

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΨΥΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΡΙΠΑΙΟ ΨΕΚΑΣΜΟ

Δ. Κωτσόπουλος¹, Π. Παρίσσης¹, Α. Ρωμαίος¹, Α. Γιανναδάκης¹,
Κ. Περράκης¹, Θ. Πανίδης¹, Β. Chen², Σ. Κουτρομπίνας³

¹Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών, Πανεπιστήμιο Πατρών, panidis@upatras.gr

²Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, chenbin@mail.xjtu.edu.cn

³Meazon S.A., Πάτρα, s.koutroubinas@meazon.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ηλεκτρονικά ισχύος βρίσκουν ευρεία χρήση στον έλεγχο και την μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος, με εφαρμογή σε ηλεκτρικούς κινητήρες, στις τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών, πληροφορικής κ.α. Η συνεχής προσπάθεια για την μείωση του όγκου τους και την αύξηση της διαχειριζόμενης ισχύος, καθιστά την ανάπτυξη ενεργών και καινοτόμων τεχνικών θερμικής διαχείρισης απαραίτητη, ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη ψύξη και ρύθμιση της θερμοκρασίας λειτουργίας. Η ψύξη με ριπαίο ψεκασμό (spray cooling) αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη μέθοδο απαγωγής μεγάλων ποσών θερμότητας και διατήρησης των ηλεκτρονικών ισχύος σε ελεγχόμενο εύρος θερμοκρασιών. Στην παρούσα εργασία γίνεται πειραματική διερεύνηση της μεθόδου του ριπαίου ψεκασμού σε κλειστό κύκλωμα, με ψυκτικό R410A. Ειδικότερα μελετώνται οι επιπτώσεις της απόστασης μεταξύ του ακροφυσίου ψεκασμού και μιας επίπεδης επιφάνειας, καθώς και του ρυθμού ροής μάζας του ψυκτικού μέσου. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι καθώς αυξάνεται η απόσταση του ακροφυσίου από την επίπεδη επιφάνεια, η κρίσιμη ροή θερμότητας μετατοπίζεται σε μεγαλύτερες θερμοροές. Επί πλέον διερευνάται η χρήση ειδικά διαμορφωμένης επιφάνειας με μικροδομές. Η χρήση επιφάνειας με κανονικές εξαγωνικές πυραμίδες έχει ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση φαινομένων κρίσιμης ροής θερμότητας σε σημαντικά υψηλότερες θερμοροές και την επίτευξη βελτιωμένων συντελεστών ροής θερμότητας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια η επέκταση της βιομηχανίας ηλεκτρονικών ισχύος σε τεχνολογικούς τομείς όπως οι τεχνολογίες επικοινωνιών, τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ηλεκτροκίνηση, η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας κ.λπ., έχει οδηγήσει στην ανάγκη ανάπτυξης καινοτόμων τεχνικών ψύξης, για την απαγωγή σημαντικών ποσοτήτων θερμότητας. Τα ηλεκτρονικά ισχύος χαρακτηρίζονται από έντονη παραγωγή θερμικής ενέργειας, που οδηγεί σε διακυμάνσεις υψηλών θερμοκρασιών με αποτέλεσμα τη θερμική κόπωση των διατάξεων. Για παράδειγμα ροές θερμότητας της τάξης των 1000 W/cm² έχουν παρατηρηθεί σε συστοιχίες διόδων λείζερ. Η υπονόμευση της αποδοτικής απαγωγής θερμότητας προκαλεί την εμφάνιση σημείων υπερθέρμανσης, που οδηγούν τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα σε αστοχία. Η αύξηση της θερμοκρασίας ενός εξαρτήματος από 25 σε 75 °C, αυξάνει το ποσοστό αστοχίας κατά πέντε φορές, ενώ η αξιοπιστία των ηλεκτρονικών ισχύος μειώνεται κατά το ήμισυ, κάθε φορά που η θερμοκρασία τους αυξάνεται κατά 10 °C (Oh et al., 2015, Küenzi, 2018). Καινοτόμες τεχνικές ψύξης απαιτούνται για να υποστηρίξουν τη συνεχή μείωση του όγκου των ηλεκτρονικών συσκευών και την αύξηση της πυκνότητας ισχύος, διατηρώντας τις θερμοκρασίες των εξαρτημάτων κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια που θέτουν τα υλικά κατασκευής και η επιθυμητή διάρκεια ζωής.

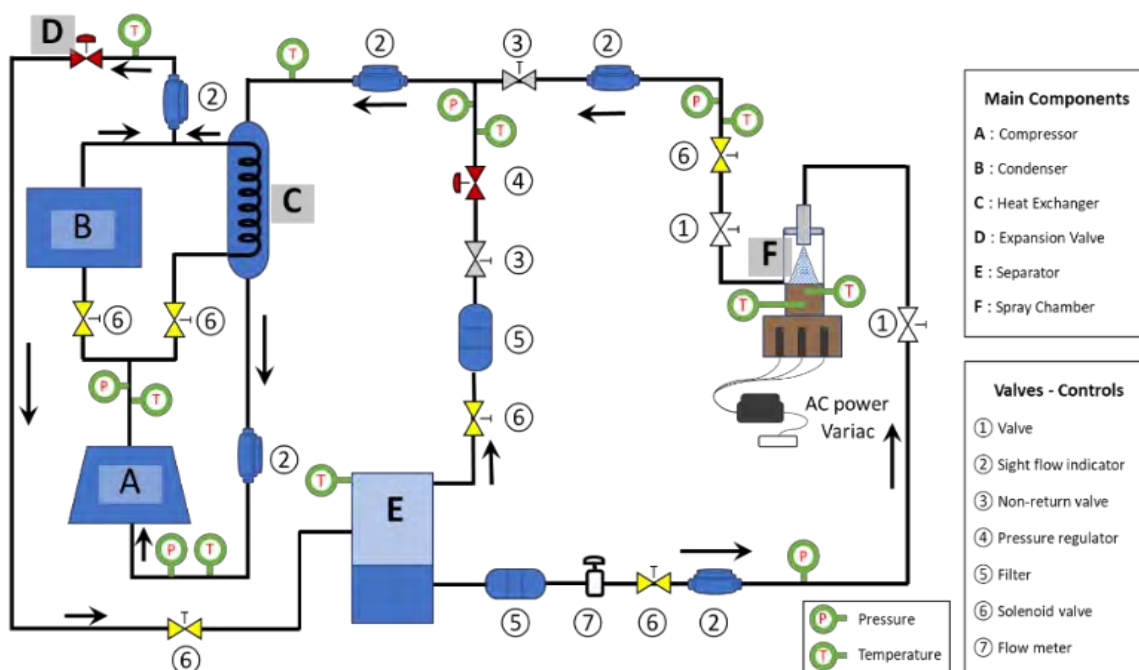
Οι νέες τεχνικές που αναπτύσσονται, αξιοποιούν διφασικά ψυκτικά μέσα, προσπαθώντας να εκμεταλλευτούν τόσο την αισθητή όσο και τη λανθάνουσα θερμότητα, για αποτελεσματικότερη απαγωγή θερμότητας. Μεταξύ αυτών των τεχνικών, η ψύξη με ψεκασμό ψυκτικών ρευστών παρέχει τη δυνατότητα απαγωγής σημαντικών ποσών θερμότητας με σχετικά χαμηλές παροχές ψυκτικού, επιτυγχάνοντας παράλληλα ομοιόμορφη κατανομή χαμηλών θερμοκρασιών στις επιφάνειες των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Οι Yan et al. (2011) προτείνουν τέσσερις μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας που κυριαρχούν κατά την ψύξη με ψεκασμό: α) εξάτμιση του υγρού φιλμ πάνω στην επιφάνεια, β) εξαναγκασμένη μεταφορά θερμότητας λόγω της πρόσκρουσης των σταγονιδίων, γ) σχηματισμός ενεργών σημείων πυρηνοποίησης με αποτέλεσμα την εμφάνιση φυσαλίδων και δ) δημιουργία δευτερευόντων σημείων πυρηνοποίησης λόγω της συνεχούς πρόσκρουσης σταγονιδίων. Οι Cheng et al. (2016) αναφέρουν ότι οι δευτερεύουσες φυσαλίδες που ενεργοποιούνται από τα δευτερεύοντα σημεία πυρηνοποίησης, οφείλονται στην πρόσκρουση και τη διείσδυση των σταγονιδίων στο υγρό φιλμ. Τα εισερχόμενα σταγονίδια συμπαρασύρουν ατμούς που δημιουργούνται λόγω εξάτμισής κατά την πτήση τους, οι οποίοι λειτουργούν ως σημεία πυρηνοποίησης για το σχηματισμό νέων μικρών φυσαλίδων (Liang & Mudawar, 2017, Yan et al., 2011). Παράλληλα η κρούση των σταγονιδίων στην επιφάνεια υποβοηθάει την απελευθέρωση φυσαλίδων (Cheng et al., 2016). Γενικά, πολλοί ερευνητές συγκλίνουν στην άποψη ότι ο κυρίαρχος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας κατά την ψύξη με ψεκασμό είναι η δημιουργία δευτερογενών σημείων πυρηνοποίησης (Pais et al., 1992, Mesler, 1993, Rini et al., 2002, Yang et al., 1996). Τα ροϊκά φαινόμενα που αναπτύσσονται κοντά στην επιφάνεια καθώς και η χρήση τροποποιημένων επιφανειών ή προσθέτων στα ρευστά λειτουργίας, φαίνεται να έχουν σημαντική επίδραση στην απόδοση της ψεκαστικής ψύξης (Liang & Mudawar, 2017). Στον Πίνακα 1 συνοψίζονται αποτελέσματα σχετικά με τη απόδοση της ψεκαστικής ψύξης, όπως η κρίσιμη ροή θερμότητας (Critical Heat Flux, CHF), ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer Coefficient, HTC) και η επιφανειακή θερμοκρασία, για προηγούμενες πειραματικές διερευνήσεις της βιβλιογραφίας.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα για ψεκαστική ψύξη από προηγούμενες εργασίες

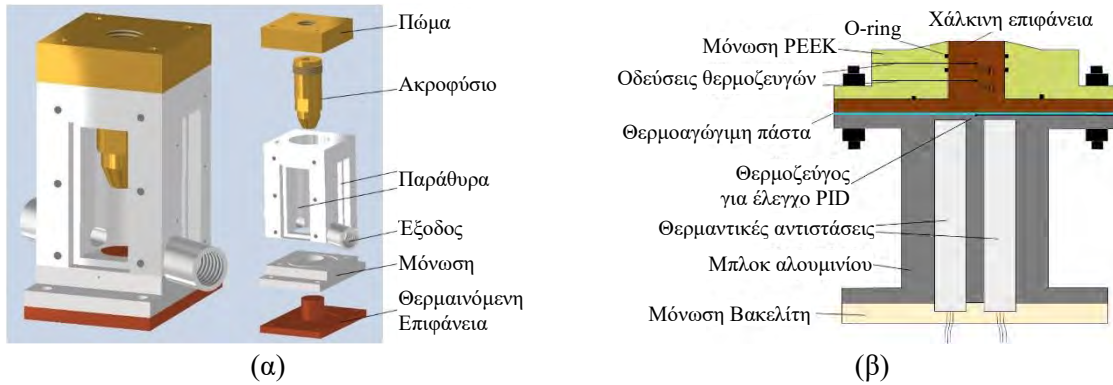
Εργασία	Ψυκτικό ρευστό	Τροποποίηση επιφάνειας	Κρίσιμη ροή θερμότητας – CHF (W/cm ²)	Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας – HTC (W/cm ² °C)	Θερμοκρασία επιφάνειας (°C)
Wang et a., 2023	R410A	-	175.0	9.04	<35
Zhou et al., 2019	R410A	NAI	330	30.0	< 10
Lin et al., 2019	R410A	-	264	21.0	< 30
Bostanci et al., 2018	R-134a, HF0-1234yf	NAI	370/ 300	8.0/ 6.4	40/ 43.4
Liu et al., 2018	R-134a	NAI	102	3.1	-
Chen al., 2018	R-134a, R22	-	117.2/ 276.1		
Yata & Bostanci, 2017	HFE-7100	NAI	190	9.26	≈ 91,6
Yaddanapudi & Bostanci, 2015	R-134a, HF0-1234yf	NAI (μακρο-δομές)	270/ 190	14.1/ 7.6	≈ 12 / ≈ 28
Shao et al., 2012	R600a	-	110	3.0	31.5

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

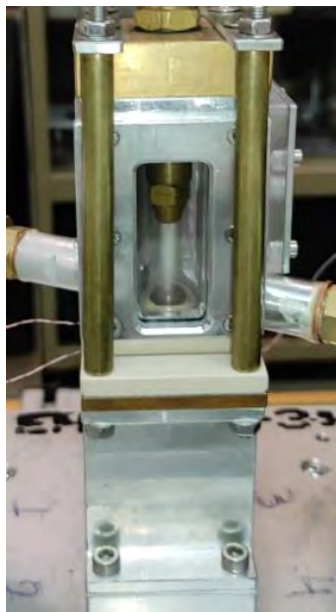
Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα κλειστό, τροποποιημένο ψυκτικό κύκλωμα (Σχ. 1.), που αξιοποιεί στοιχεία μιας οικιακής κλιματιστικής μονάδας, θερμικής ισχύος 3.5 kW (12000 Btu/hr). Το κύκλωμα είναι εξοπλισμένο με κατάλληλες διατάξεις και αισθητήρια για τον έλεγχο και την καταγραφή της λειτουργίας του συστήματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Η επιλογή του ψυκτικού μέσου (R410A) έγινε με γνώμονα τα κατάλληλα ρευστοθερμικά και φιλικά προς το περιβάλλον χαρακτηριστικά (Lin et al., 2019, Wang et al., 2023). Βασικό στοιχείο της διάταξης αποτελεί ο θάλαμος ψεκασμού (Σχ. 2.α και Σχ. 3). Στη βάση του είναι προσαρμοσμένο σύστημα θέρμανσης, που περιλαμβάνει τέσσερις αντιστάσεις συνολικής ηλεκτρικής ισχύος 4 x 400 W (Σχ. 2.β και Σχ. 3). Η θερμότητα άγεται μέσω συμπαγούς χάλκινου κυλίνδρου (λαιμού, Σχ. 2.α), μονωμένου περιμετρικά με μονωτικό υλικό (Peeek), ώστε να διασφαλίζεται η μονοδιάστατη ροή θερμότητας στη διαμήκη διεύθυνσή του. Για τον προσδιορισμό της ροής θερμότητας κατά μήκος του χάλκινου λαιμού είναι τοποθετημένα δύο θερμοζεύγη τύπου K, σε απόσταση 7 mm μεταξύ τους. Η άνω επιφάνεια του χάλκινου κυλίνδρου υποκαθιστά την επιφάνεια ενός ηλεκτρονικού ισχύος από το οποίο απάγεται θερμότητα. Ο θάλαμος ψεκασμού είναι κυλινδρικός, διαμέτρου 30 mm. Ο ψεκασμός επιτυγχάνεται μέσω ενός ακροφυσίου Danfoss (OD 5 USgal/hr, 60° spray angle), που είναι τοποθετημένο στο άνω μέρος του θαλάμου, σε ελεγχόμενη απόσταση από τη θερμαινόμενη επιφάνεια. Ο θάλαμος ψεκασμού και το σύστημα θέρμανσης καλύπτονται από παχύ στρώμα μονωτικού υλικού για την αποφυγή απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον. Κατά την λειτουργία της πειραματικής διάταξης το ψυκτικό φορτίο, που μεταφέρεται από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις μέσω του χάλκινου στελέχους στο ψυκτικό μέσο, ελέγχεται με έναν ελεγκτή PID. Η τροποποίηση της επιφάνειας ψεκασμού με διαμόρφωση μικροδομών (πετυρία, πυραμίδες κτλ.) αναμένεται να επηρεάσει θετικά την ικανότητα απαγωγής μεγάλων ποσών θερμότητας μέσω της αύξησης της επιφάνειας διαβροχής αλλά και της μεταβολής των μηχανισμών διφασικής ψύξης (Bostanci et al., 2012). Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι δυνατότητες ψύξης με ριπαίο ψεκασμό σε επίπεδη επιφάνεια (Σχ. 4.α) και σε τροποποιημένη επιφάνεια με διατεταγμένες κανονικές εξαγωνικές πυραμίδες, ύψους 0.75 mm, σε απόσταση μεταξύ τους 1 mm (Σχ. 4.β). Η διάμετρος της επιφάνειας και στις δύο περιπτώσεις είναι 17 mm.



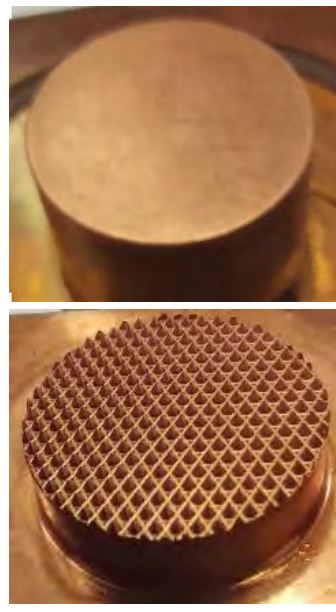
Σχήμα 1: Κλειστό ψυκτικό κύκλωμα.



Σχήμα 2: Σχέδιο θαλάμου ψεκασμού (α) και συστήματος θέρμανσης (β).



Σχήμα 3: Σύστημα θέρμανσης και θάλαμος ψεκασμού.



Σχήμα 4: Απλή επίπεδη επιφάνεια (α) και επιφάνεια με εξαγωνικές πυραμίδες (β).

2.1 Εξισώσεις υπολογισμών και εκτίμηση αβεβαιότητας

Για τον υπολογισμό της ροής θερμότητας μέσω του χάλκινου κυλίνδρου και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας και του ψυκτικού χρησιμοποιήθηκαν δύο θερμοζεύγη τύπου Κ όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.β. Σύμφωνα με το νόμο Fourier, η ροή θερμότητας q , υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1):

$$q = k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

όπου ΔT και Δx είναι η διαφορά θερμοκρασίας και η απόσταση μεταξύ των δύο θερμοζευγών T_1 και T_2 στο Σχήμα 2.β αντίστοιχα. Η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των θερμοζευγών είναι 7 mm. Η επιφανειακή θερμοκρασία T_w και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h μπορούν να υπολογιστούν με τις ακόλουθες εξισώσεις (2) και (3):

$$T_w = T_1 - \frac{q \Delta x_{w-1}}{k} \quad (2)$$

$$h = \frac{q}{T_w - T_{sat}} = \frac{q}{\Delta T_{sat}} \quad (3)$$

όπου Δx_{w-1} είναι η απόσταση μεταξύ του θερμοστοιχείου T_l και της άνω επιφάνειας του χάλκινου κυλίνδρου. Η θερμοκρασία της άνω επιφάνειας του χάλκινου κυλίνδρου είναι T_w , ενώ T_{sat} είναι η θερμοκρασία κορεσμού στο θάλαμο ψεκασμού, που αντιστοιχεί στην πίεση κορεσμού του ψυκτικού.

Η αβεβαιότητα της ένδειξης των θερμοστοιχείων είναι περίπου $\pm 2.5^\circ\text{C}$ στην περιοχή θερμοκρασιών από -30°C έως 250°C . Για τη μέτρηση της πίεσης χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί αισθητήρες πίεσης, ένας Carel SPKT0 E3P στην περιοχή πίεσης από 0.1 έως 1.28 MPa, με αβεβαιότητα πλήρους κλίμακας ± 0.01656 MPa και ένας Carel SPKT0 E6P στο εύρος πίεσης από 0.0 έως 4.5 MPa, με αβεβαιότητα πλήρους κλίμακας ± 0.054 MPa. Η αβεβαιότητα της απόστασης μεταξύ των θερμοζευγών T_l και T_2 είναι ± 0.1 mm, ενώ ο αισθητήρας ροόμετρου έχει πλήρη κλίμακα αβεβαιότητας $\pm 5\%$ στην περιοχή από 0.3 έως 3 L/min. Σύμφωνα με τη θεωρία εκτίμησης αβεβαιοτήτων (Moffat, 1988) για μια μέση τιμή της ροής θερμότητας 200 W/cm^2 , η αβεβαιότητα είναι $\pm 7.00\%$, ενώ οι αβεβαιότητες της επιφανειακής θερμοκρασίας T_w και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h είναι $\pm 8.16\%$ και $\pm 10.8\%$ αντίστοιχα.

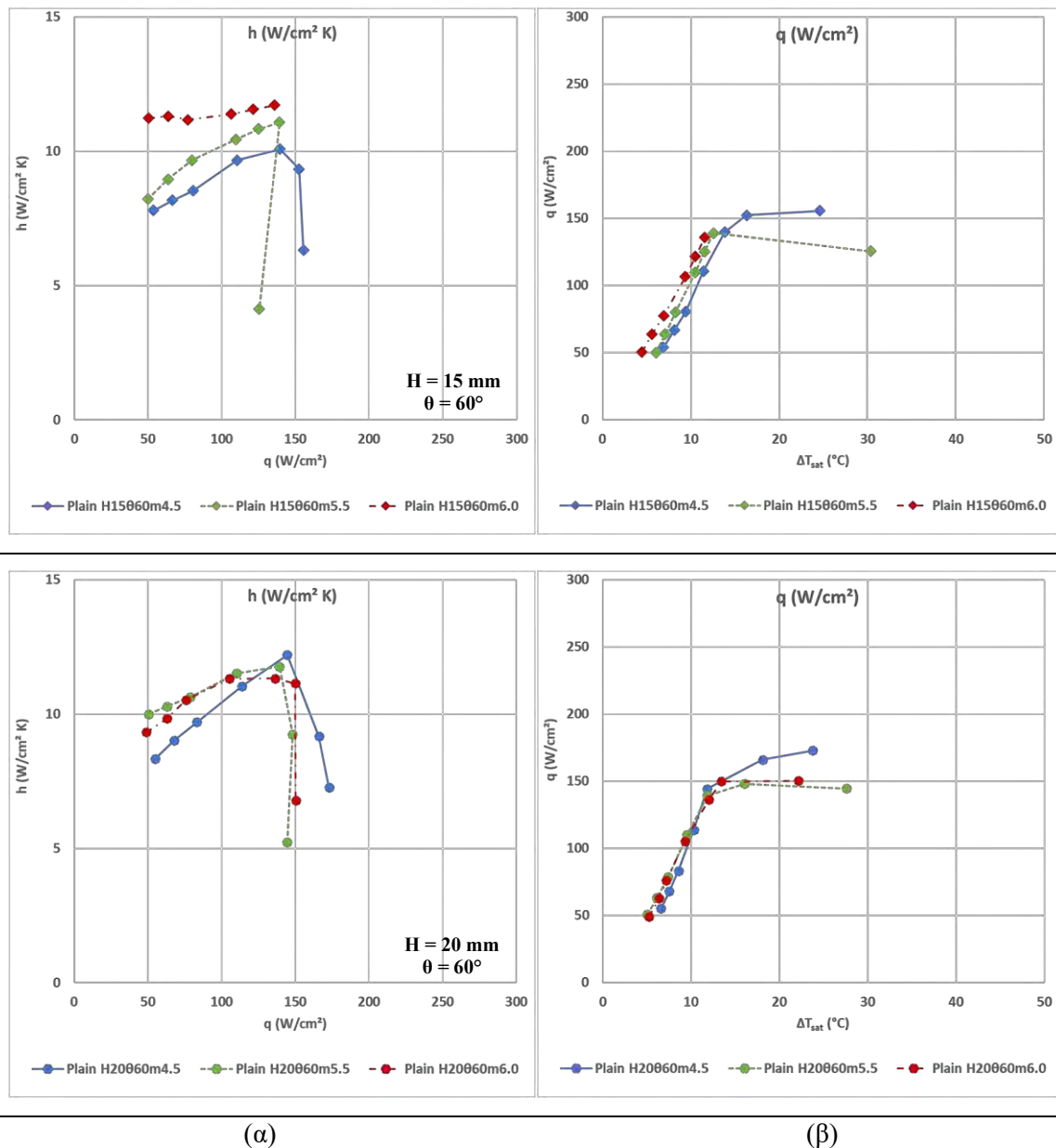
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Επίπεδη επιφάνεια ψύξης

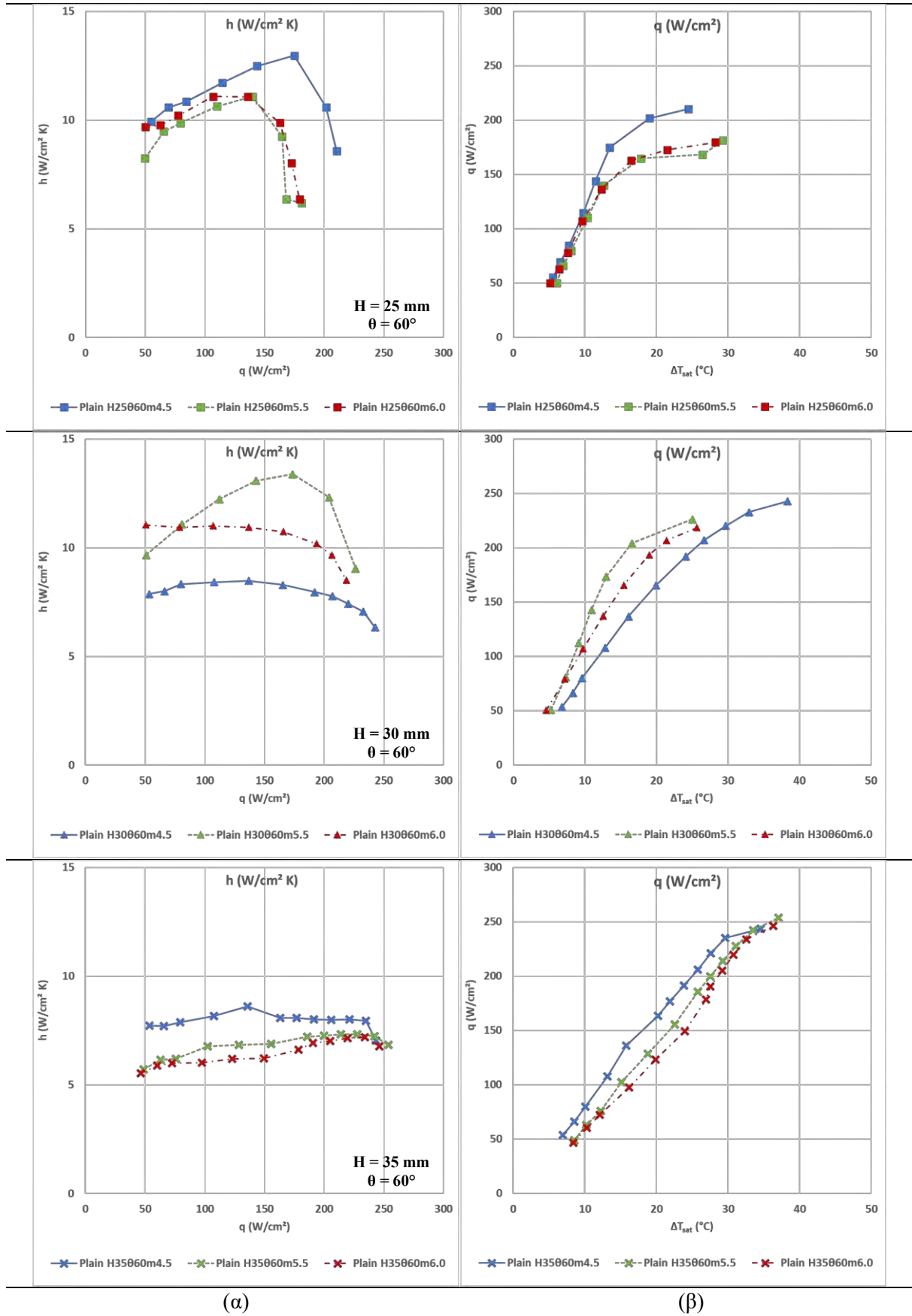
Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ένα ακροφύσιο Danfoss OD 5 USgal/hr, πλήρους κώνου, με γωνία ψεκασμού 60° . Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την επίπεδη επιφάνεια, σε ξεχωριστά διαγράμματα για αποστάσεις μεταξύ της εξόδου του ακροφυσίου και της επιφάνειας 15, 20, 25, 30 και 35 mm. Τα σύμβολα στον χαρακτηρισμό κάθε καμπύλης μέτρησης αναφέρονται στην απόσταση του ακροφυσίου, H, σε mm, στη γωνία εκροής του ακροφυσίου, θ , σε μοίρες και στην παροχή μάζας του ψυκτικού, m, σε g/s. Η πρώτη στήλη, (α), περιλαμβάνει διαγράμματα του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, h, ως προς τον ρυθμό ροής θερμότητας, q. Στη δεύτερη στήλη, (β), φαίνεται η σχέση του ρυθμού ροής θερμότητας, q, με την υπερθέρμανση, ΔT_{sat} , δηλαδή τη διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας επιφάνειας και της θερμοκρασίας κορεσμού. Παρουσιάζονται αποτελέσματα για παροχές μάζας, m, 4.5 g/s (μπλε χρώμα, συνεχής γραμμή), 5.5 g/s (πράσινο χρώμα, διακεκομμένη γραμμή) και 6.0 g/s (κόκκινο χρώμα, διακεκομμένη γραμμή με τελείες).

Στη στήλη (α) ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, h, ξεκινάει από χαμηλές τιμές οι οποίες αρχικά αυξάνονται βαθμιαία καθώς αυξάνεται ο ρυθμός ροής θερμότητας, q. Από κάποια τιμή του q και μετά οι τιμές του συντελεστή h μειώνονται απότομα, όταν η απόσταση του ακροφυσίου από την επιφάνεια είναι μικρή, ενώ καθώς η απόσταση αυτή μεγαλώνει η μείωση καθίσταται πιο σταδιακή. Η τελευταία, μέγιστη τιμή του συντελεστή h αντιστοιχεί στην κρίσιμη ροή θερμότητας (Critical Heat Flux, CHF), κατά την οποία αρχίζει η εμφάνιση στρωματικού βρασμού. Πρέπει να σημειωθεί ότι η κρίσιμη ροή θερμότητας στην ψύξη με ψεκασμό, παρά την απότομη πτώση του συντελεστή, h, σε μικρές αποστάσεις, δεν έχει τα χαρακτηριστικά σημείου κατάκαυσης (burnout), όπως στον δεξαμενικό βρασμό, δεδομένου ότι η συνεχής κρούση σταγονιδίων δεν επιτρέπει την κάλυψη της επιφάνειας με ένα ευσταθές στρώμα ατμού. Οποσδήποτε η κατά τόπους εμφάνιση στρωματικού βρασμού και άρα η μείωση τοπικά του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω της πολύ μικρότερης αγωγιμότητας του ατμού, οδηγεί στην μείωση του συντελεστή μεταφοράς, απότομα σε μικρές αποστάσεις του ακροφυσίου και πιο σταδιακά σε μεγαλύτερες. Είναι χαρακτηριστικό ότι για διαδοχικές αποστάσεις η σειρά των καμπυλών για κάθε παροχή δεν παρουσιάζει μια συνεπή τάση, πιθανότατα λόγω της διαφοράς συνεισφοράς των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας, που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή (Yan et al., 2011). Παρά ταύτα φαίνεται ότι η αύξηση της απόστασης του ακροφυσίου από την επιφάνεια έχει κατ' αρχήν ως αποτέλεσμα την μετατόπιση της τιμής της κρίσιμης ροής θερμότητας σε μεγαλύτερες τιμές, με παράλληλη μικρή αύξηση του μέγιστου συντελεστή μεταφοράς, αν και στη μεγαλύτερη απόσταση που μελετήθηκε οι τιμές του συντελεστή παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις σε αρκετά μικρότερες τιμές.

Αντίστοιχες παρατηρήσεις προκύπτουν και από την εξέταση της δεύτερης στήλης των διαγραμμάτων, όπου παρουσιάζεται η εξέλιξη του ρυθμού ροής θερμότητας, q , με την υπερθέρμανση, ΔT_{sat} . Σε χαμηλές τιμές η εξέλιξη είναι σχεδόν γραμμική ενώ στο σημείο της κρίσιμης ροής θερμότητας η κλίση των καμπυλών μειώνεται σημαντικά. Η μέγιστη τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας επιτυγχάνεται για παροχή 5.5 g/s σε απόσταση 30 mm, με $h=13.4 \text{ W/cm}^2\text{K}$, για ροή θερμότητας $q=173.62 \text{ W/cm}^2$, ενώ για παροχή 4.5 g/s σε απόσταση 20 mm επιτυγχάνεται επίσης υψηλή τιμή του συντελεστή μεταφοράς $h=13.0 \text{ W/cm}^2\text{K}$, για ροή θερμότητας 174.9 W/cm^2 . Στην μεγαλύτερη απόσταση των 35mm φαίνεται να επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της τιμής της κρίσιμης ροής θερμότητας ($q \sim 290 \text{ W/cm}^2$) αλλά με σημαντική μείωση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας ($h \sim 8 \text{ W/cm}^2\text{K}$).



Σχήμα 5. (συνεχίζεται): (α) Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, h , συναρτήσει της ροής θερμότητας, q , και (β) Ροή θερμότητας, q , συναρτήσει της υπερθέρμανσης της επιφάνειας, ΔT_{sat} , για παροχές μάζας $m=4.5, 5.5$ και 6.0 g/s , για επίπεδη επιφάνεια σε διάφορες αποστάσεις, H , από ακροφύσιο 60° .



Σχήμα 5 (συνέχεια): (α) Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, h , συναρτήσει της ροής θερμότητας, q , και (β) Ροή θερμότητας, q , συναρτήσει της υπερθέρμανσης της επιφάνειας, ΔT_{sat} , για παροχές μάζας $m=4.5, 5.5$ και 6.0 g/s, για επίπεδη επιφάνεια σε διάφορες αποστάσεις, H , από ακροφύσιο 60° .

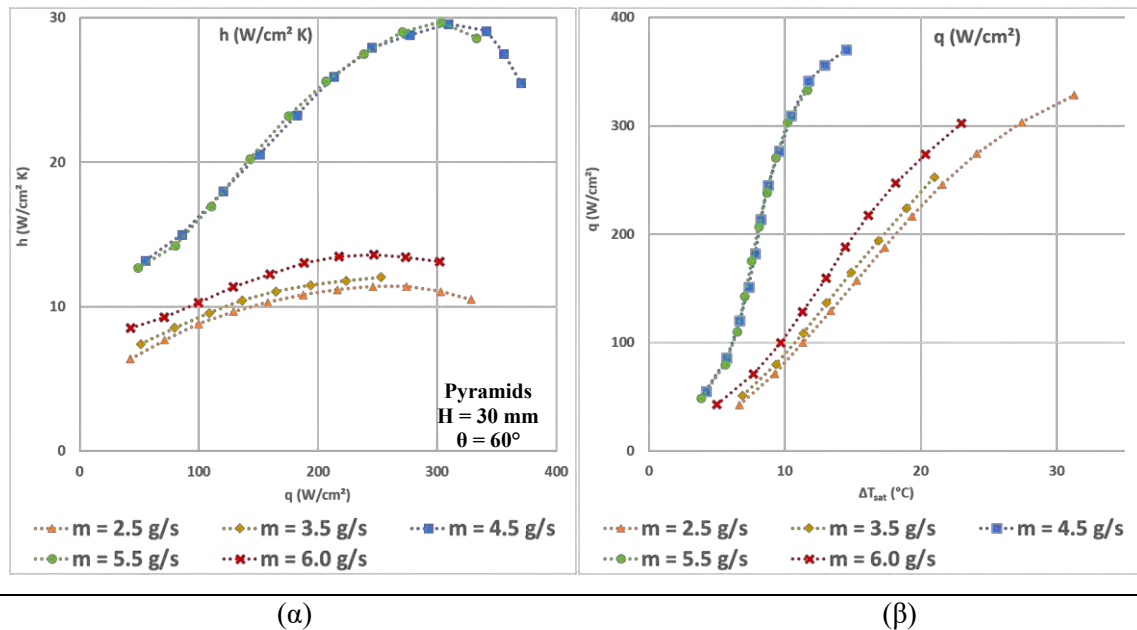
Η υποχώρηση της τιμής του ρυθμού ροής θερμότητας, q , σε χαμηλότερες τιμές στις τελευταίες μετρήσεις μερικών πειραμάτων απαιτεί μια εξήγηση. Υπενθυμίζεται ότι τα μεγέθη που ελέγχονται σε αυτά τα πειράματα είναι η θερμοκρασία ρύθμισης του PID και οι θερμοκρασία κορεσμού που επιβάλλεται από το διφασικό μίγμα στο θάλαμο ψεκασμού, η οποία παραμένει σταθερή σε κάθε πείραμα. Η αύξηση του ρυθμού ροής θερμότητας επιτυγχάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας ρύθμισης του PID. Ο ρυθμός ροής θερμότητας καθορίζεται από τις δύο αυτές θερμοκρασίες και από τις συνολικές θερμικές αντιστάσεις που παρεμβάλλονται εν σειρά, λόγω της αγωγής μέσα στο χάλκινο στέλεχος και του συντελεστή συναγωγής που διαμορφώνεται από τους μηχανισμούς διφασικής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας και του ψυκτικού. Εξαιτίας του χαμηλού συντελεστή μεταφοράς, μετά το σημείο της κρίσιμης ροής θερμότητας, η συνολική θερμική αντίσταση μεγαλώνει, με αποτέλεσμα η ίδια αύξηση στην τιμή της θερμοκρασίας ελέγχου του PID να οδηγεί σε μικρότερες αυξήσεις του συνολικού ρυθμού ροής θερμότητας. Η συνολική θερμική αντίσταση γίνεται κάποιες φορές τόσο μεγάλη που παρά την αύξηση της θερμοκρασίας ελέγχου του PID ο συνολικός ρυθμός ροής θερμότητας μειώνεται.

3.2 Επιφάνεια ψύξης με κανονικές εξαγωνικές πυραμίδες

Όπως ήδη αναφέρθηκε η τροποποίηση της επιφάνειας ψεκασμού με διαμόρφωση μικροδομών (περύγια, αυλακώσεις κτλ.) αναμένεται να επηρεάσει θετικά την ικανότητα απαγωγής μεγάλων ποσών θερμότητας μέσω της αύξησης της επιφάνειας διαβροχής αλλά και της μεταβολής των μηχανισμών διφασικής ψύξης (Bostanci et al., 2012). Έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες στο παρελθόν για την αξιολόγηση διάφορων τύπων τροποποιημένων επιφανειών με θετικά αποτελέσματα (Yaddanapudi & Bostanci, 2015 Yata & Bostanci, 2017, Bostanci et al., 2018, Liu et al., 2018, Zhou et al., 2019). Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν οι επιδόσεις επιφάνειας με διατεταγμένες κανονικές εξαγωνικές πυραμίδες. Η γεωμετρία αυτή πέρα από την αύξηση της επιφάνειας ανταλλαγής θερμότητας, προσφέρει επιφάνειες με διάφορους προσανατολισμούς σε σχέση με τη διεύθυνση πρόσπτωσης των σταγονιδίων και δημιουργεί ευνοϊκούς άξονες απορροής του ψυκτικού. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6, για απόσταση της εξόδου του ακροφυσίου από τη βάση της επιφάνειας 30 mm. Η εξέλιξη των καμπυλών παρουσιάζει παρόμοιες τάσεις με αυτές της επίπεδης επιφάνειας με σταδιακή αύξηση της τιμής του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, h (αναγόμενου στην επίπεδη επιφάνεια), μέχρι το σημείο της κρίσιμης ροής θερμότητας, ενώ στη συνέχεια η μείωσή του φαίνεται να είναι πιο σταδιακή. Η μεγάλη διαφορά σε σχέση με τα αποτελέσματα της επίπεδης επιφάνειας είναι η σημαντική αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (πάνω από 29 W/cm²K για παροχές 4.5 και 5.5 g/s) και αντίστοιχα της τιμής της κρίσιμης ροής θερμότητας (πάνω από 300 W/cm² στις προαναφερθείσες παροχές). Η αύξηση αυτή υπερβαίνει την αύξηση της επιφάνειας μετάδοσης θερμότητας (~80%), και υποδεικνύει μεταβολή των μηχανισμών διφασικής ψύξης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκε η πειραματική διερεύνηση της μεθόδου του ριπαίου ψεκασμού σε κλειστό κύκλωμα, με ψυκτικό R410A. Ειδικότερα μελετήθηκαν οι επιπτώσεις της απόστασης μεταξύ του ακροφυσίου ψεκασμού και επίπεδης επιφάνειας, καθώς και του ρυθμού ροής μάζας του ψυκτικού μέσου. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι καθώς αυξάνεται η απόσταση του ακροφυσίου από την επίπεδη επιφάνεια, η κρίσιμη ροή θερμότητας μετατοπίζεται σε μεγαλύτερες θερμοροές. Η πειραματική διερεύνηση των επιδόσεων τροποποιημένης επιφάνειας με κανονικές εξαγωνικές πυραμίδες είχε ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση φαινομένων κρίσιμης ροής θερμότητας σε σημαντικά υψηλότερες θερμοροές σε σχέση με την επίπεδη επιφάνεια (άνω των 300 W/cm², αντί των 175 W/cm²) και την επίτευξη βελτιωμένων συντελεστών ροής θερμότητας (άνω των 29 W/cm²K σε σχέση με 13.5 W/cm²K).



Σχήμα 6: (α) Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, h , συναρτήσει της ροής θερμότητας, q , και (β) Ροή θερμότητας, q , συναρτήσει της υπερθέρμανσης της επιφάνειας, ΔT_{sat} , για επιφάνεια με εξαγωνικές πυραμίδες σε απόσταση $H=30 \text{ mm}$, από ακροφύσιο 60° , για διάφορες παροχές μάζας, m .

5. ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ

Η έρευνα αυτή συγχρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης και από Εθνικούς πόρους, στο πλαίσιο της Δράσης «Διμερής και Πολυμερής Ε&Τ Συνεργασία Ελλάδας-Κίνας» της ΓΓΕΤ (ΕΣΠΑ 2014–2020, Τ7ΔΚΙ-00022-SprayCooling - MIS: 5050707).

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bostanci H., Rini D.-P., Kizito J.-P., Singh V., Seal S., and Chow L.C. (2012), "High heat flux spray cooling with ammonia: Investigation of enhanced surfaces for CHF", *Int. J. Heat Mass Transfer* 55, pp. 3849–3856.
- Bostanci, H., Altalidi, S., & Nasrazadani, S. (2018), "Two-phase spray cooling with HFC- 134a and HFO-1234yf on practical enhanced surfaces.", *Applied Thermal Engineering*, 131, 150–158.
- Chen S., J. Liu, X. Liu, and Y. Hou (2015), An experimental comparison of heat transfer characteristic between R134-a and R22 in spray cooling, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 66, pp. 206–212
- Cheng W.-L., W.-W. Zhang, H. Chen, and L. Hu (2016), "Spray cooling and flash evaporation cooling: The current development and application", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55
- Künzi R. (2018), "thermal design of power electronic circuits", in *CERN Accelerator School: Power Converters, CAS 2014 - Proceedings*, pp. 311–327.
- Liang G. and I. Mudawar (2017), "Review of spray cooling – Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, pp. 1174–1205.
- Lin Y. K., Zhou Z. F., Fang Y., Tang H. L., and Chen B. (2019), "Heat transfer performance and optimization of a close-loop R410A flash evaporation spray cooling", *Applied Thermal Engineering*, 159 (113966), pp. 1-7.
- Liu X., J. Liu, R. Xue, L. Chen, and Y. Hou (2018), "Heat transfer optimization of R134a phase change spray cooling in a closed loop system", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 92.

Mesler R. (1993), Discussion: ‘Surface Roughness and Its Effects on the Heat Transfer Mechanism of Spray Cooling’ (Pais, M. R., Chow, L. C., and Mahefkey, E. T.), ASME J. Heat Transfer, 114, pp. 211–219.

Moffat R.J. (1988), “Describing the uncertainties in experimental results”, Experimental Thermal and Fluid Science, 1 (1).

Oh H., B. Han, P. McCluskey, C. Han, and B. D. Youn (2015), “Physics-of-failure, condition monitoring, and prognostics of insulated gate bipolar transistor modules: A review”, IEEE Transactions on Power Electronics, 30 (5), pp. 2413–2426.

Pais M. R., L. C. Chow, and E. T. Mahefkey (1992), “Surface Roughness and Its Effects on the Heat Transfer Mechanism in Spray Cooling”, Journal of Heat Transfer, 114 (1).

Rini D. P., R.-H. Chen, and L. C. Chow (2002), “Bubble Behavior and Nucleate Boiling Heat Transfer in Saturated FC-72 Spray Cooling”, Journal of Heat Transfer, 124 (1).

Wang S., Zhou Z., Chen B., Panidis T., Romeos A., Giannadakis A. (2023), "Dynamic thermal management of flashing spray cooling by the frequency conversion of compressor", Applied Thermal Engineering, 218 (119322).

Yaddanapudi S. J. and H. Bostanci (2015), “Spray Cooling With HFC-134a and HFO-1234yf for Thermal Management of Automotive Power Electronics”, Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. V08BT10A022. ASME.

Yan Z., Zhao R., Duan F., Wong T. N., Toh K. C., Choo K. F., Chan P. K. and Chua Y. S. (2011), "Spray Cooling", in Two Phase Flow, Phase Change and Numerical Modeling, A. Ahsan (Ed.), ISBN: 978-953-307-584-6, InTech.

Yang J., L. C. Chow, and M. R. Pais (1996), Nucleate Boiling Heat Transfer in Spray Cooling, Journal of Heat Transfer, 118 (3).

Yata V. V. R. and H. Bostanci (2017), “Investigation of spray cooling schemes for dynamic thermal management”, 16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), Orlando, FL, USA, 2017, pp. 744-751.

Zhou Z.-F., Y.-K. Lin, H.-L. Tang, Y. Fang, B. Chen, and Y.-C. Wang (2019), “Heat transfer enhancement due to surface modification in the close-loop R410A flash evaporation spray cooling”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 139.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MODIFIED SURFACES ON SPRAY COOLING OF POWER ELECTRONICS

ABSTRACT

Power electronics are widely used in the control and conversion of electrical power, with application in electric motors, in telecommunications, IT, etc. technologies. The continuous effort to reduce their volume and increase the managed power, makes the development of active and innovative thermal management techniques necessary, in order to achieve optimal control and reduction of temperature. Spray cooling is a promising method of removing large amounts of heat and keeping power electronics in a controlled temperature range. In the present work, an experimental investigation is made of the method of burst spraying in a closed circuit, with refrigerant R410A, and the use of specially shaped surfaces with microstructures. In particular, the effects of the distance between the spray nozzle and a flat surface, as well as the mass flow rate of the refrigerant are studied. The results indicate that as the distance of the nozzle from the flat surface increases, the critical heat flux shifts to larger heat fluxes. In addition, the use of a modified surface with microstructures is being investigated. The use of a surface with regular hexagonal pyramids results in the delay of critical heat flux phenomena at significantly higher values and the achievement of superior heat transfer coefficients.