



**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ &
ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επίδραση της θερμοκρασίας πήξης και της
λιποπεριεκτικότητας του γάλακτος στην πορεία πήξης του
γάλακτος με πυτιά**

Αδελίνη Γεωργία
Γιαννακούλη Αικατερίνη

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2012

Επίδραση της θερμοκρασίας πήξης και της λιποπεριεκτικότητας του γάλακτος στην πορεία πήξης του γάλακτος με πυτιά

Αδελίνη Γεωργία
Γιαννακούλη Αικατερίνη

Υποβολή Πτυχιακής διατριβής που αποτελεί μέρος των απαιτήσεων για την απονομή του Πτυχίου του Τμήματος Τεχνολογίας Τροφίμων του ΤΕΙ Θεσσαλονίκης.

Ημερομηνία
Φεβρουάριος 2012

Εισηγητές Καθηγητές
Αντωνίου Κλειώ
Δημητρέλη Γεωργία

Η επόμενη σελίδα αφορά κάποιες πιθανές ευχαριστίες σε μέλη του Εκπαιδευτικού Προσωπικού , άλλους Σπουδαστές ή κάποιους φορείς που συνέλαβαν στην ολοκλήρωση της πτυχιακής διατριβής .

Ευχαριστούμε θερμά τις καθηγήτριες Δημητρέλη Γεωργία και Αντωνίου Κλειώ για την βοήθεια και την υποστήριξη που μας παρείχαν. Ευχαριστούμε την την κα Μαρία Μπαξεβάνου, βοηθό του εργαστηρίου Τεχνολογίας και Έλεγχος ποιότητας Γάλακτος και Γαλακτοκομικών προϊόντων. Επίσης, ευχαριστούμε τον Στέλιο Εξαρχόπουλο και την Παπαδοπούλου Πωλίνα για την βοήθεια τους κατά την διεξαγωγή της πτυχιακής μας εργασίας. Τέλος, ευχαριστούμε τον καθηγητή Ραφαηλίδη Στυλιανό για την διάθεση του Δυναμικού ρεομέτρου υοειδή σωλήνα.

Αδελίνη Γεωργία
Γιαννακούλη Αικατερίνη

ΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Σχολή Τεχνολογίας Τροφίμων & Διατροφής, Τμήμα
Τεχνολογίας Τροφίμων, 57400 Θεσσαλονίκη Τ.Θ. 141

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας πήξης και της λιποπεριεκτικότητας του γάλακτος στην πορεία πήξης του με πυτιά. Για την παρασκευή των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε παστεριωμένο αγελαδινό γάλα λιποπεριεκτικότητας 0%, 1,5% και 3,5%, ενώ η πήξη πραγματοποιήθηκε στους 30°C, 35°C και 40°C. Η μελέτη της πορείας σχηματισμού της πηκτής του γάλακτος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός δυναμικού ρεομέτρου υοειδούς σωλήνα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, τόσο η θερμοκρασία πήξης όσο και η λιποπεριεκτικότητα του γάλακτος επηρεάζουν την πορεία πήξης του με πυτιά. Συγκεκριμένα, η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου που απαιτείται για την έναρξη ανόδου του συντελεστή ελαστικότητας (G'), ενώ ταυτόχρονα αυξάνει τον ρυθμό συναίρεσης του πηγματος οδηγώντας το σε γρήγορη κατάρρευση και επομένως σε μικρότερες τιμές του G' . Όσον αφορά τη λιποπεριεκτικότητα του γάλακτος, η αύξηση της προκαλεί μείωση του χρόνου που απαιτείται για την έναρξη ανόδου του G' , αύξηση της μέγιστης τιμής G' και αύξηση του χρόνου που απαιτείται για την επίτευξη της μέγιστης τιμής G' .

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	5
2.1. Πυτιά.....	5
2.1.1. Ένζυμα πυτιάς	5
2.1.2. Πηκτική δύναμη της πυτιάς.....	6
2.1.3. Υποκατάστατα πυτιάς.....	6
2.1.3.1. Χυμοσίνη- πεψίνη σε αναλογία 50:50	7
2.1.3.2. Πυτιές άλλων προελεύσεων	7
2.2. Καλλιέργειες.....	8
2.3. Μηχανισμός πήξης του γάλακτος με την επίδραση πυτιάς	8
2.3.1. Πρώτο στάδιο	9
2.3.2. Δεύτερο στάδιο.....	10
2.4. Ρεολογία στην βιομηχανία τροφίμων	10
2.5. Ρεολογική κατάταξη των πηκτών.....	11
3. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	13
4. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	14
4.1 Υλικά	14
4.1.1. Γάλα	14
4.1.2. Πυτιά εμπορίου.....	15
4.1.3. Οξυγαλακτική καλλιέργεια.....	15
4.2. Παρασκευή των δειγμάτων.....	15
4.3. Δυναμικό ρεόμετρο υοειδή σωλήνα.....	16
4.3.1. Περιγραφή οργάνου.....	16
4.3.2. Αρχή λειτουργίας ρεομέτρου	19
4.3.3 Μαθηματικές σχέσεις.....	20
4. 4. Μελέτη της ρεολογικής συμπεριφοράς των δειγμάτων	23
4. 5. Στατιστικός έλεγχος.....	24
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	25
5.1. Μελέτη των ιξωδοελαστικών παραμέτρων κατά το σχηματισμό της πηκτής.....	25
5.2. Επίδραση της θερμοκρασίας πήξης στα ρεολογικά χαρακτηριστικά της πηκτής.....	33
5.3. Επίδραση της λιποπεριεκτικότητας του γάλακτος στα ρεολογικά χαρακτηριστικά της πηκτής	35
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	36
7. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	37
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	38
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	41

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πήξη του γάλακτος με την επίδραση πυτιάς αποτελεί το πρώτο και ένα από τα πιο σημαντικά στάδια στην τεχνολογία παρασκευής τυριών. Οι μηχανισμοί που διέπουν το σχηματισμό της πηκτής του γάλακτος καθώς επίσης και οι παράγοντες που τον επηρεάζουν καθορίζουν τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Η μελέτη επομένως τόσο της πορείας πήξης του γάλακτος με την επίδραση πυτιάς όσο και των παραγόντων που την επηρεάζουν είναι υψίστης σημασίας.

Η πήξη του γάλακτος με την επίδραση πυτιάς είναι το αποτέλεσμα της δράσης του ενζύμου χυμοσίνη, που υπάρχει σε αυτήν, πάνω στην κολλοειδή φάση του γάλακτος και συγκεκριμένη στην κ-καζεΐνη, η οποία βρίσκεται στην επιφάνεια των καζεϊνικών μικκυλίων. Αποτέλεσμα της ενζυμικής διάσπασης είναι η αποσταθεροποίηση των καζεϊνικών μικκυλίων, η συνένωση τους παρουσία ιόντων ασβεστίου και ο σχηματισμός ενός τρισδιάστατου πρωτεϊνικού πλέγματος μέσα στον οποίο παγιδεύονται μηχανικά και τα υπόλοιπα συστατικά του γάλακτος (Ζερφυρίδης, 2001). Τα χαρακτηριστικά της κολλοειδούς φάσης αλλά και οι συνθήκες του προβάλλοντα χώρου επηρεάζουν τόσο το σχηματισμό όσο και τις ρεολογικές ιδιότητες της πηκτής.

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη πήξη του γάλακτος με την επίδραση πυτιάς είναι η θερμοκρασία επώασης, το pH, η θερμική επεξεργασία του γάλακτος, η συγκέντρωση των ιόντων ασβεστίου, το είδος και η ποσότητα της πυτιάς, η χημική σύσταση του γάλακτος κ.α. (Fox et al., 2000).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας πήξης και της λιποπεριεκτικότητας του γάλακτος στην πορεία πήξης του γάλακτος με πυτιά. Η μελέτη της ρεολογικής συμπεριφοράς της πηκτής κατά τη διάρκεια σχηματισμού της θα γίνει με τη χρήση δυναμικού ρεομέτρου υοειδούς σωλήνα.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1. Πυτιά

Στη χώρα μας πυτιά ονομάζονται όλα τα προϊόντα του εμπορίου που χρησιμοποιούνται για την πήξη του γάλακτος κατά την παρασκευή τυριών. Σε διεθνές επίπεδο όμως έχει καθιερωθεί η ονομασία αυτή να δίδεται μόνον σε προϊόντα που λαμβάνονται με εκχύλιση από ήνυστρα μη απογαλακτισμένων νεαρών μηρυκαστικών, κατά κύριο λόγο μοσχαριών. Τα σχετικά προϊόντα από άλλες πηγές χαρακτηρίζονται ως υποκατάστατα της ή απλά ως ένζυμα πήξης (Ανυφαντάκης, 2004).

Η πυτιά χρησιμοποιήθηκε αρχικά και επί πολλούς αιώνες για την παρασκευή τυριών στις κτηνοτροφικές εκμεταλλεύσεις. Στις συνθήκες αυτές κάθε κτηνοτρόφος παρασκεύαζε μόνος του, κατά τρόπο εμπειρικό, την πυτιά για τις ανάγκες του. Από τα μέσα όμως του 19ου αιώνα, οπότε δημιουργήθηκαν τα πρώτα συνεταιρικά τυροκομεία, προέκυψε η ανάγκη παρασκευής μεγαλύτερων ποσοτήτων της και ένα στοιχειώδες εμπορικό ενδιαφέρον. Αργότερα δημιουργήθηκαν μεγάλες βιομηχανικές μονάδες, ενώ αυξήθηκε σημαντικά η ποσότητα του τυροκομούμενου γάλακτος, με αποτέλεσμα να αναπτυχθεί εμπορικό ενδιαφέρον που οδήγησε στη παραγωγή της σε βιομηχανική κλίμακα (Ανυφαντάκης, 2004).

2.1.1. Ένζυμα πυτιάς

Η πυτιά οφείλει την πηκτική της δύναμη, κατά κύριο λόγο, στο ένζυμο χυμοσίνη ή ρεννίνη, περιέχει όμως και άλλα ένζυμα σε πολύ μικρότερη αναλογία. Η πεψίνη, η τρυψίνη και διάφορες άλλες πεπτιδάσες είναι συνήθως συστατικά της. Η χυμοσίνη αφθονεί στο επιθήλιο των ηνύστρων, όπου απαντά υπό τη μορφή του προένζυμου της προχυμοσίνης ή προρεννίνης. Θεωρείται ότι είναι το μοναδικό ένζυμο που πρακτικά υπάρχει στο ήνυστρο αμέσως μετά τη γέννηση των ζώων. Με την ανάπτυξή τους όμως αυξάνει σταδιακά η αναλογία της πεψίνης ενώ μειώνεται αυτή της χυμοσίνης, ώστε σε ήνυστρα ζώων ηλικίας 5 έως 7 μηνών τα δύο ένζυμα υπάρχουν περίπου στην ίδια αναλογία. Ήνυστρα ζώων ηλικίας μεγαλύτερης των 2 χρόνων θεωρείται ότι περιέχουν πρακτικά μόνον πεψίνη (Ανυφαντάκης, 2004).

2.1.2. Πηκτική δύναμη της πυτιάς

Ως πηκτική δύναμη μιας πυτιάς ορίζονται τα μέρη του γάλακτος που πήζει ένα μέρος της στους 35°C σε 40 min. Εκφράζεται, συνήθως, σε μορφή κλάσματος στο οποίο αριθμητής είναι η μονάδα και παρονομαστής τα μέρη του γάλακτος που μπορεί να πήξει ένα μέρος της στις παραπάνω συνθήκες (Ανυφαντάκης, 2004).

2.1.3. Υποκατάστατα πυτιάς

Η παραδοσιακή πυτιά από ήνυστρα μοσχαριών του γάλακτος είναι ένα πολύ ακριβό ένζυμο επειδή η προσφορά του είναι μικρή σε σχέση με τη ζήτηση του. Αυτό προκλήθηκε (Ζερφυρίδης, 2001):

- από το γεγονός ότι τα μοσχάρια δεν σφάζονται πλέον μικρά αλλά διατηρούνται για να αποκτήσουν βάρος προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή κρέατος και
- από την αύξηση της γαλακτοπαραγωγής η οποία προκάλεσε την ακόμη μεγαλύτερη αύξηση στην παραγωγή τυριών.

Έγινε έτσι αναγκαία η αναζήτηση πυτιάς και από στομάχια άλλων ζώων και άλλων πηκτικών ενζύμων. Αρκεί τα ένζυμα αυτά να ανταποκρίνονται σε ορισμένες προδιαγραφές. Από άποψη υγείας των καταναλωτών να είναι άμεμπτα και από τεχνολογική άποψη να δίνουν ένα καλό πήγμα του γάλακτος, καλή απόδοση τυριού, ευμενή πρωτεολυτική δράση κατά την ωρίμανση του τυριού ώστε να αποκτήσει γεύση και άρωμα ευχάριστα στον καταναλωτή χωρίς να επηρεάζει τη δομή και υφή του τυριού (Ζερφυρίδης, 2001).

Ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας και η Διεθνής Ομοσπονδία Γάλακτος έχουν θέσει ορισμένες προϋποθέσεις στις οποίες πρέπει να ανταποκρίνεται ένα ενδημικό προϊόν, για να χαρακτηριστεί ως υποκατάστατο της κλασσικής πυτιάς, που συνοψίζονται ως εξής (Ανυφαντάκης, 2004):

- Να είναι διαλυτό στο νερό, ώστε να εξασφαλίζεται εύκολα η ομοιόμορφη διασπορά του στο γάλα.
- Να στερεείται γεύσεων και οσμών που μπορούν να επηρεάσουν τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του τυριού
- Να μην είναι τοξικό
- Να μην επιδεικνύει αντιβιοτική δράση
- Να έχει περιορισμένη πρωτεολυτική και λωποδυτική δράση
- Να μην επιφέρει εκτροπή στην αλληλουχία των φάσεων της τυροκόμησης, όπως διαμορφώνεται με τη τυτιά
- Να προκαλεί τη πήξη υπό τα φυσικοχημικά δεδομένα του γάλακτος

2.1.3.1. Χυμοσίνη- πεψίνη σε αναλογία 50:50

Οι πρωτεΐνες που παράγονται στα στομάχια διαφόρων ζώων και κυρίως των μηρυκαστικών πληρούν τους παραπάνω όρους και χρησιμοποιούνται στην τυροκομία. Από αυτά τη μεγαλύτερη διάδοση έχει η τυτιά από στομάχια αμνών και εριφίων αλλά και τυτιά από ήνυστρα μοσχарιών μεγαλύτερα από την κανονική τους ηλικία οπότε περιέχει και πεψίνη μαζί με χυμοσίνη. Πρέπει να λεχθεί ότι η κοινή τυτιά έχει πάντοτε και ένα ποσοστό πεψίνης και επομένως ένα μέρος της πηκτικής της δύναμης οφείλεται σε αυτήν. Προέκυψαν έτσι διάφορα παρασκευάσματα τυτιάς και πεψίνης διαφόρου προελεύσεως. Το παρασκεύασμα σε αναλογία 50:50 φαίνεται να έγινε γενικά αποδεκτό αφού κατά τα τελευταία 15 χρόνια δεν αναφέρονται βασικές διαφορές από την καθαυτό τυτιά στην επίδραση του στα διάφορα τυριά (Ζερφυρίδης, 2001).

2.1.3.2. Πυτιές άλλων προελεύσεων

Πυτιές φυτικής προελεύσεως που δοκιμάστηκαν για το πήξιμο του γάλακτος ήταν εκχύλισμα από καπρούς *Withania coagulans* και άλλων φυτών. Έδωσαν τυριά με πικρή γεύση και δεν είχαν καμία εμπορική επιτυχία (Ζερφυρίδης, 2001).

Ένζυμα πηκτικά του γάλακτος παρασκευάστηκαν επίσης τόσο από βακτήρια όσο και από μύκητες. Αυτά από βακτήρια ήταν κυρίως από τα είδη του γένους *Bacillus* και ιδίως του *B. subtilis*, *B. Mesentericus* και *B. polymyxa*, όλα έχουν όμως το σημαντικό μειονέκτημα του πολύ υψηλού κόστους και υποβάθμισης του τελικού προϊόντος (Ζερφυρίδης, 2001).

Παρόμοια μειονεκτήματα αποδόθηκαν και στις τυτιές που παρασκευάστηκαν από μύκητες αλλά σε μικρότερη έκταση. Έτσι σήμερα κυκλοφορούν στο εμπόριο διάφορες τυτιές προελεύσεως μυκήτων που έδωσαν πολύ καλά αποτελέσματα στην πλειονότητα των τυριών και σε πολλές χώρες έχουν αντικαταστήσει σε μεγάλο ποσοστό την παραδοσιακή τυτιά (Ζερφυρίδης, 2001).

2.2. Καλλιέργειες

Η χρησιμοποίηση καλλιέργειας αποτελεί το επίκεντρο της τυροκομίας και σε αυτήν αποδίδεται το 90% της επιτυχίας ενός τυριού. Έτσι δίκαια θεωρείται σαν την καρδιά της τυροκομίας (Ζερφυρίδης, 2001).

Η καλλιέργεια έχει ως σκοπό την παραγωγή γαλακτικού οξέος κατά ορισμένο ρυθμό αμέσως μόλις προστεθεί στο γάλα μέχρι το τυρόπηγμα και το φρέσκο τυρί να στραγγίσει καλά. Με τη δράση της επιτυγχάνονται τα ακόλουθα (Ζερφυρίδης, 2001):

- Παρεμποδίζεται η ανάπτυξη της φυσικής μικροχλωρίδας του γάλακτος
- Διευκολύνεται η δράση της τυτιάς
- Η συναίρεση του τυροπήγατος και το στράγγισμα του γίνονται καλά
- Παράγουν ενώσεις, οι οποίες συμβάλουν θετικά στη γεύση και το άρωμα του τελικού προϊόντος

2.3. Μηχανισμός πήξης του γάλακτος με την επίδραση τυτιάς

Με τον όρο πήξη του γάλακτος εννοούμε μία σειρά αλλαγών στις φυσικοχημικές του ιδιότητες, οι οποίες υπό ορισμένες συνθήκες, προκαλούν μεταβολές στα μικκύλια των καζεϊνών του που οδηγούν τελικά στη δημιουργία του τυροπήγατος. Οι αλλαγές αυτές είναι δυνατόν να προκληθούν είτε με οξύνιση είτε με χρήση πρωτεολυτικών ενζύμων που περιέχονται στη τυτιά (Ανυφαντάκης, 2004).

Η πήξη του γάλακτος με την επίδραση τυτιάς διακρίνεται σε δύο στάδια.

2.3.1. Πρώτο στάδιο

Η πρωτογενής φάση είναι ενζυμική και ολοκληρώνεται σε λίγα λεπτά. Καταρχήν γίνεται μία ειδική πρωτεόλυση της καζεΐνης που μετράται από το μη πρωτεϊνικό άζωτο (NPN) που εκλύεται από την κ-καζεΐνη και είναι διαλυτό σε 12% τριγλωροξικό οξύ (TCA). Το κλάσμα της καζεΐνης που παίρνει μέρος αποκλειστικά στην φάση αυτή είναι η κ-καζεΐνη. Από αυτήν απελευθερώνεται ένα τμήμα που έχει ένα κύριο πεπτιδίο που κατά 30% σχεδόν έχει σάκχαρα (7% γαλακτοζαμίνη, 7,4% γαλακτόζη και 14,3% N-ακετυλονευραμινικό-σιαλικό-οξύ). Έτσι το αποσπώμενο κομμάτι ονομάστηκε γλυκομακροπεπτιδίο (GMP), είναι ηλεκτροφορητικά ομοιογενές και έχει μοριακό βάρος 6000-8000. Από τα δύο αυτά τεμάχια της κ-καζεΐνης το μεγάλο τεμάχιο (παρά-κ-καζεΐνη) το οποίο παραμένει στο καζεϊνικό μικκύλιο είναι υδρόφοβο ενώ το δεύτερο τεμάχιο το οποίο αποκόπτεται και μένει στην υδατική φάση είναι υδρόφιλο για αυτό και είναι υδατοδιαλυτό. Η ιδιότητα αυτή αποτελεί και την κύρια δύναμη σταθεροποίησης ή κολλοειδούς κατάστασης του καζεϊνικού μικκυλίου μέσα στο γάλα για αυτό και ονομάζεται στερική σταθεροποίηση. Η κατανομή της κ-καζεΐνης επηρεάζει την κατανομή των μικκυλίων και τη στερική σταθεροποίηση (Horne, 1986; De Kruijff, 1999) και όταν μία επαρκής ποσότητα έχει διασπαστεί τότε τα ασταθή καζεϊνικά μικκύλια αρχίζουν να συσσωματώνονται. Η άλλη δύναμη διατήρησης της κολλοειδούς κατάστασης είναι η ηλεκτρική απόθεση των καζεϊνικών μικκυλίων λόγω αρνητικού φορτίου στην επιφάνεια τους και ονομάζεται ηλεκτρική σταθεροποίηση αλλά αυτή είναι μικρή. Με την ενζυμική υδρόλυση της κ-καζεΐνης μειώνονται και οι δύο αυτές δυνάμεις οπότε αποσταθεροποιείται το καζεϊνικό μικκύλιο. Όταν η υδρόλυση της κ-καζεΐνης που βρίσκεται στο γάλα φτάσει το 60-80% τότε έχει προχωρήσει επαρκώς η πρωτογενής φάση ώστε να επέλθει πήξη του γάλακτος (Ζερφυρίδης, 2001). Η φύση των ελκτικών δυνάμεων κατά τη διάρκεια της συγκέντρωσης των καζεϊνικών μικκυλίων δεν είναι ακόμη απόλυτα σαφές, αν και οι γέφυρες Ca, οι δυνάμεις Van Der Waals και οι υδρόφοβες αλληλεπιδράσεις φαίνεται να εμπλέκονται (Walstra, 1990; Mellema et al., 1999).

2.3.2. Δεύτερο στάδιο

Η συσσωμάτωση των αποσταθεροποιημένων καζεϊνικών μικκυλίων αποτελεί το δεύτερο στάδιο της διαδικασίας πήξης του γάλακτος με πυτιά και οδηγεί στο σχηματισμό πήγματος (Horne, 1986; De Kruif, 1999). Όταν η κ-καζεΐνη σαν μέρος του καζεϊνικού μικκυλίου υφίσταται την επίδραση της χυμοσίνης, χάνει την ικανότητα της να σταθεροποιεί το μικκύλιο και με την παρουσία των ιόντων ασβεστίου τα αποσταθεροποιημένα μικκύλια σχηματίζουν το τυρόπηγμα (Ζερφυρίδης, 2001).

Ο σχηματισμός του πήγματος αποδίδεται στο ότι η καζεΐνη είναι φωσφοπρωτεΐνη και σχηματίζει διμοριακούς δεσμούς με τα ιόντα ασβεστίου, χωρίς τα οποία η δευτερογενής φάση δεν επιτελείται. Οι διμοριακοί αυτοί δεσμοί είναι : NP-Ca-PN.

Αλλά υπάρχουν και άλλοι τύποι διμοριακών δεσμών που παίρνουν μέρος στην αντίδραση της πήξεως. Κατά άλλους ο σχηματισμός του πήγματος οφείλεται στο ότι τα ιόντα ασβεστίου μειώνουν το αρνητικό φορτίο των αποσταθεροποιημένων μικκυλίων καζεΐνης πράγμα που διευκολύνει την συσσωμάτωσή τους. Τα λιποσφαίρια και ο ορός συγκρατούνται μέσα στο πήγμα μηχανικά για αυτό και όταν το πήγμα διαιρείται σε μεγάλα τεμάχια, όπως κατά την παραγωγή μαλακών τυριών, η διαφυγή του λίπους στο τυρόγαλα είναι πιο αυξημένη και ανάλογα με την ανάδευση μπορεί να ξεπεράσει και το 0,8% (Ζερφυρίδης, 2001).

2.4. Ρεολογία στην βιομηχανία τροφίμων

Τα τρόφιμα είναι συνθετικά υλικά τόσο στην δομή τους όσο και στην ρεολογία τους και σε πολλές περιπτώσεις αποτελούνται από μίγμα στερεών και υγρών συστατικών (Finney, 1972).

Η επιστήμη της ρεολογίας έχει πολλές εφαρμογές στον τομέα των τροφίμων σχετικά με την αποδεκτότητα τους από τον καταναλωτή ,την επεξεργασία τους καθώς και τον τρόπο διαχείρισής τους (Barbosa – Canovas et al.,1996).

Η ρεολογία μελετά την ροή και την παραμόρφωση των υλικών και ιδιαίτερα την συμπεριφορά τους όταν μεταβαίνουν από την υγρή στην στερεά φάση και

αντίστροφα. Επιπλέον η ρεολογία προσπαθεί να καθορίσει την σχέση μεταξύ της τάσης στο υλικό και της προκύπτουσας ροής ή παραμόρφωσης που λαμβάνει χώρα.

Οι ρεολογικές ιδιότητες καθορίζονται μετρώντας τη δύναμη που ασκείται στο δείγμα και στη παραμόρφωση που προκαλεί αυτό συναρτήσει του χρόνου. Η διαφορά μεταξύ των θεμελιωδών και των εμπειρικών ρεολογικών μεθόδων είναι ότι αντίθετα με τις εμπειρικές οι θεμελιώδεις ερμηνεύουν την ένταση και την φορά της δύναμης και της παραμόρφωσης για υλικά με συγκεκριμένο σχήμα και σύνθεση. Το πλεονέκτημα των θεμελιωδών μεθόδων είναι ότι βασίζονται σε γνωστές αρχές και εξισώσεις της φυσικής. Οι εμπειρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται συχνά όταν η σύνθεση του δείγματος ή η γεωμετρία του είναι τόσο συνθέτη ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η δύναμη ή η παραμόρφωση βάση γνωστών εξισώσεων.

Σε όλες τις ρεολογικές μετρήσεις τα βασικότερα μεγέθη είναι η τάση και η παραμόρφωση. Η τάση είναι το μέτρο της δύναμης ανά μονάδα επιφάνειας και εκφράζεται σε μονάδες πίεσης (pascal) (Tabilo – Munizaga & Barbosa – Canovas, 2004). Η παραμόρφωση παριστάνει ένα αδιάστατο μέγεθος σχετικό με τη παραμόρφωση του υλικού. Τα τρόφιμα δείχνουν κάθετη παραμόρφωση όταν συμπιέζονται (compressive stress) ή εκτείνονται (tensile stress) (Neilsen, 1998).

2.5. Ρεολογική κατάταξη των πηκτών

Ένας μεγάλος αριθμός τροφίμων ανήκει στην κατηγορία των πηκτών δηλαδή των κολλοειδών συστημάτων στα οποία μεγάλη ποσότητα νερού ακινητοποιείται λόγω δέσμευσης των μορίων του από υδρόφιλα κολλοειδή σωματίδια του υλικού.

Οι πηκτές κατατάσσονται με βάση την διάταξη των μακρομορίων τους πριν και κατά την διάρκεια του σχηματισμού του πλέγματος σε :

- Πηκτές οι οποίες σχηματίζονται από άτακτα βιοπολυμερή όπως καραγεννάνες άμυλο, ζελατίνες και
- Πηκτές όπου το δίκτυο περιλαμβάνει ειδικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ συμπαγών και λιγότερο εύκαμπτων σωματιδίων όπως θερμικά μετουσιωμένες πρωτεΐνες και συσσωματωμένες πρωτεΐνες από ενζυμική ή χημική αντίδραση.

Επίσης βασισμένες στην μικροσκοπική συμπεριφορά του συστήματος της πηκτής μπορούν να διαχωριστούν σε αληθινές και ψευδό – πηκτές. Οι αληθινές πηκτές είναι αποτέλεσμα του σχηματισμού ενός τρισδιάστατου πλέγματος ενώ οι ψευδό – πηκτές χαρακτηρίζονται από ένα ασθενές πλέγμα το οποίο σπάει πολύ εύκολα όταν υπόκειται σε μια τάση αρκετά υψηλή (Lopes da Silva & Rao, 1999).

Δοκιμές τάσης – παραμόρφωσης είναι χρήσιμες στην μελέτη της συμπεριφοράς των πηκτών και ξενικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δυο τύπους , στις δοκιμές μικρής παραμόρφωσης και στις δοκιμές μεγάλης παραμόρφωσης .

- Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται στην παραμόρφωση ενός δείγματος όταν για το σπάσιμο αυτού απαιτείται ένα πολύ μικρό ποσοστό παραμόρφωσης , το οποίο συχνά εκτελείται από θεμελιώδεις δοκιμές .
- Οι δοκιμές μεγάλης παραμόρφωσης αναφέρονται στην παραμόρφωση ενός δείγματος μέχρι το σημείο της μόνιμης αλλαγής της δομής του . Εκτός αυτού οι τελευταίες συχνά αποδίδουν πληροφορίες που σχετίζονται με την οργανοληπτική εκτίμηση (Hamann & MacDonald, 1992).

Δυναμικές δοκιμές μικρής παραμόρφωσης παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την διαδικασία σχηματισμού του πηγματος. Κάποιες από τις παραμέτρους που καθορίζονται από την μηχανική δοκιμή μικρής παραμόρφωσης είναι (Steffe, 1996):

- Η τιμή G' (Storage modulus) η οποία εκφράζεται σε μονάδες πίεσης (Pa). Η τιμή αυτή είναι ένα μέτρο της αποθηκευμένης ενέργειας παραμόρφωσης ανά κύκλο ταλάντωσης και παριστάνει την ελαστική συμπεριφορά του δείγματος.
- Η τιμή G'' (Loss modulus) η οποία εκφράζεται σε μονάδες πίεσης (Pa). Η τιμή αυτή είναι ένα μέτρο της ενέργειας που χάνεται ως θερμότητα ανά κύκλο ταλάντωσης και παριστάνει την ιξώδη συμπεριφορά του δείγματος .
- Η τιμή $\tan\delta$ η οποία είναι ο λόγος του ιξώδους G'' προς τον ελαστικό χαρακτήρα G' : $\tan\delta = G'' / G'$.
- Το συνθετικό ιξώδες n^* : $n^* = G^* / \omega$, όπου ω είναι η συχνότητα της ταλάντωσης σε (rad s^{-1}) $G^* = ((G')^2 + (G'')^2)^{1/2}$.

Η συμπεριφορά του δείγματος εξαρτάται από τις τιμές G', G'' και κατά συνέπεια από την τιμή $\tan\delta$. Έτσι διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- Όταν ισχύει η ανισότητα $G' \gg G''$, τότε το δείγμα συμπεριφέρεται περισσότερο σαν στερεό.
- Όταν ισχύει η ανισότητα $G' \ll G''$, τότε το δείγμα συμπεριφέρεται περισσότερο σαν υγρό.
- Όταν $\delta = 0^0$ ή $\epsilon\phi\delta = 0$ τότε το δείγμα παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά.
- Όταν $\delta = 90^0$ ή $\epsilon\phi\delta = \infty$ τότε το δείγμα παρουσιάζει ιξώδη συμπεριφορά.
- Όταν $0^0 < \delta < 90^0$ τότε το δείγμα ονομάζεται ιξωδοελαστικό.

3. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας πήξης και της λιποπεριεκτικότητας του γάλακτος στην πορεία πήξης του γάλακτος με πυτιά. Η μελέτη της ρεολογικής συμπεριφοράς της πηκτής κατά τη διάρκεια σχηματισμού της θα γίνει με τη χρήση δυναμικού ρεομέτρου υοειδούς σωλήνα.

4. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

4.1 Υλικά

4.1.1. Γάλα

Για την παρασκευή των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε παστεριωμένο ομογενοποιημένο γάλα, λιποπεριεκτικότητας 0%, 1,5% και 3,5%. Τα χαρακτηριστικά του κάθε είδους γάλακτος όπως αναφέρονται στις συσκευασίες τους παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.1-4.4.

Πίνακας 4.1. Χαρακτηριστικά παστεριωμένου γάλακτος λιποπεριεκτικότητας 3,5%.

Διαθρεπτικά Χαρακτηριστικά / 100 gr	
Ενέργεια	63Kcal
Λιπαρά	3,5g
Πρωτεΐνες	3,2g
Υδατάνθρακες	4,75g
Ασβέστιο	130mg

Πίνακας 4.2. Χαρακτηριστικά παστεριωμένου γάλακτος λιποπεριεκτικότητας 1,5%.

Διαθρεπτικά Χαρακτηριστικά / 100 g	
Ενέργεια	45Kcal
Λιπαρά	1,5g
Πρωτεΐνες	3,2g
Υδατάνθρακες	4,75g
Ασβέστιο	130mg

Πίνακας 4.3. Χαρακτηριστικά παστεριωμένου γάλακτος λιποπεριεκτικότητας 0%.

Διαθρεπτικά Χαρακτηριστικά / 100 g	
Ενέργεια	33Kcal
Λιπαρά	0g
Πρωτεΐνες	3,4g
Υδατάνθρακες	4,75g
Ασβέστιο	130mg

4.1.2. Πυτιά εμπορίου

Για την παρασκευή των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε κρυσταλλική πυτιά του εμπορίου (Danaes, Thessaloniki, Greece) με περιεκτικότητα σε χυμοσίνη 95% και πεψίνη 5%, ενώ η πηκτική της δύναμη ήταν 883 IMCU.

4.1.3. Οξυγαλακτική καλλιέργεια.

Τα δείγματα εμβολιάστηκαν με καλλιέργεια εμπορίου Jointex X3, Dosi 4 (CSL Centro Sperimentale, de Latte S.P.A, Zelo Buon Persico, Italy).

4.2. Παρασκευή των δειγμάτων

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την παρασκευή δειγμάτων είναι η εξής:

Παρασκευή διαλύματος πυτιάς: 0,25g πυτιάς ζυγίστηκαν σε ζυγό ακριβείας και τοποθετήθηκαν σε ογκομετρική φιάλη των 100 ml, η οποία συμπληρώθηκε μέχρι τη χαραγή με απεσταγμένο νερό.

Προετοιμασίας: σε ζυγό ακριβείας ζυγίστηκαν 0,1 g καλλιέργειας εμπορίου, τοποθετήθηκαν σε αποστειρωμένο περιέκτη υπό ασηπτικές συνθήκες και προστέθηκαν με αποστειρωμένο σιφώνιο πλήρωσεως 50 ml γάλακτος UHT. Το δείγμα αναδεύτηκε για 20 min σε υδατόλουτρο σε θερμοκρασία 35 °C.

Παρασκευή δειγμάτων: Υπό ασηπτικές συνθήκες εμβολιάστηκαν 400 g παστεριωμένου γάλακτος (με διαφορετική λιποπεριεκτικότητα κάθε φορά) με 5 ml από το διάλυμα καλλιέργειας σε κωνική φιάλη των 1000 ml. Στην συνέχεια ακολουθούσε ανάδευση στο υδατόλουτρο για 5 min. Στο εμβολιασμένο παστεριωμένο γάλα προστέθηκαν με σιφώνιο πλήρωσεως 2 ml από το διάλυμα πυτιάς. Το δείγμα ανακινήθηκε 40 φορές και αμέσως μεταφέρθηκε στον υοειδή σωλήνα του ρεομέτρου όπως αυτό περιγράφεται παρακάτω.

4.3. Δυναμικό ρεόμετρο υοειδή σωλήνα

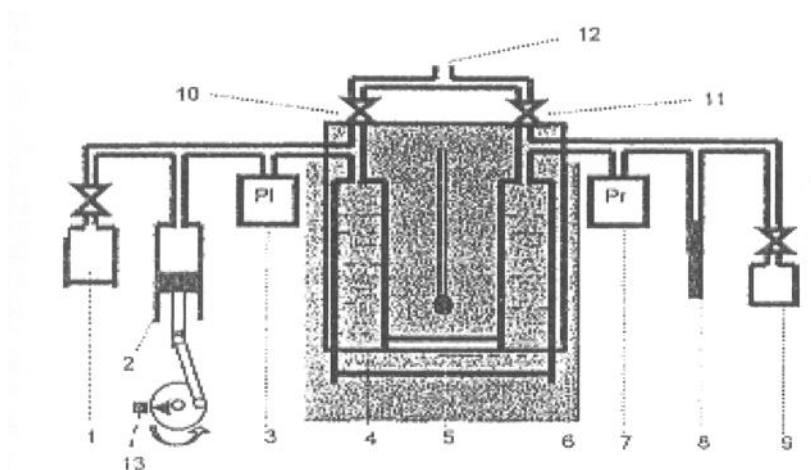
4.3.1. Περιγραφή οργάνου

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.1 που ακολουθεί, το ρεόμετρο υοειδή σωλήνα αποτελείται από τη μονάδα του υοειδή σωλήνα 4 μέσα στον οποίο τοποθετείται το υπό μέτρηση δείγμα. Τα δύο σκέλη του υοειδή σωλήνα είναι ταυτόσημα και συνδέονται με τα άλλα εξαρτήματα του ρεομέτρου. Στην αριστερή πλευρά του, ο υοειδής σωλήνας περιλαμβάνει τις βάνες 10, τον μεταλλάκτη της πίεσης 3, την μονάδα δημιουργίας της πίεσης του αέρα 2 και μία ή περισσότερες διατάξεις νεκρού όγκου βάνας 1. Στην δεξιά πλευρά του υοειδή σωλήνα είναι συνδεδεμένα η βάνα 11, ο μεταλλάκτης πίεσης 7, η βαθμολογημένη μικρή μονάδα εμβόλου-κυλίνδρου 8, και μία ή περισσότερες διατάξεις νεκρού όγκου- βάνας 9. Η μονάδα του υοειδή σωλήνα εισάγεται μεταξύ των δύο μονάδων θερμοστάτισης 6 οι οποίες σε σύνδεση με τον αισθητήρα θερμοκρασίας 5 που βρίσκεται στερεωμένος στην κεντρική περιοχή της μονάδας του υοειδή σωλήνα, παρέχει ένα θερμοστατούμενο περιβάλλον για το δείγμα. Οι αναφερθείσες βάνες είναι κατά προτίμηση ηλεκτροβάνες που επικοινωνούν από τη μία με την ατμόσφαιρα μέσω του ανοίγματος 12. Η λειτουργία του ρεομέτρου είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και επιτελείται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Η μονάδα δημιουργίας πεπιεσμένου αέρα 2 βασίζεται σε ένα μηχανικό κινητήρα που αποτελείται από ένα έμβολο μέσα σε ένα κύλινδρο και ένα

στροφαλοφόρο άξονα. Ο περιστρεφόμενος στροφαλοφόρος κινούμενος από έναν ηλεκτρικό κινητήρα, κατά προτίμηση βηματικό ή ένα σερβοκινητήρα συνεχούς ρεύματος, παλινδρομεί το έμβολο. Απλή αρμονική κίνηση μπορεί να επιτευχθεί κατασκευάζοντας τον άξονα πολύ μεγαλύτερο από το στρόφαλο. Ένας σκωτικού τύπου μηχανισμός ζυγού μπορεί επίσης να δοκιμαστεί για να προσδώσει απλή αρμονική κίνηση (Xu et al., 2004).

Ο ανιχνευτής της θέσης αναφοράς του στρόφαλου είναι ένας διακόπτης μηχανικού ή οπτικού τύπου, που μεταβάλλει τη κατάσταση όταν ο στρόφαλος κινηθεί πέρα από τη θέση αναφοράς. Αυτή η κατάσταση μπορεί να αναγνώθει από τον υπολογιστή για μια φάση αναφοράς κι να δημιουργήσει την επιθυμητή πίεση του αέρα. Σε κανονική μέτρηση οι βάνες 10 και 11 είναι κλειστές, ώστε απομονωθούν αμφότερες οι πλευρές του υοειδή σωλήνα από την ατμόσφαιρα ενώ ο στρόφαλος βρίσκεται στη θέση αναφοράς, έτσι μια προς τα εμπρός και προς τα πίσω κίνηση του εμβόλου θα δημιουργήσει θετική/ αρνητική πίεση του αέρα σε σχέση με την ατμόσφαιρα. Ποικίλες μορφές σχέσεων πίεση-χρόνου μπορούν να παραχθούν μέσω του συστήματος ελέγχου περιστροφής του κινητήρα, όπως ημιτονοειδής, υπό κλίση, βηματική ή άλλες πολύπλοκες μορφές. Εφαρμόζοντας εναλλασσόμενα θετική και αρνητική πίεση, η τάση του δείγματος να μετακινείται προς τη μία κατεύθυνση του υοειδή σωλήνα μπορεί να εξαλειφθεί.



Σχήμα 4.1. Δυναμικό ρεόμετρο υοειδή σωλήνα (Xu et al., 2004)

Οι δύο μεταλλάκτες πίεσης 3 και 7 παρέχουν το μέσο για την παρακολούθηση της εφαρμοζόμενης πίεσης αέρα στην αριστερή και στην δεξιά πλευρά του δείγματος αντίστοιχα. Οι μεταλλάκτες αυτοί είναι προτιμότερο να αποτελούνται από

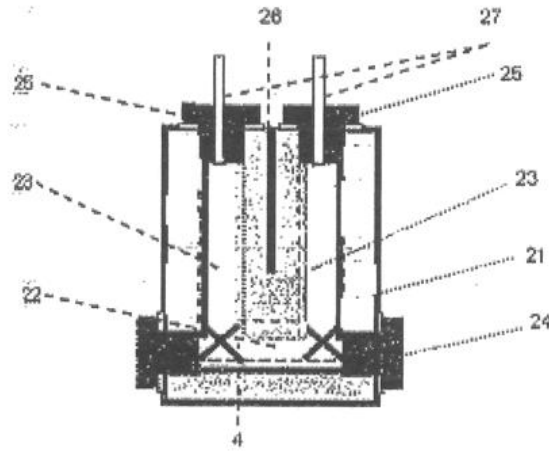
μεταλλάκτη πυριτίου πιεζοηλεκτρικού τύπου με τα σχετικά κυκλώματα επεξεργασίας του σήματος ικανά να στέλνουν το σήμα στον υπολογιστή.

Οι μονάδες νεκρού όγκου βάνας 1 και 9 είναι ενσωματωμένες στην αριστερή πλευρά και στη δεξιά πλευρά του υοειδή σωλήνα αντίστοιχα. Όταν οι βάνες ελέγχου είναι ανοιχτές, οι όγκοι που αντιστοιχούν περιλαμβάνονται στο σύστημα, μεταβάλλοντας τον ολικό νεκρό όγκο στην αντίστοιχη πλευρά του υοειδή σωλήνα.

Η βαθμολογημένη μικρή μονάδα εμβόλου-κυλίνδρου 8, μπορεί να είναι μια βαθμολογημένη σύριγγα, είναι συνδεδεμένη στη δεξιά πλευρά του υοειδή σωλήνα για να παρέχει μια εγνωσμένη μετατόπιση του όγκου για τον προσδιορισμό του νεκρού όγκου στην πλευρά αυτή του υοειδή σωλήνα.

Η λεπτομερής διάταξη της κατασκευής της μονάδας του υοειδή σωλήνα φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Η μονάδα είναι κατασκευασμένη από ένα ορθογώνιο συμπαγές τεμάχιο αλουμινίου 21, όπου μέσω του κεντρικού επιπέδου του έχουν διατηρηθεί τρεις συγκοινωνούντες αγωγοί, οι οποίοι είναι: στο χαμηλότερο επίπεδο ένας οριζόντιος 22, που τέμνεται από δύο κατακόρυφους αγωγούς 23. Οι τρεις αγωγοί έχουν την ίδια διάμετρο και όλοι φέρουν στο εσωτερικό τοίχωμά τους, σπείρωμα. Στο μέσο της μονάδας υπάρχει οπή 26 για την τοποθέτηση του αισθητήρα θερμοκρασίας. Ο οριζόντιος αγωγός 22 μπορεί να σφραγιστεί από αμφότερες τις πλευρές με τα φέροντα σπείρώματα συστήματος πώματος-φλάντζας 24 ώστε να δημιουργηθεί ο υοειδής σωλήνας δηλαδή ένας αγωγός υοειδούς σχήματος σε διασύνδεση με τους κατακόρυφους αγωγούς 23. Ο σωλήνας σύνδεσης 27 έχει το ένα άκρο προσαρμοσμένο στην κορυφή των συστημάτων πώματος-φλάντζας 25, αφήνοντας ελεύθερο το άλλο άκρο για επικοινωνία με άλλα μέρη του ρεομέτρου. Τα πλεονεκτήματα του σχεδιασμού αυτού περιλαμβάνουν:

- Καλή θερμοκρασιακή ομοιογένεια σ' όλη τη μονάδα του υοειδή σωλήνα λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας του αλουμινίου.
- Το σπείρωμα που υπάρχει στο εσωτερικό τοίχωμα των αγωγών εξυπηρετεί αμφότερες τις ανάγκες στερέωσης των πωμάτων και την παρεμπόδιση της ολίσθησης των υπό δοκιμή δειγμάτων πάνω στο τοίχωμα του υοειδή σωλήνα και
- Απομακρύνοντας τα συστήματα των πωμάτων-φλάντζών του αγωγού του υοειδή σωλήνα, αυτός μπορεί εύκολα να καθαριστεί.



Σχήμα 4.2. Μονάδα του υοειδή σωλήνα του δυναμικού ρεόμετρου (Xu et al., 2004)

4.3.2. Αρχή λειτουργίας ρεομέτρου

Το υπό μέτρηση δείγμα αφήνεται να δημιουργήσει πηκτή στον υοειδή σωλήνα 4 σε θερμοκρασία προκαθορισμένη από τη μονάδα του θερμοστάτη 6 και με τις βάνες 10 και 11 αφημένες ανοικτές ώστε να επικοινωνούν με την ατμόσφαιρα. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων αμφότερες οι πλευρές του δείγματος απομονώνονται από το περιβάλλον με το κλείσιμο των βανών 10 και 11. Στη συνέχεια στην αριστερή πλευρά του δείγματος εφαρμόζεται πίεση αέρα που δημιουργείται από τη μονάδα δημιουργίας πίεσης 2. η εφαρμοζόμενη πίεση αέρα καταγράφεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του μεταλλάκτη πίεσης 3. Το εύρος της εφαρμοζόμενης πίεσης μπορεί να επιλεγεί περιλαμβάνοντας ορισμένο νεκρό όγκο του στοιχείου 1 μέσω της βάνας ελέγχου του. Ο όγκος μετατόπισης του δείγματος κάτω από την επίδραση της εφαρμοζόμενης πίεσης προκαλεί μεταβολή στην πίεση στον κλειστό χώρο στη δεξιά πλευρά του υοειδή σωλήνα που επίσης καταγράφεται στον υπολογιστή μέσω του μεταλλάκτη πίεσης 7. Η πίεση στη δεξιά πλευρά του υοειδή σωλήνα ονομάζεται ανάδραση, η οποία εξισορροπεί την εφαρμοζόμενη πίεση αέρα στην αριστερή πλευρά με αποτέλεσμα τη δημιουργία μειωμένης πίεσης. Το μέγεθος της ανάδρασης μπορεί να επηρεαστεί από την συμπίεση μέρους του νεκρού όγκου του στοιχείου 9 μέσω της βάνας ελέγχου του. Η εκμετάλλευση της ανάδρασης στην παρούσα εφεύρεση επιτρέπει την μέτρηση της ακαμψίας πολύ ασθενών πηκτών με ένα προβλέψιμο όριο μετατόπισης του όγκου. Το βαθμολογημένο μικρό σύστημα εμβόλου-κυλίνδρου 8, για το οποίο μια σύριγγα μπορεί να χρησιμοποιηθεί, παρέχει το προσδιορισμό του νεκρού όγκου που υπάρχει στο άνω μέρος της δεξιάς πλευράς του δείγματος. Η

μετατόπιση του όγκου μπορεί κατόπιν να υπολογιστεί από την ανάδραση. Ο συντελεστής ακαμψίας του δείγματος υπολογίζεται από την επενεργούσα πίεση και την προκύπτουσα μετατόπιση του όγκου (Xu et al., 2004).

Η κύρια μέθοδος λειτουργίας περιλαμβάνει:

- Προετοιμασία του υπό δοκιμή δείγματος στον υοειδή σωλήνα έχοντας τις βάνες 10 και 11 ανοιχτές
- Τοποθέτηση του στρόφαλου τη θέση αναφοράς
- Κλείσιμο των βανών 10 και 11
- Ενεργοποίηση της μονάδας δημιουργίας πίεσης για επίτευξη μιας επιθυμητής πίεσης αέρα και καταγραφή των πιέσεων σε αμφοτέρες πλευρές του δείγματος
- Επανάληψη της μέτρησης ανά χρονικά διαστήματα για να παρακολουθείται η συμπεριφορά του δείγματος. Για να αποφευχθεί η πιθανή μετακίνηση του δείγματος προς τη μία πλευρά του υοειδή σωλήνα, πράγμα που μπορεί να συμβεί σε μια πηκτή δείγματος που υφίσταται συναίρεση, εφαρμόζονται εναλλασσόμενες θετικές και αρνητικές κινούσες πιέσεις (Xu et al., 2004).

4.3.3 Μαθηματικές σχέσεις

Θεωρητικά το ρεόμετρο λειτουργεί με βάση τον νόμο των τέλειων αερίων που αναφέρει ότι σε ένα κλειστό θάλαμο το γινόμενο της πίεσης P και του όγκου V παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια μιας ισόθερμης διεργασίας εκφραζόμενο από την εξίσωση $P_1 * V_1 = P_0 * V_0$, όπου ο δείκτης 0 αντιπροσωπεύει μια κατάσταση αναφοράς και ο δείκτης 1 αντιπροσωπεύει μια οποιαδήποτε άλλη κατάσταση. Η βασική αυτή εξίσωση μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση του ρεόμετρου υοειδή σωλήνα. Όταν οι βάνες 10 και 11 είναι ανοικτές στην ατμόσφαιρα επιτρέπουν την ισορροπία πίεσης να επιτευχθεί σε αμφοτέρες τις πλευρές του υοειδή σωλήνα οπότε η $P_0=1 \text{ atm}$, η κατάσταση αυτή ορίζεται ως η κατάσταση αναφοράς στην οποία ο στρόφαλος κανονικά οδηγείται στη θέση αναφοράς και το έμβολο στέκεται στο σημείο περίπου του μέσου της διαδρομής. Κλείνοντας αυτές τις βάνες ορισμένη ποσότητα αέρα εγκλωβίζεται σε αμφοτέρες τις πλευρές του υοειδή σωλήνα και η κατάσταση που ακολουθεί θα πρέπει να ερευνηθεί με τη χρήση της της παραπάνω βασικής εξίσωσης. Εφαρμόζοντας την βασική εξίσωση στον εγκλωβισμένο όγκο της αριστερής πλευράς του υοειδή σωλήνα προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$P_1 * V_1 = (P_{10} + \Delta P_1) * (V_{10} + \Delta V_1) = P_{10} * V_{10}$$

Όπου το 1 δηλώνει την αριστερή πλευρά και επίσης εκφράζεται μια νέα κατάσταση σε επίπεδο διαδοχικών αυξήσεων σε σχέση με την κατάσταση αναφοράς δηλαδή ΔP_1 και ΔV_1 . Είναι προφανές ότι το μέγεθος των αυξήσεων της πίεσης ΔP_1 που δημιουργείται από μια αύξηση του όγκου ΔV_1 με τη μετατόπιση του εμβόλου εξαρτάται από το V_{10} , που είναι ο αρχικός όγκος εγκλωβισμένος στην αριστερή πλευρά. Μέσω του στοιχείου 1 που χρησιμοποιείται για να συμπεριλάβει ή να αποκλείσει νεκρό όγκο, το V_{10} μπορεί τότε να ρυθμιστεί ώστε να παρέχει το επιθυμητό μέγεθος πίεσης αέρα, δηλαδή μικρότερο V_{10} για υψηλότερη πίεση και μεγαλύτερο V_{10} για χαμηλότερη πίεση. Επιπλέον, σε στατική κατάσταση, ελαττωμένη πίεση αέρα μπορεί να επιτευχθεί από μια μικρότερη γωνία στροφής του κινητήρα και επομένως της μετακίνησης του εμβόλου. Αμφότερες οι εκδοχές χρησιμοποιούνται στην πράξη μέσω του προγραμματισμού (Xu et al., 2004).

Το πλάτος της μετατόπισης του όγκου ενός παλινδρομικού εμβόλου και τα πλάτη των επιταχυνόμενων πιέσεων αέρα για όλους τους συνδυασμούς του στοιχείου 1 του νεκρού όγκου μπορεί να υπολογιστεί από τις σχετικές διαστάσεις του ρεομέτρου χρησιμοποιώντας την προαναφερθείσα βασική εξίσωση και επίσης μπορεί να ελεγχθεί πειραματικά. Πίεση του αέρα που δημιουργήθηκε από δεδομένη γωνιακή μετατόπιση του τροφάλου σε σχέση με τη θέση αναφοράς μπορεί να υπολογιστεί με βάση το πλάτος και τη σχέση το ημίτονου. Πλάτη σε διάφορους συνδυασμούς νεκρού όγκου αποθηκεύονται στον υπολογιστή για αναζήτηση όταν επιζητείται να δημιουργηθεί μια επιθυμητή πίεση αέρα.

Ομοίως, εφαρμόζοντας την βασική εξίσωση στον εγκλωβισμένο όγκο στη δεξιά πλευρά του υοειδούς σωλήνα προκύπτει μια εξίσωση ανάλογη εκείνης της αριστερής πλευράς:

$$P_r * V_r = (P_{r0} + \Delta P_r) * (V_{r0} + \Delta V_r) = P_{r0} * V_{r0}$$

Όπου ο δείκτης r δηλώνει τη δεξιά πλευρά. Είναι προφανές ότι η μετατόπιση του όγκου ΔV_r προκαλεί αύξηση της πίεσης κατά ΔP_r του οποίου το μέγεθος επηρεάζεται από τον αρχικό εγκλωβισμένο όγκο V_{r0} . Γι' αυτό, με το στοιχείο 9 που χρησιμοποιείται για να συμπεριλάβει ή να αποκλείσει νεκρό όγκο, το V_{r0} , και επομένως το ΔP_r μπορεί να ρυθμιστεί. Το ΔP_r , που μπορεί να ονομαστεί ανάδραση, συντελεί σε μια μειούμενη πραγματική πίεση που είναι η πίεση του αέρα στην αριστερή πλευρά μείον αυτή που βρίσκεται στη δεξιά πλευρά. Αυτός ο αυτοπροσαρμοζόμενος χαρακτήρας επιτρέπει την μέτρηση να πραγματοποιείται σε ένα δείγμα εξαιρετικά χαμηλής ακαμψίας, δηλαδή μια μικρή πίεση αέρα που εφαρμόζεται στο δείγμα προκαλεί μια μεταβολή ΔV_r η οποία με τη σειρά της

προκαλεί μια μεταβολή ΔP_r που είναι συγκρίσιμη με την εφαρμοζόμενη κινούσα πίεση του αέρα (Xu et al., 2004).

Είναι επίσης προφανές ότι αν το V_{r0} είναι γνωστό, η μετατόπιση του όγκου μπορεί να υπολογιστεί από την αύξηση της πίεσης ΔP_r . Ο V_{r0} , ο αρχικός νεκρός όγκος εγκλωβισμένος στο επάνω πάνω μέρος της δεξιάς πλευράς του δείγματος μπορεί να προσδιοριστεί από μια γνωστή αύξηση του όγκου ΔV_r , που προκαλεί το βαθμολογημένο μικρό σύστημα εμβόλου –κυλίνδρου δ και η αύξηση της πίεσης ΔP_r , που δημιουργείται, βασίζεται στην προαναφερθείσα εξίσωση. Στην πράξη ο V_{r0} διαιρείται σε δύο μέρη τα οποία προσδιορίστηκαν χωριστά. Πρώτα η μονάδα του υοειδούς σωλήνα αποσυνδέθηκε από τη διάταξη που είναι συνδεδεμένη στη δεξιά πλευρά του και ο νεκρός όγκος προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας το μικρό σύστημα εμβόλου-κυλίνδρου δ όπως προαναφέρθηκε για να αποφευχθούν σφάλματα που προκαλούνται από την παραμόρφωση του δείγματος, ενώ ο νεκρός όγκος που υφίσταται στη μονάδα του υοειδούς σωλήνα προσδιορίζεται από τις διαστάσεις του. Κατόπιν η τιμή του V_{r0} λαμβάνεται από την άθροιση των δύο μερών. Για δεδομένη κατασκευή είναι προφανές ότι οι τιμές του πρώτου μέρους του V_{r0} για όλους τους συνδυασμούς του στοιχείου νεκρού όγκου θ του ρεομέτρου, είναι σταθερές γι' αυτό μπορούν να αποθηκευτούν στον υπολογιστή για ανεύρεση όταν απαιτείται, ενώ το δεύτερο μέρος του V_{r0} θα πρέπει να προσδιοριστεί για κάθε δείγμα. Η τιμή του V_{r0} προσδιορίστηκε και εισήχθη στον υπολογιστή προτού να αρχίσει το πείραμα.

Για ένα εντελώς ελαστικό δείγμα ο συντελεστής διάτμησης μετρούμενος με τη μέθοδο του υοειδή σωλήνα μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση ανάλογη αυτής του Poiseuille:

$$G = \pi * R^4 * (P_1 - P_r) / 8L * \Delta V_r$$

Όπου P_1 και P_r είναι οι μετρηθείσες πιέσεις από την αριστερή και από τη δεξιά πλευρά αντίστοιχα

L είναι ο ολικό μήκος του δείγματος,

R είναι η πραγματική ακτίνα του υοειδή σωλήνα,

ΔV_r είναι η μετατόπιση του όγκου του δείγματος που μπορεί να υπολογιστεί από τη δημιουργούμενη ΔP_r , οπότε προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση για το G που υπολογίζεται από μετρήσεις της πίεσης

$$G = (\pi * R^4 / 8L * V_{r0}) * (P_1 - P_r) * (1 + P_{r0} / \Delta P_r)$$

Υποθέτοντας ότι $P_{r0} / \Delta P_r \gg 1$, πράγμα ου συχνά συμβαίνει στην πράξη, το G μπορεί να ληφθεί κατά προσέγγιση από την ακόλουθη εξίσωση:

$$G = (\pi * R^4 * P_{r0} / 8L * \Delta V_r) * \Delta P_r / (\Delta P_r - 1)$$

Από την οποία η πραγματική ουσία της παρούσας εφεύρεσης γίνεται ακόμη πιο προφανής, δηλαδή το G μετρείται από τον λόγο των πιέσεων των μανόμετρων από αμφότερες τις πλευρές του δείγματος, που είναι $\Delta P_1 / \Delta P_T$. Για ένα δείγμα πολύ χαμηλού συντελεστή ακαμψίας ο λόγος του $\Delta P_1 / \Delta P_T$ μειώνεται περίπου στο 1, που αποτελεί λόγο ύπαρξης ανάδρασης ΔP_T σχεδόν ίσης με την κινούσα δύναμη ΔP_1 . Τέτοιου είδους μέτρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με μια περιορισμένη μετατόπιση του όγκου του δείγματος, στην παρούσα εφεύρεση με την κατάλληλη επιλογή της κινούσας πίεσης ΔP_1 και του νεκρού όγκου V_{T0} .

Δυναμικές μετρήσεις ή ερπυσμού με τη χρήση της συσκευής είναι δυνατό να γίνουν για ρεολογική μοντελοποίηση και ιξωδοελαστική ανάλυση (Xu et al., 2004).

4. 4. Μελέτη της ρεολογικής συμπεριφοράς των δειγμάτων

Το δείγμα εισάγεται στον υποδοχέα (υοειδή σωλήνα) μέχρι καθορισμένου ύψους. Η ελεύθερη επιφάνεια του δείγματος καλύπτεται με λεπτό στρώμα παραφίνης, για να αποφευχθούν φαινόμενα εξάτμισης και δημιουργίας υμενίου στην επιφάνεια του δείγματος κεφίρ. Στη συνέχεια το δείγμα απομονώνεται από το περιβάλλον με το κλείσιμο των δύο βανών, αριστερά και δεξιά του σωλήνα. Μικρή ποσότητα του δείγματος αφού μεταφέρθηκε σε ποτήρι ζέσεως και εμβαπτίστηκε σε αυτό pH-μέτρο για τον έλεγχο της τιμής του pH, τοποθετήθηκε μέσα σε θερμοστατούμενο χώρο δίπλα στο όργανο. Η θερμοκρασία σε όλη τη διάρκεια του πειράματος παρέμενε σταθερή τόσο στον περιέκτη όσο και στον θερμοστατούμενο χώρο.

Στη συνέχεια επιλέχθηκε η επιθυμητή θερμοκρασία πήξης (30°C , ή 35°C ή 40°C) και τέθηκε σε λειτουργία το ρεόμετρο μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ανά 5 min και μέχρι το δείγμα να καταρρεύσει καταγράφονταν οι τιμές του συντελεστή ελαστικότητας (G'), του συντελεστή ιξώδους (G''), της θερμοκρασίας και του pH.

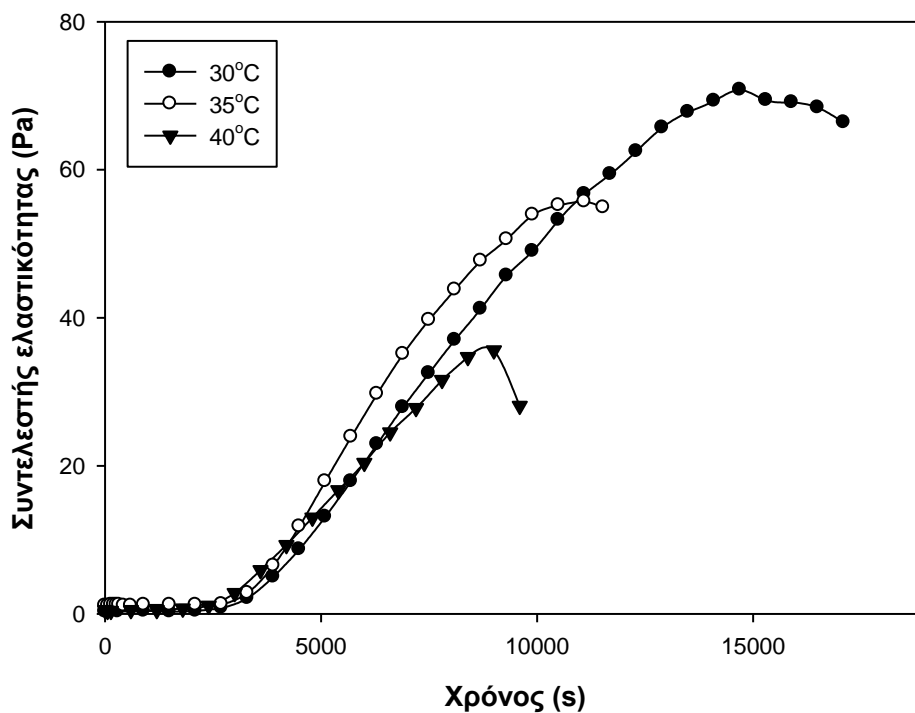
4. 5. Στατιστικός έλεγχος

Στα στοιχεία του πειράματος εφαρμόστηκε η ανάλυση της διακύμανσης δύο επιλέξιμων παραγόντων (Two-Way ANOVA): Θερμοκρασίας επώασης (3 επίπεδα: 30°C, 35°C, 40°C) και λιποπεριεκτικότητα γάλακτος (3 επίπεδα; 0%, 1,5%, 3,5%). Σε περίπτωση που τα αποτελέσματα της ANOVA εμφάνισαν στατιστική σημαντικότητα του μελετώμενου παράγοντα, εφαρμόστηκε ο έλεγχος των πολλαπλών συγκρίσεων του Tukey ώστε να εντοπιστούν αυτές οι διαφορές (Πετρίδης, 2000). Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων έγινε με τη χρήση του προγράμματος Minitab 14.

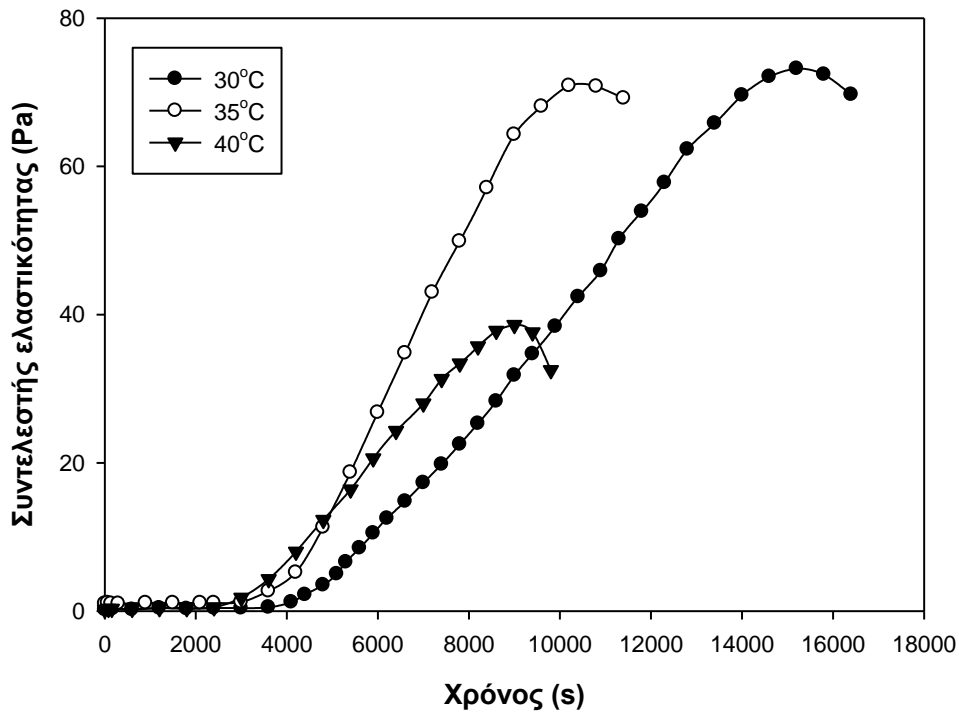
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1. Μελέτη των ιξωδοελαστικών παραμέτρων κατά το σχηματισμό της πηκτής

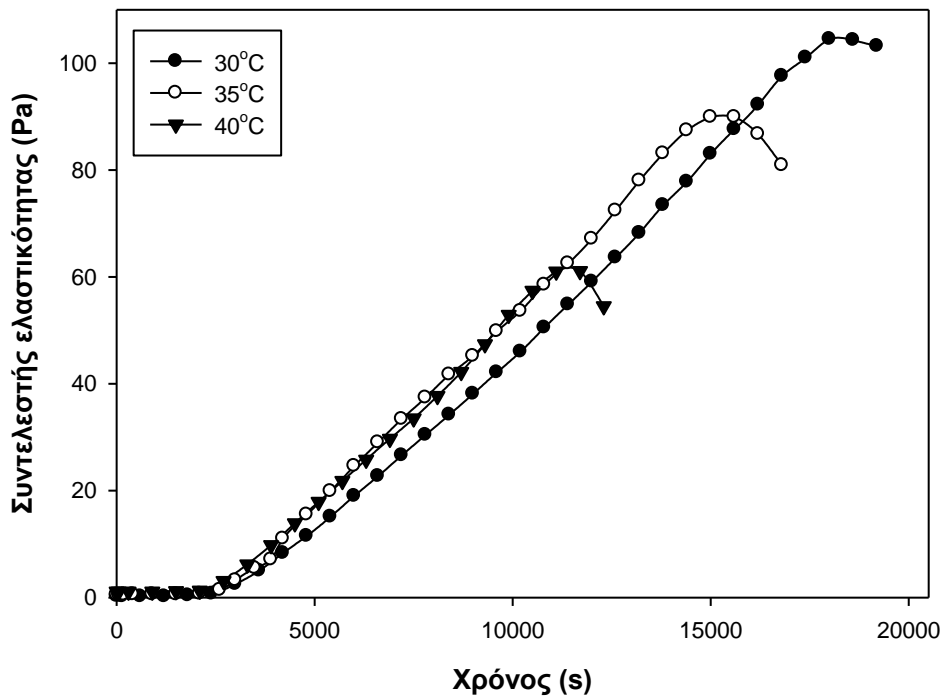
Στα Σχήματα 5.1-5.6 φαίνεται η μεταβολή του G' σε συνάρτηση με το χρόνο πήξης κατά τη διάρκεια σχηματισμού της πηκτής των δειγμάτων. Όπως παρατηρείται τόσο η θερμοκρασία πήξης όσο και η λιποπεριεκτικότητα του γάλακτος επηρεάζουν τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες της πηκτής. Από τις καμπύλες G' -χρόνου πήξης υπολογίστηκαν οι εξής παράμετροι: ο χρόνος που απαιτείται για την έναρξη ανόδου του G' , η μέγιστη τιμή του G' και ο χρόνος στην μέγιστη τιμή G' . Οι τιμές των παραμέτρων φαίνονται στον Πίνακα 5.1.



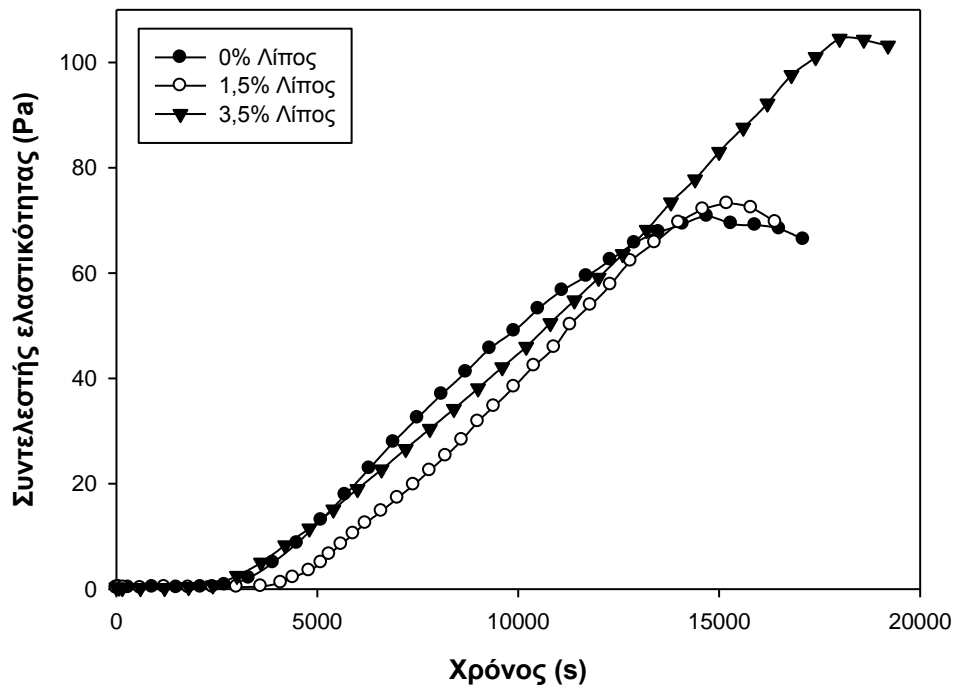
Σχήμα 5.1. Μεταβολή του συντελεστή ελαστικότητας σε σχέση με το χρόνο πήξης για τα δείγματα γάλακτος 0% λιποπεριεκτικότητας, τα οποία επώαστηκαν σε διαφορετικές θερμοκρασίες (30°C, 35°C και 40°C).



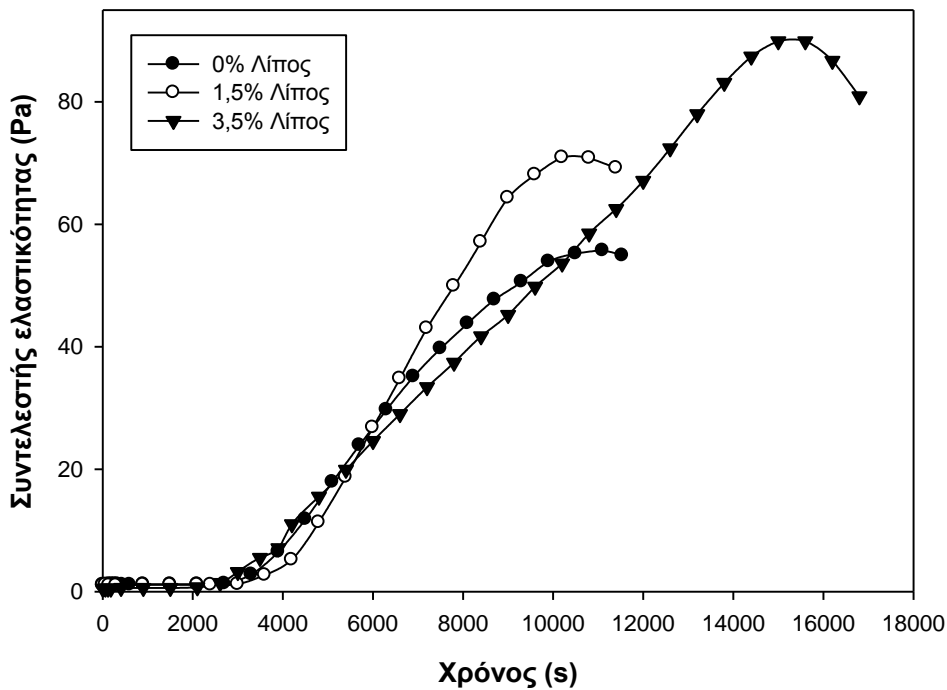
Σχήμα 5.2. Μεταβολή του συντελεστή ελαστικότητας σε σχέση με το χρόνο πήξης για τα δείγματα γάλακτος 1,5% λιποπεριεκτικότητας, τα οποία επωάστηκαν σε διαφορετικές θερμοκρασίες (30°C, 35°C και 40°C).



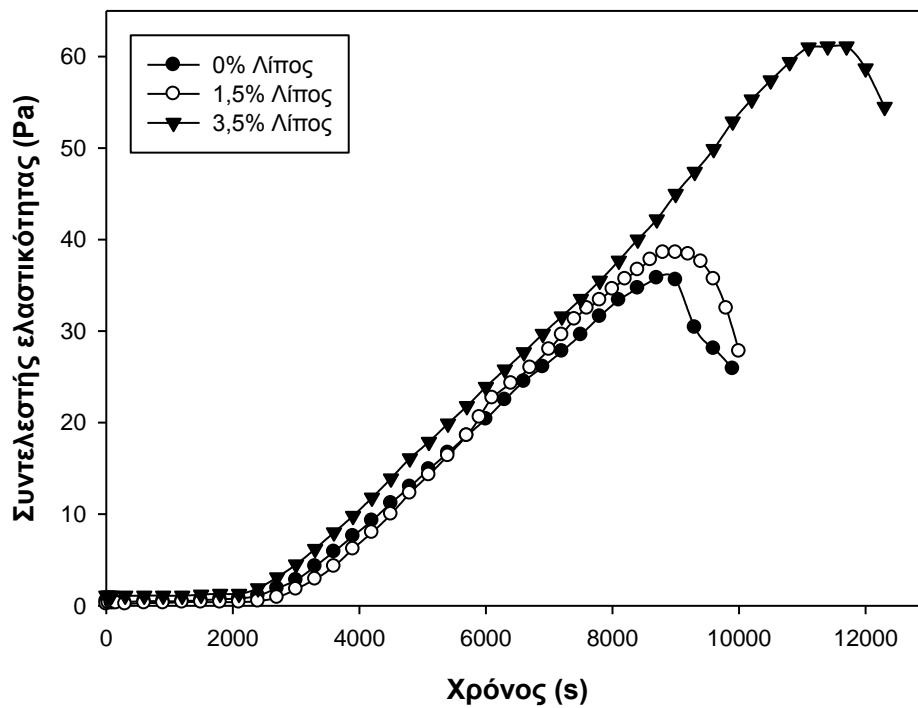
Σχήμα 5.3. Μεταβολή του συντελεστή ελαστικότητας σε σχέση με το χρόνο πήξης για τα δείγματα γάλακτος 3,5% λιποπεριεκτικότητας, τα οποία επωάστηκαν σε διαφορετικές θερμοκρασίες (30°C, 35°C και 40°C).



Σχήμα 5.4. Μεταβολή του συντελεστή ελαστικότητας σε σχέση με το χρόνο πήξης των δειγμάτων που επώαστηκαν στους 30°C και παρασκευάστηκαν με γάλα διαφορετικής λιποπεριεκτικότητας (0%, 1,5% και 3,5%).



Σχήμα 5.5. Μεταβολή του συντελεστή ελαστικότητας σε σχέση με το χρόνο πήξης των δειγμάτων που επώαστηκαν στους 35°C και παρασκευάστηκαν με γάλα διαφορετικής λιποπεριεκτικότητας (0%, 1,5% και 3,5%).



Σχήμα 5.6. Μεταβολή του συντελεστή ελαστικότητας σε σχέση με το χρόνο πήξης των δειγμάτων που επωάστηκαν στους 40°C και παρασκευάστηκαν με γάλα διαφορετικής λιποπεριεκτικότητας (0%, 1,5% και 3,5%).

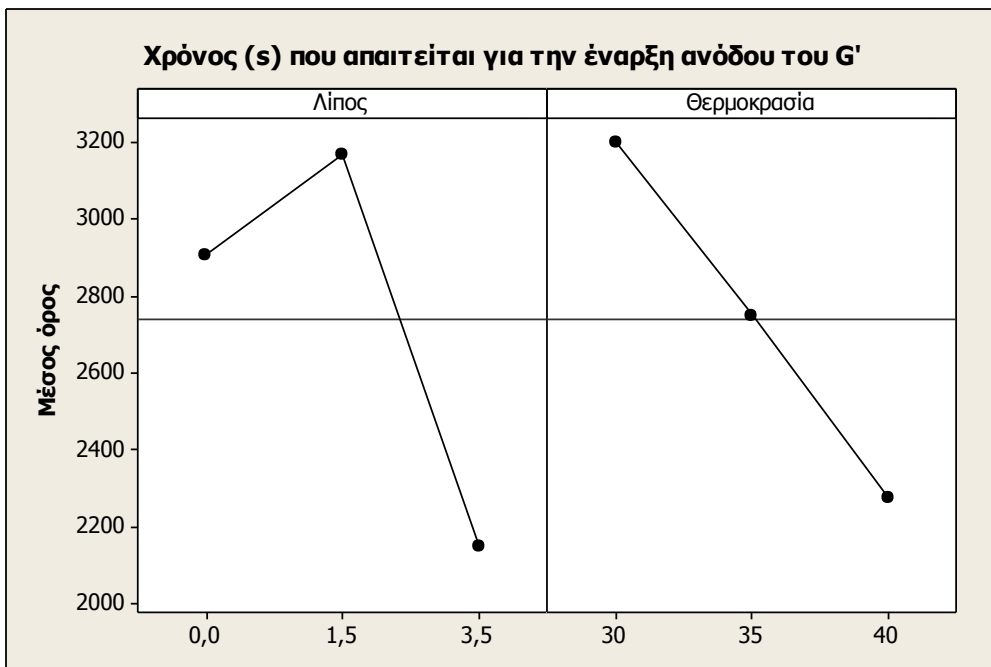
Πίνακας 5.1. Μέσοι όροι του χρόνου που απαιτείται για την έναρξη ανόδου του συντελεστή ελαστικότητας (G'), της μέγιστης τιμής του G' και του χρόνου στην μέγιστη τιμή G' .

Λίπος (%)	Θερμοκρασία πήξης (°C)	Χρόνος έναρξης ανόδου G' (s)	Μέγιστη τιμή G' (Pa)	Χρόνος στη μέγιστη τιμή G' (s)
0	30	3249	69,9	14849
0	35	2850	55,9	10900
0	40	2550	35,4	8850
1,5	30	3799	72,9	15250
1,5	35	3149	71,7	10649
1,5	40	2550	38,3	8950
3,5	30	2550	104,8	18450
3,5	35	2250	90,5	15450
3,5	40	1650	60,8	11550

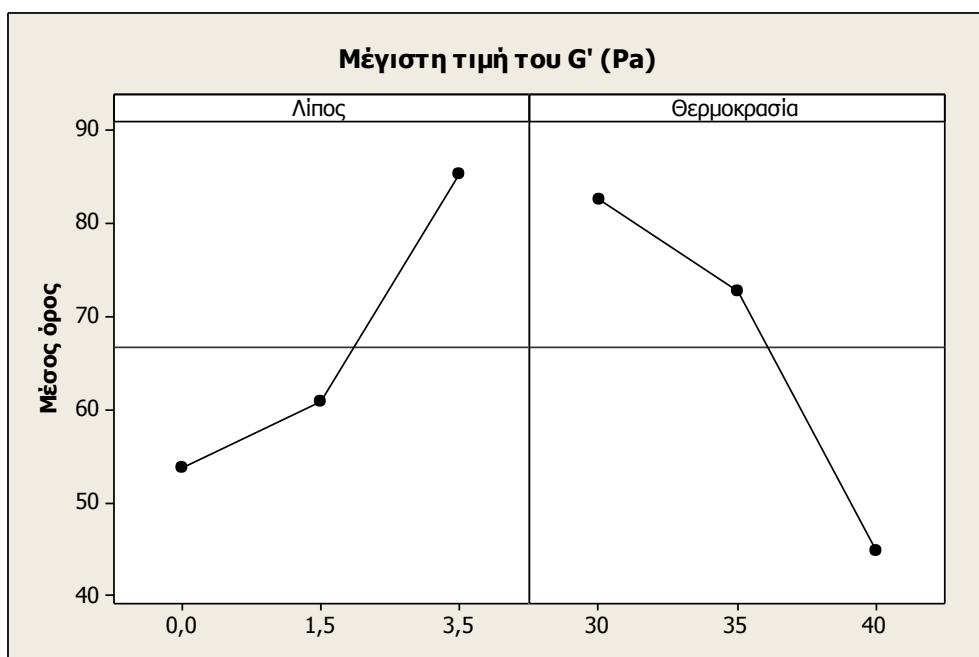
Η εφαρμογή της ANOVA έδειξε ότι ο χρόνος που απαιτείται για την έναρξη ανόδου του G' επηρεάζεται στατιστικά σημαντικά τόσο από τη θερμοκρασία πήξης ($p < 0,05$) όσο και από τη λιποπεριεκτικότητα του γάλακτος ($p < 0,05$) (Παράρτημα). Σύμφωνα με το Σχήμα 5.7 η αύξηση της θερμοκρασίας πήξης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου που απαιτείται για την έναρξη ανόδου του G'. Η κατάταξη των δειγμάτων σύμφωνα με τον έλεγχο των πολλαπλών συγκρίσεων του Tukey είναι η εξής: $40^{\circ}\text{C} < 35^{\circ}\text{C} < 30^{\circ}\text{C}$. Όσον αφορά τη λιποπεριεκτικότητα του γάλακτος, η αύξηση της προκαλεί μείωση του χρόνου που απαιτείται για την έναρξη ανόδου του G' (Σχήμα 5.7). Η κατάταξη των δειγμάτων σύμφωνα με τον έλεγχο Tukey είναι η εξής: 3,5% Λίπος < 0% Λίπος = 1,5% Λίπος.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ANOVA η μέγιστη τιμή του G' επηρεάζεται στατιστικά σημαντικά και από τους δύο παράγοντες που μελετήθηκαν (θερμοκρασία πήξης: $p < 0,05$; λιποπεριεκτικότητα γάλακτος: $p < 0,05$) (Παράρτημα). Σύμφωνα με το Σχήμα 5.8 η αύξηση της θερμοκρασίας πήξης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μέγιστης τιμής του G'. Η κατάταξη των δειγμάτων σύμφωνα με τον έλεγχο των πολλαπλών συγκρίσεων του Tukey είναι η εξής: $40^{\circ}\text{C} < 35^{\circ}\text{C} < 30^{\circ}\text{C}$. Η μέγιστη τιμή του G' επηρεάζεται και από τη λιποπεριεκτικότητα του γάλακτος. Συγκεκριμένα, αύξηση της λιποπεριεκτικότητας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέγιστης τιμής του G' (Σχήμα 5.8). Η κατάταξη των δειγμάτων σύμφωνα με τον έλεγχο Tukey είναι η εξής: 0% Λίπος < 1,5% Λίπος < 3,5% Λίπος

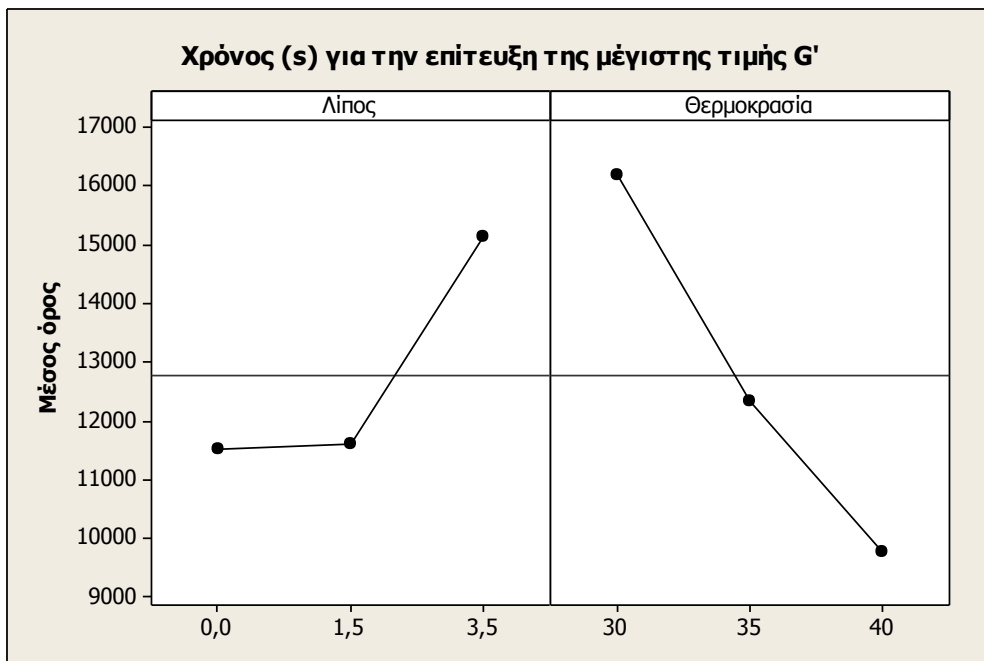
Ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη της μέγιστης τιμής G', σύμφωνα με την εφαρμογή της ANOVA, επηρεάζεται στατιστικά σημαντικά τόσο από τη θερμοκρασία πήξης ($p < 0,05$) όσο και από τη λιποπεριεκτικότητα του γάλακτος ($p < 0,05$) (Παράρτημα). Σύμφωνα με το Σχήμα 5.9 η αύξηση της θερμοκρασίας πήξης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου που απαιτείται για την επίτευξη της μέγιστης τιμής G'. Η κατάταξη των δειγμάτων σύμφωνα με τον έλεγχο των πολλαπλών συγκρίσεων του Tukey είναι η εξής: $40^{\circ}\text{C} < 35^{\circ}\text{C} < 30^{\circ}\text{C}$. Ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη της μέγιστης τιμής G' επηρεάζεται και από την λιποπεριεκτικότητα του γάλακτος. Συγκεκριμένα, αύξηση της λιποπεριεκτικότητας προκαλεί αύξηση του χρόνου για την μέγιστη τιμή G' (Σχήμα 5.9). Η κατάταξη των δειγμάτων σύμφωνα με τον έλεγχο Tukey είναι η εξής: 0% Λίπος = 1,5% Λίπος < 3,5% Λίπος.



Σχήμα 5.7. Επίδραση της θερμοκρασίας πήξης και της λιποπεριεκτικότητας του γάλακτος στον χρόνο που απαιτείται για την έναρξη ανόδου του συντελεστή ελαστικότητας (G').



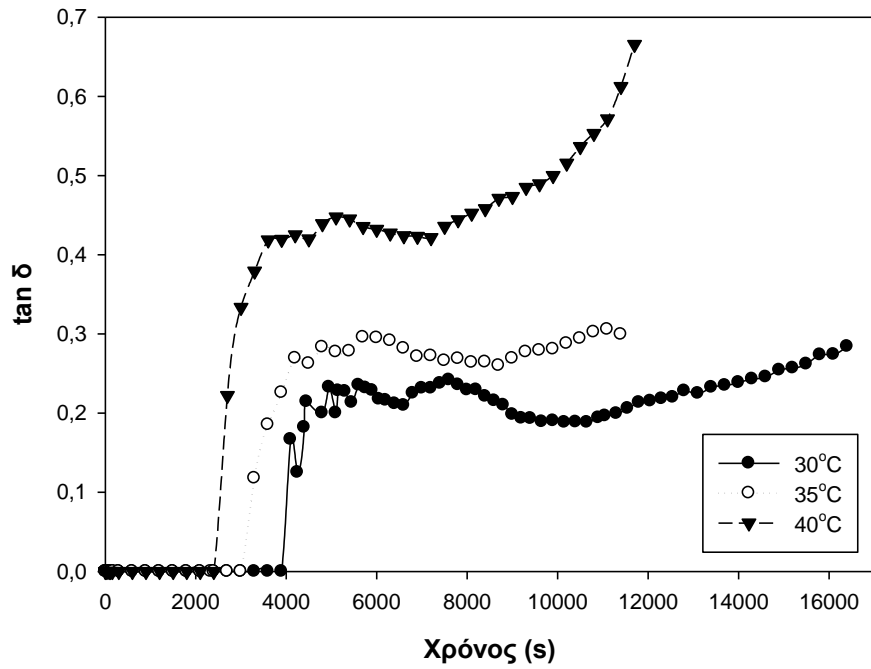
Σχήμα 5.8. Επίδραση της θερμοκρασίας πήξης και της λιποπεριεκτικότητας του γάλακτος στην μέγιστη τιμή του συντελεστή ελαστικότητας (G').



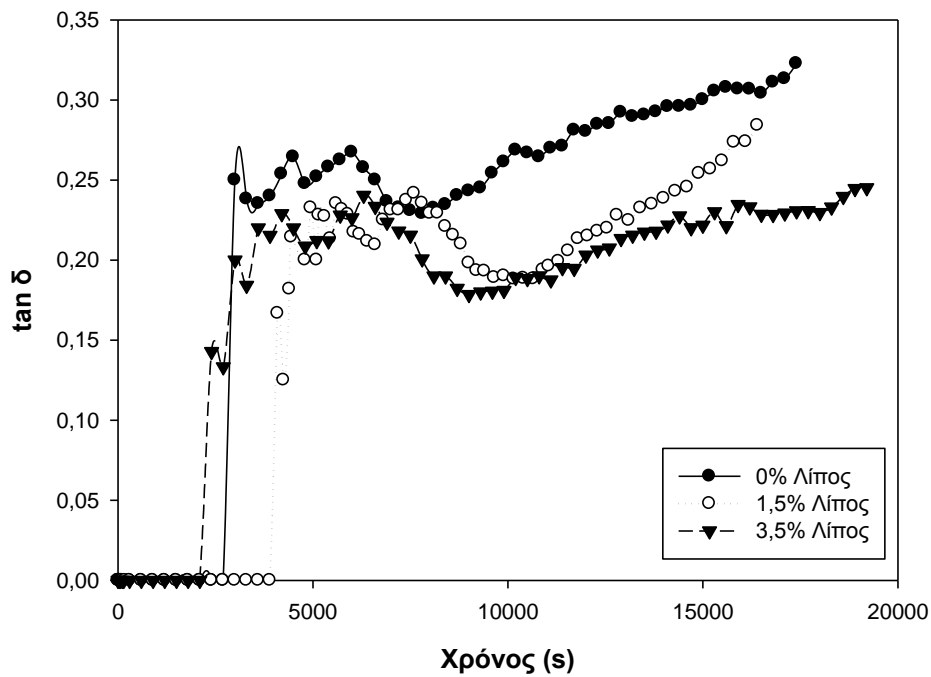
Σχήμα 5.9. Επίδραση της θερμοκρασίας πήξης και της λιποπεριεκτικότητας του γάλακτος στον χρόνο που απαιτείται για την επίτευξη της μέγιστης τιμής του συντελεστή ελαστικότητας (G').

Εκτός από το G' , μία επίσης σημαντική ρεολογική παράμετρος κατά τη διάρκεια σχηματισμού της πηκτής είναι η $\tan\delta$, η οποία αποτελεί μέτρο της ιξώδους συμπεριφοράς των δειγμάτων. Στα Σχήματα 5.10 και 5.11 φαίνονται δύο χαρακτηριστικά διαγράμματα μεταβολής της $\tan\delta$ σε σχέση με το χρόνο πήξης σε δείγμα γάλακτος λιποπεριεκτικότητας 1,5%, το οποίο επωάστηκε σε διαφορετικές θερμοκρασίες (30°C, 35°C και 40°C) και σε δείγμα που επωάστηκε στους 30°C και παρασκευάστηκε με γάλα διαφορετικής λιποπεριεκτικότητας (0%, 1,5% και 3,5%), αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τα Σχήματα 5.10 και 5.11, τα δείγματα που παρουσίασαν μειωμένους χρόνους έναρξης του G' , αυξημένες μέγιστες τιμές του G' και αυξημένους χρόνους για την επίτευξη της μέγιστης τιμής G' εμφάνισαν και μειωμένες τιμές $\tan\delta$. Συγκεκριμένα, τα δείγματα που επωάστηκαν σε χαμηλές θερμοκρασίες και παρασκευάστηκαν με μειωμένη λιποπεριεκτικότητα παρουσίασαν αυξημένες τιμές της $\tan\delta$, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι τα δείγματα είχαν περισσότερο ιξώδη παρά ελαστικό χαρακτήρα.

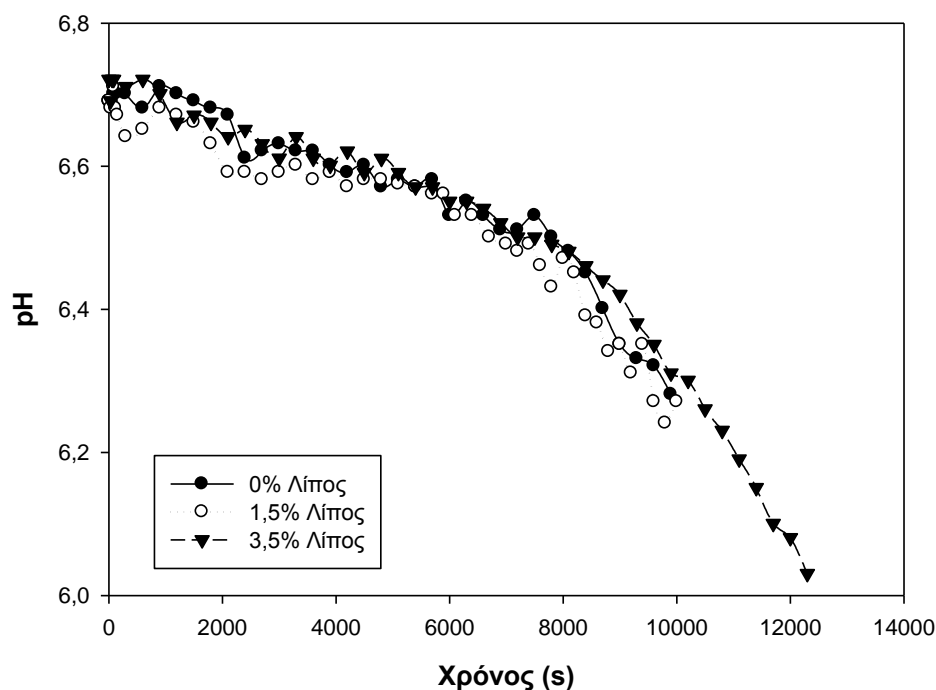


Σχήμα 5.10. Μεταβολή της $\tan \delta$ σε σχέση με το χρόνο πήξης για τα δείγματα γάλακτος 1,5% λιποπεριεκτικότητας, τα οποία επώαστηκαν σε διαφορετικές θερμοκρασίες (30°C, 35°C και 40°C).



Σχήμα 5.11. Μεταβολή της $\tan \delta$ σε σχέση με το χρόνο πήξης των δειγμάτων που επώαστηκαν στους 30°C και παρασκευάστηκαν με γάλα διαφορετικής λιποπεριεκτικότητας (0%, 1,5% και 3,5%).

Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα μεταβολής του pH, σε σχέση με το χρόνο, των δειγμάτων που παρασκευάστηκαν με γάλα διαφορετικής λιποπεριεκτικότητας (0%, 1,5% και 3,5%) και έπηξαν στους 40°C. Ο ρυθμός μείωσης του pH δεν επηρεάστηκε από τη θερμοκρασία πήξης και τη λιποπεριεκτικότητα του γάλακτος.



Σχήμα 5.12. Μεταβολή της τιμής του pH σε σχέση με το χρόνο πήξης των δειγμάτων που επώαστηκαν στους 40°C και παρασκευάστηκαν με γάλα διαφορετικής λιποπεριεκτικότητας (0%, 1,5% και 3,5%).

5.2. Επίδραση της θερμοκρασίας πήξης στα ρεολογικά χαρακτηριστικά της πηκτής

Η επίδραση της θερμοκρασίας πήξης στις ιξωδοελαστικές παραμέτρους της πηκτής του γάλακτος κατά τη διάρκεια σχηματισμού της μπορεί να εξηγηθεί σύμφωνα με τα παρακάτω.

Η θερμοκρασία επηρεάζει κυρίως τη δεύτερη φάση πήξης του γάλακτος, τη συνένωση δηλαδή των αποσταθεροποιημένων καζεϊνικών μικκυλίων από τα ιόντα ασβεστίου και το σχηματισμό του τρισδιάστατου πρωτεϊνικού πλέγματος. Σύμφωνα με τους Fox et al. (2000) αύξηση της θερμοκρασίας από τους 18°C έως τους 40-45°C προκαλεί μείωση του χρόνου πήξης του γάλακτος. Αυτό σημαίνει ότι τα ιόντα

ασβεστίου με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώνουν τα αποσταθεροποιημένα καζεϊνικά μικκύλια με γρηγορότερο ρυθμό, άρα ο εμφανής σχηματισμός πήγματος επέρχεται γρηγορότερα με αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου που απαιτείται για την έναρξη ανόδου του G' .

Επιπλέον, η αύξηση της θερμοκρασίας πήξης έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση των υδρόφοβων δεσμών των καζεϊνών, ενώ ταυτόχρονα ευνοείται και η δέσμευση του ασβεστίου από τα καζεϊνικά μικκύλια. Και τα δύο φαινόμενα αυξάνουν τις έλξεις των πρωτεϊνικών μορίων και προκαλούν τη δημιουργία ισχυρών δεσμών (Horne, 1998), ενώ ταυτόχρονα αυξάνουν τον ρυθμό συναίρεσης του πήγματος οδηγώντας το σε γρήγορη κατάρρευση (Mellema et al., 2002). Το πήγμα που δημιουργείται από την πήξη του γάλακτος με την επίδραση πυτιάς είναι εξαιρετικά δυναμικό με αποτέλεσμα κατά τη δημιουργία του να λαμβάνει χώρα ανακατανομή της δομής του, η οποία τελικά το οδηγεί σε κατάρρευση (Lucey, 2001). Το φαινόμενο της ανακατανομής της δομής μπορεί να περιγραφεί με τα εξής στάδια: αρχικά παρατηρείται αύξηση του μεγέθους των συσσωματωμάτων των καζεϊνικών μικκυλίων και σχηματισμός συμπλεγμάτων, τα οποία στη συνέχεια μερικώς καταστρέφονται από τις συνεχείς κινήσεις και την αναδιάταξη των συσσωματωμάτων δίνοντας τη θέση τους σε νηματώδης επιμηκυνόμενες δομές (Mellema et al., 2002). Στην περίπτωση που αυξάνεται η θερμοκρασία πήξης του γάλακτος, όπως προαναφέρθηκε, ευνοείται η δημιουργία ισχυρών δεσμών, η οποία οδηγεί σε έντονη ανακατανομή της δομής με αποτέλεσμα η κατάρρευση να επέρχεται νωρίτερα. Αυτό οδήγησε τα δείγματα που επώαστηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες να καταρρεύσουν πιο γρήγορα και επομένως σε μικρότερες τιμές του G' . Οι υψηλές τιμές της $\tan \delta$ που παρουσίασαν τα δείγματα σε υψηλές θερμοκρασίες (Σχήμα 5.10) επίσης αποτελούν ένδειξη υψηλού ρυθμού ανακατανομής της δομής λόγω έντονης κινητικότητας των συσσωματωμάτων.

Εκτός από τη θερμοκρασία επώασης και η μείωση του pH των δειγμάτων εξαιτίας της προστιθέμενης καλλιέργειας συνέβαλε στη διευκόλυνση της κατάρρευσης τους. Με τη μείωση του pH αφενός μεν το κολλοειδές ασβέστιο πηγαίνει στη διαλυτή μορφή και αφετέρου μειώνονται οι απώσεις των πρωτεϊνικών μορίων. Και τα δύο φαινόμενα διευκολύνουν την ανακατανομή της δομής και επομένως τη συναίρεση του πήγματος (Mellema et al., 2002).

5.3. Επίδραση της λιποπεριεκτικότητας του γάλακτος στα ρεολογικά χαρακτηριστικά της πηκτής

Η επίδραση της λιποπεριεκτικότητας στον χρόνο που απαιτείται για την έναρξη ανόδου του G' , στην μέγιστη τιμή του G' και στον χρόνο που αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή G' μπορεί να αποδοθεί στην ομογενοποίηση του γάλακτος. Συγκεκριμένα, η ομογενοποίηση του γάλακτος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της επιφάνειας του λίπους με αποτέλεσμα να υπάρχουν επιπλέον απαιτήσεις σε μεμβράνη για την κάλυψη τους. Σε αυτήν την περίπτωση η καινούργια μεμβράνη αποτελείται κυρίως από καζεΐνες, οι οποίες συμμετέχουν στο σχηματισμό του τρισδιάστατου πρωτεϊνικού πλέγματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συμμετοχή των λιποσφαιρίων στο πρωτεϊνικό πλέγμα και την αύξηση του G' με την αύξηση της συγκέντρωσης του λίπους (Fox et., 2000).

Η συμμετοχή των λιποσφαιρίων στο πρωτεϊνικό πλέγμα μειώνει και την τάση του πήγματος για συναίρεση. Σε αυτήν την περίπτωση τα λιποσφαίρια συμπεριφέρονται όπως οι καζεΐνες παρεμποδίζοντας την ανακατανομή της δομής και επομένως μειώνουν την τάση συναίρεσης (Fox et., 2000). Οι μειωμένες τιμές της $\tan \delta$ στα δείγματα με 3,5% λιποπεριεκτικότητα (Σχήμα 5.11) αποτελούν επίσης ένδειξη μειωμένου ρυθμού ανακατανομής της δομής.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η θερμοκρασία πήξης και η λιποπεριεκτικότητα επηρεάζουν τις ιξωδοελαστικές παραμέτρους της πηκτής του γάλακτος κατά τη διάρκεια σχηματισμού της.

Η αύξηση της θερμοκρασίας πήξης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου που απαιτείται για την έναρξη ανόδου του G' , ενώ ταυτόχρονα αυξάνει τον ρυθμό συναίρεσης του πηγματος οδηγώντας το σε γρήγορη κατάρρευση και επομένως σε μικρότερες τιμές του G' .

Η αύξηση της λιποπεριεκτικότητας του γάλακτος προκαλεί μείωση του χρόνου που απαιτείται για την έναρξη ανόδου του G' , αύξηση της μέγιστης τιμής G' και αύξηση του χρόνου που απαιτείται για την επίτευξη της μέγιστης τιμής G' .

7. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Μελέτη της επίδρασης του pH, της συγκέντρωσης ιόντων ασβεστίου και του είδους της πυτιάς στα ρεολογικά χαρακτηριστικά της πηκτής του γάλακτος με την επίδραση πυτιάς κατά την πορεία σχηματισμού της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Α. Ξένη Βιβλιογραφία

- Barbosa-Canovas G.V., Kokini J.L. & Ibarz A., (1996), The rheology of semiliquid foods. *Advances in Food and Nutrition Research*, **39**, 1-69
- De Kruif, C. G., (1999). Casein micelles interactions. *Interntational Dairy Journal*, **9**, pp183–188.
- Finney E.E. 1972. Elementary concepts of rheology relevant to food texture studies. *Food technology*.68-77
- Fox P. F., Guinee T. P., Cogan T. M. & McSweeney P. L.H., (1998). Fundamentals of cheese science. *Journal of Dairy Research*, **47**, 103–111.
- Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M., & McSweeney, P. L. H., (2000), *Fundamentals of cheese science*, Aspen Publishers, Gaithersburg, Maryland.
- Hammann D.D & MacDonald G.A., (1992), Rheology and texture properties of surimi and surimi-based foods. In L.C Lanier & Lee C.M. (edition). *Surimi technology*. Marcel Dekker. Inc (chapter 7)
- Horne, D. S. (1986). Steric stabilization and casein micelle stability. *J. Colloid Interface Sci.*, **111**, pp250–260.
- Horne, D. S. (1988). Casein interactions: Casting light on the black boxes, the structure in dairy products. *International Dairy Journal*, **8**, 171-177.
- Lopes da Silva J.A and Rao A.M 1999. Rheological behaviour of food gel systems. In A.M Rao (Ed). *Rheology of fluid and semifluid foods principles and applications*. Aspen Publishers Inc. 319-368.
- Lucey.J. A., (2001). The relationship between rheological parameters and whey separation in milk gels. *Food Hydrocolloids*, **15**, 603-608.
- Lucey.J. A., (2002). Formation and Physical Properties of Milk Protein Gels. American Dairy Science Association, *Journal of Dairy Science*, **85**, 281–294
- Mellema, M., LeermakersF. A. M., & De Kruif C. G. (1999). Molecular mechanism of the renneting process of casein micelles in skim milk, examined by viscosity and light-scattering experiments and simulated by model SCF calculations. *Langmuir*, **15**, 6304–6313.

- Mellema, M., Walstra, P., van Opheusden, J. H. J., & van Vliet, T. (2002). Effects of structural rearrangements on the rheology of rennet-induced casein particle gels. *Advances in Colloid and Interface Science*, **98**, 25-50.
- Mittal G.S., Sharma S.K. & Hill A.R. (2003). Effect of milk concentration, pH and temperature on aggregation kinetics and coagulation properties of milk. *Journal of Dairy Research*, **65**, 149-154.
- Nielsen S.S., (1998), Rheological principles for food analysis. (2nd edition). *Aspen Publishers*, 553-569
- Sandra S., Alexander M., & Dalgleish D.G. (2007). The rennet coagulation mechanism of skim milk as observed by transmission diffusing wave spectroscopy. *Journal of Colloid and Interface Science*, **308**, 364–373.
- Sandra S., Cooper C., Alexander M. & Corredig M. (2011). Coagulation properties of milk retentates measured using rheology and diffusing wave spectroscopy. *Food Research International*, **44**, 54-60.
- Schmidt D. G., (1982), Association of caseins and caseine micelle structure. In: *Developments in Dairy Chemistry*, pp80, P.F. Fox Edit. APPL. Sci. Publ., London, New York
- Slattery C. W., (1976), Review: Casein micelle structure. An examination of models. *Journal of Dairy Science*, **59**, pp 1547
- Steffe J.F., (1996), Rheological methods in food process engineering (2nd edition). East Lansing. MI.USA: Freeman Press
- Tabilo-Munizaga G. and Barbosa-Canovas G.V., (2005), Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*, **67**, 147-156
- Titapiccolo G. Ion , Corredig M., and Alexander M., (2010), Modification to the renneting functionality of casein micelles caused by nonionic surfactants, American Dairy Science Association, *Journal of Dairy Science*, **93**, 506–514
- Walstra. P., (1990), On the stability of casein micelles, *Journal of Dairy Science*, **73**, 1965–1979.
- Waungana A., Singh H. & Bennett R.J. (1999). Rennet coagulation properties of skim milk and effects of heat treatment and pH adjustment. *Food Research International*, **31**, 645-651.
- Xu Z.M., Raphaelidis S.N., Karapantsios T.D., Tellos E. & Bounarelis C. (2004). U-tube rheometer for the dynamic measurement of elasticity. *Journal of Food Engineering*, **85**, 590–597.

B. Ελληνική Βιβλιογραφία

- Ανυφαντάκης Ε. Μ., (2004). Ένζυμα που χρησιμοποιούνται στη τυροκομία, Τυροκομία: Χημεία, Φυτικοχημεία, Μικροβιολογία, pp 159-170, *Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε.*, Αθήνα
- Ζερφυρίδης Κ. Γ., (2001). Τεχνολογία Προϊόντων Γάλακτος-Τυροκομία, pp 74-85 δεύτερη έκδοση, *Εκδόσεις Γαχούδη*, Θεσσαλονίκη
- Μάντης Ι. Α., (2001). Υγιεινή και τεχνολογία του γάλακτος και των προϊόντων του, pp 13-19, δεύτερη έκδοση, *Εκδοτικός Οίκος Αδελφών Κυριακίδη*, Θεσσαλονίκη.
- Πετρίδης Δ. (2000). Εφαρμοσμένη στατιστική. Θεσσαλονίκη: *Εκδόσεις Όμηρος*.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

General Linear Model: time at G start versus fat; temperature

Factor	Type	Levels	Values
fat	fixed	3	0,0; 1,5; 3,5
temperature	fixed	3	30; 35; 40

Analysis of Variance for time at G start, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
fat	2	3346768	3346768	1673384	26,47	0,000
temperature	2	2563801	2563801	1281901	20,27	0,000
Error	13	821991	821991	63230		
Total	17	6732560				

S = 251,456 R-Sq = 87,79% R-Sq(adj) = 84,03%

Unusual Observations for time at G start

Obs	time at G start	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
7	4098,00	3624,00	132,53	474,00	2,22 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals

Response Variable time at G start

All Pairwise Comparisons among Levels of fat

fat = 0,0 subtracted from:

fat	Lower	Center	Upper	
1,5	-125	258,0	640,9	(-----*-----)
3,5	-1141	-758,0	-375,1	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----
-1200 -600 0 600

fat = 1,5 subtracted from:

fat	Lower	Center	Upper	
3,5	-1399	-1016	-633,1	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----
-1200 -600 0 600

Tukey Simultaneous Tests

Response Variable time at G start

All Pairwise Comparisons among Levels of fat

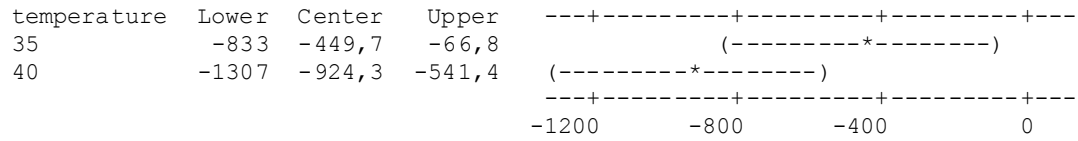
fat = 0,0 subtracted from:

fat	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
1,5	258,0	145,2	1,777	0,2155
3,5	-758,0	145,2	-5,221	0,0005

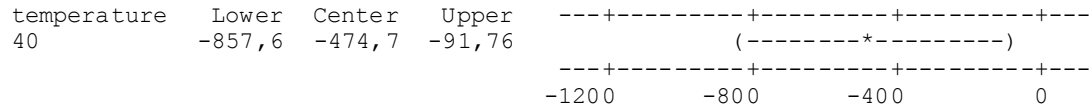
fat = 1,5 subtracted from:

fat	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
3,5	-1016	145,2	-7,000	0,0000

3,5 -1016 145,2 -6,998 0,0000
 Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals
 Response Variable time at G start
 All Pairwise Comparisons among Levels of temperature
 temperature = 30 subtracted from:



temperature = 35 subtracted from:



Tukey Simultaneous Tests
 Response Variable time at G start
 All Pairwise Comparisons among Levels of temperature
 temperature = 30 subtracted from:

temperature	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
35	-449,7	145,2	-3,097	0,0216
40	-924,3	145,2	-6,367	0,0001

temperature = 35 subtracted from:

temperature	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
40	-474,7	145,2	-3,270	0,0157

General Linear Model: G max versus Λίπος; Θερμοκρασία

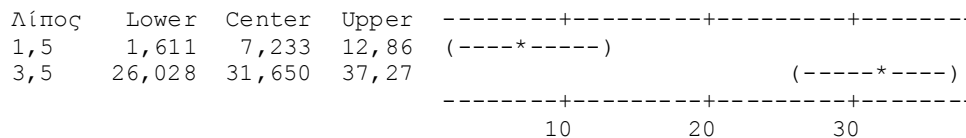
Factor	Type	Levels	Values
Λίπος	fixed	3	0,0; 1,5; 3,5
Θερμοκρασία	fixed	3	30; 35; 40

Analysis of Variance for G max, using Adjusted SS for Tests

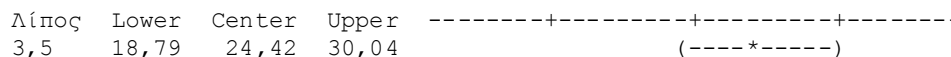
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Λίπος	2	3300,4	3300,4	1650,2	121,07	0,000
Θερμοκρασία	2	4592,2	4592,2	2296,1	168,46	0,000
Error	13	177,2	177,2	13,6		
Total	17	8069,9				

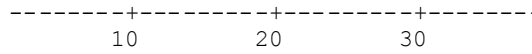
S = 3,69194 R-Sq = 97,80% R-Sq(adj) = 97,13%

Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals
 Response Variable G max
 All Pairwise Comparisons among Levels of Λίπος
 Λίπος = 0,0 subtracted from:



Λίπος = 1,5 subtracted from:





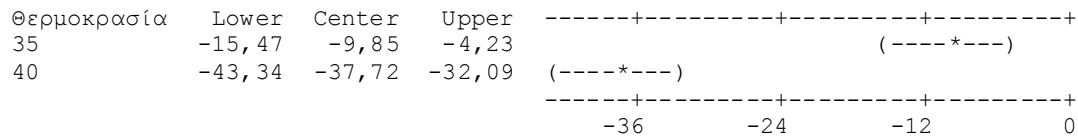
Tukey Simultaneous Tests
 Response Variable G max
 All Pairwise Comparisons among Levels of Λίπος
 Λίπος = 0,0 subtracted from:

Λίπος	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
1,5	7,233	2,132	3,393	0,0124
3,5	31,650	2,132	14,848	0,0000

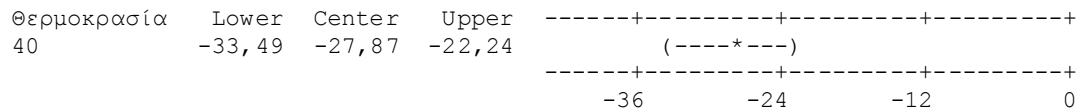
Λίπος = 1,5 subtracted from:

Λίπος	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
3,5	24,42	2,132	11,45	0,0000

Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals
 Response Variable G max
 All Pairwise Comparisons among Levels of Θερμοκρασία
 Θερμοκρασία = 30 subtracted from:



Θερμοκρασία = 35 subtracted from:



Tukey Simultaneous Tests
 Response Variable G max
 All Pairwise Comparisons among Levels of Θερμοκρασία
 Θερμοκρασία = 30 subtracted from:

Θερμοκρασία	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
35	-9,85	2,132	-4,62	0,0013
40	-37,72	2,132	-17,69	0,0000

Θερμοκρασία = 35 subtracted from:

Θερμοκρασία	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
40	-27,87	2,132	-13,07	0,0000