

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ



## “Ανάπτυξη Βιομηχανικής Γραμμής Παραγωγής Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών Πινάκων Κρυσταλλικού Πυριτίου”

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για  
την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Υπό τον

Μελέτιο Γ. Ρεντούμη

Χανιά, Σεπτέμβριος 2015



© Copyright 2015: υπό Μελέτιο Γ. Ρεντούμη

*Απαγορεύεται η αναδημοσίευση, η αποθήκευση και γενικά η αναπαραγωγή και μεταβίβαση τμήματος ή ολόκληρου του παρόντος έργου με οποιονδήποτε ηλεκτρονικό, μηχανικό ή φωτοαντιγραφικό σύστημα χωρίς την προηγούμενη άδεια του συγγραφέα.*



Η διατριβή του Μελετίου Γ. Ρεντούμη (2013019056) με τίτλο: “*Ανάπτυξη Βιομηχανικής Γραμμής Παραγωγής Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών Πινάκων Κρυσταλλικού Πυριτίου*” εγκρίνεται

Μπιλάλης Νικόλαος, Καθηγητής, Επιβλέπων

Αντωνιάδης Αριστομένης, Καθηγητής

Σταυρουλάκης Γεώργιος, Καθηγητής

**Δημοσιεύσεις σε συνέδρια και περιοδικά που αποτέλεσαν άμεσα ή έμμεσα προϊόντα της παρούσης εργασίας:**

Katsigiannis Y., Rentoumis M., Katsamaki A., Chatzikokolaki A., Bilalis N. Estimation of Quantities of Waste Materials for Photovoltaic Installations in Crete Island, Int. Conf. on Advances in Mechanical and Automation Engineering - MAE, Rome, Italy, June 2014.

Katsigiannis Y., Rentoumis M., Katsamaki A., Chatzikokolaki A., Bilalis N. Estimation of Quantities of Waste Materials for Photovoltaic Installations in Crete Island, Int. Journal of Manufacturing and Industrial Engineering - IJMIE, Volume 1: Issue 3, September 2014.

Meletios Rentoumis, Ilias Athanailidis, Pavlos Koulouridakis, Yiannis Katsigiannis, Nikolaos Bilalis, Development of a Three Dimensional Industrial Production Line Simulation for Crystalline Silicon Photovoltaic Panel Recycling, 4th International Symposium and 26th National Conference on Operational Research, Chania, Greece, June 4-6 2015.

1<sup>st</sup> Place at Project of the Year 2015, Dassault Systèmes Academy, "Development of a 3D Industrial Production Line Simulation for Crystalline Silicon Photovoltaic Panel Recycling"

**Acknowledgment**

*This research has been co-financed by the European Union (European Regional Development Fund – ERDF) and Greek national funds through the Operational Program “Competitiveness and Entrepreneurship” of the National Strategic Reference Framework (NSRF) – Research Funding Program: “COOPERATION 2011 – Redesign and Recycling of Photovoltaic Panels”.*







## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου διατριβής, Καθηγητή κ. Μπιλάλη Νικόλαο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου όπως και για την πρωτότυπη φύση του θέματος που μου πρότεινε. Ευχαριστώ τον Δρ. Κατσίγιαννη Ιωάννη για την εκπληκτική συνεργασία και τις πολύτιμες συμβουλές και διορθώσεις του.

Ευχαριστώ το φίλο και συνάδελφο Αθαναηλίδη Ηλία για την πολύτιμη συνεργασία μας στη διεκπεραίωση του 3<sup>ου</sup>, 4<sup>ου</sup> & 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου. Χωρίς εσένα, το αποτέλεσμα δεν θα ήταν το ίδιο. Ο χρόνος ήταν περιορισμένος και η αφοσίωση υπέρμετρη. Συγγνώμη για τα ξενύχτια και τα πρωινά ξυπνήματα.

Γιάννα σε ευχαριστώ για την αγάπη, την υπομονή και την κατανόηση που μου έδειξες και συνεχίζεις να μου δείχνεις με κάθε ευκαιρία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω του φίλους μου Ελίνα, Παναγιώτη, Μιχαήλ για τη στήριξή τους όλο αυτό το διάστημα και την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση που μου παρείχαν σε κάθε βήμα.

με|έ|ς|η|ς

## Περίληψη

Η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκές (φ/β) κυψελίδες είναι μια καθιερωμένη και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που εκμεταλλεύεται στο έπακρο την ηλιακή ενέργεια, η οποία είναι ανανεώσιμη. Παρόλο που έχουν παρουσιαστεί πολυάριθμες μέθοδοι ανά την υφήλιο σχετικά με την ανακύκλωση φ/β πινάκων, η Ελλάδα δεν έχει λάβει κάποια αξιόλογη δράση έως σήμερα. Σε παγκόσμια κλίμακα, το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς ( $\approx 90\%$ ) βασίζεται στη χρήση κρυσταλλικού πυριτίου ως ημιαγωγό για τις φ/β κυψελίδες. Επιπλέον, σύμφωνα με εκτιμήσεις αναμένεται πως η συνολική ποσότητα φ/β αποβλήτων στην Ευρώπη θα αγγίζει τους 3.500.000 τόνους μέχρι το 2040, ενώ στην Ελλάδα αναμένονται 264.000 τόνοι μέχρι το 2038. Σαν αποτέλεσμα, κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση μίας ενοποιημένης μεθόδου διαχείρισης φ/β πινάκων όταν εκείνοι φτάνουν το τέλος της χρήσιμης ζωής τους με στόχο την επιτυχή ανάκτηση υλικών όπως: πυρίτιο, αλουμίνιο, άργυρο και γυαλί. Ο στόχος της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής είναι η προσομοίωση μιας μεθόδου ανακύκλωσης φ/β πινάκων κρυσταλλικού πυριτίου, εφαρμόσιμη σε βιομηχανικό επίπεδο, με χρήση της πλατφόρμας σχεδίασης CATIA. Ο σχεδιασμός της διαδικασίας ανακύκλωσης πραγματοποιήθηκε παραμετρικά, με στόχο τη δυνατότητα εύκολης προσαρμογής της χωροθέτησης και διαστασιολόγησης κάθε μηχανήματος και κατ' επέκταση του πεδίου ανακύκλωσης στο σύνολό του.



## Abstract

Power generation from photovoltaic (PV) cells is a well-established and promising technology that takes full advantage of solar energy, which is a renewable energy source. Although numerous methods of PV recycling have been proposed worldwide, Greece has not taken any serious corresponding action until now. In global scale, the largest market share ( $\approx 90\%$ ) is based on c-Si as a semiconductor for the PV cells. Moreover, estimations expect that the overall quantity of PV waste in Europe will reach 3.500.000 tones until 2040 while in Greece, until 2038 the amount will be in the range of 264.000 tones. As a result, it is essential to propose a unified management of PV end-of-life (EOL) process, in order to achieve a successful recovery of materials such as silicon, aluminum, silver and glass. The scope of this dissertation is the simulation of an integrated c-Si PV recycling process, applicable to the industrial level, with the use of CATIA software. The design of this recycling process is parametric, in order to allow the location and sizing configuration of each machine and installation type that can be used.

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Abstract .....	6
<b>1. Υλικά φ/β κελιών.....</b>	<b>10</b>
Εισαγωγή.....	10
1.1 Φ/β κελιά πυριτίου .....	11
1.1.1 Μονοκρυσταλλικά κελιά.....	12
1.1.2 Πολυκρυσταλλικά κελιά.....	16
1.1.3 Κελιά άμορφου πυριτίου.....	18
1.1.4 Μικρο-κρυσταλλικού πυριτίου.....	20
1.2 Φ/β κελιά βασισμένα σε αρσενιούχο γάλλιο (GaAs), φωσφορούχο ίνδιο (InP) και αντιμονιούχο γάλλιο (GaSb) .....	21
1.2.1 Συσκευές μονής ένωσης (single-junction devices).....	21
1.2.2 Συσκευές πολλαπλών συνενώσεων (multi-junction devices).....	22
1.3 Τεχνολογίες λεπτού υμενίου-μεμβράνης.....	27
1.3.1 Τελουριούχου κάδμιου CdTe) και Θειούχου κάδμιου (CdS).....	27
1.3.2 Δισεληνοϊνδιούχου γαλλίου χαλκού, (CuGa <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> Se <sub>2</sub> )/ Δισεληνοϊνδιούχου χαλκού (CuInSe <sub>2</sub> )/ Διθειούχου ινδιούχου χαλκού (CuInS <sub>2</sub> ).....	28
1.3.3 Ετερο-επαφή (Heterojunction-HJ) και Ετερο-επαφή με εσωτερικό λεπτό στρώμα (Heterojunction with intrinsic layer-HIT) .....	29
1.4 Dye-sensitized φ/β κελιά .....	30
1.5 Οργανικά φ/β κελιά .....	32
1.6 Η νανοτεχνολογία στην παραγωγή φ/β κελιών .....	37
1.6.1 Νανοσωλήνες άνθρακα (CNT).....	37
1.6.2 Κβαντικές κηλίδες (Quantum Dots -QDs) .....	38
1.6.3 Φ/β κελιά Θερμού Φορέα (Hot carrier-HC).....	39
1.7 Φ/β κελιά βασισμένα σε περβοσκίτες .....	40
1.8 Φ/β κελιά οπίσθιας επαφής.....	42
1.9 Συγκεντρωτικά φ/β συστήματα .....	45
1.10 Θερμο-φωτοβολταϊκή τεχνολογία (TPV).....	48
<b>2. Ανακύκλωση φ/β πινάκων .....</b>	<b>50</b>
2.1 Η δομή των φ/β πινάκων .....	51
2.1.1 Πίνακες κρυσταλλικού πυριτίου .....	51
2.1.2 Πίνακες χαλκογενιδίων .....	54
2.2 Μεθοδολογίες ανακύκλωσης φ/β πινάκων.....	56
2.2.1 Μεθοδολογίες για ανακύκλωση φ/β πινάκων κρυσταλλικού πυριτίου (x-Si).....	61
2.2.2 Μεθοδολογίες για ανακύκλωση φ/β πινάκων χαλκογενιδίων .....	65
2.3 Υπάρχουσες επώνυμες μεθοδολογίες ανακύκλωσης φ/β πινάκων.....	75
2.3.1 Επιλεγμένες επώνυμες μεθοδολογίες ανακύκλωσης για φ/β πίνακες κρυσταλλικού πυριτίου .....	75
2.3.1.1 Η μέθοδος της Deutsche Solar .....	75

2.3.1.2 Η μέθοδος της Loser Chemie GmbH .....	77
2.3.1.3 Η μέθοδος της SolarWorld .....	77
2.3.1.4 Η μέθοδοι της Solar Cells Inc. (SSI), Pilkington Solar International (PSI) ....	78
2.3.2 Επιλεγμένες επώνυμες μεθοδολογίες ανακύκλωσης για φ/β πίνακες χαλκογενιδίων .....	79
2.3.2.1 Η μέθοδος της First Solar .....	79
2.3.2.2 Η μέθοδος της 5N PLUS .....	82
2.3.2.3 Η μέθοδος της ANTEC Solar .....	85
2.3.2.4 Η μέθοδος της PrimeStar Solar .....	86
2.3.2.5 Η μέθοδος της Loser-Chemie GmbH .....	91
<b>3. Μέθοδος - Πρόταση ανακύκλωσης φ/β πινάκων κρυσταλλικού πυριτίου .....</b>	<b>93</b>
3.1 Ευρωπαϊκοί Οργανισμοί – Πρωτοβουλίες .....	93
3.2 Η ανακύκλωση φ/β πινάκων στην Ελλάδα .....	95
3.3 Η πρόταση .....	96
3.3.1 Ο στόχος .....	96
3.3.2 Η προτεινόμενη μεθοδολογία .....	96
3.3.3 Η προτεινόμενη γραμμή παραγωγής για ανακύκλωση φ/β πινάκων κρυσταλλικού πυριτίου .....	98
3.3.3.1 Τμήμα φυσικής αποσυναρμολόγησης .....	98
3.3.3.2 Θερμική επεξεργασία .....	100
3.3.3.3 Θρυμματισμός .....	111
3.3.3.3.1 Θρυμματιστής διπλού άξονα - Twin Shaft Shredder.....	112
3.3.3.3.2 Κοκκοποιητής - Impact Crusher.....	115
3.3.3.4 Μηχανικός διαχωρισμός.....	117
3.3.3.5 Χημική επεξεργασία.....	121
3.3.3.6 Φούρνος επανάτηξης ανακτώμενου πυριτίου.....	122
3.3.3.7 Μηχανισμοί μεταφοράς εντός της γραμμής ανακύκλωσης.....	124
3.3.3.7.1 Ραουλόδρομος .....	125
3.3.3.7.2 Ταινιόδρομος .....	125
3.3.4 Ενδεικτικές παραμετροποιήσεις.....	127
3.3.5 Η γραμμή ανακύκλωσης.....	139
<b>4. Συμπεράσματα - Προοπτικές.....</b>	<b>143</b>
<b>Βιβλιογραφία – References.....</b>	<b>145</b>
<b>5. Παράρτημα.....</b>	<b>152</b>
5.1 Bill of materials .....	152
5.2 Η Jeanne .....	206
5.3 Μηχανολογικά Σχέδια .....	207



## 1. Υλικά φ/β κελιών

### Εισαγωγή

Το πυρίτιο έχει καθιερωθεί στο χώρο της παραγωγής φ/β κελιών λόγω της μεγάλης απόδοσης που παρέχει. Ωστόσο, εξαιτίας του υψηλού κόστους του οι ερευνητές αναζητούν νέες κατασκευαστικές λύσεις. Έως τώρα, ο μόνος ικανός αντικαταστάτης καθίσταται η τεχνολογία φ/β κελιών λεπτού υμενίου (thin film technology). Ο λόγος για τον οποίο η τεχνολογία αυτή εξασφαλίζει μικρότερο κόστος είναι διότι απαιτεί περιορισμένες ποσότητες υλικών για την κατασκευή της και αποτελείται από λιγότερα στρώματα σε σύγκριση με τη μονοκρυσταλλική και πολυκρυσταλλική τεχνολογία, μειώνοντας κατά συνέπεια το κατασκευαστικό κόστος. Παρόλα αυτά, η απόδοση της παραμένει ακόμα χαμηλή και αποτελεί ικανή λύση για περισσότερο εξειδικευμένες εφαρμογές.<sup>[6]</sup>

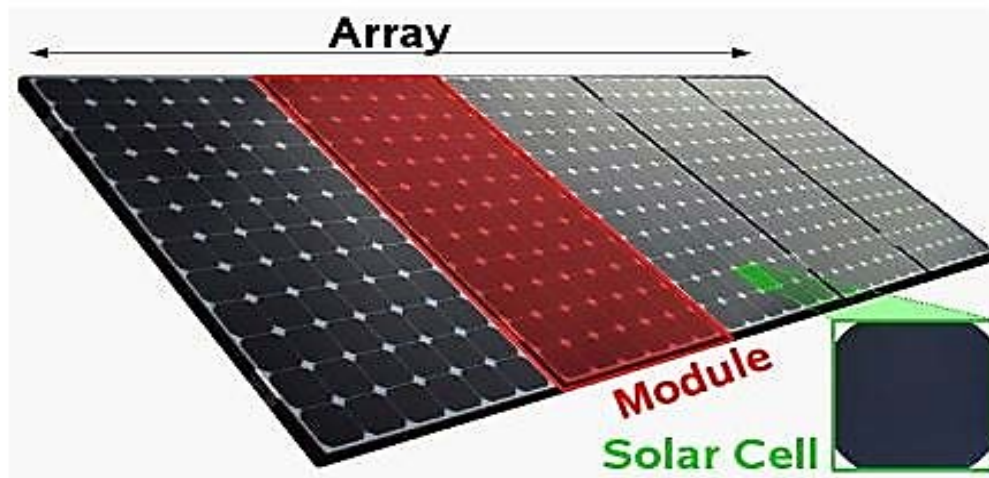
Όσον αφορά στην εν λόγω τεχνολογία, τρία (3) υλικά συναντώνται κατά κύριο λόγο: το άμορφο πυρίτιο, το CdS/CdTe και το CIS<sup>[5]</sup>. Σε κάθε μία όμως από τις παραπάνω περιπτώσεις, τα υλικά αυτά, επιφέρουν βλαβερές επιπτώσεις στο περιβάλλον κατά τη διαχείρισή τους, μετά το τέλος της ζωής των φ/β κελιών που υποστηρίζουν. Για το λόγο αυτό, οι ερευνητές δεν στοχεύουν μόνο στην αύξηση της απόδοσης αλλά και στην αντικατάσταση των παλαιών υλικών με νέα, περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον. Στην κατεύθυνση εκείνη βρίσκονται τεχνολογίες λεπτού υμενίου που υποστηρίζονται από πολυμερή ή "οργανικά" υλικά. Τα πολυμερή παρέχουν αρκετά πλεονεκτήματα: το χαμηλό κόστος, το μικρό βάρος και είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Το μόνο εμπόδιο που υφίσταται ωστόσο, είναι η μικρή απόδοση που υπόσχονται (3-4%).<sup>[1]</sup>

Σε κάθε περίπτωση όμως, πριν ξεκινήσει η ανάλυση των διαφόρων τεχνολογιών φ/β οφείλεται να παρουσιαστεί εν συντομία η ιεραρχία των φ/β συστημάτων.

Το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια ενός φ/β στοιχείου χάνεται στο περιβάλλον λόγω ανάκλασης ή μετατροπής του σε θερμότητα. Προκειμένου λοιπόν, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια να θεωρηθεί αρκετή, τα φ/β κελιά συνδέονται μεταξύ τους σε ενιαία διάταξη προς τη δημιουργία φ/β πλαισίων. Αντίστοιχα, η ένωση πλαισίων αποτελεί μια συστοιχία (Εικόνα 1). Σε περιπτώσεις που οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι μεγάλες, οι συστοιχίες φ/β πλαισίων χωροθετούνται με



κατάλληλο τρόπο σε ειδικά κατασκευασμένες στηρίξεις σχηματίζοντας ένα φ/β πάρκο (Εικόνα 2).



Εικόνα 1 Φ/β κελί, φ/β πλαίσιο, φ/β συστοιχία. <sup>[8]</sup>



Εικόνα 2 Φ/β πάρκο. <sup>[9]</sup>

### 1.1 Φ/β κελιά πυριτίου

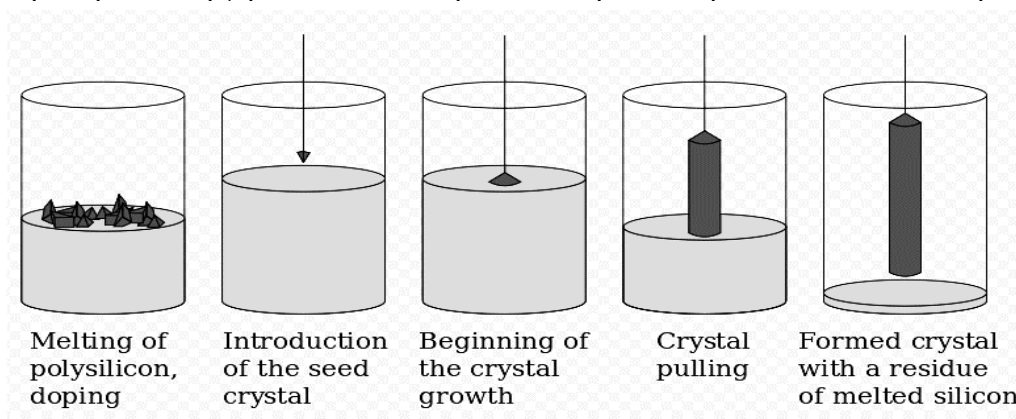
Από όλα τα υλικά που συναντώνται στην τεχνολογία φ/β κελιών, το κρυσταλλικό πυρίτιο είναι εκείνο που δύναται να παρέχει την υψηλότερη απόδοση. Επιπλέον, η παραγωγή του ενδυναμώνεται από το γεγονός πως αποτελεί ένα από τα υλικά με την μεγαλύτερη αφθονία στη φύση. Στη συνέχεια, ακολουθεί μια ανάλυση των τεχνολογιών που στηρίζονται στο κρυσταλλικό πυρίτιο. <sup>[2][6]</sup>



### 1.1.1 Μονοκρυσταλλικά κελιά

Τα μονοκρυσταλλικά κελιά χρησιμοποιούνται ευρέως στην φ/β τεχνολογία εξαιτίας της μεγάλης τους απόδοσης ( $\approx 28.8\%$ ) σε σύγκριση με τα πολυκρυσταλλικά κελιά που παρουσιάζουν απόδοση  $\approx 17-20\%$ . Το ποσοστό απόδοσης όμως αυτό δεν συναντάται σε πραγματικές συνθήκες (εφαρμογή σε φ/β πίνακες) καθώς με μετρήσεις προκύπτει πως κυμαίνεται σε τιμές ανάμεσα στο 15 και 23% <sup>[3][48]</sup>. Τα πολυκρυσταλλικά κελιά αντίστοιχα αποδίδουν χαμηλότερα.

Τα περισσότερα μονοκρυσταλλικά κελιά του εμπορίου χρησιμοποιούν μονοκρυσταλλικά wafers (επίπεδες λεπτές φέτες πυριτίου μικρού πάχους  $\approx 400\mu\text{m}$ ) εμπλουτισμένα με βόριο και παράγονται με τη βοήθεια της μεθόδου Czochralski (CZ) <sup>[9][10]</sup> (Εικόνα 3). Η συγκεκριμένη διαδικασία βρίσκει ευρεία εφαρμογή στη μικροηλεκτρονική. Το πυρίτιο που παράγεται μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου κατέχει αμειψόμορφη δομή, αν και περιέχει ορισμένες ανεπιθύμητες προσμίξεις οξυγόνου, άνθρακα και μεταλλικών ιόντων. Επιπλέον, προστίθενται στο μείγμα άτομα βορίου ή φωσφόρου σε ακριβείς ποσότητες με στόχο να μετατρέψουν το πυρίτιο σε τύπο n ή p, με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Το οξυγόνο που δημιουργήθηκε μέσω της εισαγωγής του μείγματος, προς τήξη στη θερμή χοάνη χαλαζία, είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στη μικροηλεκτρονική, εξαιτίας της μηχανικής ενδυνάμωσης που προκαλεί στις λεπτές φέτες πυριτίου. Το οξυγόνο αντιδρά με το βόριο και δημιουργεί μια ηλεκτρικά ενεργή ατέλεια που οριοθετεί την ποιότητα του υλικού ύστερα από



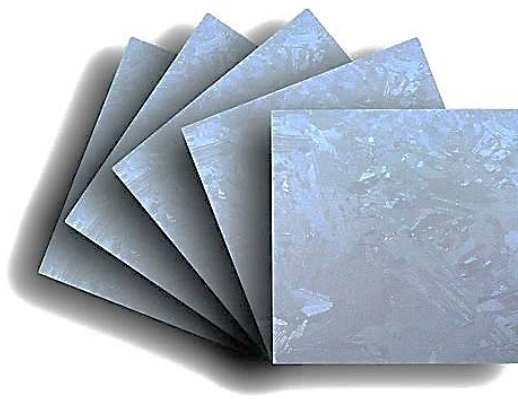
Εικόνα 3 Σχηματική περιγραφή της μεθόδου Czochralski (CZ). <sup>[11]</sup>

φωτισμό. Με τη βοήθεια του μαγνητικού περιορισμού δύναται η διαδικασία να περιορίσει την ποσότητα οξυγόνου στο μείγμα. Οι κρύσταλλοι πυριτίου που παράγονται με τη μέθοδο της επιπλέουσας ζώνης (Floating-Zone-FZ), κατά τη διάρκεια της CZ μεθόδου προτιμώνται στη κατασκευή φ/β κελιών υψηλής απόδοσης

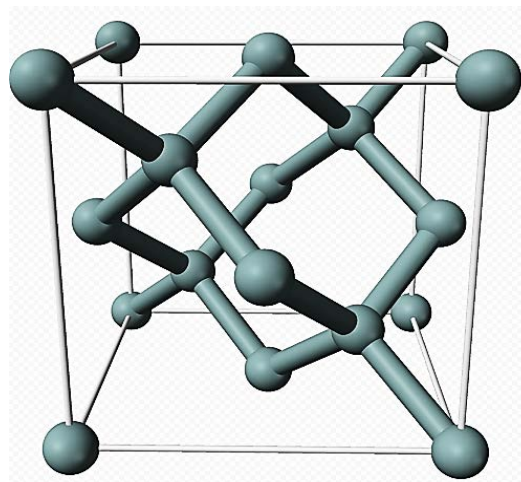
διότι κατέχουν τις μικρότερες απώλειες ανασυνδυασμού. Με το τέλος της διαδικασίας παράγονται μονοκρύσταλλοι πυριτίου (Εικόνα 4) μήκους έως και 2m και διαμέτρου 45cm. Οι κρύσταλλοι στη συνέχεια τεμαχίζονται δίνοντας τελικά τις φέτες πυριτίου (Εικόνα 5).



Εικόνα 4 Κρύσταλλος πυριτίου. <sup>[12]</sup>

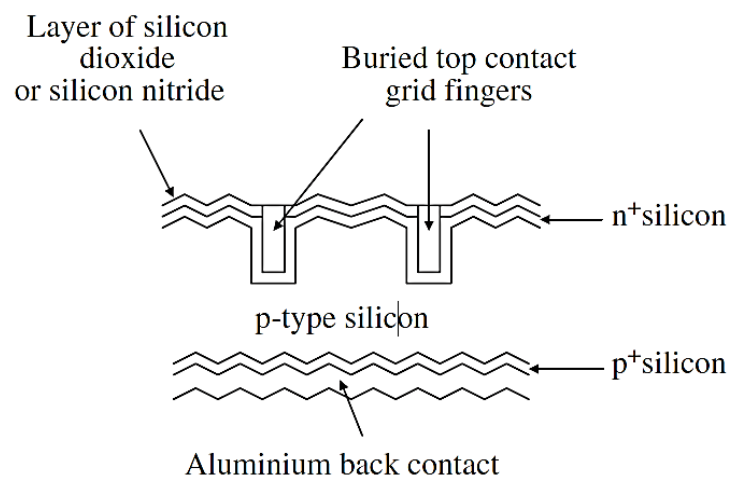


Εικόνα 5 Φέτες πυριτίου. <sup>[13]</sup>

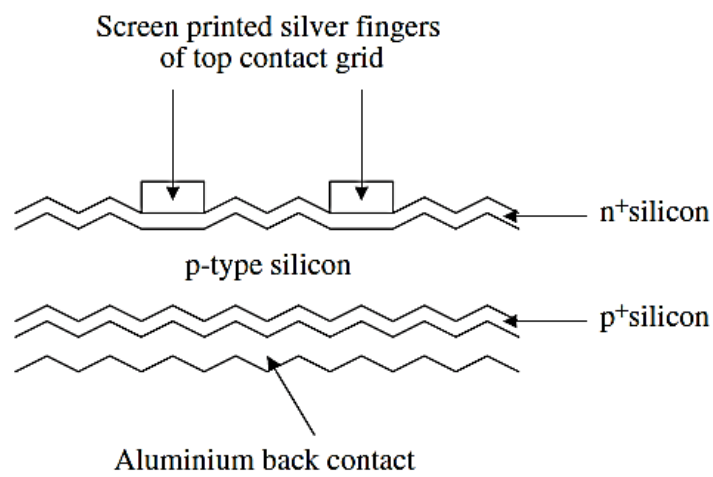


Εικόνα 6 Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου. <sup>[6]</sup>

Στη διάταξη p-n τοποθετούνται εμβυθισμένες ή μη, επαφές από ασήμι στην n-περιοχή για να πραγματοποιηθεί η ηλεκτρική επαφή (Εικόνα 7), αλλά και για να μπορεί να επιτραπεί στο φως να φτάσει την περιοχή της ένωσης. Στη συνέχεια, μια επίστρωση αλουμινίου τοποθετείται στο πίσω μέρος της p-type επιφάνειας. Επιπλέον, η διάταξη υπόκειται σε μια διαδικασία ανόπτησης προκειμένου να δημιουργηθεί μια  $p^+$  doped επιφάνεια στο πίσω μέρος του κελιού, να μειωθεί η αντίσταση των επαφών και να εξασφαλιστεί μια επιφάνεια με τις κατάλληλες ιδιότητες ώστε να είναι ικανή να ανακλά μειονότητες φορέων πίσω στη ένωση. Η πάνω επιφάνεια του κελιού στη συνέχεια διαμορφώνεται κατάλληλα για την μείωση της αντανάκλασης και την κατάλληλη διάθλαση του φωτός μεγιστοποιώντας το μήκος της διαδρομής που θα πραγματοποιήσει εντός του πυριτίου. Η επένδυση κατά της αντανάκλασης εξασφαλίζεται με την χρήση  $\text{TiO}_2$ , το οποίο τοποθετείται πάνω από τις εμβυθισμένες επαφές για να ολοκληρωθεί το φ/β κελί. <sup>[5]</sup>



Εικόνα 7 Τομή ενός φ/β κελιού πυριτίου με εμβυθισμένες επαφές. <sup>[5]</sup>



Εικόνα 8 Τομή ενός μονοκρυσταλλικού κελιού με τυπωμένες επαφές. <sup>[5]</sup>

### 1.1.2 Πολυκρυσταλλικά κελιά

Τα πολυκρυσταλλικά κελιά είναι μια οικονομικότερη λύση στην κατασκευή φ/β πινάκων. Ωστόσο, η αποδοτικότητά τους είναι χαμηλότερη συγκριτικά με την μονοκρυσταλλική ή άλλες υπό ανάπτυξη τεχνολογίες υλικών για φ/β πίνακες. Οι πολυκρυσταλλικές φέτες πυριτίου παράγονται χρησιμοποιώντας χαμηλότερης ποιότητας ράβδους τηγμένου και επανακρυσταλλομένου πυριτίου <sup>[17]</sup> (Εικόνα 9). Ύστερα από τη ψύξη τους, δημιουργούνται κατάλληλα προσανατολισμένοι κρύσταλλοι υπό την μορφή ράβδων, οπότε και τεμαχίζονται σε λεπτές φέτες. Ύστερα από τη διαδικασία εφαρμογής πλάσματος με τη μέθοδο εγχάραξης με ενεργά ιόντα (Reactive-Ion Etching-RIE) <sup>[18]</sup> δημιουργείται μια ιδιαίτερα αγωγίμη επιφάνεια με ταυτόχρονη την σχετική αύξηση της ηλιακής απορρόφησης κατά 40%. Η τελειοποίηση της μεθόδου αδρανοποίησης (retexturing) πολυκρυσταλλικών επιφανειών πραγματοποιήθηκε από τον Zolper (1989) και τον Inomota (1996) φτάνοντας τελικά σε ποσοστά απόδοσης 19.8% από τον Zhao (1998) <sup>[3]</sup>. Οι εμπορικοί πολυκρυσταλλικοί πίνακες κυμαίνονται σε απόδοση 12-15%.



Εικόνα 9 Ράβδος πολυκρυσταλλικού πυριτίου. <sup>[16]</sup>

Η μέθοδος εγχάραξης με ενεργά ιόντα (Εικόνα 10) είναι μια μικροκατασκευαστική τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων στοιχείων από την επιφάνεια των φετών πυριτίου με τη βοήθεια χημικά ενεργού πλάσματος. Το

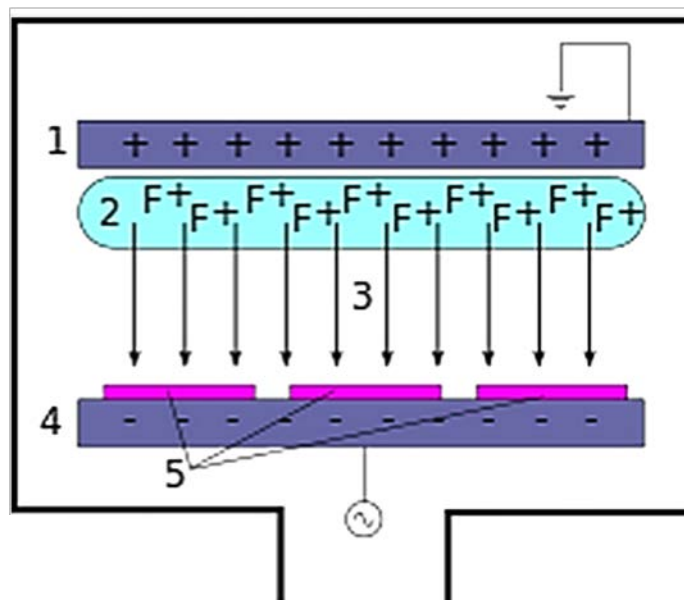


πλάσμα παράγεται υπό χαμηλή πίεση (κοντά στο κενό) μέσω ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Τελικά, ιόντα υψηλής ενέργειας κατευθύνονται στην επιφάνεια της φέτας πυριτίου και αντιδρούν με τα στοιχεία εκείνα που οφείλεται να απομακρυνθούν.

Η τυπική διάταξη RIE που συναντάται αποτελείται από ένα κυλινδρικό δωμάτιο κενού με μια επίπεδη, ηλεκτρικά μονωμένη επιφάνεια στην οποία τοποθετούνται τα υπό επεξεργασία φετών πυριτίου, στο κάτω μέρος του δωματίου. Αέριο εισέρχεται από μικρές εισόδους από το πάνω μέρος του δωματίου και εξέρχεται μέσα από την αντλία κενού που βρίσκεται στο κάτω μέρος. Το αέριο που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία του πυριτίου είναι το εξαφθοριούχο θείο ( $\text{SF}_6$ ). Η πίεση διατηρείται σταθερή, πολύ κοντά στην πίεση κενού.

Το πλάσμα εκκινείται με την πρόκληση ισχυρούς συχνότητας ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο επίπεδο που βρίσκονται οι φέτες πυριτίου. Η συχνότητα ορίζεται συνήθως στα 13.56MHz με τάση μερικές εκατοντάδες Watts. Το ηλεκτρικό πεδίο αναγκάζει το εισαγόμενο αέριο να ιονιστεί αφαιρώντας του ηλεκτρόνια, δημιουργώντας πλάσμα.

Σε κάθε κύκλο του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και προσκρούουν τόσο στο πάνω όσο και το κάτω επίπεδο του κυλινδρικού δωματίου. Ηλεκτρόνια απορροφούνται από τα τοιχώματα του όταν προσκρούουν σε αυτό ενώ στο



Εικόνα 10 Μια γραφική απεικόνιση της διάταξης RIE. 1, 4: τυπικά ηλεκτρόδια που δημιουργούν το ηλεκτρικό πεδίο (3) το οποίο επιταχύνει τα ηλεκτρόνια (2) προς την επιφάνεια των δειγμάτων.<sup>[19]</sup>

σημείο που βρίσκονται οι φέτες πυριτίου δημιουργείται αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο τάσης μερικών εκατοντάδων Volts λόγω της DC μόνωσης που έχει εφαρμοστεί στην αρχή της διαδικασίας. Το ίδιο το πλάσμα αναπτύσσει ένα ελάχιστο θετικό φορτίο λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης θετικών ιόντων σε σχέση με τα αρνητικά. Λόγω της συγκεκριμένης διαφοράς δυναμικού, τα θετικά ιόντα εμφανίζουν την τάση να κινηθούν προς το κάτω μέρος του δωματίου όπου και έρχονται σε επαφή με τις φέτες πυριτίου αντιδρώντας με στοιχεία που βρίσκονται στην επιφάνειά τους.

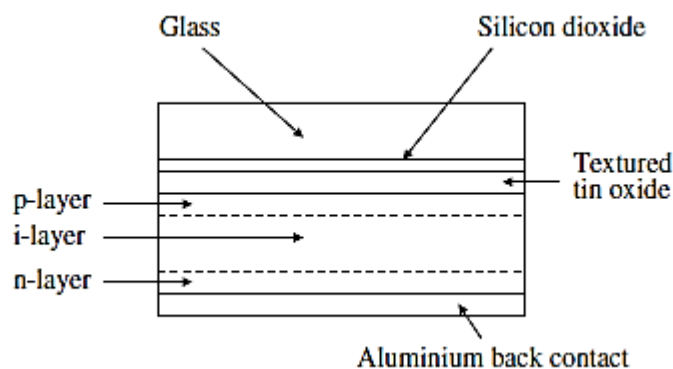
### 1.1.3 Κελιά άμορφου πυριτίου

Το άμορφο πυρίτιο είναι μια μη-κρυσταλλική μορφή πυριτίου με πολύ μεγάλη απόδοση. Τα λεπτά υμένια άμορφου πυριτίου παράγονται μέσω της Χημικής Εναπόθεσης Ατμών (Chemical Vapour Deposition-CVD) αερίων που συνίστανται από  $\text{SiH}_4$  ή PECVD <sup>[28]</sup> ή hot wire CVD <sup>[29]</sup>. Το μεγάλο πλεονέκτημα που παρέχουν είναι ότι δύνανται να τοποθετηθούν τόσο πάνω σε άκαμπτα υποστρώματα, όπως είναι γυάλινες επιφάνειες όσο και εύκαμπτα, όπως είναι πλαστικές, λεπτές μεταλλικές επιφάνειες, παρέχοντας έτσι ευκολία στην παραγωγή και στη χρήση. Το υλικό που χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή των φ/β κελιών είναι υδρογονωμένο άμορφο πυρίτιο,  $\alpha\text{-Si}$ , ένα κράμα πυριτίου και υδρογόνου (5-20%), με κύριο λόγο ύπαρξης του υδρογόνου, να εξουδετερώνει την αστάθεια δεσμών που επικρατούν λόγω της άτακτης τοποθέτησης των ατόμων πυριτίου στο πλέγμα. Το εν λόγω υδρογονωμένο άμορφο πυρίτιο εμφανίζει τιμή ενεργειακού διάκενου<sup>1</sup> 1.7eV, ενώ συντελεστή απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας  $\geq 10^5 \text{cm}^{-1}$  (40 φορές μεγαλύτερος συντελεστής από εκείνον που εμφανίζει το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο) για φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη εκείνης του ενεργειακού διάκενου. Αυτό μεταφράζεται πως μόλις μερικά μικρά τμήματα υλικού είναι ικανά να απορροφήσουν αρκετή ηλιακή ακτινοβολία έτσι ώστε να μειωθεί η ποσότητα των υλικών και κατά συνέπεια το κόστος.

Το ντοπάρισμα-εμπλουτισμός στα κελιά άμορφου πυριτίου, δηλαδή η προσθήκη διαφορετικών ατόμων στο μείγμα της κατασκευής έχει αποδειχθεί πως προκαλεί μείωση της ευκολίας χρήσης και του προσδόκιμου χρόνου ζωής. Για την επίλυση-περιορισμό του συγκεκριμένου προβλήματος έχει δοκιμαστεί η χρήση μιας διάταξης p-i-n (Εικόνα 11), όπου όταν το φως απορροφηθεί, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές

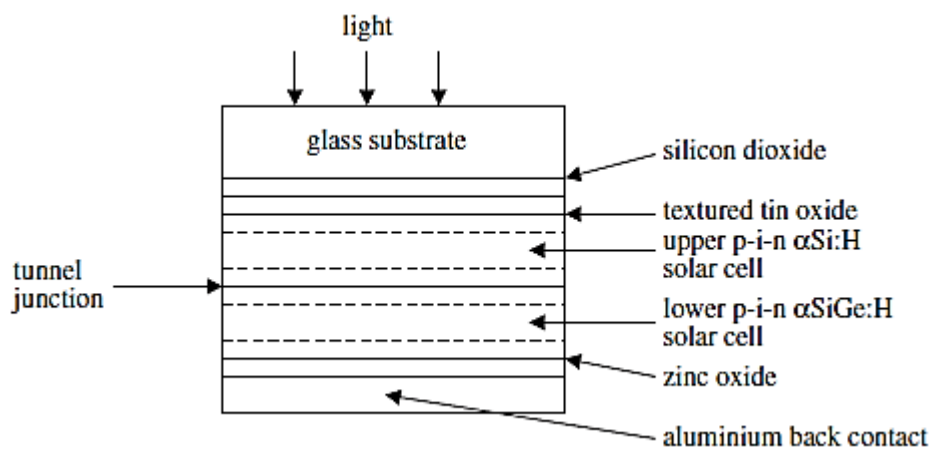
<sup>1</sup> Το ενεργειακό διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στην ζώνη αγωγιμότητας αποτελεί την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για την διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους, ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής.

που δημιουργούνται κινούνται στο μη εμπλουτισμένο  $i$  επίπεδο λόγω του ηλεκτρικού πεδίου που επικρατεί. Η απόδοση των συγκεκριμένων διατάξεων σε εργαστηριακό περιβάλλον αγγίζει ποσοστό που ξεπερνά το 12%. Ωστόσο, στο εμπόριο με την πάροδο του χρόνου και την εκτεταμένη έκθεση στο ηλιακό φως, η απόδοση περιορίζεται στο 4-5%. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Staebler-Wronski effect.



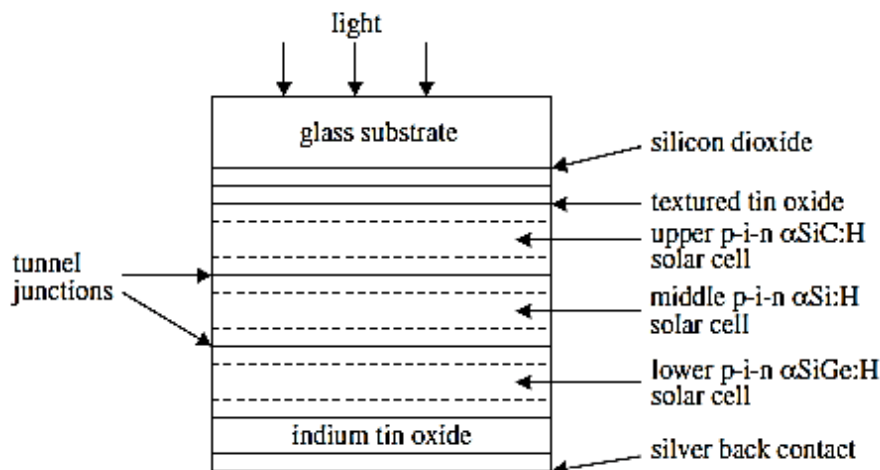
Εικόνα 11 Τομή τυπικής διάταξης μονής ένωσης άμορφου πυριτίου. <sup>[5]</sup>

Όμως, υπάρχει η δυνατότητα το ηλιακό φως να απορροφηθεί πιο αποτελεσματικά με τη χρήση πολλαπλών δομών p-i-n (Εικόνα 12), (Εικόνα 13) με διαφορετικό ενεργειακό διάκενο στα επίπεδα  $i$  με στόχο τελικά τη δημιουργία δομών διπλής ή και τριπλής συνένωσης. Χαμηλότερες τιμές ενεργειακού διάκενου δημιουργούνται με την κραμάτωση του πυριτίου με γερμάνιο, ενώ υψηλότερες με την κραμάτωση του με άνθρακα. Στην πρώτη περίπτωση, της διπλής συνένωσης η απόδοση ξεπερνά το 9.5% ενώ στη δεύτερη το 10% <sup>[28]</sup>. Το σημερινό μερίδιο της αγοράς που κατέχουν τα κελιά άμορφου πυριτίου είναι μικρότερο από 5%.



Εικόνα 12 Τομή τυπικής διάταξης διπλής ένωσης άμορφου πυριτίου. <sup>[5]</sup>

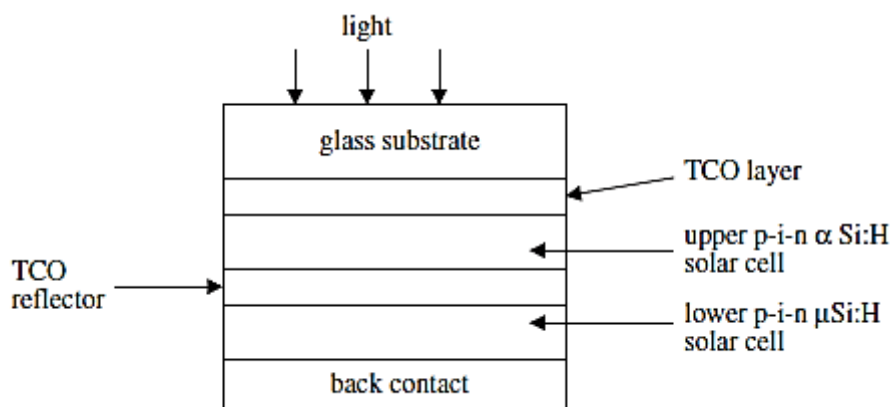




Εικόνα 13 Τομή τυπικής διάταξης τριπλής ένωσης άμορφου πυριτίου. <sup>[5]</sup>

#### 1.1.4 Μικρο-κρυσταλλικού πυριτίου

Όταν τα αέρια που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή λεπτών υμενίου άμορφου πυριτίου διαλυθούν μέσα σε υδρογόνο, η μικροδομή που αναπτύσσουν διαφέρει από σημείο σε σημείο <sup>[5]</sup>. Αυτό λοιπόν, το είδος πυριτίου δύο φάσεων καλείται μικροκρυσταλλικό πυρίτιο (Εικόνα 14). Οι φυσικές ιδιότητες που παρουσιάζει προσομοιάζουν περισσότερο εκείνες του μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου παρά εκείνες που εμφανίζει το άμορφο πυρίτιο, ιδιαίτερα όσον αφορά στη σταθερότητα κάτω από έντονη ακτινοβολία. Σε αυτόν τον τομέα παρατηρείται ερευνητική κινητικότητα στοχεύοντας στη δημιουργία υβριδικών κελιών άμορφου και μικροκρυσταλλικού πυριτίου τριπλής συνένωσης (triple junction) προς την αύξηση της απόδοσης και σταθερότητας με αρχική απόδοση 16.3% και τελική 13.4% <sup>[20]</sup>. Η σημερινή απόδοση των κελιών μικροκρυσταλλικού πυριτίου φτάνει το  $\approx 10.1\%$  <sup>[48]</sup>.



Εικόνα 14 Τομή τυπικής διάταξης κελιού μικροκρυσταλλικού πυριτίου. <sup>[5]</sup>

## 1.2 Φ/β κελιά βασισμένα σε αρсениούχο γάλλιο (GaAs), φωσφορούχο ίνδιο (InP) και αντιμονιούχο γάλλιο (GaSb)

### 1.2.1 Συσκευές μονής ένωσης (single-junction devices)

Τα τρία παραπάνω υλικά αποτελούνται από στοιχεία τα οποία ανήκουν στις III-V ομάδες του περιοδικού πίνακα. Χαρακτηρίζονται από υψηλό συντελεστή απόδοσης απορρόφησης ακτινοβολίας, μεγάλη τιμή ενεργειακού διάκενου, καθώς και ικανοποιητικό χρόνο ζωής και κινητικότητα φορέων. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά, τα καθιστούν ικανά συστατικά για την κατασκευή αποδοτικών φ/β κελιών. Μονοκρυστάλλοι των συγκεκριμένων υλικών δύνανται να παραχθούν μέσω της διαδικασίας Czochralski που περιγράφηκε προηγουμένως ή της διαδικασίας Bridgmann. Τα δύο υλικά που συναντώνται κυρίως από αυτή τη κατηγορία είναι τα GaAs και InP. Η ηλιακή ακτινοβολία με τιμή ενέργειας πάνω από εκείνη της αντίστοιχης του ενεργειακού διάκενου (και για τα δύο υλικά, η τιμή βρίσκεται πολύ κοντά στο βέλτιστο, 1.424eV και 1.34eV αντίστοιχα) απορροφάται μόλις με την χρήση μερικών μικρομέτρων του υλικού λόγω των υψηλών συντελεστών απορρόφησης που κατέχουν. <sup>[1][5][6]</sup>

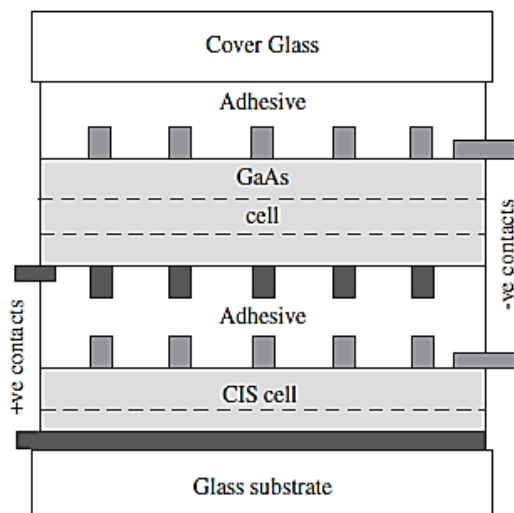
Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των συγκεκριμένων υλικών είναι το υψηλό κόστος που απαιτείται για την παρασκευή των υποστρωμάτων σε σχέση με εκείνα που απαιτούνται για τη διάταξη (90% του συνολικού κόστους). Οι κρυσταλλικές ατέλειες σε συνδυασμό με ανεπιθύμητες ακαθαρσίες, συνήθως, οδηγούν σε μειωμένες αποδόσεις ενώ δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικές μέθοδοι κατασκευής της διάταξης. Ακόμη, σαν υλικά μπορούν σπάσουν σε μικρότερα τμήματα όντας σημαντικά μηχανικώς ασθενέστερα σε σχέση με το πυρίτιο. Επιπλέον, η υψηλή τους πυκνότητα είναι ένα μειονέκτημα, αναφορικά με το βάρος τους, εκτός και αν χρησιμοποιηθούν σε τεχνολογίες λεπτού υμενίου εκμεταλλευόμενα τους υψηλούς συντελεστές απορρόφησης ακτινοβολίας που κατέχουν. Τα παραπάνω μειονεκτήματα, τα περιθωριοποίησαν ως επίγεια τεχνολογία. Όμως, η υψηλή ανθεκτικότητα και απόδοση που παρουσιάζουν κρίθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη σε διαστημικές εφαρμογές. <sup>[5]</sup>

Σήμερα, η απόδοση των φ/β κελιών, σε εργαστηριακό επίπεδο, GaAs με χρήση υποστρωμάτων πυριτίου και InP με χρήση υποστρωμάτων GaAs για μονής ένωσης διατάξεις, φτάνει το  $\approx 28.3\%$  και  $\approx 22.1\%$  <sup>[48]</sup> αντίστοιχα.

Το τελευταίο διάστημα, οι έρευνες προσανατολίζονται στην ανάπτυξη διατάξεων πολλαπλών συνενώσεων, ενώ η απόδοση των μονών ενώσεων έχει μείνει περίπου σταθερή από τη δεκαετία του 90'. Οι μονές ενώσεις ερευνώνται μόνο ως υπο-κελιά εντός διατάξεων πολλών συνενώσεων. Διατάξεις με βάση τα αντιμονιούχο γάλλιο (GaSb) και ινδιούχο αρσενιούχο γάλλιο (In-GaAs) βρίσκουν εφαρμογή σε θερμοφωτοβολταϊκές συσκευές (TPV) <sup>[26]</sup>.

### 1.2.2 Συσκευές πολλαπλών συνενώσεων (multi-junction devices)

Στις διατάξεις μονής ένωσης, είναι δυνατή η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική για τιμές της πάνω από την τιμή του ενεργειακού διάκενου. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η ενέργεια των φωτονίων, η πλεονάζουσα ενέργεια δεν προκαλεί τη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων και οπών, αλλά χάνεται στο πλέγμα όπως και η θερμοκρασία που περιορίζει την απόδοση του κελιού. Έχει αποδειχθεί και θεωρητικά πως με την χρήση διατάξεων πολλαπλών συνενώσεων με διαφορετικές τιμές ενεργειακού διάκενου, είναι δυνατή η αύξηση της απόδοσης. Η τιμή του συνολικού ενεργειακού διάκενου εξαρτάται προφανώς από τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων συνενώσεων. <sup>[5]</sup>



Εικόνα 15 Τομή διάταξης ενός μηχανικά στοιβαγμένου κελιού GaAs/InP. <sup>[5]</sup>

Έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές διατάξεις πολλαπλών συνενώσεων. Ανάμεσά τους, ο διαχωρισμός του ηλιακού φάσματος σε ζώνες που αντιστοιχούν σε ενεργειακά διάκενα ξεχωριστών κελιών, όντας στοιβαγμένα το ένα πάνω από το άλλο (μηχανική ένωση (//))-(Εικόνα 15) ή και ενωμένα φυσικά και ηλεκτρικά (μονολιθική διάταξη (/)) <sup>[5]</sup>. Και για τις δύο περιπτώσεις συνένωσης τα κελιά είναι διατεταγμένα με βάση την

τιμή του αντίστοιχου ενεργειακού διακένου τους. Στην περίπτωση της μηχανικής συνένωσης δεν υπάρχει περιορισμός σχετικά με τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν. Ένα παράδειγμα είναι το κελί GaAs/CuInSe<sub>2</sub> που αναπτύχθηκε από τη Boeing <sup>[30][31]</sup>.

Τα συνήθη υλικά για την κατασκευή των διατάξεων αυτών είναι κράματα υλικών από τις III-V ομάδες του περιοδικού πίνακα βασισμένα στα συστήματα GaAs και InP. Ωστόσο, με την αύξηση του αριθμού των συνενώσεων, ταυτόχρονα αυξάνεται και η πολυπλοκότητα του συστήματος λόγω των απαιτήσεων των υλικών που χρησιμοποιούνται. Υλικά με διαφορετικές τιμές ενεργειακού διάκενου, πρέπει να είναι δομημένα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η ηλιακή ακτινοβολία που θα διαπεράσει το ένα κελί θα απορροφηθεί από κάποιο επόμενο.

Μέχρι το 1990 η απόδοση των κελιών αυτού του τύπου είχε φτάσει το 27.3% με την συνένωση GaInP<sub>2</sub>/GaAs (Εικόνα 16) ώσπου και άνοιξε ο δρόμος για τις τριπλές συνενώσεις (GaInP/GaAs/Ge) (1.9eV/1.42eV/0.67eV) (Εικόνα 17, Εικόνα 18) με τα GaInP<sub>2</sub>/GaAs διασκορπισμένα σε ένωση Ge. Η σημερινή μεγαλύτερη καταγεγραμμένη απόδοση τριπλής συνένωσης GaInP/GaAs/GaInAs είναι 36.9% <sup>[48]</sup>.

Σε εμπορικό επίπεδο, οι τριπλές συνενώσεις φτάνουν τυπική απόδοση 27.6% σε θερμοκρασία 28°C για επιφάνειες άνω των 26cm<sup>2</sup>.

Το υψηλό κόστος κατασκευής των διατάξεων πολλαπλών συνενώσεων (Εικόνα 19, Εικόνα 20) δεν τις καθιστά ανταγωνιστικές σε επίγειες εφαρμογές αν και η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει το 30% και για αυτόν τον λόγο προτιμώνται για εφαρμογές στο διάστημα. Επιπλέον, οι συνενώσεις αυτές λειτουργούν σε καθορισμένο φάσμα ακτινοβολίας υψηλής συγκέντρωσης και μικρές αλλαγές σε αυτό επιφέρουν σημαντικές μειώσεις στην απόδοση τους. Ακόμη, στην περίπτωση επίγειων εφαρμογών, απαιτείται η χρήση ιχνηλατικών συστημάτων για την αύξηση της συνολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

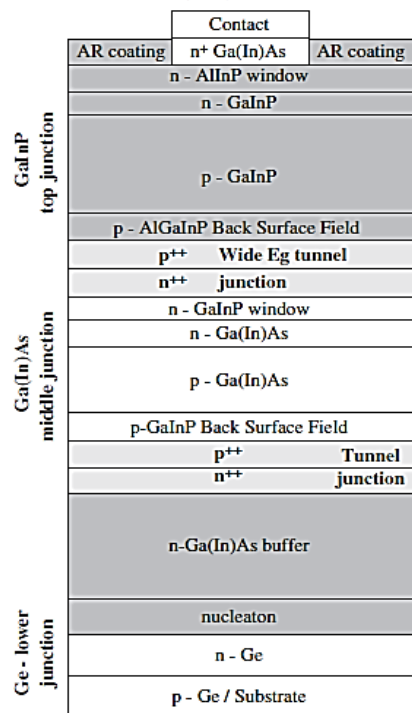
Junction 1	AR Coating		MgF <sub>2</sub> /ZnS 0.12μm/0.065μm
	n - AlInP <sub>2</sub>		0.04μm
	n - GaInP <sub>2</sub>		0.1μm
	p - GaInP <sub>2</sub>	1.85 eV	0.8μm
	p <sup>+</sup> - GaAs		0.02μm
Junction 2	n <sup>+</sup> - GaAs		0.02μm
	n - AlGaAs		0.2μm
	n - GaAs		0.1μm
	p - GaAs	1.42 eV	3.5μm
	p <sup>+</sup> - GaAs		
Substrate			

Tunnel  
Junction.

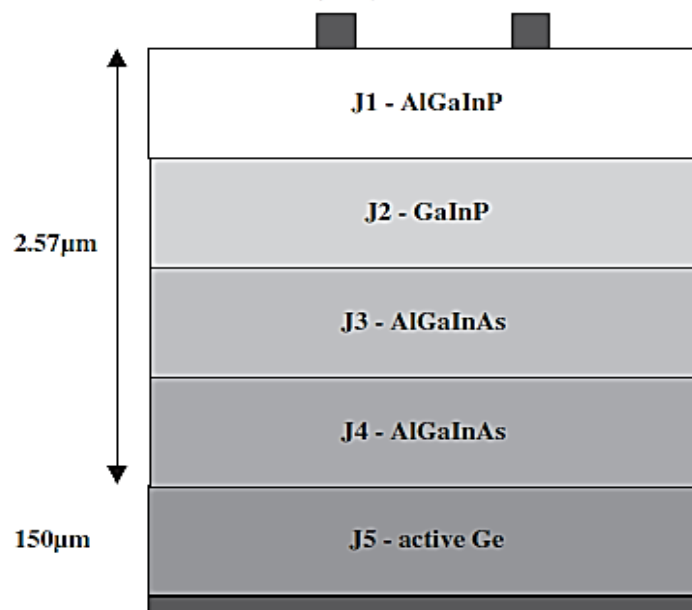
Εικόνα 16 Τομή διάταξης του monolithic GaInP/GaAs κελιού σε υπόστρωμα GaAs με απόδοση 27.3%.<sup>[5]</sup>

GaInP Top junction	Contact
	AR coating
	GaAs contact
	AR coating
	n <sup>+</sup> - window
	n <sup>+</sup> - GaInP <sub>2</sub>
	p - GaInP <sub>2</sub>
	p <sup>+</sup> - Back Surface Field
	p <sup>++</sup> / n <sup>++</sup> Tunnel junction
	n <sup>+</sup> - window
GaInAs Middle junction	n <sup>+</sup> - InGaP
	p - InGaAs
	p <sup>+</sup> - Back Surface Field
	p <sup>++</sup> / n <sup>++</sup> Tunnel junction
Ge Lower junction	n - GaAs nucleaton / buffer
	n <sup>+</sup> - Ge
	p - Ge
	p - Ge Substrate

Εικόνα 17 Τομή διάταξης του μονολιθικού GaInP/GaAs/Ge κελιού τριπλής συνένωσης.<sup>[5]</sup>



Εικόνα 18 Τομή διάταξης του μονολιθικού GaInP/GaAs/Ge κελιού τριπλής συνένωσης. Το n-GaInP επίπεδο χρησιμοποιείται για να μειώσει την μη-αντιστοιχία μεταξύ του διεσπαρμένου Ge στην κατώτερη ένωση με την ενεργή μέση ένωση GaInAs. <sup>[5]</sup>



Εικόνα 19 Πιθανή πενταπλή διάταξη φ/β κελιού. <sup>[5]</sup>

<b>J1 - AlGaInP</b> <b>2.16 eV</b>
<b>J2 - GaInP</b> <b>1.88 eV</b>
<b>J3 - AlGaInAs</b> <b>1.6 eV</b>
<b>J4 - GaInAs</b> <b>1.405 eV</b>
<b>J5 - 1.18 eV material</b> <b>GaInNAs ?</b> <b>(<math>I_{ph} &gt; 8.5 \text{ mA cm}^{-2}</math>)</b>
<b>J6 - active Ge</b> <b>0.661 eV</b>

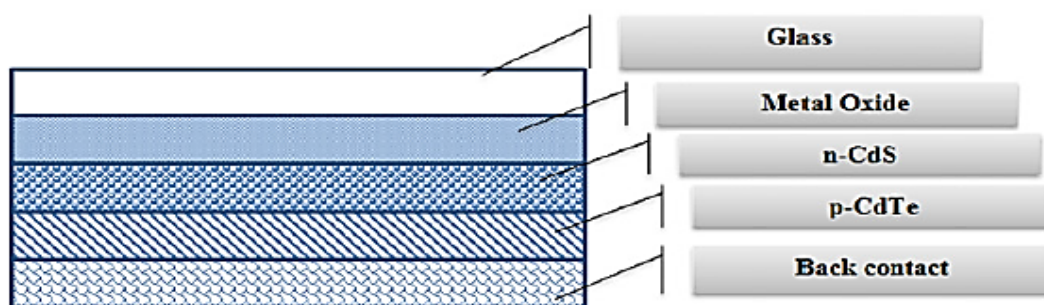
Εικόνα 20 Τομή πιθανής εξαπλής διάταξης κελιού με τα υλικά και τις τιμές των εκάστοτε ενεργειακών διακένων. <sup>[5]</sup>

### 1.3 Τεχνολογίες λεπτού υμενίου-μεμβράνης

Συγκριτικά με τα φ/β κελιά κρυσταλλικού πυριτίου, τα κελιά λεπτού υμενίου έχουν μικρότερο κόστος λόγω του ότι απαιτούν λιγότερα υλικά για την κατασκευή τους και συντομότερες διαδικασίες παραγωγής <sup>[6]</sup>. Από τη στιγμή που τα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι περιορισμένα, το πάχος των κελιών είναι αρκετά μικρό, περίπου 35-260nm <sup>[32]</sup>.

#### 1.3.1 Τελουριούχου κάδμιου (CdTe) και Θειούχου κάδμιου (CdS)

Το 1956, μετά από την έρευνα του Loferski <sup>[33]</sup>, αποδείχτηκε πως το βέλτιστο ενεργειακό διάκενο για την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 1.5eV. Αυτό το γεγονός, τον οδήγησε στην πρότασή του για το CdTe, το οποίο έχει ενεργειακό διάκενο κοντά στη βέλτιστη τιμή (1.45eV) και πολύ καλό συντελεστή απορρόφησης ακτινοβολίας  $a > 10^5 \text{cm}^{-1}$  για απορρόφηση φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο. Το υλικό αυτό σήμερα εμφανίζει απόδοση  $\approx 16.7\%$  <sup>[48]</sup>. Η διαδικασία για την παραγωγή CdS/CdTe κελιών ξεκινά με την εξάτμιση ενός λεπτού στρώματος CdS πάνω σε ένα αγωγίμο γυάλινο υπόστρωμα, ακολουθούμενη από την εξάτμιση ενός στρώματος CdTe και τελικά την τοποθέτηση μιας μεταλλικής επαφής για την ολοκλήρωση της αρχικής διαδικασίας (Εικόνα 21). Στη συνέχεια, παρουσία  $\text{CdCl}_2$ , το υπό επεξεργασία κελί θα τοποθετηθεί σε θάλαμο θερμοκρασίας 450°C, όπου θα πραγματοποιηθεί μερική κρυσταλλοποίηση των ημιαγωγών, με την παράλληλη εισαγωγή χαλκού για τον εμπλουτισμό του στρώματος CdS <sup>[34]</sup>.



Εικόνα 21 Τομή n-CDS/p-CdTe. <sup>[6]</sup>

Έχει παρατηρηθεί πως με την χημική θερμική επεξεργασία, τα φ/β κελιά CdTe βελτιώνονται, ενώ με τον εμπλουτισμό του CdS με χαλκό, αυξάνεται η φωτοαγωγιμότητά τους καθώς πρόκειται για έναν ημιαγωγό τύπου n. Αν και η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει αυξημένη σταθερότητα στο χρόνο, υπάρχουν προβληματισμοί όσον αφορά στη περιβαλλοντική συμπεριφορά του Te <sup>[35]</sup>.



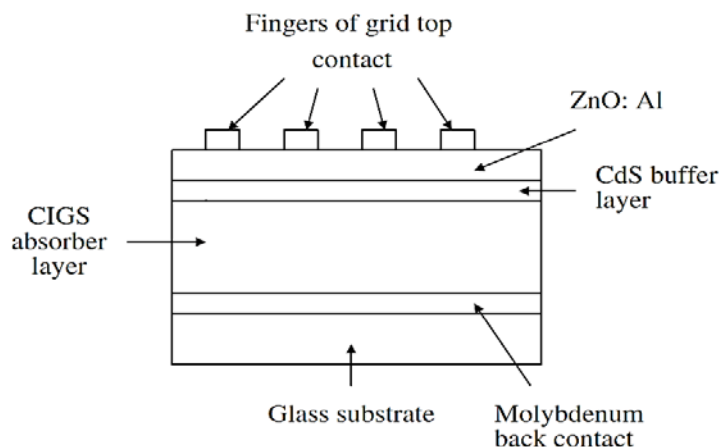
### 1.3.2 Δισεληνοϊνδιούχου γαλλίου χαλκού, ( $\text{CuGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ )/ Δισεληνοϊνδιούχου χαλκού ( $\text{CuInSe}_2$ )/ Διθειούχου ινδιούχου χαλκού ( $\text{CuInS}_2$ )

Τα υλικά αυτά ονομάζονται και χαλκοπυρίτες και βρίσκονται στις I, III και IV ομάδες του περιοδικού πίνακα. Όπως με το άμορφο πυρίτιο και το CdTe, τα παραπάνω υλικά παρουσιάζουν ενεργειακό διάκενο κοντά στο 1.5eV (1.68eV) και υψηλό συντελεστή απορρόφησης ακτινοβολίας για φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από τη τιμή του ενεργειακού διακενου, καθιστώντας μικρή επιφάνεια κελιού ικανή να απορροφήσει το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.<sup>[5]</sup>

Το 1974, ο Wagner<sup>[36]</sup> δημιούργησε ένα φ/β κελί  $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$  με απόδοση 12%. Η διάταξη δημιουργήθηκε με την τοποθέτηση ενός λεπτού στρώματος CdS πάνω σε μια λεπτή φέτα μονοκρυσταλλικού  $\text{CuInSe}_2$ . Η επιτυχία αυτή, έδωσε το έναυσμα για την παραγωγή παρόμοιων κελιών με εναπόθεση πολλών στρωμάτων, με την χρήση τεχνικών λεπτού υμενίου (Εικόνα 22).

Παρατηρήθηκε επίσης πως με την ενσωμάτωση Ga σε  $\text{CuInSe}_2$  παράγοντας  $\text{CuGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$  (CIGS) διευρύνεται το ενεργειακό διάκενο προς τη βελτιστοποίηση της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας. Το CIGS εμφανίζεται να είναι η πιο αποδοτική ένωση από την ομάδα των χαλκοπυριτών.

Ένας ακόμη ημιαγωγός της ίδιας ομάδας είναι το  $\text{CuInS}_2$ . Το συγκεκριμένο υλικό, κατέχει ενεργειακό διάκενο πολύ κοντά στη τιμή 1.5eV και για αυτό τον λόγο καθίσταται ως ένας πολύ ισχυρός υποψήφιος για την παρασκευή αποδοτικών φ/β κελιών. Η μεγαλύτερη έρευνα πάνω σε αυτού του είδους κελιά πραγματοποιήθηκε από το Ινστιτούτο Hahne-Meitner στο Βερολίνο με την εξάτμιση όλων των στοιχείων σε θερμό, γυάλινο υπόστρωμα επενδεδυμένο με μολυβδαίνιο (Mo).



Εικόνα 22 Τυπική διάταξη υποστρωμάτων σε δομή υποστήριξης χαλκοπυριτών.<sup>[5]</sup>



Αν και έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι για την παραγωγή φ/β κελιών λεπτού υμενίου από χαλκοπυρίτες, μόνο τρεις (3) έχουν θεωρηθεί ως καταλληλότερες για μαζική παραγωγή:

- Συν-εξάτμιση των στοιχείων <sup>[37]</sup>.
- Σεληνοποίηση/θείωση των στοιχειακών πρόδρομων στοιβάδων <sup>[38]</sup>.
- Επεξεργασία συζευγμένων στοιχειακών στοιβάδων <sup>[39]</sup>.

Τελευταία εμφανίζονται διάφορα ρεύματα ερευνών:

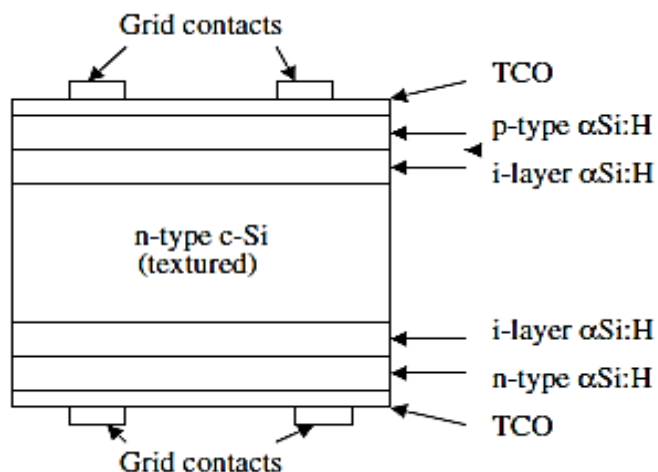
- Ανάπτυξη ενός στρώματος απουσία Cd που θα αντικαταστήσει το υπάρχον CdS στρώμα που χρησιμοποιείται, με ισχυρούς υποψηφίους τα: ZnSe, ZnIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> και MgZnO.
- Αντικατάσταση του Ga και In με στοιχεία που βρίσκονται σε μεγαλύτερη αφθονία στη φύση. Πολλά υποσχόμενη είναι η αντικατάσταση του Ga στο CIGS με Al, όπως και η αντικατάσταση του Ga και In με Zn και Sn αντίστοιχα προς τη δημιουργία Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>2</sub> φ/β κελιών.

Η μέγιστη απόδοση που έχει παρατηρηθεί σε φ/β κελιά αυτού του τύπου είναι 20%, ενώ για πίνακες φτάνει το 13%.

### 1.3.3 Ετερο-επαφή (Heterojunction-HJ) και Ετερο-επαφή με εσωτερικό λεπτό στρώμα (Heterojunction with intrinsic layer-HIT)

Τα HJ φ/β κελιά αποτελούν την ένωση μεταξύ τεχνολογίας κρυσταλλικού πυριτίου υψηλής απόδοσης και χαμηλού κόστους λεπτού υμενίου υδρογονωμένου άμορφου πυριτίου σε ενιαία διάταξη. Η ένωση αυτών των δύο τεχνολογιών παρουσιάζει κάποιες ατέλειες στην επιφάνεια του κρυσταλλικού πυριτίου με αποτέλεσμα τη μείωση της αναμενόμενης απόδοσης. Ωστόσο, εκείνη παραμένει πάνω από την απόδοση που θα παρείχαν τα κελιά άμορφου πυριτίου στην περίπτωση των p-i-n διατάξεων που αναλύθηκαν προηγουμένως. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε με την εισαγωγή ενός ενδιάμεσου στρώματος υδρογονωμένου άμορφου πυριτίου ανάμεσα στα προηγούμενα δύο επίπεδα της διάταξης: το επίπεδο υδρογονωμένου άμορφου πυριτίου και της λεπτής κρυσταλλικής φέτας. Τα νέα αυτά κελιά καλούνται HIT φ/β κελιά <sup>[21]</sup>. Η σημερινή απόδοση τους καθορίζεται πάνω από 23% σε εργαστηριακό επίπεδο. Οι έρευνες πάνω στη συγκεκριμένη τεχνολογία κατευθύνονται τόσο στην αύξηση της απόδοσης, όσο

και στην μείωση του πάχους της διάταξης. Αξίζει να σημειωθεί πως όλες οι διεργασίες που πραγματοποιούνται για την παρασκευή τους απαιτούν θερμοκρασία κάτω των 200°C.

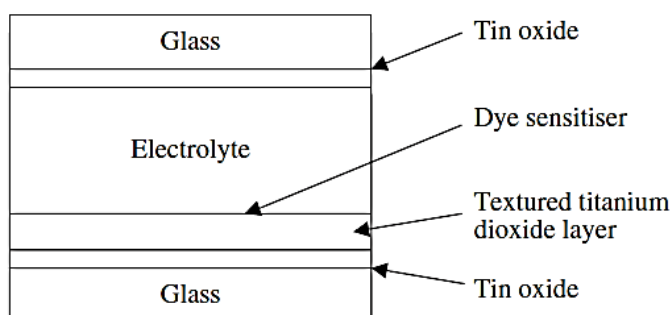


Εικόνα 23 Τομή ενός HIT κελιού πάχους 200mm. <sup>[5]</sup>

#### 1.4 Dye-sensitized φ/β κελιά

Λόγω των ποικίλων προβληματισμών που παρουσιάζονται σχετικά με την απόδοση, το κόστος και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των φ/β τεχνολογιών και υλικών, οι ερευνητές παρουσίασαν την ιδέα των dye-sensitized φ/β κελιών. Πρόκειται για μια εφαρμογή που στηρίζεται στη χρήση ενός φωτό-ηλεκτροχημικού κελιού. Τα περισσότερα επιτυχημένα κελιά αυτής τεχνολογίας δημιουργήθηκαν από τον Michael Grätzel από όπου πήραν και το όνομα Grätzel cells <sup>[40][41]</sup> (Εικόνα 24). Στην εν λόγω διάταξη το άνω ηλεκτρόδιο του κελιού αποτελείται από ένα στρώμα  $\text{TiO}_2$  πάνω σε εμπλουτισμένο με φθόριο, γυαλί, επενδεδυμένο με  $\text{SnO}_2$ . Πάνω στο στρώμα  $\text{TiO}_2$ , στη συνέχεια, εφαρμόζεται ειδική χρωστική που συνήθως είναι ένα μέταλλο μετάβασης-ρουθίνιο (Ru) ή όσμιο (Os). Η επιφάνεια του  $\text{TiO}_2$  είναι ιδιαίτερα τραχεία με στόχο να αυξηθεί το εμβαδόν της ενεργής επιφάνειας για την μεγιστοποίηση της απορροφώμενης ακτινοβολίας. Το κάτω ηλεκτρόδιο κατασκευάζεται με την επίστρωση πυρολιθικού λευκόχρυσου πάνω σε ίδιου είδους γυάλινη επιφάνεια με το πάνω ηλεκτρόδιο. Η διάταξη ολοκληρώνεται με την προσθήκη κατάλληλου ηλεκτρολύτη (συνήθως ενός διαλύματος ιωδίου) ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια σφραγίζοντας τα άκρα για τον περιορισμό διαρροών. Η απόδοσή τους σήμερα βρίσκεται γύρω στο 11% <sup>[48]</sup> με πρωτότυπες διατάξεις του είδους να φτάνουν το 15%.

Τα dye-sensitized φ/β κελιά κατέχουν την μεγαλύτερη απόδοση από τις τεχνολογίες 3<sup>ης</sup> γενιάς στην οποία ανήκουν. Αποτελούν μια ελκυστική λύση για την αντικατάσταση των εγκαταστάσεων χαμηλής πυκνότητας, όπως εγκαταστάσεις σε στέγες, όπου το χαμηλό βάρος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Παρατηρείται επίσης πως δύνανται να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, εκτεθειμένα σε μικρές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, λειτουργώντας κάτω από συνθήκες όπου άλλου είδους φ/β στοιχεία δε θα μπορούσαν. Επιπλέον, ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι πως δεν απαιτούν ειδικό προστατευτικό περίβλημα για την λειτουργία τους, σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνολογίες που λόγω της μεταλλικής προστασίας, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό επηρεάζουν την αρτιότητα και απόδοση των κελιών. Αποτελεσματικά, είναι ικανά να λειτουργούν αποδοτικότερα σε χαμηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες χρησιμοποιώντας πλαστικό προστατευτικό περίβλημα για την αποβολή θερμότητας.



*Εικόνα 24 Τομή ενός ηλεκτροχημικού κελιού Grätzel το οποίο χρησιμοποιεί ηλεκτρολύτη βασισμένο σε ιόντα ιωδίου και dye-Sensitized TiO<sub>2</sub> για την απορρόφηση του ηλιακού φωτός. [5]*

Το βασικότερο μειονέκτημα των dye-sensitized φ/β κελιών είναι πως έχουν σχεδιαστεί με ηλεκτρολύτη, ο οποίος βρίσκεται σε υγρή μορφή. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, ο ηλεκτρολύτης παγώνει, διακόπτοντας την λειτουργία του κελιού, ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες διαστέλλεται προκαλώντας ζημιά στη διάταξη. Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος του ρουθηνίου και του λευκόχρυσου που απαιτούνται για τη λειτουργία του κελιού. Επιπροσθέτως, ένα μεγάλο μειονέκτημα είναι πως το διάλυμα του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται, εμπεριέχει πτητικές οργανικές ουσίες, οι οποίες εγκυμονούν κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι εκείνες οι ουσίες δύνανται να διαπερνούν το πλαστικό που αποτελεί το βασικό στοιχείο του περιβλήματος των κελιών, αποκλείει την εφαρμογή τους σε μεγάλες εγκαταστάσεις. [5][6][22]

## 1.5 Οργανικά φ/β κελιά

Τα οργανικά και πολυμερή φ/β κελιά κατασκευάζονται από λεπτά υμένα (100nm) οργανικών ημιαγωγών όπως πολυμερή και στοιχεία που αποτελούνται από μικρομόρια, όπως το πεντακένιο ( $C_{22}H_{14}$ ), polyphenylene vinylene ( $C_8H_6$ )<sub>n</sub>, φθαλοκυανίνη χαλκού (μία μπλε και πράσινη οργανική χρωστική) και φουλερένια άνθρακα. Η απόδοση που παρουσιάζουν σήμερα τα οργανικά φ/β κυμαίνεται γύρω στο 4.2%<sup>[1][24][25]</sup>, αγγίζοντας όμως τιμές της τάξης του 10%<sup>[48]</sup> σε εργαστηριακό επίπεδο, αν και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον που παρουσιάζουν σαν τεχνολογία είναι η ευελιξία στην εφαρμογή και στην απόσυρσή τους. Το γεγονός πως ουσιαστικά πρόκειται για πλαστικό εξασφαλίζει το χαμηλό κόστος κατασκευής καθώς δεν εμφανίζονται τεχνικές δυσκολίες στην παραγωγή, λόγω της ήδη υπάρχουσας τεχνογνωσίας, ενώ ταυτόχρονα δεν απαιτούνται ακραίες συνθήκες για την παρασκευή τους (υψηλές θερμοκρασίες, πιέσεις κενού).

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο ζευγάρι δότης-αποδέκτης. Η ηλιακή ακτινοβολία ενεργοποιεί το δότη ο οποίος προκαλεί το ηλεκτρόνιο να μεταφερθεί στην περιοχή του αποδέκτη αφήνοντας μια οπή πίσω του για να επαναληφθεί ο κύκλος. Τα φορτία λοιπόν, δημιουργούμενα από την ηλιακή ακτινοβολία μεταφέρονται στα αντίθετα ηλεκτρόδια για να χρησιμοποιηθούν πριν ανασυνδυαστούν.

Τα οργανικά φ/β κελιά παρουσιάζουν ορισμένες διαφορές σε σχέση με τα ανόργανα (κελιά πυριτίου):

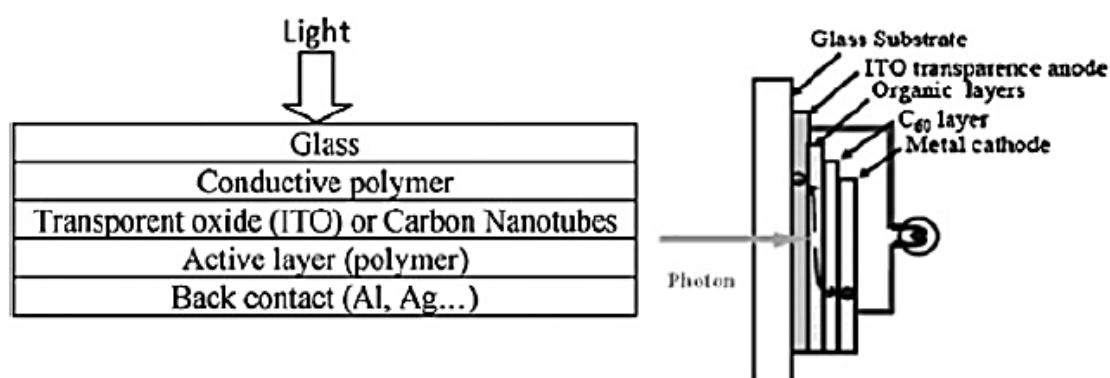
- Τα ζευγάρια δότη-αποδέκτη δεν δημιουργούνται αυθόρμητα, καθώς απαιτούν περίπου 100meV για την διέγερσή τους, σε αντίθεση με τα κελιά κρυσταλλικού πυριτίου που απαιτούν μόλις μερικά meV. Αυτό συνεπάγεται πως η δημιουργία του φορτίου πιθανώς δεν προέρχεται εξ 'ολοκλήρου από την ηλιακή ακτινοβολία.
- Η μεταφορά των φορτίων πραγματοποιείται μεταξύ συγκεκριμένων καταστάσεων (φάσεων) και όχι με την μεταφορά μέσω μιας ζώνης, όπου οι κινητικότητες είναι χαμηλότερες.
- Το φασματικό εύρος της απορροφώμενης ακτινοβολίας είναι μικρότερο από το ηλιακό φάσμα.
- Ο συντελεστής απορρόφησης ακτινοβολίας είναι αρκετά μεγάλος ( $10\text{cm}^{-1}$ ), εξασφαλίζοντας πως με μικρό πάχος κελιού η απόδοση θα είναι αρκετά υψηλή.

- Παρουσιάζουν μεγάλη ανθεκτικότητα στο οξυγόνο και το νερό.
- Σαν ημιαγωγοί μίας διάστασης, η ηλεκτρονική και οπτική συμπεριφορά τους δύνανται να είναι ιδιαίτερα ανισότροπη καθιστώντας τους ιδιαίτερα χρήσιμους στο σχεδιασμό ηλεκτρονικών συσκευών.

Τα πρώτα δύο χαρακτηριστικά οφείλονται στο γεγονός πως οι διαμοριακές δυνάμεις Van der Waals στα οργανικά στερεά είναι πιο αδύναμες σε σχέση με τους δεσμούς των ανόργανων στερεών. Συνεπώς, όλες οι ηλεκτρονικές φάσεις περιορίζονται σε περιορισμένες μοριακές περιοχές και δεν δημιουργούν ζώνες. Ακόμη, η χαμηλή κινητικότητα επιδεινώνεται λόγω της άτακτης δομής που επικρατεί στα οργανικά στερεά.

### Αρχές λειτουργίας

Η απλούστερη δομή ενός οργανικού φ/β κελιού είναι ένα στρώμα οργανικού υλικού να τοποθετείται ανάμεσα σε δύο διαφορετικές αγωγίμες επαφές, συνήθως οξειδίο του κασσιτέρου με ίνδιο (ITO) και μέταλλα όπως Al, Ca ή Mg. Η διαφορά στο θερμοδυναμικό έργο, που απαιτείται για την απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου από την επιφάνεια του στερεού, παρέχει το κατάλληλο ηλεκτρικό πεδίο για να οδηγήσει τους διαχωρισμένους φορείς φορτίου στις αντίστοιχες επαφές (μια τραχεία αναλογία με την p-i-n ένωση του άμορφου πυριτίου). Το ηλεκτρικό πεδίο αυτό είναι σπάνια επαρκές ώστε να διασπάσει την φωτο-δημιουργούμενη διέγερση. Αντίθετα, η διέγερση αυτή

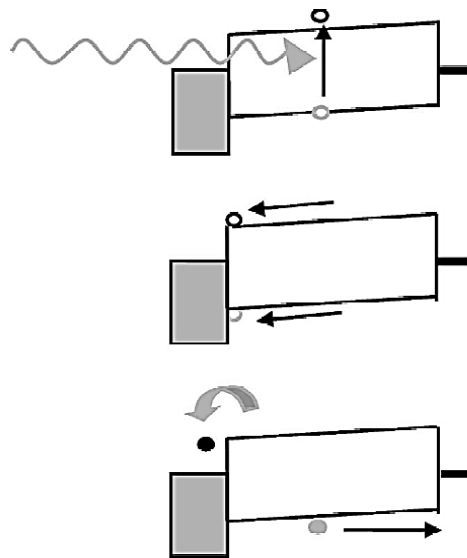


Εικόνα 25 Οργανικό φ/β κελί. <sup>[6]</sup>

διαχέεται στο οργανικό επίπεδο μέχρι να φτάσει μια επαφή, όπου δύναται να διασπαστεί σε μικρότερα φορτία ή να επανασυνδυαστεί.

## Ομοσυνδέσεις

Τα φ/β οργανικά κελιά ενός επιπέδου αυτού του τύπου παρουσιάζουν κβαντικές αποδόσεις της τάξης του 0.1%. Με τον όρο κβαντική απόδοση ορίζουμε το λόγο του αριθμού των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται στο εξωτερικό κύκλωμα ανά προσπίπτον φωτόνιο σε δεδομένο μήκος κύματος και αποτελεί το μέτρο της αξίας των οργανικών φ/β. Ταυτόχρονα, η απόδοση όσον αφορά στη μετατροπή σε ηλεκτρικό ρεύμα είναι κάτω από 1%. Η κβαντική απόδοση που παρουσιάζεται ως σήμερα απέχει κατά πολύ από εκείνη των ανόργανων φ/β που βρίσκεται ανάμεσα στο 80-90% <sup>[23]</sup>.

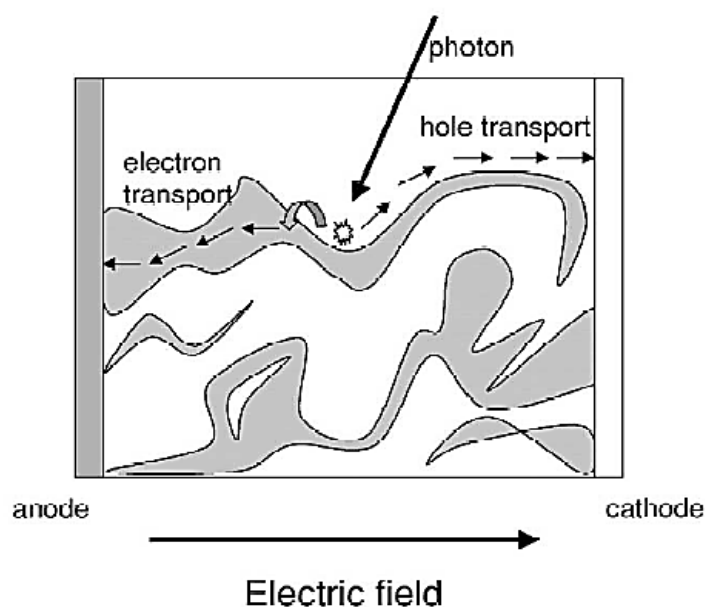


*Εικόνα 26 Τυπική διάταξη που περιγράφει μια απλή συσκευή που αποτελείται από ένα οργανικό επίπεδο ανάμεσα σε δύο μεταλλικές επαφές. Τα απορροφώμενα φωτόνια δημιουργούν ζευγάρια ηλεκτρονίων και οπών τα οποία διαχέονται προς τις επαφές δημιουργώντας φορτία. Μόνο το επίπεδο του οργανικού υλικού που βρίσκεται εντός του εύρους διάχυσης των ζευγών μιας επαφής μπορεί να συμμετάσχει στο φωτο-ρεύμα.* <sup>[23]</sup>



## Ετεροσυνδέσεις και διεσπαρμένες Ετεροσυνδέσεις

Η μεγαλύτερη ανάπτυξη που έχει πραγματοποιηθεί στα οργανικά φ/β αφορά τον τομέα των ετεροσυνδέσεων δότη-αποδέκτη. Σε αυτή τη διεπαφή μεταξύ διαφορετικών υλικών, δημιουργούνται ηλεκτροστατικές δυνάμεις, αποτέλεσμα της ηλεκτρονιο-συγγένειας και του δυναμικού ιονισμού. Στην περίπτωση που και τα δύο παραπάνω



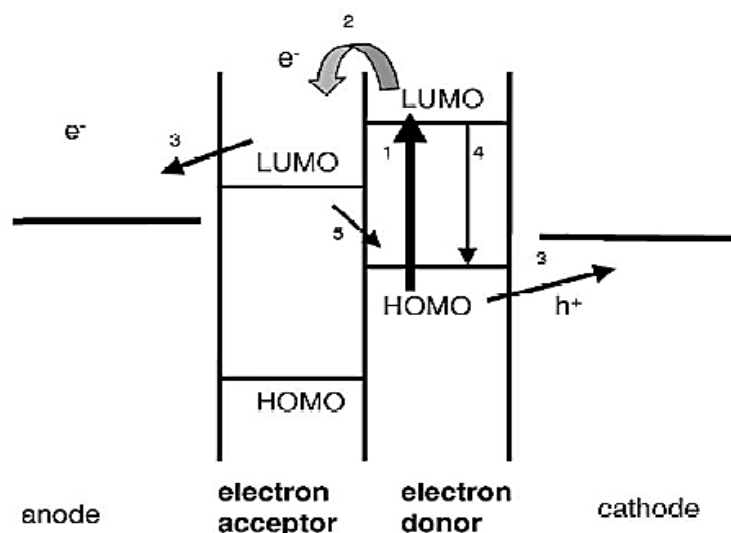
*Εικόνα 27 Τα υλικά του δότη και του αποδέκτη δύνανται να αναμειχθούν προς τη δημιουργία μιας διεσπαρμένης ετεροσύνδεσης. Εάν η κλίμακα απόστασης του μείγματος είναι παρόμοια με εκείνη της απόστασης διάχυσης του ζεύγους ελεύθερου ηλεκτρονίου-οπής, τότε η πιθανότητα εκείνο να φτάσει την διεπαφή και να αποσπαστεί είναι μεγάλη. Για αποτελεσματική δημιουργία φωτο-ρεύματος, κάθε υλικό οφείλει να παρέχει ένα συνεχές μονοπάτι για την μεταφορά των ξεχωριστών φορτίων στις επαφές. Απομονωμένες περιοχές μπορούν να εγκλωβίσουν φορτία και να προκαλέσουν ανασυνδυασμό.<sup>[23]</sup>*

χαρακτηριστικά είναι μεγαλύτερα στο ένα υλικό (αποδέκτης) σε σχέση με το άλλο (δότης) τότε δημιουργείται το κατάλληλο φορτίο για τη διέγερση των ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρικά πεδία που αναπτύσσονται είναι αρκετά ισχυρά έτσι ώστε να μπορέσουν να διαχωρίσουν τα δεσμευμένα ζεύγη (ηλεκτρονίων-οπών). Στην περίπτωση των ετεροσυνδέσεων, τα ζεύγη δοτών-αποδεκτών διαχωρίζονται πιο αποτελεσματικά σε σχέση με την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού που προκαλείται από τις μεταλλικές διεπαφές στις μονοστρωματικές διατάξεις<sup>[23]</sup>. Μια εξέλιξη των ετεροσυνδεδεμένων διατάξεων είναι οι διεσπαρμένες ετεροσυνδέσεις, όπου οι δότες και αποδέκτες είναι αναμειγμένοι άτακτα. Περαιτέρω εξέλιξη αφορά η σταδιακή διαφοροποίηση του μείγματος. Εάν η έκταση του μείγματος είναι περίπου ίση με το μήκος που επηρεάζει η διάχυση των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών, τότε όταν εκείνο



δημιουργηθεί από οποιοδήποτε υλικό, είναι πιθανό να διαχυθεί σε μια διεπαφή και να διαχωριστεί. Στην περίπτωση που υπάρχει συνεχές μονοπάτι σε κάθε υλικό από την διεπαφή προς τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια, τότε οι διαχωρισμένοι φορείς φορτίων μπορούν να μεταφερθούν στις επαφές δίδοντας ηλεκτρικό ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα.

Η κβαντική απόδοση της διάταξης των δύο επιπέδων είναι γύρω στο 9% με απόδοση 1%. Στη δεύτερη περίπτωση, της αναμειγμένης ετεροσύνδεσης τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 45% και 1%. Στην τελευταία περίπτωση της σταδιακής διαφοροποίησης του μείγματος, η κβαντική απόδοση βρίσκεται στο 50% και η απόδοση των κελιών στο 2.1%. [23]



*Εικόνα 28 Σχηματικό διάγραμμα της ζώνης ενεργειακού διακένου σε μια ετερο-σύνδεση δότη-αποδέκτη. Εάν τόσο η διεγερμένη (LUMO), όσο και η σταθερή κατάσταση (HOMO) του υλικού του δότη βρίσκονται ενεργειακά υψηλότερα από εκείνες του αποδέκτη, τότε είναι ενεργειακά ευκολότερη η μεταφορά μετά τη δημιουργία ελεύθερου ηλεκτρονίου και κατ' επέκταση οπής, στη διεπαφή δημιουργώντας ένα θετικό φορτίο στον αποδέκτη και ένα αρνητικό στο δότη. Για αποδοτική δημιουργία φωτο-ρεύματος, ο διαχωρισμός των φορτίων (2) πρέπει να πραγματοποιηθεί επιτυχώς με ανασυνδυασμό (4) μετά το γεγονός της απορρόφησης των φωτονίων (1) και η μεταφορά στις επαφές (3) οφείλει να ολοκληρωθεί με ανασυνδυασμό στη διεπαφή (5). [23]*

Ολοκληρώνοντας, η έρευνα στην οργανική φ/β τεχνολογία προσανατολίζεται στη βελτίωση απορρόφησης του ηλιακού φωτός, στη βελτίωση παραγωγής φωτο-ρεύματος, στη βελτίωση μεταφοράς φορτίου, στην αντιμετώπιση κατασκευαστικών δυσκολιών προς επίτευξη σταθερότητας και τέλος στην κατανόηση των ορίων της κατασκευής όσον αφορά στην απόδοσή της.

## 1.6 Η νανοτεχνολογία στην παραγωγή φ/β κελιών

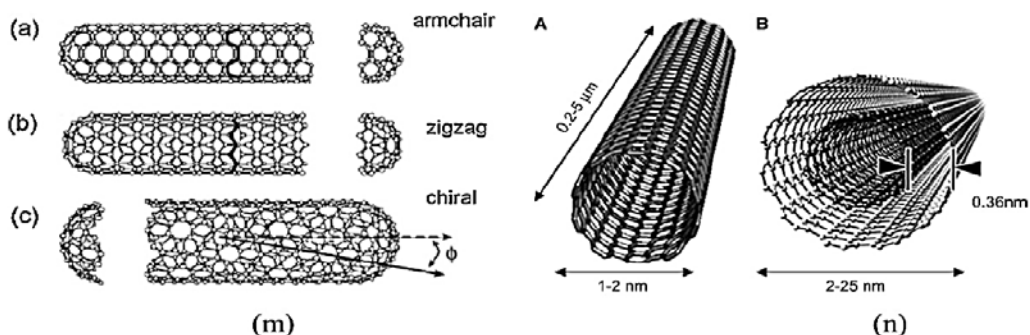
Εκτός από την ακατάπαυστη αναζήτηση νέων εξελιγμένων υλικών για την κατασκευή φ/β κελιών με όλο και μεγαλύτερη απόδοση, η έρευνα κινείται ταυτόχρονα και στην κατεύθυνση της αλλαγής του τρόπου με τον οποίο δομούνται τα φ/β κελιά. Η νανοτεχνολογία ή διαφορετικά 3<sup>η</sup> γενιά φ/β, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του ενεργειακού διάκενου με την βοήθεια συστατικών μεγέθους νανο-μορίων. Η τεχνολογία αυτή περιλαμβάνει: νανοσωλήνες άνθρακα (Carbon nanotubes -CNT), Κβαντικές Κηλίδες (Quantum Dots -QDs) και φ/β κελιά Θερμού Φορέα (Hot Carrier-HC) <sup>[6][26]</sup>.

Η χρήση των εν λόγω τεχνολογιών συνοδεύεται από ορισμένα πλεονεκτήματα:

- i. Βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά υλικών.
- ii. Μικρό κόστος.
- iii. Χαμηλό βάρος.
- iv. Καλές ηλεκτρικές αποδόσεις.

### 1.6.1 Νανοσωλήνες άνθρακα (CNT)

Οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι μοριακού μεγέθους σωλήνες, οι οποίοι αποτελούνται από επάλληλα εξαγωνικά πλέγματα άνθρακα με εξαιρετικές μηχανικές και ηλεκτρονικές ιδιότητες <sup>[26]</sup>. Η δομή ενός νανοσωλήνα μπορεί να παρασταθεί ως ένας πίνακας (ν-γραμμών, μ-στηλών), που περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο το φύλλο γραφενίου (ένα ξεχωριστό στρώμα γραφίτη) έχει διαταχθεί στο χώρο. Υπάρχουν δύο (2) είδη νανοσωλήνων άνθρακα, οι μονοφλοιϊκοί (single-walled) και οι πολυφλοιϊκοί (multi-walled) (Εικόνα 29). Στην πρώτη περίπτωση, ένα φύλλο γραφίτη έχει τυλιχθεί παίρνοντας τη μορφή κυλίνδρου ενώ στη δεύτερη περίπτωση εμφανίζεται μια διάταξη από ομόκεντρους κυλίνδρους γραφίτη <sup>[42]</sup>. Η ουσία της χρήσης νανοσωλήνων άνθρακα στην παραγωγή φ/β κελιών έγκειται στο γεγονός πως μετά την επικάλυψη των επιφανειών τους με p και n ημιαγωγούς δημιουργώντας p-n ενώσεις, η συνολική επιφάνεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες.



Εικόνα 29 Νανωσωλήνες άνθρακα μονού και διπλού τοιχώματος. <sup>[1]</sup>

Πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα από το πανεπιστήμιο Cornell, υποδεικνύουν πως ερευνητές έχουν καταφέρει να δημιουργήσουν τα βασικά χαρακτηριστικά ενός φ/β κελιού με τη βοήθεια νανωσωλήνων που μπορεί να αυξήσει ιδιαίτερα τη μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Πρόκειται για την κατασκευή μιας φωτοδιόδου που βασίζεται στην χρήση ενός απλού νανωσωλήνα άνθρακα. Περιγράφεται πως η συγκεκριμένη διάταξη μετατρέπει το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια με ιδιαίτερα αποδοτικό τρόπο πολλαπλασιάζοντας την τιμή της.

Σήμερα, οι νανωσωλήνες χρησιμοποιούνται ως διάφανα ηλεκτρόδια για αποδοτικά και εύελικτα πολυμερή φ/β κελιά. Dye-sensitized νανωσωλήνες φθαλοκυανίνης νατρίου (NaPc) έχουν αναπτυχθεί με αποτέλεσμα υψηλό φορτίο κλειστού κυκλώματος αλλά χαμηλή τάση ανοιχτού κυκλώματος. <sup>[44]</sup>

Οι αποδόσεις των νανωσωλήνων άνθρακα είναι ακόμα περιορισμένες και κυμαίνονται ανάμεσα στο 3-4%. Ωστόσο, οι έρευνες συνεχίζονται.

### 1.6.2 Κβαντικές κηλίδες (Quantum Dots -QDs)

Τα φ/β κελιά βασισμένα στην τεχνολογία κβαντικών κηλίδων, αποτελούνται από κρυστάλλους-ημιαγωγούς διαστάσεων μερικών νανομέτρων, οργανωμένους με κατάλληλο τρόπο έτσι ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση του ενεργειακού διακένου <sup>[1]</sup>. Οι κρύσταλλοι-ημιαγωγοί αποτελούνται από στοιχεία επιλεγμένα από τις II-VI, III-V, ή IV-VI ομάδες του περιοδικού πίνακα. Ένα φ/β κελί με μεγάλο ενεργειακό διάκενο από ημιαγωγούς είναι ικανό να απορροφήσει τα περισσότερα ενεργητικά φωτόνια δημιουργώντας υψηλότερη τάση στην έξοδο. Αντίθετα, ένα φ/β κελί με χαμηλότερο ενεργειακό διάκενο δύναται να απορροφήσει φωτόνια που βρίσκονται στο κόκκινο του φάσματος αποδίδοντας υψηλότερη τιμή του ρεύματος στην έξοδο και μικρότερη τάση.

Για τους παραπάνω λόγους τα κελιά βασισμένα στην εν λόγω τεχνολογία χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας. Σήμερα, οι ερευνητές στοχεύουν στην αύξηση της απόδοσης της τεχνολογίας κβαντικών κηλίδων. Για το λόγο αυτό, ο σχεδιασμός μιας τρισδιάστατης διάταξης, μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων, είναι απαραίτητος έτσι ώστε να αυξηθεί ο χρόνος ζωής των ζευγαριών ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών για την συλλογή και μεταφορά των θερμών φορέων προς την παραγωγή υψηλότερης τάσης.

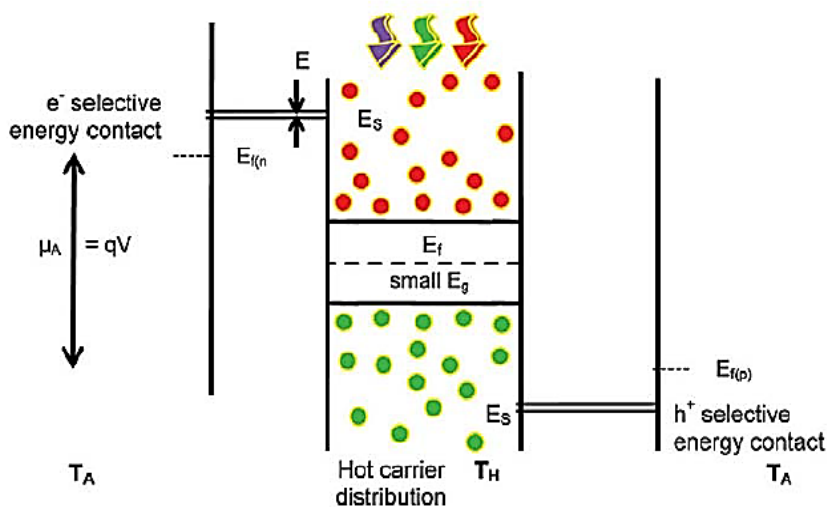
Η αρχή λειτουργίας των κβαντικών κηλίδων έχει εφαρμοστεί για διαφορετικούς συνδυασμούς ημιαγωγικών υλικών και αναφέρεται χαρακτηριστικά: όταν χρησιμοποιείται το GaAs, το κελί έχει ένα υψηλό πλεονέκτημα στην έξοδο αλλά είναι πολύ ακριβότερο σε σχέση με τα σχέδια διατάξεων που είναι βασισμένα στο ημιαγωγικό πυρίτιο, όπως το πυρίτιο-διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{Si-SiO}_2$ ), πυρίτιο-καρβίδιο του πυριτίου ( $\text{Si-SiC}$ ) ή πυρίτιο-νιτρίτης του πυριτίου ( $\text{Si-Si}_3\text{N}_4$ ).

### 1.6.3 Φ/β κελιά Θερμού Φορέα (Hot carrier-HC)

Ένας ακόμη τρόπος για να αυξηθεί η απόδοση των φ/β κελιών είναι η επιτρεπόμενη απορρόφηση ενός φάσματος ενεργειών φωτονίων με την σωστά χρονισμένη συλλογή των φωτοδιεγερμένων φορέων πριν το σημείο που εκείνοι έρχονται σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον τους. Ένα φ/β κελί θερμού φορέα εμφανίζει αποδόσεις της τάξεως του 65% χωρίς την χρήση τεχνολογιών συγκέντρωσης (concentration) του φωτισμού, βασισμένο ωστόσο σε μια γενικά απλή διάταξη σε σχέση με τα υψηλής απόδοσης συμβατικά φ/β κελιά <sup>[45]</sup>. Το γεγονός αυτό προκύπτει από τη χρήση τεχνικών κατασκευής λεπτού υμενίου διατηρώντας τις χαμηλές ποσότητες υλικού που απαιτούνται, το χαμηλό κόστος και τη δυνατότητα χρήση μη-τοξικών υλικών τα οποία βρίσκονται σε αφθονία στη φύση.

Η ιδέα πίσω από τα φ/β κελιά θερμού φορέα στηρίζεται στην καθυστέρηση ψύξης του φωτοδιεγερμένου φορέα. Η αρχικά υψηλή του θερμοκρασία οφείλεται στη αλληλεπίδραση των μορίων στο κρυσταλλικό πλέγμα. Έτσι, δίδεται η δυνατότητα στους φορείς να συλλεχθούν ενώ βρίσκονται ακόμα σε υψηλή ενεργειακή κατάσταση. Αποτελεσματικά, το κελί μπορεί να αποδώσει αρκετά υψηλές τιμές τάσης στην έξοδο. Ακόμη, εκτός από τη χρήση των απορροφητικών υλικών (absorber materials) που μειώνουν τον ρυθμό ψύξης του φορέα, ένα φ/β κελί θερμού φορέα οφείλει να

εξασφαλίζει την έξοδο των φορέων από τη διάταξη διαμέσου επαφών που δέχονται μόνο ένα πολύ συγκεκριμένο εύρος τιμών ενέργειας. <sup>[46]</sup>



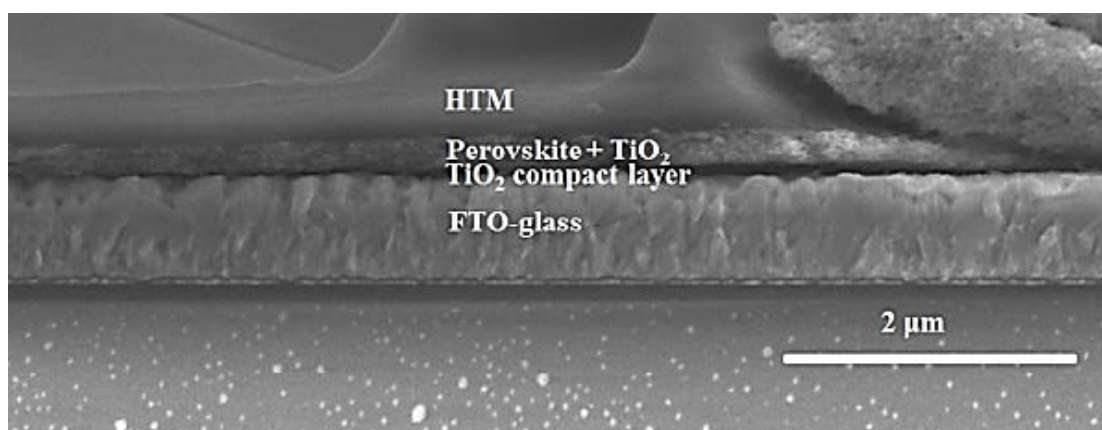
Εικόνα 30 Διάγραμμα ζώνης του HC κελιού που χρειάζεται αργή ψύξη των φορέων κατά την απορρόφηση και συλλογή τους μέσα από επιλεκτικές επαφές με βάση την ενέργεια. <sup>[27]</sup>

### 1.7 Φ/β κελιά βασισμένα σε περβοσκίτες

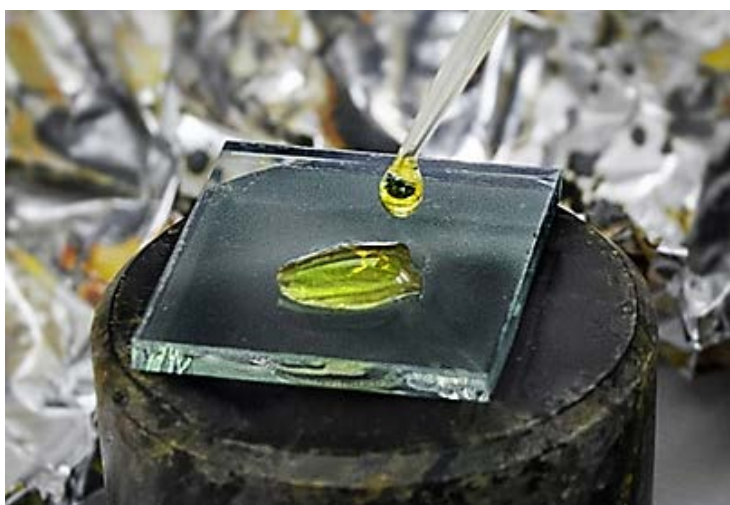
Οι περβοσκίτες είναι μια ομάδα κρυσταλλικών ορυκτών τα οποία είναι γνωστά στην επιστημονική κοινότητα για πάνω από έναν αιώνα. Ωστόσο, οι ιδιότητες που τα καθιστούν κατάλληλα για εφαρμογή τους σε φ/β κελιά δεν ήταν γνωστή μέχρι το 2009. Εντός λίγων ετών, η αρχική τους απόδοση του 3.8% άγγιξε το 19.3%. Αξίζει να σημειωθεί πως η ραγδαία αυτή αύξηση της απόδοσης είναι πρωτόγνωρη αν αναλογιστεί κανείς πως η συμβατική τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου φτάνει σήμερα το 23% με το χρόνο που απαιτήθηκε για την εξέλιξη αυτή να είναι πολύ μεγαλύτερος <sup>[50]</sup>.

Ένα βασικό μειονέκτημα των ιδιαίτερα αποδοτικών περβοσκιτών είναι πως περιέχουν στη σύστασή τους μόλυβδο. Το γεγονός αυτό δημιουργεί ένα σημαντικό εμπόδιο στην ευρεία εμπορευματοποίηση τους καθώς ο μόλυβδος είναι ιδιαίτερα ευδιάλυτος στο νερό καθιστώντας τα μη εφαρμόσιμα σε οικιακές φ/β εγκαταστάσεις. Σήμερα όμως, έχουν πραγματοποιηθεί ορισμένες ανεξάρτητες έρευνες για την παραγωγή φ/β κελίων με περβοσκίτες απαλλαγμένα από μόλυβδο. Η απόδοση που επέτυχαν οι δύο ερευνητικές ομάδες είναι 6.4% <sup>[53]</sup> (Henry Snaith, Πανεπιστήμιο της Οξφόρδης, Ηνωμένο Βασίλειο) και 5.73% (Robert Chang, Πανεπιστήμιο Northwestern, Illinois, ΗΠΑ).

Για την παρουσίαση των κελιών βασισμένα σε περβοσκίτες απαλλαγμένα από μόλυβδο θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος και συσκευή της πρώτης ομάδας. Στη συγκεκριμένη κατασκευή χρησιμοποιήθηκε ο περβοσκίτης, methylammonium tin triiodide ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ ) σαν φωτο-ενεργό υλικό. Συνοπτικά, φύλλα γυαλιού επενδυμένα με FTO επεξεργάστηκαν με τη χρήση σκόνης ψευδαργύρου και υδροχλωρικού οξέος προκειμένου να αποκτήσουν ένα συγκεκριμένο μοτίβο ηλεκτροδίων.



Εικόνα 31 Τομή της διάταξης κελιού περβοσκίτη απαλλαγμένο από μόλυβδο όπως προτάθηκε από την ομάδα του πανεπιστημίου της Οξφόρδης.<sup>[53]</sup>



Εικόνα 32 Εφαρμογή του ειδικού διαλύματος για την παραγωγή ενός κελιού περβοσκίτη.<sup>[51]</sup>

Μετά από καθαρισμό, εφαρμόστηκε πλάσμα οξυγόνου για την απομάκρυνση των τελευταίων ιχνών οργανικών καταλοίπων. Στη συνέχεια, ένα παχύ, συμπαγές στρώμα  $\text{TiO}_2$  τοποθετήθηκε πάνω στη γυάλινη επιφάνεια με τη χρήση ισοπροποξειδίου του τιτανίου διαλυμένο σε άνυδρη αιθανόλη και θερμαινόμενο στους  $500^\circ\text{C}$ . Μόλις το υπόστρωμα ψυχθεί, το στρώμα  $\text{TiO}_2$ , πάχους 400nm τοποθετείται πάνω στη γυάλινη



επιφάνεια. Ακολουθεί ύστερα θέρμανση στους 500°C για 45 λεπτά. Το φωτο-ενεργό υλικό  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$  δημιουργήθηκε με την ανάμειξη  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  και  $\text{SnI}_2$  σε τελική συγκέντρωση 40% κ.β. σε N-διμεθυλοφορμαμίδιο (DMF). Το τελικό διάλυμα απλώνεται έπειτα, ομοιόμορφα πάνω στο επενδυμένο με  $\text{TiO}_2$  υπόστρωμα εντός αδρανούς ατμόσφαιρας. Ακολουθεί, η διάλυση εντός του υπάρχοντος στρώματος του υλικό μεταφοράς οπών. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 31. Τελικό στάδιο της διαδικασίας αποτελεί η τοποθέτηση ηλεκτροδίων από χρυσό, πάχους 50nm. Ύστερα, η συσκευή ασφαλίζεται με την χρήση ενός εύτηκτου πολυμερούς και εποξειδικής ρητίνης.

Σύμφωνα με εκτιμήσεις οι ερευνητές θα προσεγγίσουν τα κελιά περβοσκίτη είτε προσπαθώντας να επιτύχουν τη μεγαλύτερη απόδοση ημιαγωγού χωρίς να υπολογίσουν το κόστος κατασκευής είτε θα προσπαθήσουν να εφαρμόσουν την πιο οικονομική μέθοδο κατασκευής. Θεωρείται πως οι δύο αυτοί δρόμοι θα συγκλίνουν λαμβάνοντας υπ' όψιν τα εκάστοτε πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα <sup>[52]</sup>. Είναι σημαντικό πως διάφορες ερευνητικές ομάδες ανά τον κόσμο επιτυγχάνουν υψηλές αποδόσεις χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους η κάθε μια.

Η θεωρητική απόδοση των φ/β κελιών περβοσκίτη υπολογίζεται γύρω στο 31%. Ωστόσο, σε πιθανές εφαρμογές εντός διατάξεων πολλαπλών ενώσεων οι αποδόσεις αναμένονται να είναι μεγαλύτερες <sup>[51]</sup>.

### 1.8 Φ/β κελιά οπίσθιας επαφής

Τα φ/β κελιά οπίσθιας επαφής στη γενικότερή τους δομή ξεχωρίζουν διότι τόσο η θετική όσο και η αρνητική εξωτερική επαφή τους τοποθετείται στη πίσω επιφάνεια του κελιού σε αντίθεση με τη συμβατική δομή των φ/β κελιών που έχει παρουσιαστεί έως τώρα.

Η διαφοροποίηση αυτή στη δομή δεν επιτρέπει μονάχα αυξημένη απόδοση του πλαισίου λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας στοίβαξης των κελιών αλλά μετατρέπει την εξωτερική επιφάνεια σε ένα ομοιόμορφο μαύρο επίπεδο. Επιπροσθέτως, όπως συμβαίνει και με τα κελιά λεπτού υμενίου, είναι ευλύγιστα και το χαρακτηριστικό αυτό σε συνδυασμό με την αυξημένη απόδοση λόγω εφαρμοζόμενης τεχνολογίας (κρυσταλλικό πυρίτιο), τα καθιστά ιδανική λύση για ενσωμάτωση σε κτιριακές υποδομές. Επιπλέον, οι απώλειες λόγω σκίασης και αντιστάσεων στις μεταλλικές επαφές μειώνονται αισθητά.

Η ανάπτυξη των φ/β κελιών οπίσθιας επαφής ξεκίνησε πριν περίπου 40 έτη, ύστερα από τις πρώτες δημοσιεύσεις του R.J Schwartz το 1975. Έκτοτε, έχουν παρουσιαστεί αρκετές αρχιτεκτονικές οι οποίες θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Ανάμεσά τους βρίσκονται οι: Metallisation Wrap-Through (MWT), Emitter Wrap-Through (EWT) και οι Back-Junction (BJ) αρχιτεκτονικές. <sup>[56]</sup>

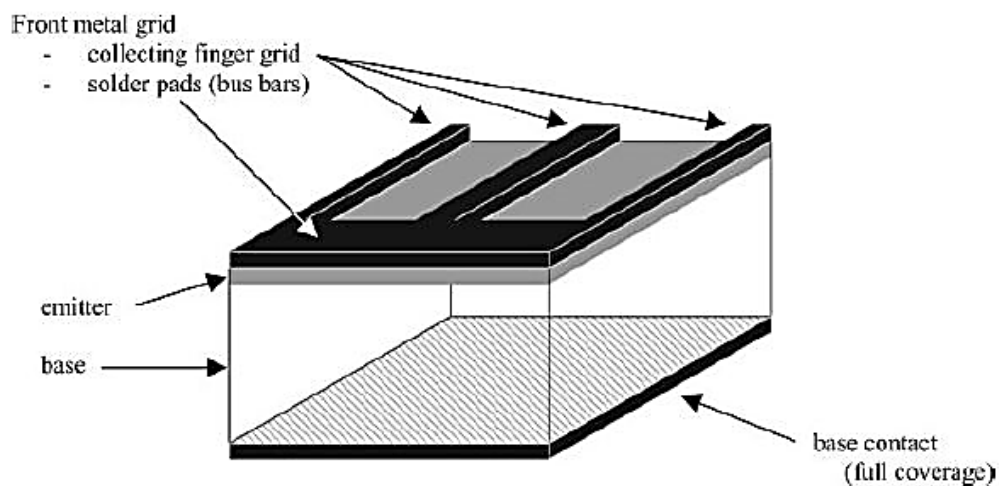
Στην Εικόνα 33 φαίνεται η απλούστερη δομή ενός φ/β κελιού κρυσταλλικού πυριτίου. Η βάση πυριτίου είναι το κύριο τμήμα της κατασκευής. Ο εκπομπός (emitter) βρίσκεται κοντά στην πάνω όψη-επιφάνεια της δομής. Το μεταλλικό δίκτυο χρησιμοποιείται για τη ανάκτηση των φορέων μέσα από το πυρίτιο. Πολλοί κατασκευαστές τοποθετούν στο εμπρόσθιο μεταλλικό δίκτυο τις παράλληλες επαφές που ενώνονται σε κεντρικότερα τοποθετημένες παχύτερες μεταλλικές μπάρες, που χρησιμοποιούνται για τη επαφή με εξωτερικές συνδέσεις.

Τα κελιά με δομή MWT κατέχουν την κοντινότερη συγγένεια με τα συμβατικά κελιά, όπως εκείνα παρουσιάστηκαν την προηγούμενη παράγραφο. Στα εν λόγω κελιά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 34, ο εκπομπός βρίσκεται επίσης κοντά στην πάνω επιφάνεια, αλλά οι μεταλλικές μπάρες για τη επαφή με εξωτερικές συνδέσεις έχουν μεταφερθεί στην πίσω όψη. Η ένωση των παράλληλων επαφών της πάνω όψης ενώνονται με τις οπίσθιες με την βοήθεια ειδικών συνδέσεων που διατρέχουν το κελί καθ' ύψος.

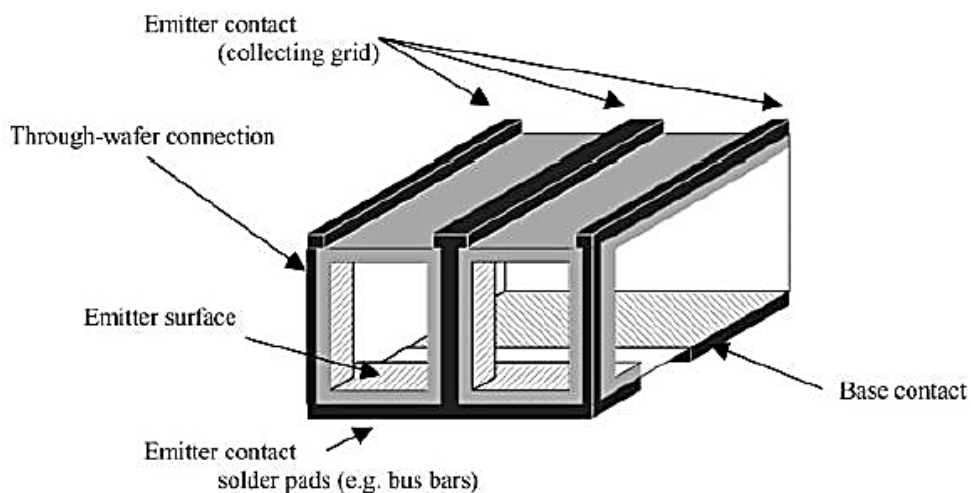
Τα κελιά αρχιτεκτονικής EWT (Εικόνα 35), απόδοσης περίπου 21.6% <sup>[58]</sup> χαρακτηρίζονται από την απουσία μεταλλικών στοιχείων στην εμπρόσθια επιφάνεια του κελιού. Παρά το γεγονός πως ο εκπομπός βρίσκεται πολύ κοντά στην πάνω επιφάνεια, όλες οι μεταλλικές επαφές είναι στην πίσω επιφάνεια.

Στην τελευταία αρχιτεκτονική (BJ) (Εικόνα 36), τόσο ο εκπομπός όσο και οι επαφές, τοποθετούνται στην οπίσθια όψη του φ/β κελιού. Η μέγιστη απόδοση που παρατηρείται είναι 14.7% <sup>[57]</sup>.

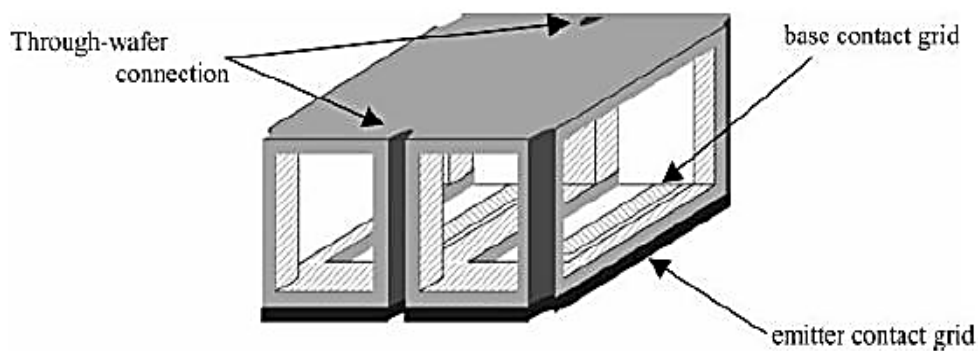




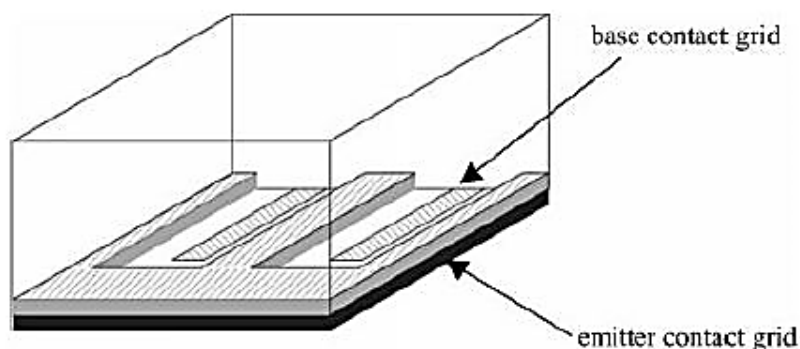
Εικόνα 33 Η αρχιτεκτονική ενός συμβατικού κελιού. [56]



Εικόνα 34 Η αρχιτεκτονική ενός Wrap-Through φ/β κελιού. [56]



Εικόνα 35 Η αρχιτεκτονική ενός Emitter Wrap-through φ/β κελιού. [56]



Εικόνα 36 Η αρχιτεκτονική ενός Back-Junction φ/β κελιού. [56]

### 1.9 Συγκεντρωτικά φ/β συστήματα

Οι φ/β πλάκες μπορεί να φανούν μη αποτελεσματικοί στην απορρόφηση του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας στην οποία εκτίθενται τόσο λόγω της γεωμετρίας τους, όσο και της μεταβαλλόμενης πυκνότητας της ακτινοβολίας που παρουσιάζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Μια εναλλακτική τεχνολογία που δύναται να εφαρμοστεί και να μεγιστοποιήσει την απορροφώμενη ηλιακή ακτινοβολία είναι η χρήση συγκεντρωτικών φ/β συστημάτων (ΣΦΣ). Τα εν λόγω συστήματα χρησιμοποιούν ειδικούς φακούς ή κάτοπτρα για να συγκεντρώσουν την ηλιακή ακτινοβολία σε μια μικρή περιοχή για την αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι διατάξεις αυτές εφαρμόζονται στους φ/β ιχνηλάτες, οι οποίοι ακολουθούν την πορεία του ήλιου. Όσο η θερμοκρασία των φ/β κελιών διατηρείται σε συγκεκριμένα επίπεδα, τόσο τα φ/β κελιά θα λειτουργούν με μεγάλη απόδοση. Εάν η συγκεκριμένη τεχνολογία εγκατασταθεί σε μεγάλα φ/β πάρκα, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποδοτική μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα. [54]

Αυτή τη στιγμή τα μόνα διαθέσιμα συγκεντρωτικά φ/β κελιά είναι εκείνα που έχουν την μορφή ενός παραβολικού αυλακιού (Εικόνα 37). Χρησιμοποιούν κάτοπτρα με συγκεκριμένο σχήμα για να επικεντρώσουν το ηλιακό φως σε θερμικά αγωγίμους σωλήνες που εμπεριέχουν υγρό κατάλληλο για μεταφορά θερμότητας. Το υγρό αυτό θερμαίνεται στους 390°C και αντλείται μέσα σε μια σειρά από εναλλάκτες θερμότητας για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού που με τη βοήθεια ενός αμοστροβίλου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. [49][54]

Οι αποδόσεις των συγκεντρωτικών φ/β συστημάτων ποικίλουν ανάλογα με την τεχνολογία των εκάστοτε φ/β κελιών, τον λόγο συγκέντρωσης ακτινοβολίας, το είδος των οπτικών και τη γεωμετρία. Για τον παραπάνω λόγο πραγματοποιείται η

ομαδοποίηση των εφαρμοζόμενων συστημάτων σε τρεις ομάδες όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 1). Στην πρώτη, θα βρίσκονται τα πολλαπλής διάταξης φ/β κελιά με βάση το GaAs, τα οποία απαιτούν λόγω του υψηλού κόστους τους, μεγάλης τάξης λόγο συγκέντρωσης. Στη δεύτερη ομάδα, μέσης τάξης συγκέντρωσης, περιέχονται κελιά που απαιτούν πυρίτιο στις διατάξεις τους ή άλλα είδη φ/β κελιών και τέλος στην τρίτη ομάδα βρίσκονται τα συμβατικά κελιά πυριτίου με βελτιωμένη απόδοση λόγω χρήσης κατόπτρων.

**Πίνακας 1. Ομαδοποίηση Συγκεντρωτικών φ/β τεχνολογιών.** <sup>[49]</sup>

Ομάδα	Τάξη ΣΦΣ	Τυπικός λόγος συγκέντρωσης <sup>2</sup>	Είδος φ/β κελιού
1 <sup>η</sup>	Υψηλής-συγκέντρωσης	>400X	Πολλαπλής διάταξης
2 <sup>η</sup>	Μέσης συγκέντρωσης	~3X-100X	Πυριτίου ή άλλης τεχνολογίας
3 <sup>η</sup>	Βελτιωμένης συγκέντρωσης	<3X	Πίνακας πυριτίου

Τα συγκεντρωτικά φ/β συστήματα κατέχουν ιδιαίτερα εντυπωσιακές αποδόσεις, προκαλώντας το ενδιαφέρον για την συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας. Στην παρούσα φάση υφίστανται επτά (7) διαφορετικές αρχιτεκτονικές πολλαπλών διατάξεων με εκείνες να κατέχουν απόδοση της τάξης του 40%. Η μέγιστη απόδοση που έχει επιτευχθεί έως σήμερα είναι 43.5%. Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 2), διαφαίνονται οι επτά (7) εν λόγω τεχνολογίες.

**Πίνακας 2. Σύνοψη των μέγιστων αποδόσεων για κελιά πολλαπλών διατάξεων.** <sup>[49]</sup>

Αρχιτεκτονική κελιού	Μέγιστη απόδοση που έχει επιτευχθεί	Εταιρεία κατασκευής
Αραιωμένο νιτρίδιο	43.5%	<i>Solar Junction</i>
GaInP-GaAs-wafer-GaInAs	42.3%	<i>Spire</i>
GaInP-Ga(In)As-Ge	41.6%	<i>Spectrolab</i>
GaInP-GaInAs-Ge	41.1%	<i>Fraunhofer ISE</i>
GaInP/Ga(In)As/GaInAs	40.8%	<i>NREL</i>

<sup>2</sup> Ο όρος λόγος συγκέντρωσης χρησιμοποιείται για τη περιγραφή της ποσότητας της ηλιακής ακτινοβολίας που συγκεντρώνεται από έναν συλλέκτη. Διακρίνεται σε δύο είδη: (i) λόγος οπτικής συγκέντρωσης: η μέση προσπίπτουσα ακτινοβολία διαιρούμενη με το εμβαδόν της επιφάνειας στην οποία εφαρμόζεται. (ii) γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης: η επιφάνεια του συλλέκτη διαιρούμενη με το εμβαδόν της επιφάνειας του δέκτη. <sup>[59]</sup>

GaInP-GaInAsQD-Ge	~40%	<i>Cyrium</i>
GaInP-GaInAsQW-Ge	~40%	<i>Quantasol</i>

Η βιομηχανία φ/β εργάζεται αδιάκοπα σε μια προσπάθεια να μειώσει τα κόστη σε κάθε βήμα της παραγωγής και εγκατάστασης των συστημάτων. Σημαντική προσπάθεια έχει πραγματοποιηθεί στον τομέα της μείωσης του πάχους των κελιών μειώνοντας κατ' επέκταση την ποσότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών. Ένα βήμα πιο πέρα, αποτελεί η μείωση της χρησιμοποιούμενης επιφάνειας φ/β κελιού χρησιμοποιώντας



Εικόνα 37 Συγκεντρωτική φ/β διάταξη μορφής παραβολικού αυλακιού. <sup>[55]</sup>

συγκεντρωτικά συστήματα, διατηρώντας όμως υψηλά την απόδοση του συστήματος. Αυτό συμβάλλει δραματικά στη μείωση της χρησιμοποιούμενης ποσότητας πυριτίου και στο γενικότερο κόστος που συνεπάγεται από την χρήση του. Τα επιπλέον κόστη αυτά δύνανται να αποτελούν έως και το μισό του συνολικού κόστους του φ/β κελιού - ειδικά με το πάχος του να μειώνεται. Κελιά με βάση τα CIGS και CdTe κρίνονται επίσης κατάλληλα για εφαρμογή σε συγκεντρωτικά συστήματα. Το 2007 και 2008, πολλές εταιρείες προσπαθώντας να αυξήσουν την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από τους φ/β πίνακες εφάρμοσαν συγκεντρωτικές τεχνολογίες. Οι πίνακες αυτοί

πυριτίου, μπορούν να ενσωματωθούν άμεσα σε συστήματα χαμηλής συγκέντρωσης χωρίς σημαντικές μειώσεις στην απόδοση.

Η αξία των ΣΦΣ στα φ/β συστήματα στηρίζεται στους εξής πυλώνες <sup>[49]</sup>:

- i. Μικρό κεφάλαιο επένδυσης λόγω της μικρής ποσότητας ημι-αγωγών που απαιτεί το σύστημα για να λειτουργήσει αποδοτικά σε μια ταχύτητα μεταβαλλόμενη αγορά.
- ii. Μεγάλη παραγωγή ενέργειας (kWh/εγκατεστημένο kW) που σχετίζεται με την χρήση ιχνηλατικών συστημάτων και μικρών συντελεστών θερμοκρασίας.
- iii. Υψηλή απόδοση καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις, η μισή επιφάνεια υλικού που βρίσκεται ενσωματωμένη σε ένα ΣΦΣ παράγει την ίδια τιμή ενέργειας σε σχέση με την μη-ενσωματωμένη διπλάσια επιφάνεια.
- iv. Μειωμένα κόστη παραγωγής και εγκατάστασης λόγω της μειωμένης ποσότητας ημι-αγωγικών υλικών και της μεγάλης απόδοσης αντίστοιχα.
- v. Ελάχιστο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

### 1.10 Θερμο-φωτοβολταϊκή τεχνολογία (TPV)

Την τελευταία δεκαετία, η θερμο-φωτοβολταϊκή τεχνολογία έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας ως ένα σύστημα συμπαραγωγής ενέργειας. Η γεννήτρια TPV είναι ένα καινοτόμο σύστημα ικανό να μετατρέψει την ενέργεια υπό μορφή ακτινοβολίας που εκλύεται λόγω καύσης σε ηλεκτρική ενέργεια (Εικόνα 38). Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια φ/β κελιών. <sup>[60][62]</sup>

Ένα τυπικό σύστημα TPV αποτελείται από:

- i. Μια πηγή θερμότητας.
- ii. Έναν εκπομπό (emitter).
- iii. Ένα φίλτρο.
- iv. Μια διάταξη από φ/β κελιά (συνήθως GaSb και Ge) <sup>[63]</sup>.

Το σύστημα προθέρμανσης του συστήματος, HX-A, εκμεταλλεύεται τα προϊόντα της καύσης (900°C-1300°C). Η θερμική παραγωγή του TPV πραγματοποιείται από τους εναλλάκτες θερμότητας HX-PV και HX-CP, οι οποίοι ανακτούν τη θερμότητα από τα ψυχόμενα φ/β κελιά και τα αέρια προϊόντα της καύσης αντίστοιχα.

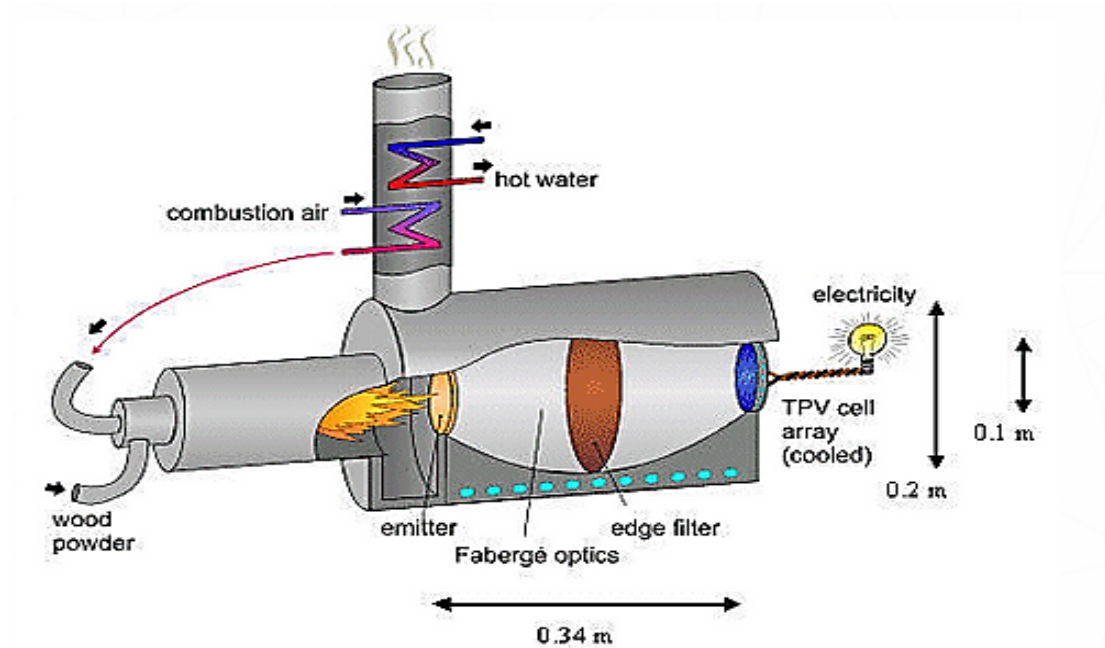
Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος παραγωγής ενέργειας είναι: (i) ο υψηλός συντελεστής χρησιμοποίησης καυσίμου (η ανάκτηση ενέργειας από τις



θερμικές απώλειες, καθιστά το TPV ιδιαίτερα ελκυστική λύση για θέρμανση και παραγωγή ενέργειας), (ii) χαμηλά επίπεδα θορύβου λόγω της απουσίας κινούμενων τμημάτων, (iii) χαμηλά κόστη συντήρησης λόγω του ότι η λειτουργία του μοιάζει με εκείνη του κοινού οικιακού λέβητα, (iv) μεγάλη ευελιξία στη χρήση καυσίμου. Τα χρησιμοποιούμενα καύσιμα μπορούν να είναι τα γνωστά ορυκτά, όπως: φυσικό αέριο, πετρέλαιο, κ.ά., αλλά και μη ορυκτά, όπως: στερεά απόβλητα, πυρηνικά απόβλητα, κ.ά. Επιπλέον, το περιβαλλοντικό κόστος της χρήσης τους (παραγωγή CO και NO<sub>x</sub>) είναι πολύ μικρό καθώς συνήθως συνδυάζονται με συσκευές καύσης όπως οι οικιακοί λέβητες. <sup>[60]</sup>

Η χρήση των συστημάτων TPV μπορεί να περιλαμβάνει: εφαρμογές σε υβριδικά οχήματα <sup>[61]</sup>, σε βιομηχανίες που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες, κ.ά.. Ακόμη, έχει προταθεί η χρήση τους ως φορητές γεννήτριες, ως συστήματα συμπαραγωγής ενέργειας, ως μονάδες παραγωγής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου, ως ηλιακές μονάδες παραγωγής ενέργειας, κ.ά..

Αν και η έρευνα στα συστήματα TPV έχει ξεκινήσει από το 1960, μόλις την τελευταία δεκαετία έγιναν σημαντικά βήματα ανάπτυξης. Η απόδοση των συστημάτων αυτών κυμαίνεται από το 0.6% έως το 11% <sup>[67]-[73]</sup> αλλά οι εκτιμήσεις υπόσχονται αποδόσεις της τάξεως του 24% <sup>[64]-[66]</sup> μέσα στα επόμενα χρόνια.



Εικόνα 38 Τυπική διάταξη θερμο-φωτοβολταϊκού συστήματος με καύσιμο θρυμματισμένο ξύλο. <sup>[60]</sup>

## 2. Ανακύκλωση φ/β πινάκων

Η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά (φ/β) στοιχεία είναι μια ήδη καθιερωμένη και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που αξιοποιεί στο έπακρο μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας -την ηλιακή. Αναπόφευκτα όμως, όπως και σε κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα άλλωστε, σε μερικά χρόνια αναμένονται μεγάλες ποσότητες αποβλήτων που θα σχετίζονται με την ευρεία χρήση των φ/β πινάκων παγκοσμίως. Το παραπάνω γεγονός δεν θα οφείλεται αποκλειστικά στην παύση της λειτουργίας τους λόγω βλάβης αλλά στη μειωμένη απόδοση των υλικών και καλωδιώσεων που περιέχουν. Οι φ/β πίνακες παρουσιάζουν προσδόκιμη διάρκεια ζωής 25-30 έτη. <sup>[74]- [76]</sup>

Σήμερα, η κυρίαρχη φ/β τεχνολογία στην αγορά χρησιμοποιεί κρυσταλλικό πυρίτιο (πολυκρυσταλλική και μονοκρυσταλλική τεχνολογία) ως ημιαγωγό, αλλά οι πίνακες λεπτού υμενίου οι οποίοι χρησιμοποιούν CdTe, άμορφο πυρίτιο, CIGS και CIS διεισδύουν στην αγορά εξαιτίας του μικρού κόστους παραγωγής που τους χαρακτηρίζει και της μεγάλης σχετικής απόδοσης. <sup>[75][81]</sup>

Η αναγκαιότητα της μαζικής ανάκτησης μη-λειτουργικών φ/β πινάκων έχει αποδειχθεί από αρκετούς ερευνητές και πρόσφατα η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέδωσε τη ντιρεκτίβα 2012/19/EU (αντικαθιστώντας την προηγούμενη 2002/96/EC) <sup>[74]</sup>, υπαγορεύοντας τη διαχείριση μετά το τέλος ζωής των φ/β πινάκων. Σύμφωνα με την συγκεκριμένη οδηγία, οι φ/β πίνακες εντάσσονται στην κατηγορία αποβλήτων ειδών ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) και καθορίζονται οι στόχοι της συλλογής, ανάκτησης και ανακύκλωσης τους για τα επόμενα έτη:

- Η ελάχιστη ποσότητα του βάρους των φ/β πινάκων που οφείλεται να συλλεχθεί ορίζεται ως το 45% του συνολικού μέχρι το 2016 και ως 65% ύστερα. <sup>[77]</sup>
- Η ελάχιστη ποσότητα ανάκτησης και ανακύκλωσης φ/β πινάκων ορίζεται ως το 75% και 65% του συνολικού βάρους αντίστοιχα μέχρι το 2015. <sup>[77]</sup>

Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί ποικίλες πιλοτικοί μέθοδοι σχετικά με την ανακύκλωση φ/β πινάκων. Ορισμένες από εκείνες αφορούν την χρήση όξινων/αλκαλικών ενώσεων για την ανάκτηση του πυριτίου από τους κρυσταλλικούς πίνακες και οργανικών διαλυμάτων ή πυρόλυση για την διάλυση του EVA (βλ. Ενότητα 2.2.1). Ορισμένες έρευνες ωστόσο προσανατολίζονται προς την ανακύκλωση των πινάκων λεπτού

υμενίου. Συγκεκριμένα, ο ερευνητής Sasala <sup>[78]</sup> και η ομάδα του εξέτασαν την ανακύκλωση πινάκων CdTe με τη συνδυασμένη χρήση φυσικών και χημικών διεργασιών.

Έως σήμερα έχουν παρουσιαστεί λίγες έγκυρες εμπορικές στρατηγικές απόσυρσης φ/β πινάκων. Η πρώτη παρουσιάστηκε από τη Deutsche Solar <sup>[79]</sup> και αφορά τους πίνακες κρυσταλλικού πυριτίου (1<sup>η</sup> γενιά) και η δεύτερη αναπτύχθηκε από την First Solar <sup>[75]</sup> στοχεύοντας στη τεχνολογία 2<sup>ης</sup> γενιάς -τους πίνακες που περιέχουν CdTe. Ακολούθησε η SolarWorld <sup>[99]</sup> καθώς και άλλες στρατηγικές μικρότερης κλίμακας. Ωστόσο, καμία από τις παραπάνω στρατηγικές δεν είναι βιώσιμη λόγω της μικρής ποσότητας φ/β πινάκων προς ανακύκλωση τη δεδομένη στιγμή. Επιπλέον, οι παραπάνω διαδικασίες δεν είναι αυτοματοποιημένες και δεν περιέχουν προδιαγραφές για την εφαρμογή τους ως μια ενοποιημένη διεργασία για διαφορετικά είδη φ/β πινάκων.

## 2.1 Η δομή των φ/β πινάκων

### 2.1.1 Πίνακες κρυσταλλικού πυριτίου

Για την παρασκευή ενός φ/β κελιού κρυσταλλικού πυριτίου χρησιμοποιούνται λεπτές επίπεδες πλάκες πυριτίου (wafers). Το επίπεδο της ένωσης p-n δημιουργείται με μια μέθοδο διάχυσης στην εμπρόσθια όψη των πλακών πυριτίου. Το πυρίτιο εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλό δείκτη ανάκλασης (30-55%) και για αυτόν το λόγο τοποθετείται ειδικό προστατευτικό περίβλημα κατά της αντανάκλασης (AR-Coating) για τον περιορισμό της. Το AR-Coating συνίσταται συνήθως από SiO, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Τα επιφανειακά ηλεκτρόδια του κελιού αποτελούνται συνήθως από Ag, Cu και Sn στην εμπρόσθια όψη. Το κελί στη συνέχεια καλύπτεται από EVA και ειδικό προστατευτικό γυαλί. Παράλληλα, τοποθετούνται φθοριούχα πλαστικά υμένα και στις δύο πλευρές του κελιού. Το EVA χρησιμοποιείται σαν κολλητικό υλικό ανάμεσα στο γυαλί και το φ/β κελί. Η συναρμολόγηση αυτή τοποθετείται στη συνέχεια σε θερμοκρασία 150°C για 20 λεπτά υπό υψηλή πίεση για την ολοκλήρωση την διαδικασίας. Ολοκληρώνοντας την κατασκευή, τοποθετείται η ως τώρα συναρμολόγηση (Εικόνα 39) σε ειδικό πλαίσιο από αλουμίνιο και η πίσω όψη προστατεύεται από ένα ειδικό φύλλο. <sup>[80][82][83]</sup>

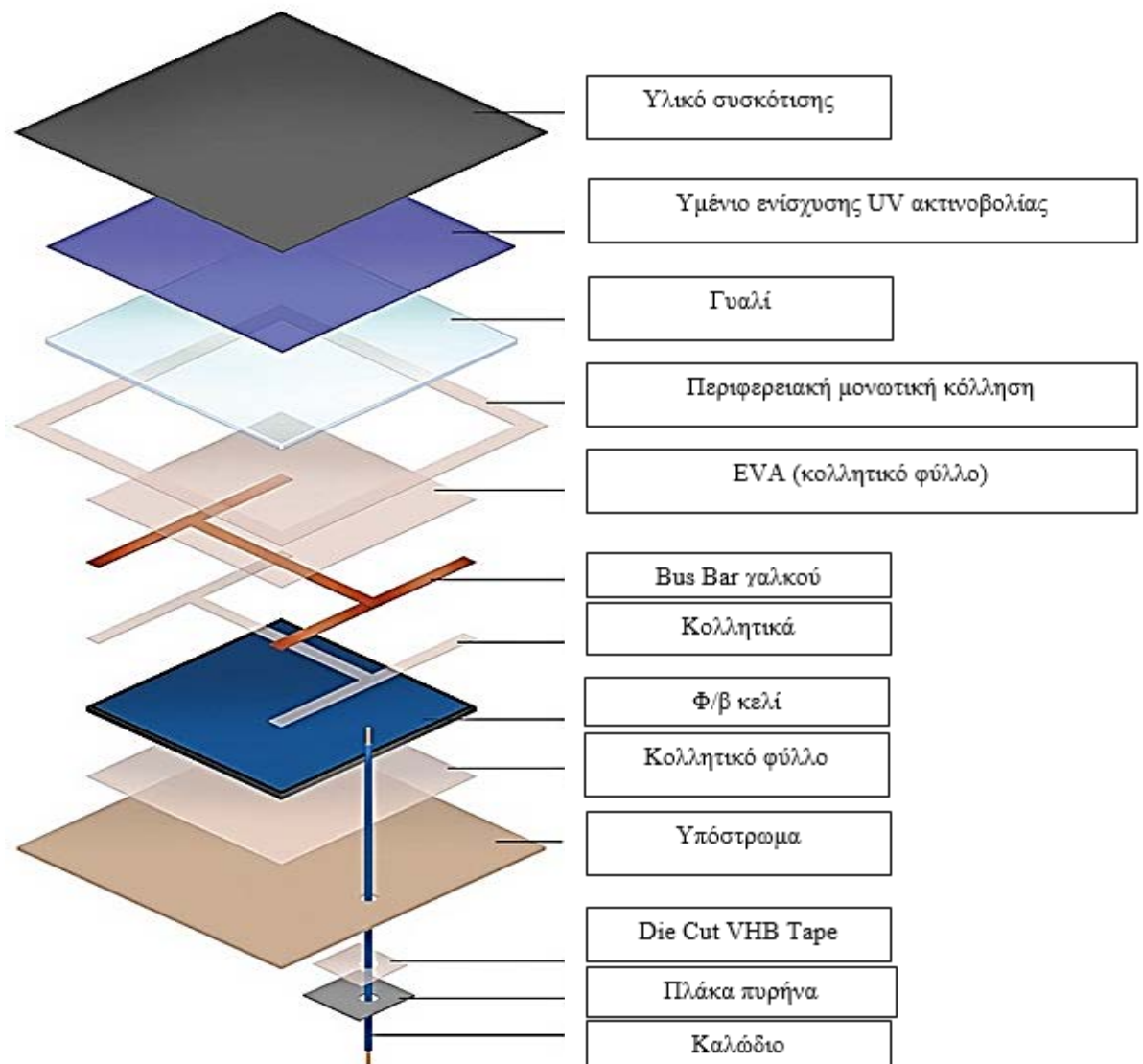
Η παρακάτω δομή, όπως φαίνεται στον πίνακα 3 είναι η πιο κοινή που συναντάται σήμερα (90% της αγοράς) στο εμπόριο πινάκων κρυσταλλικού πυριτίου λόγω του



μικρού κόστους και της ικανοποιητικής απόδοσης. Όπως αναλύθηκε προηγουμένως για την κατασκευή ενός φ/β πίνακα απαιτούνται αρκετά τμήματα συμπεριλαμβανομένου των φ/β κελιών, του προστατευτικού γυαλιού, του πλαισίου αλουμινίου, του EVA και του προστατευτικού φύλλου της πίσω επιφάνειας. Το κατασκευαστικό κόστος του φ/β κελιού αποτελεί το 65% του συνολικού κόστους του πίνακα. Με τις υπάρχουσες διεργασίες ανακύκλωσης υπάρχει η δυνατότητα ανάκτησης έως και του 60% της συνολικής ποσότητας πυριτίου που εμπεριέχεται σε έναν αποσυρόμενο πίνακα. Ωστόσο, το ποσοστό αυτό θεωρείται αρκετά χαμηλό. <sup>[83]</sup>

*Πίνακας 3. Σύσταση φ/β κελιού. <sup>[84]</sup>*

Υλικά	Ποσοστό (%)	kg/kW <sub>p</sub>
Γυαλί	74,16	77,3
Πλαίσιο αλουμινίου	10,30	10,7
EVA	6,55	6,8
Ηλ. Κελιά x-Si	3,48	3,3
Οπίσθιο φύλλο (Tedlar)	3,60	3,8
Κολλητικές ουσίες	1,16	1,2
Χαλκός (καλωδιώσεις)	0,57	0,59
Συν. Βάρος	-	102,3



Εικόνα 39 Δομή φ/β κελιού (exploded view). <sup>[80]</sup>

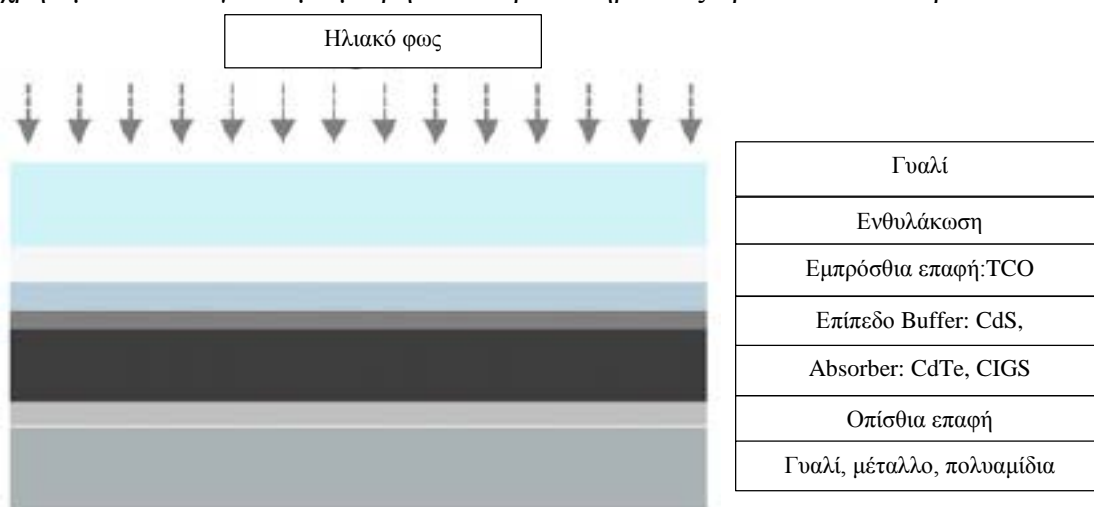
### 2.1.2 Πίνακες χαλκογενιδίων

Τα φ/β κελιά χαλκογενιδίων βασίζονται σε υλικά τα οποία ανήκουν στις II-VI και I-III-VI<sub>2</sub> ομάδες του περιοδικού πίνακα και πρόκειται για ημιαγωγούς όπως: CdTe και CdS/CuInSe<sub>2</sub> (CIS), Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>, Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub>, CuInSe<sub>2</sub>, Cu(In,Ga)S<sub>2</sub> αντίστοιχα. Τα κελιά που βασίζονται σε υλικά των ομάδων I-III-VI<sub>2</sub> του περιοδικού πίνακα ονομάζονται για συντομία CIGS φ/β κελιά. Οι δύο ομάδες υλικών φ/β κελιών - CdTe και CIGS- είναι κατάλληλες για επίγειες εφαρμογές λόγω της μεγάλης τους απόδοσης, αξιοπιστίας και αντοχής στο χρόνο, καθώς και του μικρού κόστους παραγωγής [86].

Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από υψηλό συντελεστή απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και για αυτόν τον λόγο βρίσκουν εκτεταμένη εφαρμογή σε τεχνολογίες φ/β πινάκων λεπτού υμενίου. Ως αποτέλεσμα, απαιτούν μικρή ποσότητα υλικού για μια εξίσου ικανοποιητική απόδοση με τα συμβατικά φ/β κελιά κρυσταλλικού πυριτίου.

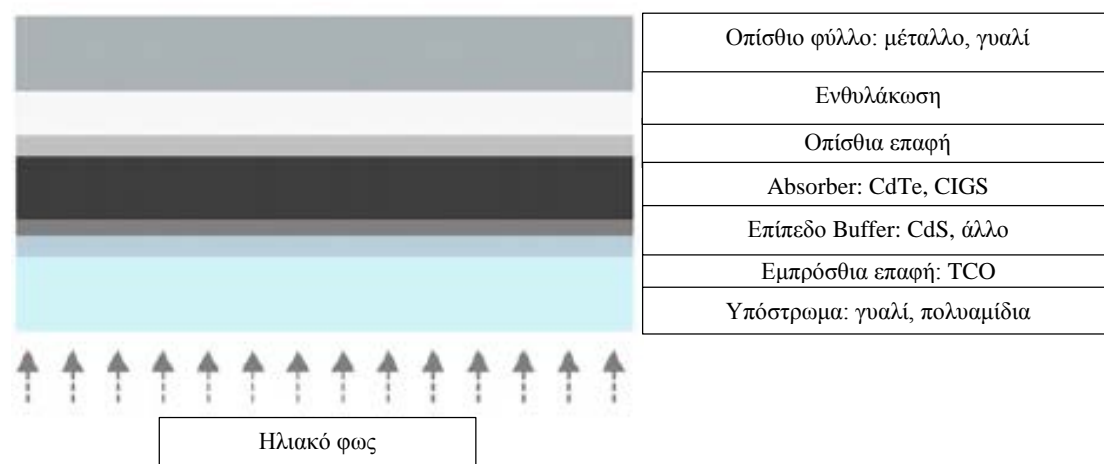
Όμως, τα χρησιμοποιούμενα υλικά εμπεριέχουν ποσότητες In, Ga και Te, τα οποία, ακόμα και σε συνδυασμό με το Cd, δύνανται να βλάψουν το περιβάλλον εάν δεν ανακτηθούν ή απορριφθούν καταλλήλως. Ακόμη, με βάση συγκεκριμένες έρευνες η διαθέσιμη παραγωγή In και Te μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη της αγοράς φ/β που βασίζεται στα συγκεκριμένα υλικά λόγω της σπανιότητάς τους, οπότε και κρίνεται απαραίτητη η ανάκτησή τους. [87]-[89]

Στη συνέχεια, ακολουθεί η παρουσίαση των δομών που εμφανίζουν οι πίνακες CdTe και CIGS όπως φαίνεται στις εικόνες 40 και 41. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιείται γυαλί με μικρή διασπορά σιδήρου ως προστασία. Το προστατευτικό



Εικόνα 40 Τομή φ/β κελιού λεπτού υμενίου σε διάταξη υποστρώματος. [86]

γυαλί ή το οπίσθιο κάλυμμα στην περίπτωση της διάταξης υπερ-στρώματος, επικολλείται με τη βοήθεια ενός πλαστικού κολλητικού στοιχείου: EVA,



Εικόνα 41 Τομή φ/β κελιού λεπτού υμενίου σε διάταξη υπερ-στρώματος. <sup>[86]</sup>

πολυβινυλοβουτυράλη (PVB) ή κ.ά.. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται το EVA σαν στρώμα ενθυλάκωσης, το οποίο συνίσταται από ένα θερμοπλαστικό υλικό. Μετά τη διαδικασία πλαστικοποίησης, το θερμοπλαστικό υλικό μετατρέπεται σε ελαστομερές χωρίς να μπορεί να τηχθεί σε μεγαλύτερο βαθμό. Στις περισσότερες περιπτώσεις, στα κελιά λεπτού υμενίου για λόγους προστασίας και αξιοπιστίας τοποθετούνται ειδικά πλαίσια από αλουμίνιο, το οποία αποτελούν το 12-15% του συνολικού όγκου. Για λόγους ευκολίας, στα πλαίσια της ανακύκλωσης, οι καλωδιώσεις και το κουτί επαφών μπορούν να αφαιρεθούν χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία. <sup>[85][86]</sup>

Τα φ/β κελιά βασισμένα σε τεχνολογία CdTe μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο με την βοήθεια της δομής υποστρώματος αλλά και εκείνη του υπερ-στρώματος. Ωστόσο, η μεγαλύτερη απόδοση παρουσιάζεται στην εφαρμογή της δομής υποστρώματος, στην οποία τα επίπεδα TCO, CdS, CdTe και η οπίσθια μεταλλική επαφή αναπτύσσονται επάλληλα σε γυάλινες επιφάνειες. Τα συνήθη διαφανή αγωγίμα οξειδία (TCO) για την εμπρόσθια επαφή δύνανται να είναι:  $\text{SnO}_x\text{:F}$ , ITO,  $\text{ZnO:Al}$  ή και  $\text{CdSnO}_4$ , τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανάπτυξη φ/β κελιών υψηλής απόδοσης. Τα στρώματα CdTe και CdS τοποθετούνται γειτονικά έτσι ώστε να δημιουργήσουν μια ετεροσύνδεση. Το πάχος του CdTe εξαρτάται από το είδος της διάταξης που εφαρμόζεται αλλά σε γενικές γραμμές κυμαίνεται από 2-6μm.

Αντίστοιχα, τα φ/β κελιά τα οποία βασίζονται στην ομάδα υλικών CIGS συνήθως κατασκευάζονται με βάση τη δομή του υποστρώματος. Η μορφή της συγκεκριμένης δομής χαρακτηρίζεται από το γεγονός πως απαιτεί ένα επιπλέον στρώμα ενθυλάκωσης, καθώς και γυαλί για την προστασία της επιφάνειας των φ/β κυψελίδων. Τα φ/β κελιά αναπτύσσονται πάνω σε ειδικό γυαλί ή μια μεταλλική επιφάνεια ή και στρώματα πολυμερών υλικών. Επιπλέον, η πίσω επιφάνεια συνίσταται από μολυβδαίνιο. Λόγω του μεγάλου συντελεστή απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, το απαραίτητο πάχος είναι της τάξης του 0.1-0.3μm. Ωστόσο, για λόγους ευστάθειας και της ανάγκης για εξασφάλιση ομοιόμορφης κατανομής των κυψελίδων, εφαρμόζεται πάχος της τάξεως του 1μm. Το CdS χρησιμοποιείται για την δημιουργία ετεροσύνδεσης, αλλά ερευνάται και η εφαρμογή των ZnS, ZnSe, ZnInSe και In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>. Όσον αφορά στην εμπρόσθια επαφή χρησιμοποιείται το ITO ή το οξείδιο του ψευδαργύρου εμπλουτισμένο με αλουμίνιο. [86]

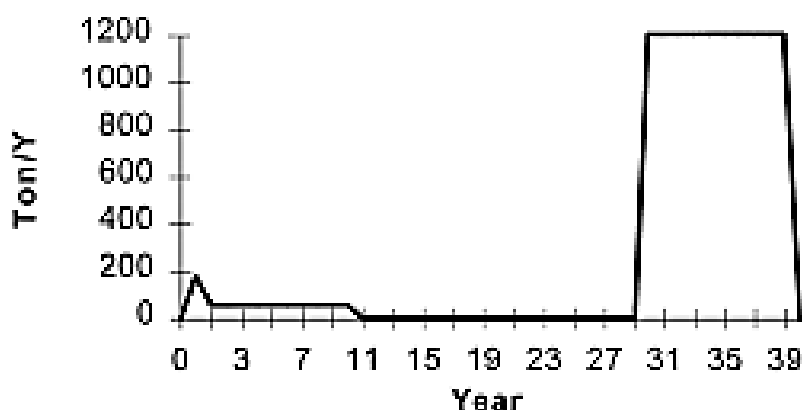
Παρακάτω, ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 4) των ποσοστών των υλικών που συνιστούν τα κελιά λεπτού υμενίου βασισμένα σε CIGS και CdTe.

Πίνακας 4. Ποσοστιαία σύσταση υλικών για φ/β κελιά λεπτού υμενίου τύπου CIGS & CdTe. [86]

Είδος κυψελίδας\ υλικά	Προστατευτικό γυαλί (%)	Ενθυλάκωση (%)	Υλικά λεπτού υμενίου (%)	Γυαλί φορέας (%)	Άλλα πολυμερή (%)
CIGS	47	1.2	0.16	47	5.6
CdTe	48	3.2	0.18	48	0

## 2.2 Μεθοδολογίες ανακύκλωσης φ/β πινάκων

Ακόμα και η πράσινη τεχνολογία δεν διαρκεί για πάντα. Με τη ταχεία ανάπτυξη των φ/β συστημάτων και την ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού των αποβλήτων (Εικόνα 42),



Εικόνα 42 Αναμενόμενη ποσότητα φ/β αποβλήτων από μια κατασκευαστική μονάδα δυναμικότητας 10 MW/έτος. [75]

καθίσταται επιτακτική η ανάγκη για την καθιέρωση βιώσιμων μεθοδολογιών ανακύκλωσής τους. Η ανάγκη αυτή δεν πηγάζει μόνο από την προσπάθεια διατήρησης του μειωμένου οικολογικού αποτυπώματος της τεχνολογίας, αλλά και από την αναγκαιότητα μείωσης του κόστους παραγωγής που απαιτείται από τις κατασκευάστριες εταιρίες, οι οποίες αναζητούν συνεχώς πρώτες ύλες με μικρότερο κόστος.

Είναι ιδιαίτερα δύσκολο να υπολογιστούν οι ακριβείς ποσότητες αποβλήτων που αναμένεται να προκύψουν σε βάθος χρόνου λόγω της τυχαιότητας που συνοδεύει την λειτουργία των φ/β συστημάτων. Ωστόσο, προβλέψεις θέλουν 264.000 τόνους αποβλήτων να συσσωρεύονται μέχρι το 2038 (Πίνακας 5) στην Ελλάδα, όταν σήμερα οι ποσότητες αυτές είναι κατά πολύ μικρότερες. <sup>[110]</sup>

Σήμερα, το 90% των αποβλήτων των φ/β συστημάτων συνίσταται από τεχνολογίες βασισμένες στο κρυσταλλικό πυρίτιο και περίπου το 10% αφορά τεχνολογίες λεπτού υμενίου -CdTe, GIGS, άμορφο, κελιά συνενώσεων- και κρυσταλλικό πυρίτιο. Μέχρι το έτος 2020 αναμένεται η ποσότητα αποβλήτων τεχνολογίας λεπτού υμενίου να αυξηθεί στο 20% με τα ποσοστά που αφορούν νέες τεχνολογίες φ/β (οργανικά, περβοσκίτες κ.ά.) να είναι πολύ χαμηλά. <sup>[82]</sup>

*Πίνακας 5. Πρόβλεψη των αποβλήτων Φ/β σε τόνους για τη δεκαετία 2028-2038 στην Ελλάδα. <sup>[110]</sup>*

Έτος	Φ/Β Βάρος (tn)	Πλαίσιο (tn)	Γυαλί (tn)	Χαλκός (tn)	EVA (tn)	Ηλ. Κελιά x-Si (tn)	Tedlar (tn)	Κολλητικά (tn)
2028	1.303	136	984	21	87	42	48	15
2029	4.120	431	3.113	60	274	133	153	48
2030	14.965	1.565	11.305	198	994	483	556	175
2031	35.661	3.729	26.939	622	2.370	1.150	1.324	418
2032	74.769	7.818	56.483	1.352	4.969	2.411	2.777	877
2033	95.889	10.027	72.438	1.752	6.372	3.092	3.561	1.125
2034	–	–	–	–	–	–	–	–
2035	1.141	119	862	10	76	37	42	13
2036	9.126	954	6.894	78	606	294	339	107
2037	20.076	2.099	15.166	170	1.334	647	746	235
2038	7.697	805	5.814	65	511	248	286	90
<b>Σύνολο</b>	<b>264.746</b>	<b>27.684</b>	<b>199.998</b>	<b>4.328</b>	<b>17.594</b>	<b>8.538</b>	<b>9.832</b>	<b>3.105</b>

Για την πραγματοποίηση της διαδικασίας της ανακύκλωσης οφείλει κανείς αρχικά να αναζητήσει την πρώτη ύλη για τη διεκπεραίωση της. Η πρώτη ύλη εκείνη δεν είναι άλλη από τα φ/β απόβλητα, τα οποία είναι διαφορετικών ειδών ανάλογα με την προέλευσή τους. <sup>[74][75][85][86]</sup>

Αναλυτικότερα, τα διαφορετικά είδη φ/β αποβλήτων μπορεί να προέρχονται από:

- i. Φ/β πίνακες οι οποίοι έφτασαν το προσδόκιμο όριο ζωής τους και επεστράφησαν στον αρχικό διανομέα ή παραγωγό, ή θεωρήθηκαν ως ελαττωματικοί κατά τη διάρκεια ενός ελέγχου ποιότητας που πραγματοποιήθηκε σε μια παραγωγική διαδικασία.
- ii. Φθορές που προκλήθηκαν κατά τη χρήση, όπως: ραγισμένο προστατευτικό γυαλί, ελαττωματική κόλληση στρώσεων, βλάβες ηλεκτρολογικού χαρακτήρα.
- iii. Υλικά τα οποία αποτελούν κατάλοιπα διάφορων διεργασιών που παίρνουν μέρος στη διαδικασία παραγωγής φ/β πινάκων.
- iv. Καθαρές πρώτες ύλες που παρέμειναν ανεκμετάλλευτες μετά το τέλος ενός ολοκληρωμένου κύκλου παραγωγής.

Το μεγαλύτερο κώλυμα που παρουσιάζεται απέναντι στην ανακύκλωση φ/β πινάκων είναι η απουσία ολοκληρωμένης υποδομής, ικανής να αποδεχθεί την πλήρη επεξεργασία τους <sup>[75][80]</sup>. Η πλήρης επεξεργασία ανακύκλωσης προϋποθέτει την παρουσία δύο κύριων τμημάτων: (i) μια μέθοδο παραλαβής και μεταφοράς των αποσυρόμενων πινάκων από τον καταναλωτή ή τον αντιπρόσωπο και (ii) κέντρα, κατάλληλα για την αποδοχή και πλήρη διεκπεραίωση της διαδικασίας ανακύκλωσης.

Λόγω της παρουσίας διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από φ/β συστήματα, για λόγους ασφαλείας και ομαλότερης λειτουργίας του δικτύου ηλεκτροδότησης, καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη η δημιουργία ενός βιώσιμου συστήματος ανακύκλωσης φ/β πινάκων. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα έχουν προταθεί τρεις πιθανές λύσεις <sup>[75][80]</sup>.

- i. Η συλλογή και η ανακύκλωση των φ/β πινάκων θα πρέπει να πραγματοποιείται από εταιρείες κοινής ωφελείας, κατασκευαστές φ/β ή κέντρα ανακύκλωσης ηλεκτρονικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Εταιρείες που είναι κύριες μεγάλων φ/β εγκαταστάσεων θα είναι υπεύθυνες για την ανακύκλωση ή μεταφορά των πινάκων στα κατάλληλα κέντρα

συγκέντρωσης. Τα κόστη της ανακύκλωσης θα μπορούσαν να περιλαμβάνονται στο αρχικό κόστος της αγοράς των πινάκων, χρεώνοντας τους καταναλωτές. Ωστόσο, εταιρείες κοινής ωφελείας με μεγάλες φ/β εγκαταστάσεις στην κατοχή τους είναι ελάχιστες, άρα η συγκεκριμένη λύση ίσως δεν είναι βιώσιμη υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες.

- ii. Η δεύτερη προτεινόμενη μέθοδος μιμείται την μέθοδο που ήδη εφαρμόζεται από τις εταιρείες ηλεκτρονικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Οι κατασκευαστές των φ/β συστημάτων θα είναι υπεύθυνοι για την αποσύνθεση και μεταφορά των πινάκων στο τέλος ζωής τους σε κέντρα ανακύκλωσης ηλεκτρονικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Ο κατασκευαστής ή ο καταναλωτής θα μπορούσε να επωμιστεί το οικονομικό βάρος της μεταφοράς και το κέντρο ανακύκλωσης να επωφεληθεί από τα κέρδη των πωλήσεων του μετάλλου και του πυριτίου.
- iii. Η τρίτη μέθοδος βασίζεται στον τρόπο που λειτουργούν τα κέντρα συγκέντρωσης συσσωρευτών (το παράδειγμα της μπαταρίας). Σε αυτήν τη περίπτωση, χρησιμοποιούνται ανάστροφες αλυσίδες ανάκτησης προϊόντων ή περιοδικής συλλογής των μη-λειτουργικών φ/β πινάκων από τα κέντρα συγκέντρωσης. Οι καταναλωτές θα μπορούν να φέρουν τους φ/β πίνακες σε συγκεκριμένα κέντρα συλλογής ή μετά από τηλεφωνική επικοινωνία να γίνεται δυνατή η παραλαβή με τη βοήθεια κατάλληλων μεταφορικών μέσων. Το κόστος της διαδικασίας αυτής μπορεί να περιλαμβάνεται στην τιμή αγοράς ή να εξοφλείται κατά το τέλος ζωής του πίνακα κατά την απόσυρσή του. Οι πίνακες στη συνέχεια θα παραδίδονται σε μεγάλα κέντρα ανακύκλωσης.

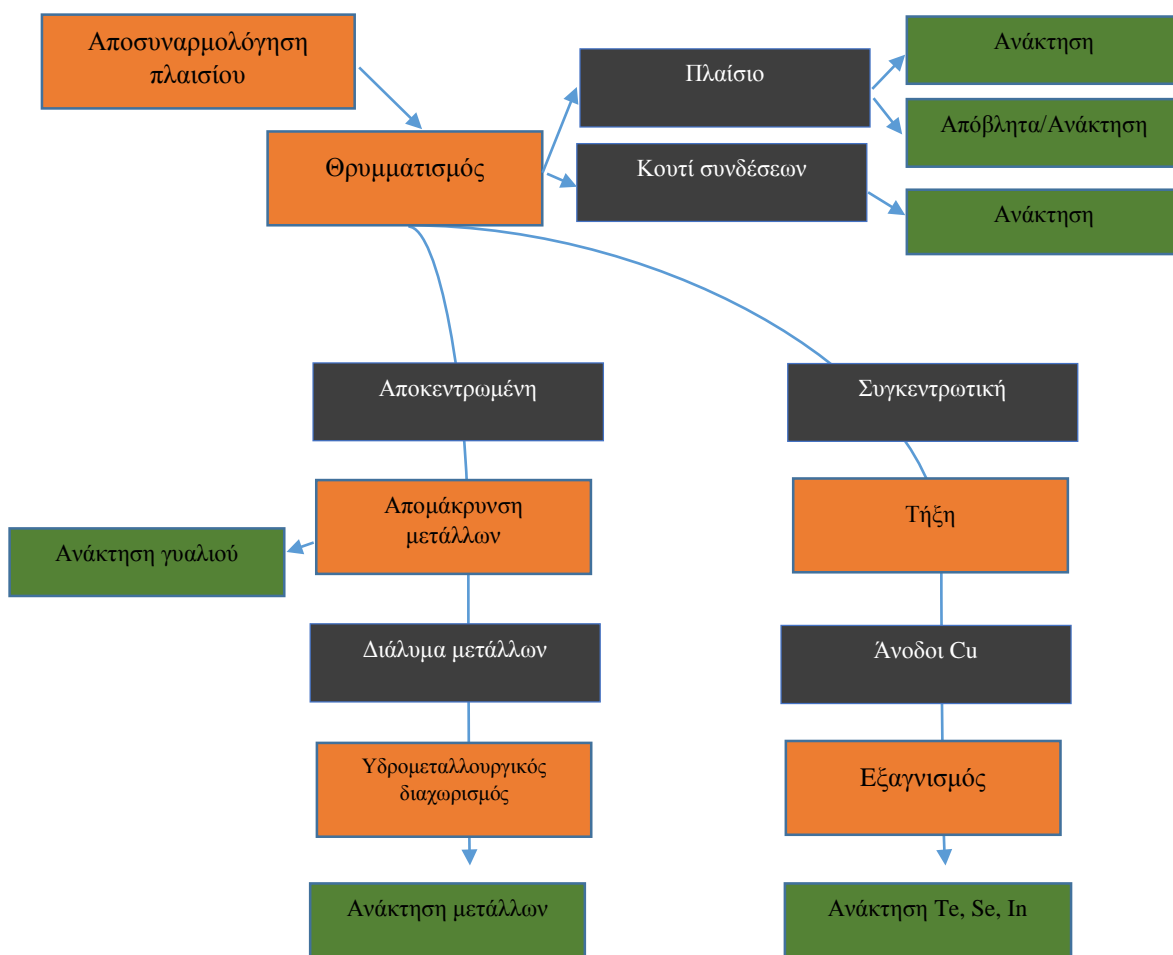
-----

Τη δεδομένη περίοδο, οι τρεις παραπάνω προτεινόμενες μέθοδοι δεν αντικατοπτρίζουν τις ανάγκες και προσδοκίες κάθε ιδιοκτήτη-καταναλωτή-εταιρείας, αλλά με την πάροδο του χρόνου θα δημιουργηθούν τα κατάλληλα κίνητρα για την ανάπτυξη μιας εκ των παραπάνω μεθόδων ή παραλλαγών.

Η δημιουργία μεγάλων κέντρων ανακύκλωσης φ/β πινάκων θα μπορούσε να επιτευχθεί με την επέκταση-αναβάθμιση των ήδη υπάρχοντων εγκαταστάσεων ανακύκλωσης και πρωτοκόλλων επεξεργασίας. Απαραίτητος εξοπλισμός για τις εγκαταστάσεις αυτές



είναι μια γραμμή μεταφοράς των υλικών μέσα από έναν ειδικό φούρνο και μια γραμμή πλύσεων για τον καθαρισμό των πλακών πυριτίου από περιττές, πλέον, επιφανειακές προσθήκες. Επιπλέον, απαραίτητη κρίνεται και η παρουσία μια διαδικασίας που θα μετατρέπει το ανακυκλωμένο πυρίτιο σε νέα φ/β κελιά. Τα μεταλλικά στοιχεία και το γυαλί δύνανται να μεταφέρονται και να επεξεργάζονται σε άλλη μονάδα των εγκαταστάσεων ή σε εντελώς διαφορετικό κέντρο επεξεργασίας. Τέλος, με την πιθανή παρουσία μια ηλεκτρολυτικής μονάδας μπορεί να γίνει δυνατή η ανάκτηση μεταλλικών στοιχείων από τα απόβλητα που προκύπτουν ύστερα από τις πλύσεις που πραγματοποιούνται κατά τον καθαρισμό των πλακών πυριτίου.



Εικόνα 34 Απόβλητα Φ/β και επιλογές ανακύκλωσης. <sup>[75]</sup>

### 2.2.1 Μεθοδολογίες για ανακύκλωση φ/β πινάκων κρυσταλλικού πυριτίου (x-Si)<sup>3</sup>.

Μέχρι πρόσφατα, οι φ/β πίνακες μετά το τέλος ζωής τους αποτελούσαν βιομηχανικό απόβλητο και η επεξεργασία τους αφορούσε κυρίως την ανακύκλωση του γυαλιού, των μεταλλικών στοιχείων και όχι των φ/β κελιών πυριτίου. Με την ποσότητα των αποσυρόμενων φ/β πινάκων να αυξάνεται, η απόρριψη των ποσοτήτων φ/β κελιών που συσσωρεύεται περιλαμβάνει πλέον υψηλό κόστος. Επιπλέον, γεγονός που έρχεται να ενδυναμώσει την άποψη αυτή είναι πως οι πλάκες πυριτίου των φ/β πινάκων σε μεγάλο ποσοστό φθάνουν άθικτες προς ανακύκλωση. Στόχος δηλαδή της διαδικασίας είναι η χρήση των παλαιών φ/β κελιών προς τη δημιουργία καινούργιων με παρόμοιες αποδόσεις. [74][80]

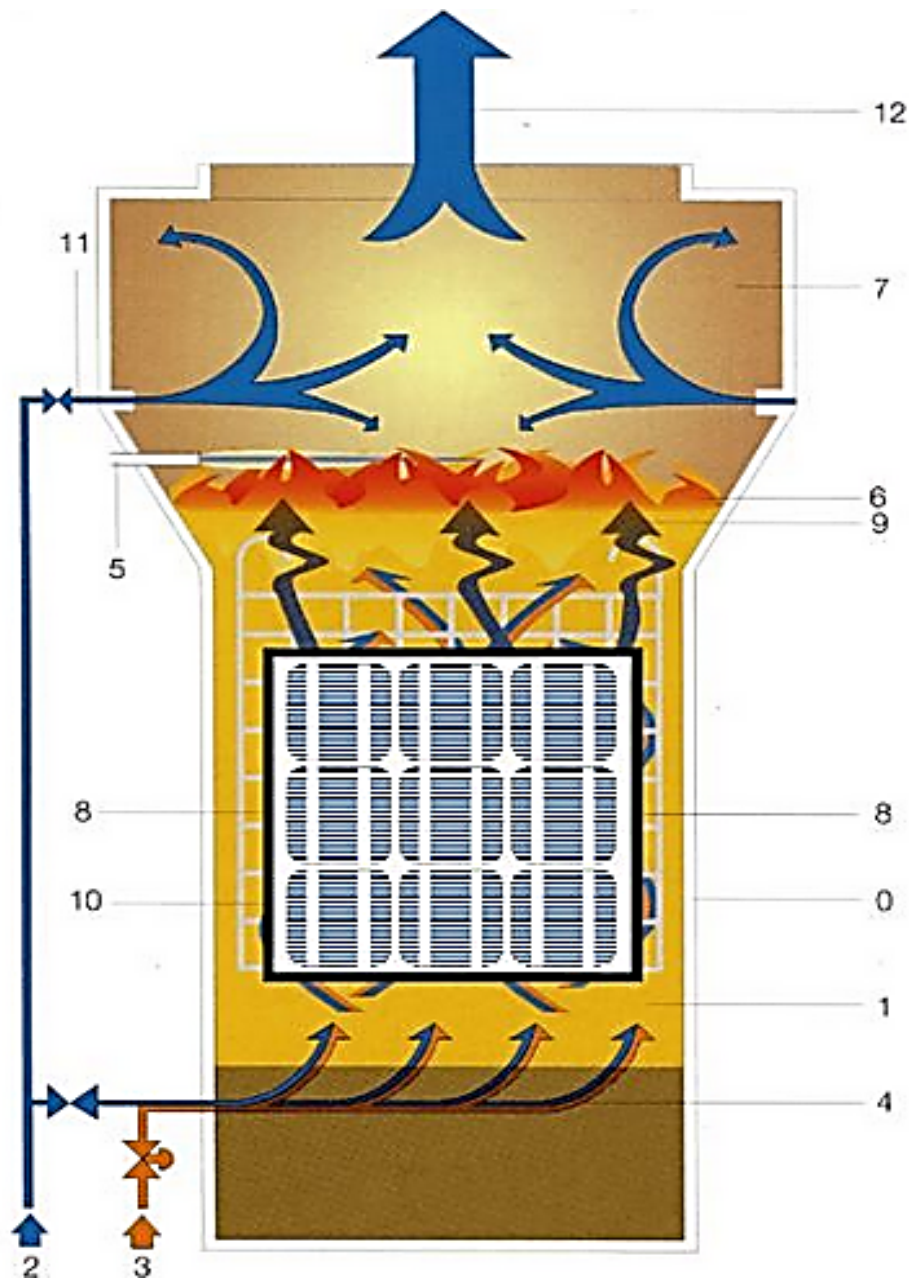
Η γενικευμένη διαδικασία ανακύκλωσης όπως αυτή θα περιγραφεί αναλυτικότερα και πιο εξειδικευμένα σε επόμενη ενότητα για τις περισσότερες εταιρείες του κλάδου, ξεκινά με την απογύμνωση του φ/β πίνακα από το μεταλλικό πλαίσιο και την γυάλινη προστασία. Η διάταξη των φ/β κελιών παραμένει προστατευμένη από το EVA και το οπίσθιο έλασμα (Εικόνα 43). Στη συνέχεια, τόσο η προστασία όσο και το πίσω έλασμα οφείλεται να απομακρυνθεί. [80][83][86]



Εικόνα 43 Φ/β κελιά πυριτίου, μια εναλλακτική πηγή πρώτων υλών αλουμινίου, πυριτίου και αργύρου. [109]

<sup>3</sup> x-Si: m-Si, p-Si, a-Si

Η καλύτερη διαδικασία προς εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα για την απομάκρυνση του EVA καθίσταται η πυρόλυση σε έναν αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης (Fluidized Bed Reactor) (Εικόνα 44) <sup>[90]</sup>. Μέσα στον εν λόγω αντιδραστήρα, ιδιαίτερα λεπτόκοκκη άμμος αποκτά τις ιδιότητες ενός ρευστού λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και το μικρό μέγεθος των κόκκων. Οι διατάξεις από λεπτές πλάκες πυριτίου τοποθετούνται στην ρευστή άμμο για 45 λεπτά στους 400°C. Το EVA και το οπίσθιο φύλλο εξατμίζονται και ο ατμός καίγεται, ενεργώντας ως πηγή θερμότητας για τον αντιδραστήρα. Το 80% των κελιών όπως εκείνα διαχωρίζονται από τη διαδικασία, παραμένουν μηχανικώς άρτια.



Εικόνα 44 Αντιδραστήρας Ρευστοποιημένης Κλίνης για την πραγματοποίηση της διαδικασίας αποκόλλησης στρώσεων (delamination) των φ/β κελιών/πινάκων. <sup>[80]</sup>

- |   |                          |                                   |
|---|--------------------------|-----------------------------------|
| 0. Αντιδραστήρας Ρευστοποιημένης Κλίνης | 5. Κανστήρας             | 10. Μείγμα αερίων                 |
| 1. Λεπτόκοκκη άμμος                     | 6. Άμεση καύση           | 11. Δευτερεύουσα παροχή ατμ. αέρα |
| 2. Παροχή ατμ. αέρα                     | 7. Χώρος καύσης          | 12. Σύστημα εξάτμισης αερίων      |
| 3. Είσοδος αερίων                       | 8. Καθαρισμός εξοπλισμού |                                   |
| 4. Διανομέας ατμ. αέρα-αερίων           | 9. Αέρια διαδικασία      |                                   |

Αναπόφευκτα, ακόμα και αν τα φ/β κελιά στο τέλος της ζωής του φ/β πίνακα ήταν λειτουργικά και ο πίνακας κατέληξε στην απόσυρση για δευτερεύοντες λόγους μετά την έκθεση στον αντιδραστήρα, η απόδοσή τους μειώνεται κατακόρυφα. Για την παραγωγή νέων φ/β κελιών, οι λεπτές πλάκες πυριτίου οφείλεται να απομονωθούν. Η στοχευμένη απόσπαση των πλακών πυριτίου επιτυγχάνεται με την χημική επεξεργασία των κελιών, απομακρύνοντας τις διάφορες επικαλύψεις και ενώσεις p-n, οι οποίες είχαν προστεθεί στις πλάκες πυριτίου κατά την παρασκευή τους. Η διαδικασία αυτή με μικρές παραλλαγές ακολουθείται τόσο για τα κελιά βασισμένα σε μονοκρυσταλλικό αλλά και πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Τα σπασμένα φ/β κελιά που δημιουργήθηκαν από τη διεργασία της πυρόλυσης επεξεργαζόμενα χημικά όπως και τα άθικτα, τήκονται και χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη νέων ράβδων πυριτίου.

Σε αυτό το σημείο της διαδικασίας, οι φ/β πίνακες έχουν διασπαστεί σε μέταλλα, γυαλί και φέτες πυριτίου. Το γυαλί και το μέταλλο μπορούν να υποστούν επεξεργασία και να ανακυκλωθούν αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας τις υπάρχουσες υποδομές. Οι άθικτες πλάκες πυριτίου ανακυκλώνονται σε νέα κελιά με τις γνωστές μεθόδους αποδίδοντας παρόμοια απόδοση με τα αρχικά, της τάξεως του 15-16.4% για τα μονοκρυσταλλικά κελιά και 12.7-15.9% για τα πολυκρυσταλλικά.

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι ένα φ/β κελί που ανακυκλώνεται ανήκει σε παλαιότερη γενιά τρόπου παρασκευής, μπορεί κανείς να υποθέσει πως μετά την ανακύκλωση τα νέα φ/β κελιά με την εφαρμογή των εκσυγχρονισμένων μεθόδων παραγωγής δύναται να αποδώσουν ακόμη και υψηλότερα από τα αρχικά. Γεγονότα σαν κι αυτό καθιστούν τέτοιου είδους επεξεργασίες ανακύκλωσης βιώσιμες και πολλά υποσχόμενες.<sup>[80]</sup>

**Πίνακας 6. Ποσοστιαία ανάκτηση υλικών μετά τη διαδικασία ανακύκλωσης για φ/β κελιά πυριτίου.**  
[84]

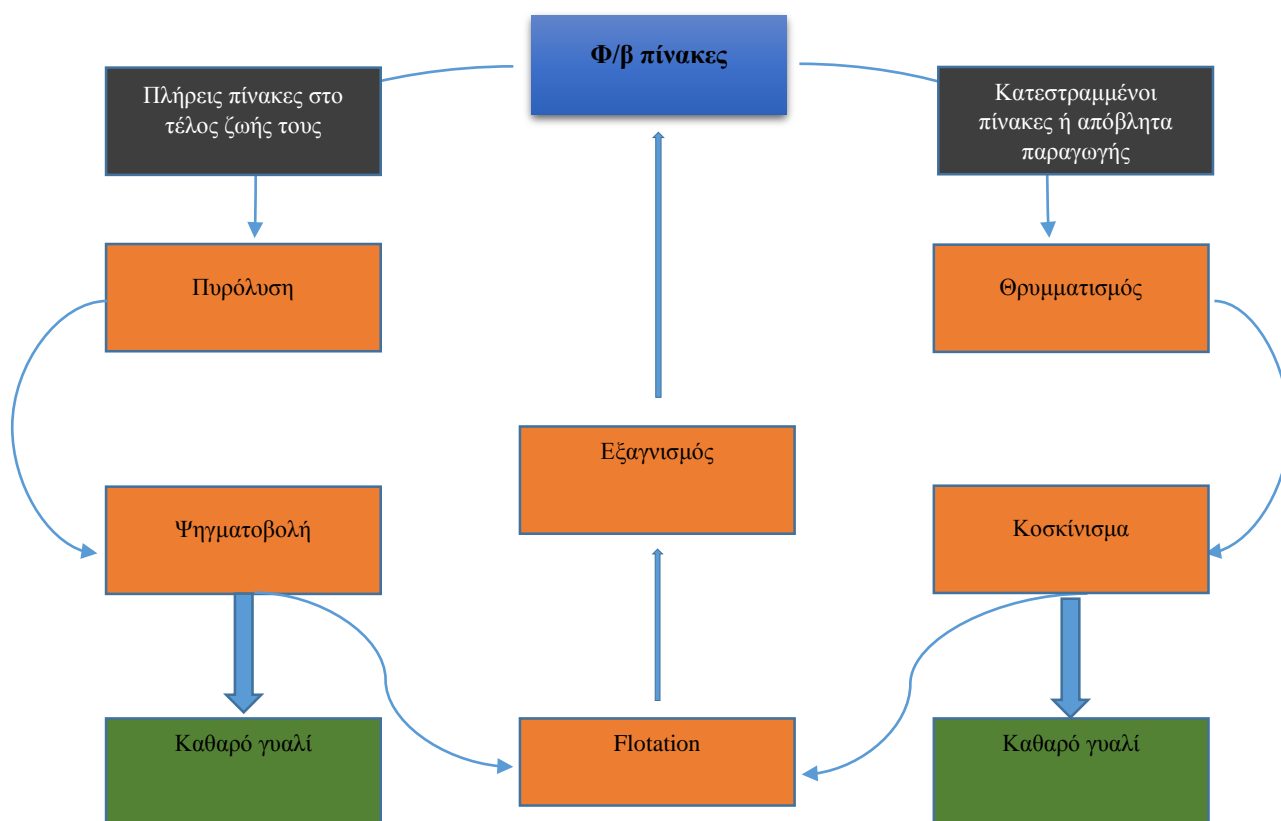
	kg/m <sup>2</sup>	Ανάκτηση (%)
Γυαλί	10,0	90
Πλαίσιο αλουμινίου	1,39	100
Φ/β κελιά	0,47	90
EVA, Tedlar (οπίσθιο φύλλο)	1,37	-
Ταινίες (Ribbons)	0,10	95
Κολλητικές ουσίες, κ.ά.	0,16	-

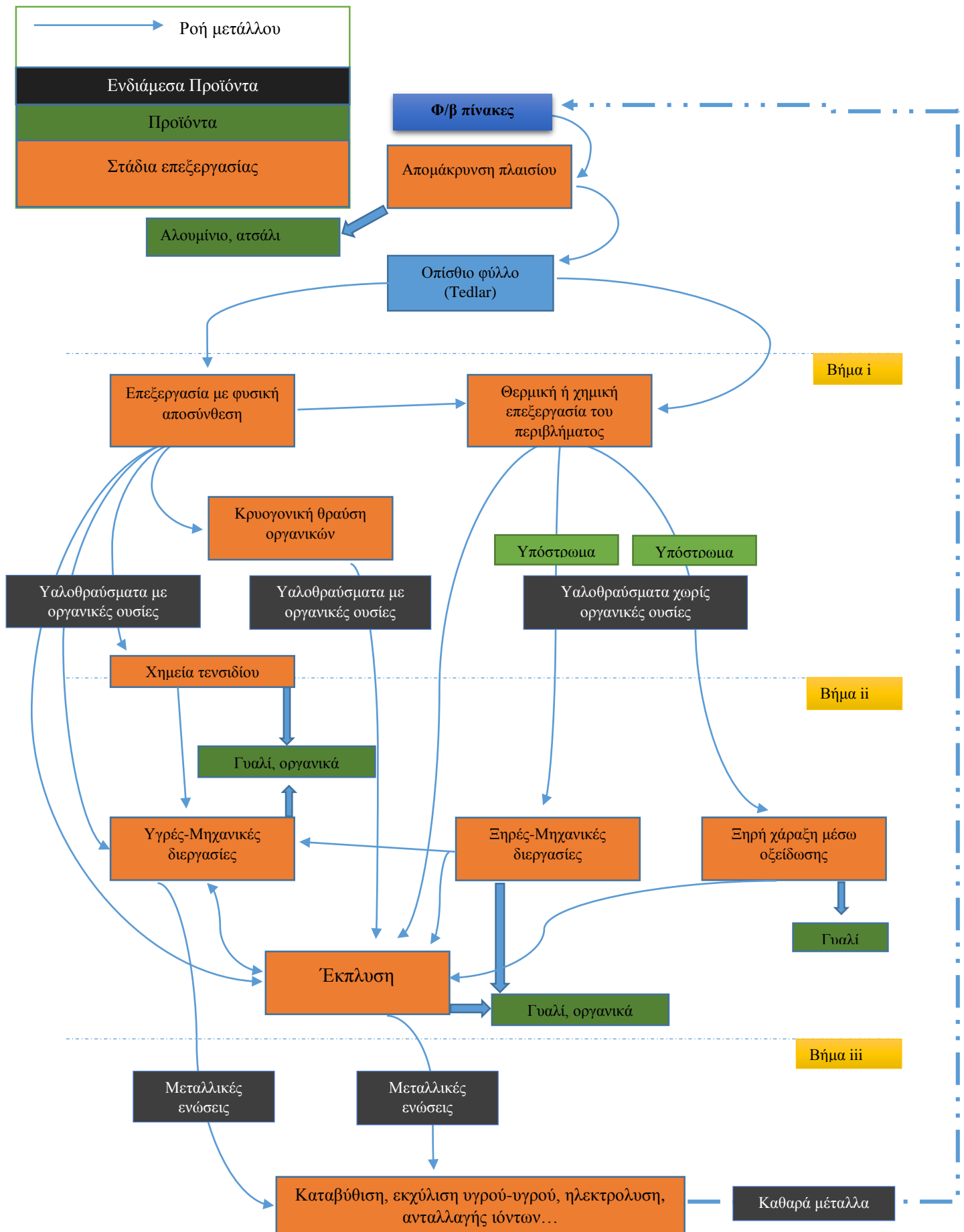
### 2.2.2 Μεθοδολογίες για ανακύκλωση φ/β πινάκων χαλκογενιδίων

Έχοντας περιληπτικά αναφέρει τις πηγές πρώτων υλών για ανακύκλωση φ/β πινάκων, είναι χρήσιμη η επιγραμματική αναφορά των πιθανών σταδίων από τα οποία αποτελείται η διαδικασία που αφορά τη διαχείριση φ/β πινάκων χαλκογενιδίων. Τα διαφορετικά αυτά στάδια μπορούν να είναι <sup>[74][75][86]</sup>:

- i. Μερική ή ολική απομάκρυνση του μεταλλικού προστατευτικού ελάσματος των φ/β πινάκων με χρήση μεθόδων φυσικής αποσύνθεσης (τεμαχισμός, άλεση), θερμικής ή χημικής επεξεργασίας ή κρυογονικής θραύσης.
- ii. Απομάκρυνση των υποστρωμάτων σε μορφή υαλοθραυσμάτων ή άθικτα εφόσον καθίσταται δυνατός ο διαχωρισμός των μη-μεταλλικών τμημάτων (φύλλα επικαλύψεων, γυαλί) από τα μεταλλικά τμήματα (ημιαγωγοί, μέταλλα).
- iii. Απομάκρυνση και ξεχωριστή επεξεργασία των υλικών.

Βασισμένο στα παραπάνω τρία στάδια, ακολουθεί το επόμενο διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται δύο γενικευμένες μέθοδοι ανακύκλωσης για πίνακες λεπτού υμενίου <sup>[85]</sup>







### Αποκόλληση στρώσεων (Delamination)

Στο πρώτο στάδιο κρίνεται απαραίτητη η απομάκρυνση του οπίσθιου προστατευτικού φύλλου (Tedlar) το οποίο έχει ως αρχικό στόχο της προστασία του εσωτερικού του φ/β πίνακα από μηχανικές καταπονήσεις, υγρασία κ.ά. Η παρουσία του είναι εκείνη που επιτρέπει το προσδόκιμο όριο ζωής του φ/β πίνακα να αγγίζει τα 25-30 έτη <sup>[80]</sup>. Οι φ/β πίνακες και η τοποθέτηση των οργανικών αυτών φύλλων έχει συνδυαστεί με την επιμήκυνση του χρόνου ζωής των πινάκων με ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας, και όχι με την ευκολία που μπορεί να παρουσιάζουν στην αποσυναρμολόγησή τους που θα πάρει μέρος κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της ανακύκλωσης. Απόρροια αυτού αποτελεί ο προσανατολισμός των κατασκευαστών στην κατεύθυνση της αντικατάστασης των προστατευτικών στρωμάτων ενθυλάκωσης με κολλητικές-μονωτικές ουσίες επιμηκύνοντας τον χρόνο ζωής, ανεβάζοντας όμως παράλληλα την δυσκολία αποσυναρμολόγησης.

Η διαδικασία που ακολουθεί αφορά την απομάκρυνση του οργανικού φύλλου με μεθόδους φυσικής αποσύνθεσης (τεμαχισμός, άλεση) (Εικόνα 45). Ωστόσο, η επεξεργασία αυτή δεν είναι αρκετή για την ολική απομάκρυνση του ελάσματος από το γυάλινο υπόστρωμα και γι' αυτόν το λόγο ακολουθούν περαιτέρω επεξεργασίες διαχωρισμού. Οι εργασίες αυτές περιλαμβάνουν τη χρήση ειδικών ουσιών για την



*Εικόνα 45 Μάζα κατεστραμμένων κελιών CIS. <sup>[109]</sup>*



ευκολότερη απομάκρυνση του φύλλου όπως: υδροκοπή, θερμική επεξεργασία (στοχευμένη ή μη), χρήση οξέων-βάσεων, διαλυτών ή κρυογονική ψύξη. <sup>[74][86]</sup>

#### Διαχωρισμός των μη μεταλλικών τμημάτων (φύλλα επικαλύψεων, γυαλί) από τα μεταλλικά τμήματα (ημιαγωγοί, μέταλλα) ύστερα από την απομάκρυνση των υποστρωμάτων

Μετά το τέλος της διαδικασίας απομάκρυνσης του οπίσθιου φύλλου καθίσταται δυνατή η απόσπαση των υλικών λεπτού υμενίου από το υπόστρωμα. Η διαδικασία αυτή είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με τη χρήση υγρών-μηχανικών, ξηρών-μηχανικών μεθόδων και ξηρής χάραξης μέσω οξείδωσης. <sup>[86]</sup>

Στην περίπτωση των υγρών-μηχανικών μεθόδων, η διεργασία διαφοροποιείται ανάλογα με την κατάσταση των πινάκων προς επεξεργασία. Στην περίπτωση των μη-κατεστραμμένων πινάκων, με τη βοήθεια μια συσκευής τεχνολογίας ψηγματοβολής υπό κενό (Vacuum Blasting) που χρησιμοποιεί το κενό και όχι την πίεση του αέρα, δύναται να απομακρυνθεί το ενεργό στρώμα των ημιαγωγών από τον γυάλινο φορέα, με μικρές απώλειες γυαλιού που επικάθονται στους ημιαγωγούς. Έτσι, είναι δυνατή η παράλληλη απομόνωση και ανακύκλωση γυαλιού. Σε επόμενο βήμα, με τη βοήθεια ενός διαχωριστή αέρα, οι λειαντικές ουσίες διαχωρίζονται από τα υψηλής αξίας υλικά. Σε μια επανάληψη της διαδικασίας είναι δυνατή η ανάκτηση του 25% των χρήσιμων υλικών του πίνακα, ποσοστό που αναμένεται να αυξηθεί σε περισσότερες επαναλήψεις. Επιπλέον, με τη διαδικασία διαχωρισμού επίπλευσης (Flotation Separation) είναι δυνατός ο εμπλουτισμός των ημιαγωγών και ο διαχωρισμός τους από λειαντικές ουσίες και τμήματα γυαλιού. Επιπλέον, επιτυγχάνεται ανάκτηση περίπου του 12% του Te και 35% του In.

Στην περίπτωση που οι φ/β πίνακες είναι κατεστραμμένοι, η διαδικασία περιλαμβάνει τη σύνθλιψη τους και περαιτέρω επεξεργασία τους με τη χρήση υγρών-μηχανικών μεθόδων. Με τη βοήθεια μιας συστοιχίας αναδευτήρων λόγω των δυνάμεων που αναπτύσσονται, το μείγμα ημιαγωγών, γυαλιού και EVA ξεπλένεται και διαχωρίζεται σε κλάσματα με τη βοήθεια ειδικών φίλτρων. Ένα μέρος από τις ποσότητες παραμένουν λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους τους στη διαδικασία επίπλευσης και υπόκεινται σε επανάληψη της διαδικασίας σύνθλιψης, όπου με προσθήκη  $H_2SO_4$  ή  $HCl$  και υπεροξειδίου του υδρογόνου ( $H_2O_2$ ) οι ποσότητες Cd και Te περιορίζονται κάτω από τα επιτρεπτά όρια.

Παράλληλα, δύναται όπως αναφέρθηκε παραπάνω να εφαρμοστούν και ξηρές-μηχανικές μέθοδοι. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας μεθόδου είναι η χρήση μια ειδικής λεπίδας για την μηχανική αφαίρεση των ημιαγωγών από το υπόστρωμα γυαλιού. Η διαδικασία αυτή συνοδεύεται συνήθως από την χημική επεξεργασία του γυαλιού για την αφαίρεση ανεπιθύμητων υπολειμμάτων. [86][91][92]

Επιπλέον, με τη χρήση διαλυμάτων (micro-emulsions) τενσιδίου είναι δυνατή η εξουδετέρωση των οργανικών ή μη-οργανικών ενώσεων που κρατούν συνδεδεμένα το γυαλί με τους ημιαγωγούς. Οι ημιαγωγοί μπορούν στη συνέχεια να αποσπαστούν χωρίς χημική επεξεργασία και να υποστούν επεξεργασία ως μέταλλα σε κατάλληλες εγκαταστάσεις.

Ακολουθούν οι μέθοδοι ξηρής χάραξης μέσω οξείδωσης. Σε αυτού του τύπου μεθόδων επεξεργασίας, με τη βοήθεια υψηλής θερμοκρασίας (της τάξεως των 400°C), αφαιρούνται κολλητικές και λειαντικές ουσίες από πίνακες και σε περιβάλλον χλωρίου ή και με προσθήκες αζώτου απομονώνεται το Cd και το Te, τα οποία εγκλωβίζονται σε χλωριούχες ενώσεις. [93]

Επιπλέον, μια διαφορετική προσέγγιση αποτελεί η εφαρμογή οξειδωτικών μέσων με θερμό περιβάλλον για την ανάκτηση του CdTe. Ακόμη, εφαρμόζεται η χρήση διάφορων οξέων-βάσεων (νιτρικό οξύ, θειικό οξύ, υδροχλωρικό οξύ, υδροξείδιο του νατρίου κ.ά.) για την επεξεργασία των μετάλλων και των υαλοθραυσμάτων, τα οποία ύστερα από πλύσεις διαχωρίζονται με διάφορες μεθόδους όπως: διαλογή, καθίζηση, φιλτράρισμα, επίπλευση, ρευστοποίηση, ξάφρισμα (skimming) κ.λπ.. [86]

#### Απομάκρυνση και ξεχωριστή επεξεργασία των υλικών.

Για την επαναχρησιμοποίηση των ημιαγωγών και μετάλλων τα οποία απαιτούνται για την κατασκευή των φ/β πινάκων απαιτείται άριστη καθαρότητα. Για τον λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η προ-επεξεργασία των υλικών αυτών για τον εξαγνισμό και εμπλουτισμό τους. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία χημικών μεθόδων επεξεργασίας που εφαρμόζονται για την ανάκτηση των μεταλλικών στοιχείων από τα διαλύματα που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα όπως: καθίζηση, ηλεκτρόλυση, ανταλλαγή ιόντων και οξείδωση. Αξίζει να σημειωθεί πως το προκείμενο βήμα οφείλεται να διαμορφωθεί ανάλογα με τις ανάγκες της ανακύκλωσης που ποικίλουν ανάλογα με το υλικό-στόχο. Η απομάκρυνση υλικών όπως το Cd, Te, In και Ga είναι μια ιδιαίτερα

λεπτή διεργασία με προσεγμένες παραμέτρους επεξεργασίας (συγκεκριμένες συγκεντρώσεις μετάλλων, μειωμένες ανεπιθύμητες προσμίξεις κ.λπ.), με τις διεργασίες αυτές να κινούνται γύρω από τους άξονες των υδρομεταλλουργικών και πυρομεταλλουργικών διεργασιών, των οποίων τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα παρουσιάζονται στον πίνακα 7.

Πίνακας 7. Στάδια και πιθανές διαδικασίες επεξεργασίας. <sup>[91][92][94]-[97]</sup>

Στάδιο	Διαδικασία	Κατάσταση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αποκόλληση στρώσεων (Delamination).	Φυσική αποσύνθεση	Εμπορικό	Αφορά μια πληθώρα πινάκων σε διάφορες καταστάσεις παραλαβής.	Δημιουργείται ένα μείγμα από διάφορα κλάσματα υλικών, το οποίο μειώνει την αξία τους.
				Τμήμα EVA παραμένει προσκολλημένο στο γυάλινο υπόστρωμα.
				Δεν είναι επαρκής για την ολική ανάκτηση των ημιαγωγών από το γυάλινο υπόστρωμα.
				Μεγάλη ποσότητα θραυσμάτων.
				Εκτομπή μεγάλων ποσοτήτων σκόνης που περιέχουν επικίνδυνα υλικά.
				Απαραίτητη η εφαρμογή μέτρων προστασίας για τον χειριστή.
				Ο χρόνος για την διεκπεραίωση της διεργασίας ποικίλει ανάλογα με την περιοχή.
Χρήση διαλυμάτων (Οργανική χημεία)	Έρευνα		Απομάκρυνση του γυαλιού από οργανικές ενώσεις.	Ορισμένες φορές δεν είναι αποτελεσματική σε πλαστικές ταινίες υψηλής διασύνδεσης
			Το διάλυμα είναι επαναχρησιμοποιούμενο.	Το Cd μπορεί να ανακτηθεί από το υγρά κατάλοιπα.
			Τα αφαιρούμενα οργανικά στοιχεία είναι ανακυκλώσιμα.	

<p>Διαχωρισμός των μη μεταλλικών τμημάτων (φύλλα επικαλύψεων, γυαλί) από τα μεταλλικά τμήματα (ημιαγωγοί, μέταλλα) ύστερα από την απομάκρυνση των υποστρωμάτων.</p>	Υδροκοπή	Έρευνα	<p>Δεν απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία των αέριων εκλύσεων.</p> <p>Η χημική επεξεργασία είναι δυνατή χωρίς επιπλέον βήματα.</p>	<p>Ακριβή και περίπλοκη μέθοδος.</p> <p>Τμήμα EVA παραμένει προσκολλημένο στο γυάλινο υπόστρωμα.</p>
	Πυρόλυση	Πιλοτικό	<p>Το EVA καίγεται χωρίς την δημιουργία καταλοίπων.</p>	<p>Δύσκολη η ανάκτηση των όλων των μετάλλων λόγω της διαφορετικής συμπεριφοράς διάλυσης του πολυμερούς απέναντι στη χημική διεργασία.</p>
				<p>Ενδείκνυται για μικρότερους πίνακες.</p>
				<p>Ενδεδειγμένη διαδικασία απόπλυσης καυσαερίων.</p>
				<p>Ιδιαίτερα ενεργοβόρος διεργασία.</p>
	Ακτινοβολία	Έρευνα	<p>Εύκολη πρόσβαση στο επίπεδο του EVA.</p>	<p>Οι θερμικές τάσεις δύνανται να καταστρέψουν το γυαλί.</p>
				<p>Αργή διεργασία.</p>
				<p>Αργή διεργασία.</p>
	Σύνθλιψη (υγρή-μηχανική διεργασία)	Πιλοτικό	<p>Δεν απαιτεί χρήση χημικών</p> <p>Το γυαλί παραμένει καθαρό.</p>	<p>Ιδιαίτερα ακριβός εξοπλισμός.</p>
	Ψηματοβολή υπό κενό	Πιλοτικό	<p>Τα βαρέα μέταλλα παραμένουν περιορισμένα.</p>	<p>Οι ημιαγωγοί που παράγονται οφείλουν να εμπλουτιστούν στην συνέχεια με χημικές ή μηχανικές μεθόδους πριν την υδρομεταλλουργική τους επεξεργασία.</p>
				<p>Η διεργασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο σε πίνακες που έχει αφαιρεθεί το EVA, όσο και σε μικρότερους</p>

			φορείς αρκεί το γυαλί να είναι άθικτο.
		Στοχευμένη διαδικασία που αφορά μόνο τους ημιαγωγούς.	Χρονοβόρος διεργασία.
		Το γυαλί παραμένει καθαρό.	Μείωση της καθαρότητας λόγω μίξης των μεταλλικών κλασμάτων με λειαντικές ουσίες.
Χημεία τενσιδίου	Πιλοτικό	Τα τενσίδια μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν.	Οι χρησιμοποιούμενες ουσίες(emulsions) οφείλουν να είναι εξειδικευμένες για την κάθε τεχνολογία κυψελίδας.
		Πλήρης απομάκρυνση των μετάλλων από το γυαλί.	Ο χρόνος διεργασίας εξαρτάται από την περιοχή επεξεργασίας.
		Απόσπαση του EVA χωρίς χρήση θερμικές ή μηχανικές εισόδους.	
		Τα οργανικά στοιχεία παραμένουν άθικτα.	
Πλύσεις	Έρευνα/Πιλοτικό/Εμπορικό	Πλήρης απομάκρυνση των μετάλλων από το γυαλί.	Παρουσία πολλών χημικών.
		Είναι δυνατή η περαιτέρω απομάκρυνση μετάλλων από τα διαλύματα.	Δύσκολος ο έλεγχος της των χημικών αντιδράσεων. Μεγάλη η πιθανότητα εκπομπής τοξικών αερίων.
Έκθεση σε χλωριούχο ατμόσφαιρα	Πιλοτικό	Μικρός αριθμός βημάτων.	Μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται.
			Η μίξη των ημιαγωγών προκαλεί δυσκολία στο διαχωρισμό τους.
Επίπλευση (Υγρή-μηχανική διεργασία)	Πιλοτικό	Σχετικά απλή διεργασία.	Σημαντικές απώλειες πολύτιμων τμημάτων κατά τη διάρκεια της

Απομάκρυνση και ξεχωριστή επεξεργασία των υλικών.				πλύσης και του φιλτραρίσματος για είσοδο στην επίπλευση.
			Περιορισμένη χρήση χημικών.	Σε μια επανάληψη της επίπλευσης, τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά.
				Οι ημιαγωγοί οφείλουν να εμπλουτιστούν περαιτέρω πριν χρησιμοποιηθούν για την παρασκευή φ/β κυψελίδων.
	Ξηρές και Υγρές μηχανικές διεργασίες	Εμπορικό	Απουσία χημικών.	Δεν δύνανται να αφαιρεθούν τα διαλυμένα στερεά.
			Απλή διεργασία.	
			Ευκολία στην εύρεση του εξοπλισμού.	
			Μικρές απαιτήσεις ενέργειας.	
	Υδρομεταλλουργικές διεργασίες	Εμπορικό	Εφαρμόζεται εμπορικά σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.	Πολλαπλά βήματα διαχωρισμού και συγκέντρωσης.
			Χαμηλές και ελεγχόμενες εκπομπές.	Οι χημικές διεργασίες οφείλουν να εξειδικευτούν στην εκάστοτε τεχνολογία φ/β κυψελίδων.
			Εύκολη διαχείριση υδάτων.	
			Αποδεδειγμένα αξιόπιστη μέθοδος.	
	Πυρομεταλλουργικές διεργασίες	Εμπορικό	Αποδεδειγμένα αξιόπιστη και καθιερωμένη μέθοδος.	Απαιτεί μεγάλες ποσότητες εισαγόμενου υλικού.
				Τα βαρέα μέταλλα είναι ανεπιθύμητα.
				Η προ-επεξεργασία για υψηλές ποσότητες συγκεκριμένων μετάλλων είναι απαραίτητη.



## 2.3 Υπάρχουσες επώνυμες μεθοδολογίες ανακύκλωσης φ/β πινάκων

### 2.3.1 Επιλεγμένες επώνυμες μεθοδολογίες ανακύκλωσης για φ/β πίνακες κρυσταλλικού πυριτίου

#### 2.3.1.1 Η μέθοδος της Deutsche Solar

Η Deutsche Solar παρουσίασε τη μέθοδό της το 2003 και απευθύνεται σε μία ευρεία ποικιλία φ/β πινάκων πυριτίου, διαφόρων μεγεθών και ειδών. Το τμήμα της εταιρείας που ασχολείται με τη εφαρμοζόμενη διαδικασία ονομάζεται SolarMaterial και απασχολείται με διάφορες ρουτίνες ανακύκλωσης ενώ ειδικεύεται στη διαχείριση των αποσυρόμενων φ/β πινάκων. Η διαδικασία της εταιρείας περιλαμβάνει πρωτόκολλα διαχείρισης πινάκων και συστατικών τους, και κατά το στάδιο της παραγωγής, όσο και κατά το στάδιο της απόσυρσης.

Επιγραμματικά, η εταιρεία αναλαμβάνει <sup>[98]</sup>:

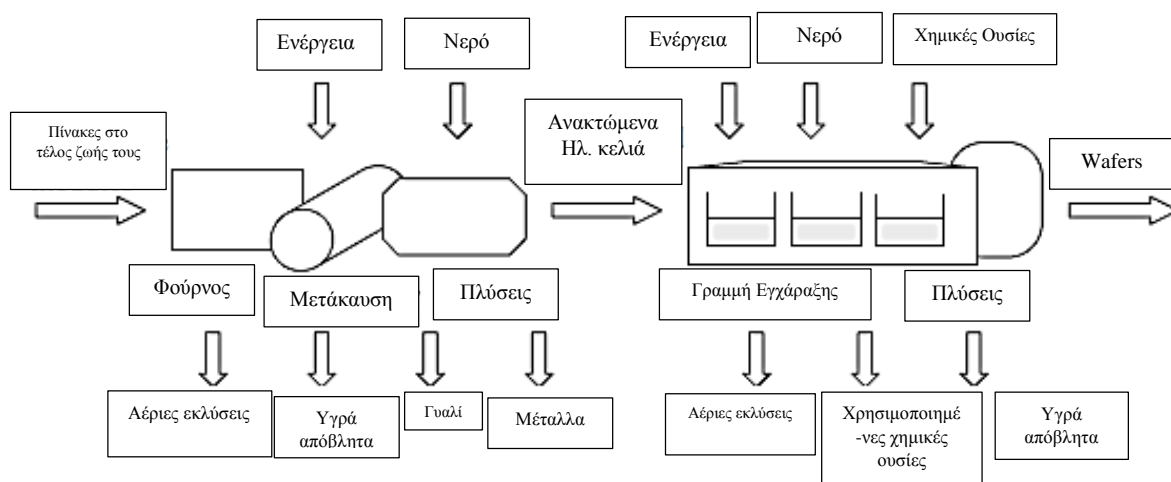
- i. Πλαϊνές, άνω και κάτω επιφάνειες πολυκρυσταλλικών ράβδων.
- ii. Υπολείμματα και απόβλητα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της παραγωγής ράβδων.
- iii. Κατεστραμμένες πλάκες πυριτίου.
- iv. Ελαττωματικώς παραγόμενα φ/β κελιά.
- v. Κατεστραμμένα φ/β κελιά.

Ένας φ/β πίνακας πυριτίου συνίσταται, όπως προαναφέρθηκε, από φ/β κελιά πυριτίου, μεταλλικές επαφές μεταξύ των κελιών, ορισμένα στρώματα προστασίας που περιβάλλουν τα κελιά, γυαλί στο εμπρόσθιο μέρος του πίνακα και μία επικάλυψη στο πίσω μέρος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο φ/β πίνακας περιβάλλεται από αλουμίνιο και ένα κουτί επαφών. Η διαδικασία ανακύκλωσης στοχεύει στην ανάκτηση του αλουμινίου, των μεταλλικών επαφών και των κελιών πυριτίου.

#### Η διαδικασία

Σε πρώτο στάδιο οι πίνακες τοποθετούνται σε ένα ειδικό φούρνο ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία αποσυναρμολόγησης έτσι ώστε να μπορέσουν να διαχωριστούν τα μεταλλικά τμήματα από το γυαλί και τα φ/β κελιά με στόχο να γίνει ξεχωριστή διαχείριση των τελευταίων. Το γυαλί και τα μεταλλικά τμήματα δίδονται προς επεξεργασία σε ειδικούς συνεργάτες εκτός εταιρείας ενώ τα κελιά επεξεργάζονται

εντός της εταιρείας. Τα κατεστραμμένα κελιά περιλαμβάνονται και αυτά στο ίδιο κύκλο επεξεργασίας με οξύ. Μετά τη χρήση οξέος αφαιρούνται οι επιστρώσεις κατά της αντανάκλασης και η ένωση p-n. Η καθαρή πλάκα/ράβδος πυριτίου, η οποία είναι το αποτέλεσμα της ανακύκλωσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά για την δημιουργία νέων φ/β κελιών. Κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας στο φούρνο καταναλώνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας, όπως συμβαίνει και στον καθαρισμό. Αξίζει να σημειωθεί πως καθ' όλη την όλη διαδικασία εκλύονται αέρια και υγρά απόβλητα. Κατά τη διάρκεια της χημικής επεξεργασίας χρησιμοποιούνται διαφορετικά χημικά μείγματα. [79][98]



Εικόνα 46 Διαγραμματική απεικόνιση της μεθόδου ανακύκλωσης της Deutsche Solar. [79]

### Κατανάλωση ενέργειας

Ένας υπολογισμός της συνολικής ενεργειακής απαίτησης της διαδικασίας δίνει μία πρώτη εκτίμηση για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της. Η κατανάλωση ενέργειας συνίσταται από την ποσότητα φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία του φούρνου και της γραμμής καθαρισμού αντίστοιχα. Η ποσότητα πρωτογενούς ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική με βαθμό αποτελεσματικότητας 35%.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 8, απαιτείται πολύ μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας για τη παραγωγή νέων ράβδων (306kWh) σε σχέση με εκείνες που δημιουργούνται μετά τη διαδικασία ανακύκλωσης (92kWh).

Πίνακας 8. Συγκριτικός πίνακας κατανάλωσης ενέργειας. <sup>[79]</sup>

	Φ/β πίνακες με νέα wafers	Φ/β πίνακες με ανακυκλωμένα wafers
Ενέργεια παραγωγής (kWh)	306	-
Διαδικασία ανακύκλωσης (kWh)	-	92
Επεξεργασία κελιών (kWh)	49	49
Συναρμολόγηση πίνακα	45	45
Σύνολο (kWh)	400	186
Παραγωγή ενέργειας (kWh)	120	120
Εκτ. Χρόνος Αποπληρωμής (έτη)	3,3	1,6

### 2.3.1.2 Η μέθοδος της Loser Chemie GmbH

Η εταιρεία ανακύκλωσης Loser Chemie αναγνωρίζοντας την σημασία της ορθής διαχείρισης των προϊόντων τεχνολογίας μετά το τέλος ζωής τους και ειδικότερα για τους φ/β πίνακες, ανέπτυξε μια καθολική μέθοδο για την αποτελεσματική διαχείριση τους στοχεύοντας τόσο στη τεχνολογία 1<sup>ης</sup> όσο και 2<sup>ης</sup> γενιάς. Η σπανιότητα των χρησιμοποιούμενων μετάλλων (Al, Ag, κ.ά.), παράλληλα με την υψηλή τους εμπορική αξία, απέδειξε την χρησιμότητα εφαρμογής αυτής της διαδικασίας. <sup>[109]</sup>

Με τη βοήθεια χημικής επεξεργασίας και πιο συγκεκριμένα, τη χρήση διαλύματος χλωριούχου αργιλίου, γίνεται δυνατή η απομάκρυνση του φύλλου αλουμινίου που βρίσκεται στην οπίσθια επιφάνεια των φ/β κελιών πυριτίου επιτυγχάνοντας παράλληλα την ανάκτηση του πολύτιμου παραπροϊόντος  $[Al_n(OH)_mCl_{3n-m}]$ , το οποίο βρίσκει εφαρμογή στη βιομηχανία χάρτου και σε μονάδες επεξεργασίας υδάτινων λυμάτων. Σε επόμενο βήμα, με τη χρήση νιτρικού αργύρου έγινε δυνατή η παραγωγή σωμάτων πυριτίου κατάλληλα για τήξη και επαναχρησιμοποίηση σε παραγωγή φ/β κελιών. Θεωρείται πως η χημική αντίδραση που εφαρμόζεται στην εν λόγω επεξεργασία παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από την κοινή χρήση υδροξειδίου του νατρίου. Τέλος, ο άργυρος που βρίσκεται στις εμπρόσθιες επαφές του πίνακα πυριτίου ανακτάται με τη χρήση νιτρικού οξέος.

### 2.3.1.3 Η μέθοδος της SolarWorld

Η SolarWorld ξεκίνησε το πιλοτικό πρόγραμμα ανακύκλωσής της το 2003 για φ/β πίνακες. Συνοπτικά, η διαδικασία ξεχωρίζει από τις προαναφερθείσες λόγω της θερμικής διαδικασίας που πραγματοποιείται, με αποτέλεσμα τα οργανικά τμήματα να αφαιρούνται πριν την απομάκρυνση των πλακών πυριτίου με χρήση οξέων. Η εταιρεία

επαναχρησιμοποιεί τα τμήματα πυριτίου και όλα τα υπόλοιπα τμήματα είτε πωλούνται, είτε απορρίπτονται. Για τη διαδικασία της συλλογής των τεμαχίων, η SolarWorld έχει διαμορφώσει ένα δικό της “bring-in” σύστημα. <sup>[99]</sup>

#### Η διαδικασία

Οι αποσυρόμενοι πίνακες θερμαίνονται στους 600°C με στόχο την καύση των οργανικών στοιχείων προστατεύοντας όμως παράλληλα τους ημιαγωγούς. Τα υπόλοιπα στοιχεία όπως τα φ/β κελιά και το γυαλί διαχωρίζονται χειροκίνητα. Το γυαλί και τα μεταλλικά μέρη αποστέλλονται προς ανακύκλωση ενώ τα φ/β κελιά διέρχονται μέσα από μία διαδικασία εφαρμογής οξέων. <sup>[98]</sup>

#### Αποτελέσματα

Η διαδικασία μπορεί να επιτύχει την ανάκτηση έως και του 84% του αρχικού βάρους που εισήχθη διατηρώντας παράλληλα υψηλό βαθμό καθαρότητας. Το γυαλί ανακυκλώνεται σε ποσοστό  $\geq 90\%$ , ενώ το 95% των ημιαγωγών επαναχρησιμοποιείται σε νέες πλάκες πυριτίου μετά από τήξη. Η θερμική επεξεργασία ανακτά το 80-98% των φ/β κελιών λαμβάνοντας μόνο υπόψιν την ζημιά που είχαν υποστεί πριν την επεξεργασία, το είδος της δομής του πίνακα και το είδος των κελιών. Όσο μικρότερο είναι το πάχος των κελιών, τόσο μικρότερη η αξιοπιστία της διαδικασίας. Πλάκες πυριτίου με πάχος μεγαλύτερο από 200μm θραύονται ευκολότερα και μπορούν να υποστούν τη διαδικασία όπου εφαρμόζονται οξέα αποδίδοντας ποσοστό ανάκτησης πάνω από 97%. <sup>[98]</sup>

#### 2.3.1.4 Η μέθοδοι της Solar Cells Inc. (SSI), Pilkington Solar International (PSI)

Οι μέθοδοι των δύο εταιρειών παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες και γι' αυτόν τον λόγο παρουσιάζονται μαζί. Περιλαμβάνουν μεθόδους ανάκτησης τμημάτων πυριτίου ή λειτουργικών κελιών πυριτίου από αντίστοιχους φ/β πίνακες.

Η SSI εξειδικεύεται στην εφαρμογή της διεργασίας της σε τμήματα φ/β πινάκων και όχι σε ολόκληρους πίνακες. Η μεθοδός της ανακτά το μεγαλύτερο τμήμα από το οπίσθιο φύλλο Tedlar και ένα μέρος από τις λειτουργικές ηλιακές κυψελίδες πυριτίου. Αρχικά, η διαδικασία ξεκινά με την σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας και την χειροκίνητη απομάκρυνση του οπίσθιου φύλλου. Στη συνέχεια, σε θερμοκρασία 500°C, πυρολύεται το EVA. Αποτέλεσμα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η

παραγωγή νέων φ/β κελιών βασισμένα στα ανακυκλωμένα υλικά με μικρή μείωση της αρχικής ονομαστικής απόδοσης.

Η PSI αντίστοιχα, χρησιμοποιεί πυρόλυση για την αντίστοιχη διεργασία της απομάκρυνσης των κολλητικών στρωμάτων. Επιπλέον, αναφέρεται πως με τη διεργασία της επιτυγχάνεται ανάκτηση του 60% της αρχικής ποσότητας πλακών πυριτίου που εισάχθηκε προς επεξεργασία. Ακόμη, τα φ/β κελιά που παράχθηκαν από τα ανακυκλωμένα υλικά παρουσιάζουν ελάχιστα καλύτερη απόδοση από τα αρχικά.

Ωστόσο, η διεργασία της πυρόλυσης που εφαρμόζεται πραγματοποιείται με τη βοήθεια ατμοσφαιρικού αέρα και όχι αδρανούς ατμόσφαιρας, κάτι το οποίο δυσχεραίνει τη διαδικασία καθώς προκαλείται οξειδωση των επαφών αργύρου που βρίσκονται στην επιφάνεια των λεπτών φετών πυριτίου. Ακόμη, η διαδικασία της πυρόλυσης ενδέχεται να διαρκέσει περίπου τέσσερις ώρες λόγω πιθανής επιφανειακής απανθράκωσης σε αντίθεση με τη μέθοδο της SSI που απαιτεί θερμική επεξεργασία μιάμισης ώρας. <sup>[111]</sup>

### 2.3.2 Επιλεγμένες επώνυμες μεθοδολογίες ανακύκλωσης για φ/β πίνακες χαλκογενιδίων

#### 2.3.2.1 Η μέθοδος της *First Solar*

Η μέθοδος της First Solar παρουσιάστηκε και εκείνη το 2003 και αφορά κυρίως στην διαχείριση φ/β πινάκων λεπτού υμενίου, τεχνολογίας CdTe. Η διαδικασία της ανακύκλωσης για την εταιρεία λαμβάνει μέρος σε κάθε μία από τις τοποθεσίες κατασκευής της. Οι συλλογή των πινάκων πραγματοποιείται από την ίδια τη First Solar και δεν υπάρχει η παραμικρή επιβάρυνση για τον πελάτη καθώς η υπηρεσία έχει προπληρωθεί κατά την αγορά. Η μέθοδος ενώ αρχικά είχε ξεκινήσει μόνο για την ανακύκλωση πινάκων CdTe, πραγματοποιούνται έλεγχοι και για την εφαρμογή της σε πίνακες τεχνολογίας CIS και CIGS. <sup>[75][86]</sup>

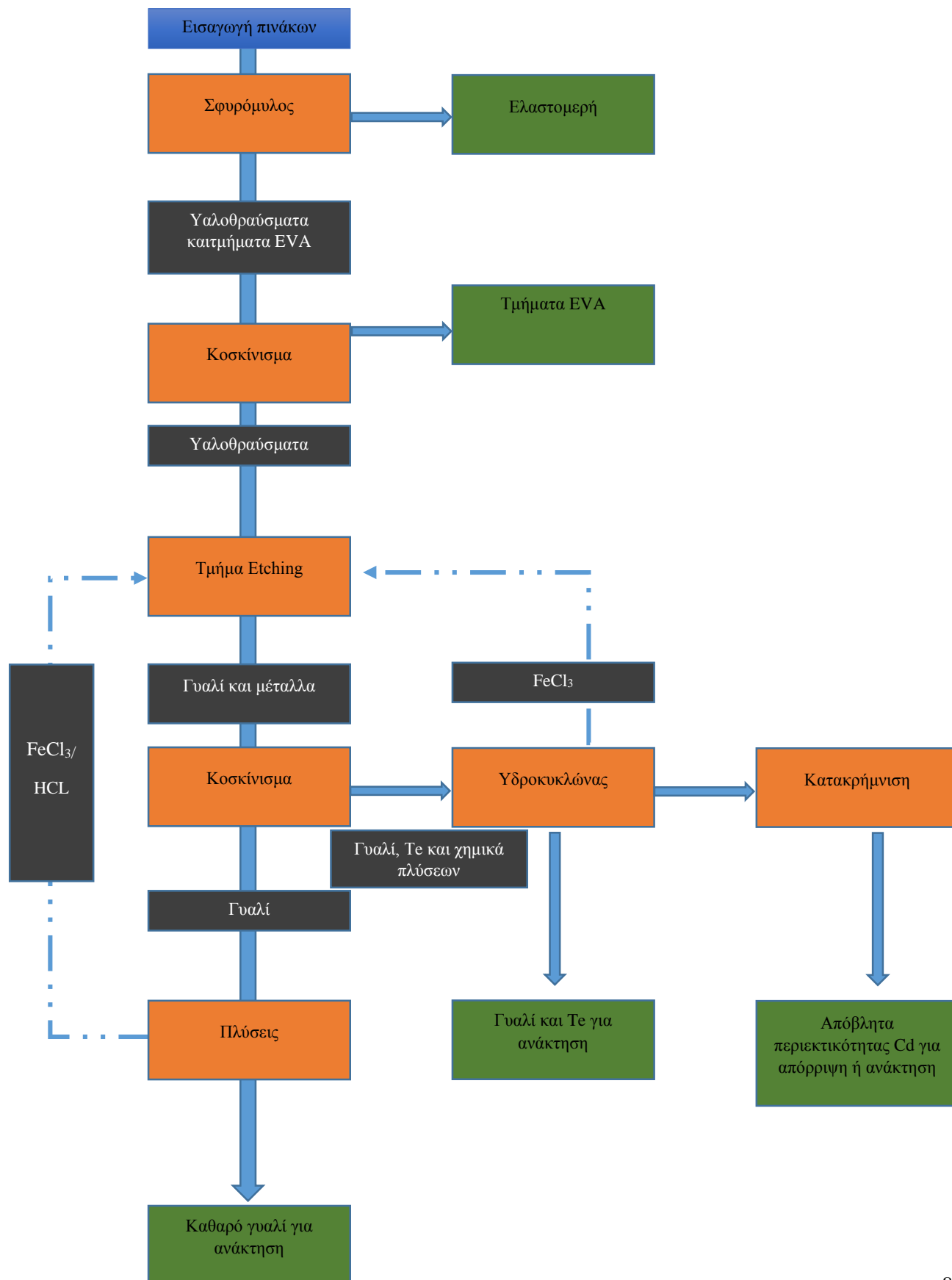
#### Η διαδικασία

Η όλη διαδικασία πραγματοποιείται σε συνολικά τρεις τοποθεσίες ανά τον κόσμο και αγγίζει την αποτελεσματική ανακύκλωση σε ποσοστό 95% για τους ημιαγωγούς, 90% για το γυαλί και 80% για το τελλούριο. Η διαδικασία ξεκινά με τον τεμαχισμό των πινάκων σε μεγάλα τμήματα, πριν τη δημιουργία τεμαχίων ακόμα μικρότερου μεγέθους της τάξεως 5mm από έναν ειδικά διαμορφωμένο σφυρόμυλο με στόχο την καταστροφή των δεσμών συγκράτησης. Οι μεμβράνες-ημιαγωγοί αφαιρούνται με



πολύ αργό ρυθμό ύστερα από την τοποθέτηση τους σε ένα πλυντήριο για 4-6 ώρες. Κατά τη διάρκεια της πλύσης, προστίθενται ασθενές θειικό οξύ και υπεροξείδιο του υδρογόνου για την επίτευξη του βέλτιστου λόγου στερεού-υγρού. Στη συνέχεια, οι μεμβράνες (films) αφαιρούνται με την χρήση οξέος. Με τη χρήση ενός διαφοροποιητή, το γυαλί ξεχωρίζεται από τα υγρά. Το υλικό αυτό μεταφέρεται σε μία δονούμενη επιφάνεια όπου το γυαλί διαχωρίζεται από το EVA. Το EVA αποθηκεύεται σε έναν άλλο φορέα ενώ το γυαλί περνάει μέσα από την δονούμενη επιφάνεια μέσω μιας χοάνης στη διαδικασία πλύσης. Μετά τον καθαρισμό του, το γυαλί αποθηκεύεται σε ειδικά σιλό και τα υγρά καθαρισμού από την προηγούμενη διεργασία αντλούνται σε ένα σύστημα κατακρήμνισης για την επεξεργασία και συλλογή μετάλλου. Παράλληλα, τα μεταλλικά στοιχεία, κατακρημνιζόμενα, διέρχονται μέσα από τρία στάδια με αυξανόμενο pH υδροξειδίου του νατρίου. Μόλις τα στερεά έχουν κατακαθίσει μεταφέρονται σε έναν εξωτερικό συνεργάτη όπου μετατρέπονται σε πρώτη ύλη για τη δημιουργία ημιαγωγών που θα χρησιμοποιηθούν σε νέους φ/β πίνακες. <sup>[75][98]</sup>

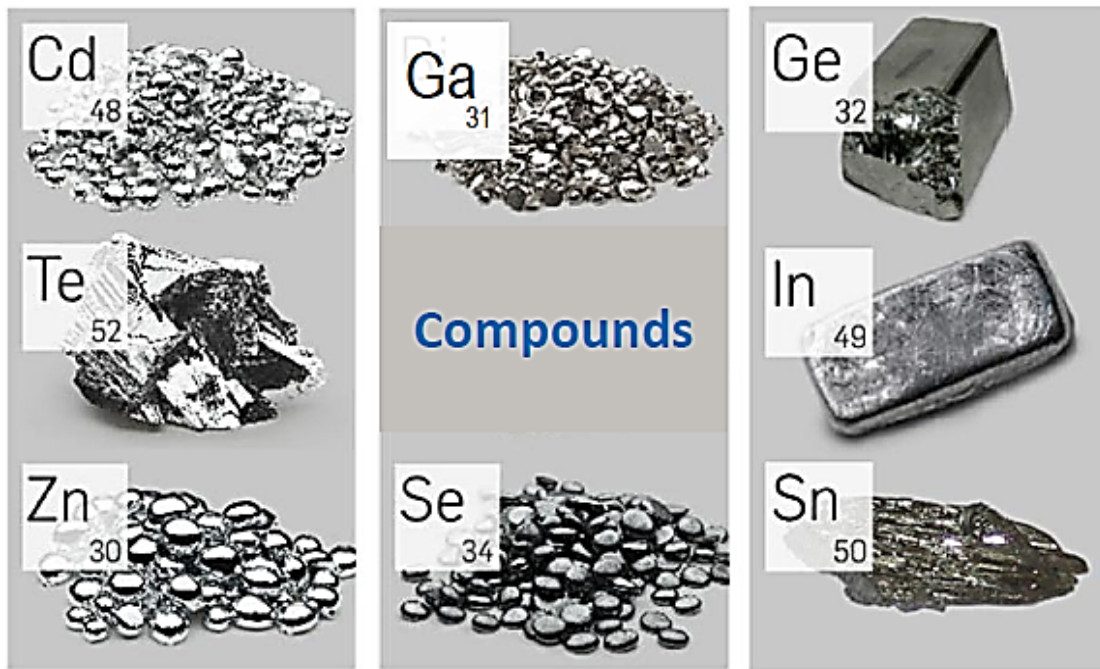
Διαγραμματικά η διαδικασία περιγράφεται στο παρακάτω [75]:





### 2.3.2.2 Η μέθοδος της 5N PLUS

Η εταιρεία 5N PLUS δραστηριοποιείται στο χώρο της ανακύκλωσης φ/β πινάκων λεπτού υμενίου και της παροχής υψηλής καθαρότητας μετάλλων και πρώτων υλών (Cd, Ga, Ge, Te, Zn, Se, Sn και In) για φ/β πίνακες. Διαθέτει εγκαταστάσεις σε Καναδά, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, Γερμανία και Μαλαισία. <sup>[104][105]</sup>



Εικόνα 47 Μέταλλα στόχοι για την 5N PLUS. <sup>[104]</sup>

Η διαδικασία της ανακύκλωσης που χρησιμοποιείται από την εν λόγω εταιρεία χωρίζεται στα τρία βήματα που περιγράφηκαν προηγουμένως: (i) απομάκρυνση κολλητικών στρωμάτων, (ii) απομάκρυνσης των οργανικών στοιχείων, και (iii)



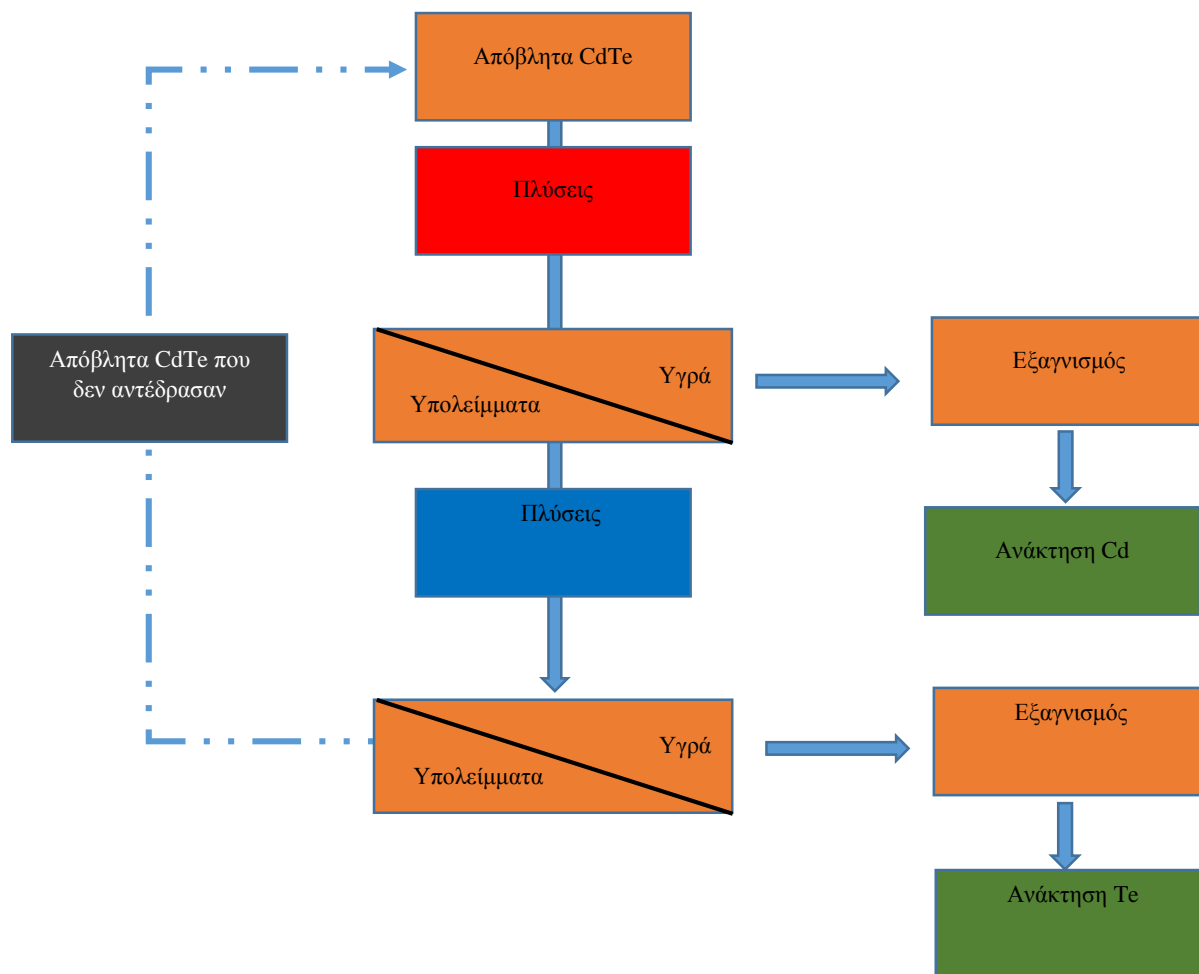
Εικόνα 48 Τμήματα επεξεργασίας φ/β πινάκων της 5N PLUS.

ανάκτηση των μετάλλων. Η διαδικασία αυτή αξίζει να σημειωθεί πως εφαρμόζεται σε άθικτους ή ελαφρώς ταλαιπωρημένους φ/β πίνακες.

Στο πρώτο στάδιο, τα εισαγόμενα προϊόντα που αποτελούνται από τους πίνακες χωρίς την γυάλινη προστασία και το πλαίσιο από αλουμίνιο, που είτε έφτασαν στο τέλος ζωής τους είτε πρόκειται για απόβλητα παραγωγής, υπόκεινται στη διαδικασία της απομάκρυνσης κολλητικών στρωμάτων. Η εν λόγω εταιρεία χρησιμοποιεί τις μεθόδους της φυσικής αποσύνθεσης, της θερμικής και χημικής επεξεργασίας και της έκθεσης σε ακτινοβολία. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διεργασιών αυτών περιγράφονται στον πίνακα 7. Μετά την εκάστοτε επεξεργασία παράγονται παραπροϊόντα όπως γυαλί, οργανικές ουσίες τα οποία επεξεργάζονται ξεχωριστά. Τα υποστρώματα φ/β κελιών που εμπεριέχουν οργανικές ουσίες προχωρούν στο επόμενο βήμα. Εκεί, με τη χρήση μεθόδων θερμικής επεξεργασίας και φυσικής αποσύνθεσης απομακρύνονται οι οργανικές ουσίες, που στη συνέχεια ανακυκλώνονται, και τα υποστρώματα χωρίς οργανικές προσθήκες οδηγούνται στο επόμενο βήμα που αφορά την απομάκρυνση μεταλλικών στοιχείων. Με τη χρήση και πάλι, είτε φυσικής αποσύνθεσης, είτε θερμικής και χημικής επεξεργασίας απομακρύνονται τα: γυαλί, Mo κ.ά., ενώ ανακτώνται τα στοιχεία που περιλαμβάνουν CdTe και CIGS.

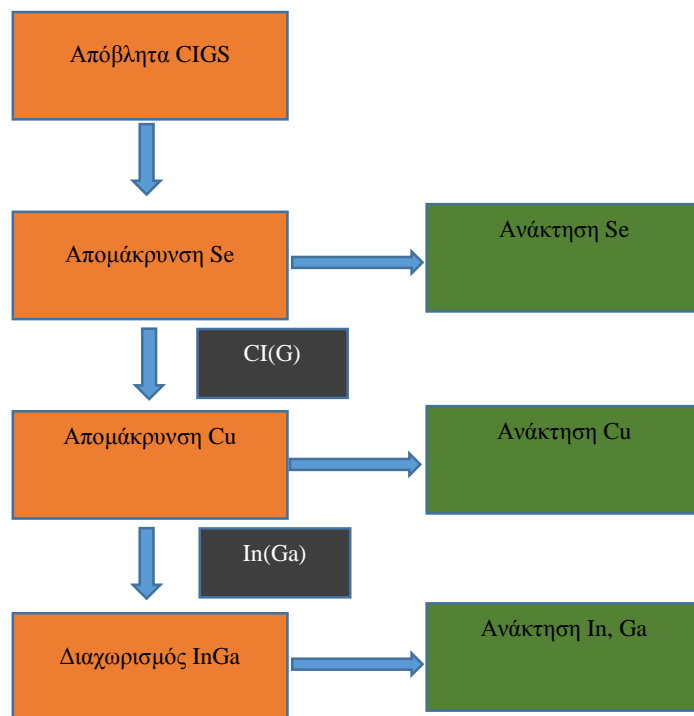
Τα υλικά που περιέχουν CdTe και CIGS επεξεργάζονται ξεχωριστά. Αρχικά, για το CdTe, πραγματοποιείται ηλεκτρόλυση για την ανάκτησή του. Μετά το τέλος του πρώτου σταδίου, από τα υγρά των πλύσεων, μετά από εξευγενισμό και απομάκρυνση προσμίξεων, ανακτάται το Cd. Από τα υπολείμματα του πρώτου σταδίου και παρουσία αλκαλικού περιβάλλοντος μετά από ηλεκτρόλυση απομονώνεται το Te ύστερα από εξευγενισμό. Αξίζει να σημειωθεί πως το CdTe, το οποίο δεν αντέδρασε και παρέμεινε ως το τέλος υπόκειται σε επανεπεξεργασία. <sup>[104]</sup>

## Η μέθοδος της 5N PLUS για το CdTe <sup>[104]</sup>



Όσον αφορά στην επεξεργασία των στοιχείων που περιλαμβάνουν CIGS, ο διαχωρισμός γίνεται με την σταδιακή απόσπαση του Se, του Cu και του In και Ga στο ίδιο στάδιο.

#### Η μέθοδος της 5N PLUS για το CIGS <sup>[104]</sup>



#### 2.3.2.3 Η μέθοδος της ANTEC Solar

Η διαδικασία ανακύκλωσης που χρησιμοποιείται από την ANTEC Solar για τους φ/β πίνακες λεπτού υμενίου CdTe και CdS αποφεύγει την χρήση υγρών-χημικών μεθόδων και δίνει έμφαση στην πραγματοποίηση των διαδικασιών παρουσία αερίων <sup>[106]</sup>. Οι πίνακες αρχικά αποσυντίθενται μηχανικά με τη χρήση συνθλιπτικών μηχανημάτων, χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις ομοιογένειας. Σε γενικές γραμμές τμήματα μεγέθους 1-10cm είναι ικανοποιητικά. <sup>[107]</sup>

Το μείγμα μικρών πλέον τμημάτων που προέκυψε, εκτίθεται σε ατμόσφαιρα υψηλής θερμοκρασίας (400-520°C για περίπου 5 λεπτά) και περιεκτικότητας σε οξυγόνο με αποτέλεσμα το EVA που αποτελεί ένα μη χλωριούχο κολλητικό σε οργανική βάση να πυρολύεται. Στην ιδανική των περιπτώσεων, παράγωγα της καύσης είναι μόνο το H<sub>2</sub>O και το CO<sub>2</sub>. Σε αντίθετη περίπτωση, κατά την οποία δημιουργούνται διάφορες οργανικές αέριες εκλύσεις όπως το μεθάνιο, δεν δημιουργείται κάποια επιπλοκή, καθώς με τη βοήθεια ειδικής αντλίας κενού τα αέρια παράγωγα απομακρύνονται από



το χώρο. Η επιλογή της θερμοκρασίας που παίρνει μέρος η διαδικασία πυρόλυσης είναι ειδικά επιλεγμένη έτσι ώστε να μην επιτρέπει στο CdTe να εξατμιστεί. <sup>[107]</sup>

Τα θρυμματισμένα πλέον φ/β στοιχεία απαλλαγμένα από το EVA, εκτίθενται σε ένα χλωριούχο-αζωτούχο αέριο σε θερμοκρασία πάνω από 400°C (διαδικασία εγχάραξης). Κατά την εν λόγω χημική επεξεργασία δημιουργούνται αέρια CdCl<sub>2</sub> και TeCl<sub>4</sub> τα οποία συμπυκνώνονται και καθιζάνουν μέσω ενός συστήματος ψύξης επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα τον διαχωρισμό τους, εξαιτίας της διαφορετικής θερμοκρασίας στερεοποίησής τους. Μια θερμοκρασία της τάξεως των 450°C είναι αρκετή για την αποτελεσματική αφαίρεση του στρώματος μετάλλων. <sup>[107]</sup>

Τα επιπλέον υαλοθραύσματα, με επιστρώσεις TCO, δύνανται να δοθούν σε τρίτους για περαιτέρω διεργασία και ανακύκλωση του γυαλιού ή να υποστούν ένα προαιρετικό βήμα που ανήκει στη συνολική διαδικασία ανακύκλωσης της ANTEC Solar. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια αερίου HCl μπορεί να απομακρυνθεί το στρώμα διάφανων αγωγίμων οξειδίων (TCO). Αν το στρώμα αυτό περιέχει μονάχα οξείδια του κασσιτέρου, παράγονται οξείδια του χλωρίου. Στην περίπτωση που συνίσταται από ITO, τότε η διαδικασία για την ανάκτηση του πολύτιμου In αποκτά ιδιαίτερη σημασία. <sup>[107]</sup>

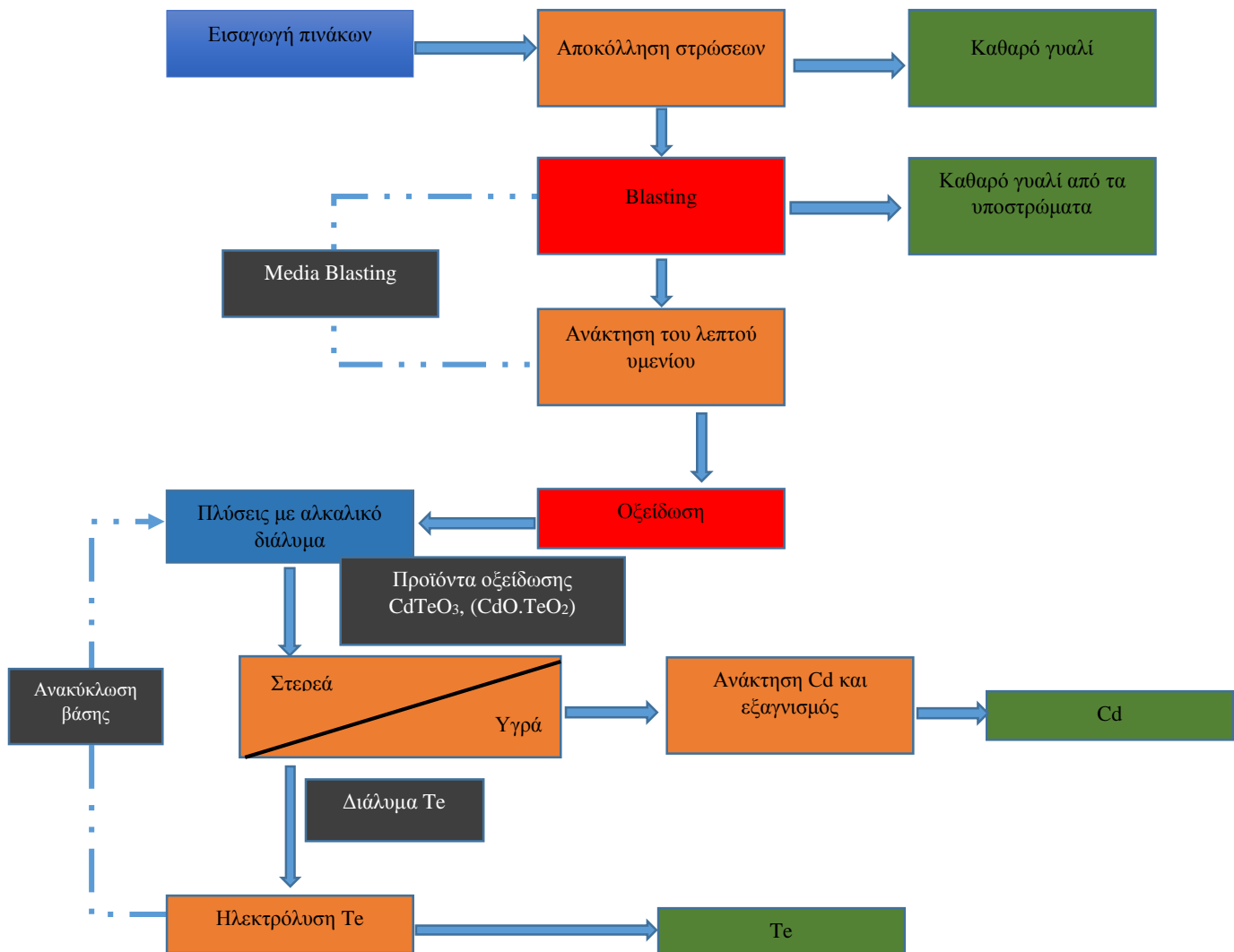
#### 2.3.2.4 Η μέθοδος της PrimeStar Solar

Η μέθοδος επεξεργασίας των φ/β στοιχείων λεπτού υμενίου CdTe πραγματοποιήθηκε από το Colorado School of Mines για χάρη της εταιρείας PrimeStar Solar. Είναι μια σχετικά πρόσφατα καθιερωμένη μεθοδολογία ανακύκλωσης καθώς η ευρεσιτεχνία των ερευνητών κατατέθηκε στα τέλη του 2012. Πλεονεκτήματα της μεθοδολογίας αυτής είναι οι χαμηλές απαιτήσεις σε χρησιμοποιούμενες ποσότητες οξέων σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες και εξασφαλίζει ανάκτηση περίπου του 80% της συνολικής ποσότητας CdTe του αρχικού φ/β πίνακα.

Η εταιρεία παρέχει τρεις διαφορετικές παραλλαγές της μεθοδολογίας της, όπως αυτές περιγράφονται στα παρακάτω διαγράμματα ροής. Στην πρώτη παραλλαγή, τα ενθυλακωμένα υποστρώματα, ύστερα από εφαρμογή του καθαρισμού με τη μέθοδο ψηγματοβολής υπό κενό, υπόκεινται αρχικά σε οξείδωση παρουσία ατμόσφαιρας υψηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο σε θερμοκρασίες ανάμεσα σε 650°C και 750°C για χρονικό διάστημα δύο ωρών. Αποτέλεσμα της διεργασίας αυτής είναι το CdTe να μετατρέπεται σε οξείδια όπως: CdTeO<sub>3</sub>, και CdO·TeO<sub>2</sub>. Ο λόγος που πραγματοποιείται

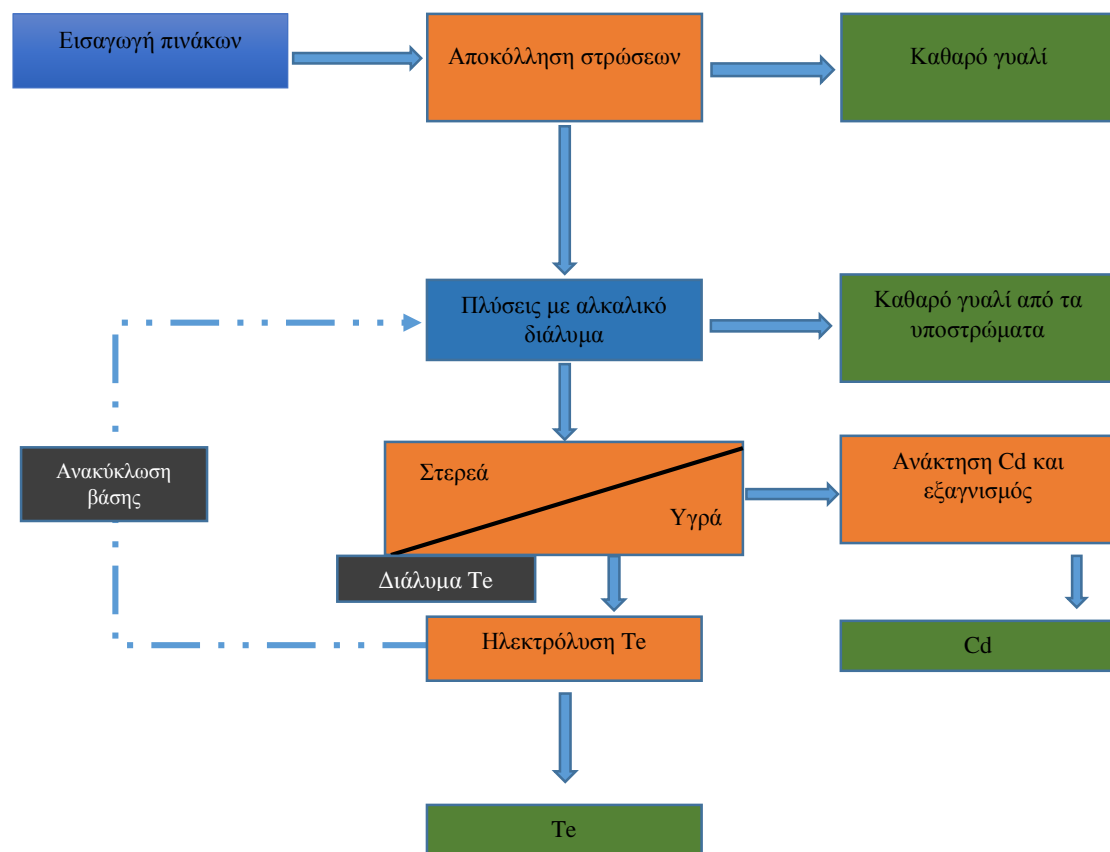
αυτό είναι διότι έτσι το Te σε κατάσταση οξείδωσης είναι ευδιάλυτο σε αλκαλικό περιβάλλον. Οι οξειδωμένες μεμβράνες λεπτού υμενίου στη συνέχεια, εκτίθενται σε αλκαλικό διάλυμα (NaOH) προς τη δημιουργία διαλυμάτων που περιέχουν Cd και Te. Το μείγμα αυτό των αλκαλικών διαλυμάτων διαχωρίζεται με φυγοκέντριση ή φιλτράρισμα. Ακολούθως, με χρήση όξινων διαλυμάτων ( $\text{HNO}_3$  και  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) και στη συνέχεια ηλεκτρόλυση ανακτάται το Cd ενώ μονάχα με ηλεκτρόλυση το Te. Η διαφορά που παρουσιάζεται στη δεύτερη παραλλαγή αφορά το γεγονός ότι τα υποστρώματα εισάγονται στη συσκευή της πρώτης οξείδωσης χωρίς να πραγματοποιηθεί η μέθοδος της ψηματοβολής υπό κενό. Η τρίτη παραλλαγή, αφορά πίνακες οι οποίοι έχουν καταστραφεί. Επιπλέον, η διαφορά με τις προηγούμενες διεργασίες είναι ότι ανάμεσα στα στάδια της οξείδωσης και της έκθεσης σε αλκαλικό περιβάλλον, οι πίνακες κονιορτοποιούνται με τη χρήση ποικίλων μηχανημάτων (ρολά θρυμματισμού, πρέσες, σφυρόμυλοι, θραυστήρες με σιαγόνες, κ.ά.). Αξίζει να σημειωθεί πως και στις τρεις παραλλαγές, τα διαλύματα αλκαλικών ουσιών που φτάνουν στο τέλος των διεργασιών ανακυκλώνονται. <sup>[108]</sup>

## Οι μέθοδοι της PrimeStar Solar Παραλλαγή 1 <sup>[108]</sup>

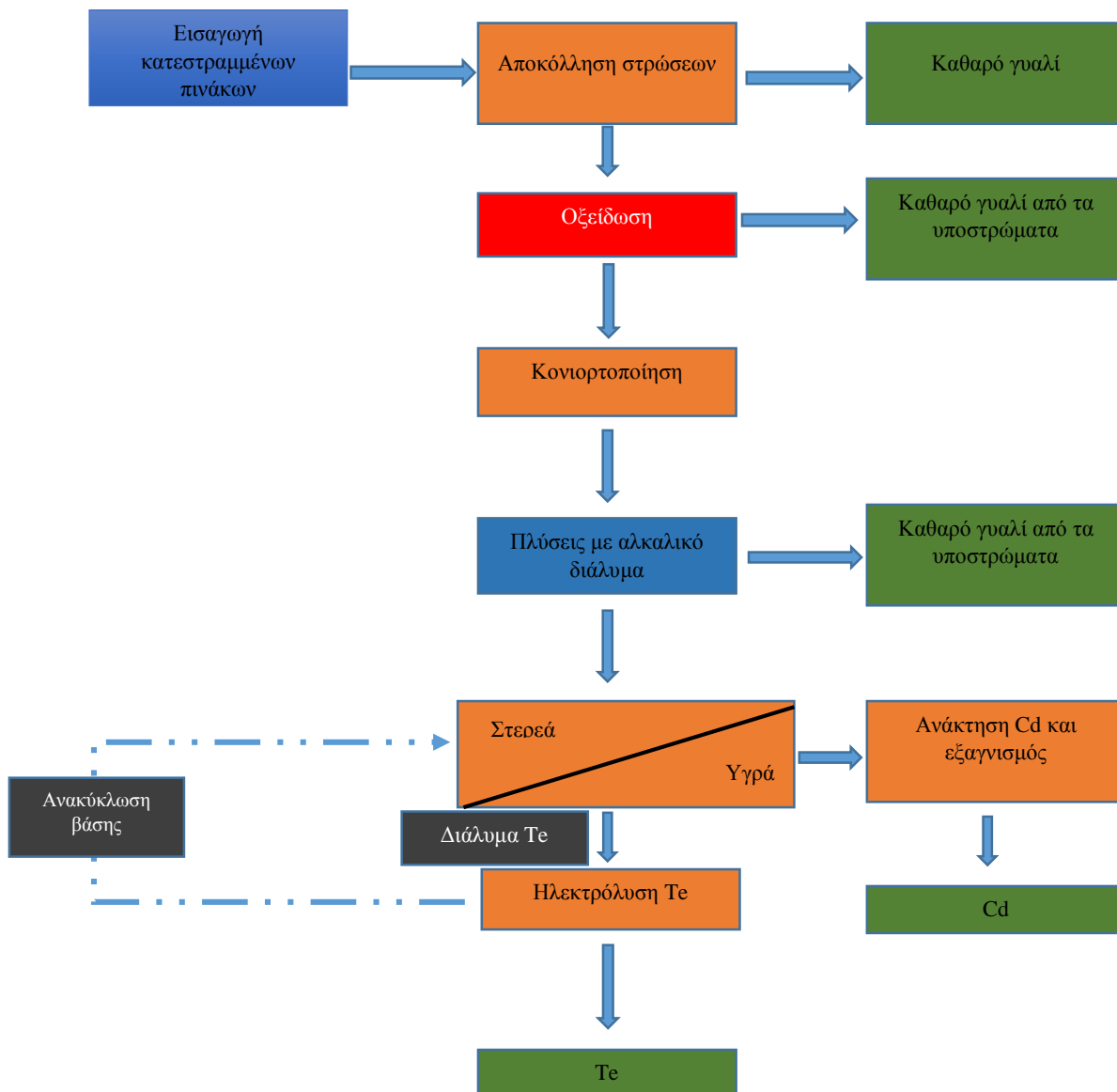




## Παραλλαγή 2 <sup>[108]</sup>



### Παραλλαγή 3 <sup>[108]</sup>



#### 2.3.2.5 Η μέθοδος της Loser-Chemie GmbH

Η Loser-Chemie εφαρμόζει την μεθοδολογία της ανακύκλωσης που έχει αναπτύξει σε φ/β πίνακες CdTe και CIGS για την ανάκτηση των πολύτιμων μετάλλων. Ωστόσο, η μέθοδός της θεωρείται εφαρμόσιμη και σε νεότερες τεχνολογίες λεπτού υμενίου που για παράδειγμα χρησιμοποιούν υποστρώματα που αποτελούνται από φύλλα αλουμινίου ή ανοξείδωτου ατσαλιού πέρα από το γυαλί ή ακόμα και ημιαγωγούς όπως το GaAs. <sup>[109]</sup>



Εικόνα 49 Σπασμένοι πίνακες λεπτού υμενίου πριν την αφαίρεση των μεταλλικών στοιχείων. <sup>[109]</sup>



Εικόνα 50 Σπασμένα τμήματα πινάκων λεπτού υμενίου μετά την αφαίρεση των μεταλλικών στοιχείων και ύστερα από καθαρισμό. <sup>[109]</sup>

Η εταιρεία μετά την πυρόλυση εφαρμόζει χημική επεξεργασία στους φ/β πίνακες. Τα οξέα που χρησιμοποιούνται είναι το υδροχλωρικό οξύ και το υπεροξείδιο του υδρογόνου για τους πίνακες λεπτού υμενίου τεχνολογίας CdTe και CIGS. Ύστερα από τις πλύσεις με τα οξέα, καθίσταται δυνατή η απομάκρυνση των μετάλλων λεπτού υμενίου όπως τα: τελλούριο, κάδμιο, ίνδιο, ψευδάργυρος, μολυβδαίνιο, σελήνιο και γάλλιο (Εικόνα 51). Επιπλέον, το γυαλί το οποίο ανακτάται είναι ιδιαίτερα υψηλής ποιότητας καθώς μετά την εφαρμογή των οξέων απομακρύνθηκε το στρώμα TCO. Στον επόμενο πίνακα, φαίνονται οι ποσότητες μετάλλων σε mg/l, όπως αυτές συνιστούν τα διαλύματα μετά την χημική επεξεργασία.



Εικόνα 51 Ετερογενές μείγμα μαύρου χρώματος που προέκυψε ύστερα από την επεξεργασία για την ανακύκλωση του CdTe. Περιέχει 92% Cd και 6% Mo. <sup>[109]</sup>

Πίνακας 9. Ανακτώμενα υλικά από τη διαδικασία ανακύκλωσης πινάκων CdTe και CIGS. <sup>[109]</sup>

Ανάκτηση από κελιά CdTe (mg/l)				
Cu	Cd	Mo	Te	Zn
0.04	810	4400	17	0.34
Ανάκτηση από κελιά CIGS (mg/l)				
Ga	In	Mo	Se	Zn
850	3500	7000	7800	-

### 3. Μέθοδος - Πρόταση ανακύκλωσης φ/β πινάκων κρυσταλλικού πυριτίου

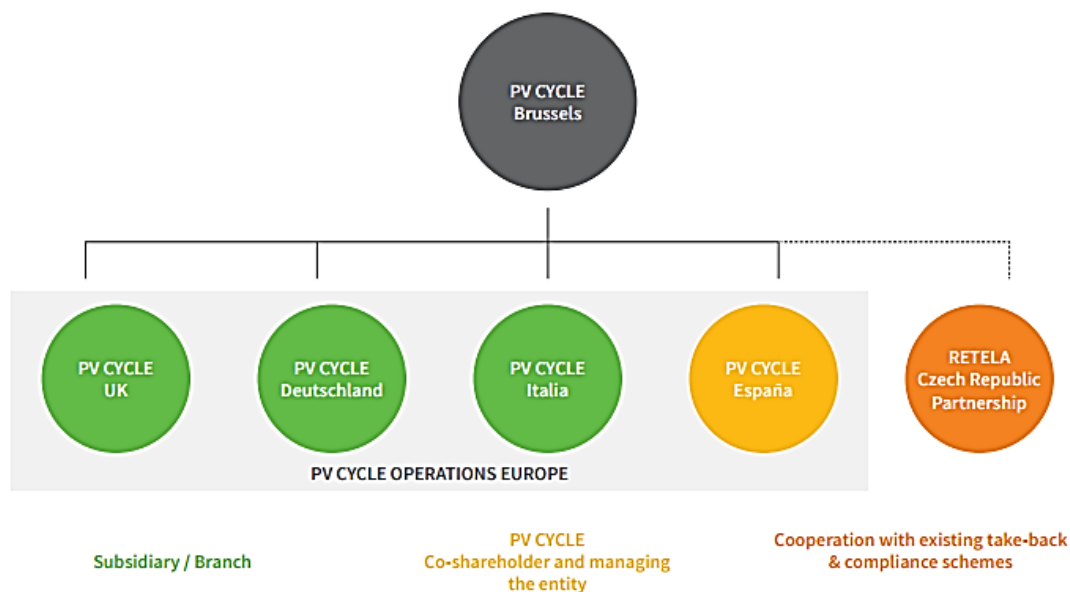
#### 3.1 Ευρωπαϊκοί Οργανισμοί – Πρωτοβουλίες

Βιομηχανίες του τομέα, στα πλαίσια της διεύρυνσης των οριζόντων της ανακύκλωσης των φ/β πινάκων, δημιούργησαν μια Ευρωπαϊκή σύμπραξη, η οποία ορίζεται υπεύθυνη για την συμμόρφωση τους σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς <sup>[112]</sup> και την παροχή εξειδικευμένων υπηρεσιών σχετικά με τη διαχείριση αποβλήτων προερχόμενα από φ/β συστήματα που υπάγονται στην κατηγορία των ΑΗΗΕ. Ο οργανισμός *PV CYCLE* <sup>[113]</sup>, διαθέτει αντιπροσώπους σε αρκετές χώρες της Ευρώπης παρέχοντας αποκεντρωμένες λύσεις. Μερικές από τις θυγατρικές και συνεργάτες του είναι οι:

- *RETELA*, υπεύθυνη για τη διαχείριση και ανάκτηση προϊόντων από παραγωγούς ΑΗΗΕ και ιδιοκτήτες φ/β συστημάτων στην Τσεχία.
- *SENS*, υπεύθυνη για τη ανάκτηση ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών, εξοπλισμό φωτισμού και φ/β συστημάτων για την Ελβετία.
- *WECYCLE*, υπεύθυνη την περισυλλογή οικιακών και επαγγελματικών αποβλήτων φ/β συστημάτων στην Ολλανδία.
- Και οι *PV CYCLE UK*, *PV CYCLE Deutschland*, *PV CYCLE Italia*, *PV CYCLE España*, υπεύθυνες για τη διαχείριση του οργανισμού και την παροχή υπηρεσιών ανακύκλωσης ΑΗΗΕ.



Εικόνα 52 Το λογότυπο του ευρωπαϊκού οργανισμού ανακύκλωσης *PV CYCLE*. <sup>[113]</sup>

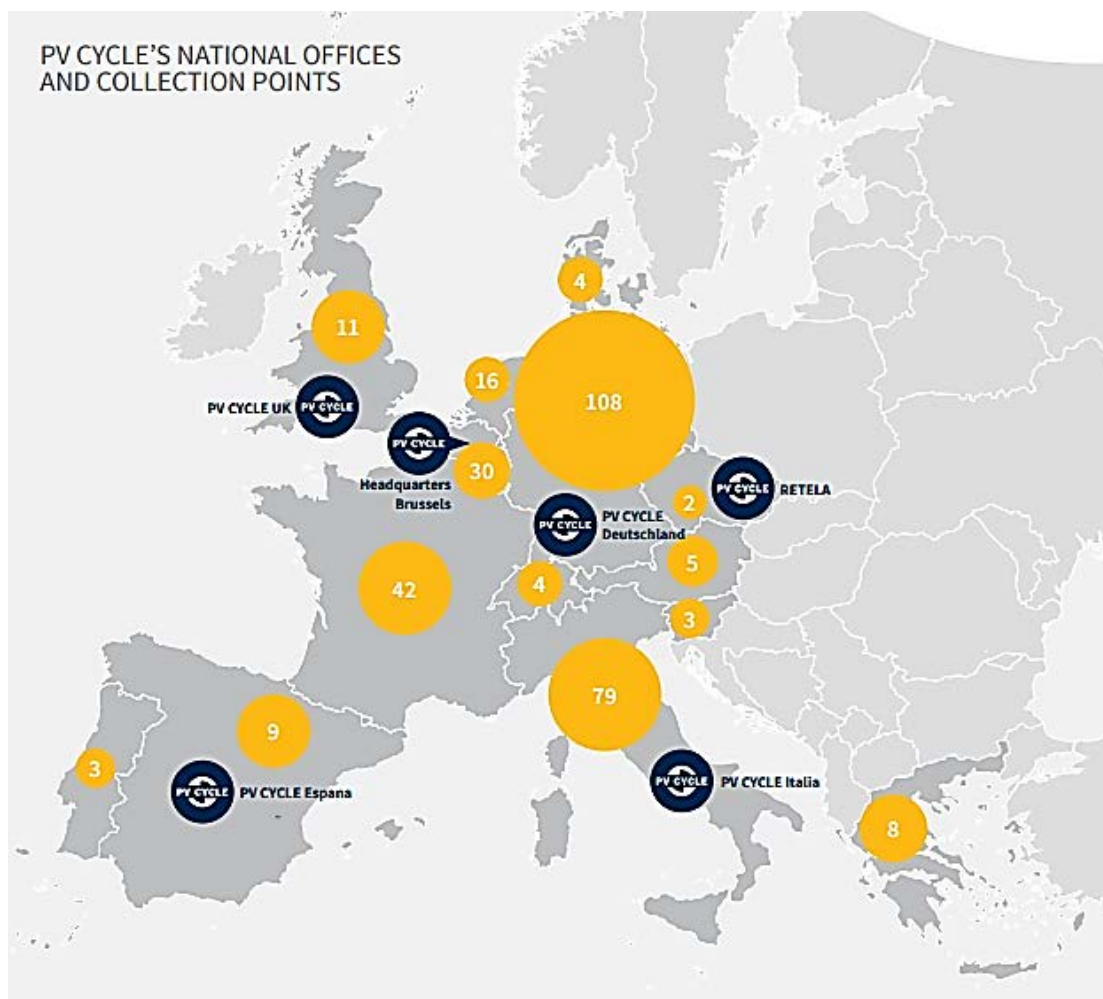


Εικόνα 53 Η δομή του Ευρωπαϊκού οργανισμού ανακύκλωσης PV CYCLE. <sup>[114]</sup>

Μέχρι το τέλος του 2013, ο οργανισμός από την ίδρυση του έχει συγκεντρώσει περίπου 8.300 τόνους ανακυκλώσιμων υλικών εκ των οποίων το 13% προήλθε μέσω σημείων συγκέντρωσης από διάφορες χώρες στην Ευρώπη, τα οποία αυξήθηκαν κατά 19% σε σχέση με το 2012 – από 272 σε 324 <sup>[114]</sup>. Η πληθώρα των ανακυκλώσιμων προϊόντων φτάνει στα σημεία συγκέντρωσης μέσω των συστημάτων συλλογής και διαλογής που υποστηρίζει ο εκάστοτε συνεργάτης.

Πίνακας 10. Αριθμός συμβεβλημένων με τον PV CYCLE, σημείων συλλογής, ανά χώρα μέχρι 31 Δεκεμβρίου 2013. <sup>[114]</sup>

Ευρωπαϊκή Χώρα	Αριθμός σημείων συλλογής
Γερμανία	108
Ιταλία	79
Γαλλία	42
Βέλγιο	30
Ολλανδία	16
Ηνωμένο Βασίλειο	11
Ισπανία	9
Ελλάδα	8
Αυστρία	5
Ελβετία	4
Δανία	4
Πορτογαλία	3
Σλοβενία	3
Δημοκρατία της Τσεχίας	2
<b>Σύνολο σημείων συλλογής</b>	<b>324</b>



Εικόνα 54 Ευρωπαϊκός χάρτης με τα διοικητικά γραφεία και σημεία συλλογής του ευρωπαϊκού οργανισμού ανακύκλωσης PV CYCLE. <sup>[114]</sup>

### 3.2 Η ανακύκλωση φ/β πινάκων στην Ελλάδα

Έως σήμερα, στον Ελλαδικό χώρο, πρωτοβουλίες για μια ενοποιημένη διαδικασία ανακύκλωσης φ/β πινάκων δεν έχει πραγματοποιηθεί. Ωστόσο, έχουν δημιουργηθεί ειδικά κέντρα συλλογής τα οποία πραγματοποιούν τη διαλογή των διάφορων τμημάτων που προκύπτουν, με σκοπό την προώθησή τους σε κέντρα ανακύκλωσης άλλων Ευρωπαϊκών χωρών. Σύμφωνα με την πιο πρόσφατη αναφορά του PV CYCLE, ο αριθμός των σημείων συγκέντρωσης φ/β αποβλήτων στην Ελλάδα ανέρχεται σε οκτώ (8) <sup>[114]</sup>.

Ανάμεσά τους βρίσκονται οι:

- Krannich Solar M.E.Π.Ε.
- Smart-Power



- Φίλια Περιβαλλοντικές Βιομηχανίες Α.Ε.
- Aleo Solar GmbH Greece
- Biorecycling LTD

### 3.3 Η πρόταση

#### 3.3.1 Ο στόχος

Μια εξέλιξη των οδηγιών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στις οποίες υπόκειται και η Ελλάδα, είναι η ιδέα της βιομηχανικής συμβίωσης. Επεξηγηματικά, πρόκειται για τη μετατροπή ενός γραμμικού μοντέλου βιομηχανικής παραγωγής σε κυκλικό. Ως αποτέλεσμα, με τη εφαρμογή της ιδέας, οι εφαρμογές και τα απόβλητα μιας παραγωγής αποτελούν χρήσιμο απόθεμα για τη λειτουργία κάποιας άλλης συγγενούς βιομηχανικής γραμμής. Στους φ/β πίνακες βρίσκεται περίσσεια πολύτιμων και σπάνιων υλικών από τα οποία, αναμφίβολα, μπορεί να ευνοηθεί η Ελληνική επιχείρηση.

Στόχος της παρούσης εργασίας είναι η παρουσίαση μιας πρότυπης, ενοποιημένης μεθόδου ανακύκλωσης φ/β πινάκων κρυσταλλικού πυριτίου με τη βοήθεια τρισδιάστατης προσομοίωσης, προσεγγίζοντας το επιχειρηματικό ενδιαφέρον του Έλληνα επενδυτή. Η σχεδίαση της γραμμής πραγματοποιήθηκε παραμετρικά, επιτρέποντας την τροποποίηση της διαστασιολόγησης και χωροθέτησης των μηχανημάτων και των εγκαταστάσεων, με σκοπό την παροχή ευελιξίας όσον αφορά στην ικανοποίηση των ποσοτικών αναγκών εισόδου/εξόδου, περιορισμών χώρου και χρηματοδότησης.

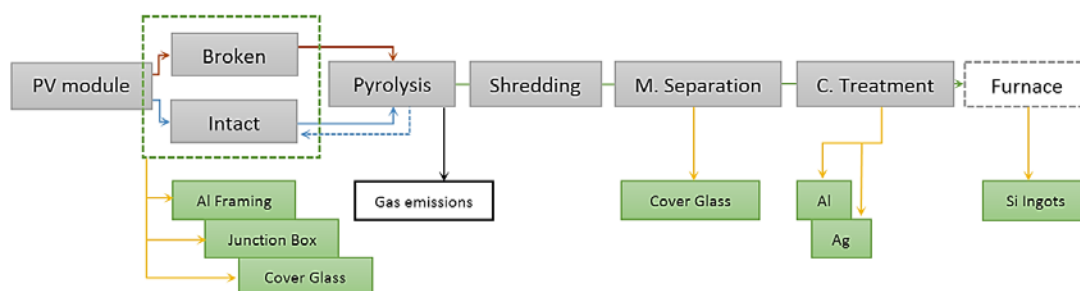
#### 3.3.2 Η προτεινόμενη μεθοδολογία

Η προτεινόμενη διαδικασία ανακύκλωσης αφορά τμήματα ή ολόκληρους φ/β πίνακες κρυσταλλικού πυριτίου (p-Si, c-Si) και ξεκινά με την φυσική αποσυναρμολόγηση των εισερχόμενων αποβλήτων φ/β υλικού όπου απομακρύνονται τα πλαίσια αλουμινίου, τα κουτιά επαφών και πιθανές καλωδιώσεις. Το στάδιο της αποκόλλησης των φ/β πινάκων ακολουθεί με την αφαίρεση της οργανικής ενθυλάκωσης (EVA) με θερμική επεξεργασία σε περιβάλλον ευγενούς αερίου. Στην περίπτωση σπασμένου προστατευτικού γυαλιού, ο πίνακας που έχει υποβληθεί σε πυρόλυση θρυμματίζεται, σε αντίθεση με την περίπτωση άθικτου προστατευτικού γυαλιού, όπου μετά την πυρόλυση η φυσική αποσυναρμολόγηση διευκολύνεται και το γυαλί ανακτάται ευκολότερα.

Το στάδιο του μηχανικού θρυμματισμού οδηγεί στην επιθυμητή κοκκομετρία, η οποία καθίσταται απαραίτητη για τον μηχανικό διαχωρισμό του γυαλιού από τα τμήματα πυριτίου. Επιπροσθέτως, η χημική επεξεργασία (αν και δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης του παρόντος κεφαλαίου) περιλαμβάνει την εφαρμογή προσαρμοσμένων όξινων/αλκαλικών διαλυμάτων ανάλογα με το είδος των εισαχθέντων πινάκων μέσα από την οποία ανακτώνται ο άργυρος και το αλουμίνιο ενώ η αντιανακλαστική επικάλυψη (ARC), οι εμπλουτισμοί των λεπτών φετών πυριτίου και η επαφή p-n αφαιρούνται.

Σαν τελικό στάδιο της διαδικασίας θα μπορούσε να υιοθετηθεί η χρήση ειδικού φούρνου για την επανάτηξη του ανακτώμενου πυριτίου σε ράβδους. Αξίζει να σημειωθεί πως τα τμήματα αλουμινίου, αργύρου, γυαλιού και τα κουτιά επαφών μπορούν να προωθηθούν σε συνεργάτες για περαιτέρω επεξεργασία εκτός του χώρου του εργοστασίου.

Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 55) φαίνεται η προτεινόμενη διαδικασία ανακύκλωσης:



Εικόνα 55 Η προτεινόμενη διαδικασία ανακύκλωσης για τμήματα ή ολόκληρους πίνακες κρυσταλλικού πυριτίου.

Η θερμική επεξεργασία πραγματοποιείται με την παρουσία πυρολυτικού αντιδραστήρα σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας με τη βοήθεια σπειροειδούς οριζόντιας περιστροφικής κίνησης επιτρέποντας τον καθορισμό του μήκους, της διαμέτρου και του χρόνου επεξεργασίας (μέσα από τη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής). Επιπλέον, η διάταξη θερμικής επεξεργασίας περιλαμβάνει σύστημα μετάκαυσης, κυκλώνες, πλυντηρίδες και κατάλληλες σωληνώσεις. Τα θερμά αέρια της καύσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ηλεκτροπαραγωγή και αυτοκατανάλωση.

Ο θρυμματισμός εφαρμόζεται με τη χρήση δύο (2) διαφορετικών ειδών μηχανών. Ο πρώτος μηχανισμός, με δίδυμους άξονες τεμαχισμού, συναντάται ευρέως σε χώρους

ανακύκλωσης και στόχος του είναι η μείωση του μεγέθους των εισαγόμενων αποβλήτων μέσω περιστροφικής κίνησης. Οι βασικοί παράμετροι σχεδιασμού αποτελούν το χρήσιμο μήκος και διάμετρος των αξόνων περιστροφής. Ο αριθμός και το πλάτος των λεπίδων καθορίζεται ανάλογα. Το δεύτερο είδος μηχανισμού θρυμματισμού συναντάται κυρίως σε πεδία ανακύκλωσης πλαστικών αποβλήτων. Ωστόσο, με κατάλληλες τροποποιήσεις δύναται να χρησιμοποιηθεί στην εν λόγω προτεινόμενη διαδικασία ανακύκλωσης. Πρόκειται για έναν κοκκοποιητή με βασικές παραμέτρους σχεδιασμού να αποτελούν το μέγεθος του πλέγματος που υποστηρίζει και η διάμετρος του άξονα περιστροφής.

Στη συνέχεια, ο μηχανικός διαχωρισμός πραγματοποιείται με τη χρήση ενός κεκλιμένου μηχανισμού δόνησης τοποθετώντας παράλληλα επίπεδα που υποστηρίζουν διαφορετικό πλέγμα με στόχο τη διαλογή βασισμένη στη διάμετρο των εισαγόμενων αποβλήτων. Ο χρήστης είναι σε θέση να τροποποιήσει το χρήσιμο μήκος, πλάτος, ύψος και τη γωνία λειτουργίας του μηχανισμού σύμφωνα με τις ανάγκες του.

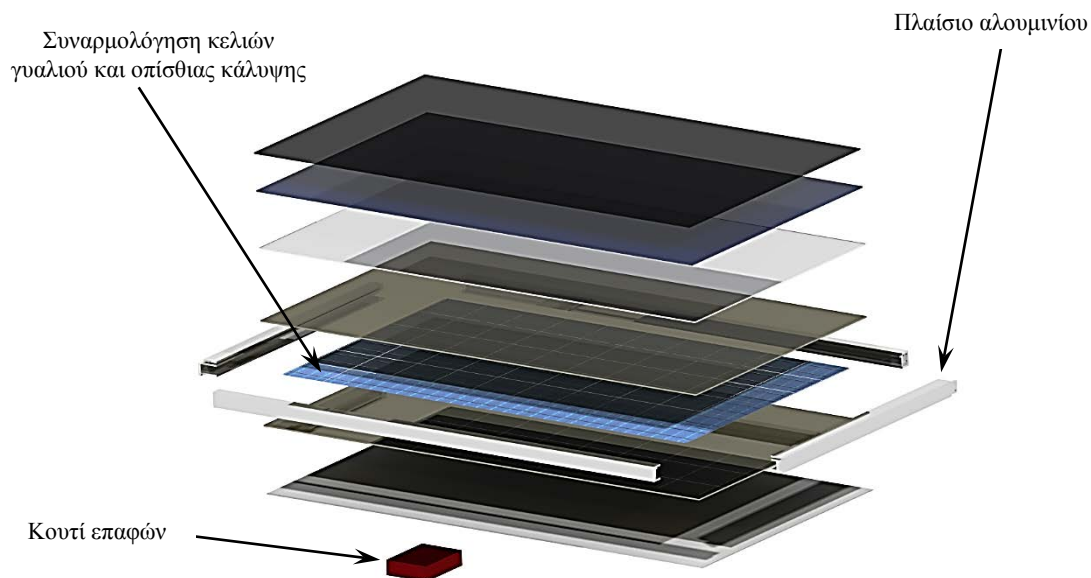
Ο χημικός διαχωρισμός πραγματοποιείται σε ειδικό χώρο και οι μέθοδοι ανάκτησης ποικίλουν. Επιπροσθέτως, σχεδιάστηκε ένας ειδικός φούρνος επανάτηξης των κομματιών καθαρού πυριτίου σε ράβδους για επαναχρησιμοποίηση σε νεότερες τεχνολογίες φ/β. Ολοκληρώνοντας, σχεδιάστηκαν ραυλόδρομοι και μεταφορικές ταινίες για τη διευκόλυνση των μεταφορών εντός του πεδίου ανακύκλωσης.

### 3.3.3 Η προτεινόμενη γραμμή παραγωγής για ανακύκλωση φ/β πινάκων κρυσταλλικού πυριτίου

#### 3.3.3.1 Τμήμα φυσικής αποσυναρμολόγησης

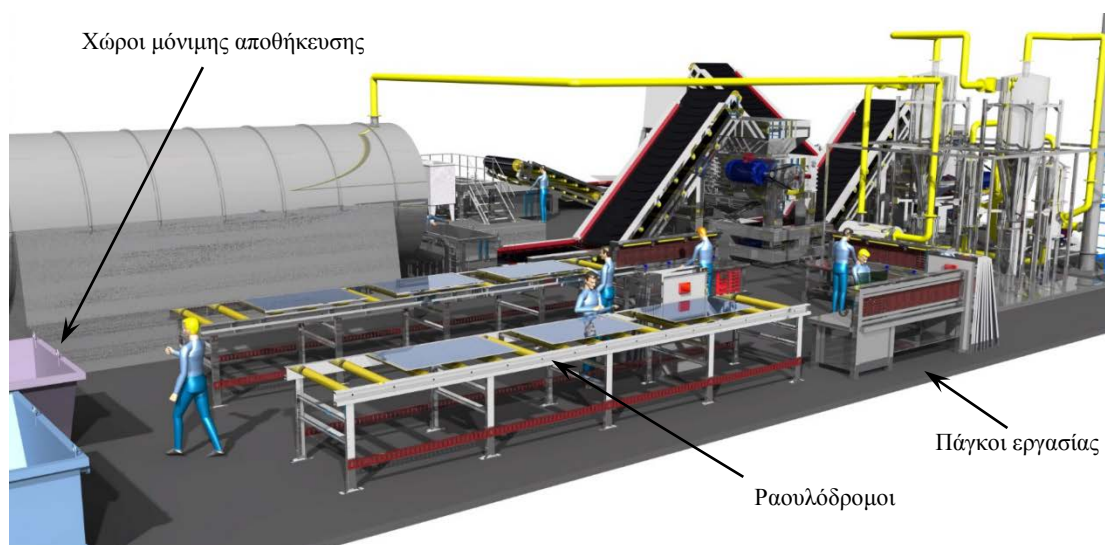
Στο εν λόγω τμήμα πραγματοποιείται η προεπεξεργασία των φ/β πινάκων πριν την εισαγωγή τους στη διαδικασία ανακύκλωσης. Η διαδικασία φυσικής αποσυναρμολόγησης εμπεριέχει δύο ενδεχόμενα. Στην περίπτωση θρυμματισμένου προστατευτικού γυαλιού, αφαιρούνται απευθείας από τον πίνακα το πλαίσιο αλουμινίου, το κουτί συνδέσεων και οι καλωδιώσεις και στη συνέχεια ο πίνακας προωθείται στο στάδιο της πυρόλυσης και του θρυμματισμού. Αντίθετα στην περίπτωση όπου το προστατευτικό γυαλί είναι άθικτο, ο πίνακας πρώτα πυρολύεται με στόχο την απομάκρυνση των οργανικών κολλητικών ουσιών και την διευκόλυνση την απομάκρυνσης του γυαλιού σε μεγάλα τμήματα. Ωστόσο, οι λεπτές φέτες πυριτίου απαιτούν περαιτέρω χημική επεξεργασία για την απομάκρυνση των προσμίξεων που

περιέχουν και για αυτόν τον λόγο αποθηκεύονται προσωρινά. Και στις δύο περιπτώσεις το πλαίσιο αλουμινίου, το προστατευτικό γυαλί, τα κουτιά συνδέσεων και οι καλωδιώσεις αποθηκεύονται σε ειδικούς χώρους για προώθηση σε εξωτερικούς συνεργάτες.



Εικόνα 56 Φ/Β Πίνακας (Exploded view).

Το τμήμα φυσικής αποσυναρμολόγησης περιλαμβάνει τρεις (3) πάγκους εργασίας και βρίσκουν εφαρμογή δύο (2) ραουλόδρομοι για την μεταφορά των πινάκων από τον αποθηκευτικό χώρο προς την επεξεργασία και τούμπαλιν καθώς και χώροι μόνιμης αποθήκευσης για το πυρίτιο, το γυαλί, το αλουμίνιο, τις καλωδιώσεις και τα κουτιά επαφών για ανακύκλωση.



Εικόνα 57 Τμήμα φυσικής αποσυναρμολόγησης.



Εικόνα 58 Πάγκκος εργασίας (Τμήμα φυσικής αποσυναρμολόγησης).

### 3.3.3.2 Θερμική επεξεργασία

Η θερμική επεξεργασία των στερεών αποβλήτων ορίζεται ως το σύνολο των διαδικασιών μετατροπής του περιεχόμενού τους σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα, με ταυτόχρονη ή συνεπακόλουθη αποδέσμευση θερμικής ενέργειας.

Η θερμική επεξεργασία, σε όποια μορφή της και αν συναντάται στοχεύει <sup>[115][116]</sup>:

- i. Στη μείωση της ποσότητας των τελικών αποβλήτων.
- ii. Στην αδρανοποίηση των υλικών τα οποία θεωρούνται επιβλαβή.

- iii. Στην εκμετάλλευση της θερμογόνου δύναμης προς ανάκτηση ενέργειας με την χρήση απαραίτητων εγκαταστάσεων μάστευσης ενέργειας.
- iv. Στη μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης.

Ωστόσο, σαν τεχνολογία συνοδεύεται τόσο από πλεονεκτήματα όσο και από μειονεκτήματα.

Η χρήση της σε χώρους ανακύκλωσης αποτελεί έρεισμα στην μείωση του όγκου των αποβλήτων σε ιδιαίτερα μεγάλο βαθμό που αγγίζει το 90%. Ταυτόχρονα, μπορεί να παρέχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται στις ανάγκες τόσο μικρών όσο και μεγαλύτερων βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Αντίθετα, συνοδεύεται από υψηλό κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη απασχόλησης εξειδικευμένου τεχνικού προσωπικού. Επιπλέον, στις περισσότερες των περιπτώσεων καθίσταται δύσκολη η άμεση αξιοποίηση των υλικών από τα απόβλητα όπως το ίδιο ισχύει και για την αξιοποίηση της παραγόμενης θερμότητας (ιδίως για τις μικρές βιομηχανικές εγκαταστάσεις). Ακόμη, η χρήση της εν λόγω τεχνολογίας συνεπάγεται από επιπλέον έξοδα που αφορούν την ύπαρξη ειδικών εγκαταστάσεων για τη διαχείριση των αέριων εκλύσεων. <sup>[115][116]</sup>

Σε γενικές γραμμές, οι τεχνικές θερμικής επεξεργασίας μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις (4) κατηγορίες <sup>[116]</sup>:

- i. Αποτέφρωση
- ii. Αεριοποίηση
- iii. Πυρόλυση
- iv. Τεχνική πλάσματος

Από τις παραπάνω μεθόδους θα δοθεί έμφαση στην διαδικασία της πυρόλυσης λόγω του ότι είναι το είδος της θερμικής επεξεργασίας που επιλέχθηκε για τη διαχείριση των αποβλήτων φ/β πινάκων.

Η πυρόλυση αποτελεί μια σχετικά νέα θερμική διεργασία, η οποία αν και αναπτύχθηκε στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα, στην Ευρώπη μόλις τα τελευταία 30 έτη άρχισε να εφαρμόζεται σε διεργασίες επεξεργασίας αποβλήτων λόγω της μειωμένης ενεργειακής απόδοσης που παρουσιάζει χωρίς την παρουσία συστημάτων μάστευσης ενέργειας αλλά και της οικονομικής βιωσιμότητάς της. Αντίθετα, σε χώρες εκτός Ευρώπης όπως



στην περίπτωση της Ιαπωνίας, η μέθοδος της πυρόλυσης εφαρμόζεται παρουσιάζοντας ικανοποιητική απόδοση με το γεγονός αυτό να οφείλεται στη διαφορετική φύση των στερεών αποβλήτων της σε σχέση με εκείνα των Ευρωπαϊκών χωρών.

Η διαδικασία της πυρόλυσης πρακτικά εκπροσωπεί την αποσύνθεση των οργανικών συστατικών που εμπεριέχονται στα στερεά απόβλητα χωρίς την παρουσία οξυγόνου και άλλων παραγόντων πρόκλησης αεριοποίησης, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, τον ατμό, κ.ά.. Βασικό πλεονέκτημα της όλης πυρολυτικής διεργασίας είναι πως τα απόβλητα βρίσκονται εντός ενός αγωγού που τα προστατεύει από την άμεση επαφή με την φλόγα αποτρέποντας οποιασδήποτε μορφής αποτέφρωση. Η θερμικής διεργασία είναι ενδόθερμη και για αυτόν τον λόγο απαιτείται μεγάλη ποσότητα ενέργειας προκειμένου να εκκινήσει η διαδικασία. <sup>[116]</sup>

Με την πυρόλυση των στερεών αποβλήτων γενικότερα, σχηματίζονται τα εξής προϊόντα:

- i. Αέρια, όπως: υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα, κ.ά..
- ii. Υγρά, όπως: ελαιώδες κλάσμα με υψηλή περιεκτικότητα και ιξώδες, που περιέχει καρβοξυλικά οξέα, κετόνες, αλκοόλες καθώς και σύνθετους οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες.
- iii. Στερεά, όπως: σχεδόν καθαρός άνθρακας και αδρανή υλικά (γυαλί, μέταλλα).

Οι επτά (7) φάσεις που ακολουθεί η διαδικασία της πυρόλυσης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 11. Οι επτά (7) φάσεις της πυρόλυσης.**

Φάση	Θερμοκρασία (°C)	Περιγραφή
1	100-200	Ξήρανση.
2	200	Οξείδωση και αποθείωση.
3	340	Διάσπαση των συνδέσμων αλειφατικών ενώσεων.
4	400	Διάσπαση των δεσμών άνθρακα με το οξυγόνο και το άζωτο.
5	400-600	Μετατροπή των πισσασφαλτούχων σε καύσιμη ύλη και πίσσα.
6	600	Διάσπαση πισσασφαλτούχων.
7	≥600	Δημιουργία αρωματικών ενώσεων και αφυδρογόνωση βουταδιενίου.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, όταν η πυρόλυση λαμβάνει χώρο σε θερμοκρασία κοντά στους 500°C, στις αέριες εκλύσεις εμφανίζονται αρωματικές ενώσεις και



φαινόλες. Για το λόγο αυτό η διαδικασία της πυρόλυσης εξοπλίζεται με τη διεργασία της αποτέφρωσης των παραγόμενων καυσαερίων σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η αναλογία των παραγόμενων αέριων εκλύσεων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως: τη σύσταση των αποβλήτων, τις συνθήκες θέρμανσης, τη θερμοκρασία της πυρόλυσης και το χρόνο αντίδρασης. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει αισθητά το στερεό υπόλειμμα, ελαττώνοντας ταυτόχρονα το υγρό κλάσμα και αυξάνει τα αέρια προϊόντα. Σε πολλές περιπτώσεις, απαιτείται η προεπεξεργασία των αποβλήτων και η αφαίρεση των αδρανών υλικών με στόχο στον θάλαμο πυρόλυσης να εισέρχονται μονάχα οργανικά υλικά. Στην παρούσα εργασία αυτό να μην κρίνεται σκόπιμο, ωστόσο είναι ιδιαίτερη χρήσιμη η απομάκρυνση των οργανικών ενώσεων από τη συναρμολόγηση με την βοήθεια της πυρόλυσης καθιστώντας εν μέρει την διαδικασία ως μέρος της φυσικής αποσυναρμολόγησης των φ/β πινάκων.

Αξίζει να σημειωθεί πως η πυρολυτική διαδικασία λαμβάνει χώρα σε κοινούς αποτεφρωτές, όπου απλά αναπτύσσονται χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με την κύρια αποτέφρωση, διαθέτοντας όμως τις ίδιες δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας και παράλληλα παραγωγής καυσίμων, τόσο αερίων όσο και υγρών.

Για την πλήρη ανάκτηση των φ/β κυττάρων ώστε να αφαιρεθεί πλήρως το EVA απαιτείται υψηλή θερμοκρασία τάξεως  $\sim 350^{\circ}\text{C}$  και άνω μέχρι τη πλήρη αποσύνθεσή του σε θερμοκρασία  $600^{\circ}\text{C}$  σε ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου όπως αερίου Ar. Σκοπός του αδρανούς αερίου είναι η αποφυγή της απανθράκωσης του EVA. Έτσι, για χρόνο αποσύνθεσης μιας ώρας σε ειδικό κλίβανο στους  $600^{\circ}\text{C}$  το EVA απομακρύνεται πλήρως. Στην Εικόνα 59, διαφαίνονται τα φ/β απόβλητα μετά την απομάκρυνση της επίστρωσης EVA. Όμως, ακόμα περιλαμβάνουν μεταλλικές προσμίξεις όπως τα μεταλλικά ηλεκτρόδια, τις αντι-ανακλαστικές επιστρώσεις (AR coating) και τις επαφές p-n.



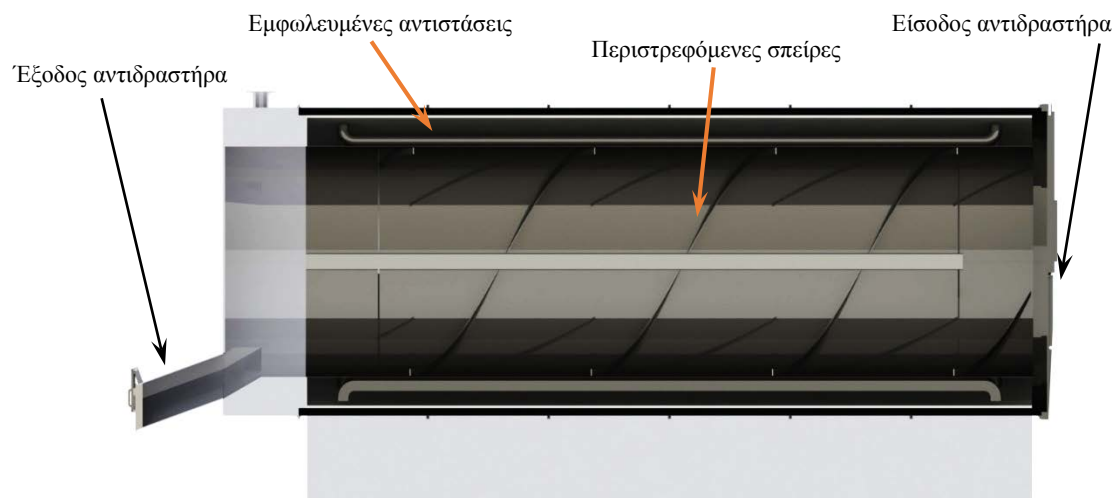
*Εικόνα 59 Τμήμα φ/β πίνακα (20mm\*10mm) μετά από θερμική επεξεργασία. [CADLAB]*

Η θερμική επεξεργασία στην προτεινόμενη μέθοδο αφορά τη χρήση ενός κυλινδρικού κλιβάνου (Εικόνα 60) με εσωτερικά περιστρεφόμενα σπειρώματα. Το σύστημα του κλιβάνου και το σύστημα διαχείρισης αερίων περιλαμβάνει:

- i. Το σύστημα υποδοχής των αποβλήτων.
- ii. Τις δύο (2) περιστρεφόμενες σπείρες.
- iii. Το σύστημα παροχής αδρανούς αερίου.
- iv. Τις εμφολευμένες αντιστάσεις.
- v. Το σύστημα εξόδου των επεξεργασμένων πλέον αποβλήτων.
- vi. Το σύστημα απαγωγής των εκλυόμενων αερίων.
- vii. Το θάλαμο μετάκαυσης.
- viii. Τους δύο (2) κυκλώνες.
- ix. Τις δύο (2) πληντυρίδες.
- x. Την εγκατάσταση απελευθέρωσης των επεξεργασμένων πλέον αερίων στην ατμόσφαιρα.

Όπως έχει ήδη περιγραφεί, η εγκατάσταση πυρόλυσης λειτουργεί σε διάταξη ανοιχτού κύκλου και μπορεί να δέχεται εισόδους είτε συνεχώς (συνεχής ροή) είτε σε πακέτα (batch type). Η κλίση της κατασκευής είναι μηδενική λόγω της παρουσίας των σπειρών. Οι αποσυρόμενοι πίνακες προωθούνται λόγω της σπειροειδούς κίνησης από

το ένα άκρο προς το άλλο με σταθερή ταχύτητα και επεξεργάζονται θερμικά υπό σταθερή θερμοκρασία.



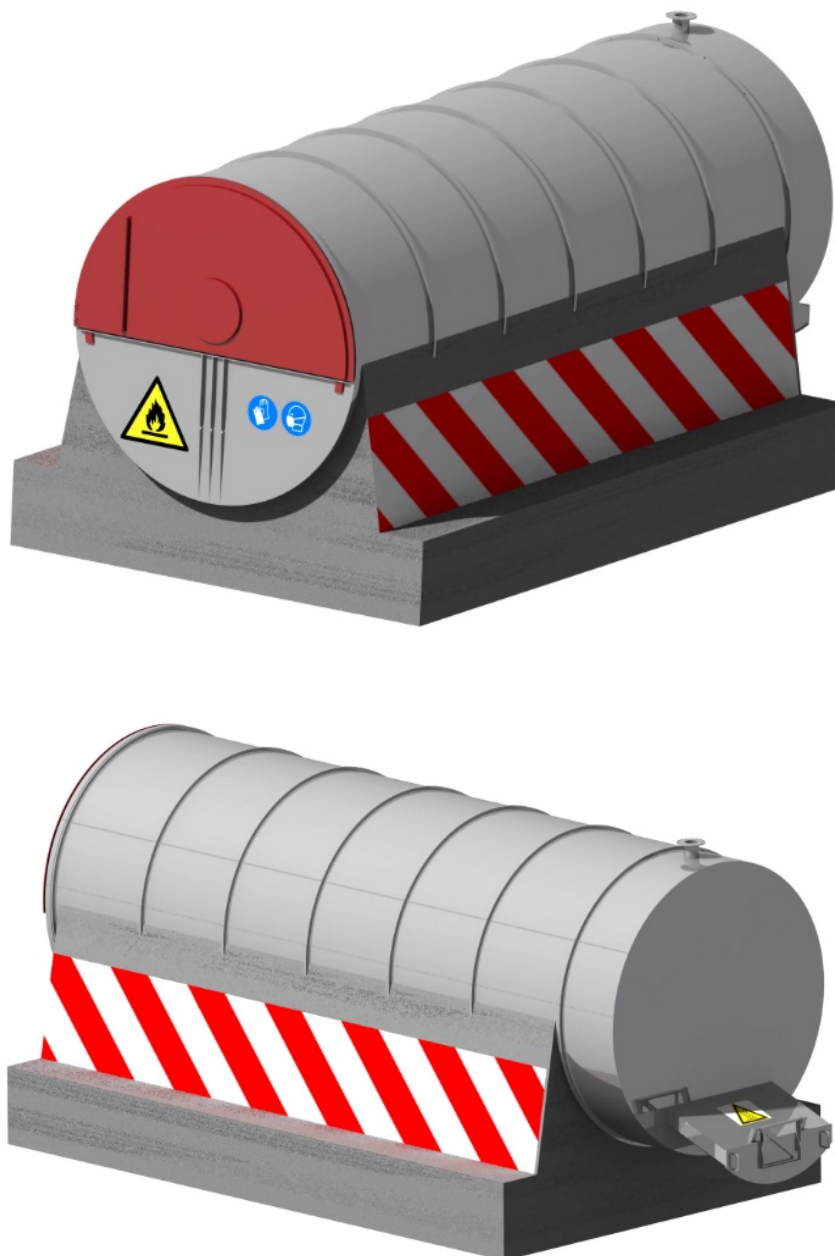
Εικόνα 60 Πυρολυτικός αντιδραστήρας (Τομή).

Βασικά πλεονεκτήματα της πυρολυτικής εγκατάστασης που προτείνεται είναι:

- i. Η δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλης ποικιλίας φ/β πινάκων ανεξάρτητα από την κατάσταση στην οποία παραλαμβάνονται.
- ii. Η δυνατότητα να προσαρμόζεται ο τρόπος λειτουργίας της κατά βούληση των χειριστών.
- iii. Ελέγχεται εύκολα ο χρόνος παραμονής εντός του κλιβάνου ρυθμίζοντας της ταχύτητα περιστροφής των σπειρωμάτων.
- iv. Επιτυγχάνεται καλή ποιότητα καύσης των οργανικών ενώσεων χωρίς να απανθакώνονται επιφανειακά οι φ/β πίνακες.

Ωστόσο, στα μειονεκτήματα της κατασκευής περιλαμβάνονται:

- i. Η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων σωματιδίων λόγω υψηλής στροβιλότητας που επικρατεί στον κλίβανο.
- ii. Απαιτείται μεγάλη ποσότητα αδρανούς αερίου.
- iii. Ένα μεγάλο μέρος της θερμότητας χάνεται μαζί με τη στάχτη.
- iv. Η επεξεργασία των καυσαερίων είναι απαραίτητη πριν την απελευθέρωσή τους στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 61 Πυρολυτικός αντιδραστήρας (Γενική άποψη).

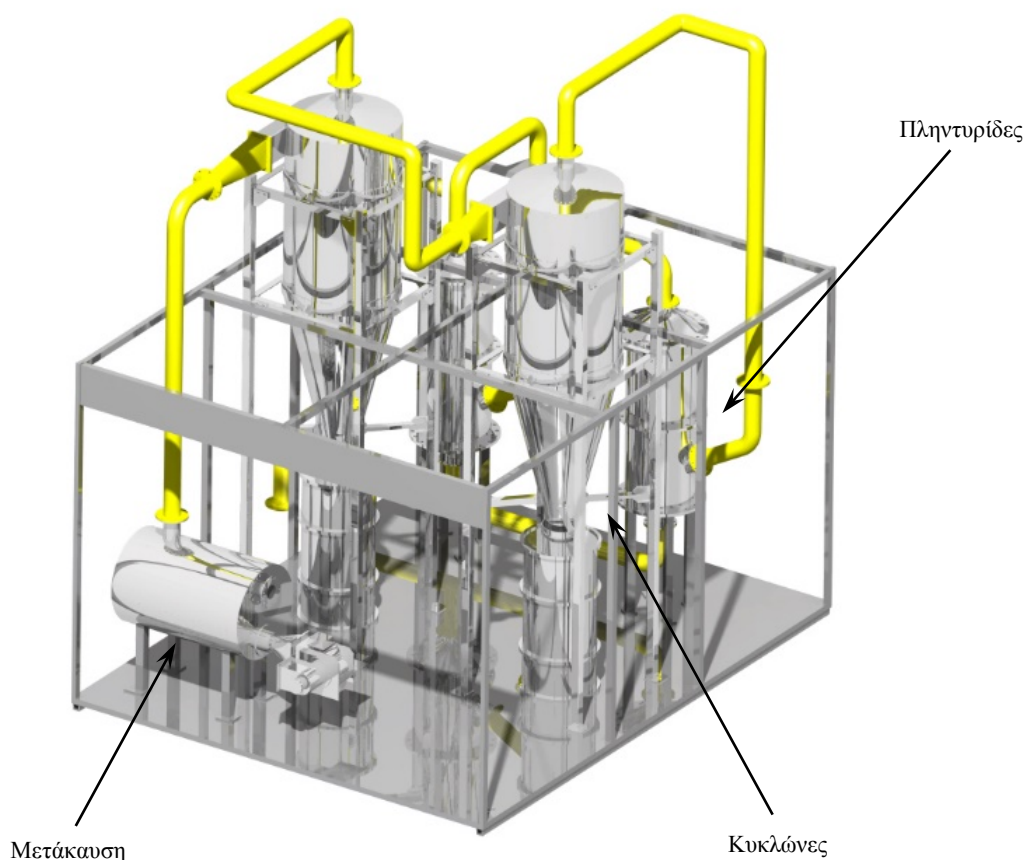
#### Απομάκρυνση ιπτάμενων σωματιδίων

Η ταξινόμηση των ιπτάμενων σωματιδίων πραγματοποιείται ανάλογα με το μέγεθος ή την προέλευσή τους. Σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από  $1\mu\text{m}$  θεωρούνται ως κονιορτός και λόγω του μικρού μεγέθους τους συμπεριφέρονται ως αέρια. Παράλληλα, σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από  $10\mu\text{m}$  συνήθως εναποτίθενται στη βάση του κλιβάνου. Τα σωματίδια τέφρας που συναντώνται στα καυσαέρια ενός λέβητα με διάμετρο  $100\mu\text{m}$  ή μικρότερη ονομάζονται ιπτάμενη τέφρα.

Η τεχνολογία για τον έλεγχο των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η πρώτη που αναπτύχθηκε. Η απόδοση συλλογής τους ποικίλει σημαντικά ανάλογα με το σύστημα αλλά συνήθως κυμαίνεται από 50% για απλά μηχανικά συστήματα, μέχρι και περισσότερο από 99% για τους ηλεκτροστατικούς κατακρημνιστές (ESP). Οι διαχωριστές αιωρούμενων σωματιδίων βασίζονται στη ξαφνική μείωση της ταχύτητας των αερίων, στην απότομη αλλαγή της διεύθυνσης της ροής, στην πρόσκρουση του αερίου ρεύματος σε μία σειρά από πτερύγια, και στη χρήση κεντρομόλου δύναμης με ανεμιστήρα.

Το πρώτο βήμα στα περισσότερα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων είναι η απομάκρυνση της ιπτάμενης τέφρας, η οποία πραγματοποιείται μέσω:

- i. Κυκλώνων (Εικόνα 63)
- ii. Ηλεκτροστατικών φίλτρων (ESP)
- iii. Σακκόφιλτρων



Εικόνα 62 Τμήμα διαχείρισης αέριων αποβλήτων.

### Κυκλώνες

Οι κυκλωνικές διατάξεις στηρίζονται στην αύξηση της διαφοράς πυκνότητας μεταξύ στερεού και αερίου όταν ασκείται φυγόκεντρη δύναμη στο μείγμα. Τα καυσαέρια εισέρχονται εφαπτομενικά με υψηλή ταχύτητα σε έναν κάθετο κυλινδρικό θάλαμο με κωνικό πυθμένα (Εικόνα 63). Η κεντρομόλος δύναμη που ενεργεί πάνω στα σωματίδια τα αναγκάζει να συγκρούονται με τα τοιχώματα του θαλάμου και να κατακάθονται στον πυθμένα του από όπου και απομακρύνονται. Το αέριο διαφεύγει μέσω ενός κεντρικού απαγωγού. Λόγω της περιορισμένης ικανότητας τους στην απομάκρυνση λεπτών σωματιδίων, οι κυκλώνες δεν απαντώνται πλέον σε σύγχρονες εγκαταστάσεις ή χρησιμοποιούνται για την προεπεξεργασία της ιπτάμενης τέφρας.



*Εικόνα 63 Κυκλώνας.*

### Χημικός καθαρισμός καυσαερίων

Σε επόμενο στάδιο, ο χημικός καθαρισμός των καυσαερίων μπορεί να λάβει χώρα με δύο κύριες μεθόδους, καθαρισμό σε υγρές πλυντηρίδες (Εικόνα 64) και καθαρισμό σε ξηρές πλυντηρίδες. Στη προκειμένη περίπτωση, προτείνεται η εφαρμογή υγρής

διάταξης. Η αρχή της μεθόδου των υγρών πλυντηρίδων βασίζεται στην απορρόφηση των αερίων συστατικών από ένα υγρό. Η αποτελεσματικότητα μιας τέτοιας διαδικασίας απορρόφησης επηρεάζεται καταρχήν από την διαθέσιμη επιφάνεια του υγρού που καθορίζει την μεταφορά μάζας από την αέρια στην υγρή φάση. Έτσι, ο στόχος του σχεδιασμού είναι η επίτευξη μιας μεγάλης επιφάνειας επαφής μεταξύ του αέριου ρεύματος και μιας υγρής φάσης ώστε ο ρύπος να διαλυθεί σε αυτήν. Όταν χρησιμοποιείται νερό, η απορρόφηση ονομάζεται φυσική ενώ όταν προστίθεται στο νερό και ένας διαλύτης που αντιδρά με το ρύπο εξουδετερώνοντας την επικινδυνότητά του, η ρόφηση ονομάζεται χημική.

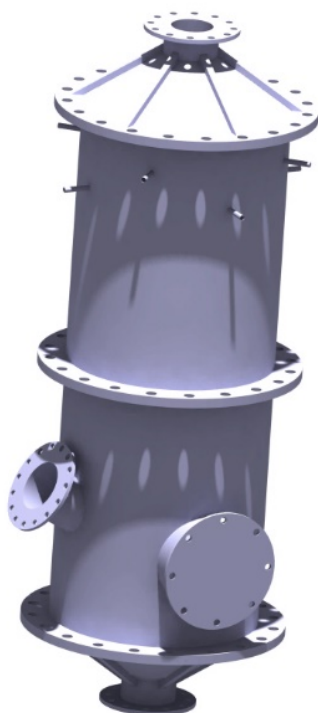
Κατά το σχεδιασμό των συστημάτων χημικού καθαρισμού οφείλεται να συνυπολογιστούν:

- i. Η αύξηση της απόδοσης σε απομάκρυνση από την αέρια στην υγρή φάση (ή εναλλακτικά η επίτευξη της ίδιας απομάκρυνσης σε εγκατάσταση με απαιτήσεις μικρότερου όγκου).
- ii. Η αύξηση του κόστους λόγω κατανάλωσης χημικών.
- iii. Η ενδεχόμενη απαίτηση ανακύκλωσης του χημικού, προβλήματα αποθέσεων κ.λπ..

Η επιλογή διαλύτη για την υγρή φάση γίνεται βασιζόμενη στις παρακάτω παραμέτρους:

- i. Τη διαλυτότητα των καυσαερίων επιδιώκοντας ανάλογη χημική φύση με το προς απομάκρυνση αέριο.
- ii. Την πτητικότητα του υγρού. Όσο το δυνατόν χαμηλότερη προκειμένου να μην υπάρχουν απώλειες, αφού το αέριο ρεύμα μετά την επαφή θα εξέρχεται κορεσμένο.
- iii. Τη διαβρωτικότητα.
- iv. Το ιξώδες. Επιδιώκεται χαμηλό ιξώδες για μικρή πτώση πίεσης, καλή ροή και καλοί συντελεστές μεταφοράς.
- v. Τη χημική σταθερότητα.
- vi. Το χαμηλό σημείο πήξης.





*Εικόνα 64 Πλοντηρίδα.*

#### Νομοθεσία

Η Ευρωπαϊκή Ένωση με την οδηγία 2000/76/EK λαμβάνει μέτρα για την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης του αέρα, του υδροφόρου ορίζοντα και του εδάφους η οποία προκαλείται από τις διαδικασίες που περιλαμβάνουν καύση ή κάποιας μορφής θερμική επεξεργασία, καθώς και των συνεπαγόμενων κινδύνων που εγκυμονούν για την υγεία του ανθρώπου. Τα επιβαλλόμενα μέτρα ζητούν κυρίως την έκδοση αδείας για τις μονάδες πυρόλυσης, ταυτόχρονα με τον καθορισμό οριακών τιμών για τις εκπομπές για ορισμένους ρύπους οι οποίοι απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα και στον υδροφόρο ορίζοντα.

#### Άδειες

Κατά την παράδοση και παραλαβή των αποβλήτων, ο φορέας εκμετάλλευσης της μονάδας ανακύκλωσης λαμβάνει όλες τις απαραίτητες προφυλάξεις για την πρόληψη ή περιορισμό των αρνητικών επιδράσεων στο περιβάλλον και των κινδύνων για τον άνθρωπο. Εξάλλου, ο φορέας εκμετάλλευσης οφείλει πριν δεχθεί τα απόβλητα στις εγκαταστάσεις του, να είναι ενήμερος σχετικά με τη διαδικασία παραγωγής, τη φυσική και χημική σύσταση των αποβλήτων καθώς και τους συναφείς με τα απόβλητα κινδύνους.

### Συνθήκες λειτουργίας

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η πλήρης καύση των αποβλήτων, η οδηγία, προβλέπει, για όλες τις εγκαταστάσεις, υποχρέωση διατήρησης των αερίων καύσεως που προκύπτουν από την πυρόλυση, σε ελάχιστη θερμοκρασία 850°C για τουλάχιστον 2 δευτερόλεπτα. Στην περίπτωση επικίνδυνων αποβλήτων, με περιεκτικότητα σε αλογονούχες οργανικές ενώσεις άνω του 1%, εκφρασμένη σε χλώριο, η θερμοκρασία πρέπει να φέρεται στους 1100°C για τουλάχιστον 2 δευτερόλεπτα. Επιπλέον, η θερμότητα που παράγεται οφείλεται να ανακτάται στον μέγιστο δυνατό βαθμό.

#### 3.3.3.3 Θρυμματισμός

Ο βιομηχανικός θρυμματισμός απαιτεί την χρήση εξειδικευμένων μηχανημάτων με στόχο την μείωση του μεγέθους των εισερχόμενων σε αυτόν υλικών. Οι βιομηχανικοί θρυμματιστές ποικίλουν όσον αφορά στο μέγεθος, στον τύπο και στο είδος υλικού που δέχονται ως είσοδο. Μερικά προϊόντα που υπόκεινται σε θρυμματισμό στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους είναι: ελαστικά, μέταλλα, οχήματα που έχουν αποσυρθεί, ξυλεία, πλαστικά και απορρίμματα. Δεν υπάρχουν μηχανήματα που στοχεύουν αποκλειστικά στη διαχείριση ενός μόνο προϊόντος αλλά στο σύνολό τους προσαρμόζονται απαιτώντας τον κατάλληλο σχεδιασμό και μέγεθος.



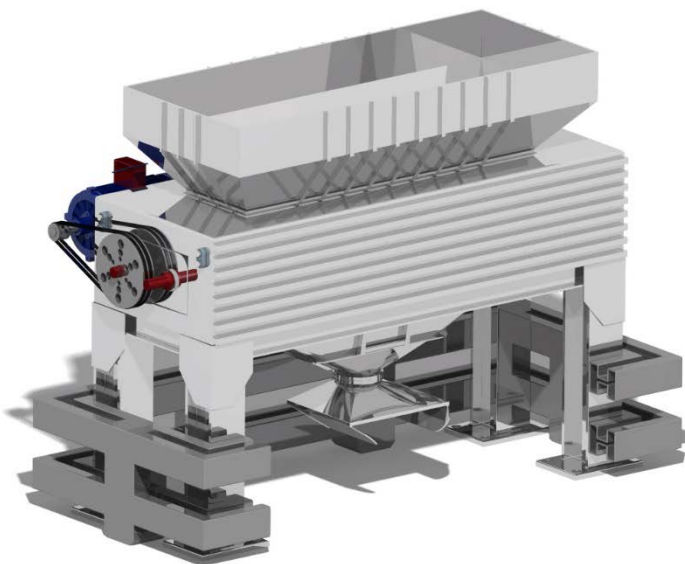
*Εικόνα 65 Εργαστηριακό αποτέλεσμα θρυμματισμού (Πρόχειρη διαλογή). [CADLAB]*

Βασικό πλεονέκτημα των θρυμματιστών είναι η μείωση του κόστους ανακύκλωσης των υλικών και η διευκόλυνση που παρέχουν στην μεταφορά τους.

Συναντώνται διάφοροι τύποι μηχανημάτων, εξοπλισμένοι με διαφορετικό είδος κοπτικών εξαρτημάτων ανάλογα με τη χρήση: (i) οριζόντιου άξονα, (ii) κατακόρυφου άξονα, (iii) μονού άξονα, (iv) διπλού άξονα, (v) τριπλού άξονα και (vi) τετραπλού άξονα. Τα παραπάνω μηχανήματα δύνανται να λειτουργούν είτε σε χαμηλές, είτε σε υψηλές ταχύτητες χωρίς όμως η ταχύτητα να αποτελεί κριτήριο κατηγοριοποίησης.

#### *3.3.3.3.1 Θρυμματιστής διπλού άξονα - Twin Shaft Shredder*

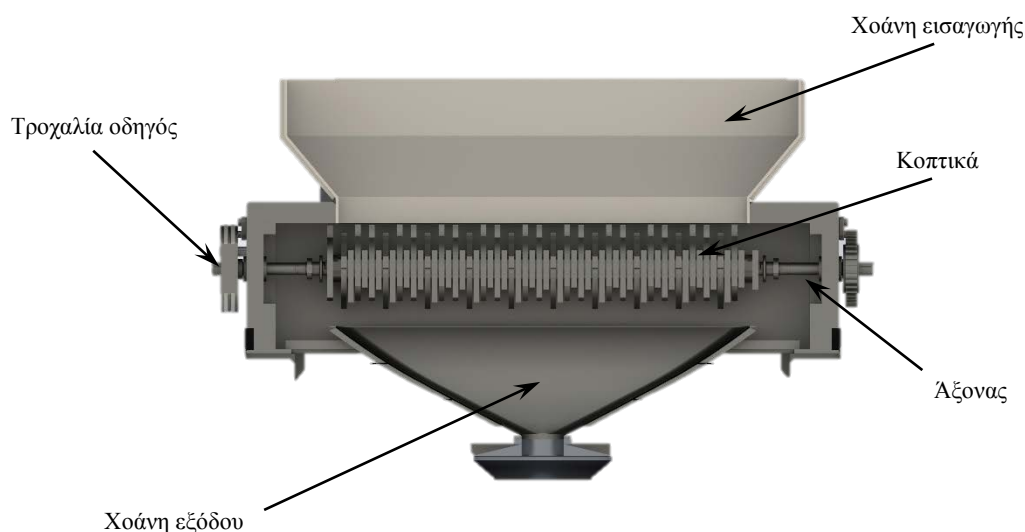
Ένα είδος μηχανισμού θρυμματισμού με την μεγαλύτερη ευελιξία ως προς την κατασκευή και τη διαμόρφωση είναι εκείνο του διπλού άξονα (Εικόνα 66). Οι συσκευές αυτού του τύπου ενσωματώνουν δύο παράλληλους και αντίστροφα περιστρεφόμενους άξονες που διαπλέκονται σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής αλλά ιδιαίτερα μεγάλες τιμές ροπής (Εικόνα 67). Καθώς οι άξονες περιστρέφονται, ειδικές λεπίδες σε μορφή δίσκων κόβουν και διαρρηγνύουν μια μεγάλη ποικιλία υλικών σε μικρότερα κομμάτια καθιστώντας τα ιδανικά για τροφοδοσίες ακανόνιστου μεγέθους. Αυτού του είδους οι θρυμματιστές δεν διαθέτουν ειδικό πλέγμα που να καθορίζει το μέγεθος της εξόδου αλλά εκείνο ορίζεται από το μέγεθος του χώρου στέγασης των κοπτήρων.



*Εικόνα 66 Θρυμματιστής διπλού άξονα (Γενική άποψη).*

Σε ένα μηχανήμα τέτοιου τύπου ορίζονται σαν βασικές παράμετροι σχεδιασμού, το μήκος και πλάτος του χώρου κοπής. Στην περίοδο λειτουργίας, τα υλικά εισέρχονται

μέσω μιας χοάνης στο χώρο κοπής και εξέρχονται επεξεργασμένα από το κάτω μέρος της μηχανής. Συναντώνται διατάξεις τόσο οριζόντιες όσο και κατακόρυφες.



*Εικόνα 67 Θρυμματιστής διπλού άξονα (Διαμήκης Τομή).*

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου θρυμματιστή δύο αξόνων καθορίζεται από τους εξής παράγοντες <sup>[117]</sup>:

- i. Το είδος του προς επεξεργασία υλικού.

Στην περίπτωση της ξυλείας χρησιμοποιούνται άξονες που περιστρέφονται με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Τα πλαστικά υλικά συνήθως απαιτούν τον θρυμματισμό μέσω ενός κοκκοποιητή αλλά σε πολλές περιπτώσεις που η σκληρότητα των υλικών το επιτρέπει, πριν την χρήση του κοκκοποιητή απαιτείται η προεπεξεργασία σε ένα θρυμματιστή. Μια αντίστοιχη περίπτωση αφορά και ο θρυμματισμός των φ/β πινάκων προς ανακύκλωση. Η σκληρότητα τόσο του γυαλιού πυριτίου ( $\approx 0.8 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) όσο και των φετών πυριτίου ( $3\text{-}5 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) πλησιάζει εκείνη του πλαστικού ( $0.7\text{-}1 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) οπότε απαιτείται η χρήση ενός θρυμματιστή που θα προηγείται της εφαρμογής του κοκκοποιητή λόγω του μεγάλου μεγέθους των φ/β πινάκων ( $1.6\text{m} \cdot 1\text{m}$ ).

- ii. Την επιθυμητή έξοδο.

Αντιλαμβανόμενος κανείς τις απαιτήσεις του σχετικά με την επιθυμητή κατάσταση της εξόδου από το θρυμματιστή, έμμεσα καθορίζει το είδος του εξοπλισμού που ικανοποιεί τις ανάγκες του. Μερικές εγκαταστάσεις στοχεύουν στην επιτυχή διαλογή των υλικών

ενώ άλλες απαιτούν θρυμματισμό και άλεση. Ένα πέρασμα από το θρυμματιστή μπορεί να παρουσιάζεται ως οικονομικότερο αλλά εάν στόχος είναι τα υλικά-έξοδος να καταλαμβάνουν όσο το δυνατόν λιγότερο χώρο τότε είναι ιδιαίτερα πιθανό να απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός κατακερματισμού.

iii. Τη χωρητικότητα.

Η επιλογή του σωστού θρυμματιστή προκειμένου να διαχειριστεί την εκάστοτε ποσότητα εισερχόμενων υλικών αποτελεί το κλειδί για την επιτυχία μιας εγκατάστασης. Η ικανότητα επεξεργασίας υπολογίζεται σε kg/h και αξίζει να τονιστεί πως μια υποδιαστασιολόγηση της εγκατάστασης μπορεί να μειώσει δραματικά τον χρόνο ζωής του μηχανήματος ενώ σε αντίθετη περίπτωση, η υπερδιαστασιολόγηση θα οδηγήσει σε υπερκατανάλωση ενέργειας και σε μεγαλύτερες απαιτήσεις χώρου.

iv. Το είδος τροφοδοσίας.

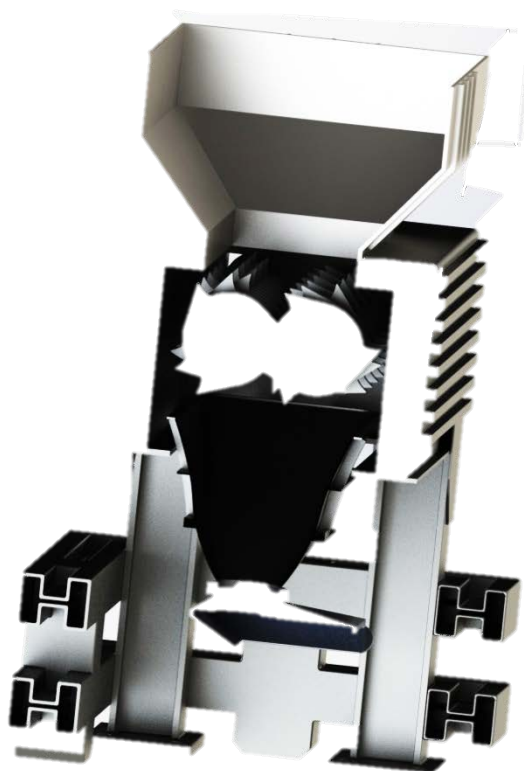
Σχετικά με τον τρόπο τροφοδοσίας της εγκατάστασης υπάρχουν δύο ειδών διατάξεις, η χειροκίνητη και η αυτόματη. Από τη μία, η πρώτη διαθέτει ειδική κατασκευή που τροφοδοτεί κατ' απαίτηση του θρυμματιστή ενώ στη δεύτερη, μια μεταφορική ταινία υπό κλίση παρέχει σε σταθερό ρυθμό τα απόβλητα προς επεξεργασία.

v. Τη χωροθέτηση της βιομηχανικής μονάδας.

Βασική παράμετρος για την επιλογή του κατάλληλου θρυμματιστή αποτελεί η επιλογή της κατάλληλης θέσης για την τοποθέτηση του, εντός της βιομηχανικής μονάδας. Λόγω του μεγάλου βάρους δεν καθίσταται δυνατή η συνεχής μετακίνησή του. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί πως κατά τον θρυμματισμό παράγονται μεγάλες ποσότητες αέριων σωματιδίων καθώς και τα επίπεδα θορύβου είναι αρκετά υψηλά.

vi. Τη συντήρηση.

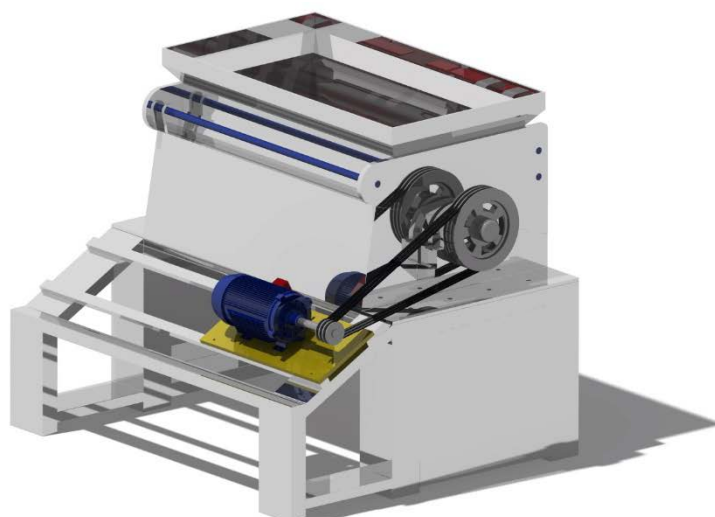
Οι θρυμματιστές υπόκεινται σε υψηλές καταπονήσεις και η συντήρηση είναι απαραίτητη. Υπό κανονικές συνθήκες και χωρίς δυσλειτουργίες, οι κοπτικοί μηχανισμοί φθίνουν με αποτέλεσμα να θεωρείται απαραίτητος ο ακονισμός τους, η στάθμισή τους και τελικά η αντικατάστασή τους.



Εικόνα 68 Θρυμματιστής διπλού άξονα (Εγκάρσια Τομή).

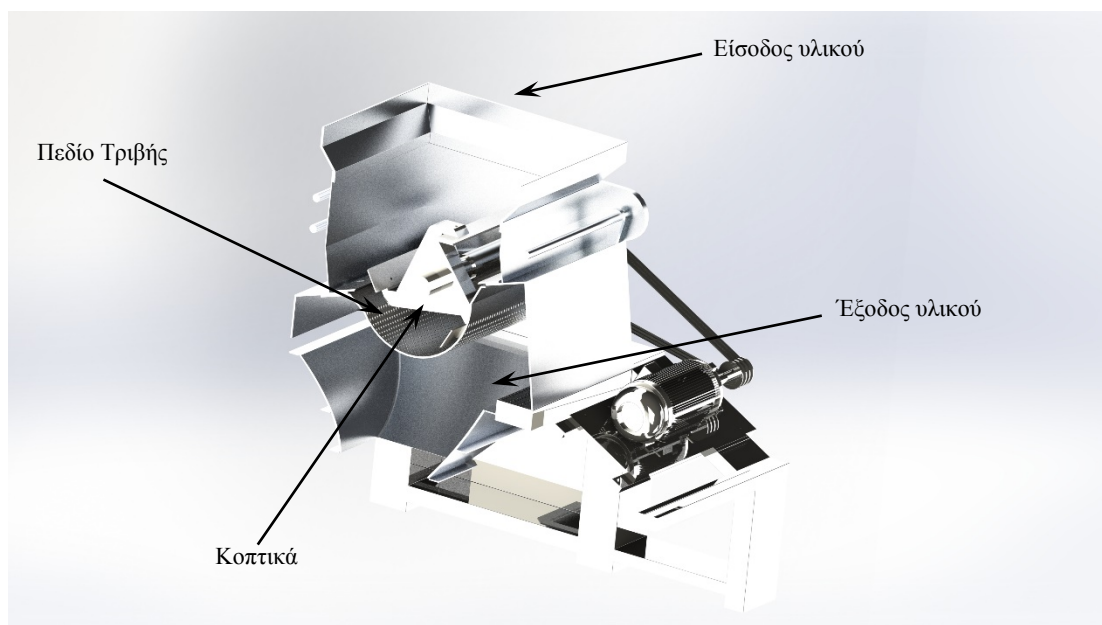
#### 3.3.3.3.2 Κοκκοποιητής - Impact Crusher

Με μια απλοποιημένη περιγραφή, ο κοκκοποιητής (Εικόνα 69) αποτελεί πρακτικά έναν μύλο άλεσης, που ενσωματώνει περιστρεφόμενα κοπτικά σε κατάλληλη διάταξη με στόχο την μείωση του μεγέθους των αρχικά εισερχόμενων υλικών σε μικρότερο. Τα υλικά που αποτελούν είσοδο στο μηχανισμό μπορεί να είναι πλαστικά, μπουκάλια, οργανικά κ.ά..<sup>[118]</sup>



*Εικόνα 69 Κοκκοποιητής (Γενική άποψη).*

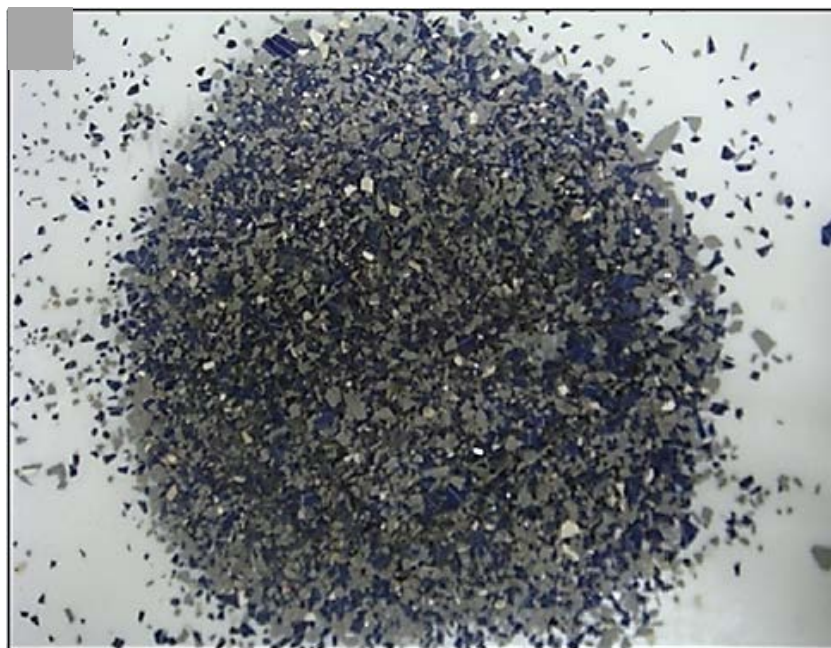
Αν και αποτελεί μια συσκευή που συναντάται κυρίως στην ανακύκλωση πλαστικών, με κατάλληλες προσαρμογές όπως του υλικού που εφαρμόζεται στα κοπτικά και στο πεδίο τριβής (Εικόνα 70) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κοκκοποίηση φ/β πινάκων που έχουν ήδη μειωθεί σε μέγεθος λόγω της πρότερης επεξεργασίας τους στο θρυμματιστή διπλού άξονα, όπως περιεγράφηκε παραπάνω. Η επιθυμητή κοκκομετρία είναι διαστάσεων 15mm\*15mm.



*Εικόνα 70 Κοκκοποιητής (Τομή).*



Αν και αποτελεί μια απλή περιγραφή, συνάδει με την πιο κοινή χρήση του εξοπλισμού αυτού του είδους. Στη βιομηχανία συναντώνται πολλές διαφορετικές εναλλακτικές της ίδιας μηχανής, όπως εκείνη του κρυφού άξονα αλλά και με διαφορές σχετικές κυρίως με την ποσότητα και το είδος των αποβλήτων που αφορούν. Μηχανήματα αυτού του τύπου συναντώνται σε χώρους παραγωγής - ανακύκλωσης - καταστροφής: πλαστικών, απόρρητων εγγράφων, φαρμακευτικών προϊόντων, χάρτου, καουτσούκ, γυαλιού, μεταλλικών αντικειμένων, υφασμάτων, κ.ά..<sup>[118]</sup>



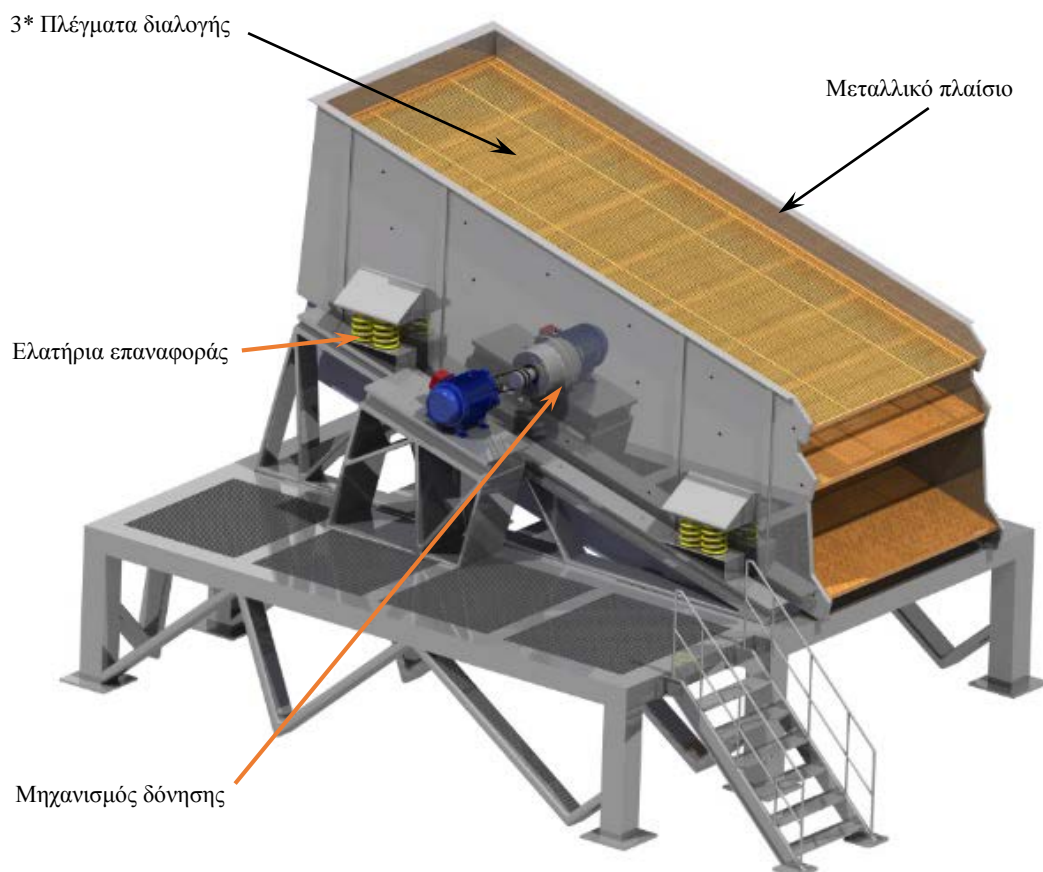
Εικόνα 71 Κατακερματισμένος φ/β πίνακας - αποτέλεσμα κοκκοποιητή. [CADLAB]

#### 3.3.3.4 Μηχανικός διαχωρισμός

Ο μηχανικός διαχωρισμός ορίζεται ως η πρακτική κατά την οποία η εισερχόμενη ποσότητα υλικών διαχωρίζεται σε μικρότερες ανάλογα με την επιθυμητή κοκκομετρία. Η εν λόγω διαδικασία λαμβάνει χώρο σε βιομηχανίες εξόρυξης, σε χώρους επεξεργασίας μεταλλικών στοιχείων, στη γεωργία, στη φαρμακευτική βιομηχανία, στη βιομηχανία πλαστικών και σε πεδία ανακύκλωσης.<sup>[119][120]</sup>

Η διαδικασία χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, στο ξηρό και υγρό διαχωρισμό. Τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατηγορία, ο διαχωρισμός εφαρμόζεται σε μια ροή υλικού δημιουργώντας βαθμίδες διαλογής που με περαιτέρω επεξεργασία αποτελούν ενδιάμεσο ή τελικό προϊόν. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιούνται στατικά ή κινούμενα πλέγματα σε επίπεδη ή επικλινή διάταξη.

Ο μηχανισμός λειτουργίας αποτελείται από έναν άξονα που με κατάλληλη διαμόρφωση προκαλεί δόνηση και ένα πλαίσιο στο οποίο στηρίζονται τα επάλληλα πλέγματα (Εικόνα 72). Υφίστανται πολλοί φυσικοί παράγοντες που καθιστούν τον μηχανικό διαχωρισμό πρακτικό, όπως για παράδειγμα: η δόνηση, η βαρυτική δύναμη, η πυκνότητα του πλέγματος και η γεωμετρία του υλικού. Ωστόσο, οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που προκαλούνται λόγω τριβής δύνανται να μειώσουν την απόδοση του διαχωρισμού προκαλώντας εμπλοκές εντός του πλέγματος.



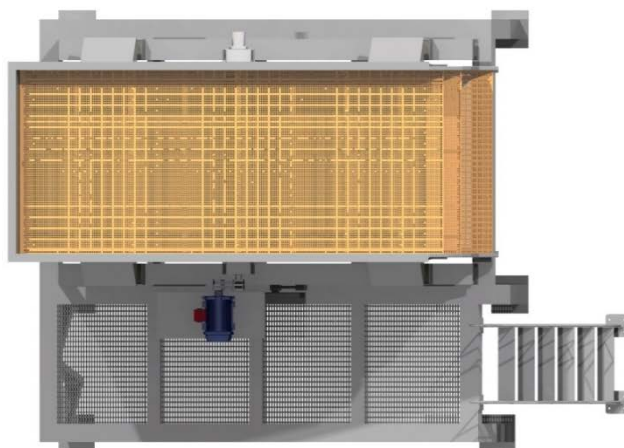
*Εικόνα 72 Δονητικός μηχανισμός διαχωρισμού – Δόνηση σε υψηλές συχνότητες (Γενική άποψη).*

Όπως και σε κάθε βιομηχανική διεργασία υπάρχει μια σειρά από παραμέτρους που επηρεάζουν το είδος και την αποτελεσματικότητα του μηχανικού διαχωρισμού. Εκείνοι είναι: το επίπεδο εμπλοκής, οι ανεπιθύμητες προσθήκες, η συχνότητα δόνησης, το χρήσιμο πλάτος των πλεγμάτων, η κοκκομετρία, η κλίση κ.ά..<sup>[120]</sup>

Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί πως ανάλογα με το είδος της δόνησης διαφοροποιείται και το τελικό αποτέλεσμα τις διαλογής λαμβάνοντας υπόψιν πως κάθε είδος παρουσιάζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα.



Εικόνα 73 Δονητικός μηχανισμός διαχωρισμού (Πλάγια όψη).



Εικόνα 74 Δονητικός μηχανισμός διαχωρισμού (Κάτοψη).

Υπάρχουν αρκετοί τύποι μηχανικής διαλογής, μερικοί από τους οποίους παρουσιάζονται στη συνέχεια <sup>[119][121]</sup>:

i. Μηχανισμός δόνησης κύκλου-ρίψης

Αυτό το είδος του εξοπλισμού ενσωματώνει έναν έκκεντρο άξονα που προκαλεί το πλαίσιο του αναδευτήρα να δονείται σε συγκεκριμένη γωνία. Αυτή η κίνηση αναγκάζει το υλικό να κινείται προς τα εμπρός και πάνω. Καθώς το μηχάνημα επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση (ηρεμία), τα διαχωρισμένα υλικά πέφτουν λόγω βαρύτητας σε

χαμηλότερο επίπεδο. Αυτό το είδος της διαλογής χρησιμοποιείται κυρίως σε διαδικασίες εξόρυξης για μεγάλα μεγέθη υλικών (15-45mm).

ii. Δόνηση σε υψηλές συχνότητες

Σε αυτό το είδος μηχανισμού, δονείται μόνο το πλέγμα διαλογής και όχι το πλαίσιο. Ωστόσο, αυτός ο εξοπλισμός προωθεί τα υλικά πιο μακριά από το σημείο εισόδου και με την εφαρμογή των επάλληλων πλεγμάτων δημιουργείται ένας καταρράκτης υλικού διαφορετικής κοκκομετρίας. Ο μηχανισμός αυτός συνήθως αφορά μεγέθη υλικού από 3.1mm-30mm. Για τη διαλογή φ/β αποβλήτων τα τρία (3) πλέγματα υποστηρίζουν κοκκομετρία 4mm, 2mm και  $\leq 2mm$  αντίστοιχα (Εικόνα 75). Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις ο μηχανισμός τοποθετείται υπό κλίση από 15-45° σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Η ποικίλη γεωμετρία και βάρος των θρυμμάτων φ/β πίνακα, καθιστά τον εν λόγω μηχανισμό ιδανικό για το διαχωρισμό τους.

iii. Περιστροφικός διαχωρισμός

Ο μηχανισμός αυτός διαφέρει από τους δυο προαναφερθέντες τύπους καθώς η μηχανή περιστρέφεται σε κυκλική τροχιά σε ένα κοντινό επίπεδο σε μικρές γωνίες. Ο οδηγός της κίνησης είναι είτε ένα έκκεντρο κιβώτιο ταχυτήτων ή έκκεντρα βάρη.

iv. Διαχωρισμός τυμπάνου

Ο εν λόγω μηχανισμός δεν απαιτεί δόνηση, καθώς το εισαγόμενο υλικό τροφοδοτείται σε ένα οριζόντια περιστρεφόμενο τύμπανο με πλέγματα γύρω από τη διάμετρό του.

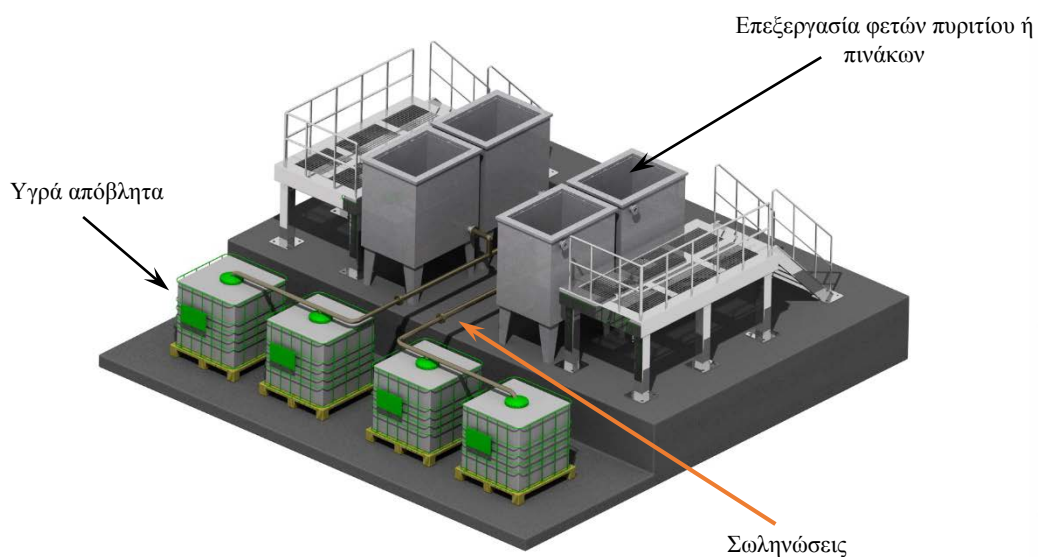


Εικόνα 75 Εργαστηριακά αποτελέσματα μηχανικού διαχωρισμού με διαφορετικές ποσοστώσεις γυαλιού-πυριτίου. Από αριστερά προς τα δεξιά: 95/5 ( $d > 4mm$ ), 80/20 ( $4mm > d > 2mm$ ), 5/95 ( $d < 2mm$ ). [CADLAB]



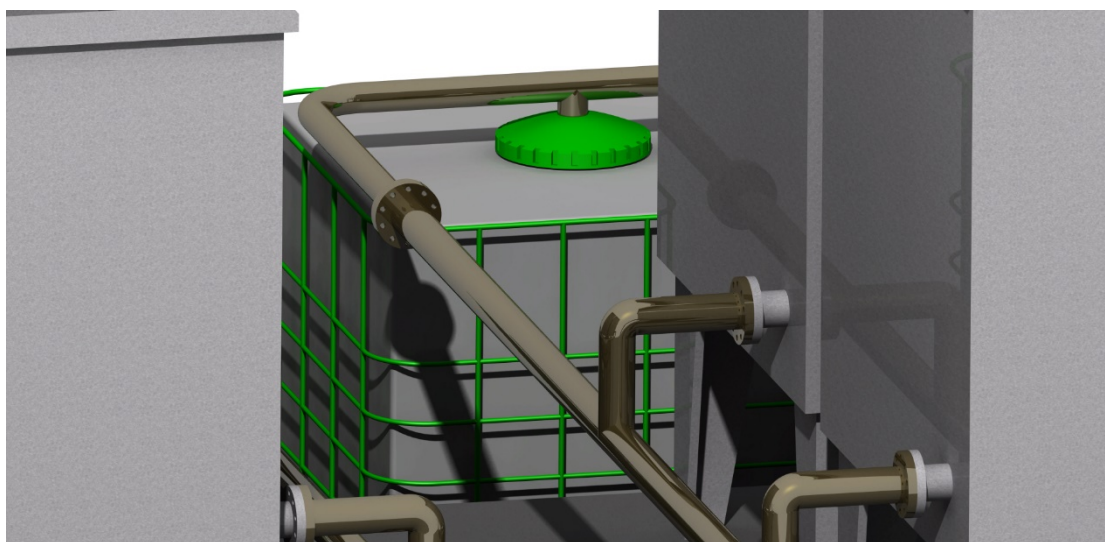
### 3.3.3.5 Χημική επεξεργασία

Στο χώρο της χημικής επεξεργασίας, στόχος αποτελεί η απομάκρυνση του αργύρου ή του αλουμινίου από τις επαφές των φ/β πινάκων.



Εικόνα 76 Χώρος χημικής επεξεργασίας (Γενική άποψη).

Για την αφαίρεσή τους χρησιμοποιούνται διάφορα οξέα όπως: KOH, NaOH ή HNO<sub>3</sub> όπου έχει εξεταστεί η επίδρασή τους σε διάφορες συγκεντρώσεις, χρόνους και θερμοκρασίες. Οι καλύτερες επιδόσεις για την αφαίρεση των επιστρώσεων Al έχουν επιτευχθεί για έκθεση σε διάλυμα 30% KOH στους 80°C για χρονικό διάστημα 2 έως 3 λεπτών.



Εικόνα 77 Χώρος συλλογής αποβλήτων χημικής επεξεργασίας.

Η θερμοκρασία μειώνει το συνολικό χρόνο της διαδικασίας. Αναφορικά, πειράματα έχουν γίνει κάνοντας χρήση του διαλύματος 10%  $\text{HNO}_3$  στους 20°C χωρίς όμως να υπάρχουν παρατηρήσιμα αποτελέσματα μετά από 40 λεπτά, συγκριτικά με τη χρήση διαλυμάτων 40%  $\text{HNO}_3$  στους 80°C όπου η επιφανειακή επίστρωση αφαιρέθηκε σε χρονικό διάστημα 15 λεπτών. <sup>[122]</sup>

### 3.3.3.6 Φούρνος επανάτηξης ανακτώμενου πυριτίου

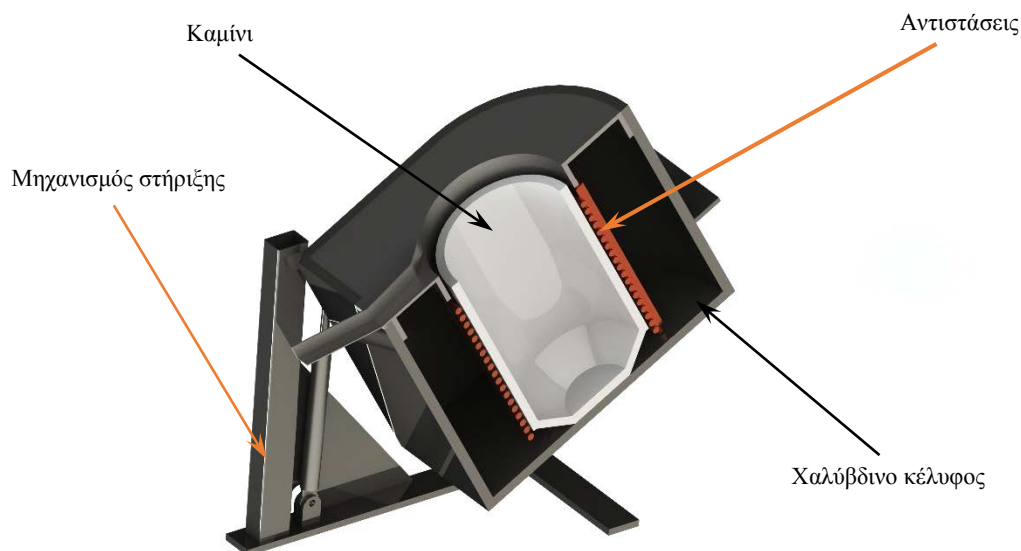
Ο φούρνος που χρησιμοποιείται για την εν λόγω διεργασία είναι ένας φούρνος ηλεκτρικής επαγωγής (Εικόνα 78). Η χωρητικότητα ενός τέτοιου είδους φούρνου ποικίλει από 1kg μέχρι αρκετούς τόνους μετάλλων, όπως σίδηρος, ατσάλι, χαλκός αλουμίνιο και πολύτιμα μέταλλα.



Εικόνα 78 Φούρνος επανάτηξης ανακτώμενου πυριτίου.

Βασικό πλεονέκτημα μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι το ότι αποτελεί μια καθαρή, ενεργειακά αποδοτική και καλά ελεγχόμενη διαδικασία σε σύγκριση με άλλες μεθόδους που ακολουθούνται στην τήξη μετάλλων. Είναι γεγονός πως από τη στιγμή που δεν χρησιμοποιείται ηλεκτρικό τόξο ή καύση, η ενέργεια που απαιτείται για την τήξη του μετάλλου δεν είναι περισσότερη από την ελάχιστη. Ωστόσο, ένα μειονέκτημα του φούρνου ηλεκτρικής επαγωγής αποτελεί η απουσία δυνατότητας περαιτέρω επεξεργασίας του υλικού και για αυτόν τον λόγο τα υλικά οφείλονται να εισέρχονται καθαρά, απαλλαγμένα από ανεπιθύμητες προσμίξεις και προϊόντα οξείδωσης. <sup>[123]-[125]</sup>

Ένας φούρνος επαγωγής συνίσταται από ένα μη αγώγιμο καμίνι το οποίο περιέχει το προς τήξη μέταλλο, με ένα σπείρωμα χαλκού περιελιγμένο γύρω του (Εικόνα 79). Ένα ισχυρό φορτίο εναλλασσόμενου ρεύματος άγεται μέσω του χαλκού και δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που διαπερνά το μέταλλο. Το μαγνητικό πεδίο επάγει ρεύμα με μορφή δινών μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Τα φορτία ρέουν εντός της ηλεκτρικής αντίστασης του υλικού και το θερμαίνουν μέσω θέρμανσης Joule. Ύστερα από την τήξη, τα φορτία υπό τη μορφή δινών εξασφαλίζουν την σωστή μείξη του τηγμένου μετάλλου. Ένα πλεονέκτημα της διαδικασίας είναι η απουσία καύσης άλλου υλικού για την παραγωγή θερμότητας με αποτέλεσμα να μειώνεται η πιθανότητα μόλυνσης του μετάλλου.



Εικόνα 79 Φούρνος επανάτηξης ανακτώμενου πυριτίου (Τομή).

Οι εφαρμοζόμενες συχνότητες λειτουργίας ποικίλουν από 50-60Hz έως 400kHz ή και υψηλότερα ανάλογα πάντα με το μέταλλο που τήκεται, την ικανότητα σε όγκο διαχείρισης του φούρνου και την ταχύτητα τήξης που απαιτείται. Γενικότερα, όσο μικρότερος είναι ο όγκος που τήκεται, τόσο μεγαλύτερη είναι και η συχνότητα του φούρνου που απαιτείται με αυτό να οφείλεται στην ικανότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος να διαπερνά την επιφάνεια του αγώγιμου υλικού.

Ένας προθερμασμένος φούρνος με ικανότητα ενός τόνου δύναται να τήξει εντός μιας ώρας αντίστοιχη ποσότητα ψυχρού σιδήρου. Οι ενεργειακές απαιτήσεις κυμαίνονται από 10kW έως 42MW για ποσότητες μετάλλου από 20kg έως 65tn αντίστοιχα.<sup>[126]</sup>





Εικόνα 80 Ράβδοι πυριτίου (Εξοδος ανακύκλωσης).

### 3.3.3.7 Μηχανισμοί μεταφοράς εντός της γραμμής ανακύκλωσης

Οι μηχανισμοί μεταφοράς εντός της γραμμής ανακύκλωσης είναι ιδιαίτερα συνηθισμένοι σε όλων των μορφών τις βιομηχανίες με στόχο τη διευκόλυνση μεταφοράς αντικειμένων από ένα σημείο σε ένα άλλο. Η χρήση τους ενδείκνυται ιδιαίτερα για την μεταφορά συμπαγών και βαρειών αντικειμένων και υλικών. Η γρήγορη και αποτελεσματική μεταφορά των αντικειμένων, τους καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλείς σε βιομηχανίες διαχείρισης υλικών και συσκευασιών. Στην αγορά βρίσκονται διαθέσιμα πολλά και διαφορετικά είδη μεταφορικών συστημάτων και διαφοροποιούνται ανάλογα με την εκάστοτε ανάγκη. <sup>[127]-[129]</sup>

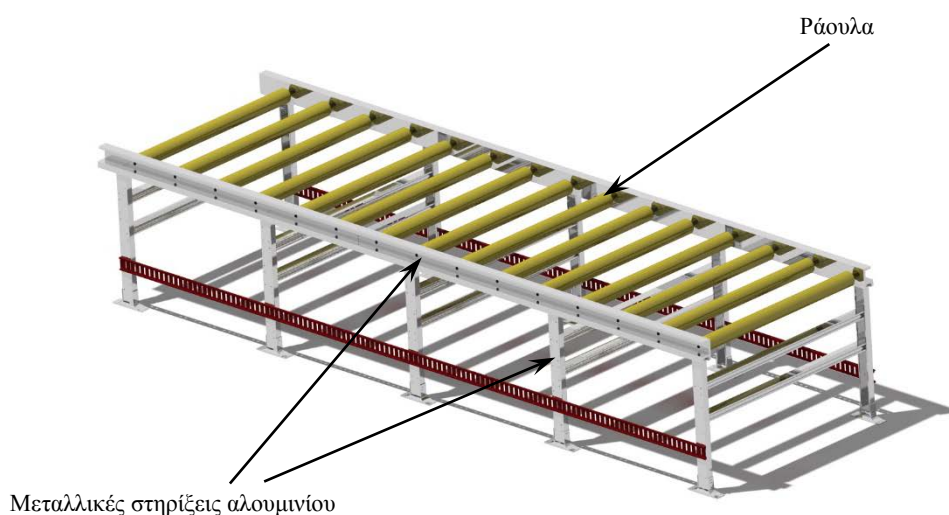
Ορισμένα από τα συστήματα μεταφοράς είναι:

Ραουλόδρομοι <sup>[130]</sup>	Electric Track Vehicle Systems
Μεταφορείς βαρύτητας	Belt driven live roller conveyors
Μεταφορικές ταινίες	Lineshaft roller conveyor
Μεταφορείς μεταλλικού πλέγματος	Μεταφορέας σε διάταξη αλυσίδας
Πλαστικοί κυλιόμενοι διάδρομοι	Μεταφορέας τύπου Auger
Κοχλιομεταφορείς	Chain driven live roller conveyor
Ευέλικτοι μεταφορείς	Εναέριοι μεταφορείς
Κατακόρυφοι μεταφορείς	Μεταφορείς προστατευμένοι από σκόνη
Σπειροειδείς μεταφορείς	Μεταφορείς αυτοκινητοβιομηχανίας
Δονητικοί μεταφορείς	Επίγειοι μεταφορείς
Πνευματικοί μεταφορείς	Μεταφορείς Drag
Φαρμακευτικοί μεταφορείς	Μεταφορείς συσκευασιών

Ωστόσο, για τις ανάγκες της γραμμής παραγωγής για την ανακύκλωση φ/β πινάκων χρησιμοποιήθηκαν και σχεδιάστηκαν παραμετρικά ραουλόδρομοι και μεταφορικές ταινίες με δυνατότητα κλίσης.

#### 3.3.3.7.1 Ραουλόδρομος

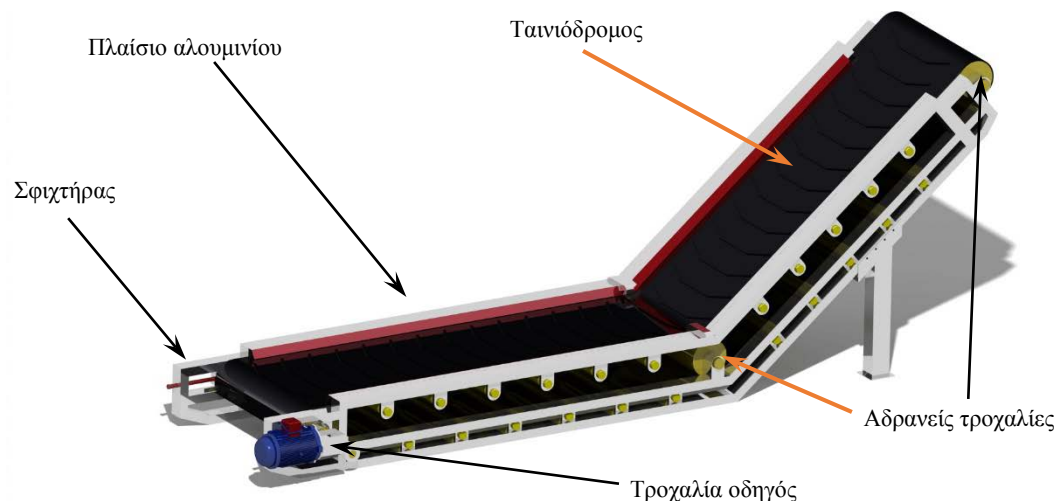
Οι μη τροφοδοτούμενοι ραουλόδρομοι αποτελούν την οικονομικότερη και συνηθέστερη μέθοδο μεταφοράς μονάδων φορτίων. Τα ράουλα, τυπικά τοποθετούνται υπό μια ελαφριά κλίση προκειμένου με ελάχιστη δύναμη και τη βαρυτική δύναμη να μπορούν να προωθούνται τα φορτία από το ένα άκρο στο άλλο, ιδιαίτερα για μεγάλες αποστάσεις. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε περιπτώσεις που τα ράουλα τοποθετούνται υπό μηδενική κλίση έτσι ώστε οι χειριστές να έχουν τον καλύτερο έλεγχο των φορτίων σε περίπτωση αναγκαίων στάσεων σε ενδιάμεσους σταθμούς εργασίας.



Εικόνα 81 Ραουλόδρομος.

#### 3.3.3.7.2 Ταινιόδρομος

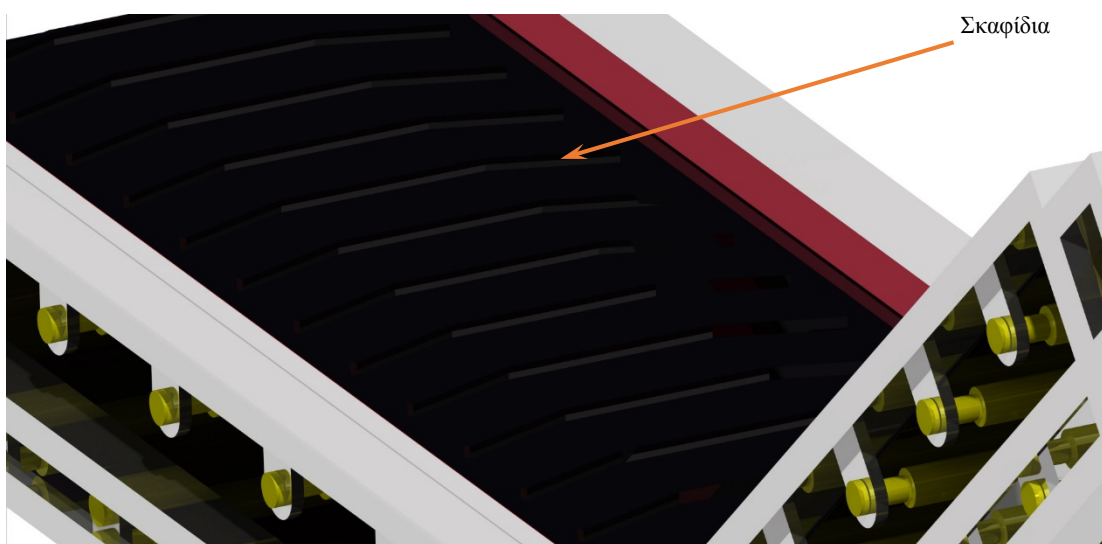
Ο μεταφορικός ταινιόδρομος αποτελεί ένα σύστημα μεταφοράς, το οποίο συναντάται ιδιαίτερα συχνά σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Η βασική λειτουργία του, στηρίζεται στην περιστροφική κίνηση τουλάχιστον δύο τροχαλιών πάνω στις οποίες βρίσκεται εφαρμογή ένας ευέλικτος ιμάντας πραγματοποιώντας μια ατέρμονο κίνηση. Η κίνηση δίνεται σε μια από τις τροχαλίες (τροχαλία οδηγός) και οι υπόλοιπες (αδρανείς τροχαλίες) ακολουθούν λόγω της παρουσίας του ιμάντα (Εικόνα 82).



*Εικόνα 82 Ταινιόδρομος.*

Όσον αφορά στα υλικά των ιμάντων χρησιμοποιούνται είτε PVC ή ελαστομερή. Στις περισσότερες των περιπτώσεων οι ιμάντες αποτελούνται από δύο επίπεδα. Το πρώτο στρώμα όντας υπό τη μορφή πλέγματος συνίσταται από ένα υλικό (πολυεστέρας, νάιλον, βαμβάκι) που μπορεί να παρέχει γραμμική αντοχή και σχήμα και ονομάζεται σκελετός ενώ το δεύτερο ονομάζεται κάλυμμα και αποτελείται από κάποιο ελαστομερές ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται.

Σε πολλές περιπτώσεις στην επιφάνεια του καλύμματος τοποθετούνται ειδικά σκαφίδια με στόχο την διευκόλυνση την ανύψωσης των υλικών στο επιθυμητό ύψος (Εικόνα 83).



*Εικόνα 83 Ζώνη ταινιόδρομου.*

### 3.3.4 Ενδεικτικές παραμετροποιήσεις

Στόχος της όλης εργασίας όπως προαναφέρθηκε είναι η προσομοίωση μιας πρότυπης για τα Ελληνικά δεδομένα, ενοποιημένης μεθόδου ανακύκλωσης φ/β πινάκων κρυσταλλικού πυριτίου. Η σχεδίαση πραγματοποιήθηκε στη πλατφόρμα τρισδιάστατης σχεδίασης CATIA V5 R21, της Γαλλικής εταιρείας Dassault Systèmes. Κατά τη σχεδίαση εφαρμόστηκε η φιλοσοφία παραμετρικού σχεδιασμού, επιτρέποντας την τροποποίηση της διαστασιολόγησης και χωροθέτησης των μηχανημάτων και των εγκαταστάσεων, με σκοπό την παροχή ευελιξίας όσον αφορά στην ικανοποίηση των ποσοτικών αναγκών εισόδου/εξόδου, περιορισμών χώρου και χρηματοδότησης. Προκειμένου να γίνει κατανοητή η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, εκείνη περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα:



*Διάγραμμα ροής εργασίας.*

Για κάθε είδος μηχανήματος που συναρμολογήθηκε μέσω του καθορισμού των παραμέτρων σχεδίασης και έχοντας ως γνώμονα τη διαστασιολόγηση αντίστοιχων μηχανημάτων της αγοράς ορίστηκαν τρία συν ένα διαφορετικά μεγέθη. Αναλυτικότερα, πρόκειται για τα **S**mall, **M**edium, **L**arge και **C**ustom. Κατ' επέκταση, στην παρούσα και επόμενη ενότητα (3.3.5) παρουσιάζονται συγκριτικοί πίνακες των εγκατεστημένων μηχανών για τα διάφορα μεγέθη καθώς και οι συναρμολογήσεις του πεδίου ανακύκλωσης αντίστοιχα.

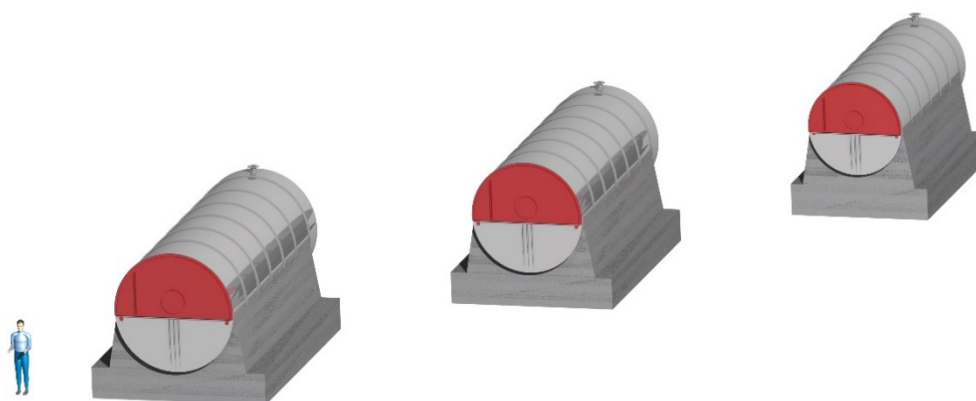
Με σειρά θα παρουσιαστούν οι συγκριτικοί πίνακες για:

- i. Τον πυρολυτικό αντιδραστήρα
- ii. Το θρυμματιστή διπλού άξονα
- iii. Τον κοκκοποιητή
- iv. Το μηχανισμό διαλογής
- v. Τη μεταφορική ταινία
- vi. Το ραουλόδρομο

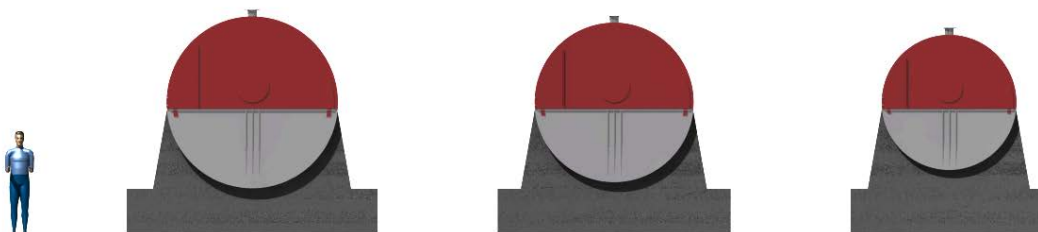
Σε κάθε πίνακα θα πραγματοποιείται σύγκριση για το ίδιο μηχάνημα σχετικά με τις κύριες παραμέτρους σχεδιασμού για κάθε προτεινόμενη εναλλακτική.

*Πίνακας 12. Ενδεικτικές τιμές πυρολυτικού αντιδραστήρα.*

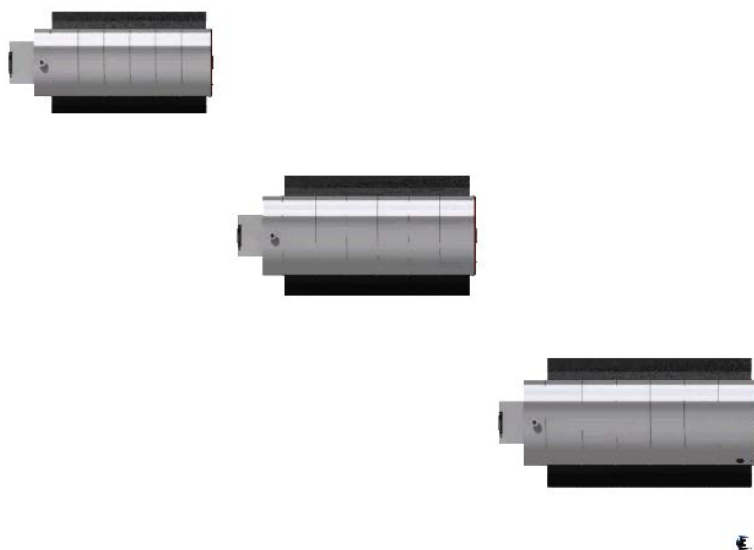
Πυρολυτικός Αντιδραστήρας	Small	Medium	Large
Μήκος (mm)	5000	6000	6600
Διάμετρος αντιδραστήρα (mm)	2200	2600	2800
Πάχος κελύφους (mm)	38	46	46
Περ. Ταχύτητα (rpm)	0.4	0.4	0.8
Σύστημα Θέρμανσης	Άμεση	Άμεση	Άμεση
Ικανότητα (tons)	5	8	12
Ισχύς (kW)	11	16	19



*Εικόνα 84 Αναπαράσταση πυρολυτικού αντιδραστήρα στις ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων (Γενική άποψη).*



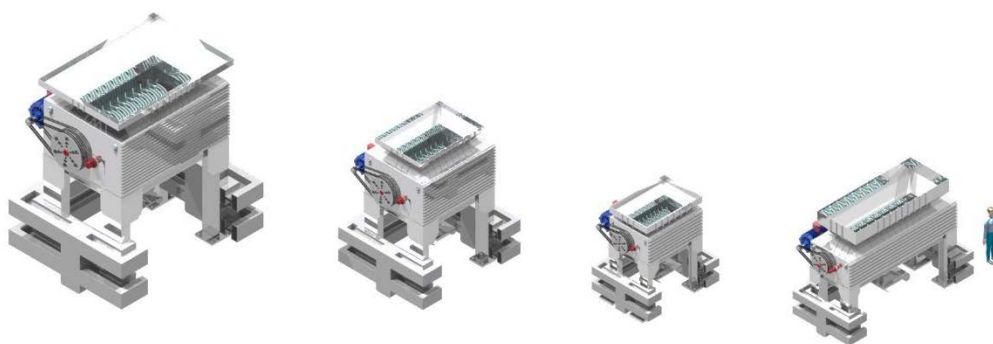
*Εικόνα 85 Αναπαράσταση πυρολυτικού αντιδραστήρα στις ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων (Πρόοψη).*



Εικόνα 86 Αναπαράσταση πυρολυτικού αντιδραστήρα στις ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων (Κάτοψη).

Πίνακας 13. Ενδεικτικές τιμές θρυμματιστή διπλού άξονα.

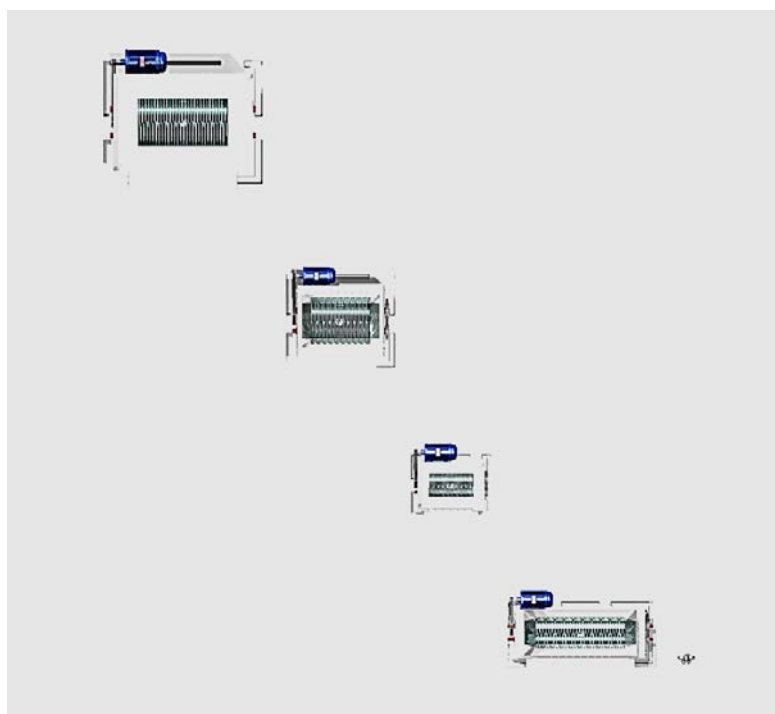
Θρυμματιστής διπλού άξονα	Small	Medium	Large
Διάμετρος άξονα (mm)	100	150	200
Ύψος (mm)	2600	3800	5100
Μήκος (mm)	2000	2200	4100
Πλάτος (mm)	1500	2700	3600
Πλάτος χώρου κοπής (mm)	1500	2000	3000
Περ. Ταχύτητα (rpm)	41	41	41
Μέγεθος θρυμμάτων (mm*mm) (max)	48*75	65*110	97*200
Πάχος κοπτικών (mm)	20	26	40
Ισχύς (kW)	7.5-11	45-75	90-132
Αριθμός κοπτικών (pcs/άξονα)	30	30	30



Εικόνα 87 Αναπαράσταση θρυμματιστή διπλού άξονα στις ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων (Γενική άποψη).



Εικόνα 88 Αναπαράσταση θρυμματιστή διπλού άξονα στις ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων (Πρόοψη).



Εικόνα 89 Αναπαράσταση θρυμματιστή διπλού άξονα στις ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων (Κάτοψη).

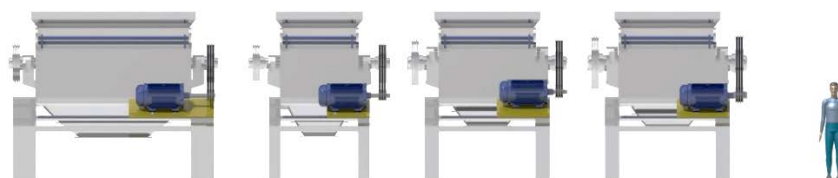


Πίνακας 14. Ενδεικτικές τιμές κοκκοποιητή.

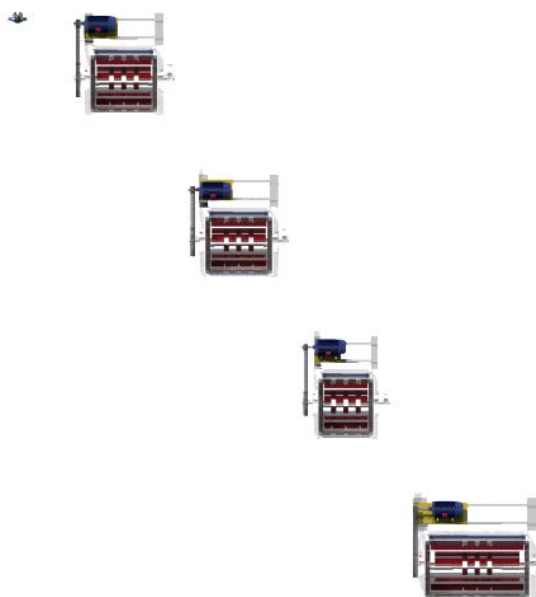
Κοκκοποιητής	Small	Medium	Large
Διάμετρος άξονα (mm)	200	245	290
Χρήσιμο πλάτος (mm)	1400	1740	1740
Μήκος (mm)	2000	2000	2000
Ύψος (mm)	1500	1500	1500
Μέγεθος θρυμμάτων (mm*mm)	15*15	15*15	15*15
Περιστρεφόμενα κοπτικά (pcs)	3	3	3
Χρήσιμος όγκος (mm <sup>3</sup> )	150	372	410
Ισχύς (kW)	15	30	45
Περ. Ταχύτητα (rpm)	16-25	16-25	16-25
Σταθερά κοπτικά (pcs)	2	2	2



Εικόνα 90 Αναπαράσταση κοκκοποιητή στις ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων (Γενική άποψη).



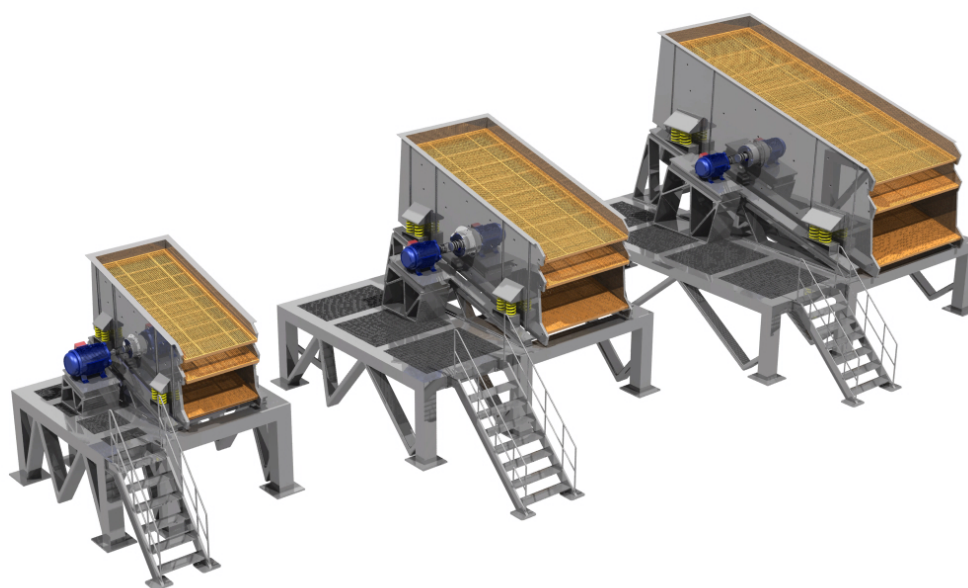
Εικόνα 91 Αναπαράσταση κοκκοποιητή στις ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων (Πρόοψη).



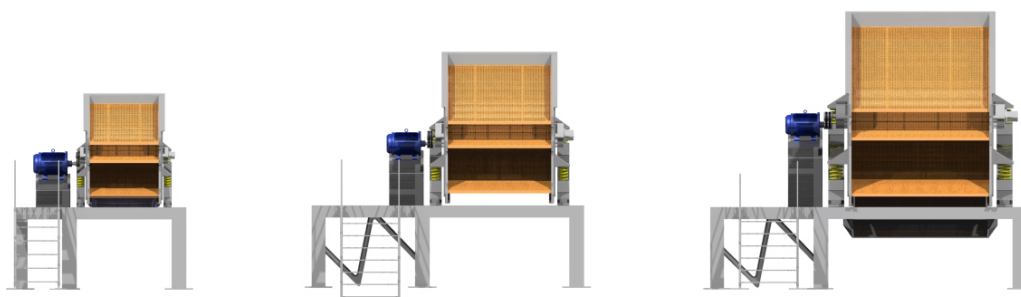
Εικόνα 92 Αναπαράσταση κρυσταλλοποίηση στις ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων (Κάτοψη).

Πίνακας 15. Ενδεικτικές τιμές Μηχανισμού διαλογής.

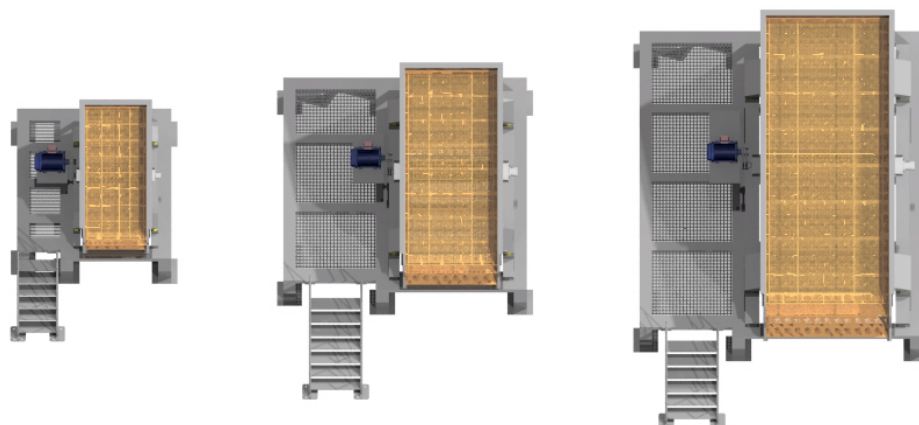
Μηχανικός Διαχωρισμός	Small	Medium	Large
Ύψος (mm)	1000	1300	1600
Πλάτος (mm)	1080	1580	2080
Μέγεθος πλέγματος (mm*mm)	1000*2000	1500*3000	2000*4500
Κλίση εγκατάστασης (deg)	15	15	20
Αριθμός πλεγμάτων (pcs)	3	3	3
Μέγεθος θρυμμάτων (mm)	0.5-20	0.5-20	0.5-20
Συχνότητα δόνησης (Hz)	13-16	16.2	16.2
Ισχύς (kW)	11	22	30



Εικόνα 93 Αναπαράσταση Μηχανισμού διαλογής στις ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων (Γενική άποψη).



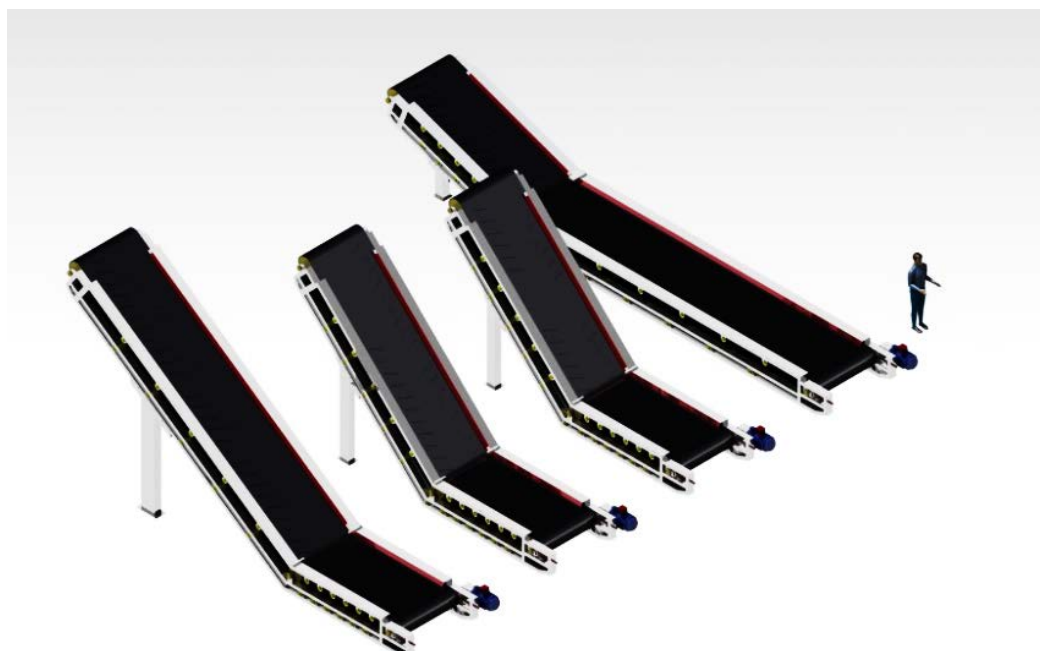
Εικόνα 94 Αναπαράσταση Μηχανισμού διαλογής στις ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων (Πρόοψη).



Εικόνα 95 Αναπαράσταση Μηχανισμού διαλογής στις ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων (Κάτοψη).

Πίνακας 16. Ενδεικτικές τιμές Μεταφορικής ταινίας.

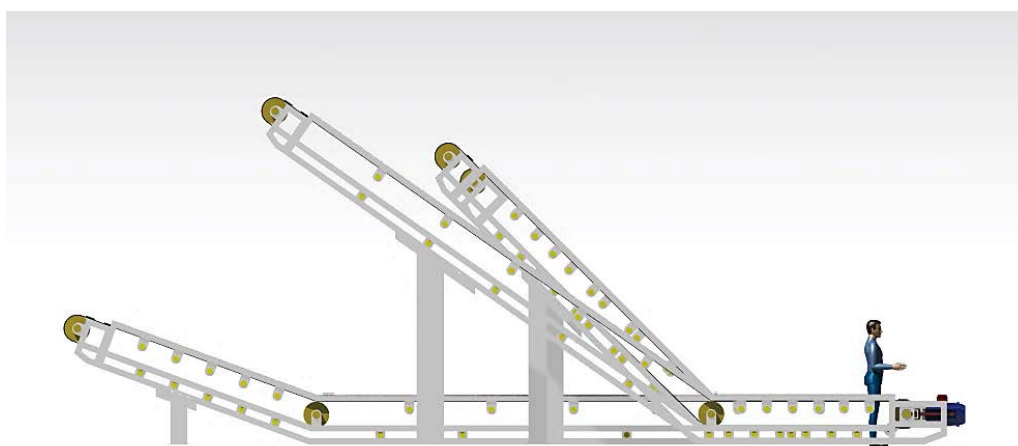
Μεταφορική ταινία			
	Small	Medium	Large
Οριζόντιο μήκος (mm)	1500	2500	4000
Επικλινές μήκος (mm)	2000	4500	6000
Ύψος οριζόντιου τμήματος (mm)	600	600	600
Πλάτος (mm)	1200	1800	2400
Χρήσιμο Πλάτος (mm)	1340	1500	2000
Κλίση (deg)	10-80	10-80	10-80



Εικόνα 96 Μηχανισμός μεταφορικής ταινίας (Γενική άποψη).



Εικόνα 97 Μηχανισμός μεταφορικής ταινίας (Πρόοψη).



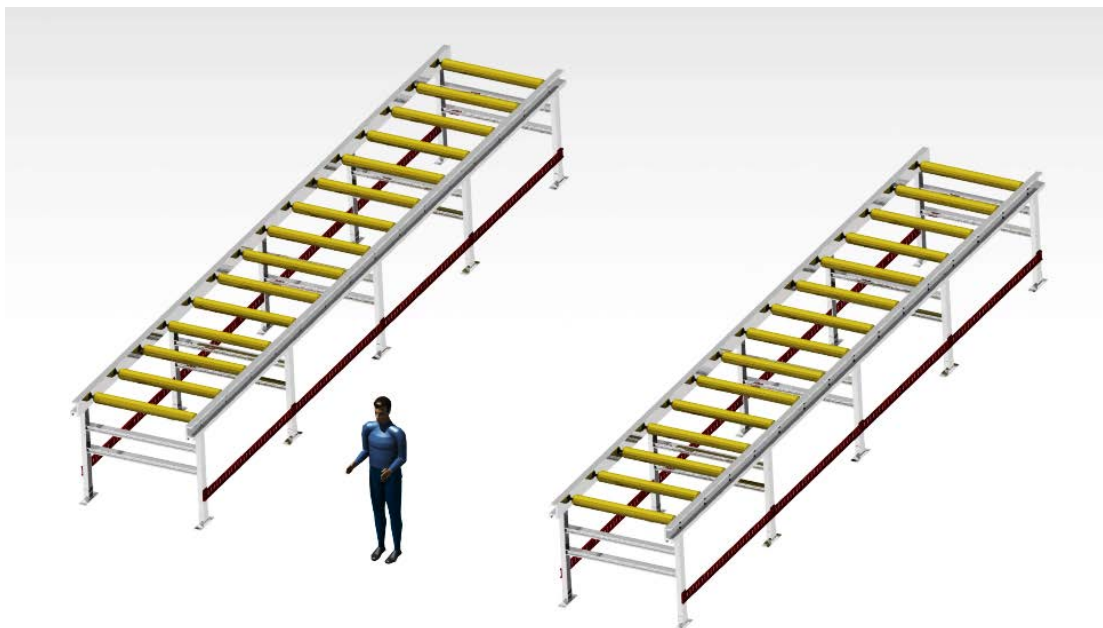
Εικόνα 98 Μηχανισμός μεταφορικής ταινίας – τυχαίες τιμές κλίσης και οριζόντιου μήκους (Πλάγια όψη).



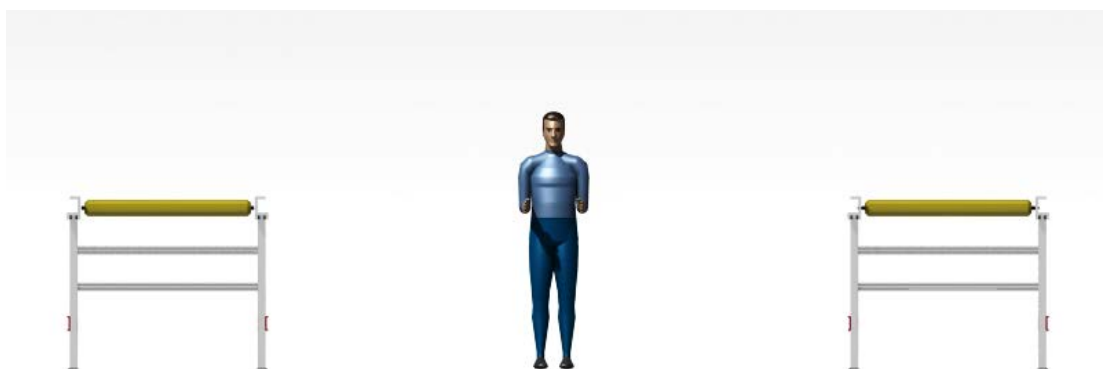
Εικόνα 99 Μηχανισμός μεταφορικής ταινίας (Κάτοψη).

Πίνακας 17. Ενδεικτικές τιμές ραουλόδρομου.

Ραουλόδρομος	Small	Medium	Large
Μήκος (mm)	4500	6000	8000
Χρήσιμο Πλάτος (mm)	1200	1200	1500
Πλάτος (mm)	1350	1350	1650
Αριθμός ράουλων (pcs)	15	15	15



Εικόνα 100 Ραουλδόδρομος (Γενική άποψη).

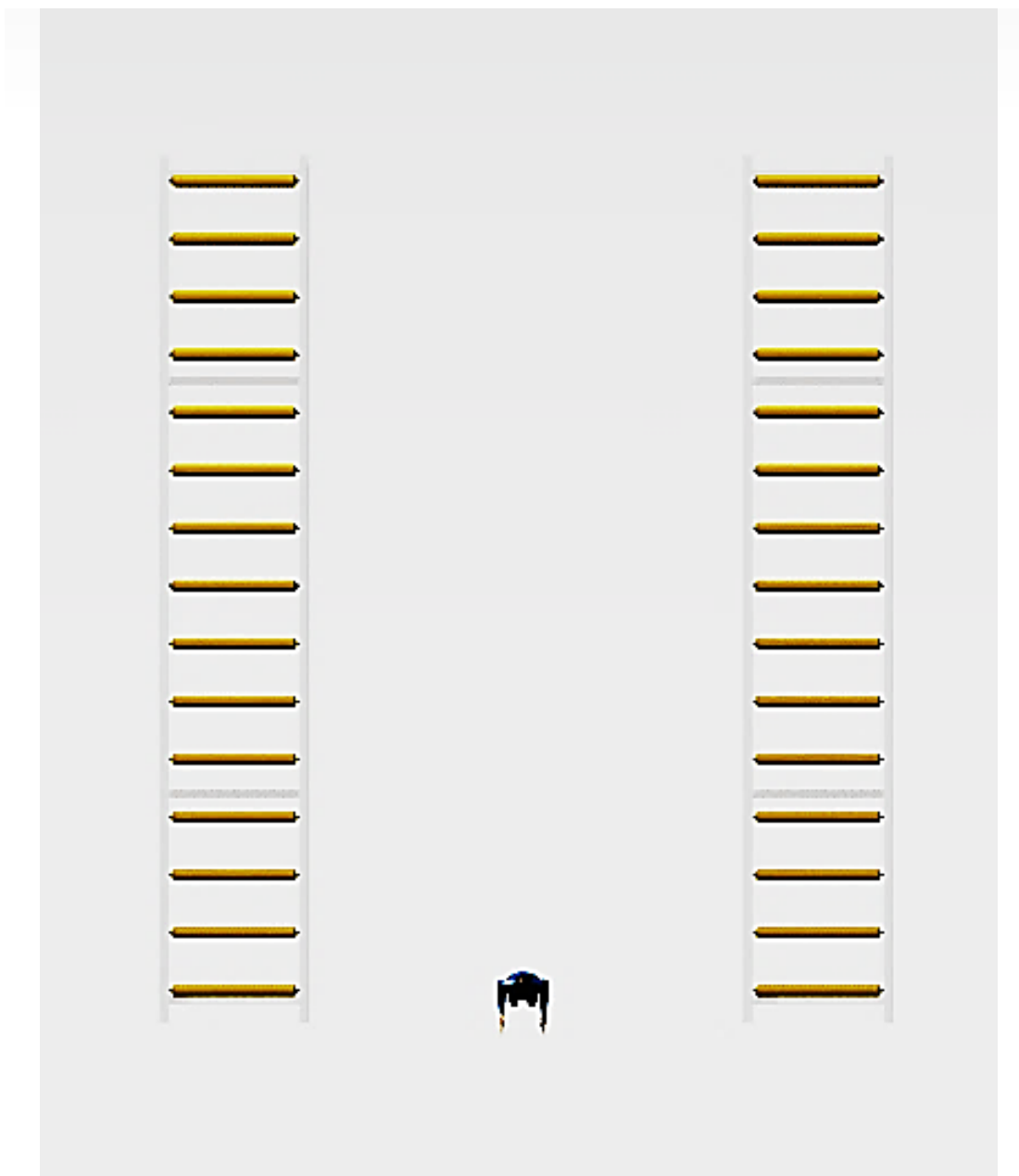


Εικόνα 101 Ραουλδόδρομος (Πρόοψη).



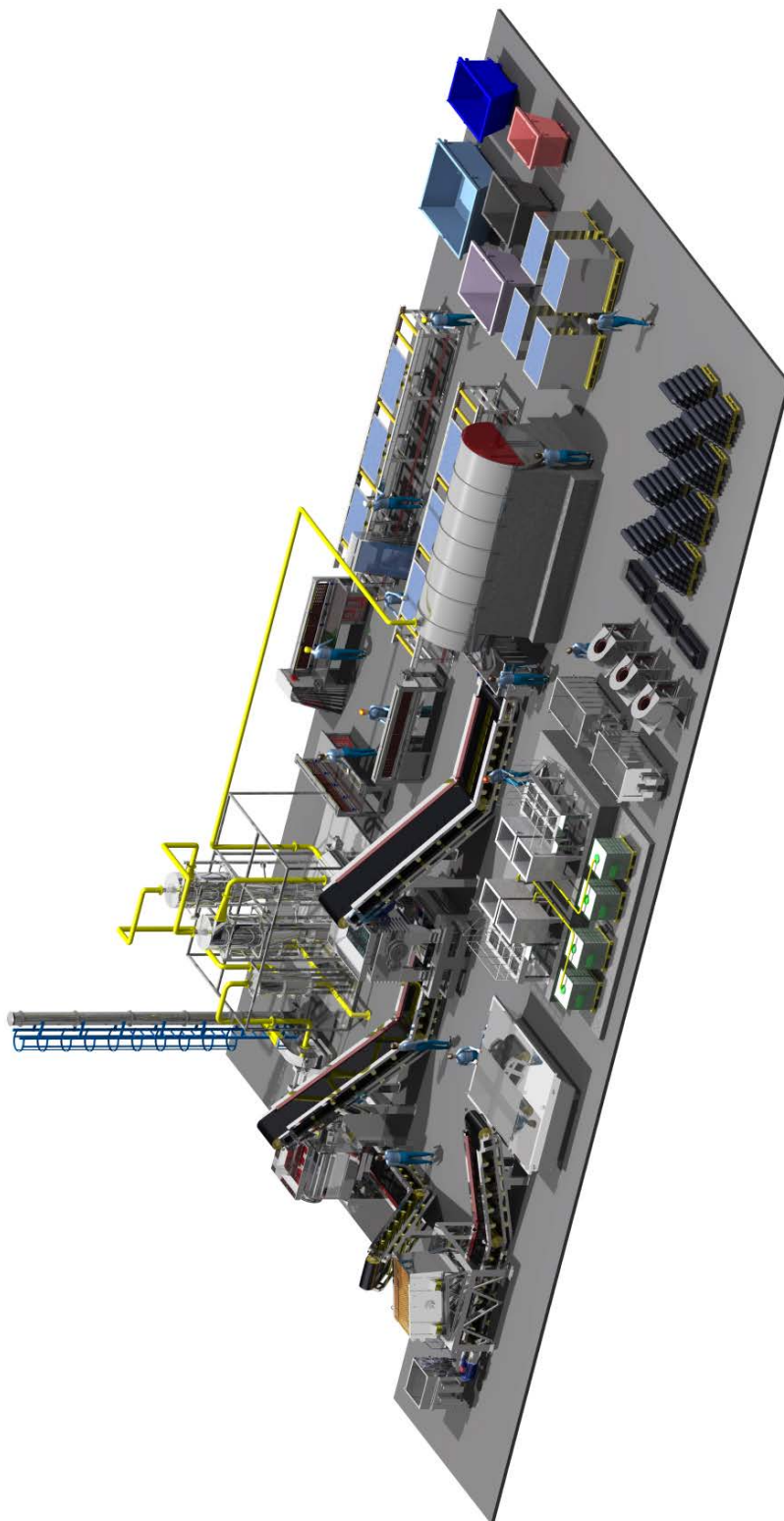
Εικόνα 102 Ραουλδόδρομος (Πλάγια όψη).



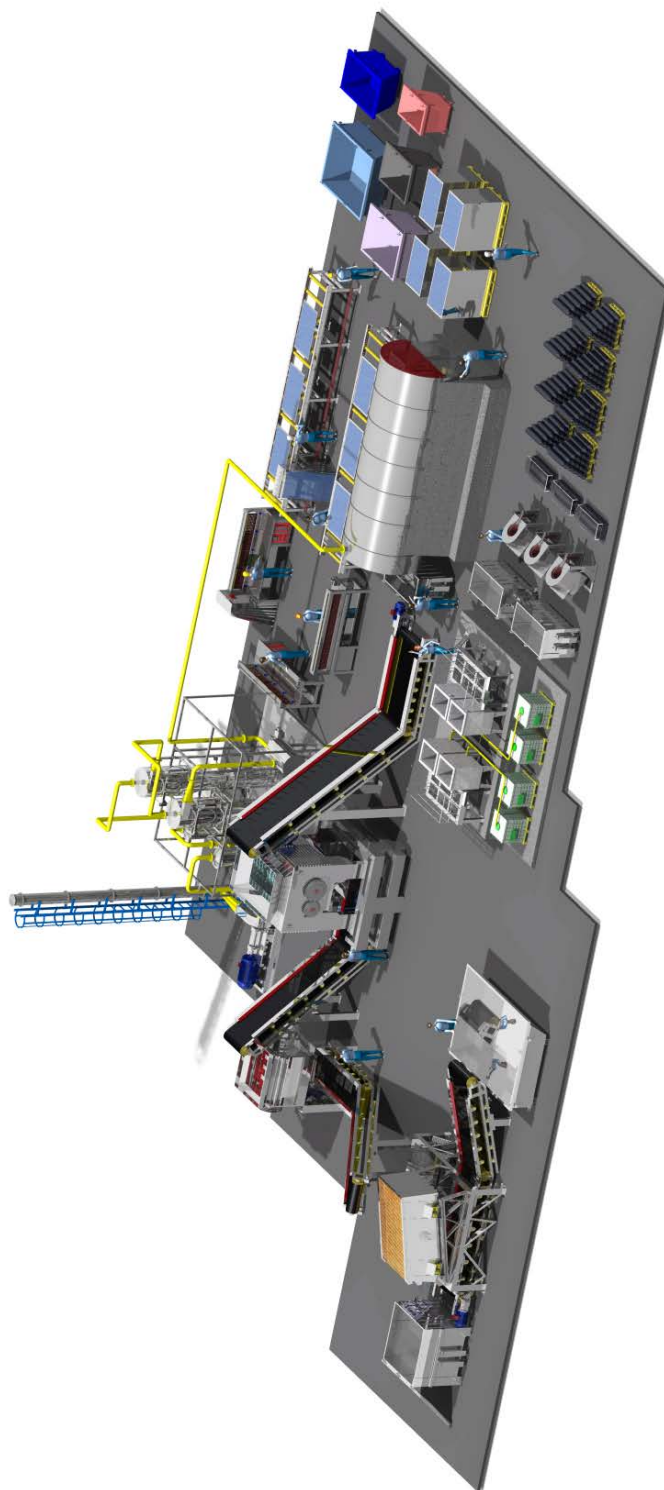


Εικόνα 103 Ραουλόδρομος (Κάτοψη).

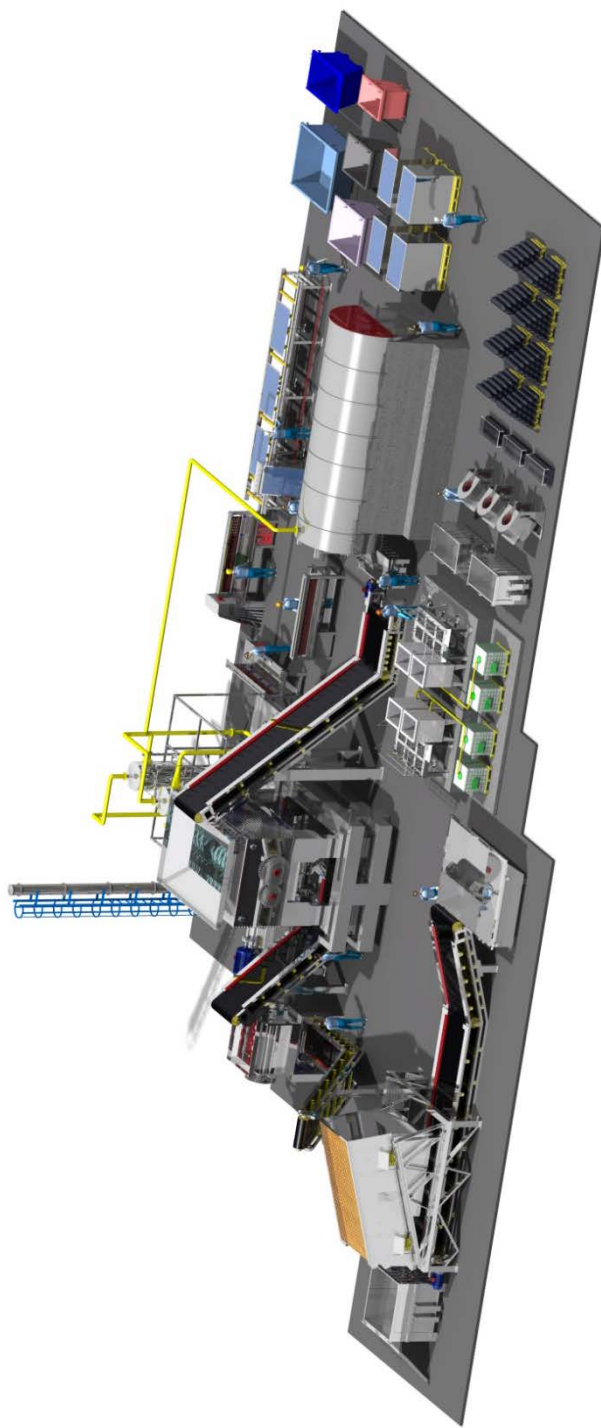
### 3.3.5 Η γραμμή ανακύκλωσης



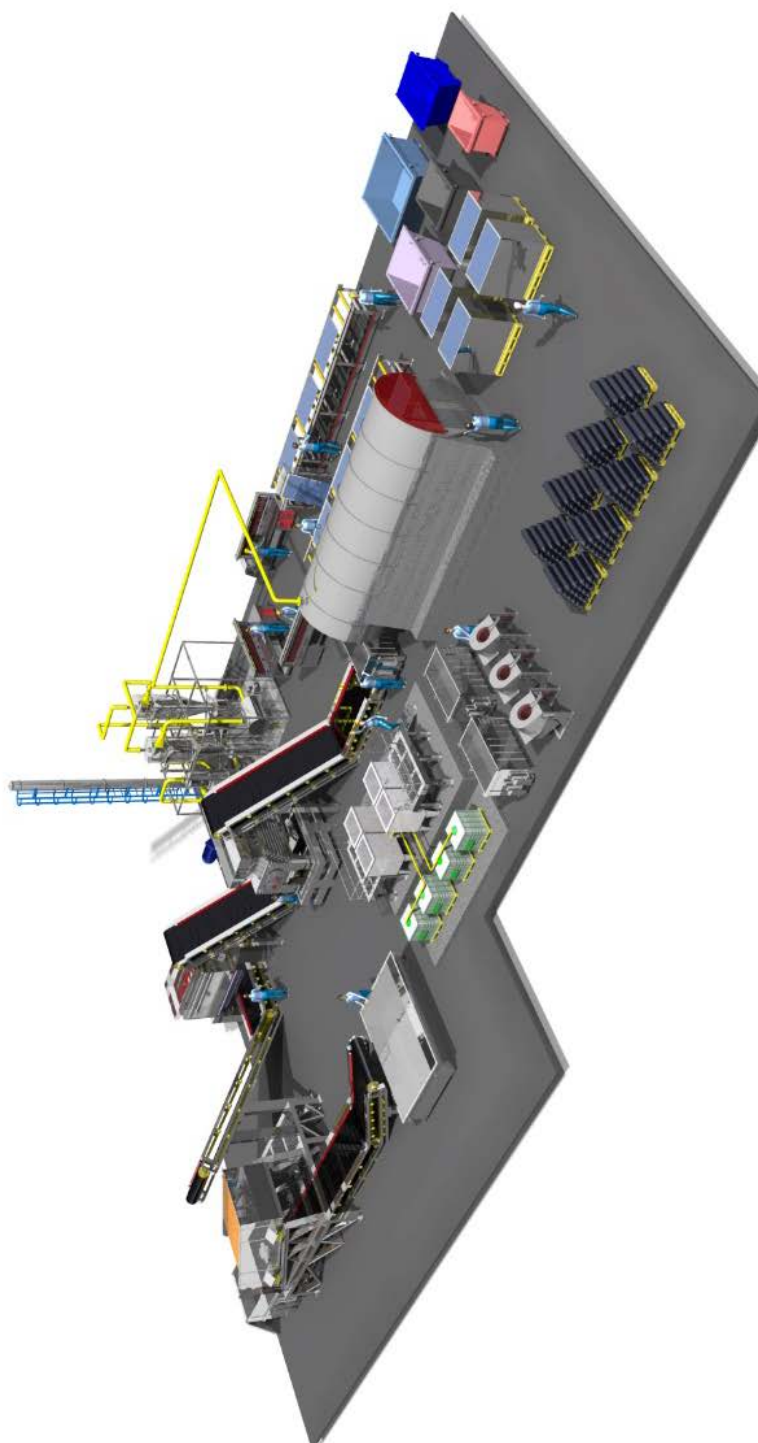
Εικόνα 104 Γραμμή ανακύκλωσης Φ/β πινάκων – Small (Γενική άποψη).



Εικόνα 105 Γραμμή ανακύκλωσης Φ/β πινάκων – Medium (Γενική άποψη).



*Εικόνα 106 Γραμμή ανακύκλωσης Φ/β πινάκων – Large (Γενική άποψη).*



Εικόνα 107 Γραμμή ανακύκλωσης Φ/β πινάκων – Custom (Γενική άποψη).

## 4. Συμπεράσματα - Προοπτικές

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη μιας τρισδιάστατης προσομοίωσης γραμμής παραγωγής ανακύκλωσης με στόχο τη διαχείριση φ/β πινάκων κρυσταλλικού πυριτίου. Η εγκατάσταση αποσκοπεί στην ικανοποίηση των αναγκών που πρόκειται να ανακύψουν την επόμενη εικοσαετία στην Ελλάδα. Ο Έλληνας επενδυτής οφείλει να είναι ενήμερος και ταυτόχρονα να είναι σε θέση να προσαρμόζει τις επενδύσεις του σύμφωνα με τις ανάγκες του. Για τον παραπάνω λόγο, η συνολική εγκατάσταση ανακύκλωσης πραγματοποιήθηκε εφαρμόζοντας παραμετρική φιλοσοφία σχεδίασης παρέχοντας ταυτόχρονα ευελιξία σε όρους μεγέθους διαχείρισης ποσοτήτων εισόδου/εξόδου, χωροθέτησης και φυσικά χρηματοδότησης.

Για κάθε μηχανισμό εντοπίστηκαν οι παράμετροι κλειδιά σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα της αγοράς και ακολουθήθηκαν κατά την ανάπτυξη τους στη σχεδιαστική πλατφόρμα του CATIA V5 R21.

Ένα παρόμοιο εγχείρημα θα ήταν εφικτό δεδομένων των μεγάλων ποσοτήτων φ/β αποβλήτων που αναμένονται τα επόμενα χρόνια σε συνδυασμό με την μείωση των εξόδων που απαιτούνται για την προώθηση τους για διαχείριση στο εξωτερικό. Οι εγκαταστάσεις που επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν δε διαφέρουν από εκείνες που συναντώνται κυρίως σε πεδία ανακύκλωσης ελαστικών, χάρτου, πλαστικών κ.λπ.. Επιπλέον, θα ήταν δυνατό, οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις συλλογής-προώθησης φ/β πινάκων να εξελιχθούν σταδιακά σε σταθμούς επεξεργασίας φ/β αποβλήτων.

Πέρα από τους στόχους που επιτεύχθηκαν αξίζει να υποδειχτούν ορισμένες προοπτικές που θα αποτελούσαν θεμιτή συνέχεια της εν λόγω εργασίας:

- i. Διαστασιολόγηση των μηχανών υπό την οπτική της κατανάλωσης ισχύος με στόχο τον ακριβή υπολογισμό των απαιτήσεων για την εύρυθμη λειτουργία του πεδίου ανακύκλωσης ενώ ταυτόχρονα θα ήταν δυνατό να υπολογιστεί η συνολική ενέργεια που θα μπορούσε να μαστευτεί από τη διαχείριση των θερμών αέριων προϊόντων της πυρολυτικής διαδικασίας.
- ii. Βελτιστοποίηση της χωροθέτησης των μηχανικών εγκαταστάσεων με ανεξάρτητες παραμέτρους: τις ποσότητες εισόδου, το διαθέσιμο χώρο του εργοστασίου και την οικονομική ευχέρεια του επενδυτή.



- iii. Επέκταση των διαδικασιών στη διαχείριση φ/β πινάκων λεπτού υμενίου ή ακόμα και νεότερων τεχνολογιών όταν οι ποσότητες τους προς ανακύκλωση φτάσουν στο επιθυμητό όριο με μικρές αλλαγές στη διαδικασία της φυσικής αποσυναρμολόγησης, θερμικής και χημικής διεργασίας.



## Βιβλιογραφία – References

- [1] L. El Chaar, L.A. Jamont, N. El Zein, Review of photovoltaic technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 2165–2175.
- [2] Bjørn Petter Jelle, Christer Breivik, Hilde Drolsum Røkenes, Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities, Solar Energy Materials & Solar Cells 100 (2012) 69–96.
- [3] T.M. Razykov, C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya, Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, Solar Energy 85 (2011) 1580–1608.
- [4] Robert W. Miles, Guillaume Zoppi, and Ian Forbes, inorganic solar cells, materialstoday, November 2007, Volume 10, Number 11.
- [5] R.W. Miles, K.M. Hynes, I. Forbes, Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues, Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 51 (2005) 1e42.
- [6] V.V. Tyagi, Nurul A.A. Rahim, N.A. Rahim, Jeyraj A./L. Selvaraj, Progress in solar PV technology: Research and achievement, Renewable and Sustainable Energy Reviews 20 (2013) 443–461.
- [7] <http://www.solar-designs.com.au/thebasics.shtml>
- [8] [http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/uk-town-may-scrap-solar-farm-planning-permission\\_100014499/#axzz37I5QHwpl](http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/uk-town-may-scrap-solar-farm-planning-permission_100014499/#axzz37I5QHwpl)
- [9] R. Uecker, Journal of Crystal Growth (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2013.11.095i>.
- [10] Czochralski Crystal Growth Method. Bbc.co.uk. 30 January 2003. Retrieved on 2011-12-06.
- [11] [http://en.wikipedia.org/wiki/Czochralski\\_process#mediaviewer/File:Czochralski\\_Process.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/Czochralski_process#mediaviewer/File:Czochralski_Process.svg)
- [12] [http://www.ami.ac.uk/courses/ami4202\\_mdesign/u02/](http://www.ami.ac.uk/courses/ami4202_mdesign/u02/)
- [13] <http://www.dreamstime.com/stock-image-silicon-wafer-processor-cores-image20022861>
- [14] Stuart R. Wenham, Martin A. Green, Muriel E. Watt and Richard Corkish, 2007, Applied Photovoltaics.
- [15] Christiane Becker, Tobias Sontheimer, Simon Steffens, Simone Scherf, and Bernd Rech, Polycrystalline silicon thin films by high-rate electron beam evaporation for photovoltaic applications-Influence of substrate texture and temperature, Energy Procedia 10 (2011) 61 – 65.
- [16] [http://www.4green.gr/data/news/preview\\_news/88687.asp](http://www.4green.gr/data/news/preview_news/88687.asp)
- [17] C. Becker, D. Amkreutz, T. Sontheimer, V. Preidel, D. Lockau, J. Haschke, L. Jogschies, C. Klimm, J. J. Merkel, P. Plocica, S. Steffens, B. Rech, Polycrystalline silicon thin-film solar cells: Status and perspectives, Solar Energy Materials & Solar Cells 119 (2013) 112–123.
- [18] BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY, Reactive Ion Etching (RIE), 2009.
- [19] [http://en.wikipedia.org/wiki/Reactive-ion\\_etching#mediaviewer/File:Rieoperation.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/Reactive-ion_etching#mediaviewer/File:Rieoperation.svg)
- [20] Hitoshi Sai, Takashi Koida, Takuya Matsui, Isao Yoshida, Kimihiko Saito, and Michio Kondo, Microcrystalline Silicon Solar Cells with 10.5% Efficiency Realized by



- Improved Photon, Absorption via Periodic Textures and Highly Transparent Conductive Oxide, *Applied Physics Express* 6 (2013) 104101.
- [21] Neeraj Dwivedi, Sushil Kumar, Atul Bisht, Kamlesh Patel, S. Sudhakar, Simulation approach for optimization of device structure and thickness of HIT solar cells to achieve 27% efficiency, *Solar Energy* 88 (2013) 31–41.
  - [22] Min-Kyu Son, Hyunwoong Seo, Kyoung-Jun Lee, Soo-Kyoung Kim, Songyi Park, Myeong-Soo Jeong, Hee-Je Kim, Computational modeling and experimental analysis on the improvement of current mismatch in a W-type series-connected dye-sensitized solar module, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 268 (2013) 17– 23.
  - [23] Jenny Nelson, Organic photovoltaic films, *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 6 (2002) 87–95
  - [24] Huanqi Cao, Weidong He, Yiwu Mao, Xiao Lin, Ken Ishikawa, James H. Dickerson, Wayne P. Hess, Recent progress in degradation and stabilization of organic solar cells, *Journal of Power Sources* 264 (2014) 168e183
  - [25] Alex C. Mayer, Shawn R. Scully, Brian E. Hardin, Michael W. Rowell, and Michael D. McGehee, Polymer-based solar cells, *materialstoday* November 2007, volume 10, number 11
  - [26] T. K. Manna and S. M. Mahajan, Nanotechnology in the Development of Photovoltaic Cells
  - [27] D. Konig, K.Casalenuovo, Y.Takeda, G.Conibeer, J.F.Guillemoles, R.Patterson, L.M. Huang, M.A.Green , Hot carrier solar cells: Principles, materials and design, *Physica E* 42 (2010) 2862–2866.
  - [28] C.R. Wronski, D.E. Carlson, in: M.D. Archer, R. Hill (Eds.), *Clean Electricity from Photo Photovoltaics*, Imperial College ,Press, 2001, pp. 199e236.
  - [29] S. Amirudden, et al., Technical Digest of the 14th International Photovoltaics Science and Engineering Conference (PVSEC-14), Bangkok, Thailand, 2004, pp. 111e112.
  - [30] N.P. Kim, R.M. Burgess, B.J. Stanbery, R.A. Mickelsen, J.E. Avery, R.W. McClelland, B.D. King, M.J. Boden, R.P. Gale, *Proceedings of the 20th IEEE Photovoltaics Specialists Conference* 1988, pp. 457e461.
  - [31] R.P. Gale, R.W. McClelland, B.D. Dingle, J.V. Gormley, R.M. Burgess, N.P. Kim, R.A. Mickelsen, B.J. Stanbery, *Proceedings of the 21st IEEE Photovoltaics Specialists Conference*, 1990, pp. 53e57.
  - [32] Vrielink JAM, Tiggelaar RM, Gardeniers JGE, Lefferts L. Applicability of X-ray fluorescence spectroscopy as method to determine thickness and composition of stacks of metal thin films: a comparison with imaging and profilometry. *Thin Solid Films* 2012;520:1740–4.
  - [33] J.J. Loferski, *Journal of Applied Physics* 27 (1956) 777.
  - [34] Hegedus SS, McCandless BE. CdTe contacts for CdTe/CdS solar cells: effect of Cu thickness surface preparation and re-contacting on device performance and stability. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2005; 88:75–95.
  - [35] Critical materials for sustainable energy applications .Resnick Institute Report California. September2011. /www.resnick.caltech.edu/learn/docs/ri\_criticalmaterials\_report.pdf
  - [36] S. Wagner, J. Shay, P. Migliorato, H.M. Kasper, *Applied Physics Letters* 25 (1974) 434.

- [37] M. Powella, D. Dimmler, Proceedings of 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, 2002, ππ 983-988
- [38] B.M. Basol, V.J. Kapur, IEEE Transactions on Electronic Devices 37 (1990) 418.
- [39] M.J. Carter, et al., Proceedings Of 19th IEEE Photovoltaics Specialist Conference, New Orleans, 1987, p. 1275.
- [40] A. Hinsch, et al., Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, 22-26, October 2001, pp. 995e1000.
- [41] B. O'Regan, M. Gratzel, Nature 353 (1991) 737e740.
- [42] Carbon Nanotubes Science and Technology, <http://www.personal.rdg.ac.uk/~scscharip/tubes.htm> [accessed 23.11.09].
- [43] Ju A. Carbon nanotubes could make efficient solar cells. Cornell University. Chronicle Online, <http://www.news.cornell.edu/stories/Sept09/NanotubeSolarCells.html>; 2009 [accessed 23.11.09].
- [44] Kyamis E, Amaratunga GAJ. Electrical properties of single-wall carbon nanotube-polymer composite films. J Appl Phys 2006; 80:465–72.
- [45] Nozik AJ. Efficiency of hot carrier solar energy converters. Journal of Applied Physics 1982;53:3813–8.
- [46] Hosenberg CB, Barnett AM, Kirkpatrick D. Nanostructured solar cells for high efficiency photovoltaics. In: IEEE 4th world conference on photovoltaic energy conversion, WCPEC-4, v 2. 2007. p. 2565–8.
- [47] Gavin Conibeer, third-generation photovoltaics, *ARC Photovoltaics Centre of Excellence, School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia, materialstoday, November 2007, volume10, number 11*
- [48] Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta and Ewan D. Dunlop, Solar cell efficiency tables (version 39), PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS, Appl. 2012; 20:12–20.
- [49] Sarah Kurtz, Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry, National Renewable Energy Laboratory, US, 2011.
- [50] <http://news.sciencemag.org/chemistry/2014/05/perovskite-solar-cells-get-lead-out>
- [51] <http://cleantechnica.com/2014/04/25/perovskites-great-potential-solar-cell-material-revealed-new-research/>
- [52] [http://www.nrel.gov/news/features/feature\\_detail.cfm/feature\\_id=10333](http://www.nrel.gov/news/features/feature_detail.cfm/feature_id=10333)
- [53] Nakita K. Noel, Samuel D. Stranks, Antonio Abate, Christian Wehrenfennig, Simone Guarnera, Amir Abbas Haghighirad, Aditya Sadhanala, Giles E., Eperon, Michael B. Johnston, Anna Maria Petrozza, Laura M. Herz, Henry J. Snaith, Lead-Free Organic-Inorganic Tin Halide Perovskites for Photovoltaic Applications, Energy & Environmental Science, January 2012, <http://www.rsc.org/suppdata/tc/c3/c3tc32075h/c3tc32075h.pdf>, <http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2014/ee/c4ee01076k>.
- [54] Vijay Devabhaktuni, Mansoor Alam, Soma Shekara Sreenadh Reddy Depuru, Robert C.GreenIIa, DouglasNims, Craig Near, Solar energy: Trends and enabling technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews 19 (2013) 555–564
- [55] [http://www.jc-solarhomes.com/COLLECTORS/concentrators\\_vs\\_flat\\_plates.htm](http://www.jc-solarhomes.com/COLLECTORS/concentrators_vs_flat_plates.htm)
- [56] Emmanuel Van Kerschaver and Guy Beaucarne, Back-Contact Solar Cells : A Review, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2006; 14:107–123



- [57] Verlinden P, Crane RA, Swanson RM, Iwata T, Handa K, Ogasa H, King DL. A 21\_6% efficient photovoltaic module with backside contact silicon solar cells. Proceedings of the 12th EPVSC, Amsterdam, 1994; 1304–1307.
- [58] Van Kerschaver E, Allebe´ C, Devreese B, Frisson L, Szlufcik J. Record high performance modules based on screen printed mwt solar cells. Proceedings of the 29th IEEE PVSEC, New Orleans, 2002; 78–81.
- [59] <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter08/chapter08.html>
- [60] C. Ferrari, F. Melino, M. Pinelli, P. R. Spina, M. Venturini, Overview and Status of Thermophotovoltaic Systems, Energy Procedia 45 ( 2014 ) 160 – 169.
- [61] Seal, M.R. "WWU VRI website: Viking 29 – A Thermophotovoltaic Hybrid Vehicle Designed and Built at Western Washington University". Retrieved 2010-11-12.
- [62] Horne E. (2002). Hybrid thermophotovoltaic power systems. Final report by EDTEK Inc. for the California energy commission.
- [63] Algora, C. and Martin, D. (2003). *Modelling And Manufacturing GaSb TPV Converters*. "Modelling and Manufacturing GaSb TPV". *THERMOPHOTOVOLTAIC GENERATION OF ELECTRICITY: Fifth Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity. AIP Conference Proceedings* **653**: 452.
- [64] European project THEREV Resp. Massimo Mazzer IMEM
- [65] G Colangelo, A de Risi and D Laforgia "New approaches to the design of the combustion system for thermophotovoltaic applications" ,Semicond. Sci. Technol. 18 (2003) S262–S269.
- [66] Lewis M. Fraas, James E. Avery, Han Xiang Huang "THERMOPHOTOVOLTAICS: HEAT AND ELECTRIC POWER FROM LOW BANDGAP "SOLAR" CELLS AROUND GAS FIRED RADIANT TUBE BURNERS".
- [67] Kailash Shukla, Edward Doyle, and Frederick Becket "Thermophotovoltaic Energy Development Program Conversion" NASA/CR-- 1998-208512 TR7020-003-98.
- [68] B. Bitnar , Semiconductor Sci. Tech. 18 (2003) S221- <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/18/5/312>
- [69] Frass L M, Ballantyne R, Hui S, Ye S, Gregory S, Keyes J, Avery J, Lamson D and Daniels B 1998 4th NREL Conf. on the Thermophotovoltaic Generation of Electricity (AIP Conf. Ser.) vol 460, ed T J Coutts, C S Allman and J Benner pp 480–7.
- [70] L. M. Fraas. W. E. Daniels. J. Muhs. "Infrared Photovoltaics for Combined Solar Lighting and Electricity for Buildings", Proceedings of 17"European PV Solar Energy Conference, Munich, Germany, 22-26 October 2001.
- [71] W. E. Horne, M. D. Morgan, V. S. Sundaram, T. Butcher, THERMOPHOTOVOLTAIC GENERATION OF ELECTRICITY: Fifth Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity (2002) AIP Conf. Proc. 653, pp. 91-100; doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.1539367>.
- [72] K. Qiu and A. C. S. Hayden, THERMOPHOTOVOLTAIC GENERATION OF ELECTRICITY: Fifth Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity (2002) AIP Conf. Proc. 653, pp. 49-58; doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.1539363>.
- [73] T. Aicher, P. Kästner, A. Gopinath, A. Gombert, A. W. Bett, T. Schlegel, C. Hebling, and J. Luther - THERMOPHOTOVOLTAICGENERATION OF ELECTRICITY: Sixth Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity: TPV6 (2004) AIP Conf. Proc. 738, pp.71-78; doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.1841881>.
- [74] G. Granata, F.Pagnanelli, E.Moscardini , T.Havlik, L.Toro , Recycling of photovoltaic panels by physical operations, Solar Energy Materials & SolarCells 123 (2014) 239–248.

- [75] Vasilis M. Fthenakis, End-of-life management and recycling of PV modules, Energy Policy 28 (2000) 1051 } 1058.
- [76] Takuya Doi, Izumi Tsuda, Hiroaki Unagida, Akinobu Murata, Koichi Sakuta, Kosuke Kurokawa, Experimental study on PV module recycling with organic solvent method, Solar Energy Materials & Solar Cells 67 (2001) 397 } 403.
- [77] Official Journal of the European Guideline (24/07/2012).
- [78] R.A. Sasala, J. Bohland, K. Smigielskic, Physical and Chemical Pathways for R.A. Sasala, J. Bohland, K. Smigielskic, Physical and Chemical Pathways for Solar Cells Inc., Toledo, OH, 43607, 1996
- [79] Anja Müller, Karsten Wambach and Erik Alsema, Life Cycle Analysis of Solar Module Recycling Process, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 895 © 2006 Materials Research Society.
- [80] <http://2011.solarteam.org/news/recycling-methods-for-used-photovoltaic-panels>.
- [81] Jun-Ki Choi, Vasilis Fthenakis, Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro-perspectives, Journal of Cleaner Production 66 (2014) 443e449.
- [82] Ewa Klugmann-Radziemska, Piotr Ostrowski, Kazimierz Drabczyk , Piotr Panek, Marek Szkodo, Experimental validation of crystalline silicon solar cells recycling by thermal and chemical methods, Solar Energy Materials & Solar Cells 94 (2010) 2275–2282.
- [83] Sukmin Kang, Sungyeol Yoo, Jina Lee, Bonghyun Boo, Hojin Ryu, Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules, Renewable Energy 47 (2012) 152e159.
- [84] <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/04/light-cycle-recycling-pv-materials>
- [85] Wolfgang Berger, Franz-Georg Simon, Karin Weimann, Erik A. Alsema, A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules, Resources, Conservation and Recycling 54 (2010) 711–718.
- [86] Max Marwede, Wolfgang Berger, Martin Schlummer, Andreas Mäurer, Armin Reller, Recycling paths for thin-film chalcogenide photovoltaic waste-Current feasible processes, Renewable Energy 55 (2013) 220e229.
- [87] APS. Energy critical materials: securing materials for emerging technologies, 2012.
- [88] Moss R, Tzimas E, Kara H, Willis P, Kooroshy J. Critical metals in strategic, energy technologies: assessing rare metals as supply-chain bottlenecks in, low-carbon energy technologies, 2011.
- [89] US DoE. Critical materials strategy, 2011.
- [90] Frisson, L., Lieten, K.; Bruton, T. et al., “Recent improvements in industrial PV module recycling” 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Glasgow, UK. 1-5 May 2000.
- [91] Berger W, Simon F-G, Weimann K, Alsema EA. A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules. Resources, Conservation and Recycling 2010;54:711e8.
- [92] Resolved, technical final report: LIFE04 ENV/D/000047, 2007.
- [93] Kushiya K, Ohshita M, Tanaka M. Development of recycling and reuse technologies for large-area Cu(InGa)Se/sub 2/-based thin-film modules. In: Kurokawa K. Proceedings of 3rd world conference on photovoltaic energy conversion, 2003. p. 1892e5.





- [94] Sander K, Schilling S, Reinschmidt J, Wambach K, Schlenker S, Müller A, et al. Study on the development of a take back and recovery system for photovoltaic products, 2007.
- [95] Huot J-Y. Recycling of solar thin film PV modules and scraps, and closed-loop use of metals; 2011. Freiberg, Germany.
- [96] Guarde D. Recycling and recovery. In: 21th European photovoltaic solar energy Conference, 07.09.2006
- [97] Goozner R, Long MO, Drinkard WF. Recycling of CdTe photovoltaic waste. Drinkard Metalox, Inc, 1999.
- [98] <http://www.renewableenergyfocus.com/view/3005/end-of-life-pv-then-what-recycling-solar-pv-panels/>
- [99] <http://www.solarworld.gr/>
- [100] <http://www.firstsolar.com/>
- [101] SENSE. Recycling of production waste, 2007.
- [102] William D. Cyrs, Heather J. Avens, Zachary A. Capshawb, Robert A. Kingsbury, Jennifer Sahmel, Brooke E. Tvermoes, Landfill waste and recycling: Use of a screening-level risk assessment tool for end-of-life cadmium telluride (CdTe) thin-film photovoltaic (PV) panels, Energy Policy 68(2014)524–533.
- [103] N.C. McDonald, J. M. Pearce, Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules, Energy Policy 38 (2010) 7041–7047.
- [104] Dr. Jean-Yves Huot, Recycling of Solar thin film PV modules and scraps, and closed loop use of metals, Innovation forum, Life-Cycle strategies and recycling of rare metals with strategic importance, 1-2 March, Freiberg, Germany.
- [105] <http://www.5nplus.com/index.php/en/>
- [106] <http://antekltd.en.ec21.com/>
- [107] Manuel Diequel Camp, Hanan (DE), Dieter Bonnet, Friedrichsdorf (DE), Rainer Gegenwart, Erfurt (DE), Jutta, Beier, Hofheim (DE), ANTEC Solar GmbH Amstadt (DE), US 6,572,782 B2, Jun. 3, 2003.
- [108] Patrick Taylor, Lakewood, CO(US), Makko De Filippo, Boston, MA (US), US 2012/0325676 A1, Dec. 27, 2012.
- [109] Wolfram Palitzsch and Ulrich Loser, Economic PV waste recycling solutions - results from R&D and practice, Loser Chemie GmbH, 08134 LangenweiBbach, BahnhofstraBe 10, Germany.
- [110] Yiannis Katsigiannis, Meletios Rentoumis, Anastasia Katsamaki, Alexandra Chatzikokolaki, Nikolaos Bilalis, Estimation of Quantities of Waste Materials for Photovoltaic Installations in Crete Island, The International Conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering-MAE 2014, June 07-08, 2014 at Rome, Italy.
- [111] [http://www.bnl.gov/pv/abs/abs\\_142.asp](http://www.bnl.gov/pv/abs/abs_142.asp)
- [112] <http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/Study%20on%20PVs%20Bio%20final.pdf>
- [113] <http://www.pvcycle.org/>
- [114] [http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/2014/06/Annual-Report\\_2013\\_LR.pdf](http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/2014/06/Annual-Report_2013_LR.pdf)
- [115] Σωτηρίου Ιωάννης, Μοντελοποίηση θερμικής καταπόνησης περιστροφικού πυρολυτικού κλιβάνου, πτυχιακή εργασία, Αιγάλεω 2012.
- [116] Αλεξίου Μάρκος, Αστικά απορρίματα – θερμοχημικές διεργασίες – στερεό καύσιμο, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009
- [117] <https://www.franklinmiller.com/white-papers/industrial-shredders/>

- [118] <http://www.jordanreductionsolutions.com/blog/what-is-a-granulator/>
- [119] [https://www.google.gr/search?tbm=pts&hl=fr&q=Screen+and+screen+element&gws\\_rd=cr&ei=98ecVYDmMofjU4uts-gL#hl=fr&q=vibrating+screen+panel&tbm=pts](https://www.google.gr/search?tbm=pts&hl=fr&q=Screen+and+screen+element&gws_rd=cr&ei=98ecVYDmMofjU4uts-gL#hl=fr&q=vibrating+screen+panel&tbm=pts)
- [120] <http://www.darbywiremesh.com/wire-mesh-glossary.html>
- [121] <http://www.engelsmann.de/en/products/screening-technology.html>
- [122] Ewa Klugmann-Radziemska. Piotr Ostrowski, Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules, Renewable Energy 35 (2010) 1751-1759.
- [123] Laughton, M. A.; Warne, D.F. (2002). *Electrical Engineer's Reference Book, 16th Ed.* Newnes. pp. 17–19. ISBN 0080523544.
- [124] Campbell, Flake C. (2013). *Metals Fabrication: Understanding the Basics.* ASM International. pp. 63–65. ISBN 162708018X.
- [125] Bauccio, Michael (1993). *ASM Metals Reference Book, 3rd Ed.* American Society for Metals. p. 50. ISBN 0871704781.
- [126] <http://www.abpinduction.com/de/info/ueber-abp/aktuelles/artikel/tiscotaiyuan-2-x-30-t-induction-furnace-system-with-24-mw-successfully-commissioned/>
- [127] <http://www.yhshuanglong.com/blog/2014/11/17/growth-of-conveyors-systems-materials-handling-in-the-industrial-and-food-sector/>
- [128] <http://daifukuna.com/>
- [129] <http://www.mhi.org/cicmhe/resources>
- [130] <http://www.cisco-eagle.com/catalog/c-1147-gravity-conveyors.aspx>





## 5. Παράρτημα

### 5.1 Bill of materials

Compute Date: Τρίτη, 2 Ιούνιος 2015 1:37:04 μμ

```
=====
=====
= Bill of Material: Recycling Site Draft Layout
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Area1	Area	Area
1	Facilities2	Area	Facilities
1	Hazard1	Area	Hazard
1	Hazard2	Area	Facilities
1	Hazard3	Area	Hazard
1	Facilities3	Area	Facilities
1	Facilities4	Area	Hazard
1	Storage Zone1	Area	Storage Zone
1	Area2	Area	Storage
1	Area3	Area	Work Cell
1	Facilities1	Area	Facilities
1	Silicon Wafers i	Area	Storage
1	Jeanne	Part	
1	Silicon Wafers	Area	Storage
1	Glass ii	Area	Storage
1	Storage (Al Framing,	Area	Storage
1	Concrete Base	Part	
1	PyrolysisPlantv3	Assembly	

1	Twin Shaft Shredder	Assembly	
1	Belt Conveyor.1	Assembly	
1	Impact Crusher	Assembly	
1	Conveyor.4	Assembly	
1	Cascade Inclined Scr	Assembly	
3	Furnace	Assembly	
1	AlBin	Part	
1	CablingBin	Part	
1	JBoxBin	Part	
1	GlassBin	Part	
1	SiliconBin	Part	
1	Chemical Baths	Assembly	
1	MetalContainer	Assembly	
4	Pallet and Panels	Assembly	
1	Belt Conveyor.2	Assembly	
1	Belt Conveyor.15	Assembly	
1	Belt Conveyor.13	Assembly	
1	Conveyor.4.13	Assembly	
1	SiliconBinB	Part	
1	WorkbenchesSubassemb	Assembly	
1	MetalContainer.1	Assembly	
1	PyrolysisSubAss	Assembly	
8	Pallet and Polycrysa	Assembly	
1	ReactorScrubberPipes	Part	
1	Storage1	Area	Storage
2	MetalContainer.2	Assembly	
2	Panels Stock	Assembly	



6	Cell	Assembly	
1	Thomas	Part	
1	Jean-Pierre	Part	
1	Paul	Part	
1	George	Part	
1	Thierry	Part	
1	Nicolas	Part	
1	Manuel	Part	
1	Alexandre	Part	
1	Matthew	Part	
1	Sean	Part	
1	Marion	Part	
1	Michel	Part	
1	Frank	Part	
3	Polycrystalline Rod	Part	
1	Molding Area	Area	Storage
2	MB-Actros+Container	Assembly	MB-Actros+Container
1	GC_CAT DP70	Assembly	GC_CAT DP70
1	GC_CAT DP70.15	Assembly	GC_CAT DP70
+-----+-----+-----+-----+			
-----+			

```

=====
=====
= Bill of Material: Areal
=
=====
=====

+-----+-----+-----+-----+
-----+
| Quantity | Part Number          | Type          | Nomenclature

```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle1	Assembly	Rectangle

```

=====
=====
= Bill of Material: Rectangle1
=
=====
=====

```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Copy (1) of Storage2	Area	Storage

```

=====
=====
= Bill of Material: Copy (1) of Storage2
=
=====
=====

```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle7	Part	Rectangle
1	Storage3	Area	Storage



```
=====
=====
= Bill of Material: Storage3
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle7.1	Part	Rectangle

```
=====
=====
= Bill of Material: Facilities2
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle4	Part	Rectangle

```
=====
=====
= Bill of Material: Hazard1
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
----------	-------------	------	--------------

1	Rectangle5	Part	Rectangle
-----+			
-----+			

```
=====
=====
= Bill of Material: Hazard2
=
=====
=====
```

-----+			
-----+			
Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
-----+			
-----+			
1	Rectangle6	Part	Rectangle
-----+			
-----+			

```
=====
=====
= Bill of Material: Hazard3
=
=====
=====
```

-----+			
-----+			
Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
-----+			
-----+			
1	Rectangle8	Part	Rectangle
-----+			
-----+			

```
=====
=====
= Bill of Material: Facilities3
=
```



=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle9	Part	Rectangle

=====

= Bill of Material: Facilities4

=

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle10	Part	Rectangle

=====

= Bill of Material: Storage Zone1

=

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle11	Part	Rectangle



```
=====
=====
= Bill of Material: Area2
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle2	Part	Rectangle

```
=====
=====
= Bill of Material: Area3
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle3	Part	Rectangle

```
=====
=====
= Bill of Material: Facilities1
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
----------	-------------	------	--------------



Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle3.3	Part	Rectangle

=====

=====

= Bill of Material: Silicon Wafers i

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle6.4	Part	Rectangle

=====

=====

= Bill of Material: Silicon Wafers

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle6.4.3	Part	Rectangle

=====

=====

= Bill of Material: Glass ii

=

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle7.5.2	Part	Rectangle

=====

= Bill of Material: Storage (Al Framing, Cabling, J. Boxes)

=

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle12	Part	Rectangle

=====

= Bill of Material: PyrolysisPlantv3

=

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
----------	-------------	------	--------------



1	Reactor	Assembly
-----+	-----+	-----+
-----+		

```
=====
=====
= Bill of Material: Reactor
=
=====
=====
```

-----+	-----+	-----+	-----+
-----+			
Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
-----+	-----+	-----+	-----+
-----+			
1	ReactorsMainBody	Part	
1	ReactorsDoor	Part	
1	InsulationCylinder	Part	
1	ScrewShaft	Part	
1	InsideChamber	Part	
1	HeatPipes	Part	
1	ReactorsLastChamber	Part	
1	ReactorBase	Part	
1	Door	Part	
-----+	-----+	-----+	-----+
-----+			

```
=====
=====
= Bill of Material: Twin Shaft Shredder
=
=====
=====
```

-----+	-----+	-----+	-----+
-----+			
Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
-----+	-----+	-----+	-----+

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	HopperBase	Part	
2	Supports.9	Assembly	
2	AXIS	Assembly	
1	Shredder Import	Part	
1	Hopper	Part	
4	Lock	Part	
1	Pulley 2	Part	
2	Belt	Part	
1	Motor1 Assembly.1	Assembly	
1	HopperSlide	Part	
1	TrasmissionGear2	Part	
1	TrasmissionGear1	Part	

=====

=====

= Bill of Material: Supports.9

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Support	Part	
4	Roulement	Part	



```
=====
=====
= Bill of Material: AXIS
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	SHAFT 1	Part	
1	Blades+body	Assembly	

```
=====
=====
= Bill of Material: Blades+body
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Blade's Body	Part	
30	Blade	Part	

```
=====
=====
= Bill of Material: Motor1 Assembly.1
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
----------	-------------	------	--------------

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Motor 1.1.8	Part	
1	Shaft.2	Part	
1	Pulley 1	Part	

=====

=====

= Bill of Material: Belt Conveyor.1

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Side panels	Part	
1	Center	Part	
3	Axis of the Shieve	Part	
1	Clip	Part	
1	Belt for the conveyo	Part	
11	Lower	Part	
11	Upper	Part	
1	Symmetry of Side pan	Part	
1	Symmetry of Clip	Part	
1	Leg for the conveyor	Part	
1	Motor BOX	Assembly	
1	Symmetry of Leg for	Part	





```
+-----+-----+-----+-----+
-----+
```

```
=====
=====
= Bill of Material: Motor BOX
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Motor 1.1	Part	

```
=====
=====
= Bill of Material: Impact Crusher
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	CrusherBase	Part	
1	Cover bot	Part	
2	Knife2	Part	
1	Upper.1	Part	
1	Support of the grate	Part	
1	Symmetry of Support	Part	
1	Axis and blades for	Assembly	
1	Grater	Part	

1	Motor1 Assembly.2	Assembly	
3	Belt.4	Part	
1	Shredder Import.5.9.	Part	
1	ImpactCrusherHopper.	Part	
-----+-----+-----+-----			
-----+			

=====

=====

= Bill of Material: Axis and blades for the Grater

=

=====

=====

+-----+-----+-----+-----			
-----+			
Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
+-----+-----+-----+-----			
-----+			
1	Impact Axis	Part	
3	Knifel	Part	
+-----+-----+-----+-----			
-----+			

=====

=====

= Bill of Material: Motor1 Assembly.2

=

=====

=====

+-----+-----+-----+-----			
-----+			
Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
+-----+-----+-----+-----			
-----+			
1	Motor 1.2	Part	
1	Shaft.3	Part	
+-----+-----+-----+-----			



1	Pulley 1.3.1	Part	
-----+			
-----+			

=====

=====

= Bill of Material: Conveyor.4

=

=====

=====

-----+			
-----+			
Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
-----+			
1	Horizontal C	Part	
1	Center.1	Part	
1	Horizontal C.1	Part	
5	LEG L	Assembly	
5	LEG R.18	Assembly	
15	Raoulo F	Assembly	
5	Bbars	Assembly	
15	Shell	Part	
1	Horizontal Lower	Part	
1	Symmetry of Horizont	Part	
-----+			
-----+			

=====

=====

= Bill of Material: LEG L

=

=====

=====

-----+			
-----+			

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Horizontal Frog Leg	Part	
1	Vertical Leg	Part	

=====

=====

= Bill of Material: LEG R.18

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Horizontal Frog Leg	Part	
1	Vertical Leg	Part	

=====

=====

= Bill of Material: Raoulo F

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Raoulo	Part	
4	Roulement.2	Part	



```
+-----+-----+-----+-----+
-----+
```

```
=====
=====
= Bill of Material: Bbars
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
2	Bars	Assembly	

```
=====
=====
= Bill of Material: Bars
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Horizontals	Part	

```
=====
=====
= Bill of Material: Cascade Inclined Screens
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Side panels.1	Part	
1	Vibrating Mechanism	Assembly	
1	Screen 3	Part	
1	Base Frame	Part	
8	Springs	Part	
1	Symmetry of Base Fra	Part	
1	Motor Base	Part	
1	Cap	Part	
1	Motor1 Assembly.3	Assembly	
2	Belt.6	Part	
1	CascadeBase	Part	
1	Screen2ndLevel	Part	
1	Screen1stLevel	Part	
1	StairsCascade	Part	
1	CascadeHopper	Part	

```

=====
=====
= Bill of Material: Vibrating Mechanism
=
=====
=====

```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
----------	-------------	------	--------------



Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Axis for VM	Part	
1	Stroke for the VM	Part	
1	Symmetry of Stroke f	Part	
3	Roulement.2.7	Part	
1	Support for the VM	Part	
1	Pulley 1.1	Part	
1	Symmetry of Support	Part	
1	Shell for VM	Part	

=====

=====

= Bill of Material: Motor1 Assembly.3

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Motor 1.3	Part	
1	Shaft.4	Part	
1	Pulley 1.5	Part	

=====

=====

= Bill of Material: Furnace

=

=====

=====



Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	FurnaceBase	Part	
1	BodyAss	Assembly	
2	HydraulicPiston	Part	
2	UpperPiston	Part	
1	FurnaceCap	Part	
1	Spout	Part	
1	MeltingChamber	Part	
1	Coil	Part	

```

=====
=====
= Bill of Material: BodyAss
=
=====
=====

```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	MainBody	Part	
1	Holding	Part	

```

=====
=====

```



= Bill of Material: Chemical Baths

=

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	StairsPlatform	Assembly	
2	Tank	Part	
1	PippingSystem	Part	
1	Symmetry of StairsPl	Assembly	
1	Symmetry of Tank	Part	
1	Symmetry of PippingS	Part	
1	Tank2	Part	
1	BathBase	Part	
4	LiquidWasteTank	Assembly	
1	PipesConnection	Part	
1	Symmetry of PipesCon	Part	

=====

= Bill of Material: StairsPlatform

=

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Stairs	Part	
1	Platform.6	Part	

```
+-----+-----+-----+-----+
-----+
```

```
=====
=====
= Bill of Material: Symmetry of StairsPlatform
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Symmetry of Stairs	Part	
1	Symmetry of Platform	Part	

```
=====
=====
= Bill of Material: LiquidWasteTank
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	WasteTank	Part	
1	SupportBase.7	Part	
1	Cage	Part	
1	Kapaki	Part	



```
=====
=====
= Bill of Material: MetalContainer
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	MainBody.1	Part	
1	UpperDoor	Part	
1	Door.2	Part	

```
=====
=====
= Bill of Material: Pallet and Panels
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
2	Pallet	Part	
61	Cell	Assembly	

```
=====
=====
= Bill of Material: Cell
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	FA	Assembly	
1	Product1	Assembly	
1	Part5	Part	
1	Part8	Part	

=====

=====

= Bill of Material: FA

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
2	Part1	Part	
2	Part2	Part	

=====

=====

= Bill of Material: Product1

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
----------	-------------	------	--------------



Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Part6	Part	
60	Part7	Part	
2	Part3	Part	
1	Product2	Assembly	

=====

=====

= Bill of Material: Product2

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
6	Part9	Part	

=====

=====

= Bill of Material: Belt Conveyor.2

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Side panels.1.16	Part	
1	Center.2	Part	

3	Axis of the Shieve.	3	Part
1	Clip.	4	Part
1	Belt for the conveyo		Part
11	Lower.	6	Part
11	Upper.	7	Part
1	Symmetry of Side pan		Part
1	Symmetry of Clip.	10	Part
1	Leg for the conveyor		Part
1	Motor BOX.	1	Assembly
1	Symmetry of Leg for		Part

```
=====
=====
= Bill of Material: Motor BOX.1
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Motor 1.1.12	Part	

```
=====
=====
= Bill of Material: Belt Conveyor.15
=
=====
=====
```





Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Side panels.1.14	Part	
1	Center.2.15	Part	
3	Axis of the Shieve.3	Part	
1	Clip.4.17	Part	
1	Belt for the conveyo	Part	
11	Lower.6.19	Part	
11	Upper.7.20	Part	
1	Symmetry of Side pan	Part	
1	Symmetry of Clip.8	Part	
1	Leg for the conveyor	Part	
1	Motor BOX.14	Assembly	
1	Symmetry of Leg for	Part	

=====

=====

= Bill of Material: Motor BOX.14

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Motor 1.1.10	Part	

```
=====
=====
= Bill of Material: Belt Conveyor.13
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Side panels.2	Part	
1	Center.3	Part	
3	Axis of the Shieve.4	Part	
1	Clip.5	Part	
1	Belt for the conveyo	Part	
11	Lower.7	Part	
11	Upper.8	Part	
1	Symmetry of Side pan	Part	
1	Symmetry of Clip.9	Part	
1	Leg for the conveyor	Part	
1	Motor BOX.12	Assembly	
1	Symmetry of Leg for	Part	

```
=====
=====
= Bill of Material: Motor BOX.12
=
=====
=====
```

```
+-----+-----+-----+-----+
+-----+
```



Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Motor 1.1.11	Part	

=====

=====

= Bill of Material: Conveyor.4.13

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Horizontal C.2	Part	
1	Center.1.3	Part	
1	Horizontal C.1.4	Part	
5	LEG L.14	Assembly	
5	LEG R.17	Assembly	
15	Raoulo F.19	Assembly	
5	Bbars.16	Assembly	
15	Shell.9	Part	
1	Horizontal Lower.10	Part	
1	Symmetry of Horizont	Part	

=====

=====

= Bill of Material: LEG L.14

=

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Horizontal Frog Leg.	Part	
1	Vertical Leg.5	Part	

=====

= Bill of Material: LEG R.17

=

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Horizontal Frog Leg.	Part	
1	Vertical Leg.5	Part	

=====

= Bill of Material: Raoulo F.19

=

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
----------	-------------	------	--------------



Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Raoulo.6	Part	
4	Roulement.2.7.12	Part	

=====

=====

= Bill of Material: Bbars.16

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
2	Bars.15	Assembly	

=====

=====

= Bill of Material: Bars.15

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Horizontals.8	Part	

=====

=====

= Bill of Material: WorkbenchesSubassembly

=

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	WorkbenchConBase	Part	
3	Workbench	Assembly	

=====

= Bill of Material: Workbench

=

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	MainDesk	Part	
1	Cabinet	Part	
3	Pegboard(Holes)	Part	
1	Vise	Assembly	
1	Pegboard(Hooks)	Part	
3	Lamp	Part	
3	LampLight	Part	



```
=====
=====
= Bill of Material: Vise
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	ViseBase	Part	
1	Jaw	Part	
1	JawHolder	Part	
1	JawShaft	Part	
1	JawShaftDriver	Part	

```
=====
=====
= Bill of Material: MetalContainer.1
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	MainBody.1.2	Part	
1	Door.2.4	Part	

```
=====
=====
= Bill of Material: PyrolysisSubAss
=
```

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	PyrolysisPlantv2	Assembly	
1	PyrolysisPlant	Assembly	
1	v2v1Pipe	Part	
1	CornerPipe	Part	

=====

= Bill of Material: PyrolysisPlantv2

=

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Chimney	Assembly	
1	CentrifugalFan	Assembly	
1	Chimney-BlowerPipe	Part	

=====

= Bill of Material: Chimney

=

=====





Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	ChimneyBase	Part	
1	3-WayPart	Part	
4	ChimneyMainPart	Part	
1	ChimneyRainCap	Part	
1	SafetyLadder	Part	

=====

=====

= Bill of Material: CentrifugalFan

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	AirBlowerMainBody	Part	
1	BlowerFan	Part	
1	BlowerBase	Part	
1	Motor1 Assembly	Assembly	
2	SupportAss	Assembly	

=====

=====

= Bill of Material: Motor1 Assembly

=

```
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Motor 1	Part	
1	Shaft	Part	

```
=====
=====
= Bill of Material: SupportAss
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	SupportBase	Part	
1	SupportCap	Part	
1	Roulement.1	Part	

```
=====
=====
= Bill of Material: PyrolysisPlant
=
=====
=====
```

```
+-----+-----+-----+-----+
+-----+
```



Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
2	ScrubberAsse,bly	Assembly	
2	Cyclone	Assembly	
1	AfterBrunAssembly	Assembly	
1	Platform	Part	
1	WetSrubbersPipe	Part	
1	BlowerScrubberPipe	Part	
1	ABPipe	Part	
1	CycloneABPipe	Part	
1	CycloneScrubberPipe	Part	
2	MiddleScrubberCyclon	Part	
1	ScrubberScrubberPipe	Part	
1	CycloneCyclonePipe	Part	
1	CycloneCyclonePipev2	Part	

=====

=====

= Bill of Material: ScrubberAsse,bly

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	ScrubberBodyUpper	Part	
1	ScrubberBodyLower	Part	
2	ScrubberCap	Part	

1	SprayNozzles	Part	
1	PlatesAssembly	Assembly	
1	GasPipe	Part	
+-----+-----+-----+-----			
-----+			

```
=====
=====
= Bill of Material: PlatesAssembly
=
=====
=====
```

+-----+-----+-----+-----			
-----+			
Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
+-----+-----+-----+-----			
-----+			
4	PerfroratedPlate	Part	
12	PlateBar(Smaller)	Part	
6	PlateBar(Longer)	Part	
1	InternalPlateBar	Part	
+-----+-----+-----+-----			
-----+			

```
=====
=====
= Bill of Material: Cyclone
=
=====
=====
```

+-----+-----+-----+-----			
-----+			
Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
+-----+-----+-----+-----			
-----+			
1	CycloneBase	Part	
+-----+-----+-----+-----			



1	CycloneBody	Part	
1	CycloneStorareTank	Part	
+-----+-----+-----+-----+			
-----+			

```

=====
=====
= Bill of Material: AfterBrunAssembly
=
=====
=====

```

+-----+-----+-----+-----+			
-----+			
Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
+-----+-----+-----+-----+			
-----+			
1	AfterburnChamber	Part	
1	ABInsulation	Part	
1	InnerChamber	Part	
1	BurnerAssembly	Assembly	
+-----+-----+-----+-----+			
-----+			

```

=====
=====
= Bill of Material: BurnerAssembly
=
=====
=====

```

+-----+-----+-----+-----+			
-----+			
Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
+-----+-----+-----+-----+			
-----+			
1	MainBodyBurner	Part	
1	CombustionAirBlower	Part	
1	Connection	Part	

1	MotorStand	Part	
1	BurnerFan	Part	
1	BurnerHead	Part	
+-----+-----+-----+-----+			
-----+			

```
=====
=====
= Bill of Material: Pallet and Polycrystalline Si Rods
=
=====
=====
```

+-----+-----+-----+-----+			
-----+			
Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
+-----+-----+-----+-----+			
-----+			
1	Pallet	Part	
21	Polycrystalline Rod.	Part	
+-----+-----+-----+-----+			
-----+			

```
=====
=====
= Bill of Material: Storage1
=
=====
=====
```

+-----+-----+-----+-----+			
-----+			
Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
+-----+-----+-----+-----+			
-----+			
1	Rectangle13	Part	Rectangle
+-----+-----+-----+-----+			
-----+			



```
=====
=====
= Bill of Material: MetalContainer.2
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	MainBody.1.3	Part	
1	Door.2.1	Part	

```
=====
=====
= Bill of Material: Panels Stock
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
8	Cell	Assembly	

```
=====
=====
= Bill of Material: Molding Area
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
----------	-------------	------	--------------

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	Rectangle14	Part	Rectangle

=====

=====

= Bill of Material: MB-Actros+Container

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	00203534-_-001_Stand	Assembly	00203534-_-001_Stan
1	MB-Actros-3a_Standar	Part	MB-Actros-3a_Standar
1	3a-Anhanger-ISO-Cont	Part	3a-Anhanger-ISO-Con

=====

=====

= Bill of Material: 00203534-\_-001\_Standard

=

=====

=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
2	00230534-_-003_Stand	Part	00230534-_-003_Stan
1	00203534-_-002_Stand	Part	00203534-_-002_Stan





+-----+-----+-----+-----+  
-----+

=====  
=====  
= Bill of Material: GC\_CAT DP70  
=  
=====  
=====

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	GC_Body	Part	GC_Body
4	GC_Front wheel	Assembly	GC_Front
1	GC_Rear wheel hub	Part	GC_Rear wheel
1	GC_Rear wheel hub_Mi	Part	GC_Rear wheel
1	GC_Stearing rod	Part	GC_Stearing
2	GC_Link lever	Part	GC_Link lever
2	GC_Rear wheel	Assembly	GC_Rear wheel
1	GC_Mast LS	Part	GC_Mast LS
2	GC_Barrel	Part	GC_Barrel
2	GC_Rod	Part	GC_Rod
1	GC_Mast US	Part	GC_Mast US
1	GC_Forks support fra	Part	GC_Forks
2	GC_Fork	Part	GC_Fork
1	GC_Seat	Part	GC_Seat
1	GC_Stearing wheel	Part	GC_Stearing
1	GC_Air filter	Part	GC_Air filter
2	GC_Rear light	Part	GC_Rear light
2	GC_Front light	Part	GC_Front

2	GC_Front light orang	Part	GC_Front
light oran			
-----	-----	-----	-----
-----			

```
=====
=====
= Bill of Material: GC_Front wheel
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	GC_Forklift Tire 8.2	Part	GC_Forklift
Tire 8.			
1	GC_Front rim	Part	GC_Front rim
-----	-----	-----	-----
-----			

```
=====
=====
= Bill of Material: GC_Rear wheel
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	GC_Rear rim	Part	GC_Rear rim
1	GC_Forklift Tire 8.2	Part	GC_Forklift
Tire 8.			
-----	-----	-----	-----
-----			



```
=====
=====
= Bill of Material: GC_CAT DP70.15
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	GC_Body.16	Part	GC_Body
4	GC_Front wheel	Assembly	GC_Front
1	GC_Rear wheel hub.9	Part	GC_Rear wheel
1	GC_Rear wheel hub_Mi	Part	GC_Rear wheel
1	GC_Stearing rod.20	Part	GC_Stearing
2	GC_Link lever.3	Part	GC_Link lever
2	GC_Rear wheel	Assembly	GC_Rear wheel
1	GC_Mast LS.4	Part	GC_Mast LS
2	GC_Barrel.8	Part	GC_Barrel
2	GC_Rod.17	Part	GC_Rod
1	GC_Mast US.11	Part	GC_Mast US
1	GC_Forks support fra	Part	GC_Forks
2	GC_Fork.21	Part	GC_Fork
1	GC_Seat.14	Part	GC_Seat
1	GC_Stearing wheel.18	Part	GC_Stearing
1	GC_Air filter.2	Part	GC_Air filter
2	GC_Rear light.12	Part	GC_Rear light
2	GC_Front light.5	Part	GC_Front
2	GC_Front light orang	Part	GC_Front

```
=====
=====
= Bill of Material: GC_Front wheel
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	GC_Forklift Tire 8.2	Part	GC_Forklift Tire 8.
1	GC_Front rim.1	Part	GC_Front rim

```
=====
=====
= Bill of Material: GC_Rear wheel
=
=====
=====
```

Quantity	Part Number	Type	Nomenclature
1	GC_Rear rim.10	Part	GC_Rear rim
1	GC_Forklift Tire 8.2	Part	GC_Forklift Tire 8.

```
=====
= Recapitulation of: Recycling Site
= Different parts: 321
= Total parts: 21027
=====
```

```
+-----+-----+
```



Quantity	Part Number
1	Rectangle7
1	Rectangle7.1
1	Rectangle4
1	Rectangle5
1	Rectangle6
1	Rectangle8
1	Rectangle9
1	Rectangle10
1	Rectangle11
1	Rectangle2
1	Rectangle3
1	Rectangle3.3
1	Rectangle6.4
1	Jeanne
1	Rectangle6.4.3
1	Rectangle7.5.2
1	Rectangle12
1	Concrete Base
1	ReactorsMainBody
1	ReactorsDoor
1	InsulationCylinder
1	ScrewShaft
1	InsideChamber
1	HeatPipes
1	ReactorsLastChamber
1	ReactorBase
1	Door
1	HopperBase
2	Support
8	Roulement
2	SHAFT 1
2	Blade's Body
60	Blade
1	Shredder Import
1	Hopper
4	Lock
1	Pulley 2
2	Belt
1	Motor 1.1.8
1	Shaft.2
1	Pulley 1
1	HopperSlide
1	TrasmissionGear2
1	TrasmissionGear1
1	Side panels
1	Center
3	Axis of the Shieve
1	Clip
1	Belt for the conveyo
11	Lower
11	Upper
1	Symmetry of Side pan
1	Symmetry of Clip
1	Leg for the conveyo

1	Motor 1.1
1	Symmetry of Leg for
1	CrusherBase
1	Cover bot
2	Knife2
1	Upper.1
1	Support of the grate
1	Symmetry of Support
1	Impact Axis
3	Knifel
1	Grater
1	Motor 1.2
1	Shaft.3
1	Pulley 1.3.1
3	Belt.4
1	Shredder Import.5.9.
1	ImpactCrusherHopper.
1	Horizontal C
1	Center.1
1	Horizontal C.1
10	Horizontal Frog Leg
10	Vertical Leg
15	Raoulo
60	Roulement.2
10	Horizontals
15	Shell
1	Horizontal Lower
1	Symmetry of Horizont
1	Side panels.1
1	Axis for VM
1	Stroke for the VM
1	Symmetry of Stroke f
3	Roulement.2.7
1	Support for the VM
1	Pulley 1.1
1	Symmetry of Support
1	Shell for VM
1	Screen 3
1	Base Frame
8	Springs
1	Symmetry of Base Fra
1	Motor Base
1	Cap
1	Motor 1.3
1	Shaft.4
1	Pulley 1.5
2	Belt.6
1	CascadeBase
1	Screen2ndLevel
1	Screen1stLevel
1	StairsCascade
1	CascadeHopper
3	FurnaceBase
3	MainBody



3	Holding
6	HydraulicPiston
6	UpperPiston
3	FurnaceCap
3	Spout
3	MeltingChamber
3	Coil
1	AlBin
1	CablingBin
1	JBoxBin
1	GlassBin
1	SiliconBin
1	Stairs
1	Platform.6
2	Tank
1	PippingSystem
1	Symmetry of Stairs
1	Symmetry of Platform
1	Symmetry of Tank
1	Symmetry of PippingsS
1	Tank2
1	BathBase
4	WasteTank
4	SupportBase.7
4	Cage
4	Kapaki
1	PipesConnection
1	Symmetry of PipesCon
1	MainBody.1
1	UpperDoor
1	Door.2
16	Pallet
532	Part1
532	Part2
266	Part6
15960	Part7
532	Part3
1596	Part9
266	Part5
266	Part8
1	Side panels.1.16
1	Center.2
3	Axis of the Shieve.3
1	Clip.4
1	Belt for the conveyo
11	Lower.6
11	Upper.7
1	Symmetry of Side pan
1	Symmetry of Clip.10
1	Leg for the conveyo
1	Motor 1.1.12
1	Symmetry of Leg for
1	Side panels.1.14
1	Center.2.15
3	Axis of the Shieve.3
1	Clip.4.17

1	Belt for the conveyo
11	Lower.6.19
11	Upper.7.20
1	Symmetry of Side pan
1	Symmetry of Clip.8
1	Leg for the conveyor
1	Motor 1.1.10
1	Symmetry of Leg for
1	Side panels.2
1	Center.3
3	Axis of the Shieve.4
1	Clip.5
1	Belt for the conveyo
11	Lower.7
11	Upper.8
1	Symmetry of Side pan
1	Symmetry of Clip.9
1	Leg for the conveyor
1	Motor 1.1.11
1	Symmetry of Leg for
1	Horizontal C.2
1	Center.1.3
1	Horizontal C.1.4
10	Horizontal Frog Leg.
10	Vertical Leg.5
15	Raoulo.6
60	Roulement.2.7.12
10	Horizontals.8
15	Shell.9
1	Horizontal Lower.10
1	Symmetry of Horizont
1	SiliconBinB
1	WorkbenchConBase
3	MainDesk
3	Cabinet
9	Pegboard(Holes)
3	ViseBase
3	Jaw
3	JawHolder
3	JawShaft
3	JawShaftDriver
3	Pegboard(Hooks)
9	Lamp
9	LampLight
1	MainBody.1.2
1	Door.2.4
1	ChimneyBase
1	3-WayPart
4	ChimneyMainPart
1	ChimneyRainCap
1	SafetyLadder
1	AirBlowerMainBody
1	BlowerFan
1	BlowerBase





1	Motor 1
1	Shaft
2	SupportBase
2	SupportCap
2	Roulement.1
1	Chimney-BlowerPipe
2	ScrubberBodyUpper
2	ScrubberBodyLower
4	ScrubberCap
2	SprayNozzles
8	PerforatedPlate
24	PlateBar (Smaller)
12	PlateBar (Longer)
2	InternalPlateBar
2	GasPipe
2	CycloneBase
2	CycloneBody
2	CycloneStorageTank
1	AfterburnChamber
1	ABInsulation
1	InnerChamber
1	MainBodyBurner
1	CombustionAirBlower
1	Connection
1	MotorStand
1	BurnerFan
1	BurnerHead
1	Platform
1	WetScrubbersPipe
1	BlowerScrubberPipe
1	ABPipe
1	CycloneABPipe
1	CycloneScrubberPipe
2	MiddleScrubberCyclon
1	ScrubberScrubberPipe
1	CycloneCyclonePipe
1	CycloneCyclonePipev2
1	v2v1Pipe
1	CornerPipe
168	Polycrystalline Rod.
1	ReactorScrubberPipes
1	Rectangle13
2	MainBody.1.3
2	Door.2.1
1	Thomas
1	Jean-Pierre
1	Paul
1	George
1	Thierry
1	Nicolas
1	Manuel
1	Alexandre
1	Matthew
1	Sean
1	Marion
1	Michel

1	Frank
3	Polycrystalline Rod
1	Rectangle14
4	00230534--003_Stand
2	00203534--002_Stand
2	MB-Actros-3a_Standar
2	3a-Anhanger-ISO-Cont
1	GC_Body
6	GC_Forklift Tire 8.2
4	GC_Front rim
1	GC_Rear wheel hub
1	GC_Rear wheel hub_Mi
1	GC_Steering rod
2	GC_Link lever
2	GC_Rear rim
1	GC_Mast LS
2	GC_Barrel
2	GC_Rod
1	GC_Mast US
1	GC_Forks support fra
2	GC_Fork
1	GC_Seat
1	GC_Steering wheel
1	GC_Air filter
2	GC_Rear light
2	GC_Front light
2	GC_Front light orang
1	GC_Body.16
6	GC_Forklift Tire 8.2
4	GC_Front rim.1
1	GC_Rear wheel hub.9
1	GC_Rear wheel hub_Mi
1	GC_Steering rod.20
2	GC_Link lever.3
2	GC_Rear rim.10
1	GC_Mast LS.4
2	GC_Barrel.8
2	GC_Rod.17
1	GC_Mast US.11
1	GC_Forks support fra
2	GC_Fork.21
1	GC_Seat.14
1	GC_Steering wheel.18
1	GC_Air filter.2
2	GC_Rear light.12
2	GC_Front light.5
2	GC_Front light orang

## 5.2 Η Jeanne



ο αφεντικό του εργοστασίου. Ο απόλυτος μονάρχης της βιομηχανίας. Πάνω από το δικό της νόμο, μόνο ο νόμος της φύσης. Όλα κύλησαν ρολόι υπό τις οδηγίες της. Η Jeanne έχει χρόνια στο χώρο της βιομηχανίας με πολλά αστέρια στο πέτο της. Το παρατσούκλι της είναι και μωβ μέλισσα χωρίς αυτό να σημαίνει πως δεν ακούει και σε άλλα κοσμητικά, όπως υπέρτατος αφέντης, αμείλικτος τύραννος και μεγάλος Σάουρον.

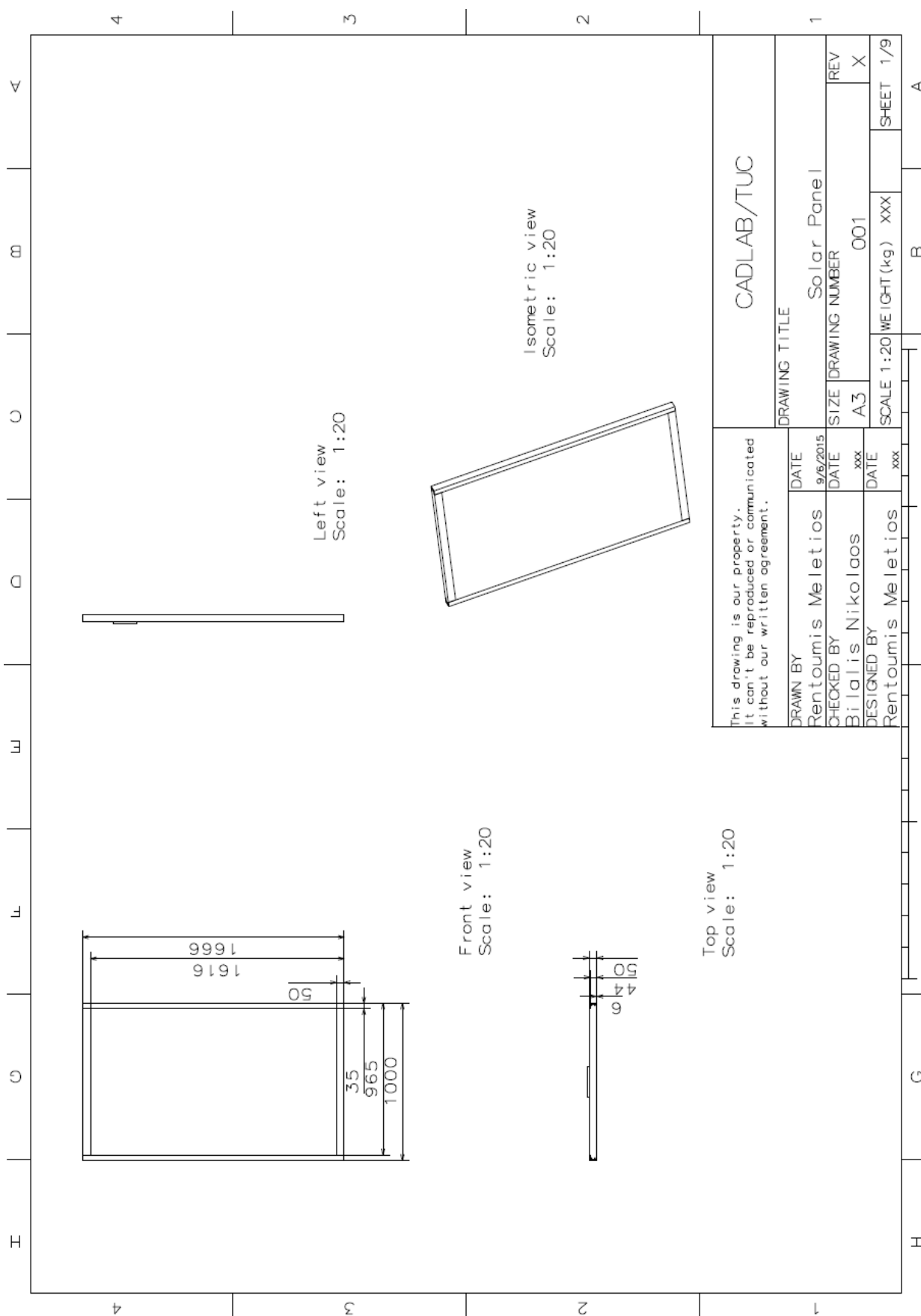
Τα χρονικά περιθώρια που μας δόθηκαν ήταν μικρά, η υπομονή της Jeanne όμως...ήταν ακόμα μικρότερη. Αποδώσαμε! Εμπρός γκρεμός και πίσω ρέμα βλέπεις...Το πείπερ έπρεπε να βγει δύο μήνες νωρίτερα από ότι είχαμε υπολογίσει.

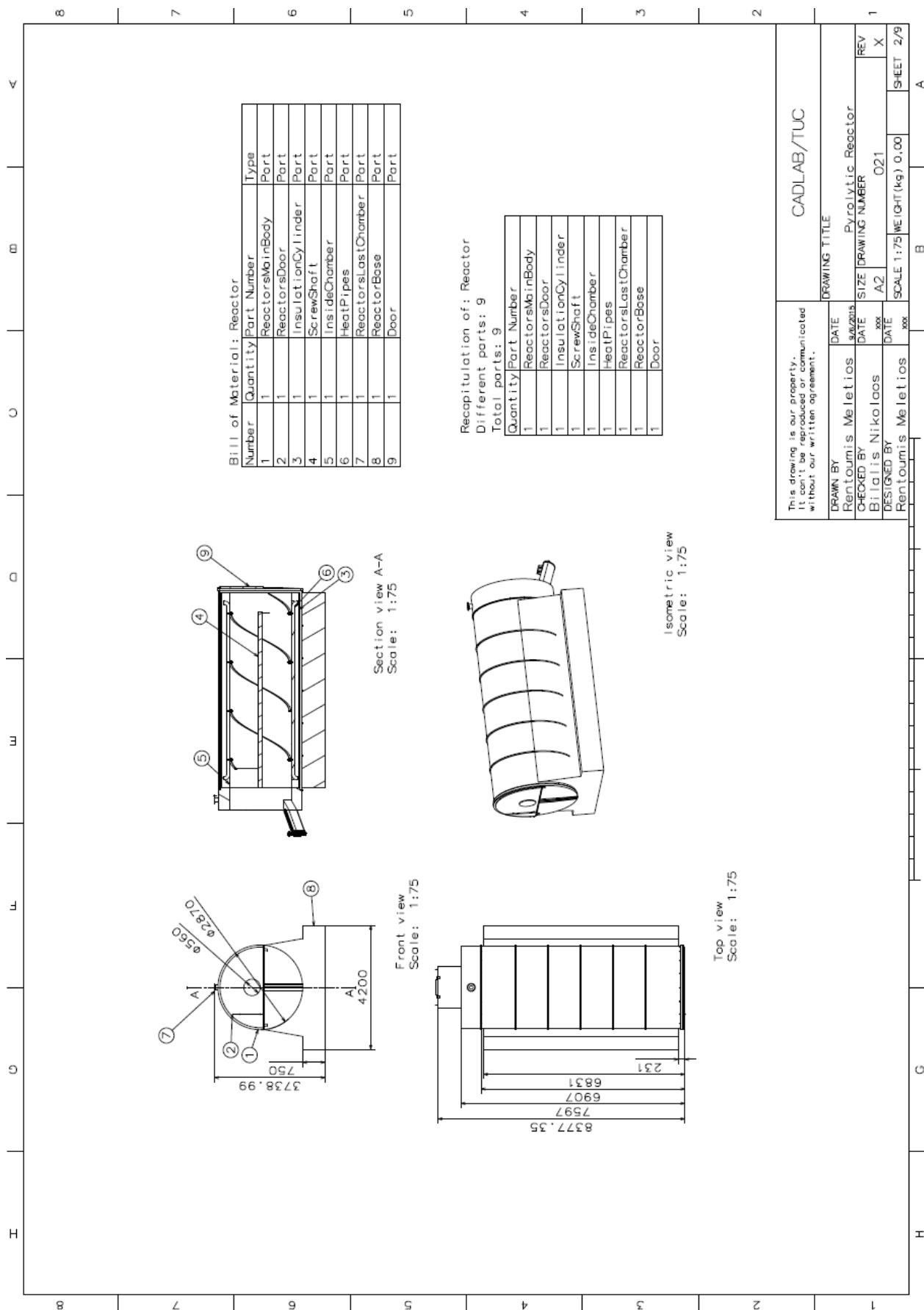
Τα σκοτεινά βράδια του χειμώνα ήταν τρομαχτικά, ειδικά όταν ερχόταν στα όνειρα της ομάδας, στοιχειώνοντάς τα, αφήνοντας πληγές που δεν έχουν επουλωθεί ούτε μέχρι σήμερα, δύο μήνες μετά την ολοκλήρωση του εγχειρήματος. Οι στόχοι και τα χρονοδιαγράμματα διαδέχονταν το ένα το άλλο δημιουργώντας ένα ασφυχτικό κλίμα στο περιβάλλον εργασίας (τουλάχιστον κερνούσε κανέναν ελληνικό που και που, αφού τον έκανε και καλά).

Κάποιοι θα είχαν λυγίσει, κάποιοι θα είχαν παρατήσει τα ποντίκια και πληκτρολόγια τους πίσω σε μια απέλπιδα προσπάθεια να κρυφτούν. Αποφασίσαμε όμως να δουλέψουμε και να ξενυχτίσουμε. Τα ωράρια δεν υπήρχαν. Ένα άπιαστο όνειρο που η Jeanne μας βοήθησε να ξεχάσουμε ή τουλάχιστον να μας πείσει με τον τρόπο της πως δεν υπήρχε περίπτωση να ζήσουμε όσο θα ήταν πάνω από το κεφάλι μας νιώθοντας την ανάσα της στο σβέρκο μας.

Νικήσαμε.

## 5.3 Μηχανολογικά Σχέδια





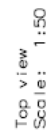
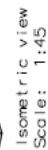
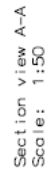
Recapitulation of: Twin  
Shaft Shredder  
Different parts: 17  
Total parts: 90

Bill of Material: Supports.9		
Number	Quantity	Type
10	1	Support
11	4	Roulement

Bill of Material: AXIS			
Number	Quantity	Part Number	Type
12	1	SHAFT 1	Part
	1	Blades+body	Assembly

Bill of Material: Blades+body		
Number	Quantity	Part Number
13	1	Blade's Body
14	30	Blade

Bill of Material: Motor Assembly.1		
Number	Quantity	Part Number
15	1	Motor 1.1.8
16	1	Shaft.2
17	1	Pulley 1



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.	CADLAB/TUC				
	DRAWING TITLE				
	DRAWN BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER	REV
	Rentoimismis Meletios	9/9/2015	A2	058	X
CHECKED BY	DATE	SCALE	1:50	WEIGHT (kg)	SHEET
Bilalis Nikolaos	2006	1:50	30	3/9	
DESIGNED BY	DATE				
Rentoimismis Meletios	2006				

