



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ
& ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Επίδραση του τρόπου ξήρανσης σε χυμό μανταρινιού



Αργυρούλα Μ. Αμαρτωλού

Επιβλέπουσα καθηγήτρια:

Ιωάννα Μαντάλα, Καθηγήτρια Γ.Π.Α

ΑΘΗΝΑ, 2023

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ
& ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Επίδραση του τρόπου ξήρανσης σε χυμό μανταρινιού

Effect of drying method on mandarin juice

Αργυρούλα Μ. Αμαρτωλού

Εξεταστική Επιτροπή:

Ιωάννα Μαντάλα, Καθηγήτρια ΓΠΑ (Επιβλέπουσα)

Νικόλαος Στοφόρος, Καθηγητής ΓΠΑ

Χρυσσαυγή Γαρδέλη, Επίκουρη Καθηγήτρια ΓΠΑ

Επίδραση του τρόπου ξήρανσης σε χυμό μανταρινιού

ΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Τροφίμων

Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων & Διατροφής Του Ανθρώπου

Εργαστήριο Μηχανικής Τροφίμων, Επεξεργασίας & Συντήρησης Γεωργικών Προϊόντων

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης των διεργασιών ξήρανσης στα χαρακτηριστικά της σκόνης από χυμό μανταρινιού (*Citrus reticulata*).

Τα μανταρινία, όπως και όλα τα άλλα εσπεριδοειδή, είναι σημαντική πηγή Βιταμίνης C, Βιταμίνης A και του συμπλέγματος Β. Επιπλέον, στον καρπό μανταρινιού υπάρχουν σε ποσότητα μεγαλύτερη των 100 μg/100 g τα καροτενοειδή.

Κατά τη διάρκεια της μελέτης παρασκευάστηκαν 19 δείγματα σκονών, οι οποίες προκύπτουν από τρεις διαφορετικούς τρόπους ξήρανσης. Οι τρόποι αυτοί είναι ξήρανση με ψεκασμό, ξήρανση με λυοφιλίωση και ξήρανση με στρώμα αφρού σε θερμό αέρα. Μετά την παραλαβή των σκονών πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις που αφορούν την πυκνότητα, το πορώδες, το χρώμα, την υγρασία, την ενεργότητα νερού, τη διαλυτότητα τους σε νερό για επανασύσταση του χυμού, την περιεκτικότητά τους σε βιταμίνη C και τις καμπύλες προσρόφησης σε πέντε διαφορετικές σχετικές υγρασίες.

Με την μέθοδο ξήρανσης με στρώμα αφρού σε θερμό αέρα παρατηρούμε την μεγαλύτερη απώλεια βιταμίνης C σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους. Τα δείγματα που σχηματίστηκαν με ψεκασμό παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα ποσοστά υδατοδιαλυτότητας, τις μικρότερες πυκνότητες και υψηλό πορώδες. Παράλληλα, λόγω των πρόσθετων ουσιών και της μεθόδου, το χρώμα των σκονών διαφέρει αρκετά από τον χυμό, ως προς τον παράγοντα L*. Τέλος, οι σκόνες από ξήρανση με στρώμα αφρού σε θερμό αέρα απορροφούν την λιγότερη υγρασία σε υψηλές σχετικές υγρασίες.

Βάσει των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης, προκύπτει ότι τόσο η μέθοδος ξήρανσης όσο και οι πρόσθετες ουσίες επηρεάζουν σημαντικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων σκονών.

Επιστημονική περιοχή: Μηχανική Τροφίμων

Λέξεις κλειδιά: Ξήρανση, χυμός μανταρινιού, χρώμα, ασκορβικό οξύ, υδατοδιαλυτότητα, καμπύλη προσρόφησης

Effect of drying method on mandarin juice

MSc Food Science & Technology

Department of Food Science & Human Nutrition

Laboratory of Food Engineering, Processing & Maintenance of Agricultural Products

Abstract

The objective of this study is to investigate the effects of the drying on properties of powder produced from mandarin juice (*Citrus reticulata*).

Mandarins, like all other citrus fruits, are an important source of Vitamin C, Vitamin A and the B complex. In addition, the mandarin fruit contains more than 100 µg/100 g of carotenoids.

During the experimental procedure nineteen samples of cladode flour were produced by three different drying methods. These methods are spray drying, freeze drying and foam-mat drying. After receiving the powders, analyses were conducted regarding the density, porosity, color, moisture, water activity, its solubility in water for juice reconstitution, its vitamin C content, and the adsorption curves in five different relative humidity.

The powders produced by foam-mat drying have greatest loss of vitamin C compared to the other two methods. The spray dried samples have the highest percentages of water solubility, the lowest densities and high porosity. At the same time, due to the additives and the method, the color of the powders is quite different from the colour of the juice, in terms of the L* factor. Finally, powders produced by foam-mat drying absorb less moisture at high relative humidities.

Based on the results of the present study, both the drying method and the additives importantly affect characteristics of the produced powders.

Scientific area: Food Engineering

Keywords: drying, mandarin juice, colour, ascorbic acid, water solubility, sorption curve

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής μελέτης έγινε στο εργαστήριο Μηχανικής Τροφίμων του τμήματος Επιστήμης Τροφίμων & Διατροφής του Ανθρώπου, του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, υπό την επίβλεψη της καθηγήτριας Ιωάννας Μαντάλα.

Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Ιωάννα Μαντάλα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ώστε να εκπονηθεί η διατριβή και για τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγηση που μου έδωσε.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, αποτελούμενη από την κυρία Γαρδέλη και τον κύριο Στοφόρο. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Χαλούλο Παναγιώτη και Αποστολίδη Ευτύχη για τις χρήσιμες συμβουλές τους και τη βοήθεια στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία "Κάμπος Χίου Βιομηχανία χυμών και αναψυκτικών Α.Ε." για τη δωρεάν παροχή των χυμών μανταρινιού που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραμάτων.

Με την άδειά μου, η παρούσα εργασία ελέγχθηκε από την Εξεταστική Επιτροπή μέσα από λογισμικό ανίχνευσης λογοκλοπής που διαθέτει το ΓΠΑ και διασταυρώθηκε η εγκυρότητα και η πρωτοτυπία της.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
1.1. Ξήρανση	1
1.1.1. Γενικά	1
1.1.2. Καμπύλη ξήρανσης	2
1.1.3. Ξήρανση με στρώμα αφρού σε ρεύμα θερμού αέρα (foam-mat drying)	3
1.1.4. Ξήρανση με ψεκασμό (spray drying)	8
1.1.5. Λυοφιλίωση (freeze drying)	11
1.2. Μεταπτώσεις Φάσεων	14
1.2.1. Γενικά	14
1.2.2. Κρυστάλλωση και Τήξη	14
1.2.3. Υαλώδης Μετάπτωση	15
1.3. Ενεργότητα Νερού (a_w)	17
1.3.1. Γενικά	17
1.4. Ισόθερμες Καμπύλες Ρόφησης	18
1.4.1. Γενικά	18
1.4.2. Μέθοδοι προσδιορισμού ισόθερμων καμπυλών	18
1.4.3. Τύποι καμπυλών	19
1.4.4. Μαθηματικά μοντέλα για ισόθερμες καμπύλες	20
1.5. Μανταρίνι.....	21
1.5.1. Γενικά.....	21
1.5.2. Προέλευση μανταρινιών	22
1.5.3. Παραγωγή και κατανάλωση εσπεριδοειδών	22
1.5.4. Σύσταση καρπού μανταρινιού	24
1.5.5. Ασκορβικό οξύ	24
2. Σκοπός	26
3. Υλικά και Μέθοδοι	27
3.1. Πρώτες ύλες	27
3.2. Ξήρανση χυμού μανταρινιού	27
3.2.1. Ξήρανση με ψεκασμό	27
3.2.2. Λυοφιλίωση (freeze drying)	29
3.2.3. Ξήρανση αφρού με ρεύμα θερμού αέρα	30
3.3. Προσδιορισμός αφριστικής ικανότητας	31

3.4.	Ξήρανση δειγμάτων	31
3.5.	Προσδιορισμός λόγου υγρασίας	31
3.6.	Προσδιορισμός σταθεράς κινητικής.....	32
3.7.	Προσδιορισμός απαιτούμενου χρόνου ξήρανσης.....	32
3.8.	Προσδιορισμός υγρασίας	32
3.9.	Προσδιορισμός ενεργότητας νερού (a_w)	32
3.10.	Μέτρηση pH και προσδιορισμός διαλυτών στερεών συστατικών ($^{\circ}$ Brix)	33
3.11.	Προσδιορισμός χρώματος.....	33
3.12.	Προσδιορισμός φαινομενικής και πραγματικής πυκνότητας	34
3.13.	Προσδιορισμός Βιταμίνης C με την μέθοδο της ινδοφαινόλης.....	34
3.13.1.	Παρασκευή διαλύματος μεταφωσφορικού οξέος- οξικού οξέος	34
3.13.2.	Παρασκευή διαλύματος ινδοφαινόλης (χρωστική ουσία).....	34
3.13.3.	Προσδιορισμός ασκορβικού οξέος	35
3.14.	Προσδιορισμός υδατοδιαλυτότητας και κατακράτησης νερού	35
3.15.	Καμπύλη προσρόφησης	35
3.16.	Στατιστική ανάλυση.....	36
4.	Αποτελέσματα	37
4.1.	Φυσικές ιδιότητες χυμού μανταρινιού.....	37
4.2.	Διόγκωση αφρού.....	37
4.3.	Απορροή αφρού.....	38
4.4.	Κινητική ξήρανσης.....	40
4.5.	Απόδοση διεργασίας.....	44
4.6.	Προσδιορισμός υγρασίας	44
4.7.	Προσδιορισμός ενεργότητας νερού	45
4.8.	Πυκνότητα και πορώδες	47
4.9.	Χρώμα	48
4.10.	Ασκορβικό οξύ	51
4.11.	Υδατοδιαλυτότητα και κατακράτηση νερού.....	52
4.9.	Καμπύλες προσρόφησης	56
5.	Συμπεράσματα	63
	Παράρτημα	64
	Βιβλιογραφία	72

1. Εισαγωγή

1.1. Ξήρανση

1.1.1. Γενικά

Η ξήρανση είναι μια πολύ σημαντική τεχνική για τη βιομηχανία τροφίμων, η οποία χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες για τη συντήρηση τροφίμων (Sagar & Kumar, 2010).

Τα παλαιότερα χρόνια η ξήρανση ήταν συνυφασμένη με τον ήλιο. Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται πολλές μέθοδοι ξήρανσης, μιας και έχουμε στη διάθεσή μας εξελιγμένο εξοπλισμό (Rahman & Perera, 2007).

Ως ξήρανση ορίζεται η διεργασία της επιλεκτικής απομάκρυνσης του νερού από το υλικό που πρόκειται να ξηραθεί. Κατά τη θερμική ξήρανση πραγματοποιείται μεταφορά ενέργειας, κατά το πλείστον με τη μορφή θερμότητας, από το περιβάλλον προς το υλικό για την εξάτμιση της υγρασίας που βρίσκεται στην επιφάνεια. Ταυτόχρονα, μεταφέρεται η υγρασία που υπάρχει στο εσωτερικό του υλικού προς την εξωτερική επιφάνεια, έτσι ώστε να εξατμιστεί και αυτή με τη σειρά της (Mujumdar, 2014b).

Τα τρόφιμα είναι απαραίτητα για τον άνθρωπο, καθώς είναι πηγή ενέργειας γι' αυτόν. Τα φρούτα και τα λαχανικά είναι γεωργικές καλλιέργειες που σε συγκεκριμένες εποχές του χρόνου παράγονται σε μεγάλες ποσότητες. Έτσι, μια μεγάλη ποσότητά τους απορρίπτεται λόγω της μη σωστής επεξεργασίας και αποθήκευσης (Javed et al., 2018). Η ξήρανση στη βιομηχανία έχει ως βασικό στόχο τη μείωση της μικροβιακής δραστηριότητας, ώστε να αποφευχθεί η αλλοίωση του προϊόντος, λόγω μικροοργανισμών, όπως τα βακτήρια, και να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του (Kumar et al., 2015). Όλα τα τρόφιμα, αλλά ιδιαίτερα εκείνα που έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό, είναι επιρρεπή σε αλλοίωση από μικροοργανισμούς (Falade & Solademi, 2010). Επιπλέον, με την ξήρανση προστατεύεται το τρόφιμο από φυσικούς ή χημικούς παράγοντες, παραδείγματος χάριν οξείδωση και μη ενζυματική αμαύρωση, οι οποίοι υποβιβάζουν την ποιότητα του προϊόντος (de Paula et al., 2020; Javed et al., 2018). Εκτός από τη διατήρηση ενός τροφίμου, η ξήρανση συμβάλει στη μείωση του βάρους και του όγκου του, το οποίο με τη σειρά του βοηθάει στη μείωση του κόστους συσκευασίας και μεταφοράς και κάνει πιο εύκολο τον χειρισμό του (Falade & Solademi, 2010).

Η ξήρανση είναι ένα σημαντικό βήμα στην επεξεργασία του προϊόντος και η σωστή ξήρανση είναι απαραίτητη για την επίτευξη και για τη διατήρηση ενός ομοιογενούς επιπέδου ποιότητας σε όλο το προϊόν (Wernecke & Wernecke, 2013). Στη βιομηχανία τροφίμων, για παράδειγμα, αυτές οι ποιοτικές παράμετροι είναι οι εξής:

- ✓ Διάρκεια ζωής
- ✓ Γεύση
- ✓ Φρεσκάδα
- ✓ Εμφάνιση
- ✓ Χρώμα

Η ξήρανση είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει μεταφορά ενέργειας και μάζας μαζί με διάφορες φυσικοχημικές διεργασίες, οι οποίες, με τη σειρά τους, μπορεί να προκαλέσουν αλλαγές στην ποιότητα του προϊόντος καθώς και στους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Οι αλλαγές αυτές μπορεί να αφορούν το σχήμα του, όπως για παράδειγμα συρρίκνωση ή διόγκωση, και την κρυστάλλωση. Επιπλέον, μπορεί να παρατηρηθεί αλλαγή στο χρώμα, την υφή ή την οσμή (Mujumdar, 2014).

Αποτελεσματική και οικονομική θεωρείται ότι είναι η ξήρανσή όταν αφαιρείται η μέγιστη δυνατή ποσότητα νερού σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ο διαχωρισμός του νερού και της στερεής ύλης μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τις παρακάτω μεθόδους:

- ✓ Θερμική ξήρανση: Κατά τη διεργασία αυτή, η πρώτη ύλη εκτίθεται σε θερμοκρασία κατά προτίμηση υψηλότερη από τους 100 °C, έτσι ώστε το νερό να εξατμιστεί από το προϊόν.
- ✓ Ξήρανση υπό κενό: Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε περιβάλλον όπου η πίεση είναι χαμηλότερη από την πίεση υδρατμών. Με αυτήν την μέθοδο, το νερό απομακρύνεται λόγω της διαφοράς πιέσεως.
- ✓ Λυοφιλίωση: Η πρώτη ύλη ψύχεται μέχρι το νερό να παγώσει εντελώς σε θερμοκρασία υπό του μηδενός. Λόγω της ψύξης, το νερό μετατρέπεται σε πάγο, ο οποίος απομακρύνεται σε επόμενα βήματα της διεργασίας.
- ✓ Χημική ξήρανση: Στην πρώτη ύλη προστίθενται δεσμευτικοί παράγοντες, οι οποίοι συνδέονται με το νερό με φυσικό ή χημικό τρόπο. Έτσι, με την απομάκρυνση του παράγοντα θα αφαιρεθεί και το νερό.

Για καλύτερη απόδοση στην διεργασία ξήρανσης συχνά γίνεται συνδυασμός διαφορετικών μεθόδων (Wernecke & Wernecke, 2013).

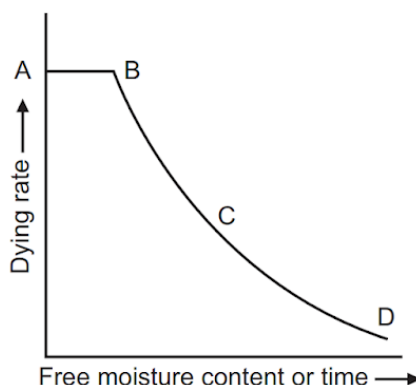
1.1.2. Καμπύλη ξήρανσης

Η καμπύλη ξήρανσης απεικονίζει τον ρυθμό ξήρανσης ενός υλικού σε σχέση με τον χρόνο ή την περιεκτικότητα σε υγρασία που έχει το υλικό. Η καμπύλη ξήρανσης μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο ονομάζεται μεταβατικό στάδιο (transient period). Στο δεύτερο στάδιο, δηλαδή την περίοδο σταθερού ρυθμού (constant rate period), η υγρασία αφαιρείται από το τρόφιμο σχετικά εύκολα. Τέλος, στην περίοδο επιβραδυνόμενου ρυθμού (falling rate period) η υγρασία που έχει απομείνει συγκρατείται από το πλέγμα του προϊόντος (Rahman & Perera, 2007).

Η μετάβαση από το πρώτο στο δεύτερο στάδιο ξήρανσης γίνεται στο σημείο που ονομάζεται κρίσιμη υγρασία. Συνήθως, παρατηρούνται δύο περίοδοι ρυθμού πτώσης τόσο για υγροσκοπικά όσο και για μη υγροσκοπικά υλικά.

Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται το μεταβατικό στάδιο A→B, η πρώτη περίοδος πτώσης B→C και η δεύτερη περίοδος πτώσης C→D. Ο τρόπος με τον οποίο συμπεριφέρεται ένα υλικό κατά την ξήρανσή του εξαρτάται από το πόσο πορώδες είναι η δομή του,

την ομοιογένεια του και τις υγροσκοπικές ιδιότητες. Η άμεση είσοδος στον ρυθμό πτώσης είναι χαρακτηριστική των υγροσκοπικών υλικών τροφίμων (Rahman & Perera, 2007).



Σχήμα 1. Ρυθμός ξήρανσης συναρτήσει είτε του χρόνου ξήρανσης είτε την περιεκτικότητα σε υγρασία.

1.1.3. Ξήρανση με στρώμα αφρού σε ρεύμα θερμού αέρα (foam-mat drying)

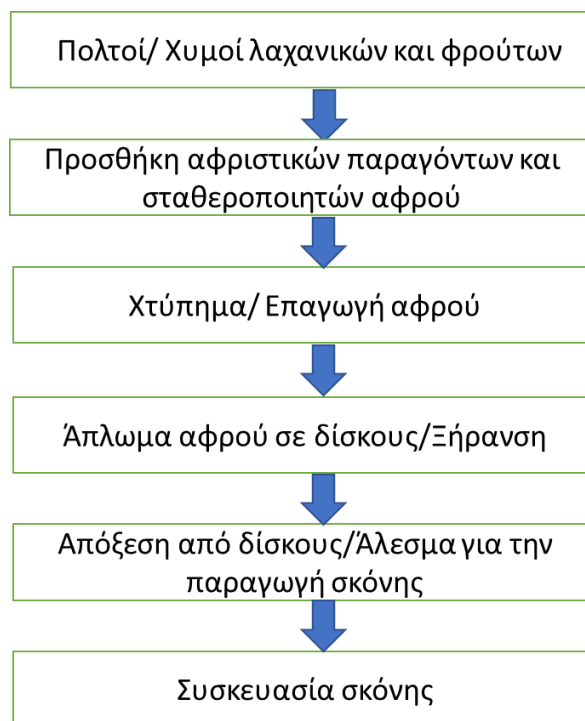
1.1.3.1. Γενικά

Η ξήρανση με στρώμα αφρού σε ρεύμα θερμού αέρα εφαρμόζεται κατά το πλείστον σε τρόφιμα που βρίσκονται σε υγρή ή ημι-υγρή μορφή, δηλαδή κάνει δυνατή την επεξεργασία τροφίμων που ξηραίνονται με δυσκολία. Τέτοια τρόφιμα είναι πολλοί φρούτων και λαχανικών και χυμοί (Tsotsas & Mujumdar, 2014). Με την μέθοδο αυτή, έχει αναγνωριστεί εδώ και πολύ καιρό ότι συντομεύει τον χρόνο ξήρανσης (Kudra & Mujumdar, 2014).

Με αυτήν την μέθοδο ξήρανσης παρατηρείται μικρότερος χρόνος ξήρανσης και σε χαμηλές θερμοκρασίες, σε σύγκριση με όταν το προϊόν δεν είναι σε μορφή αφρού. Το γεγονός ότι το προϊόν βρίσκεται σε αφρώδη κατάσταση συνεπάγεται ότι έχει μεγαλύτερη επιφάνεια εκτεθειμένη για ξήρανση (Javed et al., 2018; Kudra & Mujumdar, 2014; Tsotsas & Mujumdar, 2014). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να διατηρείται η θρεπτική ποιότητα του προϊόντος. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι η υψηλή απόδοση ξήρανσης και η γρήγορη ενυδάτωση του προϊόντος. Τέλος, η μέθοδος αυτή είναι οικονομικά αποδοτική (Sangamithra et al., 2015). Σημαντικά μειονεκτήματα είναι η δημιουργία και η διατήρηση ενός σταθερού, καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας, αφρού, η περιορισμένη απόδοση λόγω του μικρού φορτίου υλικού που μπορεί να εφαρμοστεί ανά μονάδα επιφάνειας ξηραντήρα, αν και αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί από μικρότερο χρόνο ξήρανσης, η αλλαγή του αρώματος του τελικού προϊόντος λόγω τυχών καταστροφής αρωματικών συστατικών και η αλλαγή χρώματος λόγω μη ενζυματικής αμαύρωσης (Tsotsas & Mujumdar, 2014).

1.1.3.2. Διεργασία ξήρανσης

Κατά την ξήρανση με αφρό, στα υγρά τρόφιμα προστίθενται αφριστικοί παράγοντες και σταθεροποιητές αφρού (Javed et al., 2018). Η παραγωγή σταθερού αφρού είναι κύρια προϋπόθεση γι' αυτή την μέθοδο ξήρανσης. Στη συνέχεια, χτυπιούνται και σχηματίζουν σταθερό αφρό, ο οποίος ξηραίνεται στον αέρα, στην κατάψυξη, σε κενό ή σε φούρνο μικροκυμάτων. Γενικά, οι υγροί αφροί ξηραίνονται με ροή ζεστού αέρα μέσα από ένα σχετικά λεπτό στρώμα του αφρώδους υλικού μέχρι να στεγνώσει στην επιθυμητή περιεκτικότητα σε υγρασία. Η μεγαλύτερη επιφάνεια που εκτίθεται στον αέρα ξήρανσης, λόγω του σχηματισμού του αφρού, είναι ο κύριος λόγος της επιτάχυνσης της απομάκρυνσης της υγρασίας. Επιπλέον, μέσω της διάχυσης παρατηρείται κίνηση της υγρασίας μέσα στο προϊόν. Η ομοιόμορφη σύσταση αφρού πραγματοποιείται με τη χρήση αναδευτήρων με υψηλές ταχύτητες (Kudra & Mujumdar, 2014; Tsotsas & Mujumdar, 2014).



Σχήμα 2. Βήματα της διεργασίας ξήρανσης στρώματος αφρού με θερμό αέρα.

Γενικά, οι αφροί είναι συστήματα στα οποία το υγρό μέσο είναι η φάση διασποράς και το αέριο είναι η διασκορπισμένη ουσία (Arzhavitina & Steckel, 2010). Για τον σχηματισμό του αφρού πρέπει αρχικά να σχηματιστεί ένα διφασικό σύστημα υγρού-αερίου με την βοήθεια μιας κατάλληλης για το εκάστοτε προϊόν επιφανοδραστικής ουσίας (Tsotsas & Mujumdar, 2014).

Οι αφροί μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες με βάση την αναλογία διασκορπισμένης φάσης προς φάση διασποράς. Όταν η αναλογία διασκορπισμένης φάσης προς φάση διασποράς είναι μεγάλη, τότε ο αφρός χαρακτηρίζεται ως πολυεδρικός και παρατηρείται ο σχηματισμός μεγάλου αριθμού φυσαλίδων. Όσο περισσότερες είναι οι φυσαλίδες, τόσο πιέζονται μεταξύ τους και σχηματίζουν κυψελοειδή δομή. Αντίθετα, η μικρή αναλογία έχει ως αποτέλεσμα οι μεμονωμένες φυσαλίδες να

διατηρούν το σφαιρικό τους σχήμα. Οι αφροί αυτοί ταξινομούνται ως αραιοί αφροί (Sangamithra et al., 2015).

Για την διασπορά της αέριας ουσίας είναι απαραίτητη η προσφορά ενέργειας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό φυσαλίδων αέρα που περικλείονται από ένα λεπτό στρώμα υγρού (Tsotsas & Mujumdar, 2014). Για την σταθεροποίηση των φυσαλίδων, και ακολούθως και του αφρού, είναι αναγκαία η παρουσία επιφανοδραστικών ουσιών. Με την σταθεροποίηση του αφρού αποφεύγεται η κατάρρευση του κατά τη διάρκεια της ξήρανσης (Kudra & Mujumdar, 2014). Τέτοιες ουσίες είναι βιολογικές και ανήκουν στην κατηγορία των πρωτεϊνών, όπως η αλβουμίνη ή πρωτεΐνη γάλακτος. (Tsotsas & Mujumdar, 2014).

1.1.3.3. Μέθοδοι σχηματισμού αφρού

Η ποσότητα του παραγόμενου αφρού και η ποιότητά του καθορίζονται από την τεχνική αφρισμού. Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι δημιουργίας αφρού είναι το χτύπημα, η ανακίνηση και το φούσκωμα (Dehghannya et al., 2018).

- ✓ Χτύπημα (Whipping): Στη μέθοδο αυτή το υγρό τρόφιμο αναδεύεται συνεχώς από ειδικά σχεδιασμένες συσκευές. Με το χτύπημα ενσωματώνεται στο υγρό τρόφιμο μεγάλη ποσότητα αέρα και λόγω της ανάδευσης ο αέρας αυτός παγιδεύεται. Όσο περισσότερο διαρκεί η ανάδευση τόσο μεγαλύτερη ποσότητα αέρα παγιδεύεται στο υγρό. Το υγρό δέχεται μεγάλη μηχανική καταπόνηση, με αποτέλεσμα ο αέρας να κατανέμεται ομοιόμορφα σε μικρού μεγέθους φυσαλίδες (Dehghannya et al., 2018; Javed et al., 2018).
- ✓ Φούσκωμα (Sparging): Με αυτή τη μέθοδο παράγονται φυσαλίδες ομοιόμορφου μεγέθους. Για να γίνει η μετατροπή όλου του χυμού σε αφρό θα πρέπει να ενσωματωθεί μεγάλη ποσότητα αέρα στο χυμό (Javed et al., 2018).
- ✓ Ανακίνηση (Shaking): Σε αυτή τη μέθοδο, δημιουργείται αφρός με έντονη ανάδευση του υγρού. Χρησιμοποιείται σπάνια από τη βιομηχανία τροφίμων καθώς είναι μια μέθοδος πολύ αργή και αναπτύσσονται αφροί μικρότερου όγκου σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους (Javed et al., 2018).

1.1.3.4. Αφριστικοί παράγοντες

Οι αφριστικοί παράγοντες χρησιμοποιούνται για την ενσωμάτωση του αέρα στο υγρό τρόφιμο με αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού ξήρανσης (Javed et al., 2018). Ο αφριστικός παράγοντας είναι μια επιφανειοδραστική ουσία που μειώνει την επιφανειακή τάση μεταξύ δύο υγρών ή μεταξύ ενός υγρού και ενός στερεού και διευκολύνει το σχηματισμό αφρού (Sangamithra et al., 2015). Η αποτελεσματικότητα των παραγόντων αυτών μπορεί να αξιολογηθεί από τις αφριστικές τους ιδιότητες και τις τελικές ποιότητες της σκόνης. Οι ιδιότητες αφρισμού διαφορετικών παραγόντων είναι δυνατόν να επηρεαστούν από πολλούς παράγοντες, όπως η συγκέντρωσή τους, η περιεκτικότητα στερεών του υγρού, ο χρόνος χτυπήματος και η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται ο σχηματισμός του αφρού (Javed et al., 2018). Γενικά, η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη κατηγορία αφριστικών παραγόντων είναι οι πρωτεΐνες,

καθώς σταθεροποιούν τους αφρούς γρήγορα και αποτελεσματικά ακόμα και αν βρίσκονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις, και είναι αποδοτικές ακόμα και όταν στο τρόφιμο υπάρχουν ουσίες όπως λίπη, αλκοόλη και αρωματικές ενώσεις, οι οποίες δρουν ως αναστολείς των παραγόντων και είναι αποδοτικές σε ένα ευρύ φάσμα pH, το οποίο συναντάται στα τρόφιμα (Brar et al., 2020; Sangamithra et al., 2015). Μερικά παραδείγματα αφριστικών παραγόντων είναι τα ακόλουθα:

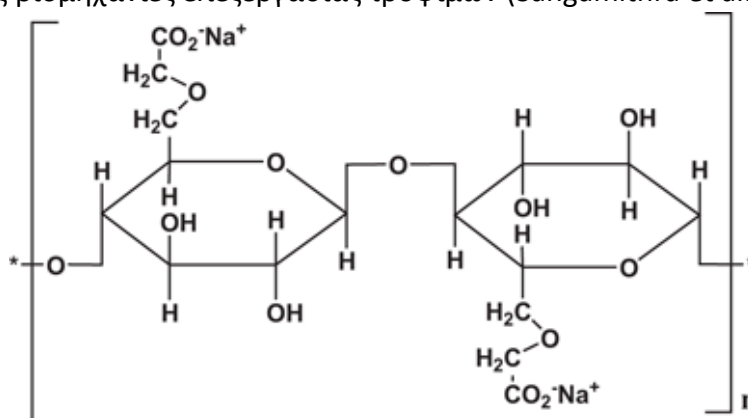
- ✓ Αλβουμίνη: Η αλβουμίνη είναι το ασπράδι του αυγού και αποτελεί την κύρια πρωτεΐνη του. Οι πρωτεΐνες της αλβουμίνης δρουν ως αμφίφιλοι γαλακτωματοποιητές μεταξύ της συνεχούς φάσης και της φάσης διασποράς για να σταθεροποιήσουν τον αφρό. Με άλλα λόγια, μπορούν να επεξεργαστούν και υδρόφοβες και υδρόφιλες ουσίες. Κατά τη διάρκεια του χτυπήματος, οι πρωτεΐνες του αυγού μετουσιώνονται στη διεπιφάνεια και αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους σχηματίζοντας σταθερή μεμβράνη. Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι η αλβουμίνη όταν χτυπηθεί σε θερμοκρασία δωματίου σχηματίζει αφρό μεγαλύτερου όγκου από ότι αν χτυπηθεί σε θερμοκρασία ψυγείου (Sangamithra et al., 2015). Επιπλέον, έχει αναλυθεί ότι ο χρόνος χτυπήματος για την αλβουμίνη ήταν σημαντικά μικρότερος από άλλους παράγοντες αφρισμού, πράγμα που σημαίνει ότι οι συγκεκριμένες πρωτεΐνες θα μπορούσαν να απορροφηθούν ταχύτερα στη διεπιφάνεια αέρα-υγρού και να μετουσιωθούν πιο γρήγορα από τις άλλες πρωτεΐνες. Όμως, έχει παρατηρηθεί ότι η αλβουμίνη δεν έχει επαρκή απόδοση στον σχηματισμό αφρού σε όλο το εύρος του pH, αλλά σε ένα περιορισμένο (Hardy & Jideani, 2015).
- ✓ Πρωτεΐνη ορού γάλακτος: Η πρωτεΐνη ορού γάλακτος μπορεί να ληφθεί από γαλακτοκομικά προϊόντα και είναι παραπροϊόν της διαδικασίας παραγωγής τυριού. Το συμπύκνωμα πρωτεΐνης ορού γάλακτος ως τελικό ξηρό προϊόν να περιέχει περισσότερο από 25% πρωτεΐνη. Για να μπορέσει κανείς να λάβει αυτό το προϊόν, από τον παστεριωμένο ορό γάλακτος απομακρύνεται επαρκής ποσότητα μη πρωτεϊνικών συστατικών. Η πρωτεΐνη ορού γάλακτος είναι διαλυτή σε νερό σε μεγάλα ποσοστά, γι' αυτό και έχει την ικανότητα να σχηματίζει αφρό υψηλής ποιότητας. Έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση του όγκου του αφρού που σχηματίζεται από την πρωτεΐνη ορού διατηρείται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι η αύξηση που σχηματίζεται με τη χρήση αλβουμίνης, η οποία μειώνεται γρήγορα με την πάροδο του χρόνου. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην πρωτεΐνη ορού δεν εμφανίζονται ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις (Sangamithra et al., 2015).
- ✓ Πρωτεΐνη σόγιας: Η πρωτεΐνη σόγιας προέρχεται από το άλευρο σόγιας όταν το συγκεκριμένο άλευρο έχει αποφλοιωθεί και έχουν απομακρυνθεί τα λίπη. Γενικά, με τη χρήση της συγκεκριμένης πρωτεΐνης δεν παρατηρείται η δημιουργία σταθερών αφρών. Έχει παρατηρηθεί ότι η πρωτεΐνη σόγιας έχει κακές αφριστικές ιδιότητες όπως ο σχηματισμός αφρού και η απορροή αφρού, πιθανόν λόγω της συμπαγής τριτοταγής δομής της (Sangamithra et al., 2015).
- ✓ Πρωτεΐνη αρακάς: Ο αρακάς είναι μια πλούσια πηγή πρωτεϊνών, βιταμινών, μετάλλων, αμύλου και φυτικών ινών. Οι πρωτεΐνες αρακά λαμβάνονται με

εκχύλιση από σπόρους του κίτρινου αρακά *Pisum sativum*. Οι ξηροί σπόροι του συγκεκριμένου φυτού διαθέτουν περίπου 20-25% ακατέργαστη πρωτεΐνη. Η απομονωμένη πρωτεΐνη αρακά (PPI) είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο συστατικό τροφής, καθώς περίπου το 80% της περιεκτικότητας της είναι πρωτεΐνη. Η PPI έχει πολλές λειτουργικές ιδιότητες όπως γαλακτωματοποίηση, αφρισμός, ζελατινοποίηση, ικανότητα συγκράτησης νερού και απορρόφηση λίπους (Sangamithra et al., 2015).

1.1.3.5. Σταθεροποιητές αφρού

Οι σταθεροποιητές αφρού είναι συστατικά που μειώνουν την αστάθεια του αφρού. Γενικά, πολυσακχαρίτες χρησιμοποιούνται κυρίως ως σταθεροποιητές. Πολλοί πολυσακχαρίτες, επειδή είναι υδρόφιλοι, δεν απορροφώνται στη διεπιφάνεια υγρού-αέρα. Ωστόσο, μελέτες έχουν δείξει ότι οι ενώσεις αυτές ενισχύουν την σταθερότητα των αφρών. Οι σταθεροποιητές δρουν είτε αυξάνοντας το ιξώδες της συνεχούς φάσης είτε σχηματίζοντας ένα τρισδιάστατο δίκτυο που καθυστερεί την κίνηση των συστατικών μέσα στον αφρό. Ο συνδυασμός πρωτεϊνών και πολυσακχαριτών δίνει μια καθαρή έλξη μεταξύ των δύο ειδών μακρομορίων (Sangamithra et al., 2015).

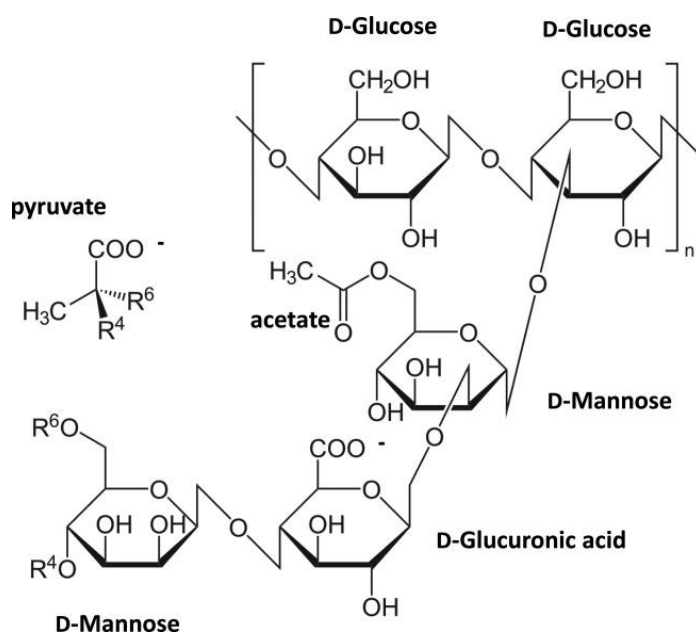
- ✓ Καρβοξυμεθυλική κυτταρίνη (CMC): Η κυτταρίνη είναι ένας γραμμικός, μη διακλαδισμένος πολυσακχαρίτης που περιέχει μονάδες γλυκοζυλίου (Hardy & Jideani, 2015). Η καρβοξυμεθυλική κυτταρίνη είναι ένα υδρόφοβο παράγωγο κυτταρίνης, με σκελετό κυτταρίνης που αποτελείται από μονομερή γλυκοπυρανόζης και τις υδροξυλομάδες τους δεσμευμένες σε ομάδες καρβοξυμεθυλίου. Το CMC έχει πολλά λειτουργικά χαρακτηριστικά, όπως η χρήση του σε προϊόντα διατροφής ως πηκτικός παράγοντας ή τροποποιητής ιξώδους, σταθεροποιητής και γαλακτωματοποιητής. Ενσωματώνεται κυρίως στα τρόφιμα ως άλας νατρίου. Το CMC θεωρείται κατάλληλος σταθεροποιητής για την παραγωγή μηχανικά και θερμοδυναμικά σταθερού αφρού. Ως εκ τούτου, το CMC είναι ένας από τους ευρέως χρησιμοποιούμενους σταθεροποιητές αφρού στις βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων (Sangamithra et al., 2015).



Σχήμα 3. Δομή της καρβοξυμεθυλοκυτταρίνης.

- ✓ Κόμμι Ξανθάνης: Το κόμμι ξανθάνης ανήκει στην ομάδα των πολυσακχαριτών. Χρησιμοποιείται συχνά ως πρόσθετο τροφίμων από τις βιομηχανίες.

Προέρχεται από τη ζύμωση των σακχάρων από το βακτήριο *Xanthomonas campestris* και είναι υδρόφιλο μόριο (Sangamithra et al., 2015). Η δομή της κύριας αλυσίδας του κόμμεος ξανθάνης αποτελείται από μονάδες κελλοβιόζης. Η κελλοβιόζη είναι σταθερή έναντι των μεταβολών του pH, της θερμοκρασίας και της διατμητικής τάσης. Η κελλοβιόζη αποτελείται από δύο μόρια γλυκόζης ενωμένα με β-γλυκοζιτικό δεσμό. Οι πλευρικές αλυσίδες του κόμμεος ξανθάνης είναι τρισακχαρίτες. Ο τρισακχαρίτης αποτελείται από ένα μόριο d-μαννόζη που συνδέεται με β-(1,4) δεσμό με ένα μόριο d-γλυκουρονικού οξέος. Το μόριο αυτό συνδέεται με ένα μόριο d-μαννόζης με β-(1,2) δεσμό. Η κάθε πλευρική αλυσίδα συνδέεται με την κύρια αλυσίδα με α- (1,3) δεσμό. (Nasrollahzadeh et al., 2021). Η ξανθάνη διαλύεται εύκολα στο νερό, οπότε η θερμοκρασία του νερού δεν παίζει σημαντικό ρόλο στη διαλυτότητα της ξανθάνης. Αυτή η ιδιότητά της, καθώς και ότι είναι καλός σταθεροποιητής, την έχουν κάνει να χρησιμοποιείται ευρέως από την βιομηχανία τροφίμων (Sangamithra et al., 2015).



Σχήμα 4. Δομή του κόμμεος ξανθάνης.

1.1.4. Ξήρανση με ψεκασμό (spray drying)

1.1.4.1. Γενικά

Η ξήρανση με ψεκασμό είναι μια τεχνική επεξεργασίας αιωρούμενων σωματιδίων (SPP). Είναι μια σημαντική μέθοδος ξήρανσης υγρών τροφίμων στον δυτικό κόσμο και έχει συνδεθεί έντονα με τις γαλακτοβιομηχανίες λόγω του προϊόντος σκόνη γάλακτος (Filková et al., 2014). Η ξήρανση με ψεκασμό είναι μια διεργασία που μετατρέπει το υγρό υλικό σε ξηρό προϊόν με τη βοήθεια ενός μέσου ξήρανσης (Selvamuthukumar et al., 2020).

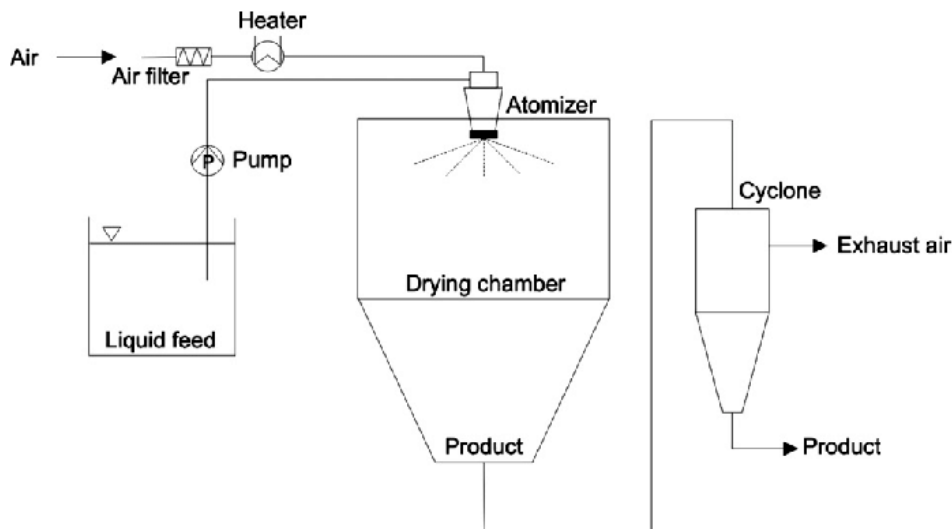
Ένα πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη ένα θερμοευαίσθητο, μη θερμοευαίσθητο και ανθεκτικό στην θερμότητα υγρό, διατηρώντας την ποιότητά του. Τα σωματίδια του παραγόμενου προϊόντος έχουν ελεγχόμενο μέγεθος, σχήμα και περιεκτικότητα σε υγρασία καθώς και ποιότητα. Η διάρκεια ζωής του προϊόντος είναι σχετικά μεγάλη μιας και η ενεργότητα νερού είναι χαμηλή. Η λειτουργία του μηχανήματος είναι συνεχής και περιέχει σχετικά απλό εξοπλισμό (Filkoná et al., 2014; Selvamuthukumaran et al., 2020).

Ένα από τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδους ξήρανσης είναι ότι δεν μπορεί να διαχειριστεί υλικά, τα οποία έχουν υψηλή πυκνότητα. Γενικά, το υλικό που θέλουμε να ξηραθεί πρέπει να είναι σε τέτοια μορφή ώστε να μπορεί να γίνει η άντλησή του (Filkoná et al., 2014). Κατά τη διάρκεια της διεργασίας παρατηρείται απώλεια του προϊόντος με αποτέλεσμα να μην έχει πολύ υψηλή απόδοση. Η απώλεια σκόνης στον ξηραντήρα οφείλεται κυρίως στην προσκόλληση του δείγματος στο τοίχωμα του ξηραντήρα, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε σάκχαρα (Barbosa et al., 2015; Goula & Adamopoulos, 2010; Selvamuthukumaran et al., 2020). Επιπλέον, αν η μονάδα είναι σχεδιασμένη ώστε να παράγει μικρά σωματίδια, τότε μπορεί να μην είναι σε θέση να παράγει πιο χονδροειδή σωματίδια και το αντίστροφο. Όσον αφορά το οικονομικό μέρος, η αρχική επένδυση είναι υψηλότερη από ότι άλλοι ξηραντήρες και η ανάκτηση και συλλογή του προϊόντος αυξάνουν το κόστος ξήρανσης (Filkoná et al., 2014; Selvamuthukumaran et al., 2020).

1.1.4.2. Διεργασία ψεκασμού

Η ξήρανση με ψεκασμό αποτελείται από τέσσερα κύρια στάδια: τον ψεκασμό της υγρής τροφοδοσίας στον θάλαμο ξήρανσης, την επαφή μεταξύ του υγρού που ψεκάζεται και ρεύματος θερμού αέρα, την εξάτμιση της υγρασίας από τα σταγονίδια και τον διαχωρισμό των ξηρών σωματιδίων (Selvamuthukumaran et al., 2020).

Στη μέθοδο αυτή, αρχικά, το υγρό μέσω μιας αντλίας τροφοδοτείται στην συσκευή ψεκασμού, η οποία μπορεί να είναι ψεκαστήρας περιστροφικού δίσκου, ακροφύσιο πίεσης ή ακροφύσιο υπερήχων, και συνήθως βρίσκεται στην κορυφή του θαλάμου ξήρανσης. Ο αέρας, που θα συμβάλει στην ξήρανση, αντλείται από το περιβάλλον και διοχετεύεται μέσω του θερμαντήρα στον διανομέα αέρα. Το υγρό ψεκάζεται σε σταγονίδια, τα οποία δημιουργούνται στον ατμοποιητή και ξηραίνονται σε μεμονωμένα σωματίδια όταν έρθουν σε επαφή με ζεστό αέρα, ο οποίος ψύχεται. Η εξάτμιση του νερού από το υγρό υλικό γίνεται με γρήγορο ρυθμό, δηλαδή σε μικρό χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να διατηρηθεί η χαμηλή θερμοκρασία στα σταγονίδια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι δυνατή η εφαρμογή υψηλών θερμοκρασιών στον αέρα ξήρανσης χωρίς να επηρεαστεί το προϊόν. Αφού το δείγμα ξηραθεί στο θάλαμο, το μεγαλύτερο μέρος της σκόνης καταλήγει στον πυθμένα του θαλάμου. Από τον πυθμένα μεταφέρεται μέσω του αέρα στον κυκλώνα. Στον κυκλώνα θα πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός της σκόνης από τον αέρα. Τα σωματίδια απομακρύνονται από το κάτω μέρος του κυκλώνα μέσω μιας περιστροφικής βαλβίδας έτσι ώστε να συλλεχτούν ή να συσκευαστούν αργότερα (Barbosa & Teixeira, 2016; Filkoná et al., 2014).



Σχήμα 5. Τυπικό σύστημα ξήρανσης με ψεκασμό.

Ο θερμός αέρας που εισέρχεται στον θάλαμο ξήρανσης μπορεί να ρέει με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Η ροή του αέρα και του ψυχρού υλικού μπορεί να είναι αντίθετες, παράλληλες ή η ροή να είναι μικτή. Στην περίπτωση που το υλικό περιέχει ενώσεις ευαίσθητες στην θερμοκρασία, προτιμότερο είναι οι ροές να έχουν την ίδια κατεύθυνση. Με αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται η θερμική υποβάθμιση καθώς η τελική σκόνη εκτίθεται σε μέτρια θερμοκρασία (Shishir & Chen, 2017).

1.1.4.3. Βοηθητικά μέσα ξήρανσης

Τα προϊόντα που ξηραίνονται με ψεκασμό ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα μη κολλώδη και τα κολλώδη προϊόντα. Τα κολλώδη προϊόντα είναι γενικά δύσκολο να ξηραθούν με ψεκασμό, λόγω της υγροσκοπικότητας και της θερμοπλαστικότητας τους (CORTÉS R. et al., 2017). Κατά τη διαδικασία ξήρανσης μπορεί να παραμείνουν ως σιρόπι ή να κολλήσουν στο τοίχωμα του ξηραντήρα ή να σχηματίσουν ανεπιθύμητα συσσωματώματα στον θάλαμο ξήρανσης και στο σύστημα μεταφοράς. Το πρόβλημα της κολλώδους σκόνης οφείλεται κυρίως στη χαμηλή θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) των σακχάρων χαμηλού μοριακού βάρους που υπάρχουν σε τέτοια προϊόντα, κυρίως σακχαρόζη, γλυκόζη και φρουκτόζη. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι οι σκόνες που φτιάχνονται από χυμό φρούτων (Barańska et al., 2020; Goula & Adamopoulos, 2010). Η υαλώδης μετάπτωση συμβαίνει όταν η θερμοκρασία αυξάνεται σε ένα εύρος από 10°C έως 20°C πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του προϊόντος. Για την καλύτερη σταθερότητα, η θερμοκρασία επεξεργασίας πρέπει να είναι κάτω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης (Shishir & Chen, 2017).

Μια λύση για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό είναι η προσθήκη ουσιών που θα βοηθήσουν στη ξήρανση, καθώς αυξάνουν την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Τέτοιες ουσίες είναι οι μαλτοδεξτρίνες, η γλυκόζη, η πρωτεΐνη σόγιας και το αραβικό κόμμι (Barańska et al., 2020; Goula & Adamopoulos, 2010). Υπάρχουν αναφορές ότι

οι πολυσακχαρίτες και οι πρωτεΐνες θα μπορούσαν να δράσουν συνεργιστικά ως προς τις ιδιότητες των γαλακτωμάτων τροφίμων. Ως εκ τούτου, πολυστρωματικά γαλακτώματα που προκύπτουν από την δράση φυσικών πολυσακχαριτών και πρωτεϊνών έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την ενθυλάκωση των βιοδραστικών ενώσεων, βελτιώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα και τη σταθερότητά τους στην ενθυλάκωση (Hu et al., 2017).

- ✓ Μαλτοδεξτρίνη: Η μαλτοδεξτρίνη είναι πολυσακχαρίτης και είναι ο πιο κοινός φορέας ξήρανσης γιατί το κόστος της είναι πολύ χαμηλό. Επιπλέον, έχει υψηλή διαλυτότητα στο νερό με χαμηλό ιξώδες και ήπια γεύση. Η μαλτοδεξτρίνη είναι πιο αποτελεσματική στην προστασία της γεύσης, του χρώματος και των βιοδραστικών ενώσεων κάτω από αντίξοες συνθήκες περιβάλλοντος (SAIKIA et al., 2014). Τα ισοδύναμα δεξτρόζης (DE) σχετίζονται στενά με το μέσο μοριακό τους βάρος. Όσο χαμηλότερο είναι το ισοδύναμο δεξτρόζης, τόσο υψηλότερη θα είναι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Barbosa & Teixeira, 2016).
- ✓ Αραβικό κόμμι: Το αραβικό κόμμι είναι ένας αποτελεσματικός φορέας λόγω των ιδιοτήτων του ως γαλκτοματοποιητής, καθώς έχει μικρή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη στη σύνθεσή του. Παρουσιάζει υψηλή διαλυτότητα και χαμηλό ιξώδες σε υδατικό διάλυμα, γεγονός που διευκολύνει τη διαδικασία ξήρανσης με ψεκασμό (Fazaeli et al., 2012). Άλλη μία σημαντική ιδιότητά του είναι ότι είναι σταθερό σε μεγάλο εύρος pH (2-8) και θερμοκρασία (30°C-90°C) (Hu et al., 2017).

1.1.5. Λυοφιλίωση (freeze drying)

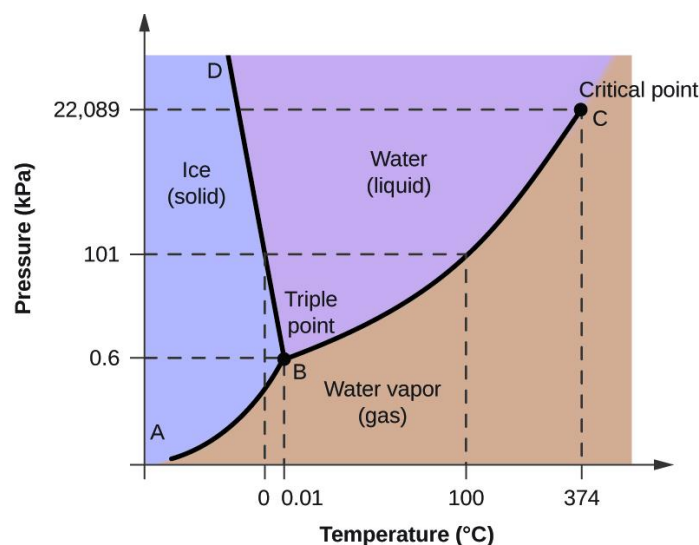
1.1.5.1. Γενικά

Στις βιομηχανίες, οι περισσότεροι ξηραντήρες χρησιμοποιούν ακόμα και σήμερα ως μέσο ξήρανσης ζεστό αέρα. Όμως, είναι γνωστό ότι η ξήρανση με ζεστό αέρα προκαλεί πολλές αρνητικές και μη επιθυμητές αλλαγές στην ποιότητα του παραγόμενου αποξηραμένου προϊόντος (Uscanga et al., 2020). Τέτοιες αλλαγές είναι ο αποχρωματισμός, η συρρίκνωση, η παραμόρφωση του σχήματος και η απώλεια θρεπτικών ουσιών. Για την αποφυγή αυτών των δυσμενών επιπτώσεων, δοκιμάζονται και χρησιμοποιούνται διαφορετικές διεργασίες ξήρανσης, όπως για παράδειγμα η λυοφιλίωση (Tsotsas & Mujumdar, 2014). Κατά κανόνα, με την λυοφιλίωση παράγεται προϊόν, του οποίου η ποιότητα είναι καλύτερη από ότι αν η ξήρανση πραγματοποιούταν από κάποια άλλη διεργασία ξήρανσης. Ένας σημαντικός παράγοντας της καλύτερης ποιότητας είναι η δομική ακαμψία που προκαλείται λόγω της κατάψυξης του υλικού πριν πραγματοποιηθεί η απομάκρυνση της υγρασίας. Λόγω αυτής της ακαμψίας δεν παρατηρείται η κατάρρευση των στερεών που παρέμειναν μετά την διαδικασία της ξήρανσης. Αμέσως μετά το τέλος της ξήρανσης, το προϊόν έχει πορώδη μη συρρικνωμένη δομή (Liapis & Bruttini, 2014).

Εάν η διεργασία αυτή γίνει ορθά, τότε τα προϊόντα μπορούν να αντέξουν μεγάλο χρονικό διάστημα διατηρώντας όλες τις αρχικές φυσικές, χημικές, βιολογικές και οργανοληπτικές τους ιδιότητες (Maria de Carvalho Tavares et al., 2019; Uscanga-Ramos et al., 2021). Επίσης, μπορεί να γίνει η ανασύστασή τους, ύστερα από επαναδιάλυση της σκόνης σε νερό, δίνοντας έτσι στο ανασυσταμένο προϊόν δομή και εμφάνιση όσο το δυνατόν πιο κοντά στο αρχικό υλικό (Barbosa et al., 2015; Liapis & Bruttini, 2014).

1.1.5.2. Διεργασία λυοφιλίωσης

Η λυοφιλίωση βασίζεται στην εξάχνωση, δηλαδή στην μετατροπή του πάγου απευθείας σε αέριο (Barbosa et al., 2015; Uscanga-Ramos et al., 2021). Αφού το νερό ή γενικά οποιοσδήποτε διαλύτης εξαχνωθεί σε ατμό, αφαιρείται από τον θάλαμο ξήρανσης όπου λαμβάνει χώρα η διαδικασία ξήρανσης. (Liapis & Bruttini, 2014). Το υλικό που θα ξηραθεί ψύχεται μέχρι να παγώσει όλο το νερό που περιέχει. Στη συνέχεια, ένα ξηρό αέριο προκαλεί την εξάχνωση. Συχνά, η πίεση περιβάλλοντος μέσα στο θάλαμο ξήρανσης μειώνεται προκειμένου να επιταχυνθεί η διαδικασία εξάχνωσης (Koroishi et al., 2008; Wernecke & Wernecke, 2013). Για άμεση εξάχνωση, η θερμοκρασία και η μερική πίεση ατμών είναι το σημείο πάγου κάτω από το τριπλό σημείο του νερού. Το τριπλό σημείο του νερού είναι περίπου 0°C και 4,59mm Hg απόλυτη πίεση (Sokhansanj & Jayas, 2014).



Σχήμα 6. Διάγραμμα φάσεων του νερού, στο οποίο απεικονίζεται το τριπλό σημείο.

Η λυοφιλίωση είναι μια συνθέτη διεργασία που περιλαμβάνει τρία βήματα. Αρχικά είναι το στάδιο κατάψυξης. Ακολουθεί το στάδιο της πρωτογενούς ξήρανσης και τέλος η δευτερογενής ξήρανση (Koroishi et al., 2008; Liapis & Bruttini, 2014).

1.1.5.3. Στάδιο κατάψυξης

Στο στάδιο αυτό, το υλικό ψύχεται σε τέτοια θερμοκρασία έτσι ώστε όλο το υλικό να είναι σε κατεψυγμένη κατάσταση. Στο τέλος αυτού του σταδίου, έχει γίνει ο

διαχωρισμός του κατεψυγμένου νερού, σε μορφή κρυστάλλων πάγου, που πρέπει να αφαιρεθούν, και διαλυμένων ουσιών. Οι κρύσταλλοι πάγου που θα σχηματιστούν σε αυτό το βήμα παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχήμα, το μέγεθος και την κατανομή των πόρων που θα σχηματιστούν στο επόμενο στάδιο στην εξωτερική επιφάνεια του υλικού, που λέγεται αποξηραμένη επιφάνεια. Το μέγεθος των κρυστάλλων επηρεάζει τον ρυθμό μάζας και θερμότητας στην αποξηραμένη επιφάνεια (Liapis & Bruttini, 2014).

1.1.5.4. Πρωτογενές στάδιο ξήρανσης

Στο πρωτογενές στάδιο ξήρανσης, ο διαλύτης που έχει καταψυχθεί, απομακρύνεται με εξάχνωση. Ο διαλύτης αυτός συνήθως είναι το νερό στα τρόφιμα. Η εξάχνωση πραγματοποιείται με την παροχή θερμότητας στο προϊόν. Η θερμοκρασία της διεπιφάνειας εξάχνωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του πάγου, αλλά όχι πολύ υψηλότερη, έτσι ώστε να μην παρατηρηθεί τήξη του προϊόντος. Για να συμβεί αυτό, η πίεση στο μηχάνημα όπου πραγματοποιείται η ξήρανση, πρέπει να είναι μικρότερη ή κοντά στην πίεση ατμών ισορροπίας του κατεψυγμένου διαλύτη. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που γίνεται επεξεργασία καθαρού νερού, τότε η εξάχνωση γίνεται στους 0°C και σε απόλυτη πίεση 4,58mm Hg. Όμως, το νερό δεν είναι καθαρό αλλά περιέχει και άλλες ουσίες. Έτσι, το υλικό ψύχεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τους 0°C ώστε το νερό να βρίσκεται σε κατεψυγμένη κατάσταση. Στο στάδια της εξάχνωσης η θερμοκρασία είναι συνήθως στους -10°C και η απόλυτη πίεση 2mm Hg ή και μικρότερη. Με το που αρχίσει η εξάχνωση, η θερμοκρασία του κατεψυγμένου προϊόντος μειώνεται. Εάν δεν υπάρχει πηγή θερμότητας, τότε η πίεση ατμών του νερού, στη θερμοκρασία που βρίσκεται το προϊόν, φτάνει στην ίδια τιμή με αυτή της μερικής πίεσης των υδρατμών στον θάλαμο ξήρανσης. Επομένως, το σύστημα φτάνει στην ισορροπία και δεν θα προκύψει πρόσθετη εξάχνωση νερού από το προϊόν. Έτσι, προκειμένου να υπάρχει συνεχής εξάχνωση του νερού από το προϊόν, πρέπει να παρέχεται η λανθάνουσα θερμότητα εξάχνωσης στο υλικό από μια πηγή θερμότητας. Η θερμότητα παρέχεται στο προϊόν συνήθως με αγωγή, συναγωγή ή ακτινοβολία. Η αγωγή πραγματοποιείται με επαφή μεταξύ θερμαινόμενων πλακών και των δοχείων υποστήριξης των προϊόντων. Η εξάχνωση ξεκινάει από την εξωτερική επιφάνεια του υλικού και σχηματίζεται ένα πορώδες αποξηραμένο προϊόν. Το τέλος του σταδίου αυτού λαμβάνει χώρα όταν δεν υπάρχει πλέον άλλη ποσότητα κατεψυγμένου διαλύτη για εξάχνωση. (Liapis & Bruttini, 2014).

1.1.5.5. Δευτερογενές στάδιο ξήρανσης

Στο δευτερογενές στάδιο ξήρανσης απομακρύνεται ο διαλύτης, ο οποίος δεν έχει καταψυχθεί. Το νερό αυτό ονομάζεται δεσμευμένο. Το στάδιο αυτό αρχίζει όταν έχει ολοκληρωθεί το πρωτογενές και περιλαμβάνει την απομάκρυνση, με τη μορφή υδρατμών, του δεσμευμένου νερού μέσα από τους πόρους του υλικού, μέσω εκρόφησης. Το νερό αυτό είναι δεσμευμένο στο κατεψυγμένο στρώμα του υλικού. Το στάδιο αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, χωρίς όμως να υπερβεί την

θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Όταν οι κρύσταλλοι είναι μικροί και ασυνεχείς, τότε ο ρυθμός μεταφοράς μάζας του υδρατμού μέσα από την αποξηραμένη επιφάνεια μπορεί να περιοριστεί. Αντίθετα, αν σχηματιστούν στο στάδιο της κατάψυξης μεγάλοι κρύσταλλοι οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους, τότε ο ρυθμός μεταφοράς μάζας μπορεί να είναι υψηλός με αποτέλεσμα το υλικό να ξηραίνεται πιο γρήγορα (Liapis & Bruttini, 2014).

1.2. Μεταπτώσεις Φάσεων

1.2.1. Γενικά

Πολλά στάδια επεξεργασίας και αποθήκευσης των τροφίμων περιλαμβάνουν μεταφορά θερμότητας. Γι' αυτό το λόγο είναι πολύ σημαντική η γνώση των ιδιοτήτων των τροφίμων. Γενικά, σκοπός των διεργασιών είναι η παρασκευή προϊόντων που να είναι επιθυμητά από τους καταναλωτές. Για να γίνει αυτό πρέπει να είναι γνωστή η συμπεριφορά των τροφίμων κατά τις μεταπτώσεις φάσεων. Τα τρόφιμα είναι ετερογενή και πολύπλοκα συστήματα στα οποία πραγματοποιούνται πολλές αντιδράσεις και είναι ασταθή εξαιτίας πολλών χημικών, φυσικών και βιολογικών μεταβολών. Το νερό και άλλα υγρά υφίστανται μεταπτώσεις φάσεων στα τρόφιμα λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας. Επίσης, τα στερεά συστατικά μπορεί να υποστούν μεταπτώσεις φάσεων οι οποίες οδηγούν σε δομικές μεταβολές (LeBail et al., 2003).

Οι μεταπτώσεις φάσεων χωρίζονται σε πρώτης τάξης και δεύτερης τάξης. Η μετάπτωση πρώτης τάξης σχετίζεται με μεταβάσεις των καταστάσεων στερεού-υγρού-αέριου. Συνηθισμένα παραδείγματα είναι οι μεταβάσεις από πάγο σε νερό, κρυστάλλωση, η ζελατινοποίηση αμύλου και η μετουσίωση πρωτεϊνών. Στις μεταπτώσεις δεύτερης τάξης εντάσσεται η υαλώδης μετάπτωση (LeBail et al., 2003).

1.2.2. Κρυστάλλωση και Τήξη

Η κρυστάλλωση και η τήξη είναι μεταπτώσεις φάσεων, οι οποίες πραγματοποιούνται μεταξύ των στερεών και υγρών φάσεων (Jouppila & Roos, 2009). Η λανθάνουσα θερμότητα, η οποία ελευθερώνεται κατά την κρυστάλλωση, είναι ίση με το ποσό θερμότητας που απαιτείται για την τήξη, στην ίδια θερμοκρασία (Roos & Drusch, 2015).

Η κρυστάλλωση ενός τήγματος πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες κάτω από τη θερμοκρασία τήξης και είναι μια σημαντική μετάπτωση φάσης που πραγματοποιείται σε διάφορα τρόφιμα κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας τους ή της αποθήκευσής τους. Η κρυστάλλωση πραγματοποιείται σε τρία στάδια που περιλαμβάνουν την πυρήνωση (nucleation), την ανάπτυξη των κρυστάλλων (propagation) και την ωρίμανση (maturation) (Roos & Drusch, 2015).

Η πυρήνωση περιλαμβάνει τη διάταξη ακαθόριστων μορίων σε μία ορισμένη κρυσταλλική φάση, ως αποτέλεσμα της ασταθούς κατάστασης που προκαλείται μετά τον υπερκορεσμό λόγω απομάκρυνσης του διαλύτη ή μείωση της θερμοκρασίας του διαλύματος ή του τήγματος (Van Hook, 1961). Η πυρήνωση οδηγεί στη δημιουργία

σταθερών πυρήνων, οι οποίοι στη συνέχεια θα αναπτυχθούν σε κρυστάλλους μέσω της διαδικασίας ανάπτυξης και ωρίμανσης (Roos & Drusch, 2015).

Μετά την πυρήνωση ακολουθεί η ανάπτυξη των κρυστάλλων. Για να πραγματοποιηθεί η ανάπτυξη των κρυστάλλων τα μόρια θα πρέπει να μπορούν να διαχέονται στην επιφάνεια των αυξανόμενων πυρήνων. Ο ρυθμός ανάπτυξης εξαρτάται από το βαθμό υπερκορεσμού, τη θερμοκρασία και την παρουσία ακαθαρσιών. Παρατηρείται καθυστέρηση ανάπτυξης σε υψηλά επίπεδα υπερκορεσμού και παρουσία ακαθαρσιών. Για παράδειγμα, όσο πιο καθαρό είναι τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός ανάπτυξης κρυστάλλων (Roos & Drusch, 2015).

Η ωρίμανση περιλαμβάνει ανακρυστάλλωση, η οποία οδηγεί στο σχηματισμό κρυστάλλων με χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση και κρυσταλλική τελειότητα (Jouppila & Roos, 2009).

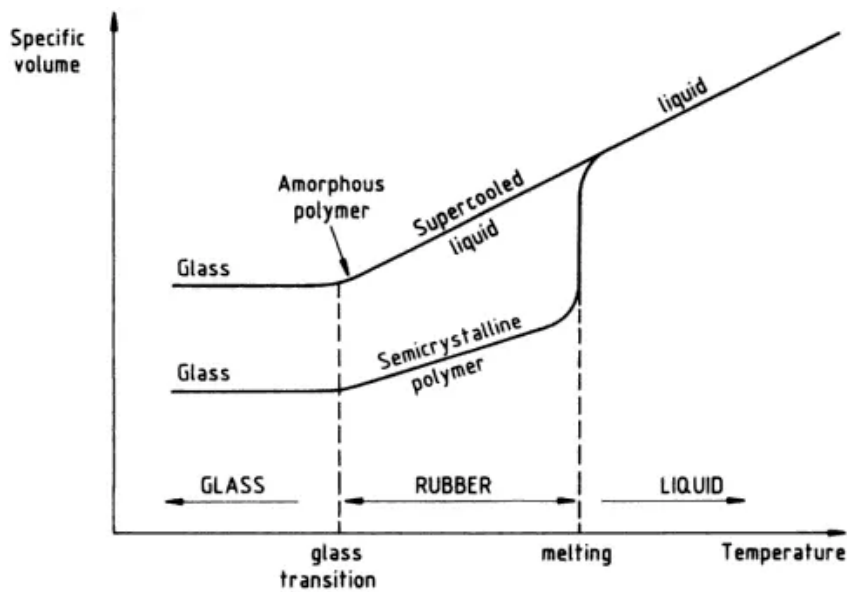
Ως θερμοκρασία τήξεως χαρακτηρίζουμε τη θερμοκρασία κατά την οποία ένα υλικό μεταβαίνει από τη στερεή στην υγρή κατάσταση. Τα περισσότερα τρόφιμα βρίσκονται σε άμορφη κατάσταση, η οποία είναι μια κατάσταση μη ισορροπίας, σε θερμοκρασίες κάτω από τη θερμοκρασία τήξης τους (Roos & Drusch, 2015).

1.2.3. Υαλώδης Μετάπτωση

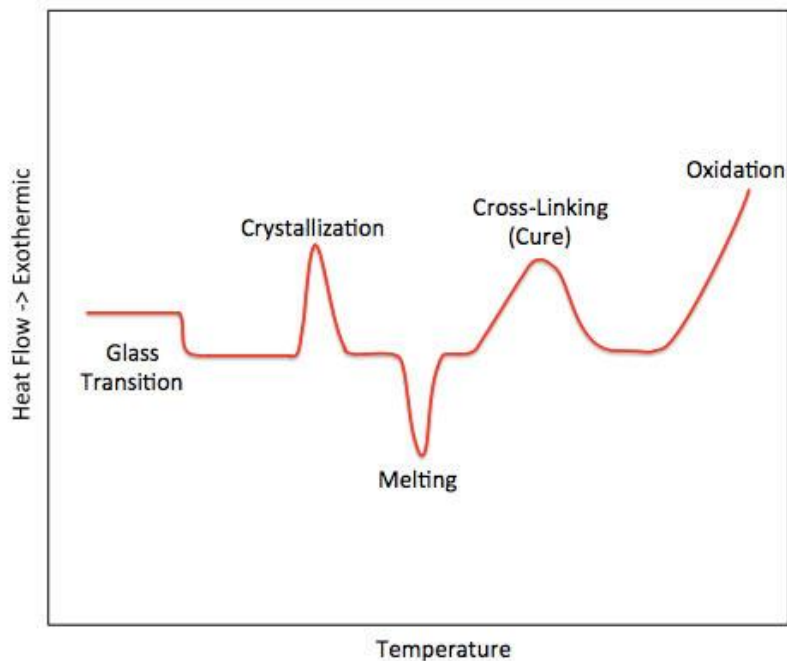
Ένα τρόφιμο μπορεί να βρίσκεται σε καθαρές άμορφες, καθαρές κρυσταλλικές ή μερικώς άμορφες δομές, δηλαδή μικτές άμορφες και κρυσταλλικές δομές. Οι κρυσταλλικές δομές έχουν μοριακή ευθυγράμμιση μεγάλης εμβέλειας, ενώ οι άμορφες δομές έχουν μοριακή ευθυγράμμιση μικρής εμβέλειας περιορισμένης τάξης (Nurhadi & Roos, 2016). Γενικά, η άμορφη κατάσταση είναι μια κατάσταση μη ισορροπίας σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τη θερμοκρασία τήξης ενός τροφίμου (Roos & Drusch, 2015).

Τα άμορφα υλικά στην υαλώδη κατάσταση έχουν υψηλό ιξώδες και είναι ιδιαίτερα εύθραυστα. Οι μοριακές κινήσεις τους περιορίζονται σε μικρές δονήσεις και περιστροφικές κινήσεις μικρής εμβέλειας. Τα τρόφιμα που βρίσκονται στην υαλώδη κατάσταση είναι ιδιαίτερα σταθερά και δεν υπόκεινται σε χημικές ή ενζυμικές μεταβολές που υποβαθμίζουν την ποιότητά τους (Liu-ring et al., 2007).

Σε χαμηλές θερμοκρασίες τα άμορφα υλικά είναι υαλώδη, είναι δηλαδή σκληρά και εύθραυστα. Αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει στην μετατροπή ενός τέτοιου υλικού στο λιγότερο παχύρρευστο, υπερψυγμένο υγρό (supercooled), όταν η θερμοκρασία υπερβεί την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g). Ως θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ορίζεται η θερμοκρασία στην οποία μια υαλώδης στερεή δομή αρχίζει να μαλακώνει και να αλλάζει σε τετηγμένη ελαστική κατάσταση (Bhandari & Howes, 1999). Αυτό προκαλείται από την έναρξη μιας συντονισμένης μοριακής κίνησης μεγάλης εμβέλειας. Οι κρυσταλλικές όμως περιοχές παραμένουν σκληρές σε θερμοκρασίες μεταξύ της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης και της θερμοκρασίας τήξης (Roos & Drusch, 2015).



Σχήμα 7: Σχηματικό διάγραμμα αλλαγής της φυσικής κατάστασης υλικών λόγω της θερμοκρασίας.



Σχήμα 8: Τυπική καμπύλη DSC που διακρίνει τις κύριες μεταβολές.

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης θεωρείται ως μία από τις πιο σημαντικές φυσικές παραμέτρους που καθορίζουν τη φυσική κατάσταση των υλικών, στην οποία το υλικό υποβάλλεται σε αλλαγή κατάστασης, αλλά όχι φάσης.

Κατά την υαλώδη μετάπτωση, οι πιο σημαντικές μεταβολές που παρατηρούνται είναι η αύξηση της κίνησης των μορίων και η μείωση του ιξώδους που οδηγούν σε κατάρρευση της δομής του προϊόντος κατά την επεξεργασία και αποθήκευση. Όταν ένα τρόφιμο δέχεται επεξεργασία σε υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτή της υαλώδους

μετάπτωσης είναι πολύ πιθανό να συμβεί ελάχιστη ή μικρή κατάρρευση, δηλαδή μείωση του πορώδους και μείωση του συνολικού όγκου του τροφίμου. Όσο πιο κοντά στο σημείο υαλώδους μετάπτωσης βρίσκεται μια διεργασία ξήρανσης, τόσο μικρότερη θα είναι η κατάρρευση. Κάτω από το σημείο μετάπτωσης δεν παρατηρείται κατάρρευση (Bhandari & Howes, 1999).

Η θερμοκρασία και το εύρος της υαλώδους μετάπτωσης των τροφίμων εξαρτώνται από το μοριακό μέγεθος, τη σύσταση και την περιεκτικότητα σε νερό. Ο ρυθμός θέρμανσης επηρεάζει, επίσης, τις τιμές της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μειώνεται με τη μείωση του μοριακού μεγέθους των ομοπολυμερών ή την αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό (Jouppila & Roos, 2009). Η προσθήκη συστατικών χαμηλού μοριακού βάρους σε κάποιο τρόφιμο ή η μείωση του μεγέθους των μορίων του πολυμερούς οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό μειώνει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Bhandari & Howes, 1999).

Τα περισσότερα προϊόντα που ανακτώνται από την ξήρανση, ανεξαρτήτως από την μέθοδο με την οποία έχουν παραχθεί, αποτελούνται από συστατικά μικρού μοριακού βάρους, όπως τα σάκχαρα, αλλά και από πολυμερή των τροφίμων (πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες) (Bhandari & Howes, 1999).

1.3. Ενεργότητα Νερού (a_w)

1.3.1. Γενικά

Η ενεργότητα νερού είναι ο λόγος της μερικής πίεσης των ατμών του περιβάλλοντος σε ισορροπία με το τρόφιμο (p) προς την τάση ατμών του καθαρού νερού (p^o), δηλαδή $a_w = \frac{p}{p^o} = \frac{RH}{100}$.

Ο όρος RH αναφέρεται στην σχετική υγρασία του χώρου σε ισορροπία με το τρόφιμο. Η σχετική υγρασία του τροφίμου είναι η ενεργότητα νερού του τροφίμου εκφρασμένη σε ποσοστό επί τις 100 (%) (Okos et al., 2006).

Σημαντικό ρόλο στην ποιότητα και την ασφάλεια των τροφίμων παίζει η ενεργότητα του νερού. Κατά τη διάρκεια αποθήκευσης των τροφίμων σε περιβάλλοντα συγκεκριμένης υγρασίας και θερμοκρασίας, πραγματοποιούνται χημικές και φυσικές μεταβολές, οι οποίες επηρεάζουν την υφή, τη δομή και άλλες ιδιότητές τους. Οι αλλαγές αυτές σχετίζονται με τη θερμοδυναμική κατάσταση του νερού στα τρόφιμα (Khalloufi et al., 2000; Moreyra & Peleg, 1981). Οι περισσότερες από τις βιοχημικές, μικροβιολογικές, ενζυμικές και μη-ενζυμικές αντιδράσεις ελέγχονται από την ενεργότητα νερού, η οποία είναι, ως εκ τούτου, μία χρήσιμη παράμετρος για την πρόβλεψη της σταθερότητας και της διάρκειας ζωής των τροφίμων. Αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα ελέγχου της μικροβιακής αλλοίωσης και προβλέπει τη σταθερότητα των προϊόντων, ως προς τις φυσικές τους ιδιότητες, την ταχύτητα των αντιδράσεων υποβάθμισης και τη μικροβιακή ανάπτυξη. Η ενεργότητα νερού παίζει ρόλο στον χρόνο ζωής, την ασφάλεια, την υφή, τη γεύση και το άρωμα των τροφίμων (Okos et al.,

2006). Συνδέεται, επίσης, με πολλές ιδιότητες των τροφίμων, όπως είναι η τραγανότητα των τροφίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, η κρυστάλλωση των συστατικών των τροφίμων, η κατάρρευση της δομής των αφυδατωμένων προϊόντων και η συσσωμάτωση της σκόνης. Η ενεργότητα νερού εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ενεργότητα νερού ενός τροφίμου είναι συγκεκριμένη για το κάθε προϊόν. Ορισμένα προϊόντα παρουσιάζουν αύξηση της ενεργότητας νερού με την αύξηση της θερμοκρασίας, σε άλλα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ τα περισσότερα τρόφιμα με υψηλή υγρασία έχουν αμελητέα μεταβολή με τη θερμοκρασία.

1.4. Ισόθερμες Καμπύλες Ρόφησης

1.4.1. Γενικά

Η υγρασία παίζει σπουδαίο ρόλο στην υαλώδη μετάπτωση και στην κρυστάλλωση των άμορφων σκονών (Shrestha et al., 2007). Όταν ένα ξηρό προϊόν μπορεί να δεσμεύει νερό, ενώ η πίεση ατμών μειώνεται, τότε αυτό ονομάζεται υγροσκοπικό (Mujumdar, 2014a). Η περιεκτικότητα σε υγρασία ενός στερεού σε ισορροπία με αέρα δεδομένης υγρασίας και θερμοκρασίας ονομάζεται περιεκτικότητα σε υγρασία ισορροπίας (EMC). Ένα διάγραμμα EMC σε μια δεδομένη θερμοκρασία σε σχέση με τη σχετική υγρασία ονομάζεται ισόθερμη καμπύλη ρόφησης (Jangam & Mujumdar, 2010). Με άλλα λόγια, η ισόθερμη καμπύλη ρόφησης περιγράφει τη σχέση μεταξύ της ενεργότητας νερού και της περιεκτικότητας σε υγρασία ισορροπίας ενός συγκεκριμένου τροφίμου και για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία (Shrestha et al., 2007). Όταν ένα στερεό εκτίθεται σε αέρα αυξανόμενης υγρασίας, τότε λαμβάνουμε την ισόθερμη καμπύλη προσρόφησης. Αυτό που προκύπτει με την έκθεση του στερεού σε αέρα φθίνουσας υγρασίας είναι γνωστό ως ισόθερμη καμπύλη εκρόφησης (Jangam & Mujumdar, 2010). Οι ισόθερμες καμπύλες προσρόφησης μπορούν να παρέχουν δεδομένα σχετικά με τη σταθερότητα της διάρκειας ζωής ενός δεδομένου τροφίμου.

1.4.2. Μέθοδοι προσδιορισμού ισόθερμων καμπυλών

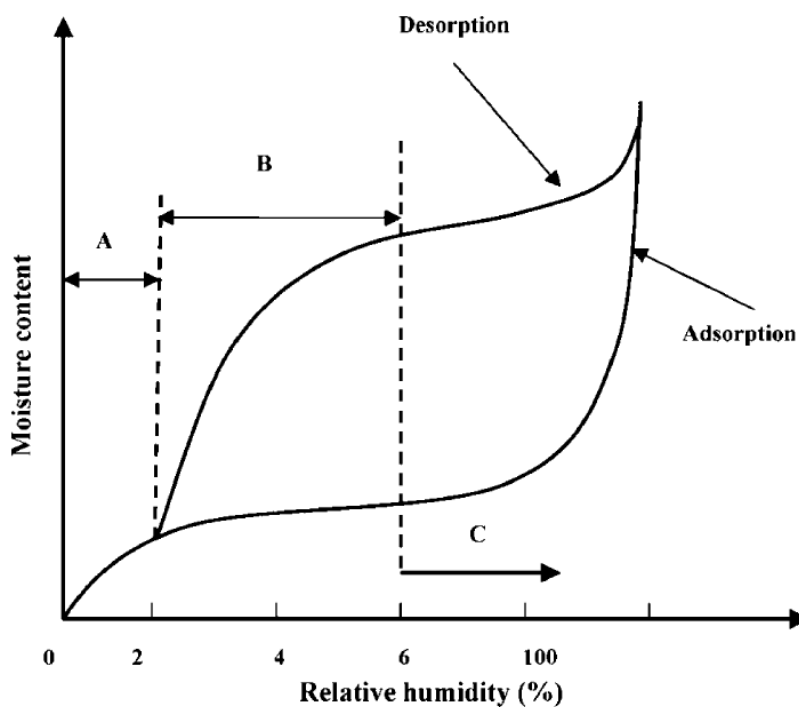
Οι ισόθερμες καμπύλες προσρόφησης προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους. Τρεις από αυτές είναι η σταθμική, μανομετρική και υγρομετρική μέθοδος.

- ✓ Η σταθμική μέθοδος (gravimetric) είναι η πιο διαδεδομένη για την ευκολία της, το χαμηλό κόστος και τη δυνατότητα χειρισμού πολλών δειγμάτων ταυτόχρονα. Κατά τη μέθοδο αυτή, συγκεκριμένες ποσότητες υλικού τοποθετούνται σε περιβάλλον που έχει συγκεκριμένη σχετική υγρασία μέχρι να ισορροπήσουν. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση κορεσμένων διαλυμάτων αλάτων. Η ποσότητα του νερού που θα απορροφήσει ή θα αποβάλλει το υλικό εξαρτάται από την σχετική υγρασία που έχει το εκάστοτε περιβάλλον.
- ✓ Στην μανομετρική μέθοδο (manometric) γίνεται χρήση πολύ ευαίσθητων μανομέτρων για τη μέτρηση της τάσης ατμών του νερού σε ισορροπία με το υπό μελέτη τρόφιμο.

- ✓ Τέλος, στην υγρομετρική μέθοδο (hygrometric) σε συγκεκριμένη υγρασία γίνεται η μέτρηση της σχετικής υγρασίας που περιβάλλει το υλικό (Basu et al., 2006; Jangam & Mujumdar, 2010).

1.4.3. Τύποι καμπυλών

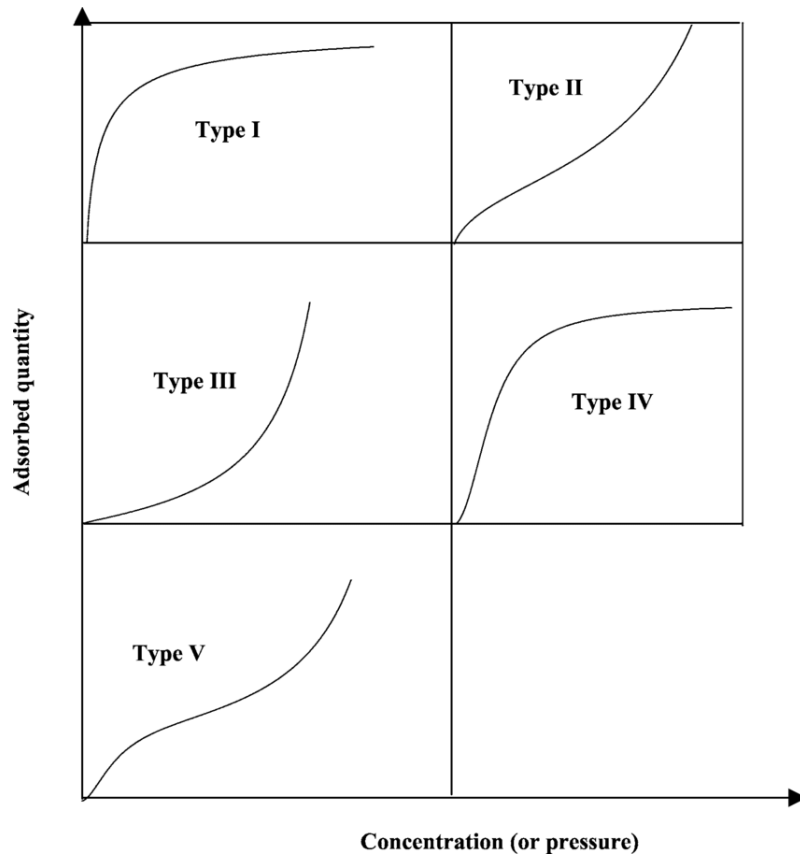
Μια ισόθερμη καμπύλη μπορεί τυπικά να χωριστεί σε τρεις περιοχές όπως φαίνεται στο Σχήμα 9. Το νερό στην περιοχή A αντιπροσωπεύει ισχυρά δεσμευμένο νερό. Το δεσμευμένο νερό περιλαμβάνει δομικό νερό (νερό με δεσμό H) και νερό μονοστοιβάδας, το οποίο απορροφάται από υδρόφιλες και πολικές ομάδες των συστατικών των τροφίμων (πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες κ.λπ.). Το δεσμευμένο νερό δεν μπορεί να παγώσει και δεν είναι διαθέσιμο για χημικές αντιδράσεις ή ως πλαστικοποιητής. Στην περιοχή B, τα μόρια του νερού συνδέονται λιγότερο σταθερά από ότι στην πρώτη ζώνη. Αυτή η κατηγορία του συστατικού νερού μπορεί να θεωρηθεί ως η συνεχής μετάβαση του δεσμευμένου στο ελεύθερο νερό. Οι ιδιότητες του νερού στην περιοχή C είναι κοντά σε εκείνες του ελεύθερου νερού που συγκρατείται σε κενά, τριχοειδή αγγεία, σχισμές και δεσμεύεται χαλαρά με τα τρόφιμα (Okos et al., 2006).



Σχήμα 9. Ισόθερμες καμπύλες ρόφησης-εκρόφησης.

Έχουν περιγράψει πέντε τύποι ισόθερμων καμπυλών. Ο τύπος 1 είναι η πολύ γνωστή ισόθερμη Langmuir, η οποία λαμβάνεται με την υπόθεση της μονομοριακής προσρόφησης αερίου από τα πορώδη στερεά σε έναν πεπερασμένο όγκο κενών. Ο τύπος 2 είναι η σιγμοειδής ισόθερμη που λαμβάνεται για διαλυτά προϊόντα, η οποία εμφανίζει ασυμπτωτική τάση καθώς η δραστηριότητα του νερού πλησιάζει το 1. Ο τύπος 3, γνωστός ως ισόθερμος Flory-Huggins, αντιπροσωπεύει έναν διαλύτη ή πλαστικοποιητή όπως η γλυκερίνη πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Η ισόθερμη τύπου 4 περιγράφει την προσρόφηση από ένα διογκώσιμο υδρόφιλο στερεό

έως ότου επιτευχθεί το μέγιστο των θέσεων ενυδάτωσης. Ο τύπος 5 είναι η πολυστρωματική ισόθερμη προσρόφησης BET, που παρατηρείται για την προσρόφηση υδρατμών σε άνθρακα. Οι δύο ισόθερμες που απαντώνται συχνότερα στα τρόφιμα είναι οι τύποι 2 και 4.



Σχήμα 10. Τύποι ισόθερμων ρόφησης.

1.4.4. Μαθηματικά μοντέλα για ισόθερμες καμπύλες

Για την κατανόηση της συμπεριφοράς ενός τροφίμου σε ένα περιβάλλον, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την ισόθερμη καμπύλη ρόφησης. Γι' αυτό το λόγο γίνεται χρήση διαφόρων μαθηματικών μοντέλων. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μαθηματικά μοντέλα φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Μαθηματικά μοντέλα για ισόθερμες ρόφησης

Όνομα

Μαθηματική εξίσωση

Langmuir

$$a_w * \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{X_0} \right) = \frac{1}{C * X_0} \quad (1)$$

Brunauer-Emmett-Teller
(BET)

$$X = \frac{X_m * C * a_w}{[(1 - a_w) * (1 + (C - 1) * a_w)]} \quad (2)$$

GAB	$X = \frac{X_m * C * a_w}{[(1 - K * a_w) * (1 - K * a_w + C * K * a_w)]} \quad (3)$
Peleg	$X = K_1 * a_w * n_1 + K_2 * a_w * n_2$
Oswin	$X = B_2 * \left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^{B_1} \quad (4)$
Τροποποιημένη Oswin	$a_w = \frac{1}{\left(\frac{B_2}{X}\right)^{B_1} + 1} \quad (5)$
Smith	$X = B_2 - B_1 * \ln(1 - a_w) \quad (6)$
Halsey	$a_w = e^{\left(\frac{B_2}{X^{B_1}}\right)} \quad (7)$
Τροποποιημένη Halsey	$a_w = e^{\left(\frac{B_2}{X^{B_1}}\right)} \quad (8)$
Henderson	$1 - a_w = e^{-B_2 * X^{B_1}} \quad (9)$
Τροποποιημένη Henderson	$1 - a_w = e^{B_2 * X^{B_1}} \quad (10)$
Kuhn	$X = \frac{B_1}{\ln a_w} + B_2 \quad (11)$
Iglesias and Chirife (1981)	$X = B_1 * \left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right) + B_2 \quad (12)$

Όπου a_w είναι η ενεργότητα νερού, X είναι η υγρασία που υπάρχει στο τρόφιμο ανά ξηρή μάζα (kg νερό/kg ξηρών στερεών), X_m είναι η περιεχόμενη υγρασία που αντιστοιχεί στο μονομοριακό στρώμα και $C, K, B_1, B_2, K_1, K_2, n_1, n_2$ είναι σταθερές (Basu et al., 2006; Okos et al., 2006). Γενικά τα πιο ευρέως διαδεδομένα μαθηματικά μοντέλα στα τρόφιμα είναι τα GAB και BET.

1.5. Μανταρίνι

1.5.1. Γενικά

Τα εσπεριδοειδή είναι φυτά, τα οποία ανήκουν στην οικογένεια Rutaceae και κυρίως στο γένος *Citrus*. Στην ομάδα αυτήν εντάσσονται η πορτοκαλιά, η μανταρινιά, η λεμονιά, η νεραντζιά και άλλα (Martí et al., 2009). Τα εσπεριδοειδή είναι χαμηλά και αειθαλή δέντρα, που ευδοκιμούν σε τροπικές ή ημιτροπικές και εύκρατες χώρες (Pandey et al., 2022). Ευνοούνται από το ζεστό και παραθαλάσσιο κλίμα, με κάποια υγρασία, ενώ η απότομη και παρατεταμένη πτώση της θερμοκρασίας τα καταστρέφει.

1.5.2. Προέλευση μανταρινιών

Η προέλευση των μανταρινιών και γενικότερα των εσπεριδοειδών είναι από την Ν.Α. πλευρά των Ιμαλαΐων. Στην Κίνα και τη Νοτιοανατολική Ασία καλλιεργείται εδώ και 4.000 χρόνια, στην Ιαπωνία τα τελευταία 400 χρόνια, ενώ περίπου το 1800 μ.Χ. έφτασε στην Ευρώπη. Στη χώρα μας ήρθε με τα πλοία του ναυάρχου Χείδεν που συμμετείχαν στη ναυμαχία του Ναυαρίνου. Το όνομα μανταρίνι προήλθε από τους μανταρινούς, εξ' αιτίας του χρώματος που είχαν τα ρούχα τους. Γενικά, στην Ευρώπη δεν υπάρχουν ενδημικά εσπεριδοειδή.

1.5.3. Παραγωγή και κατανάλωση εσπεριδοειδών

Η παγκόσμια παραγωγή και κατανάλωση εσπεριδοειδών έχει αυξηθεί έντονα από τα μέσα της δεκαετίας του 1980. Η παραγωγή πορτοκαλιών, μανταρινιών, λεμονιών και λάιμ έχει επεκταθεί ταχέως και έχει επιτευχθεί ακόμη ταχύτερη ανάπτυξη για τα επεξεργασμένα προϊόντα εσπεριδοειδών, καθώς οι βελτιώσεις στη μεταφορά και τη συσκευασία μείωσαν το κόστος και βελτίωσαν την ποιότητα. Η παραγωγή εσπεριδοειδών της Ευρωπαϊκής Ένωσης συγκεντρώνεται στην περιοχή της Μεσογείου. Η Ισπανία και η Ιταλία αντιπροσωπεύουν τους κορυφαίους παραγωγούς εσπεριδοειδών, ακολουθούμενες από την Ελλάδα, την Πορτογαλία και την Κύπρο (Spreen, n.d.).

Οι σημαντικότεροι παραγωγοί μανταρινιών είναι η Κίνα, η Ισπανία και η Ιαπωνία ακολουθούμενες από τη Βραζιλία, την Κορέα, το Πακιστάν, την Ιταλία, την Τουρκία, την Αίγυπτο, τις Ηνωμένες Πολιτείες, το Μαρόκο και την Αργεντινή (Martí et al., 2009). Τα περισσότερα μανταρίνια, ωστόσο, καταναλώνονται στις χώρες παραγωγής. Έτσι οι χώρες μεγάλης κατανάλωσης μανταρινιών είναι η Κίνα, η Ιαπωνία, το Πακιστάν και η Αίγυπτος (Spreen, n.d.). Στην Ευρώπη, εκτός από την Ισπανία, την Ιταλία, την Ελλάδα και την Πορτογαλία, οι υπόλοιπες χώρες εισάγουν κυρίως μανταρίνια για να καλύψουν τις ανάγκες τους. Στην Ελλάδα, τα εσπεριδοειδή αποτελούν σημαντικό εξαγωγικό είδος, καθώς η καλλιέργεια τους είναι ευρέως διαδεδομένη στον ελλαδικά χώρο (Spreen, n.d.).

Στους Πίνακες 2 έως 5 παρατίθενται στοιχεία που αφορούν την παραγωγή και την εξαγωγή μανταρινιών τόσο στην Ευρώπη όσο και παγκοσμίως, σύμφωνα με τον FAO.

Πίνακας 2. Παραγωγή μανταρινιών στην Ευρώπη (χιλιάδες τόνους).

Χώρα/Ετος	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Κροατία	40,3	65	35,9	52,4	19,1	47,7	52,1
Γαλλία	31,7	41,6	29,6	43,2	41,8	48,5	34,4
Ελλάδα	160,9	159,9	161,1	162,9	176,6	174,7	150,6
Ιταλία	642,8	617	822,4	697,7	747,1	578,3	763,6
Πορτογαλία	36,3	37,6	39,2	39	39,1	42,1	41,3
Ισπανία	2198,9	2389,7	2018,8	2382,1	1967	1978,6	1826,3
Άλλες χώρες	10,5	17,3	17,3	29,3	31,9	31,2	34,8
Σύνολο	3121,4	3327,1	3124,3	3,406,6	3,022,6	2,901,1	2903,1

Πίνακας 3. Παραγωγή μανταρινιών παγκοσμίως (χιλιάδες τόνους).

Χώρα/Ετος	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Αφρική	2197.1	2776.3	2659.5	2 974.4	2 958.7	3 160.4	3304.7
Ασία	26505.9	28442.4	29393.9	23988.8	25128.7	25680.1	26700.0
Καραϊβική	36.6	34.8	35.6	39.1	41.5	45.0	46.9
Κεντρική Αμερική	518.2	517.2	511.5	472.5	501.9	502.9	492.8
Ευρώπη	3 121.4	3 327.1	3 124.3	3 406.6	3 022.6	2 901.1	2903.1
Βόρεια Αμερική	660.0	700.0	810.0	861.0	933.0	729.0	986.1
Ωκεανία	97.5	106.9	107.7	132.4	134.4	145.2	136.5
Νότια Αμερική	2 227.5	2 531.3	2 594.0	2 653.3	2 645.1	2 793.1	2 859.2
Σύνολο	35375.1	38447.2	39245.8	34536.3	35373.7	35964.9	37429.3

Πίνακας 4. Εξαγωγή μανταρινιών στην Ευρώπη (χιλιάδες τόνους).

Χώρα/Ετος	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Κροατία	20,4	46,3	16,2	45,1	19,3	32,3	22,3
Γαλλία	31,4	36,5	37,2	36,8	40,1	30,2	34,6
Ελλάδα	86,8	85,9	96,4	127,5	92,2	92,6	98,2
Ιταλία	67,4	90,8	84,9	94,8	93,9	77,6	62,9
Πορτογαλία	8,6	7,0	13,6	11,9	13,2	20,0	18,4
Ισπανία	1567,9	1584,0	1530,3	1471,5	1367,3	1405,5	1448,7
Ολλανδία	62,6	62,4	71,5	103,5	115,1	91,7	90,5
Λιθουανία	35,4	32,2	31,2	21,0	17,0	16,5	14,0
Γερμανία	19,4	19,1	21,5	18,5	13,6	14,9	15,9
Πολωνία	46,4	38	30,4	27,6	24,5	26,9	19,8
Άλλες χώρες	82,7	85,3	89,9	83,3	75,1	79,4	79,4
Σύνολο	2029.0	2087.5	2023.1	2041.5	1871.3	1887.6	1904.7

Πίνακας 5. Εξαγωγή μανταρινιών παγκοσμίως (χιλιάδες τόνους).

Χώρα/Ετος	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Αφρική	560.5	568.2	598.6	743.8	876.5	1076.1	940.5
Ασία	1 860.9	1 916.9	1 819.9	1 900.9	1 673.5	2 035.6	2 058.7
Καραϊβική	1.8	1.0	0.5	0.9	0.6	1.2	1.2
Κεντρική Αμερική	2.3	3.1	3.3	6.0	6.9	6.2	6.2
Ευρώπη	2 029.0	2 087.5	2 023.1	2 041.5	1 871.3	1 887.6	1 904.7
Βόρεια Αμερική	44.6	37.2	45.9	40.4	38.0	29.3	37.5
Ωκεανία	39.1	32.8	52.6	53.5	70.2	65.0	87.1
Νότια Αμερική	275.8	294.0	268.6	294.0	341.5	357.3	375.5
Σύνολο	4814.0	4940.7	4812.5	5081.0	4878.5	5458.4	5411.4

1.5.4. Σύσταση καρπού μανταρινιού

Η περιεκτικότητα του καρπού μανταρινιού σε νερό ανέρχεται περίπου στο 85%. Τα κύρια σάκχαρα που απαντώνται είναι η γλυκόζη, η φρουκτόζη και η σακχαρόζη σε αναλογία 1:1:3. Τα μανταρίνια, όπως και όλα τα άλλα εσπεριδοειδή, είναι σημαντική πηγή Βιταμίνης C, Βιταμίνης A και του συμπλέγματος Β. Όσον αφορά τα μέταλλα, σε μεγαλύτερη συγκέντρωση βρίσκονται το κάλιο, το ασβέστιο και ο φώσφορος. Στον καρπό συναντάμε διάφορα αμινοξέα, όπως η λυσίνη, η λευκίνη, η αργινίνη και άλλα. Επιπλέον, στον καρπό μανταρινιού υπάρχουν σε ποσότητα μεγαλύτερη των 100 μg/100 g τα καροτενοειδή. Τέτοια είναι το β-καροτένιο, το α-καροτένιο, η ζεαξανθίνη, η λουτεΐνη και η β-κρυπτοξανθίνη (USDA, n.d.).

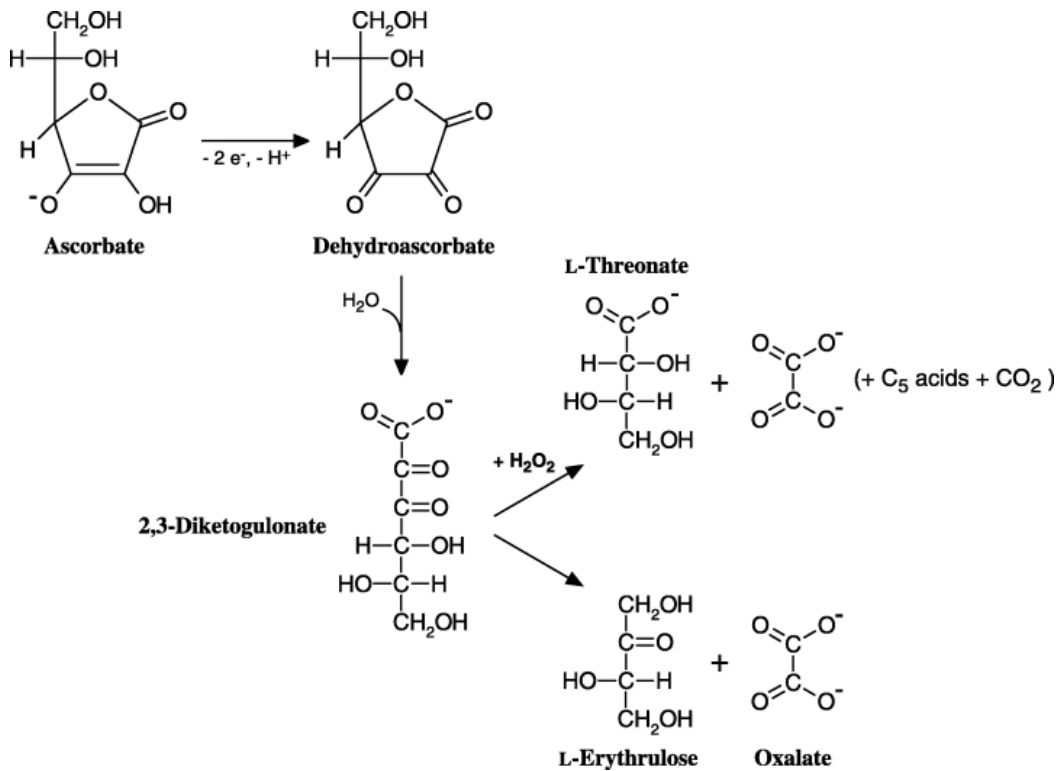
1.5.5. Ασκορβικό οξύ

Το ασκορβικό οξύ ή αλλιώς η βιταμίνη C αποτελεί συστατικό διαφόρων τροφίμων. Η βιταμίνη C είναι μια υδατοδιαλυτή ουσία. Επιπλέον, έχει αντιοξειδωτική δράση και προστατεύει μακρομόρια, όπως οι πρωτεΐνες και το DNA, από την οξείδωσή τους από τις ελεύθερες ρίζες (Costanzo et al., 2022). Το ασκορβικό οξύ συμβάλλει στην ανάπτυξη υγιών οστών, δοντιών, ούλων, συνδέσμων και αιμοφόρων αγγείων (Feszteroná et al., 2023).

Στην ανθρώπινη διατροφή, περισσότερο από 90% της βιταμίνης C λαμβάνεται από τα φρούτα και τα λαχανικά. Η λήψη της βιταμίνης C από τα τρόφιμα είναι απαραίτητη, καθώς ο άνθρωπος δεν μπορεί να την συνθέσει από μόνος του (Feszteroná et al., 2023). Οι άνθρωποι δεν διαθέτουν το ένζυμο που μετατρέπει την γλυκόζη σε βιταμίνη C. Έχει ειπωθεί ότι στα πρώιμα πρωτεύοντα υπάρχει μετάλλαξη στο γονίδιο που εκφράζει το συγκεκριμένο ένζυμο μιας και το τελευταίο παράγει τοξικό H₂O₂ (Pandey et al., 2022).

Τα εσπεριδοειδή έχουν αναγνωριστεί ως μία από τις κύριες πηγές θρεπτικών συστατικών με χαρακτηριστικά οξειδοαναγωγής. Τα εσπεριδοειδή παρέχουν περίπου το 51% της βιταμίνης C που προσλαμβάνει ένας ενήλικας άνθρωπος, καθώς και σημαντικές ποσότητες ορισμένων καροτενοειδών χρωστικών. Από τον χυμό των εσπεριδοειδών λαμβάνεται μόνο το ένα τέταρτο από την βιταμίνη C που υπάρχει στον καρπό.

Η περιεκτικότητα των τροφίμων σε βιταμίνη C αναφέρεται συνήθως ως ολική βιταμίνη C και περιλαμβάνει δύο βιολογικά ενεργές μορφές. Η ανηγμένη μορφή της βιταμίνης C ονομάζεται L-ασκορβικό οξύ (AA) και η οξειδωμένη μορφή ονομάζεται L-δεϋδροασκορβικό οξύ (DHA). Στα εσπεριδοειδή την βιταμίνη C την συναντάμε στην ανηγμένη της μορφή (Martí et al., 2009).



Σχήμα 11. Διάσπαση ασκορβικού οξέος (Linster & Schaftingen, 2017).

Στα τρόφιμα η βιταμίνη C είναι αρκετά ασταθής λόγω της οξείδωσης της σε δικετογουλονικό, οξαλικό και θρεονικό οξύ. Η οξείδωση της βιταμίνης οφείλεται στην παρουσία αέρα, φως και θερμότητας. Για τον λόγο αυτό είναι ευαίσθητη σε χημική και ενζυμική οξείδωση κατά την επεξεργασία, το μαγείρεμα και την αποθήκευση της (Feszterová et al., 2023).

Το ασκορβικό οξύ οξειδώνεται αναστρέψιμα σε δεϋδροασκορβικό οξύ (DHA) κατά την έκθεση στο φως, τη θερμότητα, στη συνέχεια το DHA περαιτέρω υδρολύεται μη αναστρέψιμα για να σχηματίσει 2,3 δικετογουλονικό οξύ, του οποίου τα μεταβολικά προϊόντα περιλαμβάνουν οξαλικό, θρεονικό και πιθανώς ξυλόζη, ξυλονικό οξύ και λυνξονικό οξύ (Padayatt & Levine, 2016; Yin et al., 2022).

Η συγκέντρωση της βιταμίνης C σε φρούτα, λαχανικά και ποτά θεωρείται παράγοντας ποιότητας. Γι' αυτό είναι αναγκαίο να υπολογίζεται κατά την επεξεργασία και αποθήκευση των τροφίμων για τη διατήρηση της ποιότητας των επεξεργασμένων χυμών (Feszterová et al., 2023).

2. Σκοπός

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής μελέτης είναι η εύρεση του καλύτερου τρόπου ξήρανσης χυμού μανταρινιού, έτσι ώστε να παραχθούν σκόρες με αποδεκτά χαρακτηριστικά ώστε να διατηρούνται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Σε αυτήν την εργασία μελετήθηκαν η ξήρανση με ψεκασμό, η ξήρανση με λυοφιλίωση και η ξήρανση με στρώμα αφρού σε θερμό αέρα.

Όσον αφορά το χυμό μανταρινιού, δεν υπάρχουν αρκετές ερευνητικές μελέτες για την ξήρανσή του, καθώς η ξήρανση φρούτων είναι δύσκολη διεργασία λόγω των σακχάρων που περιέχουν.

3. Υλικά και Μέθοδοι

3.1. Πρώτες ύλες

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων ξήρανσης, χρησιμοποιήθηκε χυμός μανταρινιού από την εταιρία "Κάμπος Χίου Βιομηχανία χυμών και αναψυκτικών Α.Ε.", ο οποίος παραχωρήθηκε ως δωρεά. Πριν την επεξεργασία, ο χυμός φυλάχθηκε σε ψυγείο στους 3°C. Η περιεκτικότητά του σε σάκχαρα είναι 10g/100ml.

Για να πραγματοποιηθεί η ξήρανση, προστέθηκαν στον χυμό διάφορες ουσίες. Στον Πίνακα 6 αναγράφονται αυτές οι ουσίες, καθώς και η προέλευση τους και οι συντομογραφίες που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω.

Πίνακας 6. Πρόσθετες ουσίες κατά την ξήρανση.

Όνομα	Προέλευση	Συντομογραφία
Αραβικό κόμμα	ICN Biomedicals, Inc.	GA
Κόμμα ξανθάνης	SIGMA ALDRICH	XG
Άμυλο καλαμποκιού	Παπαδόπουλος (δωρεά)	corn starch
Καρβοξυμεθυλική κυτταρίνη	SIGMA ALDRICH	CMC
Μαλτοδεξτρίνη DE 14-17	Παπαδόπουλος	MD
Πρωτεΐνη ορού γάλακτος 85%	Μπαχαροπωλείο	WPC
Πρωτεΐνη αρακά 78%	Βιολογος	PPC
Ίνες ζαχαροκάλαμου	International Fiber Europe NV	sugar cane fiber
Πρωτεΐνη σόγιας 69%	Ευριπίδου	SP
Αλβουμίνη	Μπαχαροπωλείο	Alb
Αποβουτυρωμένο γάλα	ristora	SMP

Επιπλέον, για τη μελέτη των ιδιοτήτων των σκονών που παράχθηκαν χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω χημικά.

Πίνακας 7. Χημικές ενώσεις που χρησιμοποιήθηκαν.

Όνομα	Εταιρία Προέλευσης	Cas no.
Ασκορβικό οξύ	PENTA	50-81-7
Μεταφωσφορικό οξύ	CHEM-LAB	37267-80-0
Οξικό οξύ	SIGMA ALDRICH	64-19-7
Μαγειρική σόδα		
2,6-διχλωροϊνδοφαινόλη (νατριούχο άλας)	SERVA FEIN BIOCHEMICA	620-45-1

3.2. Ξήρανση χυμού μανταρινιού

3.2.1. Ξήρανση με ψεκασμό

Η ξήρανση με ψεκασμό πραγματοποιήθηκε στον ξηραντήρα ψεκασμού Edibon Sray dryer (Σχήμα 12). Επειδή ο χυμός μανταρινιού έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε σάκχαρα, υπάρχει υψηλός κίνδυνος προσκόλλησης στα τοιχώματα του θαλάμου. Γι' αυτό

τον λόγο προστέθηκαν στον χυμό μαλτοδεξτρίνη DE 14-17, πρωτεΐνη ορού γάλακτος 85% ή αραβικό κόμμι. Στον Πίνακα 8 αναγράφεται η σύσταση των τεσσάρων μειγμάτων που φτιάχτηκαν. Πριν την έναρξη της ξήρασης, το κάθε μείγμα αναδεύτηκε στον μαγνητικό αναδευτήρα AGE (Velp Scientifica) μέχρι την πλήρη ομογενοποίησή του. Το μείγμα τροφοδοτήθηκε στο ξηραντήρα ψεκάσμου του εργαστηρίου. Οι συνθήκες λειτουργίας του ψεκάστρα αναφέρονται στον Πίνακα 9. Οι σκόνες που παράχθηκαν αποθηκεύτηκαν σε πλαστικά δοχεία. Οι συνθήκες αυτές καθώς και οι αναλογίες επιλέχτηκαν βάσει προπειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο πάνω στο φραγκόσυκο.

Πίνακας 8. Σύσταση δειγμάτων για ξήραση με ψεκάσμο.

Σύσταση	Αναλογίες	Όνομα δείγματος	g στερεών/ 100g διαλύματος
Juice:MD	100:200	2x Brix MD	24,58
Juice:MD:WPC	100:190:10	1,9x Brix MD + 0,1x Brix WPC	24,58
Juice:MD:WPC	100:100:100	1,34x Brix MD + 0,33x Brix GA	24,58
Juice:MD:GA	100:133:67	1x Brix MD + 1x Brix WPC	24,58

Πίνακας 9. Συνθήκες λειτουργίας του ψεκάστρα.

Θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα	150°C
Θερμοκρασία εξερχόμενου αέρα	77°C
Πίεση αέρα	1 bar
Ρυθμός τροφοδοσίας	10%



Σχήμα 12. Ξηραντήρας ψεκάσμου Edibon Sray dryer (αριστερά), αντλία τροφοδοσίας και δοχείο συλλογής (δεξιά).

3.2.2. Λυοφιλίωση (freeze drying)

Αρχικά αναμίχθηκαν 25ml χυμού μανταρινιού με πρόσθετες ουσίες και τοποθετήθηκαν σε 50ml Falcon, τα οποία στη συνέχεια καταψύχθηκαν στους -35°C , ώστε να ακολουθήσει η διαδικασία της λυοφιλίωσης. Τα δείγματα, αφού καταψύχθηκαν πλήρως, τοποθετήθηκαν στον ξηραντήρα Virtis Freezemobile (Σχήμα 13). Μετά το πέρας της διεργασίας, τα δείγματα λειοτρηβήθηκαν με γουδί μέχρι να γίνουν σκόνη και τελικά αποθηκεύτηκαν σε πλαστικά δοχεία. Η σύσταση του κάθε δείγματος φαίνεται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10. Σύσταση δειγμάτων για λυοφιλίωση.

Σύσταση	Αναλογίες	Όνομα δείγματος	g στερεών/ 100g διαλύματος
Juice:MD:sugar cane fiber	100:5:1	5% MD+ 1% sugar cane fiber	14,91
Juice:GA:sugar cane fiber	100:5:1	5% GA+ 1% sugar cane fiber	14,91
Juice:MD:native corn starch	100:5:1	5% MD+ 1% native corn starch	14,91
Juice:WPC:XG	100:5:0,25	5% WPC+ 0,25% XG	14,3
Juice:PPC:XG	100: 5:0,25	5% PPC+ 0,25% XG	14,3
Juice:MD:CMC	100:9:0,6250	9% MD+ 0,625% CMC	17,72
Juice:MD:GA	100:9:9	9% MD+ 9% GA	23,56
Juice:MD	100:5	9% MD	17,25
Juice		Juice	9,8



Σχήμα 13. Ξηραντήρας Virtis Freezemobile, (αριστερά), δείγματα για ξήρανση (δεξιά).

3.2.3. Ξήρανση αφρού με ρεύμα θερμού αέρα

Ο συγκεκριμένος τρόπος ξήρανσης πραγματοποιήθηκε στο φούρνο SNOL (Σχήμα 14α) του εργαστηρίου σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες 40°C, 55°C, 70°C και ταχύτητα αέρα στον ανεμιστήρα στο 10. Αρχικά, αναμίχθηκαν ο χυμός μανταρινιού με πρωτεΐνη και πολυσακχαρίτη. Το τελικό μείγμα ζύγιζε 40g και είχε σύσταση 5% πρωτεΐνη και 0,25% πολυσακχαρίτη. Το ζύγισμα έγινε σε ζυγαριά ακριβείας τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων. Το μείγμα αναδεύτηκε στον ηλεκτρονικό αναδευτήρα EUROSTAR, IKA (Σχήμα 14β) για 5 λεπτά με ταχύτητα 2000 στροφές ανά λεπτό. Το μείγμα απλώθηκε σε αλουμινένια ταψιά. Μετά το πέρας της διεργασίας, τα δείγματα λειοτροπήθηκαν με γουδί μέχρι να γίνουν σκόνη και τελικά αποθηκεύτηκαν σε πλαστικά δοχεία. Στον Πίνακα 11 αναφέρεται η σύσταση των δειγμάτων.



Σχήμα 14. Φούρνος SNOL (α) και ηλεκτρονικός αναδευτήρας EUROSTAR (β).

Πίνακας 11. Σύσταση δειγμάτων για ξήρανση με ρεύμα θερμού αέρα.

Σύσταση	Αναλογίες	Όνομα δείγματος	g στερεών/ 100g διαλύματος
Juice:WPC:XG	37.9:2:0.1	WPC + XG	12,41
Juice: WPC:CMC	37.9:2:0.1	WPC + CMC	12,41
Juice:PPC: XG	37.9:2:0.1	PPC + XG	12,41
Juice:PPC: CMC	37.9:2:0.1	PPC + CMC	12,41
Juice:Alb:XG	37.9:2:0.1	Alb + XG	12,41
Juice: Alb:CMC	37.9:2:0.1	Alb + CMC	12,41
Juice:SP: XG	37.9:2:0.1	SP + XG	12,41
Juice:SP: CMC	37.9:2:0.1	SP + CMC	12,41
Juice:SMP: XG	37.9:2:0.1	SMP + XG	12,41
Juice:SMP: CMC	37.9:2:0.1	SMP + CMC	12,41

3.3. Προσδιορισμός αφριστικής ικανότητας

Ο προσδιορισμός της αφριστικής ικανότητας των παραγόμενων δειγμάτων γίνεται με τον υπολογισμό της διόγκωσης του αφρού τους (foam overrun) μετά τον σχηματισμό του αφρού και το ποσοστό απορροής τους (drainage). Το ποσοστό απορροής υπολογίζεται 15 λεπτά μετά το τέλος του χτυπήματος του δείγματος για τον σχηματισμό αφρού.

Το ποσοστό διόγκωσης του αφρού υπολογίζεται από τον τύπο
$$\% \text{ Διόγκωση αφρού} = \frac{V_{foam} - V_{liq}}{V_{liq}} * 100 \quad (13),$$

όπου V_{foam} ο όγκος του αφρού μετά το τέλος του χτυπήματος και V_{liq} ο όγκος του δείγματος πριν την έναρξη του χτυπήματος.

Για τον υπολογισμό του ποσοστού απορροής χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση:

$$\% \text{ Απορροή} = \frac{V_{drain}}{V_{liq}} * 100 \quad (14),$$

όπου V_{drain} το ποσοστό απορροής 15 λεπτά μετά το τέλος του χτυπήματος και V_{liq} ο όγκος του δείγματος πριν την έναρξη του χτυπήματος.

Γενικά ένα δείγμα έχει την καλύτερη αφριστική ικανότητα όταν σχηματίζει ελάχιστη απορροή και έχει την μεγαλύτερη διόγκωση αφρού.

3.4. Ξήρανση δειγμάτων

Για να μελετήσουμε την ξήρανση των δειγμάτων, σε προζυγισμένα πλαστικά καπάκια με διαστάσεις 1,2cm ύψος, 3,1cm εσωτερική διάμετρος προσθέτουμε ποσότητα από το δείγμα μέχρι να γεμίσουν. Τα ζυγισμένα καπάκια ζυγίζονται εκ νέου σε ζυγαριά ακριβείας τεσσάρων ψηφίων και τοποθετούνται στον φούρνο, σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία κάθε φορά, μέχρι την επόμενη μέρα. Για την μελέτη της κινητικής ξήρανσης, για τις πρώτες ώρες ξήρανσης ζυγίζονται τα καπάκια κάθε είκοσι λεπτά. Την επόμενη μέρα τα καπάκια ζυγίστηκαν ώστε να υπολογιστεί το βάρος του αφρού, όταν αυτός θα έχει φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας, (M_e), με το περιβάλλον που έχει ο φούρνος. Στη συνέχεια τα καπάκια τοποθετούνται στο φούρνο Heraeus του εργαστηρίου για τρεις ώρες στους 105°C. Μετά το πέρας των τριών ωρών τα καπάκια ζυγίζονται ξανά ώστε να υπολογιστεί το βάρος του ξηραμένου αφρού.

3.5. Προσδιορισμός λόγου υγρασίας

Για τον υπολογισμό της σταθεράς ξήρανσης, πρώτα πρέπει να προσδιοριστεί ο λόγος υγρασίας (MR). Ο λόγος αυτός υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (15),$$

όπου M_t είναι το ποσό υγρασίας κατά τη ξήρανση την χρονική στιγμή t , M_e είναι το ποσό υγρασίας κατά την ισορροπία του δείγματος και M_o είναι η αρχική υγρασία του δείγματος πριν την έναρξη της ξήρανσης του.

3.6. Προσδιορισμός σταθεράς κινητικής

Για τον υπολογισμό της σταθεράς κινητικής υπάρχουν διάφορα μοντέλα. Ένα από αυτά τα μοντέλα είναι το μοντέλο Lewis:

$$MR = e^{-k*t} \quad (16),$$

όπου k η σταθερά ξήρανσης (h^{-1}) και t ο χρόνος ξήρανσης (h).

Από την παραπάνω εξίσωση και από την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων θα υπολογιστεί η σταθερά ξήρανσης.

3.7. Προσδιορισμός απαιτούμενου χρόνου ξήρανσης

Για τον υπολογισμό του συγκεκριμένου χρόνου, στην παρούσα εργασία θεωρούμε ότι η πλήρης ξήρανση πραγματοποιείται όταν η υγρασία σε $w_b=12\%$.

Από την εξίσωση $t_{req} = -\frac{\ln MR}{k}$ (17) και τις εξισώσεις (15) και (16) προκύπτει:

$$t_{req} = -\frac{\ln \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}}{k} \quad (18)$$

3.8. Προσδιορισμός υγρασίας

Για τον προσδιορισμό της υγρασίας, τόσο για τον χυμό μανταρινιού όσο και για τις παραγόμενες σκόνες, χρησιμοποιήθηκε ο φούρνος Heraeus του εργαστηρίου. Για τον υπολογισμό της υγρασίας χρησιμοποιούνται γυάλινα φιαλίδια ξήρανσης, τα οποία ζυγίζονται σε ζυγαριά ακριβείας τεσσάρων ψηφίων, ώστε να είναι γνωστό το βάρος τους. Στη συνέχεια ζυγίζεται συγκεκριμένη ποσότητα από κάθε δείγμα εντός των φιαλιδίων, τοποθετούνται στον φούρνο και θερμαίνονται για τρεις ώρες στους $105^\circ C$. Μετά από τρεις ώρες, ζυγίζονται ξανά τα φιαλίδια που περιέχουν τα δείγματα. Για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκαν τουλάχιστον 3 επαναλήψεις. Από την απώλεια βάρους υπολογίστηκε η περιεχόμενη υγρασία και εκφράστηκε ως %.

$$\text{υγρασία \%} = \frac{W_{\alpha\rho\chi} - W_{\tau\epsilon\lambda}}{W_{\alpha\rho\chi}} * 100 \quad (19)$$

3.9. Προσδιορισμός ενεργότητας νερού (a_w)

Για τον προσδιορισμό της ενεργότητας το μηχάνημα Ενεργότητας νερού Rotronic HygroLab C1 θερμαίνεται περίπου στους $25^\circ C$. Από κάθε δείγμα ζυγίστηκε $0,8$ g και

τοποθετήθηκε σε πλαστικά τρυβλία. Για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκαν τουλάχιστον 2 επαναλήψεις.

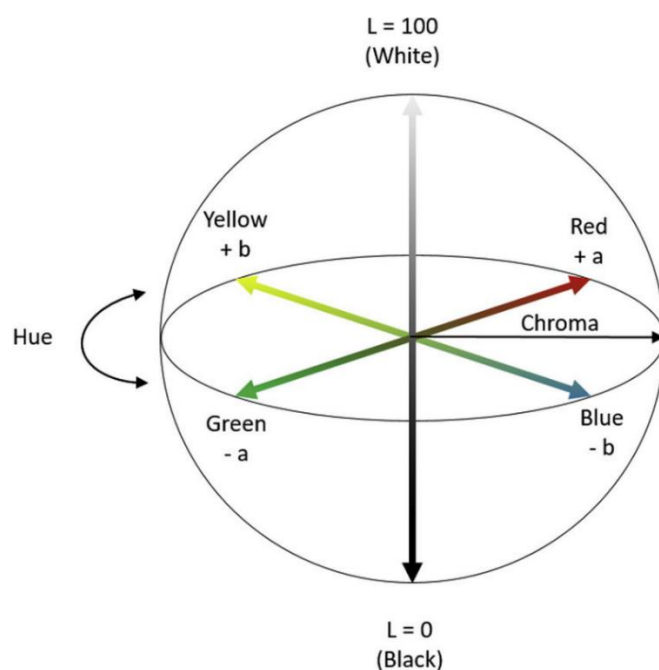
3.10. Μέτρηση pH και προσδιορισμός διαλυτών στερεών συστατικών ($^{\circ}\text{Brix}$)

Η μέτρηση του pH στο χυμό μανταρινιού έγινε με το όργανο HANNA HI 98150, ενώ ο προσδιορισμός των διαλυτών στερεών συστατικών με διαθλασίμετρο. Για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκαν τουλάχιστον 2 επαναλήψεις.

3.11. Προσδιορισμός χρώματος

Ο προσδιορισμός του χρώματος, τόσο του χυμού μανταρινιού όσο και των σκονών που παράχθηκαν, έγινε με την χρήση του φωτόμετρου NS800.

Οι μετρήσεις του χρώματος βασίστηκαν στον προσδιορισμό των χρωματικών παραμέτρων L^* , a^* , b^* του συστήματος CIE Lab. Το L^* εκφράζει την φωτεινότητα με το $L^*=0$ να αντιστοιχεί στο μαύρο και το $L^*=100$ να αντιστοιχεί στο λευκό. Οι τιμές των a^* και b^* είναι οι ορθογώνιες συντεταγμένες του χρώματος πάνω στο επίπεδο διατομής του χρώματος, κάθετο στον άξονα μαύρου-άσπρου. Η θετική τιμή του a^* υποδηλώνει κόκκινο χρώμα, ενώ η αρνητική τιμή πράσινο χρώμα. Η θετική τιμή του b^* υποδεικνύει κίτρινο χρώμα, ενώ η αρνητική μπλε χρώμα.



Σχήμα 15. Το χρωματικό διάγραμμα CIELAB.

Για τη πραγματοποίηση των μετρήσεων, τα δείγματα τοποθετήθηκαν μέσα σε πλαστικά διάφανα τρυβλία. Για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκαν 3 επαναλήψεις.

3.12. Προσδιορισμός φαινομενικής και πραγματικής πυκνότητας

Η πυκνότητα του προϊόντος ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής μάζας του προϊόντος ως προς τον συνολικό όγκο του προϊόντος.

Με τον όρο φαινόμενη πυκνότητα (bulk density) περιγράφεται το βάρος που καταλαμβάνει καθορισμένος όγκος σκόνης ελεύθερα στοιβαγμένης. Καθώς η τιμή της επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον αέρα που εγκλωβίζεται μεταξύ των σωματιδίων της σκόνης, συνήθως, χρησιμοποιείται ταυτόχρονα με τη φαινόμενη πυκνότητα και η πραγματική πυκνότητα (tapped density), η οποία προκύπτει κατόπιν ανάδευσης της σκόνης, έτσι ώστε να μειωθεί ο όγκος.

Για τον προσδιορισμό της φαινομενικής πυκνότητας, κάθε δείγμα εισέρχεται σε προζυγισμένο ογκομετρικό κύλινδρο. Στη συνέχεια, μετρήθηκε ο όγκος και το βάρος του κάθε δείγματος. Για τον υπολογισμό της πραγματικής πυκνότητας έγινε ήπια ανάδευση σε Αναδευτήρας IKA VORTEX Genius 3 και υπολογίστηκε εκ νέου ο όγκος. Για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκαν 3 επαναλήψεις σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Το πορώδες υπολογίζεται από τη σχέση $\varepsilon = \frac{\rho_{\pi\rho} - \rho_{\varphi}}{\rho_{\pi\rho}}$ (20),

$\rho_{\pi\rho}$ αντιστοιχεί στην πραγματική πυκνότητα και ρ_{φ} αντιστοιχεί στην φαινομενική πυκνότητα.

3.13. Προσδιορισμός Βιταμίνης C με την μέθοδο της ινδοφαινόλης

3.13.1. Παρασκευή διαλύματος μεταφωσφορικού οξέος- οξικού οξέος

Σε 100ml αποστειρωμένου και αποιονισμένου νερού (ddH₂O) διαλύονται 20ml οξικού οξέος και 7,5g μεταφωσφορικού οξέος. Ακολουθεί ανάδευση σε μαγνητικό αναδευτήρα AGE (Velp Scientifica), μέχρι την ομογενοποίηση του διαλύματος. Προστίθεται ddH₂O έως ότου ο τελικός όγκος του διαλύματος να φτάσει στα 250ml, έτσι το διάλυμα να έχει συγκέντρωση 3% μεταφωσφορικό οξύ και 8% οξικό οξύ. Τέλος, φιλτράρεται με διηθητικό χαρτί και τοποθετείται σε μπουκάλι, το οποίο αποθηκεύεται σε ψυγείο.

3.13.2. Παρασκευή διαλύματος ινδοφαινόλης (χρωστική ουσία)

Διαλύονται 42mg μαγειρικής σόδας σε 50ml ddH₂O και ανακατεύονται σε μαγνητικό αναδευτήρα AGE (Velp Scientifica), μέχρι να ομογενοποιηθούν. Στη συνέχεια, προστίθενται 50mg άλας νατρίου 2,6-διχλωροϊνδοφαινόλης στο παραπάνω διάλυμα. Ο τελικός όγκος του διαλύματος θα είναι 200ml. Πριν την αποθήκευσή του σε ψυγείο, το διάλυμα φιλτράρεται με διηθητικό χαρτί και τοποθετείται σε αδιαφανές μπουκάλι.

3.13.3. Προσδιορισμός ασκορβικού οξέος

Η κατασκευή του ασκορβικού οξέος γίνεται λίγο πριν πραγματοποιηθεί η μέτρησή του. Διαλύονται 50mg ασκορβικού οξέος σε 20ml διαλύματος μεταφωσφορικού οξέος- οξικού οξέος(3%, 8%) και αναδεύονται σε μαγνητικό αναδευτήρα AGE (Veip Scientifica). Έπειτα, το ασκορβικό οξύ τοποθετείται σε ογκομετρικό σωλήνα και προστίθεται διάλυμα μεταφωσφορικού οξέος- οξικού οξέος, μέχρι ο τελικός όγκος να φτάσει τα 50 ml. Έτσι, το διάλυμα ασκορβικού οξέος που φτιάχτηκε θα έχει συγκέντρωση 100mg ασκορβικού οξέος ανά 100ml διαλύματος.

Για τον προσδιορισμό της Βιταμίνης C στον χυμό, σε φλάσκες που περιέχουν 5ml διαλύματος μεταφωσφορικού οξέος- οξικού οξέος, προστίθενται 2ml του χυμού. Στη συνέχεια πραγματοποιείται τιτλοδότηση με ινδοφαινόλη μέχρι το δείγμα να πάρει ελαφρύ αλλά διακριτό ροζ χρώμα. Για τα δείγματα σκόνης από μανταρίνι, η ποσότητα που θα διαλυθεί σε 5ml διαλύματος μεταφωσφορικού οξέος- οξικού οξέος εξαρτάται από την ποσότητα των στερεών που είχε το δείγμα πριν από την διεργασία της ξήρανσης, ώστε να αντιστοιχεί σε 2ml χυμού.

Όσο υπάρχει ασκορβικό οξύ στο δείγμα το οποίο δεν έχει αντιδράσει, δηλαδή δεν έχει οξειδωθεί σε δεϋδροασκορβικό οξύ, δεν παρατηρείται αλλαγή στο χρώμα του διαλύματος. Όταν έχει οξειδωθεί όλο το ασκορβικό οξύ, τότε μια σταγόνα από την χρωστική είναι αρκετή για να χρωματίσει το διάλυμα ελαφρά ροζ.

3.14. Προσδιορισμός υδατοδιαλυτότητας και κατακράτησης νερού

Αρχικά ζυγίστηκαν σε ζυγαριά ακριβείας τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων και διαλύθηκαν 0,4g σκόνης σε 5ml νερού στους 30°C με συνεχή και ήπια ανάδευση για 30 λεπτά. Στη συνέχεια το διάλυμα φυγοκεντρήθηκε για 10 λεπτά στα 5000rpm. Το υπερκείμενο τοποθετήθηκε σε προζυγισμένο τρυβλίο και έπειτα πραγματοποιείται εξάτμιση στον φούρνο για μια νύχτα στους 105°C, ενώ και η γέλη τοποθετήθηκε στο φούρνο Memmert. Τέλος, υπολογίστηκε το βάρος που έχει το εναπομείναντα υπερκείμενο και η γέλη. Δείκτης υδατοδιαλυτότητας είναι το βάρος των ξηρών στερεών στο υπερκείμενο εκφρασμένο ως ποσοστό του αρχικού βάρους του δείγματος. Δείκτης απορρόφησης νερού είναι το βάρος της γέλης εκφρασμένο ως ποσοστό του αρχικού βάρους του δείγματος.

3.15. Καμπύλη προσρόφησης

Αρχικά ζυγίζονται σε ζυγαριά ακριβείας τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων 0,2g σκόνης και τοποθετούνται στα γυάλινα φιαλίδια ξήρανσης, τα οποία έχουν διαφορετική σχετική υγρασία. Στη συνέχεια στεγνώνουν στο φούρνο κενού στους 70°C για 3 ώρες. Ύστερα ζυγίζονται ξανά και στη συνέχεια ξηραίνονται στα βάζα, καθένα από το οποίο έχει διαφορετική σχετική υγρασία. Τα βάζα τοποθετούνται μέσα σε φούρνο SNOL στους 25°C. Όταν περάσουν δυο εβδομάδες τα γυάλινα τρυβλία ξήρανσης ξανά ζυγίζονται για να υπολογιστεί πόση ποσότητα νερού απορροφήθηκε από την σκόνη.

Τέλος, τα γυάλινα τρυβλία ξήρανης στεγνώνουν στον φούρνο για 3 ώρες στους 105°C και μετά ζυγίζεται το βάρος τους. Το κάθε βάζο έχει διαφορετική σχετική υγρασία. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται τα διαφορετικά άλατα που χρησιμοποιήθηκαν με βάση την τυποποιημένη μέθοδο για την αποτύπωση των καμπυλών υγρασίας.

Πίνακας 12. Συγκέντρωση των αλάτων για θερμοκρασία $T = 25^{\circ}\text{C}$.

Άλατα	Σχετική υγρασία (%)
LiCl	11
MgCl ₂	33
K ₂ CO ₃	44
NaBr	58
NaCl	75



Σχήμα 16. Σκόνες μετά από 3 ώρες στους 70°C υπό κενό (αριστερά), σκόνες μετά από 3 ώρες στους 105°C (δεξιά).

3.16. Στατιστική ανάλυση

Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε 3 επαναλήψεις και τα δεδομένα αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας την one-way ANOVA σε συνδυασμό με τη δοκιμή Duncan. Το στατιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία ήταν το Statgraphics και το επίπεδο εμπιστοσύνης ορίστηκε στο 95% καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης.

4. Αποτελέσματα

4.1. Φυσικές ιδιότητες χυμού μανταρινιού

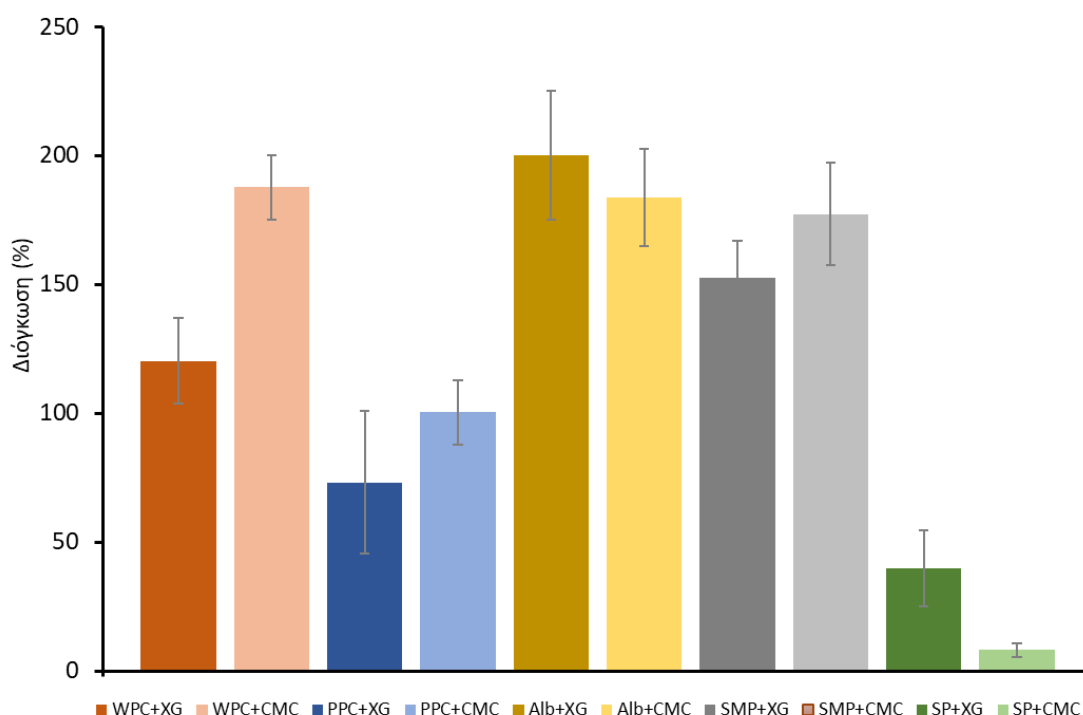
Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι φυσικές ιδιότητες του συσκευασμένου και παστεριωμένου χυμού μανταρινιού. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι φυσικές ιδιότητες του.

Πίνακας 13. Φυσικές και χημικές ιδιότητες του χυμού μανταρινιού.

Δείγμα	pH	Brix	L*	a*	b*	Βιταμίνη C (mg/100ml)	Υγρασία (wb)
Juice	3,55 ±0,1	9,8 ±0,1	35,3962 ±0,471	1,2225 ±0,0555	23,2663 ±0,607	63,6036 ±0,312	0,881348 ±0,001

4.2. Διόγκωση αφρού

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο σχηματισμός του αφρού είναι υψίστης σημασίας για την μέθοδο ξήρανσης με στρώμα αφρού σε ρεύμα θερμού αέρα. Γι' αυτό το λόγο μελετήθηκε κατά πόσο διογκώνεται ο αφρός που σχηματίστηκε. Στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 17) παρουσιάζονται τα ποσοστά διόγκωσης του αφρού για κάθε έναν από τους συνδυασμούς που πραγματοποιήθηκαν.



Σχήμα 17. Ποσοστό επί τοις εκατό (%) της διόγκωσης του αφρού.

Παρατηρούμε ότι η αλβουμίνη σε συνδυασμό με το κόμμι ξανθάνης έχει την μεγαλύτερη διόγκωση με ποσοστό 200%, δηλαδή διπλασιάζεται ο όγκος του δείγματος λόγω της ενσωμάτωσης αέρα. Την μικρότερη διόγκωση την παρατηρούμε με την πρωτεΐνη σόγιας σε συνδυασμό με την καρβοξυμεθυλική κυτταρίνη με διόγκωση περίπου 8%.

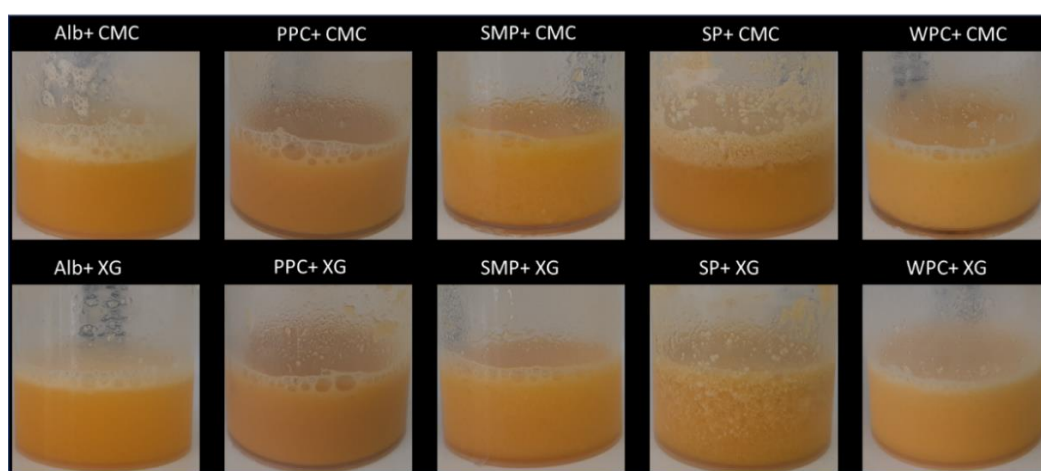
Μικρό ποσοστό διόγκωσης συναντάμε και με την πρωτεΐνη σόγιας σε συνδυασμό με το κόμμα ξανθάνης (39%). Γενικά, από την βιβλιογραφία γνωρίζουμε ότι η συγκριμένη πρωτεΐνη δεν είναι ιδανική για τον σχηματισμό αφρού. Υψηλά ποσοστά διόγκωσης έχει η πρωτεΐνη ορού σε συνδυασμό με (CMC) (187%), αλβουμίνη με (CMC) (187%) και αποβουτυρωμένο γάλα με (CMC) (177%).

4.3. Απορροή αφρού

Για τον σχηματισμό αφρού στον χυμό μανταρινιού πραγματοποιήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί πρωτεϊνών και πολυσακχαριτών. Ο Πίνακας 14 δείχνει αν στον αφρό λίγα λεπτά μετά τον σχηματισμό δημιουργείται απορροή, δηλαδή εάν όλος ο χυμός μανταρινιού έχει ενσωματωθεί στον αφρό ή εάν μετά από μικρό χρονικό διάστημα ένα μέρος του χυμού έχει αποσπαστεί από τον αφρό με αποτέλεσμα να μην μπορεί να γίνει η ξήρανσή όλου του δείγματος χυμού με αυτήν την μέθοδο.

Πίνακας 14. Ποσοστό επί τοις εκατό (%) της απορροής του αφρού.

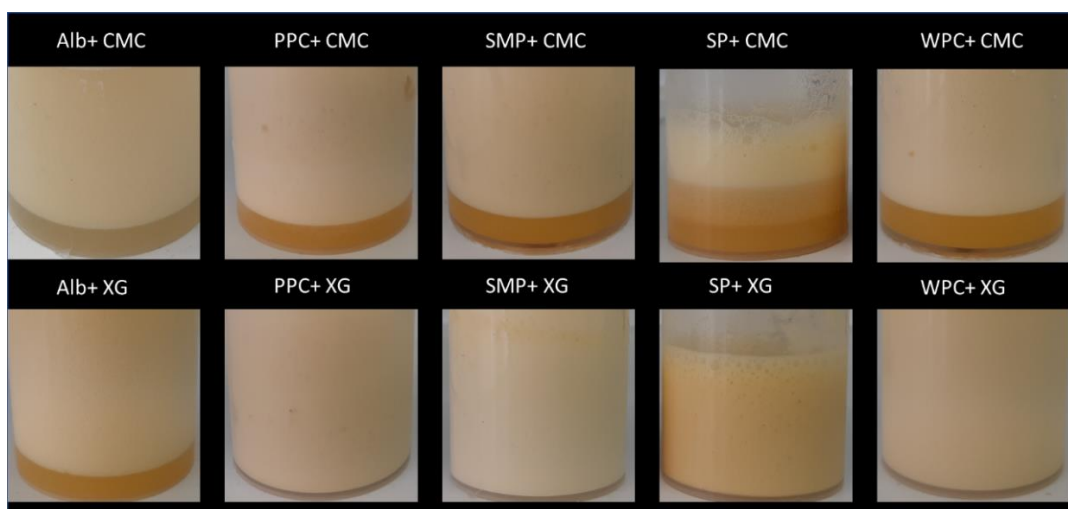
Δείγμα	απορροή ≤ 5%	απορροή > 5%
WPC+XG	+	
PPC+XG	+	
Alb+XG		+
WPC+CMC		+
PPC+CMC		+
Alb+CMC		+
SMP+XG	+	
SP+XG	+	
SMP+CMC		+
SP+CMC		+



Σχήμα 18. Χυμός μανταρινιού ύστερα από την προσθήκη του εκάστοτε πολυσακχαρίτη και πρωτεΐνη

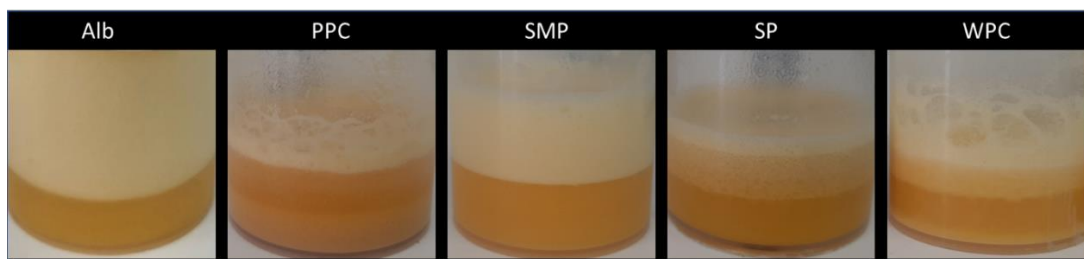
Στο Σχήμα 18 φαίνεται ο χυμός μανταρινιού μαζί με την εκάστοτε πρωτεΐνη και πολυσακχαρίτη πριν από τον σχηματισμό αφρού. Στο Σχήμα 19 φαίνεται ο αφρός, που σχηματίστηκε με τη μέθοδο του χτυπήματος, 10 λεπτά μετά το τέλος του χτυπήματος.

Από τις φωτογραφίες παρατηρούμε ότι η αλβουμίνη σχηματίζει απορροή με όποιον από τους δύο πολυσακχαρίτες και αν την συνδυάσουμε. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι η αλβουμίνη δεν σχηματίζει σταθερό αφρό σε όλο το εύρος pH, αλλά σε ένα περιορισμένο, στο οποίο φαίνεται ότι δεν ανήκει ο χυμός μανταρινιού. Επιπλέον, ο συνδυασμός οποιασδήποτε πρωτεΐνης με την καρβοξυμεθυλική κυτταρίνη σχηματίζει απορροή. Υποθέτουμε ότι η καρβοξυμεθυλική κυτταρίνη δεν είναι σταθερή στο pH που έχει ο χυμός. Γι' αυτόν τον λόγο ο αφρός, αν και σχηματίζεται, δεν μπορεί να παραμείνει σταθερός για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αντίθετα, το κόμμα ξανθάνης δεν σχηματίζει απορροή, λόγω ότι είναι σταθερό ανεξάρτητα από το pH.



Σχήμα 19. Σχηματισμός αφρού 10 λεπτά μετά το τέλος του χτυπήματος.

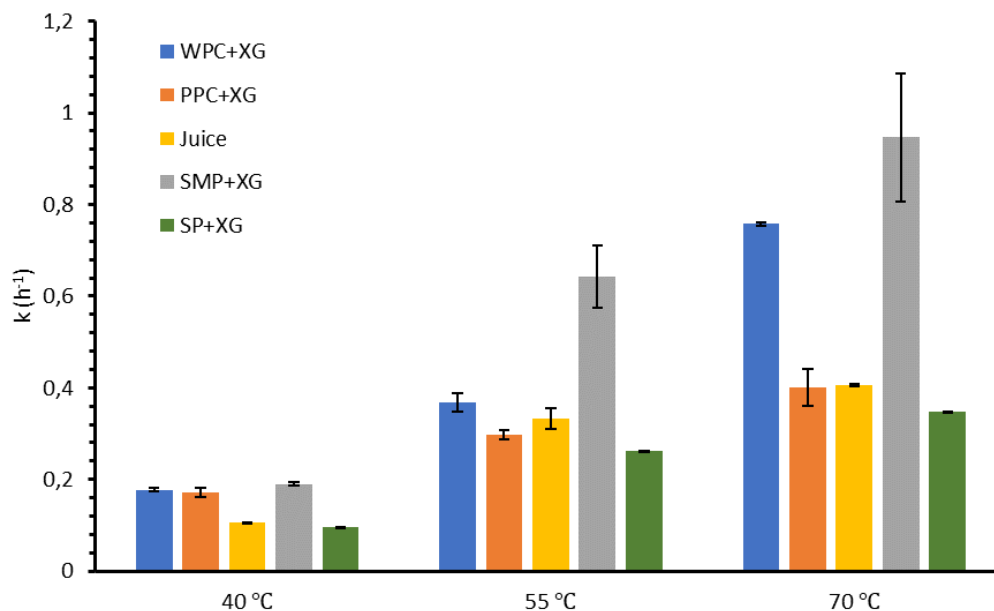
Στα δείγματα που δεν προστέθηκε κάποιος πολυσακχαρίτης, δηλαδή περιέχουν τον χυμό μανταρινιού και μια από τις πρωτεΐνες που χρησιμοποιήθηκαν και στα παραπάνω πειράματα, παρατηρούμε ότι ο αφρός που σχηματίζεται δεν είναι σταθερός ούτε έχει μεγάλη διόγκωση (Σχήμα 20). Πιο αναλυτικά, το δείγμα με την αλβουμίνη σχηματίζει απορροή και μάλιστα με μικρότερο χρονικό διάστημα από ότι με την προσθήκη πολυσακχαρίτη. Η διόγκωση του αφρού, όμως, είναι παραπλήσια με αυτή που παρατηρήθηκε με την προσθήκη και πολυσακχαρίτη. Στα δείγματα που περιέχουν WPC, PPC, SMP ή SP δεν εμφανίζεται το ίδιο μεγάλο ποσοστό διόγκωσης και δεν έχει γίνει καλή ομογενοποίηση του δείγματος. Η διόγκωση που παρατηρούμε σιγά σιγά υποχωρεί. Το μέγιστο ποσοστό διόγκωσης το συναντάμε στο δείγμα που περιέχει SMP (75%) και το χαμηλότερο στο SMP (5%).



Σχήμα 20. Σχηματισμός αφρού, χωρίς την προσθήκη πολυσακχαρήτη, 10 λεπτά μετά το τέλος του χτυπήματος.

4.4. Κινητική ξήρανσης

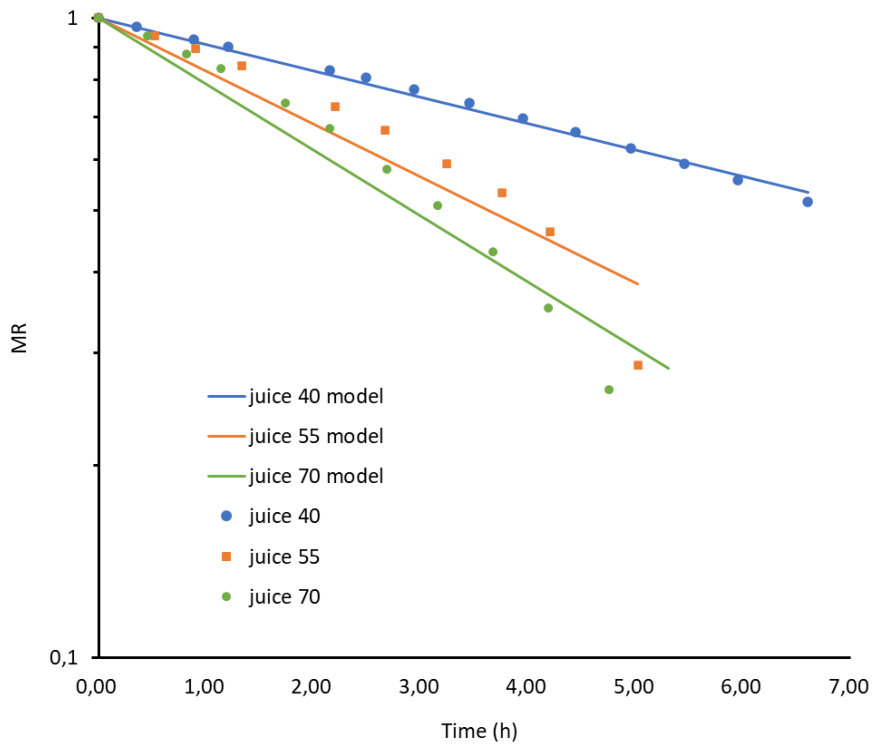
Για την μελέτη της κινητικής λήφθηκαν υπόψη τα δείγματα στα οποία δεν παρατηρήθηκε απορροή. Στο παρακάτω διάγραμμα, φαίνεται η διακύμανση του συντελεστή της ξήρανσης (k) ανάμεσα σε διαφορετικά δείγματα για τις τρεις θερμοκρασίες ξήρανσης.



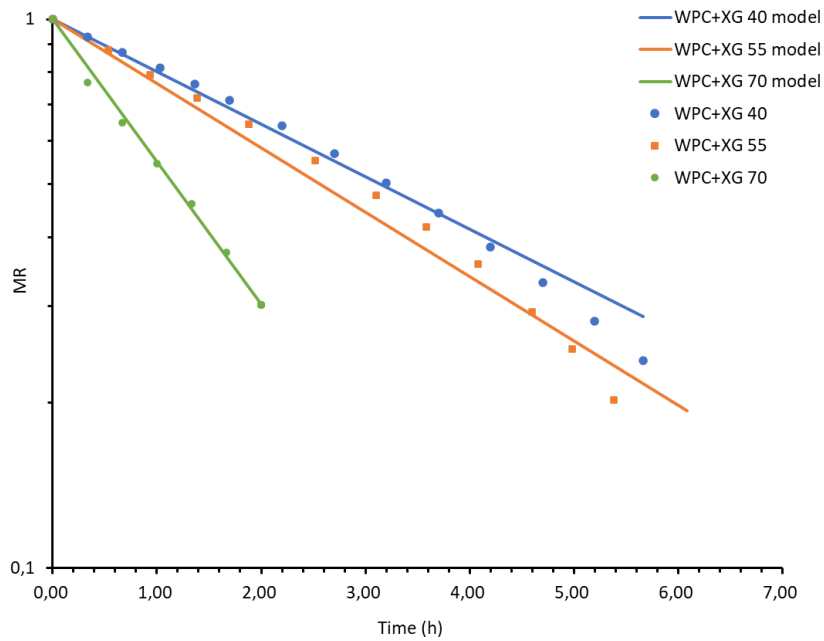
Σχήμα 21. Μέση τιμή του συντελεστή ξήρανσης (k) για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η προσθήκη διαφορετικών πρωτεϊνών αλλά και η θερμοκρασία επηρεάζουν το συντελεστή της ξήρανσης. Από το Σχήμα 21 διαπιστώνουμε ότι όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία ξήρανσης τόσο χαμηλότερος είναι και ο συντελεστής ξήρανσης k . Παρατηρούμε ότι και στις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες η πρωτεΐνη ορού γάλακτος και η πρωτεΐνη αποβουτυρωμένου γάλακτος έχουν υψηλότερο k από τον σκέτο χυμό, ενώ η πρωτεΐνη σόγιας έχει το χαμηλότερο k . Από την εξίσωση για τον απαιτούμενο χρόνο ξήρανσης γνωρίζουμε ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής k τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος. Για την θερμοκρασία 40°C, από το διάγραμμα βλέπουμε ότι ο σκέτος χυμός μανταρινιού με ρυθμό ξήρανσης 0,105168 h⁻¹ και η πρωτεΐνη σόγιας (0,09533855 h⁻¹) έχουν τον χαμηλότερο συντελεστή και τον υψηλότερο η πρωτεΐνη αποβουτυρωμένου γάλακτος (0,1897195 h⁻¹). Στη μέγιστη θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα η πρωτεΐνη σόγιας παρουσιάζει το χαμηλότερο k (0,1897195 h⁻¹). Τον υψηλότερο συντελεστή τον παρουσιάζει η πρωτεΐνη από αποβουτυρωμένο γάλα (0,9461075 h⁻¹) και η πρωτεΐνη ορού γάλακτος (0,7578065 h⁻¹).

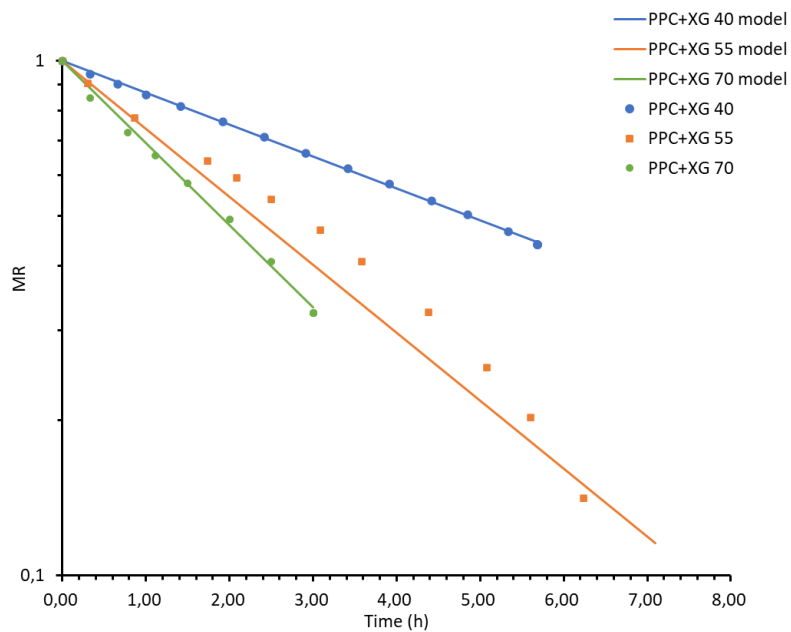
Στα Σχήματα 22- 26 απεικονίζεται ο λόγος υγρασίας ως προς τον χρόνο, σε λογαριθμική κλίμακα, για τον χυμό μανταρινιού, το δείγμα πρωτεΐνη ορού γάλακτος (WPC) με κόμμι ξανθάνης (XG), πρωτεΐνη αρακά (PPC) με κόμμι ξανθάνης (XG), πρωτεΐνη αποβουτυρωμένου γάλακτος (SMP) με κόμμι ξανθάνης (XG) και πρωτεΐνη σόγιας (SP) με κόμμι ξανθάνης (XG) στις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες που πραγματοποιήθηκε η ξήρανση (40°C, 55°C και 70°C). Επιπλέον, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία ξήρανσης τόσο λιγότερος χρόνος απαιτείται.



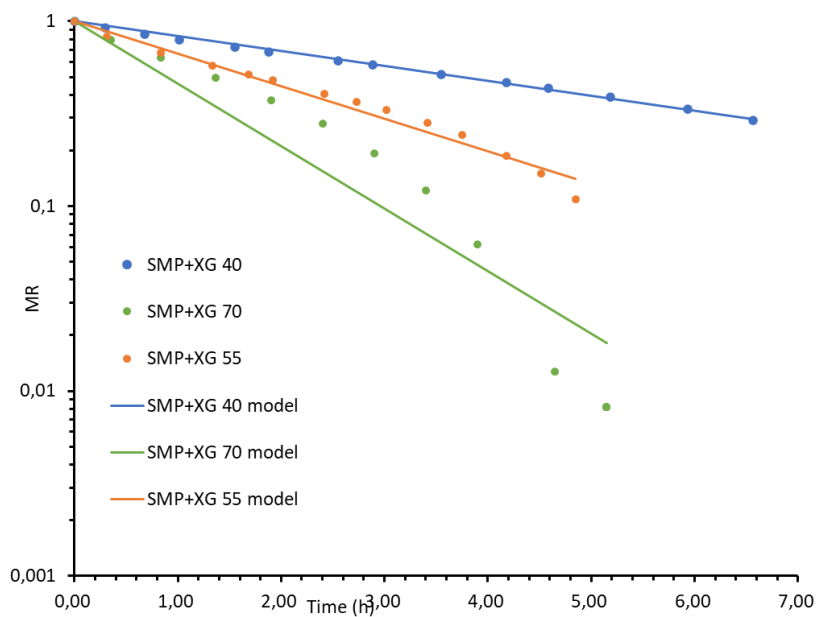
Σχήμα 22.Κινητική για την ξήρανση του χυμού σε θερμοκρασία 40°C, 55°C και 70°C.



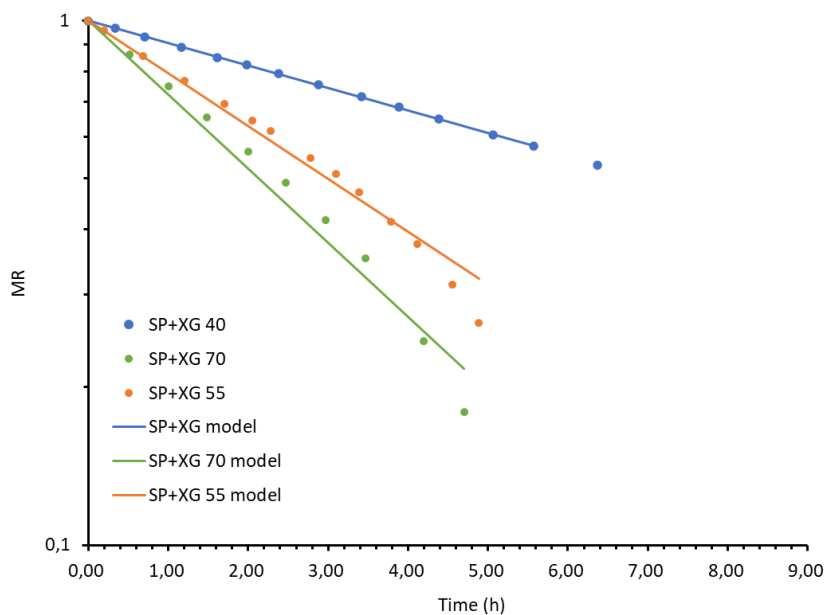
Σχήμα 23.Κινητική για την ξήρανση του WPC+XG σε θερμοκρασία 40°C, 55°C και 70°C.



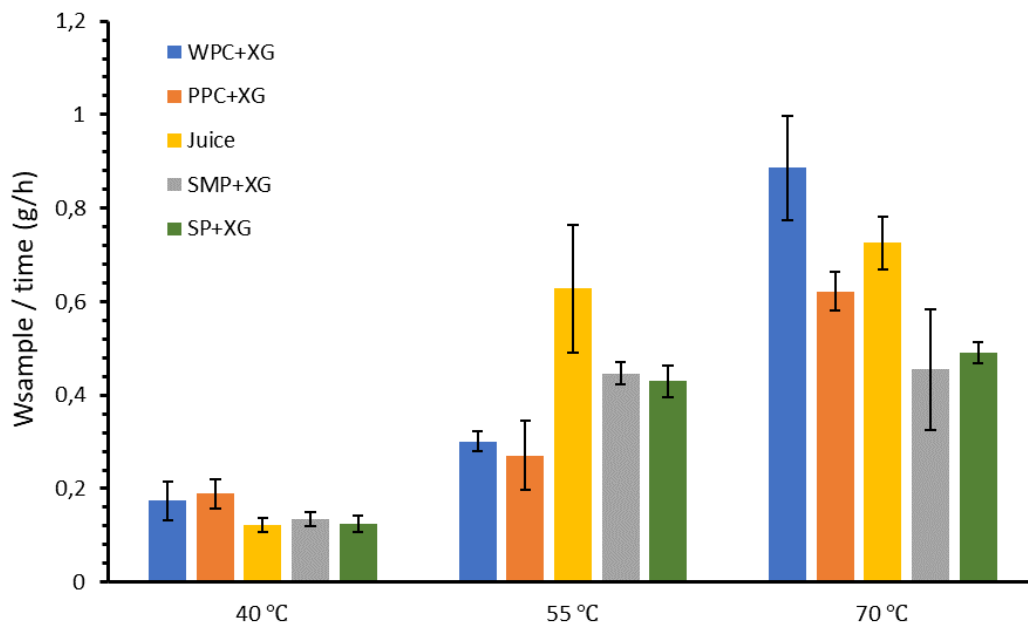
Σχήμα 24.Κινητική για την ξήρανση του PPC+XG σε θερμοκρασία 40°C, 55°C και 70°C.



Σχήμα 25.Κινητική για την ξήρανση του SMP+XG σε θερμοκρασία 40°C, 55°C και 70°C.



Σχήμα 26.Κινητική για την ξήρανση του SP+XG σε θερμοκρασία 40°C, 55°C και 70°C.



Σχήμα 27. Μάζα ξήρανσης χυμού μανταρινιού/χρόνο για πλήρη ξήρανση.

Επιθυμητό είναι τα δείγματα αφρών να έχουν μεγαλύτερο λόγο μάζας χυμού προς το χρόνο ξήρανσης από ότι όταν ξηραίνεται σκέτος ο χυμός. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο λόγος τόσο λιγότερος ο χρόνος ξήρανσης για συγκεκριμένη ποσότητα χυμού. Στο Σχήμα 27 φαίνεται η ποσότητα του δείγματος που ξηραίνεται ως προς τον χρόνο ξήρανσής του έως την υγρασία στόχο.

Παρατηρούμε ότι όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία ξήρανσης τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για την ξήρανση του δείγματος. Όμως, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι όταν ο χυμός ξηραίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό

διάστημα υπάρχει η πιθανότητα να έχουμε μείωση της συγκέντρωσης θερμοευαίσθητων ουσιών, όπως είναι οι βιταμίνες, αλλά και επιπτώσεις στο χρώμα της σκόνης.

Επιπλέον, για διαφορετική θερμοκρασία ξήρανσης, διαφορετικά συστήματα έχουν μεγαλύτερο λόγο. Για θερμοκρασία ξήρανσης 40°C, τα συστήματα με πρωτεΐνη ορού (0,173769333 g/h) και με πρωτεΐνη αρακά (0,188713667 g/h) ξηραίνονται πιο γρήγορα από ότι ο σκέτος χυμός μανταρινιού (0,122158 g/h). Για θερμοκρασία ξήρανσης 70°C μόνο το σύστημα με πρωτεΐνη ορού (0,88637225 g/h) παρουσίαζε μεγαλύτερο λόγο από τον χυμό (0,725404333 g/h). Τέλος, για θερμοκρασία ξήρανσης 55°C ο χυμός έχει τον καλύτερο λόγο (0,725404333 g/h). Τον χαμηλότερο λόγο η πρωτεΐνη αρακά (0,2706995 g/h) και η πρωτεΐνη ορού γάλακτος (0,301066 g/h).

Σε αυτήν την εργασία θα μελετήσουμε τις φυσικές ιδιότητες των συστημάτων πρωτεΐνης ορού σε συνδυασμό με ξανθάνη και πρωτεΐνης αρακά σε συνδυασμό με ξανθάνη.

4.5. Απόδοση διεργασίας

Σημαντική παράμετρος της ξήρανσης είναι η απόδοση. Η απόδοση ξήρανσης προσδιορίστηκε διαιρώντας το βάρος της στερεάς μάζας που ελήφθη μετά την ξήρανση με τη συνολική μάζα των στερεών που τροφοδοτήθηκαν στον ξηραντήρα.

Στις μεθόδους ξήρανσης με λυοφιλίωση και ξήρανσης με στρώμα αφρού σε θερμό ρεύμα αέρα, δεν υπάρχει απώλεια στερεάς μάζας λόγω της διεργασίας. Επομένως, θεωρούμε ότι η απόδοση ανέρχεται στο 100%. Στην ξήρανση με ψεκασμό, γνωρίζουμε ότι υπάρχουν απώλειές καθώς σκόνη προσκολλάται στα τοιχώματα του ξηραντήρα. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι αποδόσεις για τα τέσσερα δείγματα της συγκεκριμένης μεθόδου ξήρανσης.

Πίνακας 15. Απόδοση ξήρανσης με ψεκασμό για τα τέσσερα δείγματα.

Δείγμα	Απόδοση (%)
2x Brix MD	35,14
1,9x Brix MD + 0,1x Brix WPC	56,36
1,34x Brix MD + 0,33x Brix GA	53,78
1x Brix MD + 1x Brix WPC	48,71

Την χαμηλότερη και υψηλότερη απόδοση την συναντάμε στο δείγμα (2x Brix MD) και (1,9x Brix MD + 0,1x Brix WPC) αντίστοιχα. Η διαφορά στην απόδοση που συναντάμε ανάμεσα στα δείγματα (1,9x Brix MD + 0,1x Brix WPC) και (1x Brix MD + 1x Brix WPC), μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι στο δεύτερο δείγμα λόγω της υψηλής συγκέντρωσης πρωτεΐνης δεν ολοκληρώθηκε η διεργασία της ξήρανσης.

4.6. Προσδιορισμός υγρασίας

Ο προσδιορισμός της υγρασίας που έχει η παραγόμενη σκόνη είναι πολύ σημαντική, καθώς συνδέεται άμεσα με την διάρκεια ζωής του προϊόντος και με την μικροβιακή του αλλοίωσή του (Aziz et al., 2017; Stavra et al., 2022). Έρευνες αναφέρουν ότι για

να είναι μια σκόνη ασφαλής, όσον αφορά την ανάπτυξη μικροοργανισμών, και να μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλο χρονικό διάστημα θα πρέπει να έχει υγρασία έως και 5% (Aziz et al., 2017; Tkacz et al., 2020). Επιπλέον, όσο περισσότερη υγρασία έχει μια σκόνη τόσο πιο γρήγορα θα παρατηρηθεί συσσωμάτωση των σωματιδίων σκόνης, με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται το προϊόν (Stavra et al., 2022). Παράγοντες που επηρεάζουν την περιεκτικότητα σε υγρασία είναι η μέθοδος ξήρανσης, οι συνθήκες κάτω από τις οποίες παράγεται η σκόνη και οι πρόσθετες ουσίες που τοποθετούνται για να έχει καλύτερες ιδιότητες το προϊόν (Tkacz et al., 2020).

Όπως φαίνεται στο Πίνακα 16, η υγρασία κυμαίνεται από 0,108544 έως 0,0226269. Η μέγιστη τιμή υγρασίας ανήκει στο δείγμα juice, το οποίο έχει παραχθεί με ξήρανση με λυοφιλίωση, και η ελάχιστη τιμή στο δείγμα WPC + XG 70°C, το οποίο έχει παραχθεί με ξήρανση αφρού με θερμό αέρα.

Από το στατιστικό πρόγραμμα παρατηρούμε ότι το $p - value < 0,05$, επομένως υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά της μέσης τιμής υγρασίας μεταξύ των δειγμάτων.

Από τη δοκιμή Duncan διαπιστώνεται ότι στατιστικά σημαντική διαφορά στην μέση τιμή υγρασίας υπάρχει ακόμα και μεταξύ δειγμάτων που παράχθηκαν με την ίδια μέθοδο ξήρανσης.

Όσον αφορά την ξήρανση με ψεκασμό, στατιστικά σημαντική διαφορά της μέσης τιμής υγρασίας παρατηρείται ανάμεσα στα δείγματα εκτός από τα δείγματα 2x Brix MD και 1,9x Brix MD + 0,1x Brix WPC.

Όσον αφορά την ξήρανση με στρώμα αφρού, στατιστικά σημαντική διαφορά της μέσης τιμής υγρασίας δεν έχουν τα δείγματα WPC + XG και PPC + XG, των οποίων η ξήρανση πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία 40°C. Για τα δείγματα που περιέχουν WPC και XG, αλλά έχουν ξηραθεί σε διαφορετική θερμοκρασία, παρατηρείται στατιστικά σημαντική διαφορά της μέσης τιμής. Για τα δείγματα που περιέχουν PPC και XG, μεταξύ των θερμοκρασιών 55°C και 70°C, δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά της μέσης τιμής αλλά και ούτε με το δείγμα WPC + XG στους 55°C. Τέλος, στη λυοφιλίωση συναντάμε στατιστικά σημαντική διαφορά της μέσης τιμής υγρασίας ανάμεσα στα δείγματα.

Από τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι στην υγρασία σημαντικό ρόλο παίζει τόσο η μέθοδος ξήρανσης όσο και οι πρόσθετες ουσίες που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με το χυμό.

4.7. Προσδιορισμός ενεργότητας νερού

Με την διαδικασία της ξήρανσης, οι σκόνες που λαμβάνονται έχουν χαμηλά επίπεδα ενεργότητας νερού. Με αυτόν τον τρόπο αναστέλλεται ή μειώνεται η αποικοδόμηση των βιολογικά ενεργών ενώσεων και η μη ενζυματική αμαύρωση παράλληλα με μείωση της ανάπτυξης μικροοργανισμών, όπως για παράδειγμα ζαχαρομυκήτων, βακτηρίων ή μούχλας, στο προϊόν (Tkacz et al., 2020). Γενικά, όταν η τιμή a_w της σκόνης είναι κάτω από 0,6 θεωρείται ασφαλές από μικροβιακή αλλοίωση (Chen et al., 2021).

Πίνακας 16. Ενεργότητα νερού και υγρασία στα δείγματα σκόνης μανταρινιού.

Μέθοδος Ξήρανσης	Δείγμα	a_w (25°C)	Υγρασία (wb)
Freeze	5% GA + 1% sugar cane fiber	0,3023 ± 0,0240 ^{ghi}	0,1036 ± 0,0118 ⁱ
	5% MD + 1% sugar cane fiber	0,291 ± 0,009 ^{fghi}	0,0902 ± 0,0100 ^h
	5% MD juice	0,304 ± 0,0274 ^{ghi}	0,0903 ± 0,0085 ^h
	9% MD + 0,625% CMC	0,3013 ± 0,0181 ^{ghi}	0,1085 ± 0,0075 ⁱ
	9% MD + 9% GA	0,2847 ± 0,0232 ^{fghi}	0,0682 ± 0,0079 ^{efg}
	5% PPC + 0,25% XG	0,215 ± 0,0606 ^{ab}	0,059 ± 0,0125 ^{cde}
	5% WPC + 0,25% XG	0,27 ± 0,0104 ^{efg}	0,0763 ± 0,0082 ^g
	5% MD + 1% native corn starch	0,1827 ± 0,0448 ^a	0,0704 ± 0,0092 ^{fg}
Spray	2x Brix MD	0,313 ± 0,0430 ^{ghi}	0,0855 ± 0,03821 ^h
	1,9x Brix MD + 0,1x Brix WPC	0,329 ± 0,007 ^{ij}	0,0516 ± 0,0068 ^c
	1,34x Brix MD + 0,33x Brix GA	0,3647 ± 0,0115 ^j	0,0623 ± 0,0045 ^{def}
	1x Brix MD + 1x Brix WPC	0,326 ± 0,0178 ^{hij}	0,0548 ± 0,0095 ^{cd}
Foam-mat	1x Brix MD + 1x Brix WPC	0,282 ± 0,0231 ^{fgh}	0,0571 ± 0,0064 ^{cd}
	WPC + XG 40°C	0,2857 ± 0,0186 ^{fghi}	0,0609 ± 0,0047 ^{cdef}
	WPC + XG 55°C	0,2568 ± 0,0103 ^{cde}	0,0374 ± 0,0066 ^b
	WPC + XG 70°C	0,2337 ± 0,0209 ^{bcd}	0,0226 ± 0,0072 ^a
	PPC + XG 40°C	0,2988 ± 0,0316 ^{fghi}	0,0564 ± 0,0024 ^{cd}
	PPC + XG 55°C	0,274 ± 0,0138 ^{efg}	0,0383 ± 0,0104 ^b
	PPC + XG 70°C	0,2263 ± 0,0069 ^{bc}	0,034041 ± 0,0044 ^b

(a-h) την ίδια στήλη υποδεικνύουν σημαντική στατιστική διαφορά ($p < 0,05$) όπως αναλύθηκε με τη δοκιμή Duncan.

Στον Πίνακα 16 φαίνεται ότι η ενεργότητα νερού κυμαίνεται από 0,364667 έως 0,182667. Η μέγιστη τιμή ενεργότητας νερού ανήκει στο δείγμα (1,9x Brix MD + 0,1x Brix WPC), το οποίο έχει παραχθεί με ξήρανση με ψεκασμό και η ελάχιστη τιμή στο δείγμα 5% WPC + 0,25% XG, το οποίο έχει παραχθεί με λυοφιλίωση.

Από το στατιστικό πρόγραμμα παρατηρούμε ότι το $p - value < 0,05$, επομένως υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά της μέσης τιμής a_w μεταξύ των δειγμάτων.

Από τη δοκιμή Duncan διαπιστώνεται ότι στατιστικά σημαντική διαφορά στην μέση τιμή της a_w υπάρχει ακόμα και μεταξύ δειγμάτων που παράχθηκαν με την ίδια μέθοδο ξήρανσης.

Όσον αφορά την ξήρανση με στρώμα αφρού, στα δείγματα που η ξήρανση έγινε σε θερμοκρασίες 40°C και 55°C, δεν παρατηρείται στατιστικά σημαντική διαφορά της μέσης τιμής της a_w , ανεξαρτήτως ποια πρωτεΐνη έχει προστεθεί. Δηλαδή, στατιστικά σημαντική διαφορά παρατηρείται μεταξύ των δειγμάτων με ξήρανση στους 70°C και εκείνων με ξήρανση στους 40°C και μεταξύ των δειγμάτων με ξήρανση στους 70°C και εκείνων με ξήρανση στους 55°C.

Όσον αφορά την ξήρανση με ψεκασμό, στατιστικά σημαντική διαφορά της μέσης τιμής της a_w παρατηρείται ανάμεσα στα δείγματα (2x Brix MD) - (1x Brix MD + 1x Brix WPC) και (1,9x Brix MD + 0,1x Brix WPC) - (1x Brix MD + 1x Brix WPC).

Τέλος, στην ξήρανση με λυοφιλίωση τα δείγματα 9% MD + 9% GA, 5% WPC + 0,25% XG έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά της μέσης τιμής της a_w με τα υπόλοιπα δείγματα.

4.8. Πυκνότητα και πορώδες

Από το στατιστικό πρόγραμμα παρατηρούμε ότι $p - value < 0,05$, επομένως υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά της μέσης τιμής της φαινομενικής πυκνότητας, της πραγματικής πυκνότητας και του πορώδους μεταξύ των δειγμάτων.

Από τη δοκιμή Duncan διαπιστώνεται ότι στατιστικά σημαντική διαφορά στις τρεις διαφορετικές μέσες τιμές υπάρχει κυρίως μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων ξήρανσης. Δηλαδή η μέθοδος ξήρανσης επηρεάζει και τις τρεις παραμέτρους.

Πίνακας 17. Πυκνότητα και πορώδες στα δείγματα σκόνης μανταρινιού.

Μέθοδος Ξήρανσης	Δείγμα	Φαινομενική πυκνότητα	Πραγματική πυκνότητα	Πορώδες
Freeze	5% GA + 1% sugar cane fiber	0,5493 ± 0,0096 ^{cd}	0,694 ± 0,0049 ^{ef}	0,2086 ± 0,0087 ^{bcd}
	5% MD + 1% sugar cane fiber	0,5614 ± 0,0172 ^d	0,67994 ± 0,0023 ^{ef}	0,1744 ± 0,0267 ^{abcd}
	5% MD juice	0,5724 ± 0,0539 ^d 0,6907 ± 0,0671 ^e	0,6968 ± 0,0159 ^{ef} 0,8059 ± 0,1043 ^{gh}	0,1775 ± 0,0903 ^{abcd} 0,1404 ± 0,0304 ^{abc}
	9% MD + 0,625% CMC	0,4865 ± 0,0155 ^{bcd}	0,6376 ± 0,0216 ^{de}	0,2359 ± 0,0493 ^{de}
	9% MD + 9% GA	0,4946 ± 0,0091 ^{bcd}	0,6405 ± 0,0169 ^{de}	0,2274 ± 0,0239 ^{cde}
	5% PPC + 0,25% XG	0,5461 ± 0,0290 ^{cd}	0,6565 ± 0,0190 ^{de}	0,1675 ± 0,0531 ^{abcd}
	5% WPC + 0,25% XG	0,4491 ± 0,0182 ^{bc}	0,5588 ± 0,0072 ^{bcd}	0,1959 ± 0,0432 ^{bcd}
	5% MD + 1% native corn starch	0,6788 ± 0,0204 ^e	0,76958 ± 0,0098 ^{fg}	0,1179 ± 0,0285 ^{ab}
Spray	2x Brix MD	0,3243 ± 0,0089 ^a	0,457 ± 0,0034 ^{ab}	0,2902 ± 0,0247 ^e
	1,9x Brix MD + 0,1x Brix WPC	0,3323 ± 0,0059 ^a	0,4430 ± 0,0037 ^a	0,25 ± 0,0347 ^{de}
	1,34x Brix MD + 0,33x Brix GA	0,327 ± 0,0059 ^a	0,4087 ± 0,0044 ^a	0,2 ± 0,0287 ^{bcd}
	1x Brix MD + 1x Brix WPC	0,3394 ± 0,0059 ^a	0,4242 ± 0,004 ^a	0,2 ± 0,0278 ^{bcd}
Foam-mat	WPC + XG 40°C	0,4375 ± 0,0781 ^b	0,5108 ± 0,1271 ^{abc}	0,1333 ± 0,0654 ^{ab}
	WPC + XG 55°C	0,4932 ± 0,0586 ^{bcd}	0,5607 ± 0,0526 ^{bcd}	0,1217 ± 0,0407 ^{ab}
	WPC + XG 70°C	0,5005 ± 0,0737 ^{bcd}	0,5657 ± 0,0552 ^{bcd}	0,1176 ± 0,0618 ^{ab}
	PPC + XG 40°C	0,5252 ± 0,0328 ^{bcd}	0,5831 ± 0,0315 ^{cde}	0,0993 ± 0,0299 ^a
	PPC + XG 55°C	0,4879 ± 0,0346 ^{bcd}	0,5573 ± 0,0270 ^{bcd}	0,125 ± 0,0362 ^{bc}
	PPC + XG 70°C	0,4586 ± 0,0427 ^{bc}	0,5625 ± 0,0479 ^{bcd}	0,1844 ± 0,0394 ^{bcd}

(a-g) την ίδια στήλη υποδεικνύουν σημαντική στατιστική διαφορά ($p < 0,05$) όπως αναλύθηκε με τη δοκιμή Duncan.

Στα δείγματα, στα οποία πραγματοποιήθηκε ξήρανση με ψεκασμό, δεν υπάρχει κάποια στατιστικά σημαντική διαφορά στην μέση τιμή της φαινομενικής πυκνότητας, στην μέση τιμή της πραγματικής πυκνότητας και στη μέση τιμή του πορώδους.

Στη μέθοδο ξήρανσης με στρώμα αφρού σε ρεύμα θερμού αέρα τα δείγματα δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά στην μέση τιμή της φαινομενικής πυκνότητας, στην μέση τιμή της πραγματικής πυκνότητας και στη μέση τιμή πορώδους.

Άρα στην μέθοδο αυτήν η θερμοκρασία στην οποία στεγνώνουν τα δείγματα δεν επηρεάζει τις συγκεκριμένες ιδιότητες.

Στη μέθοδο λυοφιλίωσης, τα δείγματα χυμού και 5% MD+ 1% native corn starch είναι εκείνα που έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά στην μέση τιμή τόσο της προγραμματικής όσο και της φαινομενικής πυκνότητας. Όσον αφορά την μέση τιμή πορώδους, δεν παρατηρείται στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δειγμάτων.

Και για την φαινομενική και για την πραγματική πυκνότητα, τις χαμηλότερες τιμές τις συναντάμε στην ξήρανση με ψεκασμό. Τις μεγαλύτερες τιμές τις συναντάμε στην ξήρανση με λυοφιλίωση.

Τις μεγαλύτερες τιμές στο πορώδες τις συναντάμε στη ξήρανση με ψεκασμό, ενώ τις χαμηλότερες στην ξήρανση με στρώμα αφρού σε ρεύμα θερμού αέρα.

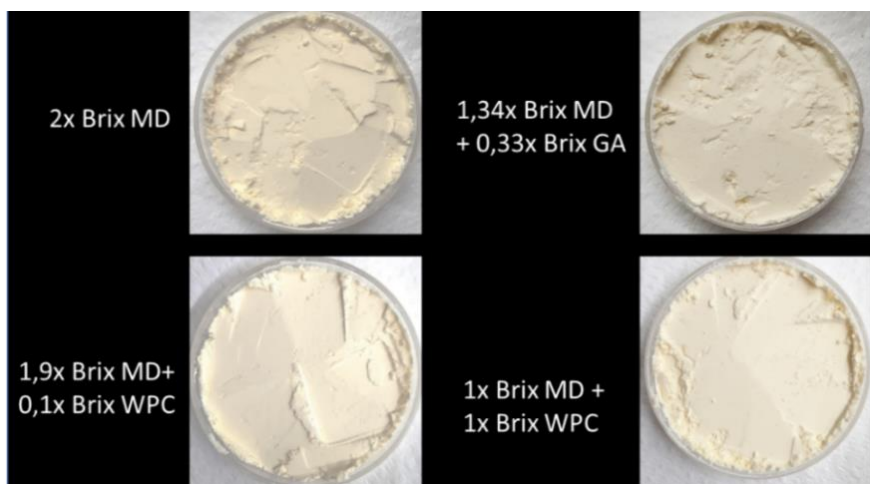
4.9. Χρώμα

Το χρώμα της σκόνης που ξηραίνεται είναι σημαντικό, καθώς καθορίζει την ποιότητα και την αισθητηριακή ελκυστικότητα των προϊόντων. Στα Σχήματα 28 - 30 παρατίθενται οι φωτογραφίες από τις σκόνες που παράχθηκαν με τους τρεις διαφορετικούς τρόπους.

Και με τις τρεις μεθόδους παίρνουμε σκόνες οι οποίες είναι φωτεινές (η τιμή L^* είναι πιο κοντά στο 100), οι τιμές a^* και b^* είναι θετικές, δηλαδή το χρώμα των σκονών είναι προς το κόκκινο και κίτρινο αντίστοιχα.

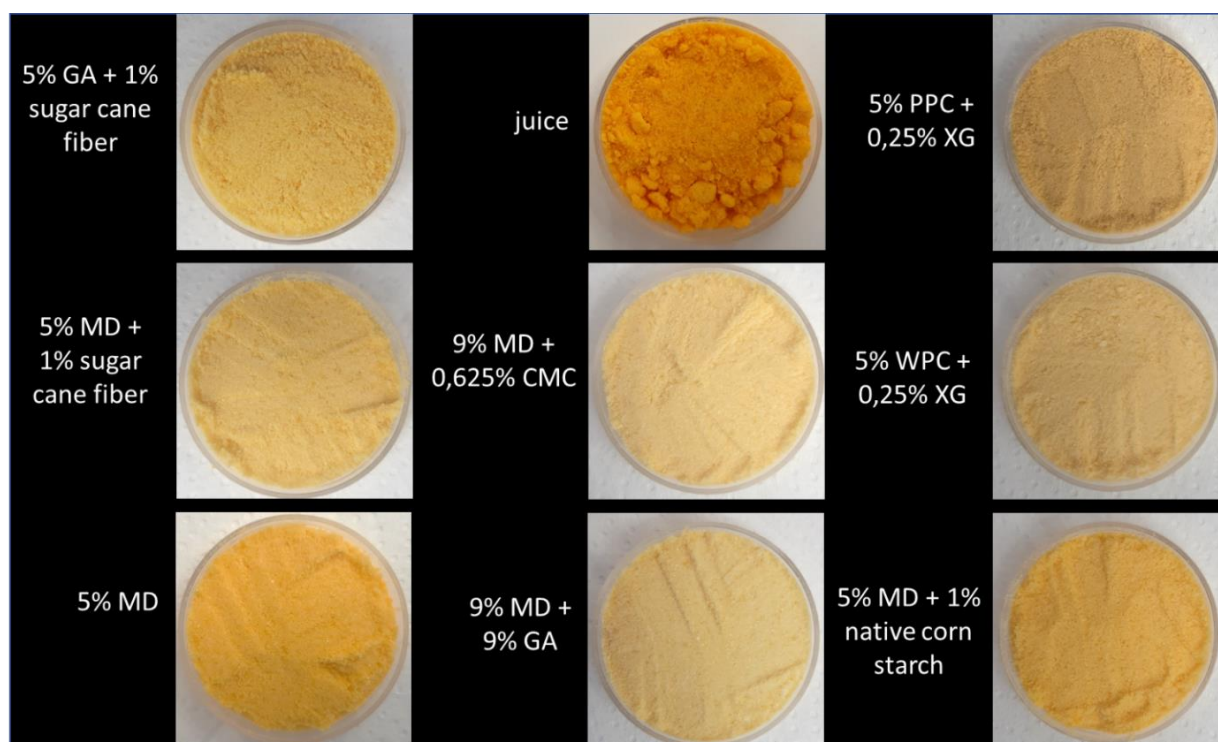
Από το στατιστικό πρόγραμμα παρατηρούμε ότι $p - value < 0,05$, επομένως υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στις μέσες τιμές των παραμέτρων L^* , a^* και b^* μεταξύ των δειγμάτων.

Από τη δοκιμή Duncan διαπιστώνεται ότι στατιστικά σημαντική διαφορά στην μέση τιμή υπάρχει κυρίως μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων ξήρανσης. Δηλαδή, η μέθοδος ξήρανσης επηρεάζει το χρώμα που θα έχει η κάθε σκόνη.



Σχήμα 28. Σκόνες από την ξήρανση με ψεκασμό.

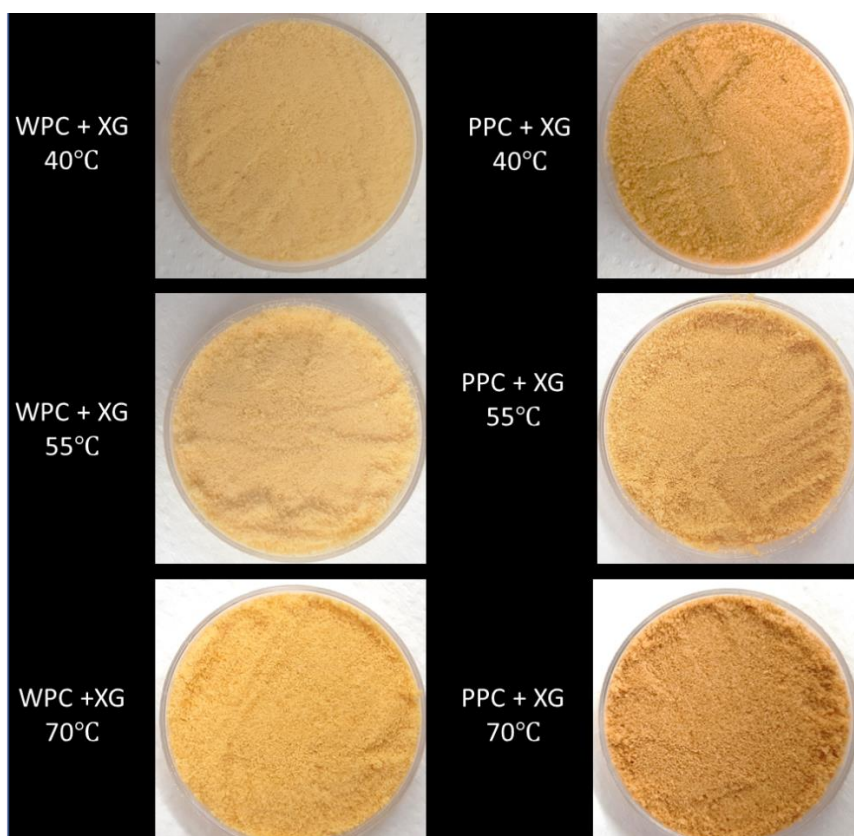
Τα δείγματα, στα οποία πραγματοποιήθηκε ξήρανση με ψεκασμό δεν υπάρχει κάποια στατιστικά σημαντική διαφορά στην μέση τιμή L* και στην μέση τιμή a*. Στα δείγματα στα οποία πραγματοποιήθηκε ξήρανση με ψεκασμό υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στην μέση τιμή b* μόνο μεταξύ του δείγματος 1,34x Brix MD + 0,33x Brix GA και των άλλων τριών.



Σχήμα 29. Σκόνες από την ξήρανση με λυοφιλίωση.

Και στη λυοφιλίωση υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στην μέση ανάμεσα στα δείγματα στη μέση τιμή L*. Πιθανών γι' αυτό να οφείλονται οι διαφορετικές ουσίες που προστίθενται στον χυμό καθώς οι συνθήκες ξήρανσης είναι ίδιες για όλα τα δείγματα. Το ίδιο ισχύει τόσο για την μέση τιμή a* όσο και για την μέση τιμή b*.

Στη ξήρανση με στρώμα αφρού σε ρεύμα θερμού αέρα, για τον παράγοντα L* υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στην μέση τιμή του. Τόσο η πρωτεΐνη όσο και η θερμοκρασία καθορίζουν τον συγκεκριμένο παράγοντα. Σημαντικό ρόλο στην τιμή a* παίζει η πρωτεΐνη και όχι η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιήθηκε η διεργασία. Αντιθέτως, σημαντικό ρόλο στην τιμή b* παίζει τόσο η πρωτεΐνη όσο και η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιήθηκε η διεργασία.



Σχήμα 30. Σκόνες από την ξήρανση αφρού με ρεύμα θερμού αέρα.

Πίνακας 18. Μετρήσεις χρώματος στα δείγματα σκόνης μανταρινιού.

Μέθοδος Ξήρανσης	Δείγμα	L*	a*	b*
Freeze	5% GA + 1% sugar cane fiber	80,0467 ± 0,4508 ^{def}	9,7667 ± 0,2479 ^{cde}	44,33 ± 0,3928 ^{hij}
	5% MD + 1% sugar cane fiber	80,7433 ± 0,5800 ^{ef}	9,9367 ± 0,1779 ^{cde}	46,1233 ± 1,2664 ^{ij}
	5% MD juice	78,93 ± 0,21 ^{de}	13,11 ± 0,296 ^f	52,9 ± 0,4078 ^l
	9% MD + 0,625% CMC	71,55 ± 0,2722 ^{bc}	16,72 ± 0,2553 ^g	58,44 ± 0,3274 ^m
	9% MD + 9% GA	84,7067 ± 0,0404 ^g	8,7233 ± 0,0493 ^{bcd}	43,3733 ± 0,2542 ^{ghi}
	5% PPC + 0,25% XG	85,0567 ± 0,3612 ^g	6,9967 ± 0,2031 ^b	37,3267 ± 0,8622 ^d
	5% WPC + 0,25% XG	76,43 ± 0,03 ^d	10,0267 ± 0,1358 ^{cde}	38,9833 ± 0,3150 ^{def}
	5% MD + 1% native corn starch	83,6233 ± 0,1701 ^{fg}	8,07667 ± 0,1665 ^{bc}	40,1633 ± 0,2026 ^{defg}
Spray	2x Brix MD	77,54 ± 0,1916 ^{de}	12,33 ± 0,5112 ^{ef}	50,5167 ± 1,1461 ^{kl}
	1,9x Brix MD + 0,1 Brix WPC	91,3433 ± 0,0907 ^h	1,94333 ± 0,0153 ^a	21,1433 ± 0,0723 ^b
	1,34x Brix MD + 0,33 Brix GA	90,8867 ± 0,2765 ^h	2,39 ± 0,1311 ^a	21,1333 ± 0,5382 ^b
	1x Brix MD + 1x Brix WPC	91,5867 ± 0,2228 ^h	1,38333 ± 0,0115 ^a	16,4967 ± 0,0874 ^a
Foam-mat	WPC + XG 40°C	90,84 ± 0,1212 ^h	2,45333 ± 0,0058 ^a	20,5633 ± 0,0737 ^b
	WPC + XG 55°C	80,5817 ± 1,1 ^{ef}	9,17444 ± 2,5722 ^{bcd}	47,3014 ± 3,0374 ^{jk}
	WPC + XG 70°C	78,6344 ± 1,7762 ^{de}	7,92667 ± 2,8963 ^{bc}	47,7433 ± 2,6594 ^{jk}
	PPC + XG 40°C	72,86 ± 6,065 ^c	8,134 ± 1,6340 ^{bc}	40,8707 ± 6,6760 ^{efgh}
	PPC + XG 55°C	71,2422 ± 3,7777 ^{bc}	11,9689 ± 1,4415 ^{ef}	41,6133 ± 1,9288 ^{fgh}
	PPC + XG 70°C	68,4678 ± 1,6102 ^b	10,8811 ± 2,1643 ^{def}	38,8117 ± 2,4315 ^{de}
	PPC + XG 70°C	64,3328 ± 2,4151 ^a	9,80611 ± 1,3613 ^{cde}	33,2783 ± 0,6797 ^c

(a-m)την ίδια στήλη υποδεικνύουν σημαντική στατιστική διαφορά (p < 0,05) όπως αναλύθηκε με τη δοκιμή Duncan.

Διαπιστώνουμε ότι η ξήρανση με ψεκασμό, σαν μέθοδος, οδηγεί στην παραγωγή σκόνης με υψηλότερη τιμή L^* και χαμηλότερες τιμές a^* , b^* από ότι οι άλλες δύο μέθοδοι ξήρανσης. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με αποτελέσματα από την μελέτη του Phing (Phing et al., 2022). Η ξήρανση με ψεκασμό σαν μέθοδος έχει τιμές για τις παραμέτρους a^* και b^* πιο κοντά στον φυσικό χυμό από ότι οι άλλες μέθοδοι. Ο χυμός όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω έχει $a^* = 1,2225$ και $b^* = 23,2663$. Όμως για την παράμετρο L^* οι τιμές που έχουν οι παραγόμενες σκόνες διαφέρουν από αυτή του φυσικού χυμού (35,3962)

4.10. Ασκορβικό οξύ

Σημαντικό είναι να διατηρηθεί στις σκόνες η βιταμίνη C, καθώς είναι μια σημαντική για τον άνθρωπο βιταμίνη και τα μανταρίνια είναι πλούσια σε αυτήν.

Από τις τιτλοδοτήσεις με ινδοφαινόλη διαπιστώνουμε ότι την υψηλότερη περιεκτικότητα σε βιταμίνη C την έδωσε το δείγμα του σκέτου χυμού, το οποίο ξηράθηκε με λυοφιλίωση. Την χαμηλότερη συγκέντρωση την παρατηρούμε στο δείγμα PPC + XG στους 70°C, μετά από σχηματισμό αφρού. Γενικά, όμως, διαπιστώνουμε ότι η πρωτεΐνη αρακά δεν προστατεύει την βιταμίνη, γι' αυτό και τα δείγματα έχουν την μεγαλύτερη ποιοτική υποβάθμιση σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα, ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας ξήρανσης. Αρκετά καλά αποτελέσματα εμφάνισαν τα δείγματα, τα οποία υπέστησαν ξήρανση με ψεκασμό. Αν και η θερμοκρασία του αέρα ήταν υψηλή, το μικρό χρονικό διάστημα που έρχεται ο χυμός σε επαφή με τον αέρα, προστάτεψε την βιταμίνη από την αποικοδόμησή της.

Από το στατιστικό πρόγραμμα παρατηρούμε ότι $p - value < 0,05$, επομένως υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά της μέσης τιμής ασκορβικού οξέος μεταξύ των δειγμάτων.

Από τη δοκιμή Duncan διαπιστώνεται ότι στατιστικά σημαντική διαφορά στην μέση τιμή ασκορβικού οξέος υπάρχει ακόμα και μεταξύ δειγμάτων που παράχθηκαν με την ίδια μέθοδο ξήρανσης.

Πιο αναλυτικά, στη μέθοδο ξήρανσης αφρού με ρεύμα θερμού αέρα, παρατηρούμε ότι τα ποσοστά ασκορβικού οξέος είναι παραπλήσια μόνο αναμεσα σε δύο ζεύγη δειγμάτων. Τα ζεύγη αυτά είναι PPC + XG 40°C- PPC + XG 55°C και WPC + XG 40°C- WPC + XG 55°C. Στην θερμοκρασία 70°C η καταστροφή της βιταμίνης C είναι αισθητά μεγαλύτερη από ότι στις άλλες δύο θερμοκρασίες.

Στη μέθοδο του ψεκασμού, αν και υπάρχει μεγάλη διατήρηση της βιταμίνης, διαπιστώνονται σημαντικές στατιστικές διαφορές ανάμεσα στα δείγματα. Συνεπώς, στη μέθοδο αυτή οι ουσίες που προστίθενται επηρεάζουν την διατήρηση της βιταμίνης. Το ίδιο συμβαίνει και στην λυοφιλίωση. Οι ουσίες που τοποθετήθηκαν στον χυμό μανταρινιού παίζουν ρόλο στα ποσοστά της βιταμίνης.

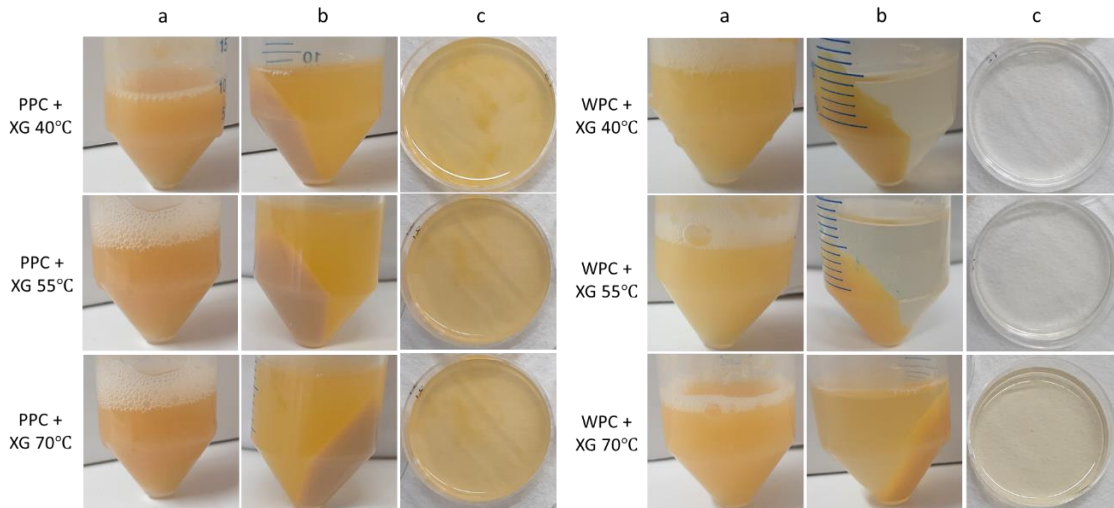
Πίνακας 19. Μετρήσεις ασκορβικού οξέος στα δείγματα σκόνης μανταρινιού.

Μέθοδος Ξήρανσης	Δείγμα	Ασκορβικό οξύ (mg/100ml)
Freeze	5% GA + 1% sugar cane fiber	36,3964 ± 0,3121 ^d
	5% MD + 1% sugar cane fiber	37,4775 ± 0,6242 ^d
	5% MD	36,2162 ± 2,3562 ^d
	juice	55,6757 ± 0,5405 ^h
	9% MD + 0,625% CMC	37,8378 ± 0,00 ^{de}
	9% MD + 9% GA	41,8018 ± 0,3121 ^g
	5% PPC + 0,25% XG	39,2793 ± 0,8257 ^{ef}
	5% WPC + 0,25% XG	43,6036 ± 0,3121 ^{hi}
	5% MD + 1% native corn starch	44,6847 ± 0,6242 ^{ij}
Spray	2x Brix MD	41,6216 ± 0,00 ^g
	1,9x Brix MD + 0,1x Brix WPC	43,7838 ± 1,4301 ^{hi}
	1,34x Brix MD + 0,33x Brix GA	44,1441 ± 0,3121 ⁱ
	1x Brix MD + 1x Brix WPC	45,9459 ± 1,0811 ^j
Foam-mat	WPC + XG 40°C	40,5405 ± 0,9362 ^{fg}
	WPC + XG 55°C	42,1622 ± 0,9362 ^{gh}
	WPC + XG 70°C	32,0721 ± 0,8257 ^c
	PPC + XG 40°C	28,1081 ± 1,949 ^b
	PPC + XG 55°C	28,8288 ± 0,6242 ^b
	PPC + XG 70°C	18,018 ± 0,6242 ^a

(a-j)την ίδια στήλη υποδεικνύουν σημαντική στατιστική διαφορά ($p < 0,05$) όπως αναλύθηκε με τη δοκιμή Duncan.

4.11. Υδατοδιαλυτότητα και κατακράτηση νερού

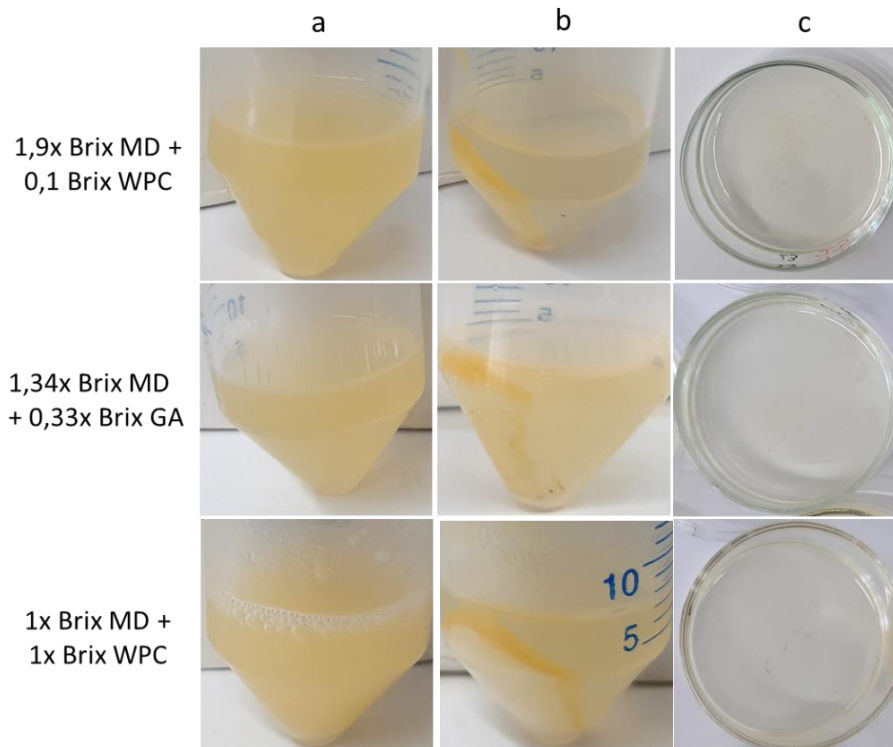
Μια ιδιότητα των σκονών που αξίζει να μελετηθεί είναι σε τι ποσοστό μπορεί να επαναδιαλυθεί σε νερό, έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει ανασύσταση του χυμού. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το χρώμα που έχει η ανασυσταμένη σκόνη.



Σχήμα 31. Σκόνες από την ξήρανση αφρού μετά από ανασύσταση α) μετά από ανάδευση β) μετά από φυγοκέντρηση γ) υπερκείμενο.

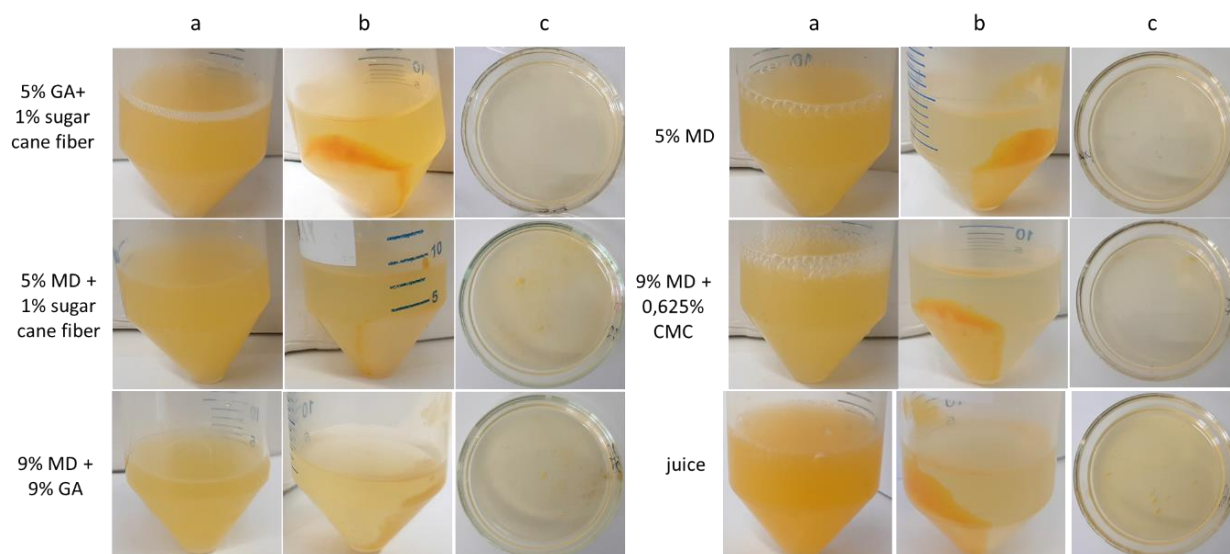
Από το Σχήμα 31 παρατηρούμε ότι η πρωτεΐνη αρικά, σε οποιαδήποτε θερμοκρασία κι αν έχει πραγματοποιηθεί η ξήρανση, δεν δεσμεύει το χρώμα του χυμού. Αντίθετα, η πρωτεΐνη ορού δεσμεύει το χρώμα στις θερμοκρασίες 40°C και 55 °C και δεν το αφήνει να απελευθερωθεί στο νερό.

Στις σκόνες που παράχθηκαν με ψεκάσμο (Σχήμα 32) παρατηρούμε ότι το χρώμα μετά την ανασύσταση δεν είναι έντονο στο νερό. Πιθανόν να παραμένει δεσμευμένο στην αδιάλυτη σκόνη.

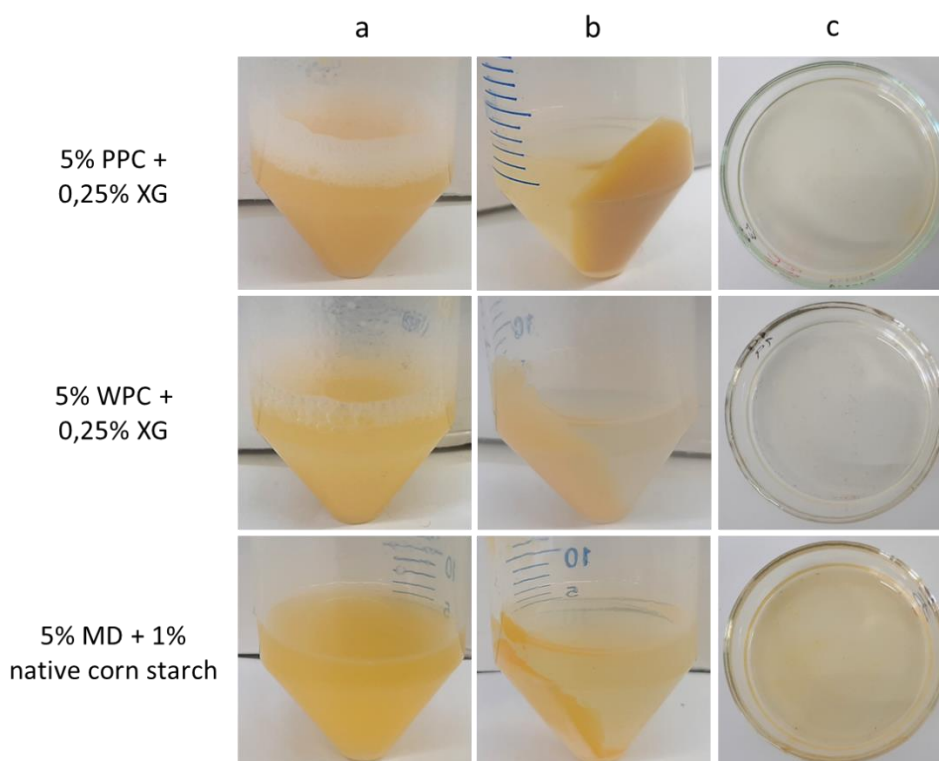


Σχήμα 32. Σκόνες από την ξήρανση με ψεκάσμο μετά από ανασύσταση α) μετά από ανάδευση β) μετά από φυγοκέντρηση γ) υπερκείμενο.

Τέλος, όσον αφορά τις σκόες από λυοφιλίωση, το δείγμα του σκέτου χυμού είναι αυτό που μετά την ανασύσταση έχει παρόμοιο χρώμα με το χρώμα του εμπορικού χυμού. Αντίθετα, τα δείγματα που περιέχουν πρωτεΐνες δεν έχουν έντονο χρώμα στο νερό.



Σχήμα 33α. Σκόες από την ξήρανση με λυοφιλίωση μετά από ανασύσταση α) μετά από ανάδευση β) μετά από φυγοκέντρηση γ) υπερκείμενο.



Σχήμα 33β. Σκόες από την ξήρανση με λυοφιλίωση μετά από ανασύσταση α) μετά από ανάδευση β) μετά από φυγοκέντρηση γ) υπερκείμενο.

Από το στατιστικό πρόγραμμα παρατηρούμε ότι $p - value < 0,05$, επομένως υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά της μέσης τιμής υδατοδιαλυτότητας μεταξύ των δειγμάτων.

Από τη δοκιμή Duncan διαπιστώνεται ότι στατιστικά σημαντική διαφορά στην μέση τιμή κατακράτησης νερού δεν υπάρχει μεταξύ δειγμάτων που παράχθηκαν με την ίδια μέθοδο ξήρανσης.

Πίνακας 20. Μετρήσεις υδατοδιαλυτότητας και κατακράτησης νερού στις σκόνες.

Μέθοδος Ξήρανσης	Δείγμα	Υδατοδιαλυτότητα	Κατακράτηση νερού
Freeze	5% GA + 1% sugar cane fiber	0,7431 ± 0,0302 ^c	0,0581 ± 0,0144 ^{ab}
	5% MD + 1% sugar cane fiber	0,8084 ± 0,0505 ^d	0,0341 ± 0,01999 ^a
	5% MD	0,8091 ± 0,0214 ^d	0,0198 ± 0,0054 ^a
	juice	0,7692 ± 0,0059 ^c	0,013 ± 0,0123 ^a
	9% MD + 0,625% CMC	0,8104 ± 0,0217 ^d	0,0244 ± 0,0044 ^a
	9% MD + 9% GA	0,8694 ± 0,0082 ^e	0,0261 ± 0,0019 ^a
	5% PPC + 0,25% XG	0,4692 ± 0,015 ^a	0,3266 ± 0,0153 ^{cd}
	5% WPC + 0,25% XG	0,5210 ± 0,0093 ^b	0,2986 ± 0,0280 ^c
	5% MD + 1% native corn starch	0,7679 ± 0,0042 ^c	0,0355 ± 0,0183 ^a
	Spray	1,9x Brix MD + 0,1x Brix WPC	0,8721 ± 0,0213 ^e
1,34x Brix MD + 0,33x Brix GA		0,8825 ± 0,0204 ^e	0,0245 ± 0,0043 ^a
1x Brix MD + 1x Brix WPC		0,7585 ± 0,0293 ^c	0,0935 ± 0,0116 ^b
Foam-mat	WPC + XG 40°C	0,5192 ± 0,0143 ^b	0,2998 ± 0,0622 ^c
	WPC + XG 55°C	0,5209 ± 0,0086 ^b	0,3265 ± 0,0450 ^{cd}
	WPC + XG 70°C	0,4773 ± 0,0085 ^a	0,3749 ± 0,0136 ^{de}
	PPC + XG 40°C	0,4977 ± 0,0054 ^{ab}	0,329212 ± 0,0142 ^{cd}
	PPC + XG 55°C	0,5028 ± 0,0060 ^{ab}	0,3213 ± 0,0505 ^{cd}
	PPC + XG 70°C	0,4977 ± 0,0054 ^{ab}	0,3598 ± 0,0141 ^e

(a-e)την ίδια στήλη υποδεικνύουν σημαντική στατιστική διαφορά ($p < 0,05$) όπως αναλύθηκε με τη δοκιμή Duncan.

Το μεγαλύτερο ποσοστό υδατοδιαλυτότητας το συναντάμε στο δείγμα 1,34x Brix MD + 0,33x Brix GA (ξήρανση με ψεκασμό) και το χαμηλότερο στο δείγμα 5% PPC + 0,25% XG (ξήρανση με λυοφιλίωση).

Στην διεργασία του ψεκασμού παραπλήσια ποσοστά υδατοδιαλυτότητας έχουν τα δείγματα 1,9x Brix MD + 0,1x Brix WPC και 1,34x Brix MD + 0,33x Brix GA, ενώ το τρίτο δείγμα έχει μικρότερη υδατοδιαλυτότητα. Από τη λυοφιλίωση παρατηρούμε ότι οι πρόσθετες ουσίες επηρεάζουν την υδατοδιαλυτότητα.

Τέλος, στη ξήρανση με αφρό παρατηρούμε ότι όταν έχει προστεθεί πρωτεΐνη ορού και η διεργασία πραγματοποιηθεί στους 70°C, τότε η υδατοδιαλυτότητα μειώνεται σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα της ίδιας μεθόδου.

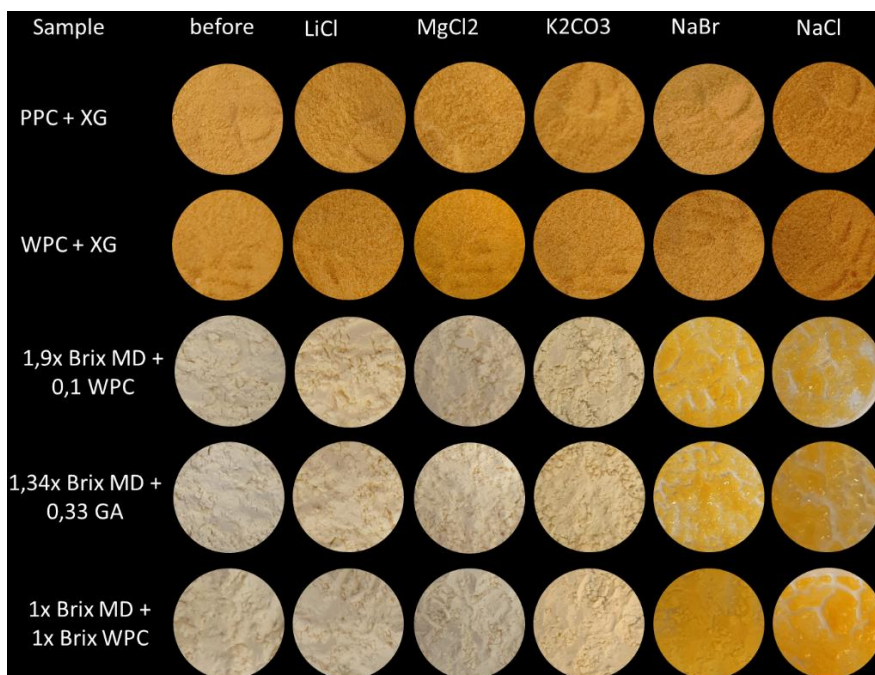
Από τον Πίνακα 20 παρατηρούμε ότι στα δείγματα που περιέχουν πρωτεΐνη ορού και πρωτεΐνη αρακά η αδιάλυτη σκόνη κατακρατά την μεγαλύτερη ποσότητα νερού. Την μέγιστη κατακράτηση την διαπιστώνουμε στο δείγμα WPC + XG 70°C. Η χαμηλότερη κατακράτηση παρατηρείται στο δείγμα juice (ξήρανση με λυοφιλίωση).

4.9. Καμπύλες προσρόφησης

Ένα σημαντικό κριτήριο για την παραγωγή σκόνης είναι η αποθήκευση και η διατήρηση της, όσον το δυνατόν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, χωρίς όμως να αλλοιωθεί. Για να διερευνηθεί αυτό το χαρακτηριστικό, τα δείγματα τοποθετήθηκαν στα βάζα για δύο εβδομάδες, έως ότου να επιτευχθεί ισορροπία στην υγρασία της σκόνης με την υγρασία μέσα στα βάζα. Στη συνέχεια, βάσει της αλλαγής της μάζας των δειγμάτων μπορούμε να διαπιστώσουμε πόση ποσότητα υγρασίας απορρίφθηκε. Οι σκόνες που θα απορροφήσουν την λιγότερη δυνατή ποσότητα είναι πιο ανθεκτικές στην αποθήκευση σε υγρό περιβάλλον.

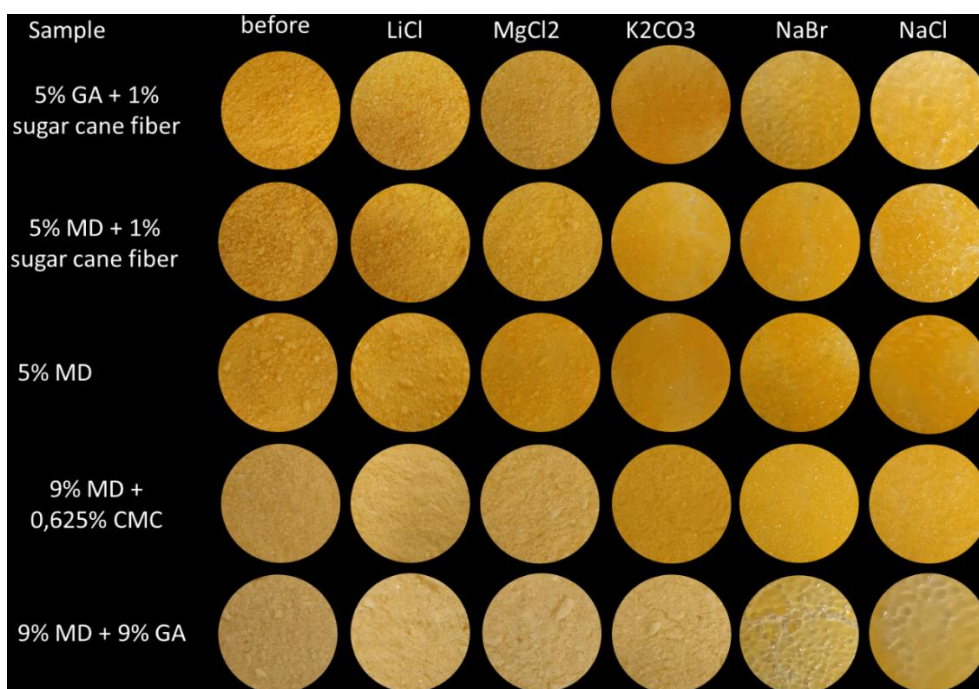


Σχήμα 34. Βάζα με διαφορετικές σχετικές υγρασίες.

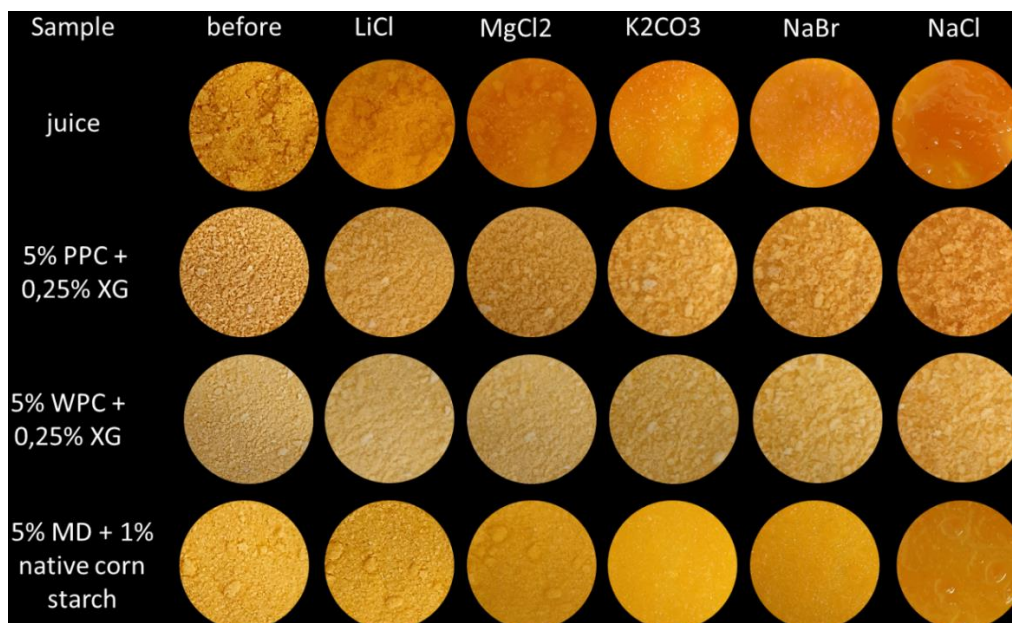


Σχήμα 35α. Σκόνες μετά από ισορροπία σε διαφορετικές σχετικές υγρασίες.

Από τις εικόνες παρατηρούμε ότι οι σκόνες που παράχθηκαν με ξήρανση αφρού διατηρούν την μορφή τους ακόμα και όταν το περιβάλλον τους έχει σχετική υγρασία ίση με 75%. Την μεγαλύτερη αλλαγή την παρατηρούμε στην σκόνη του σκέτου χυμού, καθώς η δομή της σκόνης αλλάζει ακόμα και σε σχετική υγρασία ίση με 44%.



Σχήμα 35β. Σκόνες μετά από ισορροπία σε διαφορετικές σχετικές υγρασίες.



Σχήμα 35γ. Σκόνες μετά από ισορροπία σε διαφορετικές σχετικές υγρασίες.

Στη μέθοδο της λυοφιλίωσης οι πρόσθετες ουσίες επιδρούν στην ποσότητα υγρασίας που θα απορροφήσει η κάθε σκόνη. Και σε αυτήν την μέθοδο, όμως, την μικρότερη μεταβολή στην δομή της σκόνης παρουσιάζουν τα δείγματα, στων οποίων την σύνθεση υπάρχουν η πρωτεΐνη ορού ή η πρωτεΐνη αρακά. Τα δείγματα αυτά διατηρούν τη μορφή της σκόνης και δεν φαίνεται να έχουν μια πιο υδαρή μορφή.

Για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκαν καμπύλες προσρόφησης, οι οποίες αναπαριστούν τα πειραματικά δεδομένα καθώς και το μαθηματικό μοντέλο GAB, BET και Peleg.

Από τα γραφήματα αλλά και από τους παρακάτω πίνακες διαπιστώνουμε ότι τα πειραματικά δεδομένα συμπίπτουν των μαθηματικών μοντέλων.

Και τα τρία μαθηματικά μοντέλα, σχεδόν σε όλα τα δείγματα παρουσιάζουν $R^2 \geq 0,98$.

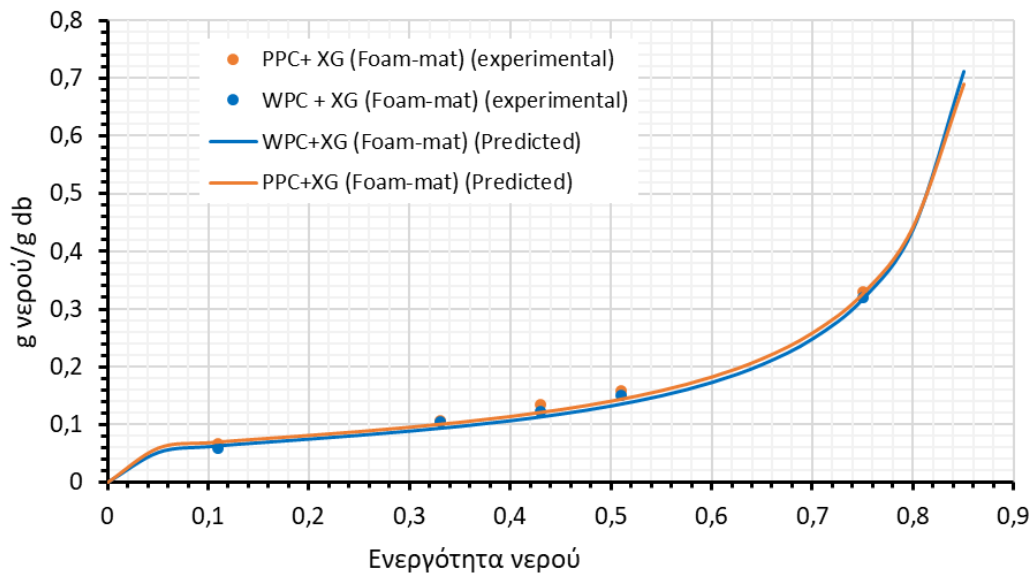
Πίνακας 21α. Τιμές παραμέτρων των μαθηματικών μοντέλων.

Μοντέλα	Παράμετροι	Συστήματα φορέων							
		1xBrix MD+1xBrix WPC	1,54xBrix MD+0,66xBrix GA	1,9xBrix MD+0,1xBrix WPC	2xBrix MD	WPC+XG	PPC+XG	5% GA+ 1% sugar cane fiber	5% MD+ 1% sugar cane fiber
GAB $X_{eq} = \frac{X_m + C + K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) + (1 - K + a_w + C + K \cdot a_w)}$	Xm (% d.b.)	0,07	0,06	0,08	0,06	0,06	0,07	0,09	0,09
	C	7,61	8,65	1,20	8,17	66,09	96,98	20,21	7,92
	K	1,02	1,03	0,97	1,00	1,07	1,06	1,01	0,97
	R ²	0,998	0,999	1,000	0,998	0,994	0,994	1,000	0,997
	E	4,29	2,07	1,23	3,19	5,08	4,60	0,77	2,91
BET $X_{eq} = \frac{X_m + C + a_w}{(1 - a_w) + (C - 1) + a_w}$	Xm (% d.b.)	0,07	0,07	0,06	0,06	0,08	0,08	0,09	0,08
	C	6,20	6,05	6,82	8,11	12,38	17,46	17,67	10,78
	R ²	0,997	0,998	0,999	0,998	0,984	0,987	1,000	0,996
	E	5,08	3,95	3,21	3,22	6,66	4,71	1,26	4,50
Peleg $X_{eq} = K_1 \cdot a_w \cdot n_1 + K_2 \cdot a_w \cdot n_2$	K1	0,49	0,76	0,61	0,43	3,33	3,32	0,70	3,93
	K2	0,12	0,17	0,15	0,13	0,18	0,19	0,18	0,28
	n1	3,95	6,58	5,72	4,54	10,55	10,52	4,35	12,79
	n2	0,54	0,74	0,67	0,62	0,51	0,49	0,42	0,83
	R ²	0,998	0,999	0,999	0,998	1,000	0,999	1,000	0,999
E	3,21	2,94	2,13	3,09	0,17	1,72	0,09	2,06	

Πίνακας 21β. Τιμές παραμέτρων των μαθηματικών μοντέλων.

Μοντέλα	Παράμετροι	Συστήματα φορέων						
		5% WPC+0.25% XG	5% PPC+0.25% XG	9% MD+9% GA	9% MD+0.625% CMC	juice	5%MD	5% MD+1% native corn starch
GAB	Xm (% d.b.)	0,08	0,10	0,07	0,08	0,10	0,08	0,08
	C	82,57	16,73	9,35	10,09	5,98	9,89	15,88
	K	0,99	0,95	0,99	0,99	1,03	1,01	1,00
	R^2	0,989	0,999	0,998	0,999	0,990	1,000	0,993
	E	5,22	2,19	2,54	1,98	13,35	0,87	5,82
BET	Xm (% d.b.)	0,08	0,09	0,06	0,08	0,11	0,09	0,13
	C	122,70	30,63	10,15	10,75	4,56	8,54	1,67
	R^2	0,989	0,996	0,998	0,999	0,990	1,000	0,984
Peleg	E	5,47	4,53	2,77	1,89	11,61	1,46	13,57
	$K1$	0,22	0,24	0,19	0,16	0,36	0,80	0,46
	$K2$	13,55	0,94	0,77	0,51	1253,85	0,21	0,08
	$n1$	0,47	0,57	0,73	0,55	0,94	5,71	1,41
	$n2$	16,31	7,01	7,19	4,16	31,19	0,66	50,00
R^2	0,999	1,000	0,998	0,999	0,997	1,000	0,964	
E	1,70	0,56	3,38	1,80	7,80	1,21	15,29	

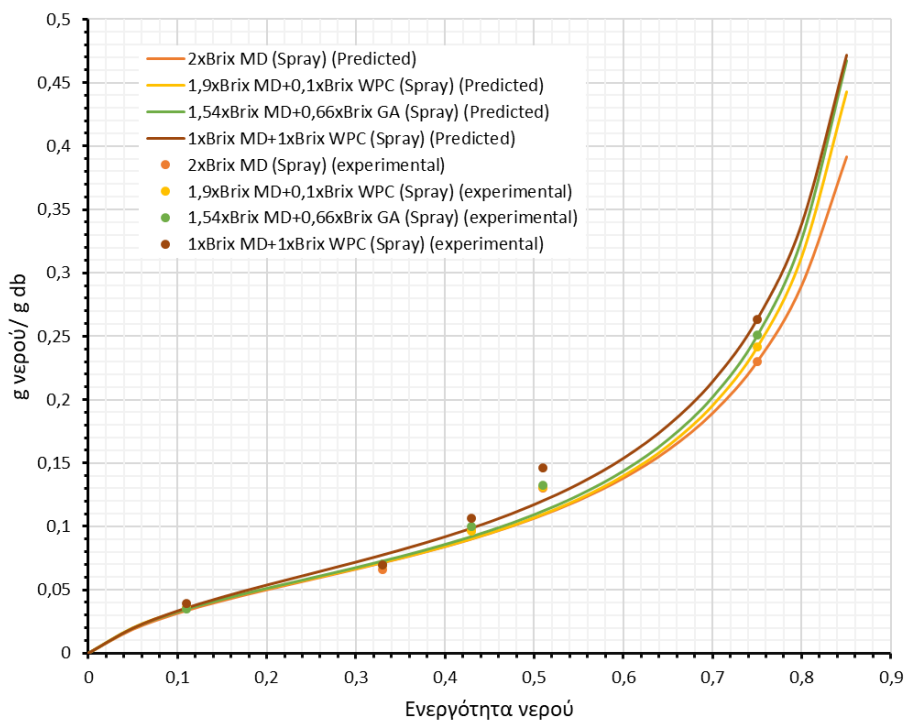
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα προσρόφησης για τις διαφορετικές μεθόδους ξήρανσης.



Σχήμα 36. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα και το μαθηματικό μοντέλο GAB που σχηματίστηκαν με ξήρανση αφρού με ρεύμα θερμού αέρα.

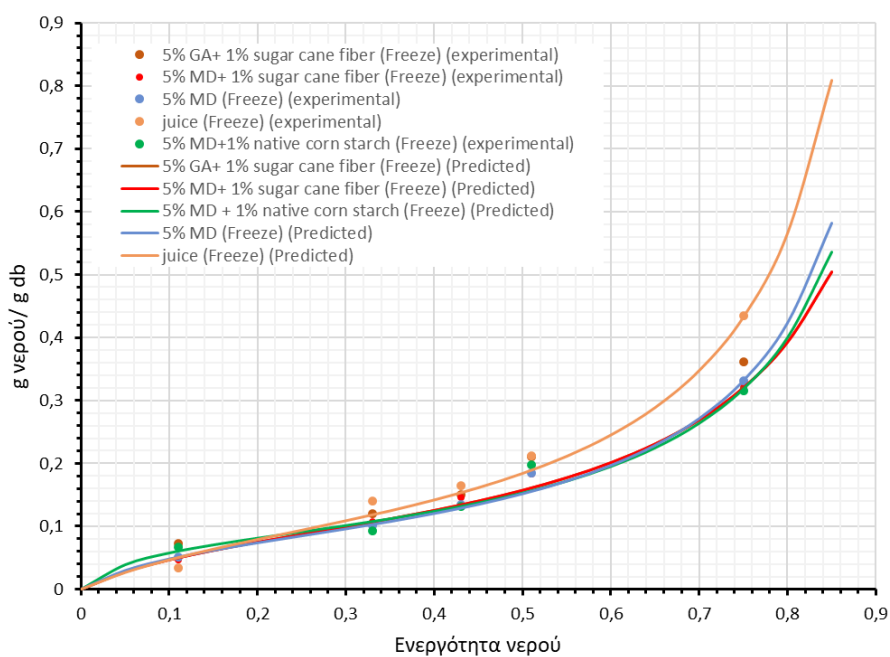
Στο Σχήμα 36 παρατηρούμε ότι αν και τα δύο δείγματα έχουν παραχθεί από διαφορετική πρωτεΐνη, η ποσότητα του νερού που απορροφούν είναι παραπλήσια. Συνεπώς, η απορρόφηση δεν επηρεάζεται από το είδος της πρωτεΐνης.

Στην ξήρανση με ψεκασμό (Σχήμα 37) όσο υψηλότερη είναι η σχετική υγρασία, τόσο μεγαλώνει η διαφορά στην απορρόφηση της υγρασίας. Όμως και πάλι, δεν είναι μεγάλες οι διαφορές αυτές.

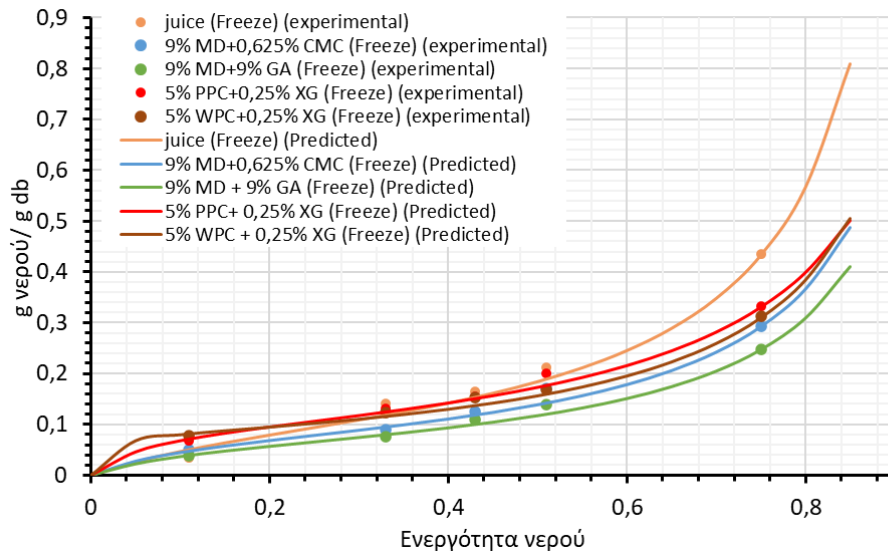


Σχήμα 37. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα και το μαθηματικό μοντέλο GAB για τα δείγματα που σχηματίστηκαν με ξήρανση με ψεκασμό.

Στην λυοφιλίωση (Σχήμα 38) παρατηρείται μεγαλύτερη διακύμανση στην υγρασκοπικότητα των σκονών. Το δείγμα 9% MD + 9% GA απορροφάει την μικρότερη ποσότητα νερού. Στον αντίποδα, την μέγιστη απορρόφηση την συναντάμε στο δείγμα που περιέχει τον σκέτο χυμό.



Σχήμα 38α. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα και το μαθηματικό μοντέλο GAB για τα δείγματα που σχηματίστηκαν με λυοφιλίωση.



Σχήμα 38β. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα και το μαθηματικό μοντέλο GAB για τα δείγματα που σχηματίστηκαν με λυοφιλίωση.

Από τις καμπύλες προσρόφησης παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η σχετική υγρασία, τόσο γίνονται διακριτές οι διαφορές την απορρόφηση νερού από τις σκόνες. Γι' αυτό τον λόγο στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 22) παρατίθενται οι τιμές για $RH = 0,75$.

Από το στατιστικό πρόγραμμα παρατηρούμε ότι $p - value < 0,05$, επομένως υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά της μέσης τιμής προσρόφησης νερού μεταξύ των δειγμάτων. Από την δοκιμή Duncan διαπιστώνουμε ότι και ανάμεσα σε δείγματα που παράχθηκαν με την ίδια μέθοδο ξήρανσης υπάρχουν διαφορές.

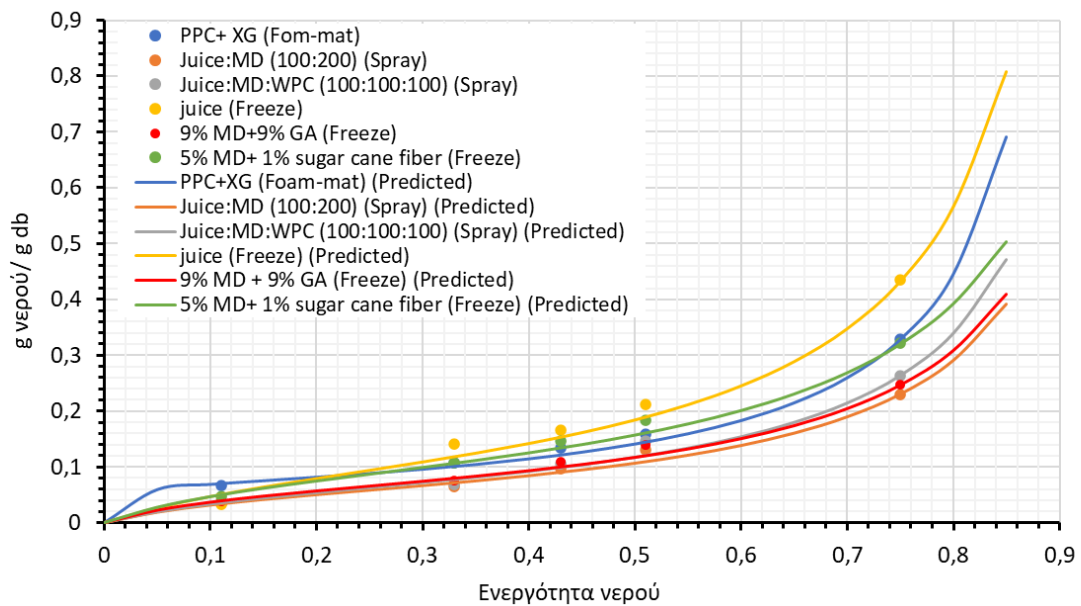
Πίνακας 22. Προσρόφηση νερού (g νερού/ g db) στα δείγματα σκόνης μανταρινιού για $RH=0,75$.

Μέθοδος Ξήρανσης	Δείγμα	g νερού/ g db
	5% GA + 1% sugar cane fiber	0,361481 ± 0,0004 ⁱ
	5% MD + 1% sugar cane fiber	0,321471 ± 0,0039 ^{fg}
	5% MD	0,331728 ± 0,0087 ^h
	juice	0,434992 ± 0,0057 ^j
Freeze	9% MD + 0,625% CMC	0,292315 ± 0,0017 ^d
	9% MD + 9% GA	0,247413 ± 0,0031 ^b
	5% PPC + 0,25% XG	0,33195 ± 0,0011 ^h
	5% WPC + 0,25% XG	0,313232 ± 0,0052 ^e
	5% MD+ 1% native corn starch	0,315975 ± 0,0004 ^{fg}

	2x Brix MD	0,230158 ± 0,0042 ^a
Spray	1,9x Brix MD + 0,1x Brix WPC	0,241875 ± 0,0059 ^{ab}
	1,34x Brix MD + 0,33x Brix GA	0,251072 ± 0,0137 ^{bc}
	1x Brix MD + 1x Brix WPC	0,263507 ± 0,0033 ^c
Foam-mat	WPC + XG	0,319825 ± 0,0067 ^{gh}
	PPC + XG	0,29709 ± 0,0415183 ^{gh}

(a-h)την ίδια στήλη υποδεικνύουν σημαντική στατιστική διαφορά ($p < 0,05$) όπως αναλύθηκε με τη δοκιμή Duncan.

Στο Σχήμα 39 αποτυπώνονται κυρίως τα δείγματα με τις πιο ακραίες τιμές για κάθε μέθοδο. Η ξήρανση σκέτου χυμού έχει ως προϊόν την σκόνη, η οποία απορροφάει την μέγιστη ποσότητα υγρασίας. Στον αντίποδα, το δείγμα 2xBrix MD απορρόφησε την λιγότερη υγρασία.



Σχήμα 39. Καμπύλη προσρόφησης τυχαίων δειγμάτων.

5. Συμπεράσματα

Συγκρίνοντας τις τρεις διαφορετικούς μεθόδους ξήρανσης διαπιστώνουμε ότι όλες δημιουργούν σκόνες οι οποίες δεν είναι επιρρεπείς σε μικροβιακή αλλοίωση.

Όσον αφορά την διατήρηση του ασκορβικού οξέος, τα χαμηλότερα ποσοστά του τα συναντάμε όταν το δείγμα ξηραίνεται με στρώμα αφρού σε ρεύμα θερμού αέρα στη θερμοκρασία των 70°C. Η ξήρανση με ψεκασμό κι με λυοφιλίωση δίνει σκόνες οι οποίες έχουν διατηρήσει στην πλειοψηφία τους μεγαλύτερο ποσοστό από την βιταμίνη σε σχέση με τον τρίτο τρόπο ξήρανσης.

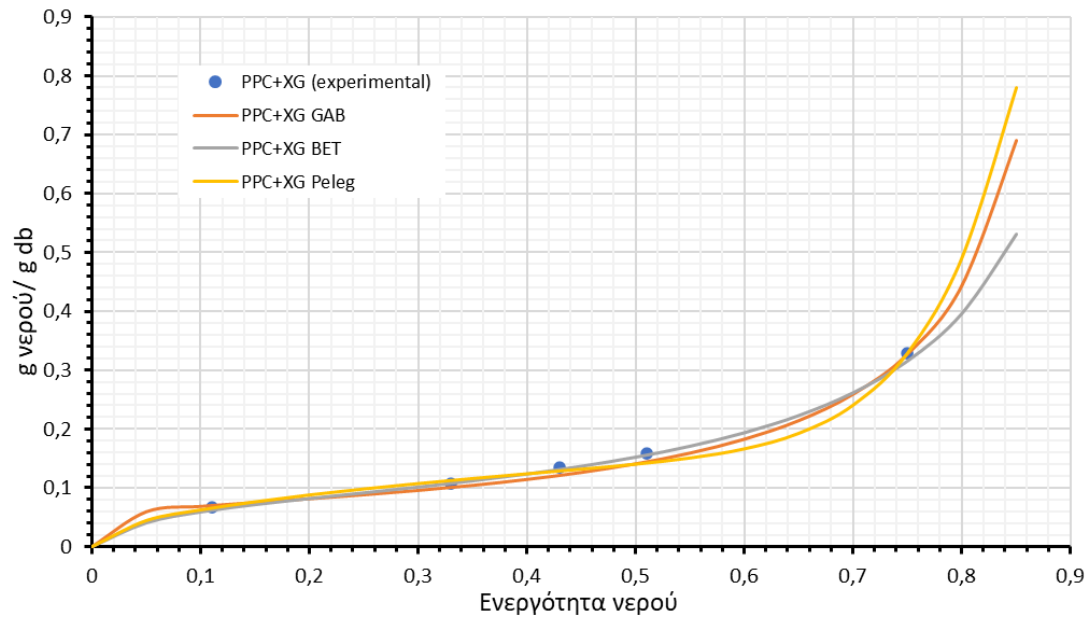
Παράλληλα, τα δείγματα τα οποία περιέχουν είτε πρωτεΐνη ορού γάλακτος με κόμμι ξανθάνης είτε πρωτεΐνη αρακά με κόμμι ξανθάνης δεν επαναδιαλύονται σε μεγάλα ποσοστά, ανεξαρτήτως από την μέθοδο ξήρανσης. Επομένως, δεν είναι ιδανικά για την χρήση των σκονών αυτών με στόχο να διαλύονται στο νερό. Άλλο ένα μειονέκτημα των δειγμάτων που περιέχουν πρωτεΐνη ορού γάλακτος και κόμμι ξανθάνης είναι ότι όταν επαναδιαλυθούν στο νερό δεν μπορούν να προσδώσουν στο νερό έντονο χρώμα χυμού μανταρινιού. Το πιο έντονο χρώμα από τα δείγματα αυτά το συναντάμε στην ξήρανση αφρού στους 70°C. Όμως και τα δείγματα από την ξήρανση με ψεκασμό δεν προσδίδουν στο νερό το έντονο χρώμα που είχε ο χυμός μανταρινιού πριν από την ξήρανση.

Ένα επιπλέον αρνητικό που έχει η ξήρανση με ψεκασμό είναι η απόδοση που έχει η μέθοδος αυτή όσον αφορά την παραγωγή σκόνης. Η μέγιστη απόδοση που λήφθηκε από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι κοντά στο 50%. Αντίθετα, οι άλλες δύο μέθοδοι ξήρανσης δεν παρουσιάζουν απώλειες που να οφείλονται στην ίδια την διεργασία.

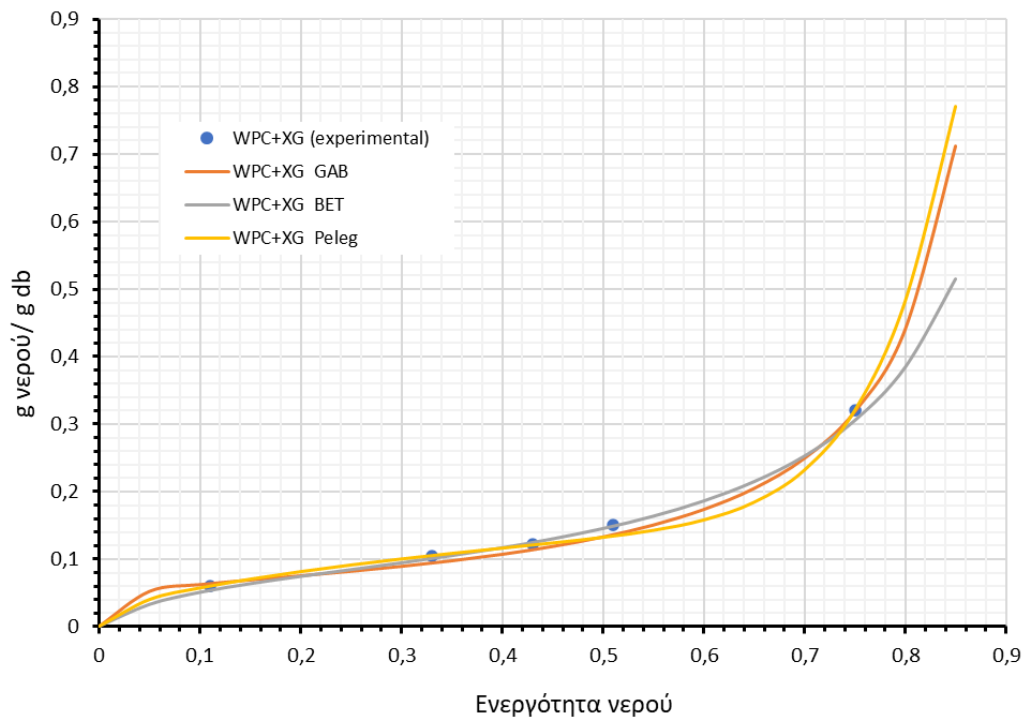
Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τις καμπύλες προσρόφησης, στις σκόνες που περιέχουν πρωτεΐνη ορού γάλακτος και κόμμι ξανθάνης ή πρωτεΐνη αρακά και κόμμι ξανθάνης ακόμα και σε περιβάλλον με σχετική υγρασία ίση με 75% δεν παρατηρήθηκε καμιά αλλαγή στη δομή τους παρά την απορρόφηση νερού. Απεναντίας, στα υπόλοιπα δείγματα, ακόμα και όταν η σχετική υγρασία ισούται με 44%, η απορρόφηση του νερού οδηγεί στην αλλαγή στη δομή τους.

Παράρτημα

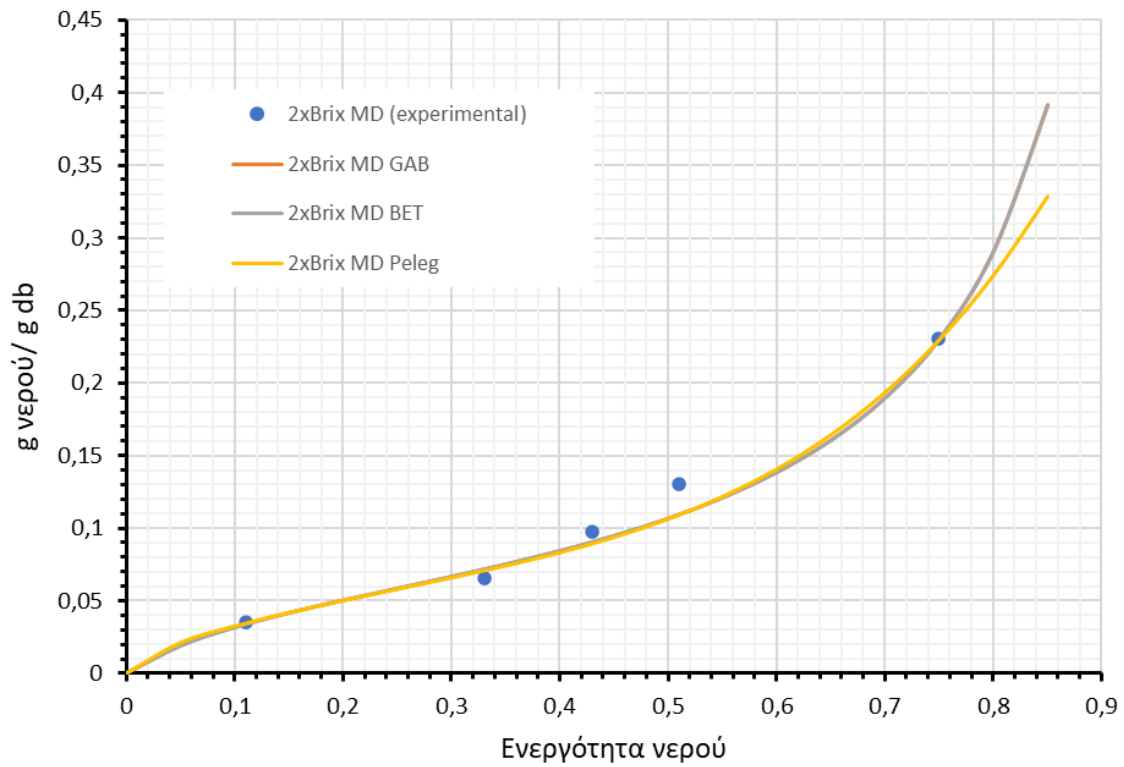
Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται οι καμπύλες προσρόφησης όλων των δειγμάτων. Σε κάθε καμπύλη εμφανίζονται τα πειραματικά δεδομένα και τα τρία διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα, ώστε να ελεγχθεί αν τα πειραματικά δεδομένα συμπίπτουν των θεωρητικών τιμών.



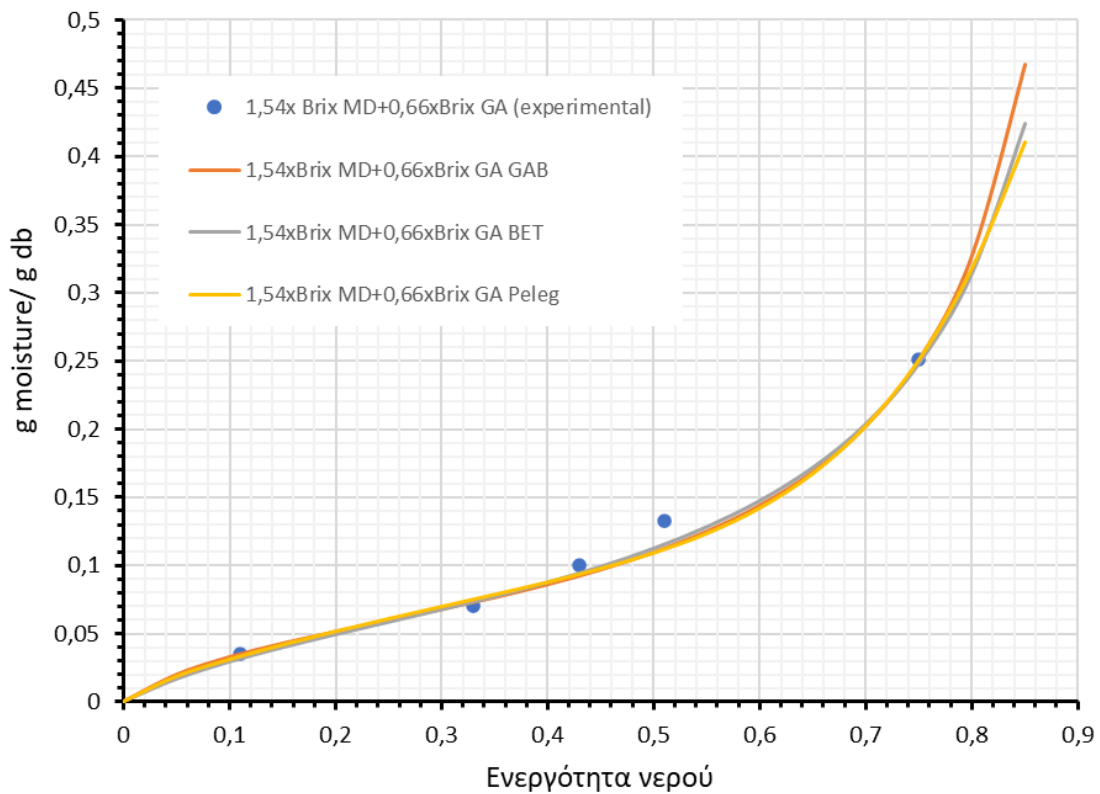
Σχήμα 40. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα PPC + XG (Foam-mat drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB,BET και Peleg.



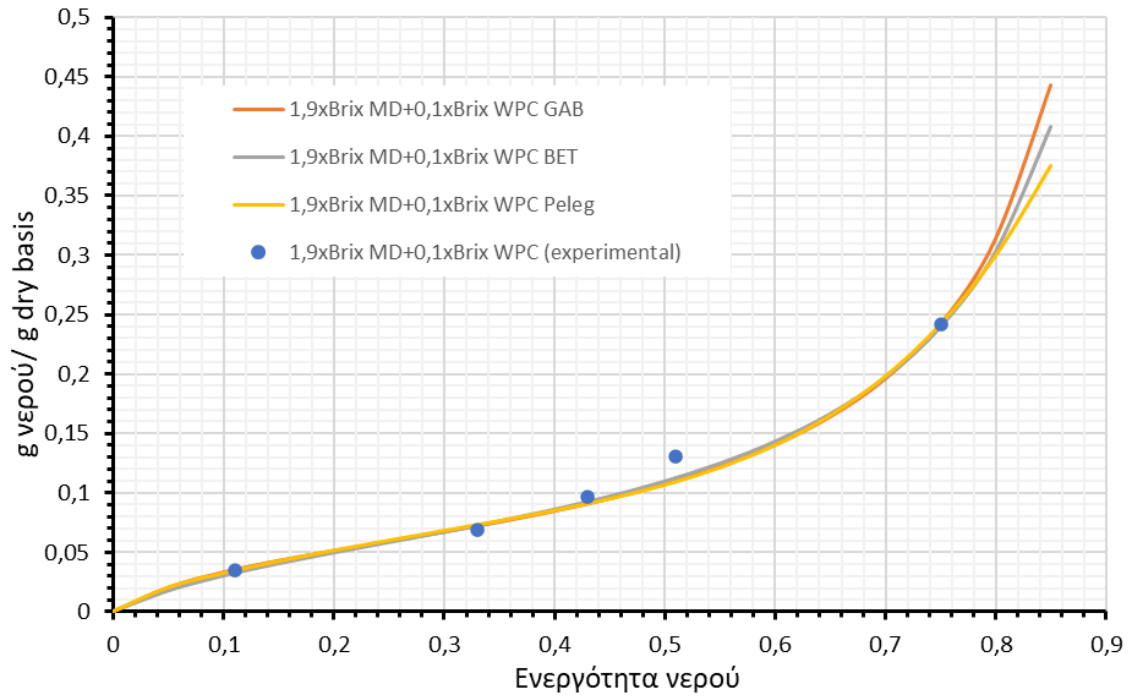
Σχήμα 41. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα WPC + XG (Foam-mat drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB,BET και Peleg.



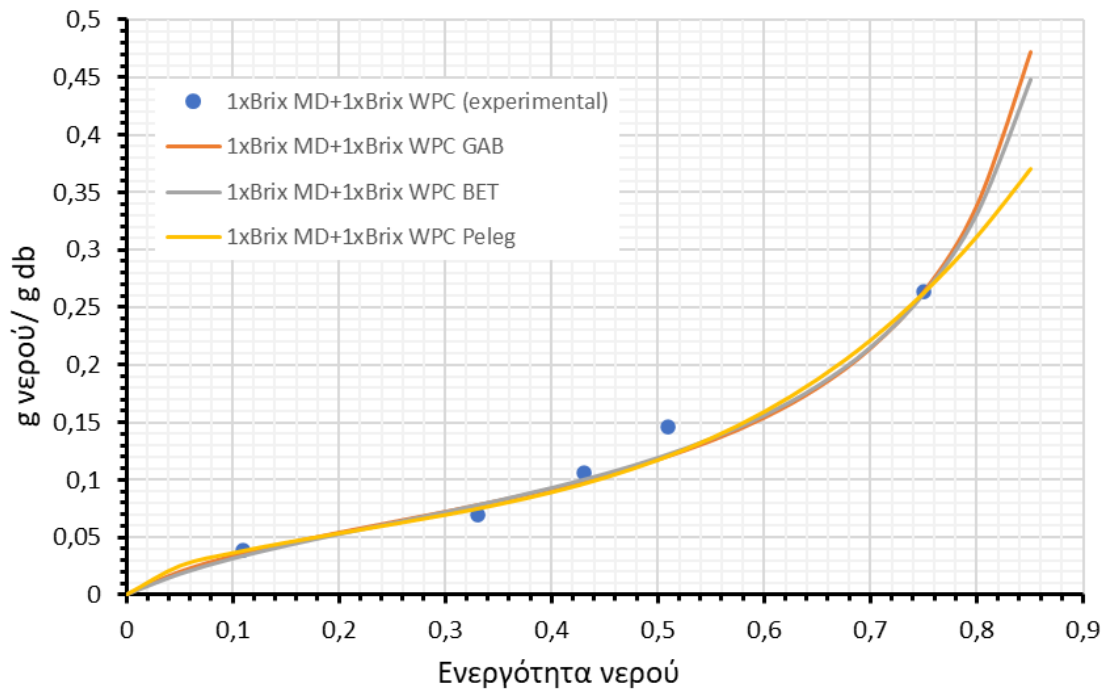
Σχήμα 42. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα 2x Brix MD (Spray drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB,BET και Peleg.



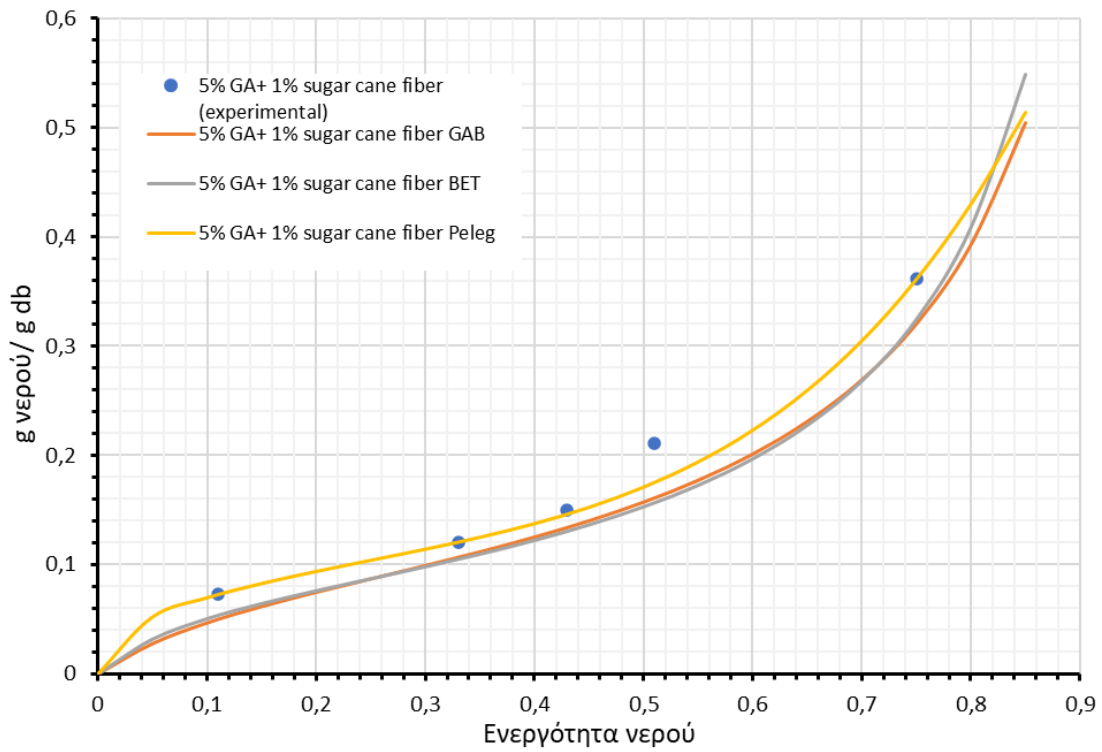
Σχήμα 43. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα 1,54xBrix MD+0,66xBrix GA (Spray drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB,BET και Peleg.



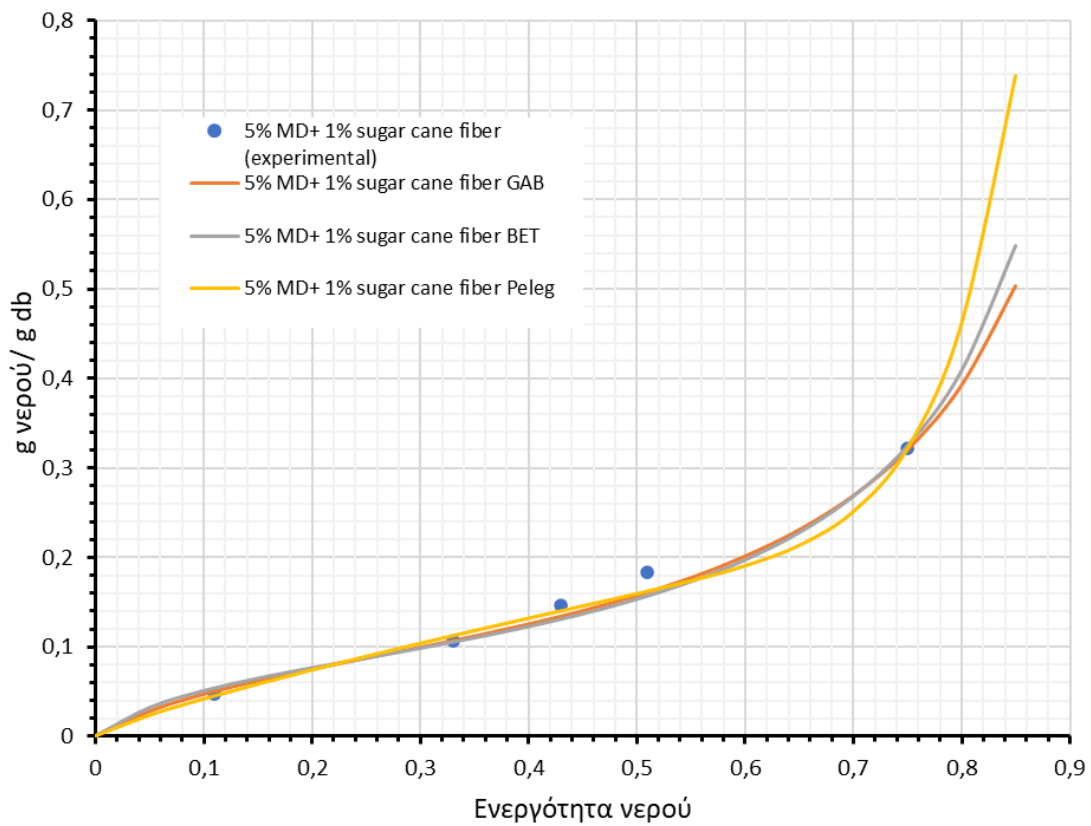
Σχήμα 44. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα 1,9xBrix MD+0,1xBrix WPC (Spray drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB,BET και Peleg.



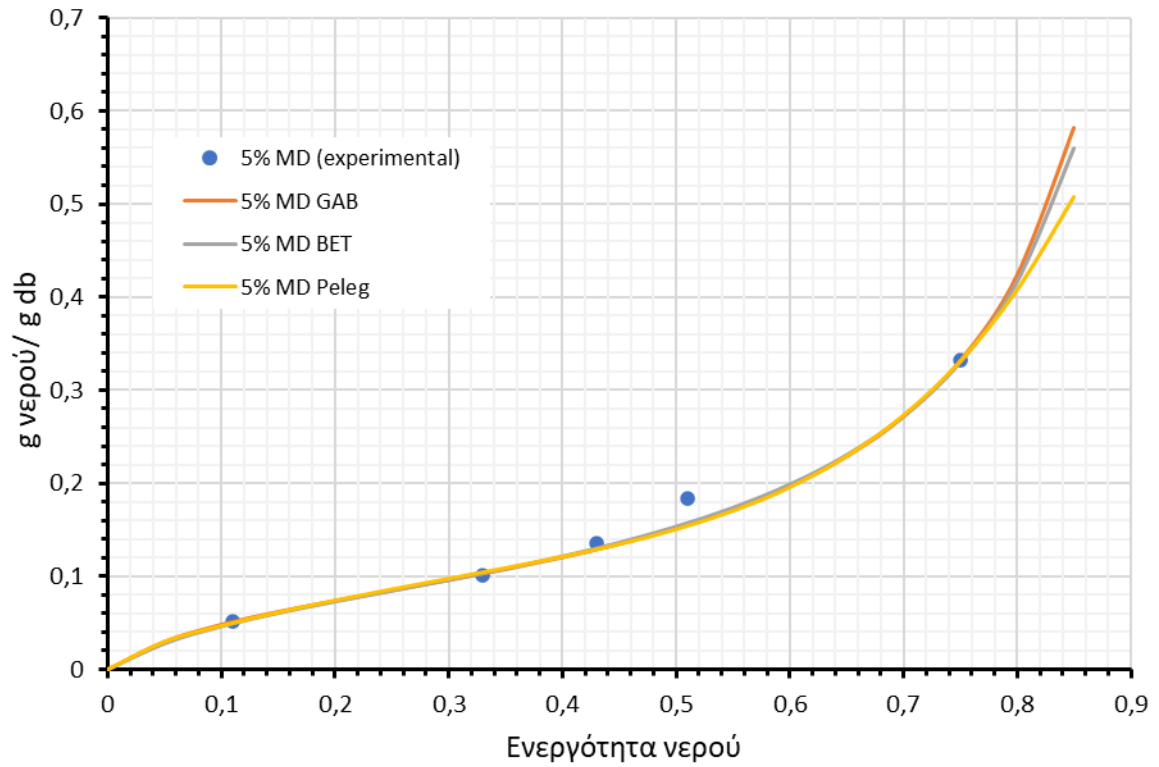
Σχήμα 45. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα 1x Brix MD + 1x Brix WPC (Spray drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB,BET και Peleg.



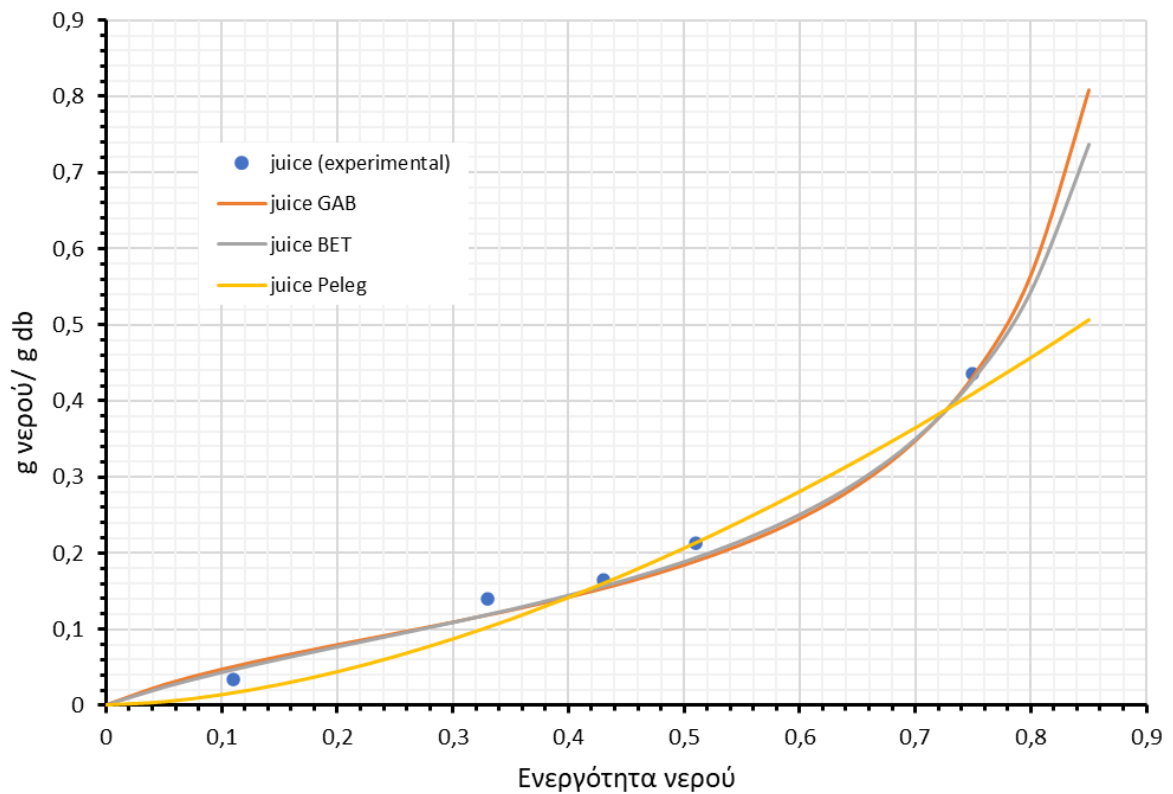
Σχήμα 46. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα 5% GA + 1% sugar cane fiber (Freeze drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB,BET και Peleg.



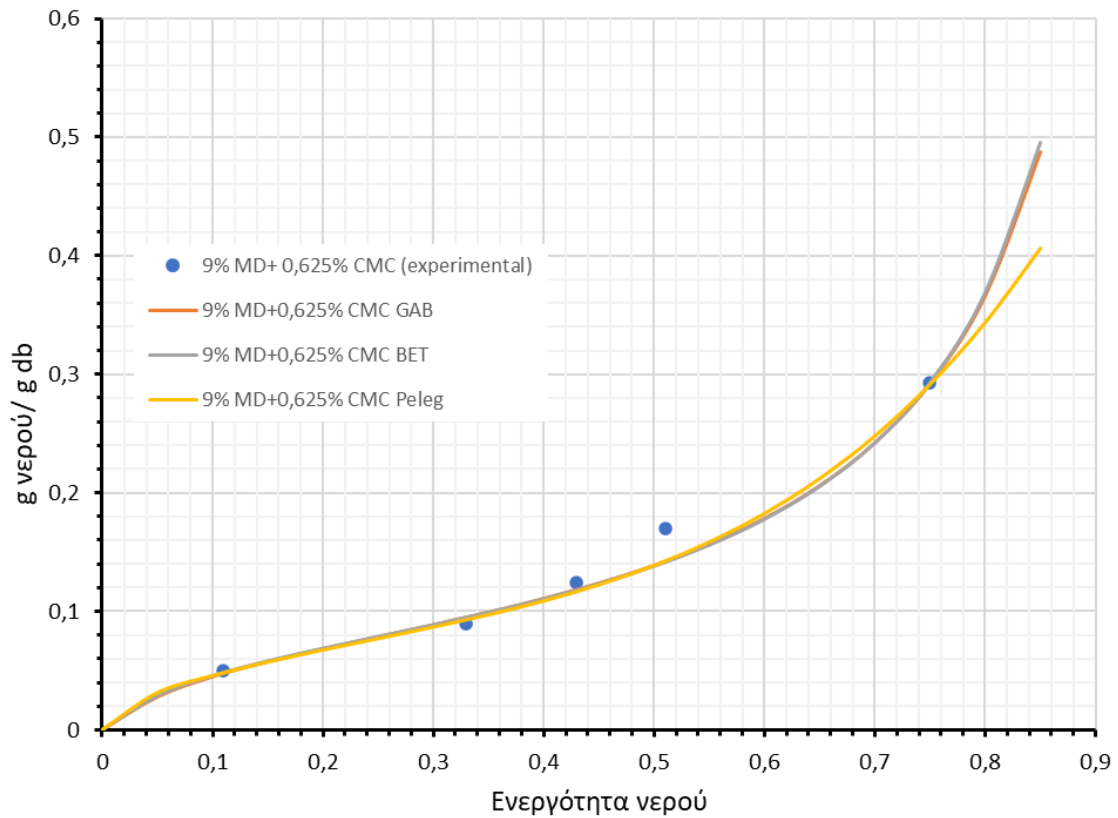
Σχήμα 47. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα 5% MD + 1% sugar cane fiber (Freeze drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB,BET και Peleg.



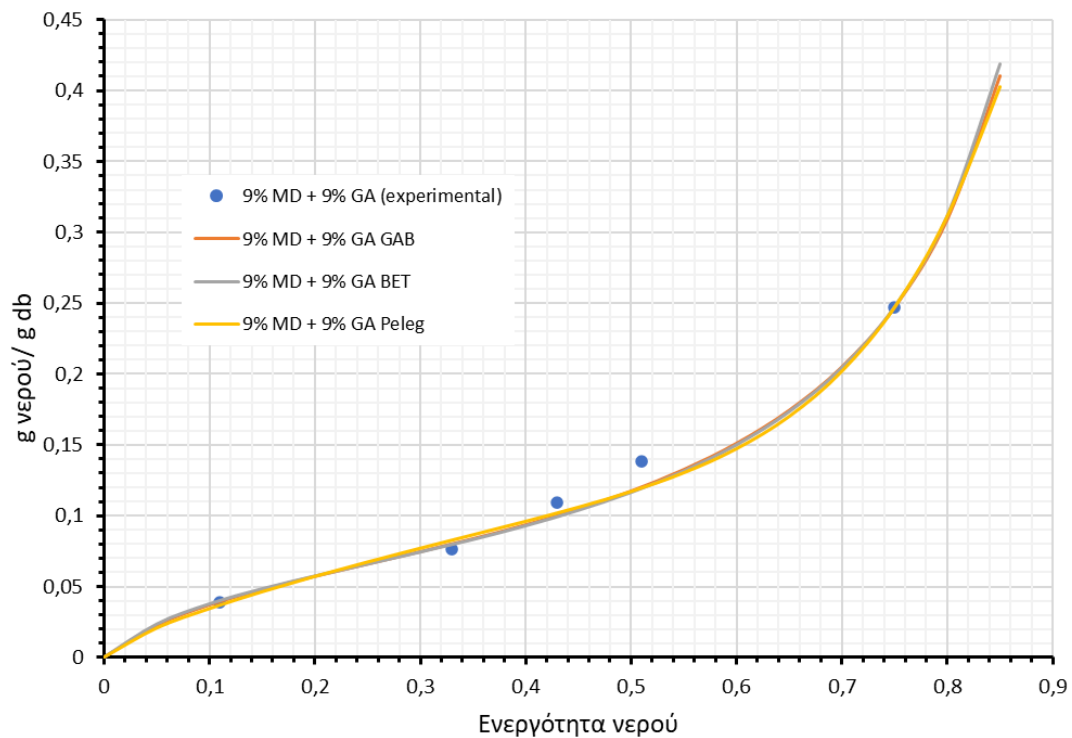
Σχήμα 48. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα 5% MD (Freeze drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB,BET και Peleg.



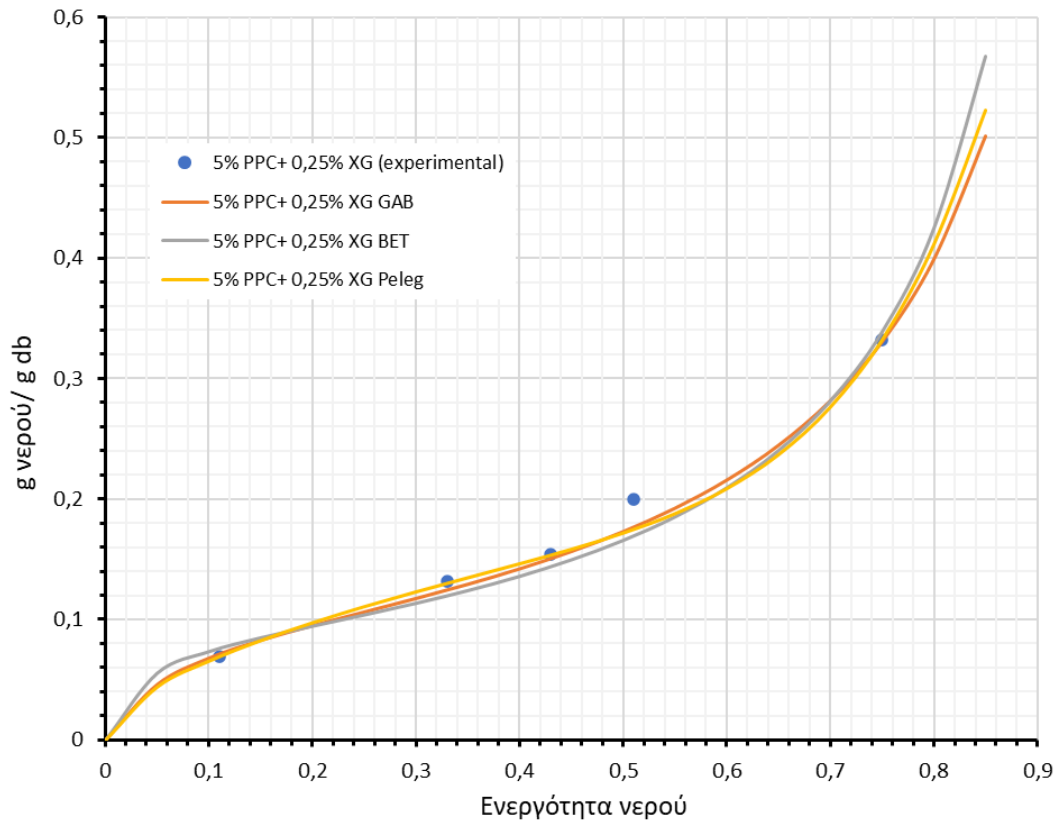
Σχήμα 49. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα juice (Freeze drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB,BET και Peleg.



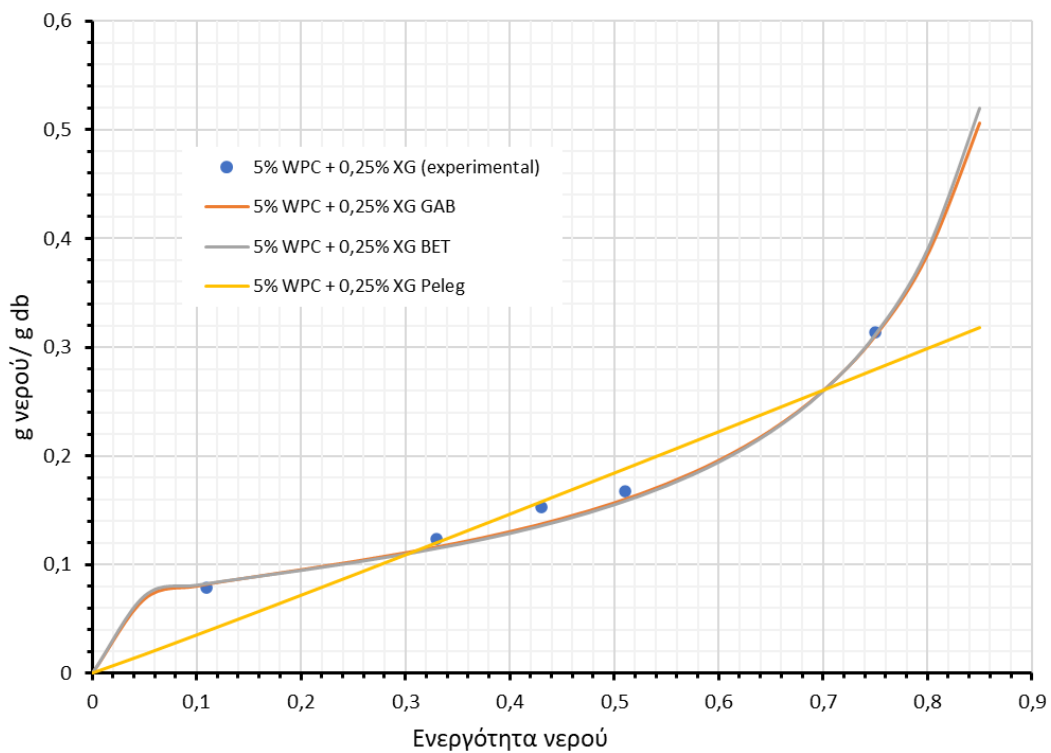
Σχήμα 50. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα 9% MD+ 0,625% CMC (Freeze drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB,BET και Peleg.



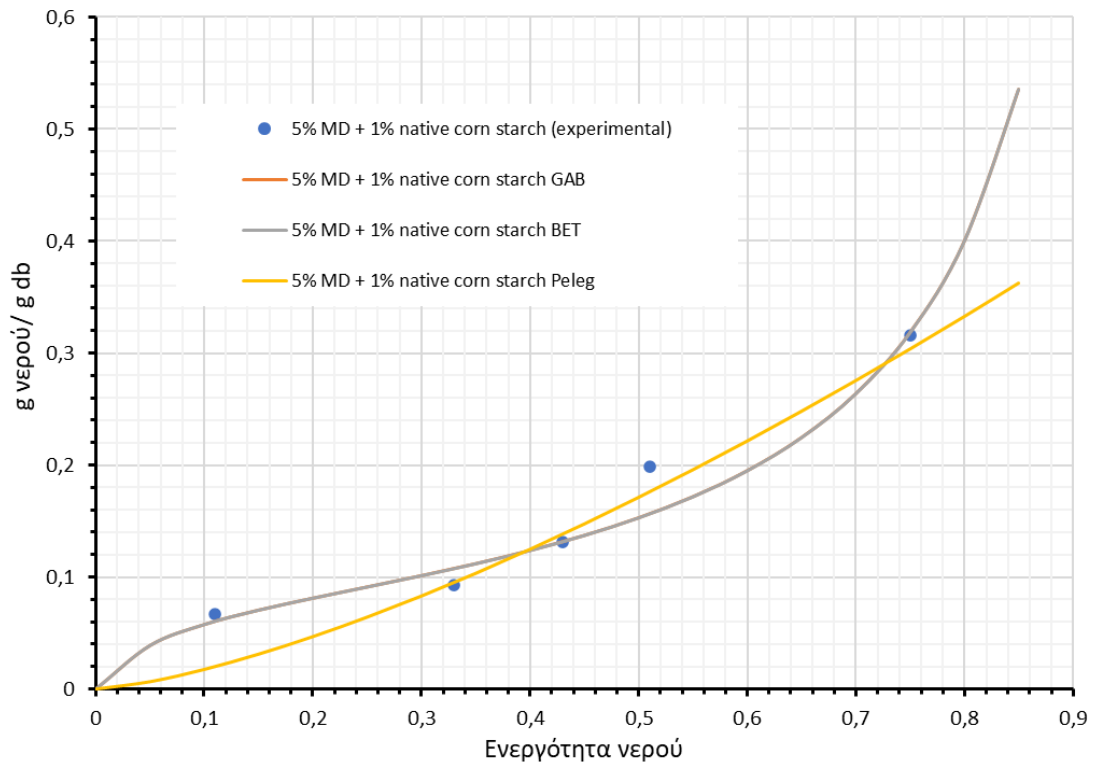
Σχήμα 51. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα 9% MD + 9% GA (Freeze drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB,BET και Peleg.



Σχήμα 52. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα 5% PPC + 0,25% XG (Freeze drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB,BET και Peleg.



Σχήμα 53. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα 5% WPC + 0,25% XG (Freeze drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB,BET και Peleg.



Σχήμα 54. Καμπύλη προσρόφησης με πειραματικά δεδομένα για το δείγμα 5% MD + 1% native corn starch (Freeze drying) και τα μαθηματικά μοντέλα GAB, BET και Peleg.

Βιβλιογραφία

- Arzhavitina, A., & Steckel, H. (2010). Foams for pharmaceutical and cosmetic application. *International Journal of Pharmaceutics*, 394.
- Aziz, M. G., Yusof, Y. A., Blanchard, C., Saifullah, M., Farahnaky, A., & Scheiling, G. (2017). Material Properties and Tableting of Fruit Powders. *Food Engineering Reviews*, 10(2), 66–80.
- Barańska, A., Jedlińska, A., & Samborska, K. (2020). Application of Dehumidified Air During Spray Drying for the Production of Food Powders. In R. Szewczyk, J. Krejsa, M. Nowicki, & A. Ostaszewska-Lizewska (Eds.), *Mechatronics 2019: Recent Advances Towards Industry 4.0*.
- Barbosa, J., Borges, S., Amorim, M., Pereira, M. J., Oliveira, A., Pintado, M. E., & Teixeira, P. (2015). Comparison of spray drying, freeze drying and convective hot air drying for the production of a probiotic orange powder. *Journal of Functional Foods*, 17, 340–351.
- Barbosa, J., & Teixeira, P. (2016). Development of probiotic fruit juice powders by spray drying: a review. *Food Reviews International*, 33(4), 335–358.
- Basu, S., Shivhare, U. S., & Mujumdar, A. S. (2006). Models for Sorption Isotherms for Foods: A Review. *Drying Technology*, 24(8), 917–930.
- Bhandari, B. R., & Howes, T. (1999). Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 40(1–2), 71–79.
- Brar, A. S., Kaur, P., Kaur, G., & Subramanian, J. (2020). Optimization of Process Parameters for Foam-Mat Drying of Peaches. *International Journal of Fruit Science*, 20(3), 1–24.
- Chen, X., Ting, J. L. H., Peng, Y., Tangjaidee, P., Zhu, Y., Li, Q., Shan, Y., & Quek, S. Y. (2021). Comparing Three Types of Mandarin Powders Prepared via Microfluidic-Jet Spray Drying: Physical Properties, Phenolic Retention and Volatile Profiling. *Foods*, 10(123).
- CORTÉS R., M., HERNÁNDEZ S, G., & ESTRADA M, E. M. (2017). OPTIMIZATION OF THE SPRAY DRYING PROCESS FOR OBTAINING CAPE GOOSEBERRY POWDER: AN INNOVATIVE AND PROMISING FUNCTIONAL FOOD. *REVISTA VITAE*, , 27(1), 59–67.
- Costanzo, G., Vitale, E., Iesce, M. R., Naviglio, D., Amoresano, A., Fontanarosa, C., Spinelli, M., Ciaravolo, M., & Arena, C. (2022). Antioxidant Properties of Pulp, Peel and Seeds of Phlegrean Mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) at Different Stages of Fruit Ripening. *Antioxidants*, 11(2).
- de Paula, R. R., Vimercati, W. C., Araújo, C. da S., Macedo, L. L., Teixeira, L. J. Q., & Saraiva, S. H. (2020). Drying kinetics and physicochemical properties of whey

- dried by foam mat drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(10). <https://doi.org/10.1111/JFPP.14796>
- Dehghannya, J., Pourahmad, M., Ghanbarzadeh, B., & Ghaffari, H. (2018). Heat and mass transfer modeling during foam-mat drying of lime juice as affected by different ovalbumin concentrations. *Journal of Food Engineering*.
- Falade, K. O., & Solademi, O. J. (2010). Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices. *International Journal of Food Science and Technology*, 45(2), 278–288.
- Fazaeli, M., Emam-Djomeh, Z., Kalbasi Ashtari, A., & Omid, M. (2012). Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. *Food and Bioproducts Processing*, 90(4), 667–675.
- Feszterová, M., Mišiaková, M., & Kowalska, M. (2023). Bioactive Vitamin C Content from Natural Selected Fruit Juices. *Applied Sciences*.
- Filková, I., Huang, L. X., & Mujumdar, A. S. (2014). Industrial Spray Drying Systems. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (4th ed.). CRC Press.
- Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. (2010). A new technique for spray drying orange juice concentrate. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11.
- Hardy, Z., & Jideani, V. A. (2015). Foam-mat Drying Technology: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(12), 2560–2572.
- Hu, Y., Li, Y., Zhang, W., Kou, G., & Zhou, Z. (2017). Physical stability and antioxidant activity of citrus flavonoids in arabic gum-stabilized microcapsules: Modulation of whey protein concentrate. *Food Hydrocolloids*.
- Jangam, S. V., & Mujumdar, A. S. (2010). Basic Concepts and Definitions. In S. V. Jangam, C. L. Law, & A. S. Mujumdar (Eds.), *Drying of Foods, Vegetables and Fruits* (Vol. 1).
- Javed, I. M., Abbas, A., Rafique, H., M, F. N., & Rasool, A. (2018). A review paper on foam-mat drying of fruits and vegetables to develop powders. *MOJ Food Processing & Technology*, 6(6). <https://doi.org/10.15406/MOJFPT.2018.06.00207>
- Jouppila, K., & Roos, Y. (2009). Crystallization: measurements, data, and prediction. In M. S. Rahman (Ed.), *Food Properties Handbook* (2nd ed.). CRC Press.
- Khalloufi, s., El-Maslouhi, Y., & Ratti, C. (2000). Mathematical Model for Prediction of Glass Transition Temperature of Fruit Powders. *Journal of Food Science*, 65(5), 842–848.
- Koroishi, E. T., Boss, E. A., Wolf Maciel, M. R., & Maciel Filho, R. (2008). Process development and optimization for freeze-drying of natural orange juice. *Journal of Food Process Engineering*, 32(3), 425–441.

- Kudra, T., & Mujumdar, A. S. (2014). Special Drying Techniques and Novel Dryers. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (4th ed.). CRC Press.
- Kumar, Y., Tiwari, S., & Belorkar, S. A. (2015). Drying: An Excellent Method for Food Preservation. *Engineering Science and Technology*, 1(8).
- LeBail, A., Boillereaux, L., Davenel, A., Hayert, M., Lucas, T., & Monteau, J. Y. (2003). Phase transition in foods: effect of pressure and methods to assess or control phase transition. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 4(1), 15–24.
- Liapis, A. I., & Bruttini, R. (2014). Freeze Drying. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (4th ed.). CRC Press.
- Linster, C. L., & Schaftingen, E. Van. (2017). Vitamin C: Biosynthesis, recycling and degradation in mammals. *The FEBS Journal*, 274(1).
- Liu-ping, F., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2007). *Storage Stability of Carrot Chips*. 25(1), 1537–1543.
- Maria de Carvalho Tavares, I., Bonatto Machado de Castilhos, M., Aparecida Mauro, M., Mota Ramos, A., Teodoro de Souza, R., Gómez-Alonso, S., Gomes, E., Da-Silva, R., Hermosín-Gutiérrez, I., & Silva Lago-Vanzela, E. (2019). BRS Violeta (BRS Rúbea × IAC 1398-21) grape juice powder produced by foam mat drying. Part I: Effect of drying temperature on phenolic compounds and antioxidant activity. *Food Chemistry*.
- Martí, N., Mena, P., Cánovas, J. A., Micol, V., & Saura, D. (2009). Vitamin C and the Role of Citrus Juices as Functional Food. *Natural Product Communications*, 4(5).
- MOREYRA, R., & PELEG, M. (1981). Effect of Equilibrium Water Activity on the Bulk Properties of Selected Food Powders. *Journal of Food Science*, 46(6), 1918–1922.
- Mujumdar, A. S. (2014a). Principles, Classification, and Selection of Dryers. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (4th ed.). CRC Press.
- Mujumdar, A. S. (2014b). Principles, Classification, and Selection of Dryers. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (4th ed.). CRC Press.
- Nasrollahzadeh, M., Sajjadi, M., Nezafat, Z., & Shafiei, N. (2021). Polysaccharide biopolymer chemistry. In *Biopolymer-Based Metal Nanoparticle Chemistry for Sustainable Applications* (Vol. 1, pp. 45–105).
- Nurhadi, B., & Roos, Y. H. (2016). Dynamic water sorption for the study of amorphous content of vacuum-dried honey powder. *Powder Technology*, 301, 981–988.
- Okos, M. R., Campanella, O., Narsimhan, G., Singh, R. K., & Weitnauer, A. C. (2006). Food Dehydration. In D. R. Heldman, D. B. Lund, & C. Sabliov (Eds.), *Handbook of Food Engineering* (2nd ed.). CRC Press.

- Padayatt, S., & Levine, M. (2016). Vitamin C physiology: the known and the unknown and Goldilocks. *Oral Diseases*, 22(6).
- Pandey, K., RATTANPAL, H. S., Sidhu, G., & Singh, J. (2022). TREE MORPHOLOGY, YIELD EFFICIENCY AND FRUIT QUALITY OF KINNOW MANDARIN (CITRUS NOBILIS LOUREIRO × CITRUS DELICIOSA TENORA) BUDDED ON DIFFERENT ROOTSTOCKS IN THE NORTH-WESTERN REGION OF INDIA. *Applied Ecology and Environmental Research*, 20(3), 2077–2093.
- Phing, P. L., Abdullah, A., Lee Sin, C., & Yin Foong, S. C. (2022). The effect of drying methods on the physicochemical and antioxidant properties of Bintangor orange (Citrus Nobilis) powders. *Acta Scientiarum Polonorum, Technologia Alimentaria*, 21(1), 111–122.
- Rahman, M. S., & Perera, C. O. (2007). Drying and Food Preservation. In M. S. Rahman (Ed.), *Handbook of Food Preservation* (2nd ed., pp. 403–432). CRC Press.
- Roos, Y. H., & Drusch, S. (2015). *Phase Transitions in Foods* (2nd ed.). Academic Press.
- Sagar, V. R., & Kumar, S. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 47(1), 15–26.
- SAIKIA, S., MAHNOT, N. K., & MAHANTA, C. L. (2014). EFFECT OF SPRAY DRYING OF FOUR FRUIT JUICES ON PHYSICOCHEMICAL, PHYTOCHEMICAL AND ANTIOXIDANT PROPERTIES. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 1656–1664.
- Sangamithra, A., Venkatachalam, S., John, S. G., & Kuppuswamy, K. (2015). Foam Mat Drying of Food Materials: A Review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 3165–3174. <https://doi.org/10.1111/JFPP.12421>
- Selvamuthukumar, M., Tranchant, C., & Shi, J. (2020). Spraying Drying: Concept, Application and Its Recent Advances in Food Processing. In M. Selvamuthukumar (Ed.), *Handbook on Spray Drying Applications for Food Industries*. CRC Press.
- Shishir, M. R. I., & Chen, W. (2017). Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science & Technology*, 65, 49–67.
- Shrestha, A. K., Howes, T., Adhikari, B. P., & Bhandari, B. R. (2007). Water sorption and glass transition properties of spray dried lactose hydrolysed skim milk powder. *LWT - Food Science and Technology*, 40(9), 1593–1600.
- Sokhansanj, S., & Jayas, D. S. (2014). Drying of Foodstuffs. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (4th ed.). CRC Press.
- Spreen, T. H. (n.d.). *Projections of World Production and Consumption of Citrus to 2010*. FAO.

- Stavra, K., Plati, F., Pavlidou, E., & Paraskevopoulou, A. (2022). Characterization of lemon juice powders produced by different drying techniques and carrier materials. *DRYING TECHNOLOGY*, 40(9), 1923–1934.
- Tkacz, K., Wojdyło, A., Michalska-Ciechanowska, A., Turkiewicz, I. P., Lech, K., & Nowicka, P. (2020). Influence Carrier Agents, Drying Methods, Storage Time on Physico-Chemical Properties and Bioactive Potential of Encapsulated Sea Buckthorn Juice Powders. *Molecules*, 25(17).
- Tsotsas, E., & Mujumdar, A. S. (2014). *Modern Drying Technology* (1st ed., Vol. 5). Wiley.
- Uscanga, M. A., Camacho, M. del M., Salgado, M. A., & Martínez-Navarrete, N. (2020). Influence of an Orange Product Composition on the Characteristics of the Obtained Freeze-dried Cake and Powder as Related to Their Consumption Pattern. *Food and Bioprocess Technology*.
- Uscanga-Ramos, M. A., Lopez-Sanchez, E., Martínez-Navarrete, N., García-Alvarado, M. A., & Salgado-Cervantes, M. A. (2021). Analytical solution of freeze-drying mathematical model based in Darcy's law: application to an orange juice-based cake. *CYTA – JOURNAL OF FOOD*, 19(1), 265–272.
- USDA. (n.d.).
- Wernecke, R., & Wernecke, J. (2013). Applications in the Chemical, Pharmaceutical, and Plastics Industries. In *Industrial Moisture and Humidity Measurement* (1st ed.). Wiley.
- Yin, X., Chen, K., Cheng, H., Chen, X., Feng, S., Song, Y., & Liang, L. (2022). Chemical Stability of Ascorbic Acid Integrated into Commercial Products: A Review on Bioactivity and Delivery Technology. *Antioxidants*, 11(1).