

## ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΦΗ ΠΑΛΜΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΤΟΜΑΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΤΗΣ

**Β. Ανδρέου, Γ. Δημόπουλος, Μ. Ψαριανός, Ε. Δερμεσονλουογλου, Π. Ταούκης**

Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

[taoukis@chemeng.ntua.gr](mailto:taoukis@chemeng.ntua.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η βιομηχανία τομάτας αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις στην παραγωγή προϊόντων της, κυρίως όσον αφορά την απόδοση, τις απώλειες προϊόντων και τις υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια. Τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία (ΠΗΠ) αυξάνουν τη διαπερατότητα των φυτικών κυττάρων μέσω ηλεκτροδιάτρησης και μπορούν να εφαρμοστούν για τη βελτίωση και ενίσχυση της αποφλοίωσης ολόκληρης τομάτας, για την αύξηση των αποδόσεων σε χυμό τομάτας καθώς και την αξιοποίηση των αποβλήτων τομάτας, βελτιώνοντας την εκχύλιση υψηλής προστιθέμενης αξίας ενδοκυτταρικών συστατικών. Τα ΠΗΠ εφαρμόστηκαν σε τρία στάδια της βιομηχανικής επεξεργασίας τομάτας. Στο πρώτο στάδιο, τα ΠΗΠ (0.5-1.5 kV/cm, 0-8000ρ.) εφαρμόστηκαν σε ολόκληρες τομάτες και εκτιμήθηκε ότι η ενεργειακή απαίτηση αποκόλλησης της φλούδας από την υπόλοιπη σάρκα μειώθηκε έως και 72,3% σε σχέση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Στο δεύτερο στάδιο, τα ΠΗΠ (0.5-2.5 kV / cm, 0-4000ρ.) εφαρμόστηκαν σε μικροτεμαχισμένες τομάτες, οδηγώντας σε αύξηση της απόδοσης σε χυμό τομάτας έως και 20,5%. Τα ΠΗΠ επιπλέον εφαρμόστηκαν στα υπολείμματα τομάτας της πρώτης χυμοποίησης που περιλαμβάνουν σπόρους, φλούδες και υπολειπόμενα κλάσματα σάρκας τομάτας για περαιτέρω αύξηση της απόδοσης σε χυμό φτάνοντας έως και 90.2% συνολική απόδοση μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ. Στο τρίτο στάδιο, μελετήθηκαν η επίδραση των ΠΗΠ στην εκχύλιση ενώσεων υψηλής προστιθέμενης αξίας από τα παραπροϊόντα τομάτας. Η απόδοση της εκχύλισης σε καροτενοειδή αυξήθηκε έως και 56,4% σε σχέση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Η εκχύλιση του λυκοπενίου αυξήθηκε από 9,84 mg λυκοπενίου/100 g σε 14,31 mg/100g ύστερα από επεξεργασία με ΠΗΠ στο 1.0 kV/cm ένταση ηλεκτρικού πεδίου και για χρόνο επεξεργασίας 7,5 ms. Η συγκέντρωση των εκχυλισμένων ολικών φαινολικών ενώσεων διπλασιάστηκε (56,16 mg γαλικού οξέος/kg) στα 2 kV/cm ένταση ηλεκτρικού πεδίου και 700 παλμούς. Συνολικά, η προεπεξεργασία των ΠΗΠ εφαρμοζόμενη σε στοχευμένα στάδια της βιομηχανικής επεξεργασίας τομάτας μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγικότητας και πιο αποτελεσματική αξιοποίηση των παραπροϊόντων τομάτας με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιομηχανία τομάτας είναι ένας από τους πιο παραγωγικούς κλάδους στην βιομηχανία τροφίμων στην Ελλάδα και καταλαμβάνει την τέταρτη θέση παγκοσμίως. Ο κλάδος αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις στην παραγωγή προϊόντων, όσον αφορά την απόδοση, την παραγωγή, τις απώλειες και την υποβάθμιση της ποιότητας των τελικών προϊόντων. Στην περίπτωση των ολόκληρων τοματών, η αποφλοίωση περιλαμβάνει τη χρήση υδροξειδίου του νατρίου σε υψηλή συγκέντρωση και θερμοκρασία δημιουργώντας απόβλητα με υψηλό pH, προκαλώντας περιβαλλοντική επιβάρυνση. Η βιομηχανία τομάτας χρησιμοποίησε την αποφλοίωση υπό πίεση ως εναλλακτική μέθοδο απομάκρυνσης του περικαρπίου της τομάτας, αλλά αυτή η μέθοδος είναι υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων, καθώς επίσης χάνονται και μεγάλες ποσότητες σάρκας τομάτας. Κατά τη διάρκεια της παραγωγής χυμού τομάτας, οι ολόκληρες τομάτες χυμοποιούνται σε ειδική διάταξη (ραφινέζα). Τυπικές αποδόσεις της διεργασίας είναι 70-80%, ανάλογα με την ποικιλία και την ωριμότητα των τοματών. Τα υπολείμματα από το πρώτο στάδιο χυμοποίησης (τα οποία περιέχουν σπόρους, φλούδες και ένα μικρό ποσοστό μη επεξεργασμένης σάρκας τομάτας) επαναχυμοποιούνται, οπότε η απόδοση σε χυμό τομάτας μπορεί να φθάσει το 93%. Ωστόσο, η επαναχυμοποίηση υποβαθμίζει την ποιότητα των τελικών χυμών τομάτας αυξάνοντας το ιξώδες του τελικού χυμού, εμποδίζοντας την περαιτέρω επεξεργασία. Σε όλα τα στάδια της επεξεργασίας της τομάτας παράγεται μια σημαντική ποσότητα παραπροϊόντων. Αυτά είναι πλούσια σε ενώσεις υψηλής προστιθέμενης αξίας όπως τα καροτενοειδή

και τα φλαβονοειδή, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις διατροφικές τους ιδιότητες και την αντιοξειδωτική τους ικανότητα. Τα παραπροϊόντα τομάτας χρησιμοποιούνται κυρίως για ζωοτροφές ή λιπάσματα. Ωστόσο, θεωρούνται μία από τις καλύτερες πηγές λυκοπενίου [2]. Η εκχύλιση του λυκοπενίου από τα παραπροϊόντα τομάτας γίνεται συνήθως με τη χρήση οργανικών διαλυτών. Από βιομηχανική άποψη, η μέθοδος εκχύλισης με διαλύτη δεν χρησιμοποιείται, λόγω των χαμηλών αποδόσεων εκχύλισης, της πολύ χρονοβόρας διαδικασίας και της μεγάλης κατανάλωσης οργανικών διαλυτών.

Τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία (ΠΗΠ) είναι μια μη θερμική τεχνολογία επεξεργασίας τροφίμων με ευρεία περιοχή εφαρμογών. Η διαδικασία βασίζεται στην εφαρμογή μικρής διάρκειας παλμών υψηλής έντασης ηλεκτρικού πεδίου που προκαλούν ηλεκτροδιάτρηση στις κυτταρικές μεμβράνες των κυττάρων ενισχύοντας έτσι τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας από το εσωτερικό του τροφίμου προς τα έξω [1]. Το σημαντικότερο όμως όφελος είναι η μη θερμική τους φύση: τα τρόφιμα μπορούν να υποστούν επεξεργασία και να διατηρήσουν τα διατροφικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά τους, καθώς δεν εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες. Επομένως, τα ΠΗΠ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προεπεξεργασία σε διάφορα στάδια της παραγωγής προϊόντων τομάτας, προκειμένου να βελτιωθεί η παραγωγικότητα τους.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να εκτιμηθεί η δυνατότητα εφαρμογής των ΠΗΠ σε διάφορα στάδια παραγωγής προϊόντων τομάτας. Στο στάδιο της αποφλοιώσης, η διάρρηξη των κυττάρων που προκαλείται από τα ΠΗΠ αναμένεται να αποκολλήσει μερικώς τη φλούδα από τη σάρκα διευκολύνοντας την απομάκρυνσή της και μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας και τις απώλειες σάρκας. Η ηλεκτροδιάτρηση των κυττάρων αναμένεται επίσης να αυξήσει την απόδοση του τελικού χυμού τομάτας και να βελτιώσει την ποιότητα των τελικών χυμών. Τέλος, τα ΠΗΠ μπορούν να ενισχύσουν την εκχύλιση συστατικών υψηλής προστιθέμενης αξίας από τα παραπροϊόντα τομάτας που προκύπτουν από όλα τα στάδια παραγωγής, αυξάνοντας τις αποδόσεις ανάκτησης τους.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### *Πρώτες ύλες*

Φρέσκες βιομηχανικές ντομάτες (Heinz 3402 cv.) προμηθεύτηκαν από ελληνική μονάδα επεξεργασίας τομάτας (ΝΟΜΙΚΟΣ ΑΕ, Αλιάρτος, Βοιωτία) με περιεκτικότητα σε υγρασία  $82,58 \pm 0,35\%$ , συνολικά διαλυτά στερεά  $4,53 \pm 0,25$  ° Brix και αρχικό χρώμα  $a/b = 1,08$  ( $L^* = 45,9 \pm 1,8$ ,  $a^* = 29,5 \pm 2,5$  και  $b^* = 27,1 \pm 1,9$ ). Οι τομάτες αποθηκεύτηκαν στους  $7$  °C, μέχρι την περαιτέρω επεξεργασία τους.

### *Παλλόμενα ηλεκτρικά πεδία*

Η επεξεργασία με ΠΗΠ διεξήχθη σε ένα σύστημα πιλοτικής κλίμακας για επεξεργασία τροφίμων (Elcrack-5 kW, DIL, Quakenbrück, Γερμανία). Η αρχική θερμοκρασία των δειγμάτων ήταν περίπου  $20$  °C και ποτέ δεν υπερέβαινε τους  $27$  °C. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις θάλαμοι επεξεργασίας με διαφορετική απόσταση ηλεκτροδίων (2-8 cm) με αντίστοιχους όγκους θαλάμου 100-400 mL. Η προεπεξεργασία με ΠΗΠ εφαρμόστηκε σε τρία διαφορετικά στάδια επεξεργασίας τομάτας. Η επιλογή των συνθηκών ΠΗΠ βασίστηκε στον δείκτη κυτταρικής διάρρηξης Z προκειμένου να επιτευχθούν διάφοροι βαθμοί ηλεκτροδιάτρησης.

### *Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης Z*

Πριν από την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών επεξεργασίας με ΠΗΠ, ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης Z προσδιορίστηκε για ολόκληρες τομάτες, ψιλοκομμένες τομάτες και για τα παραπροϊόντα τομάτας προκειμένου να υπάρξει ένα ευρύ φάσμα με διάφορα ποσοστά ηλεκτροδιάτρησης της κυτταρικής μεμβράνης λόγω των ΠΗΠ. Αυτός ο δείκτης χαρακτηρίζει την διαπερατότητα της κυτταρικής μεμβράνης σε σχέση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Για ανεπεξέργαστους ιστούς το  $Z = 0$ , ενώ για έναν ιστό με όλα τα κύτταρα διερρηγμένα το  $Z = 1$ .

### **Αποφλοιώση τοματών**

Στο πρώτο στάδιο, ολόκληρες μη αποφλοιωμένες τομάτες προεπεξεργάστηκαν με ΠΗΠ (0,5-1,5 kV/cm για 0-8000 παλμούς, συχνότητα 20 Hz και πλάτος παλμού 15 μs) προκειμένου να εκτιμηθεί το έργο για την πλήρη απόσπαση της φλούδας από την σάρκα τους καθώς και η τελική υφή των αποφλοιωμένων τοματών. Για να συγκριθούν τα ΠΗΠ με άλλες συμβατικές μεθόδους αποφλοιώσης, οι τομάτες υποβλήθηκαν επίσης σε ζεμάτισμα για 1 λεπτό στους 70 °C και με ατμό στους 100 °C για 5 λεπτά. Η αποφλοιώση και η τελική υφή των δειγμάτων μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας αναλυτή υφής (MODEL TA-XT2i, StableMicro Systems, Godalming, Surrey, UK) για όλα τα δείγματα. Το μέγιστο έργο (περιοχή κάτω από την καμπύλη του διαγράμματος δύναμης με χρόνο) που απαιτείται για την απομάκρυνση της φλούδας από τη σάρκα τομάτας μετρήθηκε καθώς και η σκληρότητα των αποφλοιωμένων τοματών.

### **Απόδοση χυμού τομάτας και ποιοτικά χαρακτηριστικά των τελικών χυμών**

Στο δεύτερο στάδιο, οι τομάτες υποβλήθηκαν σε συνθήκες ΠΗΠ (0.5-2.5kV / cm για 0-4000 παλμούς, συχνότητα 20 Hz και πλάτος παλμού 15μs) και στην συνέχεια χυμοποιήθηκαν σε ραφινέζα. Σε αυτό το βήμα, μελετήθηκε επίσης η επίδραση των ΠΗΠ υπολείμματα τοματών του πρώτου σταδίου χυμοποίησης (φλούδες, σπόροι και ένα κλάσμα μη συμπιεσμένης σάρκας τομάτας) για να εκτιμηθεί κατά πόσον η προεπεξεργασία με ΠΗΠ θα μπορούσε να αυξήσει την απόδοση των τελικών χυμών. Η επίδραση των ΠΗΠ μελετήθηκε στην απόδοση του χυμού τομάτας (μάζα χυμού τομάτας (kg) / μάζα των τοματών (kg)), και οι χυμοί τομάτας από το πρώτο αλλά και από το δεύτερο στάδιο αξιολογήθηκαν όσον αφορά το χρώμα (CR-200 Minolta Chromametero Minolta Co., Japan), το ιξώδες (Brookfield, DVII & Pro, USA) και την συνεκτικότητα κατά Bostwick.

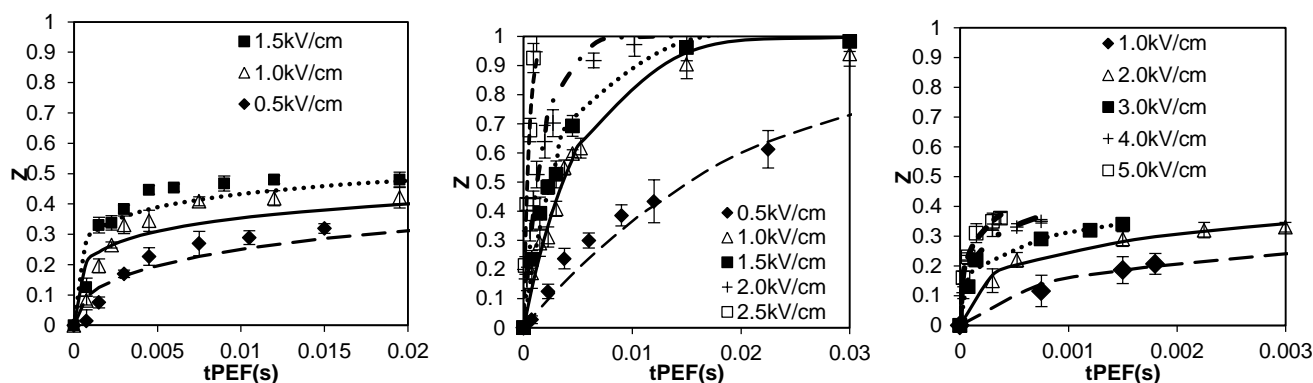
### **Εκχύλιση ενώσεων υψηλής προστιθέμενης αξίας από παραπροϊόντα τομάτας**

Στο τρίτο βήμα, τα ΠΗΠ εφαρμόστηκαν σε παραπροϊόντα τομάτας (και από τα δύο στάδια χυμοποίησης) (1,0-5,0kV / cm για 0-500 παλμούς, συχνότητα 20 Hz και πλάτος παλμού 15μs) και στην συνέχεια εκχυλίστηκαν ενώσεις υψηλής προστιθέμενης αξίας με μέθοδο εκχύλισης στερεού-υγρού (1:10). Σε 2g παραπροϊόντων τομάτας προστέθηκαν 20 mL διαλύτη και αναδεύτηκαν για 30 λεπτά στους 25°C. Τα εκχυλίσματα φυγοκεντρήθηκαν στις 3000 rpm (φυγοκέντρηση Thermo Scientific Heraeus Megafuge 16R, Waltham, MA, ΗΠΑ) για 10 λεπτά για να διαχωριστεί το υπερκείμενο υγρό. Στη συνέχεια αποθηκεύθηκαν στους -20 ° C μέχρι περαιτέρω ανάλυση. Οι ενώσεις που εκχυλίστηκαν ήταν καρροτενοειδή (φασματοφωτομετρικά με την μέθοδο του Lichtenthaler (1987)), λυκοπένιο (HPLC με την μέθοδο του Perkins-Veazie, Collins, Pair, & Roberts (2001)), ολικές φαινολικές ενώσεις (mg γαλλικού οξέος/L), ολικές πρωτεϊνές(mg/100g) και αντιοξειδωτική ικανότητα (Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) and 2,2-diphenyl-1-picryl-hydrazyl-hydrate (DPPH) values).

## **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ**

### **Επιλογή βέλτιστων συνθηκών ΠΗΠ με βάση τον δείκτη κυτταρικής διάρρηξης Z**

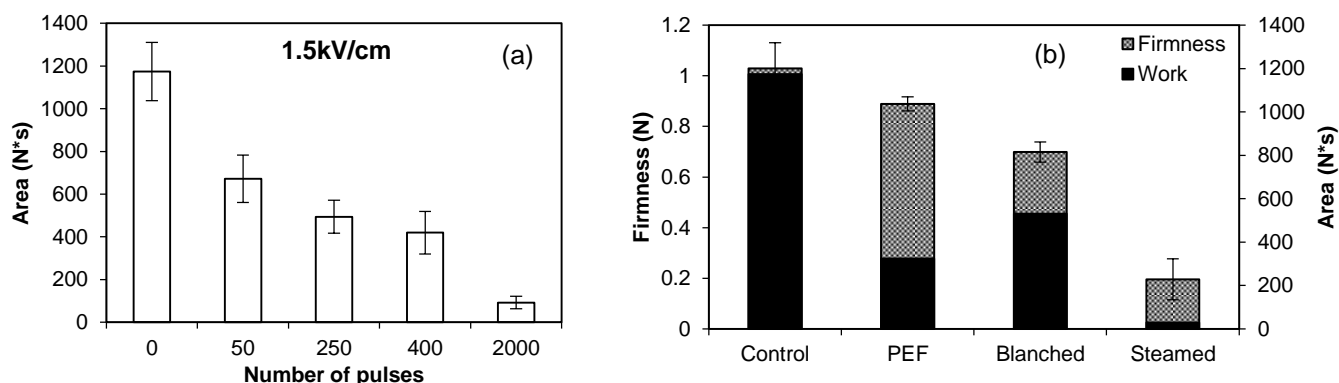
Η αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και του χρόνου επεξεργασίας αύξησαν τον δείκτη κυτταρικής διάρρηξης Z (Σχήμα 1). Στις ολόκληρες τομάτες η μέγιστη τιμή Z που επιτεύχθηκε ήταν περίπου 0,5 για μικροτεμαχισμένες τομάτες 1,0 και 0,3 για τα παραπροϊόντα (φλούδες και σπόρια). Οι διαφορές αυτές στον Z μεταξύ των διαφορετικών ιστών τομάτας θα μπορούσαν να σχετίζονται με το μέγεθος των κυττάρων. Το Z χρησιμοποιήθηκε για να επιλεγούν οι κατάλληλες συνθήκες επεξεργασίας με ΠΗΠ σε κάθε περίπτωση.



**Σχήμα 1.** Δείκτης κυτταρικής διάρρησης  $Z$  για (α) ολόκληρες τομάτες, (β) ψιλοκομμένες τομάτες και (γ) παραπροϊόντα τομάτας

### Επίδραση των ΠΗΠ στην βελτίωση της αποφλοιώση ολόκληρων τοματών

Το έργο που απαιτείται για την αποφλοιώση τομάτας εξαρτάται από το χρόνο επεξεργασίας με ΠΗΠ σε ολόκληρες τομάτες. Η προεπεξεργασία με ΠΗΠ σε ολόκληρες ντομάτες σε ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.5kV/cm οδήγησε σε μείωση κατά 92% του έργου της αποκόλλησης της φλούδας από την υπόλοιπη σάρκα (Εικόνα 2α). Η αύξηση του δείκτη κυτταρικής διάρρησης  $Z$  οδήγησε σε μειωμένο έργο αποκόλλησης σε όλες τις μελετηθείσες συνθήκες ( $p < 0,05$ ).



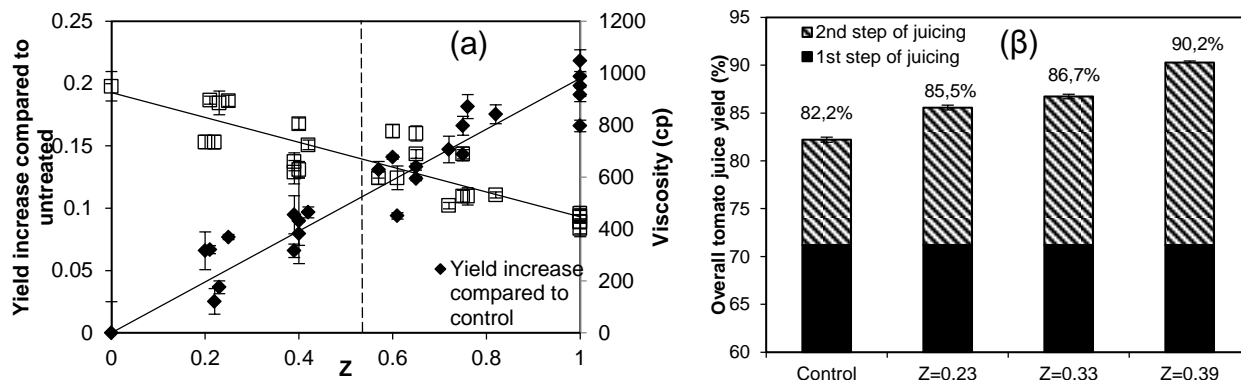
**Σχήμα 2.** (α) Έργο που απαιτείται για την πλήρη αποκόλληση της φλούδας τομάτας από την υπόλοιπη σάρκα για 1.5 kV/cm ένταση ηλεκτρικού πεδίου (b) Έργο που απαιτείται για την πλήρη αποκόλληση της φλούδας τομάτας από την υπόλοιπη σάρκα και σκληρότητα των τελικών αποφλοιωμένων τοματών για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ, ζεματισμένα και με ατμό δείγματα.

Η προεπεξεργασία με ΠΗΠ (1,5 kV/cm ένταση ηλεκτρικού πεδίου και 500 παλμοί) συγκρίθηκε με άλλες συμβατικές τεχνικές αποφλοιώσης, με ατμό ή ζεμάτισμα. Παρατηρήθηκε ότι το έργο για την πλήρη αποκόλληση της φλούδας τομάτας για τις ζεματισμένες τομάτες και με ατμό ήταν 54,7% και 97,4% χαμηλότερο σε σχέση με τις μη επεξεργασμένες, αντίστοιχα. Το έργο για την αποφλοιώση που χρειάστηκε μετά την προεπεξεργασία με ΠΗΠ σε ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1,5 kV/cm για 500 παλμούς ήταν 72,3% χαμηλότερη σε σχέση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Επιπλέον, η προεπεξεργασία με ΠΗΠ μείωσε την σκληρότητα των τελικών αποφλοιωμένων τοματών κατά μόλις 21,6% σε σύγκριση με το μη επεξεργασμένο, ενώ η αποφλοιώση με ζεμάτισμα και με ατμό μείωσε τη σκληρότητα των τελικών αποφλοιωμένων τοματών κατά 38,3% και 82,7% αντίστοιχα, σε σύγκριση με τις ανεπεξέργαστες (Εικόνα 2β).

### Επίδραση της επεξεργασίας ΠΗΠ στην απόδοση του χυμού τομάτας

Στο πρώτο στάδιο χυμοποίησης, παρατηρήθηκε αύξηση της απόδοσης του χυμού τομάτας για τις ψιλοκομμένες τομάτες που είχαν προεπεξεργαστεί με ΠΗΠ σε όλες τις υπό μελέτη συνθήκες. Όπως αναμενόταν, πιο έντονες συνθήκες με ΠΗΠ, είχαν ως αποτέλεσμα υψηλότερες αποδόσεις σε χυμό

(Σχήμα 3α). Η αύξηση της απόδοσης σε χυμό τομάτας κυμαίνεται από 2% έως περίπου 20,5% σε σχέση με το ανεπεξέργαστο, ανάλογα με την ένταση των συνθηκών με ΠΗΠ καθώς και με τον δείκτη κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  που επιτυγχάνεται σε κάθε επεξεργασία με ΠΗΠ. Η υψηλότερη απόδοση σε χυμό τομάτας που επιτεύχθηκε ήταν 89,2% μετά την προεπεξεργασία με ΠΗΠ, ενώ τα ανεπεξέργαστα δείγματα είχαν 71,4% απόδοση σε χυμό.



**Εικόνα 3** (α) Αύξηση της απόδοσης σε χυμό τομάτας σε σχέση με το ανεπεξέργαστο δείγμα για όλες τις μελετούμενες συνθήκες με ΠΗΠ και ιξώδες των τελικών χυμών τομάτας σε συνάρτησι με τον δείκτη κυτταρικής διάρρηξης  $Z$ , (β) Συνολική απόδοση σε χυμό τομάτας και από τα δυο στάδια χυμοποίησης για το ανεπεξέργαστο δείγμα και για 1,5 kV/cm ένταση ηλεκτρικού πεδίου και  $Z$  από 0,2 έως 0,4.

Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι η απόδοση του χυμού τομάτας εξαρτάται μόνο από τον δείκτη κυτταρικής διάρρηξης  $Z$ , ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο επιτεύχθηκε μετά από την επεξεργασία με ΠΗΠ (ένταση ηλεκτρικού πεδίου και χρόνος επεξεργασίας). Η σχέση μεταξύ του δείκτη  $Z$  και της αύξησης της απόδοσης του χυμού τομάτας περιγράφηκε γραμμικά ( $R^2 = 0.914$ ) (Σχήμα 3α). Οι δείκτες ποιότητας για όλους τους τελικούς χυμούς τομάτας είχαν μικρές διαφορές σε σύγκριση με τον ανεπεξέργαστο εκτός από το ιξώδες και τη συνεκτικότητα κατά Bostwick. Οι τελικοί χυμοί τομάτας που είχαν προεπεξεργαστεί με ΠΗΠ είχαν μειωμένο ιξώδες σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο, σε όλες τις υπό μελέτη συνθήκες. Η προεπεξεργασία με ΠΗΠ οδήγησε σε αύξηση της διαπερατότητας της κυτταρικής μεμβράνης και έτσι διευκόλυσε την άμεση απελευθέρωση νερού, οδηγώντας σε μειωμένο ιξώδες των τελικών χυμών τομάτας [3]. Οι τιμές συνεκτικότητας κατά Bostwick ήταν περίπου 12,5 cm και από 15,2 έως 30 cm για τα μη επεξεργασμένα και προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα, αντίστοιχα. Οι βέλτιστες τιμές συνεκτικότητας κατά Bostwick των χυμών τομάτας που θα μπορούσαν να γίνουν αποδεκτές από τη βιομηχανία τομάτας κυμαίνονταν από 12 cm έως περίπου 18 cm [4], που αντιστοιχεί σε ιξώδες μεταξύ 550-700 cp. Παρατηρήθηκε επίσης από το Σχήμα 3α ότι για τις τιμές του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  που κυμαίνονται από 0,5 έως 0,7, ο τελικός χυμός τομάτας είχε το βέλτιστο ιξώδες ενώ η αύξηση της απόδοσης του χυμού σε αυτές τις συνθήκες ήταν περίπου 10-15% υψηλότερη σε σύγκριση με τα μη επεξεργασμένα δείγματα. Για τις πιο έντονες συνθήκες με ΠΗΠ, η αύξηση της απόδοσης σε χυμό ήταν η υψηλότερη, ωστόσο το ιξώδες των χυμών αυτών είχε τιμές κάτω από 400 cp. Η επεξεργασία με ΠΗΠ επίσης εφαρμόστηκε πριν το δεύτερο στάδιο της χυμοποίησης στα υπολείμματα του πρώτου σταδίου (σπόροι, φλούδες και ένα μέρος μη συμπιεσμένης σάρκας ντομάτας) και οδήγησε σε αύξηση της απόδοσης σε χυμό και σε βελτιωμένο τελικό ιξώδες. Η συνολική απόδοση του χυμού τομάτας (και από τα δύο στάδια) ήταν 82,2% για τα ανεπεξέργαστα δείγματα. Η υψηλότερη συνολική απόδοση χυμού και από τα δυο στάδια χυμοποίησης προεπεξεργάζοντας με ΠΗΠ μόνο τα υπολείμματα του πρώτου σταδίου ήταν έως και 90,2% για ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1,5 kV/cm (Σχήμα 3β). Η δεύτερη χυμοποίηση υποβαθμίζει την ποιότητα των τελικών χυμών τομάτας αυξάνοντας το ιξώδες του χυμού. Η τιμή της συνεκτικότητας κατά Bostwick των μη επεξεργασμένων χυμών τομάτας που προκύπτουν από την ανάμιξη του χυμού από το δεύτερο στάδιο με εκείνη του πρώτου (σε αναλογία 1: 6) ήταν περίπου 10,9 cm, μια τιμή η οποία είναι μη αποδεκτή σύμφωνα με τα πρότυπα της βιομηχανίας

τομάτας και η οποία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω ως έχει. Κατά συνέπεια, η μείωση του ιξώδους του χυμού που επιτεύχθηκε από τα ΠΗΠ, δεν επηρέασε το τελικό ιξώδες του χυμού, όταν αναμιγνύονται χυμοί και από τα δύο στάδια. Η προεπεξεργασία με ΠΗΠ για ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1,5 kV/cm είχε ως αποτέλεσμα την ταυτόχρονη αύξηση της απόδοσης (περίπου 10%) σε σύγκριση με την ανεπεξέργαστο και η τιμή συνεκτικότητας κατά Bostwick ήταν 14,2cm.

### **Επίδραση της επεξεργασίας PEF στην εκχύλιση ενδοκυτταρικών ενώσεων από απόβλητα τομάτας**

Τα προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ παραπροϊόντα τομάτας (και από τα δύο στάδια χυμοποίησης) οδήγησαν σε σημαντική αύξηση ( $p < 0,05$ ) της εκχύλισης όλων των ενδοκυτταρικών συστατικών όπως τα καροτενοειδή, το λυκοπένιο, οι πρωτεΐνες και οι φαινολικές ενώσεις σε σύγκριση με τα ανεπεξέργαστα δείγματα. Οι πιο έντονες συνθήκες με ΠΗΠ (υψηλότερος δείκτης Z) οδήγησαν σε υψηλότερες συγκεντρώσεις όλων των ενδοκυτταρικών ενώσεων που μελετήθηκαν. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι η ηλεκτροδιάτρηση των κυτταρικών μεμβρανών των παραπροϊόντων τοματών δημιούργησε πόρους, προκαλώντας καλύτερη απελευθέρωση αυτών των ενώσεων προς το εξωτερικό του κυττάρου. Οι πιο έντονες συνθήκες με ΠΗΠ οδήγησαν σε αύξηση της απόδοσης της εκχύλισης των καροτενοειδών ενώσεων, από 35,9% έως 56,4% σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο. Η απόδοση της εκχύλισης του λυκοπενίου για τα δείγματα που είχαν προεπεξεργαστεί με ΠΗΠ ήταν υψηλότερη έως και 45% σε σχέση με το ανεπεξέργαστο. Η συγκέντρωση του λυκοπενίου που εκχυλίστηκε από τα μη επεξεργασμένα δείγματα ήταν 9,84 mg/100 g, ενώ για τα προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1,0 kV/cm για 7,5ms) ήταν 14,31 mg/100g. Η συγκέντρωση των φαινολικών ενώσεων για τα μη επεξεργασμένα δείγματα ήταν 27,95 mgGAE/L. Η προεπεξεργασία των ΠΗΠ αύξησε σημαντικά ( $p < 0,05$ ) την συνολική απόδοση εκχύλισης φαινολικών ενώσεων, διπλασιάζοντας την (56,16 mgGAE/L) για ένταση ηλεκτρικού πεδίου 2 kV/cm και 700 παλμούς, επιβεβαιώνοντας ότι τα ΠΗΠ μπορούν να βελτιώσουν τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας κατά τη διάρκεια της εκχύλισης. Τα προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ παραπροϊόντα τομάτας είχαν σημαντικά ( $p < 0,05$ ) υψηλότερη αντιοξειδωτική δράση σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα.

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν ότι η επεξεργασία με ΠΗΠ σε επιλεγμένες συνθήκες θα μπορούσε να εφαρμοστεί ως προεπεξεργασία στα κρίσιμα στάδια της βιομηχανία τομάτας οδηγώντας σε μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, αυξημένη παραγωγικότητα και αποτελεσματικότερη αξιοποίηση παραπροϊόντων. Γενικά, η αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και του χρόνου επεξεργασίας με ΠΗΠ αύξησαν τον δείκτη κυτταρικής διάρρηξης Z και στη συνέχεια διευκόλυνε την αποφλοίωση ολόκληρων τοματών, αύξησε την απόδοση του χυμού τομάτας και ενίσχυσε την εκχύλιση ενδοκυτταρικών ενώσεων από τα παραπροϊόντα τομάτας. Ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης Z των δειγμάτων είχε καλή γραμμική συσχέτιση με όλους τους δείκτες που μελετήθηκαν. ποσοτικοποιώντας ικανοποιητικά την επίδραση των ΠΗΠ .

### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Donsi, F., Ferrari, G., & Pataro, G. (2010). Applications of pulsed electric field treatments for the enhancement of mass transfer from vegetable tissue. *Food Engineering Reviews*, 2 (2), 109-130.
- [2] Luengo, E., Alvarez, I., & Raso, J. (2014). Improving carotenoids extraction from tomato waste by pulsed electric fields. *Frontiers in Nutrition*, 1, 1-10.
- [3] Pataro, G., Carullo, D., Bakar Siddique, Md A., Falcone, M., Donsi, F., & Ferrari, G. (2018). Improved extractability of carotenoids from tomato peels as side benefits of PEF treatment of tomato fruit for more energy-efficient steam-assisted peeling. *Journal of Food Engineering*, 233, 65-73.
- [4] Gould, W. A. *Tomato Production, Processing, and Technology*, 3rd ed.; CTI Publishing: Baltimore, MD, 1992; pp 202-203, 254, 297-344, 359-367, 436.