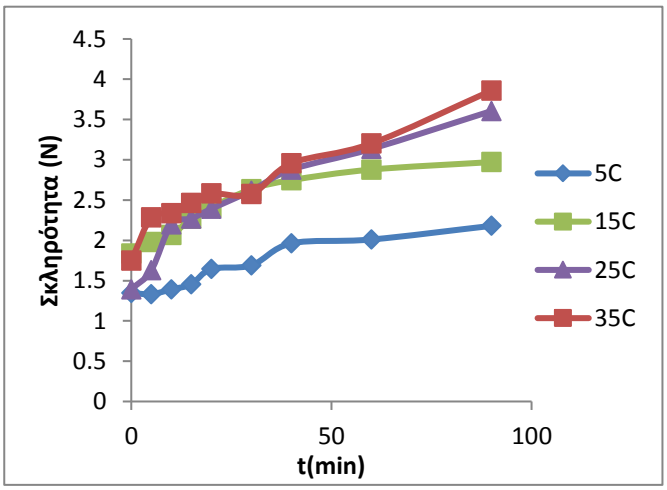
Μέσω του αναλυτή υφής μετρήθηκε η σκληρότητα όλων των δειγμάτων στις διάφορες θερμοκρασίες, αναλογίες, συγκεντρώσεις και χρόνους ωσμωτικής προκατεργασίας. Στα Σχήματα 6.15 α, β, γ και 6.16 α, β, γ,παρουσιάζεται η μεταβολή της σκληρότητας των δειγμάτων Φέτας με το χρόνο ώσμωσης για θερμοκρασίες ώσμωσης 5-25°C, αναλογία ωσμωτικού διαλύματος/τροφίμου 1:3, 1:4 και 1:5 και συγκεντρώσεις ωσμωτικού διαλύματος σε γλυκερόλη 65 και 55%, αντίστοιχα.

65% Γλυκερόλη

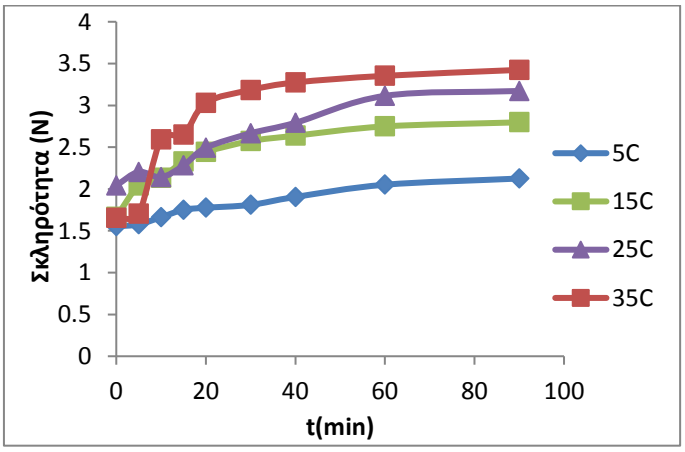
β)1:4



α)1:3



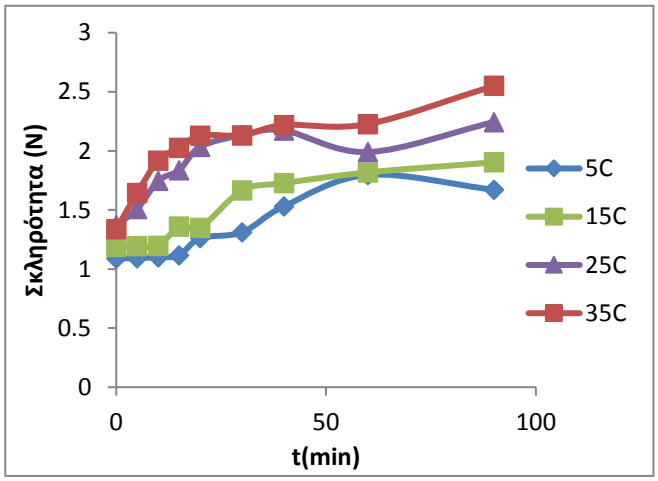
γ)1:5



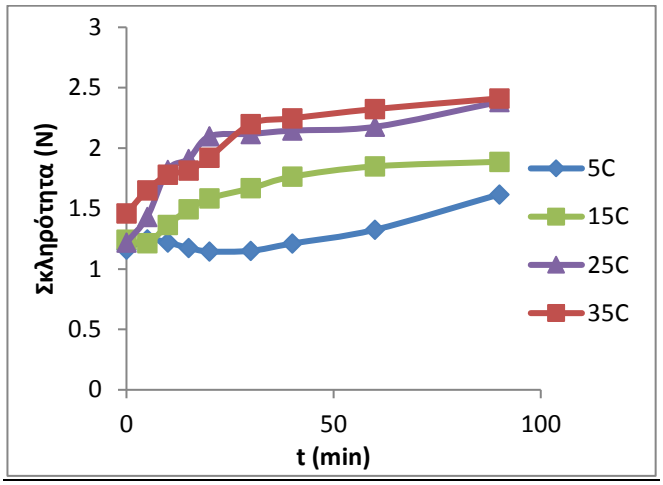
Σχήμα 5.15 Σκληρότητα Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσηςγλυκερόλης 65%, σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C και με αναλογία α)1:3, β)1:4, γ)1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

55% Γλυκερόλη

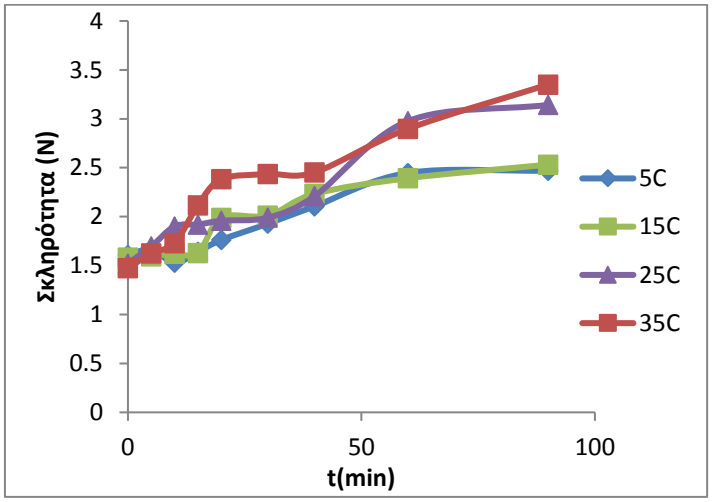
α)1:3



β)1:4



γ)1:5



Σχήμα 5.16 Σκληρότητα Φέτας σε ωσμωτικό διάλυμα 55% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C με αναλογία α)1:3, β)1:4, γ)1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

Αντίστοιχη συμπεριφορά με το χρώμα, φαίνεται να παρουσιάζει και η σκληρότητα των δειγμάτων, η οποία αυξάνεται σημαντικά ($p<0.05$) με το χρόνο της ωσμωτικής αφυδάτωσης και με αύξηση της θερμοκρασίας της διεργασίας. Η αύξηση της σκληρότητας του τυριού θα μπορούσε να αποδοθεί στην αφυδάτωση του δείγματος που λαμβάνει χώρα.

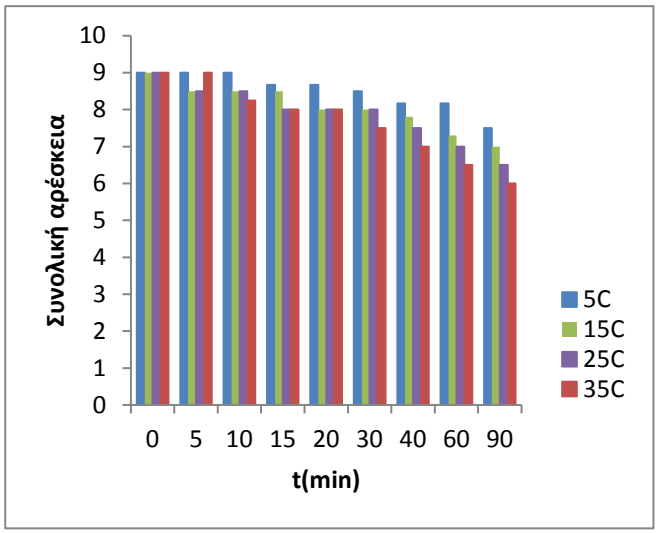
5.1.2.4.3 Οργανοληπτική αξιολόγηση

Από την οργανοληπτική αξιολόγηση ως προς τη συνολική αρέσκεια, που πραγματοποιήθηκε για όλα τα δείγματα στις διάφορες θερμοκρασίες, συγκεντρώσεις, αναλογίες και χρόνους ωσμωτικής προκατεργασίας, προέκυψαν τα διαγράμματα πουακολουθούν. Στα Σχήματα 5.17 α, β, γ και

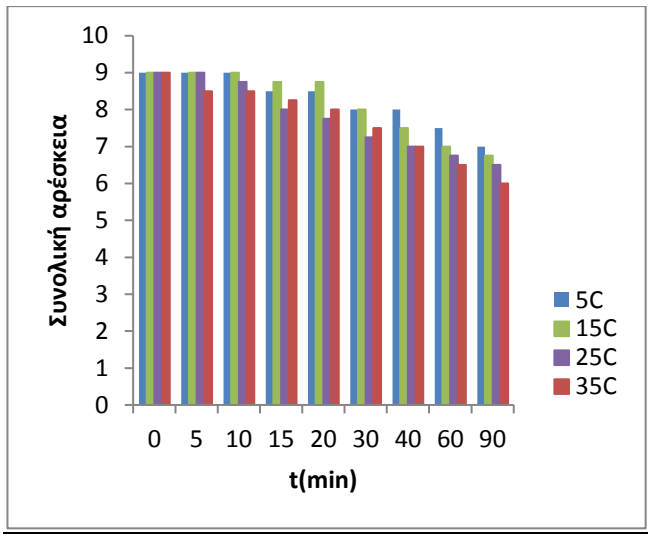
5.18 α, β, γ, παρατίθεται η μεταβολή της βαθμολόγησης των δειγμάτων ως προς τη συνολική τους αρέσκεια συναρτήσει του χρόνου ωσμωτικής αφυδάτωσης, για θερμοκρασίες ώσμωσης 5-25°C, αναλογία ωσμωτικού διαλύματος/τροφίμου 1:3, 1:4 και 1:5 και συγκεντρώσεις ωσμωτικού διαλύματος σε γλυκερόλη 65 και 55%, αντίστοιχα.

65% Γλυκερόλη

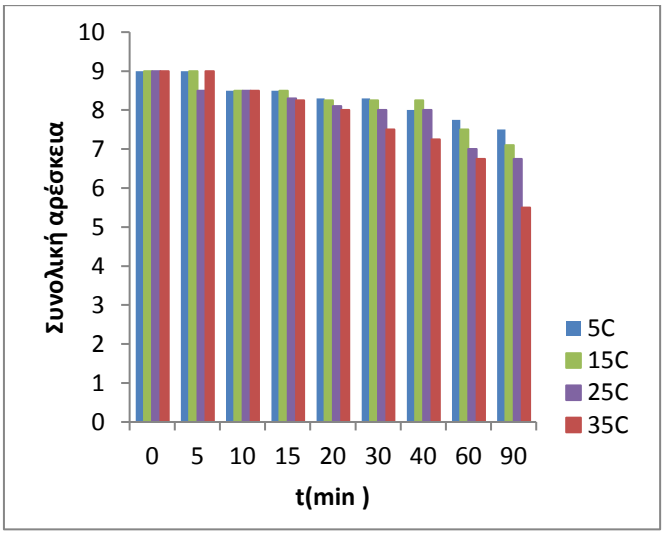
α)1:3



β)1:4



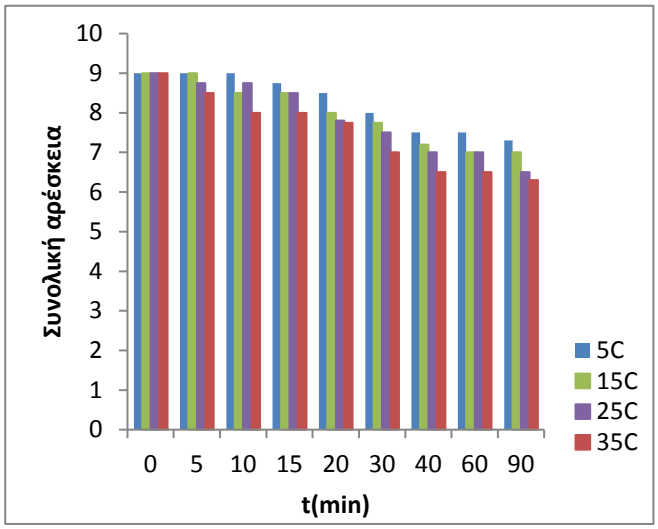
1:5



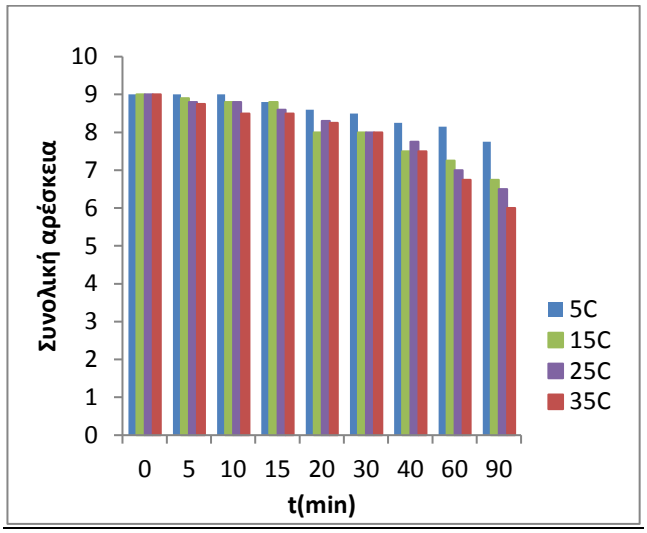
Σχήμα 5.17 Οργανοληπτική αξιολόγηση Φέτας ως προς τη συνολική αρέσκεια, εμβαπτισμένης σε ωσμωτικό διάλυμα 65% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C με αναλογία α)1:3, β)1:4, γ)1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

55% Γλυκερόλη

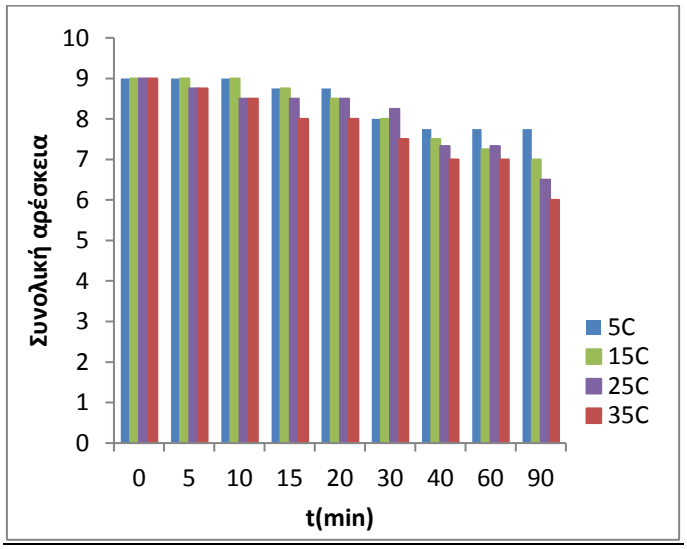
α)1:3



β)1:4



γ)1:5



Σχήμα 5.18 Οργανοληπτική αξιολόγηση Φέτας ως προς τη συνολική αρέσκεια, εμβαπτισμένης σε ωσμωτικό διάλυμα 55% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C με αναλογία α)1:3, β)1:4, γ)1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

Από τα παραπάνω Σχήματα εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα ως προς τη συνολική αρέσκεια των δειγμάτων Φέτας από τους δοκιμαστές, η οποία φάνηκε να επηρεάζεται από την εμφάνιση, τη γεύση- οσμή καθώς και την υφή του τυριού. Όπως προκύπτει, η συνολική αρέσκεια μειώνεται με τη πάροδο του χρόνου. Στους 5°C δεν παρατηρείται σημαντική μείωση της αρέσκειας των

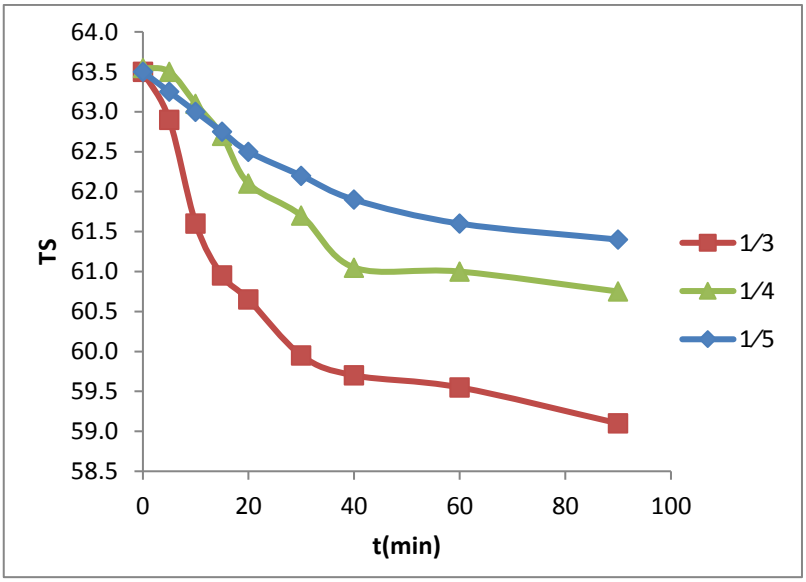
δοκιμαστών (p>0.05), ενώ με αύξηση της θερμοκρασίας η μείωση που παρουσιάζεται είναι εντονότερη. Αυτή η πτωτική τάση μπορεί να εξηγηθεί από την αύξηση της σκληρότητας του τυριού και τη μεταβολή του χρώματός του, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, καθώς επίσης και από τη διαφοροποίηση της γεύσης του από τη Φέτα control, λόγω της πρόσληψης στερεών από το ωσμωτικό διάλυμα.

5.1.2.4.4 Μέτρηση pH

Ανεξαρτήτως των συνθηκών της ωσμωτικής επεξεργασίας, το pH των δειγμάτων Φέτας φάνηκε να μειώνεται κατά περίπου 0,2 μονάδες (από 4,30±0,06 σε 4,10±0,04) στα 90 min ώσμωσης. Η μείωση αυτή του pH των δειγμάτων με αύξηση του χρόνου ώσμωσηςθα μπορούσε να αποδοθεί στην πρόσληψη οξικού οξέος το οποίο αποτελεί συστατικό του ωσμωτικού διαλύματος και συμβάλλει(μαζί με τη μείωση της ενεργότητας του νερού) στη μικροβιολογική σταθερότητα του προϊόντος.

5.1.2.4.5 Μέτρηση ολικών διαλυτών στερεών (TS)

Τα ολικά διαλυτά στερεά του ωσμωτικού διαλύματος μετρούνταν κατά τη διάρκεια της ωσμωτικής επεξεργασίας με σκοπό να διασφαλιστεί η ομαλή πορεία της διεργασίας. Παρατηρήθηκε ότι τα ολικά διαλυτά στερεά του διαλύματος μειώνονταν συναρτήσει του χρόνου ωσμωτικής αφυδάτωσης και μάλιστα όσο μικρότερη ήταν η αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό διάλυμα, τόσο μεγαλύτερη ήταν η μείωσή τους, λόγω της υψηλότερης αραίωσης του διαλύματος. Στο Σχήμα 5.19 παρουσιάζεται ενδεικτικά η επίδραση του χρόνου στα ολικά διαλυτά στερεά για αναλογίες ωσμωτικού διαλύματος/τρόφιμο 1:3, 1:4 και 1:5, για ωσμωτικό διάλυμα με συγκέντρωση γλυκερόλης 65% και σε θερμοκρασία ώσμωσης 35°C.



Σχήμα 5.19 Ολικά διαλυτά στερεά οσμωτικού διαλύματος 65% γλυκερόλης σε θερμοκρασία 35°C συναρτήσει του χρόνου ώσμωσης για αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό διάλυμα 1:3, 1:4 και 1:5.

5.1.2.5 Συντελεστές διάχυσης

Οι τιμές των συντελεστών διάχυσης για την απώλεια νερού και πρόσληψη στερεών υπολογίστηκαν για όλους τους μελετώμενους συνδυασμούς συνθηκών ώσμωσης, μέσω του μοντέλου μεταφοράς μάζας κατά το 2° νόμο του Fick (Εξισώσεις 4.7 και 4.8). Οι τιμές των συντελεστών διάχυσης για την απώλεια νερού (D_{ew}) παρουσιάζονται στον πίνακα (5.1).

Πίνακας 5.1 Συντελεστές διάχυσης για την απώλεια νερού (D_{ew}) για δείγματα Φέτας εμβαπτισμένα σε ωσμωτικά διαλύματα 55% και 65% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C με αναλογία 1:3, 1:4, 1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

	D_{ew} (m^2s^{-1})					
T (^{o}C)	**1/3**		**1/4**		**1/5**	
	55%	**65%**	**55%**	**65%**	**55%**	**65%**
5	8,1E-09	8,47E-09	1,04E-08	1,11E-08	1,12E-08	1,21E-08
15	8,26E-09	8,7E-09	1,11E-08	1,19E-08	1,19E-08	1,29E-08
25	9,07E-09	9,63E-09	1,17E-08	1,27E-08	1,34E-08	1,48E-08
35	9,23E-09	9,8E-09	1,23E-08	1,35E-08	1,36E-08	1,52E-08

Από τον Πίνακα 5.1 παρατηρείται ότι η τιμή του συντελεστή διάχυσης για την απώλεια νερού (Dew) αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης γλυκερόλης καθώς και της αναλογίας ωσμωτικού μέσου προς τρόφιμο.

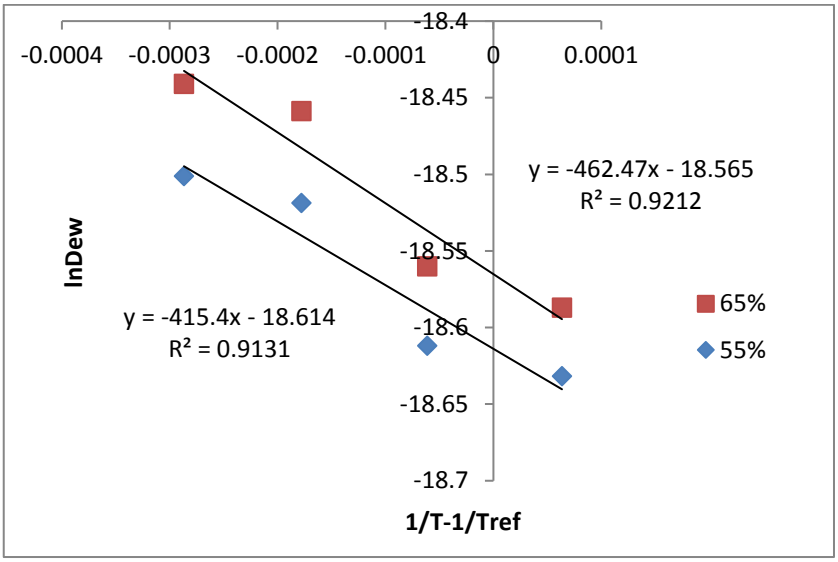
Στον Πίνακα 5.2 παρατίθενται οι τιμές της ενέργειας ενεργοποίησης των συντελεστών διάχυσης για την απώλεια νερού για ωσμωτικά διαλύματα συγκέντρωσης 55 και 65% σε γλυκερόλη και για αναλογίες τυριού προς ωσμωτικό μέσο 1:3, 1:4 και 1:5.

Πίνακας 5.2 Ενέργεια ενεργοποίησης για την απώλεια νερού (D_{ew}) για δείγματα Φέτας εμβαπτισμένα σε ωσμωτικά διαλύματα 55% και 65% γλυκερόλης με αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο 1:3, 1:4, 1:5.

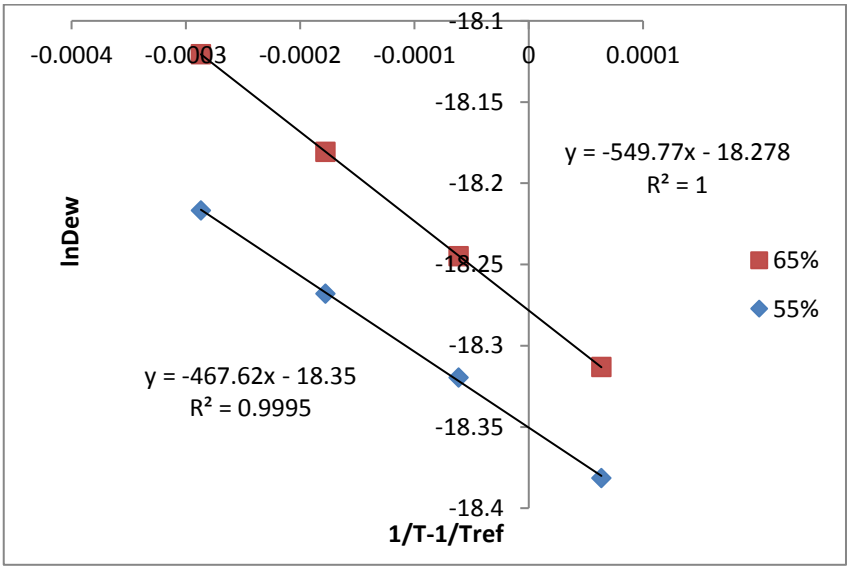
	E_a (kJ/mol)		
Συγκέντρωση γλυκερόλης (%)	**1/3**	**1/4**	**1/5**
65%	3,84	4,57	5,86
55%	3,45	3,89	4,91

Από τον Πίνακα 5.2 είναι εμφανής η αύξηση της ενέργειας ενεργοποίησης με αύξηση της συγκέντρωσης γλυκερόλης καθώς και με αύξηση της αναλογίας ωσμωτικού μέσου προς τρόφιμο. Αύξηση της ενέργειας ενεργοποίησης σημαίνει αύξηση της εξάρτησης του συντελεστή διάχυσης από τη θερμοκρασία. Παρατηρείται ότι η εξάρτηση των συντελεστών διάχυσης από τη θερμοκρασία είναι αρκετά μικρή και για τις 2 συγκεντρώσεις γλυκερόλης. Στα Σχήματα 5.20 α, β, γ, παρουσιάζονται τα διαγράμματα Arrhenius των συντελεστών διάχυσης για την απώλεια νερού (Dew) σε αναλογίες τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο 1:3, 1:4 και 1:5.

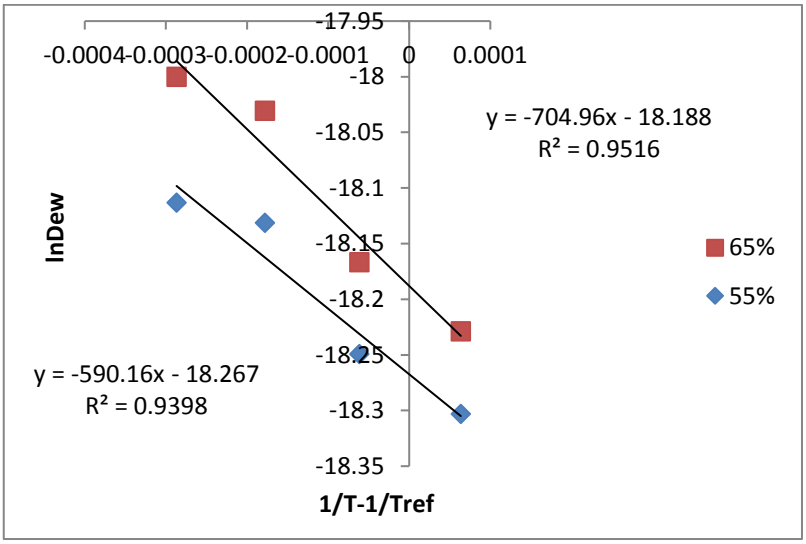
α)1:3


-0.0004
-0.0003
-0.0002
-0.0001
0
0.0001
-18.4
-18.45
-18.5
-18.55
-18.6
-18.65
-18.7
lnDew
1/T-1/Tref
y = -462.47x - 18.565
R² = 0.9212
y = -415.4x - 18.614
R² = 0.9131
65%
55%

β)1:4


-0.0004
-0.0003
-0.0002
-0.0001
0
0.0001
-18.1
-18.15
-18.2
-18.25
-18.3
-18.35
-18.4
lnDew
1/T-1/Tref
y = -549.77x - 18.278
R² = 1
y = -467.62x - 18.35
R² = 0.9995
65%
55%

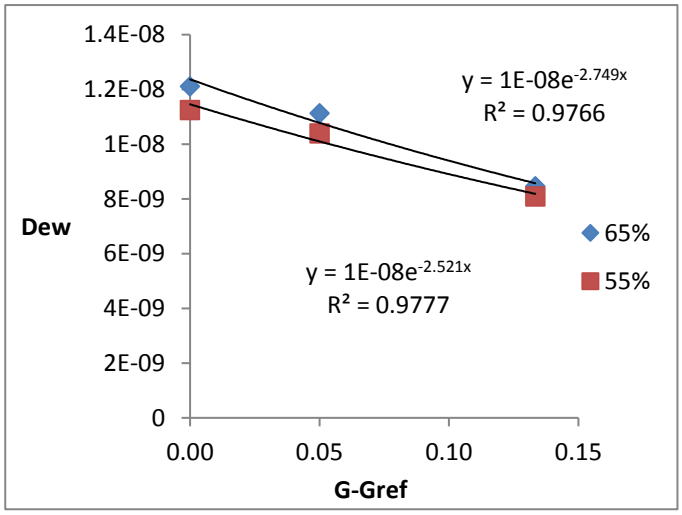
γ)1:5



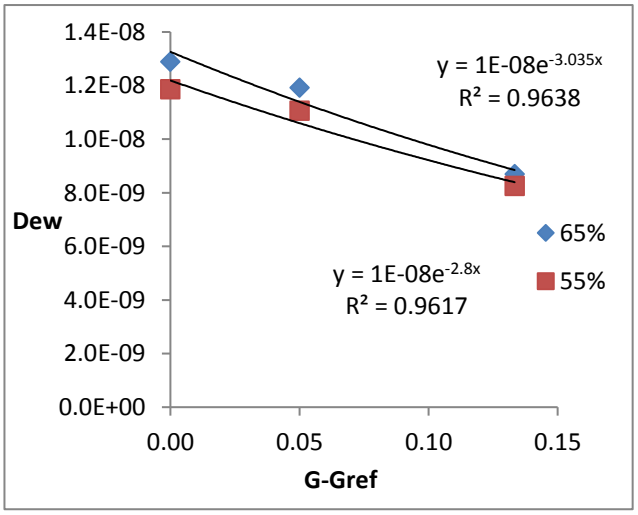
Σχήμα 5.20 Διαγράμματα Arrhenius των συντελεστών διάχυσης για την απώλεια νερού (D_{ew}) δειγμάτων Φέτας εμβαπτισμένων σε ωσμωτικό διάλυμα 55% και 65% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C με αναλογία α)1:3, β)1:4, γ)1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

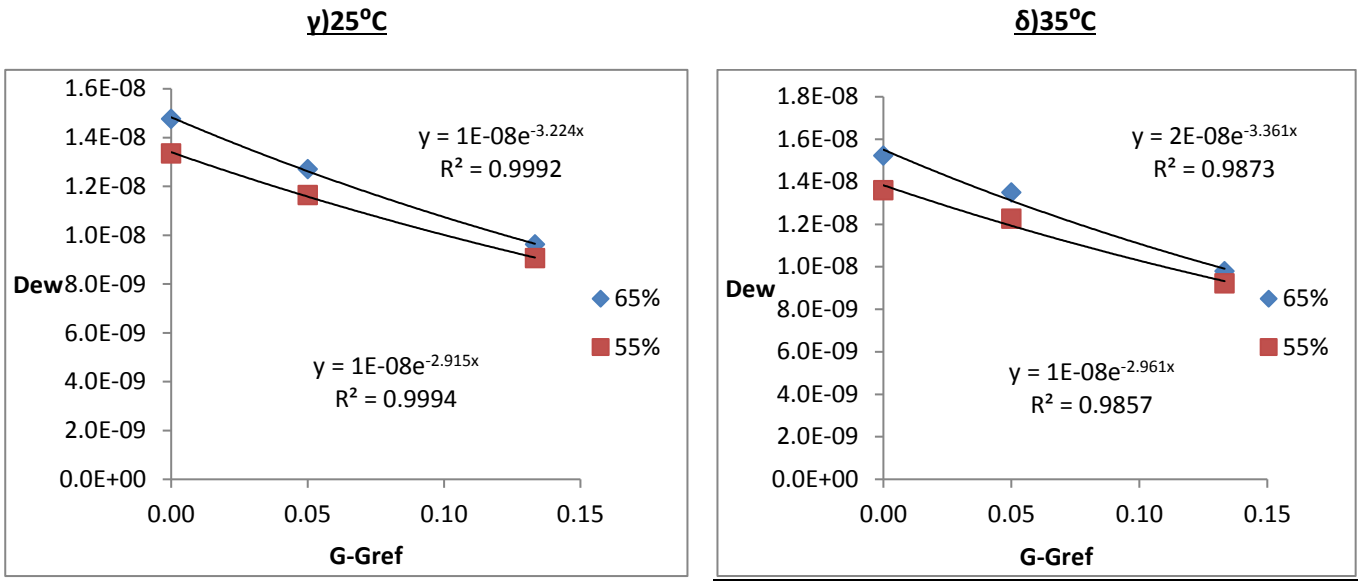
Η επίδραση της αναλογίας τροφίμου προς ωσμωτικό διάλυμα στους συντελεστές διάχυσης για την απώλεια νερού (D_{ew}) για θερμοκρασίες 5, 15, 25 και 35°C και για συγκεντρώσεις γλυκερόλης 55 και 65% παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.21 α, β, γ, δ. Να σημειωθεί ότι η αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο, συμβολίζεται στα παρακάτω διαγράμματα με G.

α)5°C



β)15°C





Σχήμα 5.21 Διαγράμματα συντελεστών διάχυσης για απώλεια νερού (D_{ew}) συναρτήσει της αναλογίας τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο σε θερμοκρασία α)5°C, β)15°C , γ)25°C και δ)35°C.

Από τα παραπάνω Σχήματα φαίνεται ότι οι τιμές των σταθερών διάχυσης για την πρόσληψη νερού αυξάνονται με αύξηση της θερμοκρασίας καθώς και της συγκέντρωσης γλυκερόλης στο διάλυμα. Ταυτόχρονα, με αύξηση της συγκέντρωσης γλυκερόλης, αυξάνεται και η ενέργεια ενεργοποίησης η οποία εκφράζει την εξάρτηση του ρυθμού διάχυσης από τη θερμοκρασία.

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών διάχυσης για την πρόσληψη στερεών (D_{es}).

Πίνακας 5.3 Συντελεστές διάχυσης για την πρόσληψη στερεών (D_{es}) για δείγματα Φέτας εμβαπτισμένα σε ωσμωτικά διαλύματα 55% και 65% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C με αναλογία 1:3, 1:4, 1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

	D_{es} (m^2s^{-1})					
T (°C)	**1/3**		**1/4**		**1/5**	
	55%	**65%**	**55%**	**65%**	**55%**	**65%**
5	7,51E-09	8,03E-09	8,61E-09	9,25E-09	1,13E-08	1,25E-08
15	7,65E-09	8,21E-09	9,26E-09	1,00E-08	1,29E-08	1,45E-08
25	7,86E-09	8,59E-09	1,05E-08	1,18E-08	1,47E-08	1,68E-08
35	8,04E-09	8,99E-09	1,17E-08	1,34E-08	1,57E-08	1,89E-08

Από τον Πίνακα 5.3 παρατηρείται ότι και η τιμή του συντελεστή διάχυσης για την πρόσληψη στερεών (D_{es}) αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης γλυκερόλης καθώς και της αναλογίας ωσμωτικού μέσου προς τρόφιμο.

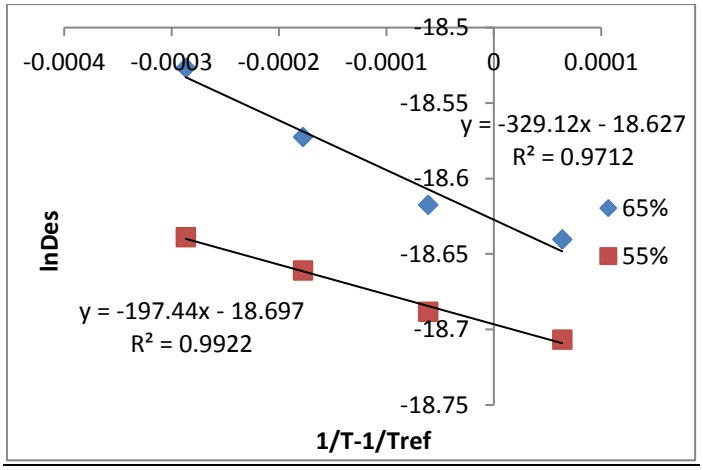
Στον Πίνακα 5.4 παρατίθενται οι τιμές της ενέργεια ενεργοποίησης των συντελεστών διάχυσης για την πρόσληψη στερεών για ωσμωτικά διαλύματα συγκέντρωσης 55 και 65% σε γλυκερόλη και για αναλογίες τυριού προς ωσμωτικό μέσο 1:3, 1:4 και 1:5.

Πίνακας 5.4 Ενέργεια ενεργοποίησης για την πρόσληψη στερεών (D_{es}) για δείγματα Φέτας εμβαπτισμένα σε ωσμωτικά διαλύματα 55% και 65% γλυκερόλης με αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο 1:3, 1:4, 1:5.

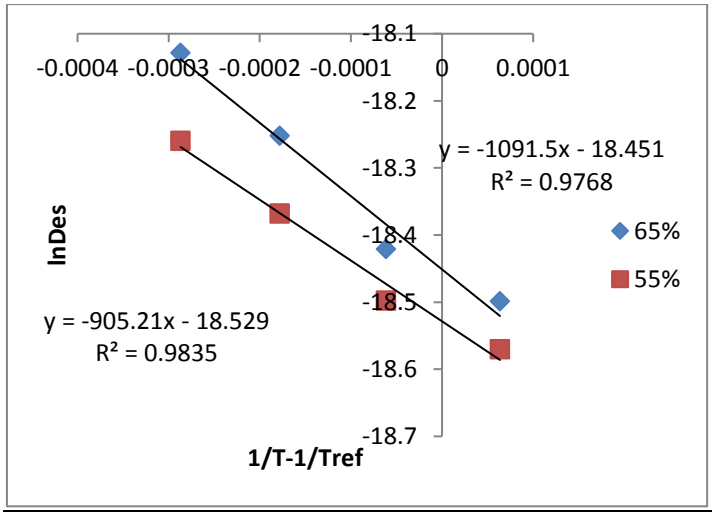
	E_a (kJ/mol)		
Συγκέντρωση γλυκερόλης (%)	**1/3**	**1/4**	**1/5**
65%	2,74	9,07	9,89
55%	1,64	7,53	8,00

Από τον Πίνακα 5.4 φαίνεται η αύξηση της ενέργειας ενεργοποίησης με αύξηση της συγκέντρωσης γλυκερόλης καθώς και με αύξηση της αναλογίας ωσμωτικού μέσου προς τρόφιμο. Επομένως, η εξάρτηση του συντελεστή διάχυσης από τη θερμοκρασία αυξάνεται με αύξηση των παραμέτρων αυτών. Στα Σχήματα 5.22 α, β, γ, παρουσιάζονται τα διαγράμματα Arrhenius των συντελεστών διάχυσης για την πρόσληψη στερεών (D_{es}) σε αναλογίες τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο 1:3, 1:4 και 1:5, αντίστοιχα.

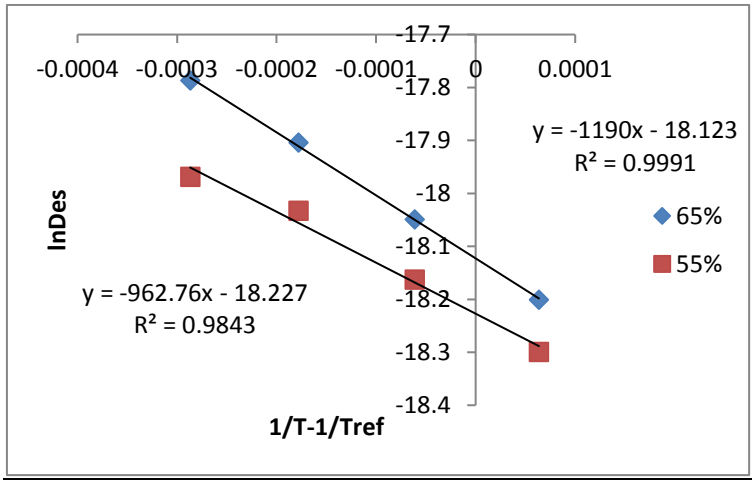
1:3



1:4



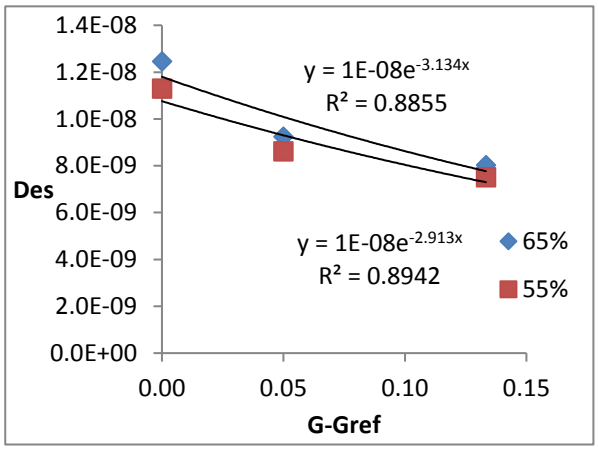
1:5



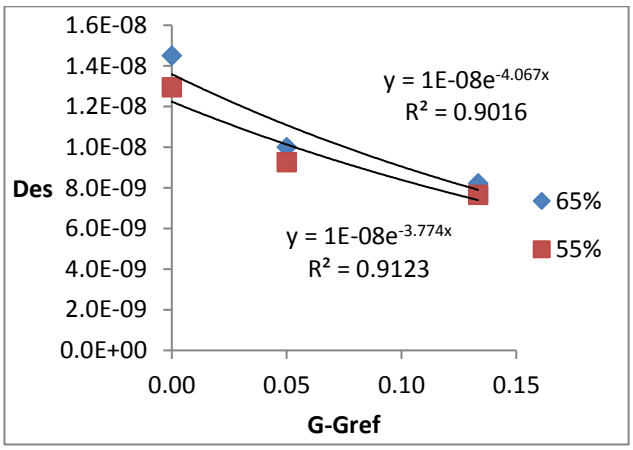
Σχήμα 5.22 Διαγράμματα Arrhenius των συντελεστών διάχυσης για την πρόσληψη στερεών (D_{es}) δειγμάτων Φέτας εμβαπτισμένων σε ωσμωτικό διάλυμα 55% και 65% γλυκερόλης σε θερμοκρασίες 5, 15, 25, 35°C με αναλογία α)1:3, β)1:4, γ)1:5 τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο.

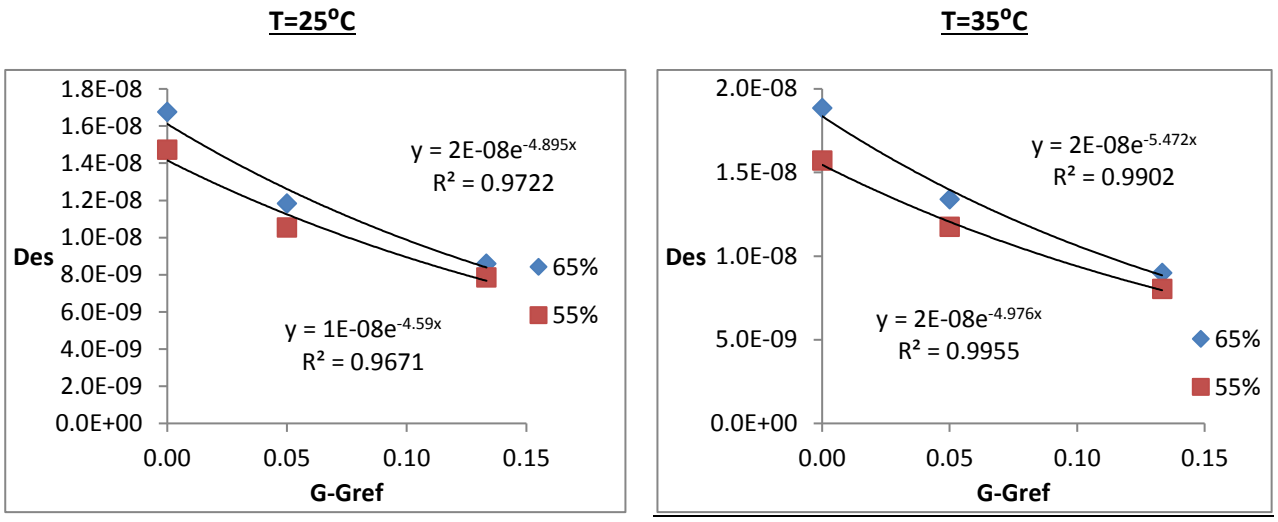
Η επίδραση της αναλογίας τροφίμου προς ωσμωτικό διάλυμα στους συντελεστές διάχυσης για την πρόσληψη στερεών (D_{es}) για θερμοκρασίες ώσμωσης 5, 15, 25 και 35°C και για συγκεντρώσεις ωσμωτικού διαλύματος σε γλυκερόλη 55 και 65%, παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.23 α, β, γ, δ, αντίστοιχα.

T=5°C



T=15°C





Σχήμα 5.23 Διαγράμματα συντελεστών διάχυσης για πρόσληψη στερεών (D_{es}) συναρτήσει της αναλογίας τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο σε θερμοκρασία α)5°C, β)15°C , γ)25°C και δ)35°C.

Από τα παραπάνω Σχήματα και Πίνακες (Σχήμα 5.19-5.23 , Πίνακας 5.1- 5.4) φαίνεται ότι οι τιμές των σταθερών διάχυσης για την πρόσληψη νερού και την απώλεια στερεών αυξάνονται με αύξηση της θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης γλυκερόλης στο διάλυμα καθώς και της αναλογίας ωσμωτικού μέσου προς τρόφιμο. Ταυτόχρονα, με αύξηση της συγκέντρωσης γλυκερόλης καθώς και της αναλογίας ωσμωτικού μέσου προς τυρί, αυξάνεται και η ενέργεια ενεργοποίησης η οποία εκφράζει την εξάρτηση του ρυθμού διάχυσης από τη θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα κι άλλων ερευνητών (Rastogi & Raghavarao, 2002).

Οι τιμές των συντελεστών διάχυσης για την απώλεια νερού (D_{ew}) που υπολογίστηκαν στην παρούσα μελέτη κυμαίνονται από $8{,}1\cdot10^{-9}$ έως $5{,}2\cdot10^{-8}$ m^2s^{-1}, ενώ για την πρόσληψη στερεών (D_{es}) κυμαίνονται από $7{,}51\cdot10^{-9}$ έως $1{,}89\cdot10^{-8}$ m^2s^{-1}. Στην παγκόσμια βιβλιογραφία δεν έχει βρεθεί κάποια μελέτη που να ασχολείται με την ωσμωτική αφυδάτωση σε τυρί ώστε να μπορέσει να γίνει σύγκριση των τιμών αυτών με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών.

Η επίδραση της συγκέντρωσης του ωσμωτικού διαλύματος σε γλυκερόλη στους συντελεστές διάχυσης για την απώλεια νερού και την πρόσληψη στερεών περιγράφεται από την Εξίσωση (5.1):

$$\boldsymbol{D} = D_{50}(T,G)\cdot e^{k(T,G)\cdot(C-C_{ref})} \qquad \textit{Εξίσωση } 5.1$$

Όπου $\boldsymbol{D_{50}(T,G)} = D_{50Tref}(G)\cdot exp\left[-\frac{E_{aD50}(G)}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{ref}}\right)\right]$ $\quad$ *Εξίσωση* 5.2

$$\text{με } \boldsymbol{D_{50Tref}(G)} = \alpha_1\cdot\left(G-G_{ref}\right)+b_1 \qquad \textit{Εξίσωση } 5.3$$

$$\boldsymbol{E_{aD50}(G)} = \alpha_2\cdot\left(G-G_{ref}\right)+b_2 \qquad \textit{Εξίσωση } 5.4$$

και $\quad \boldsymbol{k(T,G)} = k_{Tref}(G)\cdot\exp\left[-\frac{E_{ak}(G)}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{ref}}\right)\right]$ $\quad$ *Εξίσωση* 5.5

$$\text{με } \boldsymbol{k_{Tref}(G)} = \alpha_3\cdot\left(G-G_{ref}\right)+b_3 \qquad \textit{Εξίσωση } 5.6$$

$$\boldsymbol{E_{ak}(G)} = \alpha_4 \cdot \left(G - G_{ref}\right) + b_4 \qquad Εξίσωση\ 5.7$$

Όπου ***D*** ο συντελεστής διάχυσης για την απώλεια νερού και την πρόσληψη στερεών της Φέτας($m^2 \cdot s^{-1}$)

D_{50} η τιμή του συντελεστή διάχυσης της Φέτας για συγκέντρωση γλυκερόλης 50% συναρτήσει της θερμοκρασίας του ωσμωτικού διαλύματος και της αναλογίας Φέτας προς ωσμωτικό μέσο ($m^2 \cdot s^{-1}$)

T η θερμοκρασία του ωσμωτικού διαλύματος (K)

T_{ref} η θερμοκρασία αναφοράς του ωσμωτικού διαλύματος (K)

G η αναλογία Φέτας προς ωσμωτικό μέσο (w/w)

G_{ref} η αναλογία αναφοράς Φέτας προς ωσμωτικό μέσο (w/w)

C η συγκέντρωση του ωσμωτικού διαλύματος σε γλυκερόλη (%)

C_{ref} η συγκέντρωση αναφοράς της γλυκερόλης (50% w/w)

k ο ρυθμός μεταβολής του συντελεστή διάχυσης της Φέτας συναρτήσει της θερμοκρασίας του ωσμωτικού διαλύματος και της αναλογίας Φέτας προς ωσμωτικό μέσο (s^{-1})

D_{50Tref} η τιμή του συντελεστή διάχυσης της Φέτας για συγκέντρωση γλυκερόλης 50% σε θερμοκρασία αναφοράς T_{ref} συναρτήσει της αναλογίας Φέτας προς ωσμωτικό μέσο ($m^2 \cdot s^{-1}$)

E_{aD50} η ενέργεια ενεργοποίησης του D_{50} συναρτήσει της αναλογίας Φέτας προς ωσμωτικό μέσο (J/mol)

k_{Tref} ο ρυθμός μεταβολής του συντελεστή διάχυσης σε θερμοκρασία αναφοράς T_{ref} συναρτήσει της αναλογίας Φέτας προς ωσμωτικό μέσο (s -1)

E_{ak} η ενέργεια ενεργοποίησης του ρυθμού μεταβολής του συντελεστή διάχυσης συναρτήσει της αναλογίας Φέτας προς ωσμωτικό μέσο (J/mol)

R η παγκόσμια σταθερά αερίων (8,314 J/mol·K)

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ οι ρυθμοί μεταβολής των D_0, E_{aD50} , k_{Tref}, E_{ak} συναρτήσει της αναλογίας Φέτας προς ωσμωτικό μέσο

b_1, b_2, b_3, b_4 οι τιμές των D_0, E_{aD50} , k_{Tref}, E_{ak} σε συγκέντρωση 50% γλυκερόλης

5.1.2.6 Προσαρμογή μαθηματικού μοντέλου

Με αντικατάσταση των τιμών της Εξίσωσης 5.1 από τις εξισώσεις 5.2-5.7, προέκυψε ένα συνδυαστικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για τη μελέτη της συνδυαστικής

επίδρασης της θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης του ωσμωτικού μέσου καθώς και της αναλογίας τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των συντελεστών διάχυσης για την απώλεια νερού και την πρόσληψη στερεών. Το συνδυαστικό αυτό μοντέλο δίνεται από την Εξίσωση 5.8 .

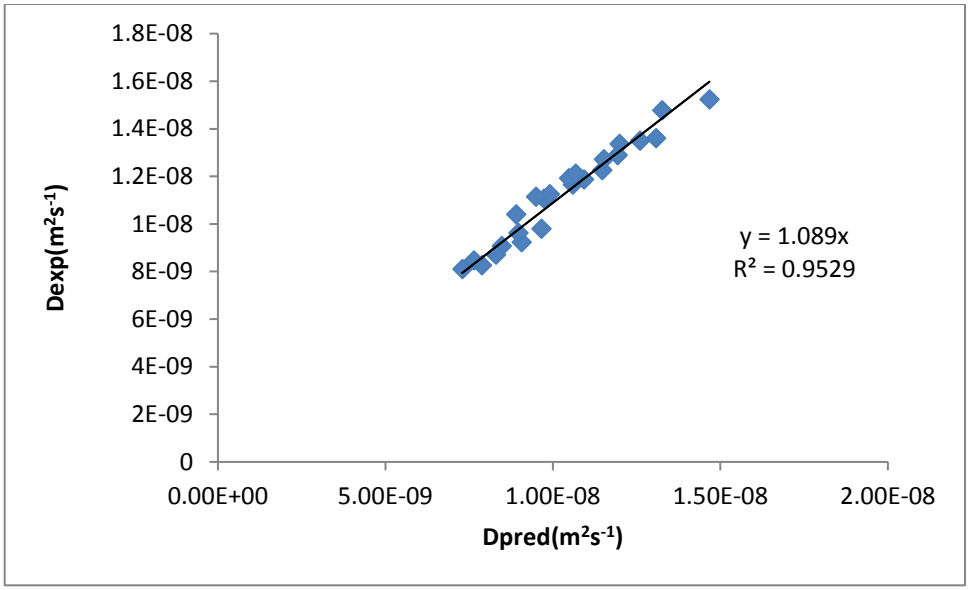
$$D=(a_1\cdot G+b_1)\cdot\exp\left[\left(-\frac{(a_2\cdot(G-G_{ref})+b_2)}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{ref}}\right)+\left((a_3\cdot(G-G_{ref})+b_3)\exp\left(-\frac{(a_4\cdot(G-G_{ref})+b_4)}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{ref}}\right)\right)\right)\right)\cdot(C-C_{ref})\right] \quad \text{(Εξίσωση 5.8)}$$

Οι τιμές των συντελεστών υπολογίστηκαν με τη βοήθεια μη γραμμικής παλινδρόμησης με το λογισμικό Systat 10.2, και παρουσιάζονται στους πίνακες (5.5) και (5.6).

Πίνακας 5.5 Τιμές των συντελεστών της Εξίσωσης 5.8 για την απώλεια νερού στα δείγματα Φέτας.

Συντελεστές	
α_1	$-2\cdot10^{-8}$
b_1	10^{-8}
α_2	-8876,9
b_2	6124,3
α_3	-2,4601
b_3	0,811
α_4	-21640
b_4	10043

Στο Σχήμα 5.24 παρουσιάζεται η συσχέτιση των πειραματικών τιμών των συντελεστών διάχυσης για την απώλεια νερού, με τις προβλεπόμενες από το μοντέλο της Εξίσωσης 5.8, τιμές.



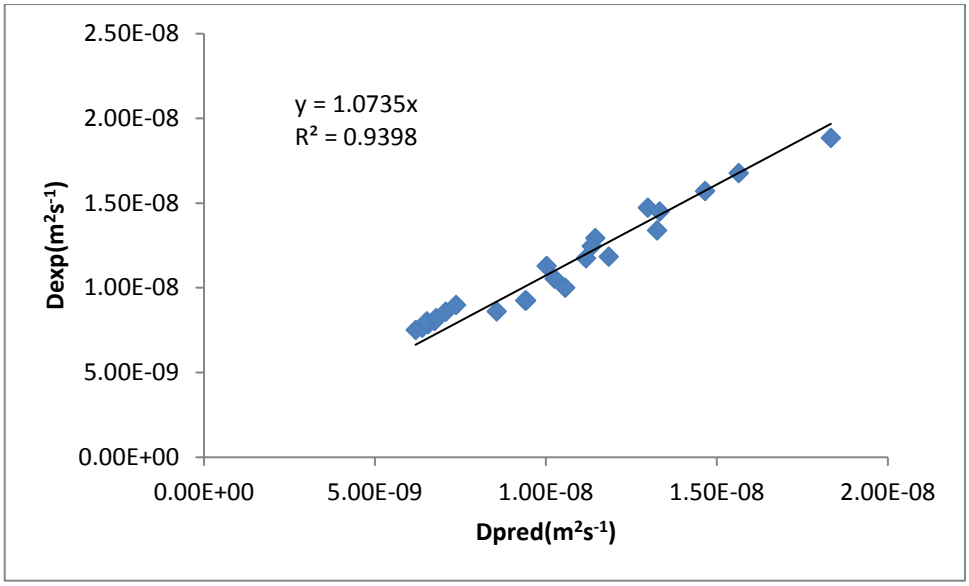
Σχήμα 5.24 Διάγραμμα συσχέτισης των προβλεπόμενων τιμών διάχυσης για την απώλεια νερού δειγμάτων Φέτας με τις πειραματικές τιμές.

Η συσχέτιση των πειραματικών με τις προβλεπόμενες τιμές του συντελεστή διάχυσης απώλειας νερού για τα δείγματα Φέτας φαίνεται ότι είναι αρκετά ικανοποιητική (R^2= 0,9529), που σημαίνει ότι η προσαρμογή του μοντέλου στα πειραματικά αποτελέσματα είναι πολύ καλή.

Πίνακας 5.6 Τιμές των συντελεστών της Εξίσωσης 5.8 για την πρόσληψη στερεών στα δείγματα Φέτας.

Συντελεστές	
α_1	$-3\cdot10^{-8}$
b_1	10^{-8}
α_2	-48020
b_2	7827,7
α_3	-6,1386
b_3	1,3751
α_4	-10804
b_4	14147

Στο Σχήμα 5.25 παρουσιάζεται η συσχέτιση των πειραματικών τιμών συντελεστών διάχυσης για την πρόσληψη στερεών, με τις προβλεπόμενες από το μοντέλο της Εξίσωσης 5.8 τιμές.



Σχήμα 5.25 Διάγραμμα συσχέτισης των προβλεπόμενων τιμών διάχυσης για την πρόσληψη στερεών δειγμάτων Φέτας με τις πειραματικές τιμές.

Παρατηρείται ότι και στην περίπτωση των συντελεστών διάχυσης για την πρόσληψη στερεών, η συσχέτιση πειραματικών και προβλεπόμενων από το παραπάνω μοντέλο τιμών, είναι αρκετά καλή, αν και λίγο μικρότερη από τη συσχέτιση των συντελεστών διάχυσης για την απώλεια νερού.

Για την επαλήθευση της Εξίσωσης 5.8 κρίνεται σκόπιμο να γίνουν ορισμένα πειράματα σε δείγματα Φέτας συγκεκριμένων συνθηκών και να συγκριθούν οι πειραματικές τιμές των συντελεστών διάχυσης με τις υπολογισμένες από το ανωτέρω μοντέλο.

Για την επιλογή των βέλτιστων συνθηκών ωσμωτικής αφυδάτωσης πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί αντιφατικοί πολλές φορές παράγοντες. Αυτοί είναι η ενεργότητα του τροφίμου, η οποία επιδιώκεται να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη για να μπορεί να διασφαλιστεί η μικροβιολογική σταθερότητά του, τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά (χρώμα, υφή, οργανοληπτική αποδεκτότητα), τα οποία επιδιώκονται να κρατούνται σε όσο γίνεται υψηλότερα επίπεδα, καθώς και το κόστος της διεργασίας, που αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη βιομηχανική εφαρμογή της μεθόδου.

Λαμβάνοντας υπόψη όλους τους ανωτέρω παράγοντες, έγινε η επιλογή των βέλτιστων συνθηκών για τη συνέχιση της μελέτης. Ως θερμοκρασία ώσμωσης επιλέχθηκαν οι 15°C, με σκοπό να επιτευχθεί ισορροπία ανάμεσα στην οργανοληπτική ποιότητα και στη μείωση της ενεργότητας νερού. Ως αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο επιλέχθηκε η 1:4, λαμβάνοντας υπόψιν τον παράγοντα κόστος αλλά και τη μείωση της ενεργότητας νερού. Τέλος, η συγκέντρωση γλυκερόλης που επιλέχθηκε ήταν 65%, καθώς φάνηκε ότι η αύξηση της συγκέντρωσης του ωσμωτικού διαλύματος σε γλυκερόλη είχε μεγάλη επίδραση στο ρυθμό της διάχυσης και κατ' επέκταση στη μείωση της ενεργότητας νερού. Ο χρόνος εμβάπτισης του τυριού στο ωσμωτικό διάλυμα επιλέχθηκε να είναι τα 30 min.

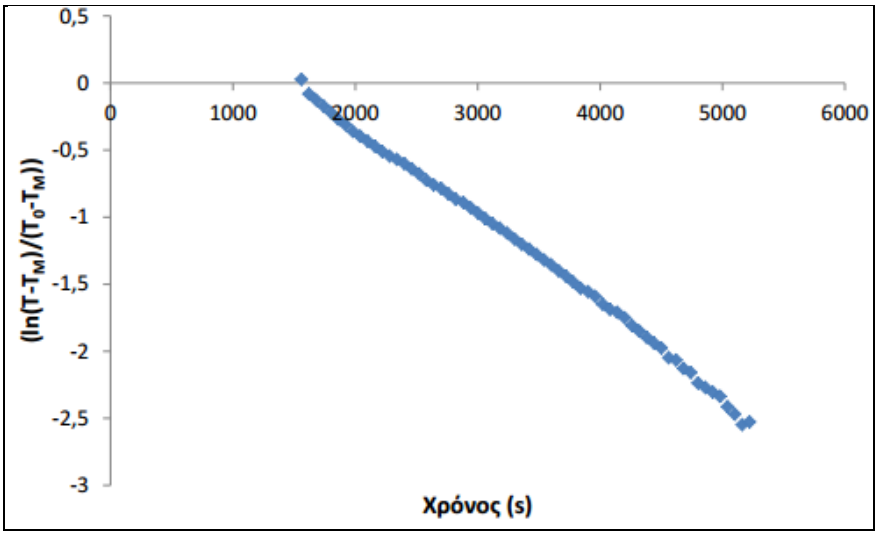
5.2 Δεύτερη Θεματική Ενότητα: Ξήρανση ωσμωτικά προκατεργασμένων δειγμάτων Φέτας

6.2.1 Σκοπός

Στη Δεύτερη Θεματική ενότητα, έγινε ξήρανση σε ωσμωτικά προκατεργασμένα και σε ανεπεξέργαστα δείγματα Φέτας με σκοπό την επιλογή των βέλτιστων συνθηκών επεξεργασίας με ξήρανση έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μείωση του χρόνου ξήρανσης σε όσο το δυνατόν ηπιότερες συνθήκες επεξεργασίας.

6.2.2 Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής στον ξηραντήρα

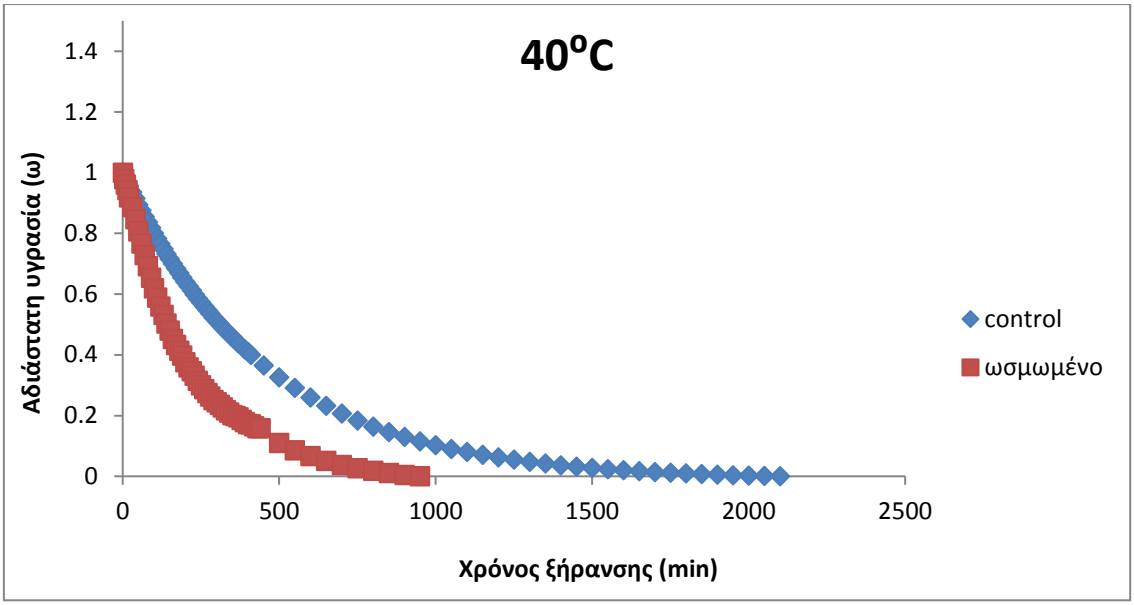
Στα δεδομένα αύξησης της θερμοκρασίας της πλάκας αλουμινίου στον ξηραντήρα, έγινε γραμμική προσαρμογή στην εξίσωση (4.16). Στο Σχήμα 5.26 παρουσιάζεται η μορφή της εξίσωσης αυτής, όπως προκύπτει από την καταγραφή των δεδομένων θερμοκρασίας. Από την κλίση του διαγράμματος καθώς και από τις γνωστές φυσικές και γεωμετρικές ιδιότητες της πλάκας, ο συντελεστής συναγωγής υπολογίστηκε ίσος με h=11.3 W/m ^{2}·K.



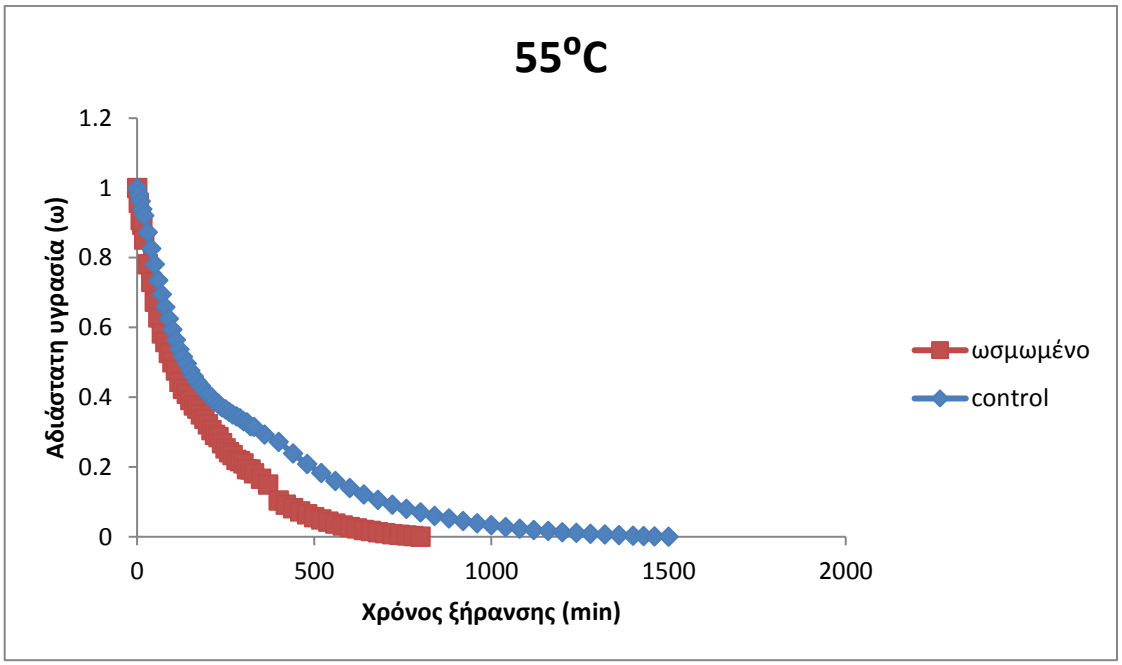
Σχήμα 5.26 Μεταβολή του λογαρίθμου της αδιάστατης θερμοκρασίας της πλάκας αλουμινίου με το χρόνο σε σταθερή θερμοκρασία ξηραντήρα 55°C.

6.2.3 Προσδιορισμός καμπυλών ξήρανσης και φαινόμενων συντελεστών διάχυσης

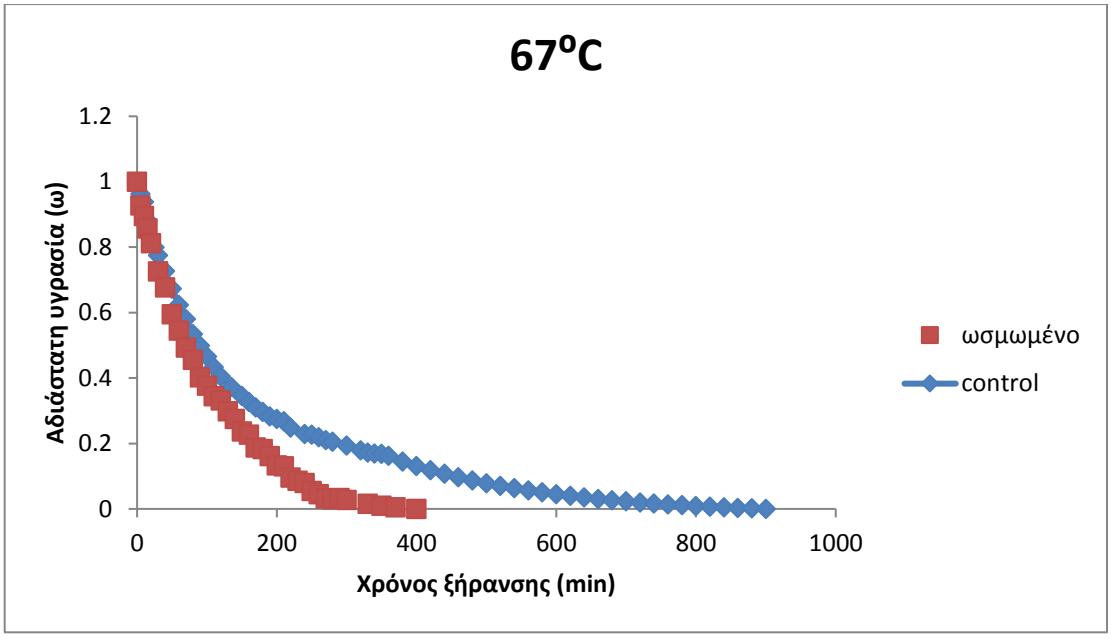
Στα Σχήματα 5.27 – 5.29 παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης για ωσμωτικά προκατεργασμένα και ανεπεξέργαστα δείγματα σε θερμοκρασίες ξήρανσης 40°C, 55°C και 67°C, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.27 Καμπύλες ξήρανσης στους 40°C για ανεπεξέργαστα και ωσμωτικά προκατεργασμένα δείγματα Φέτας

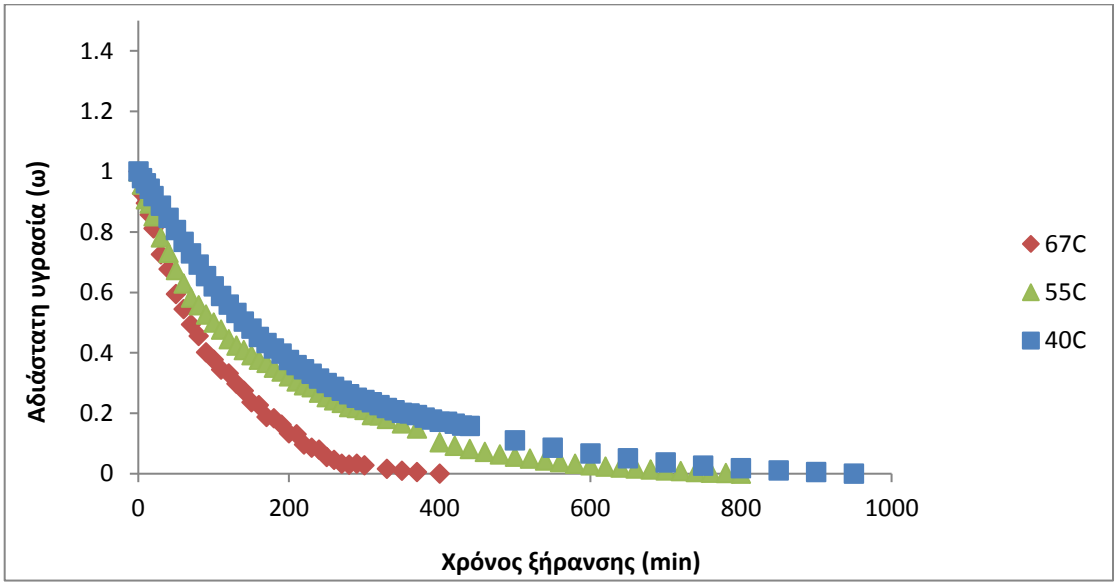


Σχήμα 5.28 Καμπύλες ξήρανσης στους 55°C για ανεπεξέργαστα και ωσμωτικά προκατεργασμένα δείγματα Φέτας.

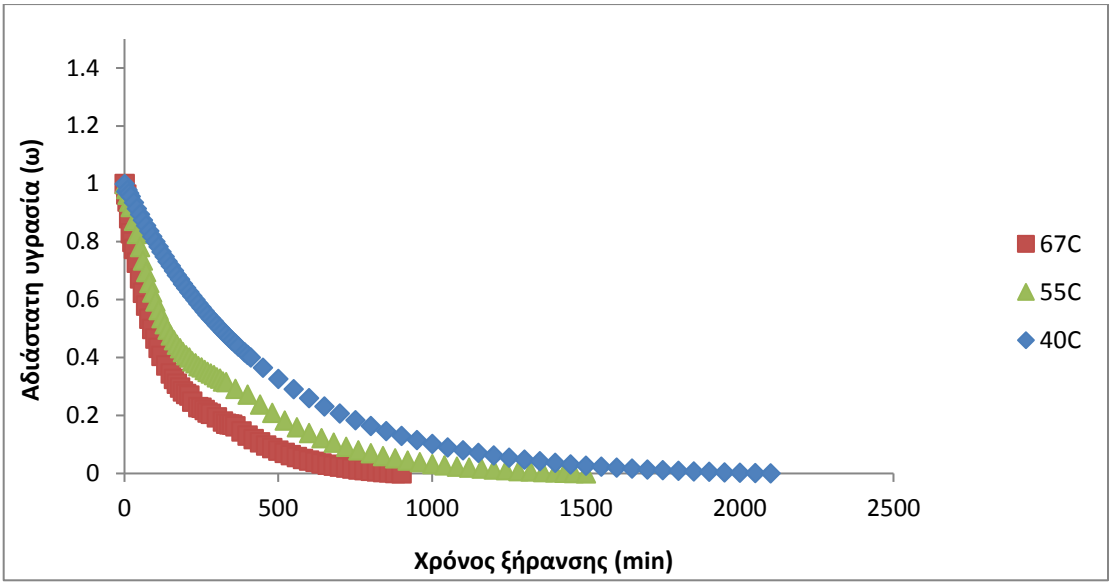


Σχήμα 5.29 Καμπύλες ξήρανσης στους 67°C για ανεπεξέργαστα και ωσμωτικά προκατεργασμένα δείγματα Φέτας.

Τα Σχήματα 5.30 και 5.31 αποτελούν συνολικά συγκριτικά διαγράμματατου ρυθμού ξήρανσης για τις 3 θερμοκρασίες ξήρανσης (40, 55 και 67° C) σε ωσμωτικά προκατεργασμένα (Σχήμα 5.30) και σε ανεπεξέργαστα δείγματα (Σχήμα 5.31).



Σχήμα 5.30 Καμπύλες ξήρανσης στους 40°C, 55°C και 67 °C για ωσμωτικά προκατεργασμένα δείγματα Φέτας.



Σχήμα 5.31 Καμπύλες ξήρανσης στους 40°C, 55°C και 67 °C για ανεπεξέργαστα δείγματα Φέτας.

Από τα παραπάνω Σχήματα παρατηρείται ότι σε όλες τις θερμοκρασίες ξήρανσης, τα ωσμωτικά προκατεργασμένα δείγματα παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερο ρυθμό ξήρανσης από τα ανεπεξέργαστα. Αυτό πιθανώς να οφείλεται σε σκλήρυνση του φλοιού της Φέτας (case hardening) κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, φαινόμενο που εμποδίζει τη διάχυση της περιεχόμενης υγρασίας, με αποτέλεσμα το μειωμένο ρυθμό ξήρανσης των ανεπεξέργαστων δειγμάτων (Achanta and Okos, 1996).

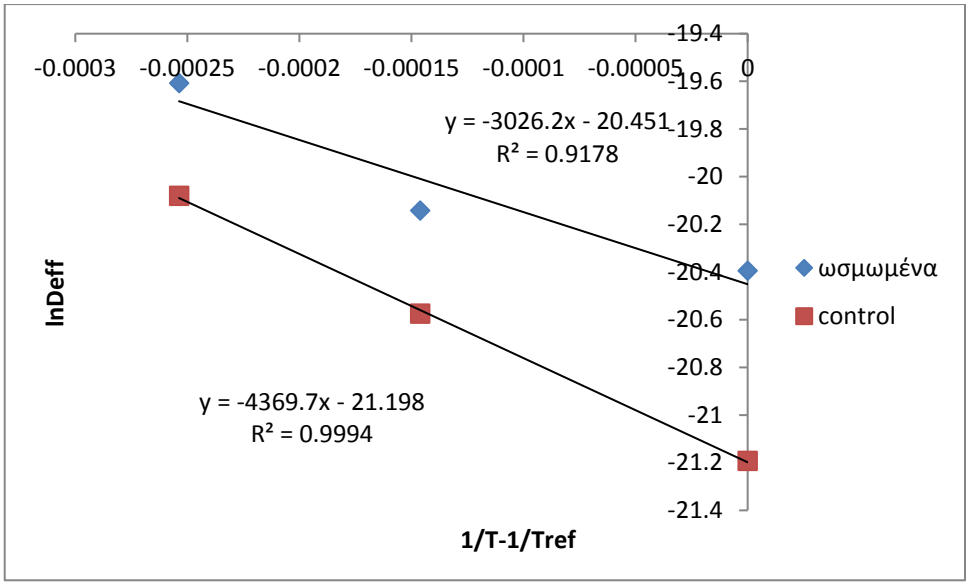
Παρατηρείται επιπλέον ότι η θερμοκρασία έχει σημαντική επίδραση στο ρυθμό ξήρανσης τόσο των οσμωτικά προκατεργασμένων όσο και των ανεπεξέργαστων δειγμάτων. Αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού ξήρανσης (Σχήματα 5.30, 5.31).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι φαινόμενοι συντελεστές διάχυσης D_{eff} υπολογισμένοι από το 2° νόμο του Fick καθώς και οι ενέργειες ενεργοποιήσης E_a υπολογισμένες από την εξίσωση Arrhenius (Εξίσωση 4.14) για τα ανεπεξέργαστα και ωσμωτικά επεξεργασμένα δείγματα Φέτας για όλες τις θερμοκρασίες ξήρανσης.

Πίνακας 5.7 Φαινόμενοι συντελεστές διάχυσης για τα ανεπεξέργαστα και τα ωσμωτικά επεξεργασμένα δείγματα Φέτας.

	D_{eff} (m^2s^{-1})		
	40°C	**55°C**	**67°C**
Ωσμωμένο Δείγμα	$1{,}39\cdot10^{-9}$	$1{,}79\cdot10^{-9}$	$3{,}05\cdot10^{-9}$
Control Δείγμα	$6{,}26\cdot10^{-10}$	$1{,}16\cdot10^{-9}$	$1{,}90\cdot10^{-9}$

Παρατηρείται ότι ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης D_{eff} της Φέτας είναι μεγαλύτερος στα ωσμωμένα δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα. Φαίνεται επίσης ότι παρουσιάζει σημαντική αύξηση με αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης.



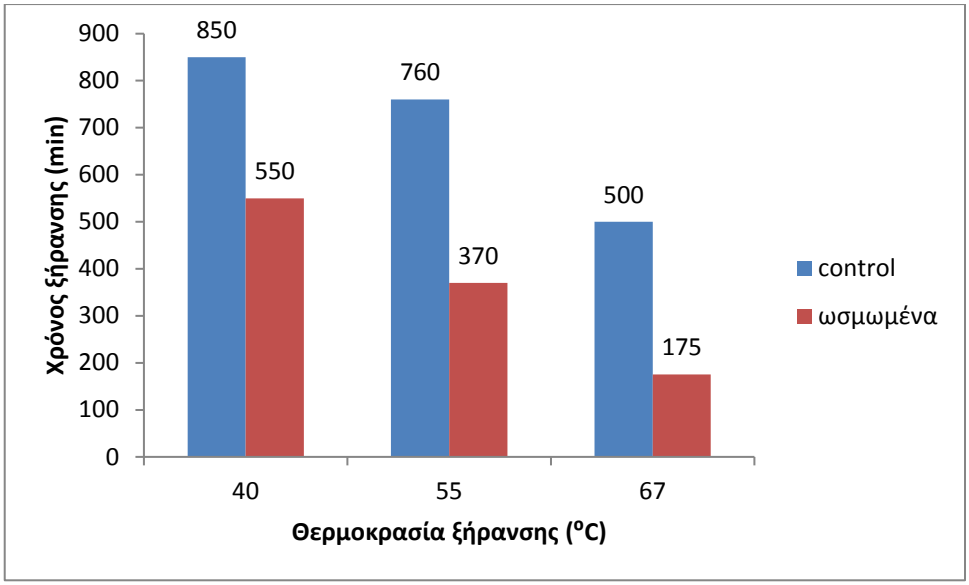
Σχήμα 5.32 Διάγραμμα Arrhenius για ανεπεξέργαστα και ωσμωτικά επεξεργασμένα δείγματα Φέτας.

Πίνακας 5.8 Ενέργεια ενεργοποίησης E_a του φαινόμενου συντελεστή διάχυσης D_{eff} και συντελεστής συσχέτισης για ανεπεξέργαστα και ωσμωτικά επεξεργασμένα δείγματα Φέτας.

	E_a (KJ/mol)	**R^2**
Ωσμωμένο Δείγμα	25,16	0,9178
Control Δείγμα	36,33	0,9994

Από τον Πίνακα 5.8 προκύπτει ότι η ενέργεια ενεργοποίησης του φαινόμενου συντελεστή διάχυσης, D_{eff}, είναι μεγαλύτερη για τα ανεπεξέργαστα δείγματα Φέτας απ' ότι για τα ωσμωμένα. Αυτό σημαίνει ότι η εξάρτηση της μεταβολής του φαινόμενου συντελεστή διάχυσης από τη θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη για τα ανεπεξέργαστα δείγματα απ'ότι για τα ωσμωμένα.

Στο Σχήμα 5.32 παρατίθεται ο χρόνος ξήρανσης για 5% εναπομένουσα υγρασία στα ανεπεξέργαστα και ωσμωτικά επεξεργασμένα δείγματα Φέτας.



Σχήμα 5.33 Χρόνοι ξήρανσης (5% εναπομένουσα υγρασία) για ανεπεξέργαστα και ωσμωτικά επεξεργασμένα δείγματα Φέτας.

Από το παραπάνω Σχήμα φαίνεται η μεγάλη επίδραση της ωσμωτικής προκατεργασίας στο χρόνο ξήρανσης των δειγμάτων. Συγκεκριμένα, στους 40°C η ωσμωτική επεξεργασία μειώνει το χρόνο ξήρανσης για 5% εναπομένουσα υγρασία κατά 35%, στους 55°C κατά 51% και στους 67°C κατά 65%. Επιπλέον, εμφανής είναι και η ελάττωση του χρόνου ξήρανσης για αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης, τόσο στα επεξεργασμένα όσο και στα ανεπεξέργαστα δείγματα.

Ως βέλτιστη θερμοκρασία ξήρανσης για το τελικό προϊόν επιλέχθηκαν οι 67°C, καθώς φάνηκε ότι για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος (ενεργότητα νερού 0,5-0,6) ο απαιτούμενος χρόνος ξήρανσης ήταν σημαντικά μικρότερος συγκριτικά με το χρόνο ξήρανσης που απαιτούνταν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό θα καθιστούσε τη διεργασία οικονομικά ασύμφορη αλλά και πολύ χρονοβόρα για χρήση της σε βιομηχανική κλίμακα.

5.3 Τρίτη Θεματική Ενότητα: Μελέτη διατηρησιμότητας των δειγμάτων Φέτας

5.3.1 Σκοπός

Σκοπός της Τρίτης Θεματικής Ενότητας υπήρξε η αποθήκευση των τελικών δειγμάτων Φέτας (ωσμωτικά προκατεργασμένων και ξηραμένων στις βέλτιστες συνθήκες) σε διαφορετικές θερμοκρασίες και η μελέτη της διατηρησιμότητάς τους μέσω προσδιορισμού κατάλληλων μικροβιακών και ποιοτικών δεικτών.

5.3.2 Μέτρηση μικροβιακού φορτίου

Ο μικροβιολογικός έλεγχος που πραγματοποιήθηκε αφορούσε στην ύπαρξη ζυμών και μυκήτων στο τυρί καθώς και ολικής μικροβιακής χλωρίδας. Τα αποτελέσματα των μικροβιολογικών αναλύσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.9 Μικροβιακό φορτίο τυριού για διάφορους χρόνους αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.

Χρόνος αποθήκευ-σης (days)	15°C		25°C		35°C		40°C	
	Ζύμες-Μύκητες (logCFU/g)	ΟΜΧ (logCFU/g)	Ζύμες-Μύκητες (logCFU/g)	ΟΜΧ (logCFU/g)	Ζύμες-Μύκητες (logCFU/g)	ΟΜΧ (logCFU/g)	Ζύμες-Μύκητες (logCFU/g)	ΟΜΧ (logCFU/g)
0	Μ.Α.	2,6±0,18	Μ.Α.	2,6±0,13	Μ.Α.	2,6±0,15	Μ.Α.	2,6±0,17
3	Μ.Α.	2,18±0,2	Μ.Α.	2,48±0,18	Μ.Α.	2,6±0,17	Μ.Α.	2,6±0,21
7	Μ.Α.	2,6±0,14	Μ.Α.	2,54±0,13	Μ.Α.	2,18±0,23	Μ.Α.	2,6±0,2
11	Μ.Α.	2,54±0,23	Μ.Α.	2,6±0,15	Μ.Α.	2,48±	Μ.Α.	2,18±0,19
14	Μ.Α.	2,48±0,17	Μ.Α.	2,48±0,19	Μ.Α.	2,6±0,11	Μ.Α.	2±0,16
17	Μ.Α.	2,65±0,15	Μ.Α.	2,18±0,23	Μ.Α.	2±0,19	Μ.Α.	2,4±0,19
21	Μ.Α.	2,4±0,22	Μ.Α.	2,18±0,24	Μ.Α.	2,48±0,16	Μ.Α.	2,18±0,2
28	Μ.Α.	2,48±0,23	Μ.Α.	2,54±0,14	Μ.Α.	2,4±0,18	Μ.Α.	2,48±0,16
53	Μ.Α.	2,18±0,18	Μ.Α.	2,4±0,23	Μ.Α.	2,6±0,17	Μ.Α.	2,4±0,2
86	Μ.Α.	2,6±0,23	Μ.Α.	2,54±0,21	Μ.Α.	2,65±0,19	Μ.Α.	2,48±0,15
137	Μ.Α.	2,48±0,24	Μ.Α.	2,6±0,15	Μ.Α.	2,54±0,22	Μ.Α.	2,6±0,19
177	Μ.Α.	2,78±0,12	Μ.Α.	2,65±0,2	Μ.Α.	2,88±0,21	Μ.Α.	3,11±0,16

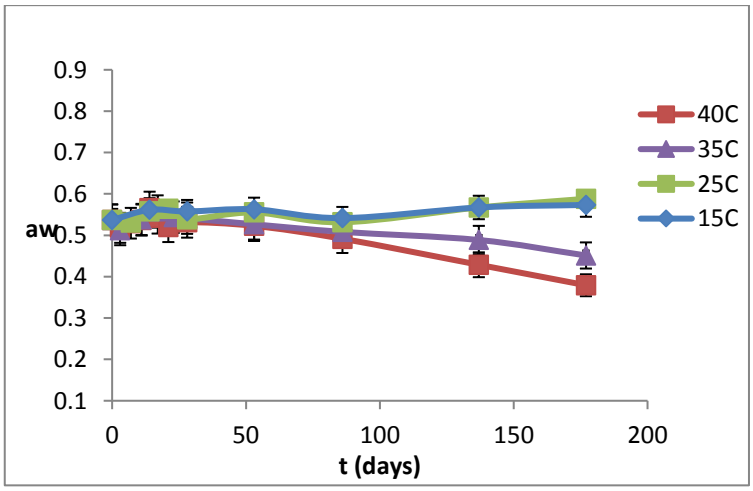
Όπου ΟΜΧ= Ολική Μικροβιακή Χλωρίδα, Μ.Α= Μη Ανιχνεύσιμο

Από τον πίνακα 5.9 παρατηρείται ότι μέχρι και το χρόνο αποθήκευσης των 6 μηνών, στο τυρί δεν ανιχνεύτηκαν καθόλου ζύμες και μύκητες, ενώ η Ολική Μικροβιακή Χλωρίδα δεν παρουσίασε αισθητή μεταβολή. Με μικροβιολογικό έλεγχο που ακολούθησε σε υπόστρωμα MRS, οι μικροοργανισμοί αυτοί ταυτοποιήθηκαν ότι ανήκουν σε γαλακτικά βακτήρια.

Συμπερασματικά, το προϊόν μετά από 6 μήνες αποθήκευσης φάνηκε ότι είναι μικροβιολογικά σταθερό ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας αποθήκευσης. Συνεπώς το μικροβιακό φορτίο δεν αποτέλεσε παράγοντα ποιοτικής υποβάθμισης του προϊόντος.

5.3.3 Μέτρηση ενεργότητας νερού

Στο Σχήμα 5.34 παρουσιάζεται η μεταβολή της ενεργότητας νερού του αποθηκευμένου προϊόντος σε συνάρτηση με το χρόνο αποθήκευσης, για θερμοκρασίες αποθήκευσης 15, 25, 35 και 45°C.

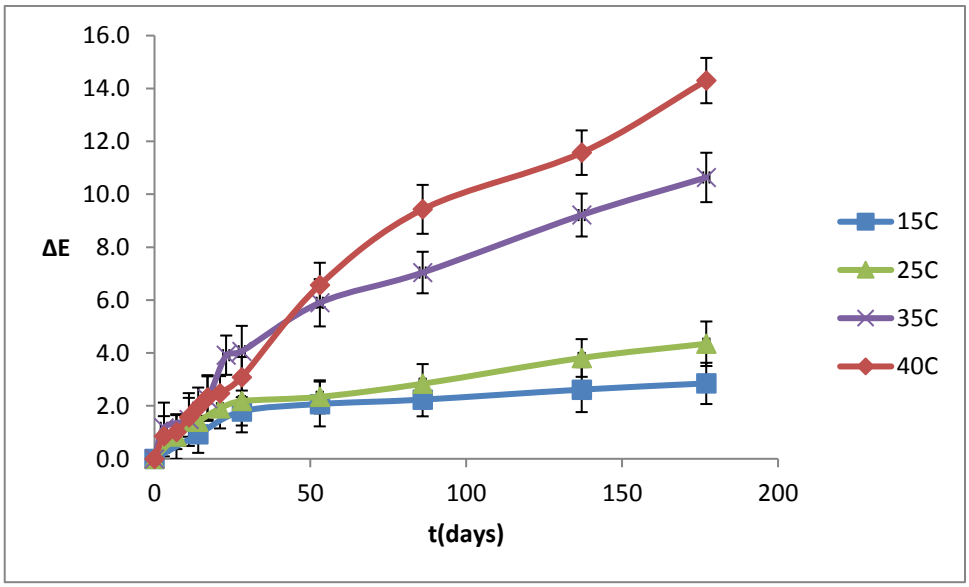


Σχήμα 5.34 Ενεργότητα νερού(a_w) του τυριού συναρτήσει του χρόνου αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.

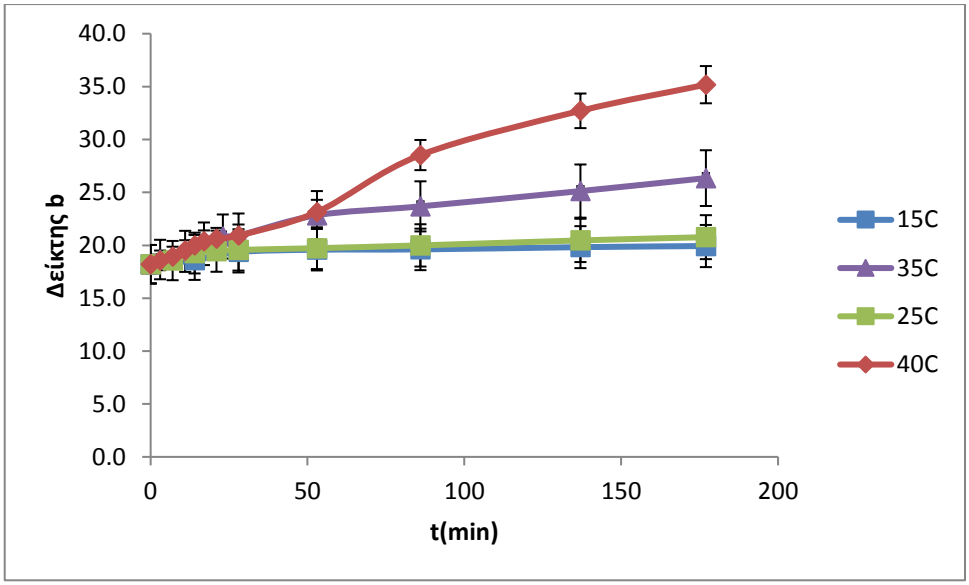
Η ενεργότητα νερού φάνηκε να διατηρείται σταθερή με το χρόνο στις χαμηλές θερμοκρασίες (15, 25°C) (Σχήμα 5.34). Αυτό σημαίνει ότι στις θερμοκρασίες αυτές το προϊόν δεν αφυδατώνεται περαιτέρω κατά την αποθήκευσή του, κάτι το οποίο είναι επιθυμητό. Στις 2 υψηλότερες θερμοκρασίες (35, 40°C), η ενεργότητα νερού αρχίζει να παρουσιάζει μια πτωτική τάση από τον 3^{ο} περίπου μήνα αποθήκευσης. Η πτώση αυτή είναι μη αναμενόμενη, καθώς θεωρήθηκε ότι η αποθήκευση του προϊόντος σε γυάλινα βαζάκια θα εμπόδιζε την περαιτέρω αφυδάτωσή του με αποτέλεσμα τη διατήρηση της ενεργότητας νερού του προϊόντος σε σταθερά επίπεδα. Κάτι τέτοιο όμως δεν επιτεύχθηκε, καθώς φάνηκε, στις υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό πιθανώς να οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο άνοιγμα του περιέκτη για λήψη δείγματος (οι μετρήσεις στις υψηλές θερμοκρασίες πραγματοποιούνταν τακτικότερα από ότι στις χαμηλότερες), καθώς και στο γεγονός ότι προς το τέλος των μετρήσεων, είχε μείνει στους περιέκτες μικρή ποσότητα δείγματος, κάτι που πιθανώς να ευνόησε την αφυδάτωσή του.

5.3.4 Υπολογισμός μεταβολής χρώματος

Η μεταβολή του χρώματος των δειγμάτων υπολογίστηκε μέσω της Εξίσωσης (4.3) για θερμοκρασίες αποθήκευσης 15, 25, 35 και 45°C. Στα Σχήματα 5.35, 5.36 παρουσιάζεται η συνολική μεταβολή του χρώματος του τυριού κατά την αποθήκευσή του στις θερμοκρασίες αυτές καθώς και ο δείκτης b, που εκφράζει το «κιτρίνισμα» του τυριού, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.35 Μεταβολή χρώματος του τυριού συναρτήσει του χρόνου αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.

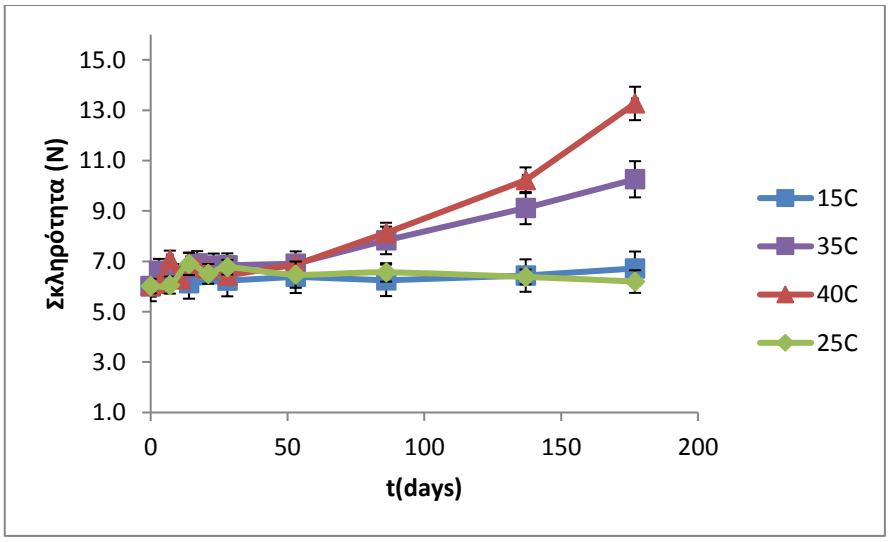


Σχήμα 5.36 Δείκτης b του χρώματος του τυριού συναρτήσει του χρόνου αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.

Από τα Σχήματα 5.35, 5.36 γίνεται αντιληπτό ότι κατά την αποθήκευσή του το τυρί υφίσταται μία μεταβολή στο χρώμα του, η οποία έχει να κάνει κυρίως με το κιτρίνισμά του. Παρατηρείται ότι όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία αποθήκευσης, τόσο πιο έντονη είναι και η μεταβολή χρώματος που παρουσιάζει. Η μεταβολή του χρώματος του τυριού ήταν σε ένα βαθμό αναμενόμενη λόγω της περιεκτικότητάς του σε λιπαρά, που ευνοούν την οξείδωσή του. Μη σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν ως προς τη μεταβολή χρώματος και της παραμέτρου b μεταξύ των δειγμάτων που αποθηκεύτηκαν στους 35 και 40°C ($p>0.05$).

5.3.5 Μέτρηση σκληρότητας

Με τη χρήση του αναλυτή υφής υπολογίστηκε η σκληρότητα των δειγμάτων Φέτας στον εκάστοτε χρόνο και θερμοκρασία αποθήκευσης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.37.

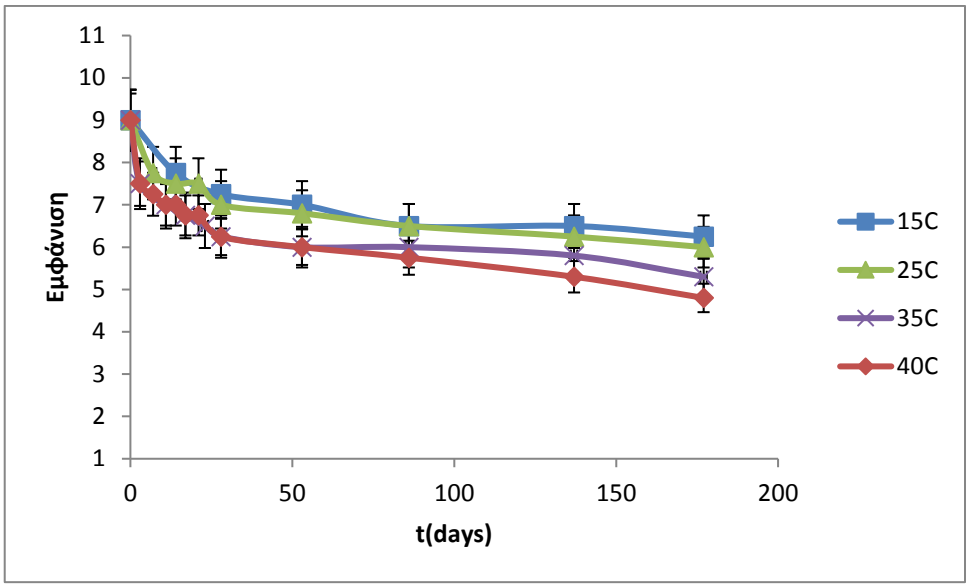


Σχήμα 5.37 Σκληρότητα του τυριού συναρτήσει του χρόνου αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.

Από το Σχήμα 5.37 προκύπτει ότι η σκληρότητα του τυριού δεν παρουσίασε μεταβολή κατά την αποθήκευσή του σε θερμοκρασίες 15-25°C, ενώ στις υψηλές θερμοκρασίες (35-40°C) παρατηρείται αύξηση της σκληρότητάς του από το δεύτερο περίπου μήνα αποθήκευσης. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται να συμβαδίζουν με αυτά της ενεργότητας νερού, κάτι το οποίο είναι επιθυμητό. Όσο μειώνεται η ενεργότητα νερού του αποθηκευμένου τροφίμου, αυξάνεται η σκληρότητά του λόγω της περαιτέρω αφυδάτωσής του και της απώλειας μέρους του μη δεσμευμένου νερού που περιέχει.

5.3.6 Οργανοληπτική Αξιολόγηση

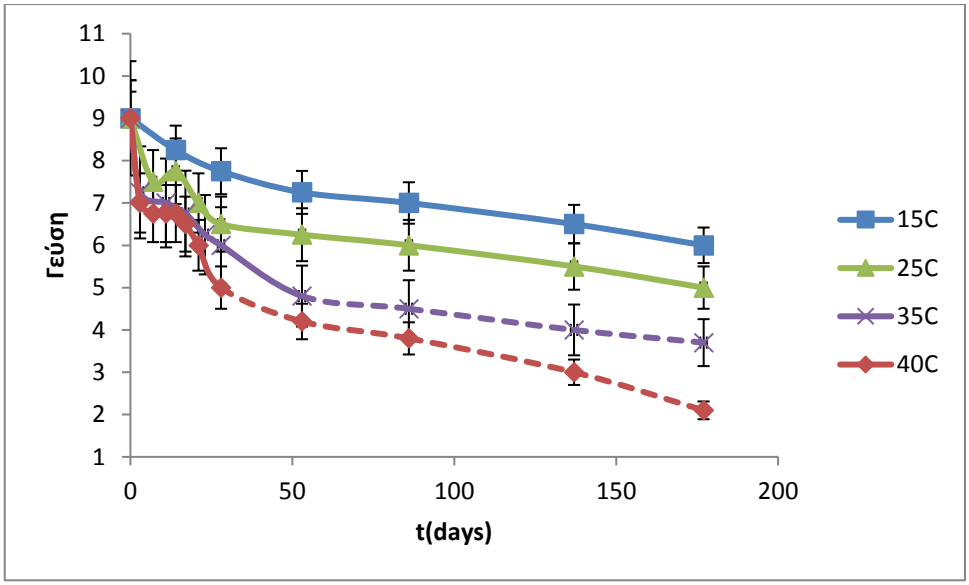
Στα Σχήματα 5.38 – 5.42 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της οργανοληπτικής αξιολόγησης του τυριού. Στο Σχήμα 5.38 παρουσιάζονται οι βαθμολογίες της εμφάνισης του τυριού ως προς την αρέσκεια, για θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.



Σχήμα 5.38 Βαθμολογία της εμφάνισης του τυριού, ως προς την αρέσκεια, συναρτήσει του χρόνου αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.

Από το Σχήμα 5.38, παρατηρείται μείωση της βαθμολογίας ως προς την εμφάνιση του τυριού με το χρόνο αποθήκευσης. Επιπλέον, με αύξηση της θερμοκρασίας αποθήκευσης παρατηρείται μείωση της αρέσκειας ως προς την εμφάνιση η οποία θα μπορούσε να αποδοθεί στο κιτρίνισμα που υφίσταται το τυρί κατά την αποθήκευσή του, καθώς βρέθηκε και από τη μέτρηση του αντικειμενικού του χρώματος παραπάνω (Σχήμα 5.35). Ανάμεσα στις θερμοκρασίες 35 και 40°C δεν εντοπίζονται στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p>0.05$) (Παράρτημα ΙΙ).

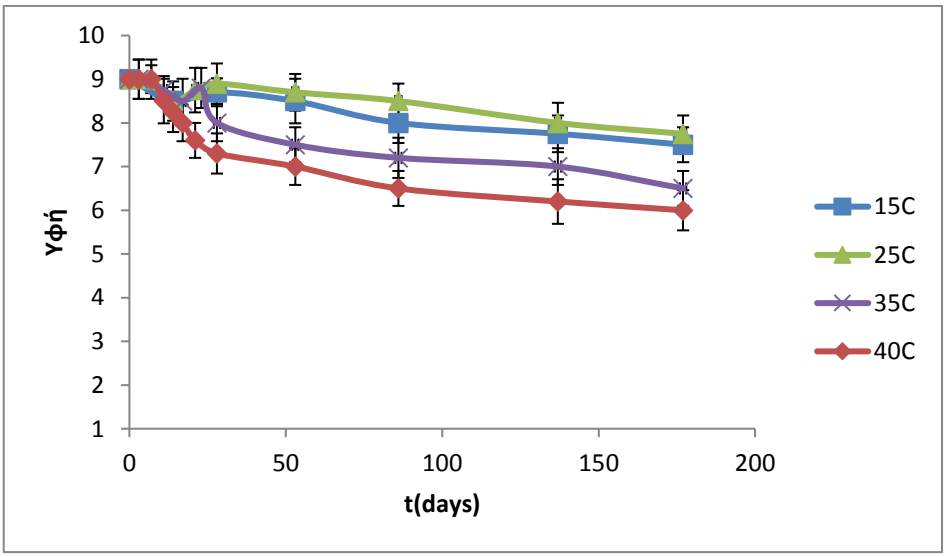
Στο Σχήμα 5.39 παρουσιάζονται οι βαθμολογίες της γεύσης του τυριού ως προς την αρέσκεια, για θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.



Σχήμα 5.39 Βαθμολογία για τη γεύση του τυριού, ως προς την αρέσκεια, συναρτήσει του χρόνου αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.

Από το Σχήμα 5.39 φαίνεται η υποβάθμιση της γεύσης του τυριού με το χρόνο αποθήκευσης. Η μείωση της αρέσκειας ως προς τη γεύση πιθανώς να οφείλεται σε οξειδωτικό ταγγισμό του τυριού κατά την αποθήκευση, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε λιπαρά. Στις θερμοκρασίες 35 και 40°C τα δείγματα φάνηκαν να παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p<0.05$)(Παράρτημα ΙΙ). Ως όριο για τον καθορισμό του χρόνου ζωής του προϊόντος ορίστηκε η βαθμολογία 5. Φαίνεται επομένως ότι στις υψηλές θερμοκρασίες (35-40°C) το προϊόν κρίνεται μη αποδεκτό μετά από ορισμένο χρόνο αποθήκευσης.

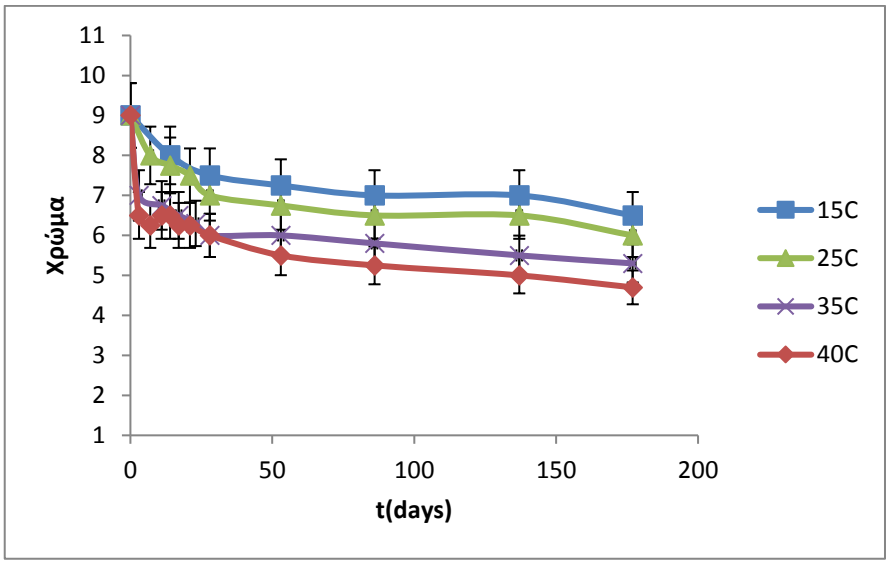
Στο Σχήμα 5.40 παρουσιάζονται οι βαθμολογίες της υφής του τυριού ως προς την αρέσκεια, για θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.



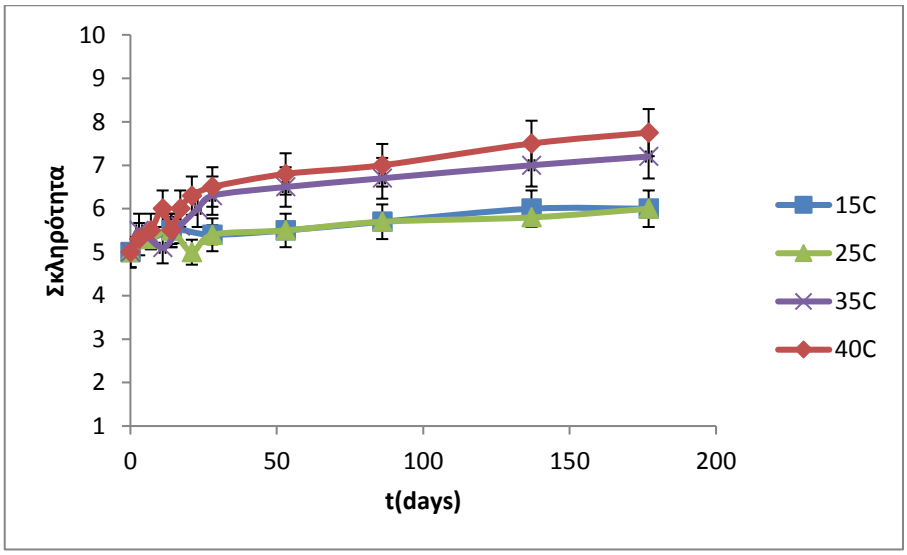
Σχήμα 5.40 Βαθμολογία για την υφή του τυριού, ως προς την αρέσκεια, συναρτήσει του χρόνου αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.

Από το Σχήμα 5.40 παρατηρείται ότι η οργανοληπτική υφή του τυριού παρουσιάζει μία πτωτική τάση με το χρόνο και τη θερμοκρασία αποθήκευσης, η οποία είναι ανάλογη της πορείας της αντικειμενικής σκληρότητας του τυριού (Σχήμα 5.36). Αυτό σημαίνει ότι οι δοκιμαστές κατάφεραν να εντοπίσουν την αύξηση της σκληρότητας του προϊόντος με το χρόνο αλλά και τη θερμοκρασία αποθήκευσης. Στις θερμοκρασίες 35 και 40°C, καθώς και 15-25°C, τα δείγματα παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p<0,05$).

Στα Σχήματα 5.41- 5.42 παρουσιάζονται οι βαθμολογίες του χρώματος και της σκληρότητας του τυριού ως προς την ένταση, για θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.



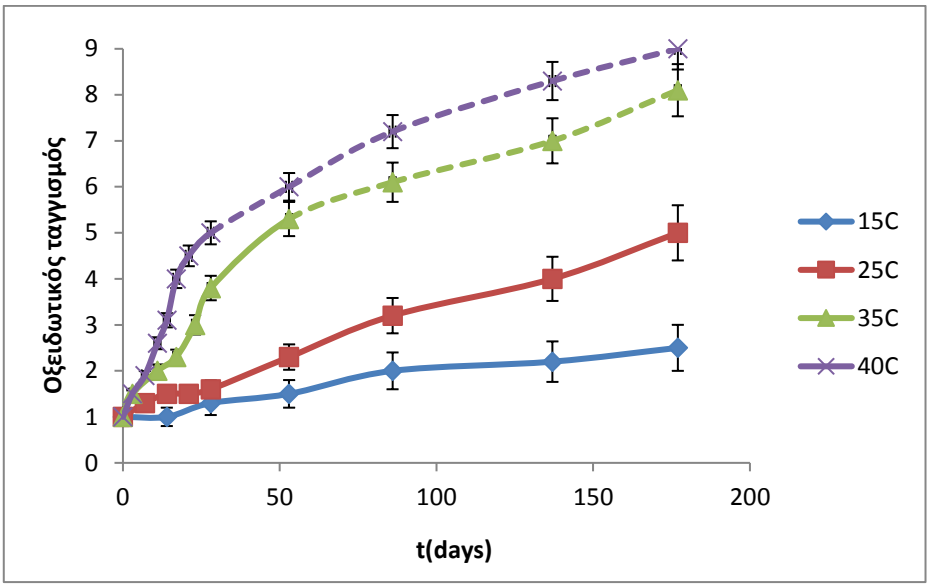
Σχήμα 5.41 Βαθμολογία για το χρώμα του τυριού, ως προς την ένταση, συναρτήσει του χρόνου αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.



Σχήμα 5.42 Βαθμολογία για τη σκληρότητα του τυριού, ως προς την ένταση, συναρτήσει του χρόνου αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.

Οι δοκιμαστές φάνηκε να εντοπίζουν μεταβολή ως προς το χρώμα των αποθηκευμένων δειγμάτων σε θερμοκρασίες 15-40°C, με το χρόνο αποθήκευσης (Σχήμα 5.41) καθώς και ως προς τη σκληρότητα του τυριού κατά την αποθήκευση σε διάφορους χρόνους και θερμοκρασίες (Σχήμα 5.42). Οι μεταβολές ως προς τη σκληρότητα εντοπίστηκαν κυρίως στις δύο υψηλές θερμοκρασίες (35-40°C), όπου και εντοπίστηκαν από τους δοκιμαστές στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο αυτών θερμοκρασιών ($p<0,05$).

Τέλος, στο σχήμα 5.43 παρουσιάζεται ο ταγγισμός του τυριού ως προς την ένταση, που εντόπισαν οι δοκιμαστές για τους διάφορους χρόνους και θερμοκρασίες αποθήκευσης.



Σχήμα 5.43 Βαθμολογία για τον οξειδωτικό ταγγισμό του τυριού, ως προς την ένταση, συναρτήσει του χρόνου αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40°C.

Από το σχήμα 5.43 παρατηρείται ότι οι δοκιμαστές αντιλαμβάνονται σε μεγάλο βαθμό την αύξηση του ταγγισμού του τυριού τόσο με το χρόνο όσο και με τη θερμοκρασία. Φαίνεται ότι ιδιαίτερα στις δύο υψηλές θερμοκρασίες (35-40°C) ο οξειδωτικός ταγγισμός του τυριού είναι έντονος, παρουσιάζοντας μεγάλη αύξηση από τις πρώτες κιόλας μέρες της αποθήκευσής του. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα του τυριού σε λιπαρά, τα οποία οξειδώνονται, ιδιάιτερα σε υψηλές θερμοκρασίες. Μεταξύ των θερμοκρασιών βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p<0,05$). Τα αποτελέσματα αυτά του οξειδωτικού ταγγισμού συμβαδίζουν με αυτά της γεύσης του τυριού για τις 4 θερμοκρασίες αποθήκευσης (Σχήμα 5.39).

Εφόσον το τυρί, μέχρι και τους 6 μήνες αποθήκευσης, δεν παρουσίασε κάποια μικροβιολογική ανάπτυξη, κύριος παράγοντας ποιοτικής υποβάθμισης του προϊόντος για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής του κρίθηκε ο οξειδωτικός ταγγισμός βάσει της οργανοληπτικής αξιολόγησης, ο οποίος όπως φάνηκε από το σχήμα 5.42 είναι έντονος ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες. Ως όριο για τον καθορισμό του χρόνου ζωής του ορίστηκε η βαθμολογία 5. Βάσει των παραπάνω, στον Πίνακα 5.10, παρουσιάζεται η διάρκεια ζωής του τυριού για τις διάφορες θερμοκρασίες αποθήκευσης.

Πίνακας 5.9 Διάρκεια ζωής τυριού για θερμοκρασίες αποθήκευσης 15, 25, 35 και 40°C.

Θερμοκρασία αποθήκευσης (°C)	Χρόνος ζωής (μήνες)
15	>6
25	**6**
35	1,5
40	1

Από τον παραπάνω πίνακα είναι εμφανές ότι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος το συγκεκριμένο προϊόν μπορεί να διατηρηθεί έως και 6 μήνες.

Από τη Στατιστική Επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε στα δείγματα (Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών), δεν φάνηκε να προκύπτει κάποιο αξιόπιστο συμπέρασμα για τη συσχέτιση των αντικειμενικών και οργανοληπτικών παραμέτρων.

5.4 Υπολογισμός κόστους προϊόντος

Στα πλαίσια του διαγωνισμού Ecotrophelia 2016, όπου και συμμετείχε το συγκεκριμένο προϊόν, έγινε υπολογισμός του κόστους παραγωγής του. Το κόστος υπολογίστηκε για περιέκτη 75g επεξεργασμένης Φέτας(ωσμωμένης και ξηραμένης στις βέλτιστες συνθήκες), που αντιστοιχούν περίπου σε 150g νωπής(ανεπεξέργαστης) Φέτας. Το κόστος της φρέσκιας Φέτας ήταν 6€/ Kg , επομένως το κόστος/ συσκευασία ανήλθε στα 0,9€.

Το κόστος των πρώτων υλών για την παρασκευή του ωσμωτικού διαλύματος παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 5.10).

Πίνακας 5.10 Διάρκεια Κόστος πρώτων υλών για την παρασκευή του ωσμωτικού διαλύματος

Πρώτη Ύλη	Κόστος (€/ συσκευασία)
Γλυκερόλη	0,117
Μαλτοδεξτρίνη	0,317
Ξύδι	0,010
Αλάτι	0,012
$CaCl_2$	0,058
H_2O	0,001

Στο συνολικό κόστος του προϊόντος συνυπολογίστηκαν το κόστος συσκευασίας (υλικό συσκευασίας, γραφικά, ετικέτες), το οποίο ήταν 0,05 €/ συσκευασία , το κόστος επεξεργασίας που περιλαμβάνει τον εξοπλισμό, τη συντήρηση των μηχανημάτων κ.α. και εκτιμήθηκε 0,2 €/ συσκευασία, καθώς και τα γενικά έξοδα τα οποία ανήλθαν στα 0,15 €/ συσκευασία .

Συνυπολογίζοντας λοιπόν όλα τα παραπάνω επιμέρους κόστη, το τελικό κόστος του προϊόντος ανέρχεται σε **1,815 €/ συσκευασία** .

6. Συμπεράσματα- Προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν πειράματα με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της ωσμωτικής αφυδάτωσης ως προκατεργασία της συμβατικής ξήρανσης με αέρα σε προϊόντα τυριού Φέτας, για την παραγωγή ενός καινοτόμου προϊόντος αφυδατωμένου λευκού τυριού, με βέλτιστη οργανοληπτική ποιότητα και μακρά διατηρησιμότητα. Πιο αναλυτικά:

Κατά την **Πρώτη Θεματική Ενότητα** πραγματοποιήθηκε μελέτη της διεργασίας της ωσμωτικής αφυδάτωσης σε ανεπεξέργαστα δείγματα Φέτας σε διαφορετικές συνθήκες επεξεργασίας (συγκέντρωση ωσμωτικού διαλύματος 55 και 65% γλυκερόλη, θερμοκρασία πραγματοποίησης πειράματος 5, 15, 25 και 35˚C, αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο 1:3, 1:4 και 1:5 και χρόνος ωσμωτικής προκατεργασίας από 5 έως 90 min). Μέσω του μοντέλου μεταφοράς μάζας κατά το 2^{ο} νόμο του Fick υπολογίστηκαν οι συντελεστές διάχυσης για την απώλεια νερού και την πρόσληψη στερεών από τα δείγματα Φέτας. Από τα αποτελέσματα που ελήφθησαν, εξήχθη το συμπέρασμα ότι όλοι οι ανωτέρω παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά την πορεία της ώσμωσης. Τόσο με αύξηση του χρόνου ώσμωσης όσο και της συγκέντρωσης γλυκερόλης, της θερμοκρασίας και της αναλογίας ωσμωτικού μέσου προς τρόφιμο, παρατηρήθηκε αύξηση του συντελεστή διάχυσης απώλειας νερού και πρόσληψης στερεών. Επιπλέον, η ενέργεια ενεργοποίησης (E_a) τόσο για την απώλεια νερού όσο και για την πρόσληψη στερεών αυξήθηκε με αύξηση της συγκέντρωσης γλυκερόλης καθώς και της αναλογίας ωσμωτικού μέσου προς τυρί. Αυτό σημαίνει ότι αυξάνεται η εξάρτηση του συντελεστή διάχυσης από τη θερμοκρασία. Πέρα από τους συντελεστές διάχυσης, σημαντική εξάρτηση από τους παραπάνω παράγοντες παρουσιάσε και η μείωση της ενεργότητας νερού του τροφίμου. Τα ποιοτικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος και συγκεκριμένα το χρώμα, η σκληρότητα καθώς και η συνολική οργανοληπτική αρέσκεια, φάνηκε να εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, το χρόνο ώσμωσης, τη συγκέντρωση γλυκερόλης και την αναλογία τροφίμου-ωσμωτικού μέσου, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη εξάρτηση από το χρόνο ξήρανσης και τη θερμοκρασία.

Ως βέλτιστες συνθήκες επεξεργασίας, λαμβάνοντας υπόψιν την ενεργότητα του τελικού τροφίμου, τα ποιοτικά και οργανοληπτικά του χαρακτηριστικά καθώς και το κόστος της διεργασίας, επιλέχθηκαν η θερμοκρασία των 15˚C, αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο 1:4, συγκέντρωση γλυκερόλης 65% και χρόνος ωσμωτικής επεξεργασίας 30 min. Για τις δεδομένες συνθήκες επεξεργασίας, η απώλεια νερού (WL) από τα δείγματα Φέτας που επιτεύχθηκε ήταν 0,28 g H_2O/ g ξηρής βάσης και η πρόσληψη στερεών (SG) ήταν 0,1035 g στερεών/ g ξηρής βάσης, ενώ η αρχική υγρασία του τυριού ήταν 1,06 g H_2O/ g ξηρής βάσης. Επομένως, μετά από χρόνο ώσμωσης 30 min στις δεδομένες συνθήκες, το τυρί βρέθηκε ότι έχει 40% υγρασία και ενεργότητα νερού (a_w) ίση με 0,88. Να σημειωθεί ότι η ενεργότητα νερού του ανεπεξέργαστου τυριού ήταν 0,93.

Με χρήση του συνόλου των αποτελεσμάτων κατασκευάστηκε ένα συνδυαστικό μαθηματικό μοντέλο το οποίο συσχετίζει τους συντελεστές διάχυσης D_{ew}, D_{es}, με τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση και την αναλογία του ωσμωτικού μέσου προς τρόφιμο. Με χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου (Εξίσωση 5.8) προσδιορίστηκαν οι συντελεστές διάχυσης D_{ew} και $D_{es,}$ σε όλες τις συνθήκες ώσμωσης του τυριού.

$$D = (a_1 \cdot G + b_1) \cdot exp\left[\left(-\frac{(a_2 \cdot (G - G_{ref}) + b_2)}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right) + \left((a_3 \cdot (G - G_{ref}) + b_3)exp\left(-\frac{(a_4 \cdot (G - G_{ref}) + b_4)}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)\right)\right) \cdot (C - C_{ref})\right]$$ (Εξίσωση 5.8)

Κατά τη **Δεύτερη Θεματική Ενότητα** μελετήθηκε η επίδραση της ξήρανσης με αέρα σε ωσμωτικά προκατεργασμένη Φέτα στις βέλτιστες συνθήκες επεξεργασίας που προσδιορίστηκαν (θερμοκρασία 15˚C, συγκέντρωση γλυκερόλης 65%, αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό μέσο 1:4 και χρόνος ωσμωτικής επεξεργασίας 30 min). Παράλληλα μελετήθηκαν και δείγματα Φέτας τα οποία δεν είχαν υποστεί κανενός είδους επεξεργασία (control). Ο συντελεστής συναγωγής του ξηραντήρα υπολογίστηκε ίσος με h=11,3 $W/m^2 \cdot K$.

Από τις καμπύλες ξήρανσης των ωσμωτικά προκατεργασμένων και των ανεπεξέργαστων δειγμάτων, προσδιορίστηκε η επίδραση της ωσμωτικής επεξεργασίας καθώς και της θερμοκρασίας, στο χρόνο ξήρανσης. Αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης έχει ως αποτέλεσμα αυξημένο ρυθμό ξήρανσης των δειγμάτων. Εμφανής ήταν επίσης η μείωση του χρόνου ξήρανσης των ωσμωτικά επεξεργασμένων συγκριτικά με τα ανεπεξέργαστα δείγματα, για την εκάστοτε θερμοκρασία. Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώθηκαν και από τον υπολογισμό του φαινόμενου συντελεστή διάχυσης για τις 3 θερμοκρασίες ξήρανσης σε ωσμωμένα και ανεπεξέργαστα δείγματα. Ο υπολογισμός του έγινε μέσω του 2ου νόμου του Fick για τη μεταφορά μάζας. Συγκεκριμένα, στους 67˚C ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης για τα ωσμωμένα δείγματα υπολογίστηκε ίσος με $3{,}05 \cdot 10^{-9}$ ενώ για τα ανεπεξέργαστα δείγματα $1{,}9 \cdot 10^{-9}$.

Επιπρόσθετα υπολογίστηκε ο χρόνος ξήρανσης για 5% εναπομένουσα υγρασία σε ωσμωτικά προκατεργασμένα και ανεπεξέργαστα δείγματα Φέτας. Εμφανής ήταν η μεγάλη επίδραση της ωσμωτικής προκατεργασίας στο χρόνο ξήρανσης των δειγμάτων. Συγκεκριμένα, στους 40°C η ωσμωτική επεξεργασία οδήγησε σε μείωση του χρόνου ξήρανσης για 5% εναπομένουσα υγρασία κατά 35%, στους 55°C κατά 51% και στους 67°C κατά 65%. Επιπλέον, παρατηρήθηκε μείωση του χρόνου ξήρανσης με αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης, τόσο στα επεξεργασμένα όσο και στα ανεπεξέργαστα δείγματα.

Ως βέλτιστη θερμοκρασία ξήρανσης για το τελικό προϊόν επιλέχθηκαν οι 67°C, καθώς φάνηκε ότι για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος (ενεργότητα νερού 0,5-0,6) ο χρόνος ξήρανσης που απαιτούνταν σε μικρότερες θερμοκρασίες ήταν σημαντικά μεγαλύτερος. Αυτό θα καταστούσε τη διεργασία οικονομικά ασύμφορη αλλά και πολύ χρονοβόρα για χρήση της σε βιομηχανική κλίμακα. Ο χρόνος ξήρανσης που εφαρμόστηκε ήταν 4 ώρες, ώστε το τυρί να φτάσει σε τελική ενεργότητα νερού < 0,6 , όπου και μπορεί να θεωρείται μικροβιολογικά ασφαλές.

Κατά την **Τρίτη Θεματική Ενότητα** μελετήθηκε η διατηρησιμότητα των τελικών αφυδατωμένων προϊόντων λευκού τυριού τύπου Φέτας (ωσμωτικά προκατεργασμένων και ξηραμένων στις βέλτιστες συνθήκες που επιλέχθηκαν για την εκάστοτε διεργασία), μετά από τοποθέτησή τους σε γυάλινα βάζα και αποθήκευση σε θερμοκρασίες 15, 25, 35 και 40˚C.

Για χρόνο αποθήκευσης 6 περίπου μηνών, το προϊόν φάνηκε μικροβιολογικά σταθερό εφ' όσον δεν ανιχνεύθηκε η ύπαρξη ζυμομυκήτων, ενώ το φορτίο των γαλακτικών βακτηρίων παρέμεινε σταθερό σε τιμή ~2.6 logcfu/g σε όλες τις θερμοκρασίες, πλην των 40°C όπου το φορτίο τους ξεπέρασε ελαφρά την τιμή 3 logcfu/g.

Η ενεργότητα νερού καθώς και η αντικειμενική και οργανοληπτική σκληρότητα του λευκού τυριού φάνηκαν να παρουσιάζουν μια μη αναμενόμενη μείωση και αύξηση αντίστοιχα κατά την αποθήκευσή του στις υψηλές θερμοκρασίες (35-40°C). Αυτό πιθανώς να οφείλεται σε πρακτικά θέματα που έχουν να κάνουν με το σχεδιασμό και την εκτέλεση των πειραμάτων και ευνόησαν την περαιτέρω αφυδάτωση του τυριού. Το χρώμα του φάνηκε να παρουσιάζει μεταβολή κατά την αποθήκευση, η οποία παρουσίασε αύξηση με αύξηση της θερμοκρασίας αποθήκευσης. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ότι η μεταβολή του χρώματός του για χρόνο αποθήκευσης 177 ημερών σε θερμοκρασία 15˚C ήταν ίση με 2,851, ενώ για θερμοκρασία αποθήκευσης 40˚C ήταν 14,3. Ως προς τα οργανοληπτικά του χαρακτηριστικά, το τελικό προϊόν παρουσίασε μείωση της βαθμολογίας ως προς την αρέσκεια αναφορικά με την εμφάνιση και τη γεύση του. Η μείωση της γευστικής αρέσκειας πιθανώς να οφείλεται σε ταγγισμό που υπέστη το τυρί κατά την αποθήκευσή του, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε λιπαρά. Ωστόσο, οι σημαντικότερες μεταβολές των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών παρατηρήθηκαν για τα αποθηκευμένα δείγματα στους 35 και 40˚C. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος οι αλλοιώσεις της οργανοληπτικής ποιότητας του τυριού δεν ήταν σημαντικές ($p>0,05$). Αυτό που τελικά καθόρισε τη διάρκεια ζωής του προϊόντος ήταν ο οξειδωτικός ταγγισμός που υπέστη με βάση την οργανοληπτική του αξιολόγηση. Τελικά, ως χρόνος ζωής του προϊόντος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ορίστηκαν οι 6 μήνες. Υπολογίστηκε τέλος το κόστος του τελικού προϊόντος, το οποίο και βρέθηκε ότι είναι 1,815 €/ συσκευασία 75g.

Συμπερασματικά, ο συνδυασμός της ωσμωτικής αφυδάτωσης και της ξήρανσης με αέρα είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός καινοτόμου προϊόντος αφυδατωμένου λευκού τυριού με βέλτιστη οργανοληπτική ποιότητα και μακρά διατηρησιμότητα. Η ωσμωτική αφυδάτωση που εφαρμόστηκε μείωσε σημαντικά το χρόνο της ξήρανσης, με αποτέλεσμα μικρότερες απαιτήσεις σε χρόνο και ενέργεια. Επιπλέον, μείωσε την επίδραση του φαινομένου του «case hardening» στο τυρί κατά την ξήρανση, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη μείωση της ενεργότητας νερού αλλά και καλύτερη οργανοληπτική αποδεκτότητα του τελικού προϊόντος. Το τελικό παραγόμενο προϊόν ήταν αφυδατωμένο αλλά όχι αποξηραμένο, καθώς, με ενεργότητα νερού ~0,55 , μπόρεσε να διατηρήσει μέρος της αρχικής του υγρασίας παραμένοντας ταυτόχρονα μικροβιολογικά και ποιοτικά σταθερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Είναι πολύ σημαντικό ότι με χρήση της τεχνολογίας αυτής δίνεται η δυνατότητα παρασκευής προϊόντων τυριού μεγάλης διάρκειας ζωής, κάτι το οποίο δεν υπάρχει στο εμπόριο, αφού το τυρί αποτελεί γενικά μία πολύ ευαλλοίωτη ομάδα τροφίμων. Είναι γεγονός ότι το καταναλωτικό κοινό αναζητά προϊόντα ποιοτικά και ασφαλή, χωρίς την προσθήκη συντηρητικών και με μειωμένη επεξεργασία. Έτσι, οι βιομηχανίες τροφίμων στρέφονται και αναζητούν προϊόντα που παρασκευάζονται με ηπιότερες μεθόδους επεξεργασίας και συντήρησης. Το καινοτόμο αυτό αφυδατωμένο προϊόν λευκού τυριού, χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με αντίστοιχα επεξεργασμένα καινοτόμα προϊόντα ντομάτας και αγγουριού για την παρασκευή μιας χωριάτικης σαλάτας σε μορφή snack. Το συγκεκριμένο προϊόν έλαβε μέρος στο διαγωνισμό 'ECOTROPHELIA', στον οποίο οι φοιτητές καλούνται να αναπτύξουν καινοτόμα προϊόντα

διατροφής, που παρουσιάζουν απαραιτήτως στοιχεία οικολογικής καινοτομίας και κατέλαβε τη 2η θέση. Η επιτυχία της ιδέας αυτής αποδεικνύει τη σύγχρονη τάση για προϊόντα υψηλών οργανοληπτικών και θρεπτικών χαρακτηριστικών με χρήση ενεργειακά ηπιότερων μεθόδων επεξεργασίας.

6.2 Προτάσεις

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μπορούν να γίνουν ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω μελέτη και έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο θέμα. Αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Συνέχιση της μελέτης ως προς το χρόνο διατήρησης του τυριού στη θερμοκρασία των 15°C.
- Προσδιορισμός και μελέτη της οξείδωσης των δειγμάτων τυριού που έχουν κρατηθεί κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διάρκειας ζωής.
- Ανάλυση του κόστους της διεργασίας και προσπάθεια για ελαχιστοποίησή του.
- Μελέτη της τεχνολογίας της ωσμωτικής αφυδάτωσης σε βιομηχανική κλίμακα και αντιμετώπιση των περιορισμών που την καθιστούν ακόμη δύσκολη ως βιομηχανική πρακτική, όπως είναι η δυσκολία ανακύκλωσης του ωσμωτικού διαλύματος.
- Μελέτη της αντίστοιχης μεθόδου (ωσμωτική αφυδάτωση και ξήρανση με αέρα) σε διαφορετικού τύπου τυριά και σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

7. Βιβλιογραφία

1. Adams M.R, Moss M.O., “Food Microbiology”, Royal Society of Chemistry, Second edition,UK, p.110-113, 134-136, (2000): 140-141
2. Ade-Omowaye, B. I. O., et al. "Use of pulsed electric field pre-treatment to improve dehydration characteristics of plant based foods." Trends in Food Science & Technology 12.8 (2001): 285-295.
3. Ahmed, Ishfaq, Ihsan Mabood Qazi, and Suraiya Jamal. "Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables."Innovative Food Science & Emerging Technologies 34 (2016): 29-43.
4. Araya-Farias, Monica, and Cristina Ratti. "Dehydration of foods: general concepts." by Cristina Ratti. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL (2009).
5. Azoubel, Patricia Moreira, and Fernanda Elizabeth Xidieh Murr. "Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato." Journal of Food Engineering 61.3 (2004): 291-295.
6. Badr, Hesham M. "Use of irradiation to control foodborne pathogens and extend the refrigerated market life of rabbit meat." Meat Science 67.4 (2004): 541-548.
7. Barat, J. M., P. Fito, and A. Chiralt. "Modeling of simultaneous mass transfer and structural changes in fruit tissues." Journal of Food Engineering 49.2 (2001): 77-85.
8. Barbosa-Cánovas, Gustavo V., and Humberto Vega-Mercado. Dehydration of foods. Springer Science & Business Media, 1996.
9. Bekele, Yetenayet, and Hosahalli Ramaswamy. "Going beyond conventional osmotic dehydration for quality advantage and energy savings." Engineering Journal and Science Technology (EJAST) 1.1 (2010): 1-15.
10. Belitz, H. D., W. Grosch, and P. Schieberle. "Χημεία Τροφίμων, 4η έκδοση." Εκδόσεις Τζιόλα (2009)
11. Castro-Giráldez, M., et al. "Analysis of chemical and structural changes in kiwifruit (Actinidia deliciosa cv Hayward) through the osmotic dehydration." Journal of food engineering 105.4 (2011): 599-608.
12. Chapman, H. R., and M. E. Sharpe. "Microbiology of cheese, in “Dairy Microbiology,“Vol. 2:“The Microbiology of Milk Products,“RK Robinson, ed." (1981).
13. Chegini, G. R., and B. Ghobadian. "Effect of spray-drying conditions on physical properties of orange juice powder." Drying Technology 23.3 (2005): 657-668.
14. Ciurzyńska, Agnieszka, et al. "Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food." Trends in Food Science & Technology 50 (2016): 186-192.
15. Cohen, Joseph S., and Tom CS Yang. "Progress in food dehydration." Trends in Food Science & Technology 6.1 (1995): 20-25.Tang, Juming, and Tom Yang. Dehydrated vegetables: principles and systems. Marcel Dekker, Inc: New York, (2004)
16. Crawford, Lester M., and Eric H. Ruff. "A review of the safety of cold pasteurization through irradiation." Food Control 7.2 (1996): 87-97.
17. Dalla Rosa, Marco, and Francois Giroux. "Osmotic treatments (OT) and problems related to the solution management." Journal of food engineering 49.2 (2001): 223-236.

18. Fernandes, Fabiano AN, et al. "Optimization of osmotic dehydration of bananas followed by air-drying." Journal of Food Engineering 77.1 (2006): 188-193.
19. Fernandes, Fabiano AN, et al. "Optimization of osmotic dehydration of papaya followed by air-drying." Food Research International 39.4 (2006): 492-498.
20. Fito, Pedro, et al., eds. Osmotic dehydration and vacuum impregnation: applications in food industries. CRC Press, 2001.
21. Fox, P. F. The major constituents of milk. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2003.
22. Fox, Patrick F., et al. "Fundamentals of cheese science." (2000): 163.
23. Fox, Patrick F., et al., eds. Cheese: chemistry, physics and microbiology: general aspects. Academic Press, 2004.
24. Garcia, Carolina Castilho, Maria Aparecida Mauro, and Mieko Kimura. "Kinetics of osmotic dehydration and air-drying of pumpkins (Cucurbita moschata)." Journal of Food Engineering 82.3 (2007): 284-291.
25. GIANNIBERTOLO, DANILA TORREGGIANIAND. "Present and future in process control and optimization of osmotic dehydration." Advances in food and nutrition research 48 (2004): 173.
26. Giraldo, G., et al. "Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango." Journal of food Engineering 58.1 (2003): 33-43.
27. Goula, Athanasia M., and Harris N. Lazarides. "Modeling of mass and heat transfer during combined processes of osmotic dehydration and freezing (Osmo-Dehydro-Freezing)." Chemical Engineering Science 82 (2012): 52-61.
28. Goula, Athanasia M., and Konstantinos G. Adamopoulos. "Effect of maltodextrin addition during spray drying of tomato pulp in dehumidified air: I. Drying kinetics and product recovery." Drying Technology 26.6 (2008): 714-725.
29. Herrera, Juan J., Laura Pastoriza, and Paul Nesvadba. "Effect of the addition of maltodextrins and sucrose on the ice-melting onset of minced fish muscle." Journal of the Science of Food and Agriculture 81.3 (2001): 305-310.
30. İspir, Ayşe, and İnci Türk Toğrul. "Osmotic dehydration of apricot: Kinetics and the effect of process parameters." Chemical Engineering Research and Design 87.2 (2009): 166-180.
31. Kindstedt, Paul. Cheese and culture: a history of cheese and its place in western civilization. Chelsea Green Publishing, 2012.
32. Leistner, Lothar, and Leon GM Gorris. "Food preservation by hurdle technology." Trends in Food Science & Technology 6.2 (1995): 41-46.
33. Loizzo, Monica Rosa, et al. "Technological aspects and analytical determination of biogenic amines in cheese." Trends in Food Science & Technology 30.1 (2013): 38-55.
34. Maestrelli, Andrea, et al. "Partial removal of water before freezing: cultivar and pre-treatments as quality factors of frozen muskmelon (Cucumis melo, cv reticulatus Naud.)." Journal of Food Engineering 49.2 (2001): 255-260.
35. Mandala, I. G., E. F. Anagnostaras, and C. K. Oikonomou. "Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics." Journal of Food Engineering 69.3 (2005): 307-316.
36. Moreira, R., et al. "Effect of stirring in the osmotic dehydration of chestnut using glycerol solutions." LWT-Food Science and Technology 40.9 (2007): 1507-1514.

37. Moreno, J., et al. "Influence of ohmic heating/osmotic dehydration treatments on polyphenoloxidase inactivation, physical properties and microbial stability of apples (cv. Granny Smith)." Innovative Food Science & Emerging Technologies 20 (2013): 198-207.
38. Mundada, Manoj, Bahadur Singh Hathan, and Swati Maske. "Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of pomegranate arils." Journal of food science 76.1 (2011): E31-E39.
39. Nieto, A., M. A. Castro, and S. M. Alzamora. "Kinetics of moisture transfer during air drying of blanched and/or osmotically dehydrated mango." Journal of Food Engineering 50.3 (2001): 175-185.
40. Panchariya, P. C., D. Popovic, and A. L. Sharma. "Thin-layer modelling of black tea drying process." Journal of food engineering 52.4 (2002): 349-357.
41. Park, Kil Jin, Adriana Bin, and Fernando Pedro Reis Brod. "Drying of pear d'Anjou with and without osmotic dehydration." Journal of Food Engineering 56.1 (2003): 97-103.
42. Phisut, N. "Factors affecting mass transfer during osmotic dehydration of fruits." International Food Research Journal 19.1 (2012): 7-18.Shi, J., & Xue, J.S.
43. Pokharkar, S. M. "Kinetic model for osmotic dehydration of green peas prior to air drying." Journal of food science and technology 38.6 (2001): 557-560.
44. Rahman, M. S. Osmotic dehydration of foods. In M. S. Rahman (Ed.), Handbook of food preservation (pp. 403e432). Boca Raton: CRC Press. (2008).
45. Rahman, Mohammad Shafiur, and Theodore P. Labuza. "Water activity and food preservation." Handbook of food preservation 20 (2007): 448-471.
46. Rastogi, N. K., et al. "Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer." Trends in Food Science & Technology 13.2 (2002): 48-59.
47. Ratti, C., et al. "Freeze drying for food powder production." Handbook of Food Powders: Processes and Properties (2013): 56.
48. Rizvi, Syed SH. "Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration." Engineering Properties of Foods (2014): 359.
49. Robinson, Richard K., ed. Dairy microbiology handbook: the microbiology of milk and milk products. John Wiley & Sons, 2005.
50. Rodrigues, Sueli, and Fabiano AN Fernandes. "Dehydration of melons in a ternary system followed by air-drying." Journal of food Engineering 80.2 (2007): 678-687.
51. Rodriguez, G., J. Vasseur, and F. Courtois. "Design and control of drum dryers for the food industry. Part 1. Set-up of a moisture sensor and an inductive heater." Journal of Food Engineering 28.3 (1996): 271-282.
52. Seguí, L., P. J. Fito, and P. Fito. "Analysis of structure-property relationships in isolated cells during OD treatments. Effect of initial structure on the cell behaviour." Journal of Food Engineering 99.4 (2010): 417-423.
53. Shi, John, and Marc Le Maguer. "Osmotic dehydration of foods: mass transfer and modeling aspects." Food Reviews International 18.4 (2002): 305-335.
54. Shi, John, and Sophia Jun Xue. "Application and Development of Osmotic Dehydration Technology in Food Processing." *Advances in food dehydration*. CRC Press, 2008. 187-208.
55. Sousa, M. J., Ylva Ardö, and P. L. H. McSweeney. "Advances in the study of proteolysis during cheese ripening." International Dairy Journal 11.4 (2001): 327-345
56. Tadesse, Teferra F., Solomon Abera, and Solomon Worku. "Nutritional and sensory properties of solar-dried carrot slices as affected by blanching and osmotic pre-

treatments." International Journal of Food Science and Nutrition Engineering 5.1 (2015): 24-32.
57. Tamime, Adnan Y., ed. Brined cheeses. John Wiley & Sons, 2008.
58. Torreggiani, Danila, and Gianni Bertolo. "Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects." Journal of Food Engineering 49.2 (2001): 247-253.
59. Torringa, Erik, et al. "Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms." Journal of food engineering 49.2 (2001): 185-191.
60. Tortoe, Charles. "A review of osmodehydration for the food industry." African Journal of Food Science 4.6 (2010): 303-324.
61. Trujillo, A. J., et al. "Application of high pressure treatment for cheese production." Food Research International 33.3 (2000): 311-316.
62. Van Nieuwenhuijzen, N. H., M. R. Zareifard, and H. S. Ramaswamy. "Osmotic drying kinetics of cylindrical apple slices of different sizes." Drying Technology 19.3-4 (2001): 525-545.
63. Vega-Mercado, Humberto, M. Marcela Góngora-Nieto, and Gustavo V. Barbosa-Cánovas. "Advances in dehydration of foods." Journal of food engineering 49.4 (2001): 271-289.
64. Volpato, Giandra, et al. "Kinetics of the diffusion of sodium chloride in chicken breast (Pectoralis major) during curing." Journal of Food Engineering 79.3 (2007): 779-785.
65. Walstra P. & Jenness R., Dairy Chemistry and Physics (John Wiley & Sons Publication),1984.
66. Walstra, Pieter, et al. Dairy science and technology. CRC press, 2005.
67. Kelly, A. L., & Zeece, M. Applications of novel technologies in processing of functional foods. Australian Journal of Dairy Technology, 64.1, (2009a) : 12-16.
68. Kelly, A. L., & Zeece, M. Applications of novel technologies in processing of functional foods. Australian Journal of Dairy Technology, 64.1, (2009b): 12-15.
69. Yu, L. J., M. Ngadi, and G. S. V. Raghavan. "Effect of temperature and pulsed electric field treatment on rennet coagulation properties of milk." Journal of Food Engineering 95.1 (2009): 115-118.

Ελληνική Βιβλιογραφία

70. Βεϊνόγλου Β. και Ε. Ανυφαντάκης, ‘Γαλακτοκομία’, Τόμος Β., Εκδόσεις Καραμπελόπουλος, Αθήνα 1981
71. Ζερφυρίδης Γρηγόρης Κ., ‘Τεχνολογία Προϊόντων Γάλακτος – Τυροκομία’, 2η Έκδοση, Θεσσαλονίκη, 2001.
72. Κώδικας Τροφίμων και Ποτών
73. Μαντής Α. Ι., ‘Υγιεινή και τεχνολογία του γάλακτος και των προϊόντων του’, Τόμος Γ΄, Εκδόσεις Αδελφών Κυριακίδη Α.Ε., Θεσσαλονίκη, 2000.
74. Παπαγεωργίου Δ.Κ., Μ. Μπόρη & Α.Ι. Μάντης, Επιβίωση της Listeria monocytogenes στα τυριά Γαλοτύρι και Τουλουμοτύρι κατά την παραμονή τους στους 5°C και στους 12°C . Δελτ. Ελλ. Κτην. Εταιρ. 49. 48-53, 1998.
75. Ταούκης Π. et al., Επιστήμη και Μηχανική Τροφίμων, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2009.
76. Ταούκης Π., Ωραιοπούλου Β., Επιστήμη και μηχανική διεργασιών τροφίμων. Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα 2009.

8.Παράρτημα

Ι. ΦΥΛΛΟ ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΦΕΤΑΣ (RANKING TEST)

ΟΝΟΜΑ:

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:

Αξιολογείστε τα παρακάτω δείγματα Φέτας ως προς τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά, με κλίμακα 1-9, στην οποία το 9 αντιστοιχεί στο χαρακτηρισμό «εξαιρετικό». Σημειώστε τη βαθμολογία σας στο αντίστοιχο κελί.

- Αξιολογείστε ως προς την αρέσκεια, **<u>το χρώμα, την υφή και τη γεύση</u>** του τυριού:

	Φέτα Α	Φέτα Β	Φέτα Γ	Φέτα Δ
ΕΜΦΑΝΙΣΗ – ΧΡΩΜΑ (1-9 βαθμούς)				
ΥΦΗ – ΔΟΜΗ (1-9 βαθμούς)				
ΓΕΥΣΗ – ΟΣΜΗ (1-9 βαθμούς)				

- Αξιολογείστε ως προς την ένταση, την **<u>εμφάνιση και το χρώμα</u>** του τυριού:

	Φέτα Α	Φέτα Β	Φέτα Γ	Φέτα Δ
Λευκό, ομοιογενές χρώμα (1-9 βαθμούς)				

- Αξιολογείστε ως προς την ένταση την **υφή - δομή** του τυριού:

	Φέτα Α	Φέτα Β	Φέτα Γ	Φέτα Δ
Σκληρή (1-9 βαθμούς)				

- Αξιολογείστε ως προς την ένταση τη **γεύση-οσμή** του τυριού:

	Φέτα Α	Φέτα Β	Φέτα Γ	Φέτα Δ
Όξινη (0-10 βαθμούς)				
Ταγγισμένη (0-10 βαθμούς)				
Αλμυρή (0-10 βαθμούς)				

II. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ANOVA)

Αντικειμενικό Χρώμα (35-40 °C)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ						
Προέλευση διακύμανσης	***SS***	***βαθμοί ελευθερίας***	***MS***	***F***	***τιμή-P***	***κριτήριο F***
Γραμμές	260,0829	7	37,15471	28,3261	0,000128	3,787044
Στήλες	3,920716	1	3,920716	2,989086	0,127455	5,591448
Σφάλμα	9,181742	7	1,311677			
Σύνολο	273,1854	15				

Δείκτης χρώματος b (35-40 °C)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ						
Προέλευση διακύμανσης	***SS***	***βαθμοί ελευθερίας***	***MS***	***F***	***τιμή-P***	***κριτήριο F***
Γραμμές	342,7417	8	42,84271	6,448085	0,008103	3,438101
Στήλες	26,44342	1	26,44342	3,979893	0,081146	5,317655
Σφάλμα	53,15403	8	6,644254			
Σύνολο	422,3392	17				

Εμφάνιση (35-40 °C)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ						
Προέλευση διακύμανσης	***SS***	***βαθμοί ελευθερίας***	***MS***	***F***	***τιμή-P***	***κριτήριο F***
Γραμμές	21,36	8	2,67	109,8514	2,27E-07	3,438101
Στήλες	0,086806	1	0,086806	3,571429	0,095452	5,317655
Σφάλμα	0,194444	8	0,024306			
Σύνολο	21,64125	17				

Γεύση (35-40 °C)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ						
Προέλευση διακύμανσης	***SS***	***βαθμοί ελευθερίας***	***MS***	***F***	***τιμή-P***	***κριτήριο F***
Γραμμές	21,14278	8	2,642847	427,6067	1,03E-09	3,438101
Στήλες	0,160556	1	0,160556	25,97753	0,000934	5,317655

Σφάλμα	0,049444	8	0,006181			
Σύνολο	21,35278	17				