

## Περίληψη

Η τεχνολογία συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών είναι μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας επιτυγχάνοντας απόδοση μετατροπής σε ηλεκτρική άνω του 43%. Όμως, από το την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που συγκεντρώνεται στον απορροφητή, ένα μέρος μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ το υπόλοιπο μεταδίδεται στο περιβάλλον με την μορφή θερμότητας. Φωτοβολταϊκά κελιά (PV) υπό υψηλή συγκέντρωση ακτινοβολίας υφίστανται υψηλό θερμικό φορτίο που πρέπει να διαχέεται αποτελεσματικά προκειμένου να διατηρηθεί μια χαμηλή θερμοκρασία ΦΒ κελιού. Η αύξηση της θερμοκρασίας του ηλιακού κελιού CPV μειώνει σημαντικά την απόδοση του. Έτσι η αποτελεσματικότητα και η απόδοσή ενός συστήματος CPV μπορεί να βελτιωθεί με την εισαγωγή αποτελεσματικής θερμικής διαχείρισης ή ενός συστήματος ψύξης.

Η ψύξη ενός ηλιακού κελιού κύτταρο πρέπει να αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του σχεδιασμού του CPV, δεδομένου ότι οι χαμηλότερες θερμοκρασίες κελιού μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλότερες αποδόσεις μετατροπής. Αυτά τα σύγχρονα συστήματα ψύξης είναι και το αντικείμενο βιβλιογραφικής ανασκόπησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Έτσι έχουν αναπτυχθεί συστήματα ψύξης σωλήνων θερμότητας για να αφαιρείτε παθητικά η θερμότητα από το κελί CPV, και να απορρίψει τη θερμότητα στο περιβάλλον μέσω φυσικής συναγωγής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει μια επισκόπηση των μικρο- και νανο-τεχνολογιών που εφαρμόζονται για την παθητική ψύξη CPV και των συναφών τεχνολογιών παραγωγής (όπως μονολιθικές εφαρμογές). Μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών είναι, νανο-σωλήνες άνθρακα που αποτελούν μια από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες ψύξης CPV υψηλής αποδοτικότητας.

**Λέξεις κλειδιά: Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Τεχνολογίες ψύξης, Μικροκανάλια, Μικροθερμοσωλήνες, Θερμοσιφωνικό σύστημα, Νανορευστά.**

## **Abstract**

Concentrating photovoltaic technology is one of the fastest growing solar energy technologies achieving electrical conversion efficiency in excess of 43%. Photovoltaic (PV) cells under concentrated illumination experience a high heat load which must be dissipated efficiently in order to maintain a low cell temperature. The increase in temperature of solar CPV cell significantly reduces the performance; the efficiency of a CPV system can be improved by introducing effective thermal management or cooling system.

A portion of the energy is converted to electricity, while the remainder must be removed as waste heat. Solar cell cooling must be an integral part of the CPV design, since lower cell temperatures result in higher conversion efficiencies. A heat pipe cooling system was developed to passively remove the high heat flux waste heat at the CPV cell, and reject the heat to ambient through natural convection.

This thesis presents an overview of micro- and nano-technologies applicable to passive CPV cooling and associated manufacturing technologies (such as monolithic applications). Among the different technologies, carbon nano-tubes and high-conductive coating are the most promising technologies to offer the best CPV cooling performance.

**Keywords: Concentrating Photovoltaic Systems, Cooling technologies, Microchannels, MicroHeatPipes, Thermosyphonic systems, Nanofluids.**

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract.....	2
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Σύντομη Ανάλυση Φωτοβολταϊκών .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>10</b>
<b>1.2 Τύποι Φωτοβολταϊκών Στοιχείων .....</b>	<b>12</b>
<b>1.3 Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά - CPV.....</b>	<b>14</b>
1.3.1 Συσχέτιση ηλεκτρικής απόδοσης με τη θερμοκρασία λειτουργίας .....	17
<b>1.4 Τύποι Συγκεντρωτικών Φωτοβολταϊκών.....</b>	<b>18</b>
1.4.1 Τύποι οπτικών μέσων .....	18
1.4.2 Τύποι συστημάτων παρακολούθησης του ήλιου(SolarTrackers).....	20
<b>1.5 Εισαγωγή στις τεχνολογίες ψύξης .....</b>	<b>23</b>
1.5.1 Κατάταξη συστημάτων ψύξης .....	23
<b>1.6 Στόχος της ψύξης συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών .....</b>	<b>24</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ψύξη συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1 Απαιτήσεις ψύξης.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2 Βασικές αρχές .....</b>	<b>27</b>
2.2.1 Απόδοση συστημάτων.....	28
2.2.2 Τύποι γεωμετριών συγκεντρωτικών ΦΒ.....	28
<b>2.3 Εφαρμογές ψύξης συγκεντρωτικών ΦΒ .....</b>	<b>31</b>
2.3.1 Περίπτωση εφαρμογής παθητικής ψύξης σε ΦΒ μονού κελιού 32	
2.3.2 Εφαρμογή παθητικής ψύξης για γραμμικά ΦΒ.....	34
2.3.3 Εφαρμογή ψύξης πυκνά δομημένων ΦΒ κελιών.....	35
<b>2.4 Τεχνολογίες μικρο- και νανο-ψύξης.....</b>	<b>37</b>
<b>2.5 Ψυκτικές διατάξεις.....</b>	<b>37</b>
2.5.1 Απαγωγός θερμότητας .....	38
<b>2.6 Φυσική συναγωγή σε μικροκανάλια .....</b>	<b>41</b>

2.6.1	Κατασκευή μικροκαναλιών .....	42
<b>2.7</b>	<b>Νανοσωλήνες άνθρακα .....</b>	<b>44</b>
<b>2.8</b>	<b>Παραγωγή νανοσωλήνων άνθρακα.....</b>	<b>46</b>
2.8.1	Μέθοδος εκκένωσης τόξου (arc discharge).....	47
2.8.2	Μέθοδος χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) .....	48
2.8.3	Μέθοδος εξάχνωσης με laser .....	49
2.8.4	Μέθοδος μονοξειδίου άνθρακα υψηλής πίεσης .....	50
<b>2.9</b>	<b>Νανოსύρματα .....</b>	<b>50</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Χρήση νανο-ρευστών.....</b>		<b>52</b>
<b>3.1</b>	<b>Εισαγωγή στην τεχνολογία.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2</b>	<b>Ορισμός και πλεονεκτήματα νανο-ρευστών.....</b>	<b>52</b>
<b>3.3</b>	<b>Μέθοδοι παραγωγής νανο-ρευστών .....</b>	<b>54</b>
3.3.1	Διαδικασία παραγωγής ενός βήματος .....	56
3.3.2	Διαδικασία παραγωγής δύο βημάτων.....	59
<b>3.4</b>	<b>Μεταφορά θερμότητας μέσω φυσικής συναγωγής .....</b>	<b>60</b>
3.4.1	Μονοφασικό μοντέλο.....	61
3.4.2	Διφασικό μοντέλο.....	61
<b>3.5</b>	<b>Μοντέλα ιδιοτήτων νανο-ρευστών .....</b>	<b>64</b>
3.5.1	Θερμική αγωγιμότητα νανο-ρευστών.....	66
<b>3.6</b>	<b>Νανο-ρευστά με προσθήκη νανοσωλήνων άνθρακα .....</b>	<b>72</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μικρο-θερμοσωλήνες .....</b>		<b>77</b>
<b>4.1</b>	<b>Εισαγωγή στους θερμοσωλήνες.....</b>	<b>77</b>
<b>4.2</b>	<b>Μέθοδος κατασκευής .....</b>	<b>77</b>
<b>4.3</b>	<b>Τρόπος λειτουργίας θερμοσωλήνων .....</b>	<b>78</b>
<b>4.4</b>	<b>Μετάβαση στους μικροθερμοσωλήνες.....</b>	<b>81</b>
4.4.1	Συσχέτιση θερμική απόδοσης μικροθερμοσωλήνων και διατομής .....	82
4.4.2	Μικροθερμοσωλήνες με αρτηρίες.....	84
4.4.3	Εργαζόμενο ρευστό μικροθερμοσωλήνων .....	85
4.4.4	Κατασκευή μικροθερμοσωλήνων .....	86
<b>4.5</b>	<b>Συνήθεις εφαρμογές .....</b>	<b>88</b>

<b>4.6</b>	<b>Παράδειγμα εφαρμογής θερμοσωλήνων σε σύστημα CPV</b>	<b>90</b>
<b>4.7</b>	<b>Άλλες μελέτες ψύξης συγκεντρωτικών ΦΒ με θερμοσωλήνες.....</b>	<b>95</b>
<b>4.8</b>	<b>Θερμοσιφωνικό σύστημα.....</b>	<b>98</b>
4.8.1	Κλειστό θερμοσιφωνικό σύστημα δύο φάσεων .....	98
4.8.2	Κατασκευή θερμοσιφωνικού συστήματος .....	99
	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>101</b>
	<b>Μελλοντικές προοπτικές.....</b>	<b>102</b>
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>103</b>

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης ενός Φ/Β στοιχείου (Wurfel P.,2005) .....	11
Εικόνα 1.2: Συστοιχία συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών στοιχείων (www.renewableenergyworld.com).....	16
Εικόνα 1.3: Σύγκριση των διαφόρων μοντέλων για τη μεταβολή της απόδοσης των κελιών με τη θερμοκρασία (O'LearyandClements) .....	17
Εικόνα 1.4: Διαμορφώσεις φακών Fresnel α) σημειακής εστίασης, β) γραμμικής εστίασης, γ) γραμμικός καλυμμένος με θόλο (TripanagnostopoulosY., 2007) .....	19
Εικόνα 1.5: Ανακλαστικοί τύποι συγκεντρωτικών μέσων α) δίσκος παραβολικής επιφάνειας β) γραμμικό κυλινδροπαραβολικό κάτοπτρο που εστιάζει σε μια γραμμική εστία (TripanagnostopoulosY. etal., 2009) .....	20
Εικόνα 1.6: Τύποι ικνηλάτισης του ήλιου σε διπλό άξονα (α) Ικνηλάτης δύο αξόνων με την παρακολούθηση των συντεταγμένων του ύψους και αζιμούθιου που τοποθετείται σε ένα βάθρο. (β) Ρύθμιση παρακολούθησης περιστροφής-κλίσης που χρησιμοποιεί τον κεντρικό σωλήνα ροπής. (γ) Ρύθμιση παρακολούθησης περιστροφής-κλίσης που χρησιμοποιεί πλαίσια μονάδων. (δ) Ικνηλάτης δύο αξόνων περιστροφικών επιφανειών. (TripanagnostopoulosY. etal., 2007) .....	21
Εικόνα 1.7: Τύποι ικνηλατικής του ήλιου ένας άξονα. (α) Οριζόντιος ικνηλάτης ενός άξονα με την κυλινδροπαραβολικό κάτοπτρο. (β) πολικός ικνηλάτης ενός άξονα με το κυλινδροπαραβολικό κάτοπτρο. (TripanagnostopoulosY. etal., 2007).....	22
Εικόνα 1.8: Σχηματική αναπαράσταση μεθόδων παθητικής και ενεργητικής ψύξης ηλιακών κελιών (Zhangbo et al., 2009).....	24
Εικόνα 2.1. Συγκέντρωση μονού κελιού: Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την διαθέσιμη επιφάνεια για απαγωγή θερμότητας (RoynesA. 2005) .....	29
Εικόνα 2.2: Γραμμικός συγκεντρωτής - Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν την περιοχή που είναι διαθέσιμη για απαγωγή θερμότητας (Roynes A. 2005).....	30
Εικόνα 2.3: Πυκνά δομημένα κελιά: Η διαθέσιμη περιοχή για ψύξη είναι μόνο το πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού (Roynes A. 2005).....	31
Εικόνα 2.4: Εφαρμογή παθητικής ψύξης σε κελί από τον Edenburn (1980) .....	32

Εικόνα 2.5: Σχέδιο παθητικής ψύξης για γραμμικό ΦΒ σχεδιάστηκε του Edenburn(1980) .....	35
Εικόνα 2.6: Σχέδιο εφαρμογής ψύξης πλαισίου από τον Horne (1993)	36
Εικόνα 2.7: Θερμική αγωγιμότητα ως προς το συντελεστή θερμικής διαστολής διαφόρων υλικών (MicheliL. etal., 2013) .....	39
Εικόνα 2.8: Απεικόνιση απαγωγού θερμότητας CVD διαμαντιού (MicheliL. etal., 2013) .....	41
Εικόνα 2.9: Σχηματική απεικόνιση κατασκευής μικροκαναλιού σε πυρίτιο (Tjerkstra et al., 1997) .....	42
Εικόνα 2.10: Μονοφλοιικός (αριστερά) και πολυφλοιικός (δεξιά) νανοσωλήνας άνθρακα (MicheliL. etal., 2013).....	45
Εικόνα 2.11: Εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας από τη θερμοκρασία για θερμοκρασίες ως 400 K (Berber et al. 2000) .....	46
Εικόνα 2.12: Πειραματική διάταξη αντιδραστήρα εκκένωσης τόξου και TEM εικόνες των παραγόμενων νανοσωλήνων άνθρακα ανάλογα της σύστασης της ράβδου της ανόδου (HanX. etal.,2009) .....	47
Εικόνα 2.13: Απεικόνιση διάταξης για την παραγωγή νανοσωλήνων με τη μέθοδο της εξάχνωσης με laser (Maser et al. 2002).....	50
Εικόνα 3.1: Μήκος κλίμακας και χαρακτηριστικά παραδείγματα (Serrano et al. 2009).....	53
Εικόνα 3.2: Διαδικασία παραγωγής ενός βήματος (SaidurR. etal. 2011) .....	57
Εικόνα 3.3: Παραγωγή νανο-ρευσιτών με τη χρήση συσκευής μάγνητρον (ενός βήματος) (HwangY. etal. 2008).....	58
Εικόνα 3.4: Σύγκριση της θερμικής αγωγιμότητας κοινών υγρών, πολυμερών και στερεών (WenD. etal. 2009).....	68
Εικόνα 3.5: Ενίσχυση θερμικής αγωγιμότητας νανοσωματιδίων χρυσού 2 nm σε νερό ως συνάρτηση της συγκέντρωσης όγκου (Choi etal. 2006) ..	69
Εικόνα 3.6: Θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία (Shen 2006) .....	70
Εικόνα 3.7: Ανάπτυξη μελετών/ερευνών από την κοινότητα επιστημόνων για τα νανορεστά (SaidurR. etal. 2011).....	71
Εικόνα 3.8: Σύνοψη δεδομένων για τα οξείδια νανο-ρευσιτών και η οριακή γραμμή που δείχνει την απόδοση των νανο-ρευσιτών (Saidur R. et al. 2011).....	71

Εικόνα 3.9: Ενεργή θερμική αγωγιμότητα για διαφορετικές συγκέντρωσης (Jiang et al. 2009).....	72
Εικόνα 3.10: Πειραματικά δεδομένα σε σχέση με τα προβλεπόμενα δεδομένα του τροποποιημένου μοντέλου των Yu-Choi (2009) .....	73
Εικόνα 3.11: Επίδραση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων στην απόδοση του θερμοσωλήνα (Naphonetal. 2009).....	75
Εικόνα 3.12: Συντελεστές μεταφοράς θερμότητας βρασμού με 1% κατόγκο CNT στο ψυκτικό R134a (ParkK. etal. 2007) .....	76
Εικόνα 4.1: Κοντινή άποψη ψύκτρας CPU με θερμοσωλήνες (FaghriA. 2014) .....	77
Εικόνα 4.2: Αρχή λειτουργίας θερμοσωλήνα (FaghriA. 2014) .....	79
Εικόνα 4.3: Σχέδιο CAD επίπεδου θερμοσωλήνα πάχους 500 μm με σύστημα επιστροφής υγρού (FaghriA. 2014) .....	81
Εικόνα 4.4: Σχέδιο CAD από ψύκτρα με επίπεδο θερμοσωλήνα, διανομέα θερμότητας και ανεμιστήρα (FaghriA. 2014) .....	81
Εικόνα 4.5: Θερμική αγωγιμότητα δίσκου πυριτίου με συστοιχία ορθογωνικών θερμοσωλήνων, τριγωνικών θερμοσωλήνων και χωρίς συστοιχία θερμοσωλήνων (Peterson et al. ,1993).....	82
Εικόνα 4.6: Μικροθερμοσωλήνας με αρτηρίες (LiuW. etal., 2011) .....	84
Εικόνα 4.7: Κάθετες διατομές των μικροθερμοσωλήνων που κατασκευάστηκαν από τον LeBerreetal. (2003) .....	87
Εικόνα 4.8: Διαδικασία κατασκευής μικροθερμοσωλήνα διατομής αστεριού (Kang S, 2002).....	88
Εικόνα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση ενός συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού και του θερμοσωλήνα που αποβάλλει την παραγόμενη θερμική ενέργεια (όχι υπό κλίμακα)( AndersonWilliamG) .....	91
Εικόνα 4.10: Συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό σύστημα της EMCORE ( AndersonWilliamG)).....	92
Εικόνα 4.11: Σύστημα ψύξης με θερμοσωλήνες με σέλα αλουμινίου για το συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό κελί, θερμοσωλήνα νερού από χαλκό και πτερύγια από αλουμίνιο ( Anderson William G) .....	93
Εικόνα 4.12: Σύστημα ψύξης με θερμοσωλήνα το οποίο προτάθηκε από τους Akbarzadehκαι Wadowski (1996).....	96
Εικόνα 4.13: Σύστημα ψύξης με σωλήνα θερμότητας όπως προτάθηκε από τον Russell (1982) .....	98



## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 3.1: Θερμική αγωγιμότητα των κυριότερων υλικών διασποράς για νανο-ρευστά (SaidurR. etal. 2011).....	55
Πίνακας 3.2: Θερμική αγωγιμότητα των κυριότερων ρευστών βάσης (SaidurR. etal. 2011) .....	55
Πίνακας 3.3: Μοντέλα ιξώδους για νανο-ρευστά (SaidurR. etal. 2011).	65
Πίνακας 3.4: Μοντέλα θερμικής αγωγιμότητας για νανο-ρευστά (SaidurR. etal. 2011) .....	65
Πίνακας 3.5: Παρουσίαση θερμικής αγωγιμότητας διαφόρων τύπων νανορευστών (Shen 2006).....	67
Πίνακας 3.6: Ερευνητικές μελέτες συνδυασμού νανοσωματιδίων με ψυκτικά υγρά (SaidurR. etal. 2011).....	74
Πίνακας 4.1: Εργαζόμενα μέσα σε θερμοσωλήνες με τα αντίστοιχα εύρη λειτουργίας (FaghriA. 2014).....	80
Πίνακας 4.2: Επισκόπηση δημοσιεύσεων στη χρήση νανορευστών σε μικροθερμοσωλήνες (LiuZ-H. etal., 2012).....	86
Πίνακας 4.3: Προηγούμενες μελέτες στην παθητική ψύξη συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών με θερμοσωλήνες.....	90
Πίνακας 4.4: Απαιτήσεις ψύξης συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού κελιού (Anderson William G).....	93
Πίνακας 4.5: Παρουσίαση των παραμέτρων του συστήματος( Anderson William G) .....	94
Πίνακας 4.6: Θερμοκρασία λειτουργίας συναρτήσει του πάχους των πτερυγίων ( Anderson William G).....	94

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Σύντομη Ανάλυση Φωτοβολταϊκών

## 1.1 Εισαγωγή

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν τις ρίζες τους στα διαστημικά προγράμματα και χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά το 1960 σε δορυφόρους. Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία αναπτύχθηκαν από τη γαλιόμορφη πυριτίδα για να τροφοδοτήσουν τους διαστημικούς δορυφόρους με την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζονταν για την λειτουργία των συσκευών τους. Από τότε μέχρι σήμερα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία βρήκαν πολλές επιγειακές εφαρμογές σε διάφορους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας για δύο βασικούς λόγους. Ο ένας είναι η ευκολία με την οποία παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια και ο άλλος τα διάφορα δισεπίλυτα προβλήματα που παρουσιάζει ο κλασικός τρόπος παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας τομέας που βοήθησε στην επέκταση της χρήσης τους ήταν οι εφαρμογές για πολύ μικρές ποσότητες ισχύος όπως σε τηλεπικοινωνίες. (Goetzberger A. et al., 2005)

Η κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων έχει μεταφερθεί από τα εξειδικευμένα εργαστήρια στα εξειδικευμένα εργοστάσια. Αυτό έχει επιφέρει οικονομία κλίμακας και αύξηση της αυτοματοποίησης και την τυποποίηση της κατασκευαστικής διαδικασίας. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, μεγάλα ποσά ηλιακής ενέργειας μπορούν να μετατραπούν σε ηλεκτρική με την χρησιμοποίηση κατασκευών που αποτελούνται από φωτοβολταϊκά στοιχεία. (Goetzberger A. et al., 2005)

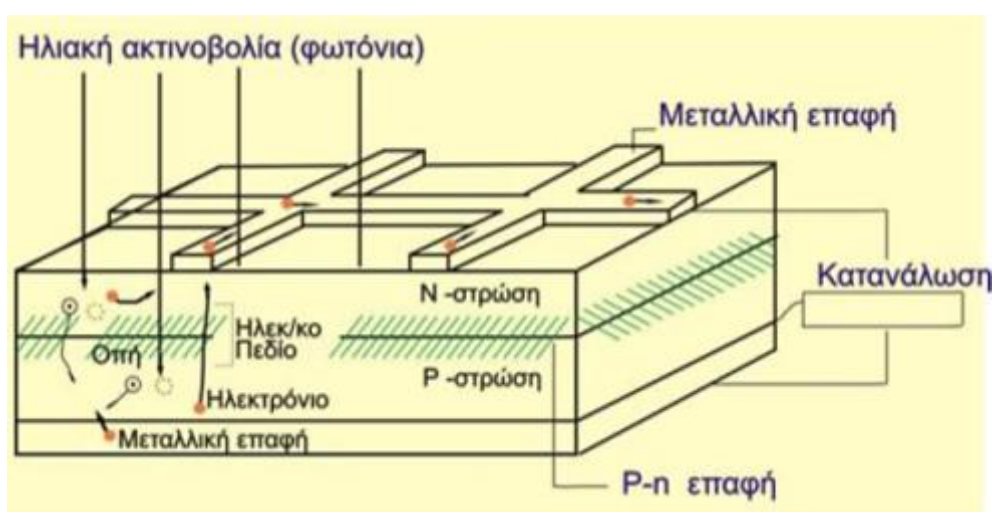
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς που είναι στοιχεία τετρασθενή με τετραεδρική κρυσταλλική δομή, όπως το πυρίτιο (Si). Στα στοιχεία αυτά δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και δε διαθέτουν ηλεκτρική αγωγιμότητα στην υποθετική περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή είναι εντελώς υποβαθμισμένος ενεργειακά. Όταν όμως απορροφήσουν κάποια αξιόλογη ενέργεια, π.χ. με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας, πραγματοποιείται μια ριζική μεταβολή. (Wurfel P., 2005)

Όταν το ηλιακό φως προσπέσει στα φωτοβολταϊκά στοιχεία ελευθερώνει ηλεκτρικά φορτία στο εσωτερικό τους τα οποία με την ενέργεια που παίρνουν κινούνται ελεύθερα και μπορούν να περάσουν από έναν καταναλωτή όπως είναι μια λάμπα ή ένας κινητήρας και να τον θέσουν σε λειτουργία. Τα ηλεκτρόνια αυτά απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους στο κρυσταλλικό πλέγμα, χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον

ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Είναι φανερό ότι το ενεργειακό διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στη ζώνη αγωγιμότητας εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους, ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής. (Wurfel P., 2005)

Αν τώρα στον τετρασθενή ημιαγωγό Si, γίνει πρόσμιξη με κάποιο πεντασθενές στοιχείο (φώσφορος, P) ή με κάποιο τρισθενές στοιχείο (βόριο, B), τότε παράγεται ημιαγωγός προσμίξεως τύπου-n και τύπου-p αντίστοιχα. Όταν ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου p έλθει σε στενή επαφή με ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου n, δηλαδή σχηματιστεί μια ένωση p-n (διάταξη διόδου ημιαγωγού), τότε ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου τύπου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι πολύ λιγότερα. (Wurfel P., 2005)

Οι πρόσθετοι φορείς φορτίζουν τους χώρους που φτάνουν με πλεονάζοντα φορτία, έτσι το δυναμικό στο χώρο p γίνεται θετικότερο ως προς το αντίστοιχο του χώρου n όπου έχουν καταλήξει τα ηλεκτρόνια που δημιουργήθηκαν στην επαφή. Η συνεχής κίνηση των φωτοδημιουργούμενων φορέων κάτω από την επίδραση του ισχυρού πεδίου αποτελεί ρεύμα με φορά αυτή του ενδογενούς πεδίου, δηλαδή από τον ημιαγωγό τύπου n στον ημιαγωγό τύπου p και ονομάζεται φωτόρρευμα. Η τιμή του είναι ευθέως ανάλογη του πλήθους των απορροφημένων φωτονίων το οποίο είναι ανάλογο των προσπίπτοντων φωτονίων των οποίων η συνολική ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας αποτελεί την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. (LuqueA. et al., 2003)



Εικόνα 1.1: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης ενός Φ/Β στοιχείου (Wurfel P.,2005)

## 1.2 Τύποι Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία διακρίνονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες, ανάλογα με το υλικό παρασκευής, τη δομή του βασικού υλικού καθώς και τον τρόπο παρασκευής. Έτσι, έχουμε την παρακάτω κατηγοριοποίηση: (LuqueA. etal., 2003)

### Α) Φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου μεγάλου πάχους»

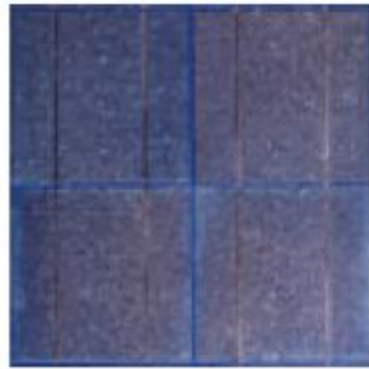
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si )



- Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)



- Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)



## **B) Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών επιστρώσεων (thin film)**

- Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός ( $\text{CuInSe}_2$  ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)



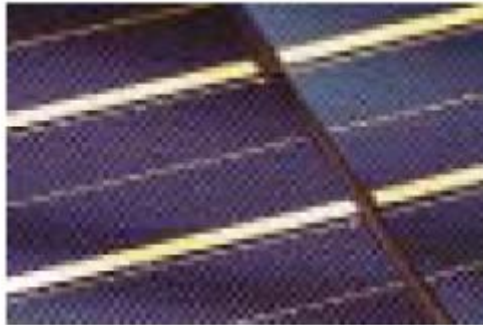
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)



- Τελουριούχο Κάδμιο ( $\text{CdTe}$ )



- Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)



## Γ) Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

### 1.3 Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά - CPV

Η ενέργεια από φωτοβολταϊκά (Φ/Β) είναι μέχρι και σήμερα μια από τις ακριβότερες πηγές ενέργειας, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες, αλλά και τις συμβατικές πηγές. Μια υποσχόμενη προοπτική μείωσης του κόστους των Φ/Β είναι η ελάττωση του πλήθους των απαιτούμενων ημιαγωγικών υλικών. Ορισμένες εταιρίες κατασκευάζουν ηλιακά κελιά με λεπτό πλακίδιο (wafer) πυριτίου, με σκοπό τη μείωση του κόστους (KurtzS., 2009). Άλλες εταιρίες χρησιμοποιούν φακούς ή κάτοπτρα, ώστε να συγκεντρώνεται η ηλιακή ακτινοβολία επάνω στα κελιά: Η αντικατάσταση της ημιαγωγικής επιφάνειας με συγκεντρωτικά κάτοπτρα ή φακούς χαμηλότερου κόστους, αποτελεί ένα τρόπο μείωσης του κόστους παραγωγής ενέργειας από

φωτοβολταϊκά. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά (*Concentrating Photovoltaic-CPV*), τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.2.

Όπως αναφέρθηκε, τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούν φακούς ή κάτοπτρα για να συγκεντρώσουν το φως του ήλιου επάνω σε ένα δέκτη. Αυτό επιτρέπει την μείωση της επιφάνειας φωτοβολταϊκών κελιών που απαιτείται για την παραγωγή ενός δεδομένου ποσού ισχύος. Ο στόχος είναι να μειωθεί σημαντικά το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται με την αντικατάσταση των φωτοβολταϊκών κελιών, με το λιγότερο ακριβό οπτικό υλικό.

Τα συγκεντρωτικά συστήματα μπορούν εύκολα να υπερβούν την απόδοση ενεργειακής μετατροπής του 20%. Στο μέλλον, η χρήση των κελιών πολυστρωματικών ενώσεων, αναμένεται να αυξήσει την απόδοση πάνω από 30%. Ενώ η έννοια είναι απλή, και έχει μελετηθεί από τη στιγμή που τα φωτοβολταϊκά έκαναν την εμφάνισή τους, η πρακτική έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα δύσκολη. Οι βασικές τεχνικές δυσκολίες, εντούτοις, οφείλονται στην ανάγκη των συγκεντρωτικών συστημάτων για αντοχή κάτω από υψηλές τιμές ροής θερμότητας και στην μεγάλη ηλεκτρική πυκνότητα ρεύματος, συν την ανάγκη για τα οικονομικώς πιο αποδοτικά και αξιόπιστα συστήματα παρακολούθησης του ήλιου (RoynceA. etal, 2005).

Μόνο ένα κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα Φ/Β κελί μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η υπόλοιπη απορροφούμενη ενέργεια μετατρέπεται εντός του ηλιακού κελιού σε θερμική ενέργεια (RoynceA. etal, 2005). Ως το 2011, οι υψηλότερες αποδόσεις που είχαν επιτευχθεί σε κελιά πυριτίου απλής ένωσης (FriedmanDJ, 2010) ήταν 25%, ενώ σε κελιά πολυστρωματικών ενώσεων (GreenMA. etal. 2012) ήταν 34,1%. Όταν χρησιμοποιήθηκε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία, καταγράφηκε αύξηση του βαθμού απόδοσης και στις δύο περιπτώσεις, οι οποίοι έφτασαν στο 27,6% και στο 43,5%, αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ενέργειας δε μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια και έτσι αποβάλλεται ως θερμότητα.



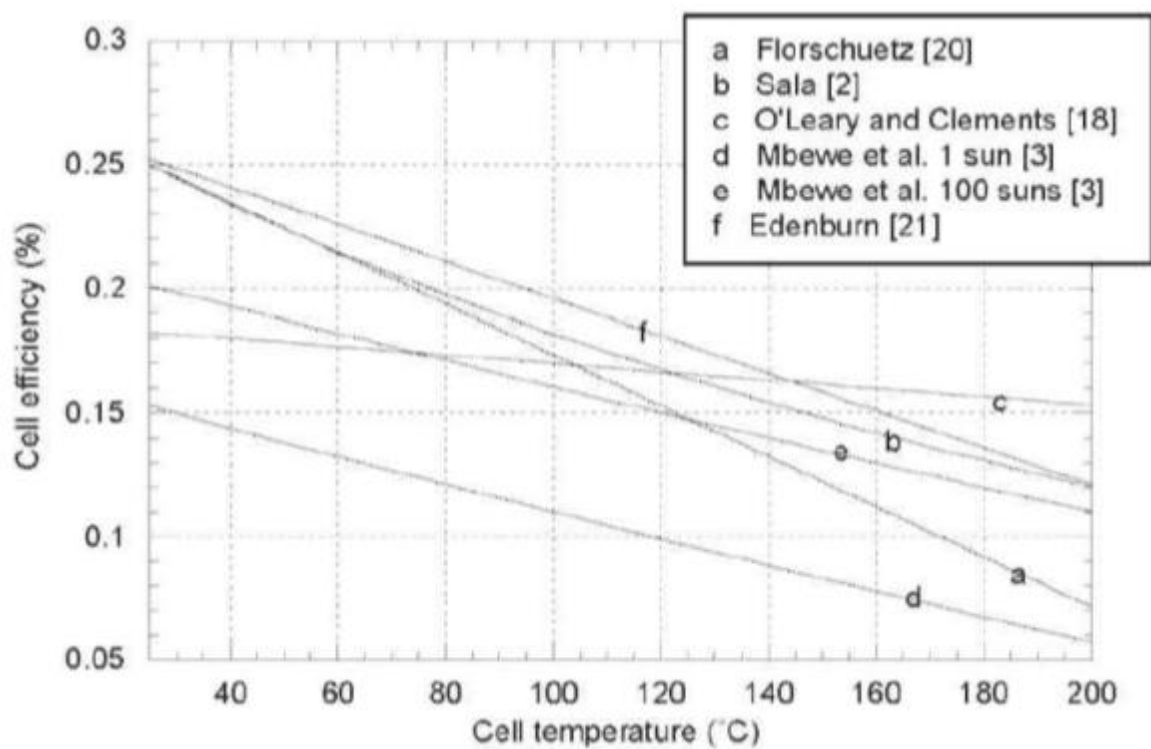
**Εικόνα 1.2: Συστοιχία συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών στοιχείων  
([www.renewableenergyworld.com](http://www.renewableenergyworld.com))**

Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού κελιού μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία κατανέμεται μη ομοιόμορφα κατά μήκος του κελιού. Οι Martinelli και Stefancich (Martinelli G. et al., 2007) συμπέραναν ότι το γεγονός αυτό μπορεί να θεωρηθεί συνέπεια του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου, ο οποίος θέτει ένα όριο στο βαθμό μετατροπής της ενέργειας μιας πηγής δεδομένης θερμοκρασίας από ένα μετατροπέα/καταβόθρα θερμότητας. Η μελέτη έδειξε επίσης ότι η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να προκαλέσει μακροπρόθεσμα τη γήρανση του κελιού (ZhangboY. et al., 2009). Η αύξηση της θερμοκρασίας θα οδηγήσει επίσης σε μηχανικές καταπονήσεις του κελιού, όπως η παραμόρφωση της επιφάνειας του κελιού, αποκόλληση του διαφανούς στρώματος και στη δημιουργία μικρορωγμών στο κελί. Αυτό οφείλεται στους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής των υλικών της δομής του κελιού. Η θερμοκρασιακή μεταβολή και, κατά συνέπεια, οι διαφορετικοί συντελεστές θερμικής διαστολής μπορούν να οδηγήσουν σε άμεση αστοχία των εύθραυστων υλικών και ή σε αστοχία του κελιού λόγω κόπωσης.



### 1.3.1 Συσχέτιση ηλεκτρικής απόδοσης με τη θερμοκρασία λειτουργίας

Η απόδοση του κελιού μεταβάλλεται τόσο με τη θερμοκρασία όσο και με την συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα για την εξάρτηση από την θερμοκρασία και τη συγκέντρωση. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.3 τα περισσότερα μοντέλα προβλέπουν μια σχεδόν ίδια εξάρτηση στο χαμηλότερο εύρος θερμοκρασιών (ευθείες γραμμές). Οι διαφορετικές τιμές που προβλέφθηκαν οφείλονται στο γεγονός ότι τα κελιά έχουν διαφορετικές μέγιστες αποδόσεις. Γι'αυτό, μια απλή προσέγγιση χρησιμοποιείται θεωρώντας γραμμική μείωση της απόδοσης με τη θερμοκρασία, και καμία εξάρτηση από τη συγκέντρωση.



Εικόνα 1.3: Σύγκριση των διαφόρων μοντέλων για τη μεταβολή της απόδοσης των κελιών με τη θερμοκρασία (O'LearyandClements)

Έτσι έχουμε την ακόλουθη σχέση

$$n = a (1 - bT_c)$$

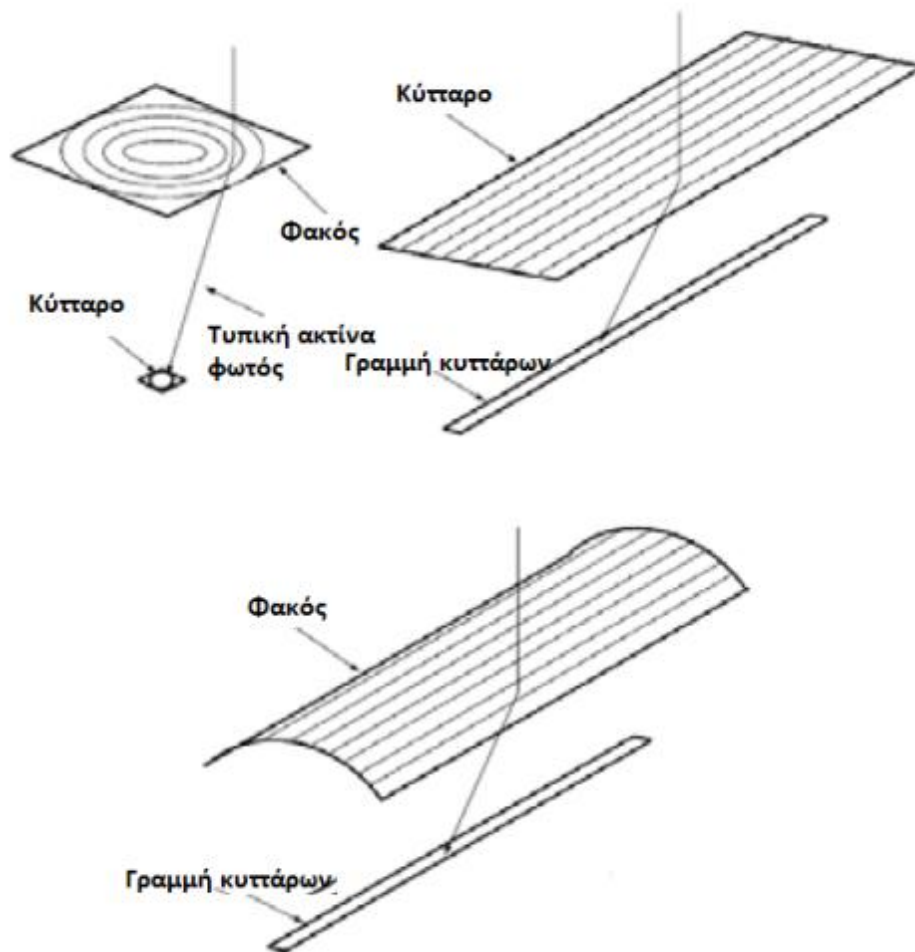
Όπου  $a$  και  $b$  είναι παράμετροι που περιγράφουν ένα συγκεκριμένο κύτταρο και  $n$  η απόδοσή του σε μια δοθείσα θερμοκρασία  $T_c$ . Η ηλεκτρική ισχύς εξόδου δίνεται από την σχέση

$$P_{el} = nT_c$$

## **1.4 Τύποι Συγκεντρωτικών Φωτοβολταϊκών**

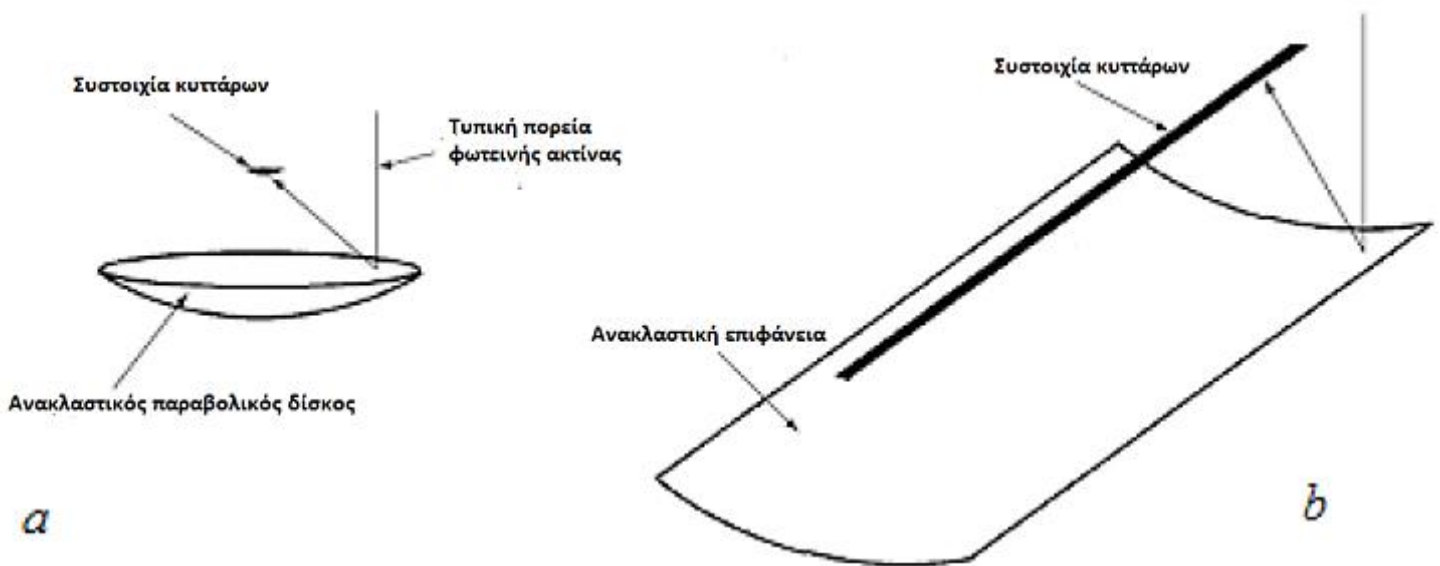
### **1.4.1 Τύποι οπτικών μέσων**

Τα περισσότερα συγκεντρωτικά συστήματα χρησιμοποιούν είτε τους φακούς είτε τα παραβολικά και τα κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα. Επιλέγονται συνήθως οι φακοί Fresnel. Ένας φακός Fresnel είναι ο λεπτός φακός όπου σε κάθε σημείο ή τμήμα του, η διάθλαση των προσπίπτουσών ακτίνων είναι διαφορετική, με αποτέλεσμα την σύγκλισή τους σε ένα εστιακό σημείο ή γραμμή. Έτσι, οι φακοί Fresnel ανάλογα με την συμμετρία που έχουν, μπορούν να εστιάζουν το φως σε ένα σημείο (κυκλική συμμετρία) ή σε μια γραμμή ( $x$  ή  $y$  συμμετρία). Οι φακοί σημειακής εστίασης, χρησιμοποιούν συνήθως ένα φωτοβολταϊκό κελί πίσω από κάθε φακό, ενώ οι φακοί γραμμικής εστίασης έχουν μια σειρά φωτοβολταϊκών κελιών. (Tripanagnostopoulos Y., 2007)



**Εικόνα 1.4: Διαμορφώσεις φακών Fresnel α) σημειακής εστίασης, β) γραμμικής εστίασης, γ) γραμμικός καλυμμένος με θόλο (ΤριpanagnostopoulosY., 2007)**

Μια εναλλακτική περίπτωση στη χρήση των φακών είναι η χρήση των κατόπτρων. Όπως είναι γνωστό, μια ανακλαστική επιφάνεια με τη μορφή μιας παραβολής, θα κατευθύνει τις προσπίπτουσες ακτίνες παράλληλα με τον άξονα της παραβολής, σε ένα σημείο που βρίσκεται στην εστία της παραβολής. Όπως στους φακούς, υπάρχουν 2 είδη παραβολικών συγκεντρωτικών μέσων, αυτά της σημειακής εστίασης (σφαιρικά κάτοπτρα), που διαμορφώνονται με την περιστροφή της παραβολής γύρω από τον άξονά της και τη δημιουργία ενός παραβολοειδούς και αυτά της γραμμικής εστίασης (κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα), που διαμορφώνονται με την επέκταση της παραβολής ως προς τον άξονα της καθέτου της παραβολής). (ΤριpanagnostopoulosY. et al., 2009)



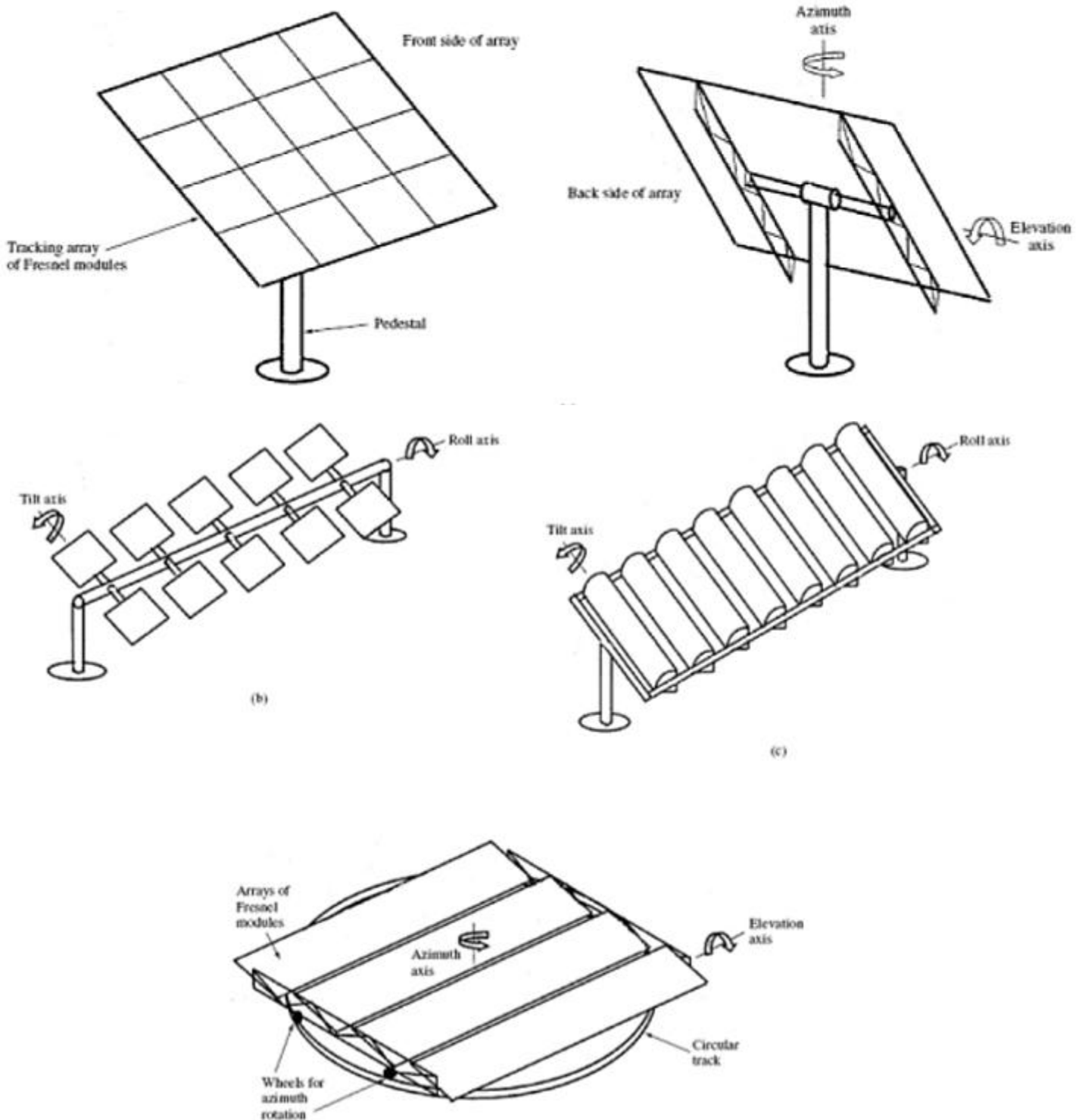
**Εικόνα 1.5:** Ανακλαστικοί τύποι συγκεντρωτικών μέσων α) δίσκος παραβολικής επιφάνειας β) γραμμικό κυλινδροπαραβολικό κάτοπτρο που εστιάζει σε μια γραμμική εστία (Tripanagnostopoulos Y. et al., 2009)

#### 1.4.2 Τύποι συστημάτων παρακολούθησης του ήλιου(SolarTrackers)

Τα συγκεντρωτικά συστήματα, για την επίτευξη σημαντικών λόγων συγκέντρωσης ή ακόμα και για την λειτουργία τους, απαιτούν την χρήση συστημάτων παρακολούθησης του ήλιου, τους ηλιακούς ικνηλάτες (solartrackers). Η οπτική σημειακή εστίαση γενικά απαιτεί την ικνηλάτιση του ήλιου σε δύο άξονες, έτσι ώστε το σύστημα να είναι πάντα προσανατολισμένο, διότι μικρές αποκλίσεις από τον προσανατολισμό, είναι καταστροφικές για το σύστημα. Από μια μηχανική σκοπιά, η ικνηλάτιση του ήλιου σε δύο άξονες είναι πιο σύνθετη από αυτή του μονού άξονα, αλλά τα συστήματα σημειακής εστίασης μπορούν να επιτύχουν πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις του ήλιου και επομένως την χρήση μικρότερης επιφάνειας απορροφητή. Τα κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα γραμμικής εστίασης χρειάζονται την ικνηλάτιση κατά μήκος ενός άξονα έτσι ώστε το είδωλο να περιορίζεται σύμφωνα με τη γραμμή εστίασης. Τα γραμμικά συγκεντρωτικά συστήματα Fresnel υφίστανται οπτικές παρεκκλίσεις όταν ο ήλιος δεν είναι κάθετος στο επίπεδο των φακών. Αυτό περιορίζει γενικά τα γραμμικά συστήματα Fresnel στην χρήση ικνηλάτων ηλίου διπλού άξονα.(Tripanagnostopoulos Y. et al., 2007)

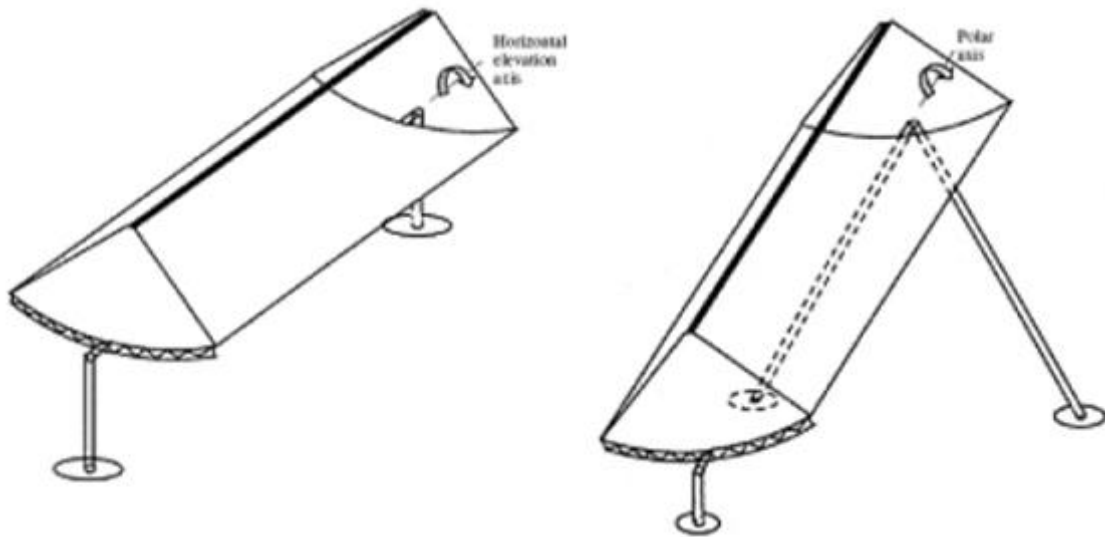
Έτσι, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι συστημάτων παρακολούθησης, του ήλιου. Δύο μεγάλες κατηγορίες διαχωρισμού των συστημάτων αυτών

είναι βάση της κίνησής τους, δηλαδή μονού ή διπλού άξονα, ενώ μια δεύτερη κατηγοριοποίηση είναι βάση του άξονα συντεταγμένων που κινούνται (ύψος, αζιμούθιο, πολικός άξονας) και της δομής που χρησιμοποιούν. Οι σημαντικότεροι τύποι παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:



**Εικόνα 1.6:** Τύποι ιχνηλάτισης του ήλιου σε διπλό άξονα (α) Ιχνηλάτης δύο αξόνων με την παρακολούθηση των συντεταγμένων του ύψους και αζιμούθιου που τοποθετείται σε ένα βάθρο.

(β) Ρύθμιση παρακολούθησης περιστροφής-κλίσης που χρησιμοποιεί τον κεντρικό σωλήνα ροής.  
(γ) Ρύθμιση παρακολούθησης περιστροφής-κλίσης που χρησιμοποιεί πλαίσια μονάδων. (δ)  
Ιχνηλάτης δύο αξόνων περιστροφικών επιφανειών.(TripanagnostopoulosY. etal., 2007)



Εικόνα 1.7: Τύποι ιχνηλάτης του ήλιου ένας άξονα. (α) Οριζόντιος ιχνηλάτης ενός άξονα με την κυλινδροπαραβολικό κάτοπτρο. (β) πολικός ιχνηλάτης ενός άξονα με το κυλινδροπαραβολικό κάτοπτρο. (TripanagnostopoulosY. etal., 2007)

Αξίζει να σημειώσουμε πως υπάρχουν γεωμετρικές διατάξεις συγκεντρωτικών συστημάτων που δεν χρησιμοποιούν ιχνηλάτιση του ήλιου. Σε γενικές γραμμές, είναι δυνατό να υπάρξει συγκέντρωση χωρίς την χρήση ιχνηλάτισης του ήλιου. Η γοητεία των ακίνητων συγκεντρωτικών συστημάτων είναι πράγματι μεγάλη, λόγω της μη απαιτούμενης παρακολούθησης του ήλιου, με αποτέλεσμα την οικονομικά αποδοτικότερη χρήση τους για συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Δυστυχώς όμως, κανένα σχέδιο ακίνητων συγκεντρωτικών μέσων δεν έχει βρεθεί ακόμα όπου το προστιθέμενο κόστος του συγκεντρωτικού μέσου να είναι λιγότερο από το επιπρόσθετο ενεργειακό κέρδος που επιτυγχάνεται μέσω της συγκέντρωσης. Η ανακάλυψη και η ανάπτυξη ενός πρακτικού, οικονομικώς αποδοτικού ακίνητου συγκεντρωτικού μέσου θα ήταν μια σημαντική συμβολή για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών. (TripanagnostopoulosY. etal., 2007)

## 1.5 Εισαγωγή στις τεχνολογίες ψύξης

Η τεχνολογία των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών είναι μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας που επιτυγχάνουν βαθμό απόδοσης σε ηλεκτρική ενέργεια μεγαλύτερο από 43%. Η θερμοκρασία λειτουργίας ενός ηλιακού κελιού επηρεάζει σημαντικά την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, μειώνοντας το βαθμό απόδοσης βάσει ενός αρνητικού θερμοκρασιακού συντελεστή. Κατά συνέπεια, τα ψυκτικά συστήματα αποτελούν μια πολύ σημαντική πλευρά σε εφαρμογές συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών. Για το λόγο αυτό ερευνώνται διάφορες μικροτεχνολογίες και νανοτεχνολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν σε παθητικά ψυκτικά συστήματα συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών. (KinseyGS. etal., 2009)

Στα συνήθη συστήματα επίπεδων φωτοβολταϊκών και στα συστήματα συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών με χαμηλό λόγο συγκέντρωσης ( $CR \leq 5 \times$ ), συνήθως δεν απαιτείται ψύξη. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη επιφάνεια που οδηγεί σε μια ροή ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία. Αντιθέτως, στα συστήματα συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών μέτριας και υψηλής συγκέντρωσης ( $10 \times < CR < 100 \times$  και  $CR > 100 \times$  αντίστοιχα), η ψύξη αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική, εξαιτίας της σημαντικής μείωσης της επιφάνειας του συλλέκτη και την αύξηση της ροής ενέργειας λόγω της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον, τα κελιά τριπλής ένωσης είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην θερμοκρασία, καθώς ο βαθμός μετατροπής ενός κελιού τριπλής ένωσης μπορεί να μειώνεται κατά 0,05% για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας του κελιού κατά 1 °C. (KinseyGS. etal., 2009)

### 1.5.1 Κατάταξη συστημάτων ψύξης

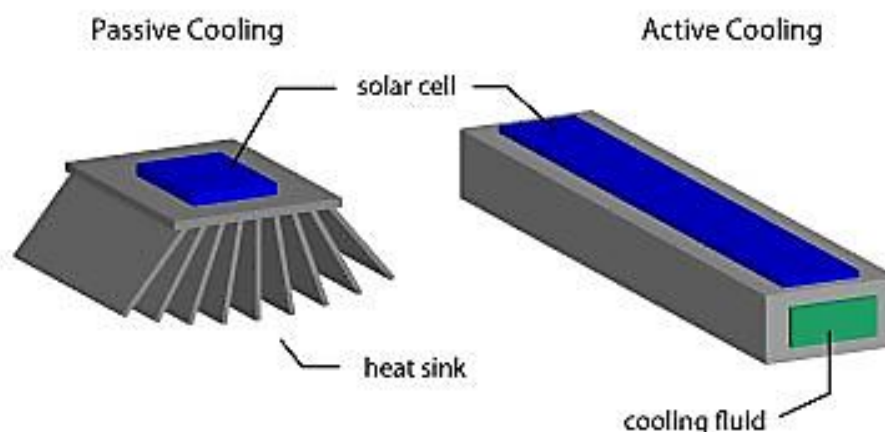
Συνήθως τα ψυκτικά συστήματα ταξινομούνται σε *παθητικά* και *ενεργητικά* συστήματα ψύξης ανάλογα με το είδος του μηχανισμού ψύξης. Η παθητική ψύξη δεν απαιτεί τροφοδοσία μηχανικής ή ηλεκτρικής ισχύος, διότι δρα μέσω της αξιοποίησης των φυσικών νόμων, ενώ τα ενεργητικά συστήματα απαιτούν εξωτερική ενέργεια για την ψύξη των ηλιακών κελιών.

Παλαιότερες μελέτες σχετικά με τα ψυκτικά συστήματα των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών έδειχναν ότι η παθητική ψύξη δε μπορεί να εφαρμοσθεί σε πυκνά δομημένα κελιά ή σε γραμμικούς

συγκεντρωτικούς συλλέκτες με λόγους συγκέντρωσης μεγαλύτερους του 20 (RoynneA. et al., 2005).

Η ενεργητική ψύξη επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα τμήμα της ισχύος που παράγεται από το κελί. Συνεπώς, ένα μέρος της παραγόμενης ενέργειας δεν θα είναι διαθέσιμη για περαιτέρω χρήση. Όμως, η ενεργητική ψύξη δεν εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας και είναι συνήθως ευκολότερα ελεγχόμενη σε σχέση με την παθητική ψύξη. Τα μικροκανάλια καταβόθρας θερμότητας ή οι δέσμες εκτόξευσης φαίνονται να είναι οι πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για την ενεργητική ψύξη μιας εγκατάστασης CPV (Roynne A. et al., 2005).

Το 2009 οι Zhangbo et al. πρότειναν νέους ορισμούς για την ενεργητική και την παθητική ψύξη. Στον ορισμό τους, η ενεργητική ψύξη αναφερόταν μόνο στην επονομαζόμενη τεχνολογία φωτοβολταϊκού/θερμικού συλλέκτη (PV/T): η θερμότητα που παράγεται από το Φ/Β απομακρύνεται από το κελί και χρησιμοποιείται ξανά σε άλλες εφαρμογές. Αυτή η νέα αντίληψη «ενεργητικής ψύξης» δεν περιλαμβάνει απαραίτητως μικροκανάλια ή δέσμες εκτόξευσης ρευστού.



**Εικόνα 1.8:** Σχηματική αναπαράσταση μεθόδων παθητικής και ενεργητικής ψύξης ηλιακών κελιών (Zhangbo et al., 2009)

## 1.6 Στόχος της ψύξης συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών

Κατά το σχεδιασμό του συστήματος ψύξης CPV, πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετές παράμετροι, όπως η τοπική άμεση κάθετη μόνωση, η γεωμετρία του συστήματος και η αναλογία συγκέντρωσης. Η απαίτηση του κελιού για ψύξη εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία του συστήματος. Μια πακτωμένη διάταξη κελιών αναπαριστά την πιο δύσκολη γεωμετρία για ψύξη. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται θερμική αντίσταση μικρότερη



από  $10^{-4}\text{m}^2\text{K}/\text{W}$  για κάθε συγκέντρωση μεγαλύτερη από 150 ήλιους (Royné A. et al., 2005).

Τα περύγια και οι διατάξεις διασκορπισμού θερμότητας χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα χαμηλής συγκέντρωσης. Το 2008, οι θερμοσωλήνες εφαρμόστηκαν επιτυχώς σε ψύξη φωτοβολταϊκών μεγάλης συγκέντρωσης. Η ενεργητική ψύξη με υγρό εφαρμόζεται κυρίως σε πακτωμένα συστήματα με υψηλές συγκεντρώσεις. Συγκεκριμένα, την τελευταία δεκαετία, έγιναν αρκετές έρευνες σε ηλιακά κελιά βυθισμένα σε υγρό (Liu L. et al., 2011, Han X. et al., 2009). Αυτή είναι μια περίπτωση ενεργητικής ψύξης: τα ηλιακά κελιά βυθίζονται σε ένα κυκλοφορούν διηλεκτρικό υγρό. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερος από  $3000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  για συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των 200 ήλιων (Zhu L. et al., 2011).

Σύμφωνα με τους Mokri και Emziane (Mokri et al., 2011) το κόστος εγκατάστασης για το 2010 ήταν πολύ χαμηλό ίσο με  $3,05\text{\$/W}$  και το ανηγμένο κόστος ενέργειας ήταν  $0,14\text{\$/kWh}$  για συστήματα μεγάλης συγκέντρωσης. Ο Gombert (Gombert A., 2011) ανέφερε ότι η επιλογή υλικού είναι εξαιρετικά σημαντική για το κόστος του συστήματος. Η διάταξη καταλαμβάνει το 20% του κόστους ολόκληρου του συστήματος, και οποίο περιλαμβάνει και το σύστημα ψύξης. Αυτό δείχνει ότι οι τιμές των υλικών του συστήματος ψύξης και η κατασκευή επηρεάζουν σημαντικά το κόστος του συστήματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ψύξη συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών

### 2.1 Απαιτήσεις ψύξης

Η συγκέντρωση ακτινοβολίας σε φωτοβολταϊκά κελιά, και η επακόλουθη αντικατάσταση δαπανηρής επιφάνεια φωτοβολταϊκών με λιγότερο ακριβά συγκεντρωτικά στοιχεία όπως καθρέφτες ή φακοί, έχει φανερί ότι είναι μια μέθοδος για μείωση του κόστους ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας. Εξαιτίας της μείωσης της περιοχής του απορροφητή, πιο ακριβά αλλά και πιο αποδοτικά ηλιακά κελιά μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Παρόλα αυτά ένα μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια (τυπική απόδοση της τάξης του 25%). Η υπόλοιπη ποσότητα που απορροφάται μετατρέπεται σε θερμική και μπορεί να προκαλέσει την αύξηση της θερμοκρασίας του κελιού εκτός και αν η θερμότητα διαχέεται στο περιβάλλον. Οι κύριες παράμετροι για το σχεδιασμό συστημάτων ψύξης είναι οι εξής: (ShakouriBA., 2006)

- A. Θερμοκρασία κελιού. Η απόδοση του φωτοβολταϊκού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τα κελιά μπορούν να υποστούν υποβάθμιση της απόδοσης τους εάν η θερμοκρασία υπερβαίνει κάποια όρια. Ο κατασκευαστής του κελιού συνήθως καθορίζει ένα συντελεστή θερμοκρασιακής υποβάθμισης και τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του.
  
- B. Ομοιόμορφη θερμοκρασία. Η απόδοση του κελιού μειώνεται με την μη ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας πάνω του. Σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο τα κελιά είναι συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους αλλά και παράλληλα. Οι σειριακές συνδέσεις αυξάνουν την εξαγόμενη τάση και μειώνουν το ρεύμα και άρα τις ωμικές απώλειες. Παρόλα αυτά, όταν κελιά είναι σε σειρά, το κελί που δίνει το μικρότερο ρεύμα, καθορίζει και την έξοδο των υπόλοιπων. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό σαν “current matching problem”. Επειδή η απόδοση του κελιού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, το κελί με την υψηλότερη θερμοκρασία θα περιορίσει την απόδοση όλης της σειράς. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση παρακαμπτήριων διόδων ή με την διατήρηση της ομοιόμορφης θερμοκρασίας κατά μήκος της σειριακής συνδεσμολογίας. (ShakouriBA., 2006)

- C. Αξιοπιστία και απλότητα. Για να κρατήσουμε τα κόστη λειτουργίας χαμηλά, μια απλή και χαμηλής συντήρησης λύση πρέπει να βρεθεί. Αυτό εμπεριέχει επίσης και την ελαχιστοποίηση της χρήσης τοξικών στοιχείων εξαιτίας περιβαλλοντικών και κανόνων υγείας. Η αξιοπιστία είναι ακόμα ένας σημαντικός παράγοντας αφού ενδεχόμενη αποτυχία στο σύστημα ψύξης μπορεί να καταστρέψει το φωτοβολταϊκό.
- D. Αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας. Η χρήση της εξαγόμενης θερμικής ενέργειας από το σύστημα ψύξης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της ολικής απόδοσης του αποδέκτη. Γι'αυτό το λόγο, σύμφωνα με τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν πιο πάνω, είναι επιθυμητό ένα σύστημα ψύξης που να μεταφέρει όσο το δυνατόν νερό σε μεγαλύτερη θερμοκρασία. Επίσης για να αποφευχθεί απώλεια θερμότητας μέσω ενός δευτερεύοντος θερμικού εναλλάκτη, ένα ανοικτού-βρόχου κύκλωμα ψύξης έχει πολλά πλεονεκτήματα. (RoynneA. 2005)
- E. Αντιλούμενη ισχύς. Εφόσον κάθε ενεργή συνιστώσα του συστήματος ψύξης απαιτεί κάποια ισχύ, αυτή θα πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή.
- F. Η απόδοση των στοιχείων. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται πρέπει να αξιολογηθούν ανάλογα με το κόστος, το βάρος, την απόδοση, την δυνατότητα ενσωμάτωσης κ.α.(RoynneA. 2005)

## 2.2 Βασικές αρχές

Η ανάπτυξη της μικροτεχνολογίας και της νανοτεχνολογίας προσφέρει νέες προοπτικές στην ψύξη των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών. Οι μικρές διαστάσεις και οι υψηλές αποδόσεις θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην ψύξη των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών. (ShakouriBA., 2006)

Λόγω του ότι η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας οδηγεί σε μείωση της ακτινοβολούμενης επιφάνειας, οι διατάξεις ψύξης μεσαίας κλίμακας δεν είναι πάντα κατάλληλες για να απομακρύνουν μεγάλα ποσά θερμότητας από μικρές επιφάνειες. Από την άλλη, όταν το μέγεθος μειώνεται κάτω από τα 100 nm, μπορούν να εμφανιστούν σημαντικές

μεταβολές στις ιδιότητες του υλικού. Επιπροσθέτως, σύμφωνα με τον Shakouri (2006), στην περιοχή των νανόμετρων υπάρχουν νέες μοναδικές επιδράσεις λόγω των κβαντικών φαινομένων και των αυξημένων αναλογιών επιφάνειας προς όγκο. Ο Bhushan (2010) όρισε τις νανοτεχνολογίες ως «οποιαδήποτε τεχνολογία σε επίπεδο νανοκλίμακας που έχει εφαρμογή στον πραγματικό κόσμο». Οι μικρο- και νανοτεχνολογίες εξασφαλίζουν ταχύτερη απόδοση, απαιτώντας λιγότερο χώρο και λιγότερο υλικό από τις συνήθεις τεχνολογίες. Πολλοί ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στις τεχνολογίες ψύξης σε επίπεδο μικροκλίμακας και νανοκλίμακας σε ηλεκτρονικά κυκλώματα: οι ηλεκτρικές διατάξεις μπορούν να παράγουν ροές θερμότητας που υπερβαίνουν τις χιλιάδες  $\text{watt/cm}^2$  (ShakouriBA., 2006).

### **2.2.1 Απόδοση συστημάτων**

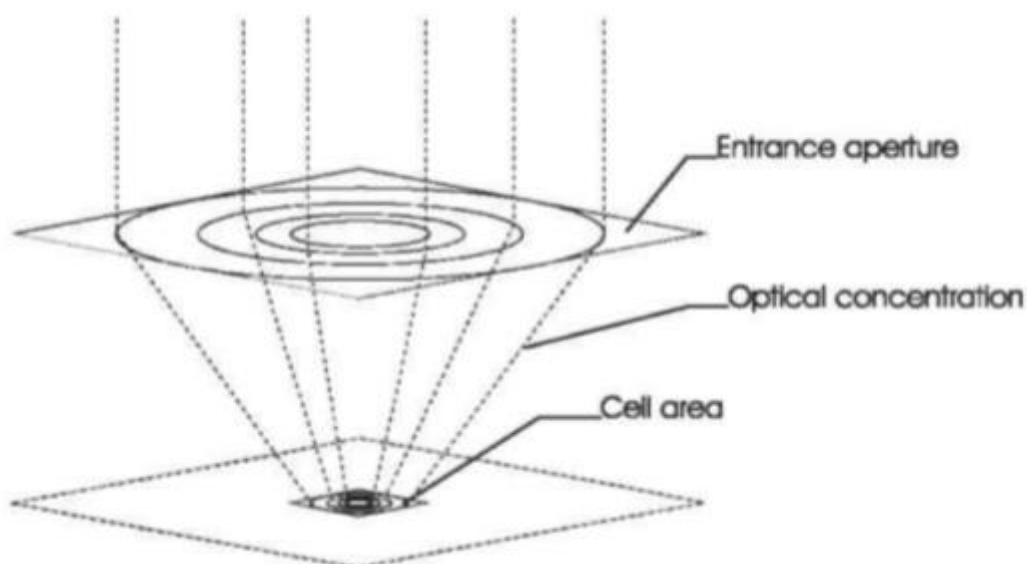
Σύμφωνα με τους Royne et al. (2005) τα μικροκανάλια καταβόθρας θερμότητας είναι τα πιο αποδοτικά συστήματα ψύξης για ένα σύστημα φωτοβολταϊκών υψηλής συγκέντρωσης. Το 2011, οι Müller et al. μελέτησαν τις αποδόσεις των μικροκαναλιών σε ένα συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό σύστημα  $1500\times$ . Απέδειξαν ότι το σύστημα παρέμεινε πλήρως λειτουργικό για έως 4930 ήλιους και κατέγραψε αύξηση 1% στην φωτοβολταϊκή απόδοση για κάθε αύξηση της συγκέντρωσης κατά 100 ήλιους. Στη μελέτη τους οι Yeom και Shannon (2007) έδειξαν ότι αυτοί οι μικρο-ψύκτες μπορούν να αποβάλλουν ροή θερμότητας έως  $500 \text{ W/cm}^2$ .

### **2.2.2 Τύποι γεωμετριών συγκεντρωτικών ΦΒ**

Στην παρούσα ενότητα είναι χρήσιμο να γίνει ένας διαχωρισμός μεταξύ των συγκεντρωτών σύμφωνα με τη μέθοδο συγκέντρωσης (καθρέφτες ή φακούς), το επίπεδο συγκέντρωσης ή τη γεωμετρία τους. Έτσι οι συγκεντρωτές ταξινομούνται ανάλογα με τη γεωμετρία τους, αφού οι απαιτήσεις για τη ψύξη των κελιών διαφέρουν ανάλογα με τη γεωμετρία. Εάν χρησιμοποιούνται φακοί τα κελιά τοποθετούνται κάτω από την πηγή φωτός και έτσι σκίαση από το σύστημα ψύξης δεν πραγματοποιείται. Για συστήματα με καθρέφτες, τα κελιά γενικά ακτινοβολούνται από κάτω, το οποίο κάνει τη σκίαση ένα σημαντικό θέμα κατά τη θεώρηση του σχεδιασμού του συστήματος ψύξης. (Royne A. 2005)

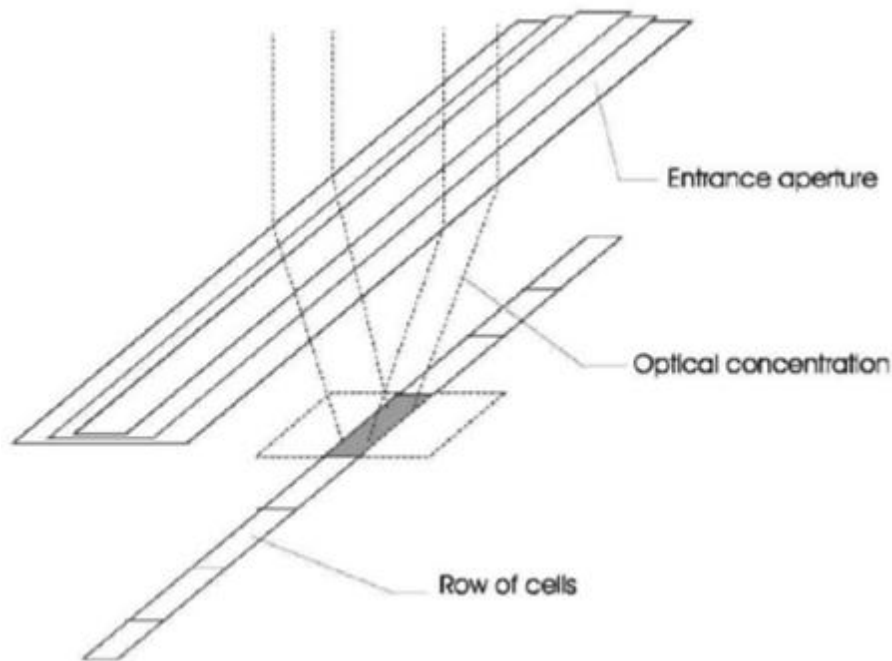
Έτσι έχουμε τις παρακάτω κατηγορίες:

A) *Μεμονωμένα κελιά*. Σε μικρούς σημειακής-εστίασης συγκεντρωτές, το ηλιακό φως εστιάζεται σε κάθε κελί ξεχωριστά. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κελί έχει μια επιφάνεια σχεδόν ίση με την επιφάνεια του συγκεντρωτή για θερμική διάχυση (ψύκτρα) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.1. Ένα κελί υπό συγκέντρωση 50 ήλιων πρέπει να έχει 50 φορές διαθέσιμη επιφάνεια για διάχυση θερμότητας. Αυτή η γεωμετρία απαιτεί παθητικό σύστημα ψύξης ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις. Συστήματα μεμονωμένων κελιών συνήθως χρησιμοποιούν μια ποικιλία από φακούς για συγκέντρωση. Μια άλλη εκδοχή είναι όταν ανακλαστικοί συγκεντρωτές μεταφέρουν το συγκεντρωμένο φως διαμέσου οπτικών ινών πάνω σε κελιά.



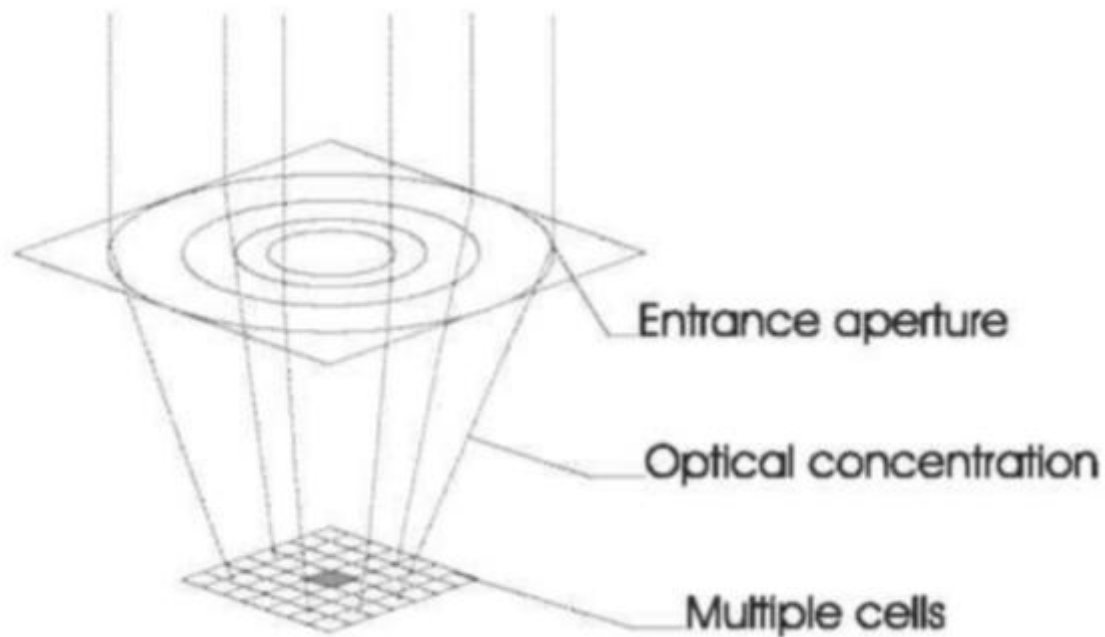
**Εικόνα 2.1.** Συγκέντρωση μονού κελιού: Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την διαθέσιμη επιφάνεια για απαγωγή θερμότητας (RoynneA. 2005)

B) *Γραμμικής γεωμετρίας*. Τα γραμμικά συγκεντρωτικά συστήματα συνήθως χρησιμοποιούν κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα ή γραμμικούς φακούς Fresnel για να εσιιάσουν το φως σε μια σειρά από κελιά. Σε αυτή τη διαμόρφωση, τα κελιά έχουν μικρότερη διαθέσιμη επιφάνεια για ψύξη επειδή δυο από τις πλευρές του κελιού είναι σε στενή επαφή με γειτονικά κελιά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2. Οι περιοχές που είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν για την ψύξη είναι οι δυο άλλες και το πίσω μέρος του κελιού. (Roynne A. 2005)



**Εικόνα 2.2:Γραμμικός συγκεντρωτής- Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν την περιοχή που είναι διαθέσιμη για απαγωγή θερμότητας(Royne A. 2005)**

Γ) *Πυκνά δομημένα κελιά.* Σε μεγαλύτερα συστήματα σημειακής εστίασης, όπως πιάτα ή ηλιοστατικά πεδία, ο αποδέκτης γενικά αποτελείται από ένα πλήθος πυκνά δομημένων κελιών. Ο αποδέκτης συνήθως τοποθετείται ελαφρώς πιο μακριά από το εστιακό επίπεδο για να αυξήσει την ομοιομορφη ακτινοβολία. Δευτερεύοντες συγκεντρωτές (kaleidoscopes) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν περαιτέρω την ομοιομορφία. Τα πλαίσια με πυκνά δομημένα κελιά παρουσιάζουν μεγαλύτερα προβλήματα για την ψύξη από τις δυο προαναφερθείσες διαμορφώσεις, αφού η μόνη διαθέσιμη περιοχή για ψύξη είναι η πίσω επιφάνειά τους όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.3. Αυτό σημαίνει ότι η ολική ποσότητα θερμότητας πρέπει να διαχυθεί σε κατεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Γι' αυτό το λόγο παθητικό σύστημα ψύξης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτή τη διαμόρφωση και υπό συνήθη επίπεδα συγκέντρωσης. (Royne A. 2005)



**Εικόνα 2.3:** Πυκνά δομημένα κελιά: Η διαθέσιμη περιοχή για ψύξη είναι μόνο το πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού (Royne A. 2005)

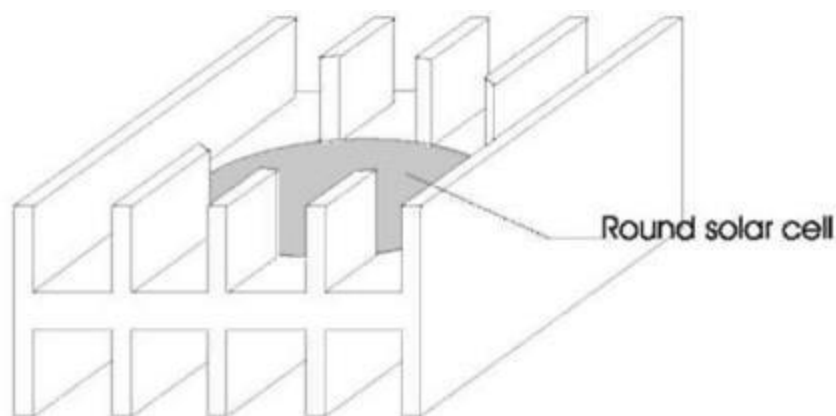
### 2.3 Εφαρμογές ψύξης συγκεντρωτικών ΦΒ

Ο Florschuetz παρουσίασε μια γενική, θεωρητική προσέγγιση στη ψύξη των ηλιακών κελιών υπό συγκέντρωση. Χρησιμοποίησε τις σχέσεις μεταξύ ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και απόδοσης κελιού για να βρει μια εξίσωση ως προς το επίπεδο ακτινοβολίας που δίνει το μέγιστο ισχύος για ένα δοθέν σύστημα ψύξης. Παρόλα αυτά, τα μέγιστα σημεία ισχύος συμπίπτουν με πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Η πιθανότητα υποβάθμισης του κελιού δεν έχει ληφθεί υπόψη. Ο Florschuetz έρευνσε την σημαντικότητα της αντίστασης επαφής μεταξύ του κελιού και του συστήματος ψύξης (αναπαρίσταται σαν  $R_{c-s}$ ). Δείχνει ότι η σημασία της αντίστασης επαφής αυξάνεται σημαντικά με αυξανόμενα επίπεδα ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της θερμοκρασιακής διαφοράς κατά μήκος του συνόρου που δίνεται από την  $AT = qR$  και έτσι αυξάνεται με αύξηση της ροής θερμότητας  $q$  και αύξηση της θερμικής αντίστασης επαφής  $R$ . Σε συστήματα υψηλής συγκέντρωσης όπου το  $q$  είναι μεγάλο, μια μικρή αντίσταση επαφής είναι αναγκαία ώστε να επιτευχθεί η ίδια θερμοκρασιακή διαφορά.

### 2.3.1 Περίπτωση εφαρμογής παθητικής ψύξης σε ΦΒ μονού κελιού

Όπως περιγράφεται στην ακόλουθη ενότητα, η παθητική ψύξη φαίνεται να λειτουργεί καλά για γεωμετρίες μονού κελιού για επίπεδα ροής 1000 ήλιων. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μεγάλης περιοχής διαθέσιμης για θερμική διάχυση.

Ο Edenburn(1980) εκτελεί μια ανάλυση αποδοτικότητας-κόστους για μια σημειακής εστίασης διάταξη φακού Fresnel με παθητικό σύστημα ψύξης. Η διάταξη ψύξης αποτελείται από γραμμικά πτερύγια (fins) σε όλες τις διαθέσιμες επιφάνειες για διάχυση θερμότητας (Εικόνα 2.4). Οι τιμές συγκέντρωσης είναι για 50, 92 και 170 ήλιους. Η ανάλυση αποτελείται από χρήση δοθέντων τιμών για το κόστος της περιοχής εισόδου (φακός και κελί) και για την περιοχή της διάταξης ψύξης και βελτιστοποίηση του κόστους της γεωμετρίας ψύξεως. Υποβάθμιση του κελιού σε υψηλές συγκεντρώσεις δε θεωρείται. Αυτό υπονοεί ότι διατάξεις που χρησιμοποιούν παθητικό σύστημα ψύξης έχοντας αναπτυχθεί υπό αυτό το μοντέλο, πρέπει να έχουν ένα μηχανισμό αποτροπής της εστίασης σε συνθήκες υψηλών ποσών θερμότητας (χαμηλή ταχύτητα ανέμου, υψηλή ακτινοβολία και μεγάλες θερμοκρασίες περιβάλλοντος). Στην έρευνα αποδοτικότητας-κόστους, ο Edenburn (1980) επίσης προτείνει τη στέγαση της σειράς κελιών σε ένα βαμμένο αλουμινένιο κουτί, και τη χρήση της βάσης αυτού σαν ψύκτρα χωρίς πτερύγια (finless). Αναφέρει ότι κατά τη διάρκεια συνθηκών με χαμηλή ροή αέρα, η ακτινοβολία είναι η πιο σημαντική συνιστώσα απώλειας θερμότητας.



Εικόνα 2.4: Εφαρμογή παθητικής ψύξης σε κελί από τον Edenburn (1980)



Μια επιφάνεια με πτερύγια θα ακτινοβολεί λιγότερο από μια άλλη χωρίς πτερύγια εξαιτίας της πτώσης θερμοκρασίας από τη βάση των πτερυγίων έως τις άκρες. Με αυτό το σχεδιασμό, τα κελιά πιθανώς να κρατηθούν κάτω από τους 150°C ακόμα και σε ακραίες μέρες υπό επίπεδα συγκέντρωσης 90 ήλιων. Ο Edenburn(1980) συμπεραίνει ότι για σημειακής εστίασης διατάξεις, το κόστος ψύξης αυξάνεται με την επιφάνεια του φακού, ενώ παραμένει σχεδόν αμετάβλητο με τη συγκέντρωση. Ο λόγος είναι ότι όσο η επιφάνεια εισόδου αυξάνεται, απαιτείται παχύτερος και πιο ακριβός θερμικός εναλλάκτης. Όταν το επίπεδο συγκέντρωσης αυξάνεται, η βέλτιστη σχεδίαση της ψύκτρας δεν αλλάζει σημαντικά, αλλά μια χαμηλής αντίστασης θερμική επαφή μεταξύ του υποστρώματος και της ψύκτρας γίνεται πολύ σημαντική ώστε να διατηρηθεί το κελί σε χαμηλή θερμοκρασία.

Ο Minano (1994) παρουσίασε ένα θερμικό μοντέλο για την παθητική ψύξη μονού κελιού υπό υψηλή συγκέντρωση. Όπως και ο Edenburn, συμπεραίνει ότι το παθητικό σύστημα ψύξης είναι πολύ αποδοτικό για κελιά όπου το μέγεθός τους μειώνεται. Συγκρίνοντας τις δοθείσες αποδόσεις των κελιών GaAs που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη περίπτωση, φαίνεται ότι μια συγκέντρωση 100 ήλιων είναι εφικτή εφόσον οι θερμοκρασίες κρατούνται σε χαμηλά επίπεδα. Ο Minano προτείνει τα κελιά να κρατούνται σε διάμετρο μικρότερη από 5 mm. Ψύκτρες για αυτά τα κελιά μπορούν να είναι όμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται σε ημιαγώγιμες συσκευές.

Ο Araki(2002) αναφέρει εκτενέστερα αποτελέσματα που δείχνουν την αποδοτικότητα των παθητικών ψύξεων για μονά κελιά. Στην έρευνά του, μια διάταξη από φακούς Fresnel εστιάζει το φως πάνω σε μονά κελιά πλαισιωμένα με ένα λεπτό φύλλο θερμικά αγωγίμου επόξυ(polyepoxide) πάνω σε μια αλουμινένια πλάκα για θερμική διάχυση. Το επίπεδο συγκέντρωσης είναι περίπου 500 ήλιους. Εξωτερικά πειράματα δείχνουν αύξηση της θερμοκρασίας των κελιών 18 °C πάνω από την περιβαλλοντική, χωρίς συμβατικές ψύκτρες. Έχει αποδειχθεί ότι καλή θερμική επαφή μεταξύ του κελιού και της πλάκας είναι σημαντική ώστε να διατηρηθεί η θερμοκρασία του κελιού χαμηλή. Τεχνικές για τη βελτίωση του είναι η χρήση λεπτότερου στρώματος επόξυ ή η αύξηση της θερμικής του αγωγιμότητας.

Ο Edenburn (1980) επίσης αναφέρει τη χρήση ενεργητικής ψύξης στις σημειακής εστίασης διατάξεις που αναφέρονται παραπάνω. Κελιά τοποθετούνται σε σειρές με ένα ορθογώνιο ψυκτικό κανάλι κατά μήκος της πίσω πλευράς κάθε σειράς. Ο Edenburn(1980) καταλήγει στο συμπέρασμα ότι σε περίπτωση που η εξαγόμενη θερμική ενέργεια χρησιμοποιηθεί, η ενεργητική ψύξη είναι η πιο αποδοτική λύση από

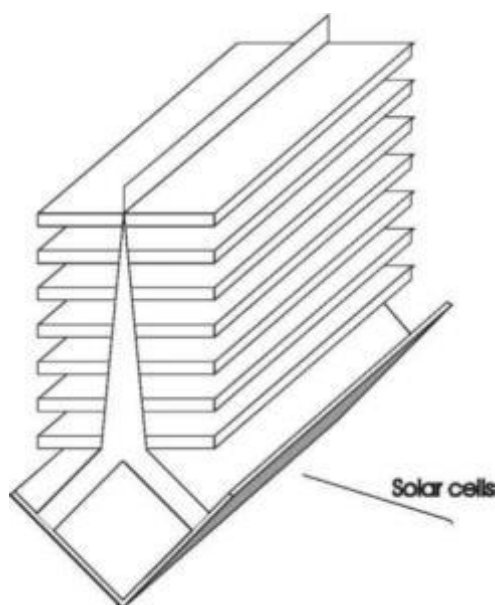
πλευράς κόστους. Χωρίς όμως αυτό το πλεονέκτημα οι απώλειες ισχύος λόγω άντλησης και διάχυσης της επιπλέον θερμότητας κάνει το ενεργητικό σύστημα ψύξης πολύ ακριβότερο από το παθητικό για μονά κελιά. Η μόνη εξαίρεση είναι για πολύ μεγάλους φακούς (με διάμετρο μεγαλύτερη από 30 cm) (Edenburn 1980). Σε αυτά τα μεγέθη, τα κόστη για παθητική και ενεργητική ψύξη είναι σχεδόν τα ίδια.

### **2.3.2 Εφαρμογή παθητικής ψύξης για γραμμικά ΦΒ**

Ο Florschuetz χρησιμοποίησε το μοντέλο του για να αποτιμήσει τόσο την ενεργητική όσο και την παθητική ψύξη ΦΒ γραμμικής γεωμετρίας. Για την περίπτωση της παθητικής ψύξης, τα κελιά τοποθετούνται κατά μήκος είτε μιας επίπεδης ή με πτερύγια μεταλλικής λωρίδας. Τα επίπεδα ακτινοβολίας στα μέγιστα σημεία ισχύος συγκρίνονται για τα διάφορα συστήματα ψύξεως. Τα πτερύγια καρφίτσας (pinfins) φαίνεται να αποδίδουν καλύτερα από τα αντίστοιχα επίπεδα, αλλά επειδή τα πτερύγια καρφίτσας είναι πιο δαπανηρά για την κατασκευή τους, ίσως να μην είναι και η καλύτερη επιλογή. Το μοντέλο προτείνει ότι η επίπεδη λωρίδα θα ήταν επαρκής για πολύ χαμηλά επίπεδα συγκέντρωσης (λιγότερο από 5 ήλιους) και η λωρίδα με τα πτερύγια μόνο για ελαφρώς μεγαλύτερα επίπεδα (10 ήλιους). Με ταχύτητα αέρα 2,2m/s, η επίπεδη λωρίδα μπορεί να λειτουργεί σε περίπου 10 ήλιους, ενώ με τα πτερύγια σε πάνω από 14 ήλιους. Η υποβάθμιση του κελιού δεν λαμβάνεται υπόψη. (RoynéA. 2005)

Το EUCLIDES είναι ένα συγκεντρωτικό σύστημα τύπου αυλακιού που κατασκευάστηκε στην Ισπανία (RoynéA. 2005). Σε αυτό το σύστημα, η θερμική ενέργεια μεταφέρεται παθητικά στο περιβάλλον μέσω μιας αλουμινένιας με πτερύγια ψύκτρας. Τα πτερύγια έχουν βελτιστοποιηθεί για την σχετικά χαμηλή συγκέντρωση (30 ήλιους) που χρησιμοποιείται στο σύστημα EUCLIDES. Η βελτιστοποίηση έδωσε διαστάσεις στο πτερύγιο ώστε να είναι 10 mm παχύ, 140 mm σε μήκος και περίπου 10 mm μεταξύ τους. Αυτό δεν μπορεί να κατασκευασθεί με τα συνηθισμένα μέσα, αλλά πραγματοποιήθηκε από το στείβαγμα πτερυγίων και διαχωριστικών πλακών και το σφίξιμό τους με βίδες. Αυτή η μέθοδος είναι σχετικά πιο κοστοβόρα. Η ψύκτρα αναμένεται να συμβάλλει στο 15,7 % του συνολικού κόστους του EUCLIDES, ενώ οι φωτοβολταϊκές μονάδες και οι καθρέφτες συμβάλλουν στο 11,9 % και στο 10,8 % αντίστοιχα. Η θερμοκρασία λειτουργίας του κελιού έχει μετρηθεί ότι είναι 58°C. Ο Edenburn (1980) μελέτησε την ψύξη ενός γραμμικού ΦΒ τύπου αυλακιού. Στο σύστημά του τα κελιά τοποθετούνται σε δυο

γραμμές σε μια γεωμετρία τύπου V. Ο παθητικός θερμικός εναλλάκτης αποτελείται από ιστό με πτερύγια που αποτρέπει την σκίαση (Εικόνα 2.5). Τα επίπεδα συγκέντρωσης είναι για 20, 30 και 40 ήλιους. Ο Edenburn(1980) βρήκε ότι εξαιτίας των υψηλότερων θερμοκρασιών, που προέρχονται από τη μεγαλύτερη διαδρομή για την απαγωγή θερμότητας στα πτερύγια, το παθητικό σύστημα ενός γραμμικού ΦΒ είναι πολύ ακριβότερο από το σχέδιο μονών κελιών, και δεν φαίνεται να είναι και αποδοτικό από πλευράς κόστους για αυτή την εγκατάσταση. Για να αυξήσει την απόδοση, πρότεινε το γέμισμα της κοιλότητας του ιστού με ένα εξατμιστικό υγρό που θα λειτουργούσε σαν ένας θερμοσυσσωρευτής για να απάγει τη θερμότητα μακριά από τα κελιά με μια χαμηλή θερμοκρασιακή διαφορά.

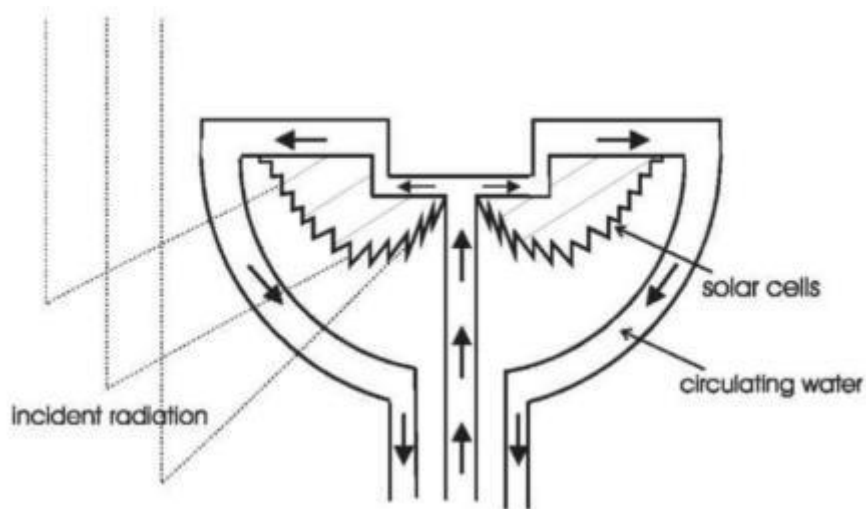


Εικόνα 2.5:Σχέδιο παθητικής ψύξης για γραμμικό ΦΒ σχεδιάστηκε του Edenburn(1980)

### 2.3.3 Εφαρμογή ψύξης πυκνά δομημένων ΦΒ κελιών

Ο Horne(1993) κατασκεύασε ένα σύστημα στο οποίο παραβολικά πιάτα εστιάζουν το φως πάνω σε κελιά που τοποθετούνται με ένα σχετικά καινοτόμο τρόπο. Εκτός ότι τοποθετούνται σε μια οριζόντια επιφάνεια, βρίσκονται κάθετα πάνω σε ένα σει δακτυλιδιών, που σχεδιάζονται να καλύψουν όλη την επιφάνεια του αποδέκτη χωρίς να τη σκιάζουν. Νερό μεταφέρεται στον αποδέκτη από ένα κεντρικό σωλήνα και μετά ρέει πίσω από τα κελιά, ψύχοντάς τα, πριν ρεώσει προς τα πίσω μέσω ενός γυάλινου κελύφους μεταξύ του συγκεντρωτή και των κελιών (Εικόνα 2.6). Με αυτό τον τρόπο, το νερό όχι μόνο ψύχει τα κελιά, δρα επίσης σαν

φίλτρο απορροφώντας ένα σημαντικό ποσό UVακτινοβολίας που αλλιώς θα έφτανε στα κελιά. Κανονικά, τα κελιά πρέπει να προστατεύονται από την UVακτινοβολία από ένα προστατευτικό κάλυμμα ή φακούς. Στην περίπτωση του Horne (1993), το νερό απορροφά επίσης κάποιο ποσό ακτινοβολίας χαμηλής ενέργειας, που έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη απόδοση κελιού και μικρότερο ποσό ισχύος που μετατρέπεται σε θερμότητα στα κελιά. Η πατέντα ενσωματώνει ένα υλικό αλλαγής φάσης σε θερμική επαφή με τα κελιά, το οποίο λειτουργεί για να εμποδίζει την ζημιά στα κελιά υπό τις ακραίες συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών.



**Εικόνα 2.6: Σχέδιο εφαρμογής ψύξης πλαισίου από τον Horne(1993)**

Μια ιδέα σχεδόν ίδια με αυτή του Horne μελετήθηκε από τον Koehler (2000). Η ιδέα του ήταν να βυθίσει τα κελιά σε ένα κυκλοφορούν ψυκτικό υγρό, όπου θερμότητα μεταφέρεται από δύο επιφάνειες κελιών και όχι από μια. Με αυτό τον τρόπο το ψυκτικό δρα και σαν φίλτρο, απορροφώντας περισσότερη από την εισερχόμενη χαμηλής ενέργειας ακτινοβολία πριν φτάσει στα κελιά. Το ψυκτικό υγρό πρέπει να μπορεί να παρέχει ηλεκτρική μόνωση στα κελιά. Με την επιλογή του σωστού ψυκτικού ρευστού και πίεσης, μπορεί να επιτευχθεί τοπικός βρασμός στα φωτοβολταϊκά κελιά, που δίνει μια ομοιόμορφη θερμοκρασία κατά μήκος της επιφάνειας και ένα πολύ μεγαλύτερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. (Koehler 2000)

## 2.4 Τεχνολογίες μικρο- και νανο-ψύξης

Όπως υπογράμμισε ο Gururatana (2012), καθώς η βιομηχανία οδηγείται συνεχώς προς ηλεκτρονικά προϊόντα μικροκλίμακας (όπως laptop και smartphones), η αποβαλλόμενη θερμότητα από τις ηλεκτρονικές συσκευές αποτελεί σημαντικό ζήτημα. Υπάρχουν αρκετές δημοσιεύσεις σχετικές με την ψύξη μικροκλίμακας, αλλά καμία δεν αφορά σε συστήματα συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών. Το 1998 ο Gromoll δημοσίευσε μια ανασκόπηση στα συστήματα μικροψύξης που βασιζόνταν σε εξαναγκασμένη ροή αέρα για συσκευασία ηλεκτρονικών υψηλής πυκνότητας. Οι Cahill et al. (2003) και Shakouri (2006) παρουσίασαν ορισμένες βελτιώσεις της μεταφοράς θερμότητας σε επίπεδο νανοκλίμακας.

Οι τεχνικές κατασκευής νανοτεχνολογιών μπορούν να χωριστούν σε συμβατικές και μη συμβατικές διαδικασίες. Οι πρώτες, όπως η φωτολιθογραφία και η λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων, χρησιμοποιούν το φως ή τα ηλεκτρόνια για να δημιουργήσουν μοτίβα. Οι συμβατικές τεχνικές είναι οι πιο ευρέως διαδεδομένες τεχνικές. Σύμφωνα με τους Gates et al. (2004), το κόστος αγοράς, εγκατάστασης και συντήρησης των εργαλείων που απαιτούνται περιορίζει την εφαρμογή τους σε περιοχές εκτός των μικροηλεκτρονικών. Οι άλλες τεχνικές, οι οποίες μοιάζουν με τις μακροσκοπικές τεχνολογίες χύτευσης, κοίλανσης και τύπωσης, αποτελούν τεχνολογίες εξαιρετικά χαμηλού κόστους (QinD. et al., 2012). Αναπτύχθηκαν ώστε να ξεπεραστούν οι τεχνικοί και οικονομικοί περιορισμοί των συμβατικών μεθόδων.

## 2.5 Ψυκτικές διατάξεις

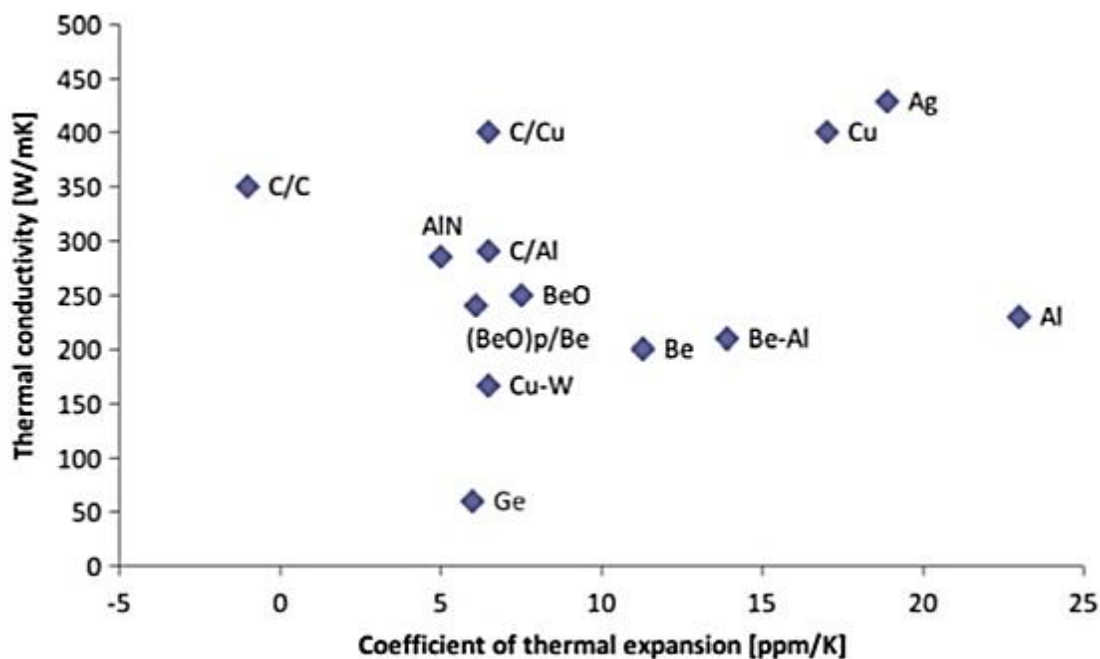
Οι τεχνολογίες ψύξης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: (Micheli L. 2013)

- ψύξης αερίου: απαγωγή θερμότητας, φυσική συναγωγή σε μικροκανάλια, νανοσωλήνες, μικροπτερύγια και νανοσύρματα
- ψύξης υγρού: φυσική συναγωγή νανο-ρευστών, μικροθερμοσωλήνες, μικρογραφίες θερμοσιφώνων (Micheli L. 2013)

### 2.5.1 Απαγωγός θερμότητας

Ο απαγωγός θερμότητας αποτελείται από ένα στρώμα υλικού υψηλής θερμικής αγωγιμότητας που επιτρέπει την απομάκρυνση της θερμότητας από το κελί. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με μια καταβόθρα θερμότητας. Ο Jagannadham et al. (2002) παρουσίασε τα σημαντικά απαραίτητα χαρακτηριστικά των απαγωγών θερμότητας: υψηλή θερμική αγωγιμότητα, υψηλή διηλεκτρική σταθερά και υψηλή ειδική θερμότητα. Οι Abyzov et al. (2012) προσέθεσαν ορισμένα ακόμη, όπως ο συντελεστής θερμικής διαστολής να βρίσκεται κοντά σε εκείνον των ημιαγωγών (πυρίτιο ή γερμάνιο), σταθερότητα κατά τη θερμική φόρτιση στη θερμοκρασία λειτουργίας, χαμηλό ειδικό ύψος, κατεργασιμότητα και χαμηλό κόστος.

Σύμφωνα με τους Bar-cohen και Wang (2010), λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας του πυριτίου (~ 150 W/mK), με τη χρήση των παραδοσιακών υλικών διασκορπισμού, όπως ο χαλκός, το βηρύλλιο και το νιτρικό αργίλιο, μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέτρια βελτίωση διασκορπισμού. Επιπλέον το οξείδιο του βηρυλλίου, που παραδοσιακά χρησιμοποιείται ως απαγωγός θερμότητας είναι ακριβό και τοξικό. Το αργίλιο και ο χαλκός είναι καλοί θερμικοί αγωγοί, αλλά ο συντελεστής θερμικής διαστολής τους είναι μεγαλύτερος του γερμανίου ή του πυριτίου. Σύνθετα υλικά όπως τα Cu-W ή Al-SiC είναι λιγότερο ακριβά, όμως η θερμική αγωγιμότητά τους είναι συνήθως χαμηλότερη από 250 W/mK. Κανένα σύνηθες σύνθετο υλικό δεν έχει θερμική αγωγιμότητα μεγαλύτερη από 400 W/m<sup>2</sup>, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Θερμική αγωγιμότητα ως προς το συντελεστή θερμικής διαστολής διαφόρων υλικών (MichellL. et al., 2013)

Οι υψηλές θερμικές αγωγιμότητες μπορούν να προκύψουν από σύνθετα γραφίτη και διαμαντιού. Οι πλάκες πυρογραφίτη είναι πολύ ανισοτροπικές και άρα δεν είναι εύκολη η εφαρμογή τους (AbyzonAM. et al., 2012). Οι νανοσωλήνες άνθρακα θεωρούνται σύνθετα υλικά λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητάς τους. Δυστυχώς, παρόλο που οδηγούν σε σημαντική βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων, οι νανοσωλήνες άνθρακα δεν αποτελούν ακόμη μια υποσχόμενη επιλογή. (AbyzonAM. et al., 2012)

Το διαμάντι είναι ένα πολύ καλό υλικό για το διασκορπισμό θερμότητας από ηλεκτρονικά (GrayKJ., 2000), λόγω της εξαιρετικά υψηλής τιμής θερμικής αγωγιμότητας (500-2100 W/mK, η οποία είναι η υψηλότερη τιμή μεταξύ όλων των γνωστών υλικών) και της πολύ υψηλής ηλεκτρικής του αντίστασης (~ $10^{18}$  Ω). Οι Bar-cohen and Wang (2010) ανέφεραν ότι η εναπόθεση διαμαντιού σε υποστρώματα όπως το πυρίτιο, είναι μια αρκετά ώριμη τεχνολογία, που μπορεί να αποφέρει καλά αποτελέσματα. Αυτό επιβεβαιώθηκε επίσης από τους Zhang et al. (2012) και Twitchen et al. (2001), που ανέφεραν ότι η θερμική αγωγιμότητα του καλύτερου συνθετικού διαμαντιού δημιουργημένου μέσω Χημικής Εναπόθεσης Ατμού (CVD) είναι ίδια με τη θερμική αγωγιμότητα του φυσικού διαμαντιού υψηλής καθαρότητας σε θερμοκρασία δωματίου (2200 W/mK). Λόγω της ωριμότητας της τεχνολογίας και του ποιοτικού αποτελέσματος που προκύπτει από τη μέθοδο της εναπόθεσης, φαίνεται

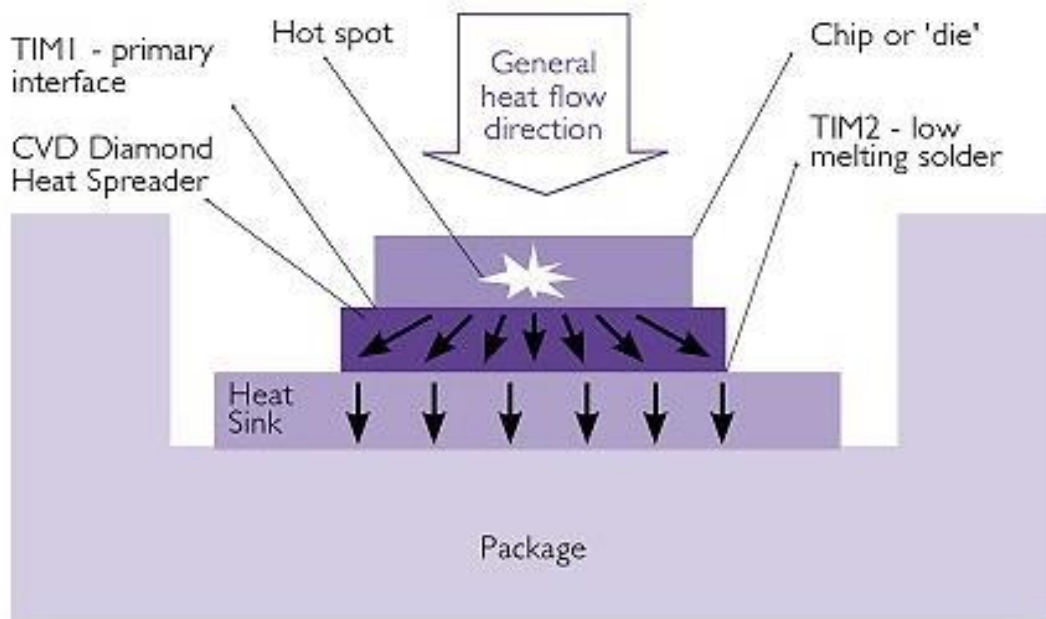
ότι η εναπόθεση στρώματος διαμαντιού σε ένα υπόστρωμα αποτελεί καλή λύση για την ψύξη των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών.

Η χαμηλή μοριακή θερμοχωρητικότητα του διαμαντιού το καθιστά καταλληλότερο για την κατανομή ενέργειας παρά για το διασκορπισμό της (Jagannadhametal., 2002). Για το λόγο αυτό, πρότειναν η χαμηλή θερμοχωρητικότητα του διαμαντιού να αντισταθμιστεί μέσω μιας υψηλότερης θερμοχωρητικότητας υποστρώματος, πάνω στο οποίο αποτίθεται το διαμάντι. Στο σχεδιασμό του απαγωγού θερμότητας, χρησιμοποιήθηκε ενδιάμεσο στρώμα νιτρικού αργιλίου κάτω από συνεχές στρώμα διαμαντιού. Παρατηρήθηκε αύξηση στη χαρακτηριστική και τη διάρκεια ζωής του απαγωγού θερμότητας, σε σχέση με απαγωγό θερμότητας με απλό στρώμα διαμαντιού και ράβδου μολυβδαινίου.

Οι Zhang et al. (2012), προσομοίωσαν στο πρόγραμμα COMSOL τις αποδόσεις ενός θερμικού υποστρώματος πολυκρυσταλλικού διαμαντιού CVD ως μέρους ενεργητικής ψύξης διατάξεων ισχύος. Παρατήρησαν ότι δεν υπάρχει βελτίωση στην ψύξη με την αντικατάσταση του νιτρικού αργιλίου με διαμάντι, επειδή η θερμική αντίσταση συναγωγής είναι μεγαλύτερη από τη θερμική αντίσταση αγωγής. Μόνο όταν απομακρύνθηκαν όλα τα υπόλοιπα στρώματα, παρουσιάστηκε αύξηση στην αποβαλλόμενη ισχύ από το σύστημα κατά δύο φορές με την αντικατάσταση του κεραμικού με διαμάντι. Περαιτέρω αύξηση της απόδοσης παρατηρήθηκε μέσω της εναπόθεσης στρώματος μικροστηλών χαλκού στην πίσω πλευρά του υποστρώματος.

Η εναπόθεση διαμαντιού είναι προφανώς μια ακριβή διαδικασία, πράγμα το οποίο είναι και ο κύριος περιορισμός της μεθόδου. Το κόστος του θερμικού υποστρώματος διαμαντιού κυμαίνεται μεταξύ 1-10 €/mm<sup>3</sup> (Zhanget al., 2012.) Συγκριτικά, το κόστος για μια πλάκα χαλκού καθαρότητας 99,9% κ.β. είναι περίπου 0,06€/cm<sup>3</sup>. Τα σύνθετα διαμαντιού αποτελούν έτσι έναν καλό συμβιβασμό μεταξύ κόστους και απόδοσης. Το κόστος του σύνθετου υλικού διαμαντιού-χαλκού με θερμική αγωγιμότητα μεταξύ 800-1200 W/mK είναι χαμηλότερο από το 1/20 του κόστους του CVD-διαμαντιού (AbyzonAM. etal., 2012). Η μέθοδος κατασκευής των σύνθετων διαμαντιού είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς επηρεάζει τη θερμική αγωγιμότητα του προϊόντος. Στη χειρότερη περίπτωση μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από την αναμενόμενη. (Nishiyabu et al., 2011)





Εικόνα 2.8: Απεικόνιση απαγωγού θερμότητας CVD διαμαντιού (MichellL. etal., 2013)

## 2.6 Φυσική συναγωγή σε μικροκανάλια

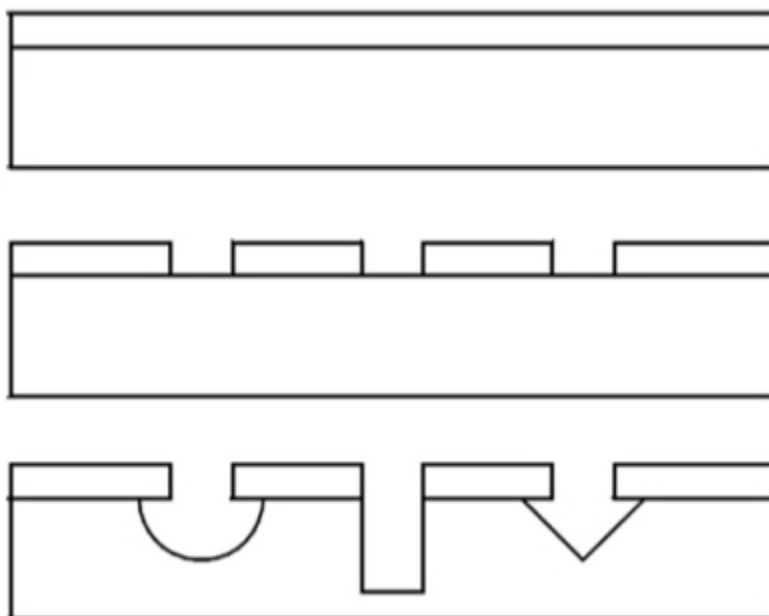
Τα μικροκανάλια αποτελούνται από πολλές παράλληλες μικροκοιλότητες, η υδραυλική διάμετρος των οποίων κυμαίνεται από 10 ως 1000 nm. Η εξαναγκασμένη ροή στα μικροκανάλια βοήθησε στο να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση ψύξης που θα ήταν κατάλληλη για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα υψηλής συγκέντρωσης. Τα μικροκανάλια έχουν μελετηθεί αρκετά για εφαρμογές ενεργητικής ψύξης (Chen R. etal., 2007, Guo Z-Y etal., 2003). Από την άλλη πλευρά, οι ροές αερίων φυσικής συναγωγής σε μικροκοιλότητες, όπως τα μικροκανάλια, δεν έχουν ερευνηθεί εκτενώς (Buonomo και Manca, 2012).

Το 2005 μελετήθηκε αναλυτικά η φυσική συναγωγή σε μικροκανάλια από τους Chen και Weng, οι οποίοι ανέφεραν ότι η παροχή όγκου σε μικροκλίμακα είναι μεγαλύτερη από ό,τι σε μακροκλίμακα, ενώ ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι χαμηλότερος. Σε μια μελέτη της φυσικής συναγωγής σε κάθετα μικροκανάλια, οι Buonomo και Manca (2012) παρατήρησαν ότι η μεγαλύτερη παροχή όγκου μπορεί να επιτευχθεί στο μεγαλύτερο αριθμό Knudsen(Kn) χωρίς σημαντική μεταβολή του μέσου αριθμού Nusselt ως προς το λόγο ροής θερμότητας. Σε μεταγενέστερη μελέτη τους (Buonomo και Manca, 2012) απέδειξαν ότι το προφίλ της θερμοκρασίας του τοιχώματος αυξήθηκε με αύξηση του Kn και οι διαφορές μεταξύ των προφίλ της θερμοκρασίας τοιχώματος

ήταν μικρότερες, με αύξηση του ύψους του καναλιού. Επιπλέον, η παροχή μάζας αυξήθηκε με αύξηση του  $K_n$ .

### 2.6.1 Κατασκευή μικροκαναλιών

Οι τεχνικές κατασκευής μικροκαναλιών έχουν γίνει συχνά αντικείμενο μελέτης. Το 1997 παρουσιάστηκαν από τους Tjerkstra et al. τέσσερις τρόποι κατασκευής μικροκαναλιών με χάραξη (etching): υγρή ανισότροπη, υγρή ισότροπη, ξηρή ανισότροπη, ξηρή ισότροπη. Η βασική προσέγγιση δημιουργίας καναλιών πυριτίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9. Το πυρίτιο καλύπτεται με μια μάσκα υλικού με το επιθυμητό μοτίβο και στη συνέχεια χαράσσεται. Στην εικόνα το αριστερό κανάλι χαράσσεται ισότροπα, το μεσαίο ανισότροπα με χάραξη ενεργού ιόντος (RIE) και το κανάλι στα δεξιά είναι χαραγμένο ανισότροπα με διάλυμα ΚΟΗ. Η ξηρή χάραξη μπορεί να γίνει μέσω μικροκατεργασίας με laser. Η τήξη του laser και η ανισότροπη χάραξη χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή μικροκαναλιών με μεγάλη αναλογία πλευρών (Alavi et al., 1992)



Εικόνα 2.9: Σχηματική απεικόνιση κατασκευής μικροκαναλιού σε πυρίτιο (Tjerkstra et al., 1997)

Καμία αναφορά δεν υπάρχει για παθητική ψύξη σε πυκνά δομημένα κελιά υπό συγκέντρωση.

Από την άλλη, ο Verlinden (2001) περιγράφει ένα μονολιθικό συγκεντρωτικό πλαίσιο πυριτίου με μια ολοκληρωμένη υδρόψυκτη ψυχρή πλάκα. Το πλαίσιο αποτελείται από 10 κελιά. Με βέλτιστη ροή ψυκτικού ίση με  $0,0127 \text{ kg/s}$  και επιφάνεια  $36 \text{ cm}^2$ , η συνολική θερμική αντίσταση από το κελί στο νερό (συμπεριλαμβανομένων όλων των στρωμάτων) μετρήθηκε ότι είναι  $2,3 \times 10^{-4} \text{ Km}^2/\text{W}$ . Το σχέδιο περιγράφεται περαιτέρω από τον Tilford, με εικόνες του πλαισίου και κάποιες διευκρινίσεις. Παρόλα αυτά, λεπτομέρειες για τον τρόπο που ρέει το νερό μέσω της ψυχρής πλάκας δεν βρέθηκαν.

Ο Lasich (2002) πρόσφατα δημιούργησε μια πατέντα με ένα κύκλωμα υδρόψυξης για πυκνά δομημένα κελιά υπό υψηλή συγκέντρωση. Το κύκλωμα είναι ικανό να απαγάγει πάνω από  $500 \text{ kW/m}^2$  από τα φωτοβολταϊκά κελιά, και να κρατήσει τη θερμοκρασία τους στους  $40^\circ\text{C}$  υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Αυτή η ιδέα βασίζεται σε ροή νερού μέσω μικρών παράλληλων καναλιών σε θερμική επαφή με τα κελιά. Το κύκλωμα ψύξης επίσης διαμορφώνει ένα μέρος της συνοδευτικής δομής του φωτοβολταϊκού αποδέκτη. Το πλαίσιο κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο για εύκολη συντήρηση και αποφυγή προβλημάτων όσον αφορά τους διαφορετικούς συντελεστές διαστολής των διαφόρων στοιχείων.

Η SolarSystemsPty. Ltd. ανέφερε μερικά σημαντικά αποτελέσματα από τα παραβολικά συγκεντρωτικά πιάτα που βρίσκονται στο WhiteCliffs, στην Australia. Λειτουργούν με μια συγκέντρωση περίπου 340 ήλιων, και χρησιμοποιούν την προαναφερθείσα πατέντα. Με μια ροή νερού στα  $0,56 \text{ kg/s}$  πάνω από μια επιφάνεια  $576 \text{ cm}^2$  με ηλεκτρική ισχύ αντλίας  $86 \text{ W}$ , διατηρεί μέση θερμοκρασία κελιού στους  $38,52^\circ\text{C}$  και επιτυγχάνει απόδοση  $24\%$  για κελιά HEDA312 Point-Contact της SunPower. Εάν όλη η απαγόμενη θερμότητα χρησιμοποιούταν, η ολική απόδοση του συστήματος θα ήταν πάνω από  $70\%$ . Αυτό αποδεικνύει καθαρά τα πλεονεκτήματα της ψύξης εάν αξιοποιηθεί η παραγόμενη θερμότητα.

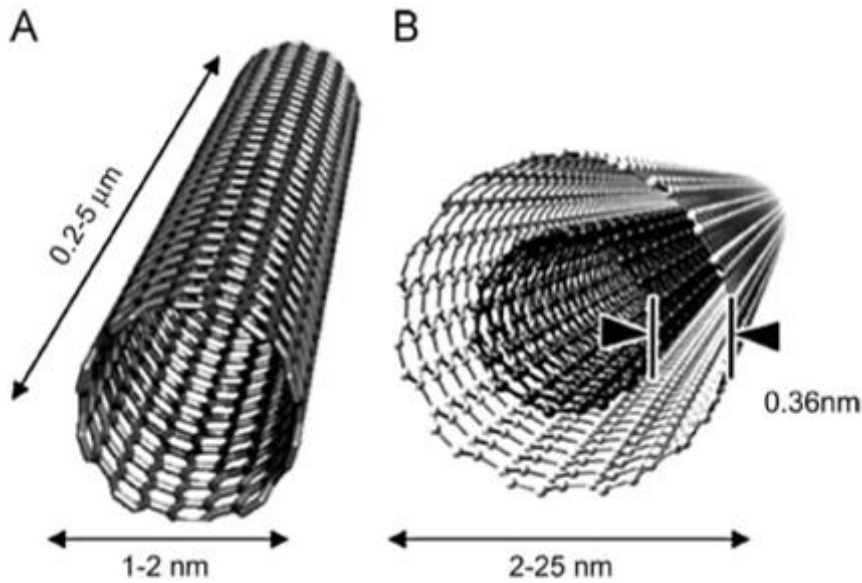
Ο Vincenzi (2002) από το Πανεπιστήμιο της Ferrara πρότεινε τη χρήση μικρομηχανικών ψυκτρών πυριτίου για το συγκεντρωτικό σύστημα. Ο αποδέκτης έχει μια επιφάνεια περίπου  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  και λειτουργεί σε ένα επίπεδο συγκέντρωσης 120 ήλιων. Χρησιμοποιώντας πλακίδια (wafers) πυριτίου με μικροκανάλια όπου το νερό κυκλοφορεί κατευθείαν κάτω από τα κελιά, το σύστημα ψύξης ολοκληρώνεται με τη διαδικασία κατασκευής του κελιού. Η αναφερόμενη θερμική αντίσταση ήταν της τάξεως του  $4 \times 10^5 \text{ Km}^2/\text{W}$ .

## 2.7 Νανοσωλήνες άνθρακα

Το 1991 ο Ιάπωνας φυσικός Iijima παρουσίασε τη σύνθεση «ενός νέου είδους δομής άνθρακα αποτελούμενη από σωλήνες μεγέθους βελόνας», αναφερόμενοι ως νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs). Είναι ομόκεντροι κύλινδροι γραφίτη, κλειστοί σε τουλάχιστον ένα άκρο με ημισφαιρική δομή, όπως ταφουλερένια. Οι διαμέτροι και τα μήκη τους είναι της τάξης του nm και του μm, αντίστοιχα. Οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν υψηλή μηχανική αγωγή και καλή θερμική αγωγιμότητα. Κατατάσσονται γενικά σε δύο κατηγορίες, οι οποίες διαφέρουν ως προς τη διάμετρο και τις θερμικές ιδιότητες: YingLS. etal., 2011).

- Μονοφλοιϊκοί νανοσωλήνες (SWCNT ή SWNT): υπάρχει μόνο ένας σωλήνας με διάμετρο 1-2 nm, αποτελούμενος από ένα φύλλο γραφενίου χωρίς επιπλέον στρώματα γραφίτη. Έχουν καλές ηλεκτρικές ιδιότητες αλλά είναι ακριβή η κατασκευή τους.
- Πολυφλοιϊκοί νανοσωλήνες (MWCNT ή MWNT): υπάρχει ένας κεντρικός σωλήνας που περιβάλλεται από έναν ή περισσότερους ομοαξονικούς κυλίνδρους που συγκρατούνται μεταξύ τους με διασπρωματικές δυνάμεις vanderWaals. Οι διαμέτροι κυμαίνονται από λίγα nm ως εκατοντάδες nm και τα μήκη μπορούν να φτάσουν τα 100 nm.

Ορισμένοι νανοσωλήνες που αποτελούνται από δύο μόνο στρώματα ανήκουν σε διαφορετική κατηγορία από τις δύο παραπάνω και ονομάζονται διπλοφλοιϊκοί νανοσωλήνες (DWCNT ή DWNT) (YingLS. etal., 2011).



**Εικόνα 2.10: Μονοφλοιικός (αριστερά) και πολυφλοιικός (δεξιά) νανοσωλήνας άνθρακα (MichellL. etal., 2013)**

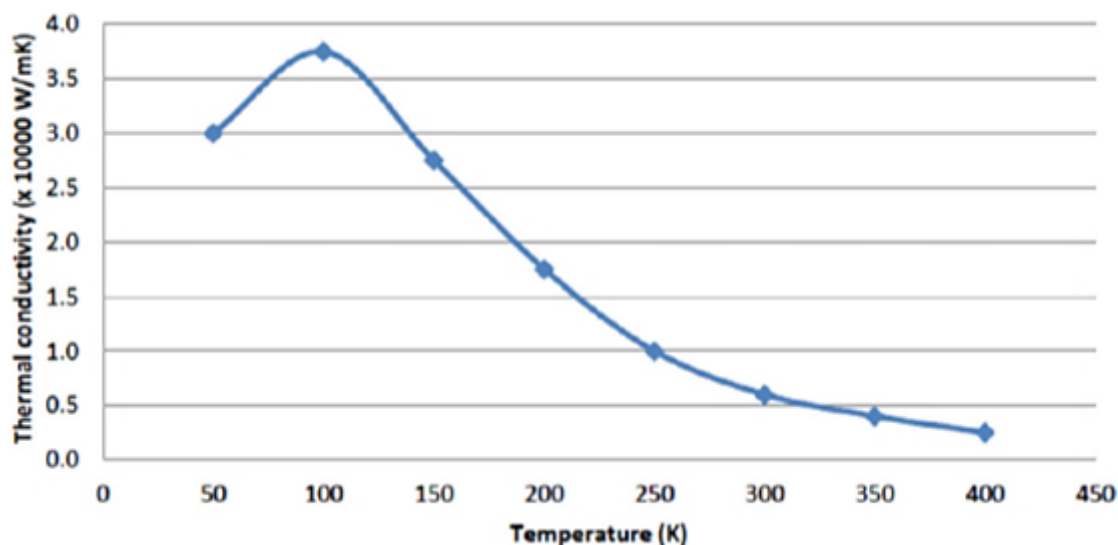
Οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν λάβει σημαντική προσοχή λόγω των σημαντικών θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους που τους καθιστούν κατάλληλες για εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως η ιατρική (Reilly RM, 2007) η αεροδιαστημική και ο φωτισμός (Endo M etal., 2008).

#### Θερμική αγωγιμότητα νανοσωλήνων άνθρακα

Το ανώτερο όριο της θερμικής αγωγιμότητας των νανοσωλήνων άνθρακα έχει βρεθεί ίσο με  $4 \times 10^9 \text{ W/m}^2\text{K}$  σε θερμοκρασία δωματίου. (Shakouri, 2006) Μια ερευνητική ομάδα κατέγραψε αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας κατά 400%, χρησιμοποιώντας συστοιχίες CNT στην επιφάνεια ενός μικροεπεξεργαστή (Yeom J. etal., 2007) Οι Kim et al. (2001) μέτρησαν τη θερμική αγωγιμότητα ενός μεμονωμένου νανοσωλήνα άνθρακα, και η τιμή που προσδιόρισαν ήταν περίπου  $3000 \text{ W/mK}$ . Οι Tong et al. (2007) προσδιόρισαν τη θερμική αγωγιμότητα μιας συστοιχίας MWCNT ίση με  $250 \text{ W/mK}$ , κατασκευασμένη σε δίσκο πυριτίου μέσω χημικής εναπόθεσης ατμού με Fe μετάπτωσης ως καταλύτη.

Οι Berber et al. (2000) εκτέλεσαν μια μελέτη προσομοίωσης για να προσδιορίσουν τη θερμική αγωγιμότητα του CNT και την εξάρτησή της από τη θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα της μελέτης τους παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.11. Συνδυάζοντας προσομοιώσεις μοριακής δυναμικής σε συνθήκες ισορροπίας και μη ισορροπίας με ακριβείς εξισώσεις δυναμικού για τον άνθρακα, οι μελετητές κατέγραψαν τιμή

6600 W/mK για ένα μεμονωμένο νανοσωλήνα άνθρακα σε θερμοκρασία δωματίου, τιμή που είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη για το διαμάντι.



**Εικόνα 2.11:** Εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας από τη θερμοκρασία για θερμοκρασίες ως 400 K (Berber et al. 2000)

Οι Kordas et al. (2007) μελέτησαν νανοσωλήνες άνθρακα μήκους 1,2 mm σε έναν μικροεπεξεργαστή πυριτίου επιφάνειας 1 mm<sup>2</sup>. Οι δοκιμές έγιναν με διάφορα θερμικά φορτία (ως 7 W) και διάφορες παροχές αερίου ψύξης (N<sub>2</sub>). Σύμφωνα με τους ερευνητές, η νανοδομή επιτρέπει την απομάκρυνση 30 και 100 W/cm<sup>2</sup> περισσότερης ισχύος στους 100 °C από ένα θερμό μικροεπεξεργαστή σε σχέση με την περίπτωση της φυσικής και της εξαναγκασμένης συναγωγής, αντίστοιχα. Συνεπώς, οι νανοσωλήνες άνθρακα αποτελούν μια πολύ ενδιαφέρουσα λύση για την παθητική ψύξη συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων μεταφοράς θερμότητας.

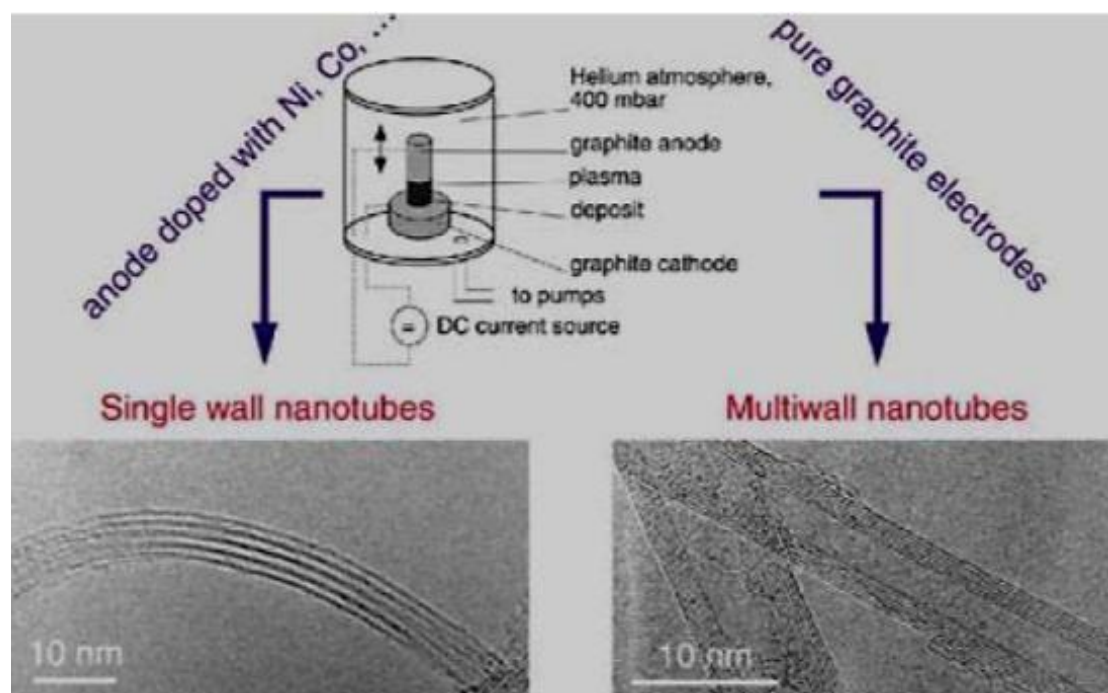
## 2.8 Παραγωγή νανοσωλήνων άνθρακα

Υπάρχουν τέσσερις τρόποι σύνθεσης νανοσωλήνων άνθρακα: εκκένωσης τόξου, χημική εναπόθεση ατμού, εξάχνωση με laser και με μονοξείδιο του άνθρακα υψηλής πίεσης. (ShakouriB. 2006)

### 2.8.1 Μέθοδος εκκένωσης τόξου (arc discharge)

Η μέθοδος εκκένωσης τόξου είναι αυτή με την οποία ανακαλύφθηκαν οι νανοσωλήνες άνθρακα από τον Iijima το 1991 (HanX. etal.,2009) αν και αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή φουλερενίων C<sub>60</sub>. Εφαρμόζεται υπό χαμηλή πίεση (50-700 mbar) και σε αδρανή ατμόσφαιρα, π.χ. He ή Ar. Συνεπώς, χρειάζονται αεροστεγείς αντιδραστήρες και εξοπλισμός για την επίτευξη κενού. Ένας τυπικός αντιδραστήρας εκκένωσης τόξου παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.12.

Κατά τη λειτουργία του, δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο εκκένωσης ανάμεσα σε δυο ράβδους - ηλεκτρόδια γραφίτη με ή χωρίς μεταλλικό καταλύτη. Αυτό επιτυγχάνεται με εφαρμογή κατάλληλης τάσης (30-35 V). Η παραγόμενη υψηλή θερμοκρασία του πλάσματος μεταξύ των ηλεκτροδίων ( ~ 4000 K ) εξαχνώνει τον γραφίτη της ανόδου και ο παραγόμενος αέριος άνθρακας εναποτίθεται στην κάθοδο υπό μορφή νανοσωλήνων. Όταν καταναλωθεί όλη η ράβδος, διακόπτεται η παροχή ρεύματος και ο αντιδραστήρας αφήνεται να ψυχθεί. Δυο είδη σύνθεσης μπορεί να εκτελεστούν στο τόξο: εξάτμιση καθαρού γραφίτη, που συνήθως οδηγεί στην ανάπτυξη πολυφλοιικών νανοσωλήνων άνθρακα ή συν-εξάτμιση γραφίτη και μετάλλου με αποτέλεσμα τη δημιουργία μονοφλοιικών νανοσωλήνων άνθρακα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.12 (GururatanaS., 2012).



**Εικόνα 2.12:** Πειραματική διάταξη αντιδραστήρα εκκένωσης τόξου και TEM εικόνες των παραγόμενων νανοσωλήνων άνθρακα ανάλογα της σύστασης της ράβδου της ανόδου (HanX. etal.,2009)

Σύμφωνα με τον Keidar (2007) οι νανοσωλήνες άνθρακα που παράγονται με αυτή τη μέθοδο έχουν λιγότερες δομικές ατέλειες σε σύγκριση με αυτές που παράγονται με τεχνικές χαμηλής θερμοκρασίας, παρόλο που η μέθοδος εκκένωσης τόξου παράγει μεγάλες ποσότητες ακάθαρτου υλικού, δηλαδή παραπροϊόντα, όπως φουλερένια και άμορφο άνθρακα (AqeilA.etal., 2010)

Οι παραγόμενοι MWCNTs έχουν συνήθως (εξωτερική) διάμετρο 10 nm. Η ποσότητα των παραγόμενων νανοσωλήνων φαίνεται να εξαρτάται από την ομοιομορφία του πλάσματος του τόξου καθώς και τη θερμοκρασία του εναποτιθέμενου άνθρακα. Σημαντικό ρόλο στο καθορισμό της διαμέτρου των εναποτιθέμενων νανοσωλήνων παίζει και το αδρανές αέριο, μιας και ο συντελεστής διάχυσης και η θερμική του αγωγιμότητα επηρεάζουν την ταχύτητα με την οποία τα μόρια του άνθρακα διαχέονται και ψύχονται (YingLSetal., 2011).

Η ποσότητα και η ποιότητα των παραγόμενων νανοσωλήνων εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους, όπως η γεωμετρία του συστήματος, η συγκέντρωση του μετάλλου, η ένταση του ρεύματος καθώς και το είδος και η πίεση του αερίου. Συνήθως η ένταση του ρεύματος είναι χαμηλή και σταθερή για την επίτευξη σταθερού πλάσματος, ενώ αύξηση της πίεσης του αερίου συνήθως οδηγεί σε αύξηση της παραγωγής των νανοσωλήνων (Buonomo B. etal., 2010)

## **2.8.2 Μέθοδος χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD)**

Η χημική εναπόθεση ατμών είναι η πιο συνήθης και απλή μέθοδος παραγωγής νανοσωλήνων άνθρακα. Ενδείκνυται για παραγωγή νανοσωλήνων άνθρακα μεγάλης κλίμακας σε πολύ μικρότερη θερμοκρασία και με μειωμένο κόστος (GururatanaS.,2012, TongT., 2007). Μπορεί να ελέγχεται η διάμετρος, το μήκος, η μορφολογία, καθώς και ο ρυθμός ανάπτυξης των παραγόμενων νανοσωλήνων, μεταβάλλοντας το μέγεθος των καταλυτικών σωματιδίων και τις συνθήκες της εναπόθεσης (Amrollahietal., 2008). Επίσης, με την συγκεκριμένη μέθοδο δημιουργούνται ελάχιστες προσμείξεις ανεπιθύμητων μορφών άνθρακα, ενώ τα εγκλωβισμένα καταλυτικά σωματίδια συνήθως βρίσκονται στα άκρα των νανοσωλήνων, καθιστώντας εύκολη την απομάκρυνσή τους στο στάδιο του καθαρισμού που ακολουθεί εκείνο της ανάπτυξης των νανοσωλήνων.

Κατά τη μέθοδο αυτή, οι νανοσωλήνες παράγονται μέσω κατάλυσης, που περιλαμβάνει την αποσύνθεση του αερίου υδρογονάνθρακα από



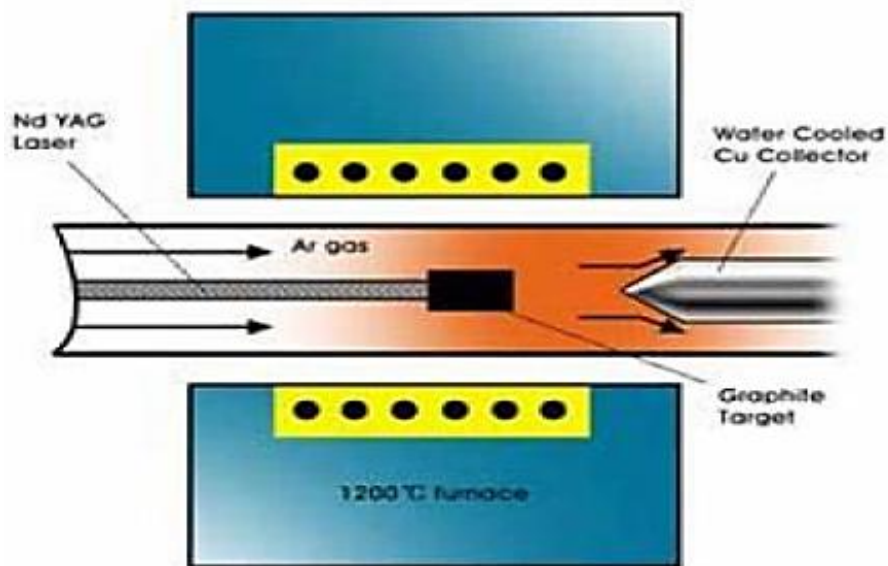
ορισμένα από τα προκύπτοντα άτομα άνθρακα. Η μέθοδος της χημικής εναπόθεσης ατμών αποτελείται από δύο κυρίως στάδια. Το πρώτο αποτελεί η παρασκευή του καταλύτη και το δεύτερο η σύνθεση των νανοσωλήνων άνθρακα (GuatataanaS., 2012). Ο καταλύτης που χρησιμοποιείται στη μέθοδο CVD αποτελείται συνήθως από σωματίδια ενός μετάλλου μετάπτωσης (π.χ. Fe, Ni, Co) ή μείγμα αυτών διασπαρμένα σε διάφορα υποστρώματα. Το υπόστρωμα παίζει σημαντικό ρόλο επιδρώντας στην δραστικότητα του καταλύτη και την ποιότητα των παραγόμενων νανοσωλήνων άνθρακα.

Αυτή η παράμετρος μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να αναπτυχθούν νανοσωλήνες άνθρακα με την επιθυμητή διάμετρο, αφού το μέγεθος των καταλυτικών σωματιδίων είναι αυτό που καθορίζει και τη διάμετρο των παραγόμενων CNTs. Ο καταλύτης παίζει σημαντικό ρόλο στον ρυθμό ανάπτυξης, στην καθαρότητα και στα δομικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων νανοσωλήνων άνθρακα. Μερικοί μεταλλικοί καταλύτες είναι κατάλληλοι για την επιλεκτική ανάπτυξη μονοφλοιικών νανοσωλήνων άνθρακα παρά πολυφλοιικών. (GuatataanaS., 2012)

### **2.8.3 Μέθοδος εξάχνωσης με laser**

Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε αρχικά το 1995 από την ερευνητική ομάδα του Smalley, ο οποίος χρησιμοποίησε μια διάταξη όπως αυτή που παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 2.13 για την παραγωγή νανοσωλήνων άνθρακα. Το laser μπορεί να είναι παλμικό ή συνεχές και η θερμοκρασία στον κλίβανο συνήθως είναι μεγαλύτερη των 1000 °C. Η πίεση στον αντιδραστήρα διατηρείται χαμηλή (~ 500 Torr) με την παρουσία αδρανούς αερίου, He ή Ar. (Maser et al. 2002)

Αφού εξαχνωθεί ο γραφίτικός στόχος, σχηματίζονται μικρά μόρια και άτομα άνθρακα που μεταφέρονται με τη ροή του αδρανούς αερίου. Έπειτα ψύχονται στον υδρόψυκτο συλλέκτη και συμπυκνώνονται γρήγορα, δημιουργώντας μεγάλα συσσωματώματα, που είναι δυνατό να περιέχουν και φουλερένια. Η μέθοδος αυτή οδηγεί στην παραγωγή νανοσωλήνων καλύτερης ποιότητας σε σχέση με τη μέθοδο εκκένωσης τόξου. Όμως, ο ρυθμός παραγωγής είναι μικρός. Σύμφωνα με τους Maser et al. (2002), η μέθοδος αυτή δεν είναι ανταγωνιστική σε παραγωγή μεγάλης κλίμακας.



Εικόνα 2.13: Απεικόνιση διάταξης για την παραγωγή νανοσωλήνων με τη μέθοδο της εξαχνωσης με laser (Maser et al. 2002)

## 2.8.4 Μέθοδος μονοξειδίου άνθρακα υψηλής πίεσης

Η μέθοδος αυτή είναι μια καταλυτική διαδικασία αέριας φάσης με χαμηλό κόστος, που αναπτύχθηκε το 1999 από τους Smalley et al. (SeeCH.etal., 2007). Η βασική αρχή της μεθόδου βασίζεται στη διάσπαση του  $\text{Fe}(\text{CO})_5$  σε CO σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Η μέθοδος αυτή μπορεί να είναι συνεχής. Από ορισμένους ερευνητές θεωρείται ως υποκατηγορία των μεθόδων χημικής εναπόθεσης, ενώ από άλλους μελετάται ξεχωριστά (SeeCH. etal., 2007).

## 2.9 Νανοςύρματα

Ένα νανοςύρμα είναι μια μονοδιάστατη δομή, όπου το μήκος του είναι κατά πολύ επεκταμένο σε σχέση με τα διαμέτρά του, το οποίο συνήθως κυμαίνεται σε μερικά νανόμετρα. Σύμφωνα με τον Zhang (2008), την τελευταία δεκαετία τα νανοςύρματα βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορα πεδία, όπως οι βιοϊασητήρες και σε άλλες ηλεκτρονικές συσκευές. Επιπροσθέτως, το 2009, ο Li et al. σχεδίασε ένα φωτοβολταϊκό δομοστοιχείο κατασκευασμένο από συστοιχίες νανოსυρμάτων Si. Οι ερευνητές βρήκαν ότι οι συστοιχίες νανοςυρμάτων πυριτίου μπορούν να επιτύχουν ισάξια υψηλή απόδοση με το υμένιο πυριτίου ίδιου πάχους.

Τα νανοσύρματα συνήθως χρησιμοποιούνται σε θερμοηλεκτρικές συσκευές (NASA, 2007), λόγω της υψηλής ηλεκτρικής και της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας που επιδεικνύουν (Volz SG. etal., 1999). Έχουν τη δυνατότητα μετατροπής της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια. Λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητάς τους δεν ενδείκνυνται για εφαρμογές παθητικής ψύξης.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Χρήση νανο-ρευστών**

### **3.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία**

Ένα από τα κύρια προβλήματα, που απαιτούσαν την εύρεση λύσης, στην ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων μεταφοράς θερμότητας ήταν η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των ρευστών. Το 1993 οι Masuda et al. ήταν οι πρώτοι που διερεύνησαν τη θερμική αγωγιμότητα νερού το οποίο περιείχε νανοσωματίδια  $Al_2O_3$ . Οι Choi and Eastman πρότειναν την ιδέα δημιουργίας νανο-ρευστών το 1999 για τη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας. Ο Choi προερχόταν από το Εθνικό Εργαστήριο της Argonne των Η.Π.Α. (Argonne National Laboratory), πρότεινε και πέτυχε τη διασπορά νανοσωματιδίων σε κοινά βιομηχανικά ρευστά μεταφοράς θερμότητας και εισήγαγε για πρώτη φορά τον όρο «νανο-ρευστό».

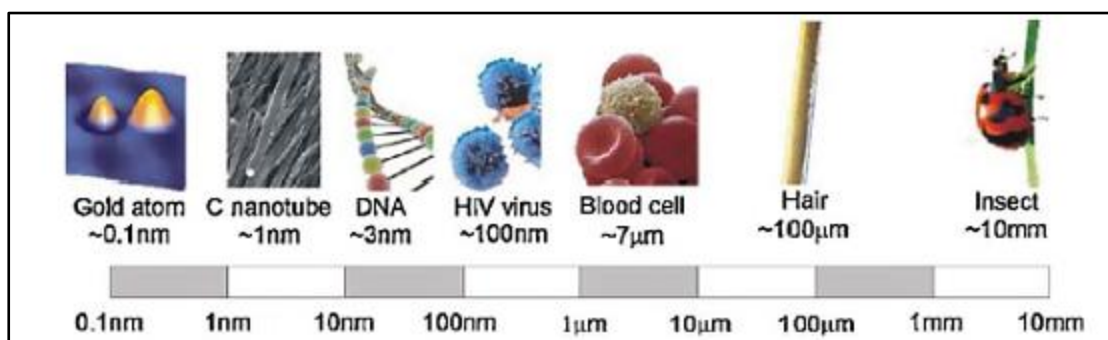
Η τεχνολογία των νανορευστών αποτελεί ένα νέο διεπιστημονικό πεδίο, όπου συναντιούνται η νανοεπιστήμη, η νανοτεχνολογία και η θερμική μηχανική, και αναμένεται να γνωρίσει σπουδαία εξέλιξη στα επόμενα χρόνια. Στην έρευνα πάνω στα νανορευστά εκτός από πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους και μικρές επιχειρήσεις ή πολυεθνικές εταιρίες που αποβλέπουν σε κέρδη από την χρήση τους σε μελλοντικές εφαρμογές (κυρίως για τη χρησιμοποίησή τους σαν υψηλής απόδοσης ψυκτικά μέσα). (Saidur et al. 2011)

Το εντυπωσιακό είναι ότι η προσθήκη πολύ μικρής ποσότητας νανοδομών (<1 % κ.ό.) προκαλεί δυσανάλογα μεγάλη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με αυτή του αρχικού υγρού μέσου. Η μικρή ποσότητα νανοδομών που απαιτείται σε συνδυασμό με το ολόένα και μικρότερο κόστος τους, κάνει τα καινοτόμα αυτά υλικά πολύ ελκυστικά για ποικίλες χρήσεις, από βιοϊατρικές μέχρι εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας. (Saidur et al. 2011)

### **3.2 Ορισμός και πλεονεκτήματα νανο-ρευστών**

Τα νανο-ρευστά είναι μια σχετικά νέα κατηγορία ρευστών, τα οποία αποτελούνται από ένα ρευστό βάσης με σωματίδια μεγέθους νανόμετρου (1–100 nm) να αιωρούνται σε αυτό. Τα σωματίδια, συνήθως είναι μέταλλα ή οξείδια μετάλλων, που αυξάνουν τους συντελεστές αγωγής και

συναγωγής, επιτρέποντας μεγαλύτερη μεταφορά θερμότητας από το ψυκτικό (SaidurR. etal. 2011). Οι Serrano et al. (2009), παρέχουν εξαιρετικά παραδείγματα για την κατανόηση του μεγέθους νανόμετρου σε σύγκριση με το χιλιοστό και το μικρόμετρο όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1.



**Εικόνα 3.1: Μήκος κλίμακας και χαρακτηριστικά παραδείγματα (Serrano et al. 2009)**

Τις προηγούμενες δεκαετίες, οι ραγδαίες εξελίξεις στη νανοτεχνολογία οδήγησαν στην εμφάνιση μιας νέας γενιάς ψυκτικών, τα οποία αποκαλούνται «νανορευσά». Τα νανορευσά ορίζονται ως αιώρημα νανοσωματιδίων σε κάποιο ρευστό βάσης. Μερικά τυπικά νανορευσά είναι αιθυλενογλυκόλη/χαλκού και νανορευσά νερού/χαλκού. Τα ρευστά είναι αραιά αιωρήματα ενεργών σύνθετων υλικών νανοσωματιδίων, που δημιουργήθηκαν πριν από περίπου μια δεκαετία, με σκοπό την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού, και έχουν πλέον αναπτυχθεί σε μια πολλά υποσχόμενη περιοχή νανοτεχνολογίας. Τα νανορευσά αυτά για εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας αντιπροσωπεύουν μια κατηγορία διαφορετική από τα συμβατικά κolloειδή, τα οποία χρησιμοποιούνται σε άλλες εφαρμογές. Σε σύγκριση με τα συμβατικά αιωρήματα στερεού-υγρού για την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας, τα νανορευσά έχουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα (SaidurR. etal. 2011):

- Μεγάλη ειδική επιφάνεια και κατά συνέπεια μεγαλύτερη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας μεταξύ σωματιδίων και ρευστού.
- Μεγάλη σταθερότητα αιώρησης με κυρίαρχη την κίνηση κατά Brown των σωματιδίων.
- Μειωμένη ισχύ αντλίας σε σύγκριση με το καθαρό υγρό, ώστε να επιτευχθεί ισοδύναμη ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας.

- Μειωμένη συσσωμάτωση των σωματιδίων σε σύγκριση με τα συμβατικά αιωρήματα σωματιδίων, ευνοώντας κατά συνέπεια τη δημιουργία συστημάτων μικρότερων διαστάσεων.
- Προσαρμοζόμενες ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της θερμικής αγωγιμότητας και τη διαβρεκτική ικανότητα της επιφάνειας, μεταβάλλοντας τη συγκέντρωση των σωματιδίων ώστε να ταιριάζουν σε διάφορες εφαρμογές. (SaidurR. etal. 2011)

### 3.3 Μέθοδοι παραγωγής νανο-ρευστών

Η διαδικασία παραγωγής των νανο-ρευστών αποτελεί το πρώτο βήμα για την κατανόηση και διερεύνηση της θερμικής τους συμπεριφοράς. Βασίζεται στην διασπορά νανοσωματιδίων, τα οποία παρουσιάζουν νέες ή βελτιωμένες ιδιότητες συγκριτικά με το υλικό από το οποίο προέρχονται, σε κάποιο κυρίως υγρό η στην απευθείας δημιουργία σταθερών νανο-ρευστών. Το κυρίως μέσο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι το νερό, η αιθυλενογλυκόλη, το μηχανέλαιο ή διάφορα μείγματα (π.χ. νερό-αιθυλενογλυκόλη για εφαρμογές θέρμανσης ή αυτοκίνησης). (SaidurR. etal. 2011)

Μερικά από τα πιο διαδεδομένα υλικά των νανοσωματιδίων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή νανο-ρευστών είναι κεραμικά οξείδια ( $Al_2O_3$ ,  $CuO$ ), μέταλλα ( $Ag$ ,  $Au$ ,  $Cu$ ,  $Fe$ ), ημιαγωγοί ( $TiO_2$ ), μόνο/δίπλο/πόλυ-στρωματικοί νανοσωλήνες άνθρακα (SWCNT, DWCNT, MWCNT), κεραμικά νιτρίδια ( $AlN$ ,  $SiN$ ), κεραμικά καρβίδια ( $SiC$ ,  $TiC$ ) και συνθετικά υλικά. (SaidurR. etal. 2011)

Ο Πίνακας 3.1 και ο

Πίνακας 3.2 παρουσιάζουν την θερμική αγωγιμότητα των σημαντικότερων υλικών διασποράς και ρευστών βάσης, αντίστοιχα, που συναντώνται στην επιστήμη των νανο-ρευστών σε θερμοκρασία αναφοράς  $T=20^{\circ}C$ .

**Πίνακας 3.1: Θερμική αγωγιμότητα των κυριότερων υλικών διασποράς για νανο-ρευστά (SaidurR. etal. 2011)**

<b>Υλικό διασποράς</b>	<b>Θερμική αγωγιμότητα <math>k</math> [W/mK]</b>
<b>Ag</b>	429
<b>Au</b>	318
<b>Cu</b>	401
<b>Fe</b>	80,4
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	40
<b>CuO</b>	80
<b>CNT's</b>	3000
<b>SiC</b>	120
<b>TiC</b>	5,64
<b>TiO<sub>2</sub></b>	8,4

**Πίνακας 3.2: Θερμική αγωγιμότητα των κυριότερων ρευστών βάσης (SaidurR. etal. 2011)**

<b>Ρευστό Βάσης</b>	<b>Θερμική αγωγιμότητα <math>k</math> [W/mK]</b>
<b>Νερό</b>	0,613
<b>Αιθυλενογλυκόλη (EG)</b>	0,253
<b>Γλυκερόλη</b>	0,28
<b>Μηχανέλαιο (EO)</b>	0,145

Το ζητούμενο κατά την παραγωγή των νανο-ρευστών είναι η δημιουργία σταθερών αιωρημάτων κατάλληλων για εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας. Οι ιδιότητες και η συμπεριφορά των νανο-ρευστών εξαρτάται εν πολλοίς από τις ιδιότητες του κυρίως ρευστού (μέσα στο οποίο εισάγονται τα νανοσωματίδια), τη συγκέντρωση των σωματιδίων, το σχήμα και τη μορφολογία τους, καθώς και από πιθανή ύπαρξη ουσιών

διασποράς ή επιφανειοδραστικών ουσιών. Ο σχηματισμός σταθερών αιωρημάτων χρησιμοποιείται ευρέως και στην βιομηχανία κολλοειδών ωστόσο το «σκληρό» περιβάλλον στο οποίο χρησιμοποιούνται τα νανο-ρευστά (αυξημένες διατμητικές τάσεις, υψηλές θερμοκρασίες) κάνουν και πιο απαιτητική την παραγωγή τους. (SaidurR. etal. 2011)

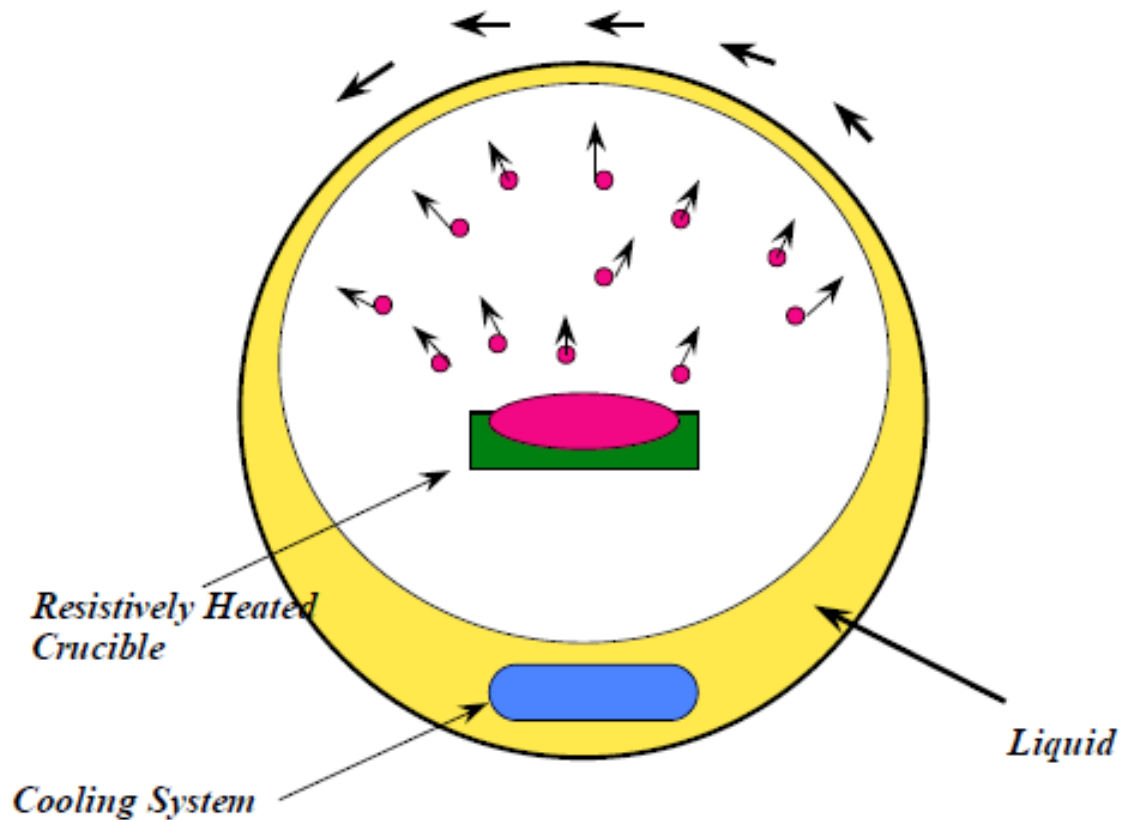
Στις περισσότερες περιπτώσεις τα νανο-ρευστά παράγονται σε μορφή σκόνης και στη συνέχεια διασπείρονται στα συμβατικά συνεχή μέσα για να σχηματίσουν τα νανο-ρευστά για συγκεκριμένες εφαρμογές. (SaidurR. etal. 2011)

### **3.3.1 Διαδικασία παραγωγής ενός βήματος**

Η μέθοδος ενός βήματος ή αλλιώς τεχνική άμεσης εξάτμισης συνθέτει και διασκορπίζει τα νανοσωματίδια στο ρευστό σε ένα βήμα. Όπως συμβαίνει και με την τεχνική συμπύκνωσης αδρανούς αερίου, η τεχνική αυτή βασίζεται στην ατμοποίηση της πρώτης ύλης υπό συνθήκες κενού, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2: Διαδικασία παραγωγής ενός βήματος . Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει αυτή η μέθοδος είναι η ελαχιστοποίηση της συσσώρευσης (συσσωμάτωσης) των νανοσωματιδίων μέσα στο ρευστό ενώ τα μειονεκτήματα είναι ότι το υγρό θα πρέπει να έχει πολύ μικρή τάση ατμών και ότι η τεχνική αυτή μπορεί να παράγει πολύ περιορισμένη ποσότητα νανο-ρευστών. Παράλληλα η μέθοδος αυτή προτιμάται για μεταλλικά νανοσωματίδια όπως ο χαλκός που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στην συσσώματωση από ελαφρύτερα σωματίδια όπως τα οξείδια του μετάλλου. (SaidurR. etal. 2011)

Η τεχνική του ενός βήματος αναπτύχθηκε αρχικά στην Ιαπωνία από τον Akoh (1978) και πήρε την ονομασία VEROS (VacuumEvaporationontoaRunningOilSubstrate) δηλαδή ατμοποίηση σε συνθήκες κενού σε στρεφόμενο υπόστρωμα λαδιού.

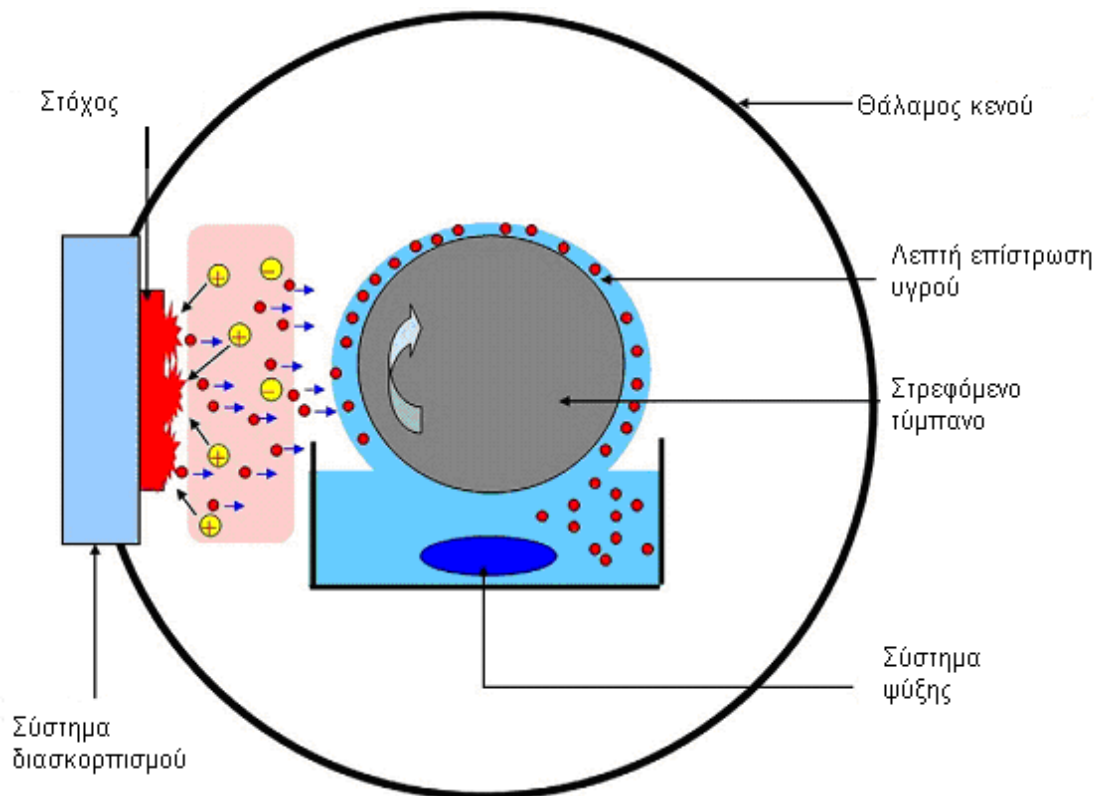




**Εικόνα 3.2: Διαδικασία παραγωγής ενός βήματος (SaidurR. etal. 2011)**

Το υλικό σε αυτή την περίπτωση είναι μέταλλο, το οποίο θερμαίνεται με αποτέλεσμα την ατμοποίηση των νανοκρυσταλλικών σωματιδίων και το διασκορπισμό τους σε υγρό χαμηλής τάσης ατμών. Το υγρό βρίσκεται σε κύλινδρο ο οποίος περιστρέφεται διαρκώς γύρω από την πηγή θέρμανσης, ενώ το υγρό ψύχεται για να εμποδιστεί μια ανεπιθύμητη αύξηση στην τάση ατμών λόγω της θερμότητας από ακτινοβολία που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια της ατμοποίησης. (SaidurR. etal. 2011)

Αργότερα η τεχνική αυτή διαμορφώθηκε και βελτιώθηκε (Wagener, Γερμανία 1997) και πήρε τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 3.3.



**Εικόνα 3.3: Παραγωγή νανο-ρευστών με τη χρήση συσκευής μάγνητρον (ενός βήματος)(HwangY. etal. 2008)**

Το μέταλλο (στόχος) βομβαρδίζεται από μία λεπτή ηλεκτρομαγνητική δέσμη (π.χ. με τη χρήση συσκευής μάγνητρον) με αποτέλεσμα σωματίδια (άτομα) από την επιφάνεια του να αποκολλούνται, να εισέρχονται και να διασκορπίζονται στο ρευστό (λεπτή επίστρωση) που περιστρέφεται με την βοήθεια στρεφόμενου τύμπανου. Η παραπάνω διαδικασία λαμβάνει χώρα σε συνθήκες κενού.

Τέλος ο ZhuH.T παρουσίασε το 2004 μια χημική μέθοδο ενός βήματος που αφορά στη διάσπαση του  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  σε αιθυλενογλυκόλη με τη χρήση ακτινοβολίας μικροκυμάτων, για την παραγωγή νανο-ρευστών με σωματίδια Cu.

Χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα πολυμερή σαν προστατευτικά και σταθεροποιητές για την αποφυγή δημιουργίας συσσωματωμάτων. Τα νανο-ρευστά που προέκυψαν παρουσίαζαν την ίδια βελτίωση στη θερμική τους αγωγιμότητα με αυτά που παρήχθησαν από τις φυσικές μεθόδους ενός- βήματος, ενώ αν συνεχιστεί η έρευνα πάνω σε αυτή τη χημική τεχνική οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι θα μπορούν να παράγουν νανο-ρευστά σε μεγαλύτερες ποσότητες και γρηγορότερα σε σχέση με τη φυσική μέθοδο.(Hwang Y. et al. 2008)

Η μέθοδος του ενός βήματος παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι μετέπειτα είναι πολύ δύσκολος ο διαχωρισμός των σωματιδίων από το ρευστό για τη δημιουργία ξηρής σκόνης (πούδρας) και αυτός είναι ο λόγος που δε χρησιμοποιείται ευρέως. Παράλληλα η χρήση της παραπάνω τεχνικής περιορίζεται από άλλους δύο παράγοντες. Ο πρώτος είναι ότι χρήση της απαιτεί συνθήκες κενού η ύπαρξη των οποίων επιβραδύνει τους ρυθμούς παραγωγής και περιορίζει την παραγόμενη ποσότητα και ο δεύτερος είναι το αρκετά υψηλό κόστος της. (Hwang Y. et al. 2008)

### **3.3.2 Διαδικασία παραγωγής δύο βημάτων**

Η μέθοδος των δύο βημάτων περιλαμβάνει αρχικά την δημιουργία των νανοσωματιδίων και στη συνέχεια το διασκορπισμό τους στο κυρίως ρευστό (συνεχές μέσο). Η μέθοδος αυτή είναι και η πιο διαδεδομένη αν αναλογιστεί κανείς τη μεγάλη κυκλοφορία νανοσωματιδίων με μέσο μέγεθος περίπου 10nm σε σκόνη, από διάφορες εταιρίες παγκοσμίως. Σε σύγκριση με τη μέθοδο ενός βήματος, η τεχνική των δύο βημάτων χρησιμοποιείται για τη διασπορά σωματιδίων οξειδίων του μετάλλου αντί για μεταλλικά σωματίδια. (HwangY. et al. 2008)

Οι τεχνικές παραγωγής νανοσωματιδίων χωρίζονται σε μηχανικές, φυσικές και χημικές. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

1. Συμπύκνωση (gas-phase condensation, physical vapors synthesis), όπου το πρωτεύον υλικό θερμαίνεται υπό κενό, μέρος του εξατμίζεται και ο προκύπτων ατμός οδηγείται σε θάλαμο αδρανούς ή μη αερίου και ακολουθεί η απότομη ψύξη και συμπύκνωση των μορίων του αερίου σε νανοσωματίδια. Η μέθοδος αυτή είναι η πιο διαδεδομένη από οικονομικής και ποιοτικής άποψης για τη μαζική παραγωγή νανοσωματιδίων.
2. Διάσπαση των πρώτων υλών στα νανοσωματίδια με δυνατότητα δημιουργίας στιβάδας (π.χ. πολυμερούς ή θειόλης) γύρω από αυτά, για τη διευκόλυνση δημιουργίας αιωρήματος. (HwangY. et al. 2008)
3. Η μηχανική τεχνική αφορά στην άλεση και αργότερα κονιορτοποίηση του υλικού, αλλά χαρακτηρίζεται ενεργειακά μη αποδοτική. Ωστόσο μετά την παραγωγή τους τα νανοσωματίδια λόγω της επίδρασης ισχυρών ελκτικών δυνάμεων VanderWaals τείνουν να σχηματίζουν συσσωματώματα πολύ μεγαλύτερων διαστάσεων από τις επιθυμητές με

αποτέλεσμα τον κίνδυνο αποσταθεροποίησης των αιωρημάτων. Το πρόβλημα γίνεται ακόμα μεγαλύτερο για νανοσωματίδια οξειδίου του μετάλλου τα οποία πρέπει να χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερες ογκομετρικές συγκεντρώσεις από τα αντίστοιχα μεταλλικά για να παρέχουν την ίδια βελτίωση στη θερμική αγωγιμότητα του συνεχούς μέσου. (HwangY. etal. 2008)

Μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ωστόσο επιφέρουν και μεγαλύτερα προβλήματα συσσωματώσεων. Ο βαθμός της συσσωμάτωσης εξαρτάται από την μέθοδο παραγωγής, διακίνησης και αποθήκευσης των σωματιδίων, παράμετροι οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη.

Μετά τη δημιουργία τους ακολουθεί ο διασκορπισμός των νανοσωματιδίων στο κυρίως μέσον, διαδικασία ιδιαίτερα σημαντική αφού θα πρέπει τα συσσωματώματα να διασκορπίζονται και να σπάνε στο αρχικό μέγεθος των νανοσωματιδίων ώστε να --δημιουργηθούν σταθερά αιωρήματα. Γίνεται χρήση υπερηχητικού εξοπλισμού (υπερηχητική ανάδευση), ομογενοποιητών, αναμικτών, αλλά και ουσιών διασποράς, επιφανειοδραστικών και μεθόδων ελέγχου του pH, όπου αλλάζουν οι ιδιότητες των επιφανειών των σωματιδίων και η μειώνεται η τάση τους να σχηματίζουν συσσωματώματα. (HwangY. etal. 2008)

Η προσθήκη ουσιών διασποράς μπορεί να επιδράσει αρνητικά ωστόσο στην θερμική απόδοση των νανο-ρευστών ιδιαίτερα όταν βρεθούν κάτω από υψηλές θερμοκρασίες. (HwangY. etal. 2008)

### **3.4 Μεταφορά θερμότητας μέσω φυσικής συναγωγής**

Το 2010 οι Godson et al. (2009) αφιέρωσαν ένα τμήμα της έρευνάς τους πάνω στα νανο-ρευστά στη μελέτη πειραμάτων φυσικής συναγωγής, τα οποία ήταν απαραίτητα για την αποσαφήνιση προηγούμενων αντικρουόμενων αποτελεσμάτων. Παρατήρησαν και αυτοί με τη σειρά τους ότι τα αποτελέσματα ήταν το ίδιο ασυνεπή. Τα χαρακτηριστικά στα οποία διαπίστωσαν αποκλίσεις και ασυμφωνίες, ήταν η θερμική αγωγιμότητα και το ιξώδες, και το απέδωσαν στο γεγονός έλλειψης προτύπων αναφορικά με την παραγωγή των νανορευστών, στις διαφορετικές πηγές νανοσωματιδίων, στην ποικιλία των μεθόδων σταθεροποίησης αλλά και στα χρονικά διαστήματα που παρεμβάλλονταν μεταξύ παραγωγής και μέτρησής τους.

Οι Ouelasti και Bennacer μελέτησαν αριθμητικά και σύγκριναν τις αποδόσεις μεταφοράς θερμότητας τριών νανο-ρευστών μέσω φυσικής

συναγωγής σε μια διαφορετικά θερμαινόμενη τετραγωνική κοιλότητα. Τα καλύτερα αποτελέσματα εμφάνισαν τα νανοσωματίδια Cu σε σχέση με αυτά από  $Al_2O_3$  και από  $TiO_2$ . (SaidurR. etal. 2011)

Από την άλλη, η μεταφορά θερμότητας μέσω φυσικής συναγωγής με νανο-ρευστά μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας διφασική ή μονοφασική προσέγγιση. Στη διφασική προσέγγιση, η ταχύτητα μεταξύ του ρευστού και των σωματιδίων μπορεί να μην είναι μηδέν [6] εξαιτίας διαφόρων παραγόντων, όπως η βαρύτητα, η τριβή μεταξύ του ρευστού και των σωματιδίων του στερεού, δυνάμεις Brown, διάχυση κατά Brown, καθίζηση και διασπορά. Για τη δεύτερη προσέγγιση, τα νανοσωματίδια μπορούν εύκολα να ρευστοποιηθούν και κατά συνέπεια η ολίσθηση κίνησης μεταξύ των δυο φάσεων να είναι αμελητέα. (SaidurR. etal. 2011)

### **3.4.1 Μονοφασικό μοντέλο**

Αν και τα νανοσωματίδια είναι μίγματα στερεού – ρευστού, στις περισσότερες μελέτες θεωρούνται μονοφασικά (ομογενή) ρευστά. Στην πραγματικότητα, λόγω του ακραίου μεγέθους τους και της μικρής συγκέντρωσης των αιωρούμενων νανοσωματιδίων, τα σωματίδια θεωρείται ότι κινούνται με την ταχύτητα του ρευστού. Θεωρώντας τώρα το θερμικό ισοζύγιο, το μίγμα ρευστού-στερεών σωματιδίων μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρεται σαν συμβατικό μονοφασικό ρευστό με ιδιότητες που υπολογίζονται συναρτήσει των στοιχείων του. (SaidurR. etal. 2011)

Οι κυρίαρχες εξισώσεις για την ανάλυση της φυσικής συναγωγής είναι η εξίσωση συνέχειας, ορμής, και οι εξισώσεις ενέργειας με τροποποιημένες την πυκνότητα, την ειδική θερμότητα, τη θερμική αγωγιμότητα και το ιζώδες για το εκάστοτε νανο-ρευστό. (SaidurR. etal. 2011)

### **3.4.2 Διφασικό μοντέλο**

Αρκετοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να δημιουργήσουν μοντέλα μεταφοράς θερμότητας για νανο-ρευστά. Πιο συγκεκριμένα το νανο-ρευστό αποτελείται από διφασικό μίγμα, στο οποίο η στερεή φάση είναι νανοσωματίδια. Για τα νανοσωματίδια είναι θέμα συζήτησης αν μπορεί να εφαρμοστεί η συμβατική διφασική ροή ώστε να περιγράψει επαρκώς τη ροϊκή συμπεριφορά του νανο-ρευστού. Από την άλλη πλευρά, αρκετοί παράγοντες όπως η βαρύτητα, η τριβή μεταξύ ρευστού και στερεών

σωματιδίων, οι δυνάμεις Brown, το φαινόμενο διάχυσης κατά Brown, η καθίζηση και η διασπορά μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τη ροή του νανο-ρευστού. Κατά συνέπεια, η ταχύτητα ολίσθησης δεν μπορεί να αμεληθεί για την προσομοίωση της ροής του νανο-ρευστού. Για την πλήρη περιγραφή και πρόβλεψη της ροής και της συμπεριφοράς σύνθετων ροών, διάφορες πολυφασικές θεωρίες έχουν προταθεί και μελετηθεί, μιας από τις πιο συχνά -χρησιμοποιούμενες είναι η Θεωρία Μιγμάτων (*Mixture Theory*), για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των νανο-ρευστών. (SaidurR. et al. 2011)

Ο Buongiorno διεξήγαγε μια μελέτη για τη μεταφορά μέσω συναγωγής σε νανο-ρευστά, όπου το μοντέλο που χρησιμοποίησε υιοθετούσε κίνηση κατά Brown και θερμοφόρηση. Έτσι ανέπτυξε μοντέλο ισορροπίας για τη μεταφορά μάζας, ορμής και θερμότητας στα νανο-ρευστά. Το νανο-ρευστό θεωρείται μίγμα δυο στοιχείων (του ρευστού βάσης + των νανοσωματιδίων) με τις ακόλουθες παραδοχές: (SaidurR. et al. 2011)

- Καμία χημική αντίδραση
- Αμελητέες εξωτερικές δυνάμεις
- Αιώρημα μίγματος ( $\varphi = 1$ )
- Αμελητέα ιξώδη απαγωγή
- Αμελητέα μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας
- Τα νανοσωματίδια και το ρευστού βρίσκονται τοπικά σε θερμική ισορροπία

### Εξίσωση συνέχειας

$$\nabla \cdot \nu = 0 \quad (3.1)$$

### Εξίσωση συνέχειας νανοσωματιδίων

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} \nu \cdot \nabla \varphi = \nabla \cdot \left( D_B \nabla \varphi + D_T \frac{\nabla T}{T} \right) \quad (3.2)$$

Όπου το  $\varphi$  είναι το κλάσμα όγκου των νανοσωματιδίων,  $D_B$  είναι ο συντελεστής διάχυσης Brown, που δίνεται από την εξίσωση Einstein – Stokes:

$$D_B = \frac{k_B T}{3\pi\mu d_p} \quad (3.3)$$

όπου  $\mu$  είναι το ιξώδες του ρευστού και  $d_p$  είναι η διάμετρος του νανοσωματιδίου και  $D_T$  είναι ο συντελεστής θερμοφορετικής διάχυσης, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$D_T = \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \left( 0.26 \frac{k}{2k + k_p} \right) \varphi \quad (3.4)$$

Στην Εξίσωση 3.4 τα  $k$  και  $k_p$  είναι η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού και του υλικού των σωματιδίων, αντίστοιχα.

### Εξίσωση ορμής

$$\nu \cdot \nabla \nu = -\frac{1}{\rho_{nf}} \nabla p + \nabla \cdot \tau + g \quad (3.5)$$

όπου

$$\tau = -\mu_{nf} \left( \nabla \nu + (\nabla \nu)^t \right) \quad (3.6)$$

με τον εκθέτη 't' ορίζεται η μεταφορά του  $\nabla \nu$ .

### Εξίσωση ενέργειας

$$\nu \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\alpha_{nf} \nabla T) + \frac{\rho_p c_p}{\rho_{nf} c_{nf}} \left( D_B \nabla \varphi \cdot \nabla T + D_T \frac{\nabla T \cdot \nabla T}{T} \right) \quad (3.7)$$

Συνεπώς το μοντέλο για τα νανο-ρευστά μπορεί να χαρακτηριστεί ως «δυο-ρευστών» (νανοσωματίδια + ρευστό βάσης), τεσσάρων εξισώσεων (2 μάζας + 1 ορμής + 1 ενέργειας), μη – ομογενές (υπάρχει ταχύτητα ολίσθησης μεταξύ νανοσωματιδίου/ρευστού) μοντέλο ισορροπίας (δεν επιτρέπονται θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ νανοσωματιδίων/ρευστού). (SaidurR. etal. 2011)

Εξάλλου οι εξισώσεις διατήρησης συνδέονται στενά, μιας και το  $\nu$  εξαρτάται από το  $\varphi$  μέσω του ιξώδους, το  $\varphi$  εξαρτάται από το  $T$  κυρίως λόγω της θερμομόρφωσης, το  $T$  εξαρτάται από το  $\varphi$  μέσω της θερμικής αγωγιμότητας και μέσω των όρων Brown και της θερμομόρφωσης στην εξίσωση της ενέργειας, το  $\varphi$  και το  $T$  εξαρτώνται από το  $\nu$  κυρίως λόγω συναγωγής και αυτό φαίνεται από τις εξισώσεις συνέχειας και ενέργειας, αντίστοιχα. (SaidurR. etal. 2011)

### 3.5 Μοντέλα ιδιοτήτων νανο-ρευστών

Οι ιδιότητες των νανο-ρευστών που αποτελούν τη βάση του μίγματος έχουν εξεταστεί εκτενώς τα προηγούμενα χρόνια. Πρόσφατα όμως δόθηκαν στοιχεία για τις ιδιότητες που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. (SaidurR. etal. 2011)

- Πυκνότητα

Λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων για τις πυκνότητες των νανο-ρευστών, χρησιμοποιούνται ανεξάρτητες σταθερές τιμές θερμοκρασίας, βασισμένες στο κλάσμα όγκου των σωματιδίων:

$$\rho_{nf} = (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (3.8)$$

- Ειδική θερμοχωρητικότητα

Η ειδική θερμοχωρητικότητα μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$(C_p)_{nf} = (1-\varphi)(C_p)_f + \varphi(C_p)_p \quad (3.9)$$

Άλλοι ερευνητές προτείνουν μια διαφορετική προσέγγιση μέσω της θερμοχωρητικότητας:

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_p \quad (3.10)$$

- Δυναμικό ιξώδες και θερμική αγωγιμότητα

Διάφορα μοντέλα νανο-ρευστών με βάση συνδυασμό διαφορετικούς τύπους για το δυναμικό ιξώδες και τη θερμική αγωγιμότητα παρουσιάζονται σε μελέτες για φυσική συναγωγή στους Πίνακες 3.3 και

Πίνακας 3.4. (SaidurR. etal. 2011)



Πίνακας 3.3: Μοντέλα ιξώδους για νανο-ρευστά (SaidurR. etal. 2011)

Μοντέλα	Δυναμικό Ιξώδες
<b>Μοντέλο Brinkman</b>	$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}}$
<b>Μοντέλο Einstein</b>	$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\varphi) \quad \varphi < 0.05$
<b>Συσχέτιση των Pak και Cho</b>	$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 39.11\varphi + 533.9\varphi^2)$
<b>Μοντέλο Nguyen</b>	$\mu_{CuO} = -0.6967 + \frac{15.937}{T} + 1.23\varphi + \frac{1356.14}{T^2} - 0.259\varphi^2$ $- 30.88\frac{\varphi}{T} - \frac{19652.74}{T^3} + 0.01593\varphi^3$ $+ 4.38206\frac{\varphi^2}{T} + 147.573\frac{\varphi}{T^2}$
	$\mu_{Al_2O_3} = \exp(3.003 - 0.04203T - 0.5445\varphi + 0.0002553T^2$ $+ 0.0524\varphi^2 - 1.622\varphi^{-1})$
<b>Μοντέλο Jang</b>	$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\varphi)[1 + n\left(\frac{d_p}{H}\right)^{-2\varepsilon} \varphi^{2/3}(\varepsilon + 1)]$
<b>Κοο και Kleinstreuer</b>	$\mu_B = 5 \times 10^4 \beta \varphi \rho_f \sqrt{\frac{k_B T}{d_p \rho_p}} f(T, \varphi)$
	$\beta = 0.0137(100\varphi)^{-0.8229} \quad \text{για } \varphi < 1\%$
	$\beta = 0.0011(100\varphi)^{-0.7272} \quad \text{για } \varphi > 1\%$
	$f(T, \varphi) = (-6.04\varphi + 0.4705)T + (1722.3\varphi - 134.63)$ $1\% \leq \varphi \leq 4\% \quad \text{και } 300 \text{ k} \leq T \leq 325 \text{ k}$
<b>Μοντέλο Maig</b>	$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 7.3\varphi + 123\varphi^2)$
<b>Μοντέλο Brown</b>	$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\varphi + 6.17\varphi^2)$
<b>Μοντέλο Nguyen</b>	$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 0.025\varphi + 0.015\varphi^2)$
<b>Gherasim et al.</b>	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 0.904e^{14.8\varphi}$

Πίνακας 3.4: Μοντέλα θερμικής αγωγιμότητας για νανο-ρευστά(SaidurR. etal. 2011)

Μοντέλα	Θερμική αγωγιμότητα
<b>Μοντέλο Wasp</b>	$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)}$
<b>Μοντέλο Jang και Choi</b>	$\frac{k_{nf}}{k_f} = (1 - \varphi) + Bk_p\varphi + 18 \times 10^6 \frac{3d_f}{d_{nano}} k_f Re_{d_{nano}}^2 Pr\varphi$
<b>Μοντέλο Bruggeman</b>	$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{(3\varphi - 1)k_p/k_f + [3(1 - \varphi) - 1] + \sqrt{\Delta_B}}{4}$ $\Delta_B = \left[ \frac{(3\varphi - 1)k_p}{k_f} + (3(1 - \varphi)) \right]^2 + 8k_p/k_f$
<b>Μοντέλο Chon</b>	$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64,7\varphi^{0,7640} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0,3690} \left(\frac{k_f}{k_p}\right)^{0,7476} Pr_T^{0,9955} Re^{1,2321}$
<b>Μοντέλο Κοο και Kleinstreuer</b>	$\frac{k_{nf}}{k_f} = \left[ \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)} \right] + 5$ $\times 10^4 \beta \varphi \rho_f (C_p)_f \sqrt{\frac{k_B T}{d_p \rho_p}} f(T, \varphi)$
<b>Μοντέλο Charuyakorn</b>	$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)} (1 + b\varphi Pe_p^m)$
<b>Μοντέλο Stationary</b>	$\frac{k_{nf}}{k_f} = \left[ 1 + \frac{k_p \varphi d_f}{k_f (1 - \varphi) d_p} \right]$
<b>Μοντέλο Yu και Choi</b>	$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)(1 + \eta)^3}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)(1 + \eta)^3}$
<b>Μοντέλο Patel</b>	$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + \frac{k_p d_f \varphi}{k_f d_p (1 - \varphi)} \left[ 1 + c \frac{2k_B T d_p}{\pi \alpha_f \mu_f d_p^2} \right]$
<b>Μοντέλο Mintsa</b>	$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1.72\varphi + 1.0$

### 3.5.1 Θερμική αγωγιμότητα νανο-ρευστών

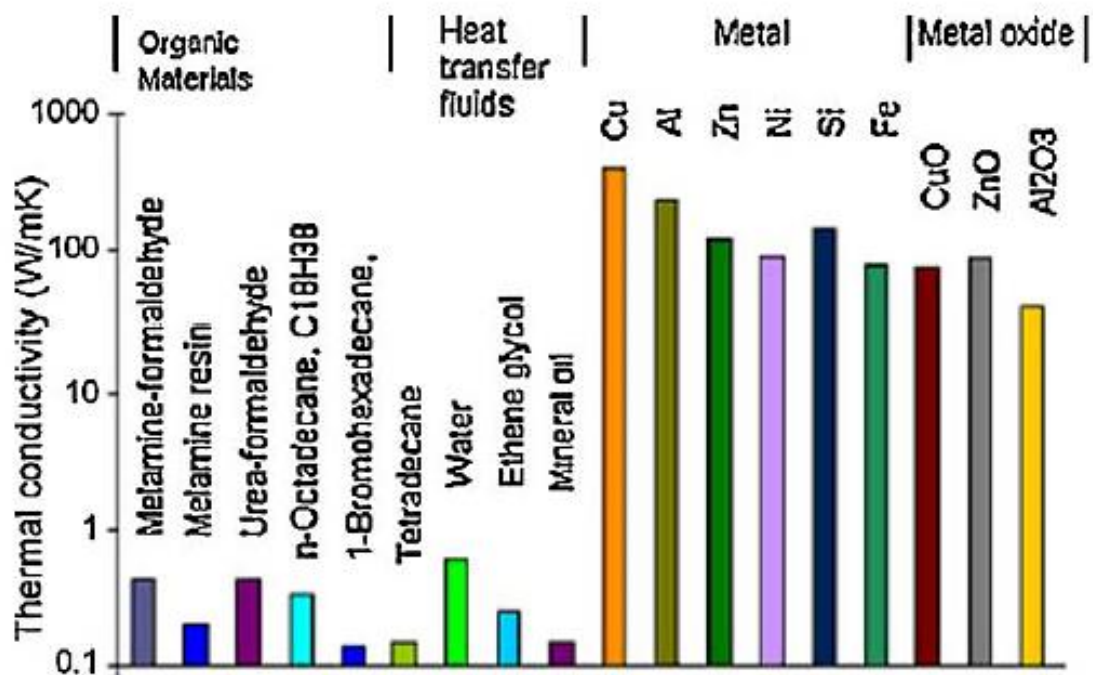
Έχει παρατηρηθεί ότι οι περισσότεροι ερευνητές συμφωνούν ότι τα νανο-ρευστά παρέχουν υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα σε σύγκριση με τα ρευστά βάσης. Η τιμή της αυξάνεται με την συγκέντρωση των σωματιδίων. Η θερμοκρασία, το μέγεθος των σωματιδίων, η διασπορά και η σταθερότητα παίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας των νανο-ρευστών (Murshedetal. 2009). Στην Εικόνα 3.4 φαίνεται η σύγκριση της θερμικής αγωγιμότητας των ρευστών και των νανο-ρευστών. Η Εικόνα 3.5 και η Εικόνα 3.6 δείχνουν τη θερμική αγωγιμότητα των νανο-ρευστών σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Ο Πίνακας 3.5 δείχνει επίσης τις βελτιωμένες θερμικές αγωγιμότητες των μεταλλικών και μη μεταλλικών νανο-ρευστώνόπως αναφέρεται από τον Shen (2006). Οι λόγοι της θερμικής αγωγιμότητας (π.χ. θερμική αγωγιμότητα των στερεών προς το ρευστό) των νανο-ρευστών κυμαίνονται στο εύρος από 3-17.100. Αυτό αποτελεί μια ένδειξη ότι όταν προστίθενται στερεά σωματίδια στα συμβατικά ρευστά/ψυκτικά, η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να αυξηθεί δραματικά.

Η έρευνα έχει δείξει ότι η θερμική αγωγιμότητα και η συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή του ρευστού μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά από τα αιωρούμενα σωματίδια (SaidurR. etal. 2011). Οι Choi et al. (2001) παρατήρησαν ότι η θερμική αγωγιμότητα του νανο-ρευστού που μελέτησαν ήταν μεγαλύτερη κατά 150% από αυτή του απλού ελαίου.

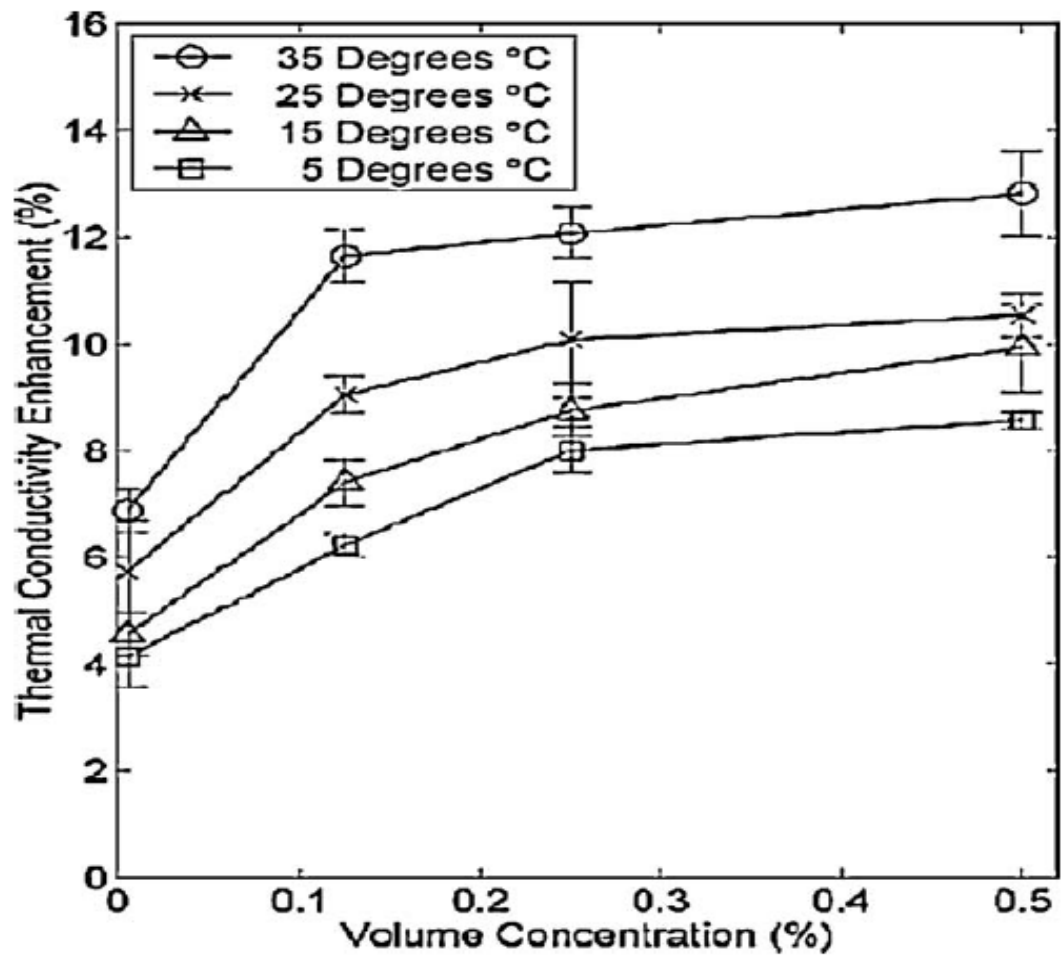
**Πίνακας 3.5: Παρουσίαση θερμικής αγωγιμότητας διαφόρων τύπων νανορευστών (Shen 2006)**

	Particle	Base fluid	Average particle size	Volume fraction	Thermal conductivity enhancement
Metallic nanofluids	Cu	Ethylene glycol	10 nm	0.3%	40%
	Cu	Water	100 nm	7.5%	78%
	Fe	Ethylene glycol	10 nm	0.55%	18%
	Au	Water	10-20 nm	0.026%	21%
	Ag	Water	60-80 nm	0.001%	17%
Non-metallic nanofluids	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Water	13 nm	4.3%	30%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Water	33 nm	4.3%	15%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Water	68 nm	5%	21%
	CuO	Water	36 nm	3.4%	12%
	CuO	Water	50 nm	0.4%	17%
	SiC	Water	26 nm	4.2%	16%
	TiO <sub>2</sub>	Water	15 nm	5%	30%
	MWCNT	Synthetic oil	25 nm in diameter 50 μm in length	1%	150%
	MWCNT	Decene/ethylene glycol/water	15 nm in diameter 30 μm in length	1%	20%/13%/7%
	MWCNT	Water	100 nm in diameter 70 μm in length	0.6%	38%

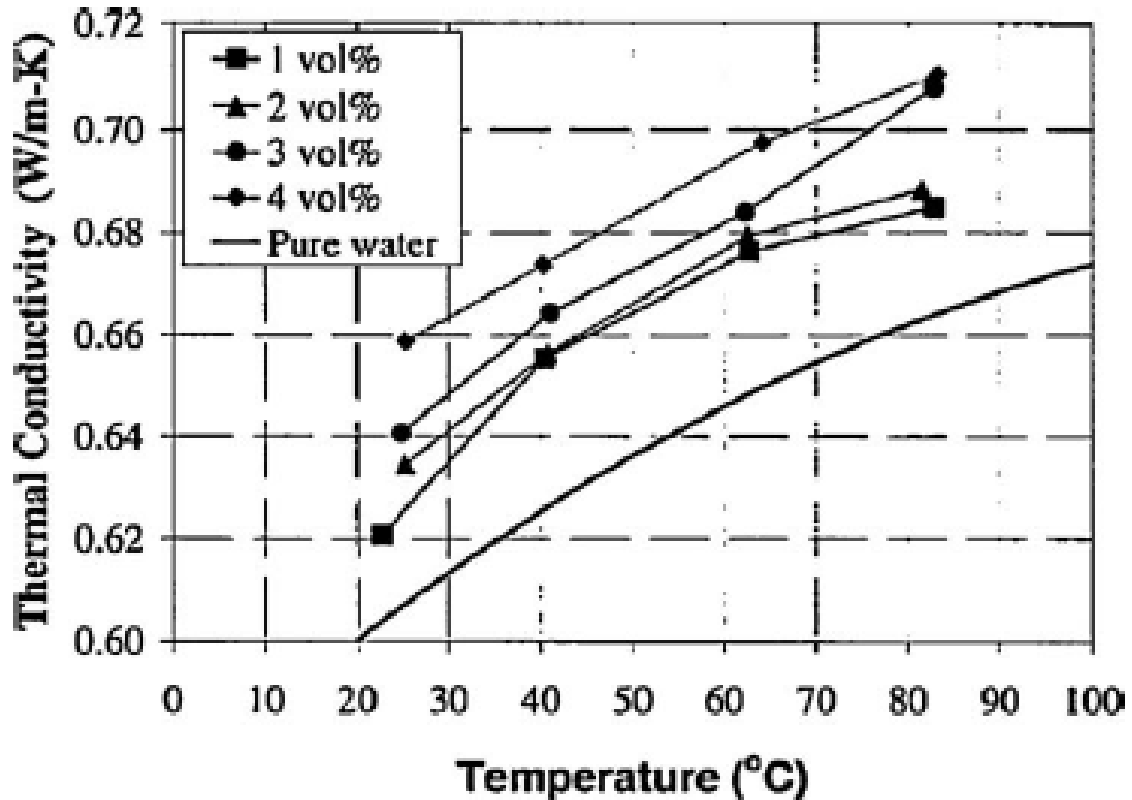
90



Εικόνα 3.4: Σύγκριση της θερμικής αγωγιμότητας κοινών υγρών, πολυμερών και στερεών (WenD. etal. 2009)



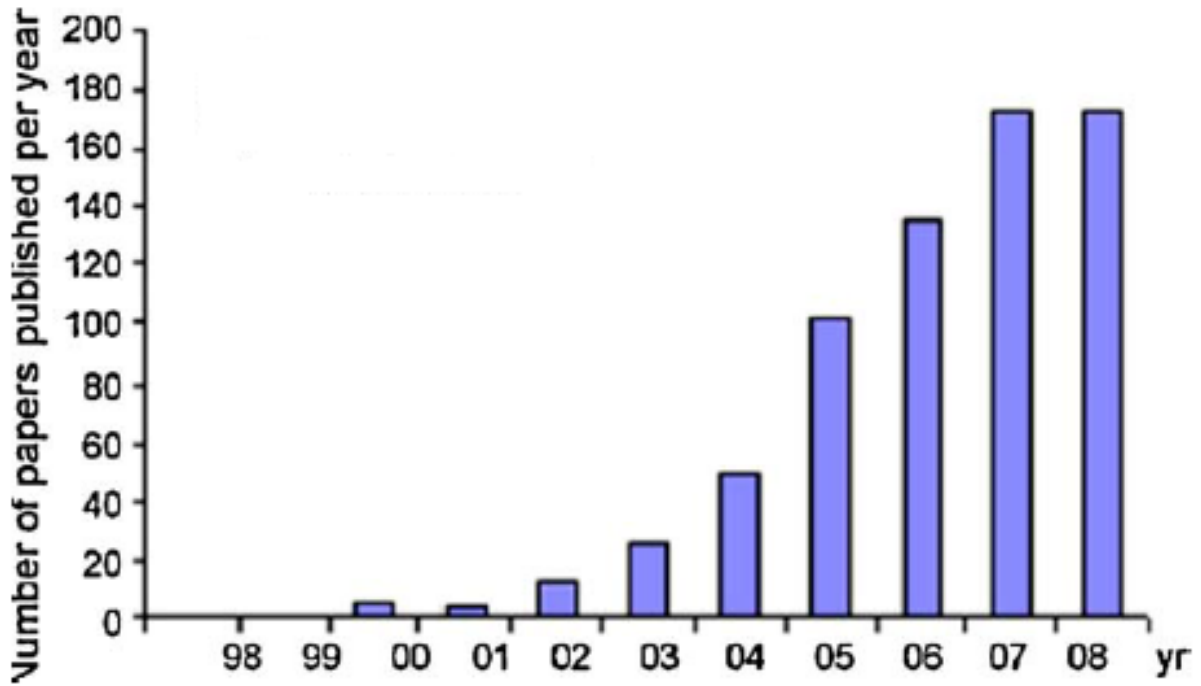
Εικόνα 3.5: Ενίσχυση θερμικής αγωγιμότητας νανοσωματιδίων χρυσού 2 nm σε νερό ως συνάρτηση της συγκέντρωσης όγκου (Choietal. 2006)



Εικόνα 3.6: Θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία (Shen 2006)

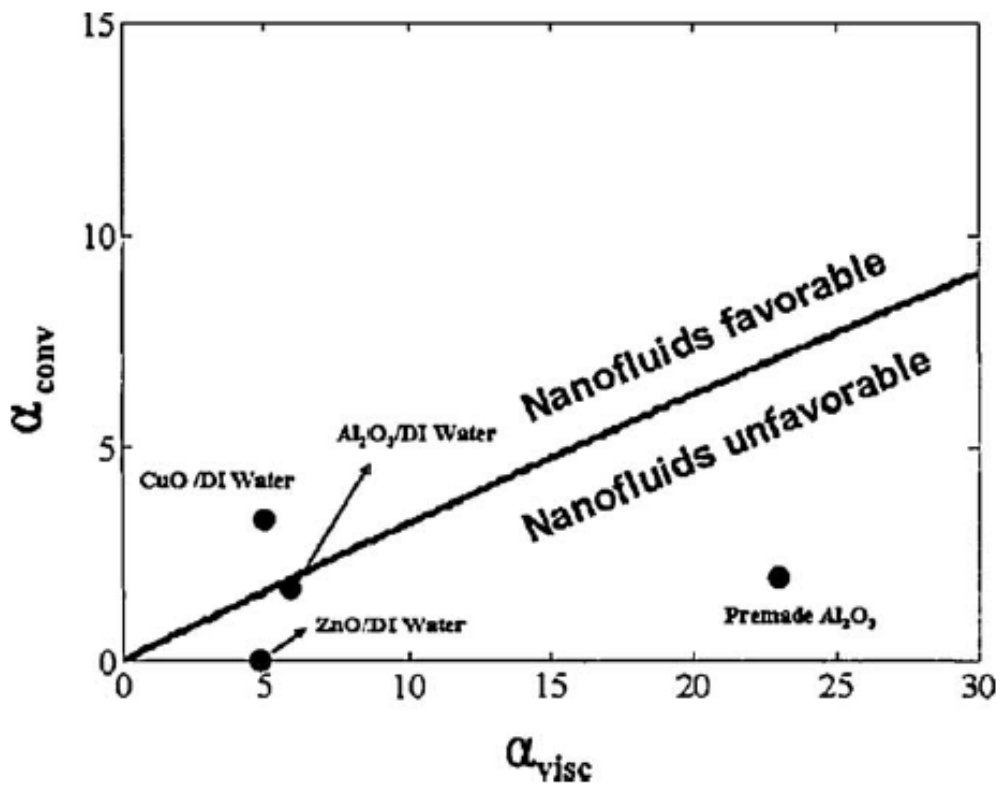
Πρόσφατα, μελέτες τριβολογίας δείχνουν ότι διάφορα λιπαντικά έλαια με πρόσθετα νανοσωματίδια ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{TiO}_2$ , διαμάντι κλπ) επιδεικνύουν αυξημένη δυνατότητα υποστήριξης φορτίου, αντοχή έναντι φθοράς και ιδιότητες μείωσης της τριβής (Xu et al. 1996). Αυτά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά καθιστούν πολύ ελκυστικά τα νανο-ρευστά σε ψυκτικές και λιπαντικές εφαρμογές σε πολλές βιομηχανίες που αφορούν τις κατασκευές, μεταφορές, την ενέργεια και τα ηλεκτρονικά.

Η Εικόνα 3.7 δείχνει ταχεία ανάπτυξη της έρευνας στον τομέα των νανο-ρευστών τα τελευταία χρόνια, συμπεριλαμβανομένου των ΗΠΑ, της ΕΕ και της Κίνας και πιο πρόσφατα της Ινδίας και της Νότιας Κορέας. Η πιθανή αγορά των νανο-ρευστών για εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας εκτιμάται σε περισσότερα από 2 δισεκατομμύρια το χρόνο παγκοσμίως, με προοπτική περαιτέρω αύξησης τα επόμενα 5-10 χρόνια. (Saidur R. et al. 2011)



Εικόνα 3.7: Ανάπτυξη μελετών/ερευνών από την κοινότητα επιστημόνων για τα νανορευστά (Saidur R. et al. 2011)

Τέλος, η Εικόνα 3.8 παρουσιάζει τα όρια των ιδιοτήτων των νανο-ρευστών για διάφορες εφαρμογές

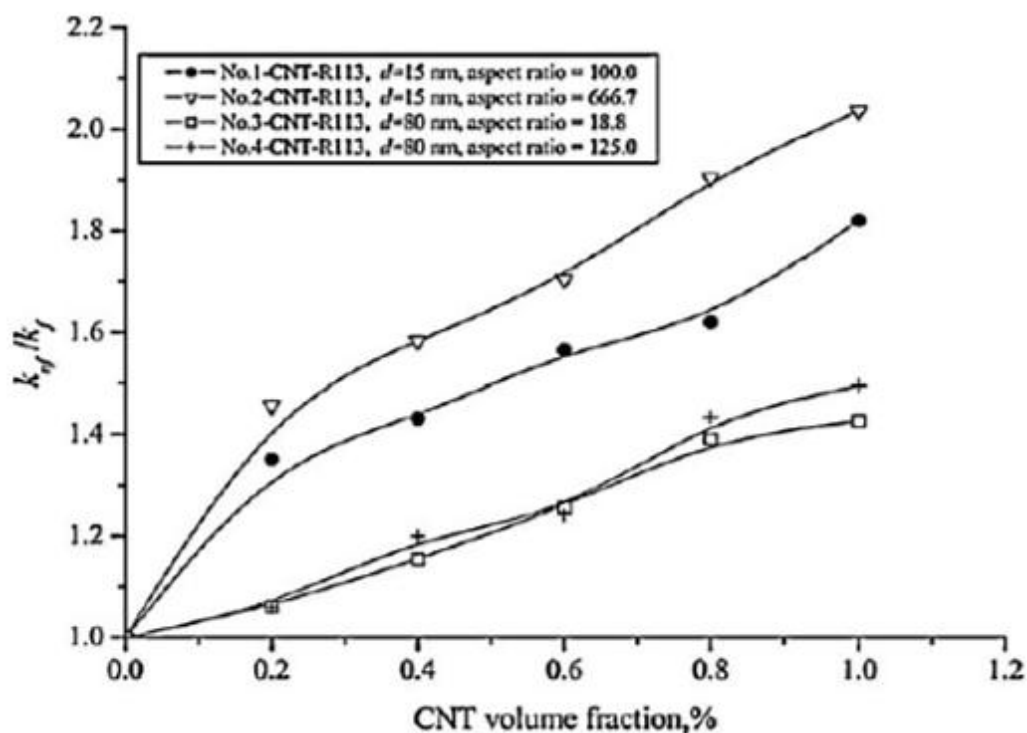


Εικόνα 3.8: Σύνοψη δεδομένων για τα οξείδια νανο-ρευστών και η οριακή γραμμή που δείχνει την απόδοση των νανο-ρευστών (Saidur R. et al. 2011)

### 3.6 Νανο-ρευστά με προσθήκη νανοσωλήνων άνθρακα

Η χρήση νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) ως νανοσωματίδια είχε διαπιστωθεί ότι είναι εξαιρετικά αποτελεσματική στη δημιουργία ρευστών υψηλής θερμικής αγωγιμότητας. Οι Amrollahi et al. παρατήρησαν αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας κατά 20% με την προσθήκη 2,5% κατ' όγκο CNTσε αιθυλενογλυκόλη, ενώ απέδειξαν ότι τα παραδοσιακά μοντέλα μακρο-διασπορά, όπως του MaxwellHamilton-Crosser, δεν μπορούν να προβλέψουν αποδοτικά τη συμπεριφορά των νανο-ρευστών CNT. (Saidur R. et al. 2011)

Τα πειραματικά αποτελέσματα των Jiang et al.(2009) έδειξαν ότι οι θερμικές αγωγιμότητες των νανο-ψυκτικών νανοσωλήνων άνθρακα (CNT) είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές των νανο-ρευστών νερού – CNT ή των νανο-ρευστών σφαιρικών νανοσωματιδίων – R113. Οι ερευνητές ανέφεραν ότι όσο μικρότερη η διάμετρος των CNT ή όσο μεγαλύτερος ο λόγος διαστάσεων των CNT, τόσο μεγαλύτερη η ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας των νανοψυκτικών CNT, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9.

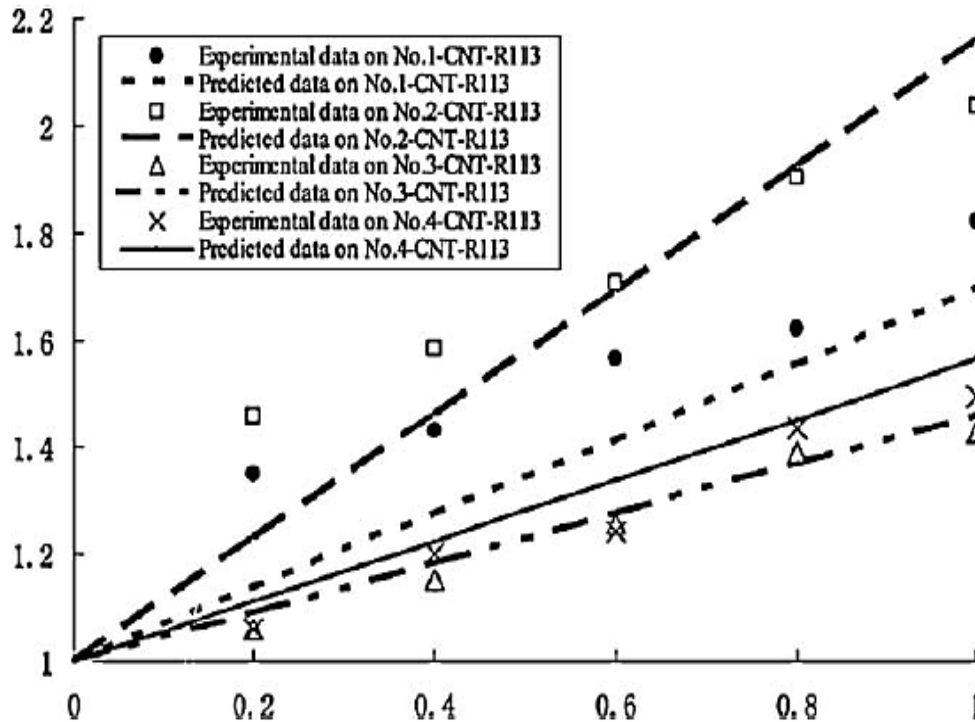


Εικόνα 3.9: Ενεργή θερμική αγωγιμότητα για διαφορετικές συγκέντρωσης (Jiang et al. 2009)

Η Εικόνα 3.10 παρουσιάζει τη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων του τροποποιημένου



μοντέλου των Yu-Choi (2009). Οι μέσες και οι μέγιστες αποκλίσεις του μοντέλου είναι 5,5% και 15,8%, αντίστοιχα, το οποίο δείχνει ότι το τροποποιημένο μοντέλο των Yu-Choi είναι καλύτερο από τα υπάρχοντα μοντέλα στην πρόβλεψη της θερμικής αγωγιμότητας των νανοφυκτικών των CNT.



**Εικόνα 3.10:** Πειραματικά δεδομένα σε σχέση με τα προβλεπόμενα δεδομένα του τροποποιημένου μοντέλου των Yu-Choi (2009)

Μερικές έρευνες διεξήχθησαν με χρήση νανοσωματιδίων σε ψυκτικά συστήματα ώστε να εκμεταλλευθούν τις σημαντικές ιδιότητες των νανοσωματιδίων στην ενίσχυση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των ψυγείων. Για παράδειγμα, οι Wang et al. (2009) βρήκαν ότι τα νανοσωματίδια  $TiO_2$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετα ενίσχυσης της διαλυτότητας των ορυκτελαίων σε ψυκτικά υδροφθορανθράκων (HFC). Επιπροσθέτως, συστήματα ψύξης με μίγμα HFC134a και ορυκτελαίου με νανοσωματίδια  $TiO_2$  εμφανίζουν καλύτερη απόδοση, επιστρέφοντας περισσότερο λιπαντικό στο συμπιεστή, με παρόμοια απόδοση με συστήματα που χρησιμοποιούν HFC134a και πολυολικό εστερικό έλαιο. Οι Wang et al. (2006) διεξήγαγαν μια πειραματική μελέτη των χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας του βρασμού για το ψυκτικό R22 με νανοσωματίδια  $Al_2O_3$  και βρήκαν ότι τα νανοσωματίδια ενίσχυσαν τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας του

ψυκτικού με μειωμένα μεγέθη φυσαλίδων που κινούνται ταχέως κοντά στην επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας.

Οι Li et al. (2006) διερεύνησαν τα χαρακτηριστικά μεταφοράς του βρασμού του ψυκτικού R11 με νανοσωματίδια  $TiO_2$  και έδειξαν ότι η ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας έφτασε το 20% για φορτίο σωματιδίων 0,01 g/l. Οι Park and Jung (2007) διερεύνησαν την επίδραση νανοσωλήνων άνθρακα (CNT) στη μεταφορά θερμότητας των πυρήνων βρασμού των ψυκτικών R123 και HFC134a. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δείχνουν ότι οι CNT αυξάνουν του συντελεστές μεταφοράς θερμότητας για αυτά τα ψυκτικά. Η μεγαλύτερη ενίσχυση έφθασε το 36,6% για μικρές ροές θερμότητας της τάξεως των 30 kw/m<sup>2</sup>. Έτσι, η χρήση των νανοσωματιδίων σε συστήματα κατάψυξης είναι ένας καινοτόμος και χρήσιμος τρόπος αύξησης της απόδοσης και της αξιοπιστίας αυτών των συστημάτων. Η συγκεκριμένη μελέτη αναλύει τη χρήση νανοσωματιδίων σε οικιακά ψυγεία, μετρώντας την απόδοση ψύξης σε οικιακά ψυγεία πληρωμένα με μίγμα HFC134a και ορυκτέλαιο με νανοσωματίδια, όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.6.

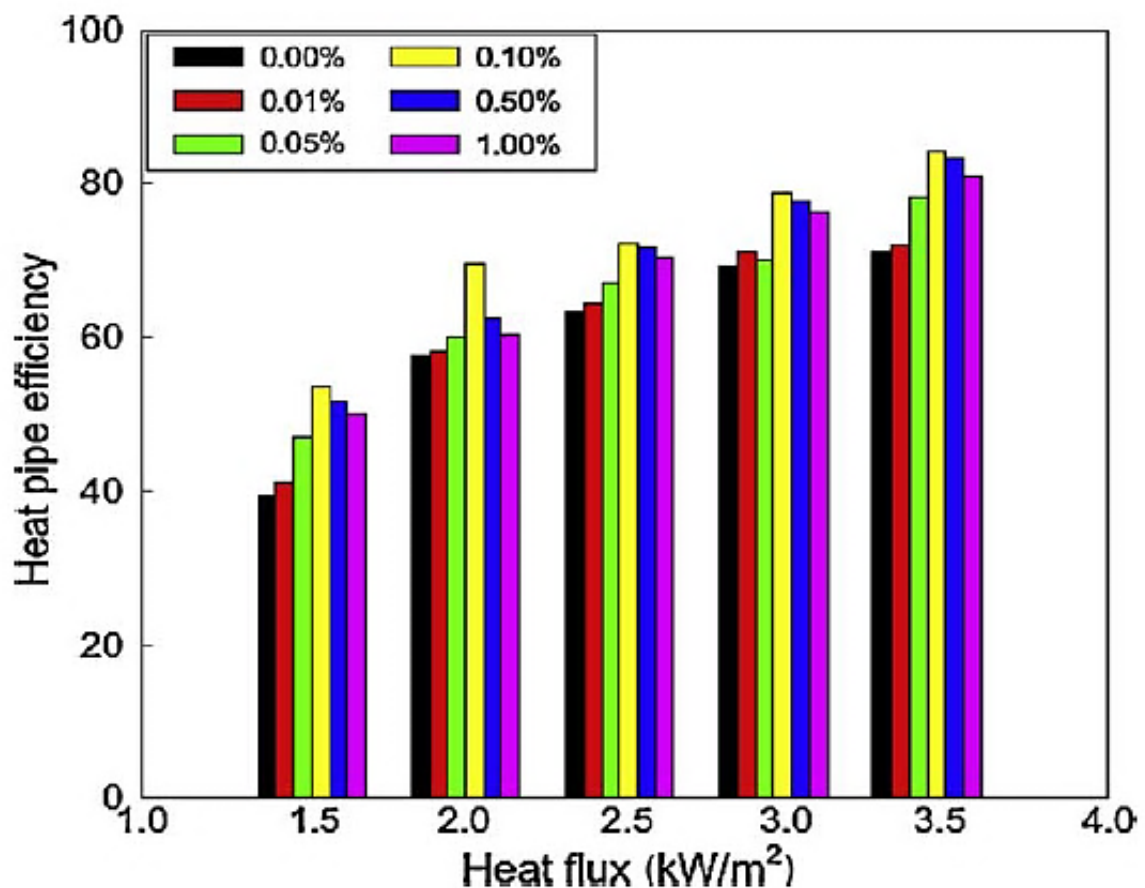
**Πίνακας 3.6: Ερευνητικές μελέτες συνδυασμού νανοσωματιδίων με ψυκτικά υγρά (Saidur R. et al. 2011)**

Refrigerant	Nanoparticles	Size of nanoparticles	Volume concentrations
R141b	Au	3nm	0.09%, 0.4%, 1.0%
R123, R134a	Carbon nanotubes	20 nm × 1 μm	1.0%
R141b	$TiO_2$	21 nm	0.01%, 0.03%, 0.05%
R113	CuO	40 nm	0.15–1.5%
R134a	CuO	30 nm	0.5%, 1.0%, 2.0%

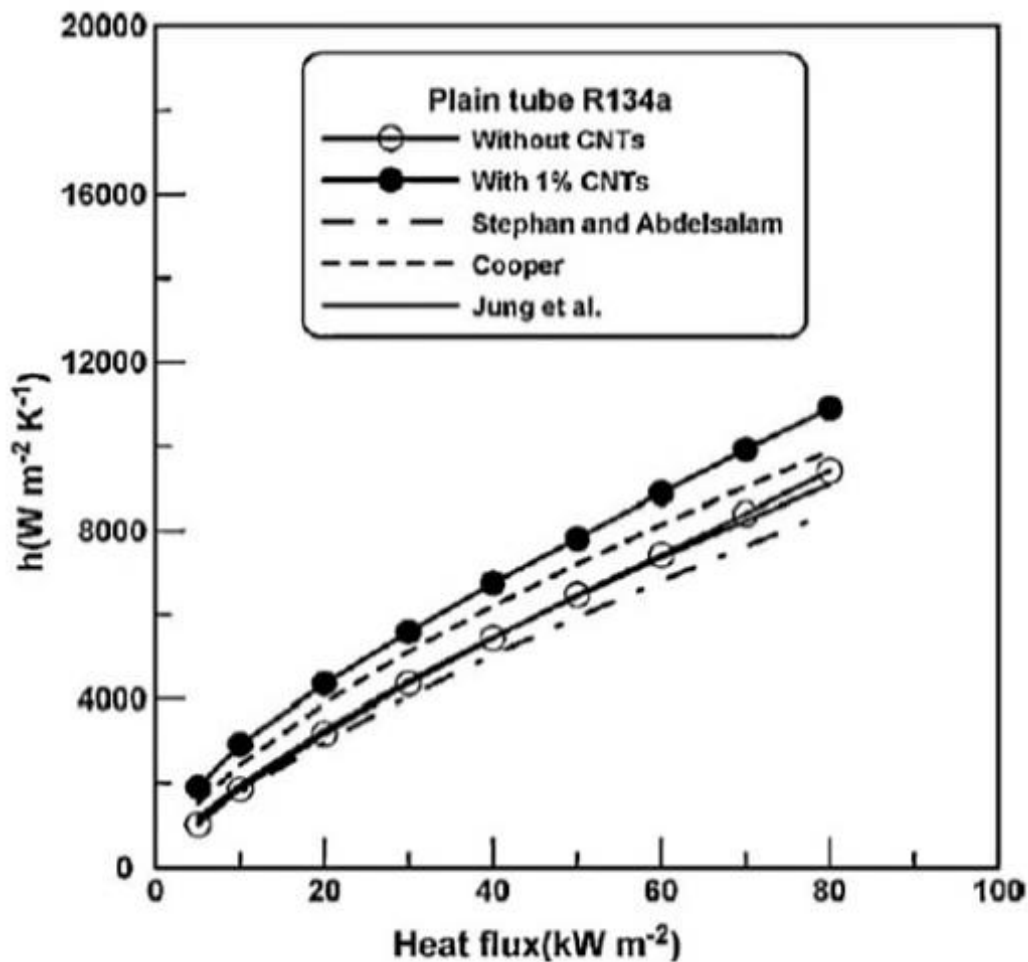
Έτσι η απόδοση των ψυγείων με τα νανοσωματίδια μετρήθηκε χρησιμοποιώντας δοκιμές κατανάλωσης και ικανότητας ψύξης. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι το μίγμα HFC134a και ορυκτελαίου με νανοσωματίδια  $TiO_2$  λειτουργούν ομαλά και με ασφάλεια στο ψυγείο. Ενώ η απόδοση του εν λόγω συστήματος ήταν καλύτερη από αυτή του συστήματος που περιείχε HFC134a και πολυολικό εστερικό έλαιο, με μείωση κατανάλωσης ενέργειας μικρότερη κατά 26,1% με κλάσμα μάζας των νανοσωματιδίων  $TiO_2$  0,1% σε σχέση με το σύστημα που περιείχε HFC134a και πολυολικό εστερικό έλαιο. Οι ίδιες μετρήσεις με τα νανοσωματίδια  $Al_2O_3$  έδειξαν ότι οι διαφορετικές ιδιότητές τους έχουν μικρή επίδραση στην απόδοση του ψυγείου. Έτσι, τα νανοσωματίδια μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε οικιακά ψυγεία, ώστε να μειώσουν

σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας, όπως αναφέρεται από τους Bi et al. (2008).

Οι Peng et al. (2009) διερεύνησαν την επίδραση των νανοσωματιδίων στα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας νανο-ρευστών με βάση ψυκτικά που βράζουν ρέοντας σε οριζόντιο λείο σωλήνα και παρουσίασαν μια συσχέτιση για την πρόβλεψη της απόδοσης μεταφοράς θερμότητας των εν λόγω νανο-ρευστών. Το μίγμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ψυκτικό R113 με νανοσωματίδια CuO. Οι ερευνητές ανέφεραν ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας των νανο-ρευστών με βάση το ψυκτικό είναι μεγαλύτερος από αυτό του καθαρού ψυκτικού, και η μέγιστη ενίσχυση του συντελεστή βρέθηκε να είναι 29,7%. Οι Naphon et al. (2009) ανέφεραν ότι ο θερμοσωλήνας με συγκέντρωση νανοσωματιδίων 0,1% είχε απόδοση 1,4 φορές μεγαλύτερη από αυτή του καθαρού ψυκτικού όπως φαίνεται από την Εικόνα 3.11 και την Εικόνα 3.12 που δείχνουν την ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας των νανοψυκτικών.



Εικόνα 3.11: Επίδραση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων στην απόδοση του θερμοσωλήνα(Naphonetal. 2009)



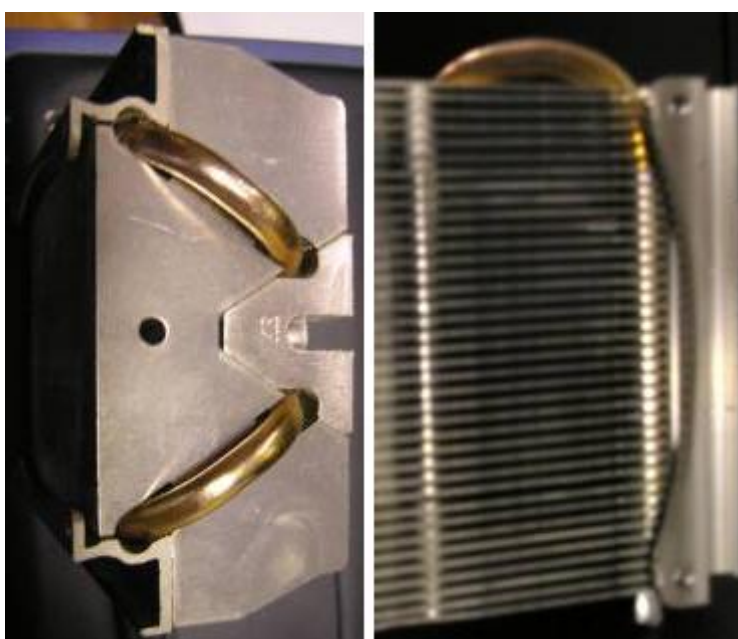
Εικόνα 3.12: Συντελεστές μεταφοράς θερμότητας βρασμού με 1% κατ'όγκο CNT στο ψυκτικό R134a(ParkK. etal. 2007)

Η τεχνολογία θερμοσωλήνων έχει χρησιμοποιηθεί σε ευρεία ποικιλία εφαρμογών σε διάφορες συσκευές μεταφοράς θερμότητας, ειδικά στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Παρόλα αυτά, η δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας περιορίζεται από τις ιδιότητες μεταφοράς του εργαζόμενου ρευστού. Η βασική ιδέα ενίσχυσης της μεταφοράς θερμότητας είναι η μεταβολή των ιδιοτήτων μεταφοράς του ρευστού και των χαρακτηριστικών ροής με τα αιωρούμενα νανοσωματίδια. Έτσι επιτυγχάνονται οι βέλτιστες συνθήκες απόδοσης των σωλήνων θερμότητας, λαμβάνοντας υπόψη τις συγκεντρώσεις των νανοσωματιδίων.(ParkK. etal. 2007)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μικρο-θερμοσωλήνες

### 4.1 Εισαγωγή στους θερμοσωλήνες

Ένας θερμοσωλήνας είναι ένας μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας, ο οποίος έχει την δυνατότητα να μεταφέρει μεγάλα θερμικά φορτία με πολύ μικρή διαφορά σε θερμοκρασία μεταξύ των ψυχρών και των θερμών επιφανειών του.



Εικόνα 4.1: Κοντινή άποψη ψύκτρας CPU με θερμοσωλήνες (FaghriA. 2014)

### 4.2 Μέθοδος κατασκευής

Ένας τυπικός θερμοσωλήνας είναι ένας σφραγισμένος σωλήνας, συνήθως κατασκευασμένος από θερμοαγωγίμο υλικό (π.χ. χαλκός ή αλουμίνιο). Στο εσωτερικό του φέρει μικρή σχετικά ποσότητα ψυκτικού υγρού (όπως είναι το νερό, η αιθανόλη, ή ο υδράργυρος κ.α.) με το υπόλοιπο του σωλήνα γεμίζεται με το ίδιο αλλά αεριοποιημένο υγρό σε καθαρή μορφή (χωρίς άλλα αέρια). (FaghriA. 2014)

Στο εσωτερικό του σωλήνα, υπάρχει ελικοειδής σχεδίαση που επιτρέπει στο υγρό να επιστρέψει στην βάση όταν ολοκληρωθεί ο κύκλος ψύξης. Οι σωλήνες στο εσωτερικό τους έχουν επίστρωση από υλικό

κατασκευασμένο με υπερθέρμανση μεταλλικής σκόνης (μέθοδος πυροσυσσώματωσης - sintering). Αν ο σωλήνας έχει συνεχή κλίση τότε η τελευταία παράμετρος δεν είναι απαραίτητη, γιατί το υγρό κυλάει στην βάση από μόνο του. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται σωλήνας Perkins. (FaghriA. 2014)

Οι θερμοσωλήνες δεν έχουν καθόλου κινούμενα μέρη και δεν χρειάζονται κατ'επέκταση και συντήρηση, αν και ποσοστό από τα μη συμπυκνωμένα αέρια θα διαφύγει από διάφορα διάκενα του σωλήνα (συνήθως στις ενώσεις), με αποτέλεσμα με το πέρασμα του χρόνου να μειώνεται ελαφρώς η απόδοση τους, ιδιαίτερα όταν η πίεση του αερίου (του αερίου που περιλαμβάνεται μέσα στο σωλήνα) είναι χαμηλή, όταν δηλαδή δεν έχει θερμανθεί αρκετά ακόμα. (FaghriA. 2014)

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως ψυκτικά μέσα εξαρτώνται από το φάσμα θερμοκρασιών που προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως ψύκτρα, και μπορεί να είναι από ήλιο (για πολύ χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας) μέχρι υδράργυρο, λίθιο και άργυρο (για τις πολύ υψηλές). Πάντως η πλειοψηφία των ψυκτρών με θερμοσωλήνες χρησιμοποιούν αμμωνία ή νερό ως ψυκτικό υγρό.

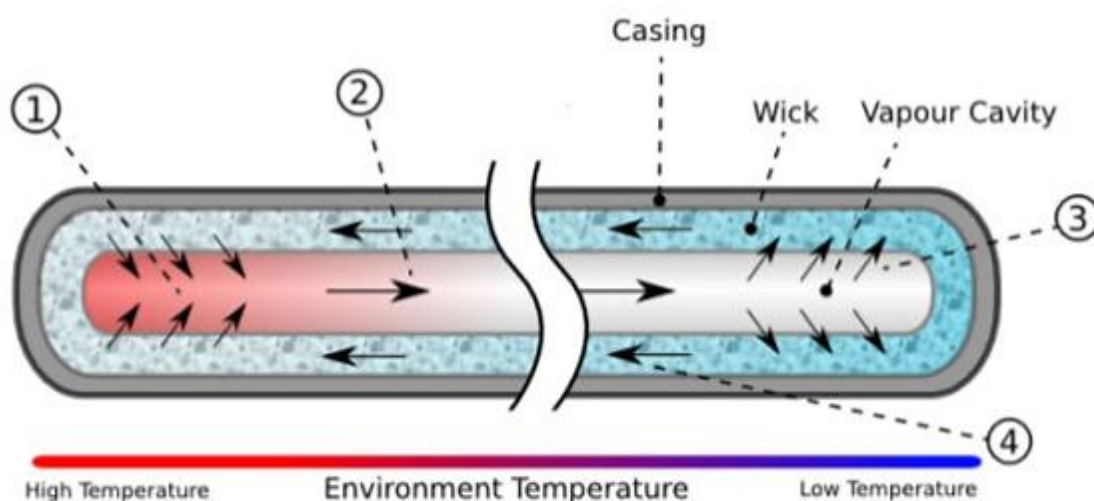
Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι η απόδοση κατά την μεταφορά θερμότητας. Η διαμεταγωγή τους είναι ταχύτερη από αυτήν που παρουσιάζει π.χ. ένα συμπαγές κομμάτι χαλκού. Η θερμότητα κινείται ταχύτερα και έχει σημειωθεί απόδοση ως και  $230\text{MW/m}^2$  (σε εφαρμογή αεροναυπηγικής). Ένας τυπικός έλεγχος επάνω στην συνολική πίεση του θερμοσωλήνα μπορεί να επιτευχθεί οριζόντια κατά την κατασκευή μια συγκεκριμένη ποσότητα εσωτερικά του υγρού λειτουργίας. Ανάλογα με την ποσότητα που θα υπάρχει θα έχουμε και την ανάλογη εφαρμογή. (FaghriA. 2014)

### **4.3 Τρόπος λειτουργίας θερμοσωλήνων**

Οι θερμοσωλήνες λειτουργούν βάσει της εξατμιστικής ψύξης για τη μεταφορά της θερμικής ενέργειας από ένα σημείο σε ένα άλλο, και της υγροποίησης του ψυκτικού υγρού. Η λειτουργία τους βασίζεται στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της αρχής και του τέλους τους. Η θερμοκρασία του θερμοσωλήνα δε μπορεί να φτάσει κάτω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. (FaghriA. 2014)

Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας ενός θερμοσωλήνα. Η μία άκρη του θερμοσωλήνα θερμαίνεται. Εκεί βρίσκεται το ψυκτικό μέσο, το οποίο εξατμίζεται και αυξάνει την εσωτερική πίεση στο σωλήνα.

Κατά την εξάτμιση απορροφάται θερμότητα, η πίεση αυξάνεται και ποσότητα υγρού αναγκάζεται να αεριοποιηθεί μεταφέροντας ποσό θερμότητας στην κρύα άκρη του θερμοσωλήνα. Ποτέ δεν αεριοποιείται όλο το ψυκτικό υγρό μέσο. Όταν το αεριοποιημένο υγρό μεταφέρει το θερμικό φορτίο, ψύχεται (είτε μέσω ψύκτρας με πτερύγια είτε με τη βοήθεια ανεμιστήρα) και υγροποιείται πάλι επιστρέφοντας στην βάση (είτε με την βοήθεια της βαρύτητας, είτε με «οδηγούς» μέσα στο θερμοσωλήνα) για να ξεκινήσει νέος «κύκλος» ψύξης.(FaghriA. 2014)



Εικόνα 4.2: Αρχή λειτουργίας θερμοσωλήνα (FaghriA. 2014)

Οι θερμοκρασίες στις οποίες παρατηρείται η εξάτμιση και η υγροποίηση εξαρτώνται από την πίεση που επικρατεί εντός του σωλήνα. Με τον τρόπο αυτό σε ένα θερμοσωλήνα, το νερό κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες θα μπορούσε να βράσει -θεωρητικά- και στους 0°C, και η μεταφορά θερμικού φορτίου θα αρχίσει κανονικά, εφόσον υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο άκρων του. Είναι όμως προτιμότερο να επιλέγεται το κατάλληλο ψυκτικό για το φάσμα θερμοκρασιών λειτουργίας. (FaghriA. 2014)

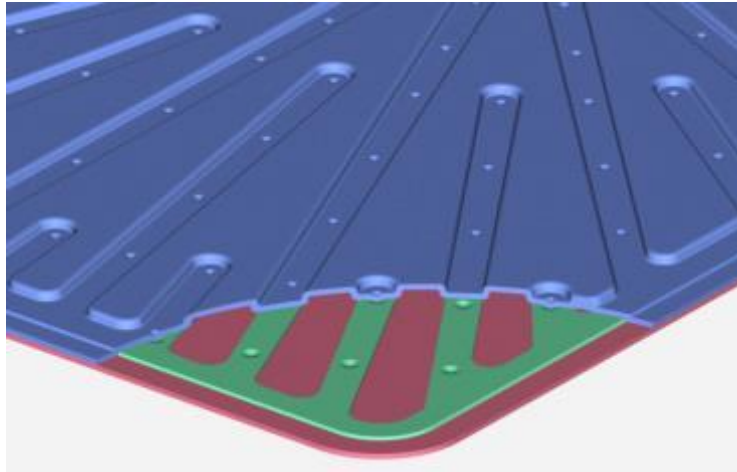
Ένας ενδεικτικός πίνακας με τα διάφορα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για διαφορετικά φάσματα θερμοκρασιών παρουσιάζεται ακολούθως (Πίνακας 4.1).

**Πίνακας 4.1: Εργαζόμενα μέσα σε θερμοσωλήνες με τα αντίστοιχα εύρη λειτουργίας (FaghriA. 2014)**

Μέσο	Σημείο Τήξης (°C)	Σημείο Βρασμού σε ατμοσφαιρική πίεση (°C)	Χρήσιμο εύρος (°C)
Ήλιο	-271	-261	-271 ως -269
Άζωτο	-210	-196	-203 ως -160
Αμμωνία	-78	-33	-60 ως 100
Ακετόνη	-95	57	0 ως 120
Μεθανόλη	-98	64	10 ως 130
Flutec PP2	-50	76	10 ως 160
Αιθανόλη	-112	78	0 ως 130
Νερό	0	100	30 ως 200
Τολουένιο	-95	110	50 ως 200
Υδράργυρος	-39	361	250 ως 650
Νάτριο	98	892	600 ως 1200
Λίθιο	179	1340	1000 ως 1800
Άργυρος	960	2212	1800 ως 2300

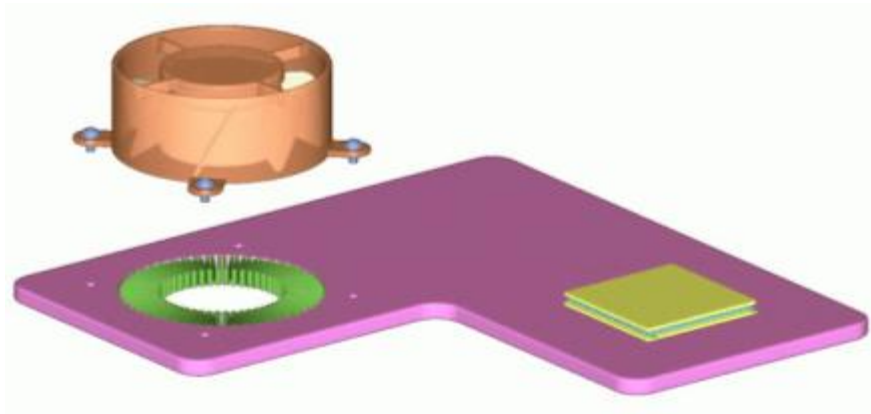
Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζεται επίπεδος θερμοσωλήνας, ο οποίος χρησιμοποιεί την ίδια τεχνολογία με τους κυκλικούς. Η διαφορά είναι ότι σε αυτή την περίπτωση μιλάμε για ένα κέλυφος επίπεδο και σφραγισμένο ερμητικά, που περιέχει μέσα ένα «κλειστό» κύκλωμα κυκλοφορίας υγρού, και φυσικά το ψυκτικό υγρό. Το βασικότερο τους πλεονέκτημα είναι ότι η θερμότητα απάγεται προς δύο κατευθύνσεις και όχι μία, όπως με τους κυκλικούς θερμοσωλήνες. Έτσι μπορούμε να έχουμε ένα πολύ λεπτό επίπεδο θερμοσωλήνα με απόδοση ίση με αυτή ενός τυπικού -αλλά σαφώς μεγαλύτερου σε διαστάσεις- κυκλικού. (FaghriA. 2014)





**Εικόνα 4.3:** Σχέδιο CAD επίπεδου θερμοσωλήνα πάχους 500 μm με σύστημα επιστροφής υγρού (FaghriA. 2014)

Εταιρίες όπως η Novel Concepts έχουν κατασκευάσει ψύκτρες τέτοιου τύπου με πάχος 500 μm (λεπτότερο από μια πιστωτική κάρτα). Ήδη αυτές χρησιμοποιούνται σε διάφορες χρήσεις π.χ. notebooks, surface mount κυκλώματα & πυρήνες, κ.λπ.



**Εικόνα 4.4:** Σχέδιο CAD από ψύκτρα με επίπεδο θερμοσωλήνα, διανομέα θερμότητας και ανεμιστήρα (FaghriA. 2014)

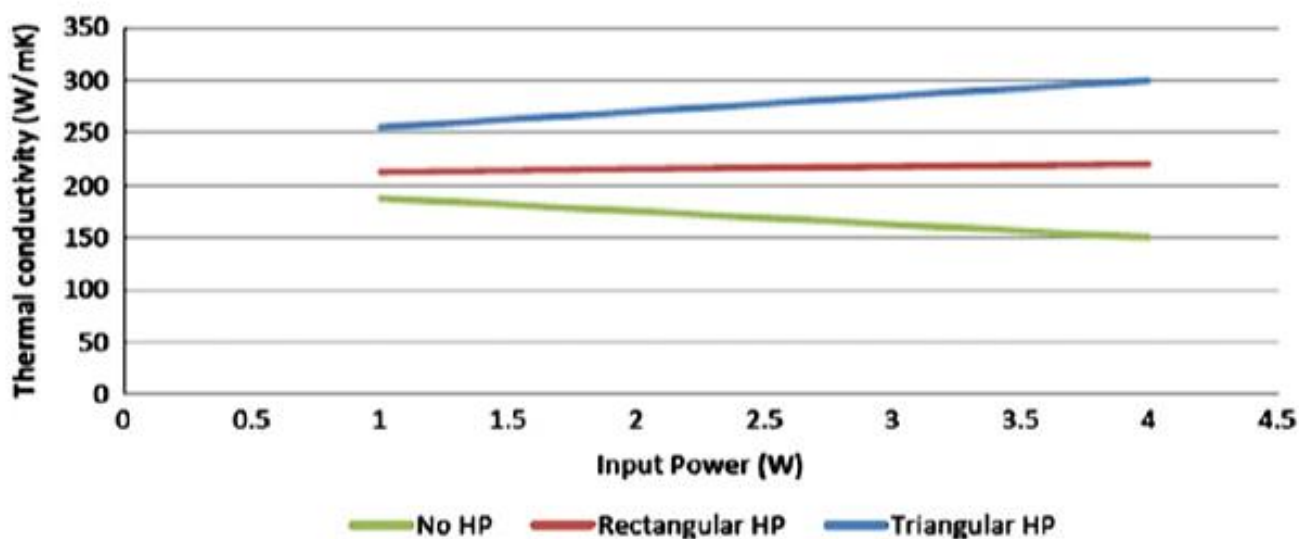
#### **4.4 Μετάβαση στους μικροθερμοσωλήνες**

Όπως ορίστηκε και προηγουμένα, οι θερμοσωλήνες είναι εναλλάκτες θερμότητας που επιτρέπουν την απομάκρυνση της ροής θερμότητας από ένα ηλιακό συγκεντρωτικό κελί με παθητική ψύξη. Η ενσωμάτωση ενός μικροθερμοσωλήνα μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη μεταφορά της αποβαλλόμενης θερμότητας από ένα τμήμα σε ένα ψύκτη και στη συνέχεια να μειώσει τη θερμική αντίσταση μεταξύ του τμήματος και του

ψύκτη. Ένας μικροθερμοσωλήνας ορίζεται ως « τόσο μικρός που η μέσω καμπυλότητα της διεπιφάνειας ατμού-υγρού είναι απαραίτητως συγκρίσιμου μεγέθους με το αντίστροφο της υδραυλικής διαμέτρου του καναλιού». (Cotter, 1984) Μέσω των μικροθερμοσωλήνων μπορεί να επιτευχθεί είτε ενεργητική είτε παθητική ψύξη. Η παρούσα εργασία εστιάζει στην παθητική ψύξη με θερμοσωλήνες.

#### 4.4.1 Συσχέτιση θερμική απόδοσης μικροθερμοσωλήνων και διατομής

Η θερμική απόδοση ενός μικροθερμοσωλήνα συνδέεται άμεσα με τη γεωμετρία της διατομής του. (Hung και Seng, 2011) Σχεδιάζονται διάφορες διατομές ώστε να βελτιώσουν την ροή επιστροφής του εργαζόμενου ρευστού. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5, ένας τριγωνικός μικροθερμοσωλήνας είναι καλύτερος από έναν ορθογωνικό, λόγω του υψηλότερου τριχοειδούς φαινομένου στην άντληση σε αυτή την περίπτωση. (Peterson et al., 1993)



Εικόνα 4.5: Θερμική αγωγιμότητα δίσκου πυριτίου με συστοιχία ορθογωνικών θερμοσωλήνων, τριγωνικών θερμοσωλήνων και χωρίς συστοιχία θερμοσωλήνων (Peterson et al., 1993)

Οι Moon et al. (2004) επιβεβαίωσαν το αποτέλεσμα αυτό ελέγχοντας μικροθερμοσωλήνες με καμπύλες διατομές. Οι Suman και Kumar (2005) ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο για τη μελέτη της απόδοσης του μικροθερμοσωλήνων. Θεώρησαν μικροθερμοσωλήνες με δύο διαφορετικές διατομές: έναν ισόπλευρο τριγωνικό θερμοσωλήνα με

πλευρά ίση με 400  $\mu\text{m}$  και έναν ορθογωνικό (400  $\mu\text{m}$ ×800  $\mu\text{m}$ ). Το εργαζόμενο μέσο ήταν πεντάνιο με υπόστρωμα πυριτίου. Οι Suman και Kumar (2005) έδειξαν ότι η απόδοση ενός θερμοσωλήνα μειώνεται με αύξηση του πλήθους των πλευρών του.

Οι Kang και Huang (2002) κατασκεύασαν ένα μικροθερμοσωλήνα διατομής αστέρα και έναν ρομβοειδούς διατομής. Κατέγραψαν αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας κατά 33,6% για τη διατομή αστέρα και 39,1% για τη διατομή ρόμβου σε σύγκριση με τον παραδοσιακό τριγωνικό μικροθερμοσωλήνα. Οι ερευνητές υποστήριξαν ότι οι πιο οξείες γωνίες και τα μικρο-διάκενα των διατομών αυτών οδηγούσαν σε μεγαλύτερη επίδραση του τριχοειδούς φαινομένου.

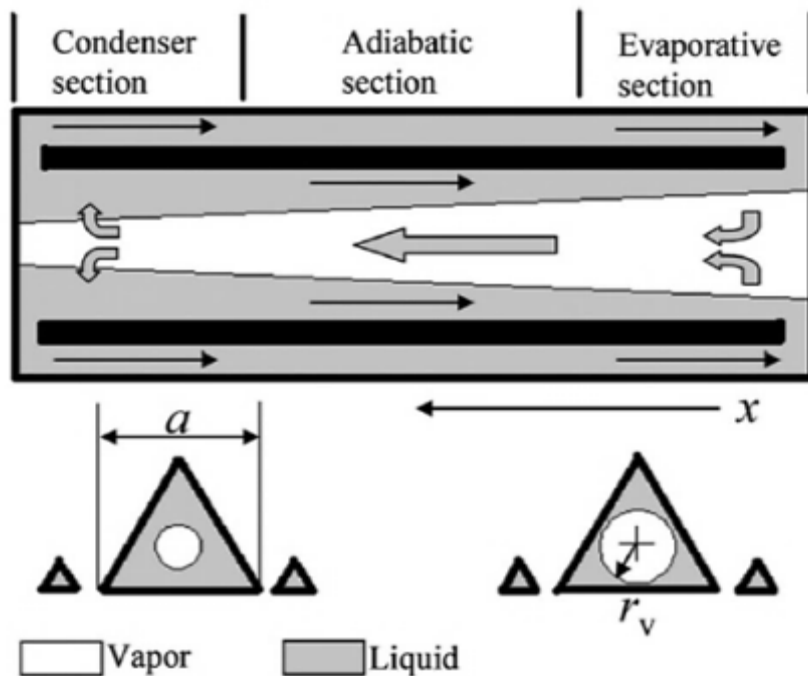
Όπως ανέφεραν οι Hung και Seng (2011), η οξύτητα και το πλήθος των οξείων γωνιών είναι δύο σημαντικές γεωμετρικές παράμετροι που ελέγχουν την ικανότητα τριχοειδούς άντλησης και κατά συνέπεια την απόδοση του μικροθερμοσωλήνα. Για κανονικά πολυγωνικά σχήματα, υπάρχει εξάρτηση μεταξύ της οξύτητας της γωνίας και του πλήθους των γωνιών από το σχήμα: η γωνία κορυφής μειώνεται με αύξηση του πλήθους των γωνιών. Σε διατομές θερμοσωλήνων σχήματος αστέρα, το πλήθος των γωνιών και η γωνία κορυφής δε συσχετίζονται. Για το λόγο αυτό οι Hung και Seng (2011) συμπέραναν ότι οι μικροθερμοσωλήνες με διατομή αστέρα οδηγούν σε υψηλότερη τριχοειδή ισχύ άντλησης και άρα σε μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς θερμότητας σε σύγκριση με τους μικροθερμοσωλήνες κανονικού πολυγώνου. Απέδειξαν επίσης ότι η αύξηση του ολικού μήκους του μικροθερμοσωλήνα οδηγεί σε μείωση της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας.

Σε μια δημοσίευσή τους, οι Sobhan et al. (2007) παρουσίασαν ένα καινοτόμο σχεδιασμό: μικροθερμοσωλήνες συνδεδεμένους με σύρμα. Οι Wang and Peterson (2002) πρότειναν μια συστοιχία μικροθερμοσωλήνων συνδεδεμένων με σύρμα. Εξέτασαν την απόδοση ενός μικροθερμοσωλήνα αργιλίου-ακετόνης συνδεδεμένου με σύρμα, τόσο αναλυτικά αλλά και πειραματικά. Ο μικροθερμοσωλήνας κατασκευαζόταν τοποθετώντας μια συστοιχία κυλινδρικών συρμάτων μεταξύ δύο επίπεδων πλακών. Ανακάλυψαν ότι η μέγιστη ικανότητα μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται με αύξηση τόσο της διαμέτρου του σύρματος όσο και της θερμοκρασίας λειτουργίας μέχρι μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται εντός του εύρους θερμοκρασιών λειτουργίας του εργαζόμενου μέσου. Απέδειξαν επίσης ότι η αύξηση της απόστασης μεταξύ των συρμάτων μπορεί να αυξήσει τη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς θερμότητας. Στην επόμενη μελέτη τους, οι Wang και Peterson (2002) επιβεβαίωσαν αυτή τη διατύπωση, αλλά προσέθεσαν ότι υπάρχει μια συγκεκριμένη απόσταση στην οποία η βελτίωση

επισκιάζεται από τη μείωση του πλήθους των θερμοσωλήνων της συστοικίας και η μέγιστη ικανότητα μεταφοράς θερμότητας περιορίζεται. Η βέλτιστη απόσταση μεταβάλλεται ποικίλλει ανάλογα με τη διάμετρο.

#### 4.4.2 Μικροθερμοσωλήνες με αρτηρίες

Στο σχεδιασμό αυτό υπάρχει ένα φλεβικό κανάλι το οποίο είναι ο παραδοσιακός μικροθερμοσωλήνας και δύο γειτονικά κανάλια αρτηρίες που εκτείνονται στις δύο πλευρές του φλεβικού καναλιού και συνδέονται στα δύο άκρα (Εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6: Μικροθερμοσωλήνας με αρτηρίες (LiuW. et al., 2011)

Στο φλεβικό κανάλι, ο ατμός μεταφέρει τη λανθάνουσα θερμότητα οδεύοντας προς το ψυχρό άκρο, όπου συμπυκνώνεται. Στις αρτηρίες, το υγρό μεταφέρεται προς το θερμό άκρο λόγω της τριχοειδούς δύναμης που εφαρμόζεται από τα αυλάκια σχήματος V στους τριγωνικούς μικροσωλήνες. Χάρη στη διαφορά πίεσης του υγρού μεταξύ του ψυχρού άκρου της αρτηρίας και του μικροθερμοσωλήνα, το υγρό που συγκεντρώνεται στην περιοχή συμπύκνωσης μπορεί να μεταφερθεί πίσω.

Οι Liu et al. (2011) συνέκριναν δύο είδη μικροθερμοσωλήνων: με και χωρίς αρτηρίες. Συμπέραναν ότι οι αρτηρίες μπορούν να αυξήσουν

αποδοτικά την τριχοειδή δύναμη βελτιώνοντας την ικανότητα μεταφοράς υγρού από το ψυχρό άκρο πίσω στο θερμό και περιορίζοντας την εξάπλωση της αδιαβατικής περιοχής.

#### **4.4.3 Εργαζόμενο ρευστό μικροθερμοσωλήνων**

Το εργαζόμενο ρευστό είναι μια σημαντική παράμετρος της απόδοσης των μικροθερμοσωλήνων, οι οποίες είναι ψυκτικές διατάξεις δύο φάσεων. Το 2003, οι Chien et al. πρότειναν τη χρήση νανορευστών στους μικροθερμοσωλήνες. Χρησιμοποιώντας νανοσωματίδια χρυσού βυθισμένα στο νερό, αντί για καθαρό νερό, πέτυχαν μια μέση μείωση της τάξης του 40% στη θερμική αντίσταση του μικροθερμοσωλήνα. Έκτοτε, έχουν δημοσιευθεί περίπου 30 μελέτες σχετικά με τη χρήση των νανορευστών σε θερμοσωλήνες (LiuZ-H. et al., 2012). και όλοι οι ερευνητές συμφωνούν στο ότι η χρήση νανορευστών βελτιώνει τη συναλλαγή θερμότητας των μικροθερμοσωλήνων. Παρακάτω παρουσιάζεται μια επισκόπηση της χρήσης νανορευστών σε μικροθερμοσωλήνες (Πίνακας 4.2). Οι Liu και Li (2012) αναφέρουν τρεις λόγους για αυτή τη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας: η ενεργή θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών αυξάνεται, οι φυσικές ιδιότητες των νανορευστών μεταβάλλονται, αυξάνοντας την τριχοειδή δύναμη στο θερμοσωλήνα και κάνοντας το υγρό να επεκταθεί στις μικροαυλακώσεις του σχήματος της διατομής και τέλος τα μικροσωματίδια σχηματίζουν ένα λεπτό πορώδες στρώμα στο τοίχωμα, το οποίο αυξάνει την τριχοειδή δύναμη.

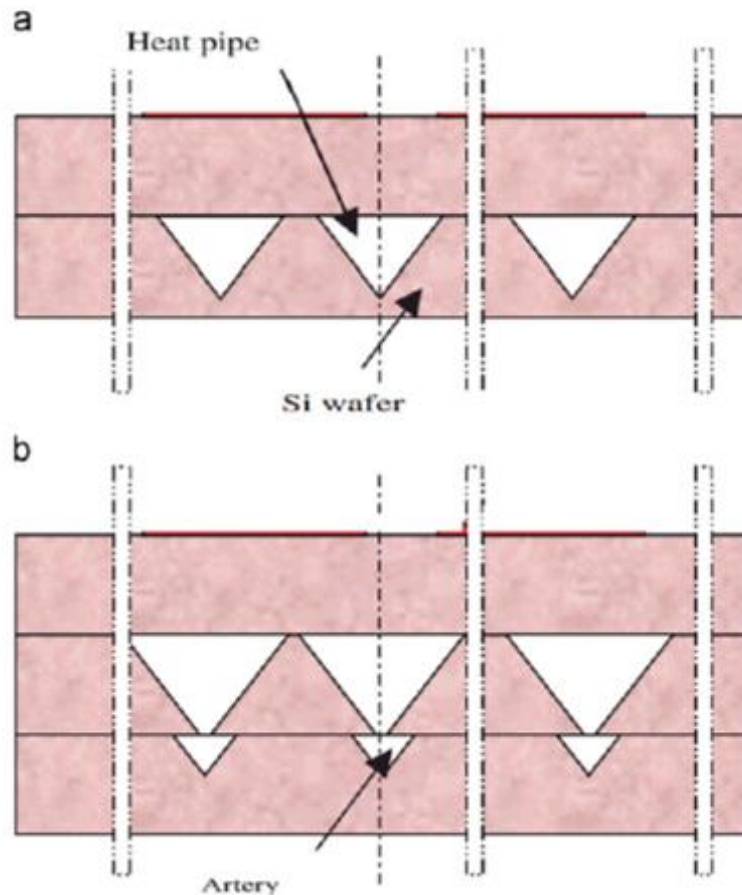
**Πίνακας 4.2: Επισκόπηση δημοσιεύσεων στη χρήση νανορευστών σε μικροθερμοσωλήνες (LiuZ-H. et al., 2012)**

Σχήμα μικροθερμοσωλήνα	Εργαζόμενο μέσο (μέγεθος νανοσωματιδίων και βέλτιστη συγκέντρωση)	Μέγιστη μείωση θερμικής αντίστασης σε σύγκριση με το ρευστό	Ερευνητές
Δισκοειδές	Au/νερό (17 nm)	40% (ως προς το απιονισμένο νερό)	Chien et al. (2003)
Κυλινδρικό	Au/νερό (10 nm)	50% (ως προς το νερό)	Kang et al. (2006)
Κυλινδρικό	Au/νερό (35 nm)	80% (ως προς το νερό)	Kang et al. (2006)
Κυλινδρικό	Au/νερό (10 nm)	44% (ως προς το νερό)	Wei et al.
Κυλινδρικό	CuO/νερό (50 nm, 1,0 wt%)	39% (ως προς το νερό)	Yang et al. (2008)
Επίπεδο	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /νερό (38,4 nm, 0,8 wt%)	47,7% (ως προς το απιονισμένο νερό)	Do K.H. and Jang S.P. (2010)
Επίπεδο	TiO <sub>2</sub> /νερό (20 nm, 4,0 wt%)	27% (ως προς το νερό)	Shafahi et al. (2010)
Κυλινδρικό	TiO <sub>2</sub> /νερό (10 nm, 4,0 wt%)	25% (ως προς το νερό)	Shafahi et al. (2010)
Κυλινδρικό	CuO/νερό (50 nm, 1,0 wt%)	50% (ως προς το νερό)	Liu et al. (2010)
Κυλινδρικό	CuO/νερό (50 nm, 1,0 wt%)	50% (ως προς το νερό)	Wang et al. (2010)

#### 4.4.4 Κατασκευή μικροθερμοσωλήνων

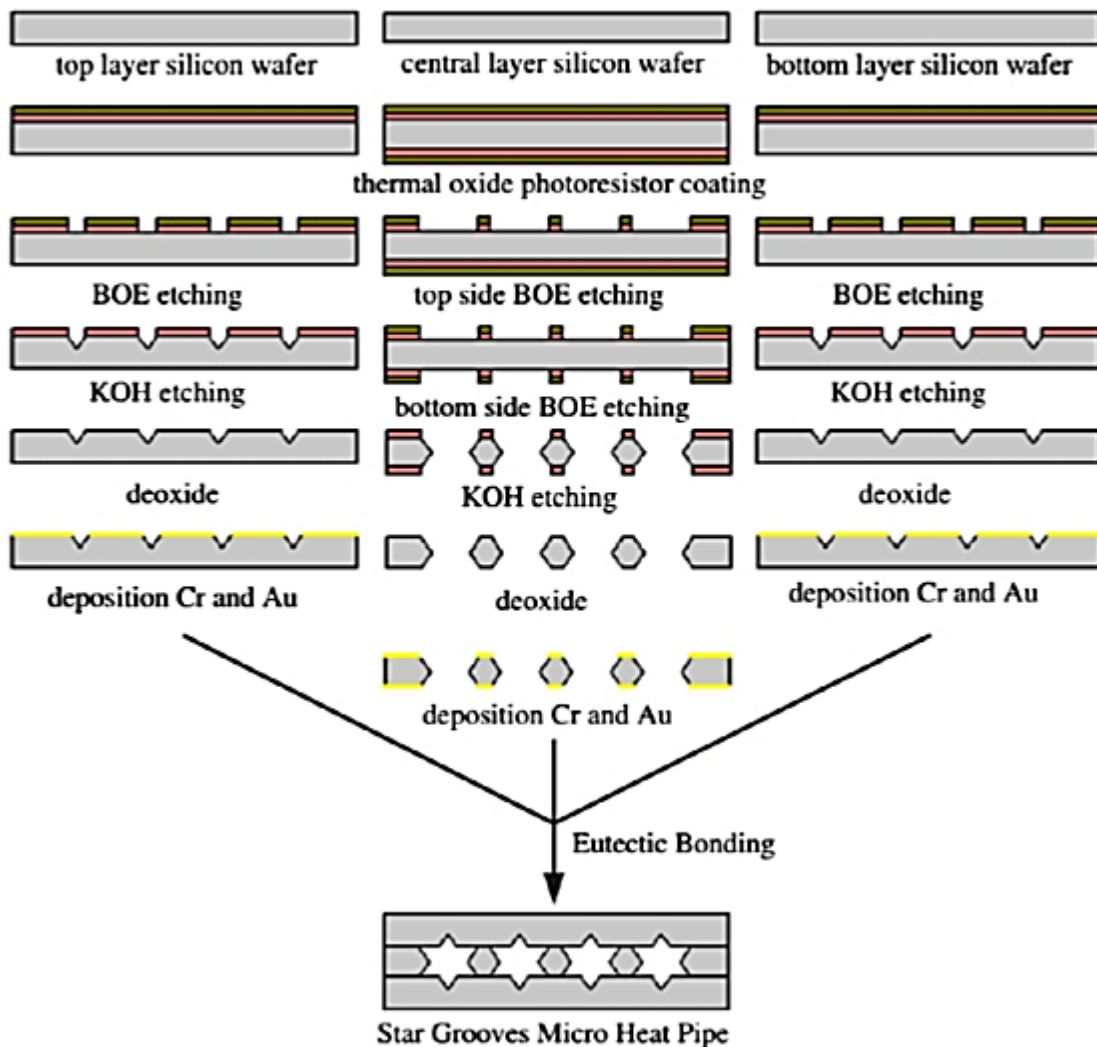
Η κατασκευή μικροθερμοσωλήνων περιλαμβάνει συνήθως συμβατικές μικροκατεργασίες. Οι Ivanova et al. (2006) κατασκεύασαν ένα μικροθερμοσωλήνα πυριτίου/νερού χρησιμοποιώντας δύο δίσκους πυριτίου. Χρησιμοποιήθηκε ξηρή χημική χάραξη μεγάλου βάθους ώστε να προκύψει μικροτριχοειδής δομή νηματίων. Το 2002, οι Le Berre et al. κατασκεύασαν και έλεγξαν μικροθερμοσωλήνες πυριτίου δύο ειδών. Ο πρώτος (Εικόνα 4.7a) αποτελούνταν από μια σειρά 55 παράλληλων τριγωνικών καναλιών πλάτους 230 μm, βάθους 170 μm και μήκους 20 mm με απόσταση 130 μm, τα οποία έχουν υποστεί μικροκατεργασία σε δίσκο πυριτίου. Η διάταξη σφραγίζεται ερμητικά με ένα δεύτερο δίσκο πυριτίου. Για το δεύτερο σχεδιασμό (Εικόνα 4.7b), προστίθενται αρτηρίες για τη μεταφορά του υγρού: το υγρό επιστρέφει μέσω ανεξάρτητα χαραγμένων καναλιών στη ζώνη ατμοποίησης. Στην περίπτωση αυτή, ο πρώτος δίσκος αποτελείται από 25 τριγωνικές διατομές, πλάτους 500 μm και βάθους 320 μm, χαραγμένα σε ολόκληρο το δίσκο. Το δεύτερος

δίσκος περιέχει επίσης 25 τριγωνικές διατομές. Η κατασκευή ξεκίνησε με τη θερμική παραγωγή ενός στρώματος οξειδίου 1,5  $\mu\text{m}$  στο δίσκο της διάταξης. Το στρώμα οξειδίων αποκτά συγκεκριμένο μοτίβο, ώστε να λειτουργήσει ως μάσκα για τη χάραξη. Οι τριγωνικές αυλακώσεις χαράσσονται με υδατικό διάλυμα 40%wt KOH σε 60  $^{\circ}\text{C}$ .



**Εικόνα 4.7: Κάθετες διατομές των μικροθερμοσωλήνων που κατασκευάστηκαν από τον LeBerreetal. (2003)**

Οι Kang και Huang (2002) κατασκεύασαν ένα μικροθερμοσωλήνα με διατομή αστέρα που αποτελείται από τρεις δίσκους πυριτίου. Χρησιμοποίησαν την τεχνολογία φωτολιθογραφίας υγρής χημικής χάραξης, για να παράξουν μια σειρά 31 παράλληλων αυλακώσεων σχήματος V. Στη συνέχεια τα τρία στρώματα των δίσκων ανέπτυξαν ευτηκτικούς δεσμούς ώστε να δημιουργήσουν το μικροθερμοσωλήνα. Οι διεργασίες αυτές παρουσιάζονται εποπτικά στην Εικόνα 4.8.



Εικόνα 4.8: Διαδικασία κατασκευής μικροθερμοσωλήνα διατομής αστεριού (Kang S, 2002)

#### 4.5 Συνήθειες εφαρμογές

Ο Grover με τους συνεργάτες του διεξήγαγε έρευνες σε συστήματα ψύξης για πυρηνικά κελιά παραγωγής ενέργειας για διαστημόπλοια, όπου υπήρχαν ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες. Οι θερμοσωλήνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και σε περιβάλλοντα έλλειψης βαρύτητας (χρήση σε διαστημικές εφαρμογές).

Από τότε, οι θερμοσωλήνες έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε διαστημικά αεροσκάφη και διαστημικά λεωφορεία για περιπτώσεις που χρειαζόντουσαν ένα σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας, σε απομακρυσμένα και δυσπρόσιτα σημεία του σκάφους, και χωρίς να απαιτείται κάποια διαδικασία συντήρησης.



Σήμερα, οι θερμοσωλήνες χρησιμοποιούνται σε σύγχρονα και εξελιγμένα συστήματα υπολογιστών, που οι απαιτήσεις για ψύξη αυξάνονται συνεχώς. Τυπικά χρησιμοποιούνται σε CPU και GPU σε συνδυασμό με κάποιο περαιτέρω σύστημα απαγωγής της θερμότητας (συνήθως με ανεμιστήρα) με σκοπό την διοχέτευση του θερμικού φορτίου στην ατμόσφαιρα (και προφανώς μακριά από την πηγή που εκπέμπει το θερμικό φορτίο).

Χρησιμοποιούνται επίσης πολύ σε συστήματα θέρμανσης νερού με ηλιακή ενέργεια (στους ηλιακοί θερμοσίφωνες). Επίσης χρησιμοποιούνται για να απάγουν θερμότητα από αγωγούς πετρελαίου (αυτό απαιτείται γιατί η ροή & στροβιλισμός του πετρελαίου δημιουργεί τριβή μέσα στον αγωγό, θερμαίνοντάς τον).

Από έρευνα που έγινε από τους Royne, Dey, και Mills [2005], βρέθηκε ότι η ψύξη μέσω θερμοσωλήνων είναι κατάλληλη για την κατηγορία μονοκύτταρων CPV για υψηλό λόγο συγκέντρωσης, π.χ., για 1.000 ήλιους, και σε CPV με γραμμικούς συγκεντρωτές για χαμηλό λόγο συγκέντρωσης, πχ για 30 ήλιους.

Οι Beach και White (1981) χρησιμοποίησαν ένα θερμοσωλήνα χαλκού με συγκολλημένα διαμήκη πτερύγια χαλκού για να αφαιρέσουν θερμότητα περίπου εφτακοσίων ήλιων, χρησιμοποιώντας το νερό ή την ακετόνη σαν εργαζόμενο ρευστό. Το σύστημα ήταν ένας θερμοσίφοντας με λέβητα, και εξετάστηκε σε κάθετη διάταξη. Η αφαίρεση θερμότητας έγινε με φυσική μεταφορά. Η διαφορά θερμοκρασία μεταξύ της κυψέλης και του περιβάλλοντος ήταν περίπου 30°C. Σε μελέτη που πραγματοποίησε ο Farahat (2004) συγκρίνοντας το θερμοσωλήνα και την εξαναγκασμένη ψύξη με νερό για τα συστήματα μονού κελιού, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το σύστημα ψύξης με θερμοσωλήνες ήταν καλύτερο.

Οι Feldman, Kenney, και Edenburn (1981) εξέτασαν την ψύξη με σωλήνες θερμότητας σε έναν γραμμικό συγκεντρωτή με λόγο συγκέντρωσης περίπου εικοσιτεσσάρων ήλιων. Ο θερμοσωλήνας θερμότητας ήταν μια θερμοσιφωνική διάταξη ειδικής κατασκευής, με βενζόλιο ως εργαζόμενο ρευστό. Η θερμότητα απορροφήθηκε από δύο πλάκες αλουμινίου με κατακόρυφα πτερύγια. Η θερμοκρασία του τμήματος εξάτμισης υπερέβη τη θερμοκρασία σχεδιασμού του δηλαδή τους 140°C για ταχύτητες ανέμου μικρότερες από 1 m/s. Οι Akbarzadeh και Wadowski (1996) έψυξαν έναν γραμμικό συγκεντρωτή με μια θερμοσιφωνική διάταξη από χαλκό, με λόγο συγκέντρωσης περίπου είκοσι ήλιων. Το εργαζόμενο μέσο ήταν το ψυκτικό R-11 (τριχλωρομονοφθορομεθάνιο), λόγω της σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας

λειτουργίας του, τους 40°C. Η αποβολή θερμότητας έγινε με φυσική συναγωγή. Το υλικό, το μέγεθος, και ο προσανατολισμός πτερυγίων δεν διευκρινίστηκαν.

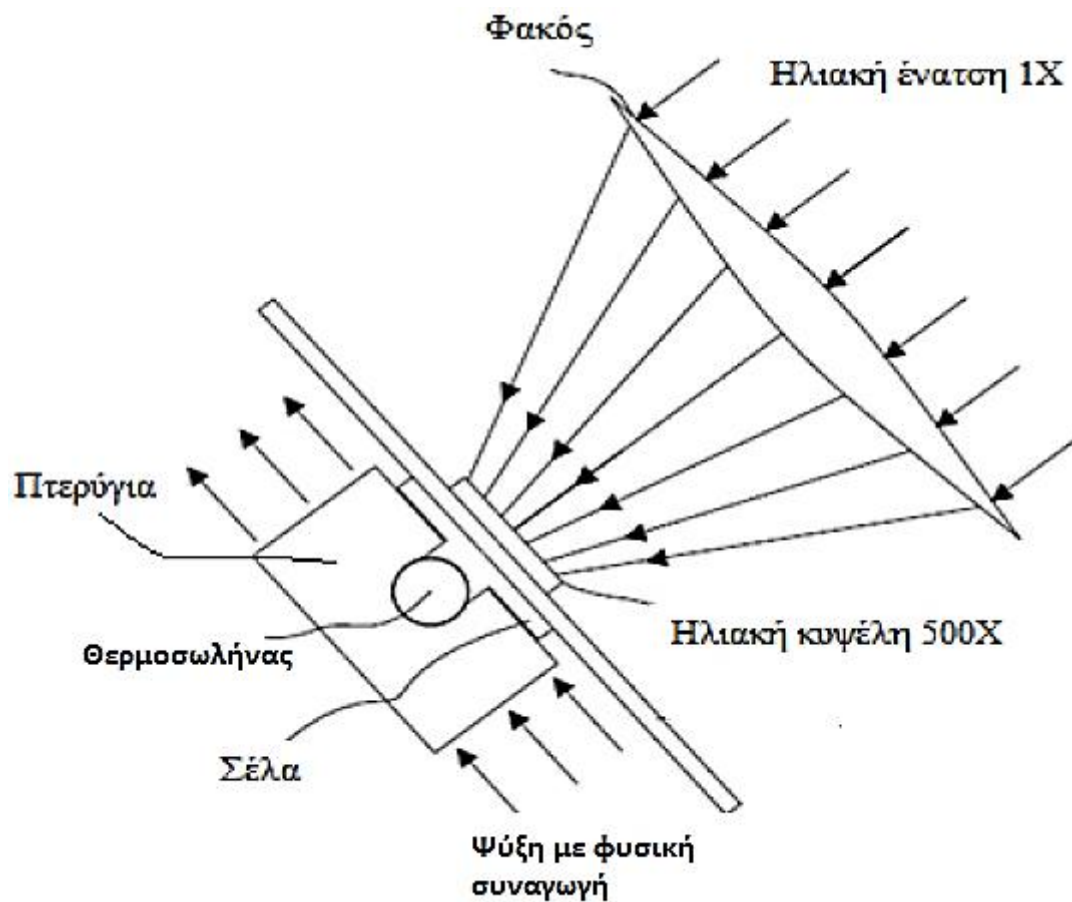
**Πίνακας 4.3: Προηγούμενες μελέτες στην παθητική ψύξη συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών με θερμοσωλήνες**

Ερευνητές	Υλικό Θερμοσωλήνα	Εργαζόμενο ρευστό	Ηλιασμός	Είδος	Αποτελέσματα
Akbarzadeh και Wadowski (1996)	Χαλκός	Ψυκτικό R-11	20 ήλιοι	Γραμμικός συγκεντρωτής	Θερμοσιφωνικό, θερμοκρασία κάτω από 46°C
Feldman, Kenney, και Edenburn (1981)	Θερμοσωλήνας και ενσωματωμένα πτερύγια αργιλίου	Βενζόλιο	24 ήλιοι	Γραμμικός συγκεντρωτής	Θερμοσιφωνικό, απαιτείται ταχύτητα ανέμου $\geq 1$ m/s
Beach και White (1981)	Θερμοσωλήνας χαλκού, Συγκολλημένα πτερύγια χαλκού	Ακετόνη ή νερό	Μέχρι 700 ήλιοι	Μεμονωμένο κέλυφος	Θερμοσιφωνικό, μόνο κάθετος έλεγχος, περίπου 30°C αύξηση πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος

#### 4.6 Παράδειγμα εφαρμογής θερμοσωλήνων σε σύστημα CPV

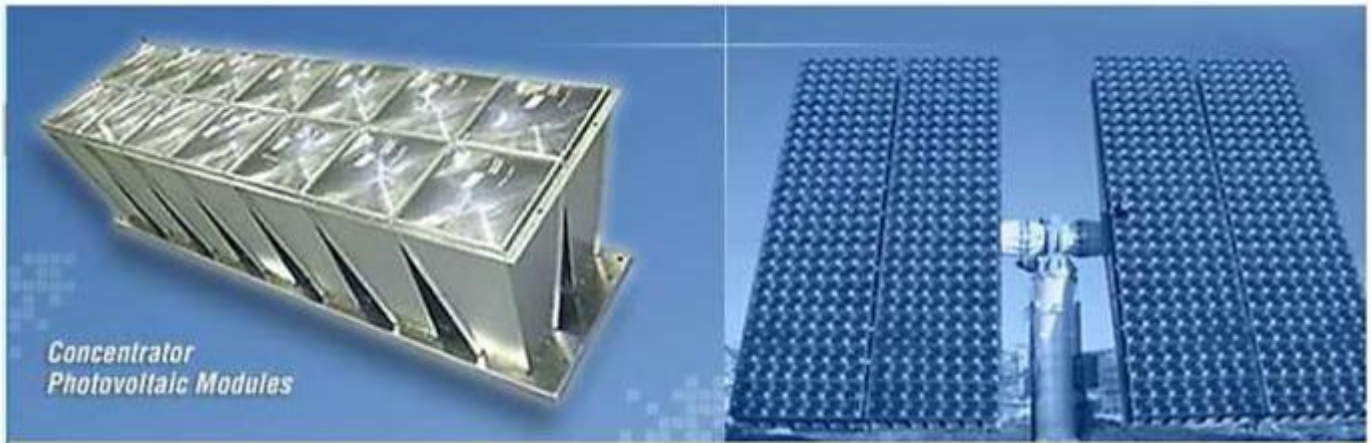
Μια σχηματική αναπαράσταση του συστήματος CPV με έναν θερμοσωλήνα παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.9. Το ηλιακό κελί τοποθετείται πάνω σε μια αλουμινένια βάση. Η ηλιακή ακτινοβολία πριν φθάσει στην ηλιακή κυψέλη έχει γίνει 500 φορές μεγαλύτερη μέσω του φακού Fresnel. (Anderson William G)

Η συγκεντρωμένη ηλιακή ροή προσπίπτει στην ηλιακή κυψέλη, παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια. Η απορριπτόμενη θερμική ενέργεια περνά από την κυψέλη μέσω της σέλας, και από εκεί στο θερμοσωλήνα, έπειτα διανέμεται από το θερμοσωλήνα σε μια σειρά πτερυγίων, όπου και αποβάλλεται μέσω φυσικής συναγωγής. (Anderson William G)



**Εικόνα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση ενός συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού και του θερμοσωλήνα που αποβάλλει την παραγόμενη θερμική ενέργεια (όχι υπό κλίμακα)(AndersonWilliamG)**

Στην Εικόνα 4.10 παρουσιάζεται ένα συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό σύστημα τύπου GEN 1 της εταιρίας EMCORE. Αποτελείται από πολλά φωτοβολταϊκά πάνελ, όπου το καθένα έχει ένα κελί επιφάνειας 1 cm<sup>2</sup>. Οι κυψέλες τοποθετούνται σε ένα σύστημα δύο αξόνων όπου η κατεύθυνση τους είναι πάντα προς τον ήλιο. Τα ηλιακά πάνελ ακολουθούν τον ήλιο με περιστροφή γύρω από έναν κάθετο άξονα. Τα κελιά περιστρέφονται και γύρω από έναν οριζόντιο άξονα. Αυτό βοηθάει στη σχεδίαση των θερμοσωλήνων, εφόσον ο σωλήνας θερμότητας είναι οριζόντιος για όλες τις συνθήκες λειτουργίας, απλοποιώντας έτσι τη σχεδίαση τους. )( Anderson William G)



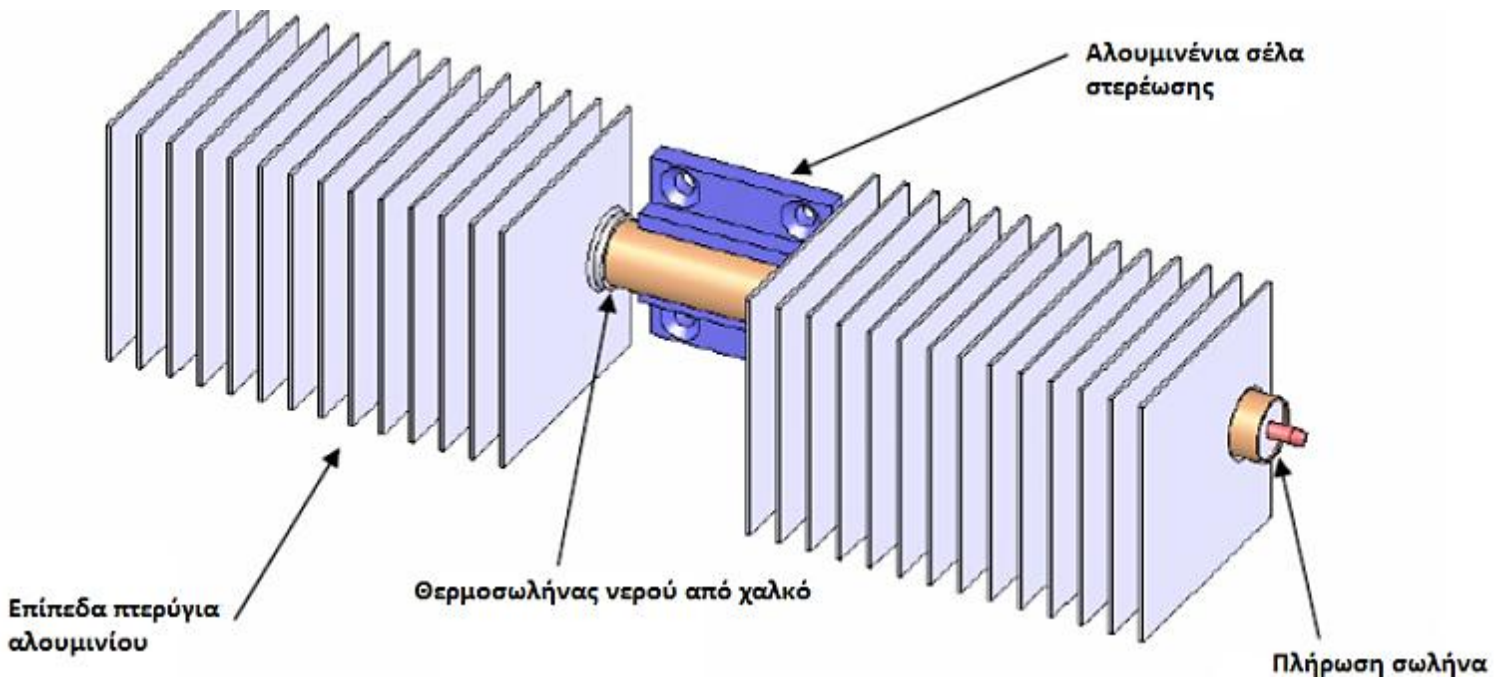
**Εικόνα 4.10: Συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό σύστημα της EMCORE( AndersonWilliamG))**

Οι απαιτήσεις ψύξης του συστήματος που μελέτησαν οι Andersonetal. παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 4.4). Η ψύξη πραγματοποιείται με φυσική συναγωγή, καθώς η εξαναγκασμένη συναγωγή απαιτεί ανεμιστήρα, ο οποίος για να λειτουργήσει καταναλώνει ισχύ. Αυτή η κατανάλωση της ισχύος για τον ανεμιστήρα μειώνει τη συνολική απόδοση του συστήματος. Ενώ η φυσική συναγωγή επιτρέπει την παθητική απομάκρυνση της θερμότητας, οι συνήθεις συντελεστές φυσικής συναγωγής είναι 10 ως 100 φορές χαμηλότεροι από εκείνους της εξαναγκασμένης συναγωγής. Καθώς αυξάνεται το μέγεθος της καταβόθρας θερμότητας, οι απώλειες αγωγής μέσω της καταβόθρας θερμότητας μειώνουν περαιτέρω την απόδοση της καταβόθρας θερμότητας. Λόγω του ότι η φυσική συναγωγή απαιτεί μεγάλη καταβόθρα θερμότητας, είναι σημαντική η αποτελεσματική διάχυση της θερμότητας. Οι θερμοσωλήνες αποτελούν μια μέθοδο ισόθερμης διανομής της θερμότητας σε όλα τα πτερύγια, αυξάνοντας την απόδοση του συστήματος.

**Πίνακας 4.4: Απαιτήσεις ψύξης συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού κελιού ( Anderson William G)**

Μέγεθος κελιού	1 cm×1 cm
Ηλιακή συγκέντρωση	~500 ήλιοι
Αποβολή θερμότητας κατά την ονομαστική λειτουργία	~40 W
Ανύψωση πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε ονομαστική λειτουργία (θερμοσωλήνας προς τον αέρα)	25 °C
Χρόνος ζωής	20 ως 30 χρόνια
Είδος μεθόδου ψύξης	παθητική

Ο σχεδιασμός του συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.11



**Εικόνα 4.11: Σύστημα ψύξης με θερμοσωλήνες με σέλα αλουμινίου για το συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό κελί, θερμοσωλήνα νερού από χαλκό και πτερύγια από αλουμίνιο ( Anderson William G)**

Οι παράμετροι του συστήματος συνοψίζονται ακολούθως (Πίνακας 4.5).

**Πίνακας 4.5: Παρουσίαση των παραμέτρων του συστήματος( Anderson William G)**

Παράμετρος	Τιμή
Διάταξη	
Ολικές διαστάσεις	22,9 cm × 5,1 cm × 5,1 cm
Φινίρισμα	Πλάκα νικελίου
Θερμοσωλήνας	
Περιβλήμα	Χαλκός
Εργαζόμενο ρευστό	Νερό
Σέλα εισαγωγής θερμότητας	
Υλικό	Αλουμίνιο 6061-T6
Διαστάσεις	3,8 cm × 3,8 cm
Πτερύγια	
Υλικό	Αλουμίνιο 1100-H14
Πλήθος	24
Βήμα	7,94 mm

Οι διαστάσεις και το βήμα των πτερυγίων επιλέχθηκαν με βάση ανάλυση CFD της διάταξης των θερμοσωλήνων σε ελεύθερο αέρα. Εκτιμήθηκε ύστερα από ένα μεγάλο αριθμό ελέγχων, όπου η θερμοκρασία που επιλέχθηκε για τις εξωτερικές επιφάνειες ήταν 20°C και η πίεση μηδενική. ( Anderson William G)

Σε μετρήσεις που έγιναν για να καθοριστεί η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των πτερυγίων χρησιμοποιήθηκαν πτερύγια με χαρακτηριστικά που δίνονται ακολούθως (Πίνακας 4.6). Η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των πτερυγίων βρέθηκε 7.94mm. Μικρότερη απόσταση δίνει μεγαλύτερη επιφάνεια με αποτέλεσμα ο αέρας να μην μπορεί να κυκλοφορήσει εύκολα μέσω των πτερυγίων. Αντίθετα, ο αέρας μπορεί να κυκλοφορήσει πιο εύκολα όταν η απόσταση μεταξύ των πτερυγίων είναι μεγαλύτερη αλλά τότε μειώνεται η επιφάνεια. ( Anderson William G)

**Πίνακας 4.6: Θερμοκρασία λειτουργίας συναρτήσεως του πάχους των πτερυγίων ( Anderson William G)**

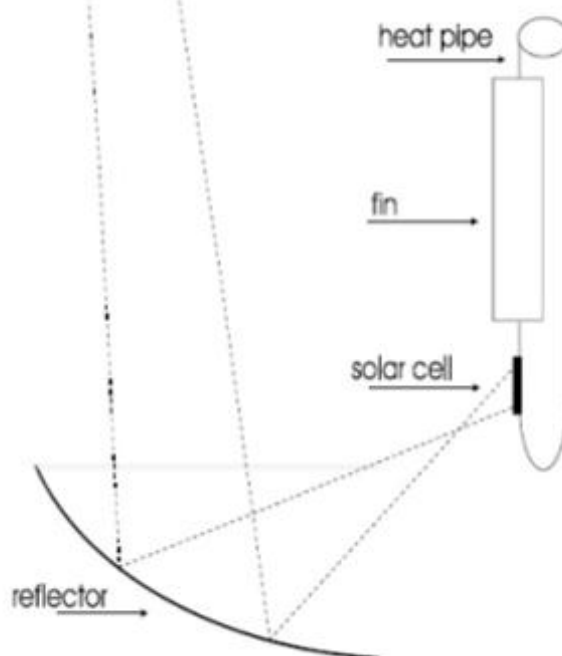
Απόσταση μεταξύ δύο πτερυγίων	Πλήθος πτερυγίων	Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ κυψέλης και περιβάλλοντος	Θερμική αντίσταση
9,53 mm	20	42,4°C	1,12 K/W
7,94 mm	24	42,3°C	1,12 K/W
6,35 mm	18	45,8°C	1,12 K/W

#### 4.7 Άλλες μελέτες ψύξης συγκεντρωτικών ΦΒ με θερμοσωλήνες

Η προσέγγιση του θερμοσωλήνα ερευνήθηκε περαιτέρω από τον Feldman για λόγο συγκέντρωσης περίπου στους 24 ήλιους. Ο ιστός ήταν κατασκευασμένος από αλουμινένια επιφάνεια με ραβδώσεις, και το εξατμιστικό υγρό ήταν η βενζόλη. Αυτό δίνει μια μέγιστη θερμοκρασία της επιφάνειας εξάτμισης περίπου στους 140 °C. Το μοντέλο δείχνει ότι η μεταφορά θερμότητας σε αυτό το σύστημα είναι εξαρτώμενη από την επιφάνεια του συμπυκνωτή. Το πρωτότυπο έχει επιφάνεια εξάτμισης 0,61 m<sup>2</sup> και επιφάνεια συμπυκνωτή 2,14 m<sup>2</sup>. Ο εξωτερικός έλεγχος επίσης δείχνει ότι η θερμοκρασία λειτουργίας είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου και λιγότερο της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας, της κατεύθυνσης του ανέμου και της κλίσης του ιστού. Υπό τις χειρότερες συνθήκες, που είναι για θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C και ακτινοβολία 19,2 kW/m<sup>2</sup>, μια ελάχιστη ταχύτητα ανέμου 1 m/s απαιτείται για να διατηρήσει τη θερμοκρασία του εξατμιστήρα κάτω από τους 140 °C. Το εμβαδόν της επιφάνειας θα πρέπει να αυξηθεί κατά ένα παράγοντα 2,1 για να επιτευχθεί το ίδιο σε συνθήκες άπνοιας. Η θερμική αντίσταση από την βάση στο περιβάλλον είναι 0,114 K m<sup>2</sup>/W για ταχύτητα ανέμου 1 m/s.

Οι Akbarzadeh και Wadowski κάνουν αναφορά για ένα γραμμικό ΦΒ σύστημα αυλακίων που χρησιμοποιεί θερμοσωλήνες για ψύξη. Σε αυτή τη περίπτωση ο ανακλαστήρας δεν είναι παραβολικός, αλλά ένας ιδανικός ανακλαστήρας που λέγεται ότι δίνει μια ομοιόμορφη κατανομή ακτινοβολίας κατά μήκος των κελιών. Κάθε κελί τοποθετείται κατακόρυφα στο τέλος κάθε θερμοσωρευτή, που κατασκευάζεται από ένα επίπεδο χάλκινο σωλήνα με πτερωτή επιφάνεια συμπυκνωτή (Εικόνα 4.12). Το σύστημα σχεδιάστηκε για συγκέντρωση 20 ήλιων, και η θερμοκρασία του κελιού αναφέρεται ότι δεν ξεπερνά τους 46 °C σε μια

ηλιόλουστη ημέρα, σε αντίθεση με τους 84 °C υπό τις ίδιες συνθήκες αλλά χωρίς ψυκτικό ρευστό στο σύστημα ψύξης.



**Εικόνα 4.12: Σύστημα ψύξης με θερμοσωλήνα το οποίο προτάθηκε από τους Akbarzadeh και Wadowski (1996)**

Ο Florschuetz στην έρευνά του χρησιμοποιεί για την λωρίδα κελιών ενεργητική ψύξη τόσο με εξαναγκασμένη ροή αέρα μέσω πολλαπλών περασμάτων όσο και με ροή νερού μέσω ενός περάσματος. Αναφέρει ότι με την εξαναγκασμένη ροή αέρα σημειώνεται μια σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας κατά μήκος των κελιών λόγω της χαμηλής θερμοχωρητικότητας του αέρα. Η απαιτούμενη ισχύς άντλησης είναι επίσης μεγάλη σε σύγκριση με το κέρδος ψύξης. Γι' αυτούς τους λόγους, η εξαναγκασμένη ψύξη δεν φαίνεται να είναι μια εφικτή εναλλακτική λύση. Από την άλλη μεριά, η υδρόψυξη δίνει τη δυνατότητα λειτουργίας σε μεγαλύτερα επίπεδα ψύξης.

Ο Edenburn προτείνει ένα σύστημα ψύξης για το γραμμικό ΦΒ, που αποτελείται από ένα κανάλι τετραγωνικής διατομής, με κλίση 45°, με V σχηματισμό φωτοβολταϊκού αποδέκτη που τοποθετείται σε μια από τις δύο μεριές του καναλιού. Το ενεργό σύστημα ψύξης βρέθηκε να είναι πιο αποδοτικό από μεριά κόστους για γραμμικά σχέδια.

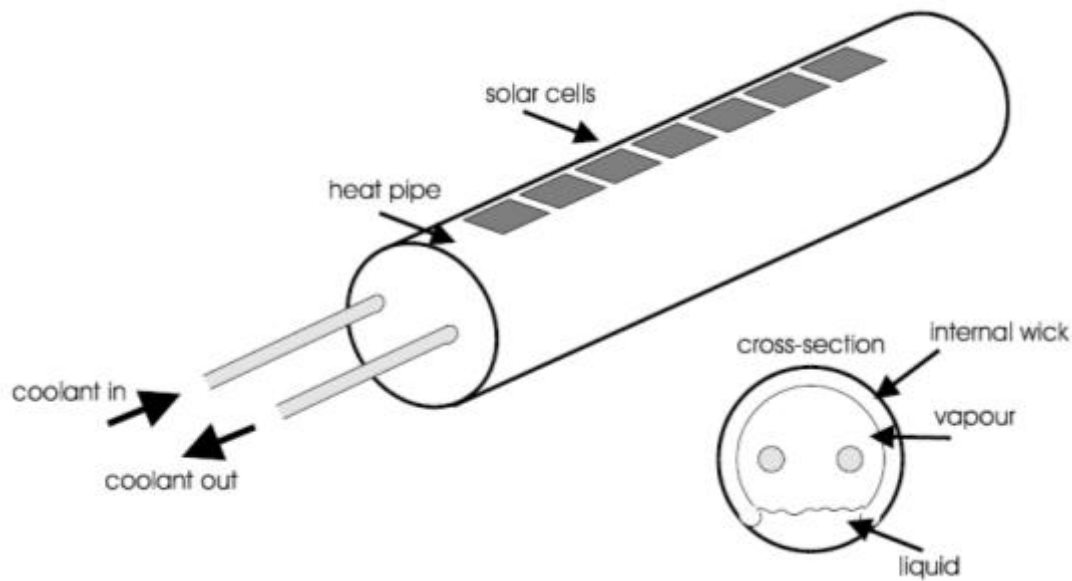
Οι O' Leary και Clements έκαναν μια θεωρητική ανάλυση της θερμικής και της ηλεκτρικής απόδοσης ενός ενεργού συστήματος ψύξης. Οι μέθοδοι που θεωρήθηκαν αποτελούνται από διάφορες γεωμετρικές ροής



ψύξης μέσω καναλιών με σωλήνες, όπου το ψυκτικό υγρό είναι μίγμα νερού, αιθυλενίου και γλυκόλης. Η βέλτιστη γεωμετρία που προτάθηκε βασιζόταν στη μέγιστη καθαρή απόδοση του αποδέκτη σε σχέση με την ροή ψύξης. Η απαιτούμενη αντλούμενη ισχύς αυξάνεται ανάλογα με την αυξανόμενη ψυκτική ροή μάζας, που είναι χαρακτηριστική για στρωτή ροή σε κανάλια. Παρότι θα ήταν ευνοϊκό να λειτουργεί για μέγιστη ροή ώστε να εξασφαλίζεται χαμηλότερη θερμοκρασία κελιού και άρα απόδοση, στην πραγματικότητα βρέθηκε ότι υπάρχει μια βέλτιστη περιοχή λειτουργίας, επειδή ο ρυθμός αύξησης της  $R$  πέφτει όταν η ροή μάζας αυξάνεται.

Ένα σύστημα γραμμικών φακών Fresnel, που ψύχεται με ροή νερού μέσω ενός γαλβανισμένου μεταλλικού σωλήνα, περιγράφηκε από τους Chen και Cid. Το σύστημα έχει ένα επίπεδο συγκέντρωσης περίπου 24 ήλιους. Τα κελιά είναι ελαφρώς κολλημένα σε ένα στρώμα χαλκού, αλουμινίου, χαλκού, που με τη σειρά του είναι κολλημένο με ένα ορθογώνιο σωλήνα. Αυτή η διαμόρφωση δίνει μια αντίσταση από το κελί στον μεταλλικό σωλήνα περίπου  $R = 8 \times 10^5 \text{ K m}^2 / \text{W}$ . Η ελαφριά κόλληση επιτρέπει θερμικές διαστολές. Η αντίσταση λόγω μεταφοράς του σωλήνα ψύξης βρέθηκε να είναι  $R = 8.7 \times 10^{-4} \text{ K m}^2 / \text{W}$  για αριθμούς Reynolds  $Re = 5000$ .

Ο Russelle φηγεί ένα σύστημα ψύξης με θερμοσωλήνα. Το σχέδιο του χρησιμοποιεί γραμμικούς φακούς Fresnel, ο καθένας εστιάζοντας το φως σε μια σειρά από κελιά που τοποθετούνται κατά μήκος του σωλήνα θερμότητας κυκλικής διατομής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.13. Διάφοροι σωλήνες τοποθετούνται ο ένας μετά τον άλλο διαμορφώνοντας ένα πάνελ. Ο θερμοσωλήνας έχει ένα εσωτερικό φυτίλι που τραβά το υγρό μέχρι την θερμαινόμενη επιφάνεια. Η θερμική ενέργεια απάγεται από το θερμοσωλήνα από ένα εσωτερικό κύκλωμα ψύξης, όπου η είσοδος και έξοδος είναι στο τέλος κάθε σωλήνα, διασφαλίζοντας ομοιόμορφη θερμοκρασία κατά μήκος του σωλήνα. Το ψυκτικό νερό παρέχεται και εξάγεται από κοινούς σωλήνες διανομής. Εξετάστηκε και ένα εναλλακτικό σύστημα όπου το ψυκτικό εισάγεται από το ένα άκρο του σωλήνα και εξάγεται από το άλλο, αλλά βρέθηκε λιγότερο επιθυμητό επειδή προκαλούσε μεγάλη βαθμίδα θερμοκρασίας κατά μήκος του σωλήνα. Για το επίπεδο συγκέντρωσης δεν έγινε καμία αναφορά. Θεωρητικά εκτιμάται ότι θα ήταν μικρή εξαιτίας των έμφυτων περιορισμών στους θερμοσωλήνες, που υποφέρουν από ατμοποιήσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.



Εικόνα 4.13: Σύστημα ψύξης με σωλήνα θερμότητας όπως προτάθηκε από τον Russell(1982)

## 4.8 Θερμοσιφωνικό σύστημα

### 4.8.1 Κλειστό θερμοσιφωνικό σύστημα δύο φάσεων

Το κλειστό θερμοσιφωνικό σύστημα δύο φάσεων αποτελείται από δύο θερμοσωλήνες που όμως δεν εμφανίζεται μεταξύ τους η τριχοειδής δύναμη. Το θερμοσιφωνικό σύστημα εκμεταλλεύεται τους νόμους της βαρύτητας: δεν είναι κατάλληλο για ειδικές εφαρμογές ή για εφαρμογές που εξαρτώνται από τον προσανατολισμό της διάταξης. Συνεπώς, δε μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα σε ένα συγκεντρωτικό ηλιακό σύστημα, το οποίο συνήθως απαιτεί σύστημα παρακολούθησης του ήλιου.

Η ιδέα των θερμοσιφωνικών μικροθερμοσωλήνων αναφέρθηκε πρώτη φορά το 1984 από τον Cotter. Ερευνούσε ένα σύστημα ψύξης για εφαρμογές που απαιτούσαν κλειστό έλεγχο θερμοκρασίας, αλλά είχαν μέτριες απαιτήσεις ψύξης. Το 1998, ο Gromoll (1998) ανέφερε ότι το θερμοσιφωνικό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πυκνότητα απώλειας θερμότητας μέχρι  $30 \text{ W/cm}^2$ . Σε υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζεται επιφανειακός βρασμός, μειώνοντας την ψυκτική ικανότητα. Αντιθέτως, το 2007, οι Yeom και Shannon (2007) ανέφεραν μέγιστη παροχή  $200 \text{ W/cm}^2$ .

Οι Pal et al. (2002) δημιούργησαν δύο εργαζόμενα ρευστά θερμοσιφωνικού συστήματος για ψύξη υπολογιστή: απιονισμένο υπερ-

φιλτραρισμένο νερό και ένα διηλεκτρικό υγρό, PF5060. Ανέφεραν ότι το νερό ήταν καλύτερο εργαζόμενο μέσο, διότι είχε καλύτερες θερμικές ιδιότητες σε σύγκριση με το PF5060. Έχουν δημοσιευθεί αρκετές μελέτες σχετικά σε την εκμετάλλευση των νανορευσιών σε κλειστά θερμοσιφωνικά συστήματα δύο φάσεων (LiuZ-H. et al., 2012), αλλά μόνο λίγες επικεντρώνονται σε μικρο-θερμοσιφωνικά συστήματα. Τα νανορευστά είχαν τη δυνατότητα να αυξήσουν τη μεταφορά θερμότητας στην πλειοψηφία των πειραμάτων, αλλά ορισμένες μελέτες ανέφεραν αντίθετα αποτελέσματα. Αυτή η αντίφαση οφείλεται σε διάφορους παράγοντες: το πορώδες ίζημα κατά τη διαδικασία βρασμού, η επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας στη θερμική απόδοση και η προετοιμασία των νανορευσιών.

Η ίδια ερευνητική ομάδα (Liu Z. et al., 2010) διεξήγαγε δύο πειράματα για να μελετήσει την απόδοση ενός ενεργητικού μικρο-θερμοσιφωνικού συστήματος με χρήση νανο-ρευστού νερού-CuO ή νανο-ρευστά με βάση νανοσωλήνες. Πρώτα έδειξαν ότι η απόδοση της μεταφοράς θερμότητας μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τη χρήση νανο-ρευστού νερού-CuO (Liu ZH. et al., 2007). Στη δεύτερη μελέτη (2010), προέκυψε μικρότερη θερμική αντίσταση και πιο ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας με τη χρήση εναιωρήματος νανοσωλήνα παρά με το απιονισμένο νερό. Επιπλέον, έδειξαν ότι η συγκέντρωση μάζας 2.0% αντιστοιχεί στη βέλτιστη ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας.

Οι Ramaswamy et al. (1999) μελέτησαν την επίδραση του πλάτους του καναλιού στην απόδοση των μικρο-θερμοσιφωνικών συστημάτων. Συμπέραναν αύξηση της αποβολής θερμότητας με αύξηση του μεγέθους των πόρων.

#### **4.8.2 Κατασκευή θερμοσιφωνικού συστήματος**

Οι Ramaswamy et al. (1999) μελέτησαν και έλεγξαν αρκετές τεχνικές μικρο - κατασκευής για τη δημιουργία θερμοσιφωνικού συστήματος πυριτίου. Ορισμένες από τις συνηθέστερες τεχνικές είναι ο τεμαχισμός του δίσκου, φρεζάρισμα με λέιζερ και υγρή χάραξη που χρησιμοποιήθηκαν για τη χάραξη των καναλιών του δίσκου πυριτίου. Σύμφωνα με τους ερευνητές, η υγρή χάραξη θεωρήθηκε ως η πιο πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την κατασκευή του θερμοσιφωνικού συστήματος, δημιουργώντας πολύ καθαρά κανάλια. Επιπλέον, δοκιμάστηκαν διάφορες τεχνικές σύνδεσης, όπως άμεση σύνδεση δίσκου, ευτηκτική και εποξική σύνδεση. Οι ερευνητές διαπίστωσαν και

επέτυχαν καλή σύνδεση με ευτηκτικό μίγμα αργιλίου-πυριτίου και εποξική ρητίνη κυανιούχου εστέρα.

## Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των μικρο- και νανο-τεχνολογιών ψύξης συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Επίσης καλύφθηκαν θέματα που αφορούν και την κατασκευή τέτοιων συστημάτων ψύξης αλλ'ακαι σε ό,τι αφορά τα γενικά και ειδικά χαρακτηριστικά της κάθε τεχνολογίας. Μεταξύ των λύσεων που προτάθηκαν και αναφέρθηκαν ήταν οι μικρο-θερμοσωλήνες, οι νανοσωλήνες άνθρακα, τα μικρο-θερμοσιφωνικά συστήματα και τα μικροκανάλια.

Επίσης έγινε παρουσίαση και των κύριων γεωμετριών των συγκεντρωτικών κατόπτρων. Οι γραμμικοί συγκεντρωτές μπορούν να ψυχθούν με παθητικές μεθόδους, οι οποίες όμως είναι αρκετά κοστοβόρες για τιμές συγκέντρωσης έως 20 ήλιους. Έτσι σε αυτές τις περιπτώσεις επιλέγεται η χρήση μικροθερμοσωλήνων για την αύξηση της αποδοτικότητας της ψύξης. Η ενεργητική ψύξη σε αυτές τις γεωμετρίες μπορεί να επιτευχθεί με χρήση νερού ή άλλων ψυκτικών μέσων. Οι μικροθερμοσωλήνες αποδεδειγμένα έχουν τη δυνατότητα να απάγουν αποτελεσματικά τη θερμότητα υψηλής ροής του κελιού CPV, να την απορρίπτουν από τα πτερύγιά τους μέσω φυσική συναγωγής, με αρκετά μικρότερη ροή θερμότητας.

Από την άλλη για κελιά υψηλής πυκνότητας, η ενεργητική ψύξη είναι η μόνη λύση. Σε υψηλές συγκεντρώσεις ήλιου, η μεγάλη ροή θερμότητας δημιουργεί μικρής επαφής αντίσταση μεταξύ του κελιού και του ψυκτικού συστήματος. Σε αυτές τις γεωμετρίες δοκιμάστηκαν τα μικροκανάλια, τα οποία αποτελούν σημαντική λύση. Η έρευνα σχετικά με τα μικροκανάλια έδειξε ότι μπορούν να επιτύχουν ικανοποιητική ψύξη του κελιού, ενώ η πτώση πίεσης ήταν μικρή ειδικά για ροή σε ευθύγραμμα κανάλια. Έτσι από τις μελέτες αρκετών επιστημονικών ομάδων διαπιστώθηκε ότι τα μικροκανάλια με μεγαλύτερες αναλογίες, μικρότερο πλάτος και υψηλότερους αριθμούς  $Re$ , οδηγούν σε μικρή ανύψωση της θερμοκρασίας και σε υψηλό δείκτη ομοιομορφίας.

Τέλος, τα τελευταία 20 χρόνια αρκετές μελέτες έχουν διεξαχθεί στην εφαρμογή και βελτιστοποίηση των νανοσωλήνων άνθρακα, ειδικά λόγω των εξαιρετικών θερμικών και μηχανικών τους ιδιοτήτων. Εξάλλου σε αρκετές έρευνες έχει διαπιστωθεί και επιβεβαιωθεί η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας και της αποδοτικότητας με χρήση νανορευστών. Από την άλλη και οι μέθοδοι παραγωγής νανορευστών είναι ώριμες και δοκιμασμένες τεχνολογίες, με πολυάριθμες διαδικασίες να έχουν

δοκιμαστεί και παρουσιαστεί τα τελευταία χρόνια. Έτσι έφτασαν στο σημείο να επιτυγχάνουν την παραγωγή ρευστών νανοσλήνων άνθρακα υψηλής καθαρότητας χωρίς να απαιτείται επιπλέον διαδικασία καθαρισμού τους.

## **Μελλοντικές προοπτικές**

Παρόλα τα ενθαρρυντικά στοιχεία σχετικά με τις τεχνολογίες ψύξης που παρουσιάστηκαν, απαιτείται περαιτέρω έρευνα και βελτιστοποίηση των επιμέρους τμημάτων, ώστε να μειωθεί το κόστος τους και να αποτελούν μια ελκυστική εμπορική λύση.

Εξάλλου, οι εφαρμογές των μικρο- και νανο-τεχνολογιών που έχουν χρησιμοποιηθεί για ψύξη συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι λίγες σε αριθμό. Σε αυτή την κατεύθυνση απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός πειραματικών ερευνών για την διερεύνηση της ευκολίας εφαρμογής τους και της αύξησης της αποδοτικότητάς τους. Επίσης, επιπρόσθετες έρευνες απαιτούνται στον τομέα των νανορευστών σχετικά με την κατανόηση της φυσικής συναγωγής και των πραγματικών δυνατοτήτων αυτής της λύσης.

Επιπλέον, μια πολλά υποσχόμενη και απλή τεχνολογία ψύξης των συγκεντρωτικών ΦΒ είναι οι επικαλύψεις υψηλής αγωγιμότητας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το στρώμα διαμαντιού το οποίο κατασκευάζεται με τη διαδικασία της χημικής εναπόθεσης ατμών. Παρόλα αυτά και για αυτή την λύση το κόστος αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα, διατηρώντας παράλληλα υψηλή απόδοση, θα μπορούσε η έρευνα να στραφεί στην εύρεση νέων σύνθετων υλικών.

## Βιβλιογραφία

- AbyzovAM, KidalovSV, ShakhovFM. Applied Thermal Engineering 2012; 48:72–80.
- Akbarzadeh, A. and Wadowski, T. (1996) Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation. Applied Thermal Engineering 16 (1), 81-87.
- Amrollahi a, Hamidi AA, Rashidi AM. Nanotechnology 2008;19:315701.
- Anderson William G., Sanjida Tamanna, David B. Sarraf, and Peter M. Dussinger, Heat Pipe Cooling of Concentrating Photovoltaic (CPV) Systems, Advanced Cooling Technologies, Inc., Lancaster, Appl Therm Eng 2008;28:1834–43.
- Aqel A, El-Nour KMMA, Ammar RAA, Al-Warthan A. Arabian Journal of Chemistry 2010;5:1–23.
- Araki, K., Uozumi, H. and Yamaguchi, M. (2002) A simple passive cooling structure and its heat analysis for 500 x concentrator PV module. 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, pp. 1568-1571.
- Bar-cohen A, Wang P. Nano-bio-electronic, photonic and MEMS packaging. In: Wong CP, Moon K-S, (Grace) Li Y, editors. US, Boston ,MA: Springer; 2010 p.349–429.
- Berber S, Kwon Y, Tomanek D.Physical Review Letters 2000; 84: 4613–6.
- Berre ML, Launay S, Sartre V, Lallemand M, Micromech J. Microengineering 2003;13:436–41.
- Bhushan B. Seminars in Cell Developmental Biology 2010; 714: 1–6.
- Bi S, Shi L, Zhang L. Application of nanoparticles in domestic refrigerators.
- Buonomo B, Manca O. International Journal of Thermal Sciences 2010;49: 1333–44.
- Buonomo B,Manca O. International Journal of Thermal Sciences 2012: 1–13.
- Cahill DG, Ford WK, Goodson KE, Mahan GD, Majumdar A, Maris HJ, et al. Journal of Applied Physics 2003; 93:793–818.

- Chein R, Chuang J. *International Journal of Thermal Sciences* 2007; 46: 57–66.
- Chen C-K, Weng HC. *Journal of Heat Transfer* 2005; 127: 1053.
- Chenlo, F. and Cid, M. (1987) A linear concentrator photovoltaic module: Analysis of non-uniform illumination and temperature effects on efficiency. *Solar Cells* 20, 27-39.
- Chien H, Tsai C, Chen P, Chen P. *Micro* 2003:389–91.
- Choi S. Nanofluids for improved efficiency in cooling systems. In: *Heavy vehicle systems review*. Argonne National Laboratory; April 18–20, 2006.
- Choi SUS, Zhang ZG, Yu W, Lockwood FE, Grulke EA. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. *Appl Phys Lett* 2001;79(14):2252–4.
- Cotter T. *Principles and prospects for micro-heat pipes*; 1984.
- Do KH, Jang SP. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2010;53: 2183–92.
- Eastman JA, Choi US, Thompson LJ, Lee S. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. *Mater Res Soc Symp Proc* 1996;457:3–11.
- Edenburn, M.W. (1980) Active and passive cooling for concentrating photovoltaic arrays. 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, pp. 776-776.
- Endo M, Strano MS, Ajayan PM. *Carbon Nanotubes* 2008; 62:13–62.
- Faghri Amir, *Heat Pipes: Review, Opportunities And Challenges*, *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*, 5, 1 (2014).
- Feldman, K.T., Kenney, D.D. and Edenburn, M.W. (1981) A passive heat pipe cooled photovoltaic receiver. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Orlando, pp. 165-172.
- Florschuetz, L.W. (1975) On heat rejection from terrestrial solar cell arrays with sunlight concentration. 11th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New York, pp. 318-326.
- Friedman DJ. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 2010;14:131–8.
- Gates BD, Xu Q, Love JC, Wolfe DB, Whitesides GM. *Annual Review of Materials Research* 2004; 34: 339–72.



Godson L, Raja, Mohan Lal D, Wongwises S. Enhancement of heat transfer using nanofluids—an overview. *Renew Sust Energy Rev* 2009, doi:10.1016/j.rser.2009.10.004.

Goetzberger A., Hoffmann V., “Photovoltaic Solar Energy Generation” Springer Berlin Heidelberg New York, 2005.

Gombert A.S.S.Gmbh, B.Street; 2011.p.1651–56.

Graven, R.M., Gorski, A.J., Schertz, W.W. and Graae, J.E.A. (1978) Modular assembly of a photovoltaic solar energy receiver. Patent no. US4118249.

Gray KJ. *Diamond and Related Materials* 2000; 9:201–4.

Green MA, Emery K ,Hishikawa Y, Warta W, Dunlop ED.;2012. p.12–20.

Gromoll B. *Revue Générale De Thermique* 1998; 37:781–7.

Guo Z-Y, Li Z-X. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2003; 24: 284–98.

Gururatana S. *American Journal of Applied Sciences* 2012; 9:436–9.

Han X, Everett V, Wang Y, Zhu L. *Japanese Journal of Applied Physics* 2009:2009.

Horne, W.E. (1993) Solar energy system. *Patent no. US5269851*.

Hung YM, Seng Q. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2011;54: 1198–209.

Hwang Yujin, Jae-Keun Lee ,Jong-Ku Lee ,Young-Man Jeong, Young-Chull Ahn , Soo H. Kim , Seong-ir Cheong, ‘Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids’, *Powder Technology* 186 (2008) 145–153.

Ivanova M, Lai A, Gillot C, Sillon N, Schaeffer C, Lefèvre F, et al. The Tenth intersociety conference on thermal and thermomechanical phenomena in electronics systems ITherm’06;2006. p.545–51.

Jagannadham K, Watkins T, Dinwiddie R. *Journal of Materials Science* 2002;37:1363–76.

Jet Propulsion Laboratory. *NASA Tech Briefs*; 2007. p. 42–3.

Jiang W, Ding G, Peng H. Measurement and model on thermal conductivities of carbon nanotube nanorefrigerants. *Int J Therm Sci* 2009;48:1108–15.

Kang S, Huang D. *Sensors* 2002; 525 (Peterborough, NH).

- Kang S-W, Wei W-C, Tsai S-H, Yang S-Y. *Applied Thermal Engineering* 2006;26:2377–82.
- Keidar M. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2007;40: 2388–93.
- Kim P, Shi L, Majumdar A, McEuen P. *Physical Review Letters* 2001; 87: 19–22.
- Kinsey GS, Edmondson KM. *Solar Cells* 2009:279–88.
- Koehler, H.C. (2000) Cooling photovoltaic (PV) cells during concentrated solar radiation in specified arrangement in coolant with as low electric conductivity as possible. Patent no. DE19904717.
- Kordas K, Moilanen P, Kumpumäki M, Vähäkangas J, Uusimäki a, et al. *Applied Physics Letters* 2007; 90:123105.
- Kurtz S. Opportunities and challenges for development of a mature concentrating photovoltaic power industry; 2009.
- Lasich, J.B. (2002) Cooling circuit for receiver of solar radiation. Patent no. WO02080286.
- Leonardo Micheli, Nabin Sarmah, Xichun Luo, K.S. Reddy, Tapas K. Mallick, Opportunities and challenges in micro-and nano-technologies for concentrating photovoltaic cooling: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20, 2013, 595-610.
- Li J, Yu H, Wong SM, Li X, Zhang G, Lo PG-Q, et al. *Applied Physics Letters* 2009;95: 243113.
- Li P, Wu XM, Li H. Pool boiling heat transfer experiments of refrigerants with nanoparticle TiO<sub>2</sub>. In: *Proceedings of the 12th symposium on engineering thermophysics*. China: Chinese Institute of Engineering Thermophysics; 2006. p. 325–8.
- Liu L, Zhu L, Wang Y, Huang Q, Sun Y, Yin Z. *Solar Energy* 2011; 85:922–30.
- Liu W, Kang J, Fu X, Stefanini C, Dario P. *Microelectronic Engineering* 2011;88:2255–8.
- Liu Z, Yang X, Wang G, Guo G. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2010;53:1914–20.
- Liu Z-H, Li Y-Y, Bao R. *International Journal of Thermal Sciences* 2010;49:1680–7.
- Liu Z-H, Li Y-Y. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2012;55: 6786–97.

- Liu ZH, Yang XF, Guo GL. *Journal of Applied Physics* 2007;102: 013526.
- Luque A., Hegedus S., “Handbook of Photovoltaic Science and Engineering” John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- Luque, A., Sala, G., Arboiro, J.C., Bruton, T., Cunningham, D. and Mason, N. (1997) Some results of the EUCLIDES photovoltaic concentrator prototype. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 5 (3), 195-212.
- Martinelli G, Stefancich M. *Concentrator photovoltaics*. Springer; 2007 p. 133–49.
- Maser WK, Benito AM, Martinez MT. *Source* 2002;40: 1685–95.
- Masuda H, Ebata A, Teramae K, Hishinuma N. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles), vol. 4. *Netsu Bussei*; 1993. p. 227–233.
- Miñano, J.C., González, J.C. and Zanesco, I. (1994) Flat high concentration devices. 24th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Hawaii, pp. 1123-1126.
- Mokri A, Emziane M. In: Moshfegh B (editor). *World Renewable Energy Congress—Sweden*. Linköping, Sweden, 8–13 May, 2011.p.2738–42.
- Moon SH, Hwang G, Ko SC, Kim YT. Experimental study on the thermal performance of micro-heat pipe with cross-section of polygon. *Microelectronics Reliability* 2004;44:315–21.
- Müller M, Escher W ,Ghannam R, Goicochea J, Michel B , Ong CL, et al. *AIP Conference Proceedings* 2011:231–4.
- Murshed SMS, Leong KC, Yang C. A combined model for the effective thermal conductivity of nanofluids. *Appl Therm Eng* 2009;29(11–12):2477–83.
- Naphon P, Thongkum D, Assadamongkol P. Heat pipe efficiency enhancement with refrigerant–nanoparticles mixtures. *Energy Convers Manage* 2009;50:772–6.
- Nishiyabu K, Kanoko Y, Tanabe D, Tanaka S. *Metal Powder Report* 2011; 66: 27–32.
- O’Leary, M.J. and Clements, L.D. (1980) Thermal-electric performance analysis for actively cooled, concentrating photovoltaic systems. *Solar Energy* 25, 401-406.

Pal A, Joshi YK, Beitelmal MH, Patel CD, Wenger TM. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 2002;25: 601–7.

Park K, Jung D. Boiling heat transfer enhancement with carbon nanotubes for refrigerants used in building air-conditioning. Energy Build 2007;39(9):1061–4.

Peng H, Ding G, Jiang W, Hu H, Gao Y. Heat transfer characteristics of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube. Int J Refrig 2009;32:1259–70.

Peter Wurfel, “Physics of Solar Cells” John Wiley & Sons Ltd, 2005.

Peterson GF, Duncan AB, Weichold MH. Journal of Heat Transfer 1993;115:751–6.

Ramaswamy C, Joshi Y, Nakayama W, Johnson W. Microscale Thermophysical Engineering 1999;3: 273–82.

Reilly RM. Journal of Nuclear Medicine: Official Publication, Society of Nuclear Medicine 2007;48: 1039–42.

Renewable Energy World: [www.renewableenergyworld.com](http://www.renewableenergyworld.com)

Royne A., Christopher J.D., Mills R. ‘Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review’ Solar Energy Materials & Solar Cells 86 (2005)451-483.

Russell, R.F. (1982) Uniform temperature heat pipe and method of using the same. Patent no. US4320246.

Saidur R., K.Y. Leong, H.A. Mohammad, A review on applications and challenges of nanofluids, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 1646–1668.

See CH, Harris AT. Industrial and Engineering Chemistry Research 2007;46: 997–1012.

Serrano E, Rus G, Martínez JG. Nanotechnology for sustainable energy. Renew Sust Energy Rev 2009;13(December (9)):2373–84.

Shafahi M, Bianco V, Vafai K, Manca O. International Journal of Heat and Mass Transfer 2010;53:376–83.

Shakouri B A. Nanotechnology 2006; 94:1613–38.

Shen B. Minimum quantity lubrication grinding using nanofluids. PhD thesis. USA: University of Michigan; 2006.

Sobhan CB, Rag RL, Peterson GP. International Journal of Energy Research 2007:664–88.

Suman B, Kumar P. International Journal of Heat and Mass Transfer 2005;48: 4498–509.

Tilford, C.L., Sinton, R.A., Swanson, R.M., Crane, R.A. and Verlinden, P. (1993) Development of a 10 kW reflective dish PV system. 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Louisville, pp. 1222-1227.

Tjerkstra RW, De Boer M, Berenschot E, Gardeniers JGE, van den Berg A, Elwenspoek MT. An investigation of micro-structures, sensors, actuators, machines and robots. In: Proceedings of the IEEE tenth annual international workshop on micro-electromechanical systems; 1997.p.147–52.

Tong T, Zhao Y, Delzeit L, Kashani A, Meyyappan M, Majumdar A. Packaging 2007;30:92–100 (Boston,Mass)

Tripanagnostopoulos Y. “Linear fresnel lenses with photovoltaics for cost effective electricity generation and solar control of buildings” Proc. Int. Conference ICSC-4, El Escorial, Spain, 12-14 March (2007).

Tripanagnostopoulos Y. and Iliopoulou A. “Improved designs for low concentration photovoltaics” Int Conf. 22nd PVSEC, Milan, Italy, 3-7 Sep (2007).

Tripanagnostopoulos Y., Georgostathis P., Iliopoulou A. “Optical study of new designs for CPVT systems” 2nd International Workshop on Concentrating Photovoltaic Optics and Power, Darmstadt, Germany 9-10 March 2009

Twitchen DJ, Pickles CSJ, Coe SE, Sussmann RS, Hall CE. Diamond and Related Materials 2001; 10: 731–5.

Verlinden, P., Sinton, R.A., Swanson, R.M. and Crane, R.A. (1991) Single-wafer integrated 140 W silicon concentrator module. 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, pp. 739-743.

Verlinden, P.J., Terao, A., Smith, D.D., McIntosh, K., Swanson, R.M., Ganakas, G. and Lasich, J.B. (2001) Will We Have a 20%-Efficient (PTC) Photovoltaic System? 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich.

Vincenzi, D., Bizzi, F., Stefancich, M., Malagu, C., Morini, G.L., Antonini, A. and Martinelli, G. (2002) Micromachined silicon heat exchanger for water cooling of concentrator solar cells. PV in Europe Conference and Exhibition - From PV technology to Energy Solutions, Rome

Volz SG, Chen G. Applied Physics Letters 1999;75: 2056.

- Wang KJ, Ding GL, Jiang WT. Nano-scale thermal transporting and its use in engineering. In: Proceedings of the 4th symposium on refrigeration and air condition. Nanjing, China: Southeast University Press; 2006. p. 66–75.
- Wang RX, Xie HB. A refrigerating system using HFC134a and mineral lubricant appended with n-TiO<sub>2</sub>(R) as working fluids. In: Proceedings of the 4<sup>th</sup> international symposium on HAVC. Beijing, China: Tsinghua University Press; 2003. p. 888–92.
- Wang YX, Peterson GP. Journal of Thermophysics and Heat Transfer 2002;16: 346–55.
- Wen D, Lin G, Vafaei S, Zhang K. Review of nanofluids for heat transfer applications. Particuology 2009;7:141–50.
- Xu JF, Zhang JR, Du YW. Ultrasonic velocity and attenuation in nanostructured Zn materials. Mater Lett 1996;29(November (1–3)):131–4.
- Yang XF, Liu Z-H, Zhao J. Journal of Micromechanics and Microengineering 2008;18: 035038.
- Yeom J, Shannon MA. Comprehensive microsystems. New York: Elsevier; 2007 p.499–550.
- Ying LS, bin Mohd Salleh MA, Mohamed Yusoff HB, Abdul Rashid SB, Abd. Razak JB. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 2011;17:367–76.
- Zhang G. Nanowires—fundamental research. In: Hashim A, editor. In Tech; 2008.
- Zhang Z, Schneider H, Tounsi P. Materials Science and Engineering: B 2012; 177:1358–61.
- Zhangbo Y, Qifen L, Qunzhi Z, Weiguo P. IEEE 6<sup>th</sup> international power electronics and motion control conference, vol.3; 2009.p.2193–7.
- Zhu L, Boehm RF, Wang Y, Halford C, Sun Y. Solar Energy Materials and Solar Cells 2011; 95:538–45.