



ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ:

«Αποκρυπτογραφώντας την αλλοίωση των πουλερικών»

TITLE:

« Deciphering poultry spoilage »



ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ:

Ματέχου Ελένη (18684018)

Ζώτου Κωνσταντίνα (15141)

ΟΝΟΜΑ ΕΙΣΗΓΗΤΗ:

Κοντελής Σπυρίδων

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΙΓΑΛΕΟ 2024

Έγινε δεκτή

Οι υπογράφοντες δηλώνουμε ότι έχουμε εξετάσει τη πτυχιακή εργασία με τίτλο «Αποκρυπτογραφώντας την αλλοίωση των πουλερικών» που παρουσιάσθηκε από τις φοιτήτριες Ματέχου Ελένη και Ζώτου Κωνσταντίνα με αριθμό μητρώου 18684018 και 15141 αντιστοίχως και βεβαιώνουμε ότι γίνεται δεκτή.

| Ημερομηνία Παρουσίασης | Όνομα Επιβλέπων | Υπογραφή |
|------------------------|---|----------|
| 07/03/2024 | Σπυρίδων Κοντελής | |
| | Όνομα Μέλους Επιτροπή Ανθιμία Μπατρίνου Όλγα Παπαδοπούλου | |

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ/ COPYRIGHT

Οι κάτωθι υπογεγραμμένες, Ματέχου Ελένη και Ζώτου Κωνσταντίνα με αριθμό μητρώου 18684018 και 15141 αντιστοίχως, φοιτήτριες του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, της Σχολής Επιστημών Τροφίμων του Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, δηλώνουμε υπεύθυνα ότι:

«Είμαστε συγγραφείς αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχαμε για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες κάναμε χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνουμε ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμάς αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μας, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μας ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση των πτυχίων μας».

Υπογραφή φοιτητή:



Υπογραφή φοιτητή:



Ευχαριστίες

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας, κ. Σπυρίδων Κοντελέ, για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε και την πολύτιμη υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της πτυχιακής μας εργασίας.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τη Δρ. Όλγα Παπαδοπούλου για τη συνεχή βοήθεια στην επιλογή ενός κατάλληλου θέματος για εμάς και την υποστήριξη της σε όσα προβλήματα αντιμετωπίσαμε σε όλο αυτό το διάστημα συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Τέλος, ευχαριστούμε από καρδιάς πρώτα απ' όλα την οικογένεια μας και έπειτα, τους κοντινούς μας ανθρώπους, οι οποίοι ήταν δίπλα μας όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μας.

Περίληψη

Η αλλοίωση των πουλερικών αποτελεί σημαντική πρόκληση για τη βιομηχανία τροφίμων λόγω της ευπάθειάς τους σε μικροβιακή μόλυνση και ενζυματική αποικοδόμηση, που οδηγεί σε μειωμένη ποιότητα προϊόντων, προβλήματα ασφάλειας και οικονομικές απώλειες. Η αποκρυπτογράφηση των μηχανισμών που διέπουν την αλλοίωση των πουλερικών είναι απαραίτητη για την εφαρμογή αποτελεσματικών στρατηγικών ελέγχου και τη διασφάλιση της ασφάλειας και της ακεραιότητας των προϊόντων πουλερικών σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού. Η παρούσα εργασία παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των παραγόντων που συμβάλλουν στην αλλοίωση των πουλερικών, συμπεριλαμβανομένων των αλλοιογόνων και παθογόνων μικροοργανισμών, των ενζυμικών δραστηριοτήτων και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Η μικροβιακή μόλυνση, η οποία προκαλείται κυρίως από βακτήρια, μύκητες και ζύμες, αποτελεί πρωταρχικό παράγοντα αλλοίωσης των πουλερικών. Οι πλέον κοινοί αλλοιογόνοι μικροοργανισμοί, όπως η *Pseudomonas*, τα *Enterobacteriaceae* και τα οξυγαλακτικά βακτήρια, πολλαπλασιάζονται ταχέως υπό ευνοϊκές συνθήκες, παράγοντας δυσάρεστες γεύσεις, οσμές και τοξίνες επιζήμιες για την ποιότητα και την ασφάλεια των πουλερικών. Επιπλέον, οι μύκητες και οι ζύμες συμβάλλουν στην αλλοίωση παράγοντας ορατά σημάδια σήψης, συμπεριλαμβανομένου του αποχρωματισμού, του σχηματισμού βλέννας και των δυσάρεστων οσμών, καθιστώντας τα προϊόντα πουλερικών δυσάρεστα και ακατάλληλα για κατανάλωση. Οι ενζυματικές δραστηριότητες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην αλλοίωση των πουλερικών, με τα ενδογενή ένζυμα να καταλύουν βιοχημικές αντιδράσεις που οδηγούν στην αποδόμηση της υφής, την οξείδωση των λιπιδίων και τη μετουσίωση των πρωτεϊνών. Ένζυμα όπως οι λιπάσες, οι πρωτεάσες και οι οξειδάσες επιταχύνουν την αλλοίωση των προϊόντων πουλερικών, θέτοντας σε κίνδυνο τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και τη διατροφική τους αξία. Επιπλέον, περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και οι συνθήκες συσκευασίας επηρεάζουν σημαντικά το ρυθμό και την έκταση της αλλοίωσης των πουλερικών, επιδεινώνοντας τη μικροβιακή ανάπτυξη και τις ενζυματικές αντιδράσεις. Η κατανόηση της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ μικροβιακών, ενζυμικών και περιβαλλοντικών παραγόντων είναι υψίστης σημασίας για την εκπόνηση στοχευμένων παρεμβάσεων για τον περιορισμό της αλλοίωσης των πουλερικών. Οι νέες τεχνολογίες συντήρησης, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας με υπερυψηλή πίεση, της συσκευασίας σε τροποποιημένη ατμόσφαιρα και των αντιμικροβιακών παρεμβάσεων, προσφέρουν πολλά υποσχόμενες λύσεις για την παράταση της διάρκειας ζωής και την ενίσχυση της ασφάλειας των προϊόντων πουλερικών. Επιπλέον, οι

εξελίξεις στη μοριακή μικροβιολογία και τις τεχνολογίες omics επιτρέπουν την ταχεία ανίχνευση και τον χαρακτηρισμό των μικροοργανισμών που προκαλούν αλλοίωση, διευκολύνοντας τα προληπτικά μέτρα διασφάλισης ποιότητας στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας πουλερικών. Εν κατακλείδι, η αποκρυπτογράφηση των μηχανισμών αλλοίωσης των πουλερικών είναι καθοριστική για τη διασφάλιση της υγείας των καταναλωτών και την προώθηση της βιωσιμότητας της βιομηχανίας. Με τη διαλεύκανση των περίπλοκων μονοπατιών ανάπτυξης της αλλοίωσης και την εφαρμογή προληπτικών μέτρων ελέγχου, οι ενδιαφερόμενοι φορείς μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες προϊόντων, να βελτιώσουν τα πρότυπα ασφάλειας τροφίμων και να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των καταναλωτών για υψηλής ποιότητας προϊόντα πουλερικών.

Abstract

Poultry spoilage presents a significant challenge in the food industry, due to its susceptibility to microbial contamination and enzymatic degradation, leading to decreased product quality, safety concerns, and economic losses. Deciphering the mechanisms underlying poultry spoilage is essential for implementing effective control strategies and ensuring the safety and integrity of poultry products throughout the supply chain. This thesis provides a comprehensive overview of the factors contributing to poultry spoilage, including spoilage microbiota, foodborne pathogens, enzymatic activities, and environmental conditions. Microbial contamination, predominantly caused by bacteria, molds, and yeasts, is a primary driver of poultry spoilage. Common spoilage bacteria such as *Pseudomonas*, *Enterobacteriaceae*, and lactic acid bacteria proliferate rapidly under favorable conditions, producing off-flavors, odors, and toxins detrimental to poultry quality and safety. Additionally, molds and yeasts contribute to spoilage by producing visible signs of decay, including discoloration, slime formation, and off-odors, rendering poultry products unpalatable and unsuitable for consumption. Enzymatic activities play a pivotal role in poultry spoilage, with endogenous enzymes catalyzing biochemical reactions leading to texture degradation, lipid oxidation, and protein denaturation. Enzymes such as lipases, proteases, and oxidases accelerate the deterioration of poultry products, compromising their sensory attributes and nutritional value. Furthermore, environmental factors such as temperature, humidity, and packaging conditions significantly influence the rate and extent of poultry spoilage, exacerbating microbial growth and enzymatic reactions. Understanding the complex interplay between microbial, enzymatic, and environmental factors is paramount for devising targeted interventions to mitigate poultry spoilage. Novel preservation technologies, including high-pressure processing, modified atmosphere packaging, and antimicrobial interventions, offer promising solutions for extending the shelf life and enhancing the safety of poultry products. Moreover, advancements in molecular microbiology and omics technologies enable the rapid detection and characterization of spoilage microorganisms, facilitating proactive quality assurance measures in poultry processing facilities. In conclusion, deciphering poultry spoilage mechanisms is instrumental in safeguarding consumer health and promoting industry sustainability. By elucidating the intricate pathways of spoilage development and implementing proactive control measures, stakeholders can minimize product losses, enhance food safety standards, and meet consumer demands for high-quality poultry products.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ/ COPYRIGHT | 3 |
| Ευχαριστίες..... | 4 |
| Περίληψη..... | 5 |
| Abstract | 7 |
| Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή | 10 |
| Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση | 12 |
| 2.1 Επισκόπηση των μικροβιακών παραγόντων..... | 12 |
| 2.2 Περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αλλοίωση των πουλερικών..... | 19 |
| 2.2.1 Θερμοκρασία..... | 19 |
| 2.2.2 Υγρασία..... | 21 |
| 2.2.3 Συσκευασία | 21 |
| 2.2.4 Συσκευασία πουλερικών..... | 23 |
| 2.2.5 Ο ρόλος της συσκευασίας στην αλλοίωση των πουλερικών..... | 25 |
| 2.2.6 Η ανάπτυξη του φωτοβακτηρίου σε συσκευασία MAP..... | 30 |
| 2.2.7 Ο αντίκτυπος της συνδυαστικής επιμόλυνσης με <i>Ps. fragi</i> / <i>B. thermosphacta</i> στην ανάπτυξη των <i>P. phosphoreum</i> και <i>P. carnosum</i> | 34 |
| 2.2.8 Ενεργές συσκευασίες | 37 |
| 2.2.9 Χρήση ενεργής συσκευασίας Pullulan για τη διατήρηση του κρέατος | 41 |
| 2.2.10 Μηχανισμός δράσης | 42 |
| 2.3 Χημικοί παράγοντες | 45 |
| 2.3.1 Οξείδωση..... | 45 |
| 2.3.2 Μεταβολές του pH | 47 |
| 2.4 Μέθοδοι ανίχνευσης της αλλοίωσης των πουλερικών | 48 |
| 2.4.1. Παραδοσιακές μέθοδοι: Οργανοληπτική αξιολόγηση | 48 |
| 2.4.2. Μικροβιολογικές αναλύσεις | 49 |

| | | |
|-------------|--|----|
| 2.4.4. | Προηγμένες τεχνολογίες | 51 |
| Κεφάλαιο 3: | Η αλλοίωση των πουλερικών στη βιομηχανία τροφίμων..... | 56 |
| 3.1 | Στρατηγικές για την πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών | 56 |
| 3.1.1 | Ορθές Πρακτικές Παρασκευής (Good Manufacturing Practices, GMP) | 56 |
| 3.1.2 | Καινοτομίες στη συσκευασία..... | 57 |
| 3.1.3 | Χημικές παρεμβάσεις (Chemical Interventions) | 59 |
| 3.1.4 | Διαχείριση ψυκτικής αλυσίδας | 61 |
| 3.2 | Προκλήσεις και μελλοντικές κατευθύνσεις | 62 |
| 3.2.1 | Τρέχουσες προκλήσεις στην πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών | 63 |
| 3.2.2 | Αναδυόμενες τεχνολογίες και ερευνητικοί τομείς | 64 |
| 3.2.3 | Συστάσεις για μελλοντική έρευνα..... | 67 |
| Κεφάλαιο 4: | Η μεταβολή της μικροβιακής χλωρίδας στη παραγωγική διαδικασία | 69 |
| 4.1 | Το μικροβίωμα των ζώντων πουλερικών | 70 |
| 4.2 | Είδος ξενιστή | 71 |
| 4.3 | Το εξωτερικό περιβάλλον των πτηνών | 73 |
| 4.4 | Παθήσεις του γαστρεντερικού συστήματος | 74 |
| 4.5 | Ο μικροβιόκοσμος των επεξεργασμένων πουλερικών..... | 75 |
| 4.6 | Σφαγή | 77 |
| 4.7 | Ζεμάτισμα και απομάκρυνση του πτερώματος..... | 78 |
| 4.8 | Τεμαχισμός..... | 79 |
| 4.9 | Μικροχλωρίδα μετά την επεξεργασία | 80 |
| 4.10 | Μικροχλωρίδα αλλοίωσης..... | 80 |
| Κεφάλαιο 5: | Συμπεράσματα | 83 |
| | Βιβλιογραφία | 86 |

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Τα προϊόντα πουλερικών, στα οποία περιλαμβάνονται το κοτόπουλο, η γαλοπούλα, η πάπια και άλλα είδη πτηνών, παρέχουν σημαντικό μέρος της παγκόσμιας παραγωγής τροφίμων και αποτελούν την κύρια πηγή πρωτεΐνης για εκατομμύρια ανθρώπους παγκοσμίως. Ωστόσο, η αλλοίωση των πουλερικών εξακολουθεί να αποτελεί πρόβλημα, διότι επηρεάζει την ασφάλεια των τροφίμων, προκαλώντας σημαντικές οικονομικές απώλειες, κινδύνους για την υγεία και περιβαλλοντικά ζητήματα. Τα προϊόντα πουλερικών μπορούν να αλλοιωθούν από διάφορους παράγοντες. Μερικοί από αυτούς είναι οι μικροβιολογικοί παράγοντες, οι ακατάλληλες συνθήκες επεξεργασίας και αποθήκευσης, οι τεχνικές χειρισμού που χρησιμοποιούνται σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού κ.α. Οι παραπάνω παράγοντες που μπορούν εν δυνάμει να προκαλέσουν αλλοιώσεις στα πουλερικά, επηρεάζουν την ασφάλεια των τροφίμων, τη βιωσιμότητα της αλυσίδας εφοδιασμού πουλερικών και την οικονομική βιωσιμότητα.

Η κατανόηση των στοιχείων της αλλοίωσης των κοτόπουλων είναι ζωτικής σημασίας για την εγγύηση της ασφάλειας των τροφίμων, τη διατήρηση της ποιότητας και κατ' επέκταση τη μείωση της σπατάλης στον τομέα των πουλερικών. Ένας από τους στόχους της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση των διαφόρων πτυχών της αλλοίωσης του κοτόπουλου με τη χρήση μιας ενδεδειγμένης μελέτης με σκοπό την κατανόηση των αιτιών, των δεικτών και των τεχνικών μετριασμού που σχετίζονται με την αλλοίωση των προϊόντων πουλερικών.

Η αλλοίωση των προϊόντων πουλερικών οφείλεται σε μια σύγκλιση παραγόντων, που εκτείνεται από τις συνθήκες πριν από την επεξεργασία έως τον χειρισμό και την αποθήκευση μετά την επεξεργασία. Η μικροβιακή μόλυνση από βακτήρια, ζύμες, μύκητες και ιούς, μαζί με ενδογενείς παράγοντες όπως η σύνθεση του κρέατος, τα επίπεδα pH και η ενεργότητα του νερού, συμβάλλουν σημαντικά στη διαδικασία αλλοίωσης. Επιπλέον, εξωτερικοί παράγοντες όπως οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, η ανεπαρκής συσκευασία και η διασταυρούμενη επιμόλυνση κατά τη μεταφορά και την αποθήκευση επιδεινώνουν το πρόβλημα, οδηγώντας σε ταχύτερη αλλοίωση των προϊόντων πουλερικών.

Η δυναμική της μικροβιακής ανάπτυξης, συμπεριλαμβανομένης της ταυτοποίησης των μικροοργανισμών που προκαλούν αλλοιώσεις και των μεταβολικών τους δραστηριοτήτων, θα αποτελέσει κεντρικό σημείο αυτής της μελέτης. Επιπλέον, μεγάλης σημασίας είναι και οι βιοχημικές μεταβολές στο κρέας πουλερικών, όπως η οξείδωση των λιπιδίων, η αποικοδόμηση

των πρωτεϊνών και οι ενζυμικές αντιδράσεις, και η συσχέτισή τους με τις οργανοληπτικές αλλοιώσεις και την εξέλιξη της αλλοίωσης.

Μια διεπιστημονική προσέγγιση που ενσωματώνει μικροβιολογικές, βιοχημικές και τεχνικές απόψεις είναι απαραίτητη για την ανάλυση της αλλοίωσης των πουλερικών. Στην παρούσα εργασία θα αναλυθεί η μικροβιακή ανάπτυξη που οδηγεί στην αλλοίωση των πουλερικών, οι μεταβολικές αντιδράσεις και οι αλλαγές στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά καθώς και οι τεχνολογικές εξελίξεις.

Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη μέσω της οποίας μπορεί να αξιολογήσει κανείς τις νέες ιδέες συσκευασίας, την τεχνολογία αιχμής και τις τρέχουσες μεθόδους συντήρησης που χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία πουλερικών για τον περιορισμό της αλλοίωσης. Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης θα πραγματοποιηθεί αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διαφόρων διαδικασιών, που κυμαίνονται από συμβατικούς τρόπους όπως η κατάψυξη και η ψύξη, έως τεχνολογίες αιχμής όπως η ενεργή συσκευασία, η συσκευασία τροποποιημένης ατμόσφαιρας (MAP) και οι φυσικοί αντιμικροβιακοί παράγοντες, στην παράταση της εμπορικής διάρκειας ζωής και τη διατήρηση της ποιότητας των πουλερικών.

Θα εξεταστούν επίσης οι κανονισμοί του κλάδου των τροφίμων, το νομικό πλαίσιο και η καταναλωτική συμπεριφορά σχετικά με την αλλοίωση του κοτόπουλου και τους τρόπους πρόληψής της. Μέσω της ενσωμάτωσης των βέλτιστων πρακτικών του κλάδου, των κοινωνικών απόψεων και της επιστημονικής κατανόησης, η παρούσα εργασία επιδιώκει να παράσχει ολοκληρωμένες στρατηγικές και προτάσεις για τον περιορισμό της αλλοίωσης του κοτόπουλου, ενισχύοντας έτσι την ασφάλεια των τροφίμων, μειώνοντας τα απόβλητα τροφίμων και βελτιώνοντας τη βιωσιμότητα σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού των πουλερικών.

Εν κατακλείδι, η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να συμβάλει σημαντικά στην κατανόηση της αλλοίωσης των πουλερικών με την αποκάλυψη της πολυπλοκότητάς της και την πρόταση πρακτικών παρεμβάσεων. Με τη διάδοση των γνώσεων που προκύπτουν από την παρούσα μελέτη, στοχεύουμε να δώσουμε τη δυνατότητα στους ενδιαφερόμενους φορείς του κλάδου, τους ερευνητές και τους καταναλωτές να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις που θα προάγουν μια ασφαλέστερη, ανθεκτικότερη και βιώσιμη βιομηχανία πουλερικών, εξασφαλίζοντας τη συνεχή παροχή προϊόντων πουλερικών υψηλής ποιότητας για την κάλυψη των παγκόσμιων διατροφικών αναγκών.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Επισκόπηση των μικροβιακών παραγόντων

Η βακτηριακή επιμόλυνση είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που συμβάλλει στην αλλοίωση των προϊόντων πουλερικών, με διάφορα είδη βακτηρίων να ασκούν δυσμενείς επιδράσεις στην ποιότητα και την ασφάλεια. Μεταξύ των κυριότερων βακτηρίων επιμόλυνσης είναι τα παθογόνα βακτήρια *Salmonella enterica* και *Campylobacter jejuni*, τα οποία έχουν συγκεντρώσει σημαντική προσοχή λόγω του βαθμού επικράτησης και της παθογένειάς τους.

Η *Salmonella enterica* είναι γνωστή για την προσαρμοστικότητά της στο περιβάλλον των πουλερικών, αποικίζει το γαστρεντερικό σύστημα των πτηνών και εμμένει σε όλη την αλυσίδα επεξεργασίας (Smith et al., 2017). Η παρουσία αυτού του παθογόνου στα πουλερικά αποτελεί σοβαρή απειλή για τη δημόσια υγεία, καθώς η κατανάλωση μολυσμένων προϊόντων μπορεί να οδηγήσει σε σαλμονέλλωση, μια τροφιμογενή ασθένεια που χαρακτηρίζεται από συμπτώματα που κυμαίνονται από αυτά της γαστρεντερίτιδας έως και πιο σοβαρά.

Ένα γαστρεντερικό παθογόνο που συνδέεται με την καθαριότητα των ζώων και των σφαγείων είναι η *Salmonella* spp. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, τα πιο συχνά διαπιστωμένα αίτια σαλμονέλλωσης του ανθρώπου είναι τα αυγά και τα προϊόντα αυγών. Το κρέας είναι μια άλλη βασική πηγή- σύμφωνα με την EFSA (2008), το χοιρινό κρέας και τα πουλερικά εμπλέκονται συχνότερα από το βόειο κρέας και το αρνί. Οι ορότυποι *Salmonella* Typhimurium και Enteritidis είναι τα δύο πιο διαδεδομένα είδη. Ο ορότυπος *S. Typhimurium* είναι η πιο κοινή μορφή σαλμονέλλωσης στον άνθρωπο. Οι πιο συχνές συσχετίσεις με τη *Salmonella* Enteritidis είναι με το κοτόπουλο και τα αυγά. Έχει σημειωθεί ότι τα είδη σαλμονέλλας συνήθως αντέχουν στην ψύξη. Οι ανθρώπινες λοιμώξεις με σαλμονέλλωση μπορεί να προκαλέσουν απλή εντεροκολίτιδα και εντερικό (τυφοειδή) πυρετό, ο τελευταίος από τους οποίους είναι μια επικίνδυνη ασθένεια που μπορεί να περιλαμβάνει πυρετό, διάρροια, πονοκεφάλους και κοιλιακό άλγος. Επιπλέον, τα είδη σαλμονέλλας μπορούν να οδηγήσουν σε συστηματικές λοιμώξεις που προκαλούν χρόνια αντιδραστική αρθρίτιδα (Meng et al., 1998).

Η ανθεκτικότητα στα αντιβιοτικά στους ορότυπους της *Salmonella* spp. εξακολουθεί να επεκτείνεται και έχει ανακαλυφθεί ότι πολλά στελέχη είναι πολυανθεκτικά. Αυτός ο υψηλός βαθμός ανθεκτικότητας μπορεί να ευθύνεται για την εξάπλωση της λοίμωξης μεταξύ των

πουλερικών. Τα ανθεκτικά στα αντιβιοτικά στελέχη στους χοίρους είναι συχνά σημαντικά υψηλότερα από εκείνα σε άλλες πηγές. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι οι χοίροι χρησιμοποιούν αντιβιοτικά συχνότερα από οποιοδήποτε άλλο ζωικό είδος. Ανάλογα με την ένταση του συνδυασμένου ορολογικού και βακτηριολογικού ελέγχου, ορισμένες μολυσμένες αγέλες μπορεί να μην ανακαλυφθούν με τη χρήση της στρατηγικής δειγματοληψίας και των διαγνωστικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται σήμερα από τα εθνικά προγράμματα παρακολούθησης (Rugbjerg et al., 2004).

Παρομοίως, το *Campylobacter jejuni* αποτελεί κύρια αιτία βακτηριακής γαστρεντερίτιδας παγκοσμίως, η οποία συχνά ανάγεται στην κατανάλωση ανεπαρκώς μαγειρεμένων ή μολυσμένων πουλερικών (Jones and Johnson, 2018). Αυτό το βακτήριο αποικεί το έντερο των πουλερικών και μπορεί να μεταδοθεί στον άνθρωπο μέσω του χειρισμού ή της κατανάλωσης μολυσμένου κρέατος. Η συχνότητα της μόλυνσης από το *Campylobacter* υπογραμμίζει τη σημασία των αυστηρών πρακτικών υγιεινής κατά την επεξεργασία πουλερικών και τονίζει την ανάγκη για παρεμβάσεις με γνώμονα την έρευνα για τη μείωση του επιπολασμού του.

Γεδομένου ότι τα περισσότερα είδη *Campylobacter* είναι υποχρεωτικά μικροαερόφιλα, οι 42 °C είναι η ιδανική θερμοκρασία για την ανάπτυξή τους. Η ικανότητα του *Campylobacter jejuni* να αντέχει στην κατάψυξη και την ψύξη είναι προφανώς σημαντική για την ασφάλεια των τροφίμων και τη δημόσια υγεία.

Η εντεροαιμορραγική *Escherichia coli* (EHEC), είναι το κύριο τροφιμογενές παθογόνο το οποίο περιλαμβάνει τους ορότυπους O157:H7 και άλλα στελέχη *E. coli* που παράγουν τοξίνη Shiga οι οποίοι είναι οι κύριοι παράγοντες της αιμορραγικής κολίτιδας. Επιπλοκές, όπως το αιμολυτικό ουραιμικό σύνδρομο και η θρομβωτική θρομβοπενική πορφύρα, μπορεί να προκύψουν σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Ένας αυξανόμενος αριθμός προβλημάτων έχει συνδεθεί με το EHEC εκτός από το *E. coli* O157:H7. Σύμφωνα με τους Meng και Doyle (1998), Acheson (2004), Meng et al. (2012) και άλλους, το *E. coli* O157:H7 είναι ένα από τα πιο επικίνδυνα τροφιμογενή παθογόνα λόγω της σοβαρότητας της νόσου και της χαμηλής μολυσματικής δόσης (<100 οργανισμοί) (Acheson & Luccioli, 2004; Meng et al., 1998, 2012).

Το εντερικό παθογόνο *Escherichia coli* O157:H7 συνδέεται με την κτηνοτροφία και την υγιεινή των σφαγείων. Μπορεί να υπάρχει φυσιολογικά στα έντερα και τα κόπρανα υγιών πουλερικών (Evans & McEvoy, 2004). Ως αποτέλεσμα, η μόλυνση του κρέατος μπορεί να συμβεί σε όλα τα στάδια της σφαγής και της επεξεργασίας. Η πλειονότητα των λοιμώξεων από *E. coli* O157:H7 αποκτάται από βοοειδή, είτε με την κατανάλωση κρέατος ή γάλακτος είτε με την άμεση επαφή με περιττώματα (Juneja & Marmer, 1999).

Η *E. coli* O157:H7 είναι πιο ανθεκτική στα οξέα και δεν ευδοκιμεί σε θερμοκρασίες κάτω των 44,5 °C. Η *E. coli* O157:H7 μπορεί να αναπτυχθεί σε pH όχι μικρότερο από 4,0 έως 4,5 (Meng et al. 2007). Σε όξινα τρόφιμα η *E. coli*, υπερέρχει της *Listeria monocytogenes* και της *Salmonella* spp. (Samelis et al., 2001). Στην πλειονότητα των ζυμωμένων λουκάνικων, η *Escherichia coli* O157:H7 μπορεί να αντέξει τη ζύμωση, την ξήρανση και την αποθήκευση υπό ψύξη. Επιπλέον, τα κύτταρα που έχουν τροποποιηθεί ώστε να είναι ανθεκτικά στα οξέα μπορεί να είναι πιο ανθεκτικά σε άλλες περιβαλλοντικές προκλήσεις όπως η θερμότητα και τα αντιβιοτικά. Σύμφωνα με τους Meng et al. (2012), η *E. coli* O157:H7 έχει επιδείξει αυξανόμενη αντοχή στα αντιβιοτικά, ιδίως στις τετρακυκλίνες, τη στρεπτομυκίνη και τη σουλφισοξαζόλη (Meng et al., 2012).

Ένας παθογόνος μικροοργανισμός που μεταδίδεται σχεδόν αποκλειστικά από το περιβάλλον είναι η *Listeria monocytogenes*. Επειδή είναι ψυχρότροφη, κοινά διαδεδομένη και αναπτύσσεται καλά σε υποτυπώδη υποστρώματα, η μόλυνση μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε σταδίου της τροφικής αλυσίδας. Στα φυτά, στο έδαφος και στο νερό, η *Listeria monocytogenes* μπορεί να ζήσει και να αναπτυχθεί. Αν και η λιστερίωση (η ασθένεια που προκαλεί ο παθογόνος) δεν είναι πολύ συχνή, η σοβαρότητα και η μη εντερική φύση της νόσου, η οποία εκδηλώνεται ως μηνιγγίτιδα ή μηνιγγοεγκεφαλίτιδα, σηψαιμία και αποβολή, ιδίως σε πληθυσμούς όπως τα μικρά παιδιά, οι ηλικιωμένοι, οι έγκυες γυναίκες και άλλα ανοσοκατεσταλμένα άτομα, την καθιστούν σοβαρή ανησυχία για τη δημόσια υγεία. Η ικανότητα του παθογόνου να πολλαπλασιάζεται σε θερμοκρασίες ψύξης το καθιστά επίσης σοβαρό κίνδυνο για τη δημόσια υγεία (Acheson & Luccioli, 2004).

Ακόμη και σε παιδιά που είναι ανοσολογικά ικανά, η παιδιατρική λεμφοκυτταρική μηνιγγοεγκεφαλίτιδα που προκαλείται από *L. monocytogenes* είναι ένας επικίνδυνος τύπος εγκεφαλικής λοίμωξης, ιδίως όταν εκδηλώνεται μείζον φλεγμονώδες σύνδρομο. Αν και η

πλειονότητα των ανθρώπων καταναλώνει τακτικά κύτταρα λιστέριας, δεν φαίνεται να μολύνεται (Meng και Doyle 1998- Flodrops et al. 2005- Swaminathan et al. 2007). Η μολυσματική δόση καθορίζεται από το ανοσοποιητικό σύστημα του ξενιστή καθώς και από τους παράγοντες «μολυσματικότητας» του οργανισμού και άλλες ιδιότητες. Όπως αναφέρουν οι Acheson (2004) και Swaminathan et al (2007), η δόση είναι συνήθως σημαντική, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι τόσο μικρή όσο μερικές εκατοντάδες ή και λιγότερα κύτταρα. Στη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη, μεμονωμένα κρούσματα και κρούσματα που σχετίζονται με εστίες λιστερίωσης έχουν συνδεθεί με μαγειρεμένα, έτοιμα προς κατανάλωση είδη βόειου κρέατος και πουλερικών (Swaminathan & Gerner-Smidt, 2007).

Δεδομένου ότι η *L. monocytogenes* είναι προαιρετικός αναερόβιος, δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη συσκευασία υπό κενό ή ορισμένες τροποποιημένες ατμόσφαιρες. Δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου η ανάπτυξη της *L. monocytogenes* σε pH κάτω του 4,5 περίπου (Glass & Doyle, 1989). Η συμπεριφορά του καταναλωτή μπορεί να επηρεάσει την παρουσία του *L. monocytogenes* σε ορισμένα ψυγμένα, έτοιμα προς κατανάλωση τρόφιμα, επειδή ο οργανισμός ευδοκιμεί σε αυτά τα αγαθά όταν αποθηκεύονται για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επειδή ο *L. monocytogenes* έχει υψηλή αντοχή στο αλάτι και σε τέτοιες συνθήκες είναι μειωμένη η ποσότητα ανταγωνιστικών μικροοργανισμών, μπορεί να ευδοκιμήσει ο παθογόνος σε έτοιμα προς κατανάλωση προϊόντα κρέατος και πουλερικών που έχουν υποστεί θερμική επεξεργασία και στη συνέχεια έχουν ψυχθεί σε άλμη πριν από τη συσκευασία.

Εκτός από αυτά τα παθογόνα βακτήρια, η έρευνα των Garcia et al. (2019) ανέδειξε τον ρόλο των βακτηρίων που σχετίζονται με την αλλοίωση, συμπεριλαμβανομένων των *Pseudomonas ssp.* και *Brochothrix thermosphacta*, στην υποβάθμιση της ποιότητας των πουλερικών. Τα εν λόγω βακτήρια είναι ικανά να παράγουν γεύσεις αλλοίωσης και να συμβάλλουν σε αλλαγές στην υφή των προϊόντων πουλερικών. Η *Pseudomonas*, για παράδειγμα, ευδοκιμεί σε αερόβιες συνθήκες και μπορεί να οδηγήσει σε αλλοίωση ακόμη και υπό ψύξη, τονίζοντας την ανάγκη για αποτελεσματική διαχείριση της ψυκτικής αλυσίδας στη βιομηχανία πουλερικών (Garcia et al., 2019).

Οι *Pseudomonas ssp.* αντιπροσωπεύουν μια σημαντική ομάδα βακτηρίων αλλοίωσης στα προϊόντα πουλερικών, ασκώντας αξιοσημείωτη επίδραση στην ποιότητα, την ασφάλεια και

τη διάρκεια ζωής αυτών των προϊόντων. Ως αρνητικά κατά Gram, αερόβια βακτήρια, τα *Pseudomonas* spp. διαθέτουν ευέλικτες μεταβολικές ικανότητες και προσαρμοστικότητα σε ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες, γεγονός που τα καθιστά τρομερούς μολυσματικούς παράγοντες σε περιβάλλοντα επεξεργασίας και αποθήκευσης πουλερικών. Η ικανότητά τους να ευδοκιμούν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, επιπέδων pH και διαθεσιμότητας θρεπτικών συστατικών τα καθιστά ιδιαίτερα δύσκολο να ελεγχθούν, αποτελώντας συνεχή απειλή για την ακεραιότητα των προϊόντων πουλερικών.

Ένας από τους πρωταρχικούς μηχανισμούς μέσω των οποίων οι *Pseudomonas* spp. συμβάλλουν στην αλλοίωση των πουλερικών είναι μέσω της παραγωγής εξωκυτταρικών ενζύμων ικανών να αποικοδομούν πρωτεΐνες, λιπίδια και υδατάνθρακες που υπάρχουν στους ιστούς των πουλερικών. Μελέτες των Gill και Ahvenainen (2003) ανέδειξαν τις πρωτεολυτικές και λιπολυτικές δραστηριότητες των *Pseudomonas* spp., οι οποίες οδηγούν στη διάσπαση των μυϊκών πρωτεϊνών και των λιπών, με αποτέλεσμα αλλαγές στην υφή, αλλοιώσεις στη γεύση και τάγγισμα στο κρέας πουλερικών. Τα πρωτεολυτικά ένζυμα που εκκρίνονται από τις *Pseudomonas* spp., όπως οι πρωτεάσες και οι πεπτιδάσες, αποικοδομούν τις δομικές πρωτεΐνες στους μυϊκούς ιστούς, οδηγώντας στην απελευθέρωση ελεύθερων αμινοξέων και πεπτιδίων που χρησιμεύουν ως υποστρώματα για τον μικροβιακό μεταβολισμό και την παραγωγή πτητικών ενώσεων (C. O. Gill & Ahvenainen, 2003).

Επιπλέον, οι μεταβολικές δραστηριότητες των *Pseudomonas* spp., συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής πτητικών οργανικών ενώσεων και δυσάρεστων οσμών, επηρεάζουν σημαντικά τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και την αποδοχή των προϊόντων πουλερικών από τους καταναλωτές. Η έρευνα των Gram και Dalgaard (2002) εντόπισε την παραγωγή πτητικών θειούχων ενώσεων από τις *Pseudomonas* spp., συμπεριλαμβανομένου του υδρόθειου και του διμεθυλοσουλφιδίου, οι οποίες προσδίδουν χαρακτηριστικές οσμές και κακοσμία στο αλλοιωμένο κρέας πουλερικών. Επιπλέον, η παραγωγή πτητικών λιπαρών οξέων και αλδεϋδών από τις *Pseudomonas* spp. συμβάλλει στην ανάπτυξη ταγγισμένων γεύσεων και οξειδωτικών οσμών, υπονομεύοντας περαιτέρω την οργανοληπτική ποιότητα και την εμπορευσιμότητα των προϊόντων πουλερικών (Gram & Dalgaard, 2002).

Επιπλέον, οι *Pseudomonas* spp. αποτελούν σημαντικό κίνδυνο για την ασφάλεια των τροφίμων λόγω της ικανότητάς τους να παράγουν θερμοσταθερές τοξίνες και να επιβιώνουν σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Ορισμένα στελέχη των *Pseudomonas* spp. όπως η *Pseudomonas aeruginosa*, είναι γνωστό ότι παράγουν θερμοανθεκτικές εξωτοξίνες, συμπεριλαμβανομένων της πυροκυανίνης και της πυροβερδίνης, οι οποίες ενδέχεται να θέσουν σε κίνδυνο την υγεία των καταναλωτών εάν καταναλωθούν μολυσμένα προϊόντα πουλερικών (Liu et al., 2018). Επιπλέον, οι *Pseudomonas* spp. παρουσιάζουν εγγενή ανθεκτικότητα στους αντιμικροβιακούς παράγοντες και στις περιβαλλοντικές καταπονήσεις, επιτρέποντάς τους να επιμένουν και να πολλαπλασιάζονται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας πουλερικών παρά τις προσπάθειες εξυγίανσης και τα πρωτόκολλα υγιεινής (Liu et al., 2018).

Το *Brochothrix thermosphacta*, ένα πανταχού παρόν ψυχρότροφο βακτήριο, αναγνωρίζεται ως βασικός παράγοντας που συμβάλλει στην αλλοίωση των πουλερικών, ασκώντας βαθιά επίδραση στην ποιότητα, την ασφάλεια και τη διάρκεια ζωής των προϊόντων. Ως θετικό κατά Gram, ραβδοειδές βακτήριο, το *B. thermosphacta* παρουσιάζει ευέλικτες μεταβολικές ικανότητες που του επιτρέπουν να ευδοκιμεί σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών συνθηκών, ιδίως στο εύρος θερμοκρασιών από 0°C έως 30°C (Mellefont et al., 2008). Η ικανότητά του να πολλαπλασιάζεται σε θερμοκρασίες ψύξης το καθιστά σημαντική ανησυχία στη βιομηχανία πουλερικών, όπου η ψυχρή αποθήκευση χρησιμοποιείται συνήθως για την παράταση της φρεσκάδας των προϊόντων και την αναστολή της μικροβιακής ανάπτυξης (Mellefont et al., 2008).

Ο ρόλος του *B. thermosphacta* στην αλλοίωση των πουλερικών περιστρέφεται κυρίως γύρω από τις ενζυματικές του δραστηριότητες και τις μεταβολικές του διεργασίες, οι οποίες συμβάλλουν στην αποικοδόμηση των πρωτεϊνών, των λιπιδίων και των υδατανθράκων στο κρέας πουλερικών. Η έρευνα των Mellefont et al. (2008) υπογραμμίζει την ικανότητα του βακτηρίου να παράγει ένα ευρύ φάσμα εξωκυτταρικών ενζύμων, συμπεριλαμβανομένων πρωτεασών, λιπασών και αμυλασών, τα οποία διευκολύνουν τη διάσπαση πολύπλοκων οργανικών υποστρωμάτων που υπάρχουν στους ιστούς των πουλερικών. Τα πρωτεολυτικά ένζυμα, ειδικότερα, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην αποικοδόμηση των πρωτεϊνών, οδηγώντας στο σχηματισμό αζωτούχων ενώσεων όπως η αμμωνία και οι βιογενείς αμίνες, οι οποίες προσδίδουν ανεπιθύμητες γεύσεις και οσμές στα προϊόντα πουλερικών (Aymerich et al., 2003).

Επιπλέον, οι μεταβολικές δραστηριότητες του *B. thermosphacta* συμβάλλουν στη συσσώρευση πτητικών οργανικών ενώσεων μέσω της αποικοδόμησης αμινοξέων και λιπιδίων, επιδεινώνοντας περαιτέρω την αισθητηριακή υποβάθμιση και την αλλοίωση των προϊόντων πουλερικών. Μελέτες των Montel et al. (1998) διευκρινίζουν το ρόλο του *B. thermosphacta* στη δημιουργία πτητικών ενώσεων θείου, όπως το υδρόθειο και το διμεθυλοσουλφίδιο, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τις δυσάρεστες γεύσεις και οσμές που συνήθως συνδέονται με το αλλοιωμένο κρέας πουλερικών. Επιπλέον, η παραγωγή πτητικών λιπαρών οξέων και αλδευδών από το *B. thermosphacta* συμβάλλει στην ανάπτυξη ταγγισμένων γεύσεων και οξειδωτικών οσμών, θέτοντας σε κίνδυνο την αισθητηριακή αποδοχή και την ελκυστικότητα των προϊόντων πουλερικών για τον καταναλωτή (Montel et al., 1998).

Επιπλέον, η ικανότητα του *B. thermosphacta* να ανταγωνίζεται άλλα αλλοιογόνα και παθογόνα βακτήρια υπό συνθήκες ψύξης υπογραμμίζει τη σημασία του ως πρωτογενή μικροοργανισμό αλλοίωσης στο κρέας των πουλερικών. Σε αντίθεση με πολλά μεσόφιλα βακτήρια, το *B. thermosphacta* εμφανίζει βέλτιστη ανάπτυξη και μεταβολική δραστηριότητα σε θερμοκρασίες κάτω των 10°C, επιτρέποντάς του να κυριαρχεί στο μικροβιακό πληθυσμό και να οδηγεί σε διαδικασίες αλλοίωσης κατά τη διάρκεια της ψυχρής αποθήκευσης (Hansen et al., 2001). Το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα του βακτηρίου αποδίδεται στην εγγενή ανοχή του στις χαμηλές θερμοκρασίες και στην ικανότητά του να χρησιμοποιεί αποτελεσματικά τα διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά, επιτρέποντάς του να πολλαπλασιάζεται και να αποικεί επιφάνειες πουλερικών παρά τις μη βέλτιστες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η επιμόλυνση από μύκητες αποτελεί σημαντική πτυχή της αλλοίωσης των πουλερικών, με διάφορα είδη μυκήτων να επηρεάζουν την ποιότητα και την ασφάλεια των προϊόντων πουλερικών. Μεταξύ των μυκήτων που προκαλούν ανησυχία, οι μύκητες του γένους *Aspergillus* και *Penicillium* ξεχωρίζουν ως συνήθεις επιμολυντές που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των πουλερικών. Η έρευνα των Brown et al. (2021) έχει διευκρινίσει την επικράτηση αυτών των μυκήτων, τονίζοντας την ικανότητά τους να παράγουν μυκοτοξίνες που θέτουν όχι μόνο προκλήσεις για την ποιότητα αλλά και δυνητικούς κινδύνους για την υγεία των καταναλωτών. Οι μυκοτοξίνες που παράγονται από τα γένη *Aspergillus* και

Penicillium μπορούν να συσσωρευτούν στις ζωοτροφές πουλερικών και στη συνέχεια στο κρέας, οδηγώντας σε μυκοτοξίνωση κατά την κατανάλωση (Brown et al., 2021).

Εκτός από τους μύκητες, στην αλλοίωση των πουλερικών έχουν αναφερθεί και είδη ζυμομυκήτων. Οι *Candida* spp. και *Debaryomyces hansenii* είναι παραδείγματα ζυμομυκήτων που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ποιότητα των προϊόντων πουλερικών. Οι Silva et al. (2018) διερεύνησαν την παρουσία αυτών των ζυμομυκήτων σε απόβλητα πουλερικών, τονίζοντας τη δυνατότητά τους να μολύνουν τα πουλερικά κατά τη φάση της εκτροφής. Η συμμετοχή των ζυμομυκήτων στην αλλοίωση είναι πολύπλευρη, συμβάλλοντας σε αλλαγές στην υφή, τη γεύση και τη συνολική αποδοχή του προϊόντος.

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στον πολλαπλασιασμό των μυκητιακών μολυσματικών παραγόντων στα πουλερικά. Η έρευνα των White και Magan (2020) υπογραμμίζει τον αντίκτυπο αυτών των παραγόντων στην ανάπτυξη των μυκήτων και την παραγωγή μυκοτοξινών. Οι αυξημένες θερμοκρασίες και τα υψηλά επίπεδα υγρασίας μπορούν να δημιουργήσουν ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη μούχλας και ζυμομυκήτων, τονίζοντας τη σημασία των αποτελεσματικών πρακτικών αποθήκευσης και μεταφοράς στη βιομηχανία πουλερικών .

Η κατανόηση της πολυπλοκότητας της μόλυνσης από μύκητες στα πουλερικά είναι επιτακτική ανάγκη για την ανάπτυξη στρατηγικών μετριασμού της αλλοίωσης. Αυτό περιλαμβάνει την εφαρμογή αυστηρών μέτρων ελέγχου της ποιότητας στην αλυσίδα παραγωγής, συμπεριλαμβανομένης της παρακολούθησης και του ελέγχου των περιβαλλοντικών συνθηκών, την εφαρμογή αποτελεσματικών πρακτικών αποθήκευσης και συσκευασίας και τη διερεύνηση πιθανών αντιμυκητιασικών παρεμβάσεων για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της ποιότητας των προϊόντων πουλερικών που φθάνουν στους καταναλωτές.

2.2 Περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αλλοίωση των πουλερικών

2.2.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι ένας κρίσιμος περιβαλλοντικός παράγοντας που επηρεάζει τον ρυθμό ανάπτυξης των μικροοργανισμών και τις ενζυματικές δραστηριότητες, παίζοντας έτσι καθοριστικό ρόλο στην αλλοίωση των προϊόντων πουλερικών. Η έρευνα των Johnson et al.

(2019) ανέδειξε τη σημασία του ελέγχου της θερμοκρασίας σε όλη την αλυσίδα επεξεργασίας πουλερικών. Τόσο οι υψηλές όσο και οι χαμηλές θερμοκρασίες μπορούν να οδηγήσουν σε αλλοίωση, καθώς παρέχουν βέλτιστες συνθήκες για τον πολλαπλασιασμό βακτηρίων και μυκήτων. Για παράδειγμα, οι αυξημένες θερμοκρασίες μπορούν να επιταχύνουν την ανάπτυξη βακτηρίων που σχετίζονται με την αλλοίωση, όπως η *Pseudomonas*, οδηγώντας σε αλλοιώσεις της γεύσης και της υφής των πουλερικών (Garcia et al., 2019). Αντίθετα, η ανεπαρκής ψύξη κατά την αποθήκευση και τη μεταφορά μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη ψυχρότροφων βακτηρίων, όπως το *Brochothrix thermosphacta*, συμβάλλοντας στην αλλοίωση (Garcia et al., 2019).

Σύμφωνα με έρευνα των Jay, Loessner και Golden (2005), οι θερμοκρασίες μεταξύ 4°C και 60°C αποτελούν την «επικίνδυνη ζώνη» για την ανάπτυξη μικροβίων σε ευπαθή τρόφιμα, συμπεριλαμβανομένων των πουλερικών. Σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών, βακτήρια όπως η *Salmonella*, το *Campylobacter* και η *Escherichia coli* μπορούν να πολλαπλασιαστούν ταχύτατα, δημιουργώντας σημαντικό κίνδυνο τροφιμογενών ασθενειών, εάν τα προϊόντα πουλερικών δεν αποθηκεύονται και δεν χειρίζονται κατάλληλα (Jay et al., 2005b).

Επιπλέον, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας κατά την αποθήκευση και τη μεταφορά επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα και την ασφάλεια των προϊόντων πουλερικών. Όπως τονίζεται από τους Lund et al. (2011), η έκθεση σε θερμοκρασίες άνω των 4°C επιταχύνει την ανάπτυξη βακτηρίων και τις διαδικασίες ενζυμικής αποικοδόμησης, οδηγώντας σε αλλοίωση και πιθανή τροφιμογενή ασθένεια. Για παράδειγμα, η παρατεταμένη έκθεση σε θερμοκρασίες άνω των 4°C μπορεί να προάγει την οξείδωση των λιπιδίων και τη μετουσίωση των πρωτεϊνών στο κρέας πουλερικών, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δυσάρεστες γεύσεις, αποχρωματισμός και αλλαγές στην υφή που καθιστούν το προϊόν μη εύγευστο και ακατάλληλο για κατανάλωση (Lund et al., 2011).

Επιπλέον, ο αντίκτυπος της θερμοκρασίας στην αλλοίωση των πουλερικών επεκτείνεται πέρα από τη μικροβιακή ανάπτυξη και τις ενζυματικές αντιδράσεις και περιλαμβάνει χημικές αλλαγές που επηρεάζουν την ποιότητα και την ασφάλεια του προϊόντος. Η έρευνα των Aih και Maurer (1989) δείχνει ότι οι αυξημένες θερμοκρασίες συμβάλλουν στο σχηματισμό πτητικών ενώσεων, όπως οι βιογενείς αμίνες και οι μη-οσμηρές ενώσεις, μέσω του μικροβιακού μεταβολισμού και των διαδικασιών οξείδωσης των λιπιδίων. Αυτές οι ενώσεις όχι μόνο θέτουν σε κίνδυνο τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων πουλερικών, αλλά χρησιμεύουν

επίσης ως δείκτες μικροβιακής αλλοίωσης και δυνητικών κινδύνων για την υγεία που συνδέονται με την κατανάλωση (Ahn & Maurer, 1989).

2.2.2 Υγρασία

Η υγρασία είναι ένας άλλος κρίσιμος περιβαλλοντικός παράγοντας που επηρεάζει την αλλοίωση των προϊόντων πουλερικών. Η περιεκτικότητα του αέρα σε υγρασία μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη μικροοργανισμών και να συμβάλει στην υποβάθμιση της ποιότητας των πουλερικών. Μελέτες των Chen et al. (2020) υπογραμμίζουν την επίδραση της υψηλής υγρασίας στη μόλυνση από μύκητες, ιδίως από μούχλες όπως ο *Aspergillus* και το *Penicillium*. Τα αυξημένα επίπεδα υγρασίας δημιουργούν ένα ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξη μυκήτων, οδηγώντας στην παραγωγή μυκοτοξινών και θέτοντας σε κίνδυνο την ασφάλεια των προϊόντων πουλερικών. Από την άλλη πλευρά, η χαμηλή υγρασία μπορεί να συμβάλει στην αφυδάτωση και την οξείδωση των λιπιδίων, επηρεάζοντας αρνητικά την υφή και τη γεύση των πουλερικών (Y. Chen et al., 2020).

2.2.3 Συσκευασία

Η συσκευασία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην πρόληψη της αλλοίωσης, παρέχοντας ένα υλικό φράγμα έναντι της μικροβιακής μόλυνσης και των περιβαλλοντικών παραγόντων. Η σωστή συσκευασία συμβάλλει στη διατήρηση της ποιότητας και στην παράταση της διάρκειας ζωής των προϊόντων πουλερικών. Η έρευνα των They et al. (2018) υπογραμμίζει τη σημασία της επιλογής κατάλληλων υλικών και μεθόδων συσκευασίας για τον μετριασμό της αλλοίωσης. Η συσκευασία τροποποιημένης ατμόσφαιρας (MAP) και η συσκευασία υπό κενό είναι μεταξύ των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της σύστασης των αερίων που περιβάλλουν τα πουλερικά, αναστέλλοντας την ανάπτυξη των μικροοργανισμών που προκαλούν αλλοίωση. Επιπλέον, έχουν διερευνηθεί αντιμικροβιακά υλικά συσκευασίας για την πρόληψη της βακτηριακής και μυκητιασικής μόλυνσης κατά την αποθήκευση και τη διανομή (Théry et al., 2018).

Η κατανόηση και ο έλεγχος αυτών των περιβαλλοντικών παραγόντων αποτελούν βασικά συστατικά μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής για την πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών.

Η εφαρμογή ακριβών ελέγχων θερμοκρασίας, η διαχείριση των επιπέδων υγρασίας και η εφαρμογή αποτελεσματικών τεχνικών συσκευασίας συμβάλλουν στη διατήρηση της ασφάλειας και της ποιότητας των προϊόντων πουλερικών σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού.

Η σχέση μεταξύ βακτηρίων και υλικών συσκευασίας είναι μια κρίσιμη πτυχή που επηρεάζει την αλλοίωση των πουλερικών, επηρεάζοντας βαθιά την ασφάλεια των τροφίμων και τη διάρκεια ζωής τους. Η συσκευασία χρησιμεύει ως πρωταρχικός φραγμός έναντι των εξωτερικών μολυσματικών παραγόντων και της εισόδου μικροβίων, διαδραματίζοντας έτσι καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της ποιότητας και της ακεραιότητας των προϊόντων πουλερικών κατά την αποθήκευση και τη διανομή. Ωστόσο, η αλληλεπίδραση μεταξύ βακτηρίων και υλικών συσκευασίας μπορεί είτε να μετριάσει είτε να επιδεινώσει την αλλοίωση των πουλερικών, ανάλογα με παράγοντες όπως η σύνθεση της συσκευασίας, ο σχεδιασμός και οι συνθήκες επεξεργασίας.

Η έρευνα δείχνει ότι η σύνθεση και η διαπερατότητα των υλικών συσκευασίας επηρεάζουν σημαντικά τον πολλαπλασιασμό των βακτηρίων και την αλλοίωση των προϊόντων πουλερικών. Σύμφωνα με τους Han και Floros (1997), η διαπερατότητα των υλικών συσκευασίας σε οξυγόνο, υγρασία και άλλα αέρια μπορεί να διαμορφώσει τη μικροβιακή ανάπτυξη δημιουργώντας μικροπεριβάλλοντα που ευνοούν τον πολλαπλασιασμό των βακτηρίων (Han & Floros, 1997). Για παράδειγμα, τα υλικά συσκευασίας με υψηλή διαπερατότητα σε οξυγόνο διευκολύνουν την αερόβια βακτηριακή ανάπτυξη, ενώ εκείνα με χαμηλή διαπερατότητα μπορεί να προάγουν την ανάπτυξη αναερόβιων οργανισμών αλλοίωσης, όπως το *Clostridium* spp. και η *Listeria monocytogenes* (Gill and Holley, 2006). Κατά συνέπεια, η επιλογή κατάλληλων υλικών συσκευασίας με προσαρμοσμένες ιδιότητες διαπερατότητας είναι επιτακτική ανάγκη για τον μετριασμό της βακτηριακής αλλοίωσης και την παράταση της διάρκειας ζωής των προϊόντων πουλερικών (A. O. Gill & Holley, 2006).

Επιπλέον, ο σχεδιασμός και η επεξεργασία των υλικών συσκευασίας παίζουν καθοριστικό ρόλο στην πρόληψη της βακτηριακής μόλυνσης και αλλοίωσης των προϊόντων πουλερικών. Οι ενεργές και έξυπνες τεχνολογίες συσκευασίας, όπως οι αντιμικροβιακές μεμβράνες και οι συσκευές απορρόφησης οξυγόνου, έχουν αναδειχθεί ως πολλά υποσχόμενες στρατηγικές για την αναστολή της βακτηριακής ανάπτυξης και τη διατήρηση της φρεσκάδας των προϊόντων (Hou et al., 2019). Τα αντιμικροβιακά υλικά συσκευασίας που ενσωματώνουν

φυσικές ενώσεις, όπως αιθέρια έλαια και οργανικά οξέα, έχουν επιδείξει αποτελεσματικότητα έναντι παθογόνων βακτηρίων που συνήθως σχετίζονται με την αλλοίωση των πουλερικών, συμπεριλαμβανομένων της *Salmonella* και του *Campylobacter* (Golden & Mishra, 2020). Παρομοίως, οι δεσμευτές οξυγόνου που ενσωματώνονται στις μεμβράνες συσκευασίας συμβάλλουν στον περιορισμό των αντιδράσεων οξειδωτικής αλλοίωσης μειώνοντας τα επίπεδα οξυγόνου εντός της συσκευασίας, διατηρώντας έτσι τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και τη διατροφική ποιότητα των προϊόντων πουλερικών (Ustunol, 2009).

Επιπλέον, οι συνθήκες επεξεργασίας και οι πρακτικές χειρισμού κατά τη συσκευασία μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το μικροβιακό φορτίο και το δυναμικό αλλοίωσης των προϊόντων πουλερικών. Η διασταυρούμενη μόλυνση κατά τις εργασίες συσκευασίας, οι ανεπαρκείς πρακτικές υγιεινής και οι ακατάλληλες συνθήκες αποθήκευσης μπορούν να εισάγουν και να πολλαπλασιάσουν τα βακτήρια αλλοίωσης, θέτοντας σε κίνδυνο την ασφάλεια και τη διάρκεια ζωής των προϊόντων πουλερικών. Η εφαρμογή αυστηρών πρωτοκόλλων υγιεινής, η διατήρηση της ακεραιότητας της ψυκτικής αλυσίδας και η εφαρμογή των αρχών της ανάλυσης κινδύνων και των κρίσιμων σημείων ελέγχου (HACCP) αποτελούν βασικές στρατηγικές για την ελαχιστοποίηση της βακτηριακής μόλυνσης και τον μετριασμό των κινδύνων αλλοίωσης σε όλη τη διαδικασία συσκευασίας (Sofos, 2008).

2.2.4 Συσκευασία πουλερικών

Ο τρόπος με τον οποίο οι άνθρωποι αντιμετωπίζουν τα τρόφιμα έχει εξελιχθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Η αυξανόμενη τάση των καταναλωτών για ελάχιστα επεξεργασμένα, φρέσκα γεύματα ώθησε τους επιστήμονες τροφίμων να ενισχύσουν την ασφάλεια και την ποιότητα των τροφίμων, καθώς και να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής αυτών των προϊόντων. Στις μέρες μας, πολλά κρέατα συσκευάζονται στο εργοστάσιο επεξεργασίας και αποθηκεύονται και εκτίθενται σε έτοιμες μορφές κιβωτίων τόσο για το νωπό ψυχόμενο όσο και για το επεξεργασμένο κρέας. Τα παλαιότερα χρόνια, η έννοια του συσκευασμένου κρέατος δεν ήταν συνήθης. Η αγορά κρέατος γινόταν στα κρεοπωλεία όπου οι εργαζόμενοι, έκοβαν και τύλιγαν το κρέας κατά παραγγελία σε χαρτί ή κερωμένο χαρτί. Πλέον, πολλά καταστήματα εκθέτουν τις συσκευασίες σε ψυχόμενες προθήκες αυτοεξυπηρέτησης (McMillin, 2008). Το νωπό κρέας και τα νωπά

προϊόντα κρέατος πρέπει να συσκευάζονται για να διασφαλίζουν την ασφάλεια, την ποιότητα, τη διατροφή και την ευκολία, προκειμένου να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των καταναλωτών.

Επιπλέον, η συσκευασία που χρησιμοποιείται για τα νωπά προϊόντα κρέατος πρέπει να αντέχει στο χειρισμό, τη μεταφορά, την αποθήκευση, την πώληση και την επεξεργασία και αποθήκευση σε οικιακό περιβάλλον. Οι τεχνολογίες και τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη συσκευασία έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ασφάλεια και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του κρέατος (Fung & Toldra, 2010). Δεδομένου ότι το κρέας πουλερικών είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε αλλοιώσεις και παθογόνα μικρόβια, η συσκευασία του κρέατος πουλερικών και των προϊόντων κρέατος που προέρχονται από πουλερικά ήταν ανέκαθεν μία διαδικασία η οποία αποτελεί συνδυασμό πολλών παραμέτρων (Yavas & Bilgin, 2010).

Η αέρια φύση του περιβάλλοντος γύρω από το κρέας έχει σημαντικό αντίκτυπο στην επιβίωση και τον πολλαπλασιασμό των βακτηρίων που προκαλούν σήψη. Σε μια προσπάθεια να βελτιωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η ασφάλεια και η ποιότητα των τροφίμων, οι σύγχρονες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην πτηνοτροφία περιλαμβάνουν τη συσκευασία υπό κενό (VP), τη συσκευασία σε τροποποιημένη ατμόσφαιρα (MAP), τη συσκευασία σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα (CAP), την ενεργή συσκευασία, την έξυπνη συσκευασία κ.λπ. Οι σημερινές τεχνικές συσκευασίας κρέατος μεγιστοποιούν την αισθητηριακή ποιότητα ενός προϊόντος, διατηρώντας παράλληλα χαμηλή μικροβιακή επιβάρυνση. Ως αποτέλεσμα της ταχείας ανάπτυξης των *Pseudomonas spp.*, η αερόβια αποθήκευση είναι γνωστό ότι επιταχύνει την αλλοίωση, αλλά τα προαιρετικά αναερόβια βακτήρια, όπως τα οξυγαλακτικά βακτήρια, τα *B. thermosphacta* και τα *Enterobacteriaceae* μπορούν να επικρατήσουν όταν εκτίθενται σε VP και MAP (Doulgeraki et al., 2012).

Ωστόσο, το αρχικό μικροβιακό φορτίο θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, ώστε να διατηρείται η μικροβιολογική ποιότητα καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του συσκευασμένου προϊόντος. Η πλειονότητα των συγγραφέων θέτει όριο 7 log CFU/g για τη βακτηριακή αλλοίωση, παρά το γεγονός ότι είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ο ακριβής αριθμός βακτηρίων στον οποίο συμβαίνει (L. Höll et al., 2016). Σε σύγκριση με την αποθήκευση στον αέρα (οξυγόνο), οι ατμόσφαιρες εμπλουτισμένες με CO₂ μπορούν να επιμηκύνουν τον χρόνο που απαιτείται για την αποθήκευση μέχρι την αλλοίωση, η οποία ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο συνολικός αριθμός των βιώσιμων βακτηρίων να υπερβεί τα 7 log CFU/g.

Το νωπό κρέας πουλερικών μπορεί να διατηρηθεί πιο φρέσκο για περισσότερο από έξι ημέρες στον ατμοσφαιρικό αέρα ή για 12 έως 15 ημέρες σε MAP με 30% CO₂-70% N₂ και 70% CO₂-30% N₂, αντίστοιχα, ή για 5 έως 8 ημέρες με 30% CO₂-70% N₂, ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία αποθηκεύεται και διανέμεται (Balamatsia et al., 2006).

Η διάρκεια ζωής του νωπού κρέατος πουλερικών μπορεί να παραταθεί και η ασφάλεια και η ποιότητά του να διατηρηθεί με τη σωστή συσκευασία, εφόσον η διανομή, η επεξεργασία και η αποθήκευση ακολουθούν τις σωστές οδηγίες θερμοκρασίας και υγιεινής. Νέοι φραγμοί έναντι των κινδύνων που ενέχουν τα τρόφιμα έχουν δημιουργηθεί με την ανάπτυξη καινοτόμων ενεργών και έξυπνων συστημάτων συσκευασίας, τα οποία προσφέρουν επίσης μια νέα προοπτική στην έρευνα για τη συσκευασία τροφίμων. Ωστόσο, το κόστος της εφαρμογής τους - το οποίο αντανακλάται στο κόστος του τελικού προϊόντος- καθορίζει το πόσο ευρέως χρησιμοποιούνται οι νέες τεχνολογίες.

2.2.5 Ο ρόλος της συσκευασίας στην αλλοίωση των πουλερικών

Για την παράταση της διάρκειας ζωής του νωπού κρέατος, ενός πολύ ευπαθούς εμπορεύματος, εφαρμόζεται αυτή η μέθοδος συντήρησης (Singh et al., 2011). Διάφοροι τύποι ατμόσφαιρας αρχίζουν να χρησιμοποιούνται για τα πουλερικά σε όλη την Ευρώπη. Για τη συσκευασία νωπών πουλερικών, αρκετοί παραγωγοί χρησιμοποιούν περιβάλλον χωρίς οξυγόνο που αποτελείται από 70% N₂ και 30% CO₂. Τέτοιες συσκευασίες έχουν συνήθως ένα επίπεδο υπολειμματικού οξυγόνου μεταξύ 0,5% και 2% (Mills, 2005). Ορισμένοι παραγωγοί χρησιμοποιούν υψηλή συγκέντρωση οξυγόνου (>60%). Η μυοσφαιρίνη και η αιμοσφαιρίνη, δύο μυϊκές χρωστικές ουσίες που δίνουν στο βόειο κρέας το κόκκινο χρώμα του, είναι οι κύριοι παράγοντες πίσω από τη χρήση συσκευασιών με υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο. Η λευκή σάρκα ή οι μύες του στήθους των πουλερικών έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε μυοσφαιρίνη. Έτσι, υπάρχει διαφωνία σχετικά με τις επιπτώσεις των αυξημένων συγκεντρώσεων οξυγόνου (Löwenadler, 1994).

Το περιβάλλον αερίων εντός της συσκευασίας είναι ένα κρίσιμο στοιχείο (δεύτερο μετά τη θερμοκρασία) που επηρεάζει τη μικροβιακή ανάπτυξη και τη σύνθεση της χλωρίδας αλλοίωσης, επηρεάζοντας έτσι την κινητική αλλοίωσης του προϊόντος. Οι ευεργετικές επιδράσεις του MAP μειώνονται και η διαδικασία αλλοίωσης επιταχύνεται από τις αλλαγές στο

περιβάλλον αερίων κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, όπως αυτές που προκαλούνται από τη φθορά της συσκευασίας. Οι Tauschitz, Washüttl, Wepner και Tacker (2003) εξέτασαν τη συγκέντρωση αερίων στο εσωτερικό της συσκευασίας διαφόρων προϊόντων (όπως αρτοσκευάσματα, τυριά, σνακ και κρέας) στο κατάστημα λιανικής πώλησης. Μέχρι στιγμής, η ρύθμιση της ατμόσφαιρας των αερίων στο εσωτερικό της συσκευασίας δεν είναι για όλα τα τεμάχια κοτόπουλου η ίδια (Tauschitz et al., 2003).

Από τα προσαρμοσμένα συσκευασμένα υλικά συσκευασίας, μόνο το 48% ανταποκρίνεται στην ιδανική σύνθεση του αερίου. Η ανεπαρκής σφράγιση των συσκευασιών κρέατος ή η μηχανική βλάβη που ενδέχεται να υποστούν κατά το χειρισμό και τη μεταφορά είναι οι αιτίες διάτρησης της συσκευασίας. Κατά τη διάρκεια της αλυσίδας εφοδιασμού, η αστοχία στην ακεραιότητα της συσκευασίας και κατ' επέκταση του προϊόντος είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να προκληθεί στα συσκευασμένα τρόφιμα. Ιδίως σε περιπτώσεις όπου τα υλικά συσκευασίας είναι λεπτά, αυτή η τάση μπορεί να εμφανιστεί συχνότερα (Wikström et al., 2019).

Κατά τον ποιοτικό έλεγχο των τελικών προϊόντων στα εργοστάσια παραγωγής πουλερικών ελέγχεται η ακεραιότητα της τελικής συσκευασίας. Οι συσκευασίες απορρίπτονται ή επανασυσκευάζονται εάν βρεθεί αστοχία σε αυτές. Κατά την παραλαβή των συσκευασιών αυτών στα μέρη διάθεσης τους (π.χ. supermarkets) οι υπεύθυνοι των καταστημάτων οφείλουν να ελέγχουν την ακεραιότητα των συσκευασιών προτού τις παραλάβουν, ειδικά όταν πρόκειται για ευαλλοίωτα τρόφιμα όπως είναι τα πουλερικά και να διαχωρίζουν όσες φέρουν αστοχίες (τρυπήματα ή χτυπήματα που μπορεί να έχουν προκληθεί κατά την μεταφορά) διότι σύμφωνα με μελέτες, ακόμη και μικρές φθορές στην συσκευασία θα μπορούσαν να προκαλέσουν αύξηση του αριθμού των μικροβίων και κατ' επέκταση ταχύτερη αλλοίωση του τροφίμου (Mills & Masso-Moreu, 2005).

Σε γενικές γραμμές, τα χαρακτηριστικά του προϊόντος, ο τύπος της συσκευασίας που χρησιμοποιείται, η αρχική ατμόσφαιρα και ο ρυθμός με τον οποίο αλλάζει η ατμόσφαιρα επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο οι συσκευασίες επηρεάζουν τη διαδικασία αλλοίωσης. Το ίδιο ισχύει και για τις συσκευασίες στις οποίες έχουν εντοπιστεί αστοχίες. Εάν για παράδειγμα σε μία συσκευασία υπάρχει οπή, η συγκέντρωση του οξυγόνου αυξάνεται, ενώ η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους της διάτρησης. Αυτό

προκαλεί ταχύτερη αλλοίωση των τροφίμων. Δεν υπάρχουν πολλές πρόσφατες μελέτες που να συζητούν τον τρόπο με τον οποίο οι οπές επηρεάζουν την ποιότητα των προϊόντων. Για παράδειγμα, οι Randell et al. (1995) διαπίστωσαν ότι η διάτρηση των μαριναρισμένων τμημάτων κοτόπουλου που συσκευάζονται σε τροποποιημένη ατμόσφαιρα επηρεάζει την ανάπτυξη των ζυμών, των μυκήτων και των κολοβακτηριδίων. Σύμφωνα με έρευνα που διεξήχθη το 2006 από τους Tournas et al., η αύξηση του αριθμού της ολικής αερόβιας μεσόφιλης χλωρίδας σε μοσχαρίσιο κιμά αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους της διάτρησης στους 5 °C. Στις συσκευασίες που έχουν εσωτερική οπή, ο μέγιστος αριθμός βακτηρίων αυξάνεται κατά 1-2 λογαριθμικούς κύκλους (Tournas et al., 2006).

Οι Ahvenainen, Eilamo και Hurme (1997) διερεύνησαν πώς επηρεάζεται η διαδικασία οργανοληπτικής αλλοίωσης προϊόντων πίτσας από την διαπερατότητα του υλικού συσκευασίας ή της διάτρησης που έχει προέλθει από την ύπαρξη οπής. Κατέληξαν ότι καθώς η διαρροή γίνεται μεγαλύτερη, η οργανοληπτική υποβάθμιση του προϊόντος γίνεται ταχύτερη (Ahvenainen et al., 1997).

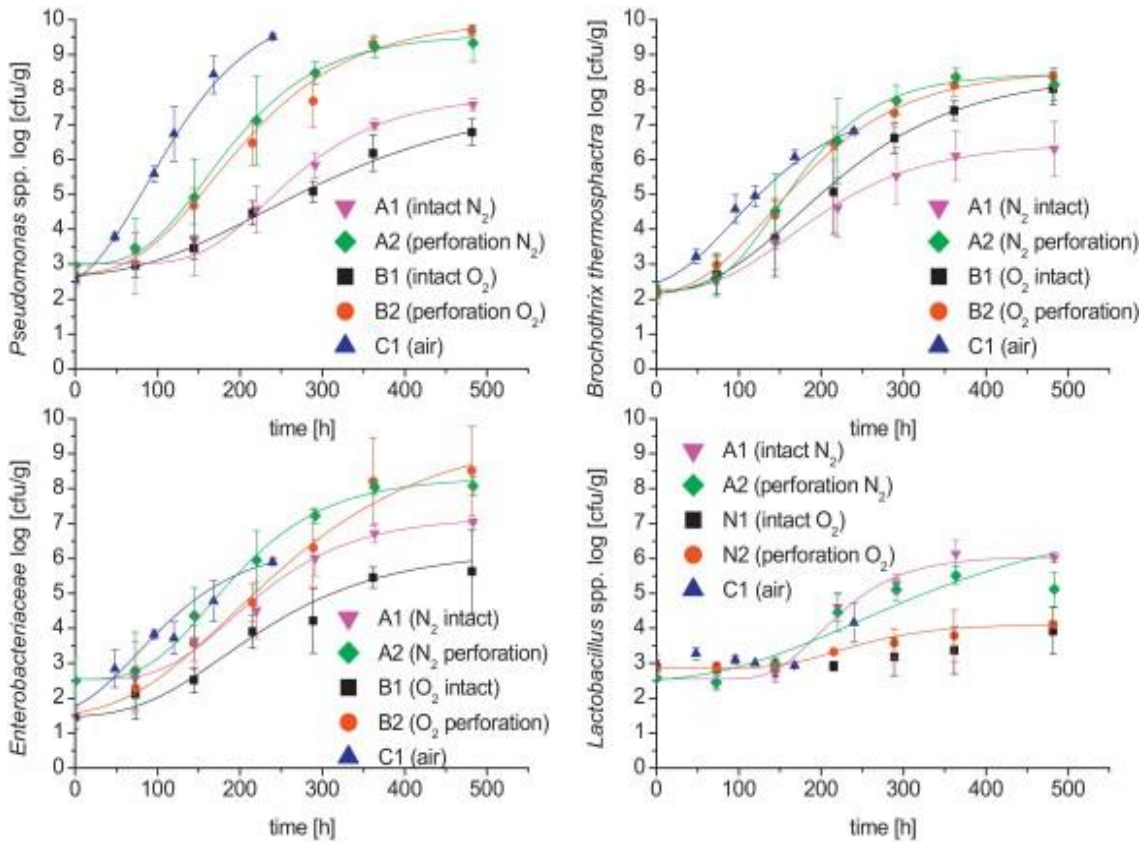
Η πλειονότητα των αναφερόμενων μελετών επικεντρώνεται στον τρόπο με τον οποίο οι μικροοπές διαφορετικού μεγέθους επηρεάζουν μερικές κοινές παραμέτρους αλλοίωσης. Ωστόσο, υπάρχουν λίγες έρευνες σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο οι διαρροές επηρεάζουν συγκεκριμένους οργανισμούς αλλοίωσης και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων σε διάφορες ατμόσφαιρες αερίων.

Οι δύο συνδυασμοί τροποποιημένης ατμόσφαιρας αερίων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα των Rossaint et al. (2014), για τη συσκευασία των φιλέτων στήθους πουλερικών είναι 70% O₂, 30% CO₂ και 70% N₂, 30% CO₂. Μια διάτρηση (Ø = 0,2 mm) έγινε στο επάνω φύλλο του μισού φύλλου των συσκευασιών MA. Μετά από περίοδο αποθήκευσης 20 ημερών στους 4 °C, τα δείγματα εξετάστηκαν σε διάφορα χρονικά διαστήματα για να εξεταστούν οι τυπικές μετρήσεις αλλοίωσης, τα επίπεδα pH και οι αλλαγές στο περιβάλλον με και χωρίς πουλερικά (Rossaint et al., 2014).

Συμπερασματικά, τα διάφορα πειράματα αποθήκευσης που πραγματοποιήθηκαν σε νωπό κρέας πουλερικών έδειξαν ότι μια διάτρηση 0,2 mm είχε αντίκτυπο στην εξέλιξη της αλλοίωσης, ανεξάρτητα από τις δύο διαφορετικές ατμόσφαιρες αερίων. Η διάτρηση προκαλεί

αύξηση της ανάπτυξης όλων των οργανισμών αλλοίωσης, με εξαίρεση τους *Lactobacillus spp.* υπό άζωτο. Οι ατμόσφαιρες που περιείχαν άζωτο και οξυγόνο είχαν διαφορετική σύνθεση της αλλοιογόνου χλωρίδας. Ως αποτέλεσμα, η ανάπτυξη των συγκεκριμένων οργανισμών αλλοίωσης επηρεάστηκε σε διαφορετικό βαθμό από τη μεταβολή της ατμόσφαιρας αερίου που προκλήθηκε από μια διάτρηση. Λόγω της διάτρησης, τα είδη *Pseudomonas* και *Enterobacteriaceae* αναπτύσσονται ταχύτερα σε περιβάλλον με οξυγόνο. Από την άλλη πλευρά, η ανάπτυξη του *B. thermosphacta* επηρεάζεται κυρίως από ένα περιβάλλον αζώτου (Rossaint et al., 2014).

Ωστόσο, η βακτηριακή ανάπτυξη εξακολουθεί να είναι περιορισμένη σε διάτρητες συσκευασίες σε σύγκριση με τον αέρα, ακόμη και με την αλλαγή στο περιβάλλον αερίων. Το αποτέλεσμα της οργανοληπτικής αξιολόγησης καταδεικνύει ότι το σύνολο όλων των χαρακτηριστικών αλλοίωσης, καθορίζει το τέλος της διάρκειας ζωής. Μια διάτρηση 0,2 mm προκάλεσε μείωση της οργανοληπτικής διάρκειας ζωής και στις δύο ατμόσφαιρες κατά 25% περίπου. Ωστόσο, μια μικρή τρύπα μπορεί να μην είναι πάντα ορατή και η ελαττωματική συσκευασία καταλήγει στα χέρια του πελάτη. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται συνεχής ανίχνευση διαρροών σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού. Επομένως, θα ήταν επωφελής η χρήση ενός δείκτη διαρροής για να σταματήσουν τα ελαττωματικά προϊόντα να φτάνουν στον τελικό καταναλωτή (Rossaint et al., 2014).



Εικόνα 1: Ανάπτυξη αλλοιογόνων μικροοργανισμών σε συσκευασία με υψηλή συγκέντρωση οξυγόνου και άζωτου με και χωρίς οπή (0,2 mm) (μέση τιμή ± SD τεσσάρων αναλύσεων, εκτός από τον αέρα (τρεις αναλύσεις)). (Rossaint et al., 2014)

| Microorganism | Package scenario | | | |
|--|---|---|---|---|
| | O ₂ intact (10d) [logcfu/g] | N ₂ intact (10d) [logcfu/g] | O ₂ perforation (7d) [logcfu/g] | N ₂ perforation (7d) [logcfu/g] |
| TVC | 6.7 (±0.1) | 6.8 (±0.2) | 6.2 (±0.1) | 6.7 (±0.1) |
| <i>Pseudomonas</i> spp. | 4.6 (±0.2) | 4.9 (±0.1) | 5.4 (±0.4) | 5.8 (±0.2) |
| <i>Brochothrix</i> <i>thermosphacta</i> | 5.6 (±0.1) | 4.9 (±0.1) | 5.3 (±0.2) | 5.3 (±0.4) |
| <i>Enterobacteriaceae</i> | 3.9 (±0.4) | 5.0 (±0.3) | 4.0 (±0.5) | 4.9 (±0.5) |
| <i>Lactobacillus</i> spp. | 2.8 (±0.1) | 3.6 (±0.3) | 3.3 (±0.1) | 4.8 (±0.2) |

Mean values±SD for four analyses.

Εικόνα 2: Βακτηριακός αριθμός ΟΜΧ και ειδικών αλλοιογόνων μικροοργανισμών στο τέλος της εμπορικής διάρκειας ζωής των πουλερικών (Rossaint et al., 2014).

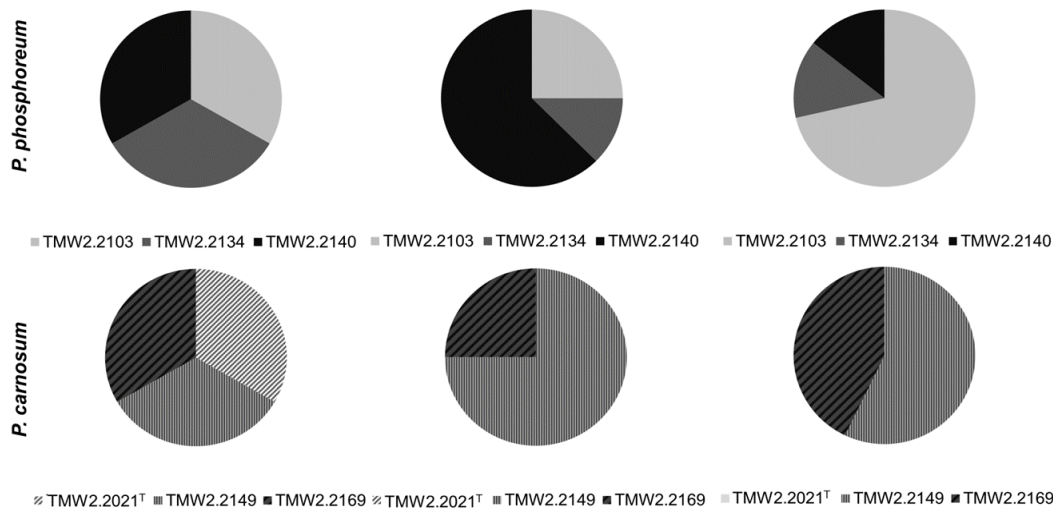
2.2.6 Η ανάπτυξη του φωτοβακτηρίου σε συσκευασία MAP

Πολυάριθμοι τύποι κρέατος σε συσκευασίες τροποποιημένης ατμόσφαιρας έχουν αποδώσει ανάπτυξη στελεχών του *Photobacterium* (Fuentes-Perez et al., 2019- Hilgarth et al., 2018a- Höll et al., 2019). Στην μελέτη που παρουσιάζεται όπου υλοποιήθηκε από τον Dalgaard, 1995 εξέτασαν την in situ ανάπτυξη του *P. phosphoreum* και του *P. carnosum*, δύο συχνών αλλά ελάχιστα μελετημένων αλλοιογόνων μικροοργανισμών κρέατος, εξετάζοντας τις επιδράσεις διαφόρων αερίων συσκευασίας και την παρουσία συν-μολυντών στο κοτόπουλο (Dalgaard, 1995).

Σήμερα χρησιμοποιείται η συσκευασία σε ατμόσφαιρα υψηλής περιεκτικότητας σε O₂/CO₂, αν και στο παρελθόν το νωπό κρέας πουλερικών συσκευαζόταν μόνο σε περιβάλλον χωρίς οξυγόνο (Rossaint et al., 2014). Ως εκ τούτου, είναι ζωτικής σημασίας να εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο η ατμόσφαιρα επηρεάζει την ανάπτυξη των φωτοβακτηρίων. Σύμφωνα με τους Devlieghere και Debevere (2000), το *P. phosphoreum* είναι πολύ ευαίσθητο στο διοξείδιο του άνθρακα. Ωστόσο, ο Dalgaard (1995) αποκάλυψε ότι το *Photobacterium* στα προϊόντα ιχθυηρών έχουν μεγαλύτερη ανοχή στο CO₂ από άλλα αρνητικά κατά Gram βακτήρια (Devlieghere &

Debevere, 2000). Τα αρνητικά κατά Gram βακτήρια έχουν συνήθως σημαντικά χαμηλότερη ανοχή στο CO₂ από τα θετικά κατά Gram βακτήρια - παρ' όλα αυτά, το *P. phosphoreum* έχει αποδειχθεί ότι έχει μάλλον υψηλή ανοχή στο CO₂ (Dalgaard, 1995).

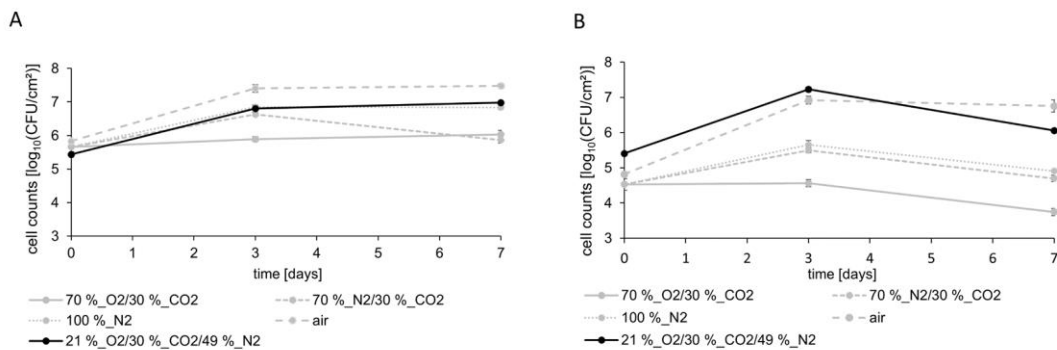
Επειδή η αερόβια αναπνοή έχει υψηλότερο ρυθμό μετατροπής ενέργειας από το ανοξικό περιβάλλον, και τα δύο στελέχη *Photobacterium* έφτασαν σε πολύ μεγαλύτερο αριθμό κυττάρων στον ατμοσφαιρικό αέρα. Ωστόσο, όπως έχει αποδειχθεί προηγουμένως σε άλλες έρευνες (López-Caballero et al., 2002), το επίπεδο O₂ οδήγησε σε πολύ μειωμένο αριθμό κυττάρων σε ατμόσφαιρα με 70% O₂. Ο μηχανισμός δράσης στο MAP με υψηλό O₂ είναι ακόμη άγνωστος, παρά τις προτάσεις ότι η ανασταλτική επίδραση του O₂ προέρχεται από την υψηλή αντιδραστικότητά του και την παραγωγή ROS και στη συνέχεια H₂O₂ (Chaix et al., 2015). Η ανοχή των φωτοβακτηρίων στο H₂O₂ ήταν πολύ χαμηλότερη από εκείνη του *B. thermosphacta* και ισάξια ή κάπως χαμηλότερη από εκείνη άλλων LAB.



Εικόνα 3: Κυριαρχία των στελεχών *P. phosphoreum* και *P. carnosum*. Τα στελέχη καλλιεργήθηκαν σε κοτόπουλο σε ατμόσφαιρα O₂/CO₂ σε συγκαλλιέργεια με *Ps. fragi* TMW2.2082, *Ps. lundensis* TMW2.2076, *Ps. weihenstephanensis* TMW2. 1728, *B. thermosphacta* TMW2.1567, *L. gelidum subsp. gelidum* TMW2.1618, *L. gelidum subsp. gasicomitatum* TMW2.1619, *C. divergens* TMW2.1577 και *C. maltaromaticum* TMW2.1581. Τα είδη ταυτοποιήθηκαν με MALDI-TOF MS και τα στελέχη διαφοροποιήθηκαν με δακτυλικό αποτύπωμα RAPD-PCR.

Αυτό, ωστόσο, εξηγεί μόνο μέχρι ενός σημείου την παρατηρούμενη ευαισθησία στο O₂-οι υψηλές συγκεντρώσεις O₂ δεν επηρέασαν τα LAB με ανοχή στο H₂O₂ παρόμοια με το *Photobacterium*

Είναι γνωστό ότι το CO₂ μπορεί να μειώσει τον ρυθμό της αερόβιας αναπνοής και ότι η βακτηριοστατική επίδραση του CO₂ εξαρτάται περιστασιακά από τα επίπεδα O₂ (Gill and Tan, 1980), υποδεικνύοντας μια πιθανή συνεργιστική επίδραση. Ως εκ τούτου, στην έρευνα των Hauschild et al. (2021) πραγματοποιήθηκε μελέτη για την ανάπτυξη σε περιβάλλον που είχε 49% N₂, 21% O₂ και 30% CO₂. Σε σύγκριση με αυτά του αέρα, ο αριθμός των κυττάρων και των δύο ειδών *Photobacterium* ήταν χαμηλότερος σε αυτή την ατμόσφαιρα- ωστόσο, η επίδραση αυτή δεν ήταν τόσο μεγάλη όσο η ουσιαστική επίδραση της υψηλής συγκέντρωσης O₂. Αυτό υποδηλώνει ότι το CO₂ και το O₂ έχουν μια μικρή συνεργιστική επίδραση που υφίσταται μόνο σε υψηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου.

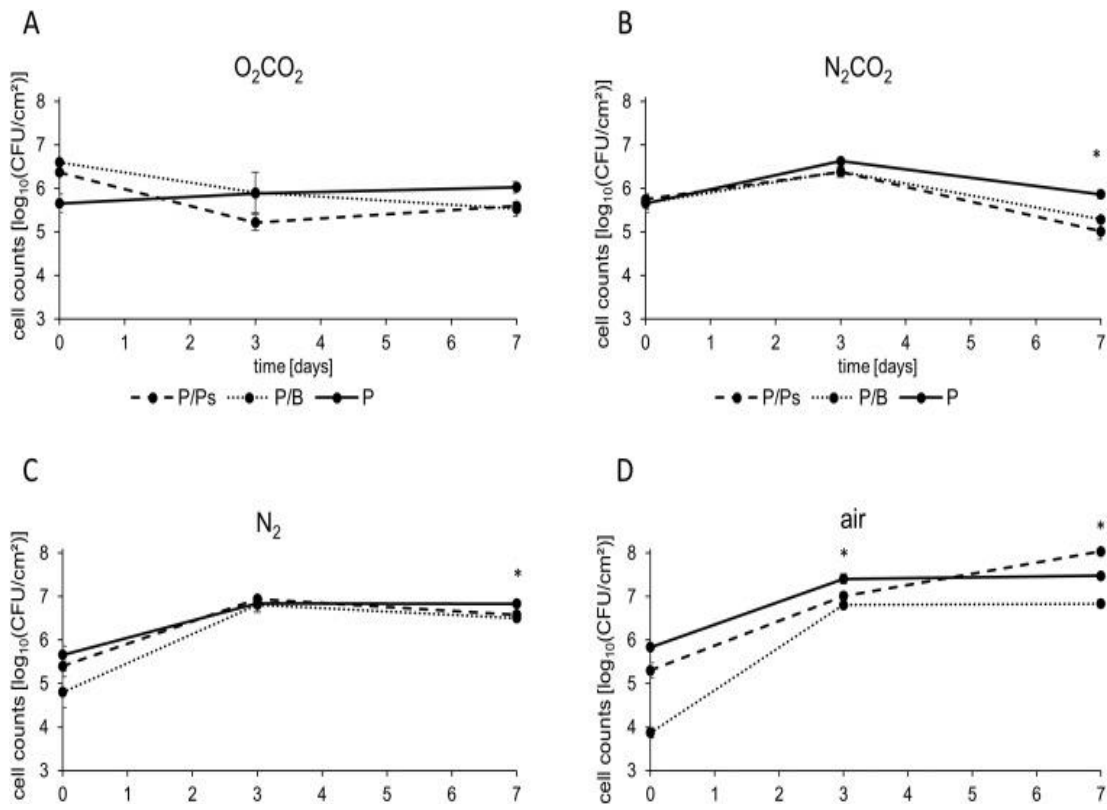


Εικόνα 4 Ανάπτυξη των *P. phosphoreum* TMW2.2103 και *P. carnosum* TMW2.2149 παρουσία 21 % O₂ και 30 % CO₂ σε σύγκριση με την ανάπτυξή τους σε συσκευασία MAP και αέρα. Το κρέας επωάστηκε στους 4 °C. N = 3. A *P. phosphoreum* TMW2.2103 B *P. carnosum* TMW2.2149

Ωστόσο, σε φυσικά μολυσμένο κρέας που συσκευάζεται σε συνθήκες υψηλού O₂/CO₂, το *Photobacterium* συχνά φτάνει σε πυκνότητες κυττάρων αρκετά υψηλές ώστε να είναι σημαντικές για την αλλοίωση (>10⁷ CFU/g). Από την άλλη πλευρά, ο σκόπιμος εμβολιασμός του κρέατος δεν φαίνεται να αποτυπώνει με ακρίβεια τον μηχανισμό αλλοίωσης σε φυσικά μολυσμένο κρέας λιανικής πώλησης. Στην πραγματικότητα, οι χημικές αλλοιώσεις που συμβαίνουν σε φυσικά μολυσμένα κρέατα και ψάρια μπορεί να είναι πολύ διαφορετικές από εκείνες που συμβαίνουν σε αγαθά που έχουν εμβολιαστεί σκόπιμα. Ειδικότερα, έχουν καταγραφεί σε αυτό το πλαίσιο μεταβολές στη σύνθεση και εξάντληση πτητικών χημικών ουσιών και οργανικών οξέων (γαλακτικό, μυρμηκικό και οξικό οξύ) (Koutsoumanis & Nychas, 1999).

Τα στελέχη *P. phosphoreum* και *P. carnosum* στην έρευνα των Hauschild et al. (2021) αναπτύχθηκαν καλά παρουσία CO₂ και χωρίς O₂, υποδεικνύοντας τη σημασία τους και για τα κρέατα που συσκευάζονται σε κενό αέρος και χωρίς τη παρουσία οξυγόνου. Οι προσαρμοστικές μεταβολικές τους ικανότητες, οι οποίες περιλαμβάνουν τόσο αναερόβια όσο και αερόβια αναπνοή με διαφορετικούς δότες ηλεκτρονίων και ζυμωτικό τρόπο ζωής, το καθιστούν δυνατό (Hauschild et al., 2021; L. Höll et al., 2019)

Κατά τη διάρκεια των επτά ημερών, το κλάσμα άλλων ειδών (όπως *B. thermosphacta* και *Pseudomonas spp.*) μεταβλήθηκε, ενώ η συνολική σχετική κυριαρχία των φωτοβακτηρίων ήταν σταθερή. Αυτό συνάδει με την προηγουμένως διαπιστωμένη σημασία του *Photobacterium* στη σήψη του κρέατος. Το μοντέλο αλλοίωσης στα πειράματά των Hauschild et al. (2021) φαίνεται να διαφέρει ελαφρώς από άλλες έρευνες, όπως συζητήθηκε παραπάνω. Αυτό θα μπορούσε να εξηγήσει γιατί, παρά το γεγονός ότι αυτά τα μικρόβια συχνά κυριαρχούν στο μικροβίωμα αλλοίωσης στις συσκευασίες λιανικής πώλησης διαφόρων ποικιλιών κρέατος, δεν εντόπισαν οι συγγραφείς της μελέτης τη κυριαρχία του *Photobacterium* (Hauschild et al., 2021).



Εικόνα 5 Ανάπτυξη του *P. phosphoreum* TMW2.2103 σε διαφορετικές ατμόσφαιρες όταν βρίσκεται σε μονοκαλλιέργεια και σε συνδυασμό με *Ps. fragi* ή *B. thermosphacta*. Το φωτοβακτήριο και το συν-αυτοσυστατικό προστέθηκαν στο μείγμα καλλιέργειας σε αναλογία 1:1. $p < 0,05$ για $N = 3$. P - *P. phosphoreum* μόνο του- P/Ps - *P. phosphoreum* έναντι *Ps. fragi*- P/B - *P. phosphoreum* έναντι *B. thermosphacta*. Οι ακόλουθες ατμόσφαιρες: A 70% O₂/30% CO₂, B 70% N₂/30% CO₂, C 100% N₂, D 21% O₂/79% N₂ (αέρας). ΠΗΓΗ και συνδεση ολων των εικονων με το κειμενο Αυτό το σχολιο είναι συνολικο (Hauschild et al., 2021).

2.2.7 Ο αντίκτυπος της συνδυαστικής επιμόλυνσης με *Ps. fragi*/*B.*

thermosphacta στην ανάπτυξη των *P. phosphoreum* και *P. carnosum*

Επειδή αποτελούσαν την πλειονότητα του συνόλου του μικροβιώματος που εντοπίστηκε κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης των πουλερικών, επιλέχθηκαν οι *Pseudomonas fragi* και *B. thermosphacta* για εξέταση των αλληλεπιδράσεών τους με το *Photobacterium* σε συγκαλλιέργεια.

| Species | Co-contaminant | Ratio (species:co-contaminant) | Effect on the cell number on day 3 | | | |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------|-----------------|
| | | | O ₂ /CO ₂ | N ₂ /CO ₂ | N ₂ | air |
| <i>P. phosphoreum</i> | <i>Ps. fragi</i> | 1:10 | + ^{-g} | - | + ^{-r} | - ^g |
| | <i>Ps. fragi</i> | 1:1 | - | + ^{-g} | + ^{-r} | + ^{-g} |
| | <i>Ps. fragi</i> | 10:1 | - | - | - | + |
| | <i>B. thermosphacta</i> | 1:10 | + ^{-g} | - | - | - ^g |
| | <i>B. thermosphacta</i> | 1:1 | + ^{-g} | + ^{-g} | + ^{-g} | + |
| | <i>B. thermosphacta</i> | 10:1 | - | - | - | + ^{-g} |
| <i>P. carnosum</i> | <i>Ps. fragi</i> | 1:10 | + ^{-g} | + | + | - |
| | <i>Ps. fragi</i> | 1:1 | + ^{-g} | + ^{-g} | + | - |
| | <i>Ps. fragi</i> | 10:1 | - ^g | + ^{-g} | + ^{-g} | - |
| | <i>B. thermosphacta</i> | 1:10 | + | + | + ^{-g} | - |
| | <i>B. thermosphacta</i> | 1:1 | - ^g | + | - | - |
| | <i>B. thermosphacta</i> | 10:1 | + | + ^{-g} | + ^{-g} | - |

Εικόνα 6 Επίδραση της παρουσίας των *Ps. fragi* και *B. thermosphacta* στον αριθμό των κυττάρων του *Photobacterium* την ημέρα 3 (Hilgarth et al., 2018).

Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, η παρουσία είτε του *B. thermosphacta* είτε του *Ps. fragi* οδήγησε σε αυξημένη ανάπτυξη του *P. carnosum* TMW2.2149 αλλά μειωμένη ανάπτυξη του *P. phosphoreum* TMW2.2103 στη MAP (εικόνα NOYMEPO). Αυτό υποδηλώνει ότι το *P. phosphoreum* βρίσκεται σε μειονεκτική θέση και το *P. carnosum* έχει ένα γενικό πλεονέκτημα ανάπτυξης όταν υπάρχουν άλλοι αλλοιογόνοι μικροοργανισμοί κρέατος. Στην πραγματικότητα, αυτό προσδίδει αξιοπιστία στη θεωρία ότι το *P. phosphoreum* και το *P. carnosum* έχουν διαφορετική προέλευση και σχετίζονται με το μικροβιόκοσμο που σαπίζει το κρέας με διάφορους τρόπους.

Σε αντίθεση με το *P. phosphoreum*, το οποίο φαίνεται να εμπλέκεται ανταγωνιστικά με το *Ps. fragi* ή το *B. thermosphacta* όταν πρόκειται για κρέας, το *P. carnosum* φαίνεται να αλληλεπιδρά αρκετά φιλικά, όπως θα αναμενόταν για ένα φυσικό μέλος του μικροβιόκοσμου αλλοίωσης. Το *P. phosphoreum* ή το *P. carnosum* κυριαρχούν συχνά στην κοινότητα σήψης συσκευασμένου κρέατος από καταστήματα λιανικής πώλησης (Hilgarth et al., 2018). Βάσει των

μελετών, είναι πιθανό να υπάρχουν και να επηρεάζουν συν-μολυντές όπως το *Pseudomonas fragi* ή/και το *B. thermosphacta* (Hilgarth et al., 2018).

Προηγούμενες έρευνες έχουν δείξει ότι το *P. phosphoreum* είναι λιγότερο προσαρμοσμένο στην ανάπτυξη σε συστήματα σήψης κρέατος από ό,τι το *P. carnosum* (Fuertes-Perez et al., 2019; Hauschild et al., 2021). Έχει ήδη αποδειχθεί ότι οι παράγοντες αλλοίωσης κρέατος αναπτύσσονται αποτελεσματικότερα παρουσία άλλων ειδών, όπως το *B. thermosphacta* και το *Ps. fragi* (Paradouroulou et al., 2020), και έχει διατυπωθεί η άποψη ότι υπάρχει συνεργιστική επίδραση στην αλλοίωση του κρέατος (L. Höll et al., 2019). Ωστόσο, σύμφωνα με τους Hauschild et al., (2021), η επίδραση μπορεί να είναι αρκετά συγκεκριμένη για κάθε είδος. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, η ειδική για το είδος αλληλεπίδραση εμφανίζεται ανεξάρτητα από την παρουσία CO₂ ή υψηλών επιπέδων O₂ (Hauschild et al., 2021).

Και τα τέσσερα είδη μπορούν να αναπτυχθούν σε αυτό το κλίμα στο πλήρες δυναμικό τους, αν και το *P. carnosum* αναπτύσσεται πολύ πιο αργά από το *Ps. fragi* και το *B. thermosphacta*. Η επακόλουθη υπερανάπτυξη του συν-μολυντικού θεωρείται ότι είναι ο μηχανισμός που περιορίζει το *P. carnosum* σε αυτό το κλίμα. Επειδή το *P. phosphoreum* αναπτύσσεται ταχύτερα από το *P. carnosum*, μπορεί να συνυπάρχει με τους συν-μολυντές. Σε αυτή την περίπτωση, το *P. phosphoreum* TMW2.2103 μπορεί να αναπτύσσεται ευκολότερα λόγω εξωκυτταρικών ενζύμων που εκκρίνει ο συν-μολυντής (όπως λιπάσες) που βοηθούν στην αποικοδόμηση του υποστρώματος ή επειδή το *Ps. fragi*, ειδικότερα, αυξάνει το pH, γεγονός που ενισχύει τις συνθήκες ανάπτυξης του *P. phosphoreum*.

Η σχετική αφθονία των οργανισμών καθ' όλη τη διάρκεια της αποθήκευσης καθορίστηκε με εμβολιασμό του κρέατος με φωτοβακτήρια και συν-μολυντές σε αναλογία υπερεκπροσώπησης και υποεκπροσώπησης. Αυτό συνάδει με τη βιβλιογραφία που αναφέρει ότι ο αρχικός αριθμός κυττάρων έχει αντίκτυπο στην κυριαρχία κατά τη διάρκεια της αλλοίωσης (Gram et al., 2002). Η γενική φύση της αλληλεπίδρασης παρέμεινε αμετάβλητη παρά τις διακυμάνσεις των αναλογιών.

Συνοψίζοντας, η ανάπτυξη των *P. phosphoreum* TMW2.2103 και *P. carnosum* TMW2.2149 στο νωπό κρέας επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον συσκευασίας που

χρησιμοποιείται. Ενώ το CO₂ από μόνο του έχει μικρή επίδραση, τα υψηλά επίπεδα O₂ και CO₂ μαζί προκαλούν τη μεγαλύτερη μείωση της ανάπτυξης και των δύο ειδών.

Παρόλα αυτά, καμία ατμόσφαιρα δεν ανέστειλε πλήρως την ανάπτυξη των φωτοβακτηρίων, γεγονός που αναδεικνύει την προσαρμοστικότητά τους όσον αφορά τον μεταβολισμό και τη δυσκολία μείωσης του επιπέδου μόλυνσης που παράγουν. Επιπλέον, η συν-μόλυνση *Ps. fragi*/*B. thermosphacta* μπορεί να έχει μικρή αλλά αξιοσημείωτη επίδραση στην ανάπτυξη των φωτοβακτηρίων. Για το *P. carnosum* TMW2.2149, η επίδρασή του υποτίθεται ότι είναι θετική (commensalistic), ενώ για το *P. phosphoreum* TMW2.2103 είναι είτε ουδέτερη είτε αρνητική (competitive).

2.2.8 Ενεργές συσκευασίες

Συνθετικά αντιοξειδωτικά, όπως το βουτυλιωμένο υδροξυλοτολουόλιο (BHT), η βουτυλιωμένη υδροξυλο-ανισόλη (BHA) και το γαλλικό προπύλιο (PG), έχουν χρησιμοποιηθεί για την ελαχιστοποίηση της οξειδωτικής τάγγισης των λιπιδίων, παρατείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του κρέατος (Du et al., 2001). Ωστόσο, το κύριο ζήτημα των ερευνητών με την ευρεία χρήση των BHT, BHA και PG είναι η ασφάλεια της ανθρώπινης υγείας, μετατοπίζοντας το ενδιαφέρον στα φυσικά προϊόντα (Du et al., 2001). Το κρέας και τα προϊόντα κρέατος μπορούν να υποβαθμιστούν ως αποτέλεσμα περιβαλλοντικών παραγόντων, λανθασμένου χειρισμού, μεταφοράς και τεχνικών συντήρησης, καθώς και μικροβιακής εισβολής από τη γηγενή μικροχλωρίδα στο στομάχι του ζώου (Otlés & Sahyar, 2016). Τα αντιμικροβιακά προστίθενται στο κρέας και τα προϊόντα κρέατος προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτά τα ζητήματα. Η χρήση αντιοξειδωτικών ή αντιμικροβιακών χημικών ουσιών για τη συντήρηση του κρέατος θεωρείται επιβλαβής για την ανθρώπινη υγεία.

Ειδικότερα, το *S. typhimurium*, το *E. coli*, ο *S. aureus*, το *Vibrio cholera* (*V. cholera*), το *Campylobacter jejuni* (*C. jejuni*) και η *Listeria monocytogenes* (*L. monocytogenes*) παρουσιάζουν μέγιστο «δείκτη πολλαπλής ανθεκτικότητας στα αντιβιοτικά» (Multiple Antimicrobial Resistance, MAR), σύμφωνα με μια μελέτη των Nithya και Mohankumar (Nithya & Mohankumar, 2006). Αυτό είναι ανησυχητικό, δεδομένου ότι αυτά τα παθογόνα βακτηριακά στελέχη είναι ανθεκτικά στα αντιβιοτικά, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μαζικές επιδημίες τροφιμογενών ασθενειών.

Επιπλέον, αυτά τα παθογόνα προκαλούν φυσικοχημικές καθώς και οργανοληπτικές αλλοιώσεις που μπορεί να μειώσουν την επιθυμία των καταναλωτών να καταναλώσουν κρέας και ζωικά παράγωγα (Abdul-Mutalib et al., 2015). Για να διατηρηθεί η ασφάλεια και η ποιότητα των προϊόντων βόειου κρέατος με ταυτόχρονη μείωση της μικροβιακής επιβάρυνσης, οι βρώσιμες συσκευασίες (Edible Films and Coatings) είναι τα πιο φιλικά προς το περιβάλλον και κατάλληλα υποκατάστατα (Sánchez-Ortega et al., 2014).

Τα κύρια εμπόδια για τη βελτίωση της συντήρησης του κρέατος είναι η τυποποίηση των διαδικασιών για τη σύνθεση πράσινων υλικών συσκευασίας σύμφωνα με τις βιομηχανικές προδιαγραφές και η προσθήκη "πράσινων" αντιοξειδωτικών/αντιμικροβιακών (Abdul-Mutalib et al., 2015). Για τη βελτίωση της ποιότητας και της διάρκειας ζωής του κρέατος (τόσο του φρέσκου όσο και του κατεψυγμένου), οι ειδικοί σε θέματα τροφίμων αναπτύσσουν πράσινα συνθετικά συντηρητικά τις τελευταίες δεκαετίες. Ο κίνδυνος που παρέχουν τα παραδοσιακά και τεχνητά συντηρητικά για το οικοσύστημα στο σύνολό του μπορεί να μετριαστεί με την υιοθέτηση ασφαλών, βιοδιασπώμενων και φιλικών προς το περιβάλλον μεθόδων συντήρησης τροφίμων και κρέατος. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των προσδοκιών των καταναλωτών για φρέσκα τρόφιμα με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και υψηλότερη ποιότητα, εξασφαλίζοντας τα ευρύτερα δυνατά δίκτυα διανομής παγκοσμίως (Sánchez-Ortega et al., 2014).

| Natural/green synthesized packaging products | Type of food | Active ingredient |
|--|--|----------------------------------|
| Chitosan | Chicken breasts, cheese, and tilapia fillets | Organic acids |
| Starch/glycerol | Chicken breast meat, tilapia fillets, and cheese | Organic acids |
| Chitosan | Ground beef | Grapefruit extracts |
| Horseradish extracts | Beef | — |
| Clove, citronella, and cypripus | Food packaging in films | Clover oil |
| Seaweed extracts | Fruits, vegetables, and meat | — |
| Alginates | — | Polysaccharides and glycoprotein |
| Pullulan | Meat, eggs, and fruits | Polysaccharides |

Εικόνα 7 Φυσική/πράσινη συνθετική δραστική συσκευασία(Sánchez-Ortega et al., 2014).

Λόγω των ποικίλων ιδιοτήτων και της βιοδιαθεσιμότητάς τους, τα φυτικά εκχυλίσματα και τα αιθέρια έλαια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συντήρηση τροφίμων χωρίς καμία ενεργή συσκευασία. Το κρέας και τα προϊόντα κρέατος διατηρούνται καλύτερα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα όταν συσκευάζονται σε ενεργές βρώσιμες συσκευασίες που περιέχουν φυτικά εκχυλίσματα και αιθέρια έλαια (Panea et al., 2014).

Για να βελτιωθεί η ποιότητα του κρέατος και των προϊόντων κρέατος που απολαμβάνουν οι καταναλωτές, οι επιχειρήσεις κρέατος επιβάλλουν την εκτεταμένη χρήση φυσικών ή πράσινων συνθετικών προϊόντων (Panea et al., 2014). Ακολουθώντας αυτή τη διαδικασία, η υπερβολική χρήση τεχνητών συντηρητικών κρέατος μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, βελτιώνοντας τα οργανοληπτικά και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του κρέατος και των προϊόντων κρέατος. Το μέγεθος, το σχήμα, η περιεκτικότητα, οι επιφανειακές μεταβολές και οι οδοί απορρόφησης των δραστικών συστατικών επηρεάζουν το πόσο αποτελεσματικές είναι οι αντιμικροβιακές και αντιοξειδωτικές ιδιότητες της συσκευασίας (Zampara et al., 2017).

Επιπλέον, οι ανησυχίες για την τοξικότητα που σχετίζονται με τις δραστικές ουσίες καθορίζονται από τη διασπορά τους σε κύτταρα και υποκύτταρα, από την ενεργό συσκευασία έως την επιφάνεια του τροφίμου. Οι βιομηχανίες κρέατος και τροφίμων έχουν θέσει αυξημένες προσδοκίες τα τελευταία χρόνια για την ανάπτυξη κατάλληλων ενεργών συσκευασιών με τη χαμηλότερη τοξικότητα, την ανώτερη αντιμικροβιακή επίδραση και την ασφάλεια των πελατών. Για να διατηρηθεί η ποιότητα του επεξεργασμένου κρέατος, η μακρότερη και απαλλαγμένη από μικρόβια συντήρηση του κρέατος απαιτεί τη χρήση ανώτερης τεχνολογίας, όπως οι EFC. Αυτό θα διατηρήσει τη ζήτηση και την υγεία των καταναλωτών, εκτός από το να αποφέρει περισσότερα χρήματα στον τομέα του κρέατος (Orr et al., 2007).

| Active ingredients | | | | |
|---------------------------|------------------------|---|--|---|
| Edible films and coatings | Incorporated materials | | Active against bacterial species | Techniques developed |
| | Nanoparticles | Others | | |
| Chitosan | Silver | Ciprofloxacin | <i>P. aeruginosa</i> | Antimicrobial loaded films |
| Chitosan | Zinc oxide | Carboxymethyl cellulose | <i>S. aureus</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>B. cereus</i> | Bionanocomposite films |
| — | — | Essential oils | <i>S. typhimurium</i> , <i>L. monocytogenes</i> , <i>E. coli</i> | Low-density polyethylene packaging (LDPE) |
| — | — | Phenolic acid—gallic acid, benzoic acid, and flavonoids | <i>L. monocytogenes</i> , <i>C. jejuni</i> | Flexible bioactive packaging |
| Whey proteins | — | Essential oils | <i>E. coli</i> , <i>L. monocytogenes</i> , <i>S. aureus</i> , <i>S. enteritidis</i> | Edible films from whey proteins |
| Chitosan | — | Garlic oil | <i>E. coli</i> , <i>L. monocytogenes</i> , <i>S. aureus</i> , <i>B. cereus</i> , <i>S. typhimurium</i> | Edible films from chitosan |
| Milk protein | — | Organic acids | <i>E. coli</i> and <i>Pseudomonas</i> spp. | Milk protein-based edible films |
| — | — | Chitosonium acetate | <i>L. monocytogenes</i> , <i>S. aureus</i> , <i>Salmonella</i> spp. | Antimicrobial packaging |
| Cellulose | Silver | — | <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> | Active food packaging |
| Chitosan | Silver | Mandarin essential oil | <i>L. innocua</i> | Modified coating |
| Pullulan | Silver | — | <i>B. subtilis</i> , <i>S. aureus</i> , <i>S. marcescens</i> | Pullulan-silver nanopackaging |
| Alginate | Zinc oxide | Glycerol | <i>S. aureus</i> , <i>S. typhimurium</i> | Active packaging |
| Alginate | — | Cinnamon bark oil and soybean oil | <i>E. coli</i> , <i>L. monocytogenes</i> , and <i>Salmonella enterica</i> | Edible film packaging |
| Soybean | Zinc oxide | — | <i>S. aureus</i> and <i>E. coli</i> | Active packaging |

Εικόνα 8 Αντιμικροβιακή ενεργή συσκευασία (Orr et al., 2007).

Οι γαλακτωματοποιητές και οι επιφανειοδραστικές ουσίες χρησιμοποιούνται επίσης ως φραγμοί αερίων και υγρασίας με τη μορφή «επιστρώσεων» σε τρόφιμα όπως κρέας για να εξασφαλίσουν τη μακροπρόθεσμη διατήρηση του κρέατος και των προϊόντων κρέατος (Sánchez-Ortega et al., 2014). Τα καθαρά λιπίδια μπορούν να λειτουργήσουν ως σύστημα συστατικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως EFC όταν αναμιγνύονται με υδροκολλοειδή (όπως πρωτεΐνες, άμυλο, κυτταρίνη και τα παράγωγά τους). Η ενσωμάτωση των λιπιδίων στα EFCs παρέχει ένα μεγάλο φράγμα νερού τόσο για τα νωπά όσο και για τα επεξεργασμένα κρέατα, ενισχύοντας τη συνεκτικότητα, την ευελιξία και την υδροφοβικότητά τους. Αυτό παρατείνει τη φρεσκάδα, το χρώμα, τη γεύση, την τρυφερότητα και τη μικροβιολογική σταθερότητα του κρέατος. Παρά τα πολλά πλεονεκτήματά τους, οι πρωτεϊνικές μεμβράνες μπορεί να είναι ευάλωτες στην πρωτεολυτική καταστροφή όταν τα προϊόντα κρέατος περιέχουν ένζυμα, ή τα αλλεργιογόνα πρωτεϊνικά κλάσματα μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις σε όσους είναι ευαίσθητοι (Gennadios et al., 1997).

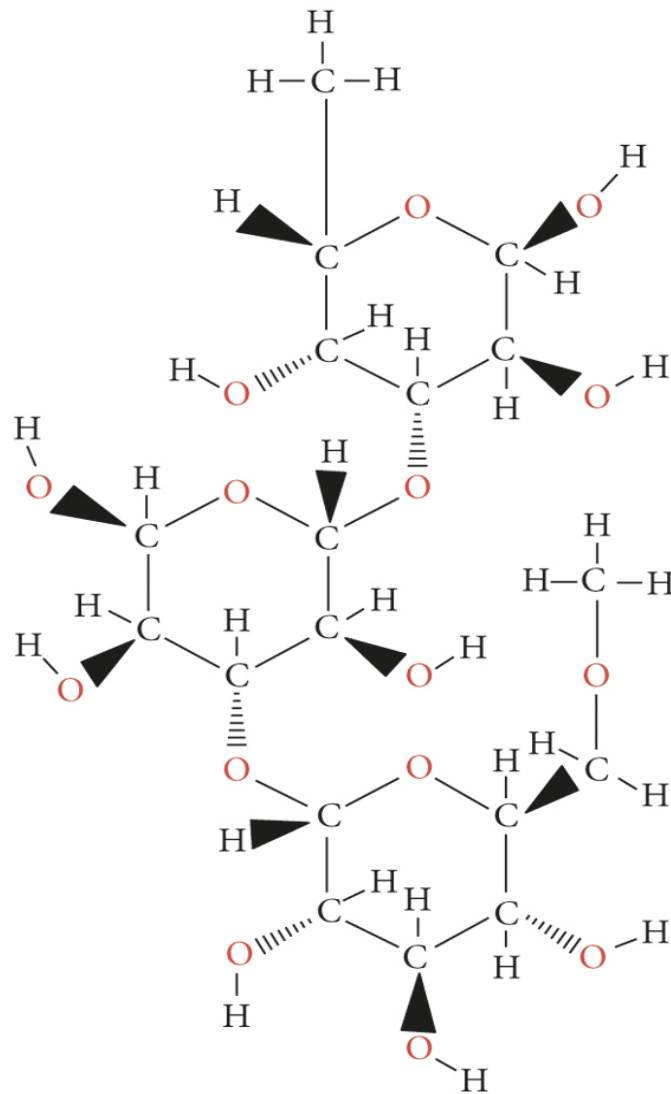
Επειδή οι μεμβράνες και οι επικαλύψεις με βάση τους πολυσακχαρίτες σταματούν την οξειδωτική τάγγιση, την αφυδάτωση και το επιφανειακό μαύρισμα, παρατείνουν τη διάρκεια ζωής του κρέατος και των προϊόντων κρέατος. Όταν υποβάλλονται σε ατμό και καπνό, οι μεμβράνες αυτές αποσυντίθενται και αναμειγνύονται με τα τυλιγμένα είδη κρέατος. Ενισχύοντας τη δομή και την υφή των προϊόντων κρέατος και μειώνοντας την απώλεια υγρασίας κατά την αποθήκευση, η παράμετρος αυτή αυξάνει τις αποδόσεις. Επιπλέον, οι μεμβράνες και οι επικαλύψεις που βασίζονται σε πολυσακχαρίτες έχουν τις ιδιότητες της τραγανότητας, της σκληρότητας, του ιξώδους, της συμπαγούς μορφής και του σχηματισμού γέλης (Sánchez-Ortega et al., 2014).

2.2.9 Χρήση ενεργής συσκευασίας Pullulan για τη διατήρηση του κρέατος

Ένα είδος μύκητα που ονομάζεται *Aureobasidium pullulans* παράγει πουλουλάνη (pullulan), έναν εξωκυτταρικό πολυσακχαρίτη που χημικά αποτελείται από επαναλαμβανόμενες μονάδες μαλτοφρουκτόζης. Με εξαίρεση τη χρήση του για την πρόληψη της τάγγισης, αυτός ο βιοδιαθέσιμος πολυσακχαρίτης δεν χρησιμοποιείται επί του παρόντος ως «φυσικό συντηρητικό και υλικό συσκευασίας» (Duncan, 2011).

Η ενεργή συσκευασία με εκχύλισμα γλυκού βασιλικού (SBE) που περιέχει πουλουλάνη μειώνει την πιθανότητα απώλειας τροφίμων και αλλαγής χρώματος κατά την αποθήκευση. Σε σύγκριση με την πουλουλάνη, η ενεργή συσκευασία χιτοζάνης μπορεί να προκαλέσει παραγωγή διαμοριακών δεσμών υδρογόνου αντί για ενδομοριακούς δεσμούς υδρογόνου, γεγονός που θα μπορούσε να μεταβάλει σημαντικά τις μελέτες περίθλασης ακτίνων Χ (XRD). Σύμφωνα με αυτά τα ευρήματα, η ενεργή συσκευασία πουλουλάνης απελευθερώνει ιόντα αργύρου πιο αποτελεσματικά από τα φιλμ χιτοζάνης (Wu et al., 2013). Η ενεργή συσκευασία πουλουλάνης θεωρείται ως μια εκκολαπτόμενη τεχνολογία συντήρησης που εγγυάται την ασφάλεια των μικροοργανισμών και συντηρεί το κρέας, με ελάχιστη επίδραση από εξωτερικές πηγές. Η πρωτοτυπία και η νοστιμιά της γεύσης των τροφίμων είναι εγγυημένες και διατηρούνται όταν τα συστατικά των τροφίμων διατηρούνται φρέσκα σε αυτές τις συσκευασίες (Sánchez-Ortega et al., 2014).

Σύμφωνα με μια μελέτη των Kraśniewska et al. (2017), η ενεργή συσκευασία πουλουλάνης προστατεύει τα τρόφιμα (φρούτα και κρέας) από μηχανικές και φυσικές βλάβες, διατηρώντας παράλληλα την ποιότητά τους. Η χρήση νανοσωματιδίων σε φιλμ πουλουλάνης για τη διαχείριση των τροφιμογενών παθογόνων που υπάρχουν στο κρέας και τα προϊόντα κρέατος έχει ανοίξει νέους δρόμους για την επεξεργασία τροφίμων και κρέατος (Kraśniewska et al., 2017).



Εικόνα 9 Χημική δομή της πουλουλάνης με επαναλαμβανόμενες μονάδες μαλτοφρουκτόζης.

2.2.10 Μηχανισμός δράσης

Απελευθερώνοντας αργά ανόργανα νανοσωματίδια στα στοχευμένα βακτηριακά κύτταρα, η πουλουλάνη ενσωματωμένη με νανοσωματίδια παρουσιάζει αξιοσημείωτη αντιβακτηριακή αποτελεσματικότητα έναντι των *E. coli* και *L. monocytogenes*. Ο πληθυσμός διαφόρων

βακτηριακών στελεχών μπορεί να μειωθεί με την εφαρμογή μιας συγκεκριμένης αντιμικροβιακής χημικής ουσίας απευθείας στην επιφάνεια του κρέατος (Trinetta et al., 2010). Οποιοδήποτε αντιμικροβιακό υλικό χρησιμοποιείται για την ενεργή συσκευασία πουλουλάνης (pullulan) έχει τους ακόλουθους αντιμικροβιακούς μηχανισμούς:

- Παράταση της φάσης προσαρμογής της ανάπτυξης βακτηρίων ή μυκήτων.
- Βλάβη στα κυτταρικά τοιχώματα.
- Δημιουργία κενών και οπών στην εξωτερική μεμβράνη του βακτηριακού ή μυκητιασικού κυττάρου.
- Ο οργανισμός-στόχος πεθαίνει ως αποτέλεσμα της καταστροφής της εξωτερικής και της εσωτερικής μεμβράνης από τους μεταβολίτες που εισέρχονται στα βακτηριακά ή μυκητιασικά κύτταρα.
- φθορά της κυτταροπλασματικής και κυτταρικής μεμβράνης, η οποία αυξάνει τη διαπερατότητα των βακτηριακών και μυκητιακών κυττάρων (Foroozandeh & Aziz, 2018).

| | Effective against bacterial strains | Type of food items | References |
|---|---|----------------------------|------------|
| Pullulan with nanoparticles/essential oils | <i>S. aureus</i> , <i>L. monocytogenes</i> , <i>S. typhimurium</i> , and <i>E. coli</i> O157:H7 | Poultry meat products | [84] |
| Pullulan with zinc nanoparticles | <i>S. aureus</i> , <i>L. monocytogenes</i> , <i>E. coli</i> O157:H7, and <i>S. typhimurium</i> | Turkey meat | [86] |
| Pullulan with silver nanoparticles | <i>S. aureus</i> and <i>L. monocytogenes</i> . | Turkey meat | [86] |
| Pullulan with silver nanoparticles | <i>L. monocytogenes</i> and <i>S. aureus</i> | Turkey deli meat | [86] |
| Pullulan with LAE-nisin Z | <i>S. aureus</i> , <i>L. monocytogenes</i> , and <i>E. coli</i> O157:H7 | Ham deli meat and raw beef | [87] |
| Pullulan with lauric arginate (LAE) and nisin Z | <i>S. typhimurium</i> and <i>S. enteritidis</i> | Turkey breast | [88] |

Εικόνα 10 Ενεργή συσκευασία Pullulan για τη συντήρηση κρέατος (Foroozandeh & Aziz, 2018).

Τα νανοσωματίδια αργύρου, χρυσού και TiO₂, καθώς και τα αιθέρια έλαια και οι ειδικές βακτηριοσίνες αποτελούν παραδείγματα αντιμικροβιακών ή δραστικών συστατικών. Τα πεπτίδια (πρωτεΐνες) που ονομάζονται βακτηριοσίνες παράγονται από το ριβόσωμα ενός συγκεκριμένου βακτηριακού στελέχους και έχουν αντιβακτηριακές ιδιότητες έναντι στελεχών που σχετίζονται με αυτό. Η ποιότητα του κρέατος μπορεί να διατηρηθεί και η διάρκεια ζωής του να παραταθεί με την εφαρμογή βακτηριοσινών, αιθέριων ελαίων και νανοσωματιδίων απευθείας στην επιφάνεια του κρέατος μέσω βρώσιμων μεμβρανών πουλουλάνης (Morsy et al., 2015). Αυτό έχει σαφή σχέση με την ικανότητα της πουλουλάνης να κολλάει στην υγρή επιφάνεια του κρέατος και να απελευθερώνει σταδιακά τους «ενεργούς παράγοντες» -νανοσωματίδια,

αιθέρια έλαια και βακτηριοσίνες- σε αυτό. Είναι επίσης ικανό να περικλείει τα νανοσωματίδια σε ένα λεπτό στρώμα, το οποίο μειώνει τον αριθμό των επιβλαβών βακτηριακών στελεχών.

Αρκετοί ερευνητές έχουν αναφέρει τη χρήση πουλουλάνης και νανοσωματιδίων/ενεργών χημικών ουσιών από διάφορες πηγές για τη δημιουργία "ενεργών συσκευασιών" τα τελευταία 20 χρόνια ως πράσινου συντηρητικού για την παράταση της διάρκειας ζωής και της ποιότητας του κρέατος (Morsy et al., 2015).

Παρομοίως, είναι αδύνατο να παραβλέψουμε τις αντιβακτηριακές ιδιότητες των νανοσωματιδίων αργύρου (Ag Nano-Particles, AgNPs) που προστίθενται σε ενεργές συσκευασίες κατά μιας ποικιλίας επιβλαβών βακτηριακών ειδών (Duncan, 2011). Τα AgNPs έχουν ισχυρές αντιβακτηριακές και αντιμυκητιασικές ιδιότητες και μπορούν να παραχθούν από κολλαγόνο, πουλουλάνη, κυτταρίνη και κουρκουμίνη. Τα πράσινα παραγόμενα AgNPs από πουλουλάνη (ως σταθεροποιητικός/αναγωγικός παράγοντας) μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την υγεία των πελατών και να διατηρήσουν την ποιότητα των προϊόντων. Οι επιχειρήσεις κρέατος χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο την «ενεργή συσκευασία πουλουλάνης», η οποία περιέχει AgNPs, ως «πράσινο» συντηρητικό (Sánchez-Ortega et al., 2014).

Το μέγεθος, το σχήμα και η κρυσταλλογραφική δομή των AgNPs, μεταξύ άλλων, μπορεί επίσης να έχουν αντίκτυπο στην αντιβακτηριακή δράση της «ενεργής συσκευασίας πουλουλάνης», η οποία ενσωματώνει AgNPs. Τα AgNPs που παράγονται από αυξανόμενες συγκεντρώσεις πουλουλάνης επέδειξαν ισχυρή αντιβακτηριακή δράση για τη συντήρηση κρέατος, όπως έδειξαν οι Ganduri et al. (Ganduri et al., 2016). Επιπλέον, τα AgNPs που παράγονται από πουλουλάνη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως «δραστική ουσία» για τη συντήρηση του κρέατος και των προϊόντων κρέατος- ωστόσο, οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητά τους είναι η συγκέντρωση, το μέγεθος και η υδρόφιλη-υδρόφοβη φύση τους. Η χρήση νανοσωματιδίων αργύρου σε φιλμ πουλουλάνης για τη δημιουργία "ενεργών συσκευασιών" για τη συντήρηση του κρέατος και των προϊόντων κρέατος αυξάνεται. Οι συνδυασμένες αντιβακτηριακές ιδιότητες της πουλουλάνης και των AgNPs μπορούν να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής και την ποιότητα των προϊόντων κρέατος (Khalaf et al., 2013).

Σύμφωνα με τους Khalaf et al. (2013), ενεργά φιλμ πουλουλάνης με νανοσωματίδια αργύρου εξουδετέρωσαν απροσδόκητα τις θανατηφόρες επιδράσεις των *S. aureus* και *L.*

monocytogenes, μειώνοντας την αλλοίωση του κρέατος και των προϊόντων κρέατος. Στην προαναφερθείσα εργασία, τα νανοσωματίδια αργύρου που ενσωματώθηκαν σε πουλουλάνη αποδείχθηκε ότι έχουν αντιβακτηριακή δράση κατά του κρέατος γαλοπούλας, υποδεικνύοντας ότι η επεξεργασία λευκού κρέατος μπορεί να γίνει με ασφάλεια. Η ικανότητα της ενεργής συσκευασίας του pullulan με AgNPs να παραμένει σταθερή σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών - μεταξύ 4°C και 25°C- έδειξε μια νέα προσέγγιση για τη συσκευασία κρέατος που είναι ασφαλής, υγιεινή και βιοδιασπώμενη(Khalaf et al., 2013; Khan et al., 2019).

Η ενεργός συσκευασία με βάση την πουλουλάνη έχει αποδειχθεί ότι έχει υψηλότερη βιοσυμβατότητα, μη ανοσογόνο, μη μεταλλαξιογόνο, μη καρκινογόνο και εύκολα αποικοδομήσιμη ιδιότητα, καθιστώντας την καλύτερη επιλογή για τη συντήρηση του κρέατος σε δοκιμές συντήρησης. Οι βελτιώσεις στις τεχνικές επεξεργασίας κρέατος έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν περαιτέρω τη μικροβιακή μόλυνση σε κρέας κρεατοπαραγωγής υψηλότερης ποιότητας (Weiss et al., 2010).

Συμπερασματικά, η ανθρώπινη υγεία βλάπτεται σοβαρά από τη χρήση συνθετικών αντιοξειδωτικών (βουτυλιωμένο υδροξυλο-τολουόλιο, βουτυλιωμένη υδροξυλο-ανισόλη και γαλλικό προπύλιο) και αντιμικροβιακών ουσιών για την πρόληψη της οξείδωσης και της αλλοίωσης του κρέατος. Η ενισχυμένη αντιμικροβιακή ικανότητα της βιοδιασπώμενης ενεργής συσκευασίας πουλουλάνης, όταν συνδυάζεται με οποιοδήποτε ενεργό υλικό (π.χ. AgNPs και αιθέρια έλαια), την καθιστά βιώσιμη τεχνολογία υποκατάστασης κατά των *S. Typhimurium*, *E. coli*, *S. aureus*, *C. perfringens*, *V. cholera*, *C. jejuni*, *S. Enteritidis* και *L. monocytogenes*. Η υψηλότερη ασφάλεια των καταναλωτών προκύπτει από την οξειδωτική και μικροβιακή σταθερότητα του κρέατος που παραμένει άθικτη ως αποτέλεσμα της επίδρασης της ενεργής συσκευασίας πουλουλάνης στη μείωση του μικροβιακού πληθυσμού. Επιπλέον, η βελτιωμένη σύνθεση, το σωστό μέγεθος και άλλοι παράγοντες επηρεάζουν το περίπλοκο φαινόμενο της αντιμικροβιακής δράσης των AgNPs όταν απελευθερώνονται από την ενεργή συσκευασία.

2.3 Χημικοί παράγοντες

2.3.1 Οξείδωση

Η οξείδωση, μια πολύπλευρη χημική διαδικασία, συμβάλλει σημαντικά στην αλλοίωση των προϊόντων πουλερικών και περιλαμβάνει διάφορες αλληλένδετες παραμέτρους που

επηρεάζουν τη γεύση, το χρώμα και τη διατροφική ποιότητα. Η ευαισθησία των λιπιδίων, ιδίως των ακόρεστων λιπαρών οξέων, στην οξείδωση αποτελεί πρωταρχικό μέλημα στην αλλοίωση των πουλερικών. Όπως διευκρινίστηκε από τους Delles et al. (2017), η οξείδωση των λιπιδίων οδηγεί στο σχηματισμό ανεπιθύμητων γεύσεων και ταγγισμένων οσμών, επηρεάζοντας δυσμενώς τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των πουλερικών. Η διαδικασία αυτή καταλύεται από την παρουσία οξυγόνου και επηρεάζεται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η έκθεση στο φως και η διάρκεια της αποθήκευσης. Η ανάπτυξη οξειδωτικών αντιδράσεων ξεκινά από την παρουσία ελεύθερων ριζών, ενώσεων με ασύζευκτα ηλεκτρόνια που μπορούν να δημιουργηθούν κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, της μεταφοράς και της έκθεσης στον αέρα. Τα αντιοξειδωτικά, συμπεριλαμβανομένων των ενδογενών προστατευτικών ουσιών, όπως η βιταμίνη E και το σελήνιο, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην αντιμετώπιση της οξείδωσης στα πουλερικά. Ωστόσο, υπό συνθήκες παρατεταμένης αποθήκευσης ή έκθεσης σε δυσμενείς περιβαλλοντικούς παράγοντες, αυτές οι φυσικές άμυνες μπορεί να εξουδετερωθούν. Έτσι, η εφαρμογή στρατηγικών για την ελαχιστοποίηση της έκθεσης σε οξυγόνο κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, η ενσωμάτωση ζωοτροφών πλούσιων σε αντιοξειδωτικά για τα πουλερικά και η βελτιστοποίηση των συνθηκών αποθήκευσης αποτελούν βασικά μέτρα για τον μετριασμό της οξειδωτικής αλλοίωσης και τη διατήρηση της ποιότητας των προϊόντων πουλερικών.

Εκτός από την οξείδωση των λιπιδίων, μια άλλη πτυχή της χημικής αλλοίωσης περιλαμβάνει την αποικοδόμηση των λιπιδίων, μια διαδικασία που επηρεάζεται από την υδρόλυση, την οξείδωση και τις ενζυματικές δραστηριότητες. Η υδρολυτική τάγγιση, η οποία καθοδηγείται από λιπολυτικά ένζυμα, έχει ως αποτέλεσμα τη διάσπαση των τριγλυκεριδίων σε ελεύθερα λιπαρά οξέα, συμβάλλοντας σε ανεπιθύμητες γεύσεις και οσμές στα προϊόντα πουλερικών. Μελέτες των Wang et al. (2019) υπογραμμίζουν τον ρόλο των λιπασών που παράγονται από βακτήρια που σχετίζονται με την αλλοίωση, όπως η *Pseudomonas*, στην προώθηση της αποικοδόμησης των λιπιδίων. Η αλληλεπίδραση μεταξύ ενζυματικών δραστηριοτήτων και οξειδωτικών διεργασιών υπογραμμίζει την πολυπλοκότητα της χημικής αλλοίωσης στα πουλερικά. Η αποικοδόμηση των λιπιδίων είναι στενά συνδεδεμένη με τις οξειδωτικές αντιδράσεις, καθώς η διάσπαση των λιπιδίων απελευθερώνει ελεύθερες ρίζες, ξεκινώντας την οξείδωση και υποβαθμίζοντας περαιτέρω την ποιότητα των πουλερικών. Ο αποτελεσματικός έλεγχος της αποικοδόμησης των λιπιδίων περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση

της δραστηριότητας των βακτηρίων που σχετίζονται με την αλλοίωση μέσω αυστηρών πρακτικών υγιεινής κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και της αποθήκευσης. Σε γενικές γραμμές, η κατανόηση της περίπλοκης σχέσης μεταξύ της οξείδωσης και της αποικοδόμησης των λιπιδίων είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη ολιστικών στρατηγικών που αντιμετωπίζουν τους χημικούς παράγοντες που συμβάλλουν στην αλλοίωση των πουλερικών, εξασφαλίζοντας την παραγωγή υψηλής ποιότητας και ασφαλών προϊόντων πουλερικών για τους καταναλωτές.

2.3.2 Μεταβολές του pH

Το pH των προϊόντων πουλερικών παίζει καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό της χημικής σταθερότητας και της ευαισθησίας τους σε αλλοίωση. Οι αλλαγές στο pH μπορούν να επηρεάσουν τη δραστηριότητα των ενζύμων, τη μικροβιακή ανάπτυξη και τη συνολική χημική σύνθεση των πουλερικών. Η έρευνα των Garcia et al. (2019) αναδεικνύει τον αντίκτυπο του pH στη διαδικασία αλλοίωσης. Το κρέας πουλερικών έχει ένα αρχικό pH (6,0 με 6,8) που επηρεάζεται από παράγοντες όπως η διατροφή του ζώου, οι διαδικασίες μετά τη σφαγή και οι συνθήκες αποθήκευσης. Καθώς η αλλοίωση εξελίσσεται, οι μικροβιακές δραστηριότητες και οι ενζυματικές αντιδράσεις μπορούν να μεταβάλλουν το pH, δημιουργώντας ένα περιβάλλον που ευνοεί την ανάπτυξη συγκεκριμένων οργανισμών αλλοίωσης.

Η αύξηση του pH, που συχνά συνδέεται με μικροβιακές δραστηριότητες, μπορεί να οδηγήσει στην αλκαλική αλλοίωση, επηρεάζοντας την υφή και τη γεύση των πουλερικών. Ορισμένα βακτήρια, όπως τα είδη *Proteus* και *Enterobacter*, είναι γνωστό ότι παράγουν αλκαλικά υποπροϊόντα, συμβάλλοντας σε φαινόμενα που σχετίζονται με την αλλοίωση. Αντίθετα, η μείωση του pH, που συχνά σχετίζεται με οξυγαλακτικά βακτήρια, μπορεί να οδηγήσει σε όξινη αλλοίωση, επηρεάζοντας τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των πουλερικών. Η κατανόηση της δυναμικής των μεταβολών του pH κατά τη διαδικασία αλλοίωσης είναι απαραίτητη για την εφαρμογή παρεμβάσεων που ελέγχουν τη μικροβιακή ανάπτυξη και τις ενζυματικές δραστηριότητες, διατηρώντας τελικά τη χημική ακεραιότητα των προϊόντων πουλερικών.

Συνοπτικά, οι μεταβολές του pH αποτελούν σημαντικό χημικό παράγοντα στην αλλοίωση των πουλερικών, επηρεάζοντας τις μικροβιακές και ενζυματικές διεργασίες που συμβάλλουν στην υποβάθμιση της ποιότητας. Η αντιμετώπιση των μεταβολών του pH και των επιπτώσεών τους στους αλλοιογόνους οργανισμούς είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ασφάλειας

και των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των πουλερικών σε όλη την αλυσίδα παραγωγής και διανομής.

2.4 Μέθοδοι ανίχνευσης της αλλοίωσης των πουλερικών

2.4.1. Παραδοσιακές μέθοδοι: Οργανοληπτική αξιολόγηση

Οι παραδοσιακές μέθοδοι για την ανίχνευση της αλλοίωσης των πουλερικών βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην οργανοληπτική αξιολόγηση, που περιλαμβάνει τις ανθρώπινες αισθήσεις για την αξιολόγηση των αλλαγών στο χρώμα, την οσμή και την υφή. Εκπαιδευμένες ομάδες οργανοληπτών διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην αξιολόγηση των οργανοληπτικών ιδιοτήτων των προϊόντων πουλερικών. Οι εν λόγω επιτροπές, όπως τονίζεται από τους Smith et al. (2020), αποτελούνται από άτομα με εξειδικευμένη εκπαίδευση για να διακρίνουν λεπτές αλλαγές στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά. Το χρώμα του κρέατος πουλερικών, για παράδειγμα, είναι ένα οπτικό στοιχείο που υφίσταται αξιοσημείωτες μεταβολές κατά τη διάρκεια της αλλοίωσης. Οι εκπαιδευμένοι αξιολογητές μπορούν να εντοπίσουν αποκλίσεις από το τυπικό προφίλ χρώματος, σηματοδοτώντας πιθανά ποιοτικά προβλήματα (B. Smith et al., 2020).

Η οσμή είναι ένας άλλος βασικός δείκτης αλλοίωσης, και οι επιτροπές οργανοληπτικής αξιολόγησης παίζουν ζωτικό ρόλο στην ανίχνευση δυσάρεστων οσμών που σχετίζονται με βακτηριακή ή μυκητιακή επιμόλυνση. Οι αλλαγές στην οσμή των προϊόντων πουλερικών, που κυμαίνονται από μια ξινή νότα έως τη σήψη, είναι ενδεικτικές της αλλοίωσης των πουλερικών. Οι αξιολογήσεις της υφής περιλαμβάνουν την αξιολόγηση των μεταβολών στη σκληρότητα (firmness) ή την τρυφερότητα (tenderness) του κρέατος, καθώς η αλλοίωση συχνά οδηγεί σε ανεπιθύμητες αλλαγές στην υφή.

Η οπτική επιθεώρηση παραμένει μια βασική παραδοσιακή μέθοδος, η οποία επιτρέπει τον εντοπισμό αποκλίσεων στα προϊόντα πουλερικών. Ο αποχρωματισμός, ο σχηματισμός βλέννας και οι αλλαγές στην εμφάνιση της επιφάνειας είναι ορατά σημάδια αλλοίωσης. Ενώ οι παραδοσιακές οργανοληπτικές και οπτικές μέθοδοι είναι υποκειμενικές και εξαρτώνται από την ανθρώπινη ερμηνεία, παρέχουν ένα οικονομικά αποδοτικό μέσο έγκαιρης ανίχνευσης, που συχνά χρησιμεύει ως η πρώτη γραμμή άμυνας κατά της υποβαθμισμένης ποιότητας των πουλερικών τόσο στις μονάδες επεξεργασίας όσο και στο εμπόριο λιανικής πώλησης (B. Smith et al., 2020).

Αυτές οι παραδοσιακές μέθοδοι, αν και λιγότερο ακριβείς σε σύγκριση με τις σύγχρονες τεχνολογίες, εξακολουθούν να είναι πολύτιμες για τον έγκαιρο εντοπισμό πιθανής αλλοίωσης, συμβάλλοντας στα συνολικά μέτρα ελέγχου της ποιότητας που εφαρμόζονται στη βιομηχανία πουλερικών.

2.4.2. Μικροβιολογικές αναλύσεις

Οι μικροβιολογικές αναλύσεις αποτελούν ακρογωνιαίο λίθο στην αξιολόγηση της μικροβιακής ποιότητας και της ασφάλειας των προϊόντων πουλερικών. Οι παραδοσιακές μικροβιολογικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τυποποιημένες τεχνικές καταμέτρησης τρυβλίων (plate count techniques), όπου τα δείγματα καλλιεργούνται σε ειδικά υποστρώματα που περιέχουν θρεπτικά υλικά και άγαρ για την ποσοτικοποίηση του συνολικού βιώσιμου μικροβιακού πληθυσμού. Η προσέγγιση αυτή, όπως συζητείται από τους Garcia et al. (2019), παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με το συνολικό μικροβιακό φορτίο στα πουλερικά, επιτρέποντας την ευρεία αξιολόγηση της ποιότητας του προϊόντος (Garcia et al., 2019).

Τα επιλεκτικά και τα εκλεκτικά μέσα χρησιμοποιούνται για την απομόνωση και την ταυτοποίηση συγκεκριμένων μικροοργανισμών αλλοίωσης σε μικροβιολογικές δοκιμές. Για παράδειγμα, τα αλλοιογόνα βακτήρια, όπως η *Pseudomonas* και ο *Brochothrix thermosphacta*, μπορούν να εντοπιστούν με τη χρήση εκλεκτικού άγαρ, βοηθώντας στην ταυτοποίησή τους και στη ποσοτικοποίησή τους (Garcia et al., 2019). Ωστόσο, αυτές οι παραδοσιακές μέθοδοι είναι χρονοβόρες καθώς για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών απαιτούνται τουλάχιστον 48 ώρες και ενδέχεται να μην παρέχουν γρήγορα αποτελέσματα για τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο σε περιβάλλοντα επεξεργασίας με γρήγορους ρυθμούς.

Οι μικροβιολογικές δοκιμές διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της ασφάλειας και της ποιότητας των πουλερικών. Οι μέθοδοι αυτές βοηθούν στη συμμόρφωση με τα κανονιστικά πρότυπα και τις απαιτήσεις της βιομηχανίας, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για τα προγράμματα διασφάλισης ποιότητας. Ενώ οι παραδοσιακές μέθοδοι καταμέτρησης αποικιών προσφέρουν μια ολοκληρωμένη εικόνα των μικροβιακών πληθυσμών, οι τεχνικές PCR ενισχύουν την εξειδίκευση, επιτρέποντας την ακριβή ταυτοποίηση των μικροοργανισμών που προκαλούν αλλοίωση.

Η ενσωμάτωση των μικροβιολογικών δοκιμών στα πρωτόκολλα ποιοτικού ελέγχου δίνει τη δυνατότητα στη βιομηχανία πουλερικών να εφαρμόζει προληπτικά μέτρα και να διατηρεί υψηλά πρότυπα μικροβιακής ποιότητας, συμβάλλοντας στην παραγωγή ασφαλών και υγιεινών προϊόντων πουλερικών.

2.4.3. Μοριακές αναλύσεις

Με τις εξελίξεις στη μοριακή βιολογία, οι τεχνικές αλυσιδωτής αντίδρασης πολυμεράσης (PCR) έχουν αναδειχθεί ως ισχυρά εργαλεία στη μικροβιολογική εξέταση για αλλοίωση πουλερικών. Οι Jones και Johnson (2018) υπογραμμίζουν την εφαρμογή της PCR για την ανίχνευση συγκεκριμένου μικροβιακού DNA, προσφέροντας μια πιο γρήγορη και στοχευμένη προσέγγιση. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την ταυτοποίηση οργανισμών αλλοίωσης με υψηλή ευαισθησία και ειδικότητα, διευκολύνοντας την έγκαιρη ανίχνευση πιθανών προβλημάτων σε προϊόντα πουλερικών.

Οι μοριακές τεχνικές έχουν φέρει επανάσταση στην αξιολόγηση και τη μέτρηση της αλλοίωσης των πουλερικών, προσφέροντας εξαιρετικά ευαίσθητες, γρήγορες και ειδικές μεθόδους για την ανίχνευση μικροβιακών προσμίξεων, την παρακολούθηση βιοχημικών αλλαγών και την αξιολόγηση της ποιότητας του προϊόντος. Η αλυσιδωτή αντίδραση πολυμεράσης (PCR), η ποσοτική PCR (quantitative PCR, qPCR), η αλληλούχιση επόμενης γενιάς (Next Generation Sequencing, NGS) και η μεταγονιδιωματική ανάλυση αντιπροσωπεύουν ορισμένα από τα μοριακά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των μικροβιακών κοινοτήτων, τον εντοπισμό οργανισμών αλλοίωσης και τη διαλεύκανση των μηχανισμών αλλοίωσης σε προϊόντα πουλερικών.

Η αλυσιδωτή αντίδραση πολυμεράσης (PCR) έχει αναδειχθεί σε ισχυρό μοριακό εργαλείο για την ανίχνευση και τον ποσοτικό προσδιορισμό συγκεκριμένων μικροβιακών ειδών ή γενετικών δεικτών που σχετίζονται με την αλλοίωση των πουλερικών. Ενισχύοντας αλληλουχίες DNA-στόχου με τη χρήση ειδικών εκκινήτων και DNA πολυμεράσεων, η PCR επιτρέπει την ταχεία και ευαίσθητη ανίχνευση βακτηρίων αλλοίωσης, όπως *Pseudomonas* spp., *Enterobacter* spp. και *Brochothrix thermosphacta* (Ercolini et al., 2006). Η PCR πραγματικού χρόνου, ή ποσοτική PCR (qPCR), προσφέρει πρόσθετα πλεονεκτήματα, καθώς επιτρέπει την ποσοτικοποίηση του DNA-στόχου σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την ακριβή μέτρηση των

μικροβιακών φορτίων και της εξέλιξης της αλλοίωσης σε προϊόντα πουλερικών (Ercolini et al., 2012).

Επιπλέον, οι εξελίξεις στη βιοπληροφορική και τα εργαλεία ανάλυσης δεδομένων διευκολύνουν την ερμηνεία και την ενσωμάτωση των μοριακών δεδομένων που παράγονται από μελέτες αλλοίωσης πουλερικών. Οι βιοπληροφορικές σωληνώσεις και οι πλατφόρμες λογισμικού επιτρέπουν στους ερευνητές να αναλύουν δεδομένα NGS, να εκτελούν ταξινομική ταξινόμηση και να προσδιορίζουν λειτουργικά μονοπάτια που σχετίζονται με τη μικροβιακή χλωρίδα αλλοίωσης (Knight et al., 2018). Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης και τα μοντέλα πρόβλεψης αξιοποιούν μοριακά δεδομένα για την ανάπτυξη ισχυρών πλαισίων για την πρόβλεψη συμβάντων αλλοίωσης πουλερικών, τη βελτιστοποίηση των συνθηκών αποθήκευσης και τη βελτίωση των πρακτικών ασφάλειας τροφίμων (Batool et al., 2022).

2.4.4. Προηγμένες τεχνολογίες

Οι προηγμένες τεχνολογίες έχουν φέρει επανάσταση στην ανίχνευση της αλλοίωσης των πουλερικών, προσφέροντας ακρίβεια, ταχύτητα και αποτελεσματικότητα στην αξιολόγηση της ποιότητας του προϊόντος. Η αέρια χρωματογραφία-φασματομετρία μάζας (GC-MS) και οι τεχνολογίες ηλεκτρονικής μύτης (e-nose) έχουν αναδειχθεί ως εξελιγμένα εργαλεία για τον εντοπισμό πτητικών ενώσεων που σχετίζονται με την αλλοίωση. Όπως περιγράφεται από τους Garcia et al. (2019), η GC-MS επιτρέπει τον διαχωρισμό και την ανάλυση πολύπλοκων μιγμάτων πτητικών ενώσεων, παρέχοντας ένα λεπτομερές προφίλ της χημικής σύνθεσης των προϊόντων πουλερικών. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην ανίχνευση των δυσάρεστων γεύσεων και οσμών που σχετίζονται με την αλλοίωση, συμβάλλοντας σε μια πιο αντικειμενική αξιολόγηση της ποιότητας του προϊόντος.

Στη βιβλιογραφία έχει γίνει εκτεταμένη χρήση της φασματοσκοπίας FTIR σε συνδυασμό με τεχνικές μηχανικής εκπαίδευσης για τη γρήγορη αξιολόγηση της μικροβιολογικής ποιότητας των τροφίμων (He & Sun, 2015). Η μεγάλη διαστατικότητα των φασματικών δεδομένων αποτελεί σημαντικό πρόβλημα για τους μηχανικούς μηχανικής μάθησης, καθώς θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση των μοντέλων. Προκειμένου να επιλεγεί ένα υποσύνολο από συναφή και μη πλεονάζοντα χαρακτηριστικά, παρουσιάστηκε στην παρούσα μελέτη μια μέθοδο

επιλογής χαρακτηριστικών συνόλου που βασίζεται στον αλγόριθμο «extra-trees» (Cai et al., 2018).

Η τεχνολογία ηλεκτρονικής μύτης, από την άλλη πλευρά, μιμείται το ανθρώπινο οσφρητικό σύστημα, χρησιμοποιώντας αισθητήρες για την ανίχνευση και την ανάλυση πτητικών ενώσεων. Αυτοί οι αισθητήρες δημιουργούν ένα μοναδικό μοτίβο σε απόκριση σε συγκεκριμένες οσμές, επιτρέποντας την αναγνώριση πτητικών ουσιών που σχετίζονται με την αλλοίωση. Η ηλεκτρονική μύτη, όπως αναλύεται από τους Garcia et al. (2019), παρέχει μια γρήγορη και μη καταστροφική μέθοδο για την αξιολόγηση της ποιότητας των πουλερικών, προσφέροντας πλεονεκτήματα όσον αφορά την αποτελεσματικότητα και την ευαισθησία.

Οι τεχνικές αλληλουχίας υψηλής απόδοσης (High Performance Sequencing Techniques) έχουν μεταμορφώσει το τοπίο των μικροβιολογικών δοκιμών. Οι Silva et al. (2018) υπογραμμίζουν την εφαρμογή αυτών των τεχνικών για την ολοκληρωμένη μικροβιακή σκιαγράφηση προφίλ σε προϊόντα πουλερικών. Με την αλληλούχιση του μικροβιακού DNA, οι μέθοδοι υψηλής απόδοσης παρέχουν λεπτομερή κατανόηση των μικροβιακών κοινοτήτων που υπάρχουν, επιτρέποντας την ταυτοποίηση των οργανισμών αλλοίωσης και τη βαθύτερη κατανόηση της πολύπλοκης μικροβιακής οικολογίας που σχετίζεται με την αλλοίωση των πουλερικών.

Οι Dourou et al. (2021) διεξήγαγαν μια μελέτη για τη διερεύνηση της εφαρμογής της φασματοσκοπίας υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier (FTIR) σε συνδυασμό με αλγορίθμους μηχανικής εκμάθησης (machine learning) για την ταχεία αξιολόγηση της μικροβιακής ποιότητας του κοτόπουλου. Στόχος της μελέτης ήταν η ανάπτυξη μιας γρήγορης και μη καταστροφικής μεθόδου για την αξιολόγηση της μικροβιακής ποιότητας των σφάγιων κοτόπουλου, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της ποιότητας των τροφίμων στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας πουλερικών. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν τη φασματοσκοπία FTIR για την απόκτηση φασματικών δακτυλικών αποτυπωμάτων δειγμάτων κοτόπουλου, αποτυπώνοντας μοναδικές βιοχημικές πληροφορίες που σχετίζονται με τη μικροβιακή μόλυνση και αλλοίωση (Dourou et al., 2021).

Η φασματοσκοπία FTIR είναι μια ισχυρή αναλυτική τεχνική που παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη χημική σύνθεση και τη μοριακή δομή των δειγμάτων με βάση τα φάσματα απορρόφησής τους στο υπέρυθρο. Στη μελέτη τους, οι Dourou et al. χρησιμοποίησαν τη

φασματοσκοπία FTIR για να αναλύσουν τα φασματικά προφίλ δειγμάτων κοτόπουλου εμβολιασμένων με διαφορετικά μικροβιακά φορτία *Salmonella* spp. καταγράφοντας τους δονητικούς τύπους των χημικών δεσμών εντός των δειγμάτων, η φασματοσκοπία FTIR επέτρεψε τη διαφοροποίηση των μικροβιακών ομάδων και την ταυτοποίηση φασματικών δεικτών που σχετίζονται με την αλλοίωση. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, συγκεκριμένα μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machines, SVMs), για την ταξινόμηση και την πρόβλεψη των επιπέδων μικροβιακής μόλυνσης σε δείγματα κοτόπουλου με βάση τα φάσματα FTIR. Οι SVMs είναι μοντέλα εκμάθησης με επίβλεψη που αναλύουν και ταξινομούν δεδομένα εντοπίζοντας τα βέλτιστα «υπερεπίπεδα» (hyperplanes) που διαχωρίζουν διαφορετικές κλάσεις ή κατηγορίες εντός του συνόλου δεδομένων. Εκπαιδεύοντας τα SVMs σε ένα σύνολο δεδομένων που αποτελείται από φάσματα FTIR και αντίστοιχα επίπεδα μικροβιακής μόλυνσης, οι Dourou et al. ανέπτυξαν μοντέλα πρόβλεψης ικανά να αξιολογούν γρήγορα τη μικροβιακή ποιότητα δειγμάτων κοτόπουλου (Dourou et al., 2021).

Τα ευρήματα των Dourou et al. (2021) κατέδειξαν την αποτελεσματικότητα της φασματοσκοπίας FTIR σε συνδυασμό με τη μηχανική εκμάθηση για την ταχεία και ακριβή αξιολόγηση της μικροβιακής ποιότητας σε σφάγια κοτόπουλου. Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν παρουσίασαν υψηλή ευαισθησία και ειδικότητα στην ανίχνευση παθογόνων όπως *Salmonella* spp., επιτρέποντας έγκαιρες παρεμβάσεις για την πρόληψη τροφιμογενών ασθενειών και την ανάκληση προϊόντων σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας πουλερικών. Επιπλέον, η μη καταστροφική φύση της φασματοσκοπίας FTIR επιτρέπει την παρακολούθηση της μικροβιακής ποιότητας σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια διαφόρων σταδίων της επεξεργασίας πουλερικών, διευκολύνοντας προληπτικά μέτρα για τη διατήρηση της ασφάλειας των τροφίμων και τη συμμόρφωση με τα κανονιστικά πρότυπα (Dourou et al., 2021).

Η αέρια χρωματογραφία-φασματομετρία μάζας (GC-MS) είναι μια αναλυτική τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως στη μελέτη της αλλοίωσης των πουλερικών, προσφέροντας υψηλή ευαισθησία και εξειδίκευση για την ανίχνευση και την ταυτοποίηση πτητικών οργανικών ενώσεων που σχετίζονται με τη μικροβιακή ανάπτυξη, τις χημικές αντιδράσεις και τις ενζυματικές διαδικασίες αποικοδόμησης. Το GC-MS επιτρέπει τον διαχωρισμό, την ταυτοποίηση και τον ποσοτικό προσδιορισμό μεμονωμένων πτητικών ενώσεων που υπάρχουν σε πολύπλοκες μήτρες,

όπως τα προϊόντα πουλερικών, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για τις βιοχημικές οδούς και τους μηχανισμούς που διέπουν τα φαινόμενα αλλοίωσης.

Μια σημαντική εφαρμογή του GC-MS στην έρευνα για την αλλοίωση των πουλερικών είναι η ανάλυση των πτητικών μεταβολιτών που παράγονται κατά τη διάρκεια της μικροβιακής ανάπτυξης και της μεταβολικής δραστηριότητας. Μελέτες των Mann et al. (2018) χρησιμοποίησαν GC-MS για τον εντοπισμό πτητικών ενώσεων που σχετίζονται με βακτήρια αλλοίωσης, όπως *Pseudomonas* spp., *Enterobacter* spp. και *Brochothrix thermosphacta* σε προϊόντα πουλερικών. Με την ανάλυση του πτητικού προφίλ (headspace) των αλλοιωμένων δειγμάτων κοτόπουλου, οι ερευνητές μπορούν να προσδιορίσουν συγκεκριμένες πτητικές οργανικές ενώσεις που παράγονται από τα βακτήρια αλλοίωσης, συμπεριλαμβανομένων των θειούχων ενώσεων, των αλδεϋδών, των κετονών και των εστέρων, οι οποίες συμβάλλουν στη μεταβολή της επιθυμητής γεύσης, οσμής και στη συνολική οργανοληπτική αλλοίωση (Man et al., 2023).

Επιπλέον, το GC-MS επιτρέπει τον χαρακτηρισμό των προϊόντων οξείδωσης των λιπιδίων και των πτητικών υποπροϊόντων που σχηματίζονται κατά την αποικοδόμηση των ακόρεστων λιπαρών οξέων στο κρέας πουλερικών. Η έρευνα των Shahidi και Zhong (2010) κατέδειξε τη χρησιμότητα της GC-MS για τον ποσοτικό προσδιορισμό των πτητικών ενώσεων που προέρχονται από λιπίδια, όπως οι αλδεϋδες (π.χ. εξανάλη, επτανάλη) και οι αλκοόλες (π.χ. 1-πεντεν-3-όλη) που σχηματίζονται κατά την οξειδωτική τάγγιση σε προϊόντα κοτόπουλου. Αυτές οι ενώσεις χρησιμεύουν ως βιοδείκτες της οξείδωσης των λιπιδίων και της οξειδωτικής αλλοίωσης, επηρεάζοντας την οργανοληπτική ποιότητα, τη διάρκεια ζωής και τη διατροφική αξία του κρέατος πουλερικών (Shahidi & Zhong, 2010).

Εκτός από τη μικροβιακή και την οξειδωτική αλλοίωση, η GC-MS διευκολύνει την ανάλυση μη πτητικών ενώσεων και μεταβολιτών που σχετίζονται με τις διαδικασίες αλλοίωσης των πουλερικών. Για παράδειγμα, η GC-MS έχει χρησιμοποιηθεί για την ποσοτικοποίηση μη πτητικών βιογενών αμινών, συμπεριλαμβανομένων της ισταμίνης, της τυραμίνης και της πουτρεσκίνης, οι οποίες συσσωρεύονται σε αλλοιωμένα προϊόντα πουλερικών λόγω της μικροβιακής αποκαρβοξυλίωσης αμινοξέων (Bolumar et al., 2020). Τα αυξημένα επίπεδα βιογενών αμινών χρησιμεύουν ως δείκτες μικροβιακής δραστηριότητας και υποβάθμισης του

προϊόντος, ενέχοντας δυνητικούς κινδύνους για την υγεία, εάν καταναλωθούν σε μολυσμένο κρέας πουλερικών.

Επιπλέον, η GC-MS συμβάλλει στη διαλεύκανση της επίδρασης των τεχνικών επεξεργασίας, των συνθηκών αποθήκευσης και των υλικών συσκευασίας στο σχηματισμό πτητικών και μη πτητικών ενώσεων στα προϊόντα πουλερικών. Η έρευνα των Alves et al. (2017) διερεύνησε την επίδραση των διαφορετικών ατμοσφαιρικών συνθηκών συσκευασίας (π.χ. αέρας, κενό, τροποποιημένη ατμόσφαιρα) στον σχηματισμό πτητικών ενώσεων στο κρέας κοτόπουλου χρησιμοποιώντας ανάλυση GC-MS. Παρακολουθώντας τις αλλαγές στη σύνθεση και τη συγκέντρωση των πτητικών ενώσεων με την πάροδο του χρόνου, οι ερευνητές μπορούν να βελτιστοποιήσουν τις στρατηγικές συσκευασίας για την ελαχιστοποίηση της αλλοίωσης, την παράταση της διάρκειας ζωής και τη διατήρηση της ποιότητας του προϊόντος (Alves et al., 2017).

Η φασματοσκοπία στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα (NIR infrared spectroscopy) είναι μια διαφορετική προηγμένη τεχνολογία που κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος στην ανίχνευση της αλλοίωσης των πουλερικών. Αυτή η μη καταστροφική τεχνική αναλύει την αλληλεπίδραση μεταξύ υπέρυθρου φωτός και δειγμάτων πουλερικών, παρέχοντας ταχείες και ακριβείς πληροφορίες για διάφορες παραμέτρους ποιότητας, συμπεριλαμβανομένης της περιεκτικότητας σε υγρασία και της οξείδωσης των λιπιδίων. Η φασματοσκοπία NIR, όπως διερευνήθηκε από τους Garcia et al. (2019), ενισχύει την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών ελέγχου ποιότητας στη βιομηχανία πουλερικών (Garcia et al., 2019).

Συμπερασματικά, οι προηγμένες τεχνολογίες φέρνουν ένα νέο επίπεδο ακρίβειας στην ανίχνευση της αλλοίωσης των πουλερικών. Από την ανάλυση πτητικών ενώσεων έως την αλληλουχία μικροβιακού DNA και τη χρήση μη καταστροφικής φασματοσκοπίας, οι μέθοδοι αυτές προσφέρουν απaráμιλλες γνώσεις, επιτρέποντας στη βιομηχανία πουλερικών να διατηρεί υψηλά πρότυπα ποιότητας και ασφάλειας των προϊόντων.

Κεφάλαιο 3: Η αλλοίωση των πουλερικών στη βιομηχανία τροφίμων

3.1 Στρατηγικές για την πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών

Η πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών είναι μια πολύπλευρη πρόκληση για τη βιομηχανία τροφίμων, η οποία απαιτεί συνδυασμό στρατηγικών που αφορούν διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του προϊόντος. Οι στρατηγικές αυτές όχι μόνο διασφαλίζουν την ασφάλεια των καταναλωτών αλλά συμβάλλουν και στην οικονομική βιωσιμότητα της βιομηχανίας πουλερικών.

3.1.1 Ορθές Πρακτικές Παρασκευής (Good Manufacturing Practices, GMP)

Οι Ορθές Πρακτικές Παρασκευής (GMP) χρησιμεύουν ως θεμέλιο της παραγωγής πουλερικών, προσφέροντας μια συστηματική και προληπτική προσέγγιση για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της ποιότητας των προϊόντων πουλερικών. Όπως τονίζεται από τους Silva et al. (2018), οι GMP περιλαμβάνουν ένα ολοκληρωμένο σύνολο κατευθυντήριων γραμμών και διαδικασιών που εκτείνονται από τα αρχικά στάδια της επεξεργασίας πουλερικών έως την τελική συσκευασία. Στο επίκεντρο των GMP βρίσκεται η δέσμευση για την υγιεινή και την εξυγίανση, αναγνωρίζοντας ότι η μικροβιακή επιμόλυνση αποτελεί πρωταρχικό παράγοντα αλλοίωσης των πουλερικών (Silva et al., 2022).

Τήρηση των προτύπων υγιεινής: οι GMP δίνουν μεγάλη έμφαση στη διατήρηση υψηλών προτύπων υγιεινής σε όλη την αλυσίδα επεξεργασίας πουλερικών. Αυτό περιλαμβάνει αυστηρό καθαρισμό και απολύμανση του εξοπλισμού, των επιφανειών και του προσωπικού για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου διασταυρούμενης μικροβιακής μόλυνσης. Τα προγράμματα τακτικής εκπαίδευσης του προσωπικού σε θέματα υγιεινής αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των GMP, εξασφαλίζοντας την κοινή κατανόηση του κρίσιμου ρόλου που διαδραματίζει κάθε άτομο στην πρόληψη της αλλοίωσης.

Έλεγχος των περιβαλλοντικών παραγόντων: οι GMP αντιμετωπίζουν επίσης τις περιβαλλοντικές συνθήκες που μπορούν να συμβάλουν στην αλλοίωση. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας και της υγρασίας στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας, στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης και στη μεταφορά είναι ζωτικής σημασίας στοιχεία των GMP. Με τη βελτιστοποίηση αυτών των συνθηκών, περιορίζεται ο πολλαπλασιασμός των μικροοργανισμών που σχετίζονται με την αλλοίωση, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής των προϊόντων πουλερικών.

Ιχνηλασιμότητα και τεκμηρίωση: Οι GMP δίνουν έμφαση στην ιχνηλασιμότητα και την τεκμηρίωση, απαιτώντας λεπτομερή αρχεία για κάθε στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας. Αυτή η σχολαστική τεκμηρίωση όχι μόνο διευκολύνει τον εντοπισμό των πρώτων υλών και των διαδικασιών, αλλά επιτρέπει επίσης τον γρήγορο εντοπισμό και την ανάκληση δυνητικά εκτεθειμένων προϊόντων. Η πτυχή αυτή είναι ζωτικής σημασίας για τον έλεγχο της ποιότητας και τη συμμόρφωση με τις κανονιστικές διατάξεις.

Πρόληψη της διασταυρούμενης επιμόλυνσης: Η διασταυρούμενη επιμόλυνση αποτελεί σημαντική ανησυχία στην επεξεργασία πουλερικών και οι GMP προβλέπουν μέτρα για την πρόληψή της. Αυτό περιλαμβάνει τη δημιουργία ειδικών χώρων για τα διάφορα στάδια επεξεργασίας, την εφαρμογή εξοπλισμού με χρωματική κωδικοποίηση και την επιβολή αυστηρών πρακτικών υγιεινής κατά τη μετάβαση μεταξύ των εργασιών. Τα μέτρα αυτά είναι καθοριστικής σημασίας για την πρόληψη της μεταφοράς μικροοργανισμών που προκαλούν αλλοίωση από το ένα στάδιο στο άλλο.

Η ενσωμάτωση των GMP στην παραγωγή πουλερικών διασφαλίζει ότι οι κίνδυνοι αλλοίωσης αντιμετωπίζονται προληπτικά σε κάθε στάδιο. Δεν πρόκειται απλώς για ένα σύνολο κανονισμών, αλλά για μια φιλοσοφία που προάγει μια κουλτούρα υπευθυνότητας, ποιότητας και συνεχούς βελτίωσης στον κλάδο. Ως αποτέλεσμα, τα προϊόντα πουλερικών που παράγονται σύμφωνα με τα πρότυπα GMP όχι μόνο πληρούν τις κανονιστικές απαιτήσεις αλλά και υπερβαίνουν τις προσδοκίες των καταναλωτών όσον αφορά την ασφάλεια και τη ποιότητα (Silva et al., 2022).

3.1.2 Καινοτομίες στη συσκευασία

Οι καινοτομίες συσκευασίας βρίσκονται στην πρώτη γραμμή των στρατηγικών για την πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών, εισάγοντας λύσεις αιχμής που όχι μόνο παρατείνουν τη διάρκεια ζωής στο ράφι αλλά και βελτιώνουν τη συνολική ποιότητα και ασφάλεια των προϊόντων πουλερικών. Όπως διευκρινίζεται από τους Smith and Johnson (2018), η εξέλιξη των τεχνολογιών συσκευασίας έχει συμβάλει καθοριστικά στην αντιμετώπιση των πολύπλοκων προκλήσεων που σχετίζονται με τη μικροβιακή μόλυνση, την οξείδωση και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Συσκευασία τροποποιημένης ατμόσφαιρας (MAP): Μία από τις μετασχηματιστικές καινοτομίες στη συσκευασία πουλερικών είναι η συσκευασία τροποποιημένης ατμόσφαιρας

(MAP). Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει τη ρύθμιση της σύνθεσης των αερίων που περιβάλλουν το προϊόν πουλερικών, συνήθως με τη μείωση των επιπέδων οξυγόνου και την αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα και του αζώτου. Η ελεγχόμενη ατμόσφαιρα εμποδίζει την ανάπτυξη μικροοργανισμών που προκαλούν αλλοίωση και επιβραδύνει τις οξειδωτικές διεργασίες, διατηρώντας τη φρεσκάδα των πουλερικών. Το MAP έχει αποδειχθεί αποτελεσματικό στη διατήρηση του χρώματος, της γεύσης και της υφής των προϊόντων πουλερικών, καθώς και στην παράταση της διάρκειας ζωής τους.

Συσκευασία υπό κενό: Η συσκευασία υπό κενό είναι ένας άλλος ακρογωνιαίος λίθος στη σφαίρα της συντήρησης των πουλερικών. Η μέθοδος αυτή αφαιρεί τον αέρα από τη συσκευασία, δημιουργώντας κενό που εμποδίζει την ανάπτυξη βακτηρίων και μυκήτων που προκαλούν αλλοίωση. Εξαλείφοντας το οξυγόνο που τροφοδοτεί τις οξειδωτικές αντιδράσεις, η συσκευασία κενού μειώνει σημαντικά τον κίνδυνο οξείδωσης των λιπιδίων, μια διαδεδομένη αιτία αλλοίωσης. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα πολύτιμη για τεμάχια πουλερικών και μεταποιημένα προϊόντα, παρέχοντας ένα προστατευτικό φράγμα έναντι εξωτερικών μολυσματικών παραγόντων και διατηρώντας την ακεραιότητα του προϊόντος.

Αντιμικροβιακά υλικά συσκευασίας: Οι καινοτομίες στη συσκευασία επεκτείνονται πέρα από το φυσικό περίβλημα των προϊόντων πουλερικών. Οι Garcia et al. (2019) ρίχνουν φως στην εμφάνιση αντιμικροβιακών υλικών συσκευασίας που έχουν σχεδιαστεί για να αναστέλλουν ενεργά την ανάπτυξη μικροοργανισμών που προκαλούν αλλοίωση. Τα υλικά αυτά μπορούν να ενσωματώνουν φυσικούς αντιμικροβιακούς παράγοντες, όπως αιθέρια έλαια ή οργανικά οξέα, που διαχέονται στο προϊόν πουλερικών και δημιουργούν ένα πρόσθετο στρώμα προστασίας από τη μόλυνση. Η αντιμικροβιακή συσκευασία συμβάλλει τόσο στην ασφάλεια όσο και στην οργανοληπτική ποιότητα των πουλερικών, ευθυγραμμιζόμενη με τη δέσμευση του κλάδου να παρέχει προϊόντα που ανταποκρίνονται ή υπερβαίνουν τις προσδοκίες των καταναλωτών.

Οι αντιμικροβιακοί παράγοντες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών εντός της συσκευασίας πουλερικών, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια και τη μακροζωία των προϊόντων πουλερικών για κατανάλωση. Τα πουλερικά, που είναι ένα εξαιρετικά ευπαθές τρόφιμο, είναι ευάλωτα σε μικροβιακή μόλυνση και αλλοίωση κατά τα στάδια της επεξεργασίας, της αποθήκευσης και της μεταφοράς. Για να μετριαστούν αυτοί οι

κίνδυνοι, χρησιμοποιούνται διάφοροι αντιμικροβιακοί παράγοντες στη συσκευασία πουλερικών για την αναστολή της ανάπτυξης επιβλαβών μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, ζύμες και μύκητες.

Ένας από τους συνήθως χρησιμοποιούμενους αντιμικροβιακούς παράγοντες στη συσκευασία πουλερικών είναι οι ενώσεις με βάση το χλώριο. Οι ενώσεις με βάση το χλώριο, όπως το διοξείδιο του χλωρίου και το υποχλωριώδες οξύ, είναι αποτελεσματικές στη μείωση της μικροβιακής μόλυνσης στις επιφάνειες των πουλερικών και στα υλικά συσκευασίας (Jay, Loessner, & Golden, 2005). Οι ενώσεις αυτές δρουν διαταράσσοντας τις κυτταρικές δομές των μικροοργανισμών, αναστέλλοντας έτσι την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό τους. Ωστόσο, οι ανησυχίες σχετικά με τον σχηματισμό δυνητικά επιβλαβών παραπροϊόντων απολύμανσης και την ανάπτυξη μικροβιακής ανθεκτικότητας έχουν ωθήσει στην έρευνα για εναλλακτικούς αντιμικροβιακούς παράγοντες (Jay et al., 2005a).

Η ενσωμάτωση αυτών των καινοτομιών συσκευασίας στην αλυσίδα εφοδιασμού πουλερικών αναδεικνύει μια προληπτική προσέγγιση για την πρόληψη της αλλοίωσης. Οι τεχνολογίες αυτές όχι μόνο αντιμετωπίζουν τις άμεσες προκλήσεις που θέτουν οι μικροβιακές προσμίξεις και οι οξειδωτικές αντιδράσεις, αλλά ανοίγουν επίσης το δρόμο για βιώσιμες πρακτικές που μειώνουν τα απόβλητα τροφίμων. Καθώς η βιομηχανία πουλερικών συνεχίζει να αγκαλιάζει τις εξελίξεις στη συσκευασία, ενισχύει την αφοσίωσή της στην παροχή φρέσκων, ασφαλών και υψηλής ποιότητας προϊόντων στους καταναλωτές (Jay et al., 2005a).

3.1.3 Χημικές παρεμβάσεις (Chemical Interventions)

3.1.3 Χημικές παρεμβάσεις

Οι χημικές παρεμβάσεις διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση της ποιότητας και της ακεραιότητας των προϊόντων πουλερικών, προσφέροντας στοχευμένες λύσεις για τον μετριασμό των παραγόντων αλλοίωσης, όπως η μικροβιακή μόλυνση και οι οξειδωτικές διεργασίες. Όπως υπογραμμίζεται από τους Jones and Johnson (2018), η συνετή χρήση αντιοξειδωτικών και αντιμικροβιακών παραγόντων ευθυγραμμίζεται με τη δέσμευση της βιομηχανίας πουλερικών να παρέχει ασφαλή, γευστικά και βιώσιμα προϊόντα (Jones et al., 2018).

Αντιοξειδωτικά για την καταπολέμηση των οξειδωτικών διεργασιών: Η οξείδωση των λιπιδίων είναι ένας κοινός ένοχος για την αλλοίωση των πουλερικών, που οδηγεί σε αλλοιωμένες γεύσεις και υποβαθμισμένη ποιότητα του προϊόντος. Οι Jones and Johnson (2018) υπογραμμίζουν τη σημασία των αντιοξειδωτικών στον μετριασμό των οξειδωτικών διεργασιών. Η ενσωμάτωση φυσικών αντιοξειδωτικών, όπως η βιταμίνη E, στις ζωοτροφές πουλερικών αποτελεί μια προληπτική στρατηγική για την ενίσχυση της οξειδωτικής σταθερότητας του κρέατος κατά την αποθήκευση και τη μεταφορά. Με την απομάκρυνση των ελεύθερων ριζών και την αναστολή της οξείδωσης των λιπιδίων, τα αντιοξειδωτικά συμβάλλουν στη διατήρηση της νωπότητας των πουλερικών, διασφαλίζοντας ότι τα προϊόντα ανταποκρίνονται στις προσδοκίες των καταναλωτών όσον αφορά τη γεύση και το άρωμα (Jones et al., 2018).

Αντιμικροβιακοί παράγοντες για τον έλεγχο των μικροβίων: Οι χημικές παρεμβάσεις επεκτείνονται και στον μικροβιακό έλεγχο, με τους αντιμικροβιακούς παράγοντες να διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην πρόληψη του πολλαπλασιασμού των βακτηρίων που σχετίζονται με την αλλοίωση. Οι Jones και Johnson (2018) υπογραμμίζουν την αποτελεσματικότητα των αντιμικροβιακών παραγόντων, όπως τα οργανικά οξέα, στον έλεγχο της ανάπτυξης παθογόνων μικροοργανισμών όπως το *Campylobacter* στα πουλερικά. Η ενσωμάτωση αυτών των παραγόντων στις πρακτικές επεξεργασίας συμβάλλει στη διατήρηση της μικροβιακής ποιότητας, διασφαλίζοντας ότι τα προϊόντα πουλερικών φτάνουν στους καταναλωτές με μειωμένο κίνδυνο αλλοίωσης. Ωστόσο, η υπεύθυνη και συνετή χρήση, τηρώντας τα κανονιστικά πρότυπα, είναι επιτακτική ανάγκη για την αποφυγή ανεπιθύμητων συνεπειών και τη διατήρηση της εμπιστοσύνης των καταναλωτών στην ασφάλεια των προϊόντων πουλερικών (Jones et al., 2018).

Τα οργανικά οξέα αντιπροσωπεύουν μια άλλη ομάδα αντιμικροβιακών παραγόντων που χρησιμοποιούνται στη συσκευασία πουλερικών για την πρόληψη της αλλοίωσης. Τα οργανικά οξέα, συμπεριλαμβανομένου του οξικού οξέος, του γαλακτικού οξέος και του κιτρικού οξέος, παρουσιάζουν αντιμικροβιακές ιδιότητες έναντι ενός ευρέος φάσματος μικροοργανισμών που απαντώνται συνήθως σε προϊόντα πουλερικών (Lücke, 2000). Αυτά τα οξέα μειώνουν το pH του περιβάλλοντος, δημιουργώντας δυσμενείς συνθήκες για την ανάπτυξη και την επιβίωση των μικροβίων. Επιπλέον, τα οργανικά οξέα παρεμβαίνουν στις μεταβολικές διεργασίες των

μικροβίων, αναστέλλοντας περαιτέρω την ικανότητά τους να πολλαπλασιάζονται και να προκαλούν αλλοίωση (Lücke, 2000).

Επιπλέον, τα αιθέρια έλαια που προέρχονται από φυτά έχουν αναδειχθεί ως πολλά υποσχόμενοι φυσικοί αντιμικροβιακοί παράγοντες για εφαρμογές συσκευασίας πουλερικών. Τα αιθέρια έλαια, όπως το έλαιο ρίγανης, το έλαιο θυμαριού και το έλαιο κανέλας, περιέχουν βιοδραστικές ενώσεις γνωστές για τις αντιμικροβιακές τους ιδιότητες (Burt, 2004). Οι ενώσεις αυτές διαταράσσουν τις μικροβιακές κυτταρικές μεμβράνες και τις ενζυματικές διεργασίες, αναστέλλοντας αποτελεσματικά την ανάπτυξη των μικροοργανισμών που προκαλούν αλλοίωση στα προϊόντα πουλερικών. Επιπλέον, τα αιθέρια έλαια προσφέρουν το πλεονέκτημα ότι αποτελούν φυσικές, μη τοξικές εναλλακτικές λύσεις σε σχέση με τους συνθετικούς αντιμικροβιακούς παράγοντες (Burt, 2004).

Ολοκληρωμένες προσεγγίσεις για την ολοκληρωμένη πρόληψη της αλλοίωσης: Η ανάπτυξη χημικών παρεμβάσεων στην παραγωγή πουλερικών δεν είναι μεμονωμένη, αλλά μάλλον ενσωματωμένη σε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση. Οι Diana et al. (2020) τονίζουν την ανάγκη για συνέργεια μεταξύ των διαφόρων παρεμβάσεων για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός αντιοξειδωτικών με αποτελεσματικές πρακτικές υγιεινής μπορεί να δημιουργήσει μια ισχυρή άμυνα τόσο κατά της οξειδωτικής όσο και κατά της μικροβιακής αλλοίωσης. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση ευθυγραμμίζεται με τις βέλτιστες πρακτικές του κλάδου, εξασφαλίζοντας μια πολύπλευρη στρατηγική που αντιμετωπίζει τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις που επηρεάζουν την ποιότητα των πουλερικών (Diana et al., 2020).

3.1.4 Διαχείριση ψυκτικής αλυσίδας

Η διαχείριση της ψυκτικής αλυσίδας αποτελεί απαραίτητη στρατηγική για την πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών, ιδίως δεδομένης της ευαισθησίας της μικροβιακής ανάπτυξης και των ενζυμικών αντιδράσεων στη θερμοκρασία. Όπως τονίζεται από τους Johnson et al. (2019), η διατήρηση μιας συνεπούς και ελεγχόμενης ψυκτικής αλυσίδας από τις μονάδες επεξεργασίας έως τα καταστήματα λιανικής πώλησης και τα νοικοκυριά είναι υψίστης σημασίας για τη διατήρηση της ποιότητας, της ασφάλειας και της διάρκειας ζωής των προϊόντων πουλερικών.

Κρίσιμος ρόλος στην αναστολή του βακτηριακού πολλαπλασιασμού: Η διαχείριση της ψυκτικής αλυσίδας αντιμετωπίζει άμεσα την ανάπτυξη ψυχρότροφων βακτηρίων, όπως το *Brochothrix thermosphacta* και τα *Pseudomonas spp.*, τα οποία μπορούν να αναπτυχθούν υπό συνθήκες ψύξης. Οι Johnson et al. (2023) τονίζουν ότι τα εν λόγω βακτήρια είναι κοινοί παράγοντες που συμβάλλουν στην αλλοίωση των πουλερικών, προκαλώντας δυσάρεστες οσμές και αλλαγές στην υφή ακόμη και υπό ψύξη. Οι κατάλληλες συνθήκες ψύξης και αποθήκευσης αναστέλλουν τον πολλαπλασιασμό αυτών των βακτηρίων, διασφαλίζοντας ότι τα προϊόντα πουλερικών διατηρούν τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά τους και ανταποκρίνονται στις προσδοκίες των καταναλωτών για τη νωπότητα (Johnson et al., 2023).

Ελαχιστοποίηση των ενζυμικών αντιδράσεων: Εκτός από τις μικροβιακές ανησυχίες, η διαχείριση της ψυκτικής αλυσίδας μετριάζει αποτελεσματικά τις ενζυματικές αντιδράσεις που συμβάλλουν στην αλλοίωση. Τα ένζυμα που είναι υπεύθυνα για την οξείδωση και την αποικοδόμηση των λιπιδίων είναι ευαίσθητα στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Διατηρώντας χαμηλές και σταθερές θερμοκρασίες σε όλη την ψυκτική αλυσίδα, η βιομηχανία μετριάζει τον κίνδυνο ενζυματικής αλλοίωσης. Αυτό όχι μόνο διατηρεί τη γεύση και την υφή των πουλερικών αλλά και παρατείνει τη συνολική διάρκεια ζωής του προϊόντος.

Διασφάλιση της συμμόρφωσης μέσω της παρακολούθησης και της κατάρτισης: Η επιτυχής διαχείριση της ψυκτικής αλυσίδας περιλαμβάνει σχολαστική παρακολούθηση και τήρηση των τυποποιημένων διαδικασιών λειτουργίας. Η συνεχής παρακολούθηση της θερμοκρασίας κατά τη μεταφορά, την αποθήκευση και την έκθεση είναι απαραίτητη για τον άμεσο εντοπισμό και τη διόρθωση τυχόν αποκλίσεων. Η εκπαίδευση του προσωπικού σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού είναι εξίσου κρίσιμη για να διασφαλιστεί ότι όλοι οι εμπλεκόμενοι κατανοούν τη σημασία της διατήρησης της ακεραιότητας της ψυκτικής αλυσίδας. Τα προγράμματα ευαισθητοποίησης που δίνουν έμφαση στον αντίκτυπο της κατάχρησης της θερμοκρασίας στην ποιότητα των πουλερικών συμβάλλουν σε μια κουλτούρα υπευθυνότητας και αριστείας.

3.2 Προκλήσεις και μελλοντικές κατευθύνσεις

Η αλλοίωση των πουλερικών στη βιομηχανία τροφίμων παρουσιάζει συνεχείς προκλήσεις που απαιτούν συνεχή προσοχή και καινοτόμες λύσεις. Η κατανόηση των τρεχουσών προκλήσεων, η

διερεύνηση των αναδυόμενων τεχνολογιών και ο εντοπισμός τομέων για μελλοντική έρευνα αποτελούν κρίσιμα βήματα για την προώθηση των στρατηγικών πρόληψης της αλλοίωσης των πουλερικών.

3.2.1 Τρέχουσες προκλήσεις στην πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών

Η προστασία των προϊόντων πουλερικών από την αλλοίωση αποτελεί μια πολύπλευρη πρόκληση στο δυναμικό τοπίο της βιομηχανίας τροφίμων καθώς και στους τομείς της έρευνας που ασχολούνται με τη μικροβιακή αλλοίωση ζωικών προϊόντων. Οι τρέχουσες προκλήσεις στην πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών περιλαμβάνουν τη μικροβιακή αντοχή, την πολυπλοκότητα της παγκόσμιας αλυσίδας εφοδιασμού και τη λεπτή ισορροπία μεταξύ των προτιμήσεων των καταναλωτών και των στόχων βιωσιμότητας.

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η βιομηχανία πουλερικών είναι η συνεχής εξέλιξη μικροβιακών στελεχών ανθεκτικών στα γνωστά αντιβιοτικά σκευάσματα. Οι Wang et al. (2020) τόνισαν την προσαρμοστικότητα των βακτηρίων που σχετίζονται με αλλοιώσεις στα υπάρχοντα μέτρα ελέγχου. Η εμφάνιση ανθεκτικών στελεχών καθιστά αναγκαία τη συνεχή επιτήρηση και την ανάπτυξη καινοτόμων στρατηγικών για την αντιμετώπιση του εξελισσόμενου μικροβιακού τοπίου, διασφαλίζοντας την αποτελεσματικότητα των προσπαθειών πρόληψης της αλλοίωσης (Wang et al., 2020).

Η περίπλοκη φύση των παγκόσμιων αλυσίδων εφοδιασμού πουλερικών εισάγει ένα σημαντικό εμπόδιο στη διατήρηση της συνεπούς διαχείρισης της ψυκτικής αλυσίδας. Όπως τονίζεται από τους Smith et al. (2021), η μεταβλητότητα των συνθηκών μεταφοράς και αποθήκευσης, ιδίως στο διεθνές εμπόριο, αποτελεί κίνδυνο για την ποιότητα και την ασφάλεια των προϊόντων πουλερικών. Η πρόκληση έγκειται στην εναρμόνιση της εφοδιαστικής ψυκτικής αλυσίδας σε διαφορετικά περιβάλλοντα, όπου απρόβλεπτες διαταραχές μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα της ψυκτικής αλυσίδας και να επιταχύνουν την αλλοίωση των πουλερικών. Η ανάπτυξη ανθεκτικών λύσεων για την αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας των παγκόσμιων αλυσίδων εφοδιασμού καθίσταται επιτακτική ανάγκη για τη διασφάλιση της φρεσκάδας των πουλερικών (E. Smith et al., 2021).

Η ικανοποίηση των απαιτήσεων των καταναλωτών για ελάχιστα επεξεργασμένα προϊόντα πουλερικών χωρίς συντηρητικά και η ευθυγράμμιση με τους στόχους της αειφορίας

είναι μια λεπτή πράξη ισορροπίας. Οι Kalaiikannan et al. (2022) υπογραμμίζουν την πρόκληση της διαμόρφωσης στρατηγικών πρόληψης της αλλοίωσης που να ανταποκρίνονται στις εξελισσόμενες προτιμήσεις των καταναλωτών. Καθώς οι καταναλωτές δίνουν ολοένα και μεγαλύτερη προτεραιότητα στα φυσικά, βιώσιμα και καθαρά προϊόντα, ο κλάδος παλεύει με την ανάγκη να καινοτομήσει, διασφαλίζοντας παράλληλα τη μακροζωία και την ασφάλεια των προϊόντων πουλερικών. Η εξεύρεση ισορροπίας μεταξύ της ικανοποίησης αυτών των προσδοκιών των καταναλωτών και της διατήρησης βιώσιμων πρακτικών παραγωγής αποτελεί κρίσιμη πρόκληση για τους παραγωγούς και τους μεταποιητές πουλερικών (Kalaiikannan et al., 2022).

Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί μια ολοκληρωμένη και συνεργατική προσέγγιση. Για την καταπολέμηση της μικροβιακής αντοχής, η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην κατανόηση των γενετικών μηχανισμών της αντοχής και στην ανάπτυξη εναλλακτικών αντιμικροβιακών στρατηγικών. Για την αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας της αλυσίδας εφοδιασμού, οι καινοτόμες τεχνολογίες για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και την προσαρμοστική εφοδιαστική θα μπορούσαν να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα της ψυκτικής αλυσίδας. Επιπλέον, η ευθυγράμμιση των στρατηγικών πρόληψης της αλλοίωσης με τις προτιμήσεις των καταναλωτών προϋποθέτει την ενεργό εμπλοκή και επικοινωνία μεταξύ της βιομηχανίας και των καταναλωτών, προωθώντας έναν διαφανή διάλογο που ενημερώνει τόσο την ανάπτυξη προϊόντων όσο και τις στρατηγικές μάρκετινγκ.

Οι προκλήσεις στην πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών υπογραμμίζουν την ανάγκη για προληπτικές και προσαρμοστικές στρατηγικές. Καθώς ο κλάδος αντιμετωπίζει αυτές τις προκλήσεις, ανοίγει ταυτόχρονα δρόμους για καινοτομία, συνεργασία και συνεχή βελτίωση. Με την αντιμετώπιση της μικροβιακής αντοχής, τη βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας και την ευθυγράμμιση με τις προσδοκίες των καταναλωτών, ο τομέας των πουλερικών μπορεί να ανοίξει το δρόμο για ένα μέλλον όπου η πρόληψη της αλλοίωσης δεν θα είναι μόνο αποτελεσματική αλλά και βιώσιμη και με γνώμονα τον καταναλωτή.

3.2.2 Αναδυόμενες τεχνολογίες και ερευνητικοί τομείς

Το τοπίο της πρόληψης της αλλοίωσης των πουλερικών εξελίσσεται συνεχώς, γεγονός που οδηγεί σε μια κριτική εξέταση τόσο των προκλήσεων όσο και των αναδυόμενων δρόμων για

έρευνα και τεχνολογικές εξελίξεις. Η παρούσα ενότητα περιγράφει τις τρέχουσες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η βιομηχανία πουλερικών και διερευνά τους ελπιδοφόρους ορίζοντες των αναδυόμενων τεχνολογιών και ερευνητικών τομέων που θα μπορούσαν να διαμορφώσουν το μέλλον της πρόληψης της αλλοίωσης.

Οι προκλήσεις που σχετίζονται με την αλλοίωση των πουλερικών είναι πολύπλευρες, με την αντοχή των μικροβίων να αποτελεί εξέχουσα ανησυχία. Οι Wang et al. (2020) υπογραμμίζουν την επίμονη προσαρμογή των βακτηρίων που σχετίζονται με την αλλοίωση σε συμβατικές αντιμικροβιακές θεραπείες. Αυτή η εξέλιξη απαιτεί την αδιάκοπη αναζήτηση καινοτόμων στρατηγικών για την αντιμετώπιση του δυναμικού μικροβιακού τοπίου, διασφαλίζοντας ότι τα μέτρα πρόληψης της αλλοίωσης παραμένουν αποτελεσματικά και προσαρμόσιμα στις αναδυόμενες απειλές (Wang et al., 2020).

Η πλοήγηση στην πολυπλοκότητα των παγκόσμιων αλυσίδων εφοδιασμού αποτελεί μια δεύτερη πρόκληση για την πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών. Οι Smith et al. (2021) φωτίζουν την περίπλοκη φύση των συνθηκών μεταφοράς και αποθήκευσης, ιδίως στο πλαίσιο του διεθνούς εμπορίου. Η μεταβλητότητα που ενυπάρχει σε αυτές τις παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού εισάγει έναν εγγενή κίνδυνο για την ποιότητα και την ασφάλεια των προϊόντων πουλερικών, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη ανθεκτικών λύσεων για την εναρμόνιση και τη διασφάλιση της ψυκτικής αλυσίδας σε διαφορετικά περιβάλλοντα (E. Smith et al., 2021).

Παράλληλα με αυτές τις προκλήσεις, οι αναδυόμενες τεχνολογίες και οι ερευνητικοί τομείς προσφέρουν ελπιδοφόρες προοπτικές για την προώθηση της πρόληψης της αλλοίωσης των πουλερικών. Η υπερφασματική απεικόνιση και οι ηλεκτρονικές μύτες, όπως συζητείται από τους Mikš-Krajnik et al. (2019), αντιπροσωπεύουν τεχνολογίες αιχμής για την ανίχνευση που παρέχουν αξιολογήσεις της ποιότητας των προϊόντων πουλερικών σε πραγματικό χρόνο. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν τη δυνατότητα να φέρουν επανάσταση στην ανίχνευση αλλοίωσης προσφέροντας ακριβείς, αντικειμενικές και γρήγορες αξιολογήσεις, επιτρέποντας έτσι προληπτικές παρεμβάσεις στην αλυσίδα εφοδιασμού πουλερικών (Mikš-Krajnik et al., 2017).

Επιπλέον, η εφαρμογή των νανοϋλικών στη συσκευασία αναδεικνύεται ως μια πρωτοποριακή οδός για την παράταση της διάρκειας ζωής των προϊόντων πουλερικών. Οι Han et al. (2019) εμβαθύνουν στην αξιοποίηση νανοσύνθετων υλικών στη συσκευασία πουλερικών,

αποδεικνύοντας τη δυνατότητά τους να ενισχύουν τις ιδιότητες φραγμού, να αποτρέπουν την είσοδο μικροβίων και να μετριάζουν την αλλοίωση. Ως καινοτόμο σύνορο, η νανοτεχνολογία στη συσκευασία παρουσιάζει ένα βιώσιμο και αποτελεσματικό μέσο για την αντιμετώπιση των προκλήσεων αλλοίωσης που σχετίζονται με τη μικροβιακή μόλυνση.

Οι στρατηγικές βιοσυντήρησης, οι οποίες επικεντρώνονται σε φυσικές αντιμικροβιακές ενώσεις που προέρχονται από φυτά και αιθέρια έλαια, αποτελούν έναν άλλο πολλά υποσχόμενο τομέα έρευνας για την πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών. Οι Pandey et al. (2021) διευκρινίζουν την αποτελεσματικότητα των αντιμικροβιακών ουσιών φυτικής προέλευσης στον έλεγχο των μικροοργανισμών αλλοίωσης, προσφέροντας εναλλακτικές λύσεις φιλικές προς το περιβάλλον. Η διερεύνηση αυτών των φυσικών ενώσεων ευθυγραμμίζεται με τη δέσμευση της βιομηχανίας για βιώσιμες πρακτικές και την αυξανόμενη ζήτηση των καταναλωτών για προϊόντα καθαρής ετικέτας και ελάχιστα επεξεργασμένα προϊόντα (Pandey et al., 2021).

Η επεξεργασία υπό υπερυψηλή πίεση (High Pressure Processing, HPP) είναι μια μη θερμική τεχνική συντήρησης τροφίμων που έχει κερδίσει σημαντική προσοχή στη βιομηχανία πουλερικών λόγω της ικανότητάς της να παρατείνει τη διάρκεια ζωής και να ενισχύει την ασφάλεια χωρίς να διακυβεύεται η ποιότητα του προϊόντος λόγω υψηλών θερμοκρασιών. Η επεξεργασία υψηλής πίεσης περιλαμβάνει την υποβολή συσκευασμένων προϊόντων πουλερικών σε υψηλές πιέσεις, που συνήθως κυμαίνονται από 100 έως 600 MPa, για την αδρανοποίηση μικροοργανισμών και ενζύμων που ευθύνονται για την αλλοίωση και τις τροφιμογενείς ασθένειες (Cheftel, 1995). Η HPP μειώνει αποτελεσματικά τους μικροβιακούς πληθυσμούς, διατηρώντας παράλληλα τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και τη θρεπτική ακεραιότητα των προϊόντων πουλερικών (Cheftel, 1995).

Η εφαρμογή της HPP στην επεξεργασία πουλερικών προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους θερμικής επεξεργασίας. Σε αντίθεση με τη θερμική παστερίωση, η οποία μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες αλλαγές στην υφή, τη γεύση και το θρεπτικό περιεχόμενο, η HPP διατηρεί τη φρεσκάδα και τα φυσικά χαρακτηριστικά των προϊόντων πουλερικών (Yuste et al., 2001). Επιπλέον, η HPP εξαλείφει την ανάγκη για χημικά συντηρητικά και πρόσθετα, ευθυγραμμιζόμενη με τις προτιμήσεις των καταναλωτών για καθαρή ετικέτα και ελάχιστα επεξεργασμένα τρόφιμα (Yuste et al., 2001).

Έρευνες έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητα της HPP στον έλεγχο παθογόνων μικροοργανισμών που συνήθως συνδέονται με προϊόντα πουλερικών, συμπεριλαμβανομένων της *Salmonella*, του *Campylobacter* και της *Listeria monocytogenes* (López-Caballero et al., 2005). Η HPP διαταράσσει τις κυτταρικές δομές των μικροοργανισμών, οδηγώντας σε μη αναστρέψιμη βλάβη και αδρανοποίηση των μικροβίων. Επιπλέον, η HPP μπορεί να διεισδύσει βαθιά στον ιστό των πουλερικών, φτάνοντας σε περιοχές απρόσιτες για επιφανειακές επεξεργασίες, ενισχύοντας έτσι τον μικροβιακό έλεγχο και εξασφαλίζοντας την ασφάλεια του προϊόντος.

Παρά την αποτελεσματικότητά της, η ευρεία υιοθέτηση της HPP στη βιομηχανία πουλερικών αντιμετωπίζει προκλήσεις που σχετίζονται με το κόστος του εξοπλισμού, την επεκτασιμότητα της επεξεργασίας και την αποδοχή των καταναλωτών (Patterson, 2005). Ωστόσο, η συνεχιζόμενη έρευνα και οι τεχνολογικές εξελίξεις αποσκοπούν στην αντιμετώπιση αυτών των εμποδίων και στη βελτιστοποίηση της HPP ως βιώσιμης παρέμβασης για την ασφάλεια των τροφίμων στην επεξεργασία πουλερικών (Patterson, 2005).

3.2.3 Συστάσεις για μελλοντική έρευνα

Η πορεία της πρόληψης της αλλοίωσης των πουλερικών απαιτεί όχι μόνο την κατανόηση των σημερινών προκλήσεων και των αναδυόμενων τεχνολογιών, αλλά και ένα προληπτικό όραμα για μελλοντικές ερευνητικές πρωτοβουλίες. Η παρούσα ενότητα διατυπώνει συστάσεις για μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες που αποσκοπούν στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας της βιομηχανίας πουλερικών έναντι της αλλοίωσης.

Η κατανόηση των γενετικών μηχανισμών που διέπουν τη μικροβιακή ανθεκτικότητα είναι υψίστης σημασίας για την ανάπτυξη στοχευμένων παρεμβάσεων. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να εμβαθύνει στην περίπλοκη μικροβιακή δυναμική της αλλοίωσης των πουλερικών, διακρίνοντας τις γενετικές προσαρμογές των βακτηρίων που σχετίζονται με την αλλοίωση. Με τη διαλεύκανση αυτών των μηχανισμών, οι ερευνητές μπορούν να διαμορφώσουν ακριβείς στρατηγικές για την αντιμετώπιση της μικροβιακής αντοχής, εξασφαλίζοντας τη μακροβιότητα των αντιμικροβιακών θεραπειών.

Παράλληλα, η διερεύνηση καινοτόμων τεχνολογιών για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και την προσαρμοστική εφοδιαστική είναι επιτακτική ανάγκη για την εναρμόνιση της παγκόσμιας αλυσίδας εφοδιασμού πουλερικών. Η ανάπτυξη προηγμένων

τεχνολογιών ανίχνευσης και λύσεων εφοδιαστικής με βάση τα δεδομένα μπορεί να ενισχύσει την ανθεκτικότητα της διαχείρισης της ψυκτικής αλυσίδας, ελαχιστοποιώντας τη μεταβλητότητα και βελτιστοποιώντας τις συνθήκες μεταφοράς και αποθήκευσης προϊόντων πουλερικών σε διαφορετικά περιβάλλοντα.

Η ευθυγράμμιση των στρατηγικών πρόληψης της αλλοίωσης με τις προτιμήσεις των καταναλωτών προϋποθέτει τη σε βάθος κατανόηση της διασταύρωσης μεταξύ των απαιτήσεων των καταναλωτών και των στόχων βιωσιμότητας. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να περιλαμβάνει ολοκληρωμένες μελέτες των καταναλωτών για την αποκάλυψη των προτιμήσεων, των αντιλήψεων και των ανησυχιών σχετικά με τα προϊόντα πουλερικών. Η γνώση αυτή μπορεί να δώσει πληροφορίες για την ανάπτυξη στρατηγικών πρόληψης της αλλοίωσης που να ανταποκρίνονται στις προσδοκίες των καταναλωτών και να προωθούν τη βιωσιμότητα στις πρακτικές παραγωγής πουλερικών.

Οι ολοκληρωμένες λύσεις ψυκτικής αλυσίδας αποτελούν κρίσιμο σημείο εστίασης για μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες. Η διερεύνηση τεχνολογιών και πρωτοκόλλων που εξασφαλίζουν συνεπή έλεγχο της θερμοκρασίας από την παραγωγή έως την κατανάλωση είναι απαραίτητη. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη νέων μεθόδων ψύξης, έξυπνων λύσεων συσκευασίας και αποτελεσματικών συστημάτων μεταφοράς που εγγυώνται την ακεραιότητα της ψυκτικής αλυσίδας, ακόμη και σε δύσκολα και διαφορετικά περιβάλλοντα.

Η μελλοντική έρευνα για την πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών θα πρέπει να περιλαμβάνει μια πολύπλευρη προσέγγιση. Η κατανόηση της μικροβιακής δυναμικής, η αξιοποίηση καινοτόμων τεχνολογιών για τη βελτιστοποίηση της αλυσίδας εφοδιασμού, η ευθυγράμμιση με τις προτιμήσεις των καταναλωτών και η βελτίωση των λύσεων της ψυκτικής αλυσίδας αποτελούν βασικές επιταγές. Με την αντιμετώπιση αυτών των συστάσεων, οι ερευνητές μπορούν να συμβάλουν στην ανάπτυξη ισχυρών, βιώσιμων και προσανατολισμένων στον καταναλωτή στρατηγικών που θα ανεβάσουν την πρόληψη της αλλοίωσης των πουλερικών σε νέα ύψη.

Κεφάλαιο 4: Η μεταβολή της μικροβιακής χλωρίδας στη παραγωγική διαδικασία

Το μικροβίωμα του κοτόπουλου, το οποίο δημιουργείται πριν από την εκκόλαψη, είναι μια πολύπλοκη μικροβιακή συμβίωση που βρίσκεται μέσα σε κάθε πτηνό και επηρεάζει την υγεία, την ανάπτυξη, την εντερική φυσιολογία και την αντοχή στις λοιμώξεις για όλο τον κύκλο ζωής του (Clavijo and Vives Flórez, 2018). Αυτός ο πληθυσμός των πρωτίστων (protists), των μυκήτων, των αρχαίων (archaea), των χλωροφυκών (*Viridplantae*) και των βακτηρίων σχηματίζει μια αρχική μικροβιακή χλωρίδα που εξελίσσεται καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του πτηνού. Η σύνθεση του μικροβιώματος επηρεάζεται τόσο από τη γενετική του ξενιστή όσο και από το περιβάλλον στο οποίο ζει το πτηνό (Broom and Kogut, 2018). Το μικροβίωμα των πτηνών ωφελεί την υγεία του ξενιστή επηρεάζοντας μια ποικιλία δραστηριοτήτων που κυμαίνονται από τη διάσπαση σύνθετων υδατανθράκων και τη ζύμωση έως τη σύνθεση βιταμινών και τη σταθερότητα του ανοσοποιητικού συστήματος (Broom & Kogut, 2018).

Τα περισσότερα βακτήρια, συμπεριλαμβανομένων και των παθογόνων, όπως το *Escherichia coli*, ζουν φυσιολογικά μέσα στον ξενιστή (πτηνό). Μικροοργανισμοί όπως η *Salmonella*, το *Campylobacter* και το *E. coli* βρίσκονται φυσιολογικά στο εντερικό σωλήνα του κοτόπουλου. Οι διακυμάνσεις στη σύνθεση του μικροβιόκοσμου μπορεί να έχουν μακροπρόθεσμες συνέπειες για το πτηνό-ξενιστή καθώς και για τα συναφή προϊόντα. Οι ανισορροπίες στο μικροβίωμα ή η δυσβίωση μπορεί να είναι επιβλαβείς για την υγεία των πτηνών, επειδή συνδέονται με κακή λειτουργία του φραγμού του γαστρεντερικού σωλήνα, κακή πρόσληψη θρεπτικών συστατικών και γαστρική φλεγμονή, με αποτέλεσμα συμπτώματα όπως διάρροια, η οποία μπορεί να εξαπλώσει την ασθένεια όταν συνδυάζεται με την εκτροφή (Shang et al., 2018). Επιπλέον, οι πληθυσμοί των παθογόνων μικροοργανισμών όπως το *Clostridium perfringens* και το Avian Pathogenic *Escherichia coli* (APEC), μπορούν να επηρεάσουν τόσο τον ξενιστή όσο και τους καταναλωτές, (Clavijo & Flórez, 2018).

Ακούσια, η θανάτωση και η επεξεργασία των πουλερικών έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά βακτηρίων που σχετίζονται με τον γαστρεντερικό σωλήνα από τα σφάγια στις επιφάνειες επεξεργασίας (ιδίως στα στάδια της αφαίρεσης του δέρματος και του εκοπλαχισμού) και από το περιβάλλον (Boubendir et al., 2021). Αυτοί οι μικροοργανισμοί υποβαθμίζουν την ποιότητα του κρέατος πουλερικών, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής του και ενδεχομένως οδηγώντας σε κρούσματα τροφιμογενών ασθενειών, όπως η σαλμονέλωση και η

καμπυλοβακτηρίωση, εάν οι καταναλωτές χειριστούν το κρέας με μη ορθό τρόπο (EFSA, 2018). Οι μύκητες και τα βακτήρια μπορούν να ευδοκιμήσουν στο πλούσια σε θρεπτικά συστατικά υπόστρωμα που αποτελεί το κρέας. Ανάλογα με τις συνθήκες, οι παρατεταμένες περιόδους αποθήκευσης που υφίσταται το κρέας μπορεί να επιτρέψουν την ανάπτυξη διαφόρων ειδών βακτηρίων στις επιφάνειες της σάρκας.

Όταν το κοτόπουλο αποθηκεύεται για μεγάλα χρονικά διαστήματα, παράγοντες όπως η θερμοκρασία και το περιβάλλον συσκευασίας μπορούν να επηρεάσουν το πόσο γρήγορα το κρέας χάνει την ελκυστικότητά του για τους καταναλωτές. Όσον αφορά την επικρατούσα μικροχλωρίδα του τελικού προϊόντος, ο τύπος αλλοίωσης που εμφανίζεται καθορίζεται επίσης από τις μεθόδους συσκευασίας που χρησιμοποιούνται (Conte-Junior et al., 2020). Ως εκ τούτου, είναι προφανές ότι η διαχείριση της σύνθεσης του μικροβιώματος μπορεί να βοηθήσει τους εμπόρους, τους μεταποιητές κρέατος, τους εκτροφείς κοτόπουλων και τους καταναλωτές στα επόμενα στάδια, ενισχύοντας την ασφάλεια και την ποιότητα του κρέατος (Conte-Junior et al., 2020).

Ενώ υπάρχουν πολλές ανασκοπήσεις που περιγράφουν το μικροβίωμα των πουλερικών κατά τη διάρκεια της πρωτογενούς παραγωγής (Clavijo and Vives Flórez, 2018), οι περισσότερες μελέτες εξετάζουν την εξέλιξη των μικροβίων αλλοίωσης κατά τη διάρκεια της αλλοίωσης (J. Chen et al., 2022). Έχουν γίνει αναφορές σχετικά με την ανάπτυξη σημαντικών παθογόνων μικροβίων των πουλερικών, όπως το *Campylobacter* και η *Salmonella* spp. σε επίπεδο εκτροφής και λιανικής πώλησης. Εκτός από τον προσδιορισμό των μικροβιακών επιδράσεων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παρασκευής κρέατος και της αποθήκευσης σε ψυγείο, σημαντικός στόχος είναι η αξιολόγηση της επίδρασης διαφόρων παραγόντων στις αλλαγές του μικροβιώματος των ζωντανών πουλερικών κρεατοπαραγωγής καθώς και οι επιδράσεις που μπορεί να επηρεάσουν τη μικροχλωρίδα του τελικού προϊόντος. Οι παράγοντες αυτοί θα μπορούσαν να προέρχονται από το ίδιο το πτηνό ή να προστίθενται από διάφορα σημεία της τροφικής αλυσίδας.

4.1 Το μικροβίωμα των ζώντων πουλερικών

Κατά τη διάρκεια της ζωής του ξενιστή, το μικροβίωμα των κοτόπουλων υφίσταται πολυάριθμες τροποποιήσεις. Η κυριαρχία ενός μόνο φύλου, γένους ή είδους δεν είναι κάτι σύνηθες. Έχει

αποδειχθεί ότι το μικροβίωμα των κρεατοπαραγωγών κοτόπουλων περιλαμβάνει συνολικά περισσότερες από 117 ταξινομικές ομάδες. Αυτή η κοινότητα είναι όμως δραστήρια και ποικίλη. Το μικροβίωμα των πρώτων βρεφών κρεατοπαραγωγής κυριαρχείται από *Proteobacteria*, όπως είναι ευρέως γνωστό, αλλά μέχρι τη στιγμή που τα ζώα σφάζονται - περίπου 32 ημέρες μετά, για τα συμβατικά εκτρεφόμενα κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής - το μικροβίωμα κυριαρχείται από ταξινομικές ομάδες του φύλου *Firmicutes*, τα οποία αντιπροσωπεύουν το 70-78% των μικροβίων του πεπτικού εντέρου. Τα γένη του φύλου *Bacteroidetes* αποτελούν μια σημαντική μειοψηφία (~11%) όλων των άλλων βακτηριακών γενών.

Υπάρχουν διάφορες μεταβλητές που μπορούν να επηρεάσουν τη μικροβιακή χλωρίδα των ζωντανών κοτόπουλων κρεατοπαραγωγής. Η ηλικία, το φύλο, η διατροφή, οι ορμόνες, το σύστημα παραγωγής και οι εξωτερικοί παράγοντες επηρεάζουν τις βακτηριακές ταξινομικές ομάδες που επικρατούν στο γαστρεντερικό σύστημα του ξενιστή (gastrointestinal tract, GIT). Αυτοί οι παράγοντες μπορούν επίσης να οδηγήσουν στη δημιουργία πολύπλοκων και δυναμικών βακτηριακών πληθυσμών σε συγκεκριμένες θέσεις σε όλο το GIT των κοτόπουλων, οι οποίες μπορούν να έχουν αντίκτυπο στην υγεία των πτηνών και στην ποιότητα των προϊόντων κρέατος. Κατά τη διάρκεια της ζωής του πτηνού, μερικές από αυτές τις μεταβλητές μπορεί να αλλάξουν, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στη μικροβιακή χλωρίδα του εντέρου (Broom & Kogut, 2018).

4.2 Είδος ξενιστή

Έχει ανακαλυφθεί ότι οι δύο μεγαλύτεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη σύνθεση του μικροβιώματος ενός πτηνού είναι η γενετική του σύνθεση και το είδος του. Ο φαινότυπος του ξενιστή, η δραστηριότητα του ανοσοποιητικού συστήματος, η μετατροπή της τροφής, η φυσιολογία και η συμπεριφορά παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των βακτηριακών ειδών που επικρατούν σε έναν ξενιστή (Pandit et al., 2018). Αυτό μπορεί να επεκταθεί ώστε να συμπεριλάβει χαρακτηριστικά που αφορούν ειδικά μια εκτροφή. Για παράδειγμα, η αναλογία *Bacteroidetes: Actinobacter* της ευρέως χρησιμοποιούμενης σημερινής ποικιλίας κοτόπουλων κρεατοπαραγωγής Cobb είναι χαμηλότερη από εκείνη του κοτόπουλου Ross, μιας άλλης δημοφιλούς εμπορικής ποικιλίας. Αντίθετα, αρκετές ποικιλίες έχουν επιδείξει αυξημένη ευπάθεια στην ανάπτυξη *Escherichia coli* που είναι ανθεκτικό στα αντιβιοτικά (Kers et al., 2018).

Περαιτέρω έρευνες που συγκρίνουν τα πτηνά που εκτρέφονται με την ίδια διατροφή και στην ίδια τοποθεσία, όπως οι ινδικές σειρές Kadaknath και Aseel, με τα λιγότερο εντατικά εκτρεφόμενα κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής Ross308 και Cobb400, δείχνουν ότι οι *Bacteroidetes* και τα *Firmicutes* κυριαρχούν στο μικροβίωμα του GIT σε επίπεδο φύλου σε όλες τις σειρές που αναλύθηκαν από τους Pandit et al. (2018). Εντός των ενδιαφερομένων γραμμών κρεατοπαραγωγής, αυτά τα φύλα αντιπροσώπευαν το 76,6-90,8% των λειτουργικών ταξινομικών μονάδων (Operetational Taxonomical Units, OTU) του GIT, ένα μέτρο της ποικιλομορφίας των ειδών. Ωστόσο, η διακύμανση σε επίπεδο τάξης και γένους ήταν αξιοσημείωτη πέρα από αυτό. Κάθε γραμμή παρουσίασε κυριαρχία των *Bacteroidia* σε επίπεδο τάξης, με εξαίρεση την Cobb400, όπου επικράτησαν τα είδη *Clostridiales*. Οι εμπορικές σειρές αποκάλυψαν υψηλότερες συνολικές OTUs GIT, με την πλειονότητα των βακτηρίων στα πτηνά Ross308 και Cobb400 να παρουσιάζουν ευνοϊκές συσχετίσεις (Pandit et al., 2018).

Ωστόσο, έχει αναφερθεί ότι τα πτηνά από τις γραμμές Kadaknath και Aseel φέρουν περισσότερα μοναδικά γένη από ό,τι οι σύγχρονες φυλές κρεατοπαραγωγής. Η φυλή Aseel βρέθηκε να περιέχει *Slackia*, *Cronobacter*, *Phascolarctobacterium*, *Oceanimonas*, *Deferribacter*, *Tepidibacterium*, *Atopobium*, *Tannerella*, *Zunongwangia*, *Acetobacterium*, μη ταξινομημένα *Alphaproteobacteria*, *Candidatus* και *Phytoplasma*, ενώ οι γραμμές Kadaknath ήταν γνωστό ότι φέρουν περισσότερα μοναδικά γένη από τις σύγχρονες φυλές κρεατοπαραγωγής. Με 10 διαφορετικά γένη που παρατηρήθηκαν στα πτηνά Cobb400 και μόλις 2 στα πτηνά Ross308, ο αριθμός των μοναδικών γενών στις σύγχρονες φυλές αναφέρθηκε ότι είναι χαμηλότερος. Σε σύγκριση με την πιο ομοιόμορφη δραστηριότητα του ανοσοποιητικού συστήματος φυλών όπως η γραμμή Wageningen, η μεταβλητότητα του ανοσοποιητικού συστήματος φυλών όπως οι γραμμές κρεατοπαραγωγής Jerusalem και Virginia μπορεί επίσης να βοηθήσει τον ξενιστή να διατηρήσει τον έλεγχο του αποικισμού του GIT (van der Most et al., 2011).

Οι ανάγκες για χειρισμό, στέγαση και διατροφή μπορεί να διαφέρουν από είδος σε είδος. Παρόλο που το γευστικό προφίλ του κρέατος έχει αλλάξει, τα πουλερικά κρεατοπαραγωγής σπάνια καταναλώνονται διεθνώς - ωστόσο, ορισμένα από αυτά τα πτηνά μπορεί να εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται στην τοπική διατροφή. Παρόλο που πάνω από έναν αιώνα η επιλεκτική αναπαραγωγή είχε γενετικές συνέπειες σε χαρακτηριστικά όπως ο ρυθμός μετατροπής της τροφής (Food Conversion Rate, FCR), η έκφραση ανοσοσφαιρινών και η

εναπόθεση μυών, τα ωοπαραγωγά πτηνά υποβάλλονται συχνά σε κυκλικά επίπεδα ορμονών και τους επιτρέπεται να φτάσουν σε υψηλότερες ηλικίες (Pandit et al., 2018). Ιδιαίτερα στις μετα-αναλύσεις, μπορεί να είναι δύσκολο να προσδιοριστεί σωστά η επίδραση διαφόρων παραγόντων και πώς επηρεάζουν τις διαφορές στον μικροβιόκοσμο των ωοπαραγωγών πτηνών και των κοτόπουλων κρεατοπαραγωγής. Ο λόγος είναι ότι οι περισσότερες μελέτες σχετικά με το μικροβίωμα των κοτόπουλων κρεατοπαραγωγής έχουν εξετάσει μόνο τον αρσενικό πληθυσμό. Οι μελέτες αυτές έγιναν επειδή οι ορμονικές μεταβολές των θηλυκών κοτόπουλων κρεατοπαραγωγής καθιστούσαν αδύνατη την αναπαραγωγή τους (Videnska et al., 2014).

4.3 Το εξωτερικό περιβάλλον των πτηνών

Το περιβάλλον στο οποίο μεγαλώνουν τα κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του μικροβιώματός τους. Το κλίμα και οι κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες έχουν αντίκτυπο σε αυτό και μπορούν να μεταβάλουν την εσωτερική μικροχλωρίδα. Η υγεία, η ευημερία και η παραγωγή των πτηνών επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, όπως η στέγαση, η έκθεση στην ύπαιθρο, η εκτροφή σε βοσκότοπους, η εκτροφή δίπλα σε άλλα ζώα, η έκθεση σε άγριους φορείς, η γέννα, οι τεχνικές εκτροφής, η θερμική καταπόνηση, η παρουσία περιττωμάτων, η πυκνότητα των πτηνών και άλλοι παράγοντες. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν επίσης τη συμπεριφορά των πτηνών, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης και της κυκλοφορίας νερού, των περιττωμάτων και της ατομικής έκθεσης σε εξωγενή (Kers et al., 2018). Κατά συνέπεια, το μικροβίωμα επηρεάζεται επίσης από αυτούς τους παράγοντες. Τα μικρόβια αντιμετωπίζουν διάφορα εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν όταν τα στοιχεία αυτά ελέγχονται μέσω της βιοασφάλειας και της υπεύθυνης διαχείρισης των πτηνών. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν τρόποι και μέρη για να εισέλθουν οι μικροοργανισμοί στην τροφική αλυσίδα.

Το μικροβίωμα των κοτόπουλων κρεατοπαραγωγής μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από την τοποθεσία τους, εν μέρει λόγω τοπικών στοιχείων, όπως το κλίμα και τα άλλα ζώα (Shi et al., 2019). Δημοφιλείς σειρές κρεατοπαραγωγής όπως οι Cobb400 και Ross308 παρουσιάζουν σαφείς διαφοροποιήσεις στα γένη που φέρουν σε διάφορα μέρη, γεγονός που υποδηλώνει ότι αυτοί οι τοπικοί παράγοντες έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο μικροβίωμα. Για παράδειγμα, τα πτηνά Cobb είχαν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις *Firmicutes* σε ένα μέρος και *Bacteroidetes* σε ένα

άλλο, αλλά οι *Bacteroides* κυριαρχούσαν στο μικροβίωμα των πτηνών Ross σε δύο περιοχές της Ινδίας (Pandit et al., 2018).

Η σύνθεση του μικροβιώματος των πτηνών μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από την εποχή. Ενώ το καλοκαίρι απομονώνονται μεγαλύτερες βακτηριακές αποικίες CFUs από το κρέας σε σχέση με το χειμώνα, οι υψηλές θερμοκρασίες του καλοκαιριού έχουν συσχετιστεί με τον υπερπληθυσμό των κυρίαρχων ειδών (Kim et al., 2019). Έχουν επίσης προηγηθεί έρευνες σχετικά με τις εποχιακές επιπτώσεις σε ορισμένα βακτήρια, συμπεριλαμβανομένου του *Campylobacter*, με μέγιστα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Kers et al., 2018). Επιπλέον, η εποχή του καλοκαιριού συνδέεται με αυξημένες εμφανίσεις μυγών-φορέων, οι οποίες μπορούν να διασπείρουν μικροοργανισμούς τόσο εντός όσο και μεταξύ των οικημάτων κρεατοπαραγωγής. Επιπλέον, οι αυξημένες θερμοκρασίες προκαλούν αντιδράσεις στρες στα κοτόπουλα, οι οποίες συνδέονται με αυξημένες συγκεντρώσεις ειδών *Salmonella* και *Campylobacter*.

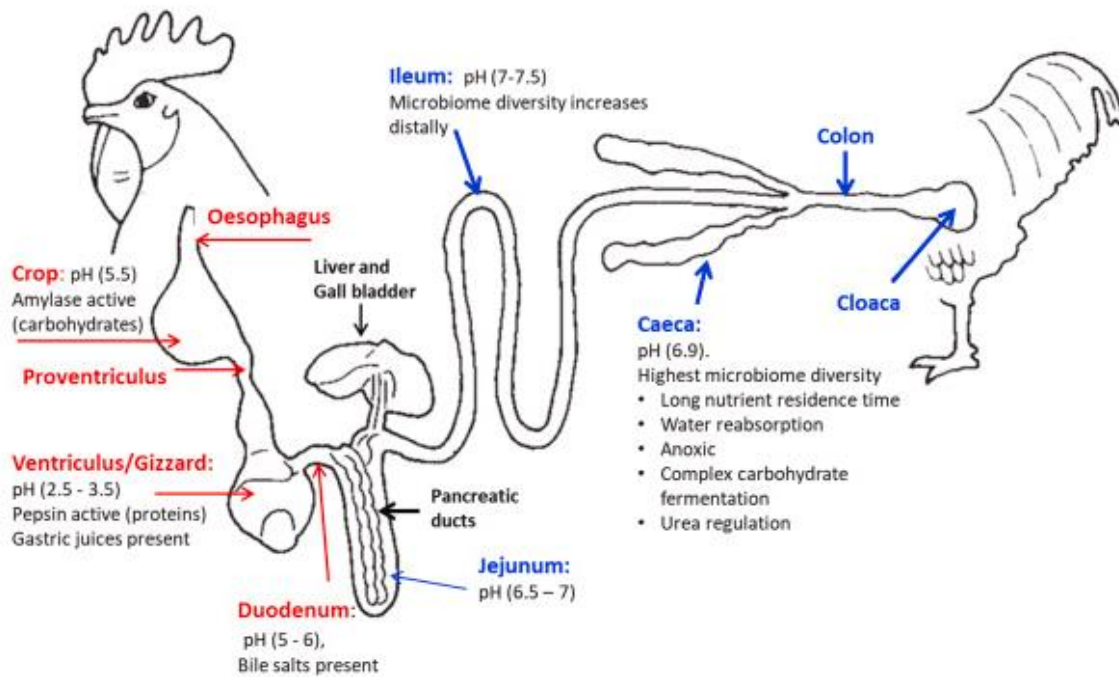
Η εγκατάσταση ενός δυσβιοτικού μικροβιόκοσμου μπορεί να διευκολυνθεί από την υγιεινή του εκκολαπτηρίου και τα μέτρα βιοασφάλειας που χρησιμοποιούνται στις εμπορικές παραγωγές. Επειδή τα σύγχρονα κοπάδια δεν εκτίθενται σε ενήλικους και γονεϊκούς μικροοργανισμούς, το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσονται τα κοτόπουλα και τα πτηνά που περιβάλλουν κάθε άτομο γίνονται οι κύριες πηγές μικροβίων. Για παράδειγμα, η πρώιμη επιμόλυνση από πιο ανθεκτικά ταξινομικά είδη, όπως το *Clostridium spp.* που σχηματίζει σπόρια, μπορεί να προκαλέσει τον αποικισμό αυτών των μικροβίων στους νεοσσούς πριν από την ώρα που θα έπρεπε. Το παθογόνο των πτηνών *C. perfringens* ανήκει σε αυτό το γένος και μπορεί να προκαλέσει νεκρωτική εντερίτιδα σε ζώα με εξασθενημένο ανοσοποιητικό σύστημα. Ένα σημαντικό τμήμα του μικροβιώματος των πρώτων νεοσσών μπορεί να αποτελείται από *Clostridium*, μέλος του φύλου *Proteobacteria* (Kers et al., 2018). Αυτό αναδεικνύει την ευπάθεια του πρώιμου μικροβιώματος στον αποικισμό ζωνόσων και πιθανών παθογόνων.

4.4 Παθήσεις του γαστρεντερικού συστήματος

Καθώς τόσο η αφθονία όσο και η ποικιλομορφία των μικροβίων αυξάνονται, η μεγαλύτερη συγκέντρωση και ποικιλομορφία ειδών μικροβίων βρίσκεται εντός του GIT, ιδίως στο παχύ έντερο (Broom and Kogut, 2018). Τα προγενέστερα όργανα του GIT έχουν το καθένα μια

μοναδική επίδραση στο μικροβίωμα μιας μετέπειτα περιοχής επηρεάζοντας παράγοντες όπως το pH, η συγκέντρωση χολικών αλάτων, η οξυγόνωση, τα προσβάσιμα θρεπτικά συστατικά και οι αντιμικροβιακοί παράγοντες. Επιπλέον, οι διάφορες συνθήκες μπορεί να έχουν αντίκτυπο στον μεταβολισμό των μικροοργανισμών (Εικόνα 1).

Σε σύγκριση με τη σακχαρολυτική δραστηριότητα και τη ζύμωση του γαλακτικού οξέος από τα ίδια γένη και είδη, τα υψηλότερα επίπεδα πεπτικών ενζύμων και το χαμηλότερο pH του στομάχου οδηγούν σε μειωμένη ζύμωση του αμύλου από τα είδη *Clostridium* και *Lactobacillus* (Clavijo and Vives Flórez, 2018). Μέσω μιας σειράς περίπλοκων σχέσεων μεταξύ του μικροβιόκοσμου και της υγείας του ξενιστή, αυτές οι εξαρτώμενες από την κατάσταση λειτουργίες μπορεί να συνεχίσουν να υποστηρίζουν την υγεία του ξενιστή.



Εικόνα 11: Γαστρεντερικό σύστημα των πουλερικών και οι διαφορετικές του επικρατείς συνθήκες (Clavijo and Vives Flórez, 2018)

4.5 Ο μικροβιόκοσμος των επεξεργασμένων πουλερικών

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας μεγάλης κλίμακας έχουν κατασκευαστεί ως απάντηση στη δημόσια ζήτηση για κρέας κοτόπουλου, προκειμένου να καλυφθούν οι ελλείψεις εφοδιασμού. Η διασφάλιση της ασφάλειας και της ποιότητας των προϊόντων κοτόπουλου κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας απαιτεί την εφαρμογή πρακτικών υγιεινής. Ο συχνός και σχολαστικός καθαρισμός διατηρεί τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας απαλλαγμένες από τη σκόνη, τη βρωμιά

και τους ρύπους που μεταφέρονται από τα κοτόπουλα. Δεδομένου ότι τα κόπρινα είναι η κύρια εστία για εντερικά παθογόνα όπως η *Salmonella*, το *E. coli* και το *Campylobacter*, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να περιοριστεί η εξάπλωσή τους μέσα στο περιβάλλον επεξεργασίας (βλ. Πίνακας 1) (Reich et al., 2018). Όμως, προκειμένου να ικανοποιηθεί η ζήτηση, οι σύγχρονες μέθοδοι παραγωγής δίνουν προτεραιότητα στην ταχύτητα της γραμμής παραγωγής, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη διαχείριση της μόλυνσης (Feye et al., 2020).

Σύμφωνα με έρευνες, το κρέας κρεατοπαραγωγής αποικίζεται από περισσότερα από 21 φύλα και 280 γένη, τα οποία θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ποιότητα, την ασφάλεια ή την ελκυστικότητα του προϊόντος στους καταναλωτές. Η κατανόηση της συσχέτισης μεταξύ του φύλου των πουλερικών και της αλλοίωσης των πουλερικών είναι ζωτικής σημασίας για τον μετριασμό της μικροβιακής μόλυνσης και τη διασφάλιση των προτύπων ασφάλειας των τροφίμων. Τα πουλερικά, που ανήκουν στο φύλο *Chordata*, περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα ειδών πτηνών που καταναλώνονται συνήθως παγκοσμίως. Ωστόσο, τα προϊόντα πουλερικών είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε αλλοίωση λόγω μικροβιακής μόλυνσης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε τροφιμογενείς ασθένειες εάν δεν αντιμετωπιστεί επαρκώς. Μικροοργανισμοί από διάφορα φύλα, συμπεριλαμβανομένων των *Firmicutes*, των *Proteobacteria* και των *Actinobacteria*, συνδέονται συνήθως με την αλλοίωση των πουλερικών. Μεταξύ αυτών, βακτήρια όπως η *Pseudomonas*, τα *Enterobacteriaceae* και τα οξυγαλακτικά βακτήρια ταυτοποιούνται συχνά ως πρωταρχικοί παράγοντες αλλοίωσης σε προϊόντα πουλερικών. Αυτά τα βακτήρια ευδοκιμούν υπό ευνοϊκές συνθήκες, όπως η βέλτιστη θερμοκρασία, η υγρασία και τα επίπεδα pH που συνήθως απαντώνται σε περιβάλλοντα επεξεργασίας και αποθήκευσης πουλερικών (Oyarzabal et al., 2005). Στον εξοπλισμό, τους ανθρώπους και τον αέρα, όλα μπορούν να συμβάλουν στη συσσώρευση βακτηριακής μόλυνσης, η οποία μπορεί στη συνέχεια να εξαπλωθεί σε όλη την εγκατάσταση. Ως εκ τούτου, είναι κρίσιμο να κατανοήσουμε πώς τα διάφορα στάδια της διαδικασίας επηρεάζουν τη μικροχλωρίδα του τελικού προϊόντος και τότε στην πορεία της παραγωγής οι αντιμικροβιακές παρεμβάσεις εφαρμόζονται πιο συνετά. Ένα σημαντικό μέρος του αρχικού μικροβιακού φορτίου καθορίζεται στο σημείο σφαγής. Είναι σύνηθες να ανακαλύπτουμε ότι οι επιφάνειες και ο εξοπλισμός είναι δύσκολο να καθαρίζονται πάντα σωστά. Ως αποτέλεσμα, από την αρχή της διαδικασίας παραγωγής κρέατος, ο εξοπλισμός

χρησιμεύει ως σταθερή εστία μόλυνσης για την εισαγωγή μικροοργανισμών στο σφάγιο κρεατοπαραγωγής (Samarundo et al., 2019).

4.6 Σφαγή

Τα κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής περνούν από διάφορες διαδικασίες στην εγκατάσταση επεξεργασίας για να είναι έτοιμα για σφαγή. Πριν από την αναισθητοποίηση, τα κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής διατηρούνται σε μια ήρεμη, σκοτεινή αποθήκη, ώστε να δοθεί χρόνος στα πτηνά να εγκλιματιστούν. Έπειτα τα κοτόπουλα μετακινούνται μέσα από θαλάμους σε σύγχρονες εγκαταστάσεις, γεγονός που μειώνει την ποσότητα του προσβάσιμου οξυγόνου, καθιστώντας τα πτηνά σε ασφυξία. Ορισμένες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν μηχανικό ή ηλεκτρικό σοκ. Μετά από αυτό, τα πτηνά μεταφέρονται στον τόπο θανάτωσης με το να αναρτώνται από τα πόδια τους σε μια μεταφορική ταινία. Τα κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής πλέον θανατώνονται και τα σώματά τους αφήνονται μέχρι να ολοκληρωθεί η αφαίμαξη (Nielsen et al., 2022).

Οι Boubendir et al. (2021) και οι Rivera-Pérez et al., (2014) έχουν αναφέρει ότι πάνω από το 60% των σφαγίων μπορεί να έχουν το μέγιστο φορτίο σε κύτταρα *Salmonella*, περίπου 6,1 log CFU/g, που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της αλυσίδας της επεξεργασίας, στα σημεία της σφαγής και της αφαίμαξης. Επειδή η *Salmonella* μεταδίδεται με το αίμα σε ορισμένα κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής, μπορεί να εξαπλωθεί στο εξωτερικό του σφαγίου και να μολύνει τα σφάγια που υποβάλλονται σε μεταγενέστερη επεξεργασία (Boubendir et al., 2021). Το σφάγιο εξακολουθεί να είναι σε μεγάλο βαθμό μολυσμένο σε αυτό το σημείο της διαδικασίας επεξεργασίας από ακαθαρσίες, φτερά και άλλους εξωτερικούς μολυσματικούς παράγοντες. Επιπλέον, η επιμόλυνση του εξοπλισμού μπορεί να συμβάλει στην υψηλότερη ποσότητα μικροβίων που εξαπλώνονται στα σφάγια κρεατοπαραγωγής. Τα ακόλουθα μέτρα ελέγχου ελαχιστοποιούν αποτελεσματικά την ποσότητα αυτού του παθογόνου που εισέρχεται στα νοικοκυριά των καταναλωτών (Boubendir et al., 2021; Rivera-Pérez et al., 2014).

Εκτός από τη δημιουργία και τη διασπορά των αερολυμάτων και των μικροβιακών ρύπων που μεταφέρονται με τον αέρα, οι πίδακες νερού υψηλής πίεσης που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό του σφαγίου σε αυτό το σημείο αναδεύουν και διασκορπίζουν επίσης τους μικροοργανισμούς του δαπέδου που έχουν εγκλιματιστεί στον ψυχρό χώρο σφαγής. Αυτό

μπορεί να βοηθήσει στη διασπορά των αερολυόμενων σωματιδίων που μεταφέρουν βακτήρια που προκαλούν αλλοίωση, συμπεριλαμβανομένων των βακτηρίων γαλακτικού οξέος (Lactic Acid Bacteria, LAB). Έχει αποδειχθεί ότι η επακόλουθη υγρασία σε αυτόν τον χώρο του σφαγείου είναι ευνοϊκή για την επιβίωση των βακτηρίων (J. Chen et al., 2022)

Σύμφωνα με τους Samarunto et al. (2019), υπάρχει εκθετική αύξηση των επιπέδων LAB στον αέρα σε αυτή τη θέση κατά τη διάρκεια μιας ημέρας επεξεργασίας. Ένα καταγεγραμμένο περιστατικό αυξήθηκε από 69 CFU/m³ σε 1510 CFU/m³ σε 4 ώρες. Τα μικρόβια από αυτό το σημείο και μετά μπορούν να μεταφέρονται στο περιβάλλον του εργοστασίου, γεγονός που συμβάλλει περαιτέρω στο τελικό μικροβίωμα του κρέατος πουλερικών, εάν δεν διατηρηθεί ο έλεγχος της ροής του αέρα στα πρώτα στάδια της αλυσίδας παραγωγής. Τα ψυχρόφιλα LAB είναι μία από τις ομάδες που συμβάλλουν σημαντικά στην αναερόβια αλλοίωση των προϊόντων κρέατος πουλερικών (J. Chen et al., 2022).

4.7 Ζεμάτισμα και απομάκρυνση του πτερώματος

Μετά τη θανάτωση, τα σφάγια βυθίζονται σε καυτό νερό σε δεξαμενή ζεματίσματος για να βοηθηθεί η αφαίρεση του πτερώματος. Κατά τη διάρκεια των στρεσογόνων διεργασιών του, τα φτερά και το δέρμα των κρεατοπαραγωγών κοτόπουλων μολύνονται σε μεγάλο βαθμό με ακαθαρσίες και περιττώματα, τα οποία εξαπλώνονται στα νερά του ζεματίσματος. Τα βακτήρια *Firmicutes* αντιπροσωπεύουν την πλειοψηφία των μικροοργανισμών στο μικροβίωμα του σφαγίου αμέσως μετά τη σφαγή -περισσότερο από 76,54%. Επί του παρόντος, ανιχνεύονται επίπεδα περίπου 10,16 log CFU/σφάγιο με την μέθοδο της αρίθμησης αερόβιων βακτηριακών πλακών (Aerobic Plate Count, APC) στην επιφάνεια του σφαγίου (Kim et al., 2017).

Τα *Proteobacter* ήταν παρόντα σε επίπεδα συγκρίσιμα με εκείνα του ζωντανού πτηνού, δηλαδή σε ποσοστό μικρότερο από 3,5%. Τα πρωτεοβακτήρια περιλαμβάνουν σημαντικά είδη βακτηρίων αλλοίωσης και επιβλαβών βακτηρίων (Ae Kim et al., 2017). Αλλά σε αυτό το σημείο, οι αυστηρές διαδικασίες επιλογής που χρησιμοποιούνται κατά την επεξεργασία αρχίζουν να έχουν αντίκτυπο στη σύνθεση του μικροβιώματος του κρέατος.

Περίπου 52,5 °C είναι η θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα το ζεμάτισμα του σφαγίου. Αυτό μειώνει την ποσότητα των μικροβίων στην επιφάνεια των σφαγίων έως και κατά 2,7 log CFU/g και μαλακώνει το δέρμα για να βοηθήσει στην απομάκρυνση των φτερών (Althaus

et al., 2017). Η θερμοκρασία από μόνη της μπορεί να μην είναι αρκετή για να σταματήσει την εξάπλωση των βακτηρίων στα σφάγια. Είκοσι ταξινομικές ομάδες, συμπεριλαμβανομένων των *Firmicutes*, των *Proteobacteria* και των *Actinobacteria*, τα οποία μαζί αντιπροσωπεύουν μεταξύ 60 και 70% των μικροβιακών ειδών, πιστεύεται ότι συνδέονται με την επιβίωση τους εντός της δεξαμενής ζεματίσματος και την επακόλουθη μόλυνση του προϊόντος (Rothrock Jr et al., 2017). Η ποσότητα της μόλυνσης του νερού της δεξαμενής ζεματίσματος αυξάνεται στην αρχή μιας ημέρας παραγωγής και στη συνέχεια εξισορροπείται μετά από μερικές ώρες, κατά τη διάρκεια των οποίων λαμβάνουν χώρα μεταβολές που αφορούν συγκεκριμένα φύλα, όπως ένας σταθερός αριθμός *Proteobacteria*, μια μείωση των *Bacteroidetes* και μια αύξηση των ειδών *Firmicutes*.

Καθώς τα βακτήρια αλλοίωσης από γένη όπως τα *Pseudomonas* και *Acinetobacter* αυξάνονται στα νερά των δεξαμενών ζεματίσματος και τα μέλη της οικογένειας *Enterobacteriaceae*, που μπορεί να περιλαμβάνουν παθογόνα, αυξάνονται επίσης σε ποσότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας, η μόλυνση με Πρωτεοβακτήρια κατά τα μεταγενέστερα στάδια της επεξεργασίας του κρέατος κοτόπουλου έχει ιδιαίτερα σημαντικό αντίκτυπο στην ποιότητα του προϊόντος (Chen et al., 2020). Τα *Firmicutes*, όπως τα *Erysipelotrichaceae* και τα *Anoxybacillus*, πολλαπλασιάζονται ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου και ενδέχεται να καλύψουν τα κενά που αφήνουν οι *Streptococcus* και *Staphylococcus*, οι οποίοι μειώνονται ταυτόχρονα στο περιβάλλον του scalding (Rothrock Jr et al., 2017).

4.8 Τεμαχισμός

Επειδή τα πουλερικά είναι μικρού μεγέθους πτηνά, η αφαίρεση των εσωτερικών σπλάχνων τους είναι μια σημαντική διαδικασία στην παρασκευή του κρέατος των πουλερικών. Τόσο ο μηχανικός όσο και ο χειρωνακτικός εκσπλαχνισμός έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν ρήξη της επένδυσης του εντέρου, διασκορπίζοντας το ανεπιθύμητο περιεχόμενο και το μικροβιολογικό φορτίο του σε όλο τον χώρο του εκσπλαχνισμού. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα μέτρα πριν από τη σφαγή, όπως η απόσυρση της τροφής, είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ακεραιότητας της επένδυσης του παχέος εντέρου και τη μείωση της πιθανότητας επιβίωσης κατά τον εκσπλαχνισμό. Εάν το περιβάλλον επεξεργασίας είναι εκτεθειμένο, υπάρχει σημαντικός κίνδυνος μόλυνσης λόγω του υψηλού φορτίου βακτηρίων (περίπου 11 log CFU/g) ανά γραμμάριο υλικού εντέρου (Waite and Taylor, 2014).

Σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας, τα επίπεδα των βακτηρίων της σάρκας φτάνουν στη μεγαλύτερή τους τιμή και συχνά ξεπερνούν τα 10,55 log CFU/σφάγιο (Ae Kim et al., 2017). Οι αερομεταφερόμενοι ρύποι εντός αυτού του τμήματος μπορούν επίσης να θεωρηθούν σημαντική πηγή εξωγενών μικροβίων στα σφάγια πουλερικών (Samarundo et al., 2019). Αυτό χαρακτηρίζεται από μείωση της αφθονίας των *Proteobacteria* και αύξηση του φορτίου *Firmicutes* (Ae Kim et al., 2017). Αμέσως μετά τον εκσπλαχνισμό, χρησιμοποιούνται διαδικασίες όπως το πλύσιμο από μέσα προς τα έξω για την εξάλειψη των ρύπων από την επιφάνεια του σφάγιου, όπως το περιεχόμενο του τυφλού που παραλήφθηκε και διασκορπίστηκε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.

4.9 Μικροχλωρίδα μετά την επεξεργασία

Από τη φάση της ψύξης της διαδικασίας παραγωγής κοτόπουλου μέχρι την κατανάλωση του προϊόντος, χρησιμοποιείται ψυχρή αποθήκευση. Η σύνθεση του αερίου συσκευασίας σε συνδυασμό με τις συνθήκες συντήρησης υπό ψύξη, αποτελούν τον συνδυασμό διατήρησης του τροφίμου μέχρι την κατανάλωση. Η μικροβιακή χλωρίδα των νωπών προϊόντων κρέατος πουλερικών μεταβάλλεται διαρκώς, έως ότου, τελικά, οι βακτηριακοί πληθυσμοί να πολλαπλασιαστούν και να αυξηθούν σε τέτοιο βαθμό ώστε το προϊόν να αλλοιώνεται ακόμη και σε περιβάλλον ψύξης (Rouger et al., 2017b). Η πολύπλευρη αλλοίωση του κρέατος έχει ως αποτέλεσμα παρατηρήσιμες αλλοιώσεις στο χρώμα, τη γεύση, τη δομή και το άρωμα του κρέατος. Βακτηριακοί αριθμοί άνω των 10^7 CFU/g είναι ενδεικτικοί της αλλοίωσης του κρέατος πουλερικών, οι αλλοιώσεις της οσμής γίνονται εμφανείς σε 10^8 CFU/g (Naveena et al., 2017). Σε αυτά τα επίπεδα, η γεύση και το άρωμα του τροφίμου μεταβάλλονται μόνιμα από την παραγωγή ορατών ενώσεων από τα μικρόβια, όπως τα οργανικά οξέα (γαλακτικό οξύ και θειοβαρβιτουρικό οξύ) και οι βιογενείς αμίνες (όπως η πουτρεσκίνη και η καδαβερίνη) (Wang et al., 2020).

4.10 Μικροχλωρίδα αλλοίωσης

Όταν το κρέας συσκευάζεται για πρώτη φορά, τα είδη *Pseudomonas*, *Enterobacteriaceae*, *Lactobacillus*, *Acinetobacter* και *B. thermosphacta* αποτελούν την πλειονότητα του ανιχνεύσιμου μικροβιακού πληθυσμού. Σε αυτό το στάδιο, το περιβάλλον του περιέκτη αρχίζει να έχει σημασία για τον υπολογισμό του μικροβιακού πληθυσμού του τελικού προϊόντος. Όταν το κρέας

πουλερικών αποθηκεύεται αερόβια, τα ψυχρότροφα είδη *Pseudomonas* πολλαπλασιάζονται αποτελεσματικά και κυριαρχούν, ενώ τα είδη *Shewanella* spp. συμβάλλουν ελάχιστα στην αερόβια αλλοίωση (Li et al., 2023). Ωστόσο, η συσκευασία με χαμηλό οξυγόνο και οι τροποποιημένες ατμόσφαιρες, εμποδίζουν τον πολλαπλασιασμό τους. Παρόλο που τα είδη *Pseudomonas* μπορεί αρχικά να βρεθούν στην επιφάνεια του κρέατος, δεν μπορούν να πολλαπλασιαστούν σωστά σε ένα περιβάλλον συσκευασίας φτωχό σε οξυγόνο, ακόμη και αν είναι προσαρμοσμένα στο κρύο. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Carrizosa et al. (2017), το διοξείδιο του άνθρακα καταστέλλει ενεργά την ανάπτυξή της. Ως αποτέλεσμα, ένα ευρύτερο φάσμα γενών προσαρμοσμένων στο ψύχος, όπως τα *Yersinia*, *Aeromonas*, *Buttiauxella*, *Carnobacterium*, *Enterobacter*, *Hafnia*, *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Pseudomonas*, *Serratia* και *Shewanella*, πολλαπλασιάζονται στο κρέας και βοηθούν στη σύνθεση γαλακτικού οξέος και αιθανόλης, που αποτελούν δείκτες αλλοίωσης. Μετά από 4 ημέρες συντήρησης, η κυρίαρχη μικροχλωρίδα αλλοίωσης εγκαθίσταται και συνήθως προκαλεί εμφανή αλλοίωση όταν ο αριθμός των βακτηρίων φτάσει τα 10^7 κύτταρα/cm². Ορισμένα είδη έχουν ακόμη χαμηλότερα κατώτατα όρια για την πρόκληση αισθητών αποτελεσμάτων αλλοίωσης- για παράδειγμα, το *B. thermosphacta* έχει αποδειχθεί ότι προκαλεί ανιχνεύσιμες μεταβολές στην οσμή του προϊόντος σε μόλις 10^5 κύτταρα/cm² (Carrizosa & Ryan, 2017).

Στις χαμηλές θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται στην ψυκτική αλυσίδα, οι αλλαγές αυτές αργούν να εκδηλωθούν, αλλά η μη αναστρέψιμη σήψη του κρέατος παρατηρείται γύρω στη 10^η ημέρα, οπότε η ελκυστικότητα του προϊόντος μειώνεται πλήρως (Samarundo et al., 2019). Επιπλέον, στο κρέας κοτόπουλου που διατηρείται σε χαμηλές θερμοκρασίες, η ανεπαρκής υγιεινή και οι διαδικασίες ψύξης μπορούν να επιταχύνουν σημαντικά την ανάπτυξη βακτηριακών ομάδων, όπως *E. coli* και *S. aureus* (Masoumbeigi et al., 2017).

| Phylum | Genera | Reference |
|----------------|--|---|
| Firmicutes | <i>Anaerostipes, Blautia, Butyrivibrio, Clostridium, Ethanoligenes, Eubacteria, Flavonifractor, Hespellia, Lachnospiraceae, Lactobacillus, Leuconostoc, Megamonas, Pseudoflavonifractor, Roseburia, Ruminococcus, Streptococcus, Veillonella</i> | (Borda-Molina et al, 2018; Broom and Kogut, 2018; Clavijo and Vives Flórez, 2018) |
| Bacteroidetes | <i>Bacteroides, Paraprevotella, Prevotella, Riemerella, Tannerella</i> | Clavijo & Vives Flórez (2018) |
| Proteobacteria | <i>Campylobacter, Desulfohalobium, Escherichia, Gallibacterium, Neisseria, Pseudomonas, Salmonella, Shigella, Vibrio, Yersinia</i> | (Ae Kim et al., 2017, Bailey et al., 2018, Clavijo and Vives Flórez, 2018) |
| Actinobacteria | <i>Bifidobacterium, Corynebacterium, Streptomyces</i> | (Shang et al., 2018; Teng and Kim, 2018) |

Πίνακας 1: Τα πιο σημαντικά γένη μικροοργανισμών στα πουλερικά (Masoumbeigi et al., 2017)

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Το μικροβίωμα των κοτόπουλων κρεατοπαραγωγής διαμορφώνεται την ημέρα της εκκόλαψης και συνεχίζει να είναι δυναμικό μέχρι την ημέρα της σφαγής, κατά την οποία συσκευάζεται, διανέμεται και τελικά μαγειρεύεται και καταναλώνεται από τους καταναλωτές. Όταν έρχεται έτοιμο για σφαγή, βακτήρια από τα φύλα *Firmicutes* και *Bacteroides* κυριαρχούν στο ζωντανό μικροβίωμα των κρεατοπαραγωγών κοτόπουλων. Όμως το περιβάλλον επεξεργασίας τροποποιεί γρήγορα το μικροβιόκοσμο του σφαγίου με συγκεκριμένο τρόπο.

Η απόκτηση γνώσεων σχετικά με τις επιπτώσεις της βιοασφάλειας, της καθαριότητας και των αντιμικροβιακών θεραπειών είναι απαραίτητη για την εγγύηση της ασφάλειας των καταναλωτών και της ποιότητας του κοτόπουλου. Ωστόσο, αποτελεσματικές παρεμβάσεις και τεχνικές διαχείρισης της μικροβιακής χλωρίδας της σάρκας του κοτόπουλου μπορούν να εφαρμοστούν στην πράξη μόνο εάν όλες οι συνιστώσες που συμβάλλουν σε αυτές είναι πλήρως κατανοητές και οι επιδράσεις τους στο τελικό προϊόν είναι πλήρως κατανοητές.

Συνεπώς, τα τελευταία στάδια της μονάδας παραγωγής κρέατος είναι κρίσιμα για τον καθορισμό της μικροχλωρίδας του τελικού προϊόντος. Τα ζωνοσογόνα βακτήρια μεταφέρονται από τα σφάγια που βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο και στη συνέχεια υποβάλλονται σε επεξεργασία ως αποτέλεσμα της αφαιμάξης του σφαγίου, της απομάκρυνσης και της εκσπλαχνισμού (Rivera-Pérez et al., 2014; Rothrock Jr et al., 2017). Είναι απαραίτητη η αυστηρή παρακολούθηση σε αυτές τις επιρρεπείς στη μόλυνση θέσεις, όπως το πλύσιμο και η ψύξη του σφαγίου, ώστε να αποτραπεί η ανάπτυξη μικροοργανισμών που σχετίζονται με την ασθένεια, οι οποίοι είναι συνήθως πιο ευαίσθητοι σε αυτά τα στάδια. Από το σημείο αυτό και έπειτα, η γραμμή επεξεργασίας διατηρείται σε χαμηλές θερμοκρασίες για την πρόληψη της ανάπτυξης ζωνοσόων όπως το *Campylobacter*, που έχουν χαμηλή αντοχή στο ψύχος (Clavijo & Flórez, 2018)

Το μικροβίωμα του εργοστασίου επεξεργασίας, το οποίο τείνει να επικρατεί στο τελικό προϊόν και μπορεί να προκαλέσει αλλοίωση του προϊόντος και μειωμένη διάρκεια ζωής κατά την αγορά του από τον καταναλωτή, επιλέγεται για ένα μικροβίωμα ανθεκτικό στο κρύο με την εκτεταμένη χρήση του ψύχους (J. Chen et al., 2022).

Μέτρα όπως η χρήση ψυκτικής αλυσίδας και η χρήση διαφορετικών τεχνικών συσκευασίας έχουν βελτιστοποιηθεί για την αύξηση της διάρκειας ζωής του προϊόντος. Υπό ιδανικές συνθήκες, οι φυσικοί φραγμοί μπορούν να σταματήσουν την είσοδο πρόσθετων

εξωγενών μικροοργανισμών στο προϊόν, επομένως η συσκευασία του κρέατος αποτελεί την τελευταία «ευκαιρία» για τα μικρόβια να μολύνουν το τελικό προϊόν. Ωστόσο, καθ' όλη τη διάρκεια της καθορισμένης διάρκειας ζωής, τα εναπομείναντα μικρόβια μπορεί να πολλαπλασιαστούν και να οδηγήσουν σε αλλοίωση (Rouger et al., 2018).

Ενώ η διατήρηση της ψυκτικής αλυσίδας είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ασφάλειας των προϊόντων πουλερικών καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους, πρόσθετα μέτρα περιλαμβάνουν τη διαχείριση του περιβάλλοντος στο εσωτερικό της συσκευασίας με την απομάκρυνση του οξυγόνου ή την προσθήκη μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα για να σταματήσει η ανάπτυξη ορισμένων βακτηρίων. Ενώ μια πιο ποικιλόμορφη μικροβιακή χλωρίδα που περιλαμβάνει πολυάριθμα LAB και αναερόβια είδη εγκαθίσταται σε συσκευασίες με χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο, τα ανθεκτικά στο ψύχος βακτήρια *Pseudomonas spp.* τείνουν να επικρατούν σε συσκευασίες όπου υπάρχει οξυγόνο (J. Chen et al., 2022; Conte-Junior et al., 2020; Rossaint et al., 2014)

Λόγω των συγκριτικά υψηλών επιπέδων εύκολα διαθέσιμων θρεπτικών συστατικών και η ενεργότητα του νερού που ευνοούν την ανάπτυξη μικροβίων, το πουλερικό θεωρείται ένα πολύ ευπαθές τρόφιμο. Αποδείχθηκε ότι τα είδη *Pseudomonas* και *B. thermosphacta* είναι η κύρια αιτία αλλοίωσης, με τα LAB και *Enterobacteriaceae* να έρχονται στη δεύτερη και τρίτη θέση, αντίστοιχα, και τις ζύμες και τους μύκητες να έχουν μικρή συμβολή. Η θερμοκρασία αποθήκευσης έχει αντίκτυπο στη μικροβιολογική αλλοίωση, εκτός από την ενδογενή και μικροβιολογική μεταβλητότητα στα προϊόντα πουλερικών. Πιο συγκεκριμένα, οι τυπικές θερμοκρασίες ψύξης (4-8°C) ευνοούν την ανάπτυξη των αλλοιγόνων μικροοργανισμών και του επιτρέπει να επιβιώσουν ακόμα και στους 0°C, γεγονός που υποδεικνύει την ανάγκη εφαρμογής διαδικασιών υγιεινής και ασφαλούς χειρισμού τροφίμων.

Χρησιμοποιώντας μια ποικιλία τεχνικών αιχμής, όπως το ψυχρό πλάσμα (Wang et al., 2020), το υπεριώδες φως (Haughton et al., 2012), την ενεργή συσκευασία (Hakeem et al., 2023), η ηχητική επεξεργασία (Piñon et al., 2020) και η επεξεργασία υπό υπερυψηλή πίεση (Bechstein et al., 2019), βρίσκονται στο επίκεντρο της τρέχουσας έρευνας με στόχο την περαιτέρω μείωση των μικροοργανισμών αλλοίωσης και την εξάλειψη των παθογόνων μικροοργανισμών από τα συσκευασμένα προϊόντα κοτόπουλου.

Παρόλα αυτά, εμπόδια όπως η εθνική νομοθεσία, το κόστος και η ανεπαρκής εκπαίδευση των καταναλωτών έχουν καταστήσει δύσκολη την εφαρμογή αυτών των στρατηγικών εντός της συσκευασίας. Ωστόσο, εξακολουθεί να είναι απαραίτητη η έρευνα αυτών των τακτικών και, εάν είναι εφικτό, η εφαρμογή τους στην πράξη, προκειμένου να διαχειριστεί η ανάπτυξη των βακτηρίων αλλοίωσης και των παθογόνων βακτηρίων εντός της συσκευασίας κατά τη διάρκεια της ψυχρής αποθήκευσης σε ψυγεία καταναλωτών και λιανικής πώλησης. Η ενεργός διαχείριση του μικροβιώματος των πουλερικών καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, από την εκτροφή έως το ψυγείο, μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα και την ασφάλεια των προϊόντων και να διατηρήσει την εμπιστοσύνη των πελατών σε αυτή την πηγή τροφίμων υψηλής περιεκτικότητας σε πρωτεΐνες (Lu et al., 2019).

Βιβλιογραφία

1. Abdul-Mutalib, N. A., Syafinaz, A. N., Sakai, K., & Shirai, Y. (2015). An overview of foodborne illness and food safety in Malaysia. *International Food Research Journal*, *22*(3), 896.
2. Acheson, D. W. K., & Luccioli, S. (2004). Mucosal immune responses. *Best Practice & Research Clinical Gastroenterology*, *18*(2), 387–404.
3. Ahn, D. U., & Maurer, A. J. (1989). Effects of sodium chloride, phosphate, and dextrose on the heat stability of purified myoglobin, hemoglobin, and cytochrome c. *Poultry Science*, *68*(9), 1218–1225.
4. Ahvenainen, R., Eilamo, M., & Hurme, E. (1997). Detection of improper sealing and quality deterioration of modified-atmosphere-packed pizza by a colour indicator. *Food Control*, *8*(4), 177–184.
5. Althaus, D., Zweifel, C., & Stephan, R. (2017). Analysis of a poultry slaughter process: Influence of process stages on the microbiological contamination of broiler carcasses. *Italian Journal of Food Safety*, *6*(4).
6. Alves, M. B. R., Fonseca, B. B., Melo, R. T., Mendonça, E. P., Nalevaiko, P. C., Girão, L. C., Monteiro, G. P., Silva, P. L., & Rossi, D. A. (2017). Feed can be a source of *Campylobacter jejuni* infection in broilers. *British Poultry Science*, *58*(1), 46–49.
7. Aymerich, T., Martin, B., Garriga, M., & Hugas, M. (2003). Microbial quality and direct PCR identification of lactic acid bacteria and nonpathogenic staphylococci from artisanal low-acid sausages. *Applied and Environmental Microbiology*, *69*(8), 4583–4594.
8. Balamatsia, C. C., Paleologos, E. K., Kontominas, M. G., & Savva, I. N. (2006). Correlation between microbial flora, sensory changes and biogenic amines formation in fresh chicken meat stored aerobically or under modified atmosphere packaging at 4 C: possible role of biogenic amines as spoilage indicators. *Antonie van Leeuwenhoek*, *89*, 9–17.
9. Batool, A., Ganguli, S., Almashaqbeh, H. A., Shafiq, M., Vallikannu, A. L., Sankaran, K. S., Ray, S., & Sammy, F. (2022). An IoT and Machine Learning-Based Model to Monitor Perishable Food towards Improving Food Safety and Quality. *Journal of Food Quality*, *2022*.
10. Bechstein, D.-V., Popp, J., Sudhaus-Joern, N., & Krischek, C. (2019). Effect of ethyl-lauroyl-arginate hypochloride in combination with high hydrostatic pressure processing on the

- microbial load and physico-chemical characteristics of minced and portioned chicken breast meat. *Poultry Science*, *98*(2), 966–976.
11. Boubendir, S., Arsenault, J., Quessy, S., Thibodeau, A., Fravallo, P., Thériault, W. P., Fournaise, S., & Gaucher, M.-L. (2021). Salmonella contamination of broiler chicken carcasses at critical steps of the slaughter process and in the environment of two slaughter plants: prevalence, genetic profiles, and association with the final carcass status. *Journal of Food Protection*, *84*(2), 321–332.
 12. Broom, L. J., & Kogut, M. H. (2018). Gut immunity: its development and reasons and opportunities for modulation in monogastric production animals. *Animal Health Research Reviews*, *19*(1), 46–52.
 13. Brown, R., Priest, E., Naglik, J. R., & Richardson, J. P. (2021). Fungal toxins and host immune responses. *Frontiers in Microbiology*, *12*, 697.
 14. Burt, S. (2004). Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods—a review. *International Journal of Food Microbiology*, *94*(3), 223–253.
 15. Cai, H., Zhu, L., & Han, S. (2018). Proxylesnas: Direct neural architecture search on target task and hardware. *ArXiv Preprint ArXiv:1812.00332*.
 16. Carrizosa, R., & Ryan, S. G. (2017). Borrower private information covenants and loan contract monitoring. *Journal of Accounting and Economics*, *64*(2–3), 313–339.
 17. Chaix, E., Broyart, B., Couvert, O., Guillaume, C., Gontard, N., & Guillard, V. (2015). Mechanistic model coupling gas exchange dynamics and *Listeria monocytogenes* growth in modified atmosphere packaging of non respiring food. *Food Microbiology*, *51*, 192–205.
 18. Cheftel, J. C. (1995). High-pressure, microbial inactivation and food preservation. *Food Science and Technology International*, *1*(2–3), 75–90.
 19. Chen, J., Yang, R., Wang, Y., Koseki, S., Fu, L., & Wang, Y. (2022). Inhibitory effect of d-Tryptophan on the spoilage potential of *Shewanella baltica* and *Pseudomonas fluorescens* and its potential application in salmon fillet preservation. *Food Microbiology*, *108*, 104104.
 20. Chen, Y., Xu, Z., Feng, K., Yang, G., Fu, W., & Chen, B. (2020). Nitrogen and water addition regulate soil fungal diversity and co-occurrence networks. *Journal of Soils and Sediments*, *20*, 3192–3203.
 21. Clavijo, V., & Flórez, M. J. V. (2018). The gastrointestinal microbiome and its association

- with the control of pathogens in broiler chicken production: A review. *Poultry Science*, 97(3), 1006–1021.
22. Conte-Junior, C. A., Monteiro, M. L. G., Patrícia, R., Mársico, E. T., Lopes, M. M., Alvares, T. S., & Mano, S. B. (2020). The effect of different packaging systems on the shelf life of refrigerated ground beef. *Foods*, 9(4), 495.
 23. Dalgaard, P. (1995). Modelling of microbial activity and prediction of shelf life for packed fresh fish. *International Journal of Food Microbiology*, 26(3), 305–317.
 24. Devlieghere, F., & Debevere, J. (2000). Influence of dissolved carbon dioxide on the growth of spoilage bacteria. *LWT-Food Science and Technology*, 33(8), 531–537.
 25. Diana, A., Santinello, M., Penasa, M., Scali, F., Magni, E., Alborali, G. L., Bertocchi, L., & De Marchi, M. (2020). Use of antimicrobials in beef cattle: An observational study in the north of Italy. *Preventive Veterinary Medicine*, 181, 105032.
 26. Doulgeraki, A. I., Ercolini, D., Villani, F., & Nychas, G.-J. E. (2012). Spoilage microbiota associated to the storage of raw meat in different conditions. *International Journal of Food Microbiology*, 157(2), 130–141.
 27. Dourou, D., Spyrelli, E. D., Doulgeraki, A. I., Argyri, A. A., Grounta, A., Nychas, G.-J. E., Chorianopoulos, N. G., & Tassou, C. C. (2021). Microbiota of chicken breast and thigh fillets stored under different refrigeration temperatures assessed by next-generation sequencing. *Foods*, 10(4), 765.
 28. Du, M., Nam, K. C., & Ahn, D. U. (2001). Cholesterol and lipid oxidation products in cooked meat as affected by raw-meat packaging and irradiation and by cooked-meat packaging and storage time. *Journal of Food Science*, 66(9), 1396–1401.
 29. Duncan, T. V. (2011). Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: barrier materials, antimicrobials and sensors. *Journal of Colloid and Interface Science*, 363(1), 1–24.
 30. Ercolini, D., De Filippis, F., La Storia, A., & Iacono, M. (2012). “Remake” by high-throughput sequencing of the microbiota involved in the production of water buffalo mozzarella cheese. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(22), 8142–8145.
 31. Feye, K. M., Baxter, M. F. A., Tellez-Isaias, G., Kogut, M. H., & Ricke, S. C. (2020). Influential factors on the composition of the conventionally raised broiler gastrointestinal microbiomes. *Poultry Science*, 99(2), 653–659.
 32. Foroozandeh, P., & Aziz, A. A. (2018). Insight into cellular uptake and intracellular

- trafficking of nanoparticles. *Nanoscale Research Letters*, 13, 1–12.
33. Fung, D. Y., & Toldra, F. (2010). Microbial hazards in food: Food-borne infections and intoxications. *Handbook of Meat Processing*. Blackwell Publishing, USA, 481–500.
 34. Ganduri, V. S. R. K., Mangamuri, U., Muvva, V., & Poda, S. (2016). Pullulan-stabilized silver nanoparticles-their synthesis, characterization and application as bactericidal agents. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 6(7), 27–37.
 35. Garcia, H. E., Weathers, K. W., Paver, C. R., Smolyar, I., Boyer, T. P., Locarnini, M. M., Zweng, M. M., Mishonov, A. V., Baranova, O. K., Seidov, D., & others. (2019). *World Ocean Atlas 2018, Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Dissolved Oxygen Saturation*.
 36. Gennadios, A., Hanna, M. A., & Kurth, L. B. (1997). Application of edible coatings on meats, poultry and seafoods: a review. *LWT-Food Science and Technology*, 30(4), 337–350.
 37. Gill, A. O., & Holley, R. A. (2006). Disruption of *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* and *Lactobacillus sakei* cellular membranes by plant oil aromatics. *International Journal of Food Microbiology*, 108(1), 1–9.
 38. Gill, C. O., & Ahvenainen, R. (2003). Active packaging in practice: meat. *Novel Food Packaging Techniques*, 365–383.
 39. Glass, K. A., & Doyle, M. P. (1989). Fate of *Listeria monocytogenes* in processed meat products during refrigerated storage. *Applied and Environmental Microbiology*, 55(6), 1565–1569.
 40. Golden, C. E., & Mishra, A. (2020). Prevalence of *Salmonella* and *Campylobacter* spp. in alternative and conventionally produced chicken in the United States: A systematic review and Meta-Analysis. *Journal of Food Protection*, 83(7), 1181–1197.
 41. Gram, L., & Dalgaard, P. (2002). Fish spoilage bacteria--problems and solutions. *Current Opinion in Biotechnology*, 13(3), 262–266.
 42. Hakeem, K. P., Shaltout, F., & El-Diasty, E. M. (2023). Effects of natural compounds of some plants on microbial contamination and sensory quality of fish fillet during refrigeration. *Benha Veterinary Medical Journal*, 45(1), 152–156.
 43. Han, J. H., & Floros, J. D. (1997). Casting antimicrobial packaging films and measuring their physical properties and antimicrobial activity. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 13(4), 287–298.
 44. Hansen, L. T., Austin, J. W., & Gill, T. A. (2001). Antibacterial effect of protamine in

- combination with EDTA and refrigeration. *International Journal of Food Microbiology*, 66(3), 149–161.
45. Haughton, P. N., Grau, E. G., Lyng, J., Cronin, D., Fanning, S., & Whyte, P. (2012). Susceptibility of *Campylobacter* to high intensity near ultraviolet/visible 395–5 nm light and its effectiveness for the decontamination of raw chicken and contact surfaces. *International Journal of Food Microbiology*, 159(3), 267–273.
46. Hauschild, P., Vogel, R. F., & Hilgarth, M. (2021). Influence of the packaging atmosphere and presence of co-contaminants on the growth of photobacteria on chicken meat. *International Journal of Food Microbiology*, 351, 109264.
47. He, K., & Sun, J. (2015). Convolutional neural networks at constrained time cost. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 5353–5360.
48. Hilgarth, M., Behr, J., & Vogel, R. F. (2018). Monitoring of spoilage-associated microbiota on modified atmosphere packaged beef and differentiation of psychrophilic and psychrotrophic strains. *Journal of Applied Microbiology*, 124(3), 740–753.
49. Höll, L., Hilgarth, M., Geissler, A. J., Behr, J., & Vogel, R. F. (2019). Prediction of in situ metabolism of photobacteria in modified atmosphere packaged poultry meat using metatranscriptomic data. *Microbiological Research*, 222, 52–59.
50. Höll, L., Behr, J., & Vogel, R. F. (2016). Identification and growth dynamics of meat spoilage microorganisms in modified atmosphere packaged poultry meat by MALDI-TOF MS. *Food Microbiology*, 60, 84–91.
51. Jay, J. M., Loessner, M. J., & Golden, D. A. (2005a). Miscellaneous food products. *Modern Food Microbiology*, 197–213.
52. Jay, J. M., Loessner, M. J., & Golden, D. A. (2005b). Staphylococcal gastroenteritis. *Modern Food Microbiology*, 545–566.
53. Johnson, A., Miller, E. A., Weber, B., Figueroa, C. F., Aguayo, J. M., Johnny, A. K., Noll, S., Brannon, J., Kozlowicz, B., & Johnson, T. J. (2023). Evidence of host specificity in *Lactobacillus johnsonii* genomes and its influence on probiotic potential in poultry. *Poultry Science*, 102858.
54. Jones, L. F., Owens, R., Sallis, A., Ashiru-Oredope, D., Thornley, T., Francis, N. A., Butler, C., & McNulty, C. A. M. (2018). Qualitative study using interviews and focus groups to

- explore the current and potential for antimicrobial stewardship in community pharmacy informed by the Theoretical Domains Framework. *BMJ Open*, 8(12), e025101.
55. Juneja, V. K., & Marmer, B. S. (1999). Lethality of heat to Escherichia coli O157: H7: D-and z-value determinations in turkey, lamb and pork. *Food Research International*, 32(1), 23–28.
 56. Kalaikannan, A., Elango, A., Rajeshwar, J. J., & Santhi, D. (2022). Evaluation of Essential Oils as a Hurdle for Ambient Temperature Storage of Chicken Patties. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 41(4), 450–455.
 57. Kers, J. G., Velkers, F. C., Fischer, E. A. J., Hermes, G. D. A., Stegeman, J. A., & Smidt, H. (2018). Host and environmental factors affecting the intestinal microbiota in chickens. *Frontiers in Microbiology*, 9, 235.
 58. Khalaf, H. H., Sharoba, A. M., El-Tanahi, H. H., & Morsy, M. K. (2013). Stability of antimicrobial activity of pullulan edible films incorporated with nanoparticles and essential oils and their impact on turkey deli meat quality. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 4(11), 557–573.
 59. Khan, M. J., Shameli, K., Sazili, A. Q., Selamat, J., & Kumari, S. (2019). Rapid green synthesis and characterization of silver nanoparticles arbitrated by curcumin in an alkaline medium. *Molecules*, 24(4), 719.
 60. Kim, A. R., Vinothkannan, M., & Yoo, D. J. (2017). Sulfonated-fluorinated copolymer blending membranes containing SPEEK for use as the electrolyte in polymer electrolyte fuel cells (PEFC). *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(7), 4349–4365.
 61. Knight, R., Vrbanac, A., Taylor, B. C., Aksenov, A., Callewaert, C., Debelius, J., Gonzalez, A., Kosciolk, T., McCall, L.-I., McDonald, D., & others. (2018). Best practices for analysing microbiomes. *Nature Reviews Microbiology*, 16(7), 410–422.
 62. Koutsoumanis, K., & Nychas, G.-J. E. (1999). Chemical and sensory changes associated with microbial flora of Mediterranean boque (Boops boops) stored aerobically at 0, 3, 7, and 10 C. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(2), 698–706.
 63. Kraśniewska, K., Ścibisz, I., Gniewosz, M., Mitek, M., Pobiega, K., & Cendrowski, A. (2017). Effect of pullulan coating on postharvest quality and shelf-life of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). *Materials*, 10(8), 965.
 64. Li, Y., Luo, Q., Su, J., Dong, G., Cao, M., & Wang, Y. (2023). Metabolic regulation of *Shewanella oneidensis* for microbial electrosynthesis: From extracellular to intracellular.

Metabolic Engineering, 80, 1–11.

65. Liu, J., Jia, R., Zhou, E., Zhao, Y., Dou, W., Xu, D., Yang, K., & Gu, T. (2018). Antimicrobial Cu-bearing 2205 duplex stainless steel against MIC by nitrate reducing *Pseudomonas aeruginosa* biofilm. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 132, 132–138.
66. López-Caballero, M. E., Gómez-Guillén, M. C., Pérez-Mateos, M., & Montero, P. (2005). A chitosan–gelatin blend as a coating for fish patties. *Food Hydrocolloids*, 19(2), 303–311.
67. Lu, Z., Thanabalan, A., Leung, H., Kakhki, R. A. M., Patterson, R., & Kiarie, E. G. (2019). The effects of feeding yeast bioactives to broiler breeders and/or their offspring on growth performance, gut development, and immune function in broiler chickens challenged with *Eimeria*. *Poultry Science*, 98(12), 6411–6421.
68. Lücke, F.-K. (2000). Utilization of microbes to process and preserve meat. *Meat Science*, 56(2), 105–115.
69. Lund, M. N., Heinonen, M., Baron, C. P., & Estévez, M. (2011). Protein oxidation in muscle foods: A review. *Molecular Nutrition & Food Research*, 55(1), 83–95.
70. Man, L., Ren, W., Qin, H., Sun, M., Yuan, S., Zhu, M., Liu, G., Wang, C., & Li, M. (2023). Characterization of the relationship between lipids and volatile compounds in donkey, bovine, and sheep meat by UHPLC–ESI–MS and SPME–GC–MS. *LWT*, 175, 114426.
71. Masoumbeigi, H., Tavakoli, H. R., Koohdar, V., Mashak, Z., & Qanizadeh, G. (2017). The environmental influences on the bacteriological quality of red and chicken meat stored in fridges. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 7(4), 367–372.
72. McMillin, K. W. (2008). Where is MAP going? A review and future potential of modified atmosphere packaging for meat. *Meat Science*, 80(1), 43–65.
73. Mellefont, L. A., McMeekin, T. A., & Ross, T. (2008). Effect of relative inoculum concentration on *Listeria monocytogenes* growth in co-culture. *International Journal of Food Microbiology*, 121(2), 157–168.
74. Meng, J., LeJeune, J. T., Zhao, T., & Doyle, M. P. (2012). Enterohemorrhagic *Escherichia coli*. *Food Microbiology: Fundamentals and Frontiers*, 287–309.
75. Meng, J., Zhao, S., Doyle, M. P., & Joseph, S. W. (1998). Antibiotic Resistance of *Escherichia coli*O157: H7 and O157: NM Isolated from Animals, Food, and Humans. *Journal of Food Protection*, 61(11), 1511–1514.
76. Mikš-Krajnik, M., Feng, L. X. J., Bang, W. S., & Yuk, H.-G. (2017). Inactivation of *Listeria monocytogenes* and natural microbiota on raw salmon fillets using acidic electrolyzed

- water, ultraviolet light or/and ultrasounds. *Food Control*, 74, 54–60.
77. Mills, N. J., & Masso-Moreu, Y. (2005). Finite element analysis (FEA) applied to polyethylene foam cushions in package drop tests. *Packaging Technology and Science: An International Journal*, 18(1), 29–38.
78. Montel, M. C., Masson, F., & Talon, R. (1998). Bacterial role in flavour development. *Meat Science*, 49, S111–S123.
79. Morsy, M. K., Sharoba, A. M., Khalaf, H. H., El-Tanahy, H. H., & Cutter, C. N. (2015). Efficacy of antimicrobial pullulan-based coating to improve internal quality and shelf-life of chicken eggs during storage. *Journal of Food Science*, 80(5), M1066–M1074.
80. Nielsen, T. B., Würtz, A. M. L., Tjønneland, A., Overvad, K., & Dahm, C. C. (2022). Substitution of unprocessed and processed red meat with poultry or fish and total and cause-specific mortality. *British Journal of Nutrition*, 127(4), 563–569.
81. Nithya, K., & Mohankumar, A. (2006). Incidence and antibiotic resistance of plasmid borne avian pathogens from poultry. *ASIAN JOURNAL OF MICROBIOLOGY BIOTECHNOLOGY AND ENVIRONMENTAL SCIENCES*, 8(3), 551.
82. Orr, G., Panther, D. J., Phillips, J. L., Tarasevich, B. J., Dohnalkova, A., Hu, D., Teeguarden, J. G., & Pounds, J. G. (2007). Submicrometer and nanoscale inorganic particles exploit the actin machinery to be propelled along microvilli-like structures into alveolar cells. *ACS Nano*, 1(5), 463–475.
83. Otlés, S., & Sahyar, B. Y. (2016). Intelligent food packaging. In *Comprehensive analytical chemistry* (Vol. 74, pp. 377–387). Elsevier.
84. Oyarzabal, J., Jimeno, J., Ruela, J., Engler, A., & Hardt, C. (2005). Agent based micro grid management system. *2005 International Conference on Future Power Systems*, 6–pp.
85. Pandey, A. K., Chavez-Gonzalez, M. L., Silva, A. S., & Singh, P. (2021). Essential oils from the genus *Thymus* as antimicrobial food preservatives: Progress in their use as nanoemulsions-a new paradigm. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 426–441.
86. Pandit, N. R., Mulder, J., Hale, S. E., Zimmerman, A. R., Pandit, B. H., & Cornelissen, G. (2018). Multi-year double cropping biochar field trials in Nepal: Finding the optimal biochar dose through agronomic trials and cost-benefit analysis. *Science of the Total Environment*, 637, 1333–1341.
87. Panea, B., Ripoll, G., González, J., Fernández-Cuello, Á., & Albert, P. (2014). Effect of nanocomposite packaging containing different proportions of ZnO and Ag on chicken

- breast meat quality. *Journal of Food Engineering*, 123, 104–112.
88. Papadopoulou, O. S., Iliopoulos, V., Mallouchos, A., Panagou, E. Z., Chorianopoulos, N., Tassou, C. C., & Nychas, G.-J. E. (2020). Spoilage potential of *Pseudomonas* (*P. fragi*, *P. putida*) and LAB (*Leuconostoc mesenteroides*, *Lactobacillus sakei*) strains and their volatilome profile during storage of sterile pork meat using GC/MS and data analytics. *Foods*, 9(5), 633.
 89. Patterson, M. F. (2005). Microbiology of pressure-treated foods. *Journal of Applied Microbiology*, 98(6), 1400–1409.
 90. Piñon, M. I., Alarcon-Rojo, A. D., Renteria, A. L., & Carrillo-Lopez, L. M. (2020). Microbiological properties of poultry breast meat treated with high-intensity ultrasound. *Ultrasonics*, 102, 105680.
 91. Reich, P. B., Sendall, K. M., Stefanski, A., Rich, R. L., Hobbie, S. E., & Montgomery, R. A. (2018). Effects of climate warming on photosynthesis in boreal tree species depend on soil moisture. *Nature*, 562(7726), 263–267.
 92. Rivera-Pérez, W., Barquero-Calvo, E., & Zamora-Sanabria, R. (2014). Salmonella contamination risk points in broiler carcasses during slaughter line processing. *Journal of Food Protection*, 77(12), 2031–2034.
 93. Rossaint, S., Klausmann, S., Herbert, U., & Kreyenschmidt, J. (2014). Effect of package perforation on the spoilage process of poultry stored under different modified atmospheres. *Food Packaging and Shelf Life*, 1(1), 68–76.
 94. Rothrock Jr, M. J., Davis, M. L., Locatelli, A., Bodie, A., McIntosh, T. G., Donaldson, J. R., & Ricke, S. C. (2017). *Listeria* occurrence in poultry flocks: detection and potential implications. *Frontiers in Veterinary Science*, 4, 125.
 95. Rugbjerg, H., Wingstrand, A., Hald, T., Andersen, J. S., Wong, D. M. A. L. F., & Korsgaard, H. (2004). Estimating the number of undetected multi-resistant *Salmonella* Typhimurium DT104 infected pig herds in Denmark. *Preventive Veterinary Medicine*, 65(3–4), 147–171.
 96. Samapundo, S., de Baenst, I., Aerts, M., Cnockaert, M., Devlieghere, F., & Van Damme, P. (2019). Tracking the sources of psychrotrophic bacteria contaminating chicken cuts during processing. *Food Microbiology*, 81, 40–50.
 97. Samelis, J., Sofos, J. N., Kain, M. L., Scanga, J. A., Belk, K. E., & Smith, G. C. (2001). Organic acids and their salts as dipping solutions to control *Listeria monocytogenes* inoculated following processing of sliced pork bologna stored at 4 C in vacuum packages. *Journal of*

- Food Protection*, 64(11), 1722–1729.
98. Sánchez-Ortega, I., García-Almendárez, B. E., Santos-López, E. M., Amaro-Reyes, A., Barboza-Corona, J. E., Regalado, C., & others. (2014). Antimicrobial edible films and coatings for meat and meat products preservation. *The Scientific World Journal*, 2014.
 99. Shahidi, F., & Zhong, Y. (2010). Novel antioxidants in food quality preservation and health promotion. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(9), 930–940.
 100. Shi, Z., Rothrock Jr, M. J., & Ricke, S. C. (2019). Applications of microbiome analyses in alternative poultry broiler production systems. *Frontiers in Veterinary Science*, 6, 157.
 101. Silva, D. N., Chrobok, M., Ahlén, G., Blomberg, P., Sällberg, M., & Pasetto, A. (2022). ATMP development and pre-GMP environment in academia: a safety net for early cell and gene therapy development and manufacturing. *Immuno-Oncology and Technology*, 16, 100099.
 102. Singh, P., Wani, A. A., Saengerlaub, S., & Langowski, H.-C. (2011). Understanding critical factors for the quality and shelf-life of MAP fresh meat: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51(2), 146–177.
 103. Smith, B., Rogers, S. L., Blissett, J., & Ludlow, A. K. (2020). The relationship between sensory sensitivity, food fussiness and food preferences in children with neurodevelopmental disorders. *Appetite*, 150, 104643.
 104. Smith, E., Morris, J., Khesghi, H., Teletzke, G., Herzog, H., & Paltsev, S. (2021). The cost of CO₂ transport and storage in global integrated assessment modeling. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 109, 103367.
 105. Sofos, J. N. (2008). Challenges to meat safety in the 21st century. *Meat Science*, 78(1–2), 3–13.
 106. Swaminathan, B., & Gerner-Smidt, P. (2007). The epidemiology of human listeriosis. *Microbes and Infection*, 9(10), 1236–1243.
 107. Tauschitz, B., Washüttl, M., Wepner, B., & Tacker, M. (2003). MAP-Verpackungen: ein Drittel nicht optimal. *Pack Aktuell* (3), 6–8.
 108. Théry, C., Witwer, K. W., Aikawa, E., Alcaraz, M. J., Anderson, J. D., Andriantsitohaina, R., Antoniou, A., Arab, T., Archer, F., Atkin-Smith, G. K., & others. (2018). Minimal information for studies of extracellular vesicles 2018 (MISEV2018): a position statement of the International Society for Extracellular Vesicles and update of

- the MISEV2014 guidelines. *Journal of Extracellular Vesicles*, 7(1), 1535750.
109. Tournas, V. H., Katsoudas, E., & Miracco, E. J. (2006). Moulds, yeasts and aerobic plate counts in ginseng supplements. *International Journal of Food Microbiology*, 108(2), 178–181.
110. Trinetta, V., Floros, J. D., & Cutter, C. N. (2010). Sakacin a-containing pullulan film: an active packaging system to control epidemic clones of *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat foods. *Journal of Food Safety*, 30(2), 366–381.
111. Ustunol, Z. (2009). Edible films and coatings for meat and poultry. *Edible Films and Coatings for Food Applications*, 245–268.
112. van der Most, P. J., de Jong, B., Parmentier, H. K., & Verhulst, S. (2011). Trade-off between growth and immune function: a meta-analysis of selection experiments. *Functional Ecology*, 25(1), 74–80.
113. Videnska, P., Rahman, M. M., Faldynova, M., Babak, V., Matulova, M. E., Prukner-Radovic, E., Krizek, I., Smole-Mozina, S., Kovac, J., Szmolka, A., & others. (2014). Characterization of egg laying hen and broiler fecal microbiota in poultry farms in Croatia, Czech Republic, Hungary and Slovenia. *PLoS One*, 9(10), e110076.
114. Wang, J., Chu, L., Wojnárovits, L., & Takács, E. (2020). Occurrence and fate of antibiotics, antibiotic resistant genes (ARGs) and antibiotic resistant bacteria (ARB) in municipal wastewater treatment plant: An overview. *Science of the Total Environment*, 744, 140997.
115. Weiss, J., Gibis, M., Schuh, V., & Salminen, H. (2010). Advances in ingredient and processing systems for meat and meat products. *Meat Science*, 86(1), 196–213.
116. Wikström, F., Verghese, K., Auras, R., Olsson, A., Williams, H., Wever, R., Grönman, K., Kvalvåg Pettersen, M., Møller, H., & Soukka, R. (2019). Packaging strategies that save food: A research agenda for 2030. *Journal of Industrial Ecology*, 23(3), 532–540.
117. Wu, J., Zhong, F., Li, Y., Shoemaker, C. F., & Xia, W. (2013). Preparation and characterization of pullulan--chitosan and pullulan--carboxymethyl chitosan blended films. *Food Hydrocolloids*, 30(1), 82–91.
118. Yavas, E., & Bilgin, B. (2010). Effect of calcium lactate, sodium diacetate and sodium chloride mixture on the microbiological, chemical and sensory properties of chicken nuggets stored in refrigeration and under modified atmospheres. *International Journal of Poultry Science*, 9(1), 66–71.

119. Yuste, J., Pla, R., Capellas, M., Sendra, E., Beltran, E., & Mor-Mur, M. (2001). Oscillatory high pressure processing applied to mechanically recovered poultry meat for bacterial inactivation. *Journal of Food Science*, 66(3), 482–484.
120. Zampara, A., Sørensen, M. C. H., Elsser-Gravesen, A., & Brøndsted, L. (2017). Significance of phage-host interactions for biocontrol of *Campylobacter jejuni* in food. *Food Control*, 73, 1169–1175.