



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*«Μελέτη τεχνολογιών διάθεσης  
χρησιμοποιημένων ελαστικών»*

**Της Φοιτήτριας**

**Βορόζεβα Ναταλία**

**Επιβλέπων**

**Καρέλλας Σωτήριος, Επίκουρος Καθηγητής,  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η βιομηχανική ανάπτυξη των δυτικών χωρών, παρά τον σημαντικό της ρόλο στην εξέλιξη της τεχνολογίας, προκάλεσε ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα της σύγχρονης εποχής, τον αυξημένο αριθμός απορριμμάτων και κατά συνέπεια την μόλυνση του περιβάλλοντος. Τα τελευταία είκοσι χρόνια γίνεται μια σημαντική προσπάθεια σε παγκόσμια κλίμακα στην αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων.

Παγκοσμίως κάθε χρόνο περίπου ένα δισεκατομμύριο ελαστικά από οχήματα κάθε είδους φτάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση ο αριθμός αυτός φτάνει τα 250 εκατομμύρια. Περίπου 10.000 τόνοι ελαστικών έρχονται στην Ελλάδα με εισαγόμενα αυτοκίνητα και αποτελούν το 20% του συνολικού ποσού. Τα ελαστικά μετά το τέλος του κύκλου της ζωής τους για πολλά χρόνια κατάληγαν στις χωματερές.

Με βάσει σημερινές ελληνικές και ευρωπαϊκές νομοθεσίες η απόσυρση των ελαστικών στους χώρους των ΧΥΤΑ έχει απαγορευτεί. Πλέον τα ελαστικά συλλέγονται και φυλάσσονται στους χώρους συλλογής μέχρι την περαιτέρω επεξεργασία τους. Έτσι σήμερα υπάρχουν περίπου 37.000 τόνοι ελαστικών σε χώρους συλλογής και αποθήκευσης.

Με αφορμή του παραπάνω προβλήματος συνταχτικέ η παρούσα διπλωματική εργασία. που έχει σκοπό την μελέτη των διαφόρων μεθόδων επεξεργασίας ελαστικών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των μεθόδων της ενεργειακής αξιοποίηση με σκοπό την χρήση του ελαστικού ως καύσιμο και την σύγκριση του με άλλα εναλλακτικά και συμβατικά καύσιμα.

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1	ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	6
1.1.1	ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ.....	6
1.1.2	ΕΤΗΣΙΟΙ ΡΥΘΜΟΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΧΩΡΑ .....	7
1.1.3	ΣΥΝΕΧΗΣ ΜΕΙΩΣΗ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΕ ΧΥΤΑ .....	9
1.1.4	ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ. ...	10
1.2	ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ .....	11
1.3	ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ .....	13
2.	ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ .....	15
2.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	15
2.2	ΑΝΑΚΤΗΣΗ/ΑΝΑΓΟΜΩΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ .....	15
2.2.1	ΜΟΡΦΕΣ ΑΝΑΓΟΜΩΣΗΣ .....	17
2.3	ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΣ .....	20
2.3.1	ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΣ .....	21
2.3.2	ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗ ΑΛΕΞΗ.....	23
2.4	ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΕΡΓΑ ΧΥΤΑ .....	25
2.5	ΠΡΟΣΘΕΤΟ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	26
2.6	ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΑ ΕΡΓΑ .....	26
2.7	ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΑ.....	27
2.8	ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ.....	27
2.9	ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΙΚΑ ΑΓΑΘΑ .....	27
2.10	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΡΟΜΩΝ.....	28
2.11	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ.....	30
2.11.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	30
2.11.2	ΣΥΝΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗ ΣΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ .....	30
2.11.3	ΣΥΝΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ .....	34
3.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ .....	36
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	36
3.2	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ.....	38
3.2.1	ΓΕΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ .....	38
3.2.2	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΑΝΑΒΡΑΖΟΥΣΑΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΚΛΙΝΗΣ .....	40

3.2.3	ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ .....	42
3.3	ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΥΠΟ ΚΕΝΟ .....	43
3.3.1	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	43
3.3.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	45
3.3.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	49
3.4	ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΜΕ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ.....	50
3.4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	50
3.4.2	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	51
3.4.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	53
3.4.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	56
3.5	ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΠΥΡΟΛΥΣΗ.....	58
3.5.1	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	58
3.5.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	60
3.5.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	62
4.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΑ ΠΡΟΙΟΝΤΑ.....	62
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	62
4.2	ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	64
4.2.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	64
4.2.2	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΙΘΑΛΗΣ (CARBON BLACK).....	64
4.2.3	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΝΘΡΑΚΑ BOUDOUARD ΑΠΟ CO.....	66
4.2.4	ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ.....	66
4.2.5	ΑΕΡΙΟ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ.....	68
5.	ΚΑΤΑΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ.....	69
5.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	69
5.2	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ.....	69
5.3	ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ.....	70
5.3.1	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	71
5.4	ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ.....	71
5.4.1	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	71
5.5	ΑΕΡΙΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ.....	72
5.5.1	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	73
5.6	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ.....	73
6.	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ.....	73
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	73
6.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΑΔΑΣ.....	74

6.2.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΑΔΑΣ Scogen – M3RP .....	74
6.2.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΤΗΣ DGEengineering –Max 09 .....	76
6.3	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥΧΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΣ .....	78
6.4	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ .....	81
6.5	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ .....	82
6.6	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΠΡΟΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ .....	83
6.6.1	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ Scogen –ΣΕΝΑΡΙΟ 1 <sup>ο</sup> ΠΩΛΗΣΗ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ 83	
6.6.2	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ Scogen –ΣΕΝΑΡΙΟ 2 <sup>ο</sup> ΠΩΛΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	84
6.6.3	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ DGEengineering: .....	84
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	86
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	88

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

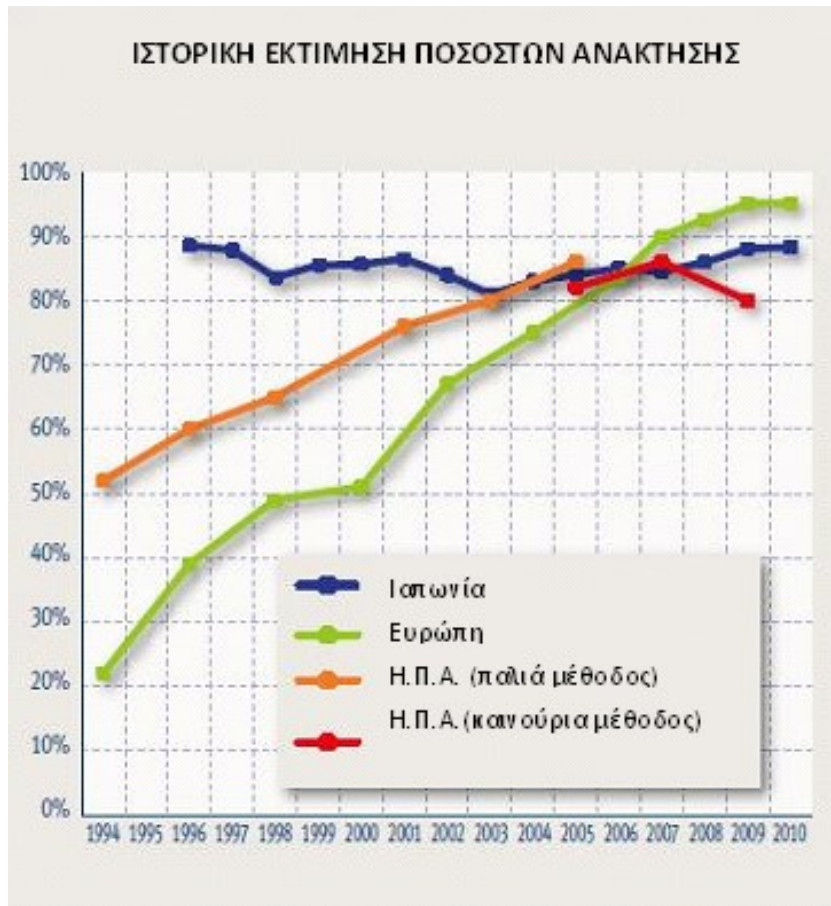
### 1.1.1 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ

Περίπου 1.4 δισεκατομμύρια ελαστικά πωλούνται παγκοσμίως κάθε χρόνο και συνεπώς άλλα τόσα αποσύρονται φτάνοντας στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Παρά την αύξηση της διάρκειας ζωής των ελαστικών και την οικονομική κρίση σε Ευρώπη, Αμερική και Ιαπωνία, ο αριθμός των απορριφθέντων ελαστικών πρόκειται να αυξηθεί περαιτέρω λόγω του συνεχώς αυξανόμενου στόλου οχημάτων παγκοσμίως.



**Εικόνα 1: Στιγμιότυπα διαχείρισης ελαστικών στο τέλος του κύκλου ζωής του (TKZ)**

Το 2010 η Ευρώπη αντιμετώπισε την πρόκληση της σωστής περιβαλλοντικά διαχείρισης περίπου 3.3 εκατομμυρίων τόνων ελαστικών (συμπεριλαμβανομένων των ελαστικών για αναγόμευση και επαναχρησιμοποίηση /εξαγωγή), ένας αριθμός αυξημένος κατά 2,2% σε σύγκριση με το 2009. Μετά τη διαλογή, περίπου 2.6 εκατομμύρια τόνοι ελαστικών παρέμειναν στην ευρωπαϊκή αγορά για ανάκτηση και ανακύκλωση. Το 2010 ο ρυθμός ανάκτησης χρησιμοποιημένων ελαστικών ήταν 94% για την Ευρώπη, 80% για τις Η.Π.Α και 89% για την Ιαπωνία.



**Εικόνα 2: Ιστορική εκτίμηση ποσοστών ανάκτησης στην Ισπανία, Ευρώπη και Αμερική [1]**

Στην Ευρώπη, το εκτιμώμενο ετήσιο κόστος διαχείρισης των ελαστικών στο τέλος του κύκλου ζωής τους είναι 600 εκατομμύρια ευρώ. Ωστόσο, εκατομμύρια χρησιμοποιημένα ελαστικά έχουν πεταχτεί παράνομα ή έχουν αποθηκευτεί.

Η μη σωστή απόρριψη των ελαστικών, σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να αποτελέσει πιθανή απειλή για την ανθρώπινη υγεία και να αυξήσει τους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Η τωρινή εκτίμηση για την ποσότητα των αποθηκευμένων ελαστικών σε όλη την Ευρώπη, ανέρχεται στους 5.7 εκατομμύρια τόνους (1.73 φορές την ετήσια παραγωγή χρησιμοποιημένων ελαστικών).

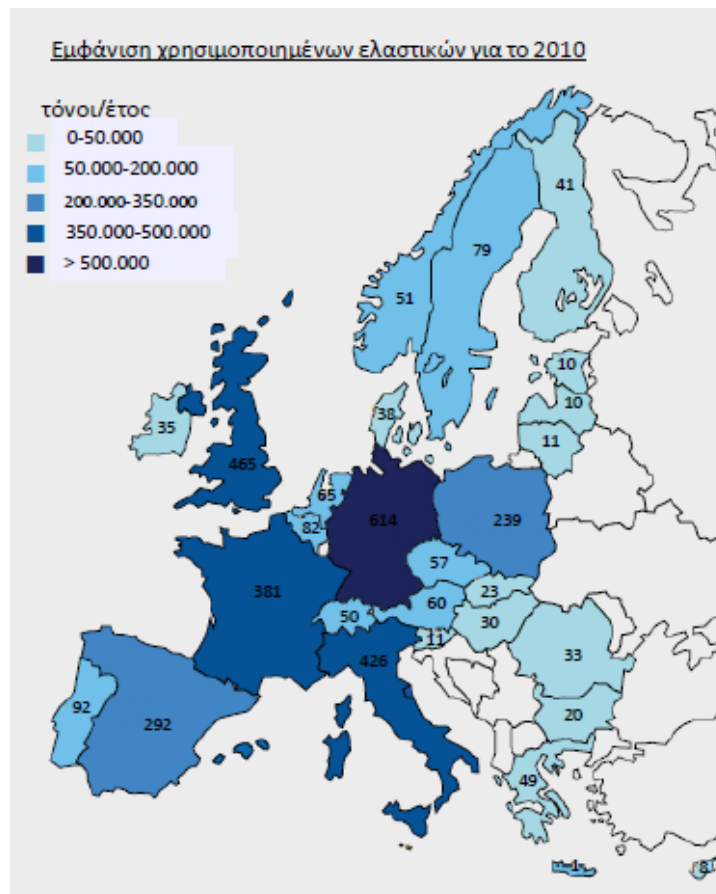
### **1.1.2 ΕΤΗΣΙΟΙ ΡΥΘΜΟΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΧΩΡΑ**

Όπως είναι φυσικό, οι μεγαλύτεροι όγκοι χρησιμοποιημένων ελαστικών εμφανίζονται στις μεγαλύτερες χώρες (Γερμανία, Ηνωμένο Βασίλειο, Γαλλία, Ιταλία, Ισπανία και Πολωνία) και κυμαίνονται στο εύρος μεταξύ 250 και 600 χιλιάδων τόνων ετησίως. Όλες οι άλλες χώρες

εμφανίζουν όγκους κάτω από 100 χιλιάδες τόνους ετησίως ενώ 6 χώρες εμφανίζουν 15 χιλιάδες τόνους ή λιγότερο.

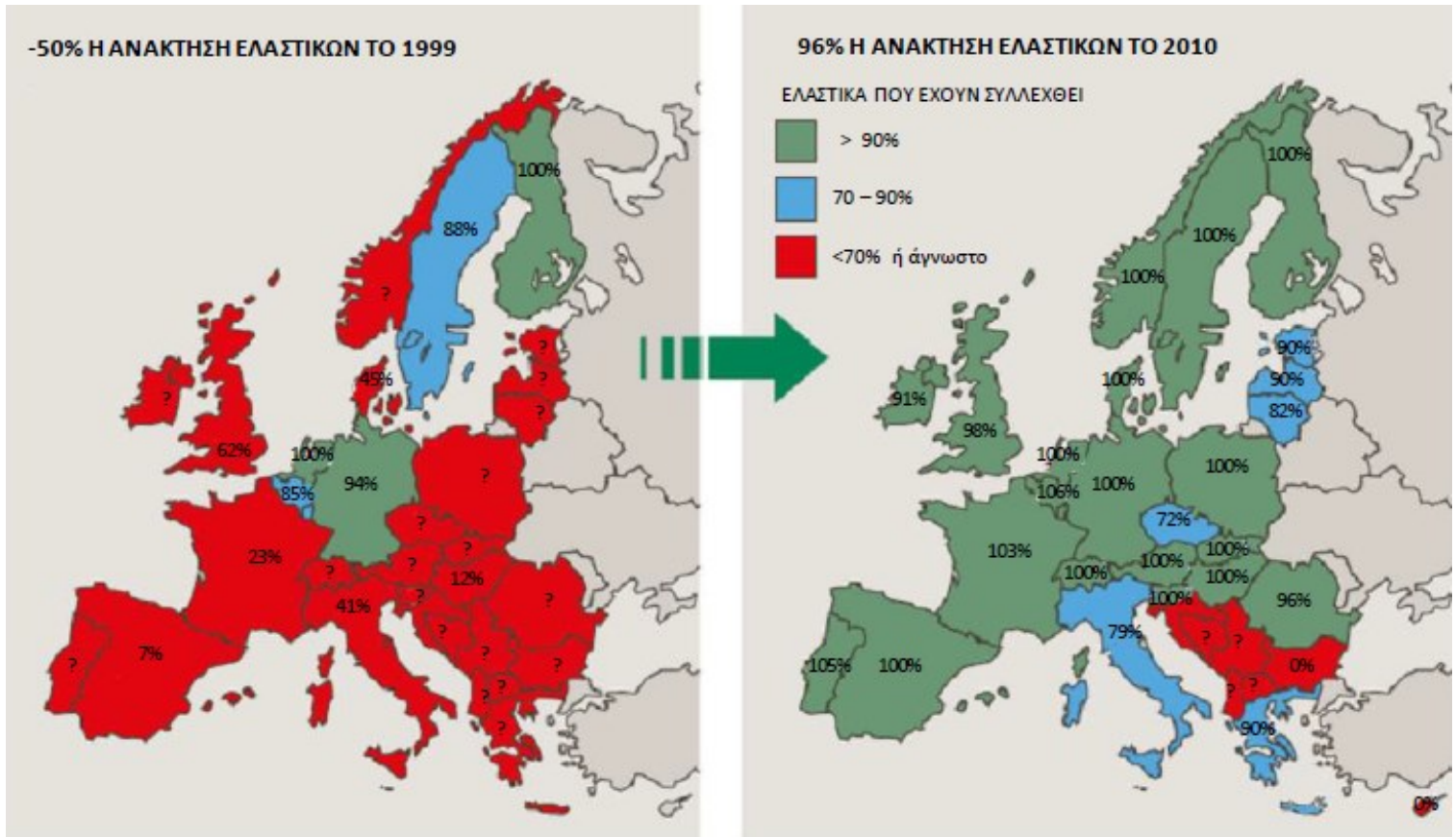
Το 2010, οι 23 από τις 27 χώρες της Ευρωπαϊκής ένωσης (καθώς η Νορβηγία και η Ελβετία) ανέκτησαν πάνω από 90% των χρησιμοποιημένων ελαστικών. Οι 18 από τις 23 χώρες αυτές πέτυχαν 100% ανάκτηση ενώ η Ιταλία και η Τσεχία ένα ποσοστό 70% - 90%. Μόνο δυο χώρες εξαρτώνται ακόμα από την απόθεση σε ΧΥΤΑ.

Στις χώρες στις οποίες λειτουργεί για πάνω από 10 χρόνια το σύστημα ευθύνης του παραγωγού (π.χ. σκανδιναβικές χώρες), ο ρυθμός ανάκτησης των χρησιμοποιημένων ελαστικών είναι 100% ενώ οι αποθήκες ελαστικών έχουν εκλείψει. Παρά τους διαφορετικούς ρυθμούς ανάκτησης των παραπάνω χωρών, το 2010 η Ευρώπη των 27 κρατών (συν τη Νορβηγία και Ελβετία) είχε έναν μέσο ρυθμό ανάκτησης ίσο με 96% που είναι αξιοσημείωτος σε σχέση με άλλους τομείς: 69% για το χαρτί και 58% για πλαστικό το 2010.



Εικόνα 3: Ποσότητες χρησιμοποιημένων ελαστικών για το 2010 (σε χιλιάδες τόνους) [1]

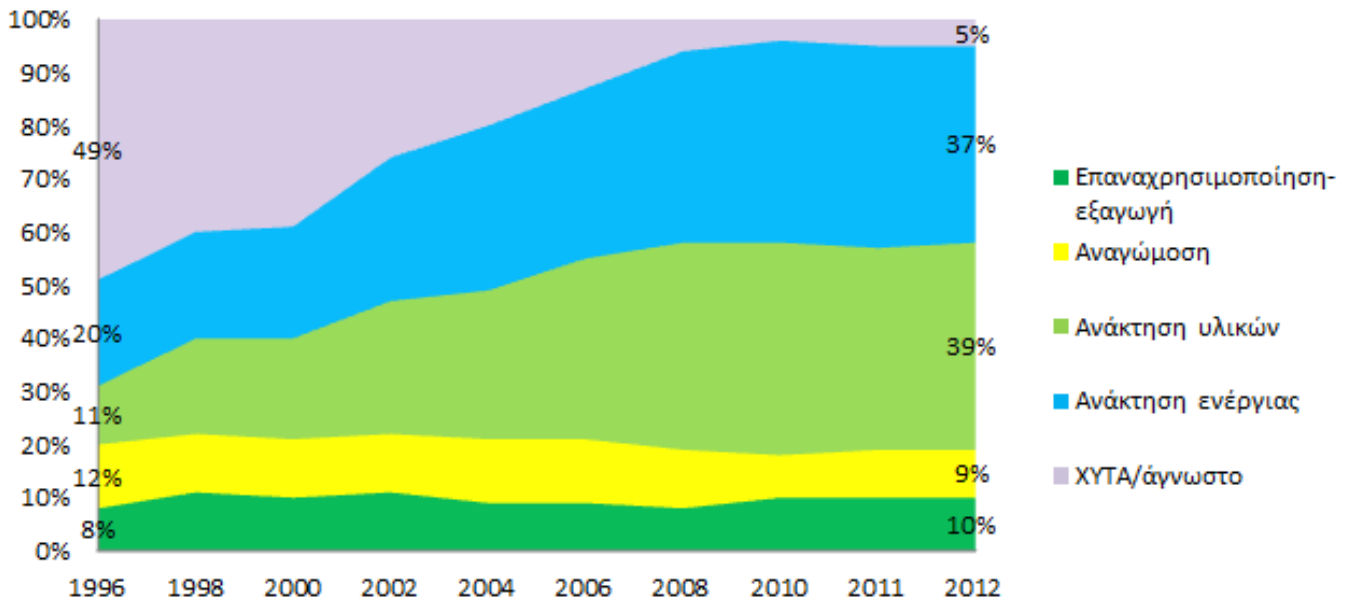




Εικόνα 4: Σύγκριση ρυθμού ανάκτησης το 2010 με αυτόν που επικρατούσε το 1999 [1].

### 1.1.3 ΣΥΝΕΧΗΣ ΜΕΙΩΣΗ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΕ ΧΥΤΑ

Από το 1996, παρατηρείται μία συνεχής μείωση των ελαστικών που απορρίπτονται σε χώρους υγειονομική ταφής. Πιο συγκεκριμένα το 32% των χρησιμοποιημένων ελαστικών μειώθηκε στο 4% για το 2009, ενώ η συνδυασμένη ανακύκλωση, ανάκτηση (υλικού και ενέργειας), επαναχρησιμοποίηση και αναγόμευση τώρα συντελούν στο 96% της ανάκτησης των εμφανιζόμενων χρησιμοποιημένων ελαστικών. Οι μεγαλύτερες αγορές το 2010 ήταν η ανάκτηση ενέργειας (45%) και η ανάκτηση υλικού (41%).



Εικόνα 5: Χρονική εξέλιξη του είδους ανάκτησης των χρησιμοποιημένων ελαστικών [2].

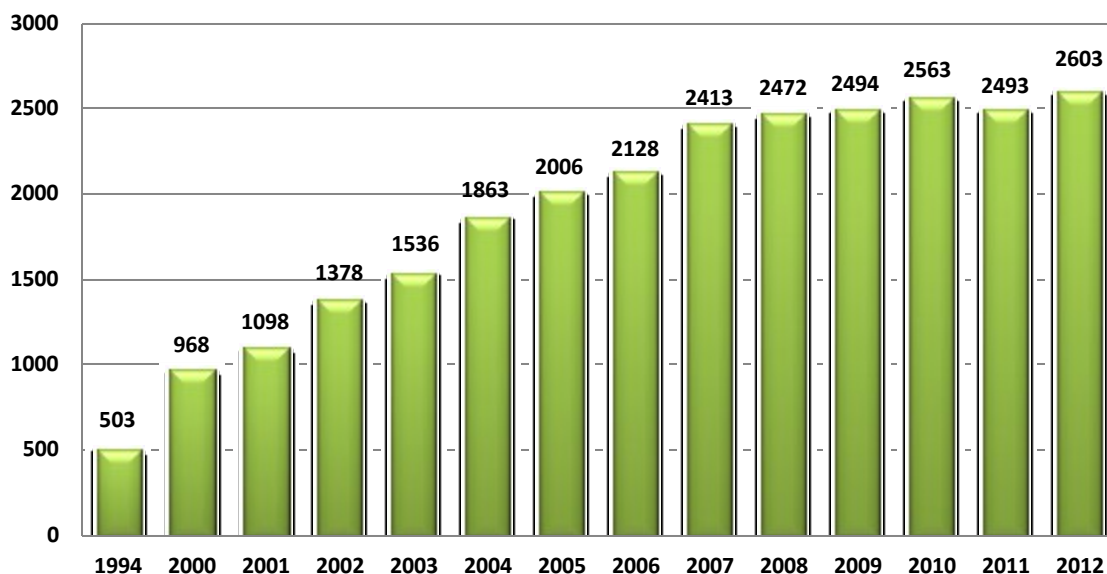
#### 1.1.4 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ.

Μετά τη διαλογή των χρησιμοποιημένων ελαστικών για αναγώμωση και επαναχρησιμοποίηση/ εξαγωγή (581.000 τόνοι) απομένει μία ποσότητα 2.6 εκατομμυρίων τόνων η οποία ανακτάται με διαφορετικούς τρόπους. Από το 1996, περισσότεροι από 20 εκατομμύρια τόνοι ελαστικών έχουν ανακτηθεί μέσω ενεργειακής αξιοποίησης ή ανάκτησης υλικού.

Το 2009, ένα εντυπωσιακό ποσοστό 95% των εμφανιζόμενων χρησιμοποιημένων ελαστικών στην Ευρωπαϊκή αγορά κατάφερε να μην οδηγηθεί σε ΧΥΤΑ. Με 2% αύξηση σε σχέση με την προηγούμενη χρονιά. Το παραπάνω καθιστά την Ευρώπη ως μια από τις πιο προηγμένες ηπείρους στον κόσμο σε ότι αφορά την ανακύκλωση και ανάκτηση των ελαστικών στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

Περίπου 2.5 εκατομμύρια τόνοι χρησιμοποιημένων ελαστικών έχουν συλλεχθεί και οδηγηθεί σε διεργασίες ανακύκλωσης και ανάκτησης. Αυτό συνιστά πενταπλάσια αύξηση των ανακτημένων ποσοτήτων τα τελευταία 18 χρόνια και μέση ετήσια αύξηση 25%.

### Εξέλιξη ανάκτησης ETZ τα τελευταία 18 χρόνια (kt/έτος)



Εικόνα 6: Χρονική εξέλιξη ανάκτησης ελαστικών στο τέλος του κύκλου ζωής τους [2]

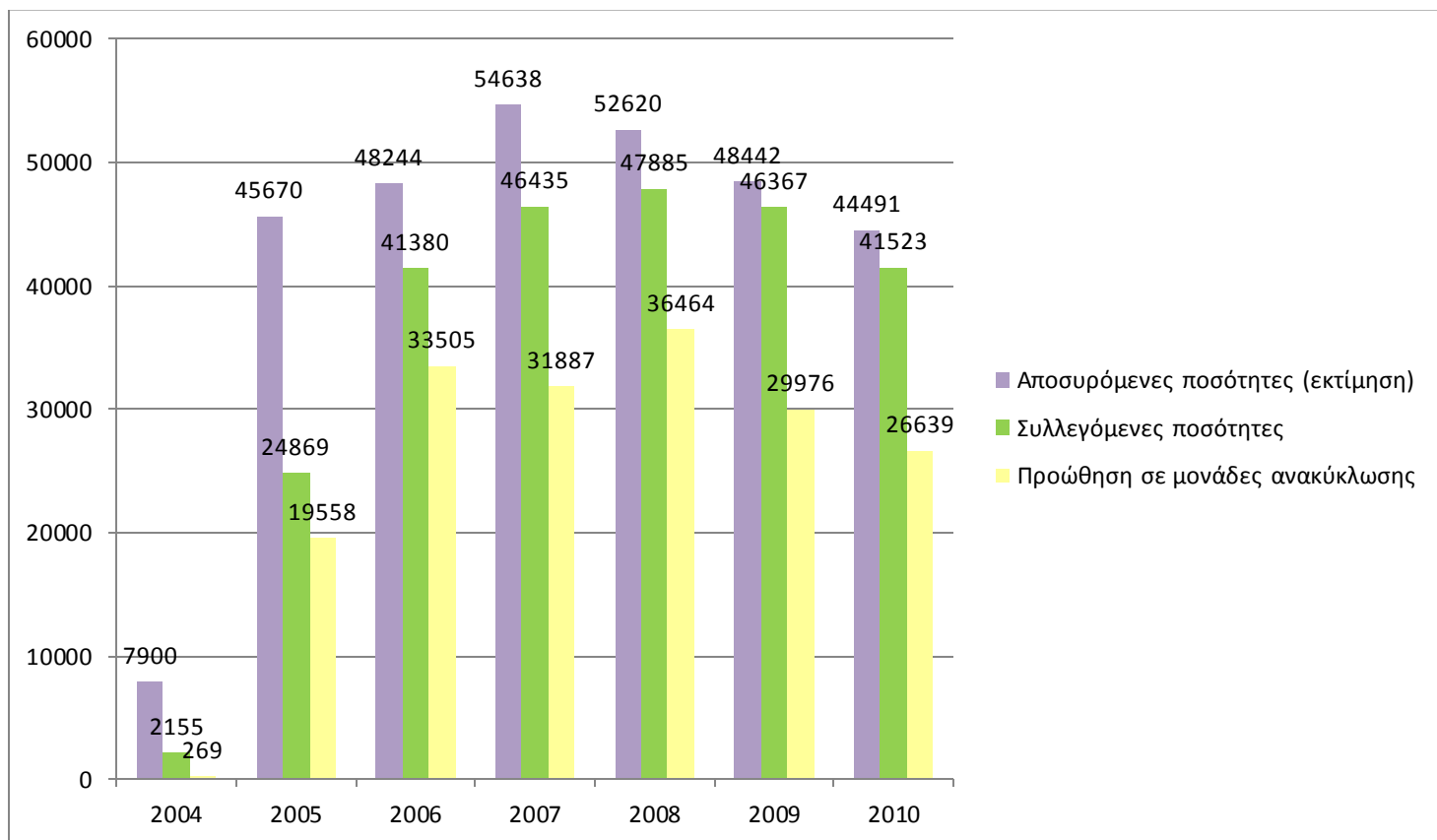
## 1.2 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ

Σύμφωνα με τη νομοθεσία (Ν2939/01, ΠΔ 109/04) οι ευθύνες των εισαγωγέων, διακινητών, εμπόρων και τελικών χρηστών – κατόχων ελαστικών οχημάτων είναι οι εξής :

- Οι εισαγωγείς να μεριμνούν για τον βέλτιστο τρόπο διαχείρισης (ανακύκλωση, ενεργειακή αξιοποίηση) όλων των μεταχειρισμένων ελαστικών που συλλέγονται από τα σημεία συλλογής.
- Οι διακινητές και οι τελικοί πωλητές ελαστικών υποχρεώνονται να διακινούν ελαστικά, τα οποία ανήκουν σε κάποιο πιστοποιημένο «σύστημα».
- Τα καταστήματα βουλκανιζατέρ, όπου γίνεται η αλλαγή των παλαιών ελαστικών στα οχήματα, είναι υποχρεωμένα να παραδίδουν τα παλαιά τους ελαστικά σε κάποιο πιστοποιημένο σύστημα εναλλακτικής διαχείρισης.
- Οι ιδιοκτήτες, κάτοχοι ή τελικοί χρήστες μεταχειρισμένων ελαστικών υποχρεούνται να τα μεταφέρουν οι ίδιοι και να τα παραδίδουν σε σημεία συλλογής ή σε νόμιμους συλλέκτες ή σε εγκεκριμένα συστήματα εναλλακτικής διαχείρισης.

Για την οργάνωση της εναλλακτικής διαχείρισης των μεταχειρισμένων ελαστικών εγκρίθηκε με απόφαση του Υπουργού ΠΕΧΩΔΕ (αρ. οικ.106157 ΦΕΚ 1145B/2004) η σύσταση του συλλογικού συστήματος ECO-ELASTIKA, που έχει αναλάβει την οργάνωση της συλλογής, ανακύκλωσης και ενεργειακής αξιοποίησης των μεταχειρισμένων ελαστικών στην Ελλάδα.

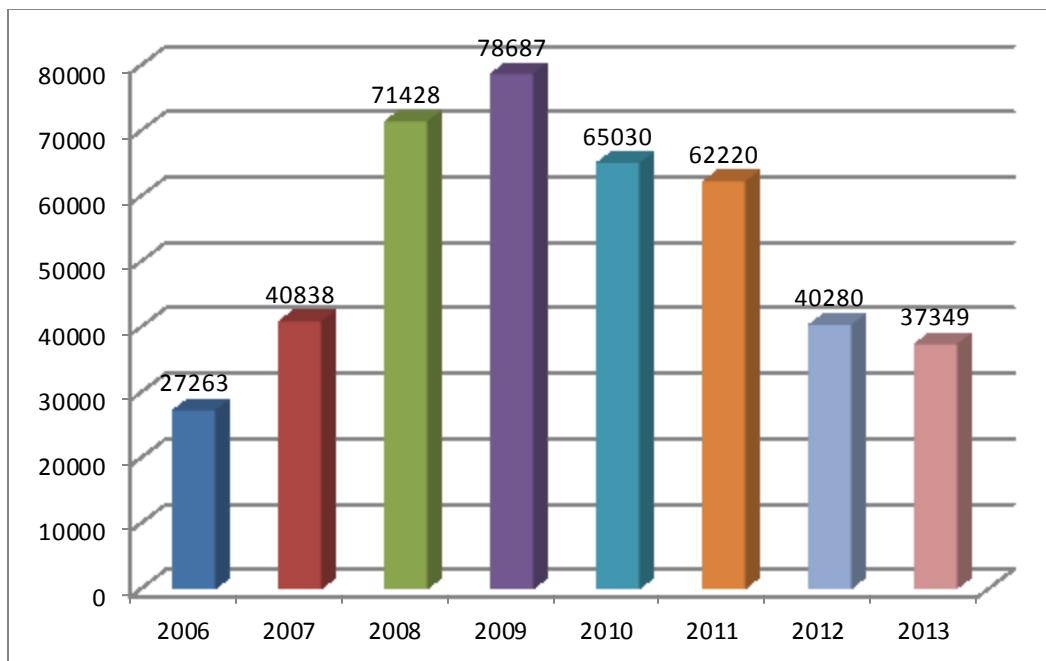
Τα μεταχειρισμένα ελαστικά συλλέγονται και είτε ανακυκλώνονται (παραγωγή τρίμματος ελαστικού) είτε αξιοποιούνται ενεργειακά.



**Εικόνα 7: Διάγραμμα αποσυρόμενων και συλλεγόμενων ελαστικών σε τόνους [3]**

Η ECO-ELASTIKA έχει πανελλαδική κάλυψη, οι δε ποσότητες μεταχειρισμένων ελαστικών που συλλέχθηκαν το 2009 ανέρχονται σε περίπου 46.367 τόνους ή ποσοστό 96% των παλαιών ελαστικών περίπου που απορρίπτονται ετησίως στην χώρα μας.

Από την έναρξη λειτουργίας της ECO-ELASTIKA υπήρξε πρωταρχική ανάγκη συλλογής των ελαστικών προτού δημιουργηθούν κατάλληλες υποδομές για περαιτέρω επεξεργασία τους. Έτσι σήμερα περίπου 37.000 τόνοι ελαστικών (ολόκληρα ή προτειχισμένα) βρίσκονται σε χώρους προσωρινής αποθήκευσης. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα ήδη τα αποθέματα αυτά σταδιακά μειώνονται.



**Εικόνα 8: Διάγραμμα αποθηκευμένων ελαστικών σε τόνους [4]**

Σήμερα λειτουργούν 8 μονάδες επεξεργασίας ελαστικού (δύο στην Αττική και από μία στην Κομοτηνή, στην Δράμα, στην Πάτρα, στην Φθιώτιδα, στα Οινόφυτα,) και μία (1) μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης (TITAN- Καμάρι Βοιωτίας) [4].

### **1.3 ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ**

**1975** Οδηγία για τα απόβλητα 75/442/ΕΚ- έχει τροποποιηθεί από τη νεότερη οδηγία 2009/98/ΕΚ. Τα ελαστικά στο τέλος του κύκλου ζωής τους χαρακτηρίζονται ως «μη επικίνδυνα απόβλητα».

**1993** Κανονισμός για την επίβλεψη και τον έλεγχο των διασυνοριακών φορτίων αποβλήτων 259/93/ΕΚ.

**1999** Οδηγία περί υγειονομικής ταφής απορριμμάτων – 1999/31/ΕΚ .

Σύμφωνα με την οδηγία περί υγειονομικής ταφής της ΕΕ (1999/31/ΕΚ), η οποία έγινε νόμος τον Ιούλιο του 2001 έχει απαγορευθεί η προώθηση των ολόκληρων ελαστικών σε χώρους υγειονομικής ταφής το αργότερο έως το 2003, και για τα τεμαχισμένα ελαστικά δε το αργότερο μέχρι το 2006. Άρθρο 5 ‘Απόβλητα και επεξεργασίες τους, μη αποδεκτά σε χώρους υγειονομικής ταφής’, παρ. 3 «Τα κράτη μέλη διασφαλίζουν ότι τα ακόλουθα απόβλητα δεν γίνονται δεκτά σε χώρο ταφής δ) ολόκληρα μεταχειρισμένα ελαστικά αυτοκινήτων μετά πάροδο δύο ετών από την

ημερομηνία που ορίζεται στο άρθρο 18 παράγραφος 1, εκτός από τα υλικά που προορίζονται για χρήση σε έργα, και μεταχειρισμένα ελαστικά αυτοκινήτων, μετά πάροδο πενταετίας από την ημερομηνία που ορίζεται στο άρθρο 18 παράγραφος 1 (εξαιρουμένων και στις δύο περιπτώσεις των ελαστικών ποδηλάτων και των ελαστικών με εξωτερική διάμετρο άνω των 1400 mm).

**2000** Λίστα ευρωπαϊκών αποβλήτων – 2000/532/EK και επιπλέον τροποποιήσεις. Τα οχήματα στο τέλος του κύκλου ζωής τους χαρακτηρίζονται με τον κωδικό '16 01 03'.

**2000** Οδηγία για την καύση των αποβλήτων – 2000/76/EK

- Συγκεκριμένες προδιαγραφές εκπομπών για τις τσιμεντοβιομηχανίες με ισχύ από το 2002.

- Οι παλιότερες τσιμεντοβιομηχανίες απαγορεύεται να καίνε ελαστικά στο τέλος του κύκλου ζωής τους μετά το 2008.

- Από το Δεκέμβριο του 2008, νέα μέριμνα για την συν-καύση αποβλήτων στις τσιμεντοβιομηχανίες συμπεριλαμβανομένων των χρησιμοποιημένων ελαστικών. Όλες οι τσιμεντοβιομηχανίες που καίνε και ελαστικά στην Ευρώπη έχουν ήδη συμμορφωθεί με αυτήν την Οδηγία.

**2000** Οδηγία για τα οχήματα στο τέλος του κύκλου ζωής τους (ELV)- 2000/53/EK. Ανάκτηση του 85% των οχημάτων προς απόρριψη με ισχύ από το 2006 με υποχρεωτική εξαγωγή των ελαστικών από το όχημα.

Εδώ καθορίζονται τα μέτρα τα οποία αποσκοπούν, ως πρώτη προτεραιότητα, στην πρόληψη της δημιουργίας αποβλήτων από οχήματα και, επιπροσθέτως, στην επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση και ανάκτηση οχημάτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους και των κατασκευαστικών τους στοιχείων, ώστε να μειώνεται η ποσότητα των προς τη διάθεση αποβλήτων. Τέλος, αποσκοπεί στη βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης όλων των οικονομικών φορέων που συμμετέχουν στον κύκλο ζωής των οχημάτων και κυρίως των φορέων που συμμετέχουν άμεσα στην επεξεργασία οχημάτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

**2001** Απόφαση της Ευρωπαϊκής Κοινότητας σχετικά με τη λίστα των αποβλήτων – 2001/118/EK. Τα ελαστικά στο τέλος του κύκλου ζωής τους κατηγοριοποιούνται με τον κωδικό 16.01.03, με ισχύ από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2002 για όλα τα μέλη της Κοινότητας.

**2005** Θεματική στρατηγική της Ευρωπαϊκής Κοινότητας σχετικά με την πρόληψη και ανακύκλωση αποβλήτων – COM (2005) 666 final.

- Συνολική ανάλυση των σημαντικότερων επιτευγμάτων στην περιοχή της διαχείρισης των αποβλήτων τα τελευταία 30 χρόνια. Τονίζεται η ανάγκη για επιπλέον ενέργειες με σκοπό τον καθορισμό των βέλτιστων περιβαλλοντικών επιλογών και στόχων που έχουν τεθεί

για την ανακύκλωση και ανάκτηση των αποβλήτων, παίρνοντας υπόψη τις διαφορές των προϊόντων και υλικών και τις πιθανές εναλλακτικές λύσεις.

- Ενθαρρύνεται η αρχή της ευθύνης του παραγωγού – στρατηγική που εφαρμόζεται από τους κατασκευαστές ελαστικών από τα τέλη του 90 περιμένοντας το ρυθμιστικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Κοινότητας.

#### **2008**      Ανανεωμένη Οδηγία για απόβλητα – 2008/98/EK

- Θέτει τις βασικές αρχές και ορισμούς σχετικά με τη διαχείριση των αποβλήτων και θέτει στο τραπέζι αρχές διαχείρισης αποβλήτων όπως «ο ρυπαίνων πληρώνει» και «ιεραρχία διαχείρισης αποβλήτων».

- Εισάγει την αρχή του τέλους των αποβλήτων, σύμφωνα με την οποία επιλεγμένα ρεύματα αποβλήτων παύουν να θεωρούνται ως απόβλητα αν συμμορφώνονται με συγκεκριμένα κριτήρια τέλους αποβλήτων.

## **2. ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ**

### **2.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Οι τεχνολογίες διαχείρισης ελαστικών που παρουσιάζονται εδώ αποτελούν τις πιο ενδεδειγμένες περιβαλλοντικά επιλογές και εφαρμογές που βρίσκονται ήδη σε ισχύ ή σε πειραματικό στάδιο. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι οι κανονισμοί που ισχύουν για τα απόβλητα και ειδικότερα για τα ελαστικά στο τέλος του κύκλου ζωής τους καθώς και το ισχύων οικονομικό πλαίσιο, καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τους τρόπους διαχείρισης των χρησιμοποιημένων ελαστικών.

### **2.2 ΑΝΑΚΤΗΣΗ/ΑΝΑΓΟΜΩΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ**

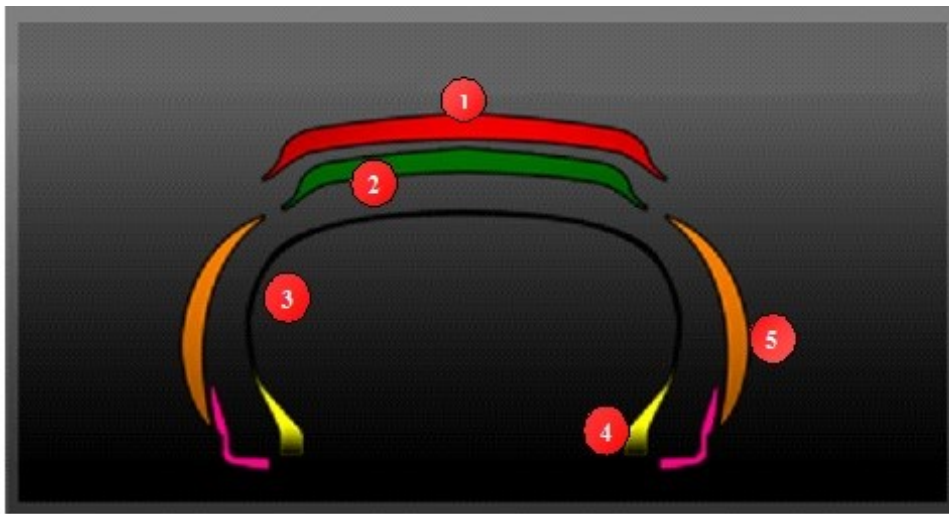
Η αναγόμευση είναι ένας ασφαλής, αποτελεσματικός και φιλικός προς το περιβάλλον τρόπος για να δοθεί νέα πνοή σε φθαρμένα ελαστικά. Κατά την αναγόμευση το «φθαρμένο» πέλμα του ελαστικού αντικαθιστάτε με ένα ολοκαίνουργιο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά. Όμως για να είναι δυνατή η αναγόμευση, το ελαστικό πρέπει να πληροί τις εξής προϋποθέσεις:

- Το ελαστικό να χρησιμοποιείται σωστά κατά την διάρκεια "πρώτης ζωής" του, δηλαδή να οδηγείται με τη σωστή πίεση αέρα και να αντιμετωπίζεται με προσοχή.
- Το πλαίσιο του ελαστικού δηλαδή ο σκελετός να μην έχει σοβαρές ζημιές.

Επιπλέον εάν ένας σκελετός μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για την αναγόμευση εξαρτάται από τον τύπο του ελαστικού. Ισχύουν τα ακόλουθα όρια για αναγόμευση:

- Ελαστικά επιβατικών αυτοκινήτων 1 φορά
- Ελαστικά ελαφρών φορτηγών και λεωφορείων 1 φορά
- Ελαστικά φορτηγών 1-3 φορές
- Ελαστικά αεροπλάνων έως και 12 φορές.

Η αναγόμευση είναι πολύ φιλική προς το περιβάλλον και οικονομικά αποδοτική. Όταν το πέλμα έχει φθαρεί, μόνο το 20% του ελαστικού έχει εξαντληθεί. Ο σκελετός, ο οποίος αντιπροσωπεύει περίπου το 80% της αξίας του ελαστικού, μπορεί να αναγομωθεί για μια "νέα διάρκεια ζωής του ελαστικού".



**Εικόνα 9: Δομή ελαστικών 1- πέλμα, 2- ζώνες, 3- σκελετός, 4-πτέρνα, 5- πλευρά.**

Μια σημαντική ποσότητα των πρώτων υλών μπορεί να διασωθεί χάρη στην αναγόμευση. Για την παραγωγή ενός ελαστικού για φορτηγά ή λεωφορεία απαιτούνται περίπου 60-80 κιλά μίγματος καουτσούκ, ενώ για την αναγόμευση του χρειάζονται μόνο 15 περίπου κιλά. Στην ΕΕ, αυτό ισοδυναμεί με περισσότερα από 300.000 τόνους καουτσούκ ετησίως. Για να παραχθεί ένα ελαστικό αυτοκινήτου απαιτούνται περίπου 28 λίτρα αργού πετρελαίου. Για την αναγόμευση από την άλλη πλευρά, απαιτούνται μόλις 5,5 λίτρα πετρελαίου. Έτσι η αναγόμευση διασφαλίζει πάνω από 500.000 τόνους αργού πετρελαίου στην ΕΕ κάθε χρόνο.

Εκτός των άλλων από τα αναγομωμένα ελαστικά επωφελούνται και οι ίδιοι καταναλωτές, δεδομένου ότι το κόστος ενός αναγομένου ελαστικού είναι κατά 45-60% μικρότερο σε σύγκριση με το καινούριο ενώ η απόσταση που διανύει είναι περίπου ίδια.

Ενώ η αναγόμευση από την μία δεν εξαλείφει την ανάγκη για τη διάθεση των παλαιών ελαστικών, από την άλλη δεν είναι και χρονοβόρα. Αυτό βοηθάει στο να διατηρείται χαμηλό



το ταχέως αναπτυσσόμενο κόστος της διάθεσης και παράλληλα μειώνει την πίεση από τους χώρους υγειονομικής ταφής.

### 2.2.1 ΜΟΡΦΕΣ ΑΝΑΓΟΜΩΣΗΣ

Οι βασικές μορφές αναγόμωσης είναι δύο:

- «ψυχρή» αναγόμωση
- «θερμή» αναγόμωση

Ο λόγος που υπάρχουν και τα δύο συστήματα είναι καθαρά οικονομικής φύσης ως προς την λειτουργία της μονάδας και δεν έχει καμία σχέση με την ποιότητα του τελικού προϊόντος, διαθέτοντας το καθένα δικά του πλεονεκτήματα.



**Εικόνα 10: Στάδια αναγόμωσης**

Τα πρώτα βήματα στην αναγόμωση είναι το ίδιο ανεξάρτητα από το ποιο σύστημα αναγόμωσης χρησιμοποιείται.

#### **Βήμα 1<sup>ο</sup> : Πρωτοβάθμια επιθεώρηση.**

Κάθε ελαστικό που παραλαμβάνεται από οποιαδήποτε μονάδα αναγόμωσης αρχικά υπόκειται σε πολύ αυστηρή οπτική επιθεώρηση. Κατά τον έλεγχο είναι δυνατόν να χρησιμοποιούνται διάφοροι μην καταστρεπτικοί εξοπλισμοί, οι οποίοι είναι διαθέσιμοι στην βιομηχανία αναγόμωσης. Ένα πολύ μεγάλο ποσοστό, της τάξης 85%, των επιβατικών οχημάτων συνήθως απορρίπτεται. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο για τα ελαστικά των φορτηγών και το γεγονός αυτό οφείλεται στην καλύτερη φροντίδα και ενίσχυση που λαμβάνεται κατά την κατασκευή και διάρκεια ζωής ενός φορτηγού.

Μόνο τα καλύτερα αποδειγμένα φθαρμένα ελαστικά επιβατικών και φορτηγών οχημάτων περνούν αυτή την επιθεώρηση.

### **Βήμα 2<sup>ο</sup>: Τράχυνση.**

Μετά την επιθεώρηση και εκλογή των κατάλληλων ελαστικών για αναγόμευση πραγματοποιείται η απομάκρυνση του παλιού πέλματος. Η διαδικασία αυτή γίνεται μόνο μηχανικά σε προσκρουστήρες υψηλής ταχύτητα .

### **Βήμα 3<sup>ο</sup>: Εφαρμογή του νέου ελαστικού στην περιοχή του πέλματος.**

Στο βήμα αυτό τα συστήματα διαφέρουν.

- **«Ψυχρή» αναγόμευση**

«Ψυχρή» αναγόμευση καλείται βουλκανισμός χωρίς καλούπι, που πραγματοποιείται σε θερμοκρασία μεταξύ 95 ° C και 110 ° C .

Κατά την διαδικασία αυτή ένα νέο προ-βουλκανισμένο πέλμα και ένα μη βουλκανισμένο στρώμα ελαστικού τοποθετούνται σε έναν θάλαμο ωρίμανσης όπου μέσω διαδικασίας βουλκανισμού, παρόμοια με την κατασκευή νέων ελαστικών, ολοκληρώνεται η διαδικασία. Το στρώμα μη βουλκανισμένου ελαστικού συγκόλλησης λειτουργεί σαν κόλα ανάμεσα στο πέλμα και τον σκελετό της ρόδας.

Η «ψυχρή» αναγόμευση έχει ενσωματωθεί πλήρως στον τομέα των ελαστικών φορτηγών και λεωφορείων από την εισαγωγή των ακτινωτών ελαστικών στα μέσα της δεκαετίας του 1960.

- **«θερμή» αναγόμευση**

Κατά την «θερμή» αναγόμευση πραγματοποιείται βουλκανισμός των ελαστικών εντός ενός καλουπιού σε θερμοκρασία περίπου 150 ° C. Το πέλμα και τα λεία πλευρικά τοιχώματα ελαστικού είναι κατασκευασμένα από μη βουλκανισμένο καουτσούκ. Η τελική μορφή και σχήμα του ελαστικού διαμορφώνονται στην πρέσα θέρμανσης. Και πάλι η διαδικασία βουλκανισμού στη επεξεργασία αυτή είναι παρόμοια με αυτήν που χρησιμοποιείται στη κατασκευή νέων ελαστικών.

Σημείωση: Και τα δύο συστήματα απαιτούν κατά τον βουλκανισμό ένα συνδυασμό χρόνου, θερμότητας και πίεση στην περιοχή του πέλματος του ελαστικού.

### **Βήμα 4<sup>ο</sup>: Τελικός έλεγχος.**

Τα αναγομωμένα ελαστικά υπάγονται σε τελική επιθεώρηση έλεγχου. Αυτό διασφαλίζει ότι μόνο τα ελαστικά που πληρούν τα ποιοτικά πρότυπα της βιομηχανίας επιτρέπονται να φύγουν από το εργοστάσιο αναγόμευση.

**Πίνακας 1: τα υπέρ και τα κατά θερμής και ψυχρής αναγόμεωσης [5]**

ΘΕΡΜΗ ΑΝΑΓΟΜΩΣΗ	ΨΥΧΡΗ ΑΝΑΓΟΜΩΣΗ
<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κατάλληλη για όλους τους τύπους ελαστικών αυτοκινήτων και των αεροσκαφών .</li> <li>• Οι υλικές δαπάνες είναι χαμηλότερες από τα πολύπλοκα προϊόντα που απαιτούνται για την ψυχρή αναγόμεωση.</li> <li>• Επιτρέπει εκτεταμένες επισκευές που πρέπει να πραγματοποιούνται στον σκελετό του ελαστικού.</li> <li>• Ακόμη και ο σκελετός μπορεί να υποβληθεί σε «θερμή» αναγόμεωση χωρίς κανένα πρόβλημα .</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χαμηλό κόστος επένδυσης μονάδας (χωρίς ακριβά καλούπια) και χαμηλά λειτουργικά έξοδα δεδομένου, ότι ο προμηθευτής υλικών αναπροσαρμόζει το εύρος καλουπιών.</li> <li>• Η διάθεση ευρύ φάσματος τύπων πέλματος, επιτρέπει τη βέλτιστη επιλογή για την εφαρμογή στα ελαστικά.</li> <li>• Το χαμηλό κόστος των απαιτούμενων επενδύσεων, σημαίνει ότι είναι δυνατή η λειτουργία αποκεντρωμένων μικρών μονάδων παραγωγής. Αυτό σημαίνει χαμηλότερο κόστος εφοδιασμού και ο χειριστής μονάδας κάνει πιο ευέλικτη επικοινωνία και είναι πιο κοντά στους πελάτες του.</li> <li>• Η διαδικασία «ψυχρής» αναγόμεωσης είναι ιδανική για τον σκελετό ελαστικού, καθώς κατά τον βουλκανισμό οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές και μειώνουν την καταπόνηση του καουτσούκ με μέταλλο στο δέσιμο του σκελετού. Συσσώρευση θερμότητας στο εσωτερικό του ελαστικού, η αντίσταση κύλισης και άλλες ιδιότητες των ελαστικών είναι συχνά ευκολότερο να αξιολογηθούν σε αυτό τον τύπο αναγόμεωσης.</li> <li>• Με ανάλογη γεωμετρία πέλματος, η απόδοση κατά την οδήγηση ενός προψημένου αναγομωμένου ελαστικού συχνά είναι καλύτερη από το ελαστικό θερμής αναγόμεωση και ισοδύναμη με νέο ελαστικό.</li> </ul>
<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ένα ξεχωριστό καλούπι που απαιτείται για κάθε πέγμα και το μέγεθος απαιτεί ένα υψηλό επίπεδο επενδύσεων σε μια σειρά από καλούπια, τα οποία θα πρέπει να ενημερώνονται τακτικά.</li> <li>• Η διαδικασία παραγωγής πρέπει να σχεδιάζεται για μεγάλο αριθμό ελαστικών. Αυτό απαιτεί ένα κεντρικό εργαστήριο παραγωγής, ένα μεγάλο πελατολόγιο και, συνεπώς, έχει σχετικά υψηλό κόστος εφοδιασμού.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υπό πίεση αναγόμεωσης απαιτεί υψηλής ποιότητας σκελετό.</li> <li>• Οι υλικές δαπάνες είναι υψηλότερες από ότι στην «θερμή» αναγόμεωση, δεδομένου ότι το προ ψημένο πέγμα έχει ήδη υποστεί βουλκανισμό και είναι επομένως πιο βαριά μεταποιημένο προϊόν.</li> <li>• Το κόστος εργασίας ανά αναγόμεωση είναι υψηλότερο από ό, τι σε θερμή αναγόμεωση για ελαστικά φορτηγών και λεωφορείων.</li> </ul>

Τα ποσοστά των αναγομωμένων ελαστικών ποικίλλουν ευρέως στην αγορά της Ευρώπης. Για τα επιβατικά αυτοκίνητα στην Ελβετία και την Ολλανδία τα αναγομωμένα ελαστικά αποτελούν μόνο το 1-2% της αγοράς, ενώ στη Σκανδιναβία το ποσοστό αυτό αυξάνεται πάνω από 20% . Στη Γερμανία, τα αναγομωμένα ελαστικά αντιπροσωπεύουν περίπου

το 10% των ελαστικών όλων των οχημάτων και το ποσοστό αυτό αυξάνεται σε 20% για τα χειμερινά ελαστικά.

Στα ελαστικά φορτηγών τα ποσοστά αναγόμενης είναι μεγαλύτερα από ότι στα επιβατικά και για την ακρίβεια στην Ισπανία κυμαίνεται στο 40% ενώ στην Φιλανδία φτάνει μέχρι και 70%. Στη Γερμανία και τη Γαλλία, τα αναγομωμένα ελαστικά φορτηγών αποτελούν περίπου 50% της αγοράς. Γενικά πάνω από 15 εκατομμύρια ελαστικά φορτηγών και λεωφορείων χρησιμοποιούνται ετησίως σε ολόκληρη την Ευρωπαϊκή Ένωση και από αυτά, περίπου 8 εκατομμύρια είναι νέα ελαστικά, και πάνω από 6 εκατομμύρια είναι αναγομωμένα.

Η αναγόμευση παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στα ελαστικά των αεροσκαφών. Ειδικά τα ελαστικά αυτά υποβάλλονται σε ακραίες καταπονήσεις, πρέπει να αντέχουν σε τεράστια πίεση και σε ταχύτητες άνω των 250 km / h. Η αναγόμευση πραγματοποιείται μετά από περίπου 150 απογειώσεις και προσγείωσης και μπορεί να επαναληφθεί έως και δώδεκα φορές. Οι διαδικασίες δοκιμής στην περίπτωση αυτή είναι φυσικά πολύ αυστηρές και η ασφάλεια αποτελεί την πρώτη προτεραιότητα.

Υψηλής ποιότητας αναγόμευση είναι η εναλλακτική λύση στα νέα ελαστικά για εμπορικά οχήματα, δεδομένου ότι προσφέρει ασφάλεια, υψηλή απόδοση λειτουργίας και μια εξαιρετική σχέση κόστος-όφελος. Όλο και περισσότεροι καταναλωτές στρέφουν την προσοχή τους και έρχονται να εκτιμήσουν την θετική εικόνα υψηλής ποιότητας αναγομωμένων ελαστικών.

### 2.3 ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΣ

Για την ανακύκλωση και επεξεργασία ελαστικών απαιτείτε ο τεμαχισμός τους με βασικό σκοπό την μείωση του μεγάλου όγκου τους.

Υπάρχουν δυο μέθοδοι τεμαχισμού του παλαιού ελαστικού, ο *μηχανικός τεμαχισμός* και η *κρυογενική άλεση* κατά τους οποίους πραγματοποιείται η απελευθέρωση των ατσαλοσυρμάτων και των ινών καθώς και περαιτέρω επεξεργασία του ελαστικού κλάσματος (καουτσούκ) ώστε να επιτευχθούν εμπορεύσιμα μεγέθη κόκκων.

**Πίνακας 2: Μία χαρακτηριστική παραγωγή προϊόντων από παλαιά ελαστικά[6]**

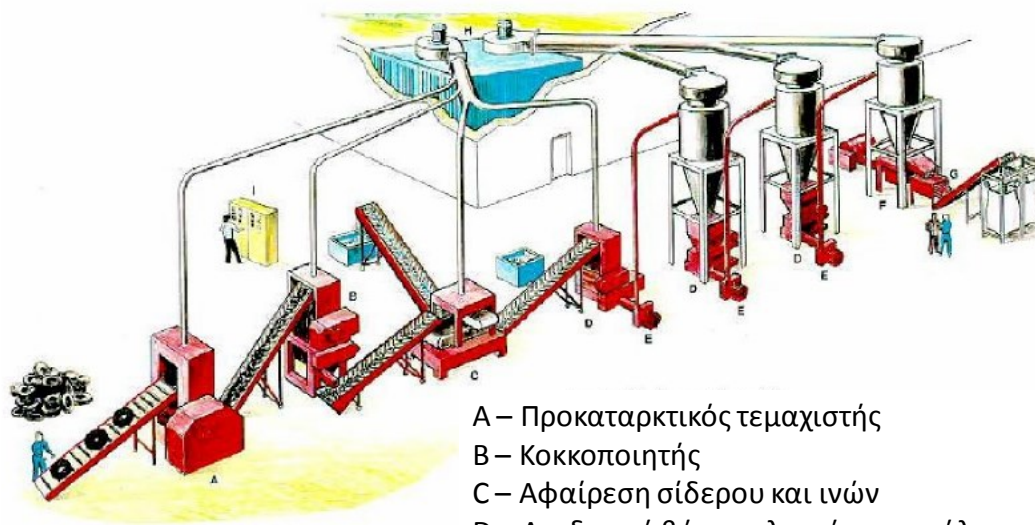
Προϊόν από:	Ελαστικά φορτηγών	Ελαστικά χωματουργικών και αγροτικών οχημάτων	Ελαστικά επιβατικών οχημάτων
Κόκκοι ελαστικού	70%	78%	70%
Χάλυβας	27%	15%	15%
Ίνες και απόρριμμα	3%	7%	15%

### 2.3.1 ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΣ

Η μηχανική ή «περιβάλλοντος» επεξεργασία των ελαστικών ονομάζεται έτσι διότι πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος ή κοντά σε αυτές. Μια απεικόνιση μιας τέτοιας μονάδας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Η συγκεκριμένη επεξεργασία μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μεγάλες, πλήρως αυτοματοποιημένες εγκαταστάσεις, με δυναμικό εισόδου πάνω από 65 χιλιάδες τόνους και διάφορα είδη ελαστικών (επιβατικά, φορτηγά κ.τ.λ). Ολοκληρώνεται σε τρία βασικά στάδια Τεμαχισμός, Κοκκοποίηση και Άλεση κατά τα οποία το τρίμα και η πούδρα ελαστικού που παράγονται είναι υψηλής ομογενοποίησης και καθαρότητας.

Το τρίμα ελαστικού στο τέλος μπορεί να έχει μέγεθος και κάτω από 2 mm. Το κλάσμα ατσαλιού που εξάγεται χρησιμοποιείται σε χαλυβουργικές εργασίες (λιώσιμο κ.τ.λ).



- A – Προκαταρκτικός τεμαχιστής
- B – Κοκκοποιητής
- C – Αφαίρεση σίδηρου και ινών
- D – Διαδοχικά βήματα λεπτόκοκκης άλεσης
- E – Σύστημα πνευματικής μεταφοράς
- F – Αεροδιαχωρισμός
- G – Δευτερέων μαγνητικός διαχωρισμός
- H – Αφαίρεση ινών και σκόνης

Πηγή: Reschner (2006)

**Εικόνα 11: Μηχανικός τεμαχισμός σε θερμοκρασία περιβάλλοντος [7]**

#### i. ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΣ

Η διαδικασία ξεκινάει με την εισαγωγή των ελαστικών στον *προ-τεμαχιστή* όπου παράγονται τεμάχια της τάξης 200x400mm έως 100x200mm. Η δυναμικότητα του συστήματος είναι μεγάλη

και φτάνει έως και 16t/ώρα. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του όγκου, εύκολη αποθήκευση και μεταφορά. Στη συνέχεια ακολουθεί ο κύριος τεμαχισμός με μικρότερη δυναμικότητα έως 10t/ώρα και με τελικά τεμάχια της τάξης 50 - 100mm. Συνήθως ο τεμαχισμός επιτυγχάνει τη παραγωγή τεμαχίων μεγεθών 50x50mm έως 50x150mm, τα οποία οδηγούνται απ' ευθείας στο δεύτερο βήμα τη κοκκοποίηση. Για να αποφευχθεί η τοποθέτηση του δεύτερου τεμαχιστή, για λόγους οικονομίας, και για να επιτευχθεί το κατάλληλο μέγεθος για περαιτέρω επεξεργασία τοποθετείται ταξινομητής μεγέθους (κόσκινο τύπου δίσκων), ο οποίος διαχωρίζει τα μεγέθη και επανατροφοδοτεί για δεύτερο « κόψιμο » τα μεγαλύτερα τεμάχια.

**Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά τεμαχιστών [6]**

Διαστάσεις χώρου Τεμαχισμού (mm)	Ισχύς (KW)	Βάρος (t)	Δυναμικότητα (t/h)
1300x1100	60 – 150	16	6 – 12
1510x1100	60 – 150	18	8 – 15
2010x1100	60 - 150	22	15 - 30

**i. ΚΟΚΚΟΠΟΙΗΣΗ**

Μετά τον τεμαχισμό ακολουθούν διαδοχικά βήματα κοκκοποίησης για τη μείωση του μεγέθους τεμαχίων όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 4 :Τα διαδοχικά βήματα της κοκκοποίησης. Η επιλογή 2 προσφέρει τη δυνατότητα μεγαλύτερης ωριαίας παραγωγής. Τα διαδοχικά βήματα παρέχουν ταυτόχρονα την ευελιξία παραλαβής μεγεθών τα οποία έχουν ζήτηση σε δεδομένη χρονική στιγμή π.χ. 3 - 4mm για κάλυψη ταρτάν αθλητικών εγκαταστάσεων ή 1 - 2mm για ανάμιξη με την άσφαλο. [6]**

	<b>Επιλογή I</b>	<b>Επιλογή II</b>
Βήμα 1	Από 50mm σε < 20mm	Από 50mm σε < 30mm
Βήμα 2	Από 20mm σε < 8mm	Από 30mm σε < 16mm
Βήμα 3	Από 8mm σε < 4mm	Από 16mm σε < 10mm
Βήμα 4		Από 10mm σε < 4mm

Η επιλογή του αριθμού των βημάτων κοκκοποίησης εξαρτάται και από την επιθυμητή παραγωγή ανά ώρα. Στην έξοδο εκάστου κοκκοποιητή τοποθετούνται μαγνητικοί διαχωριστές και κόσκινα για τον διαχωρισμό των ατσαλοσυρμάτων και των ιών σε όποιο στάδιο θεωρείται ότι είναι μηχανικά βέλτιστο και οικονομικά συμφέρων ο διαχωρισμός, συνήθως σε κοκκομετρία

κάτω των 20mm. Για τα ελαστικά χρησιμοποιείται συνήθως κοκκοποιητής ταχύτητας 300 στροφών ανά λεπτό με εξερχόμενα τεμάχια 4mm - 30mm και μεγάλης δυναμικότητας.

## ii. ΑΛΕΣΗ

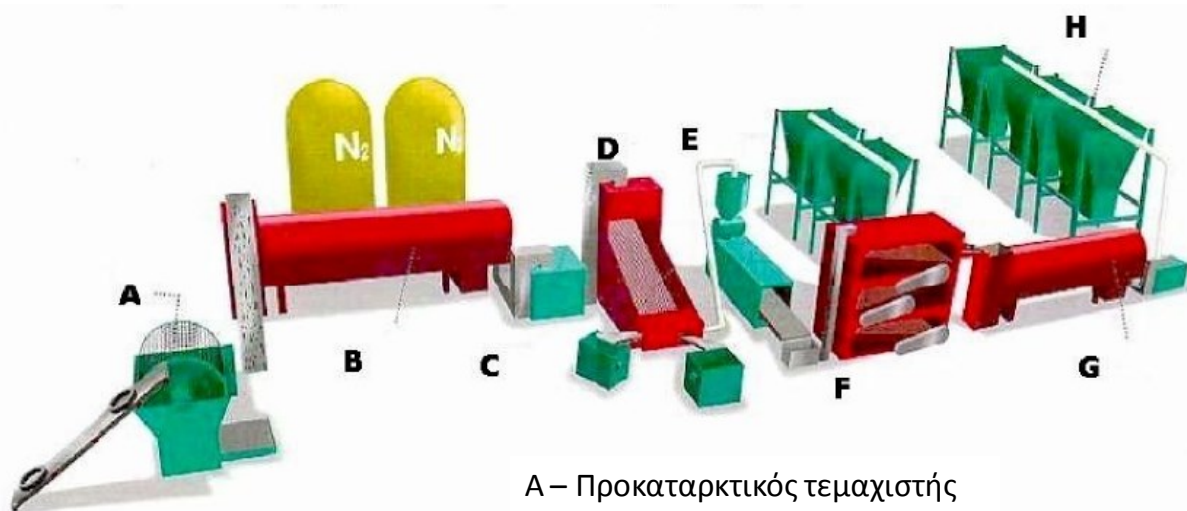
Στο στάδιο της άλεσης τα εξερχόμενα από το τελευταίο εν σειρά κοκκοποιητή οδηγούνται σε μύλο για τη μείωση του μεγέθους από 10mm σε κόκκους μικρότερους των 4mm.

Ο μηχανικός τεμαχισμός παράγει θόρυβο, σκόνη και απαιτεί κατανάλωση μεγάλης ποσότητας ενέργειας (120-125 kWh/t). Τα μηχανήματα πρέπει να είναι εξοπλισμένα με κατάλληλα συστήματα αποκονίωσης, συστήματα πυροπροστασίας και άμεσης διακοπής λειτουργίας σε περίπτωση κινδύνου, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η υγεία και η ασφάλεια των εργαζομένων. Η χρήση ενισχυμένων παπουτσιών, γαντιών, κράνους και προστατευτικών για τα μάτια και αυτιά είναι υποχρεωτικά. Επίσης πρέπει να υπάρχει ένας χώρος για την αποθήκευση του τρίματος ελαστικού, που θα προστατεύεται από το φως του ήλιου.

### 2.3.2 ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗ ΑΛΕΣΗ

Στη κρυογενική επεξεργασία ολόκληρα ελαστικά ή τεμάχια 50mm ή μικρότερα, ψύχονται σε θερμοκρασία κάτω από  $-80^{\circ}\text{C}$  έως  $-120^{\circ}\text{C}$ . Σε αυτή τη θερμοκρασία το ελαστικό γίνεται ψαθυρό και η μείωση του μεγέθους πραγματοποιείται ευκολότερα.

Η προκαταρκτική επεξεργασία τεμαχισμού πραγματοποιείται όπως και στη μηχανική επεξεργασία. Τα τεμάχια μεγέθους 50mm τροφοδοτούνται σε τούνελ ψύξης συνεχούς λειτουργίας σε θερμοκρασία κάτω από  $-120^{\circ}\text{C}$  και αμέσως διοχετεύονται σε υψηλής ταχύτητας σφυρόμυλο. Στο σφυρόμυλο παράγεται ένα ευρύ φάσμα μεγεθών κόκκων από 10mm έως 0.2mm και ταυτόχρονα απελευθερώνονται τα ατσαλοσύρματα και οι ίνες τα οποία διαχωρίζονται όπως και στη μηχανική επεξεργασία. Επειδή οι κόκκοι ελαστικού έχουν πολύ χαμηλή θερμοκρασία στην έξοδο από το σφυρόμυλο, διοχετεύονται σε ξηραντήριο και έπειτα ταξινομούνται σε διάφορα μεγέθη.



- A – Προκαταρκτικός τεμαχιστής
- B – Διάδρομος ψύξης
- C – Σφαιρόμυλος
- D – Αφαίρεση σιδήρου και ινών
- E – Ξηραντής
- F – Ταξινομητής
- G – Δεύτερο βήμα άλεσης
- H – Σιλό αποθήκευσης προϊόντος

Πηγή: Reschner (2006)

**Εικόνα 12: Κρυογονική άλεση (-80°C με -120°C) [7]**

Σε περίπτωση όταν υπάρχει ζήτηση των κόκκων ελαστικού τάξης μεγέθους μικρότερη των 0.6mm πραγματοποιείται ένα δεύτερο στάδιο κοκκοποίησης όπου οι κόκκοι μεγέθους άνω του 1mm τροφοδοτούνται ξανά σε τούνελ ψύξης ώστε να επαναληφθεί η διαδικασία και να επιτευχθεί το ζητούμενο μέγεθος.

Συνεπώς ανάλογα με το μέγεθος των τελικών προϊόντων αυτά διακρίνονται σε:

- Τεμάχια ελαστικού (μέγεθος τεμαχίων : 40 - 300mm)
- Τσιπς ελαστικού (μέγεθος: 10mm - 50mm) και
- Τρίμμα ελαστικού (μέγεθος τρίμματος: 1mm - 10 mm)
- Πούδρα ελαστικού (μέγεθος κόκκων 0 mm-1 mm)

Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι το κόστος, επειδή η διεργασία ξεκινά με τα τσιπς ελαστικού, οπότε στο κόστος της αρχικής άλεσης προστίθεται και το κόστος του υγρού αζώτου. Η διεργασία απαιτεί επιπρόσθετα μέτρα ασφάλειας προς αποφυγή των εργατικών ατυχημάτων.

Στους πίνακες που ακολουθούν απεικονίζονται τα προϊόντα που παράγονται κατά την επεξεργασία των ελαστικών και οι πιθανές χρήσεις αυτών.



**Πίνακας 5: Χρήσεις των τελικών προϊόντων της ανακύκλωσης των ελαστικών [6]**

Στάδιο Επεξεργασίας	Χρήσεις – Διάθεση υλικών
<b>Προ-τεμαχισμός (Pre-shredding)</b>	Καύση, υλικά κατασκευών, τεχνητές επιφάνειες, σταθεροποιητές, ηχομονώσεις, διάθεση σε ΧΥΤΑ
<b>Τεμαχισμός (Shredding)</b>	Αποχετεύσεις, μονώσεις, υλικά για πλήρωση κενών
<b>Μηχανική κοκκοποίηση/ άλεση (Granulators/ Cutting mills)</b>	Αθλητικές εγκαταστάσεις και δάπεδα, στρώματα, τροχοί, πλακάκια, παγκάκια, υλικά για στέγες, ασφαλτοστρώσεις, υλικά οδοπροστασίας
<b>Κρυσταλλική κοκκοποίηση</b>	Σόλες παπουτσιών, αθλητικός εξοπλισμός, επικάλυψη καλωδίων, μέρη αυτοκινήτου, επιστρώσεις, πλακάκια, αντιολισθητικά, δάπεδα παιδότοπων, οδοσήματα κλπ.

**Πίνακας 6: Βαθμός επεξεργασίας των ελαστικών [6]**

Βαθμός επεξεργασίας	Ποσοστό	Χρήσεις
Παραγωγή κόκκων	63%	Κάλυψη αθλητικών επιφανειών. Γήπεδα ποδοσφαίρου κ.α. Πρόσθετο στην άσφαλο.
Τεμάχια	12%	Έργα πολιτικού μηχανικού, έργα αποχέτευσης, θερμικές – ηχητικές μονώσεις, υποστρώματα
Ολόκληρα ελαστικά	10%	Έργα πολιτικού μηχανικού: Έργα ακτών, σιδηροτροχιών, τοιχώματα και βάσεις ΧΥΤΑ
Πούδρα	8%	Πρώτη ύλη βιομηχανικών προϊόντων: πλακίδια δαπέδων, ηχομονωτικά υλικά, αντικραδασμικές βάσεις, υλικά οδοσημάτων, εξαρτήματα αυτοκινήτων
Ειδικές εφαρμογές	5%	-  -
Διάφορα	2%	-  -

## 2.4 ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΕΡΓΑ ΧΥΤΑ

Σύμφωνα με τη νομοθεσία (29407/3508/2002 ΚΥΑ «Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων») δεν επιτρέπεται να πετάγονται στο περιβάλλον ή να μεταφέρονται σε

χώρους ταφής σκουπιδιών ολόκληρα ή τεμαχισμένα μεταχειρισμένα ελαστικά οχημάτων. Εξαιρέση αποτελούν τα υλικά που προορίζονται για χρήση σε κατασκευαστικά έργα εντός του ΧΥΤΑ/ΧΥΤΥ όπως τα παρακάτω:

- Συλλογή στραγγισμάτων
- Προστατευτικό στρώμα των γύρω τοιχωμάτων
- Στρώμα λεκάνης απορροής
- Καθημερινή κάλυψη του χώρου
- Προσωρινοί δρόμοι
- Μπάλες ελαστικών στους δρόμους

Στις παραπάνω εφαρμογές χρησιμοποιούνται ολόκληρα ελαστικά (κομμάτια πάνω από 300 mm), τεμαχισμένα ελαστικά (50 mm – 300 mm) και τσιπς ελαστικού (10 mm-50 mm). Η επιλογή του μεγέθους εξαρτάται από το κόστος επεξεργασίας και μεταφοράς, τη διαθεσιμότητα και περιβαλλοντικές προϋποθέσεις για το χώρο χρήσης τους. Εξαρτάται επίσης από τον συγκεκριμένο χώρο υγειονομικής ταφής και τις νομικές προϋποθέσεις [8].

## **2.5 ΠΡΟΣΘΕΤΟ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΕΛΑΦΟΥΣ**

Τα ελαστικά χρησιμοποιούνται ως ελαφρύ πρόσθετο σε μεγάλο εύρος έργων όπως:

- πρόσθετο σε κατασκευές αντιστήριξης και αναχώματα
- πρόσθετο σε αντερείσματα γεφυρών
- σταθεροποιητής σε πρηνή εδαφών αντικαθιστώντας τα αδρανή υλικά και τα χαλίκια

Στις εφαρμογές αυτές χρησιμοποιούνται ολόκληρα ελαστικά (κομμάτια πάνω από 300 mm), τεμαχισμένα ελαστικά (50 mm – 300 mm) και τσιπς ελαστικού (10 mm-50 mm).

## **2.6 ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΑ ΕΡΓΑ**

Η αντοχή και η σταθερότητα των ελαστικών προσφέρονται για τη χρήση τους στις ακτές και στα ποτάμια, με σκοπό να απορροφούν την ενέργεια του κινούμενου νερού, είτε αυτό είναι παλιρροϊκό είτε του ποταμιού, είτε της βροχής. Ελαστικά έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί στην αποκατάσταση διαβρωμένων ρείθρων και μικρών φαραγγιών μέσω γεμίματος καθώς και στην κατασκευή προστατευτικών τοιχίων διάβρωσης.

## **2.7 ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΑ**

Τα ηχοπετάσματα κατασκευασμένα από λάστιχα μπορούν να μειώσουν τα επίπεδα θορύβου στις μεγάλες οδούς ταχείας κυκλοφορίας. Σε αυτά γίνεται χρήση ολόκληρων και τεμαχισμένων ελαστικών. Μερικά ηχοπετάσματα κατασκευάζονται από ειδικές ματ επιφάνειες που φτιάχνονται από κόκκους ελαστικού.

## **2.8 ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ**

Τα τεμαχισμένα ελαστικά και τσιπ χρησιμοποιούνται ως θερμομονωτικό υλικό. Η θερμική αντίσταση των ελαστικών είναι επτά με οκτώ φορές μεγαλύτερη από ότι του χαλικιού. Σε χώρες με μέσες και πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, χρησιμοποιούνται για μόνωση δρόμων και άλλων συναφών κατασκευών, κάτω από την ασφάλτο για αποφυγή ρωγμών λόγω ψύχους και ως πρόσθετο στην κατασκευή των σωληνώσεων νερού.

## **2.9 ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΙΚΑ ΑΓΑΘΑ**

Η χρήση ελαστικών σε μορφή πούδρας ή τριμάτων έχει αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία χρόνια στην βιομηχανική αγορά καλύπτοντας μεγάλο πλήθος εφαρμογών όπως τεχνητοί χλοοτάπητες, δάπεδα αθλητικών και παιδικών χώρων, μέχρι και παρασκευή μικρότερων αντικειμένων όπως σόλες παπουτσιών.

### **-Τεχνητός χλοοτάπητας:**

Στην παρασκευή του τεχνητού χλοοτάπητα χρησιμοποιούνται συνήθως τα τρίματα ελαστικού είτε ως πρόσθετά σε τεχνητά αθλητικά δάπεδα, είτε στην κατασκευή των ελαστικών επικαλύψεων. Ένας κανονικός χλοοτάπητας γηπέδου περιέχει 100-130 τόνους ελαστικού τρίματος. Αν προστεθεί και ελαστική επικάλυψη χρειάζονται 60-80 επιπλέον τόνοι τρίματος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα αθλήματα όπως ποδόσφαιρο, χόκεϊ και δε χρειάζονται πότισμα. Κατασκευάζεται σε σχετικά χαμηλές τιμές σε όλα τα μέρη του κόσμου και οι ρυθμοί ανάπτυξης της συγκεκριμένης αγοράς έχουν αυξηθεί κατά 25% από το 2001 και αναμένεται να συνεχιστούν έτσι.

### **-Δάπεδα αθλητικών χώρων και παιδικών χαρών**

Το τρίμα ελαστικού είναι ιδιαίτερα ελκυστικό για δάπεδα αθλητικών χώρων και παιδικών χαρών λόγω των ιδιοτήτων της ελαστικότητάς του και του μειωμένου παραγόμενου θορύβου. Τα τρίματα αναμιγνύονται με πολυουρεθάνη και το πάνω στρώμα συνήθως βάφεται. Η Ευρωπαϊκή ένωση έχει θεσπίσει πρότυπα (EN 1177) σχετικά με την απαραίτητη ελαστικότητα δαπέδων σε δημόσιες παιδικές χαρές.

## **2.10 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΡΟΜΩΝ**

Την κυριότερη εφαρμογή των φθαρμένων ελαστικών σε έργα Πολιτικού Μηχανικού, παγκοσμίως, αποτελεί η προσθήκη τους σε ασφαλτομίγματα, η οποία πραγματοποιείται τα τελευταία 30-40 χρόνια με σκοπό τη βελτίωση ιδιοτήτων των παραγόμενων ασφαλτομιγμάτων [9].

Τα τρίματα ελαστικού μπορούν να ενσωματωθούν στα ασφαλτομίγματα με δύο μεθόδους:

- Υγρή διαδικασία
- Ξηρή διαδικασία

Κατά την υγρή διαδικασία τα τρίματα δρουν ως τροποποιητές ασφάλτου, ενώ κατά την ξηρά διαδικασία τσιπς, τρίματα ή πούδρα ελαστικών χρησιμοποιούνται ως λεπτόκοκκο κλάσμα των αδρανών.

Η υγρά μέθοδος έχει εφαρμοστεί στα ασφαλτικά μίγματα που παρασκευάζονται εν θερμώ αλλά και στις ασφαλτικές επαλείψεις. Πραγματοποιείται η διασπορά του ελαστικού στην άσφαλτο και στην συνέχεια προστίθενται και τα αδρανή. Συνίσταται η προσθήκη πούδρας ελαστικού (διαβαθμίσεως έως 4,75 mm) στην άσφαλτο σε αναλογία 18-25 %, πριν την προσθήκη στα αδρανή. Το παραγόμενο προϊόν από την ανάμιξη ονομάζεται λαστιχάσφαλτος (rubber asphalt).

Η υγρά μέθοδος είναι η περισσότερο διαδεδομένη μέθοδος παραγωγής ασφαλτομιγμάτων ενώ έχουν πραγματοποιηθεί σχετικές μελέτες παγκοσμίως με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η εφαρμογή της στις ΗΠΑ ξεκίνησε ήδη από το 1970 και βαθμιαία οι διάφορες Πολιτειακές Αρχές Συγκοινωνιακών Έργων ανέπτυξαν μεθοδολογίες παραγωγής και προδιαγραφές.

Από τις μέχρι σήμερα εφαρμογές στις ΗΠΑ έχουν συνταχθεί τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Παρατηρήθηκε βελτιωμένη επίδοση σε σχέση με τα συμβατικά ασφαλτομίγματα εν θερμώ στους περισσότερους κλιματικούς τύπους. Επιστρώσεις πυκνής σύνθεσης με ενσωμάτωση λαστιχασφάλτου μπορούν να έχουν τις ίδιες επιδόσεις με στρώσεις συμβατικών

μιγμάτων μεγαλύτερου πάχους. Στρώσεις κυκλοφορίας με ανοικτές συνθέσεις λαστιχασφάλτου έχουν επιδείξει μεγαλύτερη αντοχή σε διάρκεια έναντι στρώσεων συμβατικών μιγμάτων.

- Γενικώς το κόστος της τροποποιημένης με πούδρα ελαστικού ασφάλτου είναι 1,5 έως 2,0 φορές μεγαλύτερο εκείνου της συνήθους ασφάλτου. Με την άνοδο της τιμής του πετρελαίου διεθνώς (και αντίστοιχα της ασφάλτου) η σχέση αυτή κόστους είναι σήμερα ευνοϊκότερη.

Κατά συνέπεια για την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας απαιτείται διερεύνηση και συνεκτίμηση παραγόντων όπως:

- Κόστος παραγωγής λαστιχασφάλτου έναντι κοινής ή τροποποιημένων με πολυμερή ασφάλτων.
- Κόστος κατασκευής στρώσεων ισοδύναμου ως προς την επίδοση στρώσεων.
- Συγκριτική αξιολόγηση ανθεκτικότητας στρώσεων υπό διάφορες κλιματολογικές συνθήκες.
- Περιβαλλοντικό κόστος διάθεσης πλεοναζόντων προϊόντων ανακύκλωσης ελαστικών.

Όσον αφορά τη **ξηρή μέθοδο** το ελαστικό αναμιγνύεται με τα αδρανή και το προκύπτων μείγμα αφού θερμανθεί αναμιγνύεται με την άσφαλτο. Συγκριτικά με την υγρή μέθοδο, η ξηρή μέθοδος έχει ερευνηθεί λιγότερο. Ωστόσο με τη μέθοδο αυτή υπάρχει η δυνατότητα απορρόφησης μεγαλύτερων ποσοτήτων φθαρμένων ελαστικών συγκριτικά με την υγρή μέθοδο, με περισσότερα περιβαλλοντικά οφέλη. Τα αποτελέσματα μελετών σχετικά με αυτή την προσθήκη αναμένεται να είναι θετικά.

Επισημαίνεται πάντως ότι η τεχνολογία ανάμιξης πούδρας ελαστικού – ασφάλτου στην χώρα είναι μάλλον ελλιπής. Σε γενικές γραμμές για την παραγωγή της λαστιχασφάλτου απαιτείται μονάδα ανάμιξης / χημικός αντιδραστήρας με κατάλληλες δοσομετρικές διατάξεις για την συνεχή και ομοιόμορφη προσθήκη ασφάλτου, πούδρας ελαστικού και λοιπών τροποποιητικών παραγόντων (modifiers). Η διαδικασία ανάμιξης / αντίδρασης, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, γίνεται σε θερμοκρασία από 165 έως 205°C και διαρκεί από 10-15 min έως και 2 ώρες, ανάλογα με τον τύπο και την κοκκομετρία της πούδρας του ελαστικού (crump rubber). Λόγω του αυξημένου ιξώδους της λαστιχασφάλτου η θερμοκρασία του ασφαλοσκυροδέματος θα πρέπει να είναι 150-180°C, για την εξασφάλιση επαρκούς εργασιμότητας και την διάστρωση και συμπύκνωση του τάπητα.

Ένα άλλο θέμα που πρέπει να αντιμετωπισθεί είναι οι μελέτες συνθέσεως των ασφαλομιγμάτων, οι οποίες, βέβαια, εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της τροποποιημένης

με πούδρα ελαστικού ασφάλτου (ιξώδες, σκληρότητα, μέτρο ελαστικότητας, μόνιμη παραμόρφωση, θερμικές ρηγματώσεις, αντοχή σε γήρανση). Απαιτείται κατά συνέπεια η εξασφάλιση μονάδος (μονάδων) ανάμιξης / αντίδρασης (άρα εξασφάλιση μιας ελάχιστης απορρόφησης προϊόντος για να είναι βιώσιμη η επένδυση και η εκτέλεση ενός πλήρους προγράμματος εργαστηριακών δοκιμών για την επιλογή καταλλήλων συνθέσεων για διάφορες εφαρμογές.

## **2.11 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ**

### **2.11.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Εκτός από τους προαναφερόμενους τρόπους διαχείρισης των χρησιμοποιημένων ελαστικών μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ενεργειακή αξιοποίηση τους. Είδη κάποια από αυτά εφαρμόζοντα στην βιομηχανίας ενώ αλλά βρίσκονται σε πειραματικά στάδια.

Ένας άλλος τρόπος εναλλακτικής διαχείρισης των χρησιμοποιημένων ελαστικών είναι η ενεργειακή αξιοποίησή τους μέσω συναποτέφρωσης σε τσιμεντοβιομηχανίες, εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εργοστάσια παραγωγής χάλυβα και ασβέστη. Ο στόχος δεν είναι η απόθεση σε αυτές τις εγκαταστάσεις των απόβλητων ελαστικών αλλά η υποκατάσταση του κύριου καυσίμου μέχρι ένα ποσοστό. Σύμφωνα με τις υφιστάμενες μελέτες για τη χρήση ελαστικών στην τσιμεντοβιομηχανία δεν προκύπτει συγκεκριμένο περιβαλλοντικό ζήτημα σε σχέση με τους ρύπου που προκύπτουν από την καύση των ελαστικών. Θα πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι οι εγκαταστάσεις καύσης που εφαρμόζουν την συναποτέφρωση ελαστικών υπάγονται στην οδηγία για την αποτέφρωση των απορριμμάτων (2000/76 EC).

### **2.11.2 ΣΥΝΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗ ΣΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**

Η διαδικασία παρασκευής τσιμέντου είναι ιδιαίτερα συνθέτη. Για την παρασκευή του απαιτείται μεγάλη ποσότητα πρώτης ύλης, διάφορες τεχνικές πυροεπεξεργασίας, καθώς και μεγάλη κατανάλωση θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαδικασία αυτή απαιτεί περίπου 3.2 - 6.3 GJ θερμικής ενέργειας και 1,7 τόνους πρώτης ύλης (κυρίως ασβεστόλιθο) ανά τόνο παρασκευής κλίνκερ [10]. Η θερμική ενέργεια που καταναλώνεται κατά την παραγωγή τσιμέντου αντιστοιχεί περίπου στο 20%-25% του κόστους της παραγωγής. Η τυπική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μιας σύγχρονης τσιμεντοβιομηχανίας είναι περίπου 110-120

kWh ανά τόνο τσιμέντου. Κατά τη επεξεργασία η θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως κατά την καύση, ενώ το μέγιστο μερίδιο ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την άλεση τσιμέντου [11].

Μέχρι τη δεύτερη πετρελαϊκή κρίση, τα κύρια καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία παγκοσμίως ήταν το πολύ βαρύ πετρέλαιο (μαζούτ), καθώς και το φυσικό αέριο, στις περιοχές που ήταν διαθέσιμο. Με τη ραγδαία αύξηση των τιμών των καυσίμων αυτών, προέκυψε η αναγκαιότητα για φθηνότερη ενέργεια και η λύση βρέθηκε στη χρήση των στερεών καυσίμων (αρχικά γαιάνθρακας και αργότερα πετρελαϊκό κοκ). Η προσαρμογή της τσιμεντοβιομηχανίας στα στερεά καύσιμα έγινε ταχύτατα και με θετικές επιπτώσεις, τόσο στην οικονομικότητα της παραγωγής, όσον και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της λειτουργίας των εργοστασίων (μειωμένες εκπομπές SO<sub>2</sub> & NO<sub>x</sub>). Η εφαρμογή της πολιτικής για την διαχείριση των αποβλήτων, δημιούργησε την αναγκαιότητα ανάπτυξης βιομηχανιών θερμικής κατεργασίας για ένα πολύ μεγάλο όγκο υλικών που περιέχει ενέργεια και που θα πρέπει να αξιοποιηθεί ή να καταστραφεί με καύση. Πλην όμως οι βιομηχανίες αυτές δεν είναι δυνατόν να θεωρηθούν ως ενεργειακά αποδοτικότερες, περιβαλλοντικά ασφαλέστερες και οικονομικά προσφορότερες. Με το δεδομένο αυτό και λαμβάνοντας υπόψη ότι η τσιμεντοβιομηχανία προσφέρει μια κατάλληλη τεχνολογία για την ασφαλή-οικονομική και περιβαλλοντικά πιο ωφέλιμη λύση, αναπτύσσεται μια νέα εναλλακτική λύση στο πρόβλημα της διάθεσης διαφόρων υλικών. Υλικά, όπως τα παλαιά ελαστικά αυτοκινήτων, μη ανακυκλώσιμα χαρτιά και πλαστικά τα χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια, λάσπες βιολογικών καθαρισμών, απόβλητα και παραπροϊόντα γεωργικών καλλιεργειών, κλπ., που περιέχουν σημαντικό ποσοστό ενέργειας, αξιοποιούνται στην τσιμεντοβιομηχανία εδώ και αρκετά χρόνια.

**Πίνακας 7: υλικά που χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικά καύσιμα από τις βιομηχανίες τσιμέντου[12]**

<b>Βιομηχανικά απόβλητα</b>	Πετρελαιοειδή, λιπαντικά, ιλύς από την παραγωγή ασφάλτου, απόβλητα χημικής βιομηχανίας, απόβλητα άνθρακα από μονάδες παραγωγής λιπασμάτων, διαλύτες
<b>Συνθετικά υλικά</b>	Επαναχρησιμοποιημένα ελαστικά, πλαστικά πολυμερή, σκόνη από την παραγωγή γραφίτη, χρησιμοποιημένες μπαταρίες
<b>Γεωργικά απόβλητα</b>	Παραπροϊόντα από αποφλοιώση ρυζιού, σιτηρών, καρύδας κακάο, παραπροϊόντα της βιομηχανίας ξύλου και χάρτου, παραπροϊόντα της βιομηχανίας τροφίμων

Οι υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται στην παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου, οι οξειδωτικές συνθήκες, οι μεγάλοι χρόνοι παραμονής των καυσαερίων, οι μεγάλες απαιτήσεις θερμικής ενέργειας καθώς και η γεωγραφική διασπορά των μονάδων της τσιμεντοβιομηχανίας

και το νομοθετικό πλαίσιο που καθορίζεται με την Οδηγία Ε.Ε 2000/76, καθιστούν την συναποτέφρωση επιλεγμένων αποβλήτων στην τσιμεντοβιομηχανία μία οικονομική και περιβαλλοντικά ασφαλή εναλλακτική λύση στο πρόβλημα της διάθεσης αποβλήτων.

Η υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, η υψηλή θερμογόνο ικανότητα 35.6 MJ/kg [13], χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και χαμηλό κόστος κάνει τα χρησιμοποιημένα ελαστικά ένα από τα πιο δημοφιλείς εναλλακτικό καύσιμο στις τσιμεντοβιομηχανίες σε όλο το κόσμο.

Τα ελαστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο είτε ολόκληρα, είτε τεμαχισμένα. Η χρήση του ολόκληρου ελαστικού έχει ένα σιν που μπορεί να αντισταθμίσει το κόστος μεταφοράς [14]. Τα ενισχυμένα σύρματα των ελαστικών μπορεί να αντικαταστήσουν την πρώτη ύλη παρασκευής του κλίνκερ που περιέχει σίδηρο[13]. Αναφέρεται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη χημική σύνθεση του κλίνκερ που παρασκευάζεται με χρήση των ελαστικών ως καύσιμο, σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα [15]. Τα ολόκληρα ελαστικά δεν απαιτούν κόστος επεξεργασίας μόνο κόστος απόκτησης τους. Μεταφορά αποθήκευση και διαχείρισης ολόκληρων ελαστικών απαιτούν περισσότερη υλικοτεχνική φροντίδα και χειρωνακτική εργασία καθώς παρουσιάζουν δυσκολία στην αυτοματοποίηση [16].

Τα τεμαχισμένα ελαστικά μπορούν να τροφοδοτούνται μηχανικά και ο ρυθμός τροφοδοσίας να είναι ελεγχόμενος, όμως ο τεμαχισμός και η απομάκρυνση του χάλυβα από τα ελαστικά αποτελεί επιπλέον κόστος.

Η σύνθεση των ελαστικών ποικίλει ανάλογα με την προέλευσης και τα επίπεδα των ενισχυτικών υλικών τους. Τελική ανάλυση των ελαστικών σε σύγκριση με λιθάνθρακα αναφέρονται στο παρακάτω πίνακα. Διαπιστώνεται ότι η τιμή της θερμογόνου δύναμης του ελαστικό είναι υψηλότερη από την τιμή του λιθάνθρακα.

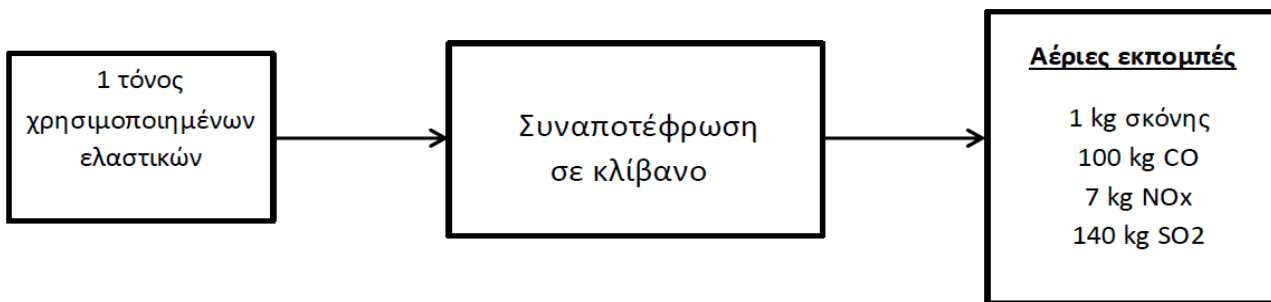
**Πίνακας 8: Τελική ανάλυση των ελαστικών και του λιθάνθρακα [17]**

Τύπος καυσίμου	Επιβατικά ελαστικά	Ελαστικά φορτηγών	Καύσιμο παραγόμενο από ελαστικά	Λιθάνθρακας
Θερμογόνος δύναμη (MJ/kg)	36.774	34.743	36.414	31.475
ποσοστό κατά βάρος (%)				
C (άνθρακας)	89,48	89,65	89,51	75,8
H (υδρογόνο)	7,61	7,50	7,59	5,1
O (οξυγόνο)	<0,01	<0,01	<0,01	8,2
N (νάτριο)	0,27	0,25	0,27	1,5
S (θειό)	1,88	2,09	1,92	1,6
Cl (χλώριο)	0,07	0,06	0,07	
Τέφρα	3,9	5,5	4,2	7,8



Αν και η χρήση των ελαστικών, ως εναλλακτικό καύσιμο, μειώνει την κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων υπάρχει ένα άλλο σοβαρό ζήτημα που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν όπως οι εκπομπές καυσαερίων. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες όσο αφορά τις περιβαλλοντικές επίπτώσεις και υπάρχουν αντιφατικά αποτελέσματα για εκπομπές SO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub> κατά τη χρήση των ελαστικών ως καύσιμο στην κατασκευή τσιμέντου. Σε μια ιταλική τσιμεντοβιομηχανία αναφέρετε αύξηση εκπομπών SO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub> όταν πραγματοποιείται η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με ελαστικά έως και 20% [18]. Αντίθετα κατά την μελέτη ενός καναδέζικου εργοστασίου παραγωγής τσιμέντου, που χρησιμοποιούσε ως καύσιμο τεμάχια ελαστικών και γαιάνθρακα, παρατηρήθηκε μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> και αύξηση των εκπομπών SO<sub>2</sub>, [19]. Άλλες μελέτες υποστηρίζουν ότι η εκπομπή NO<sub>x</sub> μειώνεται όταν ως εναλλακτικό καύσιμο χρησιμοποιούνται ολόκληρα τα ελαστικά [20,21].

**Σχήμα 13: αέριες εκπομπές κατά την καύση ελαστικών[22].**



Διαφωνία στις απόψεις επίσης παρουσιάζεται και στις εκπομπές των διοξινών και φουρανίων . Σε πραγματικό εργοστάσιο έδειξε ότι οι εκπομπές διοξινών και φουρανίων αυξήθηκε κατά τη χρήση ελαστικών ως εναλλακτικό καύσιμο [23]. Αντίθετα στο καναδέζικο εργοστάσιο[19] διαπίστωσε ότι η χρήση άχρηστων ελαστικών σε κλιβάνους τσιμέντου μείωσε το ποσοστό των διοξινών και φουρανίων που εκπέμπονται. Ωστόσο στην ιταλική τσιμεντοβιομηχανία [18] αναφερθεί ότι οι εκπομπές διοξινών και φουρανίων παρέμειναν αμετάβλητη (και πολύ κάτω από το όριο).

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι εκπομπές CO (μονοξείδιο του άνθρακα) και HCl (Υδροχλωρικού οξύ) βρεθήκαν να είναι υψηλότερες από τις κανονικές [19,24]. Οι εκπομπές του Zn (ψευδάργυρος), ο οποίος αναμιγνύεται με το καουτσούκ κατά την παραγωγή του ελαστικού, για τον έλεγχο ρυθμού βουλκανισμού, είναι δυνατόν να αυξηθούν [25].

Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε τις οριακές τιμές εκπομπών των εγκαταστάσεων τσιμεντοβιομηχανίας που χρησιμοποιεί δευτερογενείς πρώτες ύλες και καύσιμα [ΕΕ 94/67, ΚΥΑ 2487/455/199, ΦΕΚ 196/Β/1999].

**Πίνακας 9: οριακές τιμές εκπομπών[26]**

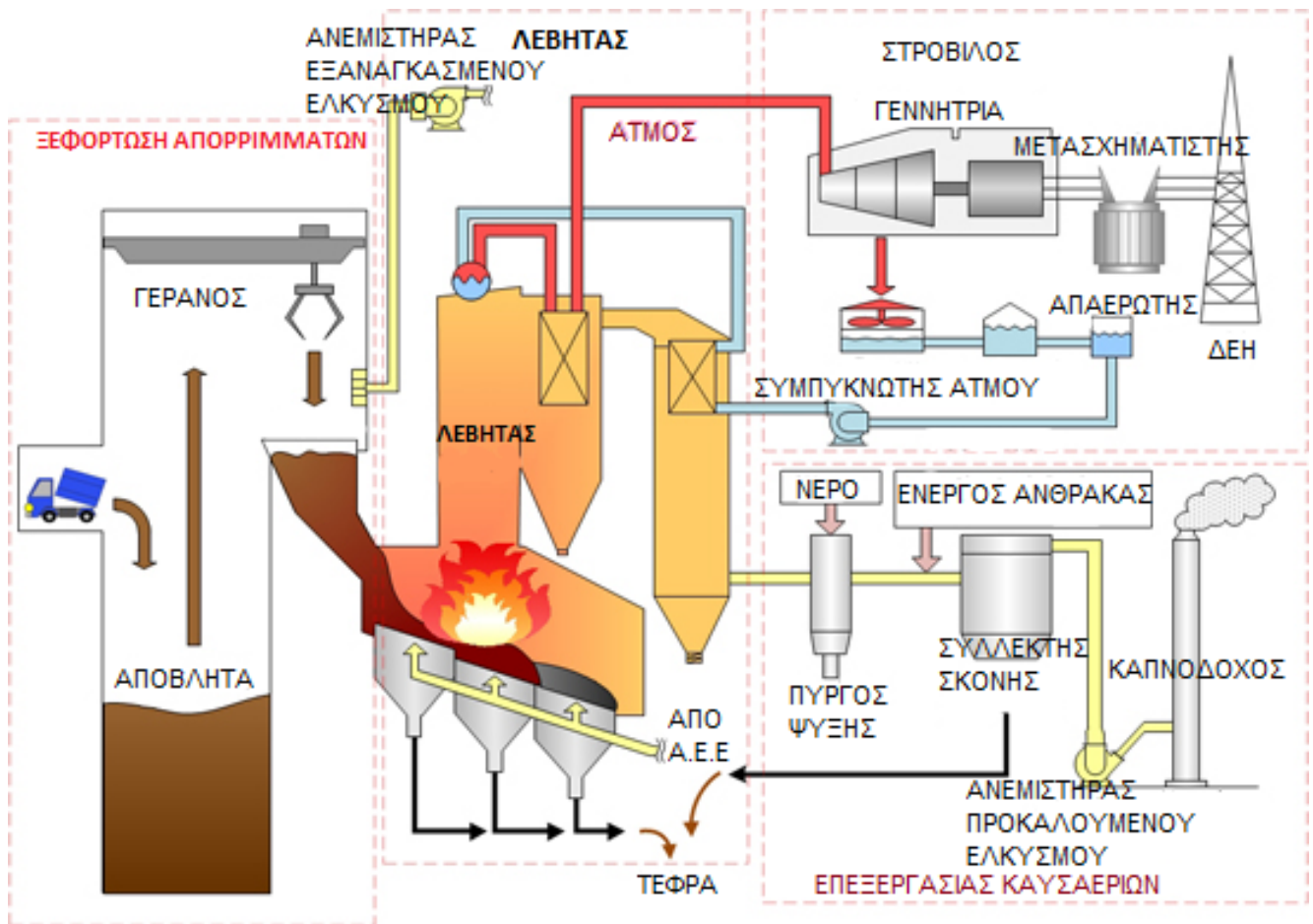
Μετρούμενη παράμετρος	Μέσες ημερήσιες τιμές (mg/m <sup>3</sup> )	Μέσες τιμές ημιώρου (mg/m <sup>3</sup> )
Μονοξειδίο του άνθρακα (CO)	50	-
Ολική σκόνη	10	30
Οργανικές ουσίες υπό τη μορφή αερίων και ατμών (TOC)	10	20
Υδροχλώριο (HCl)	10	60
Υδροφθόριο (HF)	1	4
Διοξείδιο του Θείου (SO <sub>2</sub> )	50	200

### 2.11.3 ΣΥΝΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Άλλη μία ενεργειακή αξιοποίηση χρησιμοποιημένων ελαστικών είναι η συναποτέφρωση τους σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Σύμφωνα με έρευνες η καύση σε υψηλές θερμοκρασίες από 800-1300°C χρησιμοποιείται για την καταστροφή των οργανικών αποβλήτων, μειώνοντας τον όγκο και την τοξικότητα. Ανεξάρτητα από το σκοπό της καύσης, ο έλεγχος εκπομπών πρέπει να εφαρμόζεται αυστηρά, σύμφωνα με τη νομοθεσία. Είναι σημαντικό οι παράμετροι όπως θερμοκρασία καύσης, χρόνος παραμονής, τύρβη (ενδεικτική του βαθμού ανάμιξης του οξυγόνου με τα απόβλητα-όσο μεγαλύτερη ανάμιξη τόσο μεγαλύτερη η καταστροφή των αποβλήτων), συγκέντρωση οξυγόνου και διάμετρος σωματιδίων να ελέγχονται αυστηρά κατά τη διεργασία της καύσης.

Γενικά τα εργοστάσια που καίνε ελαστικά πρέπει να χρησιμοποιούν τις βέλτιστες διαθέσιμες τεχνολογίες με σκοπό την αποφυγή έκλυσης επικίνδυνων ρύπων. Τα καυσαέρια παράγουν στοιχεία με υψηλό επίπεδο τοξικότητας και χρειάζονται ειδική αντιμετώπιση. Οι διοξίνες, τα φουράνια, οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), αποτελούν παραπροϊόντα της διεργασίας καύσης και μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον εάν ελευθερωθούν χωρίς κανέναν έλεγχο στο περιβάλλον. Οι συνθήκες καύσης καθώς και ο έλεγχος εκπομπών πρέπει να συμμορφώνονται πάντα με την εκάστοτε νομοθεσία.

Συνεπώς η καύση ελαστικών είναι μια τεχνολογία που προϋποθέτει σημαντική κεφαλαιακή επένδυση και αντιμετωπίζει μειωμένη αποδοχή από τοπικές κοινωνίες. Η υποκατάσταση του καυσίμου από ελαστικά στις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις, προϋποθέτει περιορισμένη επένδυση κυρίως σε μετρητικό εξοπλισμό ώστε να ελεγχθούν οι επιπλέον ρύποι από την εισαγωγή του ελαστικού στην καύση. Πολύ λίγα εργοστάσια καίνε αποκλειστικά ελαστικά ως κύριο καύσιμο και μερικά από αυτά έχουν αντιμετωπίσει πρόβλημα βιωσιμότητας και έκλεισαν.



Εικόνα 14: Τυπική εγκατάσταση συμπαραγωγής ηλεκτρισμού θερμότητας [27]

### 3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λέξη πυρόλυση είναι μία σύνθετη λέξη ελληνικής προέλευσης. Αποτελείται από τις λέξεις «πυρ» - φωτιά και «λύση» - αναδόμηση δηλαδή είναι μια διαδικασία θερμοχημικής αποσύνθεσης οργανικής ύλης σε υψηλές θερμοκρασίες. Η επεξεργασία αυτή πραγματοποιείται απουσία οξυγόνου. Στην πράξη όμως δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί μια ατμόσφαιρα απόλυτης απουσίας οξυγόνου έτσι ένα μικρό ποσοστό της οξειδωσης λαμβάνει πάντα χώρα.

Συνήθως η θερμοκρασία πυρόλυσης κυμαίνεται στις 250 °C - 500 °C. Πυρόλυση μπορεί να χαρακτηριστεί ως ατμοσφαιρική, υπό κενού, καταλυτική, γρήγορη ή αργή, ανάλογα με τις παραμέτρους λειτουργίας που εφαρμόζονται. Κατά την πυρόλυση πραγματοποιείται αλλαγή χημικής σύνθεσης και της φυσικής φάσης υλικού, και είναι μη αναστρέψιμη.

Η πυρόλυση δεν αποτελεί νέα τεχνολογία, η ανθρωπότητα την χρησιμοποιεί για χιλιάδες χρόνια τώρα. Το παλαιότερο γνωστό παράδειγμα είναι η παρασκευή κάρβουνου, περίπου 38.000 χρόνια πριν, ως καύσιμη ύλη για το μαγείρεμα. Στην εποχή του χαλκού σκόπιμη παραγωγή κάρβουνου χρησιμοποιούτανε για την τήξη μετάλλων, κάτι που ακόμα και σήμερα υφίσταται στην μεταλλουργία σε μεγάλο βαθμό.

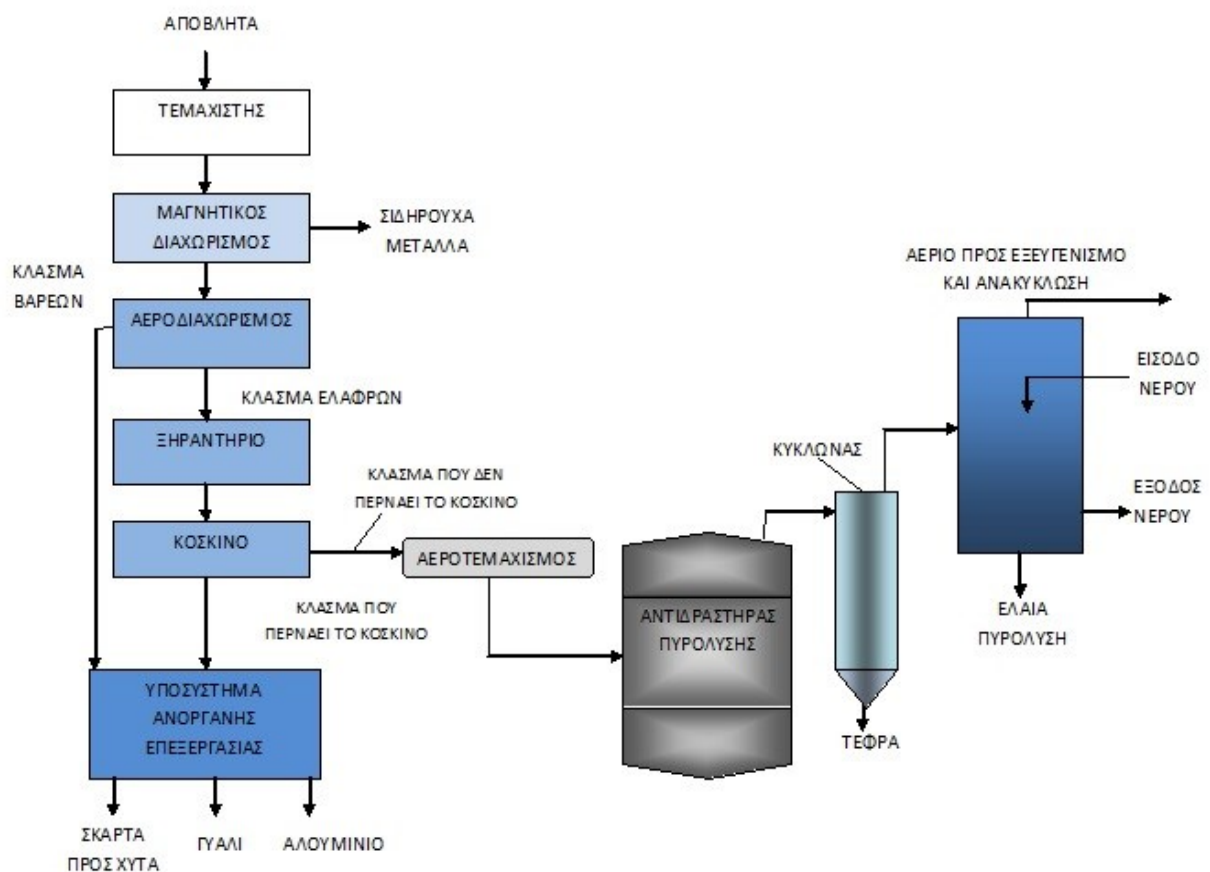
Οι πρώτες αρχές της πυρόλυσης εμφανίστηκαν το 1958 στο εργαστήριο του Bell στην Αμερική. Στη συνέχεια, μια σειρά από πανεπιστήμια και οργανισμούς σε όλο το κόσμο άρχισαν προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης για να εξετάσουν την χρησιμότητα της. Τα πρώτα συστήματα Πυρόλυσης ήταν φούρνοι από πυρότουβλα που χρησιμοποιούσαν έμμεση θερμότητα με χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο. Αυτά τα συστήματα ήταν ασυνεχείς διεργασίας μετά από κάθε παρτίδα, ο φούρνος θα έπρεπε να καθαρίζεται και να ετοιμάζεται για την επόμενη παρτίδα. Οι πρώτες εμπορικές εκδοχές των παραπάνω συστημάτων πυρόλυσης τέθηκαν σε εφαρμογή στο νοσοκομειακό τομέα τις αρχές του 1970, αλλά λόγω της χαμηλής δυναμικότητας όγκου και προβλήματος που παρουσιάστηκε με τα κονιάματα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κλίβανου είχαν περιορισμένη εμπορική επιτυχία. Στα τέλη της δεκαετίας του 70 και στις αρχές της δεκαετίας του 80 εμφανίστηκαν συστήματα συνεχής τροφοδοσίας με ένα σχεδιασμό κώνου που έκανε την απομάκρυνση των καυσαερίων πιο αποτελεσματική. Το σύστημα αυτό πρώτο εμφανίστηκε στην Αγγλία μετά στις ΗΠΑ, τη Γερμανία, την Ιαπωνία, τον Καναδάς και την Ολλανδία.

Πέρα από τις παραπάνω εξελίξεις την δεκαετία του 80 εμφανίστηκε αυξημένη περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης και οι τεχνολογίες αποτέφρωσης τέθηκαν υπό έλεγχο.

Τα περιβαλλοντικά πρότυπα που άρχισαν να εφαρμόζονται απαιτούσαν την προσθήκη του πολύ ακριβού εξοπλισμού για τον καθαρισμό των εκπομπών, αλλά ακόμα κι έτσι τα υποπροϊόντα πυρόλυσης παρέμειναν προβληματικά.

Στα μέσα της δεκαετίας του 80 κάνουν εμφάνιση τα πρώτα πιλοτικά και εμπορικά συστήματα άμεσης πυρόλυσης υπό μορφή αντιδραστήρων σταθερής κλίνης, ρευστοποιημένης κλίνης και υβριδικών σχεδίων. Όμως υπήρχαν προβλήματα στα συστήματα αυτά προερχόμενα από την πρόσμιξη στα υποπροϊόντα τους με επικίνδυνους ρύπους όπως πίσσα και τεφρά

Τα τελευταία 30 χρόνια τα συστήματα πυρόλυσης και οι αδυναμίες τους έχουν υποβληθεί σε μεγάλη έρευνα με αποτέλεσμα δημοσίευση πανεπιστημιακών και κυβερνητικών μελετών και την εμπορευματοποίηση νέων συστημάτων πυρόλυσης.



Εικόνα 15: Τυπικό διάγραμμα ροής της διεργασίας της πυρόλυσης. [28]

## 3.2 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ

### 3.2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ

Οι αντιδραστήρες μιας θερμική επεξεργασία πρέπει να σχεδιάζονται και να λειτουργούν έτσι ώστε να συνδυάζει οικονομικό κόστος εγκατάστασης με αποτελεσματικότητα, καθώς και την εξοικονόμηση ενέργειας με αποδοτική λειτουργία. Στην βιομηχανία σήμερα υπάρχουν πολλά και διάφορα είδη αντιδραστήρων με την παρακάτω γενική ταξινόμηση τους [29].

#### **Κατηγορία 1<sup>η</sup> - βάσει τον τρόπο λειτουργίας.**

Ανάλογα με τον τρόπο τροφοδοσίας και απομάκρυνσης των προϊόντων, οι αντιδραστήρες διακρίνονται σε:

- ασυνεχούς λειτουργίας ή διαλείποντος έργου
- μη- συνεχούς λειτουργίας ή ημιδιαλείποντος έργου
- συνεχούς λειτουργίας

Στους αντιδραστήρες ασυνεχούς λειτουργίας (ή διαλείποντος έργου) οι πρώτες ύλες και τα προϊόντα της αντίδρασης παραμένουν στον αντιδραστήρα χωρίς να πραγματοποιείται οποιαδήποτε εκροή ή εισροή μάζας. Μετά το τέλος της αντίδρασης, το τελικό μίγμα απομακρύνεται, και στην συνέχεια ο αντιδραστήρας φορτώνεται με νέο υλικό. Σε αυτούς τους αντιδραστήρες οι συνθήκες της αντίδρασης (συγκέντρωση, θερμοκρασία ή/και πίεση των προϊόντων), είναι δυνατό να μεταβάλλονται με τον χρόνο.

Στους αντιδραστήρες *συνεχούς λειτουργίας*, τα αρχικά και τα τελικά προϊόντα τροφοδοτούνται και απομακρύνονται συνεχώς. Η λειτουργία των συνεχών αντιδραστήρων μπορεί να είναι μόνιμη ή δυναμική. Στους συνεχείς αντιδραστήρες μόνιμής λειτουργίας η εισροή μάζας στον αντιδραστήρα είναι σταθερή και ίση με την εκροή μάζας από αυτόν. Αντίθετα, στους συνεχείς αντιδραστήρες δυναμικής λειτουργίας η εισροή μάζας δεν είναι σταθερή και γενικά δεν είναι ίση με την εκροή μάζας από τον αντιδραστήρα. Συνήθως, οι συνεχείς αντιδραστήρες λειτουργούν στην μόνιμη κατάσταση, και πιο σπάνια (π.χ. στάδιο εκκίνησης, ή διακοπής) η λειτουργία τους είναι δυναμική.

Πολλές φορές η λειτουργία των αντιδραστήρων μπορεί να είναι ημι-συνεχής. Στην περίπτωση αυτή, ο αντιδραστήρας φορτώνεται αρχικά με ένα ή περισσότερα συστατικά, ενώ τα υπόλοιπα αντιδρώντα προστίθενται συνεχώς στον αντιδραστήρα κατά της διάρκεια της αντίδρασης, με ή χωρίς ταυτόχρονη απομάκρυνση των προϊόντων της αντίδρασης από τον αντιδραστήρα. Οι αντιδραστήρες ημι-συνεχούς λειτουργίας ή ημιδιαλείποντος έργου

χρησιμοποιούνται κυρίως στις περιπτώσεις εκείνες, όπου ζητείτε η διατήρηση της συγκέντρωση ενός αντιδραστήριου χαμηλή, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος της θερμοκρασίας (λόγω του υψηλού θερμοτονισμού της αντίδρασης) ή/και ελάττωση της παραγωγής ανεπιθύμητων παραπροϊόντων.

**Κατηγορία 2<sup>η</sup> - βάσει τον αριθμό φάσεων που συνυπάρχουν στον αντιδραστήρα.**

Ανάλογα με τον αριθμό φάσεων που συνυπάρχουν στον αντιδραστήρα, οι αντιδραστήρες μπορούν να διακριθούν σε ομογενείς και ετερογενείς. Στους ομογενείς αντιδραστήρες τα προϊόντα της αντίδρασης σχηματίζουν μία και μόνο ομογενή φάση. Αντίθετα στους ετερογενείς αντιδραστήρες, δυο ή/και περισσότερες φάσεις συνυπάρχουν στο χώρο του αντιδραστήρα. Οι ετερογενείς αντιδραστήρες μπορεί να είναι καταλυτικοί ή μη καταλυτικοί. Η ύπαρξη δυο ή περισσότερων φάσεων στον αντιδραστήρα έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση φυσικών φαινομένων μεταφοράς μάζας, θερμότητας και ορμής, τα οποία θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη στην ανάλυση και επιλογή ενός αντιδραστήρα.

**Κατηγορία 3<sup>η</sup> - βάσει τα πρότυπα ροής και ανάμιξης.**

Ανάλογα με τις συνθήκες ροής και ανάμιξης οι αντιδραστήρες διακρίνονται σε πλήρους ανάμιξης και σε αντιδραστήρες εμβολικής ροής (απουσία οποιασδήποτε ανάμιξης). Οι δυο παραπάνω κατηγορίες περιγράφουν τις δυο ακραίες ιδανικές καταστάσεις ανάμιξης στους αντιδραστήρες. Πρέπει να σημειωθεί ότι η κατάσταση ανάμιξης σ' έναν βιομηχανικό αντιδραστήρα είναι δυνατό να περιγράφεται από κάποιο μοντέλο που δεν ακολουθεί ακριβώς τις παραπάνω ακραίες ιδανικές καταστάσεις.

Στους ιδανικούς αντιδραστήρες πλήρους ανάμιξης, η συγκέντρωση των αντιδρώντων και προϊόντων είναι ανεξάρτητη του χώρου του αντιδραστήρα. Το ίδιο ισχύει και για τη θερμοκρασία. Συνθήκες πλήρους ανάμιξης μπορεί να επιτύχει σε αντιδραστήρες συνεχούς, και ημι-συνεχούς λειτουργίας με τη χρήση κατάλληλου συστήματος ανάδευσης. Αντίθετα, συνθήκες εμβολικής ροής επιτυγχάνουμε σε αυλωτούς αντιδραστήρες συνεχούς λειτουργίας όταν η ροή των προϊόντων διαμέσου του αυλού είναι τυρβώδης ( δηλαδή ο αριθμός του Reynolds είναι μεγαλύτερος από  $2.0 \times 10^3$  ).

**Κατηγορία 4<sup>η</sup> - Βάσει την μεταβολή ή όχι της θερμοκρασίας.**

Ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι της μεταβολής θερμοκρασίας οι αντιδραστήρες διακρίνονται σε ισοθερμοκρασιακούς και σε μη ισοθερμοκρασιακούς. Στους ισοθερμοκρασιακούς αντιδραστήρες η θερμοκρασία παραμένει αμετάβλητη, ενώ στους μη ισοθερμοκρασιακούς η θερμοκρασία μεταβάλλεται χρονικά η με την απόσταση.

Παρακάτω θα γίνει αναφορά στους πιο διαδομένους αντιδραστήρες που χρησιμοποιούνται για την πυρόλυση ελαστικών.

Αντιδραστήρας περιστρεφόμενης κλίνης: ουσιαστικά πρόκειται για έναν περιστρεφόμενο κύλινδρο με κλίση. Ο χρόνος παραμονής στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, που είναι σημαντικός παράγοντας σχεδιασμού, καθορίζεται από την σωστή επιλογή διαμέτρου, το μήκος την ταχύτητα, την κλίση και την εσωτερικής κατασκευής (σχεδιασμού). Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι του περιστρεφόμενης κλίνης άμεσης και έμμεσης καύσης.

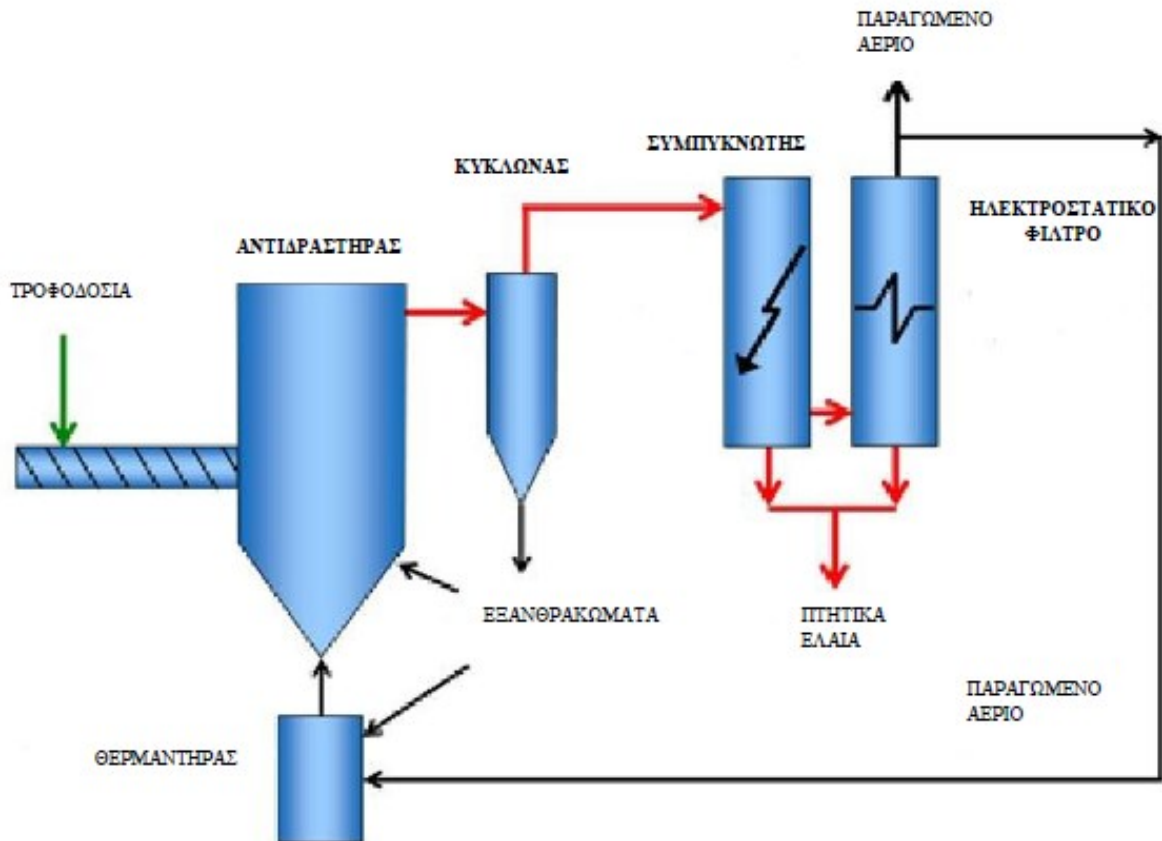
Αντιδραστήρας σταθερής κλίνης : ο αντιδραστήρας σταθερής κλίνης χρησιμοποιείται κύριος από ερευνητές διότι είναι πολύ απλός στην κατασκευή και την λειτουργία του.

Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης: είναι δύσκολος στην λειτουργία του, για τον λόγο αυτό οι μελέτες που έχουν γίνει με την χρήση του είναι λίγες. Ωστόσο έχει τα εξής πλεονεκτήματα μεγάλο χρόνο παραμονής, ο οποίος συμβάλει σε δευτερεύουσες αντιδράσεις και χαμηλότερη θερμοκρασία και ρυθμό θέρμανσης, τα οποία ευνοούν την απανθράκωση. Η πυρόλυση εδώ χαρακτηρίζεται ως ταχεία πυρόλυση η οποία παράγει άμεσα αέριο και υγρό προϊόν. Οι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης διακρίνονται σε αντιδραστήρα αναβράζουσα και ανακυκλοφορίας.

### **3.2.2 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΑΝΑΒΡΑΖΟΥΣΑΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΚΛΙΝΗΣ**

Ο αντιδραστήρας αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης είναι το πιο διαδομένο σύστημα πυρόλυσης που υπάρχει σήμερα στην εφαρμογή. Ο απλό σχεδιασμός και η κατασκευή του, προσφέρει καλή μεταφορά θερμότητα και καλό έλεγχο της θερμοκρασίας. Χρησιμοποιείται για γρήγορη πυρόλυση όπου η παραγωγή του ελαίου μπορεί να φτάσει και το 60 με 75 %.





Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση αναβράζουσα ρευστοποιημένης κλίνης[30]

Η τροφοδοσία πραγματοποιείται με μηχανική ή πνευματική μεταφορά της πρώτης ύλης μέσα στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Για την επίτευξη των απαραίτητων υψηλών ρυθμών θέρμανσης τα τροφοδοτούμενα τεμάχια δεν πρέπει να ξεπερνά τα 2-3 mm.

Τα τεμάχια της πρώτης ύλης εισάγονται στο εσωτερικό του αντιδραστήρα όπου η παροχή θερμότητας γίνεται με δύο τρόπους, άμεσα ή έμμεσα.

Στην περίπτωση άμεσης θέρμανσης το αδρανές αέριο εισάγεται στο εσωτερικό του αντιδραστήρα και έρχεται σε άμεση επαφή με την πρώτη υλη. Εάν χρησιμοποιείται καυσαέριο που προέρχεται από την καύση των μονίμων αερίων ή εξανθρακωμάτων, η καύση θα πρέπει να είναι στοιχειομετρική για να αποφευχθούν τυχών αντιδράσεις οξειδωσης.

Η έμμεση θέρμανση του αντιδραστήρα πραγματοποιείται μέσω των επιφανειών συναλλαγής. Τέτοιες μπορεί να είναι είτε τα τοιχώματα του ίδιου του αντιδραστήρα, είτε θερμοί σωλήνες που φέρουν καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας, τα οποία προέρχονται από την καύση του εξανθρακώματος. Στην περίπτωση αυτή, το μίγμα των καυσαερίων δεν χρειάζεται να είναι φτωχό σε οξυγόνο, αφού δεν έρχεται σε άμεση επαφή με τη πρώτη ύλη κι έτσι δεν υπάρχει η απαίτηση στοιχειομετρικής καύσης.

Στην συνέχεια τα προϊόντα πυρόλυσης εξάγονται από το πάνω μέρος του αντιδραστήρα μαζί με το αέριο ρευστοποίησης. Ο διαχωρισμός του εξανθρακώματος από τα πτητικά πρέπει να γίνει το συντομότερο δυνατόν για την αποφυγή της αποδόμησης των συμπυκνώσιμων ουσιών σε μόνιμα αέρια. Αυτό επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση κυκλώνων υψηλής απόδοσης μετά την έξοδο του αντιδραστήρα. Στους κυκλώνες τα συμπυκνώσιμα πτητικά βρίσκονται ακόμα στην αέρια φάση, οπότε λαμβάνει χώρα φιλτράρισμα του θερμού αερίου. Παρόλα αυτά, οι κυκλώνες δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί με αποτέλεσμα τα εξανθρακώματα που παράγονται κατά την πυρόλυση να καταλήγουν στο παραγόμενο έλαιο.

Τα παραγόμενα εξανθρακώματα που συλλέγεται και διαχωρίζεται αποτελούν το 15-20 % των τελικών προϊόντων, έχουν όμως σχετικά υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο. Για το λόγο αυτό είναι δυνατόν να χρησιμοποιούνται στην καύση για παραγωγή θερμότητα που είναι αναγκαία για τη συντήρηση της διεργασίας. Σε διαφορετική περίπτωση το εξανθράκωμα διαχωρίζονται από την άμμο και εξάγεται. Η ανάκτηση του ελαίου που συμπυκνώνεται είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία. Ένα ιδιαίτερο πρόβλημα που σχετίζεται με την συμπύκνωση είναι η τάση των πτητικών να σχηματίζουν αερολύματα κατά την ψύξη τους, τα οποία πρέπει να απομακρύνονται. Για το σκοπό αυτό εγκαθίστανται κατάλληλες πλυντηριδες και ηλεκτροστατικά φίλτρα μετά τον συμπυκνωτή.

Τα μόνιμα αέρια που παράγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ρευστοποίηση της κλίνης αφού πρώτα καούν ή θερμομανθούν, ώστε να παρέχουν κατ' αυτό τον τρόπο και επιπλέον θερμότητα στον αντιδραστήρα.

Η ανάκτηση του ελαίου που συμπυκνώνεται είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία. Ένα ιδιαίτερο πρόβλημα που σχετίζεται με την συμπύκνωση είναι η τάση των πτητικών να σχηματίζουν αερολύματα κατά την ψύξη τους, τα οποία πρέπει να απομακρύνονται. Για το σκοπό αυτό εγκαθίστανται κατάλληλες πλυντηριδες και ηλεκτροστατικά φίλτρα μετά τον συμπυκνωτή.

Τα μόνιμα αέρια που παράγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ρευστοποίηση της κλίνης αφού πρώτα καούν ή θερμομανθούν, ώστε να παρέχουν κατ' αυτό τον τρόπο και επιπλέον θερμότητα στον αντιδραστήρα.

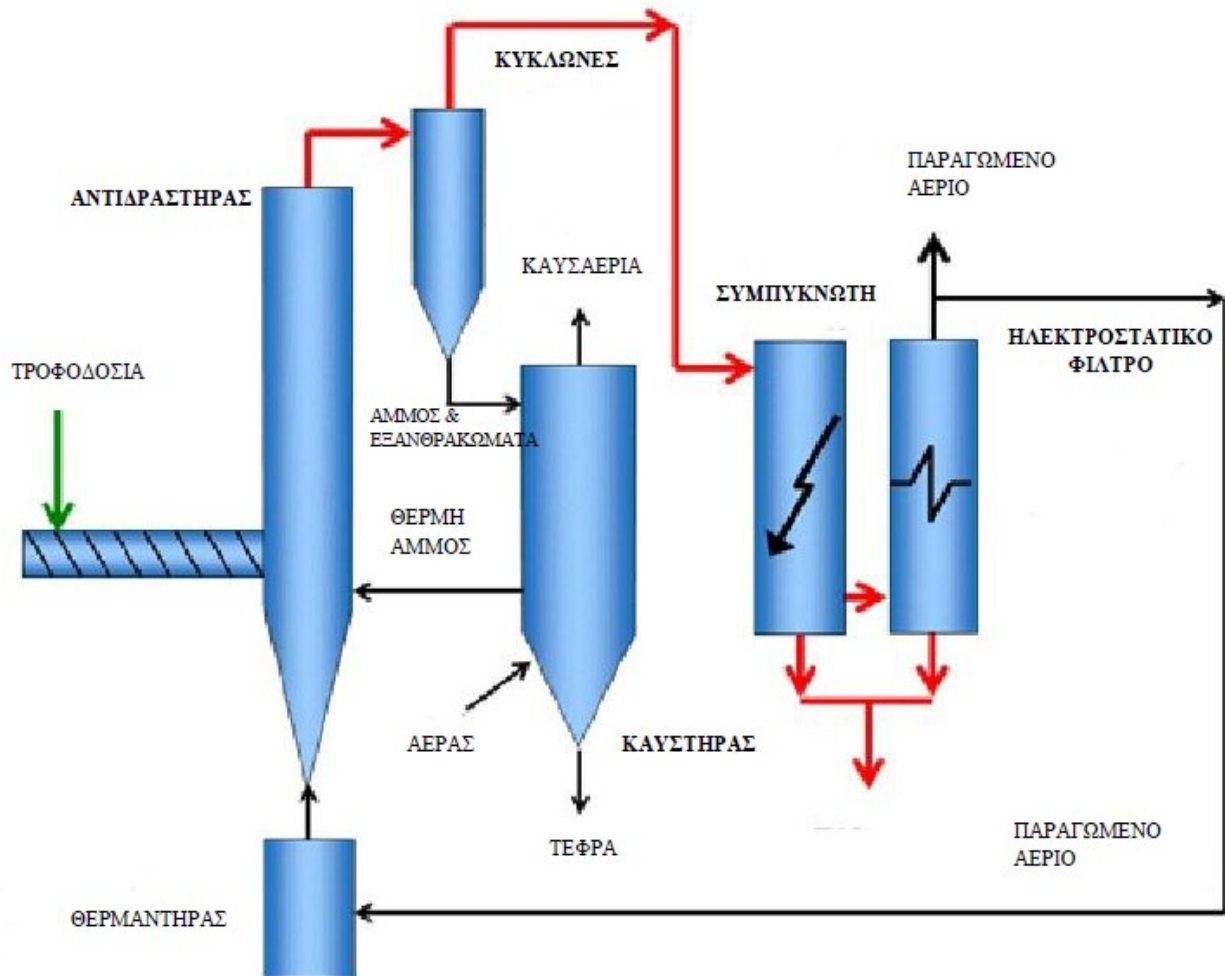
### **3.2.3 ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ**

Γενικά οι Αντιδραστήρες Ρευστοποιημένη κλίνη μοιάζουν αρκετά στην λειτουργία τους.

Η διαφορά του αντιδραστήρα ανακυκλοφορίας βρίσκεται στο γεγονός ότι το υλικό κλίνης δεν παραμένει στο εσωτερικό του αντιδραστήρα αλλά μεταφέρεται σε ξεχωριστός

αντιδραστήρας καύσης όπου θερμαίνεται εκ νέου και εισάγεται ξανά στο εσωτερικό της ρευστοποιημένης κλίνης. Τα τεμάχια σε αυτή την περίπτωση όμως έχουν μικρότερο μέγεθος της τάξης το πολύ μέχρι 1-2 mm.

Οι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας έχουν και αυτοί μεγάλη χρήση στην βιομηχανία, ωστόσο το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα διαχείρισης μεγάλης παροχής υλικού προς επεξεργασία.



Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας [31].

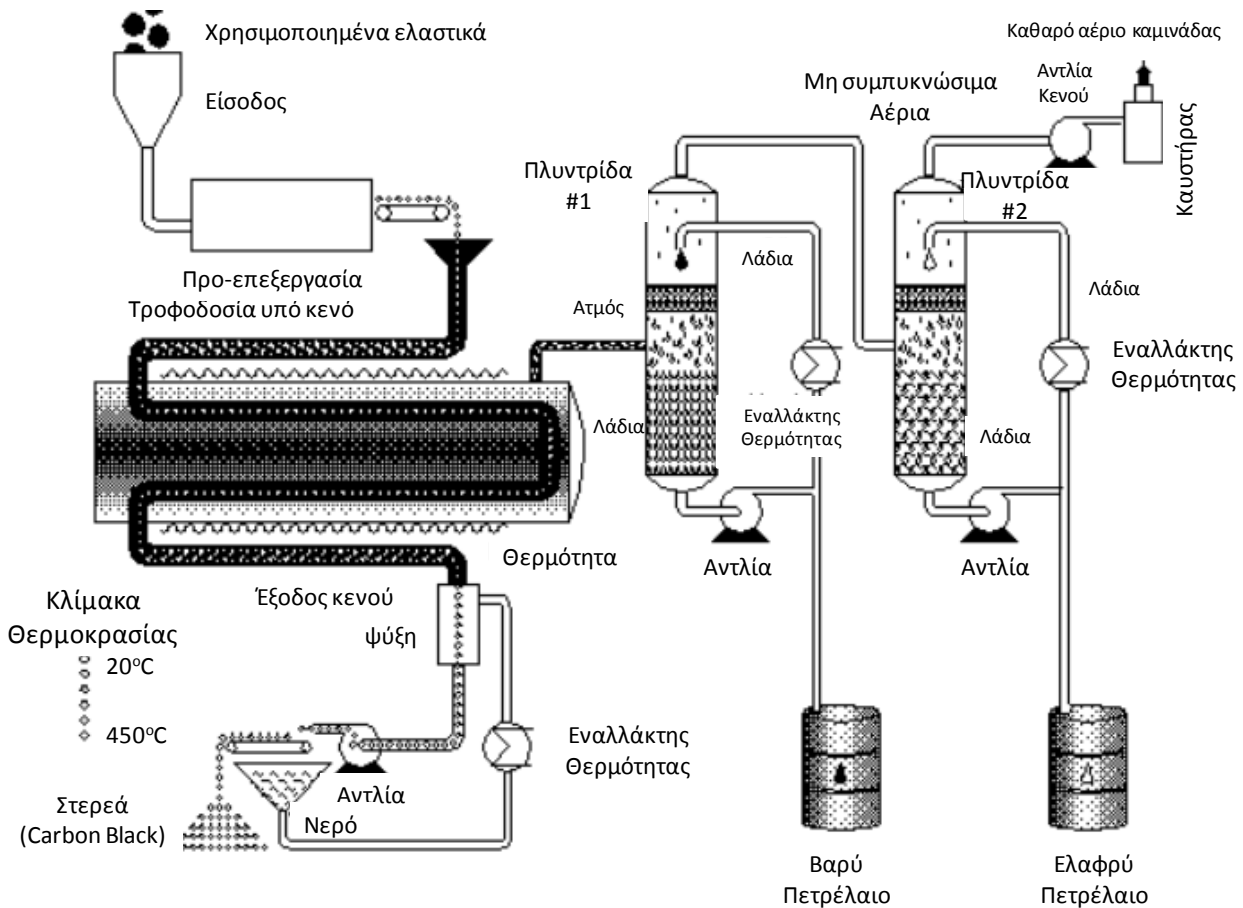
### 3.3 ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΥΠΟ ΚΕΝΟ

#### 3.3.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Στην τεχνολογία πυρόλυσης υπό κενό όχι μόνο στον αντιδραστήρα της πυρόλυσης δεν υπάρχει οξυγόνο αλλά επιπροσθέτως δεν εισέρχεται στον αντιδραστήρα κανένα αέριο. Στην

πραγματικότητα, η διεργασία λειτουργεί ως θερμική απόσταξη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για πυρόλυση ελαστικών και άλλων αποβλήτων.

Η διαδικασία πυρόλυσης ελαστικών υπό κενό πραγματοποιείται στις θερμοκρασίες από 480 °C έως και 520 °C και υπό πίεση 10kPa. Η τροφοδοσία πρώτης ύλης είναι συνεχής και η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 10 °C ανά λεπτό έως την τελική θερμοκρασία πυρόλυσης. Τα ελαστικά εισάγονται μηχανικά στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Οι οριζόντιες πλάκες που μεταφέρουν την πρώτη ύλη θερμαίνονται εσωτερικά με υλικό, όπως το τηγμένο άλας. Η θερμοκρασία του άλατος δεν διατηρείται σταθερή και είναι γενικά κατά 30 °C υψηλότερη από την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο υλικό μέσα στον αντιδραστήρα. Οι ατμοί των υδρογονανθράκων απομακρύνονται ταχύτατα από την περιοχή της αντίδρασης μέσω αντλίας κενού. Το έλαιο ανακτάτε σε δυο διαδοχικούς συμπυκνωτές, σε βαρύ και ελαφρύ αντίστοιχα. Παραγόμενο συμπυκνωμένο αέριο χρησιμοποιείται ως καύσιμο στο καυστήρα για την θέρμανση του τηγμένου άλας. Τα στερεά υπολείμματα πυρόλυσης αποτελούνται από χαλύβδινα σύρματα και carbon black (εξανθρακώματα). Μετά την απομάκρυνση του χάλυβα το carbon black μπορεί να επεξεργαστεί για περεταίρω χρήση [32].



Εικόνα 18: Σχηματικό διάγραμμα πυρόλυσης υπό κενό [32]

### 3.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της πυρόλυσης υπό κενό εξαρτούνται από την μορφή και είδος πρώτης ύλης, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 10: παραγόμενα προϊόντα πυρόλυσης [32].**

Τύπος ελαστικών	Ελαστικά επιβατικών οχημάτων	Ελαστικά επιβατικών οχημάτων	Ελαστικά επιβατικών οχημάτων ενισχυμένο με οξείδιο πυριτίου	Ελαστικά φορτηγών
Συνολική πίεση (kPa)	10	7	7	6
Θερμοκρασία (° C)	550	520	500	485
Μέγεθος τεμαχίων (mm)	20X30	100X120	Ολόκληρο ελαστικό	100X120
Ποσοστά βάσει πρώτης ύλης %				
Carbon black	33	36	37	39
Έλαιο	56	45	47	43
Αέριο	10	6	5	5
Χάλυβας	10	10	10	10
Νερό	1	3	1	3

Κατά την πυρόλυση υπό κενό τα ποσοστά των παραγόμενων προϊόντων διαφέρουν από τα αντίστοιχα ποσοστά των προϊόντων της πυρόλυσης υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες [33,34]. Αυτή η διαφορά οφείλεται στον χρόνο παραμονής του αρχικού υλικού στον αντιδραστήρα. Στην πυρόλυση υπό κενό ο χρόνος παραμονής είναι μικρότερος και αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερης παραγωγής ελαίου και αντίστοιχα μικρότερης παραγωγής αερίου και του carbon black. Η αντλία κενού είναι αυτή που απομακρύνει γρήγορα τα προϊόντα από τον αντιδραστήρα και περιορίζει τις δευτερογενείς αντιδράσεις και διάσπαση αλυσίδων υδρογονάνθρακα.

Είναι πολύ σημαντική η χρήση του carbon black που παράγεται να είναι εμπορική ώστε η διαδικασία πυρόλυσης να είναι βιώσιμη. Δυο σημαντικότερες ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την ποιότητα του carbon black είναι η ειδική επιφάνεια και ο ειδικός όγκος του.

**Πίνακας 11: ιδιότητες του Carbon black [32].**

Carbon black	Ιδιότητες			
	Ειδική επιφάνεια (m <sup>2</sup> /g)	Ειδικός όγκος (cm <sup>3</sup> /100g)	Τεφρά (%)	Θείο (%)
από πυρόλυση	95	102	0.7	0.5
N110	138	113	0.5	0.7

(χρησιμοποιείται στο πέλμα του ελαστικού φορτηγών και λεωφορείων)				
N330 (χρησιμοποιείται στην πτυχή σκελετού του ελαστικού φορτηγών και λεωφορείων)	83	102	0.4	0.6
N660 (χρησιμοποιείται στην εσωτερική επένδυση του ελαστικού φορτηγών και λεωφορείων)	36	90	0.4	0.6

Παρατηρείται ότι οι ιδιότητες του carbon black απο πυρόλυση κυμαίνονται κοντά στις μέσες τιμές του συμβατικού carbon black. Μετά την απόμετάλλωση τα πρώτα παραγόμενα σωματίδια του carbon black εύκολα μπορούν να συνθλιβούν σε λεπτόκοκκη σκόνη. Η κατανομή και το μέγεθος σωματιδίων που προκύπτουν εξαρτώνται από το βαθμό λείανσης του. Όσο αφορά την χημική σύσταση του carbon black για να πλησιάζει με την χημική σύσταση του συμβατικού θα πρέπει η διαδικασία της πυρόλυσης να πραγματοποιείται σε συνθήκη με υψηλές θερμοκρασίες και με χαμηλή πίεση.

Λόγω χαμηλής ποιότητας, το carbon black πυρόλυσης μπορεί να αντικαταστήσει το συμβατικό σε ορισμένες παρασκευές του καουτσούκ, όπως ζώνες μεταφοράς, λαστιχένιες μπότες και άλλα. Μια άλλη χρήση του είναι ως συμπληρωματικό υλικό στην παρασκευή της ασφάλτου. Έχει βρεθεί ότι η προσθήκη του carbon black στην ασφάλτο σε ποσοστό 5 - 30% κατά βάρος βελτιώνει τις ακόλουθες ιδιότητες: το ιξώδες, τη σκληρότητα της ασφάλτου, την αντοχή της στην αυλάκωση και ρηγμάτωση. Για την επίτευξη της παρασκευής υψηλής απόδοσης συνδετικού υλικού έχει προταθεί η προσθήκη του carbon black να κυμαίνεται στα ποσοστά 5-15% κατά βάρος [35].

Το έλαιο που παράγεται από πυρόλυση έχει υψηλότερη θερμογόνο δύναμη (44 MJ/kg) [36] από το ίδιο το ελαστικό (33 MJ/kg) [37], από το λιθάνθρακα (28 MJ/kg) [38] και ξυλάνθρακα (30 MJ/kg) [39]. Το έλαιο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υγρό καύσιμο σε βιομηχανικούς κλιβάνους, μονάδες παραγωγής ενέργειας και καυστήρες. Περιέχει χαμηλή περιεκτικότητα σε τεφρά (0,05%), θείο (0,8-1,5%) και υπολείμματα άνθρακα (1-2 %).

**Πίνακας 12: σύνθεση του ελαίου πυρόλυσης [32].**

Σύνθεση του ελαίου παραγόμενου κατά την πυρόλυση υπό κενό (κατά βάρος %)				
	Άνθρακας (C)	Υδρογόνο (H)	Άζωτο (N)	Οξυγόνο (O) (η διαφορά)
Ελαστικά επιβατικών οχημάτων	86,5	10,8	0,5	2,2
Ελαστικά επιβατικών οχημάτων ενισχυμένο με οξειδίο πυριτίου	87,6	10,5	0,4	1,5
Ελαστικά φορτηγών	87,9	11,2	0,7	0,2

Η περιεκτικότητα του ελαίου σε χλώριο ποικίλει από 100 έως 180ppm. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση σε χλώριο παρατηρείται σε βαριά κλάματα του ελαίου. Η υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα οδηγεί στην παραγωγή των ανθρακούχων υλικών υψηλής αξίας που χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανίες. Το έλαιο πυρόλυσης είναι ελαφρός μολυσμένο με μέταλλα και διάφορες μεταλλοειδή προσμίξεις. Όσο αφορά την χημική σύνθεση ολεφινών είναι ανάλογη με αυτήν που λαμβάνεται κατά την οπτανθρακοποίηση διάφορων συμπυκνωμάτων του συμβατικού πετρελαίου που έχουν υποστεί πυρόλυση [40].

Το έλαιο πυρόλυσης μπορεί να αναμειχθεί με συμπυκνώματα πετρελαίου και να υποβληθεί σε παρόμοιες θερμικές επεξεργασίες με σκοπό την παρασκευή καυσίμου παρόμοιο με το καύσιμο diesel. Οι σημαντικές προϋποθέσεις για το καύσιμο diesel είναι η ποιότητα της ανάφλεξης, το ιξώδες, το νερό και η περιεκτικότητα του σε ιζήματα και το S (θείο). Η ποιότητα ανάφλεξης των βαρέων καυσίμων υποδεικνύεται από το δείκτης diesel ο οποίος σχετίζεται με το σημείο ανιλίνης και την πυκνότητα του καυσίμου. Κατά συνέπεια το καύσιμο που παράγεται από το έλαιο πυρόλυσης θα πρέπει να έχει ιξώδες που να κυμαίνεται στα 10-15 cSt [41] έτσι ώστε να παρέχει καλά χαρακτηριστικά κατά τον ψεκασμό καυσίμου. Επίσης η θερμοκρασία του παραγόμενου καυσίμου πρέπει να ρυθμίζεται ώστε να παρέχετε το σωστό ιξώδες στην αντλία. Το νερό και τα ιζήματα πρέπει να μειωθούν για να φτάσουν τα επίπεδα του συμβατικού καυσίμου, προτού φτάσουν το φίλτρο του κινητήρα. Κατά την καύση η τυχών περιεκτικότητα σε θείο σχηματίζει το διοξείδιο του θείου. Δεδομένου ότι το SO<sub>2</sub> είναι πολύ διαβρωτικό, η περιεκτικότητα σε θείο μέσα στο καύσιμο πρέπει να είναι περιορισμένη. Σύμφωνα με τις παραπάνω απαιτήσεις, η χρήση του ελαίου πυρόλυσης θα απαιτούσε προκαταρκτικές επεξεργασίες, όπως καθίζηση, φυγοκέντριση και φιλτράρισμα.

**Πίνακας 13: ιδιότητες καύσιμου Diesel (CIMAK-B10) και του καυσίμου από πυρόλυση [32].**

	<b>ΚΑΥΣΙΜΟ Diesel (CIMAK-B10)</b>	<b>ΕΛΑΙΟ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ</b>
Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	975	950
Ιξώδες σε 50 (mm <sup>2</sup> /s)	40	9,7
Ιξώδες σε 100 (mm <sup>2</sup> /s)	10	3,2
Σημείο ανάφλεξης (°C)	50	28
Θείο (% κ.β.)	3,5	0,8
Τέφρα (% κ.β.)	0,10	Ίχνη
Νερό (% κ.β.)	0,5	0,32
Βανάδιο (ppm)	300	0
Αλουμίνιο (ppm)	30	4
Νάτριο(ppm)	50	1,3

Το επεξεργασμένο έλαιο πυρόλυσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μόνο του ή αναμειγμένο με άλλα καύσιμα, όπως το καύσιμο diesel. Η ανάμειξη τους μειώνει το ιξώδες και κατά συνέπεια βελτιώνει την διάσπαση σε άτομα και θα εξασφαλίζει πλήρη καύση του καυσίμου. Οι ιδιότητες του καυσίμου που προέρχεται από το ελαίου πυρόλυσης και ιδικά από τα ελαστικά, το κατατάσσουν σε πολύτιμο συστατικό για την χρήση του με συμβατικά καύσιμα.

Εκτός από την χρήση του ελαίου πυρόλυσης ως καύσιμο είναι δυνατή η απόσταξη του και η ανάμειξη του με αντίστοιχα κλάσματα του πετρελαίου.

Μπορούν να εφαρμοστούν πολλά συστήματα κλασματοποίησης του ελαίου. Η επιλογή εξαρτάται από την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί. Κατά την απόσταξη στους 204 ° C παράγεται ένα ελαφρύ κλάσμα παρόμοιο με την νάφθα. Το κλάσμα αυτό είναι πλούσιο σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες, κάτι που είναι επιθυμητό στην σύνθεση της βενζίνης. Έχει βρεθεί ότι υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες συμπυκνώνονται, οδηγώντας έτσι στο σχηματισμό των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων, οι οποίοι σχηματίζονται κατά την καύση και εισέρχονται στην ατμόσφαιρα με το καυσαέριο υπό μορφή άκαυστων ενώσεων. Οι ενώσεις αυτές είναι επικίνδυνες [42]. Εφόσον η νάφθα του έλαιο πυρόλυσης είναι παρόμοια με την νάφθα πετρελαίου θα πρέπει να υποβληθεί και αυτή σε διαδικασία υδρόλυσης.

Κατά την απόσταξη στους >204 ° C το έλαιο που παρασκευάζεται έχει ιδιότητες παρόμοιες με τα κλάσματα πετρελαίου Sundex 790 [43] που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή σύνθετου καουτσούκ. Κατά την σύγκριση των τελικών υλικών παρατηρείτε ότι τα προϊόντα που παρασκευάστηκαν με κλάσμα ελαίου πυρόλυσης παρουσιάζουν μεγαλύτερο ιξώδες, με αποτέλεσμα ο χρόνος σκλήρυνσης να μειώνεται. Επίσης η αντοχή σε εφελκυσμό και η σκληρότητα του προϊόντος απέδειξε ότι το κλάσμα ελαίου πυρόλυσης είναι ένας καλός πλαστικοποιητής.

Όταν το κλάσμα πυρόλυσης υποβληθεί σε μια αργή απόσταξη (>350 °C) παράγεται οπτάνθρακας. Το κλάσμα περιείχε χαμηλή περιεκτικότητα σε θείου (0,78%) και χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα (0,24%) [44]. Τα κύρια μέταλλα που βρέθηκαν στον οπτάνθρακα (ψευδάργυρος και πυρίτιο) είναι εκείνα που αρχικά υπάρχουν στο ελαστικό. Η απουσία του βαναδίου, μια ανεπιθύμητη πρόσμειξη που υπάρχει στο εμπορικό κοκ, είναι αισθητή. Το έλαιο κατά την απόσταξη επίσης παράγει κλάσμα υψηλής αρωματικής νάφθας, ελαφρύ έλαιο εσωτερικής καύσης (205-350°C) πλούσιο σε αρωματικό υδρογονάνθρακα, βαρύ πετρέλαιο εσωτερικής καύσης (300°C) το οποίο μπορεί να ανακτηθεί με την διαδικασία παραγωγής οπτάνθρακα και τέλος ένα καύσιμο αέριο με υψηλή θερμοαντική ικανότητα.

Τα υπολείμματα κλάσματος (> 400°C) η λεγόμενη «πίσσα πυρόλυσης» παράγεται από τα υπολείμματα του πυθμένα που αποτελούν το 29% (κ.β.) του συνολικού ελαίου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνδετικό υλικό στην άσφαλτο οδοποιίας. Σε σύγκριση με την πίσσα συμβατικού πετρελαίου, που χρησιμοποιείται ευρέως στις οδοποιία, έχει υψηλή διαπερατότητα, υψηλό σημείο σκλήρυνσης και χαμηλό δυναμικό ιξώδες.

**Πίνακας 14: ιδιότητες πίσσας πυρόλυσης και πίσσας πετρελαίου [32].**

	<b>Πίσσα πυρόλυσης</b>	<b>Πίσσα πετρελαίου</b>
Άνθρακας (% κ.β.)	88,4	85,3
Υδρογόνο (% κ.β.)	10,20	10,4
Άζωτο (% κ.β.)	0,6	0,8
Θείο (% κ.β.)	0,6	3,3
Οξυγόνο (% κ.β.)	0,2	0,2



Τα στοιχεία σύνθεσης παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα όπου φαίνεται ότι η πίσσα πυρόλυσης είναι πλούσια σε άνθρακα και έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο, επίσης και η περιεκτικότητα της σε θείο είναι μάλλον χαμηλή, ενώ η περιεκτικότητα σε άζωτο είναι παρόμοια με εκείνη της πίσσας πετρελαίου.

### 3.3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Η πυρόλυση υπό κενό έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους ανακύκλωσης ελαστικών. Κατά την επεξεργασία δεν παράγονται τοξικές ουσίες και όλα τα προϊόντα πυρόλυσης μπορούν να βρουν εμπορική χρήση. Μια σημαντική διαφορά ανάμεσα σε πυρόλυση υπό κενό και της πυρόλυσης σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες περίπου 500 C, είναι ο χρόνος παραμονής. Κάτι που οδηγεί στην δημιουργία δευτερευόντων αντιδράσεων αποσύνθεσης πολύτιμων ενώσεων. Η ειδική επιφάνεια και ειδικός όγκος του carbon black αλλάζει ελαφρώς, ωστόσο μια μικρή ποσότητα ανθρακούχων εναποθέσεων που σχηματίζονται απενεργοποιούν το 1/3 των δραστικών θέσεων επί της επιφάνειας του carbon black κάτι που κάνει το carbon black να ανήκει σε χαμηλή εμπορική ζήτηση. Σε αυτή την περίπτωση η αναβάθμιση του carbon black είναι εφικτή με την διαδικασία σύνθλιψης και κοσκινίσματος. Άλλη μία σημαντική χρήση του carbon black είναι η προσθήκη του στην άσφαλτο αν προηγηθεί η απομεταλλόση του, κάτι που είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί.

Τα παραγόμενα έλαια της πυρόλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα ως καύσιμο ή να υποβληθούν σε απόσταξη. Τα ελαφρότερα κλάσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγή των χημικών προϊόντων υψηλής αξίας και ως έλαια αραίωσης στην σύνθεση του καουτσούκ. Τα βαρύτερα κλάσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετα στην οδοποιία ή ως πρώτη ύλη για την παρασκευή του οπτάνθρακα.

Σήμερα υπάρχουν εγκατεστημένες μικρές μονάδες στις χώρες όπως Ινδία και ευρύτερη Ασία που χρησιμοποιούν επιτυχώς την τεχνολογία αυτή. Βέβαια το θεσμικό και εμπορικό πλαίσιο των παραπάνω περιοχών διαφέρει αρκετά από το αντίστοιχο Ευρωπαϊκό. Παρόλα αυτά μια μονάδα έχει κατασκευαστεί εντός της Ευρωπαϊκής ένωσης και συγκεκριμένα στην Τσεχία και βρίσκεται σε στάδιο αρχικής λειτουργίας.



**Εικόνα 19 : μονάδα πυρόλυσης M3RP στην Τσεχία [45]**

Η μονάδα αυτή μπορεί επιτυχώς να επεξεργαστεί εκτός από ψιλοκομμένα ελαστικά (1 – 4 mm) μια σειρά υλικών όπως φλοιό ρυζιού, οικιακά στερεά απόβλητα, στερεή βιομάζα, κελύφη καρύδας, απόβλητα επεξεργασίας χαρτιού, οργανικά απόβλητα κ.α.

Όσον αφορά την πυρόλυση ελαστικών η κατά βάρος κατανομή των προϊόντων για ένα τόνου ελαστικών είναι ενδεικτικά: 170 kg αερίου, 350 kg άνθρακα, 430 kg πετρελαιοειδών και 50 kg χάλυβα. Η αναλυτική περιγραφή της συγκεκριμένης μονάδας θα γίνει στο κεφάλαιο 6.

### **3.4 ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΜΕ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ**

#### **3.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

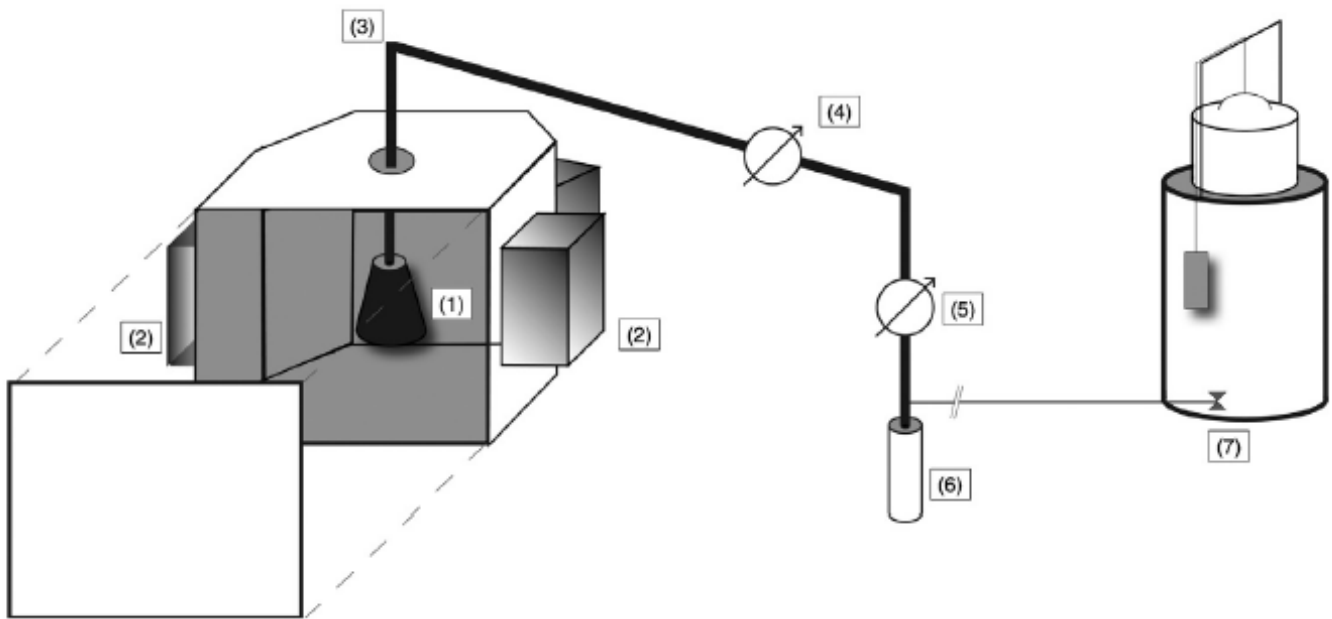
Πυρόλυση με μικροκύματα χρησιμοποιείται ευρέως στην επεξεργασία βιομάζας ιδίως για παραγωγή βιο-καυσίμου ή αερίου [46,47,48,49]. Λίγα έργα έχουν ασχοληθεί με πυρόλυση των

πολυμερών υλικών με μικροκύματα [50] και περισσότερά από αυτά περιορίζονται σε πολυστυρένιο (PS) [51] και πολυαιθυλένιο (PE)[52].

Η επεξεργασία αυτή αποτελεί μια εναλλακτική λύση ή συμπληρωματική μέθοδο σε άλλες φυσικές ή θερμικές επεξεργασίες ανακύκλωσης. Γενικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε υλικό που έχει την ικανότητα να απορροφάει τα μικροκύματα, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον χρόνο επεξεργασίας[53] χωρίς την δημιουργία των παραπροϊόντων τα οποία είναι πάντα παρών σε άλλες διαδικασίες. Επιπλέον δίνει το πλεόνασμα του ελέγχου των ιδιοτήτων τελικών προϊόντων χρησιμοποιώντας διαφορετική ισχύει των μικροκυμάτων.

### 3.4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

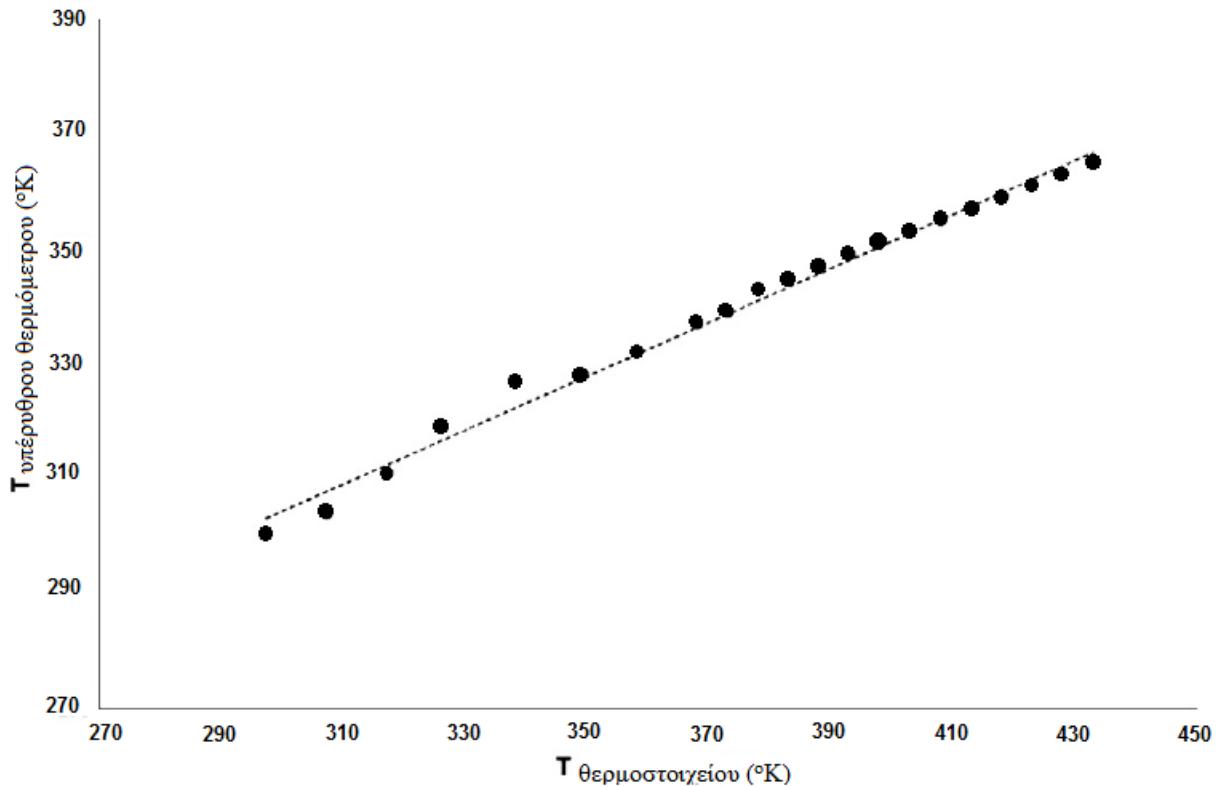
Στην εγκατάσταση του παρακάτω σχήματος χρησιμοποιείτε φούρνος μικροκυμάτων με συχνότητα 2.45 GHz και ισχύ 6 KW. Τα προϊόντα που παράγονται είναι εξανθράκωμα με περιεκτικότητα σε άνθρακα έως και 92,03%, έλαιο με ιξώδες (< 2,9 cP), και αέριο με ίχνη N<sub>2</sub> (άζωτο) και θερμογόνο ικανότητα αντίστοιχα 34 MJ / kg για στερεό, 45 MJ / kg για υγρό και 46 MJ / kg για αέριο [54].



**Σχήμα 20: σχηματική διάταξη δοκιμαστικής μονάδας πυρόλυσης με μικροκύματα [54]**  
**(1) Αντιδραστήρας, (2) γεννήτρια μικροκυμάτων, (3) θερμόμετρο, (4) & (5) ψύκτες, (6) συλλέκτης ελαίου και (7) σύστημα συλλογής αερίου.**

Το αρχικό υλικό είναι τσιπς ελαστικών μεγέθους 2X2 cm, τα οποία ξηραίνονται επί 24 ώρες στους 338 °K (64,85 °C) σε ένα αεριζόμενο φούρνο πριν από κάθε δοκιμή. Τα χαρακτηριστικά του ελαστικού είναι (C: 88,19%, H: 7,23%, N: 0,23%, S: 1,76%).

Κατά την πυρόλυσης με μικροκύματα δεν είναι δυνατή η καταμέτρηση της θερμοκρασίας με κλασσικούς μεθόδους. Τα κλασσικά θερμοόμετρα απορροφούν τα μικροκύματα και δεν δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούμε μια βαθμονόμηση μεταξύ των μετρήσεων του υπέρυθρου θερμοόμετρου και του κλασσικού θερμοόμετρου, Μια γραμμική σχέση μεταξύ των θερμοκρασιών προκύπτει από το παρακάτω διάγραμμα και είναι ( $R^2=0.9910$ ):  $T_{max}^{EXT} = (T_{max}^{IR} - 18.861)/0.469$



Σχήμα 21: Διάγραμμα συσχέτισης θερμοκρασιών [54]

Οι δοκιμές έχουν γίνει με διαφορετικούς συνδυασμούς ισχύς και ποσότητας μάζας. Μια σημαντική παράμετρος που μας δίνει μια συνοπτική σχέση ανάμεσα σε ισχύ (P) και την μάζα ( $M^2$ ) προκύπτει από τον τύπο:

$$\frac{P}{M^2} = 3.0243 \times M^{2.046}$$

**Πίνακας 15: Τα αποτελέσματα τω δοκιμών [54]**

α/α Δοκιμών	Ισχύς (kW)	Βάρος ελαστικών (gr)	P/M2 (kW/kg <sup>2</sup> )	T <sup>IR</sup> <sub>max</sub> (°K)	T <sup>EXT</sup> <sub>max</sub> (°K)	Χρόνο ς (min)	Στερεό (% κ.β.)	Υγρό (% κ.β.)	Αέριο (% κ.β.)
1	6	208,8	137,6	573	872	14	41,1	31,5	27,4
2	4,8	212,8	106,0	546	814	15	40,6	43,1	16,3
3	3	233,3	55,1	522	764	39	43,2	42,6	14,1
4	1,5	252,1	23,6	523	766	100	65,0	20,7	14,3
5	3	1501,1	1,3	533	787	70	50,7	39,3	9,0
6	3	502,8	11,9	513	744	59	40,6	44,0	13,4
7	3	64,1	730,1	453	617	47	47,5	30,1	22,4

\* T<sup>IR</sup><sub>max</sub> : μέγιστη θερμοκρασία υπέρυθρου θερμομέτρου

\* T<sup>EXT</sup><sub>max</sub> : μέγιστη θερμοκρασία επέκτασης

Σε κάθε δοκιμή η ηλεκτρική ενέργεια παρέμεινε σταθερή και η διαδικασία σταματούσε όταν δεν ανιχνευόταν περαιτέρω παραγωγή αερίου. Θεωρείται ότι η πυρόλυση έχει ολοκληρωθεί μόνο όταν δεν ανιχνεύεται οργανικό υλικό στα υπολείμματα.

Στα πειράματα 4 και 5 παρατηρήθηκε μη ολοκληρωμένη πυρόλυση. Στο πείραμα 4 η ισχύς που χρησιμοποιήθηκε ήταν πολύ χαμηλή 1,5 kW με αποτέλεσμα την διατήρησης της ακεραιότητας τετηγμένης μήτρας, παρ όλου που η διασπορά θερμότητας ήταν πολύ υψηλή για να παρέχει την επαρκή θερμότητα για την ολοκλήρωση πυρόλυσης.

Κατά το πείραμα 5 χρησιμοποιήθηκε μια μεγάλη μάζα του ελαστικού, αυτό είχε σαν αποτέλεσμα η πυρόλυση να λάβει μέρος μόνο στην εξωτερική επιφάνεια του τεμαχίου δημιουργώντας έτσι ένα περιβλήμα, το οποίο θωράκισε το τεμάχιο και εμπόδισε την περαιτέρω πυρόλυση στο εσωτερικό του. Έτσι λόγω χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας το εσωτερικό τμήμα να μην υποστεί αποσύνθεση.

Τα ιδανικότερα αποτελέσματα έχει δώσει το πείραμα 3, με χρήση των 3 kW για 0,23kg του αρχικού υλικού και με ποσοστά παραγόμενων προϊόντων 43,21% κ.β. στερεό, 42,6% κ.β. υγρό και 14,1% κ.β. αέριο. Η μεγαλύτερη ποσότητα αερίου λαμβάνεται κατά τα πειράματα 1 και 7 λόγω υψηλής τιμής αναλογίας του λόγου P/M<sup>2</sup> που προωθεί μια γρήγορη αποσύνθεση ελαστικού σε απλά και πτητικά μόρια.

### 3.4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στις δοκιμές που θεωρήθηκαν ως ολοκληρωμένη πυρόλυση, το στερεό υλικό που συλλέχτηκε ήταν της τάξης 40,6 – 47,5% κ.β. αρχικού υλικού (τα μεταλλικά σύρματα είχαν διαχωριστεί, ζυγιστεί και στην συνέχεια αφαιρεθεί από τους υπολογισμούς). Όπως φαίνεται και στον πίνακα υψηλότερη τιμή του στερεού προϊόντος λαμβάνεται όταν ο λόγος ισχύς – μάζας (P/M<sup>2</sup>) είναι μεγαλύτερος.

**Πινάκας 16: με ιδιότητες παραγόμενου στερεού προϊόντος [54]**

α/α Δοκ.	ΑΘΔ (MJ/kg)	ΚΘΔ (MJ/kg)	ΤΕΛΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ				ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (g/mL)	ΤΕΦΡΑ % κ.β.
			C (% κ.β.)	H (% κ.β.)	N (% κ.β.)	S (% κ.β.)		
1	35 ± 4	35 ± 4	88,33	0,35	0,15	2,3	0,401	7,23
2	36 ± 4	36 ± 4	87,99	0,58	0,00	1,8	0,420	7,72
3	33 ± 3	33 ± 3	82,31	0,83	0,48	2,0	0,492	7,57
4	30 ± 3	30 ± 3	86,71	3,21	0,33	1,3	Δεν ανιχνεύετε	5,88
5	34 ± 3	34 ± 3	84,90	1,61	0,42	1,6	0,560	6,29
6	34 ± 3	34 ± 3	86,65	0,32	0,78	1,5	0,434	Δεν ανιχνεύετε
7	Δεν ανιχνεύετε	Δεν ανιχνεύετε	92,03	0,53	0,00	Δεν ανιχνεύετε	0,562	9,50

Μια μικρή ποσότητα (μικρότερη από το 1%), υδρογόνου πάντα υπάρχει στο στερεό προϊόν υποδεικνύοντας την παρουσία μικρών ποσοτήτων οργανικής ουσίας. Η παρουσία αυτών των ενώσεων αποδίδεται στην μικρή ποσότητα υγρού που παραμένει στο τέλος κάθε πειράματος. Η παρουσία υγρού στα στερεά προϊόντα δεν επηρεάζει καμία περεταίρω εφαρμογή του, για παράδειγμα το εμπορικό κοκ περιέχει 14% κ.β. πτητικού καύσιμου υγρού [55]. Στα πειράματα 4 και 5 η ποσότητα υδρογόνου ήταν πάνω από 1%. Το θείο στο στερεό προέρχεται από τις ενώσεις που υπάρχουν στο βουλκανισμένο ελαστικό και το ποσοστό του φτάνει περίπου το 50% του αρχικού θείου που υπάρχει αρχικά στο ελαστικό [56]. Τα στερεά προϊόντα έχουν την κατώτερη θερμογόνο δύναμη υψηλότερη από τα ίδια τα ελαστικά και οπάνθρακα πετρελαίου [57] και μικρότερη ποσότητα θείου από τον ακατέργαστο οπάνθρακα [58]. Χαμηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο παρουσιάζεται όταν ο λόγος  $P/M^2$  είναι μεγαλύτερος από  $55,1 \text{ kw/kg}^2$ . Η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι της τάξης 89,33-88,71 % και μειώνεται με την αύξηση σε περιεκτικότητα υδρογόνου.

Οι σιδερένιες βέργες έχουν αφαιρεθεί από τα ελαστικά πριν την διαδικασία πυρόλυση, παρόλο αυτά στο στερεό προϊόν υπάρχουν υπολείμματα μετάλλων. Ο Fe (σίδηρος) και Zn (ψευδάργυρος) είναι τα μέταλλα που ανιχνεύονται σε μεγαλύτερη αφθονία. Η παρουσία του σιδήρου οφείλεται πιθανών στην ύπαρξη μικρών κομματιών που παρέμειναν στα τεμαχισμένα ελαστικά, είτε επειδή δεν είχαν απομακρυνθεί με μαγνήτη, είτε επειδή αποτελούσαν μη σίδηρομαγνητικά στοιχεία. Ο Zn (ψευδάργυρος) προέρχεται από τις ενώσεις ZnO (οξείδιο του ψευδαργύρου) οι οποίες χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα στην κατασκευή ελαστικού. Ο Cu

(χαλκός) προέρχεται από ορείχαλκο ο οποίος χρησιμοποιείται ως επικάλυψη στα μεταλλικά σύρματα του ελαστικού. Άλλα μεταλλικά στοιχεία που ανιχνεύονται στα στερεά προϊόντα προέρχονται από επιπρόσθετα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ελαστικών. Πάντως το ποσοστό των μεταλλικών στοιχείων, ήταν κάτω από το επιτρεπτό όριο που ισχύει με βάση το ευρωπαϊκό πρότυπο για εμπορική αιθάλη.

Οι ιδιότητες του στερεού προϊόντος επηρεάζονται από τους παραμέτρους πυρόλυσης και από τα κατάλοιπα οργανικών ουσιών. Αν ο λόγος  $P/M^2$  είναι μικρότερος από  $55,1 \text{ kW/kg}^2$  τότε η περιεκτικότητα σε υδρογόνο είναι μεγαλύτερη από 1%. Η ειδική επιφάνεια, οι διαστάσεις των πόρων και η κατανομή τους εξαρτώνται από την ποσότητα των προσροφημένων ενώσεων. Η ειδική επιφάνεια είναι μεγαλύτερη όταν η περιεκτικότητα σε υδρογόνο είναι χαμηλή.

Οι τιμές των χαρακτηριστικών στοιχείων του στερεού πυρόλυσης, λαμβάνουν θέση μεταξύ τιμών του ανθρακίτη και της πίσσας. Όπως και να έχει η υψηλή περιεκτικότητα σε θείο και τέφρα εμποδίζει οποιαδήποτε άμεση χρήση του στερεού εκτός αν προηγηθεί διαδικασία μείωσης ανεπιθύμητων συστατικών.

**Πινάκας 17: ιδιότητες υγρού προϊόντος πυρόλυσης με μικροκόμματα. [54]**

α/α Δοκ	P/M <sup>2</sup> (kW/kg <sup>2</sup> )	Πυκνότητα (g/mL)	Ιξώδες (cP)	ΑΘΔ (MJ/kg)	ΚΘΔ (MJ/kg)	ΤΕΛΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ				C/H Μοριακή αναλογία
						C (% κ.β.)	H (% κ.β.)	N (% κ.β.)	S (% κ.β.)	
1	137,6	0,900	2,58	47 <sub>+5</sub>	45 <sub>+4</sub>	87,72	11,31	0,23	0,7	0,65
2	106,0	0,889	2,44	48 <sub>+5</sub>	46 <sub>+5</sub>	85,78	11,01	0,29	1,0	0,65
3	55,1	0,874	1,73	44 <sub>+4</sub>	42 <sub>+4</sub>	86,87	10,12	0,66	0,9	0,72
4	23,6	0,816	0,73	43 <sub>+4</sub>	40 <sub>+4</sub>	87,35	11,83	0,02	0,8	0,62
5	1,3	0,890	2,36	43 <sub>+4</sub>	41 <sub>+4</sub>	87,41	10,77	0,39	0,8	0,68
6	11,9	0,900	2,88	43 <sub>+4</sub>	40 <sub>+4</sub>	87,68	10,84	0,15	0,8	0,68
7	730,1	0,907	Δεν ανιχνεύετε	Δεν ανιχνεύετε	Δεν ανιχνεύετε	84,77	10,78	0,34	Δεν ανιχνεύετε	0,66

Τα παραγόμενα υγρά πυρόλυσης στην τελική ανάλυση δεν παρουσίασαν μεγάλες διαφορές μεταξύ δοκιμών. Ο λόγος  $P / M^2$  επηρεάζει τις ιδιότητες όπως το χρώμα, την πυκνότητα και το ιξώδες. Παρατηρήθηκαν δυο περιπτώσεις. Εάν διατηρούμε την σταθερή μάζα και μειώνουμε το λόγο  $P / M^2$  (1-4 πείραμα) τότε παράγετε υγρό ωχροκίτρινης απόχρωσης, χαμηλής πυκνότητας και με χαμηλό ιξώδες. Σε περίπτωση σταθερής ισχύς και μεταβολής μάζας παρατηρείται ότι με την αύξηση της μάζας αυξάνεται η πυκνότητα και το ιξώδες του υγρού καθώς και το χρώμα του είναι σκούρο καφέ. Η ανώτερη και η κατώτερη

θερμογόνο ικανότητα του ελαίου είναι κοντά στις τιμές του καύσιμου diesel [59]. Τα παραγόμενα υγρά πυρόλυσης που έχουν χαμηλό ιξώδες, χαμηλή πυκνότητα και υψηλή ανώτατη θερμογόνα ικανότητα μπορεί να θεωρηθεί ως δυνητικό καύσιμο. Ένα πιθανό μειονέκτημα των υγρών προϊόντων είναι η σχετικά μεγάλη περιεκτικότητα τους σε θείο (μέχρι 1,0%) που απαιτεί υδροαποθείωση προτού χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο αυτοκινήτων.

Στην σύνθεση του αερίου παραγωγής υπήρχαν μικρά οργανικά μόρια όπως μεθάνιο, αιθάνιο, αιθένιο, προπένιο, υδρογονάνθρακες και σε χαμηλή ποσότητα ισοπρένιο. Καθώς και ανόργανα μόρια όπως υδρογόνο, υδρόθειο, μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα.

Παρατηρούμε ότι με την μείωση του λόγου  $P / M^2$  από 137,6 στο 55,1 το ποσοστό του παραγόμενου αερίου μειώνεται από 27,4% στο 14,1% και σύγχρονος αυξάνεται η περιεκτικότητα του σε υδρογονάνθρακες από 46,54 σε 76,79% ενώ μειώνονται η ποσότητες των προπενίων και βουτελενίων. Αυτά τα δεδομένα θα συμφωνούσαν σε περίπτωση μικρού χρόνου παραμονής ελαστικών στον αντιδραστήρα με ψηλό βαθμό αναλογίας  $P / M^2$ . Άλλες ανόργανες ουσίες ταυτοποιήθηκαν σε μία ποσότητα μικρότερη από 1%, όπως  $H_2S$ , CO και  $CO_2$ , αλλά δεν προσδιορίστηκαν ποσοτικά.

#### 3.4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πυρόλυση ελαστικών με μικροκύματα πραγματοποιείται σε σύντομο χρονικό διάστημα και επηρεάζεται έντονα από την ισχύ και το ποσοστό μάζας που πυρολύεται. Η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση και τελική σύνθεση των προϊόντων. Μια τέτοια τεχνολογία εμπορεύεται η εταιρία Global Resource corporation. Η μονάδα πυρόλυσης μπορεί να επεξεργαστεί ένα εύρος οργανικών υλικών όπως:

- Ελαστικά
- Πλαστικά
- Οικιακά απόβλητα
- Ασφαλτούχος σχιστόλιθος και κάρβουνο

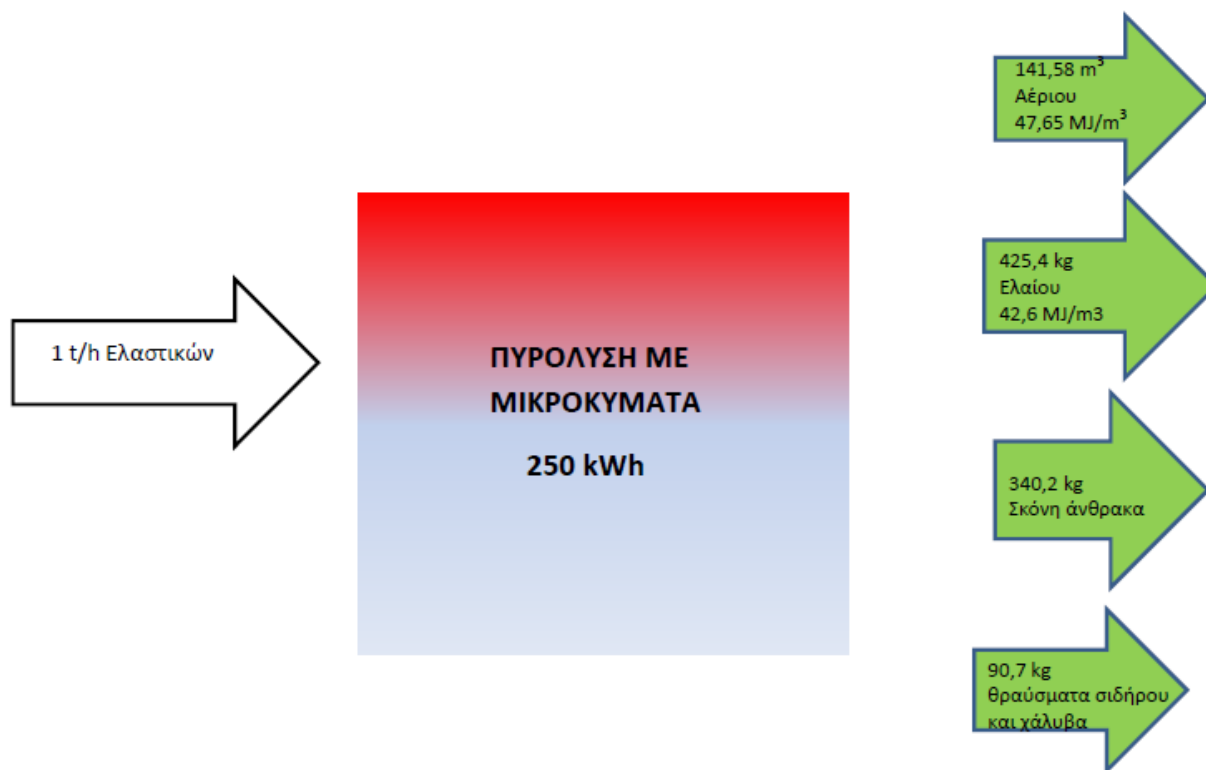




**Εικόνα 22: Γραφική απεικόνιση μονάδας πυρόλυσης με μικροκύματα [60]**

Σύμφωνα πάντα με την εταιρία η πρώτη ύλη προεπεξεργάζεται σε ένα κλειστό αντιδραστήρα υπό κενό. Η διεργασία αποσύνθεσης της πρώτης ύλης δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως πλήρη πυρόλυση επειδή με την τεχνολογία μικροκυμάτων επιτυγχάνεται και μερική πυρόλυση των υδρογονανθράκων. Η ιδιοκατανάλωση της μονάδας πυρόλυσης με μικροκύματα για επεξεργασία 1 t/h είναι 250 kWh.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (Global Resource corporation) για την πυρόλυση με μικροκύματα ενός τόνου ελαστικών.



Σχήμα 23: διάγραμμα ροής πυρόλυσης με μικροκύματα

Το παραγόμενο έλαιο έχει τις παρακάτω ιδιότητες

Πυκνότητα (@ 20 C)	Στάχτη (%κ.β.)	Υγρασία (% κ.β.)	Θείο (%κ.β.)	H <sub>u</sub> MJ/Kg	Ιζήματα (% κ.β.)	Αλογόνα ppm	Χλώριο ppm	Σημείο Ανάφλεξη (°C)
936,2	0,009	0,008	0,619	42,6	0,008	660	600	49,5

Οι διαφορετικών ποιοτήτων σκόνης άνθρακα που παράγονται δύναται να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενεργού άνθρακα. Επίσης μπορεί να παραχθεί carbon black (ένα μείγμα N 100, N200, N300, N500 και N700) με περιεκτικότητα σε τέφρα 12-13,5%.

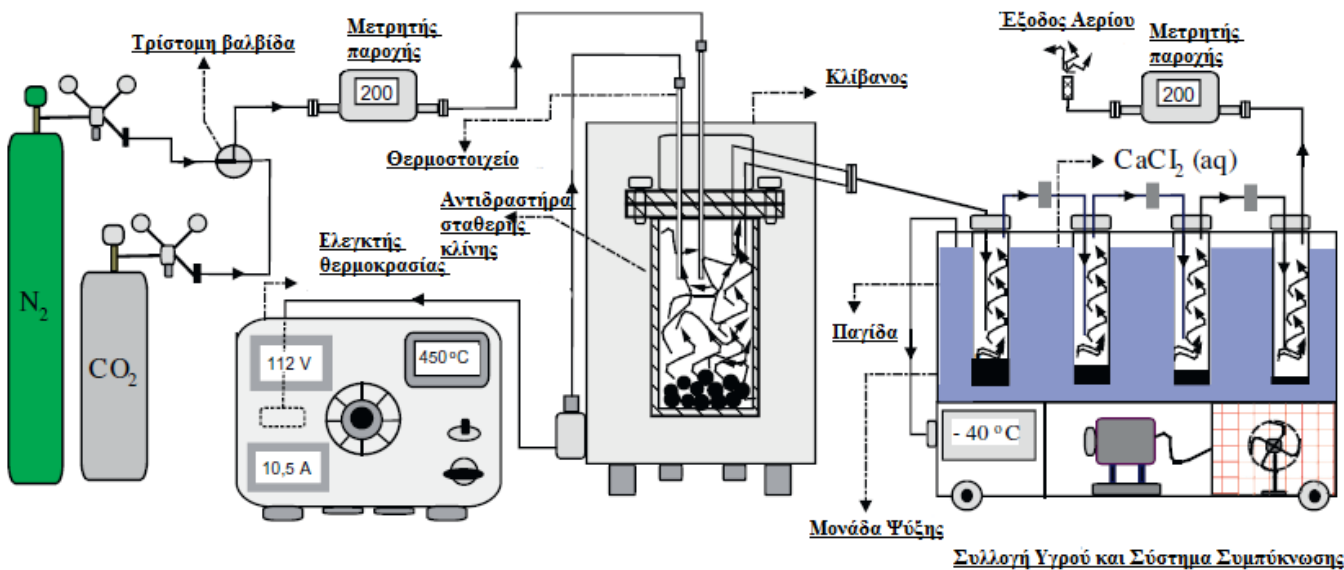
Η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Σίγουρα, όμως αυτή η τεχνολογική λύση δεν μπορεί να χαρακτηριστεί τεχνολογικά ώριμη.

### 3.5 ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΠΥΡΟΛΥΣΗ

#### 3.5.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Κατά την καταλυτική πυρόλυση γίνεται χρήση διαφόρων φυσικών ή χημικών καταλυτών με σκοπό την επιρροή στις αναλογίες και στην ποιότητα των τελικά προϊόντων πυρόλυσης. Ο σκοπός είναι να προσδιοριστεί α) η επίδραση της θερμοκρασίας στην λειτουργία και β) η

επίδραση της αναλογία καταλύτη / ελαστικά στη παραγωγή και ποιότητα των τελικών προϊόντων.



Σχήμα 24: σχηματική διάταξη μονάδας πυρόλυσης με καταλύτη [61]

Το κύριο μέρος της εγκατάστασης του παραπάνω σχήματος αποτελεί ο αντιδραστήρας σταθερής κλίνης από ανοξείδωτο χάλυβα. Το σημείο συλλογής υγρού προϊόντος και συμπύκνωσης αερίου αποτελείται από 4 παγίδες, κυλινδρικού τύπου που είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με αγωγούς. Οι κύλινδροι είναι βουτηγμένοι σε ψυκτικό διάλυμα που αποτελείται από 31 % κ.β. διάλυμα  $\text{CaCl}_2$  (χλωριούχου ασβεστίου). Ο αντιδραστήρας θερμαίνεται με ηλεκτρικό κλίβανο και ο έλεγχος εσωτερικής θερμοκρασίας πραγματοποιείται μέσω θερμοστοιχείων που είναι τοποθετημένα στο εσωτερικό του κλιβάνου.

Ο καταλύτης που χρησιμοποιείται εδώ είναι διογκωμένος περλίτης με την εξής κύρια σύνθεση:  $\text{SiO}_2$  (78,92% κ.β.),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13,39% κ.β.),  $\text{K}_2\text{O}$  (3,88% κ.β.),  $\text{Na}_2\text{O}$  (3,75% κ.β.),  $\text{CaO}$  (0,51% κ.β.),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,85% κ.β.), και  $\text{MgO}$  (0,14 % κ.β.). Πριν από τη χρήση, ο καταλύτης θερμαίνεται στους  $500^\circ\text{C}$  για να απομακρυνθεί η υγρασία, και στη συνέχεια φυλάσσεται σε ξηραντήρες για περαιτέρω χρήση.

Η εισαγωγή του καταλύτη γίνεται με δυο τρόπους α) απευθείας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα β) ο καταλύτης αναμειγνύεται με τους κόκκους ελαστικού (2,00 mm) και στην συνέχεια το μείγμα τοποθετείται στο εσωτερικό του αντιδραστήρα.

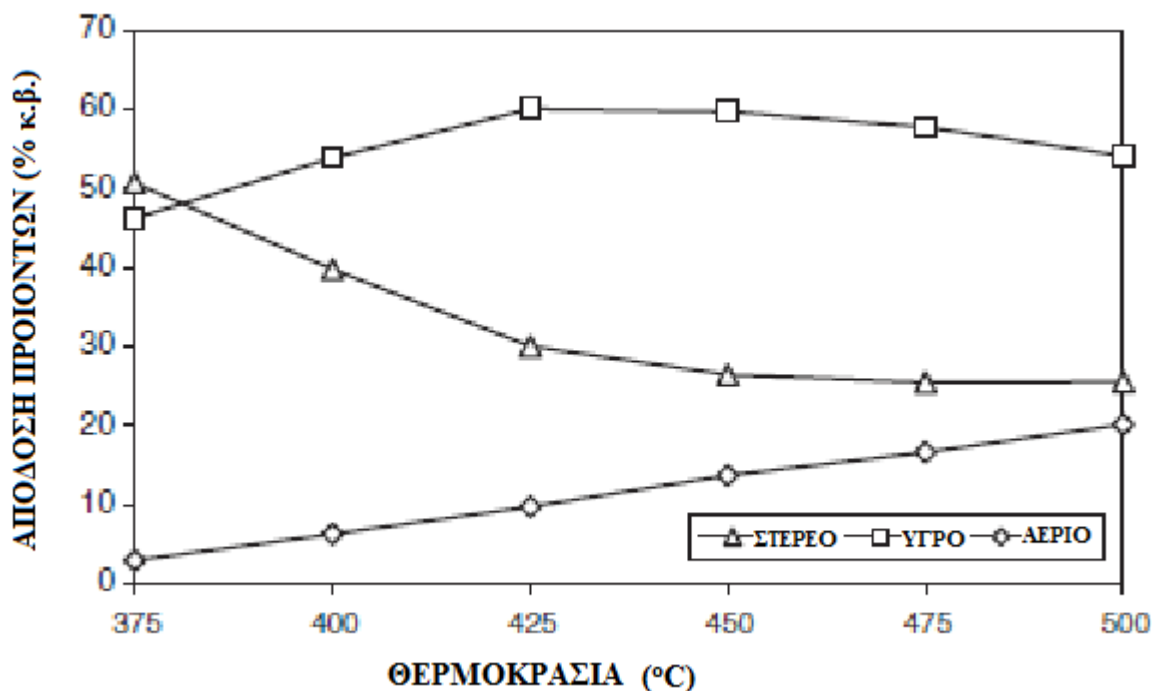
Ο αντιδραστήρας γεμίζεται με την πρώτη ύλη και τοποθετείται στο εσωτερικό του ηλεκτρικού φούρνου, τότε ο αέρας του αντιδραστήρα καθαρίζεται με ροή αζώτου (25 mL/min).

Ο αντιδραστήρας θερμαίνεται εξωτερικά και η αύξηση της θερμοκρασίας πραγματοποιείται με ρυθμό περίπου 10 °C ανά λεπτό και η ροή αζώτου φτάνει στα 100 mL/min. Υπό σταθερή τελική θερμοκρασία των 900 °C ο αντιδραστήρας εξακολουθεί να θερμαίνεται για 60 λεπτά μέχρι ώπου οι κόκκοι να μετατραπούν πλήρως. Στην συνέχεια ο αντιδραστήρας απομακρύνεται από τον φούρνο και ψύχεται σε θερμοκρασία δωματίου. Τα υγρά προϊόντα συμπυκνώνεται εντός τεσσάρων παγίδων, οι οποίες συνδέονται μεταξύ του και ψύχονται μέσα σε διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου. Το στερεό υπόλειμμα που παραμένει στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, στην συνέχεια εξάγεται, ζυγίζεται και φυλάσσεται. Το βάρος του αερίου υπολογίζεται από την διάφορα που προκύπτει αν αφαιρέσουμε από την αρχική μάζα ελαστικών την μάζα υγρού και στερεού προϊόντων.

### 3.5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Υπολογισμοί έδειξαν ότι το σφάλμα της μέσης τιμής απόδοσης τουλάχιστον τριών πειραμάτων, που διεξήχθησαν υπό τις ίδιες πειραματικές συνθήκες, ήταν της τάξης μικρότερης από ± 0,7%.

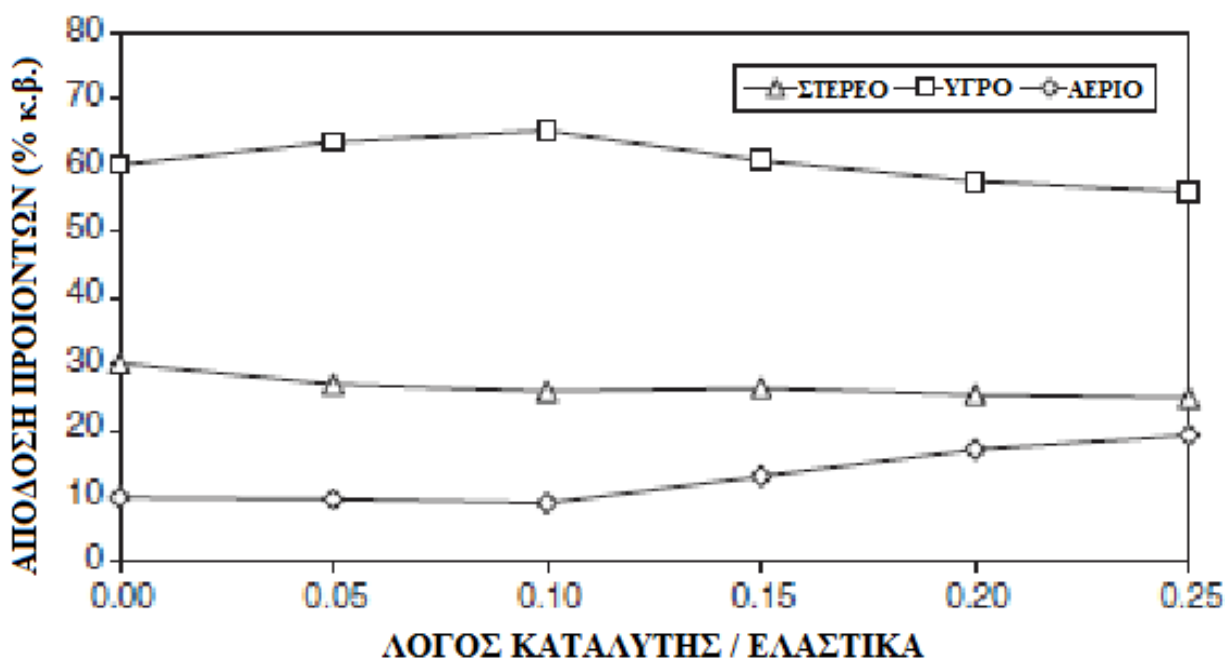
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αναλογία των τελικών προϊόντων εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία πυρόλυσης.



Σχήμα 25: Επίδραση της θερμοκρασίας στις αναλογίες προϊόντων[61]

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ η απόδοση του αερίου αυξάνεται συνεχώς από 2,99% έως και 20,22%, η απόδοση του στερεού προϊόντος μειώνεται από 50,67% έως 26,41% στους 450 °C, και στην συνέχεια παραμένει σχεδόν σταθερή. Από την άλλη η απόδοση του υγρού στην αρχή αυξάνεται από 46,24% μέχρι 60,02% στους 425 °C [62]. Στην συνέχεια η απόδοση του υγρού μειώνεται και φτάνει τελικά στους 500 °C να είναι 54,12%. Έτσι μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η ιδανική θερμοκρασία για παραγωγή υψηλότερης απόδοσης σε έλαιο πυρόλυσης είναι 425 °C. Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε συμφωνία με το αποτέλεσμα του Barbooti et al. [63] για παραγωγή του ελαίου πυρόλυσης υπό ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου.

Στο σημείο αυτό, και αφού προηγήθηκε ο προσδιορισμός της βέλτιστης θερμοκρασίας, θα γίνει προσθήκη του καταλύτη σε διάφορες αναλογίες ποσοστών για τον προσδιορισμό της ιδανικότερης.



**Σχήμα 26: Επίδραση του διογκωμένου περλίτη στις αναλογίες προϊόντων[61]**

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα με την αύξηση του λόγου καταλύτη/ελαστικά στα 10% αυξάνεται και η απόδοση του ελαίου από 60,02 στους 65,11% κ.β. Παρατηρείται μια αύξηση παραγωγής υγρού τάξης 8,48% κ.β. σε σύγκριση με την πυρόλυση χωρίς καταλύτη. Στην συνέχεια παρατηρείται πτώση της απόδοσης μέχρι και 55,89 % κ.β. Από την άλλη η απόδοση του αερίου παραμένει σταθερή και μόνο με την αύξηση του λόγου πάνω από 10% αυξάνεται σημαντικά. Όπως ήταν αναμενόμενο η απόδοση του στερεού προϊόντος ήταν σχεδόν σταθερή και ανεξάρτητα από την χρήση του καταλύτη.

### 3.5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται ιδιότητες των υγρών προϊόντων με και χωρίς χρήση του καταλύτη.

**Πίνακας 18: ιδιότητες ελαίου πυρόλυσης [61]**

	Παραγόμενο έλαιο χωρίς καταλύτη	Παραγόμενο έλαιο με καταλύτη
Άνθρακα (C) % κ.β.	84,09	86,42
Υδρογόνο (H) % κ.β.	9,75	9,90
Άζωτο (N) % κ.β.	0,39	0,36
Θείο (S) % κ.β.	1,37	1,46
Οξυγόνο(O) % κ.β.	4,40	1,87
Μοριακή αναλογία H/C	1,391	1,375
Μοριακή αναλογία O/C	0,039	0,016
Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> , στους 15 °C)	994,7	992,5
Ιξώδες (cSt, στους 40 °C)	6,61	6,52
Α.Θ.Δ. (MJ/kg)	41,31	42,70

Σε γενικές γραμμές για τα προϊόντα της πυρόλυσης ισχύουν όλα όσα έχουν προαναφερθεί στις παραπάνω ενότητες. Αυτό που παρατηρείται εδώ είναι ότι με την χρήση του καταλύτη είναι δυνατή η παρέμβαση στην τελική αναλογία του υγρού προϊόντος καθώς και η βελτιστοποίηση ιδιοτήτων των τελικών προϊόντων.

Βεβαία δεν πρέπει να αγνοείται το γεγονός ότι η χρήση του καταλύτη επιβαρύνει το κόστος της λειτουργίας μονάδας πυρόλυσης.

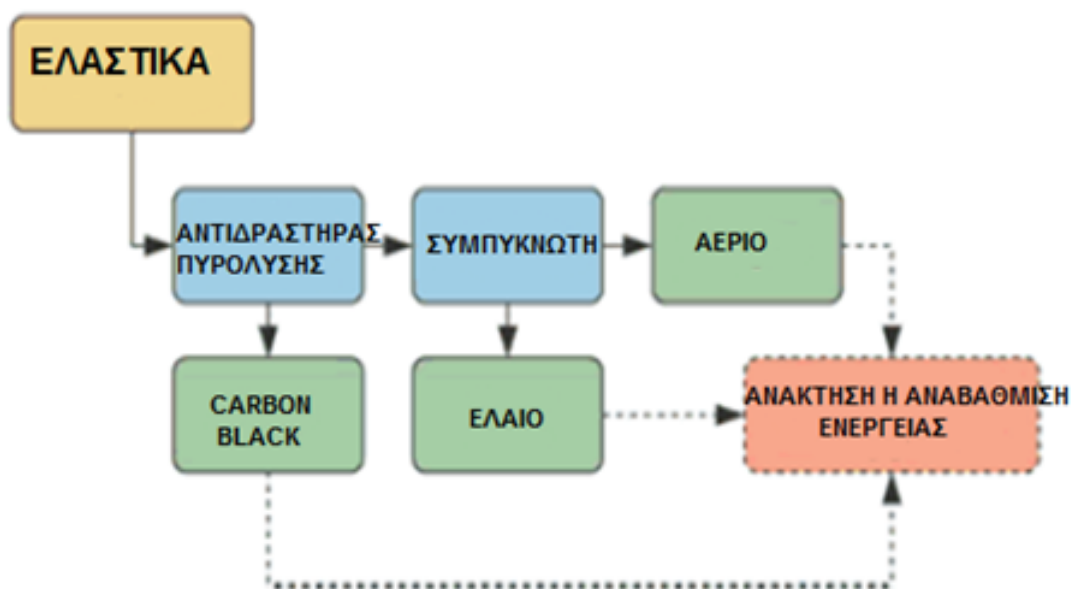
## 4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΑ ΠΡΟΙΟΝΤΑ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για παραπάνω από 30 χρόνια η τεχνολογία της πυρόλυσης έχει προταθεί, σχεδιαστεί, πατενταριστεί και τα τελευταία χρόνια έχουν ανεγερθεί αρκετές μονάδες πυρόλυσης. Παρ' όλα αυτά πολύ λίγες από τις αρχικές προσπάθειες είχαν εμπορική επιτυχία και εξελίχθηκαν

περαιτέρω. Τα βασικά προβλήματα ήταν τεχνικής και οικονομικής φύσης. Το κόστος εγκατάστασης είναι μεγάλο και τα προϊόντα της πυρόλυσης δεν έχουν την κατάλληλη αξία για να ανταγωνιστούν τα συμβατικά προϊόντα. Παρ' όλα αυτά οι τεχνολογικές καινοτομίες μπορούν να μικρύνουν το επενδυτικό και λειτουργικό κόστος και να αναβαθμίσουν τα προϊόντα της πυρόλυσης ελαστικών. Με αυτό τον τρόπο, η πυρόλυση που είναι ιδιαίτερα φιλική τεχνολογική λύση μπορεί να γίνει εμπορικά βιώσιμη.

Τα τελικά προϊόντα της πυρόλυσης είναι αέριο, έλαιο και άνθρακας. Δυστυχώς τα προϊόντα αυτά έχουν χαμηλές θερμικές ιδιότητες. Δυσκολίες υπάρχουν ακόμα και στην αγορά του παραγόμενου ανακυκλωμένου σιδήρου από την πυρόλυση διότι το υλικό συχνά επιμολύνεται με άνθρακα, κάτι που το κάνει ανεπιθύμητο στους επεξεργαστές των μετάλλων. Συνήθως το μεταλλικό υπόλειμμα είναι στην μορφή ογκώδη μάζας με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος διαχείρισης και μεταφοράς του.



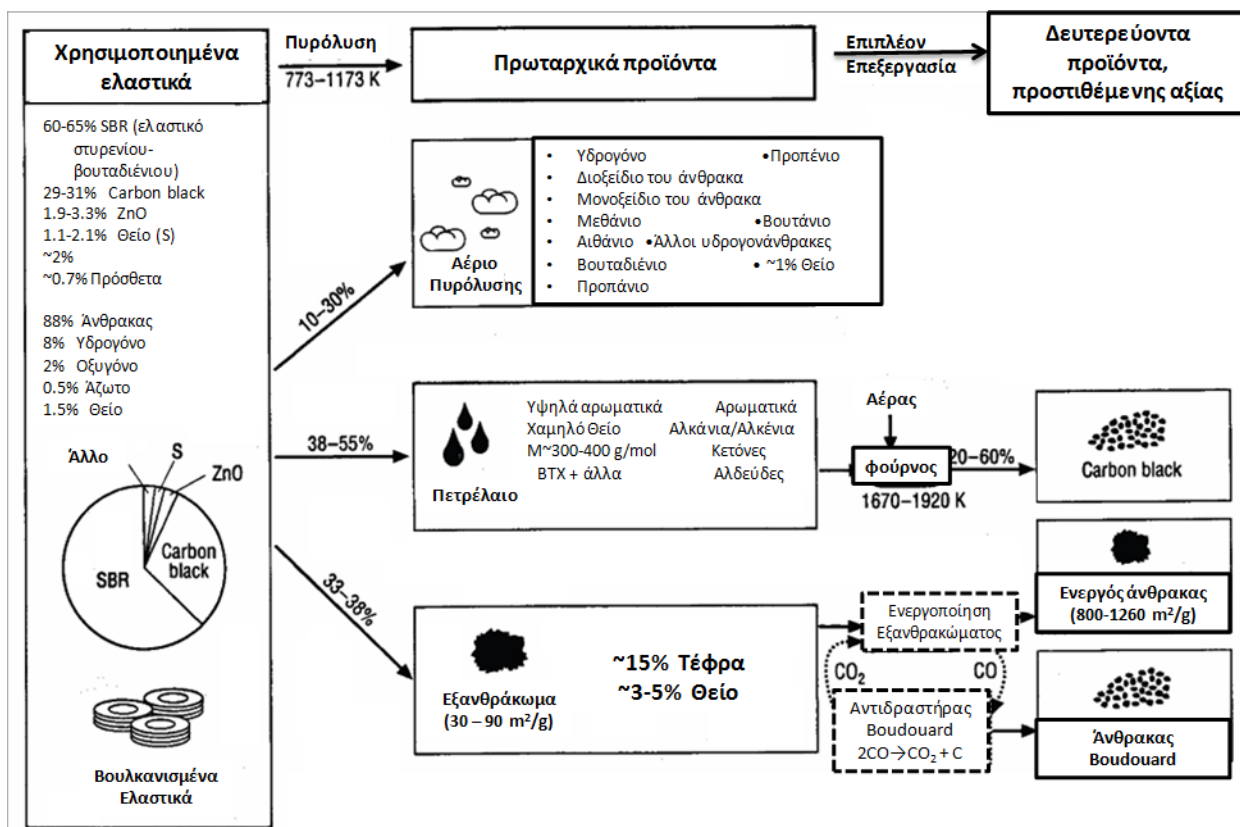
Εικόνα 27: Πυρόλυση χρησιμοποιημένων ελαστικών. [64]

## 4.2 ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

### 4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η απλή πυρόλυση παράγει σημαντικές ποσότητες πετρελαιοειδών και άνθρακα τα οποία μπορούν να επεξεργαστούν περαιτέρω και να προκύψουν δευτερογενή, μεγαλύτερης εμπορικής αξίας, προϊόντα. Η πυρόλυση με επεξεργασία των προϊόντων είναι μια σχετικά καινούργια τεχνολογία που διαφοροποιείται σε σχέση με την συμβατική πυρόλυση στο γεγονός ότι τα προϊόντα της πυρόλυσης υπόκεινται σε δευτερογενή επεξεργασία και αναβαθμίζονται εμπορικά.

Στην **Εικόνα 28** παρατίθενται η χημική σύνθεση των ελαστικών, τα πρωτογενή προϊόντα της απλής πυρόλυσης αλλά και η περαιτέρω επεξεργασία τους και τα αντίστοιχα προϊόντα της δευτερογενούς επεξεργασίας.



Εικόνα 28: Απλή πυρόλυση και δευτερογενής επεξεργασία των προϊόντων [65]

### 4.2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΙΘΑΛΗΣ (CARBON BLACK)

Από την διαδικασία πυρόλυσης χρησιμοποιημένων ελαστικών ένα από τα προϊόντα που παράγεται είναι και η αιθάλη. Η ποιότητα της αιθάλης πυρόλυσης ή όπως είναι γνωστή και



διεθνώς «carbon black» δεν είναι ίδια με αυτήν που παράγεται από το πετρέλαιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα και η τιμή της να είναι κατά πολύ χαμηλότερη.

Μια ενδιαφέρουσα λύση για παραγωγή του carbon black υψηλής ποιότητας αποτελεί η χρήση του πετρελαίου πυρόλυσης ως αρχική ύλη. Αυτό συμβαίνει διότι οι ιδιότητες του πετρελαίου αυτού είναι παρόμοιες με τα κλάσματα πετρελαίου που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή αυτή.

Η παραγωγή του carbon black πραγματοποιείται σε φούρνο πετρελαίου, μέσο μερικής καύσης και πυρόλυσης. Για την διαδικασία χρησιμοποιείται χαλύβδινος αντιδραστήρας, και με θερμοκρασία να κυμαίνεται στους 1673-1923 °C

Οι ιδιότητες της αιθάλης που είναι σημαντικές για τις εφαρμογές ενίσχυσης, είναι η ειδική επιφάνεια και ο ειδικός. Οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από τον σχεδιασμό ακροφυσίων, την θερμοκρασία, τον χρόνο παραμονής και την ένταση τριβής.

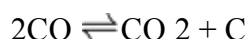
Εκτός από τα παραπάνω το πετρέλαιο πυρόλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως καύσιμο για την διαδικασία πυρόλυσης. Κάτι τέτοιο όμως απαιτεί επιπρόσθετη επεξεργασία του πετρελαίου για αφαίρεση των αρωματικών.

Οι λόγοι για τους οποίους η μετατροπή του carbon black από το πετρέλαιο πυρόλυσης αποτελεί μια ελκυστική επιλογή είναι οι εξής:

- Τα στερεά προϊόντα, στην περίπτωση μας το carbon black , αποθηκεύονται και διαχειρίζονται ευκολότερα.
- Η εμπορική αξία του στερεού προϊόντος είναι μεγαλύτερη από όλα τα πιθανώς ανακτηθέντα καύσιμα (στερεά ή υγρά)
- Δεν χρειάζεται περεταίρω επεξεργασία των προϊόντων
- Η χρήση των πετρελαιοειδών ως καύσιμο απαιτεί επιπρόσθετη επεξεργασία και αναβάθμιση εξαιτίας της σχετικά μεγάλης περιεκτικότητας σε αρωματικές ενώσεις
- Επειδή το carbon black χρησιμοποιείται στην παραγωγή ελαστικών, η παραγωγή του από τα πετρελαιοειδή πυρόλυσης είναι μιας μορφής ανακύκλωση η οποία είναι πιο πρακτική από την προσπάθεια ανάκτησης του αρχικού carbon black από το εξανθράκωμα.

### 4.2.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΝΘΡΑΚΑ BOUDOUARD ΑΠΟ CO

Η παραγωγή του άνθρακα Boudouard είναι ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό της εξελιγμένης πυρόλυσης και πραγματοποιείται μέσω της αντίδρασης Boudouard. Γενικά η αντίδραση Boudouard είναι η αντίδραση οξειδοαναγωγής σε ένα μείγμα χημικής ισορροπίας μονοξειδίου του άνθρακα και διοξειδίου του άνθρακα σε μια δεδομένη θερμοκρασία.



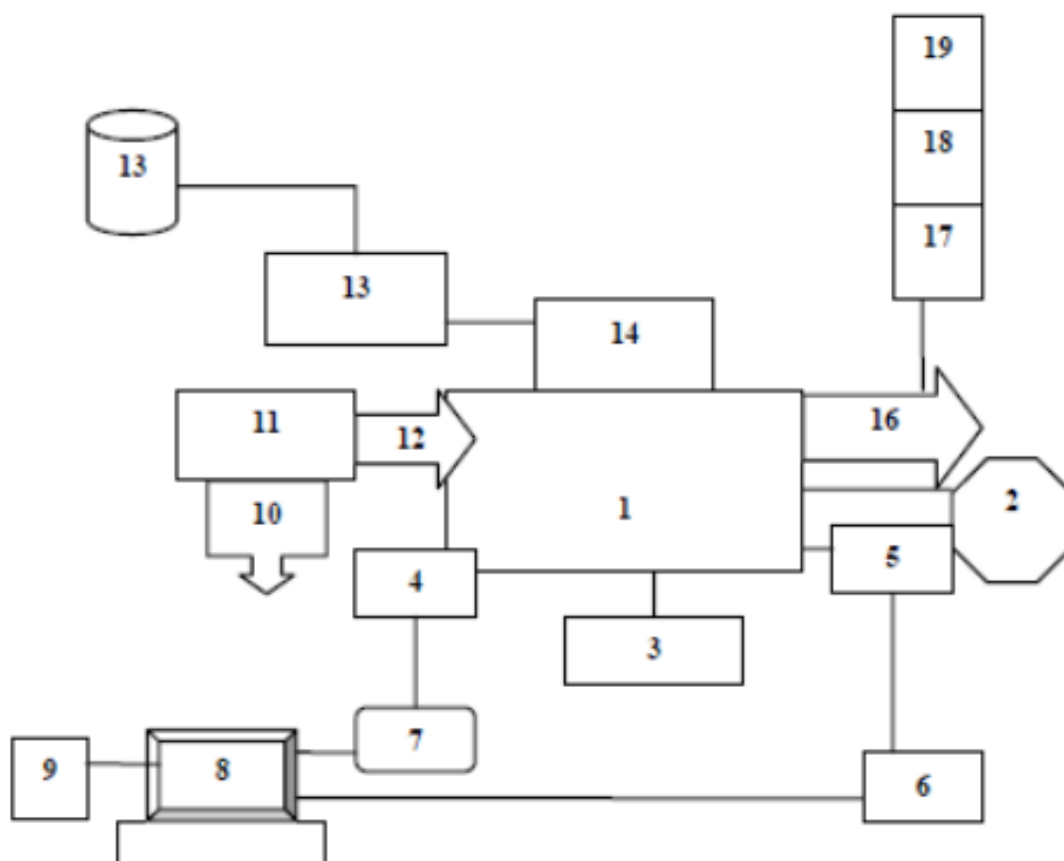
Δηλαδή είναι ο δυσανάλογος καταμερισμός του μονοξειδίου άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα και άνθρακα (άνθρακας Boudouard) ή αντίστροφα :

Η θερμοκρασία της αντίδρασης κυμαίνεται στους 773-800° K και το προϊόν του άνθρακα είναι απαλλαγμένο από την τέφρα και μέγεθος των σωματιδίων του είναι αρκετά μικρότερο απ' ό,τι μπορεί να επιτευχθεί με άλεση. Στην πραγματικότητα το μέγεθος του άνθρακα Boudouard είναι αρκετά μικρό ώστε να καεί πλήρως σε κινητήρα diesel. Ο άνθρακας Boudouard είναι παρόμοιος του carbon black αν και έχει μηδενική περιεκτικότητα σε υδρογόνο. Σε μερικές εφαρμογές μπορεί να αντικαταστήσει το carbon black. Βασικές εφαρμογές του άνθρακα Boudouard είναι η παραγωγή λιπαντικών και χρωστικών ουσιών.

### 4.2.4 ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ

Από το πετρέλαιο πυρόλυσης όπως είδη αναφέρθηκε είναι δυνατή η παραγωγή του carbon black υψηλής ποιότητας. Άλλο ένα ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με την μίξη του καύσιμου diesel (DF) με πετρέλαιο πυρόλυσης [66].

Ένα τέτοιο πείραμα έχει πραγματοποιηθεί με την βοήθεια του δοκιμαστικού μονοκύλινδρου κινητήρα diesel άμεσου ψεκασμού με μείγματα διάφορων αναλογιών κατά όγκο του πετρελαίου πυρόλυσης με καύσιμου diesel. Πριν την εκτέλεση του πειράματος, τα μείγματα αυτά ήταν υπό παρακολούθηση και έλεγχο για 15 μέρες για τυχόν διαχωρισμούς, οι οποίοι τελικά δεν παρατηρήθηκαν.



**Εικόνα 29: Διάταξη μονοκύλινδρου κινητήρα diesel άμεσου ψεκασμού[66]**

**1. Κινητήρας, 2 δυναμόμετρο, 3. Δείκτης καυσαερίων, 4. Κωδικοποιητής, 5. Συλλέκτης πίεση, 6. Μεταλλάκτης πίεσης, 7. Ενισχυτής, 8. C.O.R. 9. Εκτυπωτής 10. Δεξαμενή αερίου, 11. Μετρητής ροής αερίου, 12. Βαλβίδα εισαγωγής, 13. Δεξαμενή καυσίμου, 14. Αντλία καυσίμου, 15. Μπεκ ψεκασμού καυσίμου, 16. Εξαγωγή καυσαερίων, 17. Αναλυτής καυσαερίων, 18. Αντλία καπνού**

Μετά την ολοκλήρωση του πειράματος πρόεκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η θερμική αποδοτικότητα φρένων του κινητήρα αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης στο μείγμα του πετρελαίου πυρόλυσης .
- Κατά την διάρκεια λειτουργίας κινητήρα δεν παρατηρήθηκε φραγή στον ψεκαστήρα σε κανένα από τα πειράματα.
- Σε πλήρη φορτίο οι εκπομπές υδρογονανθράκων είναι υψηλότερες για το μείγμα. Κάτι που οφείλεται στην παρουσία αρωματικού υδρογονάνθρακα στο πετρέλαιο.
- Οι εκπομπές του μονοξειδίου άνθρακα είναι επίσης υψηλές για το μείγμα αλλά οι τιμές δεν ξεπερνάν το 0,1%.
- εκπομπές καπνού είναι υψηλότερες σε λειτουργία με πλήρες φορτίο σε

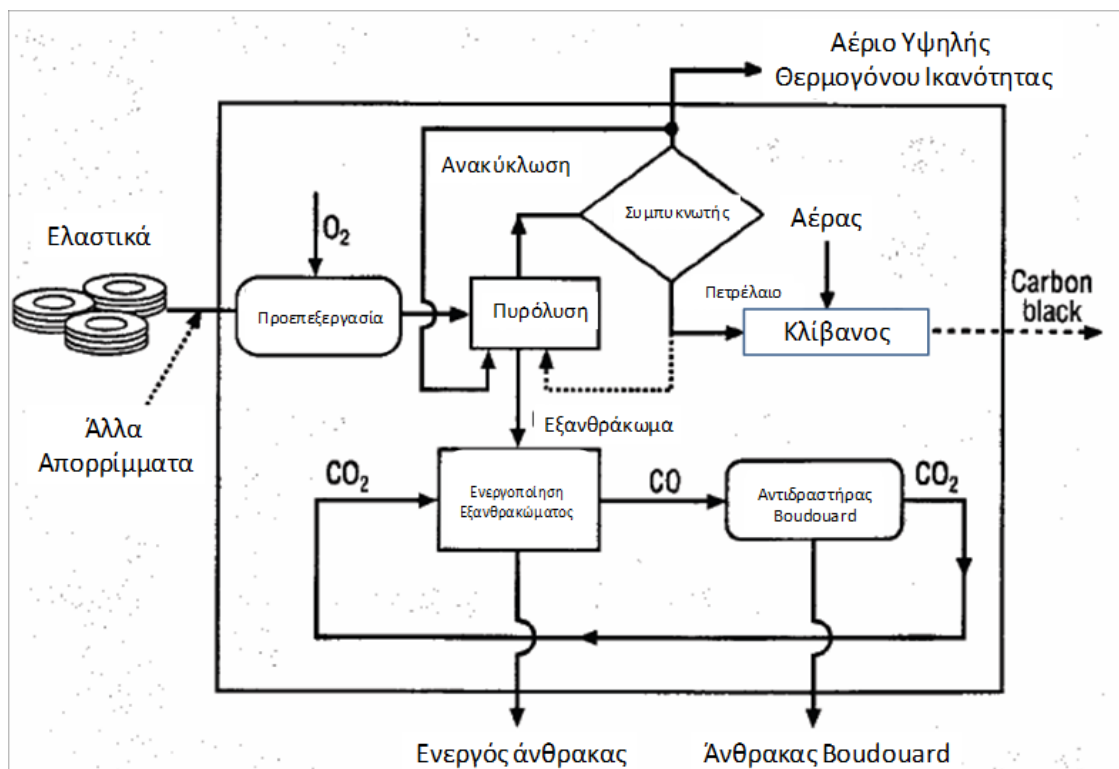
σχέση με το καύσιμο diesel.

- Η καθυστέρηση ανάφλεξης είναι μεγαλύτερη για το μείγμα.
- Μέγιστη πίεση και ο ρυθμός αύξησης της πίεσης του μείγματος είναι υψηλότερα σε σύγκριση με καύσιμο diesel.

Συμφώνα με τα παραπάνω η μείωση του ιξώδες και των αρωματικών ενώσεων, στο μείγμα πετρελαίου πυρόλυσης με diesel, δίνει την δυνατότητα στο μείγμα αυτό να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε κινητήρες diesel.

#### 4.2.5 ΑΕΡΙΟ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ

Το παραγόμενο αέριο συνήθως χρησιμοποιείται για τις θερμικές ανάγκες της μονάδας. Στο σχήμα που ακολουθεί παρατίθεται ένα απλουστευτικό διάγραμμα της διεργασίας της εξελιγμένης πυρόλυσης.



Εικόνα 30: Πυρόλυση ελαστικών με δευτερογενή επεξεργασία των προϊόντων [65]

Οι μεγάλης κλίμακας εφαρμογές είναι γενικά περιορισμένες εξαιτίας των σημαντικών λειτουργικών προβλημάτων που έχουν εμφανίσει αλλά και του υψηλού κόστους που απαιτείται για την αναβάθμιση των προϊόντων της πυρόλυσης.

## **5. ΚΑΤΑΛΟΓΑ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ**

### **5.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Κατά την διαδικασία πυρόλυσης δημιουργούνται απόβλητα κάποια από τα οποία προκαλούν περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Γενικά οι επιπτώσεις αυτές δεν είναι σημαντικές λόγω χαμηλής δυναμικότητας που παρουσιάζουν οι μονάδες πυρόλυσης. Καθώς στο παρελθόν δεν έχει αναφερθεί το κλείσιμο μιας τέτοιας μονάδας λόγω μόλυνσης. Βέβαια οι διαφορές αναφορές ως προς τα απόβλητα δεν παρουσιάζουν πλήρη εικόνα είτε λόγω πειραματικής διαδικασίας είτε λόγω χαμηλής δυναμικότητας. Διότι με αύξηση δυναμικότητας αυξάνεται και το ποσοστό αποβλήτων. Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι η σύνθεση των ελαστικών. Αυτό όμως είναι δύσκολά να πραγματοποιηθεί διότι η σύνθεση διαφέρει από μάρκα σε μάρκα και αποτελεί συνήθως εμπορικό μυστικό.

### **5.2 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ**

Η μόνη πρώτη ύλη που απαιτείται για την πυρόλυση είναι τα χρησιμοποιημένα ελαστικά. Οι περισσότερες μονάδες επεξεργασίας διαθέτουν ένα απόθεμα πρώτης ύλης που επαρκεί για 10 με 30 μέρες για ποικίλους λόγους όπως διακυμάνσεις τιμών, προβλήματα μεταφοράς ή απεργίες. Οι ποσότητες που αποθηκεύονται είναι τις τάξη 10.000 με 300.000 ελαστικά ανάλογα της δυναμικότητας μονάδας. Η Αποθήκευση ολόκληρων ελαστικών απαιτεί ορθή διαχείριση για την πρόληψη πιθανών προβλημάτων υγείας. Ολόκληρα ελαστικά που αποθηκεύονται σε εξωτερικούς χώρους μπορεί να υποστούν επεξεργασία με φυτοφάρμακα ή εντομοκτόνα για τον έλεγχο φορέων (π.χ., κουνούπια ή άλλα έντομα, τρωκτικά, φίδια). Μια πιθανή βροχή που ξεπλένει, εκτός από τα διάφορα χρώματα η λάδια που υπάρχουν πάνω στα ελαστικά, και τα φυτοφάρμακα, έχει ως αποτέλεσμα όλες αυτές οι ουσίες να περάσουν στο έδαφος. Αυτό με την σειρά του σημαίνει κίνδυνος μόλυνση του εδάφους και των υδάτων.

Η απορροή όμβριων από τους χώρους αποθήκευσης είναι δυνατόν να ρυθμιστεί, μέσο ανάπτυξης σχεδίου πρόληψης της ρύπανσης. Οι βέλτιστες πρακτικές διαχειρίσεις είναι ο έλεγχος της απορροής μέσω της συγκράτησης (π.χ. αναχωμάτων) και της δέσμευσης (π.χ. λίμνες καθίζησης) που μπορούν να αποτελέσουν αποδεκτές και αποδοτικές λύσεις.

Επίσης η αποθήκευση ελαστικών αποτελεί κίνδυνο πυρκαγιάς. Εκτός από αυτό η ανοιχτή καύση απορριμμάτων ελαστικών εκπέμπουν ρύπους που είναι βλαβεροί για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Η δημιουργία διαδρόμων και κρασπέδων ανάμεσα και γύρω από τους σωρούς ελαστικών επιτρέπουν την άμεση πρόσβαση για κατάσβεση τυχών πυρκαγιάς καθώς χρησιμοποιούνται και ως αντιπυρικές ζώνες

Με βάση τα παραπάνω μια μονάδα που πρόκειται να στηθεί θα πρέπει να λάβει υπόψη τους παραπάνω κινδύνους λαμβάνοντας όλα τα απαραίτητα μέτρα προστασίας του περιβάλλοντος κατά την αποθήκευση της πρώτης ύλης.

### 5.3 ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Γενικά οποιοδήποτε στερεά προϊόντα που προέρχονται από την επεξεργασία ελαστικών θα μπορούσε να χαρακτηριστούν ως στερεά απόβλητα, αν και δεν πωλούνται, δεν χρησιμοποιούνται ή δεν ανακυκλώνονται κατά την επεξεργασία ελαστικών.

Τα στερεά απόβλητα θεωρούνται επικίνδυνα εφόσον παρουσιάζουν κάποια από τα χαρακτηριστικά των επικίνδυνων αποβλήτων.

- Αναφλεξιμότητα. ποσό εύκολα ένα υλικό πιάνει φωτιά και αν υπάρχει κίνδυνος έκρηξης.
- Διαβρωτικότητα. Έχει pH μικρότερο από 2 ή μεγαλύτερη από 12,5, ή προκαλεί την καταστροφή των ζωντανών ιστών επιφάνειες ή χάλυβα με χημική δράση
- Αντιδραστικότητα. Έχοντας ιδιότητες εκρηκτικότητα ή χημική δράση που μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία ή το περιβάλλον
- Τοξικότητα. Ένα από τα συστατικά του υλικού έχουν συγκεντρώσεις Τοξικότητας πάνω από τα κανονικά όρια και έχει αποδειχθεί ότι αποτελούν κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία ή το περιβάλλον.

Κατά την λειτουργία μιας μονάδας πυρόλυσης δημιουργούνται διάφορα στερεά απόβλητα τα οποία δεν έχουν χαρακτηριστεί ως επικίνδυνα και κατηγοριοποιούνται στις εξής κατηγορίες

- Οικιακού τύπου απόβλητα από καθαρισμό κτιρίων, γραφείων, καντίνας και τουαλέτες προσωπικού.
- Γραφειακού τύπου απόβλητα που περιλαμβάνουν χαρτί, κενά δοχεία μελανιών κλπ.
- Υλικά από τον καθαρισμό του πατώματος.
- Υλικά από τον καθαρισμό μετά από επισκευές και συντήρηση μηχανολογικού εξοπλισμού.

- Υπόλοιπα (μέταλλα, αδρανείς ίνες από την κατεργασία των ελαστικών). Αυτά υπολογίζονται στη βάση του 15% της αρχικής δυναμικότητας που θα διατίθενται για ανακύκλωση.

### **5.3.1 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

Τα οικιακά και γραφειακά απόβλητα θα χωρίζονται σε ανακυκλώσιμα και μη και θα διατίθενται μέσω του τοπικού συστήματος συλλογής για την απομάκρυνση. Τα στερεά κατάλοιπα της πυρόλυσης εφόσον δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως προϊόν και δεν μπορεί να δεχτεί ανακύκλωση όπως μέταλλα μολυσμένα με άνθρακα θα διατίθενται σε χώρο υγειονομικής ταφής

## **5.4 ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ**

Τα υγρά απόβλητα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Οικιακού τύπου λύματα (κουζίνα, τουαλέτες, και χώροι υγιεινής προσωπικού).
- Υγρά από τον καθορισμό του πατώματος.
- Υγρό από την διαδικασία πυρόλυσης.
- Υδαρές υγρό από καθαρισμούς σωλήνων. Περιέχει λάδια πυρόλυσης.

### **5.4.1 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

Τα οικιακού τύπου υγρά απόβλητα θα διατίθενται είτε σε κεντρικό δίκτυο αποχέτευση εφόσον υπάρχει είτε σε σηπτικό/απορροφητικό λάκκο (βόθρο).

Τα υγρά απόβλητα προερχόμενα από την πυρόλυση που περιέχουν λάσπες ή λάδια θα συμπυκνώνονται (υπάρχει επαρκής ποσότητα θερμότητας) και θα μπορούν να εξαιρωθούν στο σύστημα που θα διαθέτει το εργοστάσιο επίσης μπορούν να διατεθούν σε αδειούχο διαχειριστή για οξειδωση ή αποτέφρωση ή εξαγωγή.

## 5.5 ΑΕΡΙΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Τα αέρια απόβλητα στην διαδικασία πυρόλυσης είναι τα καυσαέρια από την ηλεκτρογεννήτρια (αεριοστρόβιλος). Προέρχονται από την αξιοποίηση του αερίου της πυρόλυσης το οποίο παράγεται συνεχώς και δεν μπορεί να αποθηκευθεί. Στην κατηγορία αυτή είχαν συμπεριληφθεί και τα καυσαέρια από την αξιοποίηση του ελαίου της πυρόλυσης το οποίο όμως μπορεί να αποθηκευθεί και να χρησιμοποιηθεί είτε αλλού είτε σε άλλο χρόνο.

Το θείο που περιέχεται στα λάστιχα (περίπου 1%) κατά την πυρόλυση κατανέμεται κυρίως στο στερεό και στα υγρά τα οποία προσομοιάζουν με συμβατικά υγρά καύσιμα αλλά λόγω του θείου χρειάζονται προεργασία (αποθείωση) πριν την χρήση τους. Το αέριο με απλό τρόπο καθαρίζεται και καίγεται χωρίς κανένα πρόβλημα.

Οι εκπομπές από την καύση είναι ένα μείγμα από αέρια και Ατμούς και περιέχουν τα αέρια της καύσης που περιλαμβάνουν:

- Άζωτο και περίσσεια οξυγόνου
- Νερό (από την καύση και την υγρασία του αέρα)
- Μονοξείδιο του άνθρακα
- Οξείδια του Αζώτου
- Διοξείδιο του Θείου

Είναι γνωστό ότι τα ελαστικά περιέχουν ψηλά ποσοστά θείου. Κατά την πυρόλυση το θείο θα διαχωριστεί στις τρεις φάσεις των προϊόντων δηλαδή στο στερεό, το υγρό και το αέριο. Για το πόσο θείο παραμένει στο στερεό δεν έχει σημασία αφού αυτό αφορά τις προδιαγραφές του τελικού προϊόντος.

Το θείο που περιέχεται στα υγρά και στα αέρια της πυρόλυσης έχει περιβαλλοντική σημασία, διότι αν αυτά χρησιμοποιηθούν σαν καύσιμα στο εργοστάσιο θα παραχθεί SO<sub>2</sub> το οποίο δεν μπορεί να ελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα χωρίς περιορισμούς.

Οι ρύποι που έχουν σημασία όσον αφορά την ποιότητα του αέρα είναι οι πιο κάτω:

- Διοξείδιο του Θείου.
- Οξείδια του Αζώτου
- Μονοξείδιο του Άνθρακα
- Οσμές



### **5.5.1 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

Όλες οι αέριες εκπομπές (καυσαέρια) εξέρχονται και διασπείρονται στο περιβάλλον. Η αραίωση που προκύπτει αλλά και η απόσταση από άλλα υποστατικά θα εξασφαλίζουν ότι δεν θα υπάρχει οχληρία.

Θα πρέπει όμως να ληφθεί πρόνοια στις εξόδους εξαερισμού του κτιρίου για την πιθανή μελλοντική ανάγκη εγκατάστασης συστημάτων καταστροφής των οσμών που θα εξέρχονται στο περιβάλλον.

Υπάρχουν συστήματα που λειτουργούν με όζον ή/και φωτοκατάλυση. Όλος ο αέρας για τις διάφορες καύσεις λαμβάνεται από το εσωτερικό του εργοστασίου άρα στο κτίριο θα υπάρχει ελαφρά υπό πίεση.

Σε τέτοια περίπτωση το σύστημα καθαρισμού του εσωτερικού αέρα θα πρέπει να σχεδιαστεί ανάλογα.

### **5.6 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ**

Η αποθήκευση των προϊόντων της πυρόλυσης, όπως το πετρέλαιο μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Το τυπικό μέγεθος μιας δεξαμενή αποθήκευσης πετρελαίου είναι 10.000 γαλόνια. Οι ανεξέλεγκτες εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων και διαρροές και απορρίψεις πετρελαίου από τις δεξαμενές αυτές ρυθμίζονται μέσο του σωστού σχεδιασμό και τις λειτουργικές απαιτήσεις μονάδας (π.χ. αναχώματα και παρακολούθηση).

## **6. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ**

### **6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στην παρούσα μελέτη, έγινε η διερεύνηση και αξιολόγηση τριών διαφορετικών σεναρίων από μονάδες οι οποίες χρησιμοποιούν την τεχνολογία της πυρόλυσης υπό κενό, η οποία έχει αρκετές βιομηχανικές εφαρμογές και ήδη υπάρχουσες.

Κατόπιν της βιβλιογραφικής έρευνας και θεωρώντας ότι στην Ελλάδα συλλέγονται κάθε χρόνο πάνω από 30.000 τόνοι ελαστικών εκτιμάται ότι οι διαθέσιμες ποσότητες στα δύο μεγάλα

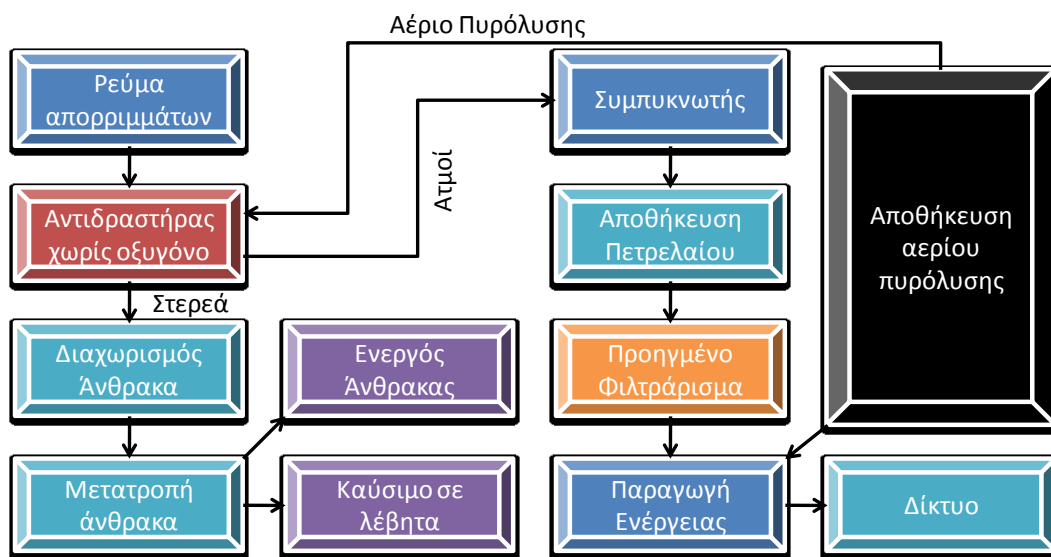
αστικά κέντρα ανέρχονται σε 6000 τόνους ετησίως για τη Θεσσαλονίκη και 8000 τόνους για την Αθήνα.

## 6.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΑΔΑΣ

Στην παρούσα μελέτη γίνεται η αναφορά σε δύο διαφορετικές μονάδες. Η μία μονάδα που μελετήθηκε ανήκει στην εταιρία Scogen και η δεύτερη στην εταιρία DGEengineering. Οι δύο μονάδες βασίζονται στην τεχνολογία της πυρόλυσης υπό κενό αλλά χρησιμοποιούν διαφορετικού είδους αντιδραστήρες για την διάσπαση των ελαστικών. Επιπλέον στην περίπτωση της μονάδας της Scogen μελετήθηκαν δύο σενάρια α) η πώληση των παραγόμενων από την πυρόλυση προϊόντων και β) η παραγωγή και πώληση ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση της μονάδας από την DGEengineering δεν μελετήθηκαν αντίστοιχα σενάρια διότι σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρία της μονάδας τα παραγόμενα προϊόντα είναι μέτριας προς υψηλής προστιθέμενης αξίας.

### 6.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΑΔΑΣ Scogen – M3RP

Η εταιρία SCOGEN (Southern Cogen Systems PVT. LTD) εμπορεύεται το σύστημα πυρόλυσης υπό κενό M3RP έχοντας επιτυχώς κατασκευάσει μονάδες στην Ινδία και στην ευρύτερη Ασία. Το σχηματικό διάγραμμα της διεργασίας πυρόλυσης που έχει αναπτύξει η εν λόγω εταιρεία παρουσιάζεται στην Εικόνα 31



Εικόνα 31: Τεχνολογία M3RP [67]

Σύμφωνα με την προηγούμενη εμπειρία που έχει η εταιρία με μικρά εργοστάσια στην Ινδία και στην ευρύτερη Ασία η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζεται ως εμπορικά ελκυστική. Βέβαια το θεσμικό και εμπορικό πλαίσιο των προαναφερθεισών περιοχών διαφέρει αρκετά από το αντίστοιχο Ευρωπαϊκό. Για την Ευρώπη η συγκεκριμένη εταιρεία έχει αναπτύξει επιχειρηματικό σχέδιο με βάση το οποίο, η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζεται εμπορικά ελκυστική και στην περίπτωση της Ελλάδας. Οι αντιδραστήρες M3RP, είναι μια καινούργια τεχνολογία που βρίσκεται σε πιλοτικό, ημιβιομηχανικό επίπεδο που μπορεί επιτυχώς να επεξεργαστεί εκτός από ψιλοκομμένα ελαστικά (1 – 4 mm) μια σειρά υλικών όπως φλοιό ρυζιού, οικιακά στερεά απόβλητα, στερεή βιομάζα, κελύφη καρύδας, απόβλητα επεξεργασίας χαρτιού, οργανικά απόβλητα κ.α.

Όσον αφορά την πυρόλυση ελαστικών, όπως αναφέρει η εταιρία που εμπορεύεται την εν λόγω τεχνολογία, η κατά βάρος κατανομή των προϊόντων για ένα τόνου ελαστικών είναι ενδεικτικά: 170 kg αερίου, 350 kg carbon black, 430 kg πετρελαιοειδών και 50 kg χάλυβα.

Η πυρόλυση υπό κενό, σε αντιδραστήρες M3RP, σύμφωνα με την ανάλυση του επιχειρηματικού σχεδίου που κατατέθηκε από τη SCOGEN, παρουσιάζεται εμπορικά ανταγωνιστική για τρεις κυρίως λόγους:

- Ο πρώτος είναι πως τα λειτουργικά / εργατικά κόστη είναι πολύ μικρά λόγω της αυτοματοποιημένης λειτουργίας της μονάδας πυρόλυσης υπό κενό.
- Ο δεύτερος είναι η ανταγωνιστική τιμή μεταπώλησης των προϊόντων της πυρόλυσης (0.34 € / kg για τα πετρελαιοειδή, 0.26 € / kg για το carbon black)
- Η μεγάλη ετήσια διαθεσιμότητα της μονάδας

Παρακάτω παρατίθενται στοιχεία για τα πετρελαιοειδή (στοιχεία από την εταιρεία SCOGEN)

Πυκνότητα (@ 20° C)	Τέφρα (%κ.β.)	Zn ppm	Φωσφόρος (5mg/kg)	μ (cps)	Ιζήματα (% κ.β.)	Θείο (%κ.β.)	Ανάφλεξη (°C)	H <sub>u</sub> MJ/kg
940	0,04	1.1	<5	3.3	0,15	1.12	57	

Σύμφωνα, με την εταιρία αυτά τα πετρελαιοειδή τηρούν τις προϋποθέσεις για πώληση ως ναυτιλιακό καύσιμο.

Βέβαια η εμπορική διάθεση σε αποδοτικές τιμές και του carbon black είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη περαιτέρω προώθηση της εν λόγω τεχνολογίας. Στον παρακάτω πίνακα

παρουσιάζονται διάφορα χαρακτηριστικά carbon black από πυρόλυση ελαστικών όπως αναφέρονται από τη SCOGEN.

Προσρόφηση ιωδίου	Φαινόμενη Πυκνότητα	Κοκομετρία	pH	Heating Loss	Θείο (%κ.β.)
94.21 mg /g	2.99 ml/g	199.3 μm	6.72	0,84%	2,23

Τα δεδομένα για το ρεύμα εισόδου αλλά και για την λειτουργία του εργοστασίου είναι τα παρακάτω:

**Πίνακας 19: Δεδομένα λειτουργίας και ρεύματος εισόδου για την εταιρία Scogen [67]**

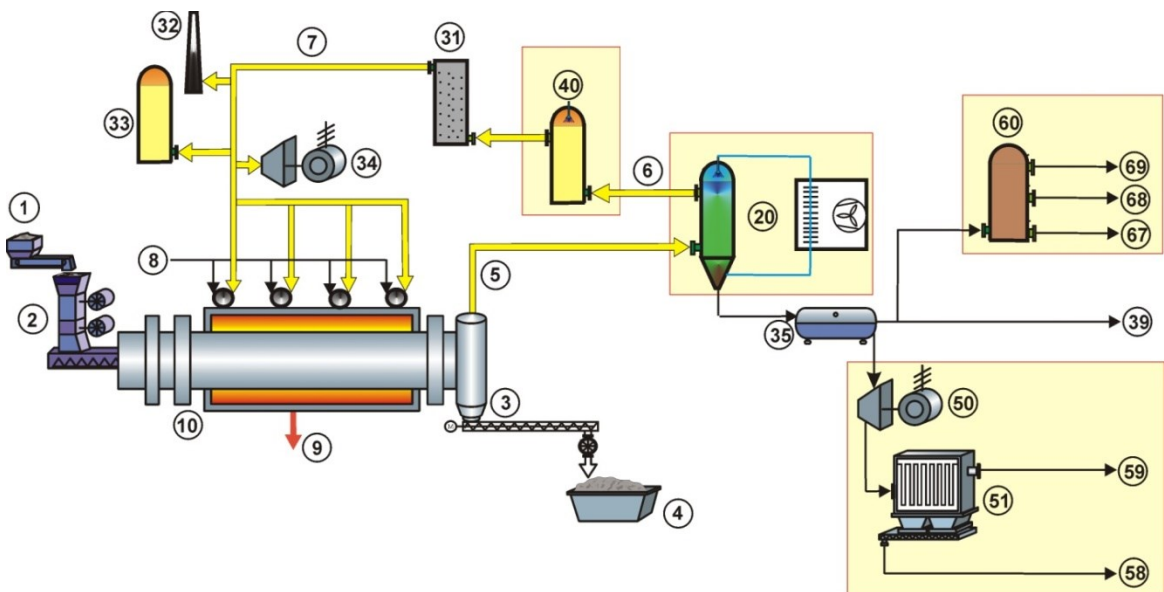
Δεδομένα λειτουργίας και ρεύματος εισόδου για την Scogen	
Ημέρες λειτουργίας το έτος	330 d
Τόνοι ελαστικού που θα επεξεργαστούν	8.000 t
Ώρες λειτουργίας την ημέρα	24 h/d
Συνολικές ώρες λειτουργίας	≈8.000 h
Ποσοστό πετρελαίου πυρόλυσης	43%
Ποσοστό μη συμπυκνώσιμου αερίου πυρόλυσης	17%
Ποσοστό carbon black	35%
Ποσοστό χάλυβα που ανακτάται	5%

### 6.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΤΗΣ DGEneengineering –Max 09

Η τεχνολογία της DGEneengineering βασίζεται στην πυρόλυση υπό κενό σε περιστροφική κάμινο. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για την θερμική διάσπαση υδρογονανθράκων και επιτρέπει την ανακύκλωση ελαστικών με ταυτόχρονο διαχωρισμό του Carbon black, του πετρελαίου από την πυρόλυση και του παραγόμενου αερίου με αρκετά χαμηλό κόστος. Η διεργασία που χρησιμοποιείται είναι η ακόλουθη:

Το εισερχόμενο υλικό αφού διαχωριστεί από τα μεταλλικά μέρη του τεμαχίζεται στα 400mm και στην συνέχεια οδηγείται στο σιλό υποδοχής. Έπειτα εισέρχεται με συνεχή τροφοδοσία στην περιστροφική κάμινο, όπου θερμαίνεται στους 500 °C και διαχωρίζεται σε αέριο και στερεό. Στο τέλος της καμίνου γίνεται ο διαχωρισμός του στερεού (Carbon Black) από το αέριο.

Τα στερεά εξάγονται με μεταφορικό κοχλία από την κάμινο και ψύχονται στους 60°C. Το αέριο εξέρχεται από την πάνω πλευρά του κελύφους και οδηγείται σε ψυκτήρα και συμπυκνωτή ώστε να συμπυκνωθεί σε πετρέλαιο πυρόλυσης. Το πετρέλαιο οδηγείται προς αποθήκευση. Τα μη συμπυκνώσιμα αέρια από την διεργασία της πυρόλυσης συμπιέζονται στα 50 mbar και τροφοδοτούνται στους καυστήρες του θάλαμου καύσης ώστε να παραχθεί η ικανή θερμότητα που απαιτείται για την θέρμανση της περιστροφικής κάμινο. Το περισσευούμενο αέριο δεν μπορεί να αποθηκευτεί και για λόγους ασφαλείας καίγεται σε πυρσό. Στην εικόνα 32 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας.



**Εικόνα 32: Διάγραμμα ροής πυρόλυσης υπό κενό της DGEngineering [68]**

Όσον αφορά την πυρόλυση ελαστικών, όπως αναφέρει η εταιρία που εμπορεύεται την εν λόγω τεχνολογία, η κατά βάρος κατανομή των προϊόντων για ένα τόνο ελαστικών είναι ενδεικτικά: 340 kg carbon black, 150 kg χάλυβα και πετρέλαιο πυρόλυσης το οποίο μπορεί να χωρισθεί σε τρεις διαφορετικές ποιότητες. Μπορεί να θεωρηθεί ως απλό πετρέλαιο πυρόλυσης, ως diesel και ως super petrol με διαφορές στην τιμή πώλησης. Οι αντίστοιχες παραγωγές ανά τόνο είναι 222kg/t, 85,7kg/t και 85,7kg/t. Το παραγόμενο Carbon Black είναι αρκετά υψηλής ποιότητας που κατατάσσεται στην κατηγορία N660 και στοιχίζει περίπου 400€/t.

Μετά από επαφή με την DGEngineering τα δεδομένα για το ρεύμα εισόδου αλλά και για την λειτουργία του εργοστασίου είναι τα παρακάτω:

**Πίνακας 20: Δεδομένα λειτουργίας και ρεύματος εισόδου για την DGEengineering[68]**

Δεδομένα λειτουργίας και ρεύματος εισόδου για την DGEengineering	
Ημέρες λειτουργίας το έτος	312 d
Τόνοι ελαστικού που θα επεξεργαστούν	8.000 t
Ώρες λειτουργίας την ημέρα	24 h/d
Συνολικές ώρες λειτουργίας	≈7.500 h
Ποσοστό πετρελαίου πυρόλυσης	22,2 %
Ποσοστό super petrol πυρόλυσης	8,6 %
Ποσοστό diesel πυρόλυσης	8,6 %
Ποσοστό μη συμπυκνώσιμου αερίου πυρόλυσης	11,6 %
Ποσοστό carbon black	34 %
Ποσοστό χάλυβα που ανακτάται	15 %

### 6.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥΧΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΣ

Θεωρούμε για λόγους σύγκρισης των τριών προαναφερθέντων σεναρίων, ότι το κεφαλαιουχικό κόστος γίνεται αποκλειστικά και μόνο από ίδια κεφάλαια. Η ανάλυση των παρακάτω πινάκων έγινε βάσει προσφορών και οικονομικών στοιχείων που δόθηκαν από τις αντίστοιχες κατασκευάστριες εταιρίες.

Στον παρακάτω πίνακα ακολουθεί η ανάλυση του σεναρίου, με μονάδα την Scogen και πώληση των προϊόντων:

**Πίνακας 21: Κεφαλαιουχικό κόστος Scogen – Σενάριο 1<sup>ο</sup> πώληση προϊόντων:**

Κύρια μέρη εγκατάστασης	
Μονάδα πυρόλυσης M3RP	1.373.740 €
Αεριομηχανή	282.830 €
Άλλα κτήρια και αγορά γης	
Κεντρικό κτήριο	64.650 €
Σιλό αποθήκευσης carbon black	32.325 €
Έκταση γης	40.405 €
Κόστη άλλων εξαρτημάτων	
Μεταφορικές ταινίες, τεμαχιστής, μονάδα θερμικής οξείδωσης	222.220 €

Ενδιάμεση αποθήκη αερίου/Αντλίες, Εγκατάσταση πυρασφάλειας	88.890 €
Δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαίου, Πελλετοποίηση carbon black ή αποθήκευση σε σάκους	96.970 €
Ανταλλακτικά	56.565 €
Εξοπλισμός γραφείων	8.080 €
<b>Κόστη εγκατάστασης</b>	
Άδειες και νομική ανασκόπηση	64.000 €
Τεχνική μελέτη εργοστασίου και κόστη ειδικών	96.000 €
<b>Άλλα κόστη</b>	
Κόστος για έναρξη του εργοστασίου	240.000 €
Άλλα μη υπολογίσιμα κόστη (10%)	266.667 €
<b>ΣΥΝΟΛΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥΧΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	
	2.933.342 €

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται το κεφαλαιουχικό κόστος για την μονάδα της Scogen, στην περίπτωση καύσης του παραγόμενου αερίου και πετρελαίου σε μικροστρόβιλο, για την παραγωγή και πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ουσιαστική διαφορά των δύο σεναρίων στο κόστος εγκατάστασης είναι το κόστος της μηχανής εσωτερικής καύσης, κατά το 2<sup>ο</sup> σενάριο είναι μεγαλύτερο, εφόσον η μηχανή πρέπει να κάνει μεγαλύτερο όγκο καυσίμου στο ίδιο χρονικό διάστημα. Επιπλέον στο δεύτερο σενάριο δεν υπάρχει η ανάγκη για αποθήκευση του πετρελαίου αλλά χρειάζεται καλύτερο σύστημα καθαρισμού των απαερίων. Στην περίπτωση αυτή γίνεται η υπόθεση ότι το κόστος είναι περίπου το ίδιο:

**Πίνακας 22: Κεφαλαιουχικό κόστος Scogen – Σενάριο 2<sup>ο</sup> πώληση ηλεκτρικής ενέργειας**

<b>Κεφαλαιουχικό κόστος Scogen – Σενάριο 2<sup>ο</sup> πώληση ηλεκτρικής ενέργειας</b>	
<b>Κύρια μέρη εγκατάστασης</b>	
Μονάδα πυρόλυσης M3RP	1.373.740 €
Αεριομηχανή	850.000 €
<b>Άλλα κτήρια και αγορά γης</b>	
Κεντρικό κτήριο	64.650 €
Σιλό αποθήκευσης carbon black	32.325 €

Έκταση γης	40.405 €
Κόστη άλλων εξαρτημάτων	
Μεταφορικές ταινίες, τεμαχιστής, μονάδα θερμικής οξείδωσης	270.705 €
Ενδιάμεση αποθήκη αερίου/Αντλίες, Εγκατάσταση πυρασφάλειας	88.890 €
Πελλετοποίηση carbon black ή αποθήκευση σε σάκους	48.485 €
Ανταλλακτικά	56.565 €
Εξοπλισμός γραφείων	8.080 €
Κόστη εγκατάστασης	
Άδειες και νομική ανασκόπηση	64.000 €
Τεχνική μελέτη εργοστασίου και κόστη ειδικών	96.000 €
Άλλα κόστη	
Κόστος για έναρξη του εργοστασίου	240.000 €
Άλλα μη υπολογίσιμα κόστη (10%)	323.385 €
<b>ΣΥΝΟΛΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥΧΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	
	3.557.230 €

Στον παρακάτω πίνακα ακολουθεί η ανάλυση του κεφαλαιουχικού κόστους της DGEngineering μόνο για την περίπτωση πώλησης των παραγόμενων προϊόντων:

**Πίνακας 23: Κεφαλαιουχικό κόστος της DGEngineering:**

<b>Κεφαλαιουχικό κόστος της DGEngineering</b>	
Εγκατάσταση μονάδας πυρόλυσης	3.619.050 €
Προετοιμασία του ρεύματος εισόδου (τεμαχισμός, άλεση κλπ)	495.240 €
Στήλη Κλασματικής Απόσταξης για συμπύκνωση διαφορετικών ρευμάτων πετρελαίου	441.905 €
Έργα πολιτικού μηχανικού	228.570 €
Άλλα μηχανολογικά εξαρτήματα	380.955 €
Άλλα μη υπολογίσιμα κόστη (10%)	516.572 €
<b>ΣΥΝΟΛΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥΧΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	
	5.682.292 €



Η DGEngineering βάσει της επιλεγμένης τεχνολογίας της έχει μεγαλύτερο αρχικό κόστος επένδυσης από την Scogen.

#### 6.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ

Η ανάλυση των παρακάτω πινάκων έγινε βάσει προσφορών και οικονομικών στοιχείων που δόθηκαν από τις αντίστοιχες κατασκευάστριες εταιρίες.

**Πίνακας 24: Λειτουργικά κόστη Scogen – Σενάριο 1<sup>ο</sup> πώληση προϊόντων**

Κόστη Λειτουργίας	
Διαφήμιση/Προώθηση	3.600 €
Προμήθειες	6.000 €
Εργατικά	171.720 €
Άλλα έξοδα (Ασφάλιση, Φόροι κλπ)	121.154 €
Κόστος Συντήρησης (2%)	58.756 €
<b>ΣΥΝΟΛΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>361.230 €</b>

**Πίνακας 25: Λειτουργικά κόστη Scogen – Σενάριο 2<sup>ο</sup> πώληση ηλεκτρικής ενέργειας**

Λειτουργικά κόστη Scogen – Σενάριο 2 <sup>ο</sup> πώληση ηλεκτρικής ενέργειας	
Κόστη Λειτουργίας	
Διαφήμιση/Προώθηση	3.600 €
Προμήθειες	6.000 €
Εργατικά	171.720 €
Άλλα έξοδα (Ασφάλιση, Φόροι κλπ)	121.154 €
Κόστος Συντήρησης (2%)	71.200 €
<b>ΣΥΝΟΛΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>373.674 €</b>

**Πίνακας 26: Λειτουργικά κόστη DGEngineering**

Λειτουργικά κόστη DGEngineering	
Κόστη συντήρησης	
Μονάδα πυρόλυσης (2%)	72.381
Εξοπλισμού προετοιμασίας ρεύματος εισόδου (2%)	9.905

Έργα πολιτικού (0,5%)	1.145
Γενικά κόστη	
Έξοδα Ασφάλισης	86.125 €
Κόστη διαχείρισης	47.850 €
Κόστη λειτουργίας	95.695 €
Εργατικά κόστη	190.000 €
Κόστη λειτουργίας	
Ηλεκτρική ενέργεια (180 KW/h)	104.691 €
Ενεργός άνθρακας	102.000 €
Διαχείριση χρησιμοποιημένου ενεργού άνθρακα	17.450 €
<b>ΣΥΝΟΛΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>727.242 €</b>

Είναι εμφανές ότι η τεχνολογία που χρησιμοποιεί η DGEengineering έχει μεγαλύτερο ετήσιο κόστος λειτουργίας. Οι διαφορές μεταξύ των δύο σεναρίων της Scogen πηγάζει από την διαφορά στην συντήρηση του εξοπλισμού καύσης που θα πρέπει να είναι μεγαλύτερου όγκου.

## 6.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Βάσει των προηγούμενων αναλύσεων το συνολικό κόστος και λειτουργικό κόστος της κάθε επένδυσης για την μελέτη των σεναρίων της, δίνεται συνοπτικά στους παρακάτω πίνακες:

**Πίνακας 27: Συνολικό κόστος επένδυσης Scogen – Σενάριο 1<sup>ο</sup> πώληση προϊόντων**

ΣΥΝΟΛΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥΧΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	2.933.342 €
ΣΥΝΟΛΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	361.230 €

**Πίνακας 28: Συνολικό κόστος επένδυσης Scogen – Σενάριο 2<sup>ο</sup> πώληση ηλεκτρικής ενέργειας**

ΣΥΝΟΛΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥΧΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	3.557.230 €
ΣΥΝΟΛΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	373.674 €

**Πίνακας 29: Συνολικό κόστος επένδυσης DGEengineering**

ΣΥΝΟΛΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥΧΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	5.682.292 €
ΣΥΝΟΛΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	727.242 €

## 6.6 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΠΡΟΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Για την οικονομική ανάλυση των τριών σεναρίων υπό διερεύνηση, θεωρήθηκε ότι η πωλήσεις των παραγόμενων προϊόντων έγιναν στις αναφερόμενες τιμές ανάλογα με τις προδιαγραφές ποιότητας που έδωσαν οι κατασκευάστριες εταιρείες των μονάδων. Επιπλέον οι οικονομικοί συντελεστές της ανάλυσης λήφθηκαν βάσει των παρόντων συνθηκών στην Ελλάδα. Θεωρήθηκε επίσης gate fee 20€/t εισερχόμενου ακατέργαστου ελαστικού. Η τιμή πώλησης του scrap χάλυβα λήφθηκε από την EUROFER (Ευρωπαϊκή Ένωση Χάλυβα). Τέλος η τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από την καύση του αερίου και του πετρελαίου πυρόλυσης, τιμολογήθηκε στην μέση οριακή τιμή συστήματος για το τελευταίο έτος.

### 6.6.1 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ Scogen –ΣΕΝΑΡΙΟ 1<sup>ο</sup> ΠΩΛΗΣΗ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ

**Πίνακας 30: Δεδομένα προτεινόμενης λύσης**

Δεδομένα σχετικά με την προτεινόμενη λύση	
Τιμή πώλησης του πετρελαίου πυρόλυσης	340 €/t
Τιμή πώλησης του carbon black	260 €/t
Τιμή πώλησης του χάλυβα	320 €/t
Gate fee Ελαστικών	20€/t
Χρόνος θεώρησης λογιστικής απόσβεσης επένδυσης	10 έτη

**Πίνακας 31: Οικονομικά στοιχεία επένδυσης Scogen – Σενάριο 1<sup>ο</sup> πώληση προϊόντων**

Οικονομικά στοιχεία προτεινόμενης λύσης Σεναρίου 1Α	
Συνολικό κόστος αρχικής επένδυσης	2.933.342 €
Συνολικό ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας	361.230 €/y
Συνολικά ετήσια κέρδη από την πώληση των προϊόντων	2.185.600,00 €/y
Απόσβεση (10 χρόνια)	293.777,78 €/y
Πληθωρισμός	3%
Επιτόκιο αναγωγής	8%
Φόρος εσόδων	25%
Περίοδος αποπληρωμής	3 έτη

**6.6.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ Scogen –ΣΕΝΑΡΙΟ 2<sup>ο</sup>**  
**ΠΩΛΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**Πίνακας 32: Δεδομένα προτεινόμενης λύσης**

Δεδομένα σχετικά με την προτεινόμενη λύση	
Τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από καύση πετρελαίου και αερίου πυρόλυσης	80 €/MWh
Τιμή πώλησης του χάλυβα	320 €/t
Gate fee Ελαστικών	20€/t
Χρόνος θεώρησης λογιστικής απόσβεσης επένδυσης	10 έτη

**Πίνακας 33: Οικονομικά στοιχεία επένδυσης Scogen – Σενάριο 2<sup>ο</sup> πώληση ηλεκτρικής ενέργειας**

Οικονομικά στοιχεία προτεινόμενης λύσης Σεναρίου 1Α	
Συνολικό κόστος αρχικής επένδυσης	3.557.230 €
Συνολικό ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας	373.674 €
Συνολικά ετήσια κέρδη από την πώληση του ρεύματος και των προϊόντων	2.622.400,00 €/y
Απόσβεση (10 χρόνια)	356.000,00 €/y
Πληθωρισμός	3%
Επιτόκιο αναγωγής	5%
Φόρος εσόδων	25%
Περίοδος αποπληρωμής	3 έτος

**6.6.3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ DGEngineering:**

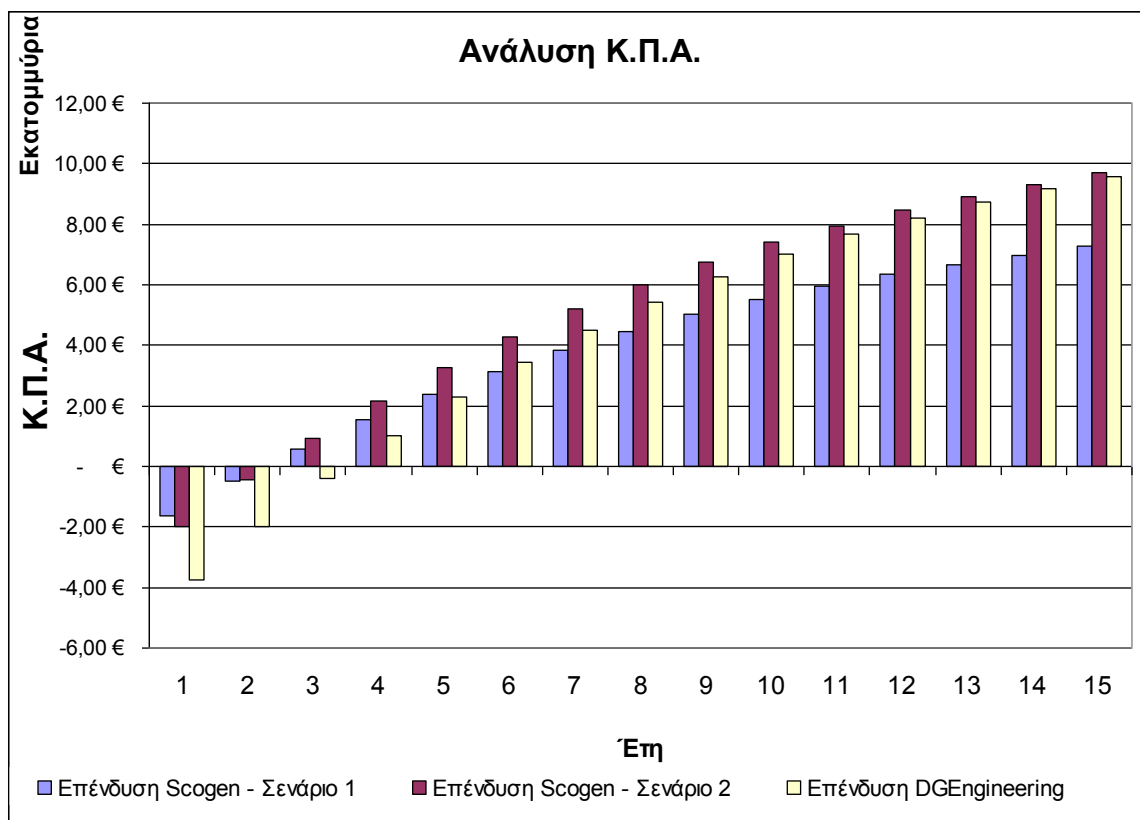
**Πίνακας 34: Δεδομένα προτεινόμενης λύσης**

Δεδομένα σχετικά με την προτεινόμενη λύση	
Τιμή πώλησης του πετρελαίου πυρόλυσης	400 €/t
Τιμή πώλησης του super πετρελαίου πυρόλυσης	700 €/t
Τιμή πώλησης του diesel πυρόλυσης	600 €/t
Τιμή πώλησης του carbon black	260 €/t
Τιμή πώλησης του χάλυβα	320 €/t
Gate fee Ελαστικών	20€/t
Χρόνος θεώρησης λογιστικής απόσβεσης επένδυσης	10 έτη

**Πίνακας 35: Οικονομικά στοιχεία επένδυσης DGEngineering**

Οικονομικά στοιχεία προτεινόμενης λύσης Σεναρίου 1Α	
Συνολικό κόστος αρχικής επένδυσης	5.682.292 €
Συνολικό ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας	727.242 €/y
Συνολικά ετήσια κέρδη από την πώληση των προϊόντων	3.681.005,71 €/y
Απόσβεση (10 χρόνια)	568.228,57 €/y
Πληθωρισμός	3%
Επιτόκιο αναγωγής	8%
Φόρος εσόδων	25%
Περίοδος αποπληρωμής	3 έτη

Είναι εμφανής η διαφορά στα ετήσια κέρδη, υπέρ της DGENgineering; και αυτό οφείλεται κυρίως στις ποιότητες παραγόμενων προϊόντων που δίνουν οι εταιρίες. Για την αξιολόγηση των σεναρίων έγινε οικονομική ανάλυση βάσει της Καθαρής Παρούσας Αξίας. Παρακάτω ακολουθεί ένα διάγραμμα, με τις ετήσιες καθαρές παρούσες αξίες για την αξιολόγηση της επένδυσης σε πλάνο 15ετίας.



**Εικόνα 33: Ανάλυση Καθαρής Παρούσας Αξίας στα τρία μελετημένα σενάρια**

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, και τα τρία σενάρια έχουν ανάκτηση αρχικού κεφαλαίου μέσα στα τέσσερα πρώτα έτη. Αλλά σε πάροδο δεκαπενταετίας το 2<sup>ο</sup> σενάριο της Scogen και το σενάριο της DGEengineering παρουσιάζουν την μεγαλύτερη Καθαρή Παρούσα Αξία οπότε και εμφανίζονται ως οι πιο συμφέρουσες επένδυσες.

Στα παραπάνω μελετημένα σενάρια έγινε και ανάλυση Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης. Οι αντίστοιχες τιμές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 36: Εσωτερικός βαθμός απόδοσης**

Σενάρια	Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (EBA)
Επένδυση Scogen – Σενάριο 1	44%
Επένδυση Scogen – Σενάριο 2	48%
Επένδυση DGEengineering	34%

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης EBA φαίνεται ότι το 2<sup>ο</sup> Σενάριο της Scogen παρουσιάζεται ως το πιο συμφέρον. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι η θεωρημένη τιμή για την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ανακεφαλαιώνοντας διαπιστώνεται η ανεπαρκής λύση που προσφέρουν οι τεχνικές διάθεσης των ελαστικών. Από την μία πλευρά υπάρχουν τεχνικές, όπως η χρήση των ελαστικών σε έργα ΧΥΤΑ, ως πρόσθετα και ενισχυτικά εδάφους, σε αντιδιαβρωτικά έργα, ως ηχοπετάσματα, ως θερμομονωτικά υλικά, σε τεχνητούς χλοοτάπητες και σε δάπεδα αθλητικών χώρων και παιδικών χαρών, που δίνουν την δυνατότητα μιας οικονομικά βιώσιμης επιλογής χωρίς όμως την ικανότητα απορρόφησης σημαντικού αριθμού ελαστικών. Από την άλλη πλευρά χρησιμοποιούνται τεχνικές που, ενώ αφομοιώνουν μεγάλη ποσότητα ελαστικών, δεν είναι ακόμα τεχνολογικά ώριμες και οικονομικά βιώσιμες.

Η πυρόλυση παρουσιάζει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον και μεγάλες προοπτικές διότι το έλαιο πυρόλυσης διαθέτει ιδιότητες ικανές να αντικαταστήσει το συμβατικό πετρέλαιο και τα κλάσματα του. Όμως οι εγκαταστάσεις των μονάδων πυρόλυσης έχουν μεγάλο κόστος και τα τελικά προϊόντα της έκαστης πυρόλυσης απαιτούν κάποιες επεξεργασίες αναβάθμισης των

τελικών προϊόντων ώστε να είναι εμπορεύσιμα. Αυτό με την σειρά του επιβαρύνει και άλλο το κόστος της εγκατάστασης.

Προς το παρόν η πιο αποτελεσματική λύση σήμερα μπορεί να θεωρηθεί η καύση των ελαστικών στις τσιμεντοβιομηχανίες. Τα ελαστικά είναι το μόνο εναλλακτικό καύσιμο που πλησιάζει στις ιδιότητες των συμβατικών καυσίμων.

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. European Tyre & Rubber manufacturers' association, ELTs 2011 edition.
2. European Tyre & Rubber manufacturers' association, statistics edition 2013
3. Ecoelastika A.E. Πρόταση ανανέωσης άδειας συλλογικού συστήματος εναλλακτικής διαχείρισης μεταχειρισμένων ελαστικών. Αθήνα Οκτώβριος 2011.
4. Ecoelastika A.E. «ANNUAL REPORT 2013»
5. H. Vrakking BV Tires Europe «Retreading cold or hot explained»
6. Δ. Κανακόπουλος, Advensol, HELECO 05, TEE, 3-6 Φεβρουαρίου 2005
7. Kurt Reschner «A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods» 2006
8. UNEP Basel Convention., “ Revised technical guidelines on environmentally sound management of used tyres” (3 March 2010).
- 9.
10. Azad Rahman, M.G. Rasul, M.M.K. Khan, S. Sharma. Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. Fuel 145 (2015) 84–99
11. van Oss HG, Padovani AC. Cement manufacture and the environment, Part II: environmental challenges and opportunities. J Ind Ecol 2003;7(1):93–126
12. Madloul NA, Saidur R, Hossain MS, Rahim NA. A critical review on energy use and savings in the cement industries. Renew Sustain Energy Rev 2011;15(4):2042–60
13. S. C. Ahluwalia, C. H. Page, Effect of low-grade fuels, combustible wastes and non-traditional raw materials, Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, India (1992), Vol. 1, pp. 83-121
14. Kaantee U, Zevonhoven R, Backman R, Hupa M. Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modelling. In: Proc. of R'2002 recovery recycling re-integration, Geneva, Switzerland, February 12–15, 2002
15. Smith CB, Martin L. Lesser known energy sources: a study of biogas and tire based fuel. Cogeneration Distributed Generation J 2008;23(2):35–72
16. Puertas F, Blanco-Varela MT. Use of alternative fuels in cement manufacture. Effect on clinker and cement characteristics and properties. Materiales de Construccion 2004;54(274):51–64
17. Ariyaratne WKH. Alternative fuels in cement kilns – characterization and experiments, MSc. Thesis, Telemark University College, Norway; 2009
18. Karell MA, Blumenthal MH. Air regulatory impacts of the use of tire-derived fuel.



- Environ Prog 2001;20(2):80–6
19. Prisciandaro M, Mazziotti G, Veglio F. Effect of burning supplementary waste fuels on the pollutant emissions by cement plants: a statistical analysis of process data. *Resour Conserv Recycl* 2003;39(2):161–84
  20. Carrasco F, Bredin N, Heitz M. Gaseous contaminant emissions as affected by burning scrap tires in cement manufacturing. *J Environ Qual* 2002;31(5):1484–90
  21. Schrama H, Blumenthal M, Weatherhead EC. A survey of tire burning technology for the cement industry. In: IEEE cement industry technical conference, San Juan, Puerto Rico, June 4–9, 1995
  22. Lemarchand D. Burning issues. *Int Cem Rev* 2000:65–7
  23. Silvestraviciute I, Karaliunaite I. Comparison of end-of-life tyre treatment technologies: life cycle inventory analysis. *Environ Res, Eng Manage* 2006;35(1):52–60
  24. Conesa JA, Gálvez A, Mateos F, Martín-Gullón I, Font R. Organic and inorganic pollutants from cement kiln stack feeding alternative fuels. *J Hazard Mater* 2008;158(2–3):585–92
  25. Pegg MJ, Amyotte PR, Fels M, Cumming CRR, Poushay JC. An assessment of the use of tires as an alternative fuel, minister of environment and labour, Nova Scotia environment and labour, environmental monitoring and compliance report, April 2007
  26. EE 94/67, KYA 2487/455/199, ΦΕΚ 196/Β/1999
  27. Yokogawa Electric Corporation
  28. ΙΤΑ, Εκτίμηση των Γενικευμένων Επιπτώσεων και Κόστους Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων
  29. Κων/νος Κυπαρισσίδης «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ» τόμος Ι, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2008
  30. <http://www.pyne.co.uk/Resources/user/PNG%20FB%20FP.png>
  31. <http://www.pyne.co.uk/Resources/user/PNG%20CFB%20FP.png>
  32. C. Roy \*, A. Chaala, H. Darmstadt «The vacuum pyrolysis of used tires End-uses for oil and carbon black products», *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 51 (1999) 201–221
  33. C. Roy, B. Labrecque, B. de Caumia, *Resour. Conserv. Recyc.* 4 (1990) 203
  34. A.M. Cinliffe, P.T. Williams, *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 44 (1998) 131
  35. A. Chaala, C. Roy, A. Ait-Kadi, *Fuel* 75 (1996) 1575

36. C. Roy, B. Labrecque, B. de Caumia, *Resour. Conserv. Recyc.* 4 (1990) 203
37. G. Ferrer, *Resour. Conserv. Recyc.* 19 (1997) 221
38. H. Lin, *The Combustion of Anthracites and Low Grade Bituminous Coals*, International Conference on Coal Science, Pittsburgh, PA, 1983
39. C. Roy, B. de Caumia, H. Pakdel, P. Plante, D. Blanchette, B. Labrecque, Vacuum pyrolysis of used tires, petroleum sludges and forestry wastes: technological development and implementation perspectives, in: E. Hogan, J. Robert, G. Grassi, A.V. Bridgwater (Eds.), *Biomass Thermal Processing*, CPL Press, London, 1992, pp. 109–122
40. Anonymous, Petroleum (Refinery Process, Survey), in: *Ullmann's Encyclopaedia of Chemical Technology*, 3rd ed., vol. 17, 1982, pp. 210–21
41. Anonymous, Heavy Fuel Specification. Report of MAN B&W Diesel AG, Augsburg, 1995
42. Anonymous, Environmental Protection and Industrial Safety 1, in : *Ullmann's Encyclopaedia of Industrial Chemistry*, 5th ed., vol. B-7, 1995, pp. 438–440
43. J.L. Leblanc, C. Roy, S. Mirmiran, B. Benallal, A. Schwerdtfeger, *Kautsch. Gummi Kunstst.* 49 (1996) 194
44. A. Chaala, C. Roy, *Fuel Process Technol.* 46 (1996) 227
45. <http://www.scogen.in/installation-pictures.php>
46. Domínguez A, Menéndez JA, Inguanzo M, Pis JJ. Production of bio-fuels by high temperature pyrolysis of sewage sludge using conventional and microwave heating. *Bioresour Technol* 2006;97:1185–93
47. Domínguez A, Menéndez JA, Inguanzo M, Pis JJ. Investigations into the characteristics of oils produced from microwave pyrolysis of sewage sludge. *Fuel Process Technol* 2005;86:1007–30
48. Menéndez JA, Domínguez A, Inguanzo M, Pis JJ. Microwave pyrolysis of sewage sludge: analysis of the gas fraction. *J Anal Appl Pyrolysis* 2004;71:657–67
49. Robinson JP, Kingman SW, Barranco R, Snape CE, Al-Sayegh H. Microwave pyrolysis of wood pellets. *Ind Eng Chem Res* 2010;49:459–6
50. Frediani P, Rosi L, Frediani M, Undri A, Occhialini S. Production of hydrocarbons from copyrolysis of plastic and tyre material with microwave heating. WO2012110990; 2012
51. Hussain Z, Khan KM, Hussain K. Microwave–metal interaction pyrolysis of polystyrene. *J Anal Appl Pyrolysis* 2010;89:39–43, [20] Hussain Z, Khan KM, Perveen

- S, Hussain K, Voelter W. The conversion of waste polystyrene into useful hydrocarbons by microwave–metal interaction pyrolysis. *Fuel Process Technol* 2012;94:145–50
52. Ludlow-Palafox C, Chase HA. Microwave-induced pyrolysis of plastic wastes. *Ind Eng Chem Res* 2001;40:4749–56
53. Undri A, Rosi L, Frediani M, Frediani P. Microwave pyrolysis of polymeric materials. In: Chandra U, editor. *Microwave heating*. InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia; 2011. p. 219
54. Andrea Undri, Stefano Meini, Luca Rosi, Marco Frediani, Piero Frediani «Microwave pyrolysis of polymeric materials: Waste tires treatment and characterization of the value-added products», *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 103 (2013) 149–158).
55. H. Predel, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Karlsruhe, Germany, 2000
56. d.M. Rodriguez, M.F. Laresgoiti, M.A. Cabrero, A. Torres, M.J. Chomòn, B. Caballero, Pyrolysis of scrap tyres, *Fuel Processing Technology* 72 (2001) 9, [16] W. Kaminsky, C. Mennerich, Pyrolysis of synthetic tire rubber in a fluidised-bed reactor to yield 1,3-butadiene, styrene and carbon black, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 58/59 (2001) 803
57. S. Parkash, *Petroleum Fuels Manufacturing Handbook*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010
58. H. Al-Haj-Ibrahim, B.I. Morsi, Desulfurization of petroleum coke: a review, *Industrial and Engineering Chemistry Research* 31 (1992) 1835
59. S. Parkash, *Petroleum Fuels Manufacturing Handbook*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010
60. [www.globalresourcecorp.com](http://www.globalresourcecorp.com)
61. Y. Kar «Catalytic pyrolysis of car tire waste using expanded perlite», *Waste Management* 31 (2011) 1772–1782
62. Gonzalez, J.F., Encinar, J.M., Canito, J.L., Rodriguez, J.J., 2001. Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 58–59, 667–683.)
63. Barbooti, M.M., Mohamed, T.J., Hussain, A.A., Abas, F.O., 2004. Optimization of pyrolysis conditions of scrap tires under inert gas atmosphere. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 72, 165–170
64. Juniper consulting, WMW technologies and Treatment, 2004

65. Marek A. Wojtowicz, miechal A. Serio «pyrolysis of scrap tires: can it be profitable?», October 1996
66. S. Murugana, , M.C. Ramaswamy and G. Nagarajanb « The use of tyre pyrolysis oil in diesel engines», Waste Management 28 (2008) 2743–2749
67. Southern Cogen Systems Pvt. Ltd
68. <http://www.dgengineering.de/download/open/MAXI-09-Wirtschaftlichkeit-Altreifen.pdf>