

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΑΣ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ/ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

^{1*}Μ. Σουλιώτης, ¹Ι. Τρουπαναγνωστόπουλος, ^{2*}Σ. Καλογήρου, ²Γ. Φλωρίδης, ^{3*}Μ. Ekhrawat, ³Δ. Τσιπάς

¹Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ρίο Πάτρας 26504, Ελλάδα
*e-mail: msouliot@physics.upatras.gr

²Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Επιστήμης Υλικών, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, P. O. Box 50329, Λεμεσός 3603, Κύπρος
*e-mail: Soteris.kalogirou@cut.ac.cy

³Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 54224, Ελλάδα
*e-mail: *mekhrawa@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι θερμοσιφωνικές συσκευές επίπεδων ηλιακών συλλεκτών και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι τα πλέον διαδεδομένα ηλιακά συστήματα τα οποία παράγουν θερμότητα και ηλεκτρισμό, αντίστοιχα. Οι ηλιακές συσκευές υβριδικών θερμικών/φωτοβολταϊκών συσκευών (PV/T) μπορούν ταυτόχρονα να παράγουν θερμότητα και ηλεκτρισμό, κατορθώνοντας να αξιοποιήσουν στο μέγιστο την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία. Συγκεκριμένα με την κατάλληλη σχεδίαση των υβριδικών PV/T ηλιακών συστημάτων είναι δυνατή η εξαγωγή θερμότητας από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, θερμαίνοντας αέρα ή νερό και τελικά να μειώνεται η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και να διατηρείται η ηλεκτρική τους απόδοση σε ικανοποιητικό επίπεδο. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται η σχεδίαση και τα πειραματικά αποτελέσματα μιας θερμοσιφωνικής υβριδικής μονάδας PV/T. Η συσκευή έχει κατασκευαστεί στο Πανεπιστήμιο Πατρών και μελετάται η ηλεκτρική και θερμική ενέργεια απολαβής κάτω από τις καιρικές συνθήκες της Πάτρας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μεγαλύτερο μέρος της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τα φωτοβολταϊκά (φβ) κύτταρα δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό αλλά σε θερμότητα, η οποία συντελεί στην αύξηση της θερμοκρασίας τους με συνέπεια την μείωση της ηλεκτρικής τους απόδοσης. Η απαγωγή της θερμότητας από τα φβ πλαίσια βοηθά όχι μόνο στη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας τους αλλά μπορεί και να αξιοποιηθεί αυξάνοντας τη συνολική ενεργειακή τους απόδοση. Τα ηλιακά συστήματα που έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν τόσο ηλεκτρική όσο και θερμική ενέργεια είναι τα υβριδικά φωτοβολταϊκά / θερμικά (φβ/θ ή PV/T) συστήματα, τα οποία αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια και έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται σε επιδεικτικές εφαρμογές. Τα υβριδικά συστήματα PV/T συνίστανται από φβ πλαίσια με ενσωματωμένη θερμική μονάδα απολαβής της θερμότητας του φβ, όπου ένα κυκλοφορούν ρευστό χαμηλότερης θερμοκρασίας αυτής του φβ θερμαίνεται ψύχοντάς το. Η χρήση του νερού ως ρευστού απολαβής της θερμότητας είναι αποδοτική όλο το έτος, κυρίως σε χώρες με ήπιο ή θερμό κλίμα. Αυτές οι υβριδικές διατάξεις μπορούν να αξιοποιηθούν για την θέρμανση του νερού σε χαμηλές θερμοκρασίες (μέχρι 40° C) ώστε να επιτυγχάνεται παράλληλα και η διατήρηση

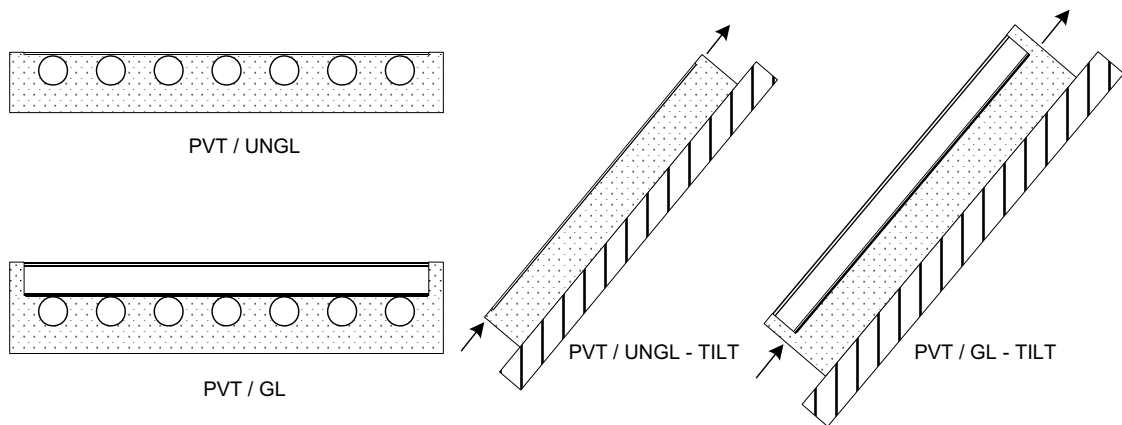
χαμηλής θερμοκρασίας στα φβ πλαίσια. Η απαγωγή θερμότητας με κυκλοφορία αέρα απαιτεί απλούστερη και φθηνότερη διάταξη, αλλά η ψύξη του φωτοβολταϊκού είναι λιγότερο αποδοτική. Όταν ο αέρας του περιβάλλοντος έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη των 20°C τα PV/T συστήματα αέρα έχουν περιορισμένες δυνατότητες εφαρμογής (κυρίως φυσικός αερισμός και θέρμανση αέρα για ορισμένες διεργασίες).

Εκτεταμένες μελέτες τόσο σε συστήματα νερού [1, 2, 3, 4] όσο και σε συστήματα αέρα [1, 5, 6, 7] έχουν πραγματοποιηθεί από το Πανεπιστήμιο Πατρών και διάφοροι τύποι υβριδικών PV/T πρωτοτύπων έχουν διερευνηθεί. Η βελτίωση της συμπεριφοράς των συστημάτων αυτών αποσκοπεί στο να βελτιωθούν τα υπάρχοντα όρια της απόδοσής τους και να κάνουν τα συστήματα αυτά κατάλληλα για συγκεκριμένους τύπους εφαρμογές. Τα υβριδικά συστήματα νερού (PVT/WATER) είναι περισσότερο ακριβά σε σχέση με τα υβριδικά συστήματα αέρα (PVT/AIR) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά όλες τις εποχές του έτους, κυρίως σε περιοχές χαμηλού γεωγραφικού πλάτους όπου η θερμοκρασία του νερού είναι συνήθως κάτω από το όριο των 20 °C. Τα υβριδικά συστήματα νερού μπορούν να εγκατασταθούν σε οριζόντιες ή κεκλιμένες οροφές κτηρίων (Σχήμα 1, δεξιά) ή ακόμα και στις προσόψεις κτηρίων, ανάλογα με την αρχιτεκτονική τους.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η σχεδίαση και η συμπεριφορά υβριδικών συσκευών PV/T νερού (PVT/WATER) που αναπτύχθηκαν στο Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών. Τα συστήματα δοκιμάστηκαν σε εξωτερικές συνθήκες προκειμένου να καταγραφούν τόσο η ηλεκτρική τους όσο και η θερμική τους συμπεριφορά. Σκοπός των συστημάτων αυτών είναι να παρέχουν ζεστό νερό και ηλεκτρισμό για οικιακές, αγροτικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Δεδομένου του μικρού μεγέθους των συσκευών αυτών, μπορούν να εγκατασταθούν σε μονοκατοικίες, πολυκατοικίες, μικρά ξενοδοχεία, κ.α. Οι συσκευές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά προς τις θερμοσιφωνικές συσκευές επίπεδων ηλιακών συλλεκτών (FPTU) ή των ολοκληρωμένων ηλιακών συσκευών συλλέκτη - αποθήκης θερμότητας (ICS) σε συνδυασμό με απομονωμένα ή διασυνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα. Προκειμένου να αυξηθεί η ενεργειακή απόδοση των συσκευών αυτών μελετήθηκε πειραματικά η δυνατότητα τοποθέτησης διάχυτων ανακλαστήρων [1, 2] μέσω των οποίων αυξάνεται η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων και ταυτόχρονα περιορίζονται οι οπτικές απώλειες, εξαιτίας του επιπρόσθετου γυάλινου καλύμματος. Τέλος, παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα υβριδικών PV/T συστημάτων με ή χωρίς τη χρήση γυάλινου διαφανούς καλύμματος αλλά και σε συνδυασμό αυτών με δεξαμενή νερού, όπου μέσω φυσικής κυκλοφορίας (θερμοσιφωνική ροή), δίνουν μια εικόνα για τη θέρμανση νερού.

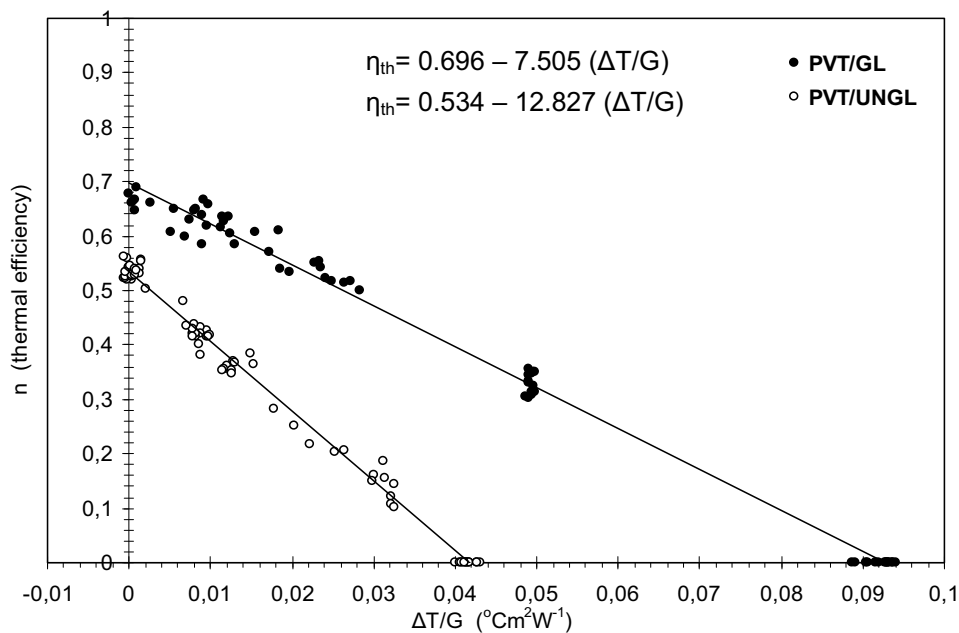
2. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ PVT.

Τα υβριδικά συστήματα PV/T νερού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κάλυψη αναγκών σε θερμό νερό οικιακής χρήσης αλλά και θέρμανσης χώρων, καλύπτοντας ταυτόχρονα και τις ηλεκτρικές ανάγκες των κτηρίων. Τα συστήματα PVT/WATER που μελετούνται αποτελούνται από φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου και η μονάδα απαγωγής θερμότητας είναι ένα μεταλλικό φύλλο χαλκού όπου πάνω σε αυτό έχουν τοποθετηθεί σωλήνες νερού προκειμένου να αποφευχθεί η άμεση επαφή του νερού με την οπίσθια επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου (Σχήμα 1, αριστερά). Ο θερμικός εναλλάκτης βρίσκεται σε θερμική επαφή με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και συνολικά το σύστημα είναι θερμικά μονωμένο προς το περιβάλλον από την πίσω και πλαϊνή επιφάνειά του.

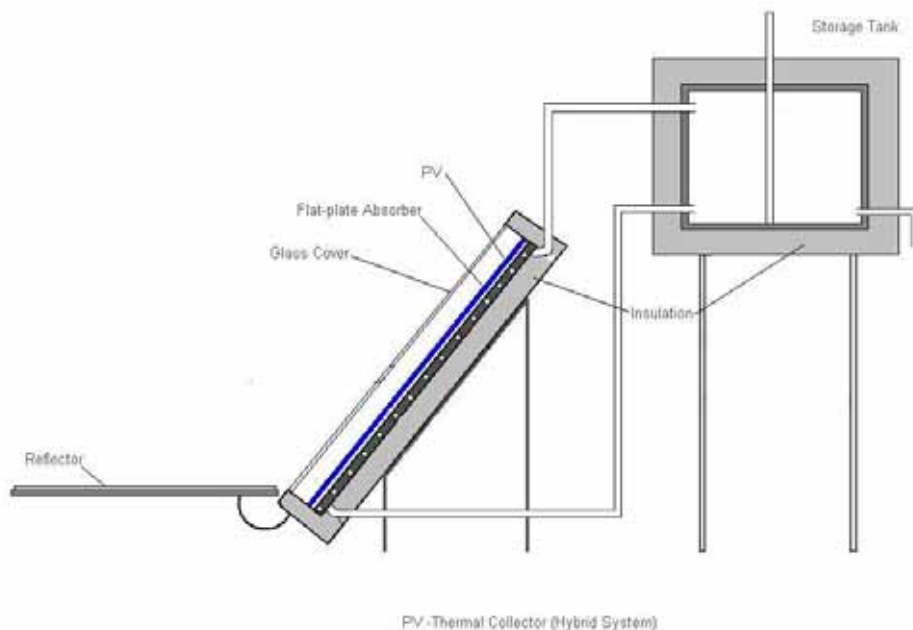


Σχήμα 1: Τομή των πειραματικών συσκευών PV/T (αριστερά) και εγκατάσταση των συστημάτων σε επικλινές οροφές κτιρίων (δεξιά).

Τα υβριδικά συστήματα PV/T χωρίς τη χρήση επιπρόσθετου γυάλινου καλύμματος (PVT/UNGL) παρέχουν ικανοποιητική ηλεκτρική απόδοση (εξαρτωμένων των συνθηκών λειτουργίας), αλλά η θερμική απόδοσή τους περιορίζεται στην περίπτωση υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας κυρίως γιατί οι θερμικές απώλειες από την εμπρόσθια επιφάνεια των πλαισίων είναι υψηλές. Το επιπρόσθετο γυάλινο διαφανές κάλυμμα (PVT/GL) αυξάνει την θερμική απόδοση των συστημάτων σε μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, αλλά οι επιπρόσθετες οπτικές απώλειες μειώνουν την ηλεκτρική απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να παρέχουν ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, κατορθώνοντας να εκμεταλλευτούν υψηλότερο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας. Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές δύο τύπων υβριδικών PV/T συστημάτων (PVT/UNGL και PVT/GL) αποτελούμενα από φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου και θερμικούς εναλλάκτες αποτελούμενους από φύλλο χαλκού όπου έχουν ενσωματωθεί σε αυτό χάλκινοι σωλήνες.

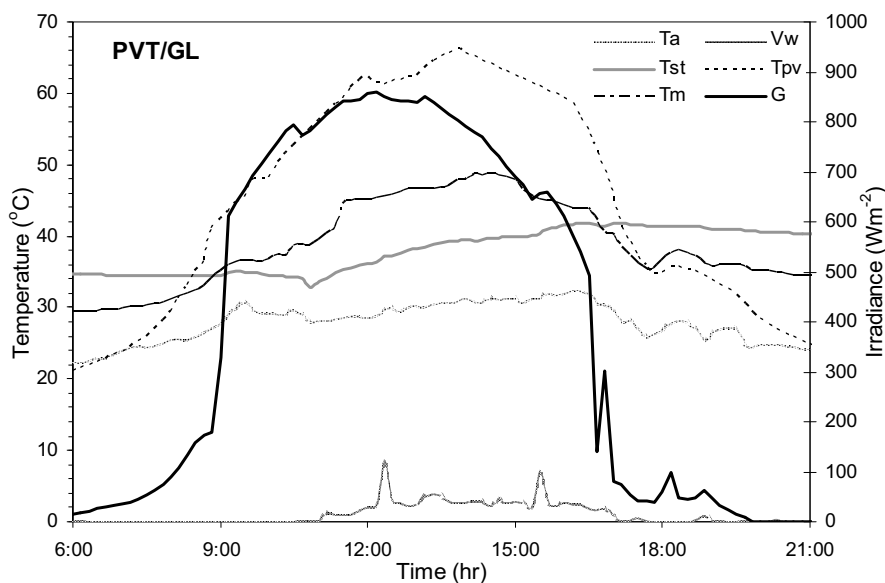


Σχήμα 2: Αποτελέσματα στιγμιαίας θερμικής απόδοσης των PV/T συστημάτων.



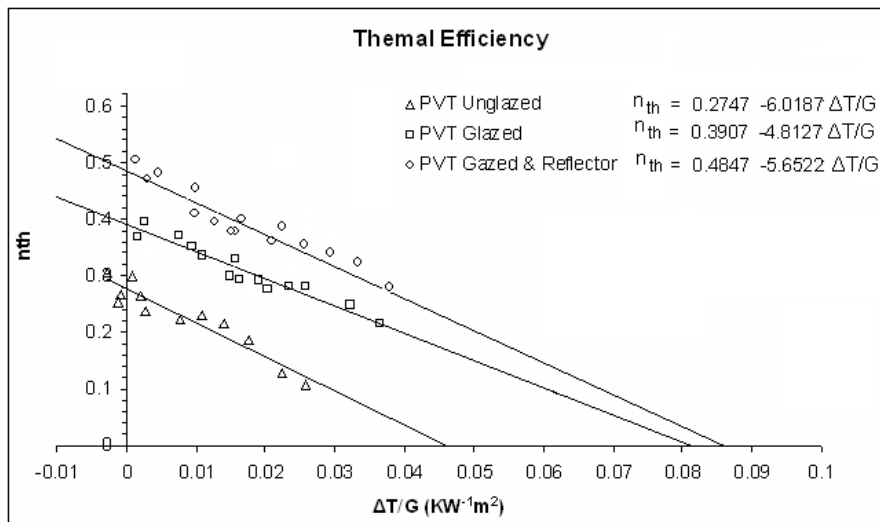
Σχήμα 3: Θερμοσιφωνική συσκευή υβριδικού φωτοβολταϊκού / θερμικού συστήματος PV/T

Χρησιμοποιήθηκαν εμπορικού τύπου φωτοβολταϊκά πλαίσια, με ηλεκτρική απόδοση που κυμαίνονταν μεταξύ 8% και 12%, ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας και τη χρήση ή μη επιπρόσθετου γυάλινου καλύμματος. Στη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς διοχετευόταν σε ένα ηλεκτρικό φορτίο, προσομοιώνοντας έτσι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Τα αποτελέσματα από τις πειραματικές δοκιμές που αφορούν τη θερμική απόδοση των συσκευών παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 2. Το σύστημα PVT/GL παρουσιάζει μια αξιοσημείωτα υψηλή θερμική απόδοση σε σχέση με το σύστημα PVT/UNGL, αλλά ταυτόχρονα η ηλεκτρική του απόδοση ελαττώνεται εξαιτίας των υψηλότερων οπτικών απωλειών.

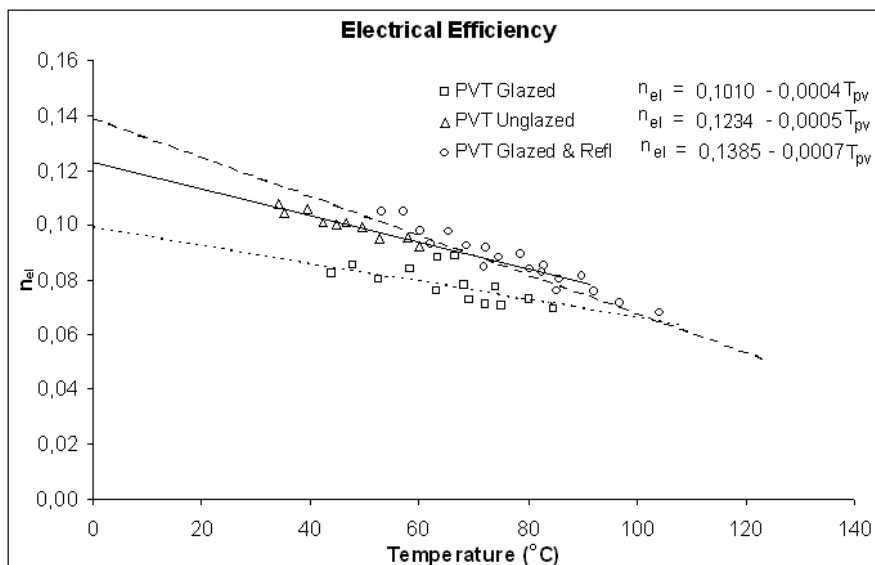


Σχήμα 4: Ημερήσια διαγράμματα μεταβολής θερμοκρασιών, έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και ταχύτητας πνέοντος ανέμου του συστήματος PVT/GL με φυσική κυκλοφορία.

Εκτός από τις πειραματικές δοκιμές σταθερών συνθηκών λειτουργίας, τόσο το σύστημα PVT/GL όσο και το σύστημα PVT/UNGL μελετήθηκαν πειραματικά στη διάρκεια ημερήσιας λειτουργίας τους αφού πρώτα συνδέθηκαν με δεξαμενή νερού με τη χρήση φυσικής και βεβιασμένης κυκλοφορίας νερού. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται σε τομή ο θερμοσιφωνικός τύπος από το υβριδικό PV/T σύστημα. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται αποτελέσματα από την ημερήσια λειτουργία του θερμοσιφωνικού συστήματος PVT/GL όπου δείχνονται οι μεταβολές της μέσης θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_{pv}), της θερμοκρασίας του κυκλοφορούντος νερού (T_m), της θερμοκρασίας του νερού εντός του δοχείου αποθήκευσης (T_{st}), της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_a), αλλά και της έντασης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (G) και της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου (V_w). Επιπλέον, τα συστήματα δοκιμάστηκαν πειραματικά χρησιμοποιώντας επίπεδους διάχυτους ανακλαστήρες, προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδρασή τους στην περίπτωση της εγκατάστασης των συστημάτων αυτών στις οριζόντιες οροφές κτηρίων [1, 2]. Η επίδραση των διάχυτων ανακλαστήρων κρίθηκε θετική σε όλες τις περιπτώσεις, λαμβανομένου του γεγονότος του επιπρόσθετου χαμηλού κόστους.



Σχήμα 5: Διαγράμματα μεταβολής της θερμικής απόδοσης των συστημάτων PV/T



Σχήμα 6: Διαγράμματα μεταβολής της ηλεκτρικής απόδοσης των συστημάτων PV/T

Οι ανακλαστήρες αυτοί τοποθετούνται μπροστά από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, όπως άλλωστε δείχνεται στο Σχήμα 3. Στα Σχήματα 5 και 6 παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα της μεταβολής της θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσης αντίστοιχα των συστημάτων αυτών όπου η βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας είναι σαφής. Οι θερμοσιφωνικές συσκευές επίπεδων ηλιακών συλλεκτών παρουσιάζουν υψηλότερες θερμικές αποδόσεις συγκριτικά με τις θερμοσιφωνικές συσκευές των υβριδικών PV/T συστημάτων εξαιτίας του υψηλότερου συντελεστή απορρόφησης της επιφάνειας του επίπεδου συλλέκτη αλλά και της συνολικά καλύτερης θερμικής μόνωσης του θερμοσιφωνικού συστήματος των επίπεδων συλλεκτών. Όμως η ανάγκη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι εξίσου σημαντική και έτσι ο αποτελεσματικός συνδυασμός συστημάτων για παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας μπορεί να αποτελέσει το μέλλον για κάλυψη οικιακών ενεργειακών αναγκών μέσω των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάζονται αποτελέσματα από τις πειραματικές δοκιμές Υβριδικών PV/T συστημάτων νερού όπως αυτά μελετήθηκαν στο Τμήμα Φυσικής στο Πανεπιστήμιο Πατρών. Τα συστήματα αυτά έχουν τη δυνατότητα να εγκατασταθούν σε αυτόνομες κατοικίες ή συγκροτήματα κατοικιών για την κάλυψη αναγκών για ηλεκτρισμό και θερμό νερό χρήσης, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου τόσο η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας όσο και η θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμαίνονται σε υψηλές τιμές. Τα αποτελέσματα από τις πειραματικές δοκιμές έδειξαν ότι τα υβριδικά PV/T συστήματα θερμοσιφωνικού τύπου μπορούν να παρέχουν ικανοποιητικά τόσο ηλεκτρική ενέργεια όσο και θερμική ενέργεια.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας καθώς και το Ίδρυμα Προώθησης της Έρευνας της Κύπρου για τη χρηματοδότηση της έρευνας μέσω του ερευνητικού διακρατικού προγράμματος Ελληνοκυπριακής Συνεργασίας ΚΥ-ΕΛ/0406/10.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M. and Yianoulis P. 2002. Hybrid Photovoltaic/Thermal solar systems. *Solar Energy* 72, 217-234.
2. Tripanagnostopoulos Y. and Souliotis M., Battisti R. and Corrado A. 2005. Energy, cost and LCA results of PV and hybrid PV/T solar systems. *Progress in Photovoltaics: Research and applications* 13, 235-250.
3. Kalogirou S.A. and Tripanagnostopoulos Y. 2006. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. 2006. *Energy Conversion and Management* 47, 3368-3382.
4. Kalogirou S.A. and Tripanagnostopoulos Y. 2007. Industrial application of PV/T solar energy systems. *Applied Thermal Engineering* 27 (8-9) 1259-1270.
5. Tripanagnostopoulos Y. and Souliotis M., Battisti R. and Corrado A. 2006. Performance, cost and Life-cycle assessment study of hybrid PVT/AIR solar systems. *Progress in Photovoltaics: Research and applications* 14, 65-76.
6. Tonui J.K. and Tripanagnostopoulos. 2007. Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable Energy* 32, 623-637.
7. Tonui J.K. and Tripanagnostopoulos. 2007. Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. *Solar Energy* 81, 498-511.