



Σχολή Επιστημών Τροφίμων Τμήμα Επιστήμης και
Τεχνολογίας Τροφίμων

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Εφαρμογή της έξυπνης συσκευασίας στα τρόφιμα: Σύγχρονες πρακτικές και
προοπτικές**

MSc Thesis

Title

Smart packaging application in foods: modern practices and opportunities

Διευθυντής

Καθ. Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων (ΠΑ.Δ.Α) Ιωάννης Τσάκης



ΌΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ

Μαρία Μπαλαμάτση
MariaBalamatsi

ΌΝΟΜΑ ΕΙΣΗΓΗΤΗ
Μαρία Γιαννακούρου
MariaGiannakourou

ΑΙΓΑΛΕΩ / AIGALEO 2021



Faculty of Food Sciences Department of Food Science
and Technology

Master of Science

FOOD INNOVATION, QUALITY AND SAFETY

MScTHESIS

Smart packaging application in foods: modern practices and opportunities

NAME OF STUDENT

Maria Balamatsi

19017

balamatsimar@yahoo.gr

SUPERVISOR

Maria Giannakourou

Έγινε δεκτή

Ο Διευθυντής του ΠΙΜΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ ΤΣΑΚΝΗΣ

Οι υπογράφωντες δηλώνουμε ότι έχουμε εξετάσει τη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία (masterthesis) με τίτλο 'Εφαρμογή της έξυπνης συσκευασίας στα τρόφιμα: Σύγχρονες πρακτικές και προοπτικές ' που παρουσιάστηκε από την ΜΠΑΛΑΜΑΤΣΗ ΜΑΡΙΑ, υποψηφίου για τον μεταπτυχιακό τίτλο σπουδών στην ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ και βεβαιώνουμε ότι γίνεται δεκτή.

Ημερομηνία

Όνομα επιβλέποντος

ΜΑΡΙΑ ΓΙΑΝΝΑΚΟΥΡΟΥ

Ημερομηνία

Όνομα μέλους επιτροπής

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΖΟΓΚΖΑΣ

Ημερομηνία

Όνομα μέλους επιτροπής

ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ

Δήλωση περί λογοκλοπής/Copyright

Έχοντας πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικής ιδιοκτησίας, δηλώνω ότι είμαι αποκλειστική συγγραφέας της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Δηλώνω, επίσης, ότι αναλαμβάνω όλες τις συνέπειες, όπως αυτές νομίμως ορίζονται, στην περίπτωση που διαπιστωθεί διαχρονικά ότι η εργασία μου αυτή ή τμήμα αυτής αποτελεί προϊόν λογοκλοπής.

Μαρία Μπαλαμάτση

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Εφαρμογή της «έξυπνης» συσκευασίας στα τρόφιμα : σύγχρονες πρακτικές και προοπτικές» πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών σπουδών μου στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ» του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Στο σημείο αυτό λοιπόν, αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα Καθηγήτρια της εργασίας, κα Μαρία Γιαννακούρου που με την ουσιαστική βοήθειά της και την αμέριστη στήριξή της καταφέραμε να ολοκληρώσουμε με επιτυχία αυτό το όμορφο «έργο».

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τη γραμματέα του τμήματος, κα Παπαπαύλου Έφη, για τη συνεχή υποστήριξη όλο αυτό το διάστημα των Μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Και Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που όλα αυτά τα χρόνια είναι δίπλα μου σε κάθε μου βήμα, καθώς και στις συμφοιτήτριες μου Καραγιώργου Αναστασία και Πριλή Έφη για τη συμπαράσταση στο κοινό μας αυτό ταξίδι.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί από τους επιστήμονες διάφορες αξιολογικές τεχνολογίες για την παρακολούθηση της ποιότητας των τροφίμων. Οι τεχνολογίες αυτές χωρίζονται σε πολλές κατηγορίες, με την πιο σημαντική από αυτές να είναι εκείνη που περιλαμβάνει τη χρήση χρόνο – θερμοκρασιακών δεικτών (time – temperature index – TTI) οι οποίοι τοποθετούνται στη συσκευασία των τροφίμων, καθιστώντας με αυτόν τον τρόπο τις συσκευασίες ως «έξυπνες». Έτσι λοιπόν, τα TTI δίνουν τη δυνατότητα μέτρησης μιας απλής οπτικής απόκρισης προκειμένου να εκτιμηθεί η ποιότητα του τροφίμου εύκολα και γρήγορα. Επίσης, κάποιες τεχνολογίες, όπως οι RFIDετικέτες, παρέχουν πληροφορία σχετικά με την κατάσταση συντήρησης σε προηγούμενα σημεία (π.χ. αν σε κάποιο σημείο της «ζωής» του, το προϊόν εκτέθηκε σε περιβαλλοντικές θερμοκρασίες που δεν ευνοούν τη συντήρησή του, για ένα χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του επιτρεπτού). Έτσι, οι έξυπνες συσκευασίες μπορούν να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμες τόσο στους τελικούς καταναλωτές όσο και σε όλα τα ενδιάμεσα στάδια στην αλυσίδα εφοδιασμού. Επιπρόσθετα, τα τελευταία χρόνια έχουν αξιοποιηθεί σημαντικά «ελπιδοφόρες» τεχνολογίες «έξυπνων» συσκευασιών με σκοπό τη μείωση της σπατάλης τροφίμων και των απορριμμάτων τους. Τέλος, σε βιομηχανικό επίπεδο, οι νέες τεχνολογίες φέρουν πολλά πλεονεκτήματα και στην εφοδιαστική αλυσίδα θέτοντας υψηλά τον πήχη για τη μετέπειτα πορεία των «έξυπνων» συστημάτων στον τομέα των τροφίμων.

Abstract

In recent years, scientists have developed a number of valuable technologies for monitoring the food quality. These technologies are divided into many categories, the most important of which is the one that involves the use of time-temperature indicators (TTI) which are placed on the packaging of food, thus making the packaging as "smart". Thus, TTIs enable the measurement of a simple visual response in order to access the quality of food easily and quickly. Also, some technologies, such as RFID tags, provide information about the state of maintenance at previous points (e.g. if at some point in its life, the product was exposed to unfavorable environmental temperatures, for longer than allowed). Therefore, "smart" packaging can be particularly useful both to end consumers and to all intermediate stages in the supply chain. In addition, in recent years "promising" technologies of "smart" packaging have been significantly utilized in order to reduce food waste. Finally, at the industrial level, new technologies bring many advantages to the supply chain, setting the bar high for the subsequent course of "smart" systems in food sector.

Περιεχόμενα

.....	iv
Περίληψη.....	xii
Abstract.....	xiv
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	4
1. Έξυπνη συσκευασία: είδη, ιδιότητες και συνήθεις εφαρμογές.....	4
1. 1. Ορισμός έξυπνης συσκευασίας.....	4
1. 2. Τεχνολογία έξυπνης συσκευασίας.....	4
1. 3. Αρχές λειτουργίας της έξυπνης συσκευασίας.....	5
2. Κατηγορίες έξυπνης συσκευασίας βάσει της τεχνολογίας.....	7
2. 1. Δείκτες χρόνου-θερμοκρασίας (TTI): αρχές λειτουργίας, τύποι, μαθηματικά μοντέλα και εφαρμογές.....	7
2. 1. 1. Έιδη TTIs.....	9
2. 1. 2. Γενική μαθηματική περιγραφή της απόκρισης του TTI.....	32
2. 1. 3. Επίδραση της θερμοκρασίας.....	34
2. 1. 4. Προδιαγραφές και χαρακτηριστικά ενός ιδανικού TTI.....	36
2. 1. 5. Διαχρονική εξέλιξη των TTI.....	38
2. 2. Ετικέτες ραδιοσυχνικής αναγνώρισης (RFID tags).....	39
2. 3. Γραμμωτοί κώδικες (barcodes).....	41
2. 4. Θερμοχρωμικά μελάνια.....	42
2. 5. Δείκτες συγκέντρωσης αερίων.....	44
Κεφάλαιο 3. Έξυπνη συσκευασία και ο αντίκτυπός της στη μείωση των απωλειών και αποβλήτων τροφίμων.....	46
3. 1. Ο ρόλος του έξυπνου συστήματος συσκευασίας στην αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων...47	

3. 1. 1. Μεθοδολογία αξιοποίησης του ΤΠΙ για πρόβλεψη ποιότητας τροφίμου και ελάττωση των απορριπτόμενων προϊόντων	52
3. 2. Τεχνολογίες εκτύπωσης ετικετών έξυπνων συσκευασιών	55
3. 3. Προκλήσεις για την καθιέρωση της έξυπνης συσκευασίας	63
3.4. Αξιοποίηση νέων τεχνολογιών στην εφοδιαστική αλυσίδα των τροφίμων	65
Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα – Επίλογος.....	69
Βιβλιογραφία	71

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1. Η συμπεριφορά του δείκτη TTI του OnVu™.....	16
Εικόνα 2. Εφαρμογή του εμπορικού δείκτη OnVu™ σε προϊόν κρέατος.....	17
Εικόνα 3. Ο αποχρωματισμός του δείκτη θερμοκρασίας χρόνου στους 25 ° C.....	19
Εικόνα 4. Αλλαγές χρώματος της πρόσβασης ετικέτας Vitsab CheckPoint	22
Εικόνα 5. Η αλλαγή χρώματος του TTI, στους 25°C.....	23
Εικόνα 6. Ανάμιξη των δύο τμημάτων του TTI με τήξη του λαδιού στους 30 ± 2 ° C. (a) Η ανάμιξη ξεκινά στα 6 ± 2 λεπτά. (b) Το ανοιχτό πράσινο χρώμα εξαπλώνεται στη συσκευή στα 8 ± 2 λεπτά. (c) Το χρώμα απλώνεται πλήρως. (d) Το χρώμα έγινε σκούρο πράσινο χρώμα μετά από 11 ± 2 λεπτά. (e) Καμία αλλαγή χρώματος μετά από 15 ± 2 λεπτά	25
Εικόνα 7: Παράδειγμα χρήσης του μικροβιακού TTI eO®. Όταν το σήμα από πράσινο γίνει μωβ, το προϊόν είναι ακατάλληλο για κατανάλωση.....	27
Εικόνα 8: Οπτική αναπαράσταση της εφαρμογής του TTI που προέρχεται από τον μικροοργανισμό <i>Janthinobacterium</i> sp.....	28
Εικόνα 9: Το φωτονικό πλέγμα με το σκληρυντικό υλικό. Η αλλαγή θερμοκρασίας οδηγεί σε απελευθέρωση του σκληρυντικού υλικού και δημιουργεί την αλλαγή χρώματος στο φιλμ.....	29
Εικόνα 10. Εναλλαγές των χρωμάτων των δεικτών που βασίζονται σε θερμοχρωμικά μίγματα πολυμερών / χρωστικών, που χρησιμοποιούνται σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες (πάνω) και σε πιο υψηλές (κάτω) Πηγή: Giannoglou, 2013	30
Εικόνα 11: Αναλυτική και γενική εικόνα του πρώτου TTI που δημιουργήθηκε, Honeywell TTI Πηγή: Καλιούπη, 2016	38
Εικόνα 12. RFID ετικέτα.....	40
Εικόνα 13. QR ετικέτα	41
Εικόνα 14. Barcode ετικέτα.....	41
Εικόνα 15. Barcode ετικέτες πάνω στην συσκευασία.....	42
Εικόνα 16. Παράδειγμα θερμοχρωμικής συσκευασίας που χρησιμοποιεί η PizzaHut	43
Εικόνα 17. Θερμοχρωμική συσκευασία που αλλάζει χρώμα για να δείξει την κατάσταση του ψωμιού.....	44
Εικόνα 18: Ο δείκτης συγκέντρωσης αερίου (οξυγόνου), Ageless Eye.....	45
Εικόνα 19: Λειτουργία ηλεκτρονικής μύτης και ηλεκτρονικής γλώσσας (e – nose, e – tongue)	47

Εικόνα 20: χρωμογόνοι χημειοαισθητήρες	50
Εικόνα 21. Τιμή υπεροξειδίου (PV) σκόνης γάλακτος σε σφραγισμένες φιάλες στους 30C (A) προσαρτημένες με ενδεικτικές ετικέτες που αλλάζουν χρώμα από έντονο πράσινο (φρέσκο) σε πορτοκαλί (προειδοποίηση) (B)	50
Εικόνα 22: Συσκευή screenprinting	57
Εικόνα 23: Η έξυπνη ετικέτα της Xerox	57
Εικόνα 24: Τεχνολογία Aerosol Jet Printing. Ο πίδακας μελανιού μεταφέρεται στο ακροφύσιο γραφής (2) όπου οδηγείται προς ένα υπόστρωμα που κινείται στους άξονες X-Y-Z (3).	58
Εικόνα 25: Εκτυπωτής τύπου R2R.....	59

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Εφαρμογές ΤΠ (αντιπροσωπευτικά είδη όλων των κατηγοριών)	31
Πίνακας 2: Συνάρτηση ποιότητας βάσει της φαινομενικής τάξης αντίδρασης.....	34
Πίνακας 3: Τα δημοφιλέστερα δευτερογενή κινητικά μοντέλα	34
Πίνακας 4: Σύγκριση μεθόδων εκτύπωσης ετικέτας σε συστήματα έξυπνης συσκευασίας	61

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Σχηματικό διάγραμμα του 1,4-πολυμερισμού ενώσεων διακετυλενίου παρουσία θερμότητας ή φωτός	10
Σχήμα 2 (α) Σχηματική απεικόνιση για το σχηματισμό ενός ισχυρού δικτύου δεσμών υδρογόνου. β) φάσματα UV αναστρέψιμων θερμοχρωμικών μεταβάσεων του PDA μετά την αντίδραση με καρβοξυλομάδα και αμιδική ομάδα	11
Σχήμα 3. Γραφική παράσταση φωτοχρωμικής αντίδρασης και φάσματος απορρόφησης.....	12
Σχήμα 4. Φωτοχρωμικές αντιδράσεις σπιροπυράνης (α), και σπιροξαζάνης (β).....	14
Σχήμα 5. Διασύνδεση μεταξύ (α) και (β) της ένδειξης OnVu™. Η έκθεση στο υπεριώδες φως προκαλεί χρωματισμό ενώ η θερμότητα προάγει την αντίστροφη αντίδραση.....	14
Σχήμα 6: Διάγραμμα συνάρτησης της απόκρισης της $F(X_c)$ με το χρόνο, για το δείκτη OnVuB1, για θερμοκρασίες ψύξης	15
Σχήμα 7: Διάγραμμα συνάρτησης της απόκρισης της $F(X_c)$ με το χρόνο, για το δείκτη OnVuB1, για αρνητικές θερμοκρασίες (σε κατάψυξη).....	16
Σχήμα 8. Η αντίδραση αποχρωματισμού ένωσης ανθρακινόνης.....	17
Σχήμα 9. Η κατασκευή του δείκτη θερμοκρασίας χρόνου: 1 υπόστρωμα, 2 φόντο για εκτύπωση, 3 σήμα, 4 διαφανές πολυμερές επίστρωμα	18
Σχήμα 10. Σχέση θερμοκρασίας χρόνου σε δείκτη χρόνου-θερμοκρασίας με επίστρωση πολυακρυλικού Πηγή: Semple et al., 2010	19
Σχήμα 11. Διάγραμμα δισδιάστατου κώδικα για τη δομή του δείκτη θερμοκρασίας χρόνου. (α) και (β) είναι η κύρια και πλάγια όψη του συστήματος TTI, αντίστοιχα. 1 – ο δείκτης θερμοκρασίας χρόνου, 2 – νανοσωλήνες, 3 – υπόστρωμα, 4 – συγκολλητικό στρώμα, 5 – μεμβράνη κάλυψης.....	26
Σχήμα 12. Η κατασκευή του δείκτη θερμοκρασίας χρόνου. (α) πλάγια όψη (β) πρόσοψη του. 1 – το διαφανές δοχείο σε σχήμα δίσκου, 2 – το ελαστικό πώμα, 3 – το μείγμα ένδειξης pH, υποστρώματος θρεπτικών συστατικών και μικροβίων	26
Σχήμα 13: Διάγραμμα εφαρμογής TTI για την πρόβλεψη της ποιότητας των τροφίμων	36
Σχήμα 14: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου του SLDS στα κομβικά σημεία ελέγχου της αλυσίδας διακίνησης των κατεψυγμένων τροφίμων	54
Σχήμα 15. Αλγόριθμος εφαρμογής των TTI για πρόβλεψη της ποιότητας του τροφίμου	54

Σχήμα 16: Ενδεικτικό σχήμα εφαρμογής του blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα τροφίμων
.....66

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Ο κύριος σκοπός της συσκευασίας στην περίπτωση των τροφίμων είναι η προστασία ενός προϊόντος από τις επιζήμιες επιπτώσεις που προκαλούνται από τον καταναλωτή /τελικό χρήστη κατά τη χρήση του προϊόντος στο εξωτερικό περιβάλλον. Από την άλλη μεριά, η συσκευασία προϊόντων χρησιμεύει ως αποτελεσματικό μέσο μάρκετινγκ για επικοινωνία με τον καταναλωτή. Τα τελευταία ειδικά χρόνια αποτελεί σημείο σημαντικής έρευνας από τη βιομηχανία τροφίμων και προσφέρεται σε διάφορα σχήματα και μεγέθη και, ως διεπαφή χρήστη, παρέχει στους καταναλωτές ευκολία χρήσης και προσαρμοστικότητα. Οι κύριες λειτουργίες της συσκευασίας τροφίμων έχουν κατηγοριοποιηθεί ως εξής : προστασία, επικοινωνία, ευκολία και περιορισμός. Για παράδειγμα, η συσκευασία που χρησιμοποιείται σε προϊόντα διατροφής εξυπηρετεί συνήθως τους ακόλουθους σκοπούς:

- Να αποφευχθεί η διαρροή ή το σπάσιμο του προϊόντος και η προστασία του από πιθανές μολύνσεις.
- Να γνωστοποιεί σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το περιεχόμενο του τροφίμου και το θρεπτικό του περιεχόμενο και να παρέχει οδηγίες μαγειρικής.
- Να παρέχει ευκολία, όπως να επιτρέπει στους καταναλωτές να θερμαίνουν εκ νέου τα περιεχόμενα τρόφιμα σε φούρνο μικροκυμάτων.
- Να παρέχει περιορισμό για ευκολία μεταφοράς και χειρισμού (Kirwan, 2011).

Ωστόσο, η παραδοσιακή συσκευασία δεν είναι πλέον επαρκής λόγω συνεχώς αυξανόμενων προσδοκιών και εμπειρίας των καταναλωτών, αυξανόμενης πολυπλοκότητας προϊόντων και, πιο πρόσφατα, εθνικών και διεθνών πρωτοβουλιών για την προώθηση μιας κυκλικής οικονομίας και την ελαχιστοποίηση του αποτυπώματος άνθρακα των τυποποιημένων προϊόντων. Απαιτείται επίσης καινοτόμος συσκευασία με βελτιωμένη λειτουργικότητα για την κάλυψη μιας ποικιλίας επιπλέον καταναλωτικών αναγκών. Ως χαρακτηριστικά παραδείγματα διαφοροποιημένων αναγκών του καταναλωτικού κοινού θα μπορούσαν να αναφερθούν η προσφορά τροφών που έχουν υποστεί επεξεργασία με λιγότερα συντηρητικά (minimally processed foods), προϊόντα που πληρούν αυξημένες κανονιστικές απαιτήσεις και

συσκευασίες, ειδικά διαμορφωμένες ώστε να επιτρέπουν πλήρη ιχνηλασιμότητα του προϊόντος σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής/διανομής τους. Επιπλέον, η έξυπνη συσκευασία χρησιμεύει ως μέσο επέκτασης των αγορών στο πλαίσιο της παγκοσμιοποίησης, συμβάλλει στην προσαρμογή αυστηρότερων εθνικών και διεθνών κανονισμών για την ασφάλεια των τροφίμων και χρησιμεύει ακόμη και ως προστασία από πιθανές απειλές βιοτρομοκρατίας τροφίμων (Kirwan, 2011).

Ένα σύγχρονο σύστημα διασφάλισης ποιότητας και ασφάλειας θα πρέπει να αποτρέπει τη μόλυνση μέσω της παρακολούθησης, της καταγραφής και του ελέγχου κρίσιμων παραμέτρων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, το οποίο περιλαμβάνει τη φάση μετά την επεξεργασία και επεκτείνεται σε όλα τα επιμέρους στάδια διακίνησης ως τη χρήση από τον τελικό καταναλωτή (Park et al., 2015).

Ένα σημαντικό εργαλείο για την παρακολούθηση της ποιότητας των συσκευασμένων τροφίμων είναι οι χρόνο – θερμοκρασιακοί δείκτες (Time – temperature indicators – TTI) που χρησιμοποιούνται ως σχετικά οικονομικές και φιλικές προς τον χρήστη συσκευές για την παρακολούθηση, καταγραφή και απεικόνιση της συνολικής επίδρασης του ιστορικού της θερμοκρασίας στην οποία έχει εκτεθεί ένα προϊόν στην ποιότητα του περιεχομένου του, καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας, τα συστήματα TTI ταξινομούνται ως χημικά, φυσικοχημικά ή βιολογικά συστήματα, με τον δείκτη αλλαγής θερμοκρασίας να εκδηλώνεται ως μια μη αναστρέψιμη αλλαγή χρώματος, μια κίνηση προς αλλαγή χρώματος ή μια μηχανική αλλαγή αντίστοιχα για τα τρία είδη (Park et al., 2015).

Οι δείκτες μπορούν να δώσουν πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα του προϊόντος (περιεχομένου) απευθείας, αλλά και για τη συσκευασία, το καπάκι/ άνοιγμα και τις συνθήκες αποθήκευσής του (Kirwan, 2011).

Στην παρούσα εργασία συζητείται το υπόβαθρο της έξυπνης / ενεργής τεχνολογίας συσκευασίας και παρέχεται μια σύντομη επισκόπηση των κύριων πεδίων εφαρμογής, καθώς και ευκαιριών για προστιθέμενη αξία στην παγκόσμια αγορά. Επίσης, τίθεται ο προβληματισμός αξιοποίησης τέτοιων έξυπνων συσκευασιών με στόχο τη σημαντική ελάττωση των απορριπτόμενων τροφίμων (foodwaste), ζήτημα που αποτελεί σημαντικό πρόβλημα στη σύγχρονη, προηγμένη κοινωνία. Τέλος, περιγράφονται σχετικές προκλήσεις και προτείνονται τομείς ενδιαφέροντος για τη μελλοντική έρευνα σε αυτό το θέμα.

Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

1. Έξυπνη συσκευασία: είδη, ιδιότητες και συνήθειες εφαρμογές

1. 1. Ορισμός έξυπνης συσκευασίας

Μια έξυπνη συσκευασία είναι αυτή που ανιχνεύει, ορισμένες από τις ιδιότητες του περιεχομένου ή του περιβάλλοντος στο οποίο φυλάσσεται και είναι σε θέση να ενημερώσει όλες τις εμπλεκόμενες πλευρές της εφοδιαστικής αλυσίδας (τον κατασκευαστή, τον λιανοπωλητή κλπ) και φυσικά τον τελικό καταναλωτή για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Αν και διαφέρει σαφώς από την έννοια της ενεργού συσκευασίας (active packaging), η έξυπνη συσκευασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας και της ακεραιότητας των συστημάτων ενεργού συσκευασίας. Οι Kim et al. (2005) περιγράφουν μια συσκευασία ως «έξυπνη» εάν έχει τις εξής δυνατότητες:

να παρακολουθεί το προϊόν,

να αισθάνεται το περιβάλλον μέσα ή έξω από τη συσκευασία,

να επικοινωνεί με τον καταναλωτή.

Για παράδειγμα, μια έξυπνη συσκευασία είναι αυτή που μπορεί να παρακολουθεί την ποιοτική κατάσταση ενός τροφίμου και που παρέχει μια έγκαιρη προειδοποίηση στον καταναλωτή ή τον κατασκευαστή τροφίμων. Η έξυπνη συσκευασία αναφέρεται σε ένα σύστημα που μπορεί να ανιχνεύσει περιβαλλοντικές αλλαγές και με τη σειρά του ενημερώνει τους καταναλωτές και όλους τους εμπλεκόμενους στη διακίνηση και εμπορία των τροφίμων.

1. 2. Τεχνολογία έξυπνης συσκευασίας

Σύμφωνα με τους Tsironi et al(2017) οι έξυπνες συσκευασίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: απλή έξυπνη συσκευασία και διαδραστική ή ανταποκρινόμενη έξυπνη συσκευασία (responsive intelligent packaging). Στη δεύτερη κατηγορία, η συσκευασία περιέχει αισθητήρες που ειδοποιούν τους καταναλωτές ότι το προϊόν είναι ελαττωματικό και ενδέχεται να έχει υποστεί επιβλαβείς αλλαγές στη σύνθεσή του, καθιστώντας το προϊόν ακατάλληλο για κατανάλωση. Τέτοια συστήματα συσκευασίας περιέχουν συσκευές ικανές να ανιχνεύουν και

να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις λειτουργίες και τις ιδιότητες των συσκευασμένων τροφίμων ή περιέχουν κάποιο εξωτερικό ή εσωτερικό δείκτη για το ενεργό ιστορικό προϊόντων και τον ποιοτικό προσδιορισμό τους.

Αυτοί οι τύποι συσκευών μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες.

1. Εξωτερικοί δείκτες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι έξω από τη συσκευασία, και περιλαμβάνουν δείκτες θερμοκρασίας-χρόνου και δείκτες φυσικής κατάστασης.
2. Εσωτερικοί δείκτες, οι οποίοι τοποθετούνται μέσα στη συσκευασία –συνήθως είναι τοποθετημένοι στο στόμιο της συσκευασίας ή στο καπάκι. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν οι δείκτες διαρροής οξυγόνου, μικροβιακοί δείκτες κ. α.
3. Δείκτες που αυξάνουν την αποτελεσματικότητα της ροής πληροφοριών και την αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ του προϊόντος και του καταναλωτή. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν ειδικοί γραμμικοί κώδικες που αποθηκεύουν πληροφορίες για τα τρόφιμα όπως το διάστημα ενδεδειγμένης χρήσης και η ημερομηνία λήξης. Επίσης σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνονται συσκευές που επιτρέπουν την ιχνηλασιμότητα των προϊόντων και συσκευές που ελέγχουν την παραποίηση, (anticounter feiting), ή την απομίμηση (tamper proof) (Kuswandi et al., 2011).

Η έξυπνη συσκευασία θα μπορούσε να προσδιοριστεί ως ένα σύστημα συσκευασίας που είναι ικανό να εκτελεί έξυπνες λειτουργίες (όπως ανίχνευση, καταγραφή και επικοινωνία), που παρέχει μια διευκόλυνση στη λήψη αποφάσεων για επιμήκυνση της διάρκειας ζωής, ή που είναι ικανό να βελτιώσει την ποιότητα, την ασφάλεια και να παρέχει πληροφορίες και προειδοποιήσεις για πιθανά προβλήματα.

1. 3. Αρχές λειτουργίας της έξυπνης συσκευασίας

Στη συσκευασία, η «ευφυΐα» μπορεί να έχει πολλές έννοιες και να καλύπτει μια σειρά λειτουργιών, ανάλογα με το προϊόν που συσκευάζεται –π. χ. Τρόφιμα, ποτά, φαρμακευτικά προϊόντα, οικιακά προϊόντα κ.λπ. Παραδείγματα τρεχουσών και μελλοντικών λειτουργιών που θεωρείται ότι έχουν «ευφυΐα» περιλαμβάνουν συσκευασίες οι οποίες (Taoukis et al.,2016):

1. Διατηρούν την ακεραιότητα και αποτρέπουν ενεργά την καταστροφή των τροφίμων (παράταση της διάρκειας ζωής).

2. Βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά του προϊόντος (εμφάνιση, γεύση, άρωμα, κ.λπ.).
3. Ανταποκρίνονται ενεργά σε αλλαγές στο προϊόν ή στο περιβάλλον της συσκευασίας.
4. Κοινοποιούν στον χρήστη τις πληροφορίες του προϊόντος, όπως το ιστορικό του ή άλλες συνθήκες στις οποίες εκτέθηκε.
5. Βοηθούν τον χρήστη να κατανοήσει αν η συσκευασία έχει ανοιχτεί
6. Επιβεβαιώνει την αυθεντικότητα του προϊόντος.

Οι δείκτες ονομάζονται έξυπνοι ή διαδραστικοί επειδή αλληλεπιδρούν με το προϊόν. Η έξυπνη συσκευασία επικεντρώνεται στην αίσθηση του προϊόντος και ενημερώνει την κατάστασή του όσον αφορά την ασφάλειά του (με ενδείξεις που φανερώνουν ότι τα τρόφιμα είναι ασφαλή και κατάλληλα για κατανάλωση ή το αντίθετο) και την ποιότητα (δείχνοντας τη φρεσκάδα, την ωριμότητα κλπ). Η αυξανόμενη ανάγκη για πληροφορίες σχετικά με τη συσκευασία θα σημαίνει ότι πρέπει να υπάρξει μια βαθμιαία αλλαγή στην παροχή αυτών των πληροφοριών και αυτό θα οδηγήσει στην ανάγκη για επέκταση της χρήσης της έξυπνης συσκευασίας, ιδίως για τα τρόφιμα. Οι καταναλωτές επιθυμούν όλο και περισσότερο, με την πάροδο του χρόνου, να γνωρίζουν ποια συστατικά υπάρχουν στο προϊόν και πώς πρέπει αυτό να αποθηκεύεται και να χρησιμοποιείται (π. χ. Μετά το άνοιγμα) (Giannoglou et al., 2008).

Μια άλλη σημαντική ανάγκη είναι η διασφάλιση της ασφάλειας των καταναλωτών, ιδίως για τα ευπαθή προϊόντα διατροφής. Πολλοί καταναλωτές, αναρωτιούνται αν, για παράδειγμα, ένα κατεψυγμένο έτοιμο γεύμα είναι ασφαλές για χρήση ή κατανάλωση. Το ερώτημα αυτό εν μέρει απαντάται με τη σφραγίδα ημερομηνίας «bestby» (ανάλωση κατά προτίμηση έως...). Ωστόσο, αυτό δεν λαμβάνει υπόψη εάν το προϊόν έχει εκτεθεί σε ιδιαίτερα υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης ή της μεταφοράς του. Στο μέλλον, οι μικροβιακοί οπτικοί δείκτες ανάπτυξης και οι δείκτες ΤΠΙ που βασίζονται στη φυσική, χημική ή ενζυμική δραστηριότητα στα τρόφιμα θα συνεισφέρουν αποφασιστικά ώστε να δώσουν μια σαφή, ακριβή και σαφή ένδειξη της ποιότητας του προϊόντος, της ασφάλειας και της διάρκειας ζωής (Tsironi et al., 2017).

Η έξυπνη συσκευασία περιλαμβάνει εργαλεία για τον έλεγχο της οξειδωσης, της ανάπτυξης μικροβίων και της υγρασίας, ενώ η έξυπνη συσκευασία διευκολύνει την παρακολούθηση της αλλοίωσης των ποιοτικών χαρακτηριστικών των τροφίμων.

2. Κατηγορίες έξυπνης συσκευασίας βάσει της τεχνολογίας

Οι έξυπνες συσκευασίες αποτελούν ένα ευρύ σύνολο, ανάλογα με την τεχνολογία που φέρουν για την ανίχνευση και παρουσίαση των αλλοιώσεων και των αλλαγών του περιεχομένου τους.

Οι κυριότερες έξυπνες συσκευασίες βασίζονται στις παρακάτω τεχνολογίες:

- Γραμμωτοί κώδικες (barcodes)
- Ετικέτες ραδιοσυχνικής αναγνώρισης (RFIDtags)
- TTI
- Θερμοχρωμικά μελάνια
- Δείκτες συγκέντρωσης αερίων

Οι περισσότερες από αυτές τις έξυπνες συσκευές δεν είχαν εκτεταμένη εμπορική εφαρμογή. Για παράδειγμα, οι χρόνο – θερμοκρασιακοί δείκτες μπορούν να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στην ένδειξη της φρεσκάδας και της ασφάλειας ενός τροφίμου αλλά και να παρακολουθούν και να επικοινωνούν ποια τρόφιμα είναι ασφαλή για κατανάλωση και ποια όχι. Αυτές οι δυνατότητες είναι εξαιρετικά σημαντικές όταν τα τρόφιμα αποθηκεύονται σε συνθήκες που δεν είναι οι βέλτιστες, όπως σε συνθήκες υπερβολικής θερμότητας ή σε μεγάλους χρόνους στην κατάψυξη. Στην περίπτωση τροφίμων που δεν πρέπει να καταψύχονται, ένας χρόνο – θερμοκρασιακός δείκτης θα υποδεικνύει εάν το τρόφιμο είχε εκτεθεί σε κρύες θερμοκρασίες περισσότερο από όσο ενδείκνυται. Αντίθετα, ένας TTI θα μπορούσε να προσδιορίσει εάν τρόφιμα ευαίσθητα στη θερμότητα είχαν εκτεθεί σε αφύσικα υψηλές θερμοκρασίες αλλά και τη διάρκεια αυτής της έκθεσης (Rokugawa et al., 2015).

2. 1. Δείκτες χρόνου-θερμοκρασίας (TTI): αρχές λειτουργίας, τύποι, μαθηματικά μοντέλα και εφαρμογές

Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας σε ένα τρόφιμο μπορούν να οδηγήσουν σε αλλαγές στην ασφάλεια και την ποιότητά του. Ένας TTI μπορεί να οριστεί ως μια απλή, φθηνή συσκευή που μπορεί να δείξει μια εύκολα μετρήσιμη, αλλαγή στις συνθήκες της συσκευασίας, η οποία αποκαλύπτει το πλήρες ή μερικό ιστορικό θερμοκρασίας ενός τροφίμου στο οποίο είναι προσαρτημένο (Taoukis et al., 2016). Οι δείκτες TTI που διατίθενται ως σήμερα στην αγορά

εξυπηρετούν αυτούς τους σκοπούς ο καθένας βάσει διαφορετικής αρχής. Η αρχή της λειτουργίας TTI είναι όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, μια μηχανική, χημική, ενζυμική ή μικροβιολογική μη αναστρέψιμη αλλαγή, που συνήθως εκφράζεται με την ορατή απόκριση με μηχανική παραμόρφωση, ή με διαφορά στο χρώμα (Giannoglou et al., 2008). Η χημική ή φυσική αλλαγή, βασίζεται σε χημική αντίδραση ή σε φυσική αλλαγή σε σχέση με το χρόνο και τη θερμοκρασία, όπως μια αντίδραση οξέος-βάσης, τήξη, πολυμερισμός κ.λπ. , ενώ μια βιολογική αλλαγή, βασίζεται στην αλλαγή στη βιολογική δραστηριότητα, όπως η ανάπτυξη μικροοργανισμών ή ένζυμων σε σχέση πάντα με το χρόνο ή τη θερμοκρασία. Ο ρυθμός αλλαγής εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Συνήθως αυξάνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες κάτι που έχει ως αποτέλεσμα να επιδεινώνεται και να υποβαθμίζεται η ποιότητα του προϊόντος. Η ορατή απόκριση του TTI αντικατοπτρίζει το ιστορικό χρόνου- θερμοκρασίας του προϊόντος στο οποίο είναι τοποθετημένο. Οι TTI πρέπει να ενεργοποιούνται εύκολα και, στη συνέχεια, να αντανakλούν μια αλλαγή στις συνθήκες που εκτίθεται το προϊόν η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μπορεί να μετρηθεί εύκολα. Αυτή η αλλαγή πρέπει να είναι μη αναστρέψιμη και ιδανικά να συσχετίζεται με την έκταση της φθοράς του προϊόντος και της υπολειπόμενης διάρκειας ζωής του. (Mustafa et al., 2018)

Οι TTI μπορούν να ταξινομηθούν είτε ως μερικοί ιστορικοί είτε ως δείκτες πλήρους ιστορικού, ανάλογα με τον μηχανισμό απόκρισης. Οι TTI μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες, με βάση τη λειτουργικότητά τους (Kim et al., 2013):

- Οι δείκτες κρίσιμης θερμοκρασίας (Critical temperature indicators – CTI) δείχνουν ότι ένα προϊόν εκτέθηκε πάνω (ή κάτω) από μια θερμοκρασία αναφοράς. Η μετουσίωση μιας σημαντικής πρωτεΐνης πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία ή η ανάπτυξη ενός παθογόνου μικροοργανισμού είναι άλλες σημαντικές περιπτώσεις όπου μια CTI θα ήταν χρήσιμη.
- Οι Ολοκληρωτές Κρίσιμης Θερμοκρασίας – Χρόνου (Critical temperature/time integrators – CTTI) είναι χρήσιμοι στην ένδειξη βλαβών στην εφοδιαστική αλυσίδα και για προϊόντα στα οποία οι αντιδράσεις που είναι σημαντικές για την ποιότητα ή την ασφάλεια, ξεκινούν ή συμβαίνουν σε μετρήσιμους ρυθμούς πάνω από μια κρίσιμη θερμοκρασία. Παραδείγματα τέτοιων αντιδράσεων είναι η μικροβιακή ανάπτυξη ή η ενζυμική δράση που αναστέλλεται κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία.
- Οι χρονο – θερμοκρασιακοί ολοκληρωτές ή Δείκτες (TTI – Time Temperature Integrators), που στην επιστημονική βιβλιογραφία καλούνται και TTM (Time Temperature Monitors –

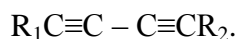
χρονο– θερμοκρασιακοί επόπτες) δίνουν μια συνεχή απόκριση που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και αναφέρεται σε όλο το ιστορικό του προϊόντος (Rokugawa et al., 2015). Άλλοι ερευνητές χωρίζουν τους TTIs με διαφορετική κατηγοριοποίηση. Οι Shaddong et al (2015) κατατάσσουν τους TTI σε χημικούς, φυσικούς, ενζυμικούς και βιολογικούς.

2. 1. 1. Έιδη TTIs

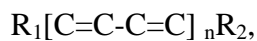
Χημικοί TTIs

Διάφορα χημικά συστήματα TTI έχουν αναπτυχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια, τα οποία αντιπροσωπεύουν σημαντικό ποσοστό εφαρμοσμένων TTI σε έξυπνες συσκευασίες. Με την πάροδο του χρόνου που συνεπάγεται αλλαγές στη θερμοκρασία, οι TTI αυτής της κατηγορίας αντιδρούν χημικά και παρουσιάζουν μια συγκεκριμένη αλλαγή χρώματος. Επομένως, αυτή η ιδιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ένδειξη της ποιότητας του συσκευασμένου προϊόντος. Σήμερα, οι χημικοί TTI διακρίνονται κυρίως από τις εξής διαδικασίες με βάση τις οποίες διέπεται η αρχή λειτουργίας τους: με βάση τον πολυμερισμό, με βάση τη φωτοχρωμία και με βάση την αντίδραση οξείδωσης (Aliakbarian et al., 2016).

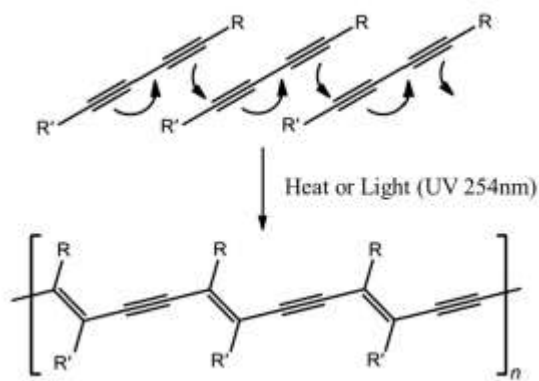
TTI βάσει πολυμερισμού. Ο πρώτος τύπος χημικής TTI βασίζεται στην αντίδραση πολυμερισμού στερεάς κατάστασης ενός μονομερούς με μια ομάδα ακετυλενίου



Όταν υποβάλλονται σε εξωτερικά περιβαλλοντικά ερεθίσματα (όπως υψηλή θερμοκρασία και υψηλή ακτινοβολία), τα μονομερή ακολουθούν μια αντίδραση 1,4-πολυμερισμού προσθήκης και σχηματίζουν ένα πολυμερές που έχει δομή



δηλαδή ένωση πολυδιακετυλενίου (PDA). Η διαδικασία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



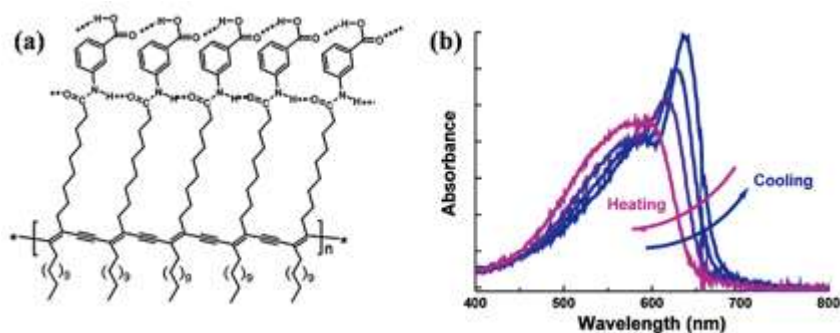
Σχήμα 1: Σχηματικό διάγραμμα του 1,4-πολυμερισμού ενώσεων διακετυλενίου παρουσία θερμότητας ή φωτός
 Πηγή: Gao et al., 2020

Επειδή η αντίδραση πολυμερισμού είναι μη αναστρέψιμη και ο ρυθμός αντίδρασης αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας, το φάσμα απορρόφησης μετατοπίζεται από την υψηλότερη ζώνη στη χαμηλότερη, κατά συνέπεια, το χρώμα του δείκτη αλλάζει. Έτσι, το PDA μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ΤΠΙ για την οπτική ένδειξη της ποιότητας του προϊόντος με βάση τη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας, ρυθμού αντίδρασης και αλλαγής χρώματος. Για την ακρίβεια, η θερμοκρασία της αντίδρασης επηρεάζει τον ρυθμό που τελικά επιφέρει αλλαγή χρώματος (Gao et al., 2020).

Το φαινόμενο αλλαγής χρώματος του πολυμερισμού μιας ένωσης διακετυλενίου είναι το αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης μεταξύ της συζευγμένης κύριας αλυσίδας και της πλευρικής αλυσίδας. Ακόμη και μια μικρή τροποποίηση της δομής της πλευρικής αλυσίδας μπορεί να οδηγήσει σε δραστική αλλαγή στη φάση της μεταβατικής συμπεριφοράς. Στην αντίδραση 1,4-πολυμερισμού του PDA, τα ηλεκτρόνια διεγείρονται από το ορατό φως και έτσι, μπορούν να δημιουργηθούν μεταβάσεις $\pi - \pi^*$. Το ορατό φως στα περίπου 640 nm μπορεί να απορροφηθεί, αλλάζοντας το χρώμα από κόκκινο σε μπλε. Κατά την εισαγωγή διαφορετικών ακραίων ομάδων για την τροποποίηση των μορίων μονομερούς διακετυλενίου, μπορούν να παραχθούν παράγωγα διακετυλενίου, όπως αλκοόλες, σουλφονικά οξέα, καρβαμικά άλατα και αρωματικοί δακτύλιοι. Επομένως, δημιουργείται μια μετατόπιση και η μέγιστη ορατή απορρόφηση κινείται γύρω στα 540 nm και συνεπώς το PDA εμφανίζεται να έχει χρώμα ανοιχτό κόκκινο ή κόκκινο. Επειδή διαφορετικές τελικές ομάδες επηρεάζουν τη διαμόρφωση της κύριας αλυσίδας με διαφορετικό τρόπο, η κατάσταση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στον σκελετό PDA είναι επίσης διαφορετική. Κατά συνέπεια, ποικίλες χρωματικές αλλαγές του

PDA μπορούν να σχεδιαστούν με διαφορετικές τροποποιήσεις της τελικής αλυσίδας (Gao et al., 2020).

Με την εισαγωγή ορισμένων ειδικών ουσιών, τα προκύπτοντα αποτελέσματα, όπως αλληλεπιδράσεις μεταξύ αμιδικού δεσμού και καρβοξυλίου και η ένωση της καρβοξυλομάδας με Na, K, Zn₂ και άλλα μεταλλικά ιόντα, μπορούν να δημιουργήσουν στο PDA μια αναστρέψιμη αλλαγή χρώματος με την έκθεση σε θερμότητα, σε χαμηλό pH ή σε άλλους χημικούς παράγοντες. Ωστόσο, επειδή η αλλαγή χρώματος είναι αναστρέψιμη, αυτό το είδος PDA δεν μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα στο ΤΤΙ για να κάνει μια σταθερή ένδειξη για τη λήξη των τροφίμων. Επομένως, πρέπει να τροποποιηθεί και να σχεδιαστεί πριν εφαρμοστεί στην πραγματική παραγωγή (Aha et al., 2003).

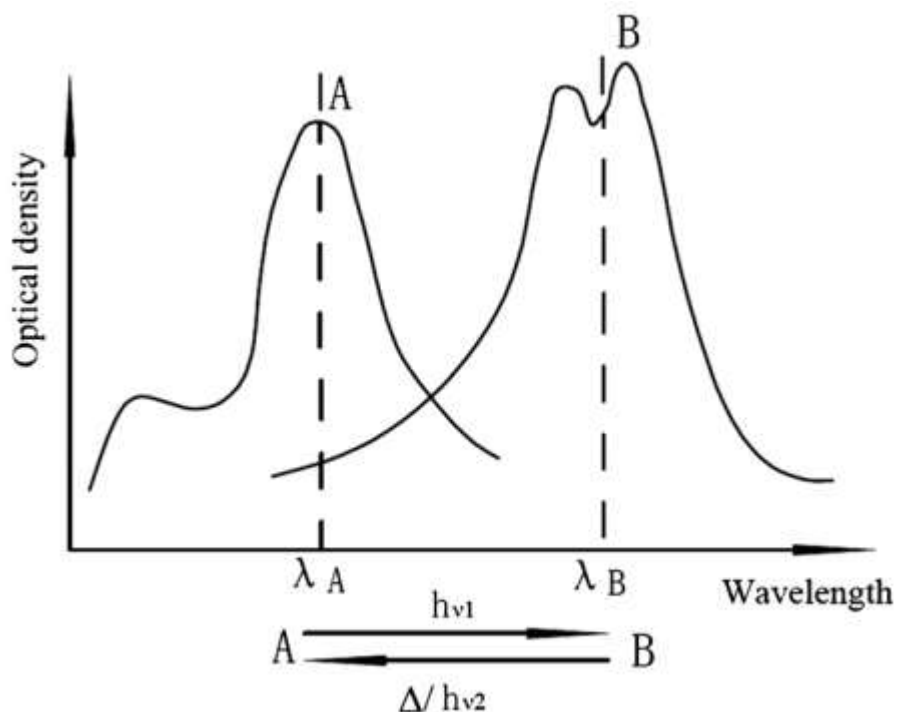


Σχήμα 2 (α) Σχηματική απεικόνιση για το σχηματισμό ενός ισχυρού δικτύου δεσμών υδρογόνου. β) φάσματα UV αναστρέψιμων θερμοχρωμικών μεταβάσεων του PDA μετά την αντίδραση με καρβοξυλομάδα και αμιδική ομάδα.

Πηγή: Aha et al., 2003

ΤΤΙ βάσει φωτοχρωματισμού. Ένας άλλος χημικός δείκτης βασίζεται σε μια φωτοχρωμική ένωση που ενεργοποιείται από ορισμένα μήκη κύματος φωτός για να εμφανίσει ένα συγκεκριμένο χρώμα. Η αρχή της θερμικά επαγόμενης εξασθένισης σε μια διαδικασία αντίστροφης αντίδρασης χρησιμοποιείται για την δημιουργία αυτού του τύπου δείκτη. Ο ρυθμός αντίδρασης και ο βαθμός εξασθένισης αλλάζουν με τη συνολική επίδραση χρόνου και θερμοκρασίας, έτσι ώστε η διάρκεια ζωής να μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την ορατή απόκριση. Στα αρχικά στάδια, η φωτοχρωμική ένωση είναι σταθερή και το χρώμα του δείκτη δεν αλλάζει κατά την έκθεση σε μια χρόνο - θερμοκρασιακή έκθεση. Επομένως, αυτό το είδος ΤΤΙ πρέπει αρχικά να ενεργοποιείται με έκθεση σε φως ορισμένων μηκών κύματος, συνήθως

υπεριώδους (UV), με αυτοματοποιημένο φορτιστή σε χαμηλή θερμοκρασία. Μετά την ενεργοποίηση αυτή, οι αλλαγές στη δομή ή την ηλεκτρονική διαμόρφωση του TTI, σε συνδυασμό με την αλλαγή χρώματος, θα επηρεάσουν το φάσμα της απορρόφησης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Tsironi et al., 2017).



Σχήμα 3. Γραφική παράσταση φωτοχρωμικής αντίδρασης και φάσματος απορρόφησης
 Πηγή: Tsironi et al., 2017

Στη συνέχεια διεξάγεται η αντίστροφη αντίδραση και η χημική ένωση αποκαθιστά την αρχική μοριακή δομή της, την ώρα που ο δείκτης υποβάλλεται σε ένα άλλο μήκος κύματος ακτινοβολίας φωτός ή αν η θερμότητα τον επηρεάσει. Κατά συνέπεια, το αλλαγμένο χρώμα μπορεί, στις εργαστηριακές δοκιμές, να επανέλθει στην αρχική κατάσταση και η διάρκεια του αποχρωματισμού είναι ανάλογη με την ποσότητα του φωτός στο οποίο εκτέθηκε. Η διάρκεια και η ένταση του φωτός που χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση της χρωστικής ουσίας μπορεί να ελεγχθεί για να ρυθμιστεί η διαδικασία του αποχρωματισμού (Kim et al., 2013).

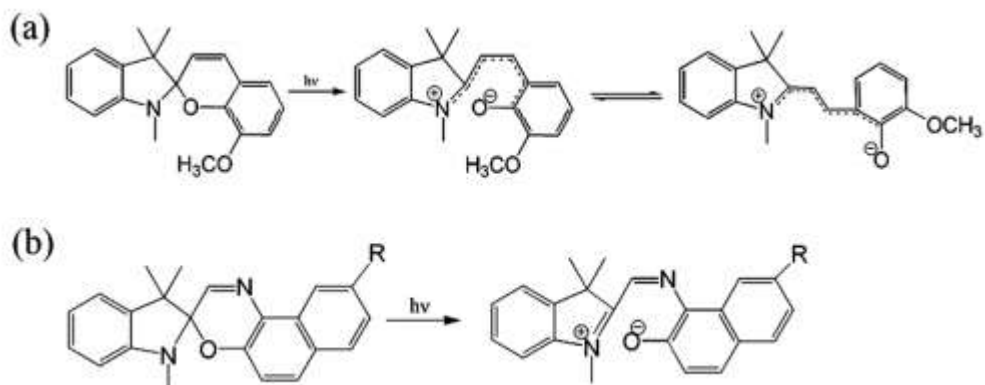
Είναι ζωτικής σημασίας η αλλαγή του χρώματος του TTI να είναι συνεπής με την αναμενόμενη λήξη του προϊόντος, όπου στην περίπτωση αυτή δε θα μπορεί να γίνει

αντιστροφή των συνθηκών, δηλαδή να δημιουργείται ένα χρώμα που θα έχει αισθητή διαφορά στον καταναλωτή. Έτσι, οι χρήστες θα μπορούν να ενημερωθούν για το θερμικό ιστορικό του προϊόντος παρατηρώντας την αλλαγή χρώματος του δείκτη TTI. Η ενέργεια Gibbs είναι αρκετά υψηλή στη φωτοχρωμική αντίδραση, έτσι ώστε η ελαφριά αναστρέψιμη αντίδραση να μπορεί να οπτικοποιηθεί εύκολα (με την φανερή εναλλαγή χρώματος του δείκτη) και ο ρυθμός είναι αρκετά γρήγορος για να φτάσει σε μια απόκριση που λαμβάνει χώρα σε picosecond, με το προϊόν να μπορεί να παρακολουθείται σε ημέρες ή και μήνες (Rokugawa, 2015).

Είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί μια αντίδραση φωτοχρωμικής ένωσης που προκαλείται από το φως ως δείκτης έξυπνης συσκευασίας, γιατί σε αυτή την περίπτωση, η απλή έκθεση σε φως θα οδηγούσε σε αλλαγή του χρώματος του δείκτη και θα έδινε λάθος πληροφορία. Εξάλλου, η θερμοκρασία προκαλεί την εξασθένηση της αντιστροφής αντίδρασης της φωτοχρωμικής ένωσης, ενώ ο ρυθμός της θερμικά επαγόμενης αντίδρασης εξασθένησης είναι πολύ βραδύτερος από αυτόν της αντίδρασης που προκαλείται από το φως, το οποίο σημαίνει ότι στην πράξη, δε θα μπορέσει να επανέλθει το αρχικό χρώμα του δείκτη.

Μέχρι σήμερα, οι φωτοχρωμικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται σε έξυπνες συσκευασίες αποτελούνται κυρίως από σπироαρωματικούς υδρογονάνθρακες και ενώσεις βινυλίου (Taoukis et al., 2016).

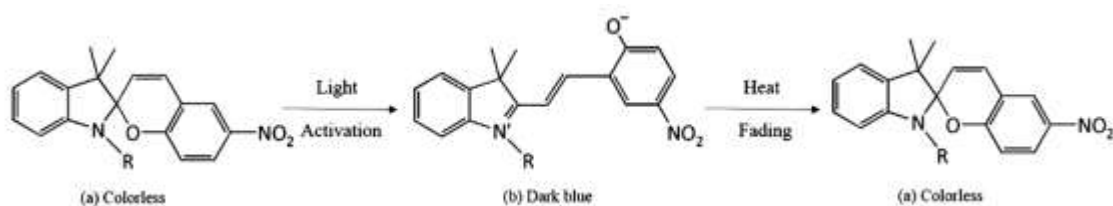
Η σπироαρωματική ένωση περιλαμβάνει κυρίως σπироπυράνη και σπироξαζίνη. Αυτά, έχουν τον ίδιο φωτοχρωμικό μηχανισμό, στον οποίο το χρώμα αλλάζει με την ετερόλυση του χημικού δεσμού και το άνοιγμα του δακτυλίου λόγω της πολύ παρόμοιας δομής τους, η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4. Φωτοχρωμικές αντιδράσεις σπιροπυράνης (α), και σπιροξαζάνης (β)
 Πηγή: Kulchan et al., 2016

Ένας δείκτης ΤΤΙ που χρησιμοποιείται στο εμπόριο είναι ο κατοχυρωμένος εμπορικά, OnVu™. Ο δείκτης αυτός αποτελείται από έξυπνη μελάνη, ευαίσθητη στη θερμοκρασία, που περιέχει τη φωτοχρωμική ένωση, το χρώμα αναφοράς, το υπόστρωμα / χαρτί και το φίλτρο UV. Το σύστημα αυτό έχει σχεδιαστεί σε σχήμα μήλου με χρωματιστό εσωτερικό και άχρωμο εξωτερικό. Η χρωστική μελάνη εκτύπωσης που έχει βάση το νερό, τοποθετείται στο εσωτερικό και υπάρχει σε δύο καταστάσεις, συγκεκριμένα, τις καταστάσεις (α) και (β) (Chu et al, 2018).

Το σπιροπυράνιο στην κατάσταση (α) είναι άχρωμο και θερμικά σταθερό ενώ το σπιροπυράνιο στην κατάσταση (β) είναι μπλε και μεταστατικό. Όταν ενεργοποιείται από την υπεριώδη ακτινοβολία, η φωτοχρωμική ένωση αλλάζει και από άχρωμη γίνεται μπλε. Με την αλλαγή της θερμοκρασίας, η κατάσταση (β) θα μετατραπεί στην κατάσταση (α) με αργό ρυθμό και το χρώμα του φωτοχρωμικού υλικού στο εσωτερικό εξασθενεί σε γαλάζιο καταλήγοντας να γίνει άχρωμο. Η αντίδραση μεταξύ (α) και (β) του δείκτη OnVu™ φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Kim et al., 2013).



Σχήμα 5. Διασύνδεση μεταξύ (α) και (β) της ένδειξης OnVu™. Η έκθεση στο υπεριώδες φως προκαλεί χρωματισμό ενώ η θερμότητα προάγει την αντίστροφη αντίδραση
 Πηγή: Kim et al., 2013

Στους φωτοχρωμικούςΤΤΙ, η χρωματική αλλαγή εκφράζεται από τη σχέση:

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_{\max})^2 + (a - a_{\min})^2 + (b - b_{\max})^2} \quad (1)$$

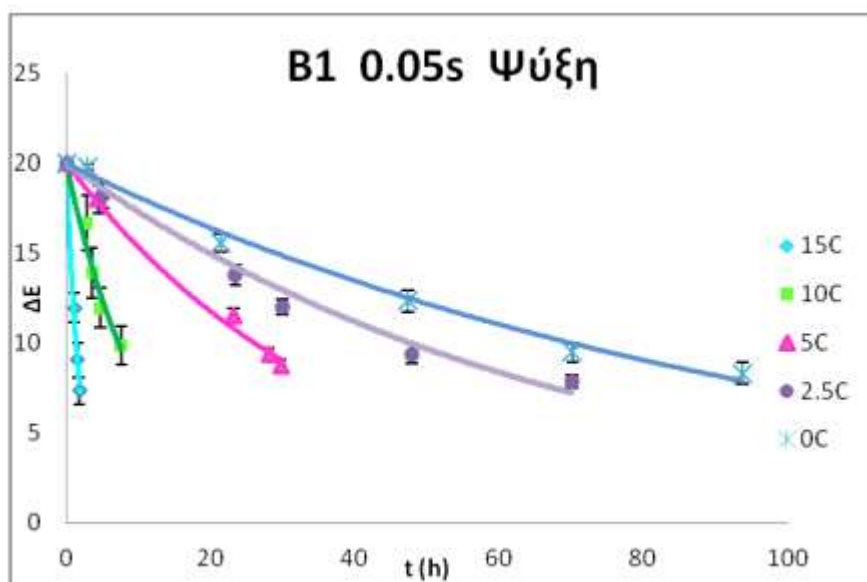
Όπου: L_{\max} , a_{\min} , b_{\max} είναι αρχικές τιμές χρώματος μη ενεργοποιημένου δείκτη

Η χρωματική μεταβολή (ΔE) σε συνάρτηση με το χρόνο, απεικονίζεται από την εκθετική καμπύλη που εκφράζεται από την εξής συνάρτηση (συνάρτηση απόκρισης, πρώτης τάξης) (Kulchan et al., 2016):

$$\Delta E = \Delta \epsilon_0 \exp^{-kt} \quad (2)$$

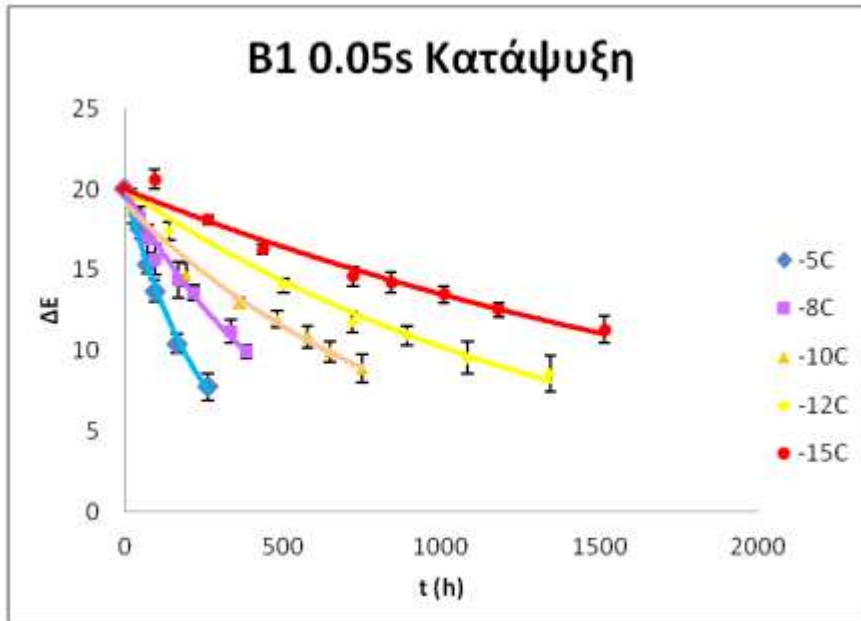
Όπου, $\Delta \epsilon_0$ το χρώμα που είχε αρχικά ο δείκτης, και k η σταθερά του ρυθμού μεταβολής της χρωματικής παραμέτρου ΔE .

Η μεταβολή του χρώματος των δεικτών αυτών, βάσει της αλλαγής της θερμοκρασίας, απεικονίζεται στα παρακάτω διαγράμματα, για θερμοκρασίες άνω και κάτω του μηδενός, αντίστοιχα (Chu et al, 2018):



Σχήμα 6: Διάγραμμα συνάρτησης της απόκρισης της $F(X_c)$ με το χρόνο, για το δείκτη OnVuB1, για θερμοκρασίες ψύξης

Πηγή: Chu et al, 2018



Σχήμα 7: Διάγραμμα συνάρτησης της απόκρισης της $F(X_c)$ με το χρόνο, για το δείκτη OnVuB1, για αρνητικές θερμοκρασίες (σε κατάψυξη)
 Πηγή: Chu et al, 2018

Όταν το χρώμα του εσωτερικού είναι ίδιο με αυτό του εξωτερικού, σημαίνει ότι το προϊόν έχει λήξει και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί πια, όπως φαίνεται παρακάτω:



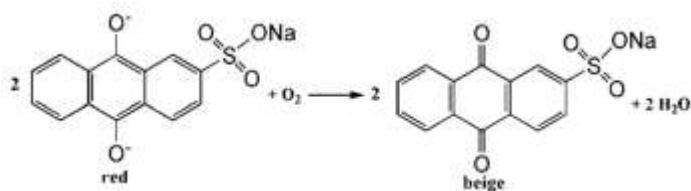
Εικόνα 1. Η συμπεριφορά του δείκτη TTI του OnVu™



Εικόνα 2. Εφαρμογή του εμπορικού δείκτη OnVu™ σε προϊόν κρέατος

ΤΤΙ με βάση την οξειδοαναγωγική αντίδραση (Redox).

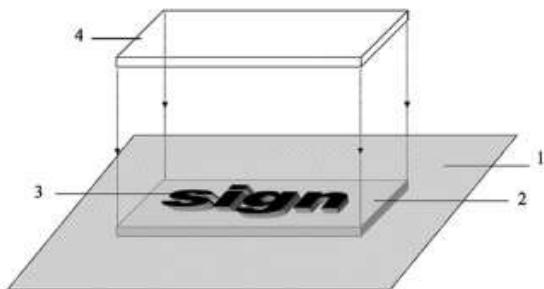
Οι ΤΤΙ αυτής της κατηγορίας βασίζονται στην αντίδραση Redox που προκαλείται από το φως ή από άλλους παράγοντες. Η χημική ένωση αντιδρά με το οξυγόνο του αέρα. Ο ρυθμός αντίδρασης σχετίζεται άμεσα με την συνολική επίδραση του χρονο-θερμοκρασιακού ιστορικού. Κρίνοντας από την αλλαγή χρώματος του ΤΤΙ και κατάλληλες μαθηματικές εξισώσεις, μπορεί να εκτιμηθεί (ως πρόβλεψη) η διάρκεια ζωής ενός προϊόντος. Ως αποχρωματισμένο υλικό που μπορεί να εφαρμοστεί σε μελάνη εκτύπωσης για ΤΤΙ χρησιμοποιείται ένα παράγωγο ανθρακινόνης. Επιλεγμένες ενώσεις ανθρακινόνης μπορούν να αποσυντεθούν σε κατακόκκινα σωματίδια. Όταν τα σωματίδια αντιδρούν με οξυγόνο, το χρώμα σταδιακά αλλάζει σε μπεζ. Η αντίδραση αποχρωματισμού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Semple et al., 2010).



Σχήμα 8. Η αντίδραση αποχρωματισμού ένωσης ανθρακινόνης
Πηγή: Semple et al., 2010

Ο ρυθμός αντίδρασης οξειδοαναγωγής σχετίζεται στενά με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η αλλαγή χρώματος επηρεάζεται τόσο από τον χρόνο όσο και από τη

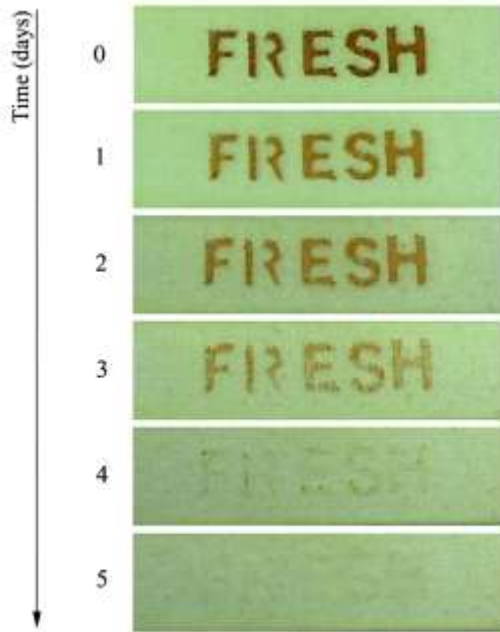
θερμοκρασία, έτσι ώστε το υλικό να μπορεί να εφαρμοστεί ως δείκτης ΤΤΙ. Αυτός αποτελείται από τέσσερα μέρη, τα οποία φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 9. Η κατασκευή του δείκτη θερμοκρασίας χρόνου: 1υπόστρωμα, 2φόντο για εκτύπωση, 3 σήμα, 4διαφανές πολυμερές επίστρωμα
Πηγή: Chu et al, 2018

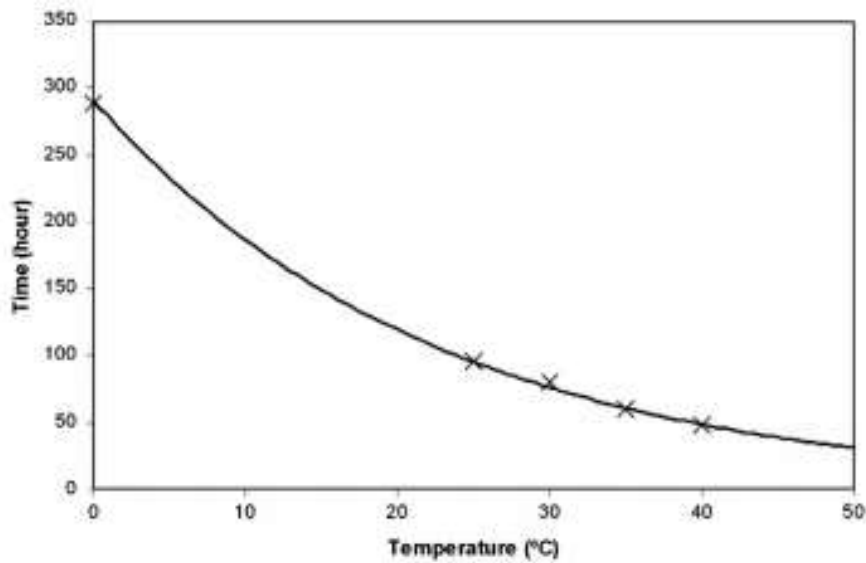
Το β-σουλφονικό νάτριο χρησιμοποιείται ως υλικό αποχρωματισμού, η υδροξυπροπυλική κυτταρίνη ως συνδετικό που διαλύεται σε μείγμα νερού-αλκοόλης, ενώ τα υπόλοιπα, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ και NaOH και οι υπόλοιπες ενώσεις του νατρίου, διαλύονται στο μείγμα νερού και αλκοόλης για να ληφθεί το θερμοχρωματικόμελάνι. Ως υπόστρωμα προτιμάται το γυαλί, το αλουμίνιο και άλλα μέταλλα ή τα δύσκολα αποικοδομήσιμα πλαστικά. Η ρητίνη είναι κατασκευασμένη από πολυβινυλική αλκοόλη και παράγωγα ανθρακινόνης. Ένα προστατευτικό φιλμ από πολυακρυλικό μπορεί να προστατεύσει το μελάνι από τις επιδράσεις του οξυγόνου και του νερού για τον έλεγχο του ρυθμού αντίδρασης.

Το ΤΤΙ αυτού του τύπου έχει καλή εκτύπωση, η οποία εξυπηρετεί τον σκοπό της παρακολούθησης της ποιότητας των τροφίμων. Η διαδικασία εξασθένισης χρώματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Kim et al., 2013).



Εικόνα 3. Ο αποχρωματισμός του δείκτη θερμοκρασίας χρόνου στους 25 ° C
 Πηγή: Kim et al., 2013

Επιπλέον, ο χρόνος εξασθένησης χρώματος ποικίλλει ανάλογα με το περιβάλλον.



Σχήμα 10. Σχέση θερμοκρασίας χρόνου σε δείκτη χρόνου-θερμοκρασίας με επίστρωση πολυακρυλικού Πηγή: Semple et al., 2010

Η σύνθεση του μελανιού εκτύπωσης και η σειρά των εξαρτημάτων καθορίζουν το χρώμα του μελανιού και τον χρόνο αλλαγής του χρώματος. Οι διαφορετικές εφαρμογές του ΤΤΙ απαιτούν διαφορετικές συνθέσεις και αναμειξείς. Ωστόσο, το ΤΤΙ με βάση την οξειδοαναγωγική αντίδραση περιέχει πιθανές τοξικές ουσίες, δηλαδή ανθρακινόνες. Τέτοια ΤΤΙ δεν μπορεί να δώσουν ακριβείς ενδείξεις επειδή το περιβάλλον οξυγόνο θα επηρεάσει την οξειδοαναγωγική αντίδραση. Για το λόγο αυτό απαιτείται περαιτέρω μελέτη μέχρι να χρησιμοποιηθούν στο εμπόριο εκτεταμένα (Ταουκίς & Τσιρόνι, 2016).

Ενζυμικοί ΤΤΙ

Οι ενζυμικοί ΤΤΙ βασίζονται στην αντίδραση υδρόλυσης του ενζύμου με το υπόστρωμα, που προκαλεί την αλλαγή χρώματος. Η έκταση της αντίδρασης καθορίζεται από το χρόνο και τη θερμοκρασία, επομένως η αλλαγή χρώματος μπορεί να αποκαλύψει τη σωρευτική επίδραση των δύο αυτών παραγόντων. Κατά συνέπεια, η εναπομένουσα διάρκεια ζωής των προϊόντων μπορεί να εμφανιστεί δυναμικά. Οι ενζυμικοί ΤΤΙ έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλους τύπους, όπως χαμηλό κόστος, σταθερή απόδοση και ευκολία στον έλεγχο. Μπορούν να βαθμονομηθούν ώστε να ταιριάζουν με τον ρυθμό αλλοίωσης ενός καθορισμένου προϊόντος μεταβάλλοντας διάφορες παραμέτρους όπως (Giannakourou, 2003):

- τον τύπο και τη συγκέντρωση ενζύμου,
- τον τύπο και τη συγκέντρωση υποστρώματος,
- την παρουσία ενεργοποιητών (π.χ. συνένζυμα) ή αναστολέων,
- το pH
- την παρουσία ρυθμιστικού διαλύματος.

Θεωρητικά, είναι δυνατή η παραγωγή τέτοιων δεικτών, των οποίων η διάρκεια απόκρισης κυμαίνεται από λίγα λεπτά έως αρκετά χρόνια, ανάλογα φυσικά και με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος του δείκτη.

ΤΤΙ με βάση την αντίδραση οξέος-βάσης

Το εμπορικά κατοχυρωμένο CheckPoint™ είναι ένας ενζυμικός ΤΤΙ βασισμένος στην αντίδραση οξέος-βάσης που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Vitsab της Σουηδίας. Η αρχή λειτουργίας είναι ότι το υπόστρωμα λιπιδίων υδρολύεται σε ελεγχόμενες συνθήκες, με αποτέλεσμα τη μείωση του pH. Κατά συνέπεια, το χρώμα του δείκτη αλλάζει. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο πιο γρήγορος είναι ο ρυθμός υδρόλυσης του λιπιδικού υποστρώματος. Η συνεχής αλλαγή χρώματος μπορεί επίσης να μετρηθεί, και έτσι, η ποιότητα του προϊόντος μπορεί να εκτιμηθεί παρατηρώντας την αλλαγή χρώματος (Gao et al., 2019).

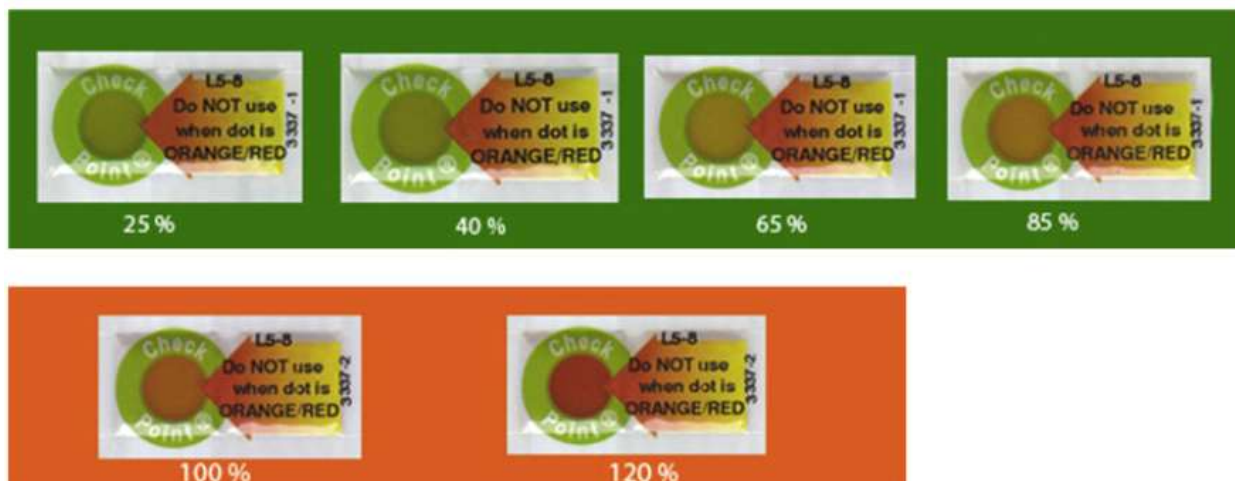
Το CheckPoint™ αποτελείται από δύο ξεχωριστά τμήματα που περιέχουν ενζυμικό διάλυμα και υπόστρωμα στο εσωτερικό με τη μορφή πλαστικών μίνι σάκων. Πριν από την ενεργοποίηση του ΤΤΙ, το ενζυμικό διάλυμα και το υπόστρωμα μπορούν να διατηρηθούν χωριστά για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, μπορεί να αποθηκευτούν στους 4° C για 1,5 χρόνια. Το φράγμα μεταξύ δύο ξεχωριστών τμημάτων μπορεί να διαχωριστεί μηχανικά και στη συνέχεια το διάλυμα ενζύμου και το υπόστρωμα αναμιγνύονται μαζί για να ενεργοποιήσουν τον ΤΤΙ. Προσαρμόζοντας τους συνδυασμούς των τύπων ενζύμων και της συγκέντρωσης του υποστρώματος, ο χρόνος απόκρισης και το εύρος θερμοκρασίας του ΤΤΙ μπορούν να προσαρμοστούν, γεγονός που συμβάλλει στη δυνατότητα εφαρμογής σε πληθώρα τροφίμων και σε διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη (Chu et al, 2018). Υπάρχουν αρκετοί τύποι Vitsab που χρησιμοποιούνται ανάλογα με το προϊόν, ώστε να καλύπτουν διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών και να λειτουργούν αξιόπιστα σε διαφορετικές κλίμακες ενεργειών ενεργοποίησης. Οι τύποι αυτοί χρησιμοποιούν διαφορετικά ένζυμα και υποστρώματα, με διαφορετικές συγκεντρώσεις. Το πιο σύνηθες ένζυμο που χρησιμοποιείται είναι η παγκρεατική λιπάση, ή λιπάσες μικροβιακής προέλευσης, όπως η *Rhizopus Oryzae Lipase*. Ως υποστρώματα χρησιμοποιούνται συνήθως η τριλαουρίνη, η τριβουτυρίνη, και ο μυριστικός μεθυλεστέρας. Το χρώμα στους δείκτες αυτούς μεταβάλλεται από πράσινο σε κόκκινο, ώστε ο χρήστης να γνωρίζει ότι όσο πιο πράσινη είναι η απόχρωση, τόσο καλύτερα συντηρημένο είναι το τρόφιμο, και όσο πιο κόκκινη γίνεται η απόχρωση τόσο αντενδείκνυται η κατανάλωσή του (Kim et al., 2019).

Η εξίσωση απόκρισης, ακολουθεί τον τύπο: $F(X) = kt$, όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια πιο αναλυτικά, όπου:

X είναι η μεταβολή του ενζύμου που χρησιμοποιείται (π. χ. παγκρεατική λιπάση)

k: η σταθερά του ρυθμού απόκρισης που εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία και από άλλες συνθήκες του περιβάλλοντος

t: ο χρόνος



Εικόνα 4. Αλλαγές χρώματος της πρόσβασης ετικέτας Vitsab Checkpoint
Πηγή: Kim et al., 2019

ΤΤΙ με βάση την αντίδραση Redox (διαφορετικοί από τους χημικούς)

Ένα νέο ενζυμικό σύστημα ΤΤΙ έχει αναπτυχθεί από τους ερευνητές, σε αντίθεση με το προηγούμενο, όπου διεξάγεται χωρίς την παρουσία ενζύμου (Han et al., 2018). Τα κύρια συστατικά του συστήματος αυτού είναι: διάλυμα βερνικιού, γκουαϊακόλη (υπόστρωμα για το βερνίκι), αλβουμίνη βόειου ορού (σταθεροποιητής ενζύμου) και ρυθμιστικό οξικού νατρίου. Το βερνίκι καταλύει τον αποχρωματισμό της οξειδωσης της γκουαϊακόλης υποδεικνύοντας τον συνολικό χρόνο έκθεσης σε μη ενδεδειγμένη θερμοκρασία. Οι κινητικές παράμετροι του συστήματος υπολογίστηκαν με πειράματα και καθορίστηκε το κινητικό μοντέλο του συστήματος. Στο μοντέλο αυτό, ο ρυθμός που αυξάνεται ο πληθυσμός του ενζύμου είναι ευθέως ανάλογος με τον αριθμό των μελών, και είναι πρακτικά σταθερός αν είναι σταθερές οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Η μορφή του μοντέλου αυτού είναι η εξής:

$$N = N_0 e^{k(t-t_L)} \quad (1)$$

N: ο αριθμός των μικροοργανισμών

t: ο χρόνος,

Νο το αρχικό φορτίο,

k ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης, ο οποίος συνήθως εκφράζεται ως προς την επίδραση της θερμοκρασίας με την εξίσωση του Arrhenius,

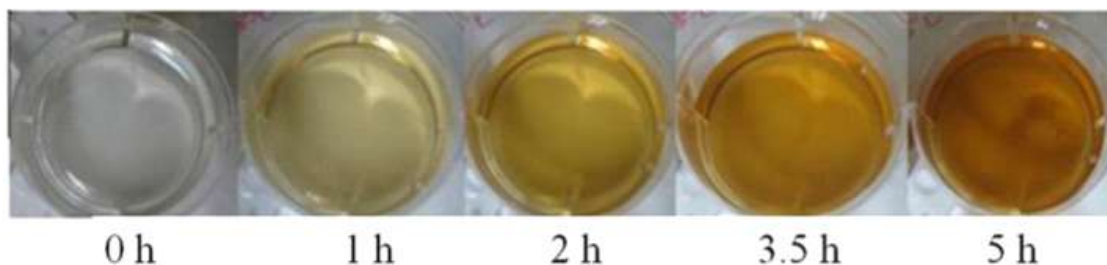
t_L ο χρόνος της λανθάνουσας φάσης (Han et al., 2018).

Η φαινόμενη ενέργεια ενεργοποίησης (E_A)(συνήθως το k περιγράφεται με την εξίσωση του Arrhenius) του συστήματος είναι 43,90-45,44 kJ / mol, το οποίο είναι κατάλληλο για υποβάθμιση ποιοτικών παραμέτρων σε τρόφιμα των οποίων η E_A είναι 18,90–70,44 kJ / mol.

Μια νέα μελέτη, πάνω σε αυτή την ιδέα, αναπτύχθηκε για την προσαρμογή της E_A του εν λόγω ΤΤΙ, χρησιμοποιώντας το Na_3N , το οποίο έχει ανασταλτική επίδραση στο βερνίκι (Cao et al., 2017).

Μετρήθηκε η σχέση μεταξύ της E_A του ΤΤΙ και της συγκέντρωσης Na_3N , οπότε μια σειρά ΤΤΙ μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να ταιριάζει με τους ρυθμούς αλλοίωσης διαφορετικών τροφίμων.

Η υψηλότερη ποσότητα Na_3N οδηγεί σε υψηλότερο E_A του συστήματος το οποίο θα μπορούσε να επεκταθεί στα 48-110 kJ / mol με τη χρήση του Na_3N (Ghaani, 2016).



Εικόνα 5. Η αλλαγή χρώματος του ΤΤΙ, στους 25°C
Πηγή: Chu et al., 2015

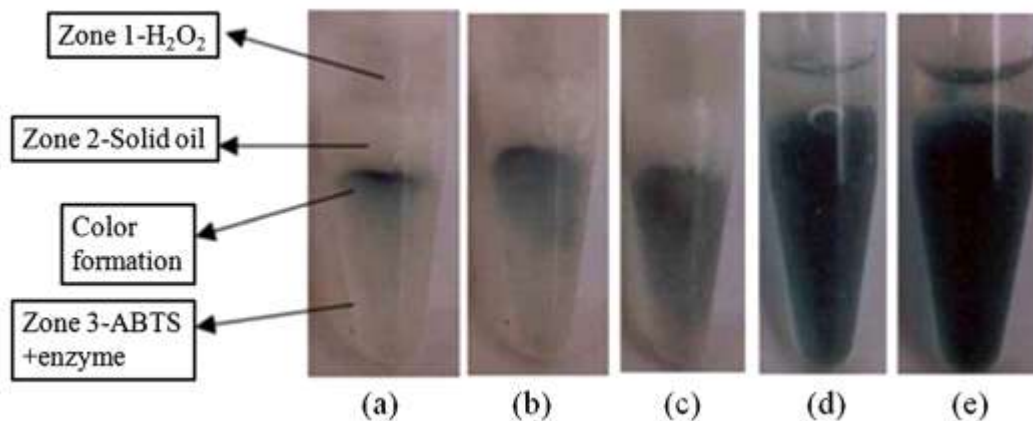
Μικροβιολογικοί ΤΤΙ

Οι ζύμες και τα βακτήρια γαλακτικού οξέος έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως ως βιολογικά συστήματα ΤΤΙ τα τελευταία χρόνια. Άλλα βακτήρια όπως το Streptococcus μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για συστήματα ΤΤΙ. Στη συνέχεια παρατίθενται τέσσερις από τους πιο κοινούς τύπους μικροβιολογικών ΤΤΙ.

ΤΤΙ που βασίζεται στη μαγιά

Οι ερευνητές (Varlet-Grancher et al., 2006) έχουν κατασκευάσει έναν μικροβιολογικού τύπου TTI, που βασίζεται στην αναερόβια αναπνοή της μαγιάς για την παραγωγή οξέος σε ορισμένες συνθήκες, ειδικά σε κάποια συγκεκριμένη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα την αλλαγή χρώματος λόγω της μεταβολής του pH. Το σύστημα TTI περιλαμβάνει δύο μέρη: το πρώτο μέρος περιέχει τα αντιδραστήρια, συμπεριλαμβανομένων των μικροοργανισμών και του δείκτη χρώματος που κατασκευάζεται από υδατοδιαλυτό μελάνι με κατάλληλο φορέα που τα διαχωρίζει, με τα δύο αυτά τμήματα να συνδέονται με ένα διαφανές πλαστικό φιλμ (vanderVorst et al., 2009).

Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει έναν ενεργοποιητή με ένα υδατικό συγκολλητικό στρώμα. Ο TTI μπορεί να ενεργοποιηθεί όταν το αντιδραστήριο έρχεται σε επαφή με τον ενεργοποιητή στην επιφάνεια. Με την επαφή της επιφάνειας του αντιδραστικού παράγοντα (του πρώτου μέρους) και της επιφάνειας του ενεργοποιητή (του δεύτερου μέρους), ενεργοποιείται ο TTI, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Το αν μπορεί να σχηματιστεί οξύ με υψηλή απόδοση σχετίζεται με την επιλογή της μαγιάς. Το χρώμα της μελάνης που δρα ως δείκτης pH θα αλλάξει καθώς η συγκέντρωση οξέος αυξάνεται με την ανάπτυξη μικροοργανισμών στο κατάλληλο εύρος θερμοκρασίας από 5 ° C έως 40 ° C. Τα θρεπτικά συστατικά στο σύστημα TTI, ταυτόχρονα, μπορούν να προωθήσουν την ανάπτυξη μικροοργανισμών για την παραγωγή οξέος. Η πηγή άνθρακα που χρησιμοποιείται γενικά είναι η γλυκόζη, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης η φρουκτόζη, η σακχαρόζη, το άμυλο ή άλλες πηγές άνθρακα. Επειδή το TTI βασίζεται στην αναερόβια αναπνοή της μαγιάς, η οποία είναι υπεύθυνη για την παραγωγή οξέων, η ποσότητα της γλυκόζης και του οξυγόνου πρέπει να ρυθμίζεται αυστηρά στο σύστημα. Έτσι, ο έλεγχος της ποσότητας είναι ιδιαίτερα σημαντικός στο σύστημα (vanderVorst et al., 2009).

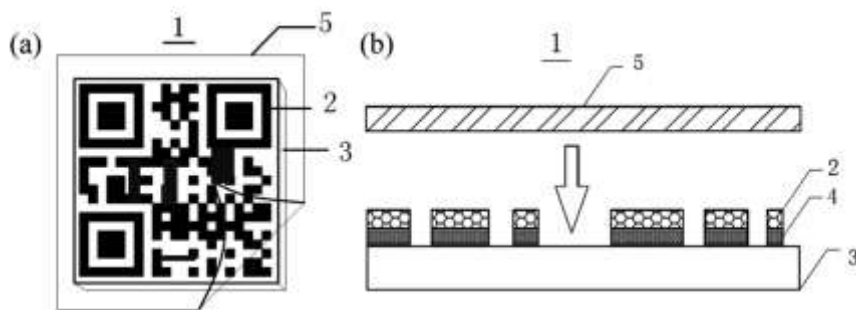


Εικόνα 6. Ανάμιξη των δύο τμημάτων του TTI με τήξη του λαδιού στους 30 ± 2 ° C. (a) Η ανάμιξη ξεκινά στα 6 ± 2 λεπτά. (b) Το ανοιχτό πράσινο χρώμα εξαπλώνεται στη συσκευή στα 8 ± 2 λεπτά. (c) Το χρώμα απλώνεται πλήρως. (d) Το χρώμα έγινε σκούρο πράσινο χρώμα μετά από 11 ± 2 λεπτά. (e) Καμία αλλαγή χρώματος μετά από 15 ± 2 λεπτά
 Πηγή: vanderVorst et al., 2009

TTI που βασίζεται στο *Lactobacillus*

Οι TTI με βάση το *Lactobacillus* χρησιμοποιούν το γαλακτικό οξύ που δημιουργείται από βακτήρια γαλακτικού οξέος για να αλλάξει το pH υπό ορισμένες συνθήκες, γεγονός που οδηγεί σε αλλαγή χρώματος για να δείξει το αποτέλεσμα της παρόδου του χρόνου και της αλλαγής στη θερμοκρασία. Ο Hogan (2008) ανακάλυψε ένα κώδικα QR (γραμμωτός κώδικας) που περιέχει τις πληροφορίες χρώματος του TTI που αλλάζει με την αλλαγή του χρόνου και της θερμοκρασίας. Έτσι, η ποιότητα του προϊόντος μπορεί να αξιολογηθεί γρήγορα και απλά, σαρώνοντας το QR για να λάβουν τις πληροφορίες του χρώματος. Αυτό το TTI αξιοποιεί στελέχη *Lactobacillus* επειδή παραμένουν ανενεργά σε θερμοκρασίες κάτω των 5 ° C και ενεργοποιούνται σταδιακά στους $5-15$ ° C. Το σύστημα TTI μπορεί να προσδιορίσει γρήγορα και με ακρίβεια εάν το προϊόν έχει αλλοιωθεί υπό ορισμένες συνθήκες, ενώ η ένδειξη χρώματος οξέος-βάσης δεν θα επηρεάσει την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Μέσα στο σύστημα TTI, διάφορες ουσίες, όπως το αλγινικό οξύ, το άγαρ, η καραγενάνη και το πολυακρυλαμίδιο, αναμιγνύονται για να δράσουν ως συνδετικό υπόστρωμα τα θρεπτικά συστατικά των μικροοργανισμών. Σε αντίθεση με τον προηγούμενο μικροβιολογικό TTI, αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί το QR για να υποδείξει το αποτέλεσμα χρόνου-θερμοκρασίας, αντί να παρουσιάζει απλώς την αλλαγή χρώματος. Ωστόσο, το εύρος θερμοκρασίας των

μικροοργανισμών δεν είναι εκτεταμένο, περιορίζοντας έτσι την εμπορική εφαρμογή του. Ωστόσο έχει κυκλοφορήσει μια εκδοχή μικροβιολογικού TPI για εμπορικά προϊόντα, ειδικά για κατεψυγμένα όπου ο TPI περιλαμβάνει ένα σακίδιο που περιέχει (ή εσωκλείει) τα θρεπτικά συστατικά του υποστρώματος, έναν δείκτη pH και τους μικροοργανισμούς (Dainelli et al., 2003).



Σχήμα 11. Διάγραμμα δισδιάστατου κώδικα για τη δομή του δείκτη θερμοκρασίας χρόνου. (a) και (b) είναι η κύρια και πλάγια όψη του συστήματος TPI, αντίστοιχα. 1 – ο δείκτης θερμοκρασίας χρόνου, 2 – νανοσωλήνες, 3 – υπόστρωμα, 4 – συγκολλητικό στρώμα, 5 – μεμβράνη κάλυψης

Πηγή: Dainelli et al., 2003



Σχήμα 12. Η κατασκευή του δείκτη θερμοκρασίας χρόνου. (a) πλάγια όψη (b) πρόσοψη του. 1 – το διαφανές δοχείο σε σχήμα δίσκου, 2 – το ελαστικό πώμα, 3 – το μείγμα ένδειξης pH, υποστρώματος θρεπτικών συστατικών και μικροβίων

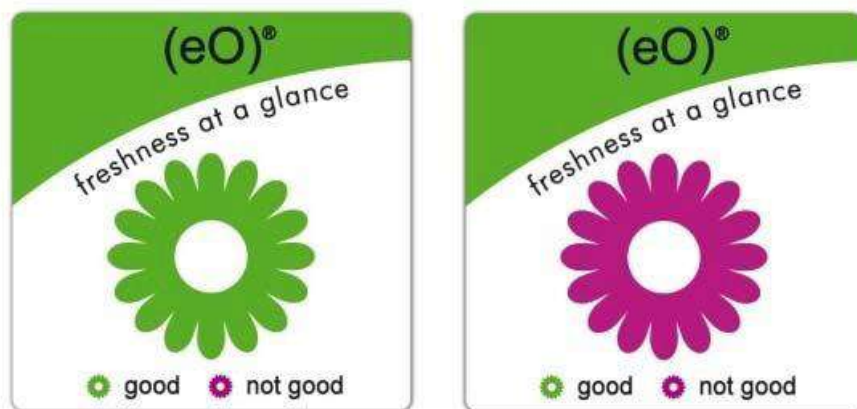
Πηγή: Dainelli et al., 2003

Με τα οξέα που παράγονται από τα βακτήρια γαλακτικού οξέος LGG (στέλεχος *Lactobacillus rhamnosus* LGG) και την ανάμιξή τους με πράσινη βρωμοκρεσόλη και κόκκινο μεθύλιο, ο TPI μπορεί να δείξει αλλαγή χρώματος, υποδεικνύοντας έτσι το ιστορικό θερμοκρασίας του τροφίμου. Τα βακτήρια γαλακτικού οξέος LGG μπορούν να κάνουν χρήση γλυκόζης ή λακτόζης για την παραγωγή γαλακτικού οξέος (Taoukis & Tsironi, 2016).

TTI βασισμένος σε βακτήρια γαλακτικού οξέος

Η ετικέτα eO® που έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία CRYOLOG βασίζεται σε έναν χρονο - θερμοκρασιακό δείκτη που εξαρτάται από την αλλαγή του pH που προκαλείται από μια ελεγχόμενη μικροβιακή ανάπτυξη επιλεγμένων στελεχών βακτηρίων γαλακτικού οξέος που εκφράζεται σε αλλαγή χρώματος μέσω κατάλληλων δεικτών pH. Πριν από τη χρήση, οι δείκτες TTI αποθηκεύονται στους -18°C για την πρόληψη της βακτηριακής ανάπτυξης. Η ενεργοποίησή τους επιτυγχάνεται απλώς με την απόψυξη, όταν δηλαδή για λίγα λεπτά το προϊόν μείνει σε θερμοκρασία δωματίου. Τα κατεψυγμένα βακτήρια τοποθετούνται στην ετικέτα και, όταν οι συνθήκες θερμοκρασίας ή όταν το προϊόν φτάσει στην ημερομηνία λήξης του, η ανάπτυξη των μικροοργανισμών προκαλεί πτώση του pH στην ετικέτα που οδηγεί σε μη αναστρέψιμη αλλαγή χρώματος του μέσου χρωματικού δείκτη που γίνεται κόκκινος (Ellouze et al., 2008; Taoukis, 2008). Οι Ellouze και Augustin (2010) αξιολόγησαν (eO)®, ένα βιολογικό TTI ως δείκτη ποιότητας και ασφάλειας για το συσκευασμένο βόειο κρέας ή φέτες κοτόπουλου (Manjunath et al., 2018).

Ένα παράδειγμα εφαρμογής φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 7: Παράδειγμα χρήσης του μικροβιακού TTI eO®. Όταν το σήμα από πράσινο γίνει μωβ, το προϊόν είναι ακατάλληλο για κατανάλωση.

TTI βασισμένος στον μικροοργανισμό *Janthinobacterium* spp.

Σε μια πολύ πρόσφατη μελέτη (Fuertes, 2016), στόχος ήταν να αναπτυχθεί ένας ευπροσάρμοστος μικροβιακός TTI με βάση το σχηματισμό βιολετίνης, μιας χρωστικής ουσίας βιολετί χρώματος που παράγεται από τον μικροοργανισμό *Janthinobacterium* spp., κατά τη

διάρκεια της πρώιμης ανάπτυξης, ανάλογα με τη θερμοκρασία και τις εγγενείς ιδιότητες του μέσου ανάπτυξης. Το *Janthinobacterium* sp. είναι ένα βακτήριο με καταλληλότερη θερμοκρασία για ανάπτυξη τους 25°C και pH στο 7.0. Είναι ικανό να παράγει έναν χρωμογόνο δευτερογενή μεταβολίτη (βιολετίνη), με τον οποίο οι αποικίες του δέχονται έναν ιώδη χρωματισμό. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή βιολετίνης είναι τα χαρακτηριστικά του μικροοργανισμού, η θερμοκρασία, η παρουσία οξυγόνου, το pH και η σύνθεση του μέσου ανάπτυξης (Fuertes, 2016).

Το σύστημα ΤΠΙ που δημιουργήθηκε, αποτελείται από το TrypticSoyAgar εμπλουτισμένο με 1% γλυκερόλη, στο οποίο είχαν τοποθετηθεί βακτηριακά στελέχη. Οι ερευνητές απέδειξαν την αποτελεσματικότητα του δείκτη, η οποία επικυρώθηκε για την ανίχνευση των αλλοιώσεων του κιμά βοδινού κρέατος υπό ισοθερμικές και δυναμικές συνθήκες αποθήκευσης ενώ αξιολογήθηκε επίσης η δυνατότητα εφαρμογής του δείκτη αυτού και σε άλλα προϊόντα κρέατος, τόσο νωπών ή κατεψυγμένων όσο και προϊόντων μαγειρεμένου κρέατος σε συσκευασία κενού (Fuertes, 2016).



Εικόνα 8: Οπτική αναπαράσταση της εφαρμογής του ΤΠΙ που προέρχεται από τον μικροοργανισμό *Janthinobacterium* sp

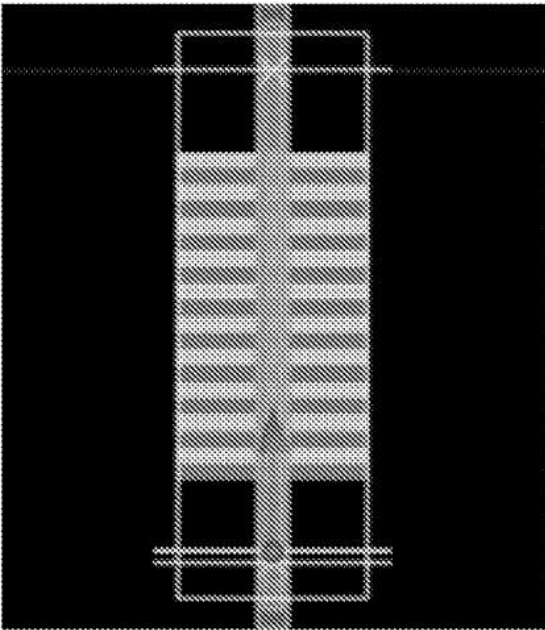
Άλλα είδη ΤΠΙ

Πέρα από τα είδη που αναφέραμε, υπάρχουν και άλλα είδη ΤΠΙ που δεν εμπίπτουν σε κάποια γενικότερη κατηγορία. Δύο αρκετά διαδεδομένα είδη είναι οι ΤΠΙ που βασίζονται στην αλλαγή του φωτονικού πλέγματος και αυτοί που βασίζονται σε θερμοχρωματικά μίγματα πολυμερών / χρωστικών (Chu et al., 2018).

ΤΠΙ που βασίζεται στην αλλαγή φωτονικού πλέγματος (photoniclatticechange)

Έχει αναπτυχθεί ένας μη αναστρέψιμος ΤΠΙ βασισμένος σε φωτονικό κρύσταλλο, που αποτελείται από ένα υπόστρωμα, ένα πλέγμα, ένα φιλμ με φωτονικά κρυσταλλικά σχέδια και μια θήκη που περιέχει σκληρυντικό υλικό. Τα φωτονικά κρύσταλλα που βρίσκονται στο φιλμ

δείχνουν τη συσχέτιση μεταξύ της χρωματικής αλλαγής και της θερμοκρασίας, παρέχοντας έτσι μια ορατή ένδειξη της αλλαγής της θερμοκρασίας που υπέστη το προϊόν. Η αλλαγή στη θερμοκρασία, προκαλεί την απελευθέρωση του σκληρυντικού υλικού από τη θήκη του και έτσι το υλικό του φωτονικού κρυστάλλου αποκρίνεται στο σκληρυντικό παρουσιάζοντας μια σταθερή χρωματική κατάσταση (Fuertes, 2016).



Εικόνα 9: Το φωτονικό πλέγμα με το σκληρυντικό υλικό. Η αλλαγή θερμοκρασίας οδηγεί σε απελευθέρωση του σκληρυντικού υλικού και δημιουργεί την αλλαγή χρώματος στο φιλμ
Πηγή: Chu et al, 2018

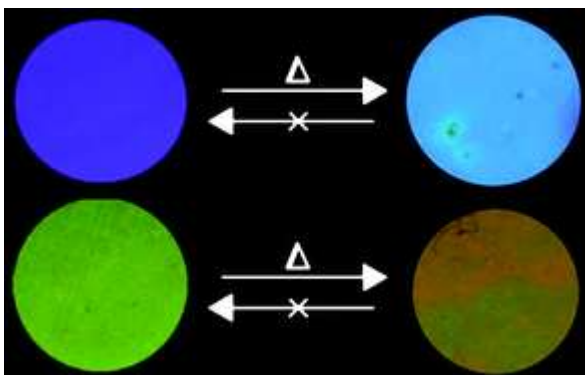
Αυτός ο ΤΤΙ δεν απαιτεί εξωτερική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και δεν παρέχει μόνο την πληροφορία της αλλαγής χρώματος σε υψηλότερη ή χαμηλότερη θερμοκρασία, αλλά μπορεί επίσης να καταγράψει τη συνεχή αλλαγή θερμοκρασίας εντός καθορισμένου χρονικού εύρους (Hogan, 2008). Ο φωτονικός κρύσταλλος μπορεί να διαχωριστεί από το σκληρυντικό πριν από την ενεργοποίηση με αποτέλεσμα και οι δύο να είναι σχετικά σταθεροί σε θερμοκρασία δωματίου, οπότε το προϊόν να μπορεί να αποθηκευτεί σε συνθήκες που δε θα δημιουργήσουν την διαρροή του σκληρυντικού υλικού, για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Σε σύγκριση με άλλες ηλεκτρονικές συσκευές καταγραφής θερμοκρασίας, το PC-TTI είναι οικονομικά αποδοτικό, ελαφρύ και ανθεκτικό στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές κυμάτων. Επιπλέον,

μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί με τυπωμένους γραμμωτούς κώδικες (barcode) για την εξαγωγή πληροφοριών προϊόντος όταν χρησιμοποιείται ως τυπωμένη ετικέτα (Fuertes, 2016).

ΤΤΙ που βασίζεται σε θερμοχρωμικά μίγματα πολυμερών / χρωστικών



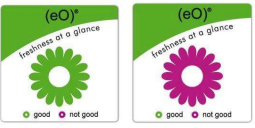




Πρόσφατα αναπτύχθηκε ένα σύστημα ΤΤΙ που βασίζεται στη φάση διαχωρισμού μεταξύ χρωστικών ουσιών και πολυμερούς ξενιστή. Τα πολυμερή με ενσωματωμένους αισθητήρες που ενεργοποιούνται σε συγκεκριμένο κατώφλι θερμοκρασίας εμφανίζουν αλλαγή των χαρακτηριστικών απορρόφησης και του φθορισμού τους όταν θερμαίνονται από κάποια εξωτερική πηγή. Η κινητικότητα των μορίων της χρωστικής ουσίας σχετίζεται στενά με τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) του υλικού. Όταν το πολυμερές πλέγμα θερμαίνεται μέχρι τη θερμοκρασία T_g , η κατάσταση των μορίων της χρωστικής ουσίας αλλάζει και ενώνονται μεταξύ τους ενώ στην χαμηλότερη θερμοκρασία ήταν απομονωμένα. Εν τω μεταξύ, αντίστοιχα αλλάζουν και οι ιδιότητες της απορρόφησης UV ή των εκπομπών φθορισμού. Οι αλλαγές αυτές οφείλονται στη μεταφορά φορτίου, στο σχηματισμό διεγέρτη ή σε αλλαγές διαμόρφωσης των μορίων της χρωστικής ουσίας κατά τη διαδικασία της συσσωμάτωσης. Η ιδιότητα του πολυμερούς πλέγματος αλλάζει αντίστροφα όταν εκτίθεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της T_g (Dainelli et al., 2003).

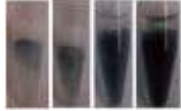

Όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι υψηλότερη από την T_g , τα φάσματα απορρόφησης ή εκπομπής των μορίων της χρωστικής ουσίας αλλάζουν, γεγονός που υποδηλώνει ότι έχει ολοκληρωθεί η διάρκεια ζωής των τροφίμων και προειδοποιεί τους καταναλωτές ότι το τρόφιμο μπορεί να έχει αλλοιωθεί (Fuertes, 2016).



Εικόνα 10.Εναλλαγές των χρωμάτων των δεικτών που βασίζονται σε θερμοχρωμικά μίγματα πολυμερών / χρωστικών, που χρησιμοποιούνται σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες (πάνω) και σε πιο υψηλές (κάτω) Πηγή: Giannoglou, 2013

Πίνακας 1: Εφαρμογές ΤΤΙ (αντιπροσωπευτικά είδη όλων των κατηγοριών)

ΕΙΔΟΣ ΔΕΙΚΤΗ / ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΕΥΡΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	ΧΡΗΣΗ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ	ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ
3M Co	Χημικός	-17 έως 48	Εμβόλια		Labuza, 2008
OnVu	Φωτοχρωμικός δείκτης	-15 έως 5	Κρέατα		Tsironi T, Gogou E, Velliou, 2008
eO	Βακτήρια γαλακτικού οξέος	-18 έως 10	Βόειο κρέας –φέτες κοτόπουλου		Ellouze & Augustin, 2010
CoolVu	Χημικός	-25 έως 5	Ψάρια		Ghaani, Cozzolino, Castelli, & Farris, 2016
ΤΤΙ με βάση την οξειδοαναγωγική αντίδραση	Χημικός	5 έως 25 βαθμοί	Λαχανικά		Galagan and Su, 2008
Vitsab – CheckPoint	Ενζυμικός – με βάση την αντίδραση οξέος - βάσης	0 έως 10	Κρέατα και ψάρια		Gogou, Katapodis, Christakopoulos, Taoukis, 2010
ΤΤΙ με βάση την	Ενζυμικός	5 έως 25	Φρούτα και		Kim, KimLee,

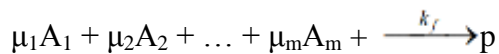
αντίδραση Redox			λαχανικά		2012
Μικροβιακός	Βασίζεται στη μαγιά	5 έως 40	Λάδι		Varlet-Grancher, 2006
Μικροβιακός	Βασίζεται στον μικροοργανισμό ό Janthinobacteri um sp	0 έως 15	Κρέατα		Mataragas, et al., 2019

2. 1. 2. Γενική μαθηματική περιγραφή της απόκρισης του TTI

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί με αξιοπιστία ένας TTI, οποιουδήποτε τύπου από όσους προαναφέρθηκαν, απαιτείται να έχει προηγηθεί μια συστηματική κινητική μελέτη της απόκρισης του δείκτη, αλλά και των πιο χαρακτηριστικών ποιοτικών παραμέτρων του τροφίμου, στο οποίο πρόκειται να εφαρμοσθεί ο συγκεκριμένος δείκτης. Ζητούμενο των μελετών αυτών είναι ο προσδιορισμός των τιμών (και των αβεβαιοτήτων τους) των κινητικών παραμέτρων των αποκρίσεων, με σκοπό να επαληθευτεί η δυνατότητα χρήσης του συγκεκριμένου δείκτη στο συγκεκριμένο τρόφιμο, προκειμένου να μπορούν να γίνουν αξιόπιστες προβλέψεις της εναπομένουσας διάρκειας ζωής του τροφίμου, σε οποιοδήποτε σημείο της ψυκτικής αλυσίδας. Η μεθοδολογία της κινητικής προσέγγισης περιγράφεται συνοπτικά στην παρακάτω ενότητα, όπου και δίνεται ένα γενικευμένο σχήμα εφαρμογής των TTI. Ως πρώτο βήμα, διερευνάται το κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο το οποίο θα χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά (την απόκριση) του TTI (Fuertes, 2016). Ο φαινόμενος ρυθμός της απόκρισης του TTI, k , είτε αυτή είναι βιολογικές αντιδράσεις ή χημικές, ακολουθεί εξάρτηση από τη θερμοκρασία τύπου Arrhenius.

Η μεταβολή της ποιότητας είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο που πρέπει να λάβει υπ' όψιν ένα μεγάλο σύνολο παραμέτρων, τόσο ενδογενών του κάθε τροφίμου όσο και του περιβάλλοντος (εξωτερικοί παράγοντες) (Fuertes, 2016).

Η αντίδραση της υποβάθμισης και αλλοίωσης του προϊόντος είναι μια μη αντιστρεπτή αντίδραση. Η απεικόνισή της μπορεί να πάρει την εξής μορφή (Gao et al., 2020):



όπου:

A_j : αντιδρώντα

μ_j : στοιχειομετρικοί συντελεστές

P: προϊόντα

k_f : σταθερά του ρυθμού αντίδρασης (Fuertes, 2016).

Η αντίδραση αυτή διεξάγεται με ρυθμό r , ο οποίος υπολογίζεται ως εξής : $k_f [A_1]^{n_1} [A_2]^{n_2} \dots [A_m]^{n_m}$

Όπου n_j είναι η τάξη της αντίδρασης ως προς τα αντιδρώντα A_j . Στην πράξη, δεν υπολογίζονται όλες οι συνιστώσες, διότι υπάρχουν ορισμένες οι οποίες επιδρούν πολύ περισσότερο σε σχέση με τις υπόλοιπες. Έτσι, η σχέση αυτή παίρνει την ακόλουθη, απλουστευμένη μορφή (Fuertes, 2016):

$$r = k'_f [A]^a$$

όπου:

a : η φαινόμενη τάξη της αντίδρασης ως προς το συστατικό A που παίζει τον μείζονα ρόλο

k'_f : η φαινόμενη σταθερά του ρυθμού της αντίδρασης.

Με την αντίδραση της υποβάθμισης της ποιότητας του τροφίμου, θεωρούμε ότι κάποια συστατικά υφίστανται ελάττωση, όπως το άρωμα ή τα θρεπτικά συστατικά. Ωστόσο, δεν συμβαίνει μόνο αυτό, καθώς είναι πιθανόν παράλληλα να έχουμε και τη δημιουργία νέων, ανεπιθύμητων παραγόντων, ανεπιθύμητες οσμές, αλλαγή του χρώματος, παρουσία μικροβίων κλπ (Gao et al., 2020).

Οι παράγοντες A και B περιγράφονται από τις εξής σχέσεις : $r_A = k [A]^m$

$$r_B = k' [B]^m$$

όπου στόχος είναι να προσδιοριστεί η τάξη της αντίδρασης m .

Στις σχέσεις αυτές:

k και k' είναι οι φαινομενικές σταθερές του ρυθμού αντίδρασης και m και m' είναι οι φαινομενικές τάξεις των αντιδράσεων.

Η αρχική εξίσωση της κινητικής αντίδρασης, παίρνει διαφορετικές μορφές ανάλογα με την τάξη της αντίδρασης στην οποία αυτή βρίσκεται.

Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζεται η μορφή που παίρνουν οι εξισώσεις ανάλογα με τη φαινομενική τάξη αντίδρασης

Πίνακας 2: Συνάρτηση ποιότητας βάσει της φαινομενικής τάξης αντίδρασης

Φαινόμενη Τάξη Αντίδρασης	Συνάρτηση Ποιότητας $f(A)_t$	Χρόνος Ημιζωής $t_{1/2}$
0	$A_0 - A_t$	$\frac{A_0}{(2k_0)}$
1	$\ln\left(\frac{A_0}{A_t}\right)$	$\ln\left(\frac{2}{k_1}\right)$
2	$\frac{1}{A_0} - \frac{1}{A_t}$	$\frac{1}{(k_2 A_0)}$
m (m≠1)	$\frac{1}{m-1} \cdot (A_t^{1-m} - A_0^{1-m})$	$\frac{2^{m-1} - 1}{k_m \cdot (m-1)} \cdot A_0^{1-m}$

2. 1. 3. Επίδραση της θερμοκρασίας

Μια από τις σημαντικότερες συνιστώσες της αλλοίωσης της ποιότητας των τροφίμων είναι ο χρόνος. Ωστόσο, δεν είναι η μόνη. Η συνιστώσα της θερμοκρασίας είναι επίσης κρίσιμης σημασίας και έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα που προσδιορίζουν την επιρροή της πάνω στα τρόφιμα (δευτερογενή μοντέλα). Μεταξύ των μοντέλων αυτών, το πιο ευρέως αποδεκτό είναι το μοντέλο του Arrhenius, αν και υπάρχουν και άλλα μοντέλα. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις εξισώσεις που διέπουν τα μοντέλα αυτά:

Πίνακας 3: Τα δημοφιλέστερα δευτερογενή κινητικά μοντέλα

A/A	Μοντέλο	Τύπος	Πηγή
1	Γραμμικό μοντέλο	$k = k_0(1+cT)$	Spencer & Baines (1967)
2	Εκθετικό -λογαριθμικό μοντέλο	$k = k_0 \exp(sT)$	Geeraerd et al., 2004
3	WLF		Labuza και Fu, 1993
4	Πολυωνυμικό μοντέλο	$\ln y = p_1 + p_2x_1 + p_3x_2 + p_4x_3 + p_5x_1x_2 + p_6x_1x_3 + p_7x_2x_3 + p_8x_1^2 + p_9x_2^2 + p_{10}x_3^2 + e$	Ross & Dalgaard, (2004)
5	Μοντέλο Arrhenius	$k = k_0 \exp$	Giannakourou (χ.χ.)

Στα παραπάνω μοντέλα, ισχύουν οι εξής συμβολισμοί (χωρίς να γίνεται επανάληψη στα σύμβολα που ερμηνεύονται παραπάνω):

Γραμμικό μοντέλο:

K: ειδικός ρυθμός αλλοίωσης, (μονάδες αλλοίωσης / ημέρα)

T: στη θερμοκρασία,

k_0 , ο ειδικός ρυθμός αλλοίωσης στους $0\text{ }^\circ\text{C}$,

c: σταθερά θερμοκρασίας

Εκθετικό –λογαριθμικό μοντέλο

s η κλίση της καμπύλης του $\ln k$ ως προς τη θερμοκρασία T

Μοντέλο WLF

C1, C2 συντελεστές που εξαρτώνται από το σύστημα.

Πολυωνυμικό μοντέλο

$\ln y_i$ είναι ο φυσικός λογάριθμος της απόκρισης

p_i ($i=1, \dots, 10$) διάφοροι συντελεστές περιβαλλοντικών παραγόντων,

x_j ($j=1, \dots, 3$) οι ίδιοι οι περιβαλλοντικοί παράγοντες π.χ. θερμοκρασία, pH, συγκέντρωση NaCl (% w/v), και

e: τυχαίο σφάλμα που (έστω) έχει μηδενικό μέσο όρο και σταθερή διακύμανση.

Μοντέλο Arrhenius

R η παγκόσμια σταθερά των αερίων ($8.314\text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$)

Ea η θερμοδυναμικά οριζόμενη παράμετρος ως ενέργεια ενεργοποίησης,

H ποιότητα των τροφίμων, εκφράζεται από την εκάστοτε συνάρτηση ποιότητας $f(A)=kt$

Με βάση τα παραπάνω αναφορικά με την ποιότητα του τροφίμου, και την απόκριση των δεικτών μπορεί να προσδιοριστεί η τιμή του δείκτη A, την χρονική στιγμή t υπολογίζοντας την απόκριση του δείκτη που χρησιμοποιείται, κατά την ίδια χρονική στιγμή t. Τα βήματα της διαδικασίας του υπολογισμού είναι τα εξής:

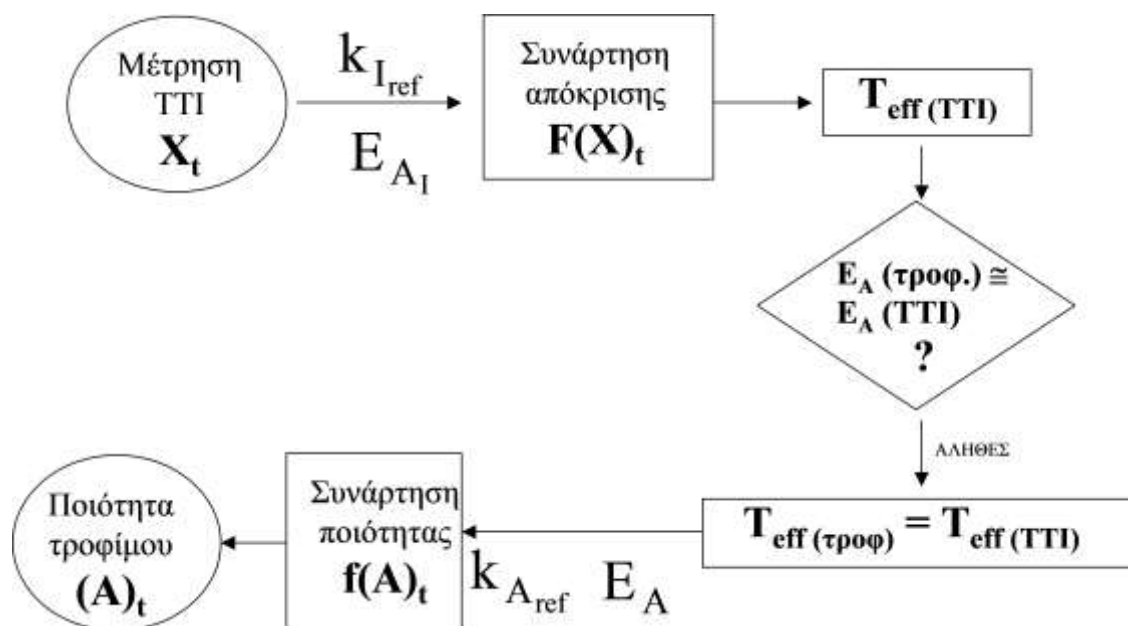
Η απόκριση, έστω X, του δείκτη είναι η πειραματική μέτρηση-βάση για να προσδιοριστεί η τιμή της συνάρτησης της απόκρισης F(X)

Μέσω της $F(X)_t$ υπολογίζεται η T_{eff} (δραστική θερμοκρασία) και ελέγχεται αν η θερμοκρασιακή εξάρτηση της απόκρισης του δείκτη είναι αντίστοιχη (ή κατά πόσο) της αλλοίωσης του τροφίμου.

Μέσω της T_{eff} και των κινητικών χαρακτηριστικών της αλλοίωσης προσδιορίζεται η συνάρτηση ποιότητας $f(A)_t$ και η τιμή του δείκτη ποιότητας τη δεδομένη χρονική στιγμή t.

Ελέγχεται αν η τιμή του A_t είναι εντός των ορίων της επιθυμητής ποιότητας (διαφορετική για κάθε τρόφιμο).

Έτσι το διάγραμμα εφαρμογής TTI για την πρόβλεψη ποιότητας των τροφίμων, κατασκευάζεται ως εξής (Γιαννακούρου, χ.χ.), από όπου είναι φανερός ο περιορισμός εφαρμογής που αφορά στην εγγύτητα των ενεργειών ενεργοποίησης της απόκρισης του TTI σε σχέση με αυτή της μεταβολής του χαρακτηριστικού ποιοτικού δείκτη του τροφίμου (πρακτικά $E_{A, \text{food}} - E_{A, \text{TTI}} \leq 25 \text{ kJ/mol}$) (Gao et al., 2020):



Σχήμα 13: Διάγραμμα εφαρμογής TTI για την πρόβλεψη της ποιότητας των τροφίμων

2. 1. 4. Προδιαγραφές και χαρακτηριστικά ενός ιδανικού TTI

Η αποτελεσματικότητα και η αξιοπιστία ενός TTI ως δείκτη ποιότητας του τροφίμου εξαρτάται από τα κινητικά χαρακτηριστικά της απόκρισής του. Σημαντική απαίτηση είναι η εξάρτηση του ρυθμού απόκρισης από τη θερμοκρασία, να προσεγγίζει κατά το δυνατόν την εξάρτηση από τη θερμοκρασία των δράσεων ποιοτικής υποβάθμισης του τροφίμου, όπως μικροβιολογικές αλλοιώσεις. Επομένως προϋπόθεση εφαρμογής ενός συστήματος ελέγχου της ψυκτικής αλυσίδας με βάση τους χρονο-θερμοκρασιακούς δείκτες είναι ο σωστός σχεδιασμός της απόκρισής τους με βάση την ενδελεχή γνώση της κινητικής των δεικτών

αλλοίωσης του τροφίμου και της εξάρτησής τους από τη θερμοκρασία. Οι απαιτήσεις για ένα αποτελεσματικό ΤΠΙ είναι να δείχνει μία συνεχή αλλαγή, ο ρυθμός της οποίας αυξάνει με τη θερμοκρασία και ο οποίος δεν αντιστρέφεται όταν η θερμοκρασία μειώνεται” (Taoukis & Labuza, 2003).

Ένας ιδανικός ΤΠΙ πρέπει να έχει τις ακόλουθες ιδιότητες (Καλιούπη, 2016):

- ✓ Να παρουσιάζει μία συνεχή, χρονο - θερμοκρασιακάεξαρτώμενη αλλαγή
- ✓ Η αλλαγή να εκφράζεται ως μία εύκολα μετρούμενη απόκριση και μη αντιστρεπτή.
- ✓ Η αλλαγή αυτή να μιμείται ή να μπορεί να συσχετιστεί με το βαθμό ποιοτικής αλλοίωσης του τροφίμου και την εναπομένουσα διάρκεια ζωής του.
- ✓ Να είναι αξιόπιστος και να δίνει σταθερές αποκρίσεις όταν εκτίθεται στις ίδιες θερμοκρασιακές συνθήκες.
- ✓ Να έχει χαμηλό κόστος.
- ✓ Να είναι ευέλικτος, έτσι ώστε διαφορετικές μορφές του να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα θερμοκρασιακά διαστήματα (π. χ. ψύξη, κατάψυξη, θερμοκρασία δωματίου) με χρήσιμες περιόδους απόκρισης από μερικές μέρες μέχρι και περισσότερο από ένα χρόνο.
- ✓ Να είναι μικρός, εύκολα προσαρμόσιμος σαν τμήμα της συσκευασίας του τροφίμου και συμβατός με μια διεργασία συσκευασίας υψηλής ταχύτητας.
- ✓ Να είναι σταθερός πριν την ενεργοποίηση του και να ενεργοποιείται εύκολα.
- ✓ Να μην επηρεάζεται από τις υπόλοιπες περιβαλλοντικές συνθήκες πέραν της θερμοκρασίας, όπως το φως, ρυπαντές του αέρα και σχετική υγρασία (RH).
- ✓ Να είναι ανθεκτικός σε φυσιολογικές μηχανικές καταπονήσεις χωρίς να επηρεάζεται η απόκρισή του.
- ✓ Να μην είναι τοξικός και στην απίθανη περίπτωση επαφής του με το τρόφιμο να μην επιφυλάσσει κινδύνους
- ✓ Να είναι σε θέση να μεταφέρει με απλό και ξεκάθαρο τρόπο το μήνυμα στον καταναλωτή ή σε οποιονδήποτε άλλον ενδιαφερόμενο.
- ✓ Η απόκρισή του να είναι οπτικά κατανοητή και να μπορεί να μετρηθεί εύκολα από ηλεκτρονικές συσκευές έτσι ώστε οι πληροφορίες να λαμβάνονται, να αποθηκεύονται και να μεταδίδονται εύκολα και γρήγορα.

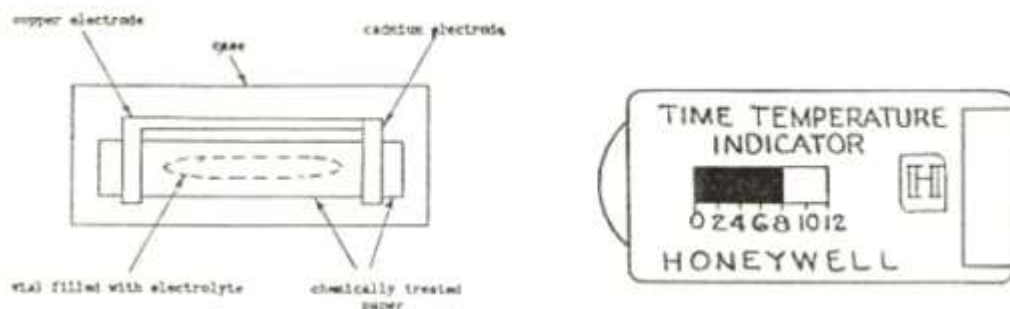
Κανένας ΤΤΙ δεν ικανοποιεί απολύτως όλες τις παραπάνω απαιτήσεις για να χαρακτηριστεί ως ιδανικός. Ωστόσο, η εξέλιξη των δεικτών, έχει οδηγήσει σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο και πλέον το μοντέλο του ιδανικού ΤΤΙ προσεγγίζεται αρκετά ικανοποιητικά από τους διαθέσιμους τύπους (Gao et al., 2020).

2. 1. 5. Διαχρονική εξέλιξη των ΤΤΙ

Οι προσπάθειες για τη δημιουργία ενός αποτελεσματικού και χαμηλού κόστους δείκτη σηματοδοτήθηκαν όταν έγινε προφανής η μεγάλη σημασία που έχουν οι θερμοκρασιακές μεταβολές στην τελική ποιότητα των τροφίμων. Αρχικά, το ενδιαφέρον προσέγγισαν τα κατεψυγμένα τρόφιμα. Η πρώτη εφαρμογή “συσκευής” που να δείχνει πιθανή κακομεταχείριση τροφίμου, χρονολογείται ήδη από το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, όταν ομάδες εφοδιαστών του Αμερικανικού στρατού τοποθετούσαν ένα κομμάτι πάγου σε κάθε συσκευασία κατεψυγμένου τροφίμου (Kim et al., 2018).

Πιθανή εξαφάνιση του πάγου μεταφραζόταν ως κακή μεταχείριση του τροφίμου. Ο πρώτος “πατενταρισμένος” δείκτης χρονολογείται το 1993 από τον Midgley. Από τότε έχουν εκδοθεί πάνω από εκατό διαφορετικές πατέντες (αμερικάνικες και διεθνείς) οι οποίες σχετίζονται με τους χρονοθερμοκρασιακούς δείκτες. Ο Byrne το 1976 έκανε μια γενική επισκόπηση των αρχικών δεικτών και το 1989 ο Ταουκίς έκανε μια λεπτομερή παρουσίαση των ΤΤΙ (Καλιούπη, 2016).

Η Honeywell Corp. (Minneapolis, MN) δημιούργησε τον πρώτο εμπορικά διαθέσιμο χρονοθερμοκρασιακό δείκτη ΤΤΙ (Renier&Morin, 1962) που κρίθηκε αξιόπιστος (Guadagni DG, 1963). Παρ’ όλα αυτά δε διατέθηκε ευρέως στην αγορά λόγω του υψηλού κόστους και του μεγάλου όγκου του, ενώ γύρω στο 1970 αποσύρθηκε.



Εικόνα 11: Αναλυτική και γενική εικόνα του πρώτου ΤΤΙ που δημιουργήθηκε, Honeywell ΤΤΙ. Πηγή: Καλιούπη, 2016

2. 2. Ετικέτες ραδιοσυχνικής αναγνώρισης (RFID tags)

Ένας άλλος τρόπος με τον οποίο ενσωματώνονται αισθητήρες σε συσκευασίες τροφίμων για να διασφαλίσουν τη φρεσκάδα και την ποιότητα είναι οι έξυπνες ετικέτες ραδιοσυχνοτήτων. Οι ετικέτες αυτές έχουν αισθητήρες ικανούς να μετρούν τη θερμοκρασία, την υγρασία και την παρουσία πτητικών αμινικών ενώσεων (RFID tags). Με τους αισθητήρες αυτούς γίνεται εφικτή στη λιανική βιομηχανία η αποτελεσματικότερη διαχείριση αποθεμάτων τροφίμων. Οι ετικέτες αυτές κατασκευάζονται μέσω υψηλής τεχνολογίας εκτύπωσης οθόνης και πλαστικοποίησης σε ειδικά φύλλα που έχουν χαμηλό κόστος και συνδυάζουν την τεχνολογία pick and place για την τοποθέτηση στοιχείων SMD σε πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος. Οι έμποροι λιανικής πώλησης σε γενικά εμπορεύματα, παντοπωλεία, είδη ένδυσης και άλλες κατηγορίες δοκιμάζουν τώρα προγράμματα RFID και αναφέρουν βελτιωμένες πωλήσεις από μεγαλύτερη διαθεσιμότητα αποθεμάτων, εξοικονόμηση κόστους και αυξημένη ανταπόκριση, ειδικά στις διαδικασίες παραλαβής και ελέγχου αποθέματος. Οι τρέχουσες ετικέτες RFID βασίζονται σε τσιπάκια που περιέχουν μνήμη που μπορεί να διαβαστεί ασύρματα για να αναγνωρίσει τα προϊόντα στα οποία τοποθετούνται (Καλιούπη, 2016).

Καθώς αυτές οι εφαρμογές αποδεικνύουν συνεχώς την αξία τους, εμφανίζονται ετικέτες με πρόσθετη λειτουργικότητα, όπως με δείκτες χρόνου – θερμοκρασίας, πίεση, και χημική ανίχνευση (Giannoglou, 2013).

Μια RFID ετικέτα περιέχει τα ακόλουθα βασικά δομικά στοιχεία:

- αισθητήρες,
- λογική σχεδίαση,
- ραδιοσυχνότητες
- κεραία
- ισχύ.

Χρησιμοποιούνται γενικές τεχνολογίες για τη συναρμολόγηση χαμηλού κόστους και την κατασκευή συστημάτων σε αλουμινόχαρτο. Μια βασική τεχνολογία είναι η υψηλής ποιότητας εκτύπωση οθόνης από άργυρο που χρησιμεύει ως πλακέτα κυκλώματος και κεραία. Για χρήση ως πλακέτα κυκλώματος και κεραία, τα μικρά ασημένια καλώδια πρέπει να παρουσιάζουν χαμηλή αντίσταση και καλή μηχανική σταθερότητα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται

άργυρος σε κολλώδη μορφή που πήζει σε χαμηλή θερμοκρασία για να καταστεί δυνατή η κατασκευή σε φύλλα **ναφθαλικού πολυαιθυλενίου** (polyethylenenaphthalate, **PEN**) χαμηλού κόστους. Ο περιορισμός της θερμικής σταθερότητας του φύλλου PEN (130 ° C) περιπλέκει τις καθιερωμένες διαδικασίες κατασκευής ηλεκτρονικών προϊόντων (Royatos-Racionero et al., 2018).

Οι πολλαπλές είσοδοι τάσης (ADC 10 bit) του μικροεπεξεργαστή επιτρέπουν την ακριβή ανάγνωση πολλαπλών αντιστατικών στοιχείων και η θερμοκρασία μπορεί να μετρηθεί με ένα ενσωματωμένο θερμόμετρο. Για να μετατρέπονται οι αντιστάσεις του αισθητήρα σε τάση κατάλληλη για ανάγνωση με τις εισόδους των μικροεπεξεργαστών, χρησιμοποιείται ένα απλό κύκλωμα διαχωριστή τάσης με αντίσταση μετρητή 10 Mohm. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες του μικροεπεξεργαστή μεταδίδονται μέσω ψηφιακής σύνδεσης σε ένα τσιπ ραδιοσυχνοτήτων που βρίσκεται στο ίδιο φύλλο. Η επικοινωνία με το εξωτερικό περιβάλλον πραγματοποιείται με άλλο ειδικό τσιπ που λειτουργεί σε συγκεκριμένη συχνότητα (συνήθως γύρω στα 14MHz και επιτρέπει την ανάγνωση με τυπικούς αναγνώστες RFID που υπάρχουν στο εμπόριο αλλά και με smartphone εξοπλισμένα με δέκτη επικοινωνίας πεδίου (NFC) (Fuertes, 2016).

Η τελική μορφή μιας RFID ετικέτας απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 12. RFID ετικέτα

Πηγή: Fuertes, 2016

Οι αισθητήρες της ετικέτας λαμβάνουν δεδομένα ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα π. χ. κάθε δύο λεπτά, δεδομένα τα οποία μπορούν εύκολα να αναπαρασταθούν οπτικά και να αναγνωστούν από συγκεκριμένες εφαρμογές. Έτσι, καθένας, είτε χρήστης είτε εμπλεκόμενος στην εφοδιαστική αλυσίδα, μπορεί να σκανάρει την ετικέτα και να ενημερώνεται αν το τρόφιμο έχει υποβληθεί σε ακατάλληλη θερμοκρασία, υγρασία κλπ., και να προχωρήσει σε εκτίμηση της ποιότητας της συντήρησής του.

2. 3. Γραμμοτοί κώδικες (barcodes)

Η χρήση των Barcode και QRcode αποτελεί μια λιγότερο δυναμική πρακτική που αποτέλεσε το θεμέλιο πάνω στο οποίο βασίστηκαν οι πιο εξελιγμένες τεχνολογικά μέθοδοι. Η χρήση barcode δηλώνει κάποια πιο γενικά στοιχεία, όπως π. χ. την ημερομηνία που δημιουργήθηκε το προϊόν, την προτεινόμενη ημερομηνία κατανάλωσης, τις θερμοκρασιακές συνθήκες που συστήνει ο κατασκευαστής να βρίσκεται το προϊόν προκειμένου να συντηρείται καλύτερα κλπ (Giannoglou, 2013).



Εικόνα 13. QR ετικέτα
Πηγή: Giannoglou, 2013



Εικόνα 14. Barcode ετικέτα
Πηγή: Royatos-Racionero et al., 2018

Μια καινοτομία σχετικά με την χρήση barcode για έξυπνες συσκευασίες που έχει αναπτυχθεί είναι το πατενταρισμένο Digimarc® . Αυτό είναι ένα ηλεκτρονικό μοτίβο σε μέγεθος pixel, που εκτυπώνεται στη συσκευασία και είναι αόρατο στο ανθρώπινο μάτι που καθιστά κάθε συσκευασία στην οποία τοποθετείται αναγνώσιμη από ένα ειδικό λογισμικό που εκδίδει η εταιρία. Το λογισμικό αυτό μπορεί να εγκατασταθεί σε POS, έξυπνες συσκευές (κινητά, τάμπλετ) ή scannerbarcode, και να διαβάσει πολλαπλά barcodes (Καλιούπη, 2016).



Εικόνα 15. Barcode ετικέτες πάνω στην συσκευασία

Πηγή: Royatos-Racionero et al., 2018

Τα πολλαπλά barcodes που έχει πάνω η συσκευασία, μπορούν να προστίθενται σε διάφορα στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας, ώστε να δίνουν μια πληρέστερη εικόνα της κατάσταση του τροφίμου. Ωστόσο, η ανάγνωση των barcodes δίνει και επιπλέον πληροφορίες για το προϊόν που δεν σχετίζονται με την συντήρησή του (π. χ. Διεύθυνση εργοστασίου κλπ) (Royatos-Racionero et al., 2018).

2. 4. Θερμοχρωμικά μελάνια

Τα θερμοχρωμικά μελάνια ανήκουν στην κατηγορία των χρωμογονιδιακών συστημάτων (chromogenicsystems). Τα χρωμογονιδιακά συστήματα περιλαμβάνουν υλικά ηλεκτροχρωμικά, που αλλάζουν πυκνότητα ή χρώμα όταν εφαρμοστεί ηλεκτρική τάση ενώ τα φωτοχρωμικά υλικά, αλλάζουν το χρώμα τους όταν εκτίθενται σε υπεριώδεις ακτινοβολίες. Τα θερμοχρωμικά υλικά αλλάζουν το χρώμα τους, όταν εκτεθούν σε ηλεκτρικές, θερμικές ή οπτικές αλλαγές και έχουν βρει πολλές εφαρμογές στον τομέα της συσκευασίας. Η αλλαγή

του χρώματος πραγματοποιείται όταν αυξηθεί ή μειωθεί η θερμοκρασία του εσωτερικού της συσκευασίας. Η αλλαγή αυτή γίνεται αντιληπτή στο ανθρώπινο μάτι, καθώς από την άχρωμη κατάσταση η ετικέτα μεταβαίνει σε έγχρωμη (ή το αντίστροφο), ενώ σε άλλες περιπτώσεις έχουμε αλλαγή από ένα χρώμα σε ένα άλλο (π. χ. Από πράσινο σε κόκκινο). Η τιμή της θερμοκρασίας στην οποία θα επέλθει η αλλαγή δεν είναι σταθερή αλλά ποικίλει, ώστε να είναι κατάλληλη για κάθε προϊόν. Για παράδειγμα, αν ένα προϊόν πρέπει να συντηρείται στο ψυγείο, η θερμοκρασία του θα είναι χαμηλή, οπότε θα χρησιμοποιηθεί δείκτης όπου η άχρωμη κατάσταση θα είναι σε θερμοκρασία μικρότερη των 5°C.

Τα θερμοχρωμικά μελάνια έχουν πολλές εφαρμογές στην συσκευασία τροφίμων προσφέροντας ασφάλεια ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές έξυπνης συσκευασίας, όπως μαζί με τα TTIs. Χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία της έξυπνης συσκευασίας για την ενίσχυση των ετικετών, την προειδοποίηση, τις συμβουλές για τη σωστή θερμοκρασία κατανάλωσης, την απόδειξη της γνησιότητας. Το παρακάτω σχήμα δείχνει ένα παράδειγμα θερμοχρωμικής συσκευασίας (Han, 2018).



Εικόνα 16. Παράδειγμα θερμοχρωμικής συσκευασίας που χρησιμοποιεί η PizzaHut
Πηγή: Han, 2018

Η κόκκινη κουκκίδα αλλάζει χρώμα για να δείξει ότι η πίτσα ήταν ζεστή μέσα στο κουτί. Η ιδέα ήταν ότι κατά την παράδοση θα εμφανιζόταν η κόκκινη κουκκίδα (LCR Hallcrest, 2015). Τα θερμοχρωμικά είναι μελάνια που αλλάζουν χρώμα μόνιμα όταν ενεργοποιούνται από αυξήσεις της θερμοκρασίας και περνούν από την άχρωμη στην έγχρωμη κατάσταση. Η

αντίδραση είναι μη αναστρέψιμη. Αυτά τα μελάνια χρησιμοποιούνται συχνά για να δείξουν μια μόνιμη βλάβη.



Εικόνα 17. Θερμοχρωμική συσκευασία που αλλάζει χρώμα για να δείξει την κατάσταση του ψωμιού.

2. 5. Δείκτες συγκέντρωσης αερίων

Υπάρχουν ετικέτες που έχουν την ιδιότητα να δρουν ως δείκτες συγκέντρωσης αερίων. Αυτές οι ετικέτες εισάγονται στις συσκευασίες ώστε να παρακολουθούνται οι αλλαγές της ατμόσφαιρας στο εσωτερικό. Η διάχυση αερίων δημιουργεί εσωτερικές αλλαγές στην ατμόσφαιρα. Οι μικροοργανισμοί μέσα από την μεταβολική δραστηριότητα τους αλλά και λόγω χημικών ή ενζυμικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα μέσα στα προϊόντα, δημιουργούν αέρια που όταν διαχέονται, δημιουργούν εσωτερική αλλαγή στην ατμόσφαιρα στο εσωτερικό.

Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται και για να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητα των δραστικών συστατικών στις συσκευασίες (π.χ., O_2 και καθαριστές CO_2) και για την ανίχνευση της εμφάνισης διαρροών. Σημαντικό είναι να ελέγχονται πολύ καλά οι δείκτες αυτοί επειδή τοποθετούνται μαζί με τα τρόφιμα. Για το λόγο αυτό γίνεται μεγάλη προσπάθεια να πληρούνται πολύ αυστηρές προδιαγραφές όταν βρίσκονται στη φάση του σχεδιασμού. Ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι η συμπεριφορά τους σε ενυδατωμένα περιβάλλοντα, ώστε να μην διαλύονται στο νερό και βέβαια να μην είναι τοξικές όταν έρχονται σε επαφή με τα τρόφιμα.

Οι γνωστότεροι δείκτες αερίων ευρείας χρήσης ελέγχουν τη συγκέντρωση οξυγόνου ή / και διοξειδίου του άνθρακα. Η τεράστια σημασία που έχουν αυτά τα δύο αέρια για τα τρόφιμα, έχει κινητοποιήσει την επιστημονική κοινότητα για αυτό και γίνονται συνεχώς έρευνες για την ανάπτυξη συγκεκριμένων δεικτών. Οι τελευταίες εξελίξεις έχουν οδηγήσει σε δείκτες οξυγόνου με τη χρήση της μεθόδου της χρωματομετρίας που ενεργοποιείται από την ακτινοβολία UV. Διάφορες εμπορικές εφαρμογές αποτελούν το AgelessEye™ από τη Mitsubishi Gas Chemical Co., το UPM για φύλαξη της διάρκειας ζωής του τροφίμου, και το Vitalon® της εταιρείας Toagosei Chemical Inc.



Εικόνα 18: Ο δείκτης συγκέντρωσης αερίου (οξυγόνου), AgelessEye

Κεφάλαιο 3. Έξυπνη συσκευασία και ο αντίκτυπός της στη μείωση των απωλειών και αποβλήτων τροφίμων

Ο όρος «έξυπνη συσκευασία» χρησιμοποιείται συχνά στη συζήτηση των συστημάτων συσκευασίας. Η έννοια αυτή θεωρείται αρκετά ευρεία, και περιλαμβάνει τόσο την έξυπνη όσο και την ενεργή συσκευασία που μπορεί να παρακολουθεί τις εσωτερικές και εξωτερικές αλλαγές που σημειώθηκαν σε ένα προϊόν (κάνοντάς το «έξυπνο») και να ανταποκριθεί / προσαρμοστεί περαιτέρω (η ιδιότητά του ως «ενεργό») επικοινωνώντας με μια εξωτερική διεπαφή, η οποία μπορεί να είναι ηλεκτρική ή οπτική) (Vanderroost et al., 2014). Όπως προαναφέρθηκε, ο απώτερος σκοπός της εφαρμογής της έξυπνης συσκευασίας είναι να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του προϊόντος και να διατηρήσει τη ποιότητά του, να δώσει πληροφορίες σχετικά με την ποιότητά του στους καταναλωτές, να βελτιώσει την ασφάλεια του προϊόντος και να καταστήσει εφικτή την ιχνηλασιμότητα του προϊόντος ενώ διακινείται κατά μήκος ή και πέρα από την αλυσίδα εφοδιασμού. Η ενεργός συσκευασία που χρησιμεύει ως η κύρια εναλλακτική λύση στην παραδοσιακή συσκευασία, στοχεύει στην υποστήριξη και διατήρηση υψηλής ποιότητας και στην επέκταση της φρεσκάδας των τροφίμων, κάτι που δεν ισχύει για την έξυπνη συσκευασία.

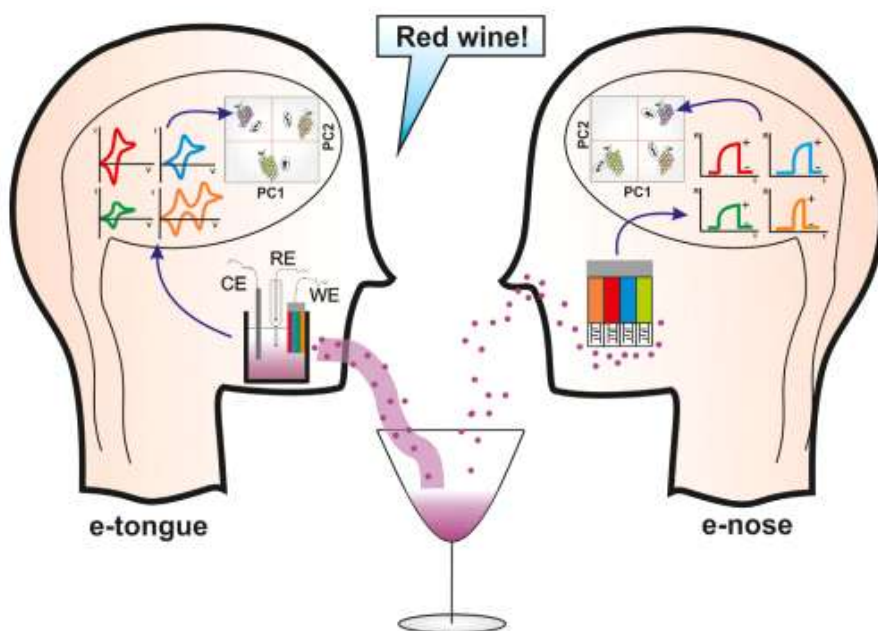
Για να γίνει καλύτερα κατανοητό, διευκρινίζουμε ότι μπορούν να ενσωματωθούν διαφορετικά συστατικά στο σύστημα που είναι ικανά να απελευθερώσουν / απορροφήσουν ουσίες από / μέσα στη συσκευασμένη τροφή για να αποφευχθεί η φθορά και αλλοίωσή τους (Prasad and Kochhar, 2014).

Η έξυπνη συσκευασία χρησιμοποιείται κυρίως για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση των συνθηκών των συσκευασμένων τροφίμων, για την καταγραφή και την παροχή δεδομένων της κατάστασης του προϊόντος κατά τις διαδικασίες αποθήκευσης και μεταφοράς. Έτσι, τα έξυπνα συστήματα συσκευασίας, όπως αναλύθηκε λεπτομερώς στο προηγούμενο κεφάλαιο, συνήθως περιλαμβάνουν στοιχεία, για παράδειγμα, ανιχνευτές αερίων, δείκτες φρεσκάδας και ωρίμανσης, δείκτες χρόνου-θερμοκρασίας (TTI) και συσκευές αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων (RFID) (Kerry et al., 2006). Υπάρχουν επίσης συστήματα που λειτουργούν ως “φορείς δεδομένων” τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση και μεταφορά δεδομένων, για την εμφάνιση των πληροφοριών σε μετέπειτα χρόνο (Muller & Schmid, 2019).

3. 1. Ο ρόλος του έξυπνου συστήματος συσκευασίας στην αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων

Οι τεχνολογικές εξελίξεις που σχετίζονται με το ζήτημα της ασφάλειας των τροφίμων είναι ένα από τα κορυφαία μέτρα για την πρόληψη των απωλειών και της σπατάλης τροφίμων. Μερικά από αυτά περιλαμβάνουν μηχανισμούς ελεγχόμενης θερμοκρασίας και ενεργειακά αποδοτικά συστήματα αποθήκευσης, νέα υλικά συσκευασίας και σχέδια, καθώς και έξυπνα συστήματα παρακολούθησης. Οι μελετητές έχουν εξετάσει και αποδείξει ότι η λειτουργία ειδικών, εξελιγμένων τεχνικών συσκευασίας, συμπεριλαμβανομένων των έξυπνων συσκευασιών, είναι απαραίτητο εργαλείο για τη μείωση των απορριμμάτων τροφίμων, διασφαλίζοντας την ασφάλεια των τροφίμων και ικανοποιώντας τις προσδοκίες των καταναλωτών (Royatos-Racionero et al., 2018).

Παρόλο που οι ψηφιακές τεχνολογίες για τις έξυπνες συσκευασίες έχουν αναπτυχθεί σημαντικά, όπως οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες, αισθητήρες εγκατεστημένοι σε «ηλεκτρονικές μύτες» και «ηλεκτρονικές γλώσσες» (e – nose, e – tongue, Εικ. 18), οι τρέχουσες συσκευές είναι συνήθως περίπλοκες και ακριβές και δεν είναι ακόμη έτοιμες να ενσωματωθούν σε συσκευασίες στο μαζικό εμπόριο (Royatos-Racionero et al., 2018).



Εικόνα 19: Λειτουργία ηλεκτρονικής μύτης και ηλεκτρονικής γλώσσας (e – nose, e – tongue)

Σήμερα, οι ενδείξεις «χρήση κατά προτίμηση πριν», «ημερομηνία παραγωγής» έχει γίνει κανόνας στη βιομηχανία τροφίμων, ωστόσο, δεν παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των τροφίμων μέσα στη συσκευασία. Αυτό θα γίνει με τα «δυναμικά συστήματα αποθήκευσης» τα οποία είναι το επόμενο βήμα της τεχνολογίας των συσκευασιών και της αποθήκευσης τροφίμων (Royatos-Racionero et al., 2018), όπως αναλυτικά παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα.

Υπό αυτό το πρίσμα, η περιβαλλοντική επιβάρυνση των υλικών συσκευασίας είναι θέμα πάνω στο οποίο έχουν δημιουργηθεί πολλές συζητήσεις και ανησυχίες, επομένως, η έρευνα για τη χαρτογράφηση της αξιολόγησης απόδοσης συσκευασίας σε σχέση με το περιβάλλον είναι ζωτικής σημασίας για την παροχή καθοδήγησης των μηχανικών σχεδιασμού συσκευασιών (Heller, Selke, & Keoleian, 2018). Υπάρχει μια επιτακτική ανάγκη να αξιοποιηθούν νέες τεχνολογίες για την εγγύηση της επισιτιστικής ασφάλειας. Οι εφαρμογές προηγμένων τεχνολογιών σε συστήματα έξυπνης συσκευασίας αναδύονται ολοένα και περισσότερο και πρόσφατα υιοθετούνται από τις φαρμακευτικές βιομηχανίες και τις βιομηχανίες τροφίμων όχι μόνο για να συμπληρώνουν τις συμβατικές λειτουργίες συσκευασίας αλλά και ως εργαλείο για την παράταση της διάρκειας ζωής των προϊόντων διατροφής, καθιστώντας το κατάλληλο για την παραγωγική διεργασία, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες και τις σπατάλες τροφίμων, συμβάλλοντας στην εξάλειψη συντηρητικών και, κυρίως της υψηλής ποιότητας και ποικιλίας για την εξασφάλιση ασφάλειας και ικανοποίησης των καταναλωτών (Janjarasskul & Suprakul, 2018).

Η εστίαση στην εφαρμογή συγκεκριμένων χημικών ή βιολογικών δεικτών εξακολουθεί να αποτελεί τη μεγαλύτερη πρόκληση στην ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων συσκευασίας στα τρόφιμα. Η ορθή απόφαση της επιλογής του δείκτη εξαρτάται από την προηγούμενη γνώση των σχετικών μικροβιακών παραγόντων και την εμφάνισή τους υπό διάφορες συνθήκες σε διαφορετικά είδη προϊόντων διατροφής, καθώς και από την απελευθέρωση ουσιών αντίδρασης που παράγονται κατά τη διαδικασία της αλλοίωσης (Aliakbarian et al., 2015). Η καταστροφή των τροφίμων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που θα μπορούσε να ξεκινήσει από μια σειρά φυσικών, χημικών ή ενζυμικών και μικροβιολογικών δράσεων.

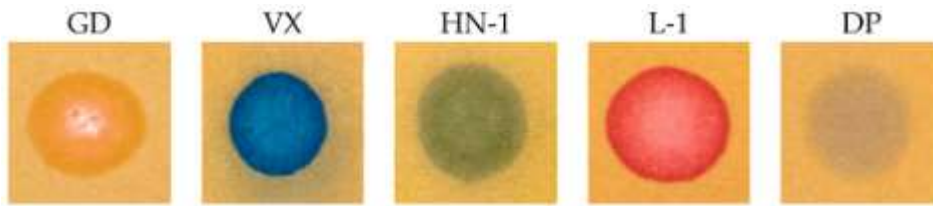
Τόσο η ανάπτυξη όσο και ο μεταβολισμός των βακτηρίων μπορεί να οδηγήσουν σε αλλαγές στο pH και να δημιουργήσουν τοξικές ουσίες, οσμές, αέρια και λεπτό σχηματισμό. Χημικές

διεργασίες, όπως η οξείδωση, η ακτινοβολία και η λιπόλυση, μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες γεύσεις και σχηματισμό ανεπιθύμητων ουσιών στη σύνθεση των τροφών. Εκτός από τις εγγενείς παραμέτρους (φυσικοχημικές και δομικές), οι εξωγενείς παράγοντες (θερμοκρασία, pH και υγρασία) μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη χημική, φυσική και βιολογική αλλοίωση των τροφίμων. Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες για τη μείωση της αλλοίωσης των τροφίμων, όπως δείκτες ακεραιότητας, δείκτες αλλοίωσης τροφίμων, δείκτες ωρίμανσης, δείκτες ευαισθησίας μικροκυμάτων και RFID (Sohail, Sun, & Zhu, 2018).

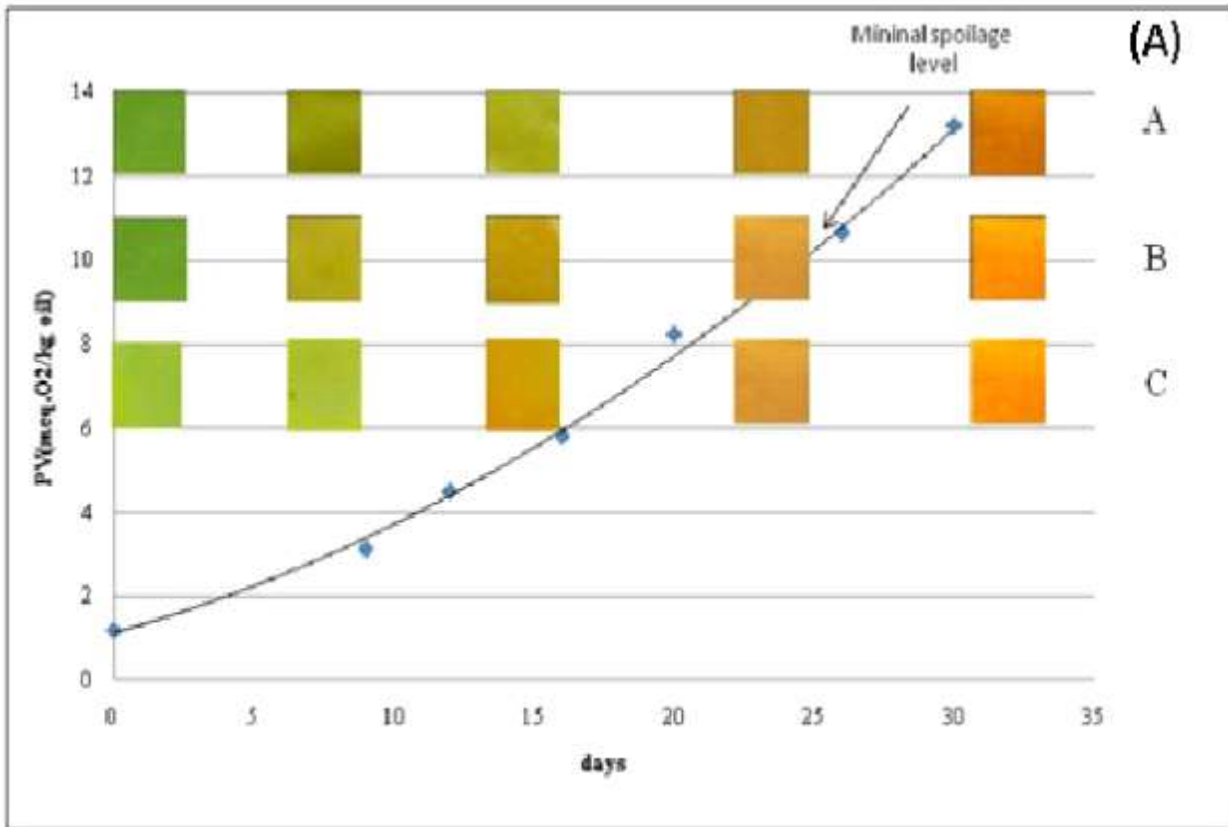
Αυτές οι ανιχνευόμενες ετικέτες RFID μπορούν να ανιχνεύσουν αλλαγές στις ιδιότητες των τροφίμων, όπως το pH, η αγωγιμότητα, η διηλεκτρική σταθερά, το ιξώδες, τα πτητικά των τροφίμων και τα αέρια, μέσω χημικών στοιχείων όπως μια ανταπόκριση επικάλυψης, μια οπτική ετικέτα, ένα χαρτί litmus και τα ηλεκτρόδια αγωγιμότητας (Kim et al., 2009).

Παράλληλα, η εκχύλιση στερεάς φάσης σε συνδυασμό με τη χρωματογραφία αερίου-φασματομετρία μάζας, η φασματοσκοπία UV-VIS και η φασματοσκοπία έχουν χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό και τον ποσοτικό προσδιορισμό των πτητικών ενώσεων στα τρόφιμα. Ωστόσο, οι περισσότερες από αυτές τις τεχνικές είναι δαπανηρές, περίπλοκες και απαιτητικές για εργασία σε σύγκριση με έξυπνα RFID που έχουν ειδικούς αισθητήρες και έχουν θεωρηθεί ως μια οικονομικά αποδοτική, μη διακριτική και φιλική προς τον χρήστη τεχνική για συσκευασίες τροφίμων (Badia-Melis et al., 2018). Επιπλέον, αυτά τα συστήματα συσκευασίας μπορούν να γίνουν ισχυρά εργαλεία για τη μείωση των απορριμμάτων τροφίμων, καθώς διαθέτουν δείκτες που μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τα συστατικά τροφίμων και τους μεταβολίτες στο κεφάλι ή / και με άλλους εξωγενείς περιβαλλοντικούς παράγοντες, επιτρέποντας έτσι την παρακολούθηση της κατάστασης του τροφίμου (Royatos-Racionero et al., 2018).

Οι χρωμογόνοι χημειοαισθητήρες είναι ένα νέο, καινοτόμο σύστημα αναλώσιμου εύχρηστου χειρισμού, όχι μόνο επειδή είναι λιγότερο ακριβό, ευέλικτο και εύκολα εκτυπωμένο στη συσκευασία, αλλά και επειδή η αλλαγή του χρώματος με το χρόνο μπορεί εύκολα να ανιχνευθεί μέσω διάφανων φιλμ με γυμνό μάτι (Sohail, Sun, & Zhu, 2018).



Εικόνα 20: χρωμογόνοι χημειοαισθητήρες



Εικόνα 21. Τιμή υπεροξειδίου (PV) σκόνης γάλακτος σε σφραγισμένες φιάλες στους 30C (A) προσαρτημένες με ενδεικτικές ετικέτες που αλλάζουν χρώμα από έντονο πράσινο (φρέσκο) σε πορτοκαλί (προειδοποίηση) (B)

Σύμφωνα με την έκθεση της Boston Consulting Group (BCG) το 2019, σημειώθηκε μια πολύ μικρή - ανεπαρκής πρόοδος στην εξάλειψη της σπατάλης τροφίμων σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού, λόγω ανεπαρκούς υποδομής, έλλειψης ερευνητικής προσπάθειας, κανονισμών και συνεργασίας σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας. Προβλέπεται λοιπόν ότι η βελτίωση της υποδομής και της αποτελεσματικότητας της αλυσίδας εφοδιασμού από μόνη της θα μπορούσε

να μειώσει την απώλεια τροφίμων κατά 270 δισεκατομμύρια δολάρια, πράγμα που ισοδυναμεί με 1,5 τρισεκατομμύρια δολάρια έως το 2050. Από αυτή την άποψη, τα συστήματα έξυπνης συσκευασίας μπορούν να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο ελαχιστοποιώντας τα απόβλητα τροφίμων και επιτρέποντας μια πιο βιώσιμη αλυσίδα εφοδιασμού (Han et al., 2018). Για παράδειγμα, οι φορείς δεδομένων θα βοηθήσουν στη σύνδεση των πληροφοριών εντός της αλυσίδας εφοδιασμού για να καταστήσουν τη διαδικασία πιο αποτελεσματική διασφαλίζοντας την ιχνηλασιμότητα, την αυτοματοποίηση ή τις κλοπές περιεχομένου (McFarlane & Sheffi, 2003).

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας στις έξυπνες συσκευασίες όχι μόνο θα μειώσει τα απόβλητα και τις απώλειες τροφίμων μέσω της βελτίωσης της αποτελεσματικότητας διανομής στην αλυσίδα εφοδιασμού και της αποτελεσματικής ανίχνευσης της αλλοίωσης των τροφίμων, αλλά επίσης θα αντιμετωπίσει τα θέματα της ασφάλειας των τροφίμων. Συγκεκριμένα, τα RFID θα προσφέρουν περισσότερα πλεονεκτήματα στη συνολική αλυσίδα εφοδιασμού υποστηρίζοντας τη διαχείριση αποθεμάτων και την ιχνηλασιμότητα, προωθώντας έτσι την ποιότητα και την ασφάλεια των τροφίμων (Kumar et al., 2009). Ομοίως, τα TTI θα βοηθήσουν στην παρακολούθηση του κατάλληλου προφίλ θερμοκρασίας ή μιας ψυχρής αλυσίδας σε μια ολόκληρη αλυσίδα εφοδιασμού (Fang, Zhao, Warner, & Johnson, 2017).

Επιπλέον, όχι μόνο ο χρόνος και το κόστος υλικού για την ανάλυση των συσκευασμένων τροφίμων ελαχιστοποιείται με τη χρήση έξυπνων συσκευασιών, αλλά θα συμβεί επίσης και μείωση του κόστους διότι οι έξυπνες συσκευασίες εξαλείφουν σημαντικά τις αλλοιώσεις των τροφίμων (Muller & Schmid, 2019). Αναμένεται οι νέες βιοδραστικές έξυπνες συσκευασίες να μπορούν να αποτελέσουν μια μελλοντική τάση, η οποία θα έχει τη δυνατότητα να ανοίξει νέα πεδία, να αυξήσει τη ζήτηση στην αγορά και να υιοθετηθεί από περισσότερες βιομηχανίες τροφίμων (Majid et al, 2018). Επιπλέον, οι συνεχείς βελτιώσεις στη συλλογή δεδομένων των απορριμμάτων των τροφίμων είναι ιδιαίτερα χρήσιμες και μπορούν να συμβάλουν αποφασιστικά στη λήψη αποφάσεων καθώς και στην προώθηση αυτού του σχεδιασμού συσκευασίας (Sohail, Sun, & Zhu, 2018). Ωστόσο, απαιτούνται προηγμένες τεχνολογίες κατασκευής για τη μείωση του κόστους μαζικής παραγωγής και τη μείωση της πολυπλοκότητας της ενσωμάτωσης έξυπνων συσκευών στις τρέχουσες γραμμές συσκευασίας. Πρέπει να γίνει περαιτέρω έρευνα σχετικά με τα θέματα ασφάλειας και τη σκοπιμότητα και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τέλος, οι πελάτες πρέπει να είναι

καλά ενημερωμένοι για αυτά τα προηγμένα συστήματα συσκευασίας, το σχετικό κόστος και τα οφέλη τους, και το πιο σημαντικό είναι η προθυμία τους να ξοδέψουν (Fuertes et al., 2016).

3. 1. 1. Μεθοδολογία αξιοποίησης του TTI για πρόβλεψη ποιότητας τροφίμου και ελάττωση των απορριπτόμενων προϊόντων

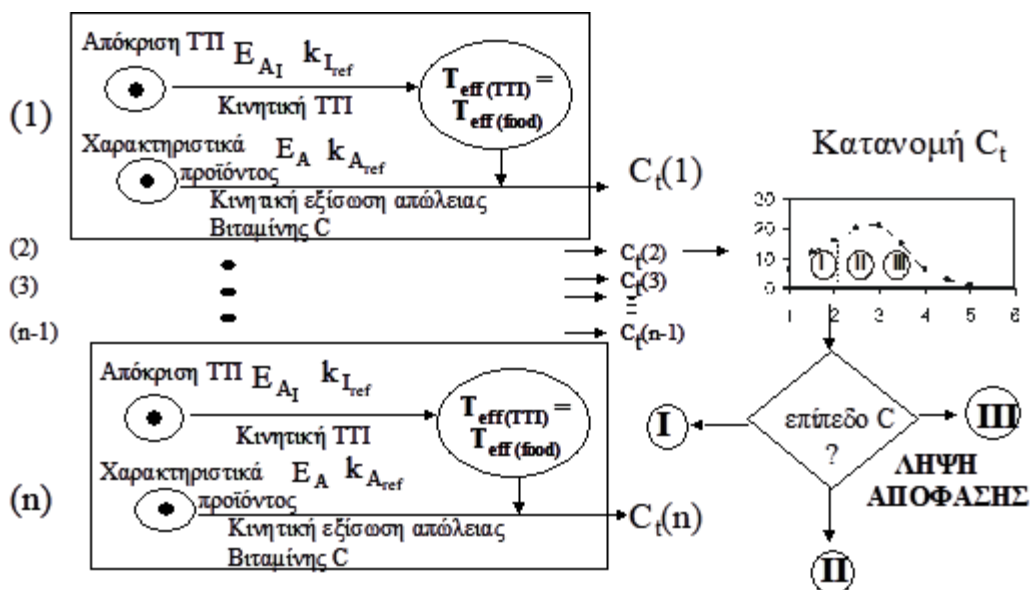
Ένα σύγχρονο σύστημα διασφάλισης ποιότητας περιλαμβάνει τη φάση μετά την επεξεργασία, που εκτείνεται ιδανικά μέχρι και το στάδιο του καταναλωτή. Η εφαρμογή ενός βελτιστοποιημένου συστήματος διασφάλισης ποιότητας για την αλυσίδα (υπό συνθήκες ψύξης) της διανομής φρέσκων και ελάχιστα επεξεργασμένων προϊόντων διατροφής απαιτεί συνεχή παρακολούθηση των συνθηκών αποθήκευσης σε συνδυασμό με διεξοδική γνώση της σχέσης μεταξύ αυτών των συνθηκών και της διάρκειας ζωής, εκφρασμένη σε ποσοτικούς όρους, δηλαδή αποτελεσματικά και ακριβή μοντέλα. Τέτοια μοντέλα βασίζονται στη μαθηματική περιγραφή της μεταβολής των μετρούμενων χημικών και βιοχημικών αλλαγών, της μικροβιολογικής δραστηριότητας και της τιμής οργανοληπτικών ιδιοτήτων του τροφίμου ως προς το χρόνο για το εύρος θερμοκρασιών ενδιαφέροντος (συνθήκες περιβάλλοντος ή συντήρηση υπό ψύξη είτε υπό απόψυξη). Επιπλέον, υπάρχει ανάγκη ανάπτυξης πρακτικών μέσων για την παρακολούθηση και καταγραφή αυτών των συνθηκών, κυρίως της πραγματικής θερμοκρασίας, από την παραγωγή έως την κατανάλωση. Οι δείκτες θερμοκρασίας χρόνου ή οι ολοκληρωτές (TTI) επιτρέπουν την παρακολούθηση αυτή έως το επίπεδο μονάδας προϊόντος. Τα TTI είναι απλές, φθηνές συσκευές που μπορούν να παρουσιάσουν μια εύκολα μετρήσιμη αλλαγή που εξαρτάται από το χρόνο και τη θερμοκρασία, η οποία αντικατοπτρίζει σωρευτικά το ιστορικό χρόνου και θερμοκρασίας του τροφίμου. Η μη αναστρέψιμη απόκριση του TTI είναι συνήθως μια οπτικά μετρήσιμη μηχανική παραμόρφωση ή μια ανάπτυξη χρώματος που βασίζεται σε μηχανικά, χημικά ή ενζυμικά συστήματα. Όπως αναλύθηκε διεξοδικά και στο προηγούμενο κεφάλαιο, μια εμπειριστατωμένη κινητική μελέτη απόκρισης του TTI είναι απαραίτητη για μια αποτελεσματική συσχέτιση με την κινητική αλλοίωσης των παρακολουθούμενων τροφίμων. Η προρρητική μικροβιολογία (predictivemicrobiology) συνέβαλε ουσιαστικά στην αξιολόγηση και τη διαχείριση του κινδύνου σχετικά με την ασφάλεια των τροφίμων. Οι συστηματικές και ποσοτικές χρήσεις μικροβιακών εμποδίων συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση του κινδύνου των τροφίμων κατά την κατανάλωση. Η ασφάλεια αποτελεί

πρωταρχικό μέλημα και πρέπει να αντιμετωπιστεί ανεξάρτητα από θέματα ποιότητας και διάρκειας ζωής (Grau et al., 2016).

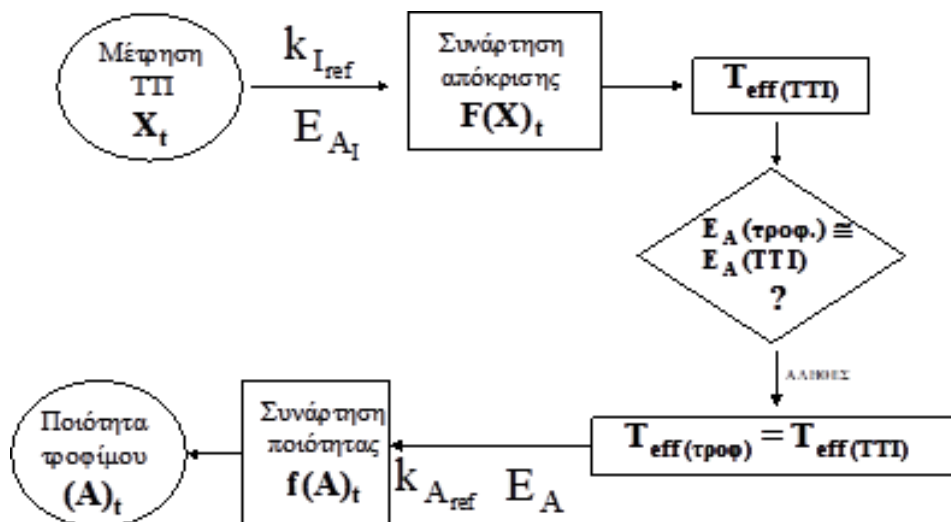
Η εφαρμογή της περιγραφόμενης συστηματικής προσέγγισης μοντελοποίησης της αλλοίωσης τροφίμων και της κινητικής TTI επιτρέπει τον προσδιορισμό της καταναλωθείσας και της εναπομένουσας διάρκειας ζωής σε οποιοδήποτε δεδομένο σημείο της αλυσίδας ψύξης. Η δυνατότητα εκτίμησης της διάρκειας ζωής οδήγησε στην εισαγωγή ενός καινοτόμου συστήματος διαχείρισης αποθεμάτων. Αντί της συμβατικής αρχικής μεθόδου (FIFO, First In First Out), χρησιμοποιήθηκε μια προσέγγιση που κωδικοποιείται ως «Least ShelfLife First Out, LSFO» για την προώθηση προϊόντων στο επόμενο στάδιο διανομής, δίνοντας προτεραιότητα σε εκείνα με την μικρότερη εναπομένουσα διάρκεια ζωής. Το σύστημα αυτό βασίζεται στην προώθηση προϊόντων, σε επιλεγμένα σημεία της αλυσίδας διακίνησης, με βάση την πραγματική εναπομένουσα ζωή τους, προωθώντας άμεσα αυτά που είναι πλησιέστερα στην οριακή τιμή απόρριψης. Στόχος είναι η επίτευξη μιας πιο ομοιόμορφης ποιότητας, με σημαντική ελάττωση των απορριπτόμενων προϊόντων στο στάδιο της κατανάλωσής τους, με προφανή πλεονεκτήματα για τη βιομηχανία και για τον ίδιο τον καταναλωτή. Ακολουθώντας αυτήν την πολιτική μάρκετινγκ, τα απορριφθέντα προϊόντα μειώνονται σημαντικά και οι καταναλωτές λαμβάνουν προϊόντα σε πιο ομοιόμορφη ποιότητα (Grau et al., 2016; Taoukis et al., 1998). Ενδεικτικές εφαρμογές του συστήματος αυτού παρουσιάστηκαν για προϊόντα φρέσκων σαλατών (Taoukis et al., 1998), όπου αναλύθηκε η σημαντική ελάττωση των απορριπτόμενων προϊόντων με την εναλλακτική μεθοδολογία του LSFO.

Σε μεταγενέστερες δημοσιεύσεις, παρουσιάστηκε ένα πιο ολοκληρωμένο σύστημα αποφάσεων για την πιο ορθολογική διαχείριση και διανομή προϊόντων, με την κωδικοποίηση “ShelfLife Decision System, SLDS” (Giannakourou et al., 2003, Giannakourou et al., 2001, Giannakourou and Taoukis, 2002a and 2002b, Koutsoumanis et al., 2002). Προκειμένου η προσομοίωση να είναι περισσότερο ρεαλιστική και να αποτυπώνει καλύτερα την πραγματικότητα, στο νέο σύστημα ενσωματώθηκε μια επιπλέον καθοριστική παράμετρος, η αρχική ποιότητα της πρώτης ύλης, που μεταβάλλεται σημαντικά επηρεάζοντας την τελική εναπομένουσα διάρκεια ζωής του προϊόντος. Σχεδιάστηκε επομένως ένα πιο πολύπλοκο και διευρυμένο σύστημα λήψης αποφάσεων που κωδικοποιείται με το όνομα SLDS (ShelfLife

Decision System), με τα ίδια δομικά στοιχεία που περιλάμβανε και το LSFO, τα οποία παραστατικά απεικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα εφαρμογής του SLDS.



Σχήμα 14: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου του SLDS στα κομβικά σημεία ελέγχου της αλυσίδας διακίνησης των καταψυγμένων τροφίμων



Σχήμα 15. Αλγόριθμος εφαρμογής των ΤΠ για πρόβλεψη της ποιότητας του τροφίμου

Τα δομικά στοιχεία του SLDS περιλαμβάνουν μοντέλα πρόβλεψης της διάρκειας ζωής των τροφίμων που μελετούνται και την κινητική της απόκρισης του κατάλληλου TTI, λαμβάνοντας υπόψη και τη μεταβλητότητα της πρώτης ύλης. Στο πλαίσιο αυτής της μεθοδολογίας, η διασφάλιση της ασφάλειας θεωρείται ότι επιτυγχάνεται ανεξάρτητα από τις συνθήκες αποθήκευσης, διανομής και χειρισμού μετά την παραγωγή μέσω της εφαρμογής αποτελεσματικών συνδυασμών εμποδίων. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι είναι πολύ σημαντικό να αναγνωρίσουμε τους κατάλληλους δείκτες που καθορίζουν πραγματικά τη διάρκεια ζωής του τροφίμου και να χρησιμοποιηθεί ο κατάλληλος πειραματικός σχεδιασμός, αποτελεσματικές και εύκολες τεχνικές μέτρησης και μαθηματικά και στατιστικά εργαλεία για την κατασκευή αξιόπιστων μοντέλων που μπορούν να προβλέψουν τη διάρκεια ζωής υπό τις δυναμικές συνθήκες που αντιμετωπίζονται στην πραγματική ψυκτική αλυσίδα (Grau et al., 2016). Το παραπάνω διάγραμμα ροής υλοποίησης του SLDS απεικονίζει τις ελάχιστες απαραίτητες πληροφορίες που χρειάζεται το σύστημα ως input, προκειμένου σε οποιοδήποτε σημείο να μπορεί να ληφθεί η βέλτιστη απόφαση για την περαιτέρω διαχείριση των προϊόντων. Το θεωρητικό παράδειγμα που φαίνεται στο διάγραμμα αυτό αφορά σε προϊόντα, διαφορετικής αρχικής ποιότητας, τα οποία, μετά από 1,5 μήνα στο κέντρο διανομής της βιομηχανίας παραγωγής, αναμένεται να προωθηθούν σε τρεις διαδοχικές χρονικές περιόδους, 30, 60 ή 90 ημέρες στους θαλάμους του καταστήματος (εναλλακτική διαχείριση I, II ή III). Επομένως, προκύπτει ο προβληματισμός με ποιόν τρόπο και με βάση ποιο κριτήριο θα γίνει η ομαδοποίηση των προϊόντων προς προώθηση στο επόμενο βήμα της αλυσίδας. Το «μοίρασμα» των προϊόντων θα μπορούσε να γίνει τυχαία, σύμφωνα με την τρέχουσα πρακτική FIFO, ή εναλλακτικά, μπορεί να λαμβάνει υπόψη του την πραγματική κατάσταση κάθε μεμονωμένου τεμαχίου προϊόντος, χρησιμοποιώντας την απόκριση του συνημμένου σε κάθε συσκευασία TTI, αφού αυτή μεταφραστεί μέσω του αλγορίθμου του σχήματος XX2, σε εναπομένουσα ζωή του συγκεκριμένου τροφίμου, τη δεδομένη χρονική στιγμή.

3. 2. Τεχνολογίες εκτύπωσης ετικετών έξυπνων συσκευασιών

Όπως συζητήθηκε παραπάνω, η έξυπνη συσκευασία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εφοδιαστική αλυσίδα τροφίμων, βελτιώνοντας την απόδοση της διανομής και συμβάλλοντας

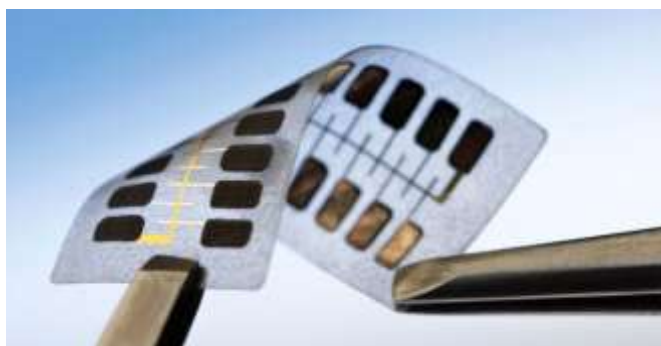
στη μείωση των απορριμμάτων και των απωλειών τροφίμων, εντοπίζοντας αλλοιώσεις τροφίμων για την αντιμετώπιση προβλημάτων ασφάλειας και, ως εκ τούτου, εξοικονομώντας χρόνο και κόστος. Ωστόσο, υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ του δυνητικού κόστους που σχετίζεται με τα απόβλητα και τις απώλειες τροφίμων, καθώς και ζητήματα ασφάλειας και το επιπλέον κόστος κατασκευής έξυπνων συσκευασιών. Οι αισθητήρες ή οι έξυπνες ετικέτες είναι βασικά στοιχεία στο σύστημα έξυπνης συσκευασίας για την παρακολούθηση της ποιότητας των τροφίμων ή των συνθηκών αποθήκευσης ή για τον προσδιορισμό του εξωτερικού περιβάλλοντος ενός συσκευασμένου προϊόντος τόσο για τις ανάγκες του κατασκευαστή όσο και των καταναλωτών (Wyser et al., 2016).

Πρέπει να αναπτυχθούν και να βελτιωθούν κατάλληλες τεχνικές για την κατασκευή αυτών των έξυπνων στοιχείων που να είναι συμβατά με τα ισχύοντα πρότυπα συσκευασίας για τη μείωση του σχετικού κόστους κατασκευής, αλλά ταυτόχρονα να διευρύνουν το εύρος των εφαρμογών τους για διάφορα προϊόντα διατροφής. Μεταξύ των υπάρχουσών τεχνικών κατασκευής, οι μέθοδοι ηλεκτρονικής εκτύπωσης έχουν λάβει σημαντική προσοχή όχι μόνο από τον ακαδημαϊκό χώρο αλλά και από τις βιομηχανικές κοινότητες λόγω της σημαντικής ικανότητάς τους να τοποθετούνται απευθείας ηλεκτρονικά εξαρτήματα (για παράδειγμα, αισθητήρες, μπαταρίες, ετικέτες RFID και οθόνες) σε εύκαμπτα υποστρώματα διαφόρων υλικών (για παράδειγμα, πολυϊμίδιο, τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο, πολυαιθερικός αιθέρας κετόνη, ελαστομερές, ακόμη και χαρτί) με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, σε μεγάλη κλίμακα και αποτελεσματικότητα (Semple, Georgiadou, Wyatt-Moon, Gelinck, & Anthopoulos, 2017). Ταυτόχρονα, διατηρούνται όλες οι άλλες ιδιότητες όπως το χαμηλό βάρος, η φορητότητα, η καμπτότητα, η δυνατότητα αναδίπλωσης και η μεγάλη ενεργή (δραστική) περιοχή της συσκευασίας.



Εικόνα 22: Συσκευή screenprinting

Κατά την τελευταία δεκαετία, οι κατασκευαστές χρησιμοποίησαν σταδιακά μεθόδους εκτύπωσης για την παραγωγή ορισμένων συμβατικών ηλεκτρονικών συσκευών για τη μείωση του κόστους (Wyser et al., 2016). Για παράδειγμα, ο οργανισμός Thin Film Electronics ASA έχει κατορθώσει με επιτυχία να δημιουργήσει ένα εκτυπώσιμο σύστημα αισθητήρων ανίχνευσης θερμοκρασίας κατάλληλο για παρακολούθηση φρέσκων τροφίμων (Thin Film, 2013). Η εταιρία Xerox, πρότεινε μια εξαιρετικά ασφαλή, τυπωμένη ετικέτα (Xerox Printed Memory) η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξετάσει εάν ένα προϊόν είναι γνήσιο και μπορεί να παρακολουθεί τον χειρισμό του προϊόντος κατά τη διανομή (Xerox, 2015).

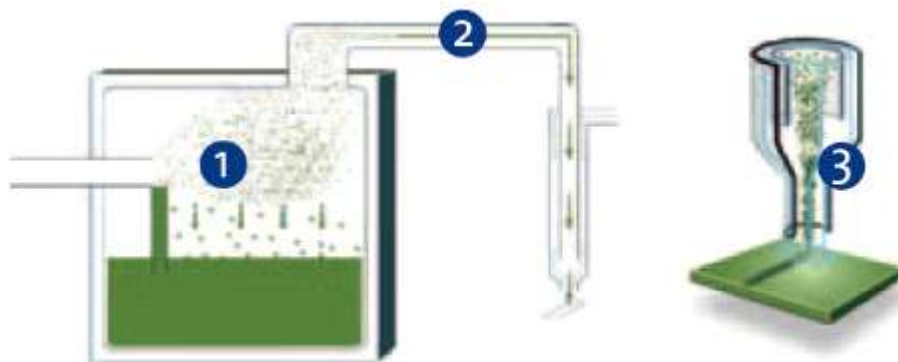


Εικόνα 23: Η έξυπνη ετικέτα της Xerox

Για την καλύτερη κατανόηση της θέσης της κατασκευής εκτυπώσιμων ηλεκτρονικών στην αλυσίδα εφοδιασμού, θα πρέπει να γίνουν κατανοητές οι διαφορετικές τεχνικές εκτύπωσης με πλεονεκτήματα, αδυναμίες και συνολικό κόστος, που θα βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων

της έξυπνης ετικέτας στο αρχικό στάδιο της εφοδιαστικής αλυσίδας τροφίμων (Cao, Andrews, & Franklin, 2017).

Υπάρχουν μερικές μέθοδοι εκτύπωσης που χρησιμοποιούνται συνήθως στην κατασκευή εκτυπώσιμων ηλεκτρονικών ειδών: γκραβούρες, φλεξογραφίες, οθόνες, inkjet εκτυπώσεις με aerosoljet (AJPs) (Chu, Qian, Chahal, & Cao, 2018).



Εικόνα 24: Τεχνολογία AerosolJet Printing. Ο πίδακας μελανιού μεταφέρεται στο ακροφύσιο γραφής (2) όπου οδηγείται προς ένα υπόστρωμα που κινείται στους άξονες X-Y-Z (3).

Στην περίπτωση της εκτύπωσης με γκραβούρα, το σχέδιο πρέπει να σφραγίζεται ή να φορτώνεται σε ρολό και χρησιμοποιείται πίεση για απευθείας μεταφορά του μελανιού σε ρολά υποστρώματος. Αυτή η μέθοδος θεωρείται ότι παράγει έξυπνες ετικέτες χαμηλού κόστους με υψηλό ρυθμό ταχύτητας κατασκευής. Για παράδειγμα, χρησιμοποιήθηκε εκτύπωση χαρακτηριστικής roll-to-roll (R2R) για την κατασκευή ετικετών για έξυπνες συσκευασίες ενώ εμφανίζει επίσης εξαιρετική δυνατότητα κλιμάκωσης και ανταγωνιστική ανάλυση (Grau et al., 2016).



Εικόνα 25: Εκτυπωτής τύπου R2R

Αυτός ο τύπος εκτύπωσης είναι κατάλληλος για μαζική παραγωγή, εάν συνδυαστεί με διαμόρφωση εκτύπωσης R2R (Khan, Lorenzelli, & Dahiya, 2015). Η φλεξογραφία, μια τεχνική που συνήθως συγκρίνεται με τη ροτογκραβούρα (rotogravure), χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές συσκευασίας, κυρίως για την κατασκευή ηλεκτρονικών συσκευών με δυνατότητες εκτύπωσης υψηλής ταχύτητας, για έξυπνη συσκευασία και RFID. Η πλάκα εκτύπωσης αποτελείται από ένα μαλακότερο υλικό και η μονάδα εκτύπωσης διαθέτει τροφοδοσία μελάνης, κύλινδρο anilox, κύλινδρο πλάκας και κύλινδρο εντύπωσης. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν οποιοδήποτε απορροφητικό υλικό (Singh et al, 2010).

Οι εικόνες γκραβούρας κοστίζουν συνήθως πολύ περισσότερο από τη φλεξογραφία, αλλά έχει μεγαλύτερο χρόνο εκτέλεσης της εκτύπωσης. Όπως η εκτύπωση inkjet, έτσι και η μεταξοτυπία παράγει παχιά και διαμορφωμένα στρώματα υλικών μεγάλου ιξώδους, διατηρώντας έτσι υψηλή απόδοση και ανάλυση. Η εκτύπωση οθόνης είναι κατάλληλη τόσο για ανόργανα όσο και για οργανικά υλικά με διαφορετικά ιξώδη παρά τη λειτουργία στρώσης ή την ευελιξία του υποστρώματος (Pardo, Jabbour, & Peyghambarian, 2000).

Η εκτύπωση οθόνης και οι απαιτήσεις της για εκτύπωση συνθέσεων μελανιού με νανοσωματίδια έχουν μελετηθεί και συζητηθεί αρκετά από την επιστημονική κοινότητα..

Όσον αφορά την εκτύπωση inkjet, τα σταγονίδια μελανιού εγχύονται από ένα ακροφύσιο σε ένα υπόστρωμα που είναι είτε άκαμπτο είτε εύκαμπτο (Singh, Haverinen, Dhagat, & Jabbour, 2010). Η εκτύπωση Inkjet επιτυγχάνει μια ισορροπία μεταξύ της ανάλυσης εκτύπωσης και της επεκτασιμότητας και χωρίς τη χρήση μάσκας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη σχετικά λεπτομερούς σχεδιασμού. Σε σύγκριση με άλλες τεχνικές εκτύπωσης, η εκτύπωση inkjet έχει χαμηλή τιμή (σχεδόν μηδενική) παραγωγή αποβλήτων και χαμηλότερο αρχικό κόστος εκκίνησης (Secor, Prabhmirashi, Puntambekar, Geier, & Hersam, 2013).

Η εκτύπωση Inkjet έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση που γίνεται ταυτόχρονα με το στάδιο της συσκευασίας, και παρέχει ορισμένες πληροφορίες σχετικά με την ημερομηνία κατασκευής και λήξης του προϊόντος (Hrytsenko, Hrytsenko, Shvalagin, Grodziuk, & Kompanets, 2018). Επιπλέον, ένα πολλά υποσχόμενο στοιχείο για τις έξυπνες συσκευασίες είναι οι ετικέτες RFID που μπορούν να δημιουργηθούν επίσης με τη μέθοδο inkjet. Σε σύγκριση με τις ετικέτες RFID μέσω τεχνολογιών ημιαγωγών πυριτίου, οι τυπωμένες RFID ετικέτες αναμένεται να είναι φθηνότερες αν χρησιμοποιηθούν αγώγιμα πολυμερή, μεταλλικά μελάνια, ακόμη και CNT. Επιπλέον, οι μέθοδοι εκτύπωσης θα διευκολύνουν το συνδυασμό ετικετών RFID με λειτουργίες ανίχνευσης χημικών όπως το αιθυλένιο και η ανίχνευση υγρασίας (Potyrailo, Mouquin, & Morris, 2008).

Μια άλλη καινοτόμα προσέγγιση είναι το AJP με ακρίβεια εκτύπωσης περίπου 10 μm. Διαφορετικές λύσεις, συμπεριλαμβανομένων λύσεων CNT υψηλής αναλογίας, καθώς και οργανικά και ανόργανα μελάνια με υψηλό ιξώδες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσω του AJP για την παραγωγή μιας παχιάς στρώσης που κυμαίνεται από δεκάδες νανόμετρα έως μερικά μικρόμετρα. Ένα άλλο πλεονέκτημα της προσέγγισης αυτής έγκειται στη μοναδική του ικανότητα εκτύπωσης μοτίβων σε μη επίπεδες, τρισδιάστατες επιφάνειες. Η εκτύπωση Inkjet είναι μια φθηνότερη προσέγγιση για εκτύπωση σε σύγκριση με αυτήν τη νέα τεχνική, η AJP (ένας εκτυπωτής AJP της βιομηχανίας κοστίζει περίπου 500k USD) (Cao, Andrews, & Franklin, 2017).

Συμπερασματικά, για κατασκευή μεγάλου όγκου, οι τεχνικές R2R είναι ιδανικές, ενώ για ανώτερη ανάλυση εκτύπωσης, άλλες τεχνικές, όπως εκτύπωση inkjet, εκτύπωση οθόνης και AJP, είναι πιο κατάλληλες (Nomikos, Politis, Renieri, Tsigonias, & Kakizis, 2014). Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει μια σύγκριση μεταξύ διαφορετικών κατάλληλων τεχνικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή συστημάτων έξυπνης συσκευασίας.

Πίνακας 4: Σύγκριση μεθόδων εκτύπωσης ετικέτας σε συστήματα έξυπνης συσκευασίας

Μέθοδος εκτύπωσης	Ιξώδες	Πάχος στρώσης (μm)	Μέγεθος χαρακτηριστικών (μm)	Εγγραφή	Ταχύτητα εκτύπωσης (m ² /s)
Γκραβούρα	0,01 - 0,2	<0,1 - 8	75	>20	3-60
Φλεξογραφία	0,05 - 0,5	0,04 - 2,5	80	<200	3-30
Εκτύπωση οθόνης	0,5 - 50	0,015 - 100	20 – 100	>25	2-3
Inkjet	0,001 - 0,004	0,05 - 20	20-50	5-20	0,01-0,5
Aerosoljet	0,0001 - 2,5	0,1 - 5	10-200	5	0,01-0,5

Παρόλο που οι παραπάνω μέθοδοι εκτύπωσης έχουν μια σπουδαία προοπτική για εφαρμογές στις έξυπνες συσκευασίες και οι προηγμένες διεργασίες κατασκευής έχουν ήδη επιτρέψει τη μαζική παραγωγή ορισμένων έντυπων ηλεκτρονικών, υπάρχουν ακόμα ορισμένα βασικά σημεία που πρέπει να τονιστούν και πολλά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά μήκος όλης της εφοδιαστικής αλυσίδας τροφίμων. Όταν χρησιμοποιούνται στη συσκευασία τροφίμων, οι έξυπνες συσκευασίες επικεντρώνονται κυρίως στην ανίχνευση παθογόνων και μολυσματικών ουσιών χρησιμοποιώντας αισθητήρες ή ενδείξεις. Αυτά τα έξυπνα στοιχεία θα πρέπει πρώτα να μπορούν να ενσωματωθούν στη συσκευασία, να παρέχουν σαφή και εύκολα αναγνωρισμένα σχόλια (για παράδειγμα, αλλαγή χρώματος) και να έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής (Kumari, Narsaiah, Grewal, & Anurag, 2015).

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τα έξυπνα στοιχεία πρέπει να είναι εκτυπώσιμα, χαμηλού κόστους, φιλικά προς το χρήστη και προς το περιβάλλον και να προσφέρουν την μέγιστη ακρίβεια. Υπό αυτό το πρίσμα, πολλά νανοϋλικά έχουν εφαρμοστεί εντατικά για την εκτύπωση εφαρμογών έξυπνης συσκευασίας (Hrytsenko et al., 2018). Η πιο βολική στρατηγική συνήθως είναι πρώτα να εκτυπώνονται οι ετικέτες SP και στη συνέχεια να τοποθετούνται αυτές στην επιφάνεια της συσκευασίας. Αυτές οι ετικέτες με αισθητήρες ή άλλους δείκτες είναι λογικό ότι θα αντιδρούν όταν γίνονται αλλαγές που προκαλούνται από

αλλοίωση, απόψυξη και ούτω καθεξής. Κατά τις οι αντιδράσεις, θα αλλάζουν τα οπτικά, μηχανικά ή ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ετικετών αυτών και έτσι ο χρήστης με μια ματιά θα αντιλαμβάνεται την αλλαγή στην ποιότητα του τροφίμου (Fuertes et al., 2016).

Ωστόσο, οι χαμηλές επιδόσεις των έντυπων ηλεκτρονικών μπορούν να παρεμποδίσουν περαιτέρω τις πρακτικές εφαρμογές τους και τα αντίστοιχα ζητήματα που αποτελούν πάγιες απαιτήσεις των χρηστών (Fuertes et al., 2016) :

- ευαισθησία και επιλεκτικότητα
- αύξηση της ευρωστίας των ηλεκτρονικών μερών και ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας
- μείωση των διακυμάνσεων στη διαδικασία παραγωγής βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους εκτύπωσης και τα χαρακτηριστικά του υλικού
- αποτελεσματική ενσωμάτωση έξυπνων ετικετών RFID (Aliakbarian, 2019).

Αυτές οι προκλήσεις σχετικά με τους τυπωμένους αισθητήρες έχουν οδηγήσει σε πολλές έρευνες (Jung et al., 2014). Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το όφελος της χρήσης έξυπνων συσκευασιών δεν έχει εκτιμηθεί ακόμα προς το παρόν από την πλευρά των εμπόρων και η αξία του δεν έχει κεφαλαιοποιηθεί στο βαθμό που αναμένεται να γίνει στο μέλλον, γεγονός που αποτελεί εμπόδιο για τη διείσδυση στην αγορά έξυπνων συσκευών. Οι έμποροι λιανικής ανησυχούν για τη μείωση των πωλήσεών τους που προκαλείται από ειδοποιήσεις και μηνύματα που παρέχονται από το SP που μπορούν να επηρεάσουν την απόφαση του καταναλωτή να αγοράσει τα αγαθά αυτά (Dainelli et al., 2008). Από την άλλη πλευρά, οι καταναλωτές δεν είναι σίγουροι για την ακρίβεια και την ποιότητα των πληροφοριών σχετικά με το προϊόν που παρέχεται από έξυπνες συσκευασίες, δηλαδή την πιστότητα των αποτελεσμάτων τους (VanderRoost et al., 2014).

Επιπλέον, υπάρχει έλλειψη αποτελεσματικών στρατηγικών μάρκετινγκ για τη μεγιστοποίηση του αντίκτυπου των έξυπνων συσκευασιών στην εφοδιαστική αλυσίδα τροφίμων. Απαιτούνται σημαντικές προσπάθειες από την ακαδημαϊκή κοινότητα και την εμπορική βιομηχανία για την ενίσχυση των εφαρμογών έξυπνης συσκευασίας ώστε να αποκτήσουν έναν πιο σταθερό ρόλο στο μέλλον (Aliakbarian, 2019).

3. 3. Προκλήσεις για την καθιέρωση της έξυπνης συσκευασίας

Παρόλο που η επιλογή των μεθόδων εκτύπωσης αποφασίζεται στο αρχικό στάδιο ολόκληρης της αλυσίδας εφοδιασμού, επηρεάζει τα υπόλοιπα στάδια αυτής, συμπεριλαμβανομένης της κατανομής κόστους μεταξύ κατασκευής, παραγωγής, αποθήκευσης, μεταφοράς και την αγορά, την ποιότητα και την ασφάλεια που σχετίζονται με την αξιοπιστία της έξυπνης συσκευασίας (χαρακτηριστικά της μεθόδου κατασκευής) καθώς και με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ καταναλωτή, προϊόντος και κατασκευαστή. Η ανάγκη αντιμετώπισης των προκλήσεων εντός των αλυσίδων εφοδιασμού τροφίμων είναι υψίστης σημασίας, καθώς οι συνέπειες μπορεί συχνά να είναι σοβαρές, καθώς η εσφαλμένη πορεία ή ο ανεπαρκής έλεγχος των προϊόντων συχνά οδηγεί σε σπατάλη, με επακόλουθη οικονομική απώλεια στις επιχειρήσεις της εφοδιαστικής αλυσίδας (Wang & Li, 2012).

Όπως με όλες τις αλυσίδες εφοδιασμού, δεν υπάρχει μια απλή προσέγγιση ενός ενιαίου μεγέθους για όλες τις συσκευασίες. Η οριοθέτηση της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας σε τρεις προοπτικές (επιχειρησιακή, τακτική και στρατηγική) οδηγεί σε έναν τεράστιο αριθμό στρατηγικών για την αντιμετώπιση προκλήσεων στην εφοδιαστικής αλυσίδα εντός αυτών των προοπτικών (vanderVorst et al., 2009). Στο στρατηγικό επίπεδο, οι ολοκληρωμένες διαδικασίες αλυσίδας εφοδιασμού αναφέρονται σε μια σειρά δραστηριοτήτων που ευθυγραμμίζουν τις επιχειρηματικές πρακτικές προς κοινούς στόχους σε εσωτερικούς, προμηθευτές και πελάτες. Εξυπηρετώντας τόσο την επιδίωξη δημιουργίας αξίας πελάτη και τη μείωση της αβεβαιότητας, η ενοποίηση του συστήματος εφοδιασμού θεωρείται εδώ και αρκετές δεκαετίες ως ένα από τα βασικά συστατικά της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας (Stauffer, 2003).

Η ενσωμάτωση της έξυπνης συσκευασίας έχει συνδεθεί με τις αυξήσεις της απόδοσης, συγκεκριμένα, της ποιότητας στην προστασία του περιβάλλοντος. Κατά συνέπεια, το ενδιαφέρον του επιστημονικού κόσμου για έρευνα γύρω από τον εφοδιασμό αλυσίδας τροφίμων είναι προφανές, καθώς η βελτιωμένη ολοκλήρωση των εφαρμογών αυτών διαπερνά τις επιχειρησιακές και τακτικές διαδικασίες λήψης αποφάσεων σε μια αλυσίδα εφοδιασμού (Aliakbarian, 2019).

Από τακτική και λειτουργική σκοπιά, οι προκλήσεις γύρω από την εφοδιαστική αλυσίδα τροφίμων αντιμετωπίζονται συχνά μέσω μηχανισμών που εμπλέκονται στη διαδικασία διανομής. Τεχνολογικά στοιχεία όπως οι μηχανισμοί ελέγχου θερμοκρασίας, μπορούν να

εφαρμοστούν για την πρόληψη τόσο της ταχείας αποικοδόμησης όσο και της βακτηριακής μόλυνσης των τροφίμων (vanderVorst et al., 2009). Συχνά, ο έλεγχος της θερμοκρασίας εκδηλώνεται σε τρεις τύπους αλυσίδων τροφοδοσίας: κατεψυγμένα προϊόντα, τρόφιμα που διατηρούνται σε απλή ψύξη και τρόφιμα που διατηρούνται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (Akkerman et al., 2010).

Μια άλλη αναδύομενη τεχνολογική στρατηγική είναι η έξυπνη συσκευασία που στοχεύει στην κοινοποίηση ακριβών πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση ενός προϊόντος και την ακεραιότητα των συσκευασιών σε όλο το μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού (Vanderroost et al., 2014). Πράγματι, οι βελτιωμένες τεχνικές συσκευασίας μπορούν επίσης να βοηθήσουν στην αύξηση της διάρκειας ζωής για συγκεκριμένα προϊόντα διατροφής (vanderVorst et al., 2009). Οι Vanderroost et al. (2014) παρέχουν μια ενδιαφέρουσα επισκόπηση των αναδύομενων τεχνολογικών τάσεων που σχετίζονται με την έξυπνη συσκευασία τροφίμων, ιδίως όσον αφορά στους αισθητήρες, τα συστήματα οσμών και τους δείκτες RFID ως σημαντικές καινοτομίες στα συστήματα συσκευασίας στον εφοδιασμό.

Μια άλλη σημαντική λειτουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος εφοδιαστικής αλυσίδας τροφίμων είναι η ενίσχυση της ιχνηλασιμότητας των προϊόντων στις καθημερινές λειτουργίες. Σε γενικές γραμμές, η ιχνηλασιμότητα σημαίνει την ικανότητα παροχής ακριβών πληροφοριών σχετικά με τη γεωγραφική τοποθεσία του προϊόντος ανά πάσα στιγμή και σε κάθε σημείο εντός της αλυσίδας εφοδιασμού (Kelepouris, Pramataris, & Doukidis, 2007). Συχνά, η ιχνηλασιμότητα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε ιχνηλασιμότητα προς τα πίσω (ή ανίχνευση) και ιχνηλασιμότητα προς τα εμπρός (ή παρακολούθηση), ανάλογα με την προβλεπόμενη πορεία του προϊόντος (Bosona & Gebresenbet, 2013).

Το κρισιμότερο ζήτημα σε κάθε αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων και η μεγαλύτερη πρόκληση αυτών είναι η κατάσταση του προϊόντος, η οποία έχει πολλές επιπτώσεις στις στρατηγικές διαχείρισης των εφοδιαστικών αλυσίδων. Η ενοποίηση των διαδικασιών θεωρείται συχνά ως μια ιδανική στρατηγική στην οποία δίνεται μεγάλη προσοχή από τους ιθύνοντες, και αυτό μπορεί να εκδηλωθεί εντός τακτικών και επιχειρησιακών επιπέδων με μάλλον συγκεκριμένους τρόπους. Οι αναδύομενες τεχνολογίες διαδραματίζουν έναν αυξανόμενο σημαντικό ρόλο σε αυτά τα επίπεδα, καθώς είναι συχνά το λειτουργικό συστατικό για την ενίσχυση της ιχνηλασιμότητας των προϊόντων μέσα σε μια ενιαία αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων. Απαιτούνται περισσότερες συνεργατικές επιστημονικές και βιομηχανικές

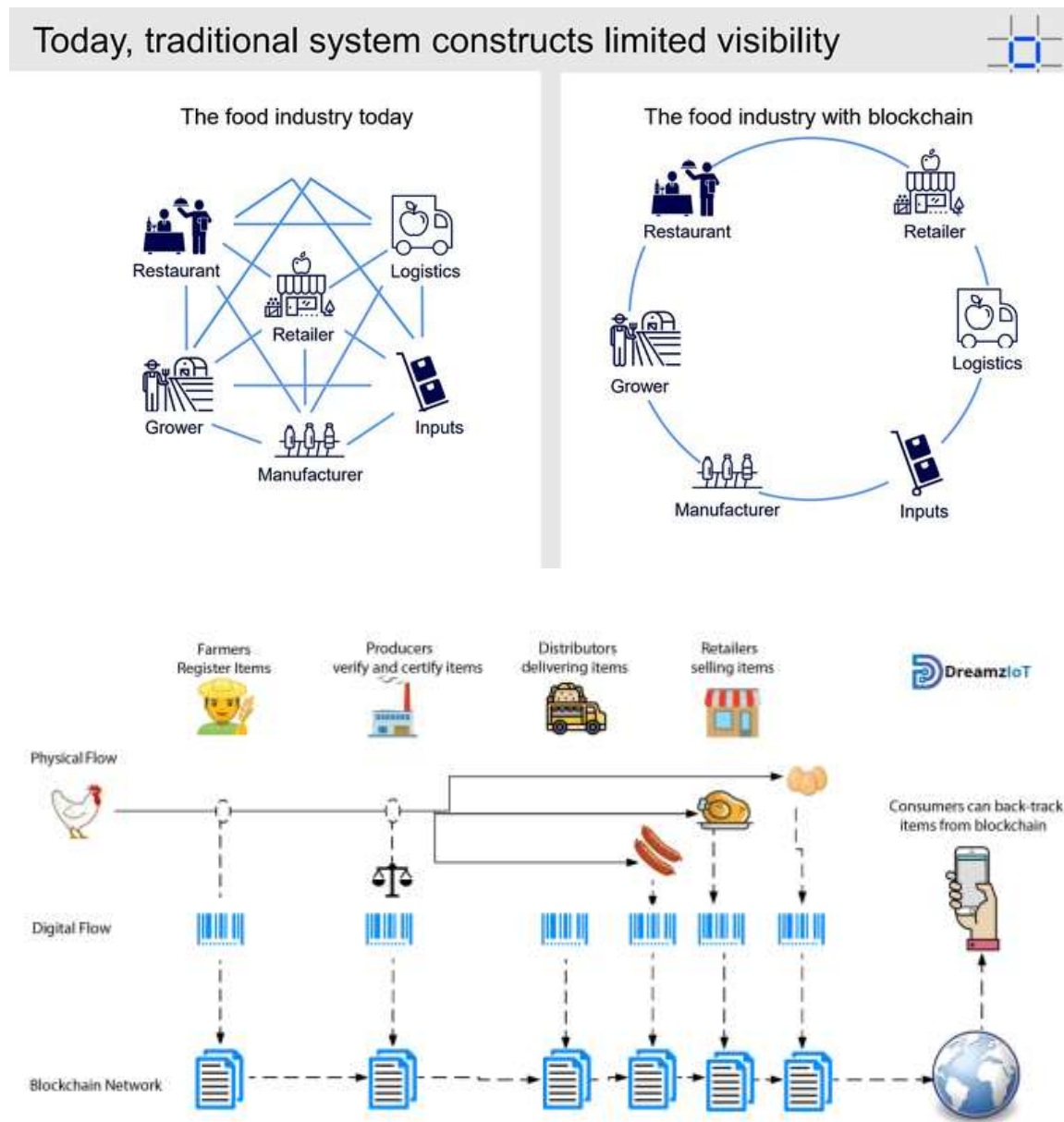
προσπάθειες για την πλήρη αποσαφήνιση όλων των τακτικών και λειτουργικών επιπέδων των στοιχείων της αλυσίδας εφοδιασμού που μπορούν να επηρεαστούν από την ενσωμάτωση αναδυόμενων τεχνολογιών, όπως οι λύσεις έξυπνης συσκευασίας (Aliakbarian, 2019).

3.4. Αξιοποίηση νέων τεχνολογιών στην εφοδιαστική αλυσίδα των τροφίμων

Τη σημασία της αξιοποίησης των νέων τεχνολογικών εργαλείων στην αύξηση των εσόδων και τον εξορθολογισμό του κόστους φαίνεται ότι έχει αντιληφθεί ο κλάδος των τροφίμων. Σύμφωνα με πρόσφατα στοιχεία, το 20% των δέκα κορυφαίων - βάσει εσόδων - αλυσίδων ειδών παντοπωλείου, παγκοσμίως, θα χρησιμοποιεί, μέχρι το 2025 σύγχρονες τεχνολογίες στον τομέα της ασφάλειας και της ιχνηλασιμότητας των προϊόντων, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ποιότητα και η φρεσκάδα των αγαθών που φτάνουν στο τραπέζι του τελικού καταναλωτή. Η δημοφιλέστερη ίσως από τις καινοφανείς αυτές τεχνικές υψηλής τεχνολογίας, που εδώ και χρόνια εφαρμόζονται ευρέως σε άλλους κλάδους, είναι το Blockchain. Επιχειρώντας να ορίσει κανείς το blockchain ως προς την λειτουργία και τη χρήση του, πρόκειται για «μια τεχνολογία που στηρίζεται σε μια ψηφιακά κατανεμημένη, αποκεντρωμένη και κοινόχρηστη βάση δεδομένων η οποία καθιστά δυνατή την αναγνώριση, την παρακολούθηση και τον εντοπισμό κάθε συναλλαγής στο δίκτυο blockchain» (Markets and Markets 2018). Οι συναλλαγές αυτές καταγράφονται και αποθηκεύονται με τη μορφή μπλοκ τα οποία στη συνέχεια προστίθενται στην αλυσίδα ονόματι blockchain σε γραμμική και χρονολογική σειρά. Έτσι δημιουργείται μια πλούσια Βάση Δεδομένων, στην οποία είναι εφικτή η ανταλλαγή πληροφοριών και δεδομένων μεταξύ όλων των εμπλεκομένων στην αλυσίδα, ενώ παράλληλα καθίσταται η διαδικασία διαφανής και αμετάβλητη για όλους τους συμμετέχοντες.

Στην πράξη το Blockchain μπορεί να βοηθήσει τις επιχειρήσεις συμβάλλοντας τον εντοπισμό των προϊόντων που περιλαμβάνονται σε μια παρτίδα ανάκλησης καθώς και στην ενίσχυση της διαφάνειας των προμηθειών στην εφοδιαστική αλυσίδα. Παράλληλα, ο έλεγχος της ποιότητας, της φρεσκάδας και της θερμοκρασίας των προϊόντων κατά τη μεταφορά τους, είναι καταλυτικής σημασίας για μια επιχείρηση τροφίμων.

Τα τελευταία χρόνια, ορισμένες μελέτες έχουν συνδέσει την τεχνολογία blockchain με την αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων. Για παράδειγμα, ο Tian συζήτησε το πιθανό όφελος της τεχνολογίας blockchain στην αλυσίδα εφοδιασμού γεωργικών τροφίμων. Στη συνέχεια, ο Tian πρότεινε ένα σύστημα ιχνηλασιμότητας βασισμένο σε blockchain για τη βελτίωση της διαφάνειας της αλυσίδας εφοδιασμού τροφίμων και την ενίσχυση της ασφάλειας των τροφίμων.



Σχήμα 16: Ενδεικτικό σχήμα εφαρμογής του blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα τροφίμων

Οι Nestle, IBM και Walmart διεξήγαγαν επίσης μια μελέτη του blockchain προκειμένου να διαχειριστούν τις αλυσίδες εφοδιασμού με αυξημένη απόδοση και να ανιχνεύσουν και να μετριάσουν τα προβλήματα ασφάλειας των τροφίμων. Τον Οκτώβριο του 2016, η Walmart άνοιξε τη συνεργασία για την Ασφάλεια των Τροφίμων Walmart στο Πεκίνο καθώς υπέγραψε συμφωνία συνεργασίας με την IBM και το Πανεπιστήμιο Tsinghua. Ωστόσο, εξακολουθεί να υπάρχει κενό στις έρευνες αυτές, καθώς τείνουν να επικεντρώνονται σε μελέτες για τη διερεύνηση της ιχνηλασιμότητας των τροφίμων αντί να ενισχύουν την εποπτεία των εμπορών (Ghaani et al., 2016). Οι κυριότεροι τομείς όπου θα μπορούσε να εφαρμοσθεί αποτελεσματικά η τεχνολογία της ολοκληρωμένης ανταλλαγής πληροφοριών μέσω του blockchain είναι στην ιχνηλασιμότητα, τη διασφάλιση της ασφάλειας των προϊόντων και της έγκαιρης αποτροπής πώλησης προβληματικών παρτίδων, την αντιμετώπιση της νοθείας, στην κατάλληλη διαχείριση των αποθεμάτων και την ορθολογική προώθηση των παραγγελιών, στην άμεση ανταλλαγή δεδομένων/πληροφοριών κλπ. Όσον αφορά στην ιχνηλασιμότητα, (traceability) επιτρέπει στις εταιρείες να εντοπίζουν γρήγορα τα μη ασφαλή προϊόντα στην πηγή τους και να αναζητήσουν άμεσα άλλους προορισμούς διανομής. Αυτό μπορεί να αποτρέψει ασθένειες και να σώσει ζωές, καθώς και να μειώσει το κόστος της ανάκλησης προϊόντων. Οι πληροφορίες που συλλέγονται και οι εμπλεκόμενες ομάδες ενδιαφερομένων ποικίλλουν ανάλογα με τις ανάγκες των ομάδων πίσω από κάθε πρωτοβουλία.

Για παράδειγμα, η πρωτοβουλία IBM Food Trust ξεκίνησε με τη συνεργασία τους με το Walmart China και το Πανεπιστήμιο Tsinghua και έχει εξελιχθεί σε μια παγκόσμια κοινοπραξία που περιλαμβάνει μεγάλες εταιρείες όπως Dole, Driscoll's, Kroger, Nestle, Tyson και Unilever. Ο Frank Yiannas της Walmart δήλωσε ότι η βελτιωμένη ιχνηλασιμότητα των δεδομένων που παρέχεται από την πλατφόρμα IBM μείωσε το χρόνο που χρειάστηκε για να εντοπίσει ένα μάνγκο από το κατάστημα πίσω στην πηγή του από επτά ημέρες σε 2,2 δευτερόλεπτα. Αυτή η μείωση του χρόνου επιτρέπει στις εταιρείες να εντοπίζουν προβληματικές αλυσίδες εφοδιασμού και να ανακαλούν τα αλλοιωμένα προϊόντα προτού καταναλωθούν και προκαλέσουν ασθένεια.

Από την άλλη, μια άλλη τεχνολογική καινοτομία που εφαρμόζεται σε πλήθος άλλων κλάδων, το Internet of Things (IoT) ορίζεται ως το δίκτυο συσκευών που συλλέγουν και μεταφέρουν δεδομένα μέσω του Διαδικτύου. Αργά, αλλά με συστηματικά και επιταχυνόμενα βήματα, η

βιομηχανία τροφίμων εξοικειώνεται με το Διαδίκτυο των πραγμάτων. Με τον αριθμό των αξιοσημείωτων εφαρμογών του IoT, οι προμηθευτές τροφίμων, οι μεταποιητές και οι λιανοπωλητές βιώνουν καλές ευκαιρίες για επιχειρησιακή καθώς και οικονομική ενίσχυση στις επιχειρήσεις τροφίμων τους. Για παράδειγμα, το IoT διευκολύνει τις εταιρείες τροφίμων να διασφαλίζουν ανώτερα επίπεδα ιχνηλασιμότητας και ασφάλειας των τροφίμων και, συνεπώς να γίνεται καλύτερος έλεγχος και ορθολογικότερη η διαχείριση της αλυσίδας προμηθειών. Επιπλέον, το δίκτυο IoT στην αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων βοηθά σημαντικά στη μείωση των απορριπτόμενων προϊόντων, του κόστους και των κινδύνων, επίσης, σε όλα τα στάδια της διαδικασίας. Στις βασικές εφαρμογές του IoT που περιλαμβάνονται στα τρόφιμα, καίρια θέση κατέχει η ασφάλεια των τροφίμων. Στα πλαίσια του IoT, χρησιμοποιούνται διάφορα είδη αισθητήρων(sensors) για την παρακολούθηση της κατάστασης του τροφίμου, του χρόνου διανομής και κυρίως της θερμοκρασίας. Η χρήση αισθητήρων παρακολούθησης θερμοκρασίας σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει σε όλους τους εμπλεκόμενους φορείς να παρακολουθούν στενά τα σημεία δεδομένων ασφάλειας τροφίμων, εξασφαλίζοντας αποτελεσματική διαχείριση της ψυχρής αλυσίδας. Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα είναι ότι με το IoT, η αλυσίδα εφοδιασμού θα μπορεί να λειτουργεί ως σύνολο, ενσωματώνοντας όλα τα εμπλεκόμενα μέρη, για να υπακούει και να εναρμονίζεται με τους παγκόσμιους και τοπικούς κανονισμούς. Οι λίστες ελέγχου αυτοματοποιημένης ανάλυσης κινδύνων και κρίσιμων σημείων ελέγχου (HACCP) χρησιμοποιούνται σε όλες τις διαδικασίες κατασκευής, παραγωγής και μεταφοράς, έτσι ώστε οι εταιρείες να μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ουσιαστικά και αξιόπιστα δεδομένα που τους επιτρέπουν να εφαρμόζουν ορισμένες λύσεις για την ασφάλεια των τροφίμων.

Συμπερασματικά, οι αναδυόμενες τεχνολογίες σε σχέση με «έξυπνα» συστήματα αναμένεται να κυριαρχήσουν τα επόμενα χρόνια στον τομέα της εφοδιαστικής αλυσίδας των τροφίμων. Η μεθοδολογία blockchain, Internet of Things, κλπ εντάσσονται στη φιλοσοφία ολοκληρωμένης διαχείρισης του BigData, που βασίστηκε στην όλο και αυξανόμενη παραγωγή δεδομένων και στις πολύπλοκες διαδικασίες διανομής των τροφίμων, αλλά και στις αυστηρότερες απαιτήσεις των καταναλωτών για ασφαλή και ποιοτικά τρόφιμα. Επομένως, εφόσον η φιλοσοφία αυτή φαίνεται να κυριαρχεί στις μεγάλες αγορές τα προσεχή χρόνια, είναι φανερό και η προστιθέμενη αξία αισθητήρων, προηγμένων συσκευών καταγραφής δεδομένων αλλά και «έξυπνων» συστημάτων αποτύπωσης της ποιότητας των τροφίμων.

Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα – Επίλογος

Η χρήση και η εφαρμογή της έξυπνης συσκευασίας είναι ένα πεδίο το οποίο έχει πολύ μεγάλες προοπτικές ανάπτυξης. Οι τεχνολογίες που έχουν μέχρι τώρα αναπτυχθεί είναι πολυάριθμες, ενώ ακόμα και μέσα στην κάθε κατηγορία, οι ερευνητές επιδίδονται σε συνεχείς μελέτες ώστε να βρουν τρόπους για να γίνεται η παρακολούθηση της ποιότητας των τροφίμων με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια και ταυτόχρονα με την ευκολία στην απεικόνιση της αντίστοιχης πληροφορίας. Όπως είδαμε, οι περισσότερες από τις τεχνολογίες έχουν περάσει στη μαζική εφαρμογή και εντοπίζονται σε ολοένα και περισσότερα προϊόντα που βρίσκονται στο ράφι των σούπερ μάρκετ, ενώ υπάρχουν πολλά «αισιόδοξα μηνύματα» από εφαρμογές που μέχρι τώρα βρίσκονται σε πειραματικό μόνο επίπεδο.

Σε μια περίοδο που οι καταναλωτές αναζητούν περισσότερο από ποτέ την ποιότητα στα συστατικά των τροφίμων τους και οι έλεγχοι σε επίπεδο διασφάλισης ποιότητας (π. χ. ISO) είναι συνεχείς και αυστηροί, οι δείκτες που τοποθετούνται στις έξυπνες συσκευασίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην εφοδιαστική αλυσίδα και το αδιαπραγμάτευτο αποτέλεσμα που απεικονίζουν λαμβάνεται πολύ σοβαρά υπ' όψιν από όλες τις εμπλεκόμενες πλευρές.

Από τις τεχνολογίες έξυπνης συσκευασίας που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, δε θα λέγαμε ότι υπάρχει κάποια η οποία πρόκειται να εγκαταλειφθεί. Η πρόοδος της τεχνολογίας θα καταστήσει τεχνικές που την αξιοποιούν περισσότερο, όπως η μέθοδος που βασίζεται στα barcodes (και πλέον QRcodes) ή η RFIDετικέτα, όλο και πιο ακριβείς, αλλά ωστόσο η απλότητα στη χρήση των χημικών ΤΤΙθα αποτελεί το μεγαλύτερο πλεονέκτημα για αυτή τη μεγάλη «οικογένεια» δεικτών, κάτι που ευνοεί ήδη την ανάπτυξη μελετών οι οποίες αξιοποιούν διαφορετικά στοιχεία και δεδομένα από τον κόσμο της χημείας, για την παραγωγή των δεικτών.

Αξιοσημείωτο δε, είναι και το γεγονός ότι με τη χρήση των δεικτών και των διάφορων τύπων έξυπνων συσκευών, μπορεί να μειωθεί η καταστροφική απώλεια τροφίμων και η συσσώρευση

αποβλήτων, με διαδικασίες σχετικά οικονομικές που ως επί το πλείστον φέρουν πλεονεκτήματα.

Συνοψίζοντας τις σκέψεις μου, οι αναδυόμενες τεχνολογίες σε σχέση με «έξυπνα» συστήματα αναμφισβήτητα μπορούν να κυριαρχήσουν τα επόμενα χρόνια αφού είναι πολλά υποσχόμενες και υπάρχει από σχεδόν όλες τις πλευρές ζήτηση για βελτίωση στον τομέα των τροφίμων.

Βιβλιογραφία

- AhnDJ, ChaeE-H, LeeG et al. Colorimetric reversibility of polydiacetylene supramolecules having enhanced hydrogenbonding under thermal and pH stimuli. *Journal of the American Chemical Society* 2003; 125(30): 8976–8977.
- Akkerman, R., Farahani, P., & Grunow, M. (2010). Quality, safety and sustainability in food distribution: A review of quantitative operations management approaches and challenges. *Or Spectrum*, 32, 863–904
- Aliakbarian, B., Casale, M., Paini, M., Casazza, A. A., Lanteri, S., & Perego, P. (2015). Production of a novel fermented milk for tied with natural antioxidants and its analysis by NIR spectroscopy. *LWT-Food Science and Technology*, 62(1), 376–383.
- Cao, C., Andrews, J. B., & Franklin, A. D. (2017). Completely printed, flexible, stable, and hysteresis-free carbon nanotube thin-film transistors via aerosol jet printing. *Advanced Electronic Materials*, 3(5), 1700057.
- Chu, Y., Qian, C., Chahal, P., & Cao, C. (2018). Printed Diodes: Materials processing, fabrication and applications. *Advanced Science*, 6(6). <https://doi.org/10.1002/advs.201801653>
- Dainelli, D., Gontard, N., Spyropoulos, D., Zondervan-van den Beuken, E., & Tobback, P. (2008). Active and intelligent food packaging: Legal aspects and safety concerns. *Trends in Food Science & Technology*, 19, S103–S112.
- Fuertes, G., Soto, I., Carrasco, R., Vargas, M., Sabattin, J., & Lagos, C. (2016). Intelligent packaging systems: sensors and nanosensors to monitor food quality and safety. *Journal of Sensors*, 2016, 1–8.
- Gao, T., Tian, Y., Zhu, Z., & Sun, D. W. (2020). Modelling, responses and applications of time-temperature indicators (TTIs) in monitoring fresh food quality. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 311-322.
- Ghaani, M., Cozzolino, C. A., Castelli, G., & Farris, S. (2016). An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 1-11.
- Giannakourou, M. C., & Taoukis, P. S. (2003). Application of a TTI- based distribution management system for quality optimization of frozen vegetables at the consumer end. *Journal of foodscience*, 68(1), 201-209.

Giannoglou, M., Touli, A., Platakou, E., Tsironi, T., & Taoukis, P. S. (2014). Predictive modeling and selection of TTI smart labels for monitoring the quality and shelf-life of frozen seafood. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 26, 294-301.

Gogou E, Katapodis P, Christakopoulos P, Taoukis PS. Effect of water activity on the thermal stability of *Thermomyceslanuginosus* xylanases for process time–temperature integration. *Journal of Food Engineering* 2010; 100(4): 649–655

Gou ML, Guo G, Zhang J et al. Time–temperature chromatic sensor based on polydiacetylene (PDA) vesicle and amphiphilic copolymer. *Sensors and Actuators B: Chemical* 2010; 150(1): 406–411

Grau, G., Cen, J., Kang, H., Kitsomboonloha, R., Scheideler, W. J., & Subramanian, V. (2016). Gravure-printed electronics: Recent progress in tooling development, understanding of printing physics, and realization of printed devices. *Flexible and Printed Electronics*, 1(2), 023002

Han, J. W., Ruiz-Garcia, L., Qian, J. P., & Yang, X. T. (2018). Food packaging: A comprehensive review and future trends. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(4), 860– 877

Fang, Z., Zhao, Y., Warner, R. D., & Johnson, S. K. (2017). Active and intelligent packaging in meat industry. *Trends Food Scientific Technology*, 61, 60–71.

Heller, M. C., Selke, S. E. M., & Keoleian, G. A. (2018). Mapping the influence of food waste in food packaging environmental performance assessments. *Journal of Industrial Ecology*, 00(0), 1–16.

Hogan, S. A., & Kerry, J. P. (2008). Smart packaging of meat and poultry products. *Smart packaging technologies for fast moving consumer goods*, 33-54.

Janjarasskul, T., & Suppakul, P. (2018). Active and intelligent packaging: The indication of quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(5), 808–831.

Kelepourist, T., Pramataris, K., & Doukidis, G. (2007). RFID-enabled traceability in the food supply chain. *Industrial Management & Data Systems*, 107, 183–200.

Kerry, J. P., O’grady, M. N., & Hogan, S. A. (2006). Past, current and potential utilization of active and intelligent packaging systems for meat and muscle-based products: A review. *Meat science*, 74, 113–130.

Muller, P., & Schmid, M. (2019). Intelligent packaging in the food sector: A brief overview. *Foods*, 8, 16.

- Kerry, J., & Butler, P. (Eds.). (2008). *Smart packaging technologies for fast moving consumer goods*. John Wiley & Sons.
- Kim, E., Choi, D. Y., Kim, H. C., Kim, K., & Lee, S. J. (2013). Calibrations between the variables of microbial TTI response and ground pork qualities. *Meat Science*, 95(2), 362-367.
- Kim, K., Kim, E., & Lee, S. J. (2012). New enzymatic time–temperature integrator (TTI) that uses laccase. *Journal of Food Engineering*, 113(1), 118-123.
- Kim, Y., Jung, B., Lee, H., Kim, H., Lee, K., & Park, H. (2009). Capacitive humidity sensor design based on anodic aluminum oxide. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 141(2), 441–446
- Bibi, F., Guillaume, C., Gontard, N., & Sorli, B. (2017). A review: Rfid technology having sensing aptitudes for food industry and their contribution to tracking and monitoring of food products. *Trends in Food Science & Technology*, 62, 91–103.
- Kulchan, R., Boonsupthip, W., Jinkarn, T., & Suppakul, P. (2016). Developing a novel colorimetric indicator for monitoring rancidity reaction and estimating the accelerated shelf life of oxygen-sensitive dairy products. *International Food Research Journal*, 23, 1092–1099.
- Kumar, P., Reinitz, H. W., Simunovic, J., Sandeep, K. P., & Franzon, P. D. (2009). Overview of RFID technology and its applications in the food industry. *Journal of Food Science*, 74, R101–R106
- Kuswandi, B., Wicaksono, Y., Abdullah, A., Heng, L. Y., & Ahmad, M. (2011). Smart packaging: sensors for monitoring of food quality and safety. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 5(3-4), 137-146.
- Madichie, N.O.; Yamoah, F.A. Revisiting the European Horsemeat Scandal: The Role of Power Asymmetry in the Food Supply Chain Crisis. *Thunderbird Int. Bus. Rev.* 2017, 59, 663–675.
- Majid, I., Nayik, G. A., Dar, S. M., & Nanda, V. (2018). Novel food packaging technologies: Innovations and future prospective. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17, 454– 462.
- Mataragas, M., Bikouli, V. C., Korre, M., Sterioti, A., & Skandamis, P. N. (2019). Development of a microbial time temperature indicator for monitoring the shelf life of meat. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 89–99
- McFarlane, D., & Sheffi, Y. (2003). The impact of automatic identification on supply chain operations. *International Journal of Logistics Management*, 14, 1–17

- Mustafa, F., & Andreescu, S. (2018). Chemical and biological sensors for food-quality monitoring and smart packaging. *Foods*, 7(10), 168.
- Nomikos, S., Politis, A., Renieri, D., Tsigonias, M. K., & Kakizis, N. K. (2014). Printed technologies for intelligent packaging applications and their impact on printed electronics market. *China Instrumentation Journal*, 1(1), 1–4
- Pardo, D. A., Jabbour, G. E., & Peyghambarian, N. (2000). Application of screen printing in the fabrication of organic light-emitting devices. *Advanced Materials*, 12(17), 1249–1252
- Park, Y. W., Kim, S. M., Lee, J. Y., & Jang, W. (2015). Application of biosensors in smart packaging. *Molecular & Cellular Toxicology*, 11(3), 277–285.
- Potyrailo, R. A., Mouquin, H., & Morris, W. G. (2008). Position-independent chemical quantitation with passive 13.56-MHz radio frequency identification (RFID) sensors. *Talanta*, 75(3), 624–628.
- Poyatos-Racionero, E., Ros-Lis, J. V., Vivancos, J. L., & Martínez-Mañez, R. (2018). Recent advances on intelligent packaging as tools to reduce food waste. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3398–3409.
- Rokugawa, H., & Fujikawa, H. (2015). Evaluation of a new Maillard reaction type timetemperature integrator at various temperatures. *Food Control*, 57, 355–361.
- Secor, E. B., Prabhumirashi, P. L., Puntambekar, K., Geier, M. L., & Hersam, M. C. (2013). Inkjet printing of high conductivity, flexible graphene patterns. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 4(8), 1347–1351.
- Semple, J., Georgiadou, D. G., Wyatt-Moon, G., Gelinck, G., & Anthopoulos, T. D. (2017). Flexible diodes for radio frequency (RF) electronics: A materials perspective. *Semiconductor Science and Technology*, 32(12), 1–45.
- Singh, M., Haverinen, H. M., Dhagat, P., & Jabbour, G. E. (2010). Inkjet printing—Process and its applications. *Advanced Materials*, 22(6), 673–685.
- Sohail, M., Sun, D.-W., & Zhu, Z. (2018). Recent developments in intelligent packaging for enhancing food quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58, 2650–2662.
- Taoukis, P., & Tsironi, T. (2016). Smart packaging for monitoring and managing food and beverage shelf life. In *The stability and shelf life of food* (pp. 141–168). Woodhead Publishing.

ThinFilm. (2013). Thinfilm Builds First Stand-Alone Sensor System in Printed Electronics. Retrieved from <http://www.thinfilm.no/news/stand-alone-system/>.

Tsironi T, Gogou E, Velliou E et al. Application and validation of the TTI based chill chain management system SMAS (Safety Monitoring and Assurance System) on shelf life optimization of vacuum packed chilled tuna. *International Journal of Food Microbiology* 2008; 128(1): 108–115.

Tsironi, T., Ronnow, P., Giannoglou, M., & Taoukis, P. (2017). Developing suitable smart TTI labels to match specific monitoring requirements: The case of *Vibrio* spp. growth during transportation of oysters. *Food Control*, 73, 51-56.

van der Vorst, J. G. A. J., Tromp, S. O., & Zee, D. J. V. D. (2009). Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics. *International Journal of Production Research*, 47, 6611–6631

Vanderroost, M., Ragaert, P., Devlieghere, F., & De Meulenaer, B. (2014). Intelligent food packaging: The next generation. *Trends in Food Science & Technology*, 39(1), 47–62

Prasad, P., & Kochhar, A. (2014). Active packaging in food industry: A review. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8, 1–7

Wyser, Y., Adams, M., Avella, M., Carlander, D., Garcia, L., Pieper, G., . . . Weiss, J. (2016). Outlook and challenges of nanotechnologies for food packaging. *Packaging Technology and Science*, 29(12), 615–648.

Xerox. (2015). Xerox launches printed memory products to combat counterfeiting.