



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΙΚΡΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΚΛΙΝΗ ΑΝΟΔΙΚΗΣ ΡΟΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΓΙΑΝΝΟΥΛΑΤΟΣ Ι. ΘΩΜΑΣ

Επιβλέπων: Σωτήριος Καρέλλας
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΙΚΡΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΚΛΙΝΗ ΑΝΟΔΙΚΗΣ ΡΟΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΙΑΝΝΟΥΛΑΤΟΣ Ι. ΘΩΜΑΣ

.....

ΓΙΑΝΝΟΥΛΑΤΟΣ Ι. ΘΩΜΑΣ

mc07653

thomas.giannoulatos@hotmail.com

Copyright © Γιαννουλάτος Ι. Θωμάς, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την εκπόνηση αυτής της εργασίας ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στην σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών, του ΕΜΠ. Με την ευκαιρία που μου δίνεται θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν με άμεσο ή έμμεσο τρόπο στο όμορφο αυτό ταξίδι.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή κ. Σ. Καρέλλα, για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και πρωτότυπο θέμα. Ευχαριστώ επίσης, τον Δρ. Κ. Πανόπουλο και τον υποψήφιο διδάκτωρ Χ. Χριστοδούλου για την υπομονή, την καθοδήγηση και τις γνώσεις που μου μετέδωσαν κατά την διάρκεια συγγραφής της παρούσας εργασίας. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο μου Νικό Παρασκευόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια του στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Inventor.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου και τους συναδέλφους και κάλους μου φίλους για την υποστήριξη και την συμπαράσταση που μου έδειξαν όλα αυτά τα χρονιά στην σχολή.

ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται και περιγράφεται η κατασκευή μιας μικρής μονάδας αεριοποίησης βιομάζας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά, γίνεται περιγραφή στις χρήσεις της βιομάζας και στην διαδικασία της αεριοποίησης, που πραγματοποιείται στην μονάδα. Η μελέτη αφορά, κυρίως, στον σχεδιασμό όλων των υποσυστημάτων που συγκροτούν την μονάδα αυτή. Για την παραγωγή μεγίστου δυνατού έργου 10 kWth πραγματοποιείται ανάλυση στις διαστάσεις κάθε επιμέρους κομματιού με την χρήση μαθηματικών μοντέλων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα κατασκευαστικά σχέδια των κομματιών αυτών και το κόστος κατασκευής τους. Τέλος, γίνεται εκτίμηση του κόστους κατανάλωσης καύσιμου μια τέτοιας μονάδας και σύγκριση του με το αντίστοιχο κόστος μιας τυπικής βενζινοκίνητης γεννήτριας ρεύματος.

ABSTRACT

This thesis analyses the design and manufacturing of a small plant, which is powered by biomass gasification, for electricity production. Initially, it describes the uses of biomass and the gasification process, which takes place into the unit. Main lines of the study concern the design of all the subsystems that constitute this unit. In order to achieve the production of maximum 10 kWth, the dimensions of all the subsystems are calculated using mathematical models. Then, it presents detailed the mechanical designs and the manufacturing cost of those systems. Finally, an estimation of the biomass consumption cost, of such a unit, is reported and compared with the corresponding cost of a standard gasoline-powered electric generator.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. ΒΙΟΜΑΖΑ	1
1.1.1. Σχηματισμός.....	2
1.1.2. Προϊόντα	3
1.1.3. Συστατικά και Ιδιότητες.....	3
1.2. ΤΡΟΠΟΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ.....	6
1.2.1. Βιοχημικές Διεργασίες	6
1.2.2. Θερμοχημικές Διεργασίες	6
1.2.2.1. Καύση.....	7
1.2.2.2. Πυρόλυση.....	7
1.3. ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ	8
1.3.1. Ορισμός	8
1.3.2. Φάσεις και αντιδράσεις της αεριοποίησης.....	10
1.3.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την αεριοποίηση	12
1.3.4. Ιστορική αναδρομή αεριοποίησης.....	14
1.3.5. Σύγκριση καύσης και αεριοποίησης.....	17
1.3.6. Παραγόμενο αέριο (Syngas).....	18
1.3.7. Πίσσες.....	18
1.3.8. Εφαρμογές της αεριοποίησης.....	19
1.4. ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΕΣ	21
1.4.1. Αεριοποιητής Συμπαρασυρμού (Entrained Flow - Bed)	21
1.4.2. Αεριοποιητής Ρευστοποιημένης Κλίνης (Fluidized - Bed)	23
1.4.3. Αεριοποιητής Σταθερής Κλίνης (Fixed - Bed)	24
1.4.3.1. Ανοδικής Ροής (Updraft)	24
1.4.3.2. Καθοδικής Ροής (Downdraft).....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	27
2.1. ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (FUEL FEEDING SYSTEM)	28
2.1.1. Περιγραφή.....	28
2.1.2. Σχεδιασμός.....	31
2.2. ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ (GASIFIER).....	34

2.2.1. Περιγραφή.....	34
2.2.2. Σχεδιασμός.....	35
2.3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΑΕΡΙΟΥ (GAS CLEANING SYSTEM).....	43
2.3.1. Περιγραφή.....	43
2.3.1.1. Κυκλώνας (Cyclone)	45
2.3.1.2. Υφασμάτινα Φίλτρα (Fabric Filters).....	47
2.3.1.3. Σύστημα Υγρού Καθαρισμού (Wet scrubber)	50
2.3.1.4. Ηλεκτροστατικό Φίλτρο (Electrostatic precipitator)	53
2.3.2. Σχεδιασμός.....	54
2.3.2.1. Κυκλώνας	54
2.3.2.2. Φίλτρο.....	57
2.4. ΣΥΣΚΕΥΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (ELECTRIC GENERATOR).....	59
2.4.1. Περιγραφή.....	59
2.4.2. Παράμετροι	60
2.4.3. Μετατροπές.....	61
2.4.4. Σχεδιασμός.....	62
2.5. ΛΟΙΠΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	63
2.5.1. Πυρσός (Flare)	63
2.5.2. Μετρητικά συστήματα (Measuring Devices).....	64
2.5.3. Φλάντζες (Flanges)	66
2.5.4. Τροφοδοσία Αέρα (Air Feeding System).....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ.....	69
3.1. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ.....	70
3.2. ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	82
3.3. ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΕΝΗΤΡΙΑΣ.....	84
3.3.1. Καύσιμο Αμόλυβδη Βενζίνη.....	84
3.3.2. Καύσιμο Αέριο Σύνθεσης.....	84
3.3.3. Συμπεράσματα	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	87
4.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	87
4.2. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	88

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	93
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΥ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΥΨΟΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΗ	99
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	101

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΒΙΟΜΑΖΑ

Η βιομάζα σχηματίζεται από ζωντανά είδη όπως φυτά και ζώα, δηλαδή είναι οτιδήποτε ήταν ζωντανό για κάποιο χρονικό διάστημα. Σχηματίζεται από την στιγμή που μια ριζά αρχίζει να φυτρώνει ή ένας οργανισμός γεννιέται. Αντίθετα με τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, κάρβουνο, φυσικό αέριο) η βιομάζα δεν απαιτεί εκατομμύρια χρόνια για να αναπτυχτεί. Τα φυτά χρησιμοποιούν το φως του ήλιου μέσω της φωτοσύνθεσης για να μεταβολίσουν το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και να αναπτυχθούν. Τα ζώα αντίστοιχα τρέφονται με βιομάζα για να αναπτυχθούν. Τα ορυκτά καύσιμα δεν ανανεώνονται όπως γίνεται με την βιομάζα και για αυτό το λόγο η βιομάζα θεωρείται ανανεώσιμη. Αυτό είναι και το κύριο πλεονέκτημα που θέτει την βιομάζα ως πηγή ενέργειας [1,2].



Σχήμα 1.1: Κύκλος του διοξειδίου του άνθρακα [3].

1.1.1. Σχηματισμός

Κάθε χρόνο ένα τεράστιο ποσό βιομάζας μεγαλώνει μέσω της φωτοσύνθεσης, απορροφώντας το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) της ατμόσφαιρας. Όταν η βιομάζα καίγεται, απελευθερώνεται το CO₂ που είχαν απορροφήσει τα φυτά από την ατμόσφαιρα σε βραχύχρονο διάστημα (μερικές ώρες έως μερικά χρόνια). Έτσι κάθε καύση βιομάζας δεν επιβαρύνει την παγκόσμια θέρμανση, μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Γι αυτό το λόγο, η βιομάζα θεωρείται ουδέτερο ως προς CO₂ καύσιμο. Ακόμα, η βιομάζα εκπέμπει αμελητέες ποσότητες θείου, οπότε η εκπομπή διοξειδίου του θείου (SO₂) μειώνεται αισθητά. Το SO₂, είναι από τα υπεύθυνα αέρια της ύπαρξης της όξινης βροχής. Η βιομάζα συμβάλλει ουσιαστικά στην υλοποίηση της αποκεντρωμένης παραγωγής, γεγονός που ευνοεί τη δημιουργία μικρών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής κοντά σε διαθέσιμες ποσότητες. Αυξάνονται οι μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού, καθώς η χρήση της βιομάζας ευνοεί τεχνοοικονομικά τη δημιουργία τους. Δίνεται η δυνατότητα ενεργειακής αξιοποίησης αστικών απορριμμάτων, των οποίων η διάθεση αποτελεί σημαντικό πρόβλημα στα μεγάλα αστικά κέντρα.

Από την άλλη πλευρά όμως, το κόστος συλλογής και επεξεργασίας των υλικών θεωρείται μεγάλο πρόβλημα, που αντιμετωπίζεται όμως με τη δημιουργία μονάδων πλησίον των παραγόμενων υλών. Επιπλέον μειονέκτημα αποτελεί το μικρό ενεργειακό περιεχόμενό της, σε σχέση με ίση μάζα ορυκτού καυσίμου, το οποίο θα μπορούσε να αντισταθμιστεί όμως από τα περιβαλλοντικά οφέλη της καύσης βιομάζας. Καθώς και η αναπόφευκτη έκλυση συγκεντρώσεων CO₂ κατά τη μεταφορά και το χειρισμό της βιομάζας [1].

Από το τεράστιο αυτό ποσό βιομάζας μόνο το 5%, δηλαδή περίπου 13,5 δις τόνοι, μπορούν μελλοντικά να 'κινηθούν' για να παραχθεί ενέργεια. Αυτό το ποσό είναι αρκετά μεγάλο για να παράξει το 26% της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης, που είναι αντίστοιχο με 6 δις τόνους πετρελαίου.

1.1.2. Προϊόντα

Τα προϊόντα της μπορεί να είναι:

- Υγρά (ethanol, biodiesel, methanol, vegetable oil and pyrolysis oil).
- Αέρια (biogas, producer gas, syngas, SNG).
- Στερεά (charcoal, torrefied biomass).

και από αυτά παράγονται:

- Χημικά προϊόντα, που παράγονται και από το πετρέλαιο, όπως οι μονοσακχαρίτες φρουκτόζη και γαλακτόζη.
- Ενέργεια, πχ για θέρμανση.
- Ηλεκτρισμός, πχ σε έναν ΑΗΣ.
- Καύσιμα για μεταφορές και μετακινήσεις.

1.1.3. Συστατικά και Ιδιότητες

Η στοιχειακή ανάλυση της βιομάζας χαρακτηρίζεται από υψηλά ποσοστά άνθρακα και οξυγόνου και σε μικρότερα ποσοστά περιέχεται το υδρογόνο και το άζωτο. Από αυτή την ανάλυση γνωρίζουμε ότι, όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό του οξυγόνου, τόσο μεγαλύτερη είναι η παρουσία μορίων νερού στα συστατικά της βιομάζας, δηλαδή τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της υγρασίας της, δηλαδή τόσο μικρότερη και η θερμική αξία του καυσίμου. Με βάση τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι το πιο επιθυμητό είδος βιομάζας ως προς την θερμική του αξία είναι αυτό που έχει τη μεγαλύτερη δυνατή περιεκτικότητα σε άνθρακα και το χαμηλότερο δυνατό ποσοστό σε οξυγόνο [1].

Εκτός από τη στοιχειακή ανάλυση, τα διάφορα είδη βιομάζας χαρακτηρίζονται και από κάποιες φυσικές και χημικές ιδιότητες. Αυτές κρίνουν σε μεγάλο βαθμό την ενεργειακή απόδοση της βιομάζας κατά την εφαρμογή των διεργασιών αξιοποίησής της. Οι σημαντικότερες ιδιότητες είναι [4]:

Θερμογόνος δύναμη

Πρόκειται για τη θερμική ενέργεια που εκλύεται κατά την καύση 1 kg καυσίμου σε αδιαβατικές συνθήκες. Ανάλογα με τη φάση στην οποία βρίσκεται το νερό στα προϊόντα της καύσης (υγρή ή αέρια) η θερμογόνος δύναμη διακρίνεται σε ανώτερη (HHV- Higher Heating Value) και σε κατώτερη (LHV- Lower Heating Value), λόγω δέσμευσης ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης των υδρατμών στα καυσαέρια. Γενικά, οι συνήθεις τιμές θερμογόνου δύναμης βιοκαυσίμου χωρίς τέφρα και σε ξηρή βάση είναι της τάξης των 20.000 kJ/kg με απόκλιση της τάξεως του 15%.

Περιεκτικότητα σε υγρασία

Αναφέρεται στην ποσότητα του νερού που περιλαμβάνεται στη βιομάζα. Το ποσοστό της υγρασίας που περιέχεται σε ένα βιοκαύσιμο αποτελεί μία ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο, τόσο για τον καθορισμό της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας, όσο και για την επιλογή της τεχνολογίας ενεργειακής αξιοποίησης που θα εφαρμοστεί. Για τη θερμική αξιοποίησή της η βιομάζα είναι απαραίτητο να έχει τιμές υγρασίας μικρότερες του 50%. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως προαναφέρθηκε, το υψηλό ποσοστό υγρασίας οδηγεί σε χαμηλή θερμική αξία λόγω του γεγονότος ότι καταναλίσκεται μεγαλύτερη ενέργεια για την εξάτμιση της υγρασίας. Ανάλογα με το είδος και την προέλευση της βιομάζας οι τιμές της υγρασίας κυμαίνονται από 10% (υπολείμματα καλλιέργειας δημητριακών) μέχρι και 80% (δασικά υπολείμματα- ζωικά απόβλητα).

Περιεκτικότητα σε τέφρα

Πρόκειται για τα ανόργανα συστατικά της καύσιμης ύλης τα οποία παραμένουν ως υπόλειμμα μετά την πλήρη καύση της βιομάζας. Αποτελείται κατά κύριο λόγο από τα εξής στοιχεία: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O , MgO , P_2O_5 , TiO_2 . Ανάλογα με την καύσιμη ύλη η ποσότητα της τέφρας μπορεί να κυμανθεί από 0.5% (ξύλο) μέχρι και 30-40% (φλοιός ρυζιού). Η παρουσία της τέφρας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις διάφορες διεργασίες εκμετάλλευσης του καυσίμου καθώς είναι από τις σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του καυσίμου υπό υψηλές θερμοκρασίες. Γενικά η ύπαρξη τέφρας δεν είναι επιθυμητή καθώς εκτός από το γεγονός ότι ελαττώνει την ποσότητα και ποιότητα του παραγόμενου αερίου, παράλληλα η τήξη και η συσσωμάτωσή της προκαλεί προβλήματα, όπως αποφράξεις, επικαθίσεις και λειτουργικές δυσχέρειες σε διάφορα μέρη της εγκατάστασης, με αποτέλεσμα τη διακοπή της διεργασίας για την συντήρηση και τον καθαρισμό της.

1.2. ΤΡΟΠΟΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Η ογκώδης και ακατάλληλη μορφή της βιομάζας είναι το κύριο εμπόδιο για την γρήγορη μετάβαση σε καύσιμη υλη. Αντίθετα με την υγρή ή την αέρια φάση, η στερεή βιομάζα δεν μπορεί να χειριστεί, να αποθηκευθεί και να μεταφερθεί με ευκολία. Αυτό παρέχει μεγάλο κίνητρο για την μετατροπή της στερεής βιομάζας σε υγρά και αέρια καύσιμα, η οποία γίνεται με δυο τρόπους, βιοχημικά και θερμοχημικά [1].

1.2.1. Βιοχημικές Διεργασίες

Στην βιοχημική διεργασία, τα μόρια της βιομάζας διασπώνται σε μικρότερα και μικρότερα μόρια μέσω βακτηρίων και ένζυμων. Αυτή η διαδικασία είναι πολύ πιο αργή από ότι η θερμοχημική, αλλά δεν χρειάζεται εξωτερική προσθήκη ενεργείας. Γίνεται με τους έξης τρεις τρόπους:

- Χώνευση (αερόβια ή αναερόβια), όπου παράγεται μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.
- Ζύμωση, όπου παράγονται σάκχαρα και από αυτά η αιθανόλη.
- Ενζυματική ή οξική υδρόλυση, όπου παράγονται ενζυμικά σάκχαρα και από αυτά η αιθανόλη.

1.2.2. Θερμοχημικές Διεργασίες

Στην θερμοχημική διεργασία, ολόκληρη η βιομάζα μετατρέπεται σε αέριο, το οποίο στην συνέχεια συντίθεται στα επιθυμητά χημικά προϊόντα ή χρησιμοποιείται κατευθείαν ως έχει. Ο κύριος σκοπός της διεργασίας είναι η παράγωγή θερμικής ενεργείας, η οποία γίνεται με τους έξης τέσσερις τρόπους:

- Καύση
- Πυρόλυση
- Αεριοποίηση

Η καύση αποτελεί μια υψηλής θερμοκρασίας διεργασία μετατροπής βιομάζας, με περίσσεια αέρα, σε CO₂ και ατμό. Η αεριοποίηση, αντιθέτως, αποτελεί μια χημική αντίδραση σε περιβάλλον έλλειψης οξυγόνου. Η πυρόλυση παίρνει μέρος σε περιβάλλον χαμηλής θερμοκρασίας με παντελή έλλειψη οξυγόνου [1].

1.2.2.1. Καύση

Η καύση αντιπροσωπεύει ίσως την αρχαιότερη χρήση της βιομάζας δεδομένου ότι ο πολιτισμός ξεκίνησε με την ανακάλυψη της φωτιάς. Το κάψιμο του ξύλου από τα δάση έμαθε στους ανθρώπους πως να μαγειρεύουν και πως να ζεσταίνονται. Χημικά, η καύση είναι μια εξώθερμη αντίδραση μεταξύ οξυγόνου και υδρογονάνθρακα. Εδώ, η βιομάζα μετατρέπεται κυρίως σε CO₂ και νερό. Η θερμότητα που απελευθερώνει η αντίδραση αυτή είναι σήμερα η μεγαλύτερη πηγή της ανθρώπινης ενεργειακής κατανάλωσης, απορροφώντας πάνω από το 90% της ενέργειας από την βιομάζα. Με την καύση της βιομάζας παράγεται κυρίως ενέργεια για θέρμανση και ηλεκτρικό ρεύμα [1].

1.2.2.2. Πυρόλυση

Αντίθετα με την καύση, η πυρόλυση πραγματοποιείται με απουσία οξυγόνου, εξαιρούμενων περιπτώσεων όπου μερική καύση απαιτείται για την παράγωγή ενέργειας απαραίτητης για την διαδικασία. Η πυρόλυση είναι μια θερμική μετατροπή αποσύνθεσης βιομάζας σε αέριο, υγρό ή στερεό υλικό.

Εμφανίζεται σε τρεις τύπους:

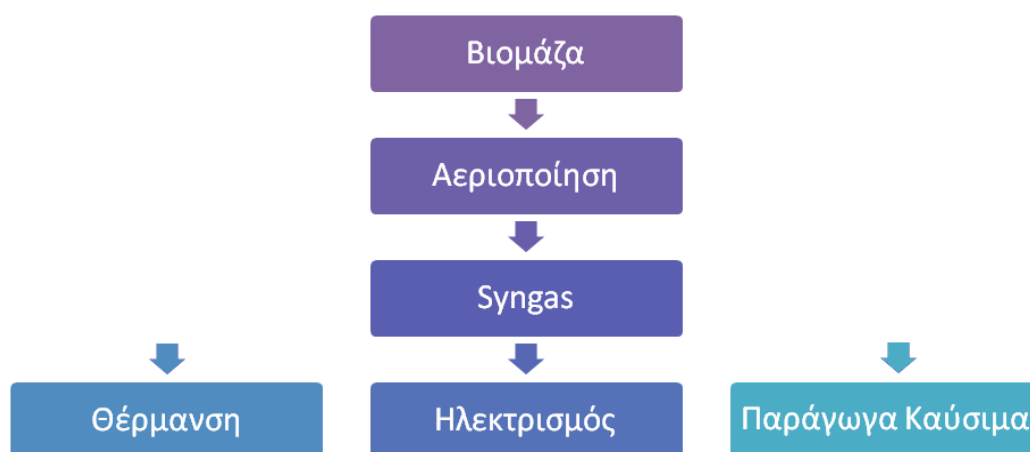
- Ήπια Πυρόλυση (Torrefaction).
- Αργή Πυρόλυση (Slow Pyrolysis).
- Γρήγορη Πυρόλυση (Fast Pyrolysis).

Στην πυρόλυση, τα μεγάλα μόρια των υδρογονανθράκων σπάνε σε μικρότερα μόρια. Ο ταχύς τύπος παράγει κυρίως υγρό καύσιμο, το βιοντίζελ. Ο αργός τύπος παράγει κάποια αέρια και στερεά, όπως το κάρβουνο. Η πυρόλυση αποτελεί μια αρκετά υποσχόμενη διεργασία μετατροπής βιομάζας σε υγρά καύσιμα και αντίθετα με την καύση δεν είναι εξώθερμη αντίδραση [1].

1.3. ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ

1.3.1. Ορισμός

Η αεριοποίηση είναι μια μορφή θερμικής επεξεργασίας που πραγματοποιείται με υποστοιχειομετρική αναλογία οξυγόνου (μικρότερη ποσότητα οξυγόνου από αυτήν που χρειάζεται για πλήρη οξειδωση) σε θερμοκρασίες άνω των 700°C και έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αερίου σύνθεσης (syngas) καθώς και μικρού στερεού υπολείμματος (tar). Το αέριο σύνθεσης αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο με μικρότερες ποσότητες μεθανίου, διοξειδίου του άνθρακα, αζώτου και λοιπών υδρογονανθράκων. Το αέριο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο με θερμογόνο ικανότητα σχεδόν την μισή από αυτήν του φυσικού αερίου. Η αεριοποίηση ανά τον κόσμο χρησιμοποιείται σε μικρές δυναμικότητες και σε επιλεγμένα ρεύματα απορριμμάτων [5].



Σχήμα 1.2: Παραγόμενα προϊόντα από την αεριοποίηση βιομάζας.

Τα μέσα αεριοποίησης αντιδρούν με τα στερεά μόρια του άνθρακα και τους βαρείς υδρογονάνθρακες ώστε να τα μετατρέψουν σε μικρότερου μεγέθους και βάρους μόρια, αέρια όπως το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο. Τα βασικά μέσα είναι:

- Οξυγόνο
- Αέρας
- Ατμός

Το οξυγόνο είναι το πιο δημοφιλές μέσο λόγω της χρήσης του στην διαδικασία της καύσης. Μπορεί να χορηγηθεί στον αεριοποιητή είτε ως καθαρό μέσο είτε μέσω του αέρα. Η επιλογή μέσου επιδρά στην θερμική αξία του αερίου που θα παραχθεί. Αεριοποίηση με οξυγόνο δίνει την μεγαλύτερη θερμική αξία σε σχέση με τα άλλα μέσα, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα.

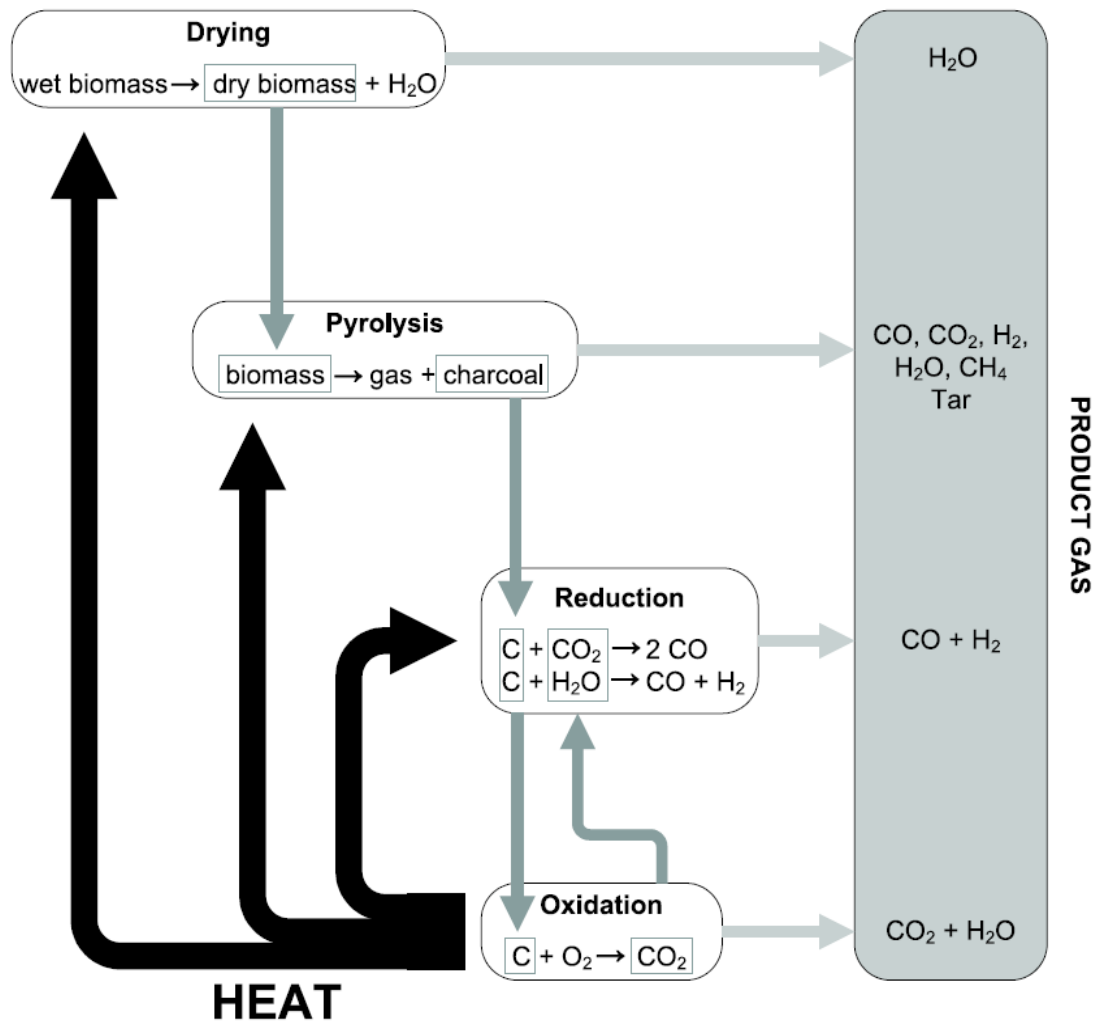
Πίνακας 1.1: Θερμογόνος δύναμη του παραγόμενου αερίου βάσει μέσου αεριοποίησης.

Μέσο Αεριοποίησης	Θερμογόνος Δύναμη
Αέρας	4 - 7 MJ / Nm ³
Ατμός	10 - 18 MJ / Nm ³
Οξυγόνο	12 - 28 MJ / Nm ³

1.3.2. Φάσεις και αντιδράσεις της αεριοποίησης

Η αεριοποίηση περιέχει τις έξης διαδικασίες [6]:

- **Ξήρανση.** Με τη χρήση θερμότητας, το νερό εξατμίζεται από το ξύλο. Αυτό είναι θετικό, επειδή το πλεόνασμα του ύδατος μειώνει τη θερμοκρασία οξείδωσης, η οποία δεν παρέχει καθαρό αέριο. Η διαδικασία αυτή συντελείται μέχρι θερμοκρασίες 150-200°C.
- **Πυρόλυση.** Σε θερμοκρασίες πάνω από 270°C η δομή του ξύλου καταρρέει, τα μεγάλα μόρια γίνονται μικρότερα. Κάρβουνο και πίσσα εκτός από το αέριο αρχίζουν να εμφανίζονται.
- **Οξειδωση ή καύση.** Υπό μια συγκεκριμένη παροχή αέρα, ένα μέρος του άνθρακα αρχίζει και οξειδώνεται (καίγεται) και μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και το οξυγόνο αντίστοιχα σε νερό. Σε αυτό το στάδιο απελευθερώνεται μεγάλο μέρος ενέργειας, η οποία είναι απαραίτητη για την:
- **Αεριοποίηση.** Εδώ πραγματοποιούνται οι πιο σημαντικές μετατροπές, η ενέργεια που χρειάζεται έχει απελευθερωθεί από την καύση πριν και η θερμοκρασίες που εμφανίζονται είναι μεγαλύτερες των 1400°C. Ο άνθρακας αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα και το μετατρέπει σε μονοξείδιο του άνθρακα. Ο άνθρακας επίσης αντιδρά με το νερό και δημιουργεί μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Αυτές αποτελούν τις βασικές αντιδράσεις, όπου παρουσιάζονται στην συνέχεια.



Σχήμα 1.3: Φάσεις της αεριοποίησης [8].

Οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν κατά την αεριοποίηση περιγράφονται ακολούθως. Είναι μια σειρά από ενδόθερμες αντιδράσεις οι οποίες συμβαίνουν λόγω της ενέργειας που εκλύεται από τις αντιδράσεις καύσης [6].

Πίνακας 1.2: Χημικές αντιδράσεις αεριοποίησης.

Είδος Αντίδρασης	Αντίδραση	Ενέργεια
Αντιδράσεις Καύσης	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394 (kJ/kmol)
	$\frac{1}{2}O_2 + H_2 \rightarrow H_2O$	-242 (kJ/kmol)
Boudouard	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	172 (kJ/kmol)
Άνθρακα - Ατμού	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	131 (kJ/kmol)
Αντίδραση Μετατόπισης	$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$	41,2 (kJ/kmol)
Παραγωγής Μεθανίου	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	-74,8 (kJ/kmol)
	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	-247 (kJ/kmol)

1.3.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την αεριοποίηση

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις αντιδράσεις της αεριοποίησης είναι κυρίως η θερμοκρασία, η πίεση και το ύψος του αντιδραστήρα.

Επίδραση της θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αεριοποίηση. Η επιλογή της πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα διάφορα σημεία τήξης των υλικών της κατασκευής καθώς και τις διάφορες χημικές διεργασίες που πρόκειται να γίνουν. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει τον σχηματισμό των εύφλεκτων αερίων, μειώνει το περιεχόμενο της υγρής και στερεής πίσσας (tar) και οδηγεί στην πλήρη μετατροπή του καύσιμου σε αέριο. Το ενεργειακό περιεχόμενο του syngas που παράγεται, αυξάνεται σταθερά ως τους 700°C αλλά μειώνεται με επιπλέον αύξηση της θερμοκρασίας.

Σημαντική είναι και η επίδραση της θερμοκρασίας στην παραγωγή των πισσών. Με την αύξηση της θερμοκρασίας οι πίσσες ελαττώνονται. Συγκεκριμένα σε πείραμα που έγινε στους 700°C η παραγωγή των πισσών ήταν 15,2 g/Nm³, ενώ με την

αύξηση της θερμοκρασίας στους 815°C η παραγωγή μειώθηκε στους 0,4 g/Nm³. Η προσθήκη καταλύτη (11-14 kg) αλουμινίου - νικελίου μειώνει ακόμα περισσότερο την παραγωγή των πισσών. Συγκεκριμένα βρέθηκε ότι στους 800°C η παραγωγή ήταν 0,15 g/Nm³ [9].

Επίδραση της πίεσης

Η αεριοποίηση υπό πίεση έχει σαφώς μεγαλύτερα πλεονεκτήματα από την αεριοποίηση υπό ατμοσφαιρική πίεση, για τον λόγο αυτόν και οι περισσότερες σύγχρονες εγκαταστάσεις γίνονται υπό πίεση που ξεκινάει από τα 10 bar και ξεπερνούν τα 100 bar. Τα πλεονεκτήματα της εγκατάστασης αυτής είναι η εξοικονόμηση ενέργειας και η μείωση του συνολικού μεγέθους της εγκατάστασης.

Τις περισσότερες των περιπτώσεων το αέριο προϊόν (syngas) στις μετέπειτα χρήσεις του (π.χ. είσοδος αεριοστρόβιλου) χρειάζεται να συμπιεστεί έτσι ώστε να φτάσει σε συγκεκριμένη τιμή πίεσης. Για την συμπίεση αυτή απαιτείται μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Το γεγονός αυτό αποφεύγεται στην αεριοποίηση υπό πίεση, καθώς το καύσιμο υφίσταται συμπίεση που απαιτεί πολύ μικρότερη ενέργεια [9].

Επίδραση του ύψους του αντιδραστήρα

Για μια δεδομένη θερμοκρασία στον αντιδραστήρα, το μεγάλο ύψος κλίνης αυξάνει τον χρόνο παραμονής του καύσιμου, ο οποίος με την σειρά του βελτιώνει την συνολική απόδοση του αερίου και αυξάνει την περιεκτικότητα σε υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο [9].

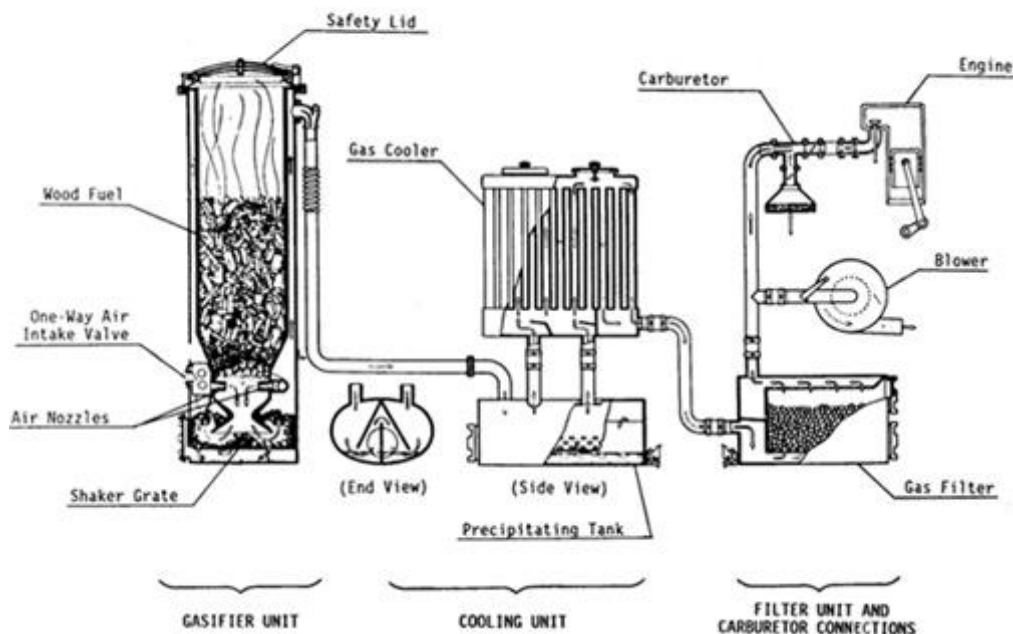
1.3.4. Ιστορική αναδρομή αεριοποίησης

Η μέθοδος της αεριοποίησης στερεών καύσιμων εφαρμόζεται ήδη τους τελευταίους αιώνες. Η ανάπτυξη και η διάδοση της τεχνολογίας αυτής συνδέεται με οικονομικά και κοινωνικά φαινόμενα. Πιο συγκεκριμένα, από τον 19ο αιώνα μέχρι τις αρχές του 20ου εγκαθίσταται σε πολλές πόλεις αεριοποιητές άνθρακα (coal gasifiers). Το παραγόμενο αέριο διανέμεται στις βιομηχανίες και στις οικίες των πολιτών και χρησιμοποιείται για την παράγωγή ηλεκτρισμού (φωτισμός κυρίως). Η τεχνολογία αυτή παρακμάζει σταδιακά λόγω της ανάπτυξης των δικτύων ηλεκτροδότησης. Κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, όλα τα αποθέματα καύσιμων (βενζίνης και πετρελαίου) επιτάσσονταν από τις στρατιωτικές αρχές. Έτσι για την κίνηση των αυτοκίνητων δημιουργήθηκαν μικρές μονάδες αεριοποίησης ξύλου, εγκατεστημένες απευθείας στα αυτοκίνητα. Μια τυπική μονάδα παρουσιάζεται παρακάτω [10].



Σχήμα 1.4: Φωτογραφίες αυτοκίνητων εποχής Β' Παγκοσμίου Πολέμου, με τεχνολογία αεριοποίησης ξύλου [11].

ORNL-DWG 87-1455



Σχήμα 1.5: Μέρη μονάδας αεριοποιητή, Β' Παγκοσμίου Πολέμου [10].

Το παραπάνω σχέδιο αποτελεί ένα τυπικό σύστημα αεριοποίησης για αυτοκίνητα εποχής Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Από αριστερά, είναι ο αεριοποιητής ή αντιδραστήρας (gasifier ή reactor). Στο εσωτερικό του τοποθετείται η καύσιμη υλη (feedstock). Στον κάτω μέρος φαίνονται τα ακροφύσια αέρα που εισάγουν καθαρό αέρα σε συνθήκες περιβάλλοντος. Στην συνέχεια, το αέριο που παράγεται από τον αεριοποιητή δέχεται μια εκτεταμένη σειρά ψύξης και καθαρισμού, δεδομένου ότι το αέριο περιέχει τεφρά, πλούσια σε σωματίδια άνθρακα, και πρέπει να εισέρθει σε μηχανή εσωτερικής καύσης καθαρό και σε καθορισμένη θερμοκρασία. Κατά την διάρκεια του φιλτραρίσματος η θερμοκρασία του αερίου μειώνεται προς το σημείο δρόσου, και έτσι μετά τοποθετείται σύστημα ψύξης για την απομάκρυνση του συμπυκνωμένου νερού. Το επόμενο στάδιο είναι μια διάταξη αποτελούμενη από ένα σταθερό φίλτρο σωματιδίων (γεμάτο άμμο συνήθως). Στην συνέχεια ο φυσητήρας, που τροφοδοτείται από την μπαταρία του αυτοκινήτου, αυξάνει την ταχύτητα του αερίου και μέσω του καρμπυρατέρ, το αέριο αναμιγνύεται με δευτερογενή αέρα με ρυθμό περίπου 1:1 και εισάγεται τελικός στην μηχανή του αυτοκινήτου [12].

Μετά το τέλος του πολέμου η τεχνολογία αυτή παύει να έχει ενδιαφέρον λόγω της αφθονίας στερεών καύσιμων. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 αρχίζει μια νέα περίοδος ακμής η οποία ισχύει ως σήμερα. Οι λόγοι είναι κυρίως οικολογικοί και αφορούν στην μείωση των εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου. Σήμερα, η τεχνολογία της αεριοποίησης συνδέεται άμεσα με την χρήση βιομάζας ως καύσιμο, καθώς θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας [10].

1.3.5. Σύγκριση καύσης και αεριοποίησης

Η βασική τους διαφορά έγκειται στα προϊόντα που παράγονται και στην μετέπειτα αξιοποίηση τους.

Κατά την καύση όλα τα αντιδρώντα μετατρέπονται κυρίως σε CO_2 και H_2O (τέλεια καύση). Το διοξείδιο του άνθρακα συντελεί σε ένα από τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά προβλήματα, το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Σοβαρό πρόβλημα της καύσης αποτελεί η εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων τοξικών ενώσεων, όπως NO_x και H_2S . Οι χημικές ενώσεις αυτές είναι εξαιρετικά βλαβερές για το περιβάλλον αλλά και καταστροφικές για την ίδια την εγκατάσταση. Συγκεκριμένα, τα NO_x είναι πρωτογενείς ρύποι που προκαλούν σημαντικές καταστροφές στους ιστούς των πνευμόνων και εξασθενίζουν την αντίσταση του οργανισμού στην πνευμονία. Εκτός αυτού, είναι υπεύθυνοι για την πρόκληση εμφυσήματος, άσθματος και βρογχίτιδας. Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις προκαλούν την όξινη βροχή και σε επίπεδο εδάφους συνεισφέρουν στην αύξηση του όζοντος και της αιθαλομίχλης [13].

Κατά την αεριοποίηση το προϊόν που παράγεται αποτελείται κυρίως από υδρογόνο (H_2) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Τα προϊόντα αυτά είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον και μπορούν μετέπειτα να χρησιμοποιηθούν αξιοποιώντας την μεγάλη θερμική ενέργεια που έχουν. Η αεριοποίηση υπερτερεί σε ότι αφορά στην χρησιμότητα αλλά και την σπουδαιότητα των προϊόντων της. Κατά την αεριοποίηση δεν ευνοείται ο σχηματισμός των NO_x καθώς επιτυγχάνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από αυτές της καύσης. Το άζωτο N μετατρέπεται σε αμμωνία NH_3 και ένα μικρό ποσοστό σε υδροκυάνιο HCN . Από την άλλη το θείο S μετατρέπεται σε υδρόθειο H_2S το οποίο είναι υπεύθυνο για πολλά προβλήματα στο νευρικό σύστημα των ανθρώπων. Το σημαντικό όμως είναι ότι και το H_2S και η NH_3 αφαιρούνται σε μετέπειτα διαδικασίες καθαρισμού του αερίου σύνθεσης. Τέλος, το εξανθράκωμα (char) που παράγεται κατά την διάρκεια της πυρόλυσης στην αεριοποίηση είναι πιο ενεργό από αυτό της καύσης [14].

1.3.6. Παραγόμενο αέριο (Syngas)

Πρόκειται για ένα μίγμα υδρογόνου H_2 (18%) και μονοξειδίου του άνθρακα CO (20%) και αποτελεί βασικό καύσιμο για τις χημικές και ενεργειακές βιομηχανίες. Διαφέρει σημαντικά από το αέριο SNG (Substitute Natural Gas) το οποίο παράγεται από το μεθάνιο. Μεγάλος αριθμός υδρογονανθράκων που παραδοσιακά παράγονται από το πετρέλαιο μπορούν να παραχθούν και από το Syngas. Μπορεί έτσι να παραχθεί κάρβουνο (coal) και κοκ (petro-coke). Μια από τις μεγάλες εφαρμογές του αερίου είναι η παράγωγη υγρού καύσιμου για μεταφορές. Το τυπικό προϊόν από την αεριοποίηση της βιομάζας περιέχει: υδρογόνο H_2 , υγρασία, μονοξείδιο του άνθρακα CO , διοξείδιο του άνθρακα CO_2 , μεθάνιο CH_4 , αποφαντικούς υδρογονάνθρακες, βενζίνη και τουεινη (toluene), όπως και μικρές ποσότητες αμμωνίας (NH_3), διάφορα οξέα και οξείδια του θείου. Από όλο από το μίγμα ξεχωρίζονται τα δυο βασικά, υδρογόνο (H_2) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και έτσι έχουμε το Syngas [15].

1.3.7. Πίτσες

Κατά την αεριοποίηση της βιομάζας εκτός από το αέριο σύνθεσης παράγονται και κάποιες ανεπιθύμητες οργανικές ενώσεις του άνθρακα, οι οποίες ονομάζονται πίσσες (tars). Η πίσσα μπορεί να προκαλέσει λειτουργικά προβλήματα στην εγκατάσταση στην οποία γίνεται η διεργασία, φράσσοντας τις σωληνώσεις σε διάφορα σημεία της μονάδας. Ακόμα, στις περισσότερες εφαρμογές, για τη χρήση του αερίου σύνθεσης απαιτείται προηγουμένως η απομάκρυνση και ο καθαρισμός των ενώσεων των πηκτών.

Οι πίσσες σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της αεριοποίησης ύστερα από μία σειρά πολύπλοκων αντιδράσεων. Ο σχηματισμός των πηκτών είναι άμεσα εξαρτώμενος από τις συνθήκες των αντιδράσεων. Με την αύξηση της θερμοκρασίας των αντιδράσεων, ευνοείται η διάσπασή τους αφού οι δεσμοί των υδρογονανθράκων σπάνε ευκολότερα και το ποσοστό του άνθρακα, του καυσίμου που μετατρέπεται σε αέριο σύνθεσης, μεγιστοποιείται [16].

1.3.8. Εφαρμογές της αεριοποίησης

Παράγωγή αερίου καύσιμου

Το μεγαλύτερο ποσοστό αεριοποιητων εμπορικής λειτουργίας σήμερα, χρησιμοποιείται για παράγωγή θέρμανσης και λιγότερο για παράγωγή αερίου καύσιμου για μηχανές εσωτερικής καύσης, εξαιτίας των λιγότερων απαιτήσεων της εγκατάστασης παράγωγης αερίου υψηλής θερμογόνου ικανότητας. Στον μέλλον, η χρήση αερίου χαμηλής θερμογόνου ικανότητας ως καύσιμο αναμένεται να βρει χρήση στις βιομηχανίες μεταλλουργίας, κεραμικών, τσιμέντου και χαρτοπολτού. Σε αυτούς τους κλάδους η μετατροπή των κλινών, των καυστήρων και των μηχανών ξήρανσης, από καύση πετρελαίου σε καύση αερίου σύνθεσης, θα αποτελεί καταρχήν μια απλή λειτουργία [17].

Παράγωγή μηχανικής ή ηλεκτρικής ισχύος

Οι αεριοποιητές συνδεδεμένοι με σταθερές μηχανές προσφέρουν την δυνατότητα αξιοποίησης βιομάζας για την παράγωγή μηχανικής ή ηλεκτρικής ισχύος σε εύρος από ελάχιστα kW ως μερικά MW. Το παραγόμενο αέριο προς καύση σε μια μηχανή οφείλει να έχει μια επαρκή τιμή θερμογόνου ικανότητας (μεγαλύτερη των 4,2 MJ/kg), να μην έχει υψηλή περιεκτικότητα σε πίσσα και τεφρά ώστε να ελαχιστοποιείται η φθορά της μηχανής και πρέπει να είναι στην μέγιστη δυνατή χαμηλή θερμοκρασία ώστε να αυξηθεί το ποσοστό εισαγωγής αερίου και κατά συνέπεια και η ισχύς εξόδου της μηχανής. Έτσι οι εγκαταστάσεις χωρίζονται ανάλογα με το μέγεθος του επιθυμητού έργου σε [17]:

- Μεγάλης κλίμακας εφαρμογές (500 kW και άνω).
- Μεσαίας κλίμακας εφαρμογές (30 - 500 kW).
- Μικρής κλίμακας εφαρμογές (7 - 30 kW).
- Πολύ μικρής (micro) κλίμακας εφαρμογές (1 - 7 kW).

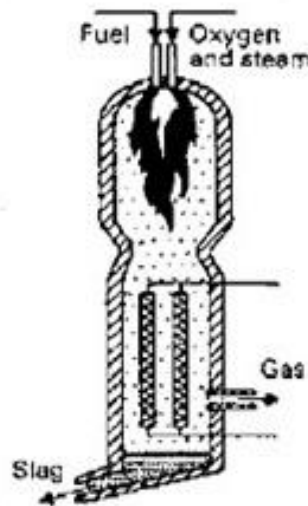
Μεταφορές

Η χρήση αντιδραστήρων τροφοδοτούμενων με ξύλο ή κάρβουνο, για να την κίνηση αυτοκίνητων, φορηγών, τρένων και πλοίων έχει αποδείξει την αξία της κυρίως στην Σουηδία αλλά και σε άλλες χώρες όπως στην Ελβετία, στη Γαλλία, στη Φινλανδία, στην Ολλανδία, στις Φιλιππίνες και στην Σρι Λάνκα, και σκοπός είναι η κατασκευή μεγάλων εγκαταστάσεων για χρήση σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Ωστόσο, η χρήση εγκατάστασης στις μεταφορές έχει αρκετές δυσκολίες σε σχέση με μια σταθερή μηχανή. Κατ' αρχάς, η κατασκευή πρέπει να είναι ελαφριά και να απαιτεί μικρό χώρο στο όχημα, συμπεριλαμβάνοντας τον αντιδραστήρα και τα συστήματα καθαρισμού και ψύξης. Επίσης κύριο ρολό διαδραματίζει ο χώρος και ο τρόπος τροφοδοσίας καύσιμου (βιομάζα). Σε δεύτερο βαθμό, γνωρίζοντας ότι οι μηχανές λειτουργούν σε μεγάλες διακυμάνσεις στο φορτίο τους, η χρήση συστήματος αεριοποίησης οδηγεί σε φθορές στα μέρη ψύξης και καθαρισμού του αερίου, όπως συνέβη σε δόκιμες κατά την διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Συμπερασματικά, αυτά τα μειονεκτήματα οφείλουν να εξισορροπηθούν με μεγαλύτερη γνώση και καλύτερη τεχνολογία, αν και οι εφαρμογές των μεταφορών θα εξαρτώνται πάντα από την εκάστοτε περιοχή και οικονομία, και ειδικά από το κόστος και την διαθεσιμότητα του πετρελαίου ή της βενζίνης [17].

1.4. ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΕΣ

Η διαδικασία της αεριοποίησης χρησιμοποιεί διάφορα ειδή αντιδραστήρων, οι οποίοι μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τον τρόπο κίνησης του καύσιμου και του μέσου αεριοποίησης (αέρος, οξυγόνο, ατμός). Έτσι χωρίζονται βασικά, στους αεριοποιητές συμπαρασυρμού (entrained - flow), στους αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized - bed) και στους αεριοποιητές σταθερής κλίνης (fixed - bed), οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω [9].

1.4.1. Αεριοποιητής Συμπαρασυρμού (Entrained Flow - Bed)

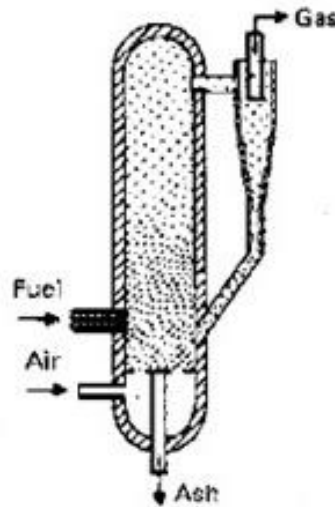


Σχήμα 1.6: Αεριοποιητής συμπαρασυρμού.

Στους αντιδραστήρες συμπαρασυρμού ένα ξηρό κονιοποιημένο στερεό, ένα ψεκαζόμενο υγρό καύσιμο ή ένα πολτοποιημένο καύσιμο αεριοποιείται παρουσία οξυγόνου ή σπανιότερα με αέρα, σε κοινή κατεύθυνση ροής καύσιμου και παραγόμενου αερίου. Οι περισσότεροι τύποι άνθρακα είναι κατάλληλοι για αυτό το είδος του αεριοποιητή, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας καθώς και γιατί τα σωματίδια του άνθρακα μπορούν και διαχωρίζονται το ένα από το άλλο λόγω μεγέθους. Οι θερμοκρασίες της τάξης των 1200°C με 1500°C και οι υψηλές πιέσεις σηματοδοτούν την υψηλή απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί, όμως η θερμική απόδοση είναι κάπως χαμηλότερη, καθώς το αέριο πρέπει να ψηχθεί πριν να καθαριστεί με την υπάρχουσα τεχνολογία. Οι υψηλές θερμοκρασίες δείχνουν επίσης ότι η πίσσα και το μεθάνιο δεν βρίσκονται στο παραγόμενο αέριο, ωστόσο η

απαίτηση οξυγόνου είναι υψηλότερη από ότι για τους άλλους τύπους αεριοποιητών. Όλοι οι αεριοποιητές συμπαρασυρμού απομακρύνουν το μεγαλύτερο μέρος της τέφρας ως εξανθράκωμα επειδή η θερμοκρασία λειτουργίας είναι πολύ μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία σύντηξης της τέφρας. Ένα χαμηλότερο κλάσμα τέφρας παράγεται είτε ως ένα είδος ξηρής ιπτάμενης τέφρας (flying ash) είτε ως ένας μαύρος χρωματισμένος πολτός τέφρας (slurry ash). Τα σωματίδια του καυσίμου πρέπει να είναι πολύ μικρότερα σε σύγκριση με άλλους αεριοποιητές, και αυτό σημαίνει ότι το καύσιμο πρέπει να κονιοποιείται. Μέχρι πρόσφατα το μεγαλύτερο μέρος κατανάλωσης ενέργειας στον συγκεκριμένο τύπο αεριοποίησης, δεν έγκειται στην άλεση του καυσίμου αλλά στην απαιτούμενη παράγωγή οξυγόνου που χρησιμοποιείται στην αεριοποίηση [18].

1.4.2. Αεριοποιητής Ρευστοποιημένης Κλίνης (Fluidized - Bed)



Σχήμα 1.7: Αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης.

Αντίθετα με τους αντιδραστήρες σταθερής κλίνης, τα μοντέλα ρευστοποιημένης κλίνης δεν έχουν ζώνες αντίδρασης και η αεριοποίηση συμβαίνει ταυτόχρονα σε όλο τον αντιδραστήρα. Οι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με την διαμόρφωση και την ταχύτητα του μέσου αεριοποίησης σε bubbling, circulating, spouted και swirling fluidized bed.

Στους αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης ο αέρας και το καύσιμο αναμιγνύονται σε ένα θερμό στρώμα κοκκώδους υλικού (κλίνη) που συνήθως είναι άμμος. Λόγω της ανάμειξης αυτής, οι διαφορές φάσεις που λαμβάνουν χώρα, πυρόλυση, καύση και αεριοποίηση δεν είναι δυνατόν να διαχωριστούν, παρόλα αυτά στην κλίνη επιτυχαίνεται ομοιόμορφη θερμοκρασία. Η θερμοκρασία, επίσης μπορεί να ρυθμιστεί εύκολα με την αλλαγή λόγου αέρα. Το μειονέκτημα είναι ότι το παραγόμενο αέριο περιέχει πάντα πίσσες που θα πρέπει με κάποιο τρόπο να απομακρυνθούν.

Τα πλεονεκτήματα χρήσης αυτού του αντιδραστήρα είναι ο υψηλός συνολικός όγκος παραγόμενου έργου, η βελτιωμένη μεταφορά μάζας και θερμότητας από το καύσιμο, η υψηλή θερμογόνος ικανότητα και τα μειωμένα υπολείμματα άκαυστου άνθρακα. Ένα ακόμη θετικό χαρακτηριστικό είναι ότι η τεφρά του καύσιμου δεν λιώνει και έτσι μπορεί να απομακρυνθεί ευκολότερα [9,19].

1.4.3. Αεριοποιητής Σταθερής Κλίνης (Fixed - Bed)

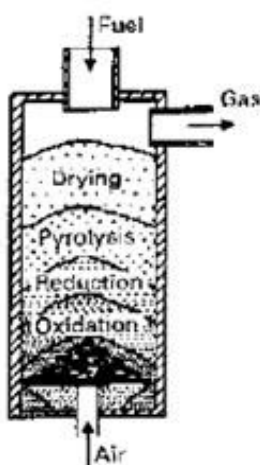
Οι αεριοποιητές σταθερής κλίνης είναι εκείνοι στους οποίους τα στερεά κομμάτια του καύσιμου κινούνται προς ή αντίθετα της ροής του αερίου κατά την διάρκεια της αντίδρασης, και τα στερεά μετατρέπονται σε αέρια.

Οι αεριοποιητές σταθερής κλίνης είναι κατάλληλοι για διεργασίες στερεών καυσίμων, οι οποίες απαιτούν σχετικά στενό έλεγχο της θερμοκρασίας (ειδικά αν είναι μεταβλητή κατά την διαδρομή της αεριοποίησης), μεταφορά των σωματιδίων τέφρας μακριά από την περιοχή της αντίδρασης, απλή λειτουργία και ελάχιστη διάβρωση στο σώμα του αντιδραστήρα [20].

Χωρίζονται στα παρακάτω είδη ανάλογα με το τρόπο εισαγωγής του μέσου αεριοποίησης και τον τρόπο εξαγωγής του αερίου, ενώ η εισαγωγή του καύσιμου γίνεται πάντα από την κορυφή.

1.4.3.1. Ανοδικής Ροής (Updraft)

Το παρακάτω σχήμα δείχνει ότι οι ροές του καύσιμου και του αερίου είναι αντίθετες (counter-current flow) μέσα στον αεριοποιητή ανοδικής ροής.



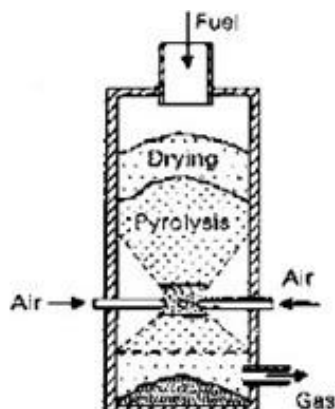
Σχήμα 1.8: Αεριοποιητής ανοδικής ροής.

Αποτελεί έναν από τους πρώτους και πιο απλούς σε χρήση, ευρέως γνωστό αντιδραστήρα. Η περιοχή οξειδωσης υψηλής θερμοκρασίας παρατηρείται στο κάτω μέρος όπου το καύσιμο καίγεται. Το μέσο αεριοποίησης εισάγεται από το κάτω μέρος

και ανεβαίνει προς το πάνω μέρος, καθώς το καύσιμο παρέχεται από την κορυφή και κατεβαίνει προς τον πάτο του αντιδραστήρα. Το καύσιμο κατά την πορεία του περνά από 3 ζώνες (ξήρανση, πυρόλυση, οξειδωση) με προοδευτική αύξηση θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία στην οξειδωση μπορεί να ξεπεράσει τους 1500°C. Η οξειδωση γίνεται στο κάτω μέρος του αεριοποιητή και το καιόμενο αέριο περνά από αυτή τη ζώνη αντιδρώντας με την τέφρα, απελευθερώνοντας την απαραίτητη θερμότητα. Το παραγόμενο αέριο, πίσσες και αλλά σωματίδια φεύγουν από την κορυφή καθώς τα βαριά σωματίδια τέφρας μένουν στον πάτο. Το παραγόμενο αέριο έχει συνήθως θερμοκρασίες μικρότερες των 400°C και γι' αυτό είναι πλούσιο σε υδρογονάνθρακες και σε υψηλή περιεκτικότητα πίσσας. Η πίσσα αυτή περιέχει σχεδόν το 30% της ενέργειας που είχε αρχικά η βιομάζα. Ωστόσο, απαιτείται καθαρισμός και ψύξη για την χρήση του αερίου αυτού σε μηχανή εσωτερικής καύσης. Το αέριο περιέχει περισσότερο μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και λιγότερο μεθάνιο, αιθάνιο και αιθίνιο από αέρια άλλων αεριοποιητών.

Οι αεριοποιητές ανοδικής ροής έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα όπως ευκολία στον σχεδιασμό και την κατασκευή, μικρή θερμοκρασία εξόδου του αερίου, υψηλό ποσοστό καύσης άνθρακα και μεγάλη θερμογόνο ικανότητα. Ωστόσο, οι επικαθίσεις σωματιδίων πίσσας μπορεί να θεωρηθούν κρίσιμες στους αεριοποιητές, ειδικά σε περιπτώσεις αεριοποίησης βιομάζας με υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα όπως τα άχυρα σιτηρών και καλαμποκιού. Άλλο μειονέκτημα αποτελεί η δυσκολία χρήσης αφράτων και χαμηλής πυκνότητας καυσίμων [9].

1.4.3.2. Καθοδικής Ροής (Downdraft)



Σχήμα 1.9: Αεριοποιητής καθοδικής ροής.

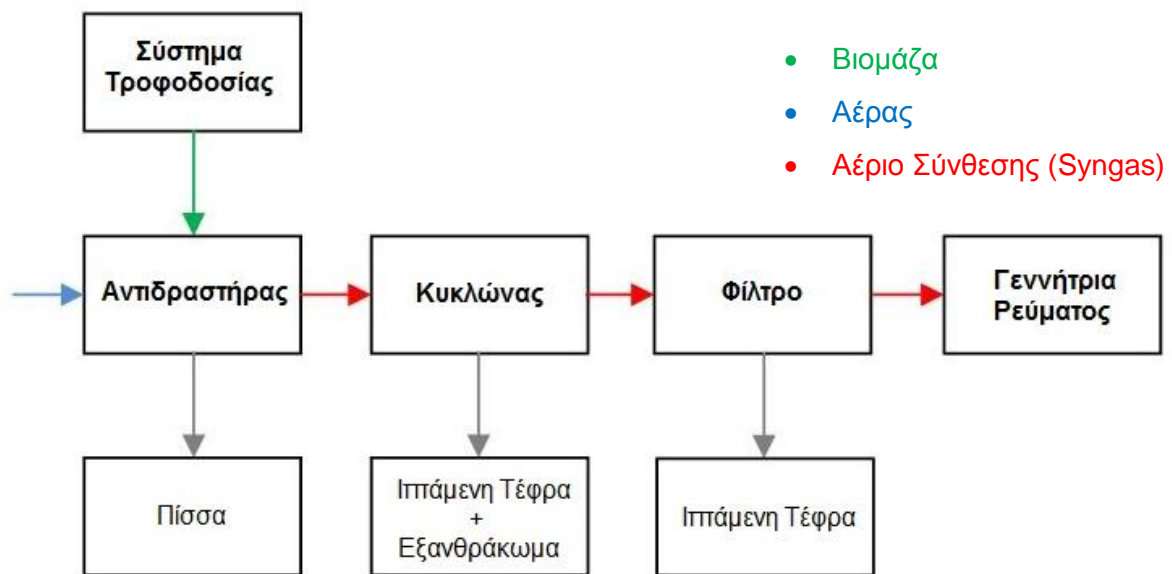
Παρόμοια περίπτωση με τον αεριοποιητή ανοδικής ροής, με την διάφορα το μέσο αεριοποίησης ρέει στην κατεύθυνση της ροής του καύσιμου (co-current flow). Απαιτείται πρόσδοση επιπρόσθετης θερμότητας στο πάνω μέρος της κλίνης είτε κάνοντας καύση σε μικρά κομμάτια στέρεου είτε με χρήση εξωτερικής ενέργειας. Το παραγόμενο αέριο φεύγει με την μέγιστη θερμοκρασία και μέρος της ενέργειας του συνήθως πάει στο μέσο που εισάγεται από την κορυφή. Καθώς όλες οι πίσσες περνούν από το σημείο της καυτής τέφρας, σε αυτή την περίπτωση, τα επίπεδα της πίσσας είναι πιο χαμηλά από εκείνα του αντιδραστήρα ανοδικής ροής.

Το πλεονέκτημα αυτής της κλίνης είναι η ικανότητα παράγωγης αερίου χαμηλής περιεκτικότητας ελαίων και πίσσας, και έτσι απαιτείται λιγότερος καθαρισμός πριν την χρήση του σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης. Ωστόσο, χρειάζεται μια μικρή κλίμακα φιλτραρίσματος. Μολονότι, θεωρείται πιο ευέλικτη κλίνη, το πρόβλημα του slagging την καθιστά ακατάλληλη για καύσιμα πλούσια σε τεφρά όπως τα υπολείμματα καλλιεργειών. Ένα βασικό μειονέκτημα είναι και η αδυναμία να χειριστεί καύσιμα χαμηλής πυκνότητας [9].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η μονάδα αεριοποίησης βιομάζας που μελετήθηκε αποτελείται από διάφορα μέρη, όπως το σύστημα τροφοδοσίας καύσιμου, τον αντιδραστήρα, τα συστήματα καθαρισμού του παραγόμενου αερίου, την μηχανή εσωτερικής καύσης που καίει το παραγόμενο αέριο και κινεί γεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και διάφορα μετρητικά όργανα και εξαρτήματα, συνδεδεμένα όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα, τα οποία θα αναλυθούν λεπτομερώς στην συνέχεια.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής μονάδας αεριοποίησης.

Τα ακόλουθα σχέδια ολόκληρης της μονάδας αποτελούν προσωπική δουλειά στο πρόγραμμα *Autodesk Inventor Professional 2013, Student Version*.

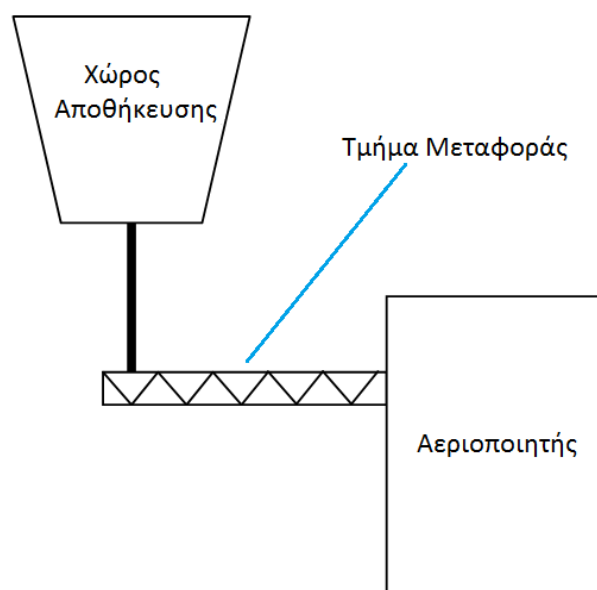
2.1. ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (FUEL FEEDING SYSTEM)

2.1.1. Περιγραφή

Η είσοδος της βιομάζας στον αντιδραστήρα επιτυγχάνεται μέσω συστήματος τροφοδοσίας. Η ιδανική τροφοδοσία του καυσίμου πρέπει να είναι ομαλή, συνεχής και να επιτρέπει τον έλεγχο της παροχής σε κάθε στιγμή. Επίσης, το σύστημα τροφοδοσίας οφείλει να είναι ευαίσθητο σε μικρο-αλλαγές μεγέθους της βιομάζας και να μην επιτρέπει την είσοδο του παραγόμενου αερίου (backflow). Αυτό αντιμετωπίζεται συνήθως με την περαιτέρω είσοδο πεπιεσμένου αέρα ή αζώτου.

Πέρα από την είσοδο του καυσίμου στον αντιδραστήρα, το σύστημα τροφοδοσίας πρέπει να είναι ικανό και για την προετοιμασία του καυσίμου. Πρόκειται δηλαδή για την ξήρανση (drying) και την κοπή (sizing) όλης της βιομάζας σε συγκεκριμένο μέγεθος. Η ξήρανση είναι απαραίτητη για την μείωση της υγρασίας της βιομάζας πριν υποστεί αεριοποίηση, με το ελάχιστο όριο περιεκτικότητας σε υγρασία να είναι 10%. Η προετοιμασία οφείλει να γίνεται σε περίπτωση συνδυασμού διαφόρων ειδών βιομάζας ως καύσιμο, όπου διαφέρουν τα μεγέθη και η περιεκτικότητα σε υγρασία από κομμάτι σε κομμάτι [27].

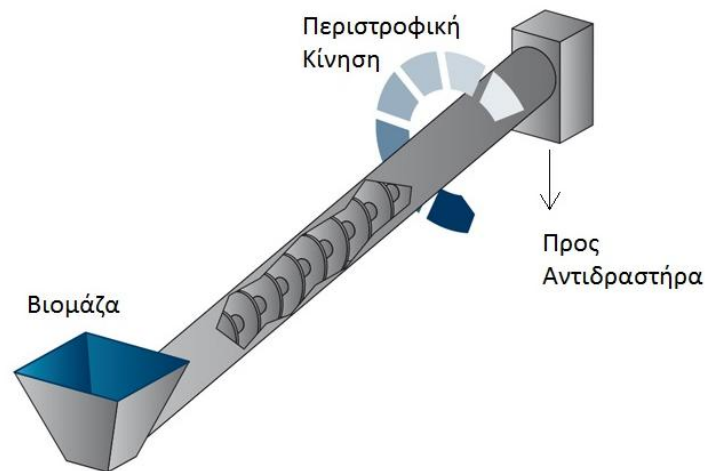
Το σύστημα αποτελείται από δυο μέρη συνήθως, τον χώρο αποθήκευσης καυσίμου και το τμήμα μεταφοράς του καυσίμου στον αντιδραστήρα [27].



Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος τροφοδοσίας.

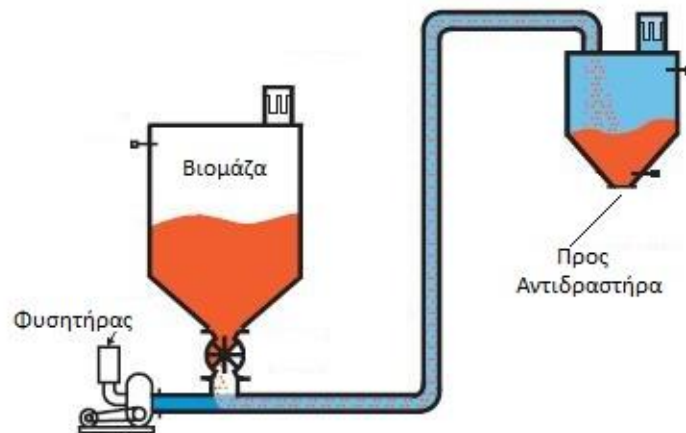
Η μεταφορά του καύσιμου γίνεται με τρεις τεχνικές [27]:

- I. Η πρώτη, και πιο συχνή, είναι μεταφορά με κοχλία (screw conveyance), η οποία είναι αποτελεσματική στις μικρές αποστάσεις, ορίου 6 m. Τα συστήματα κοχλιών έχουν καθιερωθεί για την μεταφορά, και την τροφοδοσία σε λέβητες, στερεής βιομάζας καθώς είναι απλοί στην κατασκευή και την λειτουργία τους, και έχουν χαμηλό κόστος. Ο κινητήρας που κινεί τον κοχλία απαιτεί ελάχιστη ενέργεια.



Σχήμα 2.3: Μεταφορά βιομάζας με κοχλία.

- II. Η δεύτερη τεχνική είναι η πνευματική μεταφορά (pneumatic transport) η οποία είναι αποτελεσματική στην μεταφορά βιομάζας, μεγάλων αποστάσεων. Έχει σχετικά χαμηλό κόστος αλλά απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας για την κίνηση του φουσητήρα αέρα υψηλής πίεσης.



Σχήμα 2.4: Πνευματική μεταφορά βιομάζας.

- III. Η τρίτη τεχνική είναι η μεταφορά με ιμάντα (belt conveyance) η οποία είναι ιδανική για μεταφορά βιομάζας ακανόνιστου σχήματος και μεγέθους. Έχει, όπως και η μεταφορά με κοχλία, χαμηλό κόστος και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χρησιμοποιείται για μικρές αποστάσεις.



Σχήμα 2.5: Μεταφορά βιομάζας με ιμάντα.

Οι μέθοδοι τροφοδοσίας καύσιμου ποικίλουν, από την πιο απλή ως την πιο σύνθετη, ανάλογα τα χαρακτηριστικά του καύσιμου και τον τύπο του αεριοποιητή.

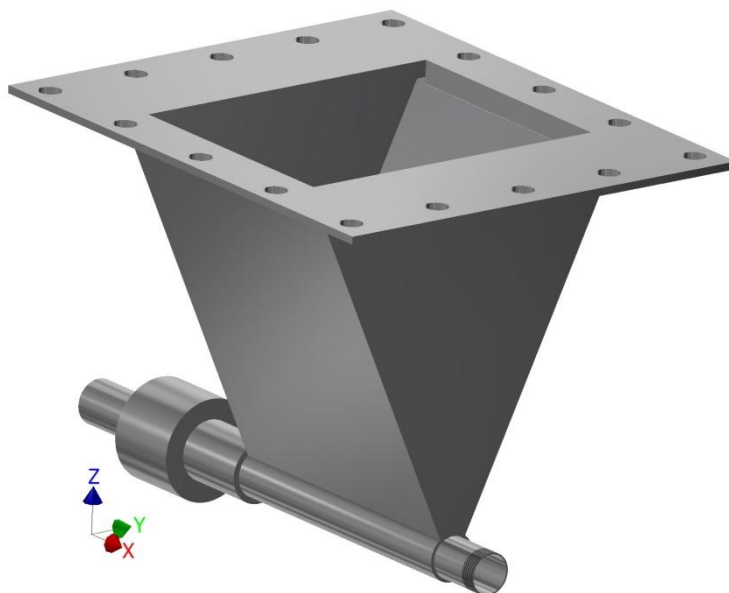
Για την σωστή λειτουργία του συστήματος τροφοδοσίας, ο χειρίστης οφείλει να κάνει έλεγχο θερμοκρασίας και πίεσης κατά την γραμμή μεταφοράς. Αυτό γίνεται ώστε να ανιχνεύονται προβλήματα όπως φράξιμο της γραμμής, λόγω πχ υψηλής υγρασίας της βιομάζας ή αεριοποίηση της βιομάζας πριν εισέλθει στον αντιδραστήρα, λόγω υψηλής θερμοκρασίας [27].

2.1.2. Σχεδιασμός

Ο σχεδιασμός του συστήματος τροφοδοσίας καύσιμου δεν βασίστηκε σε κάποιο μαθηματικό μοντέλο, ωστόσο παραδείγματα ετοιμών τμημάτων βοήθησαν στον σχεδιασμό αλλά και στην αποφυγή λαθών κατά την διαστασιολόγηση.

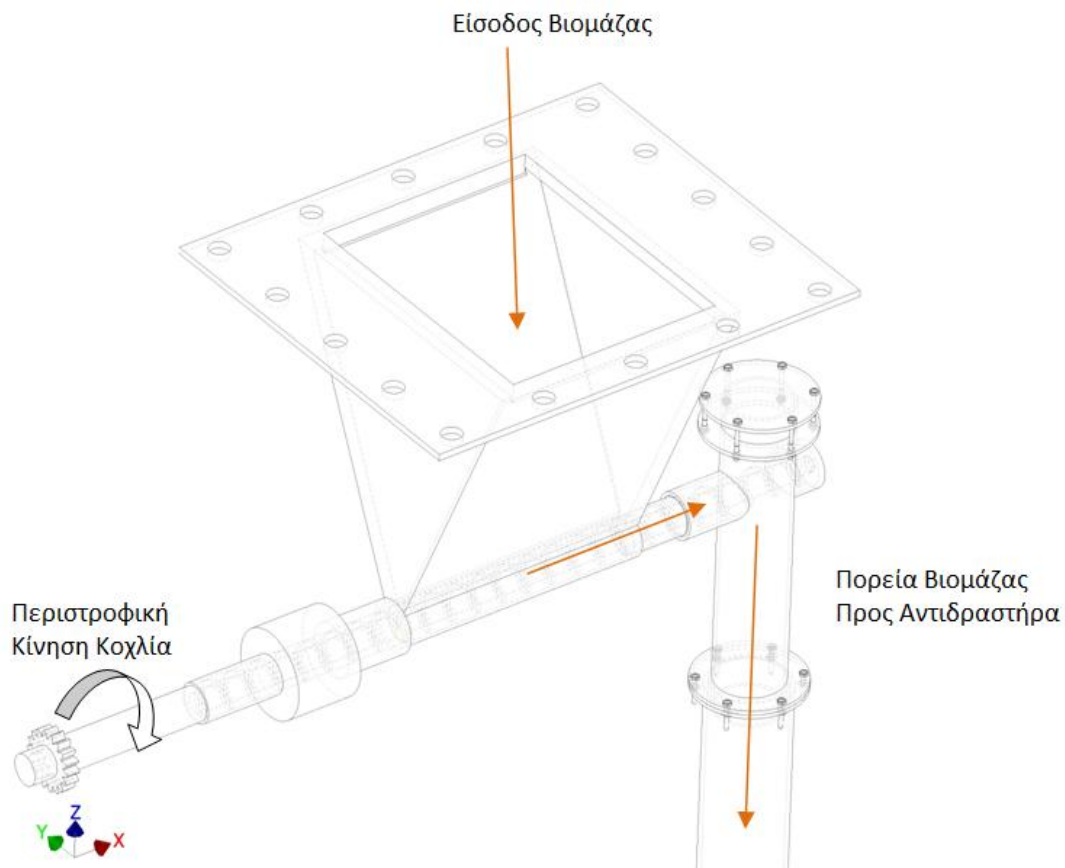
Ως μεταβλητές εισόδου (inputs) θεωρηθήκαν η παροχή μάζας του καυσίμου προς τον αντιδραστήρα, που παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο, και τα χαρακτηριστικά του καύσιμου. Στην προκείμενη περίπτωση είχαμε ως καύσιμο πελλέτες ξύλου (wood pellets) σταθερού μεγέθους, πυκνότητας και υγρασίας.

Το σύστημα τροφοδοσίας βιομάζας πρόεκυψε μελετώντας την εγκατάσταση ρευστοποιημένης κλίνης του Κ.Α.Π.Ε. [28]. Αποτελείται λοιπόν από ένα σιλό (χοάνη), τριγωνικού σχήματος, τοποθετημένο καθ' ύψος του αεριοποιητή. Το σύστημα λειτουργεί με την μέθοδο κοχλία, εσωτερικά του σιλό, για την μεταφορά της βιομάζας στον αντιδραστήρα. Το σύστημα αυτό περιέχει επίσης τις απαραίτητες σωληνώσεις και συνδέσεις, ώστε να λειτουργεί ικανοποιητικά, να προσφέρει στεγανότητα και σωστή στήριξη, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.6**.



Σχήμα 2.6: Τρισδιάστατη απεικόνιση του σιλό.

Η πορεία του καυσίμου φαίνεται στο **Σχήμα 2.7**:

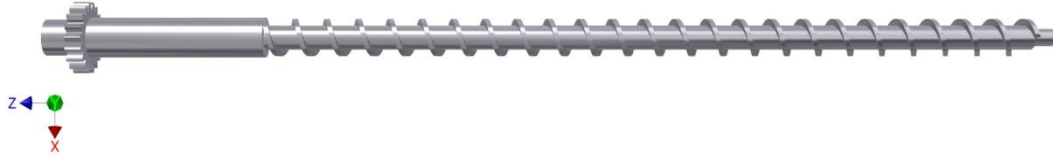


Σχήμα 2.7: Wireframe του συστήματος τροφοδοσίας.

Ο συνολικός όγκος του σιλό υπολογίστηκε στα 0,007 m³, ικανό να χωρέσει περίπου 4,5 kg καυσίμου. Το υλικό που επιλέχτηκε ήταν λαμαρίνα θερμής έλασης (γαλβανιζέ), πάχους 5 - 10 mm.

Ο κοχλίας σχεδιάστηκε ειδικά για τον συγκεκριμένο τύπο του καύσιμου, ικανός να προσφέρει την απαιτούμενη παροχή, ρυθμίζοντας τις στροφές τού. Ο σχεδιασμός του κοχλία πρόεκυψε από τις διαστάσεις του σιλό.

Πρόκειται δηλαδή, για έναν κοχλία μήκους 636 mm, διαμέτρου 23,5 mm και βήματος 20 mm, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.8**.



Σχήμα 2.8: Τρισδιάστατη απεικόνιση του κοχλία.

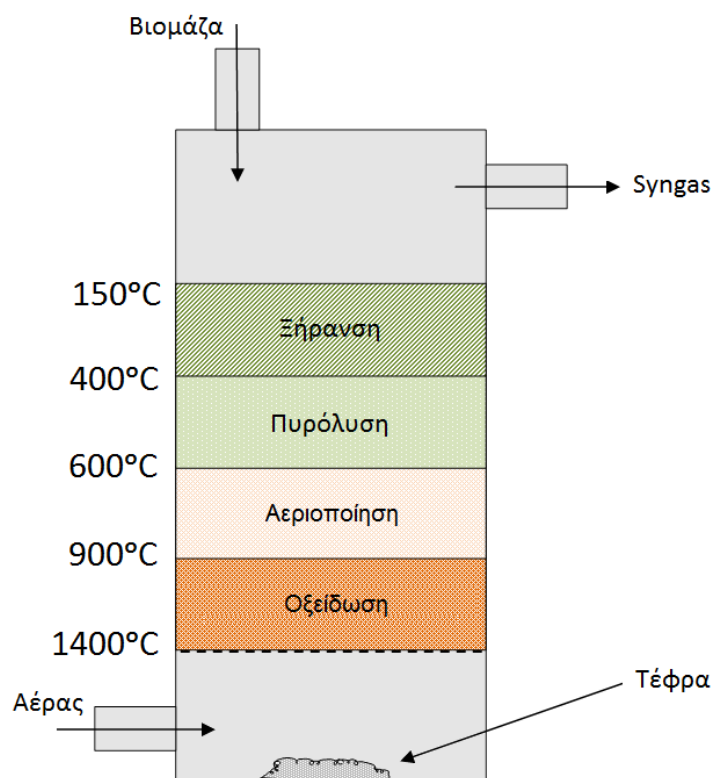
Για την κίνηση του κοχλία τοποθετήθηκε σύγχρονος κινητήρας 1 HP, με ηλεκτρονική οδήγηση που καθιστά δυνατή την ρύθμιση των στροφών λειτουργίας. Η σύνδεση του με τον άξονα του κοχλία γίνεται μέσω ενός μειωτήρα στροφών και ενός ελαστικού συνδέσμου (κοπλερ).

Τα σχέδια με τις βασικές διαστάσεις του σιλό και του κοχλία παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

2.2. ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ (GASIFIER)

2.2.1. Περιγραφή

Ο αντιδραστήρας αποτελεί το κύριο μέρος της εγκατάστασης και είναι εκείνο που συνδέει όλα τα υπόλοιπα μέρη. Ο αντιδραστήρας είναι ένας αεριοποιητής σταθερής κλίνης, ανοδικής ροής (updraft, fixed-bed gasifier) και έχει κυλινδρικό σχήμα. Στο εσωτερικό του λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αεριοποίησης της βιομάζας σε υψηλές θερμοκρασίες. Στον αντιδραστήρα εισέρχεται το καύσιμο (βιομάζα) και το μέσο (αέρας) και εξέρχεται το παραγόμενο αέριο (syngas). Η λειτουργία του αντιδραστήρα έχει αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 2.9: Ζώνες αεριοποίησης σε αντιδραστήρα ανοδικής ροής.

2.2.2. Σχεδιασμός

Εδώ παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό βασικών διαστάσεων και παραγόντων εισαγωγής (input) που επηρεάζουν τον αντιδραστήρα και την διαδικασία της αεριοποίησης. Σκοπός της μελέτης αυτής δεν ήταν η κατασκευή ενός τέλει αεριοποιητή αλλά η παράγωγη ενός αξιόλογου, από άποψη θερμογόνου ικανότητας, αερίου σύνθεσης (syngas). Βάσει αυτής της θεώρησης η κατασκευή του αεριοποιητή οφείλει να έχει απλό σχεδιασμό, να είναι εύκολη στην χρήση και να αποδίδει τουλάχιστον έργο 10 kW. Το μέγεθος αυτό επιλέχθηκε ώστε να είναι αρκετά μεγάλο για παραγωγή αξιόλογου αερίου και αρκετά μικρό για να κατασκευαστεί και να δοκιμαστεί μέσα στο εργαστήριο. Λαμβάνοντας υπόψη αυτήν την ενέργεια εξόδου (thermal output) και τα χαρακτηριστικά του καυσίμου του **Πίνακα 2.1**, έγιναν οι εξής υπολογισμοί.

Παροχή καύσιμου

Για τις δόκιμες αεριοποίησης χρησιμοποιήθηκαν, ως καύσιμο, πελλέτες ξύλου (wood pellets). Η επιλογή αυτή βασίζεται στην χαμηλή παράγωγη τέφρας αλλά και στην ευκολία αναζήτησης τους στο εμπόριο. Δυο παράγοντες χαρακτηρίζουν το καύσιμο και αυτοί είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία και η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα, στην προκειμένη περίπτωση η υγρασία είναι μικρότερη του 10% και η θερμογόνος ικανότητα περίπου 18 MJ/kg [21].

Πίνακας 2.1: Φυσικά και θερμικά χαρακτηριστικά του καύσιμου [21].

Τύπος (Type)	Πελλέτα Ξύλου
Μορφή (Shape)	Κυλινδρική
Διάμετρος (Diameter)	6 - 8 mm
Μήκος (Length)	3 - 40 mm
Πυκνότητα (Absolute Density)	1000 kg/m ³
Φαινομενική Πυκνότητα (Bulk Density)	650 kg/m ³
Ειδικός Βαθμός Αεριοποίησης (SGR)	110 - 210 kg/h m ²
Υγρασία (Moisture)	< 10 %
Πτητικά (Volatile Matter)	74-78 %
Τέφρα (Ash)	< 0,7 %
Άνθρακας (Fixed Carbon)	< 20 %
Θερμογόνος Ικανότητα (Lower Heating Value)	16 - 19 MJ/kg



Σχήμα 2.10: Πελλέτες ξύλου [23].

Υπολογισμός παροχής:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Q_n}{LHV_{fuel}}$$

Όπου:

- \dot{m}_{fuel} : Η παροχή του καύσιμου, σε kg/s.
- Q_n : Η τιμή του ζητούμενου έργου, σε W.
- LHV_{fuel} : Η θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου, σε MJ/kg

Οπότε, για την παράγωγη του ζητούμενου έργου, προέκυψε από την παραπάνω εξίσωση [22] παροχή καυσίμου ίση με 0,0013 kg/s ή 4,62 kg/h.

Συνοπτικά, βάσει της στοιχειομετρίας της αεριοποίησης, 1 kg βιομάζας απαιτεί περίπου 1,6 kg αέρα (βλ. Παράρτημα 2). Δηλαδή, για την αεριοποίηση 4,62 kg καύσιμου, απαιτούνται 7,38 kg (ή 6,13 m³) αέρα.

Τέλος, η παροχή του παραγόμενου αερίου θα είναι το άθροισμα των παροχών εισόδου. Δηλαδή, το παραγόμενο αέριο θα έχει παροχή 12 kg (ή 12,64 m³).

Κύριες διαστάσεις αντιδραστήρα

Πρόκειται για την διάμετρο και το ύψος του κυλίνδρου όπου πραγματοποιείται η διαδικασία της αεριοποίησης. Ο υπολογισμός έγινε με τις παρακάτω εξισώσεις [22], λαμβάνοντας υπόψη κάποιες σταθερές που αφορούν στο καύσιμο όπως την πυκνότητα (ρ), τον ειδικό βαθμό αεριοποίησης (SGR), την παροχή καυσίμου (\dot{m}_{fuel}) που υπολογίστηκε προηγουμένως, και θεωρώντας ένα χρόνο παραμονής καυσίμου (fuel residence time) T ανάμεσα στις 2 ÷ 3 h (ή 10800 ÷ 14400 sec). Εφόσον το ύψος του αντιδραστήρα είναι αλληλένδετο με τον χρόνο παραμονής του καυσίμου, είναι σημαντικό το ύψος να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να πραγματοποιείται αποτελεσματικά η αεριοποίηση βιομάζας (βλ. Παράρτημα 3).

Υπολογισμός διαστάσεων:

$$D = \left(\frac{1.27 \cdot \dot{m}_{fuel}}{SGR} \right)^{0.5}$$

Όπου:

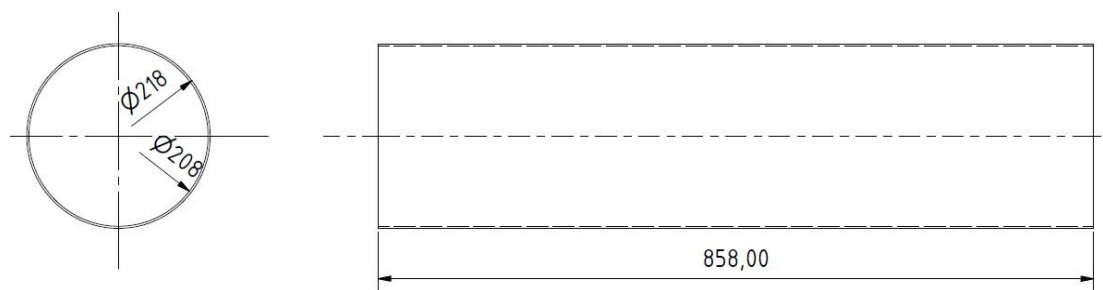
- D : Η διάμετρος του αντιδραστήρα, σε m.
- \dot{m}_{fuel} : Η παροχή του καυσίμου, σε kg/s.
- SGR : Ο ειδικός βαθμός αεριοποίησης καυσίμου, σε kg/sec m².

$$H = \frac{SGR \cdot T}{\rho_{fuel}}$$

Όπου:

- H : Το ύψος του αντιδραστήρα, σε m.
- SGR : Ο ειδικός βαθμός αεριοποίησης καύσιμου, σε kg/sec m².
- T : Ο χρόνος παραμονής του καύσιμου, σε sec.
- ρ_{fuel} : Η φαινομενική πυκνότητα του καύσιμου, σε kg/m³.

Τελικά, προκύπτει ο κύλινδρος με εσωτερική διάμετρο $D=208$ mm και ύψος $H=858$ mm όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχέδιο.

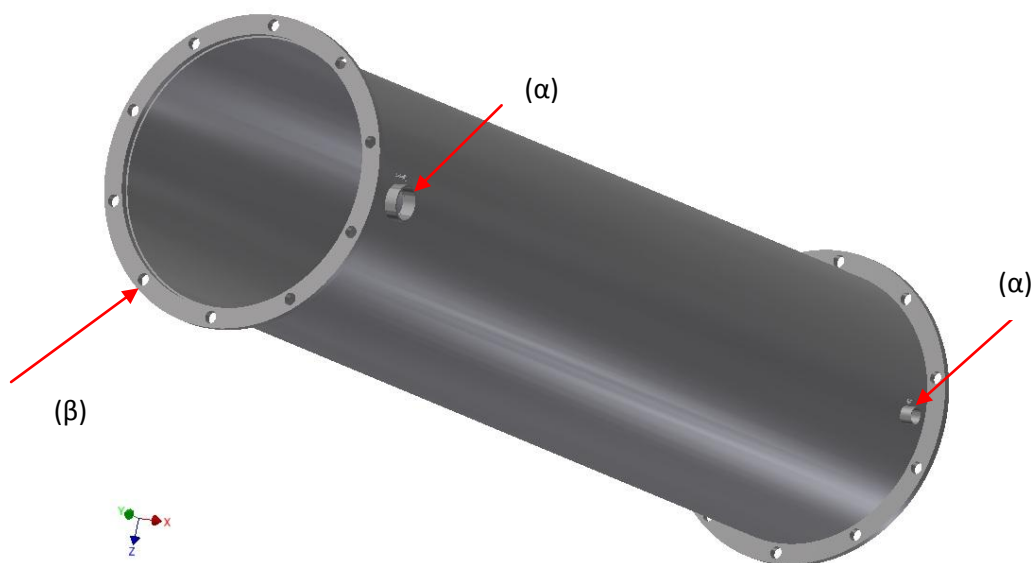


Σχήμα 2.11: Πρόοψη και κάτοψη του κυλίνδρου (διαστάσεις σε mm).

Για το υλικό κατασκευής του αεριοποιητή προτείνεται ανοξειδωτος χάλυβας τύπου PK10 (Steel Mat.No. 1.4762, DIN X10CrAl24, AISI 446) [24], ελάχιστου πάχους 2 mm [26]. Στην κατασκευή αυτήν, για το υλικό του κυλίνδρου επιλέχτηκε ανοξειδωτος χάλυβας τύπου PK333 (Steel Mat.No. 1.4005, DIN X12CrS13, AISI 416) [25] με πάχος 10 mm, ο οποίος έχει αντοχή σε συνεχόμενες θερμοκρασίες τάξεως 1200°C και οδηγεί σε μικρή αύξηση της πίεσης.

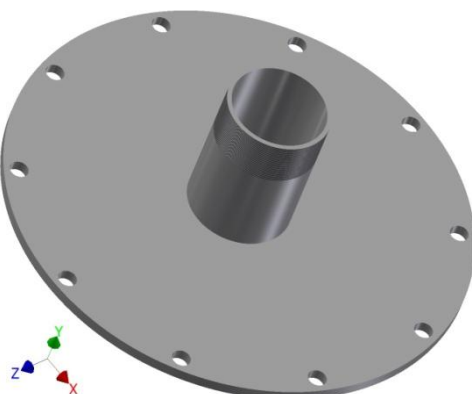
Στην συνέχεια έγινε ο σχεδιασμός και των υπολοίπων κομματιών και εξαρτημάτων που απαρτίζουν τον αεριοποιητή. Έτσι, για την ολοκλήρωση του συστήματος απαιτήθηκαν οι παρακάτω ενέργειες και κατασκευές:

- I. Στο κυρίως σώμα, δηλαδή στον κύλινδρο, έγιναν δυο εγκάρσιες οπές διαμέτρου 0,5 in και 1 in , ώστε να συγκολληθούν σωλήνες για την είσοδο του αέρα και την έξοδο του αερίου αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.12**.
- II. Ακόμα, τοποθετήθηκαν δυο όμοια στεφάνια, στο πάνω και στο κάτω μέρος, για το κλείσιμο και την στεγανότητα του κυλίνδρου με τοποθέτηση φλάντζας. Τα στεφάνια είναι εξωτερικής διαμέτρου 250 mm, εσωτερικής διαμέτρου 218 mm, φέρουν κυκλικά δέκα κυκλικές οπές των 10 mm για κοχλίες σύσφιξης, και έχουν πάχος 6 mm, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.12**.



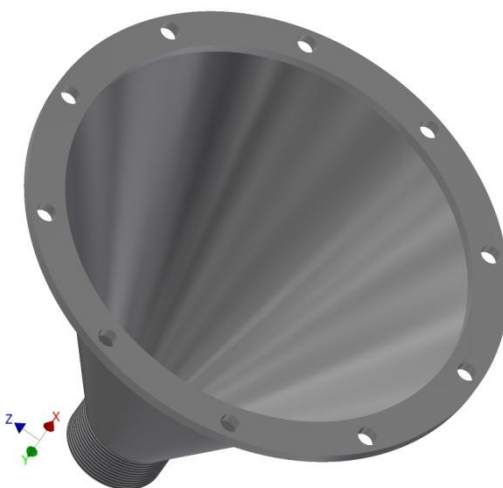
Σχήμα 2.12: Τρισδιάστατη απεικόνιση του κυλίνδρου, (α) οπές εισόδου - εξόδου και (β) στεφάνι.

- III. Η κορυφή του αντιδραστήρα έκλεισε με την τοποθέτηση φλάντζας πάχους 6 mm και εξωτερικής διαμέτρου 250 mm. Στο κέντρο αυτής πραγματοποιήθηκε οπή και συγκολλήθηκε σωληνομαστός διαμέτρου 2 in, για την τροφοδοσία του καύσιμου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.13**.



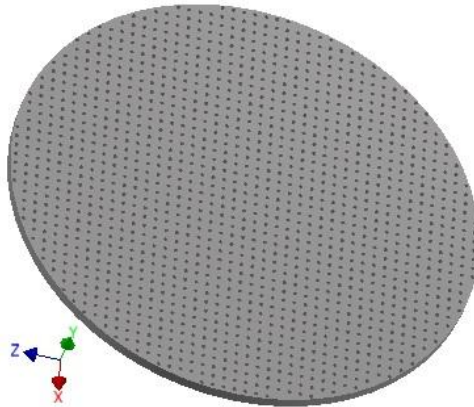
Σχήμα 2.13: Τρισδιάστατη απεικόνιση της φλάντζας (πάνω μέρος).

- IV. Το κάτω μέρος του αντιδραστήρα έκλεισε με την τοποθέτηση φλαντζοτού κωνικού τμήματος πάχους 6 mm, από διάμετρο 212 mm σε διάμετρο 50,8 mm (2 in) και βάθους 165 mm, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.14**. Αυτό το κομμάτι έχει ως στόχο την συγκράτηση όλης της στερεής τέφρας που παράγεται κατά την αεριοποίηση και την εύκολη απομάκρυνση της κατά τον καθαρισμό.



Σχήμα 2.14: Τρισδιάστατη απεικόνιση της φλάντζας (κάτω μέρος).

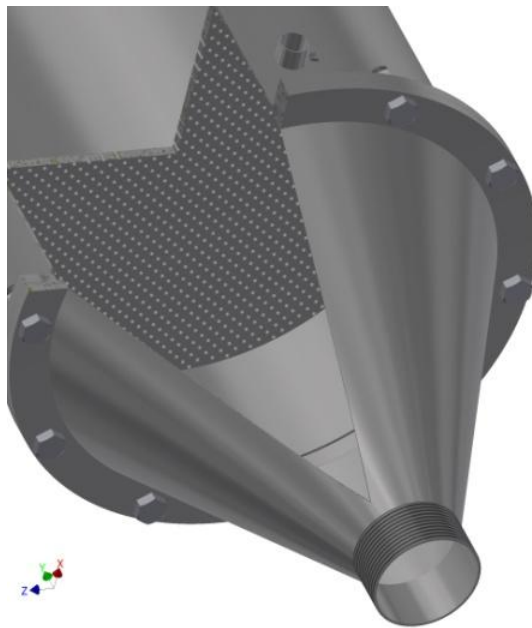
- V. Σε ύψος 150 mm από τον πάτο και εσωτερικά, τοποθετήθηκε πάνω σε ειδική βάση, η σταθερή εσχάρα (grate) διαμέτρου 208 mm, πάχους 6 mm και οπών 2 mm, , όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.15**.



Σχήμα 2.15 Τρισδιάστατη απεικόνιση της εσχάρας.

Για όλα τα κομμάτια που προαναφέρθηκαν επιλέχτηκε ως υλικό ανοξείδωτος χάλυβας τύπου PK333.

Τελικά, κατά την συναρμολόγηση όλων των παραπάνω κομματιών (components) και την χρήση κοχλιών για την σύσφιξη τους (fasteners), πρόεκυψαν τα εξής αποτελέσματα:



Σχήμα 2.16: Τρισδιάστατη απεικόνιση του ολοκληρωμένου αντιδραστήρα, κάτω όψη σε τομή 3/4.



Σχήμα 2.17: Τρισδιάστατη απεικόνιση του ολοκληρωμένου αντιδραστήρα.

Τα σχέδια με τις βασικές διαστάσεις του αντιδραστήρα και όλων των υποσυστημάτων που τον απαρτίζουν παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

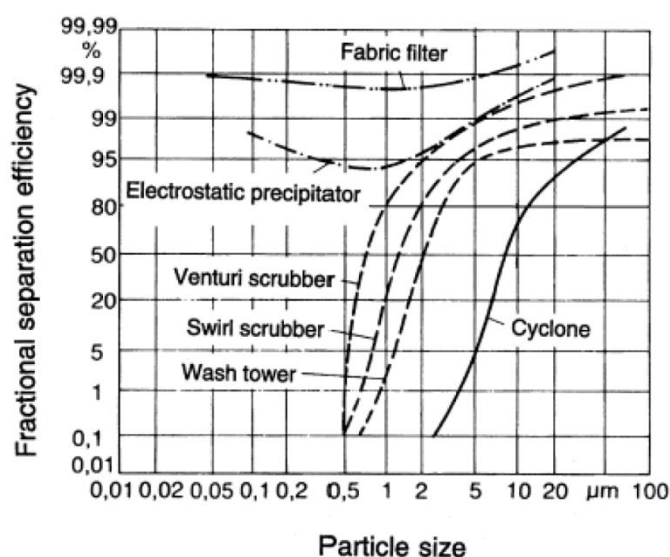
2.3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΑΕΡΙΟΥ (GAS CLEANING SYSTEM)

2.3.1. Περιγραφή

Το αέριο σύνθεσης (syngas), όπως έχει ήδη επεξηγηθεί, παράγεται κυρίως για τις ενώσεις υδρογόνου (H_2) και μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Όμως πέρα από αυτά τα συστατικά περιέχει και ανεπιθύμητες ενώσεις, μερικές από αυτές να καθίστανται επικίνδυνες για την εγκατάσταση και βλαβερές για τον άνθρωπο. Τα συστατικά αυτά του αερίου είναι κυρίως [29-32]:

- **Σωματίδια.** Σωματίδια πίσσας (tar) και εξανθρακώματα (char), μεγέθους 0,1 - 100 μm , που υπάρχουν μέσα στο αέριο και προκαλούν διάβρωση.
- **Πίσσες.** Πρόκειται για μίγματα συνθετών οργανικών ενώσεων, κυρίως αρωματικής φύσης, μεγάλου μοριακού βάρους, οι οποίες όταν το αέριο βρίσκεται σε θερμοκρασία κάτω των $400^\circ C$, αρχίζουν να στερεοποιούνται σχηματίζοντας μίγματα αερολυμάτων (aerosol mixtures), που διαχωρίζονται πολύ δύσκολα στην συνεχεία.
- **Αλκάλια Μέταλλα.** Στις υψηλές θερμοκρασίες παράγονται στο αέριο ενώσεις νατρίου (Na) και καλίου (K).
- **Αζωτούχες ενώσεις.** Το άζωτο στο περιβάλλον της αεριοποίησης ενδέχεται να παράγει αμμωνία (NH_3) και υδροκυάνιο (HCN), τα οποία προκαλούν αύξηση των εκπομπών νιτρικών οξειδίων (NO_x).
- **Θειούχες και Χλωριούχες ενώσεις.** Πρόκειται συνήθως για υδρόθειο (H_2S), καρβονυλοσουλφίδιο (COS) και υδροχλώριο (HCl).

Ο καθαρισμός του αερίου είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι για κάθε μικρή μονάδα αεριοποίησης βιομάζας. Έντονη προσοχή πρέπει να δίνεται στους ρυπαντές (contaminants) και ιδιαίτερα στα δηλητηριώδη όξινα συστατικά (H_2S , HCN , NH_3 , άλατα που περιέχουν μέταλλα, οργανικά αλογόνα, θειούχες και νιτρικές ενώσεις, ενώσεις που περιέχουν πυρίτιο, καθώς και διάφορα έλαια) αλλά και στα στερεά συστατικά που περιέχονται στο αέριο, τα όποια πρέπει να συγκρατούνται σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Το ακόλουθο διάγραμμα δείχνει τεχνικές που συνδυάζονται για τον αποτελεσματικό καθαρισμό του αερίου σύνθεσης [19].

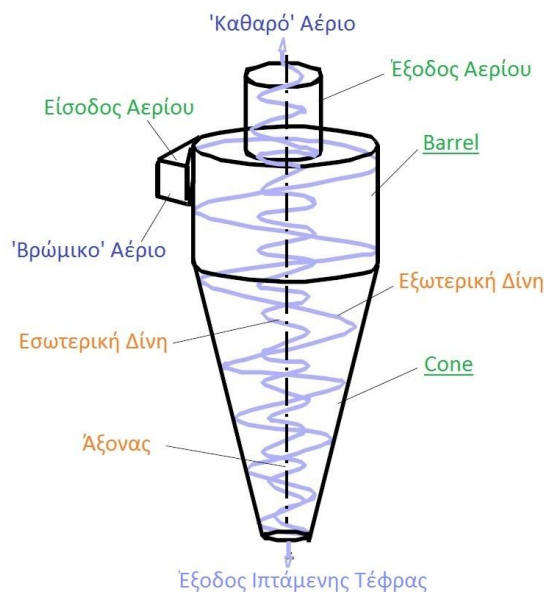


Σχήμα 2.18: Διάγραμμα αποδοτικότητας συλλογής σωματιδίων διαφόρων συστημάτων καθαρισμού [35].

Η παράγωγή πίσσας μαζί με το αέριο σύνθεσης είναι το κύριο πρόβλημα κατά την διαδικασία της αεριοποίησης. Η μεγάλη συγκέντρωση συστατικών πίσσας έχει ως αποτέλεσμα το φράξιμο και την δυσλειτουργία τμημάτων της μονάδας [34]. Ο διαχωρισμός των πηκτών από το αέριο μπορεί να επιτευχθεί με τους παρακάτω τρόπους:

2.3.1.1. Κυκλώνας (Cyclone)

Οι διαχωριστές αυτοί παρέχουν μια απλή μέθοδο για την απομάκρυνση των μεγάλων και βαρέων σωματιδίων, που περιέχονται στα αέρια, με χαμηλό κόστος και ελάχιστη συντήρηση. Γενικά, ο κυκλώνας αποτελείται άνω από ένα κυλινδρικό τμήμα, που αναφέρεται και ως κάννη (barrel) και κάτω από ένα κωνικό τμήμα, που αναφέρεται και ως κώνος (cone) [36].

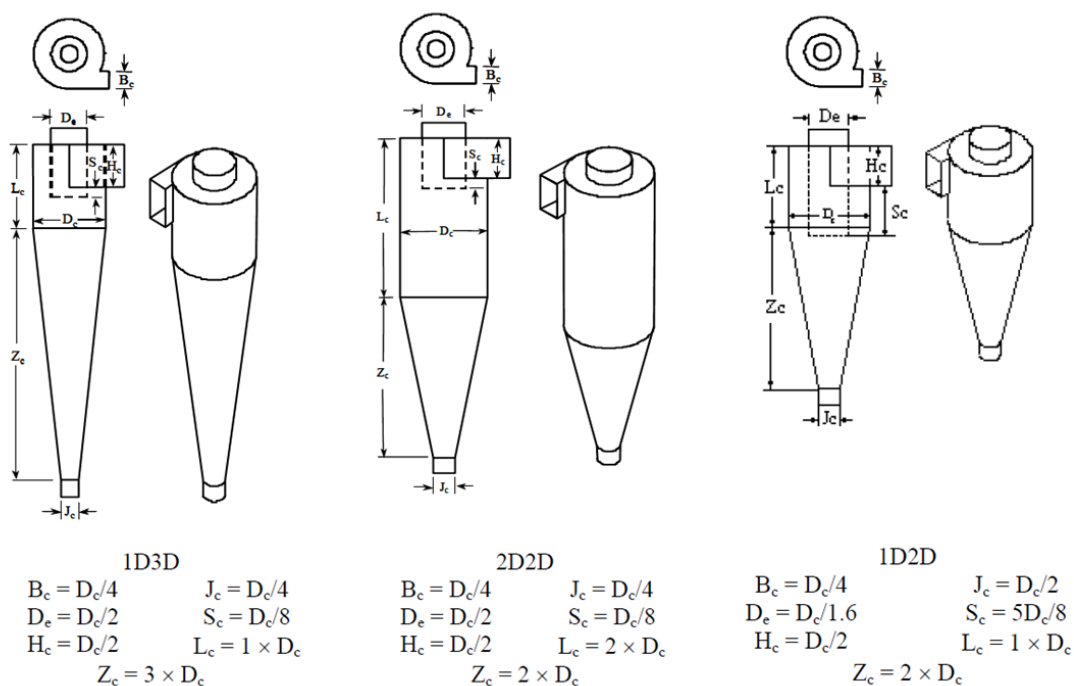


Σχήμα 2.19: Μέρη και λειτουργία κυκλώνα.

Η λειτουργία του έχει ως εξής, ρεύμα παραγόμενου αερίου εισέρχεται εφαπτομενικά στο πάνω τμήμα του κυλίνδρου και κινείται προς τα κάτω, σχηματίζοντας εξωτερική δίνη στο εσωτερικό του κώνου. Η αύξηση της ταχύτητας μέσα στην δίνη έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό φυγόκεντρης δύναμης στα σωματίδια, ξεχωρίζοντας τα από το ρεύμα του αερίου. Όταν το αέριο φτάσει στον πυθμένα του κώνου, δημιουργείται εσωτερική δίνη, αντιστρέφοντας την κατεύθυνση του ρεύματος και οδηγώντας το στην έξοδο από το άνω μέρος, ως καθαρό πλέον αέριο. Τα σωματίδια αντιθέτως οδηγούνται στον θάλαμο συλλογής τέφρας, που είναι συνδεδεμένος στο κάτω μέρος του κυκλώνα [36].

Η αποδοτικότητα των κυκλώνων στον διαχωρισμό σωματιδίων φτάνει το 95%. Αν και οι κυκλώνες γενικά μπορούν να εργάζονται σε υψηλές θερμοκρασίες, εμφανίζονται συχνά προβλήματα σε θερμοκρασίες άνω των 450°C. Στις εφαρμογές της γεωργικής βιομηχανίας, χρησιμοποιούνται κυρίως τρεις τύποι σχεδίων κυκλώνα για την

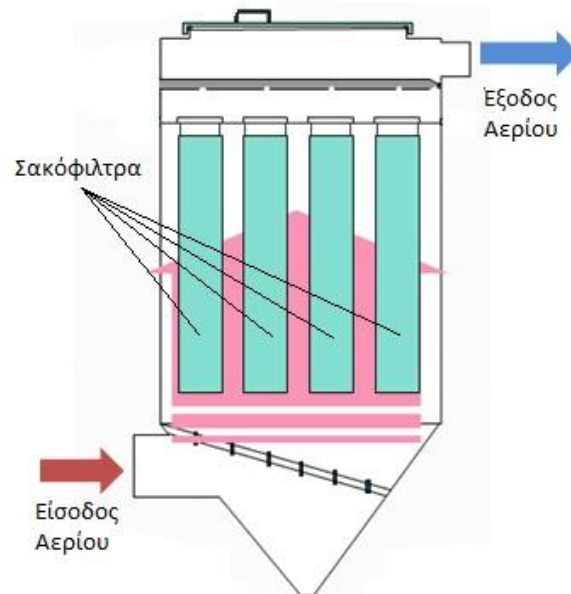
απομάκρυνση σωματιδίων, οι 1D2D, 1D3D και 2D2D. Οι τύποι αυτοί διαφέρουν στις διαστάσεις τους, ανάλογα με την αποδοτικότητα που έχουν στην συλλογή τέφρας, μικρών ή μεγάλων διαστάσεων. Το D αναφέρεται στην διάμετρο του κυλινδρικού τμήματος και οι αριθμοί που προηγούνται των D, αναφέρονται στο ύψος του κυλίνδρου και του κώνου αντίστοιχα. Παραδείγματος χάρη, αν το σχέδιο 1D3D έχει διάμετρο κυλίνδρου x, τότε έχει ύψος κυλίνδρου x και ύψος κώνου 3x. Παρακάτω παρουσιάζονται σχέδια και διαστάσεις των τριών αυτών τύπων κυκλώνων [36].



Σχήμα 2.20: Τύποι και διαστάσεις κυκλώνων [36].

2.3.1.2. Υφασμάτινα Φίλτρα (Fabric Filters)

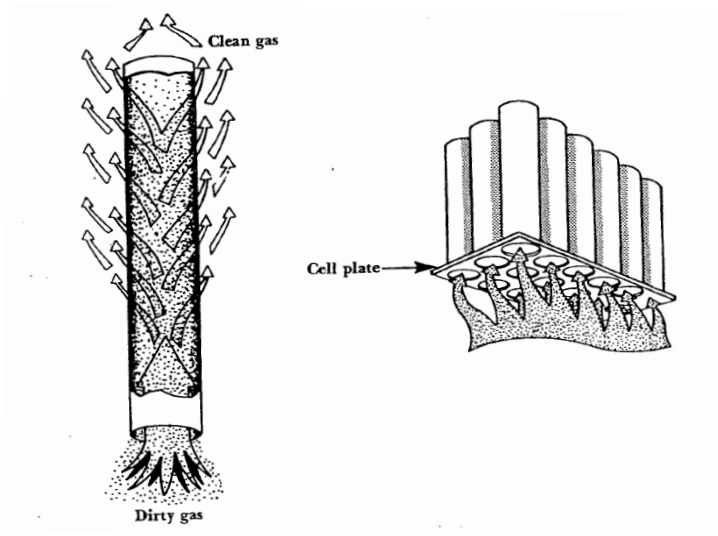
Τα συστήματα υφασμάτινων φίλτρων ή σακόφιλτρα (baghouses) απομακρύνουν τα σωματίδια από το αέριο ρεύμα μέσω ενός πορώδους υφάσματος. Τα συστήματα αυτά συχνά αναφέρονται και ως «σακόφιλτρα» (baghouses), επειδή το ύφασμα διαμορφώνεται σε κυλινδρικούς σάκους εγκατεστημένους σε ειδική κατασκευή [40].



Σχήμα 2.21: Σύστημα υφασμάτινων φίλτρων [40].

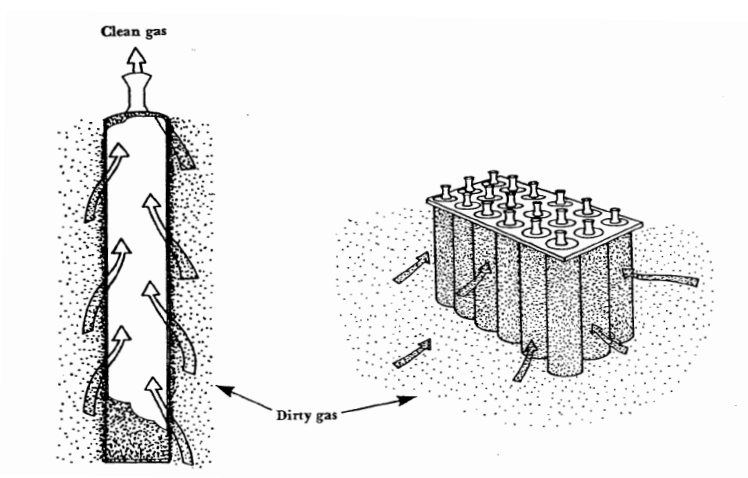
Το αέριο εισέρχεται στο κάτω μέρος της συσκευής και ρέει προς το πάνω μέρος. Τα μεγάλα σωματίδια απομακρύνονται από την ροή και κατακάθονται στην χοάνη. Τα μικρότερα σωματίδια συγκρατούνται από τους κυλινδρικούς σάκους με δυο τρόπους [37]:

- Εσωτερικά του σάκου.



Σχήμα 2.22: Συλλογή σωματιδίων εσωτερικά [37].

- Εξωτερικά του σάκου.



Σχήμα 2.23: Συλλογή σωματιδίων εξωτερικά [37].

Όταν το πάχος της σκόνης στους συλλέκτες φτάσει ένα ορισμένο επίπεδο, όπου η ροή αερίου είναι περιορισμένη (πτώση πίεσης), τότε επιβάλλεται καθαρισμός των φίλτρων. Ο καθαρισμός μπορεί να γίνει κατά την λειτουργία (online) ή μεμονωμένα (offline).

Τα κυριότερα είδη σακόφιλτρων είναι [40]:

- Με ρεύμα αέρα αντίθετης ροής (reverse flow).
- Με μηχανική δόνηση (shaker).
- Με αέρα υπό πίεση (pulse jet).

Η χρήση του συστήματος αυτού προσφέρει υψηλές αποδόσεις μέχρι και 99%, ακόμη και για τα μικρά σωματίδια. Ακόμα, υπάρχει δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλων ογκομετρικών παροχών αέριων και απαίτηση για χαμηλές πτώσεις πίεσης. Ωστόσο, επειδή αποτελούνται από πολλά είδη, τα όποια συναρμολογούνται στην μονάδα, απαιτείται μεγάλη επιφάνεια για την έδραση της συσκευής. Επιπροσθέτως, οι υψηλές θερμοκρασίες, η υγρασία και οι διάφοροι τύποι ρύπων προκαλούν διάβρωση στα υφάσματα και η λειτουργία τους παύει να είναι ικανοποιητική [37,40].

2.3.1.3. Σύστημα Υγρού Καθαρισμού (Wet scrubber)

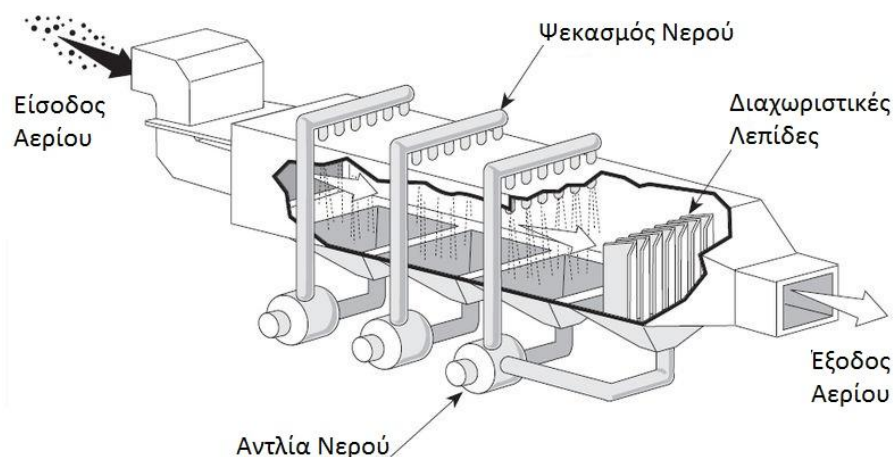
Πρόκειται για έναν από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους καθαρισμού αερίου με ποσοστό κοντά στο 99%. Ανάλογα με τον σχεδιασμό της εγκατάστασης, η διαδικασία του καθαρισμού γίνεται με δυο τρόπους. Ο πιο συχνός είναι ο ψεκασμός του υγρού μέσου (συνήθως νερό) στο αέριο. Με αυτό τον τρόπο τα βαρέα σωματίδια και οι πίσσες κολλούν στα μόρια του νερού και απομακρύνονται τελικά από το αέριο. Ο άλλος τρόπος αναγκάζει το αέριο να εισέχει σε μια δεξαμενή νερού. Όπως και στον προηγούμενο τρόπο, τα σωματίδια παραμένουν στο νερό και το αέριο εξέρχεται τελικά 'καθαρό'.

Ένα τυπικό σύστημα υγρού καθαρισμού απαιτεί και τον ανάλογο εξοπλισμό, όπως σωληνώσεις, φυσητήρες, αντλίες νερού και ειδικά σχεδιασμένα δοχεία για την συγκράτηση του νερού και την απομάκρυνση των ρύπων.

Αν και η χρήση των συνεπάγεται με πολλά πλεονεκτήματα, όπως το μεγάλο εύρος θερμοκρασιών εισόδου του αερίου και την απομάκρυνση πολλών ειδών ρύπων, οι συσκευές αυτές απαιτούν συχνή συντήρηση ώστε να συνεχίσουν να λειτουργούν ικανοποιητικά για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ακόμα, η υψηλή υγρασία του εξερχόμενου αερίου σε συνδυασμό με την ποιότητα των ρύπων προκαλεί πολλές φορές προβλήματα διάβρωσης στην εγκατάσταση [41].

Παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά τα τρία είδη υγρού καθαρισμού αερίου:

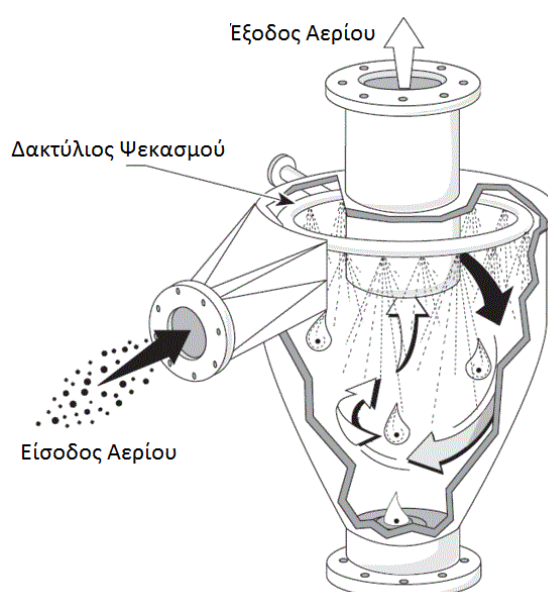
- Spray Tower:



Σχήμα 2.24: Συσκευή υγρού καθαρισμού τύπου Spray Tower [42].

Αυτός ο τύπος βασίζεται κυρίως στην απλή λειτουργία του, απαιτεί ελάχιστη ενέργεια και η απόδοση του φτάνει το 95%. Το αέριο ρέει κατά μήκος ενός θαλάμου, κατά την πορεία του γίνεται ψεκασμός νερού σε ένα ή περισσότερα σημεία. Το νερό απομακρύνει τα σωματίδια από το αέριο, τα όποια καταλήγουν σε δοχεία στον πυθμένα του θαλάμου. Το νερό μέσω διάταξης αντλίας ανακυκλώνεται από το δοχείο στα μπεκ [42].

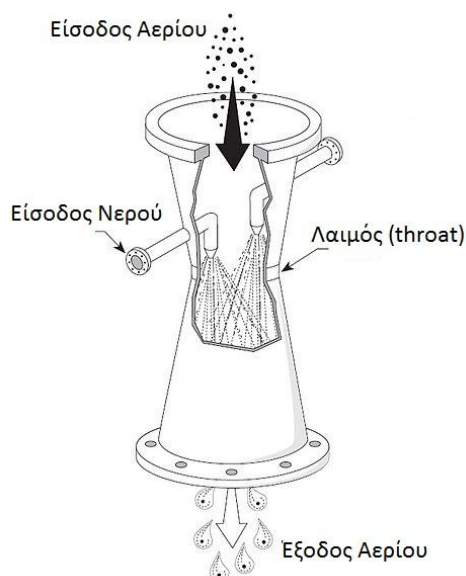
- Swirl Scrubber ή Cyclonic Spray Scrubber:



Σχήμα 2.25: Συσκευή υγρού καθαρισμού τύπου Swirl [43].

Η λειτουργία αυτής της συσκευής βασίζεται στην λειτουργία του κύκλωνα. Το αέριο εισέρχεται με υψηλή ταχύτητα, επαπτομενικά στο πάνω τμήμα και εξέρχεται από την κορυφή. Κατά την πορεία της ροής του αερίου μέσα στις δίνες, γίνεται ψεκασμός νερού. Το νερό απομακρύνει τα σωματίδια από το αέριο, τα όποια καταλήγουν σε δοχείο στον πυθμένα της συσκευής. Πρόκειται για μια περιπλοκή συσκευή, η όποια απαιτεί ενέργεια για την παροχή του νερού και λειτουργεί για συγκεκριμένους τύπους αερίων. Η απόδοση του φτάνει το 95% [43].

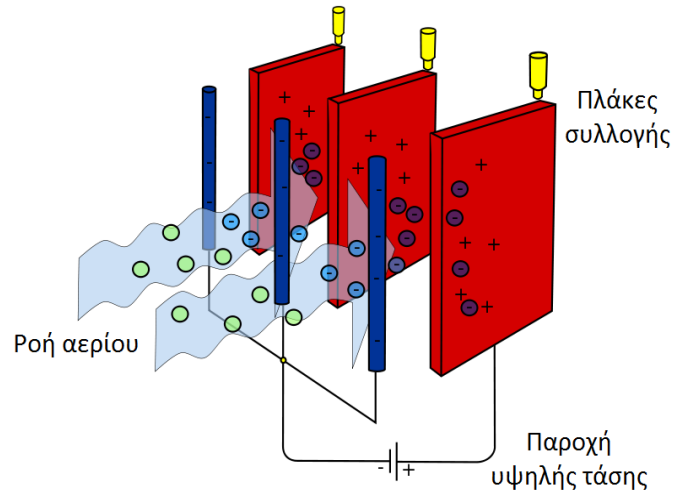
- Venturi scrubber:



Σχήμα 2.26: Συσκευή υγρού καθαρισμού τύπου Venturi [44].

Οι τύποι Venturi αποτελούν την πιο αποτελεσματική λύση στον καθαρισμό του αερίου από σωματίδια και πίσσες. Είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες συσκευές καθαρισμού, διότι η ανοικτή τους κατασκευή επιτρέπει την αφαίρεση περισσότερων σωματιδίων, χωρίς περαιτέρω συνδέσεις με σωληνώσεις και εξαρτήματα. Είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να συλλέγει το 99,99% των σωματιδίων του αερίου, καθώς λειτουργεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και ταχύτητες εισόδου. Παρόλα αυτά, το κόστος της είναι αρκετά υψηλό σε σχέση με τους άλλους δυο τύπους καθαρισμού [44].

2.3.1.4. Ηλεκτροστατικό Φίλτρο (Electrostatic precipitator)



Σχήμα 2.27: Ηλεκτροστατικό φίλτρο [46].

Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα αποτελούνται από πλάκες συλλογής σωματιδίων, οι οποίες διαρρέονται από συνεχές ρεύμα υψηλής τάσεως. Έτσι, τα σωματίδια της τέφρας, περνώντας ανάμεσα από αυτές τις πλάκες ιονίζονται και προσκολλώνται πάνω τους, απ' όπου περισυλλέγονται με διάφορες μεθόδους (ταλάντωση, με σφυριά, κλπ). Στη συνέχεια αποκαθίστανται και αποτίθενται σε ιδιαίτερο χώρο [45].

Στην εγκατάσταση έγινε μελέτη καθαρισμού του αερίου με την χρήση αρχικά ενός κυκλώνα, για την συγκράτηση των μεγάλων σωματιδίων (particulate matter) και στην συνέχεια ενός φίλτρου απορροφητικών ινών, για την συγκράτηση μικρότερων σωματιδίων πίσσας (tar).

2.3.2. Σχεδιασμός

2.3.2.1. Κυκλώνας

Για τον σχεδιασμό του κυκλώνα [36] έγινε μελέτη δυο διαδικασιών, βασισμένες σε μαθηματικά μοντέλα. Η πρώτη περιγραφή [37] αναφέρεται ως Κλασική Σχεδίαση Κυκλώνα (Classical cyclone design - CCD) και έχει αναπτυχθεί στις αρχές του 1950 [38]. Η δεύτερη περιγραφή, που παρουσιάστηκε ως εναλλακτική λύση [39], αναφέρεται ως Διαδικασία Σχεδίασης Κυκλώνα Τέξας (Texas A&M Cyclone Design Process - TCD) και είχε ως σκοπό την αντιμετώπιση των προβλημάτων που σχετίζονται με το σχεδιασμό των κυκλώνων χρησιμοποιώντας την κλασική σχεδίαση κυκλώνα (CCD).

Η διαδικασία TCD χρησιμοποιεί, κυρίως, την ταχύτητα εισόδου του αερίου στον κυκλώνα και προσφέρει τον υπολογισμό όλων των διαστάσεων, για τον σχεδιασμό του βέλτιστου κυκλώνα, αλλά και της πτώσης πίεσης εισόδου-εξόδου του αερίου. Είναι απλούστερη σε σύγκριση με τη διαδικασία του CCD και παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα για την εκτίμηση της πτώσης πίεσης. Όμως, η διαδικασία TCD δεν ενσωματώνει ορισμένους υπολογισμούς, όπως την κλασματική καμπύλη απόδοσης, και έτσι δεν μπορεί να γίνει εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του κυκλώνα και της συγκέντρωσης εκπομπών.

Υπολογισμός Βασικών Διαστάσεων

Γνωρίζοντας την ταχύτητα εισόδου του αερίου στον κυκλώνα, έγινε αρχικά ο υπολογισμός της διαμέτρου του κυλινδρικού τμήματος [36]:

$$D_c = \sqrt{\frac{8 \cdot Q}{V_i}}$$

$$Q = V_{gas} \cdot A$$

Όπου:

- Q : Η παροχή του αερίου, σε m^3/s .
- V_i : Οριακή τιμή για την ταχύτητα του αερίου, κατά την είσοδο στον κυκλώνα, 12 ± 2 m/s.
- V_{gas} : Η ταχύτητα εισόδου του αερίου, σε m/s.
- A : Το εμβαδό διατομής του σωλήνα εισόδου, σε m^2 .

Από την παραπάνω εξίσωση προέκυψε διάμετρος κώνου, ίση με 48,4 mm.

Ύστερα, και αφού έγινε επιλογή του τύπου 1D2D για την εγκατάσταση, πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί και των υπόλοιπων διαστάσεων του κυκλώνα [36]:

Πίνακας 2.2: Εξισώσεις υπολογισμού διαστάσεων κυκλώνα.

Διάσταση	Εξίσωση
Διάμετρος Κώνου	D_c
Ύψος Κώνου	$L_c = D_c$
Ύψος Κώνου	$Z_c = 2 \cdot D_c$
Διάμετρος Εξόδου αερίου	$D_e = \frac{5 \cdot D_c}{8}$
Διάμετρος Εξόδου ιπτάμενης τέφρας	$J_c = \frac{D_c}{2}$
Πλάτος εισόδου αερίου	$B_c = \frac{D_c}{4}$
Ύψος εισόδου αερίου	$H_c = \frac{D_c}{2}$

Υπολογισμός Πτώσης Πίεσης

Η πτώση πίεσης αφορά στην διάφορα της τιμής της πίεσης της εισόδου από την αντίστοιχη τιμή της εξόδου του κύκλωνα. Ο υπολογισμός έγινε με την παρακάτω εξίσωση [36]:

$$\Delta P = \frac{3950 \cdot K \cdot Q^2 \cdot p \cdot \rho_{gas}}{T}$$

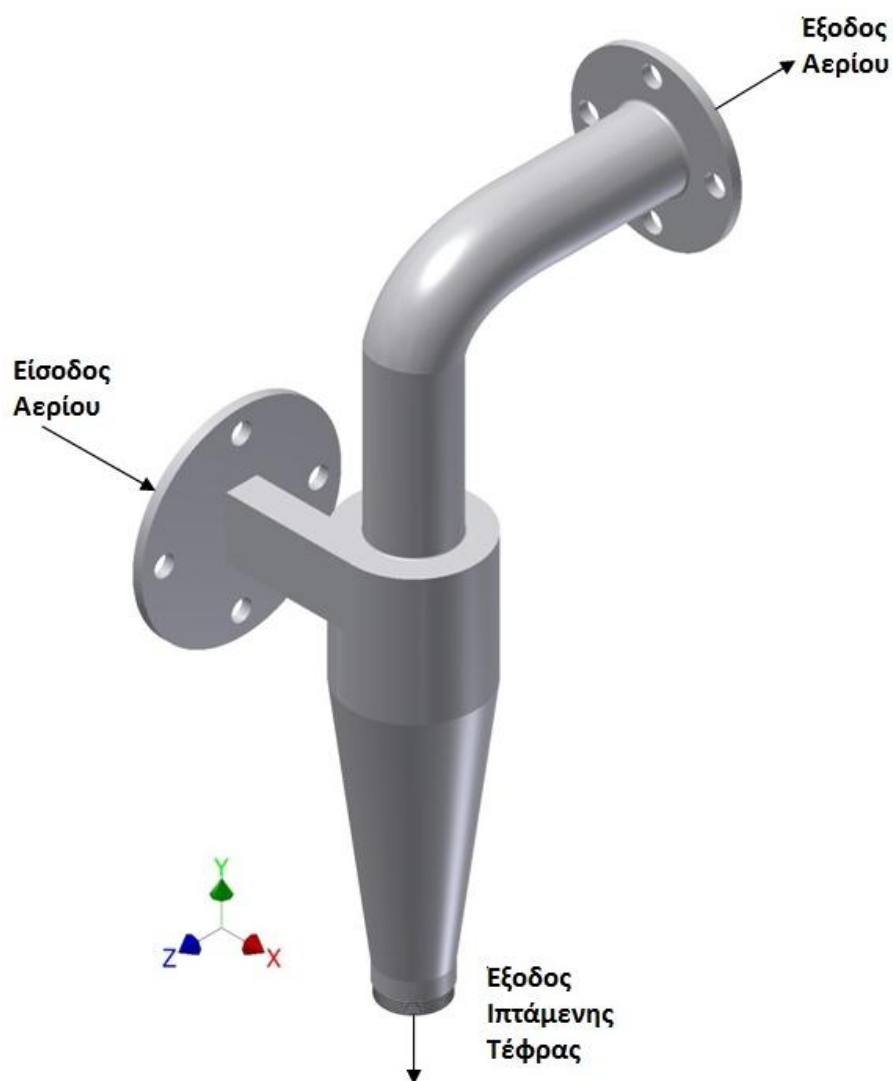
Όπου:

- K : Ο συντελεστής αναλογίας πίεσης του κύκλωνα, ίσος με 3,4 για τον συγκεκριμένο τύπο κύκλωνα.
- Q : Η παροχή του αερίου, σε m^3/s .
- p : Η πίεση εισόδου, σε bar.

- ρ_{gas} : Η πυκνότητα του αέριου, σε kg/m^3 .
- T : Η θερμοκρασία εισόδου του αέριου, σε $^{\circ}\text{C}$.

Από την παραπάνω εξίσωση προέκυψε πτώση πίεσης κυκλώνα, ίση με 0,004 bar.

Τελικά, ο κυκλώνας που προέκυψε φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 2.28: Τρισδιάστατη απεικόνιση του κυκλώνα.

2.3.2.2. Φίλτρο

Ο σχεδιασμός του φίλτρου της εγκατάστασης που μελετήθηκε, βασίστηκε στην απλή λειτουργία του σακόφιλτρου που προαναφέρθηκε, με την συλλογή των σωματιδίων να γίνεται εσωτερικά του σάκου. Ως απορροφητικό υλικό επιλέχτηκε το quartz wool. Οι ίνες του υλικού αυτού είναι μη εύφλεκτες και έτσι μπορούν χρησιμοποιηθούν σε υψηλές θερμοκρασίες, αφού διατηρούν τις μηχανικές τους ιδιότητες μέχρι και στους 1050°C. Οι υφαντές αυτές ίνες που το αποτελούν, βρίσκονται σε διαστάσεις 5-15 μm και δίνουν μια κατσαρή μορφή (όπως το βαμβάκι), η όποια αποτρέπει την συμπίεση του υλικού και βελτιώνει τις επιθυμητές ιδιότητες του [50]. Η σύσταση του quartz wool φαίνεται στο **Σχήμα 2.30**.



Σχήμα 2.29: Ρολό quartz wool [50].

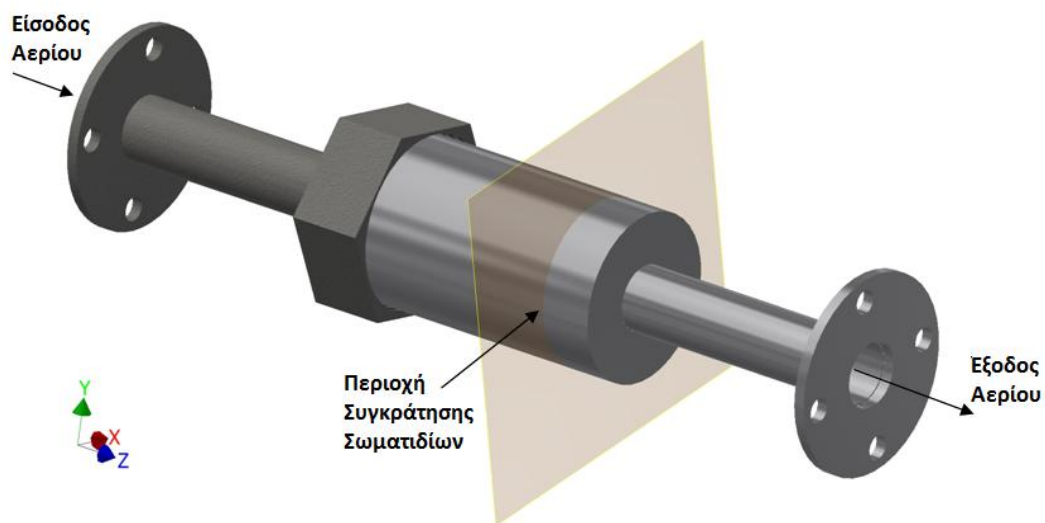
	Na	K	Li	Al	Ca	Fe	Ti
Quartz Wool (NS1)	2.5	0.6	4.0	23.0	0.5	0.5	3.0

Σχήμα 2.30: Σύσταση του απορροφητικού υλικού (τιμές σε ppm) [50].

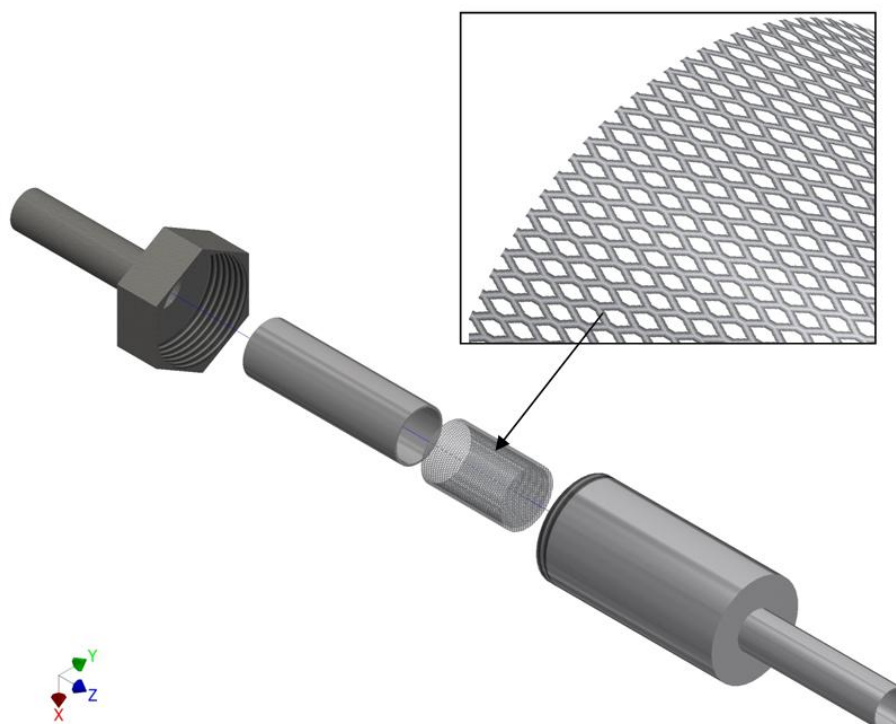
Το απορροφητικό υλικό τοποθετήθηκε εντός μιας ειδικά διαμορφωμένης θήκης, η όποια κατασκευάστηκε για να το συγκρατεί και να παρέχει την απαραίτητη στεγανότητα. Πρόκειται για μια κυλινδρική μεταλλική διάταξη διαμέτρου 3,5" και συνολικού μήκους 200 mm. Στο εσωτερικό τοποθετήθηκε ένας ακόμα κύλινδρος διαμέτρου 2", με συγκολλημένο μεταλλικό πλέγμα περιμετρικά του, για την συγκράτηση του απορροφητικού υλικού.

Το απορροφητικό υλικό προϋποθέτει μεγίστη πτώση πίεσης ίση με 0,01 bar [50], ανάλογα με το πάχος του στρώματος και την θερμοκρασία εισόδου του αέριου.

Η διάταξη του φίλτρου που πρόεκυψε φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 2.31: Τρισδιάστατη απεικόνιση της ολοκληρωμένης διάταξης φιλτραρίσματος.



Σχήμα 2.32: Τρισδιάστατη απεικόνιση (σε ανάπτυγμα) του φίλτρου και μεγέθυνση στο μεταλλικό πλέγμα.

Τα σχέδια με τις βασικές διαστάσεις του κυκλώνα και του φίλτρου παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

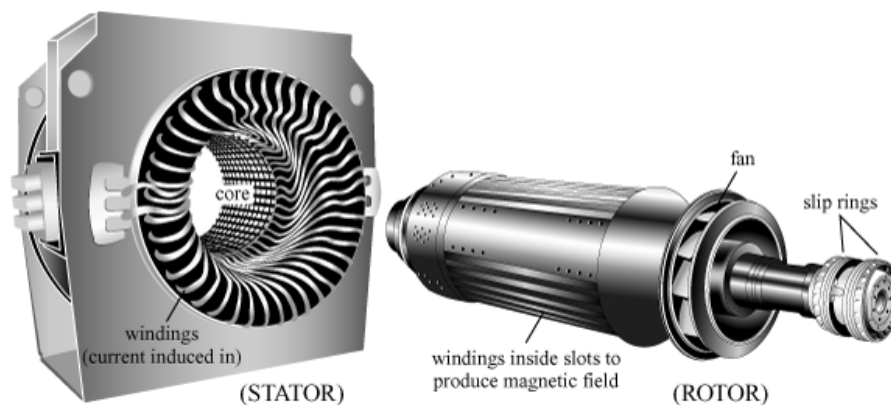
2.4. ΣΥΣΚΕΥΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (ELECTRIC GENERATOR)

2.4.1. Περιγραφή

Μια από τις βασικές εφαρμογές της αεριοποίησης αποτελεί η παράγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, με την χρήση γεννήτριας.

Η γεννήτρια ή ηλεκτρογεννήτρια, είναι μια μηχανή που βασίζεται στους νόμους της ηλεκτροφυσικής και ιδιαίτερα στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Αφορά, δηλαδή, στην ενέργεια και στη μετατροπή της από τη μια μορφή σε μια άλλη. Συγκεκριμένα η γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, σύμφωνα με φαινόμενο της φυσικής κατά το οποίο εάν ένα πηνίο περιστραφεί μέσα σ' ένα μαγνητικό πεδίο, τότε στις άκρες του πηνίου παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.

Η γεννήτρια αποτελείται από δύο μέρη, το ακίνητο μέρος της που λέγεται στάτορας ή επαγωγέας, στο οποίο υπάρχουν οι μαγνήτες και το κινητό μέρος της που λέγεται ρότορας ή επαγωγίμο, στο οποίο υπάρχουν τα πηνία. Γυρίζοντας το ρότορα μέσα στο στάτορα παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Η περιστροφή του ρότορα γίνεται με μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) [47].



Σχήμα 2.33: Στάτορας και ρότορας γεννήτριας ρεύματος [48].

Ωστόσο, για την λειτουργία της μηχανής που κινεί την γεννήτρια απαιτείται καύσιμο. Το καύσιμο αυτό, ανάλογα και τον τύπο της μηχανής, σπινθήρα (spark ignition) ή αυτανάφλεξης (heat compression), είναι βενζίνη ή πετρέλαιο αντίστοιχα. Σκοπός της διεργασίας που μελετήθηκε, ήταν η αντικατάσταση του ορυκτού καύσιμου που

χρησιμοποιείται στην ΜΕΚ, με το αέριο σύνθεσης που παράγεται από την αεριοποίηση της βιομάζας.

Οι ΜΕΚ που χρησιμοποιούνται για την κίνηση γεννητριών ρεύματος, ανεξαρτήτως καυσίμου, έχουν θερμική απόδοση 35 - 40% και ηλεκτρική απόδοση 30-35%.

2.4.2. Παράμετροι

Για να είναι εφικτή η αντικατάσταση του συμβατικού καυσίμου με το παραγόμενο αέριο, η ΜΕΚ έχει τις εξής βασικές απαιτήσεις:

- Το αέριο κατά την εισαγωγή του στην μηχανή, πρέπει να είναι απαλλαγμένο από τις υψηλές περιεκτικότητες σωματιδίων πίσσας και τέφρας, ώστε η καύση να έχει την μέγιστη ισχύ και η μηχανή να λειτουργεί χωρίς προβλήματα, για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Το αέριο πρέπει να εισέρχεται στην μηχανή σε χαμηλές θερμοκρασίες, της τάξεως των 30 - 50°C. Κατά την ψύξη μειώνεται η θερμοκρασία και αυξάνεται ο όγκος του αερίου, όποτε γίνεται καύση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου.
- Το αέριο κατά την εισαγωγή του στην μηχανή πρέπει να αναμειχτεί με αέρα, σε αναλογία περίπου 1,9 kg αέρα/kg καυσίμου.
- Ένας τρόπος για την έναρξη της μηχανής (έναυση), απαιτεί ανάμιξη του αερίου με βενζίνη ή κάποιο άλλο καύσιμο. Ένας δεύτερος τρόπος, προϋποθέτει την εγκατάσταση μπαταρίας, για εκκίνηση με μίζα.
- Κατά την λειτουργία της μηχανής πρέπει να γίνεται έλεγχος της ανάμιξης αέρα-καυσίμου, καθώς τυχόν σβήσιμο απαιτεί επανεκκίνηση με έναν από τους παραπάνω τρόπους.

2.4.3. Μετατροπές

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω απαιτήσεις την μηχανής, παρουσιάζονται οι μετατροπές που πρέπει να εφαρμοστούν για την χρήση του αερίου ως καύσιμη υλη:

- Ο καθαρισμός του αερίου γίνεται με τις διαδικασίες που αναφέρθηκαν στην παράγραφο Γ. Η χρήση του κύκλωνα προϋποθέτει απόδοση διαχωρισμού σωματιδίων 90-98% για διάμετρο σωματιδίων d , $20 < d < 50$ μm . Και η χρήση σακόφιλτρου προϋποθέτει αντίστοιχη απόδοση διαχωρισμού σωματιδίων περίπου 99%.
- Το μήκος και το υλικό των σωληνώσεων από όπου διέρχεται εσωτερικά το αέριο, προϋποθέτουν μείωση της θερμοκρασίας, από τους 120-150°C στους 40 - 60°C και συνολική πτώση πίεσης 1,5 - 2,5 kPa.
- Η ανάμιξη με τον αέρα πριν την είσοδο στην μηχανή, γίνεται με κατάλληλη διάταξη σωληνώσεων και βανών, ώστε να ρυθμίζεται η αναλογία κάθε στιγμή από τον χειριστή.

2.4.4. Σχεδιασμός

Σε αυτό το σημείο δεν έγινε ο σχεδιασμός της γεννήτριας ρεύματος ή της μηχανής εσωτερικής καύσης, αλλά η επιλογή μιας κατάλληλης γεννήτριας εμπορίου, βάσει των υπολογισμών που είχαν προηγηθεί.

Στην αρχική υπόθεση, σκοπός ήταν η παραγωγή έργου τουλάχιστον 10 kWh, ωστόσο επειδή πρόκειται για μια πρωτότυπη μονάδα, δόθηκε βάρος στην επιτυχία του πειράματος. Έτσι, επιλέχτηκε γεννήτρια μικρότερης ισχύος, με τα έξης χαρακτηριστικά:

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά γεννήτριας ρεύματος [51].

Κατασκευαστής	KUMATSUGEN
Μοντέλο	GB3000
Μέγιστη Απόδοση	3.5 kVA
Τάση	230 V
Ισχύς	6.5 HP (4.9 kW)
Κυβισμός	196 cc
Κινητήρας	4χρονος - αερόψυκτος
Καύσιμο	Αμόλυβδη βενζίνη
Χωρητικότητα	15 L
Κατανάλωση	1.45 L/h
Σύστημα Ανάφλεξης	Ηλεκτρονική TCI
Διαστάσεις	620x460x480 mm
Βάρος	45 kg



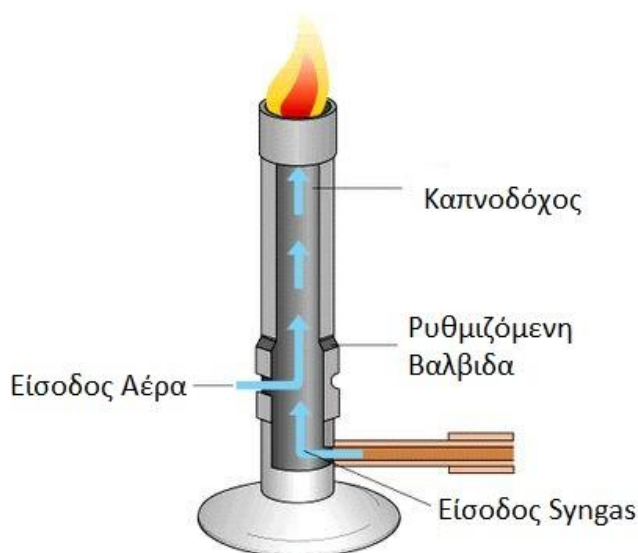
Σχήμα 2.34: Γεννήτριας ρεύματος KUMATSUGEN [51].

2.5. ΛΟΙΠΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Σε αυτήν την παράγραφο έγινε περιγραφή του υπόλοιπου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που απαιτείται για την ολοκλήρωση της εγκατάστασης.

2.5.1. Πυρσός (Flare)

Ο πυρσός είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται από μεγάλες βιομηχανικές μονάδες, όπως τα διυλιστήρια, για την καύση των εύφλεκτων αερίων που παράγονται. Η χρήση του είναι απαραίτητη για την ασφάλεια της εγκατάστασης και του προσωπικού, λόγω των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Η καύση γίνεται όταν το παραγόμενο αέριο δεν χρησιμοποιείται σε κάποια άλλη διαδικασία. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η τοποθέτηση ενός πυρσού, τύπου Bunsen, ο οποίος αποτελεί μια πολύ απλή συσκευή καύσης παραγωγού αερίου, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

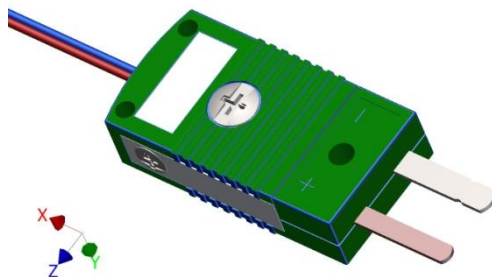


Σχήμα 2.35: Πυρσός Bunsen.

Η καύση του αερίου γίνεται εντός της συσκευής, με σπινθήρα και είσοδο επιπλέον αέρα ή και ενός ακόμα εύφλεκτου καύσιμου, συνήθως προπανίου.

2.5.2. Μετρητικά συστήματα (Measuring Devices)

- Ο έλεγχος και η καταγραφή της θερμοκρασίας έγινε με την τοποθέτηση θερμοστοιχείων τύπου K (thermocouple, type K), με εύρος μέτρησης -270°C έως 1260°C . Η ευαισθησία των οργάνων είναι $41\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Τα συγκεκριμένα θερμοστοιχεία είναι ευρύτατα διαδεδομένα στο εμπόριο και έτσι αποτελούν μια σχετικά οικονομική λύση. Η τοποθέτηση τους είναι τέτοια ώστε το μπροστινό τους τμήμα (σημείο ένωσης των δύο υλικών) να εφάπτεται στη εσωτερική επιφάνεια του αντιδραστήρα. Τα δυο υλικά που το απαρτίζουν είναι κράμα Νικελίου-Χρωμίου (Ni-Cr) και κράμα Νικελίου(Ni) [52].



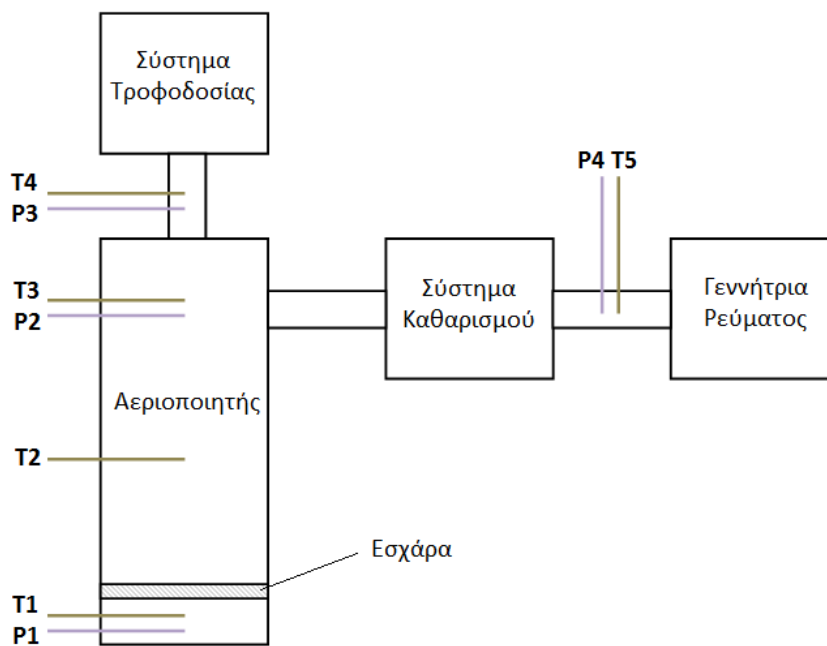
Σχήμα 2.36: Τρισδιάστατη απεικόνιση του θερμοστοιχείου τύπου K.

- Ο έλεγχος και η καταγραφή της πίεσης έγινε με την τοποθέτηση συστήματος αισθητήρα αντίστασης πίεσης (piezoresistive sensor gauge), με εύρος μέτρησης 0 έως 1600 mbar.



Σχήμα 2.37: Συστήματα μέτρησης πίεσης της εταιρίας WIKA.

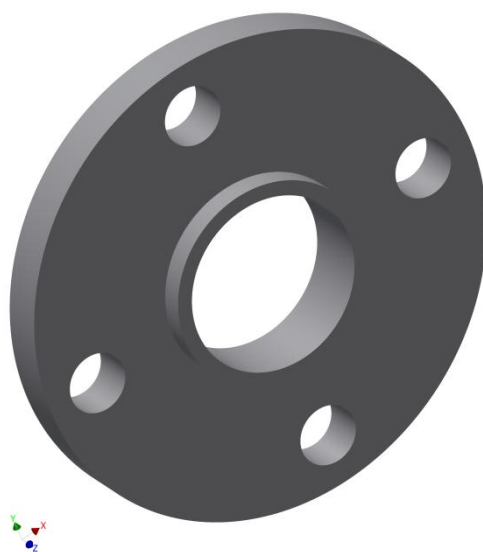
Η σωστή τοποθέτηση των μετρητών καθορίζει και την ποιότητα του έλεγχου που επιθυμείται. Στην περίπτωση μονάδας αεριοποίησης, απαιτούνται 5-6 μετρητές θερμοκρασίας και 3-4 μετρητές πίεσης, στα σημεία που φαίνονται στο **Σχήμα 2.38**.



Σχήμα 2.38: Σημεία μετρήσεως θερμοκρασίας $T(i)$ και πίεσης $P(i)$.

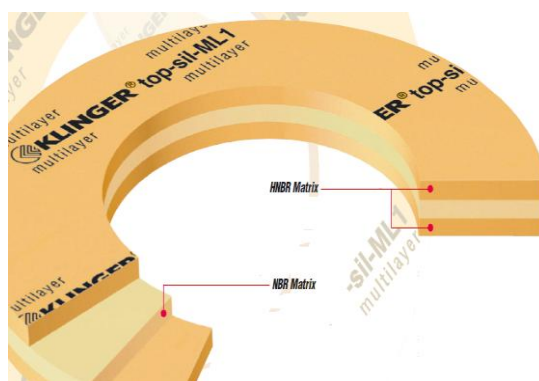
2.5.3. Φλάντζες (Flanges)

Οι φλάντζες είναι τμήματα σιδηρού (ή αλλού υλικού) που χρησιμοποιούνται για την ένωση σωληνώσεων σε διάφορες εφαρμογές. Οι φλάντζες που κατασκευάζονται κατά ASME πληρούν τις απαραίτητες προδιαγραφές και οι διαστάσεις τους μετριοούνται συνήθως σε ίντσες, με εύρος διαμέτρου: $\frac{1}{2}$ " -24". Στην παρούσα εγκατάσταση έγινε σχεδιασμός και χρήση κυκλικών φλαντζών, τεσσάρων οπών διαμέτρου 13 mm, εξωτερικής διαμέτρου 106 mm και πάχους 6 mm, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.39** (η εσωτερική διάμετρος διέφερε ανάλογα την σωλήνωση).



Σχήμα 2.39: Τρισδιάστατη απεικόνιση της φλάντζας.

Για την στεγανοποίηση μεταξύ των φλαντζών χρησιμοποιήθηκαν παρεμβύσματα (gaskets) πάχους 1-2 mm. Τα παρεμβύσματα είναι της εταιρείας Klinger και μπορούν να αντέξουν, υπό κατάλληλες συνθήκες, μέχρι 400°C [49].



Σχήμα 2.40: Παρέμβυσμα στεγανοποίησης φλάντζας [49].

2.5.4. Τροφοδοσία Αέρα (Air Feeding System)

Για την σωστή λειτουργία της μονάδας η ροή του παραγόμενου αερίου πρέπει να έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση και ταχύτητα. Αυτό εξαρτάται κυρίως από τον τρόπο εισαγωγής του αέρα. Η τροφοδοσία μπορεί να γίνει με δυο τρόπους:

- Με πεπιεσμένο αέρα κατά την είσοδο, οδηγούμενο από κάποιον συμπιεστή. Έτσι το παραγόμενο αέριο συμπαρασύρεται προς την έξοδο, λόγω της αυξημένης ταχύτητας του αέρα.



Σχήμα 2.41: Συμπιεστής αέρα.

- Με φυσική αναπνοή στην είσοδο και τοποθέτηση φυσητήρα πριν τον πυρσό. Έτσι το παραγόμενο αέριο, λόγω της συσκευής αυτής, αναρροφάται και ακολουθεί την έξοδο.



Σχήμα 2.42: Φυσητήρας θερμών αερίων.

Παρόλο που ο δεύτερος τρόπος αποτελεί μια πιο απλή και οικονομική λύση, η ύπαρξη συμπιεστή (μεγίστης συμπίεσης 10 bar) στο εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων, του τομέα Θερμότητας, του ΕΜΠ, σηματοδοτεί την επιλογή αυτού του τρόπου τροφοδοσίας αέρα στον αντιδραστήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, έγινε αρχικά περιγραφή των κατασκευαστικών σχεδίων του κάθε υποσυστήματος της μονάδας που μελετήθηκε προς κατασκευή.

Έπειτα, έγινε παρουσίαση του κόστους των συστημάτων αυτών (σε €, μη συμπεριλαμβανομένου του ΦΠΑ και των εργατοωρών) συγκεντρωτικά σε έναν Πινάκα.

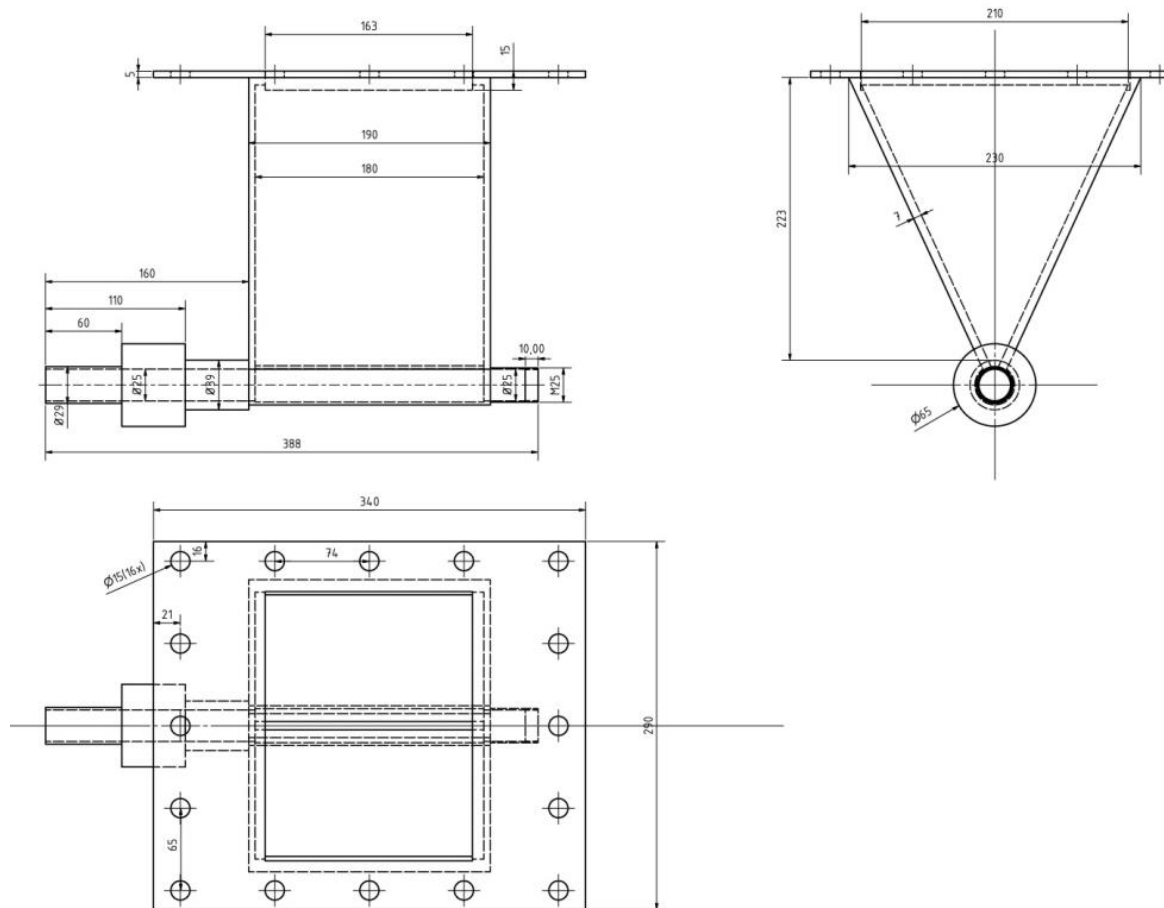
Τέλος, έγινε σύγκριση του κόστους κατανάλωσης καύσιμου για ορισμένο χρονικό διάστημα, ανάμεσα στην λειτουργία της γεννήτριας με παραγόμενο αέριο και με αμόλυβδη βενζίνη.

Τα ακόλουθα κατασκευαστικά σχέδια παρουσιάστηκαν με την έξης σειρά, όπως ακριβώς δηλαδή αναλύθηκαν και στο κεφάλαιο του σχεδιασμού:

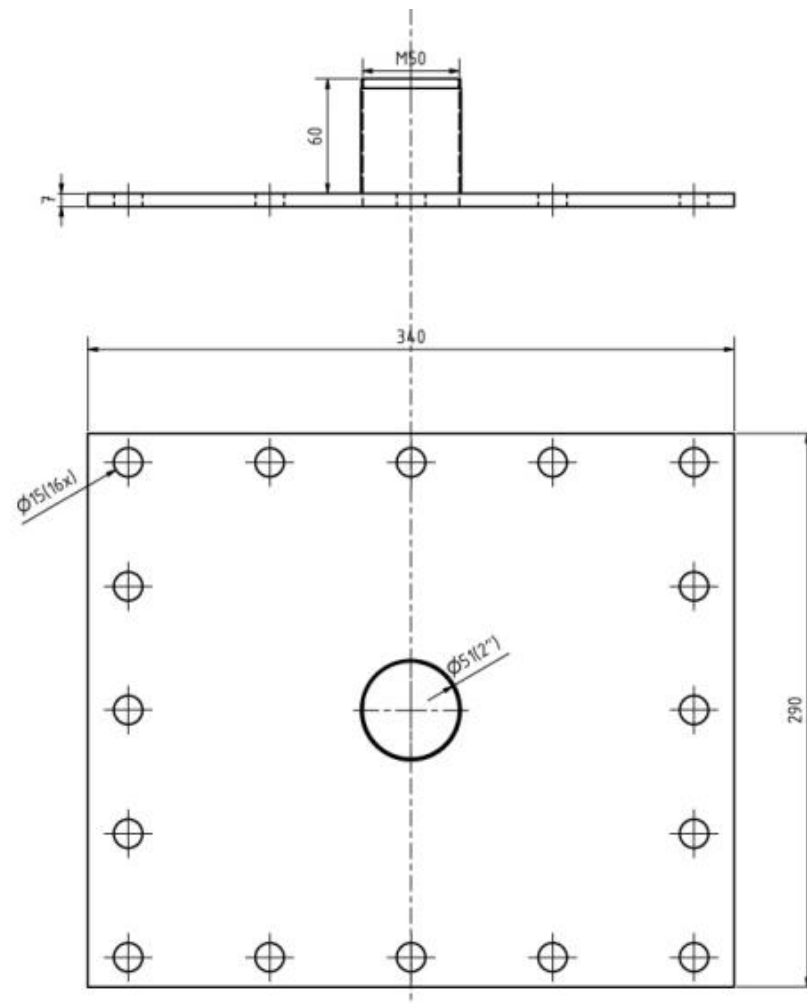
- Υποσυστήματα Τροφοδοσίας Καύσιμου.
- Υποσυστήματα Αντιδραστήρα.
- Υποσυστήματα Καθαρισμού του Αερίου.

Για τα κόστη των υποσυστημάτων προς κατασκευή, δόθηκαν ειδικές προσφορές από τις εταιρίες: *Maniva Tech* (www.manivatech.gr) και *SteelMax ABEE* (www.steelmax.gr).

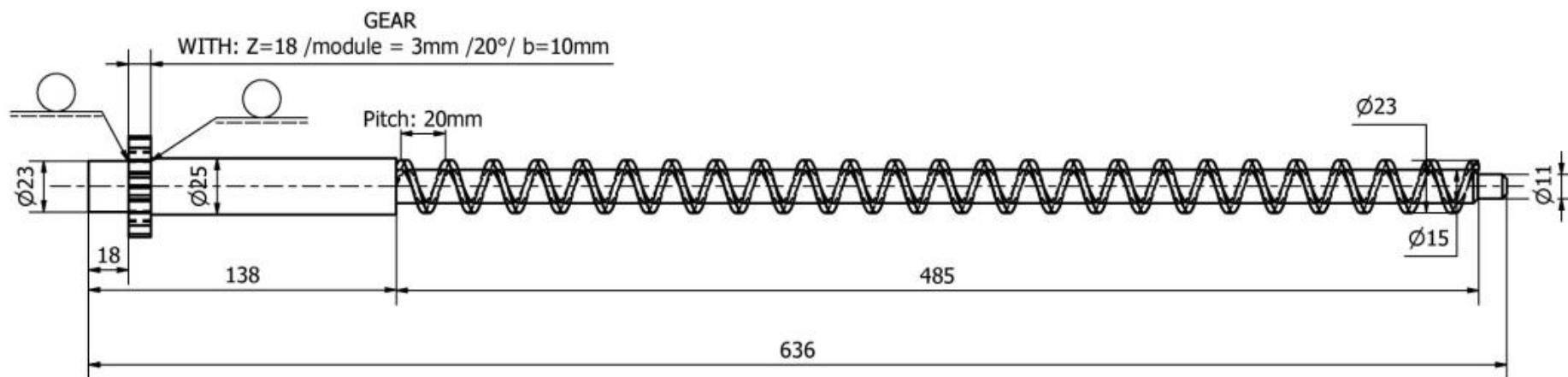
3.1. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ



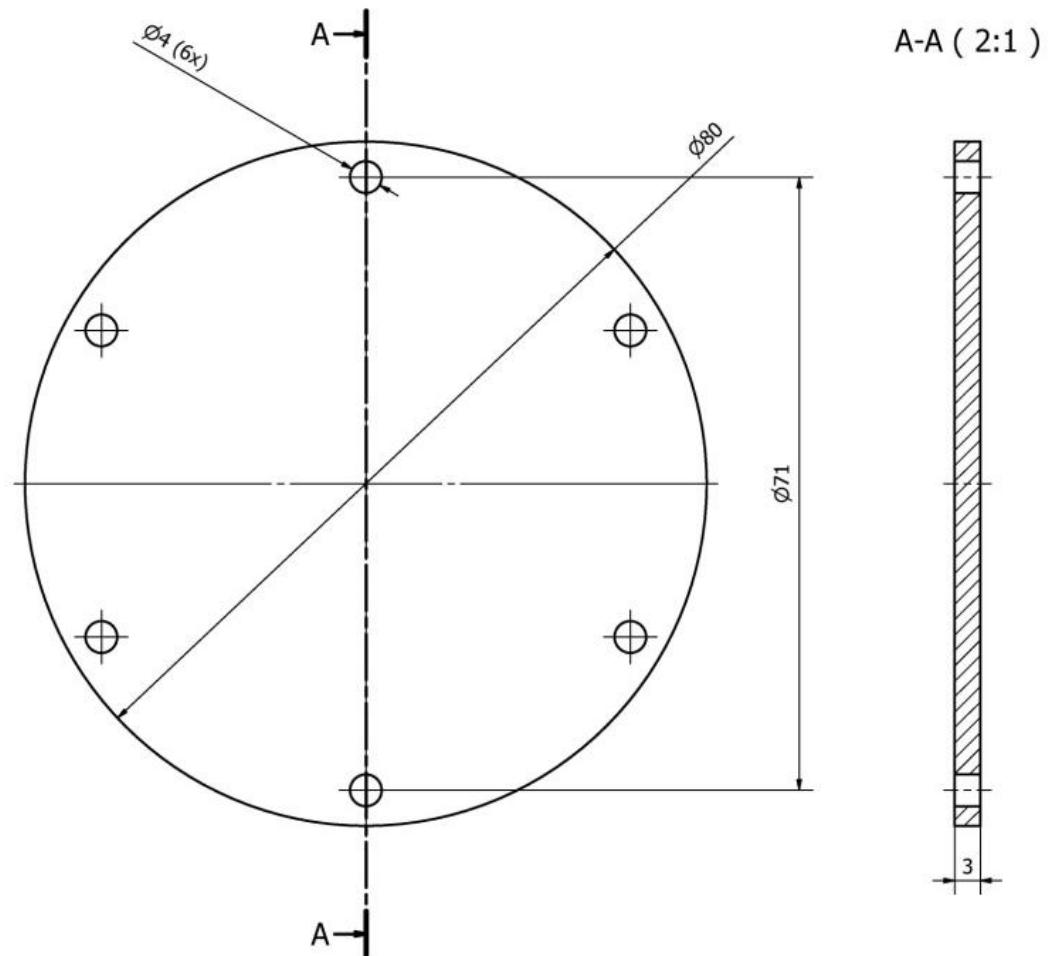
Σχήμα 3.1: Κατασκευαστικό Σχέδιο Σιλό.



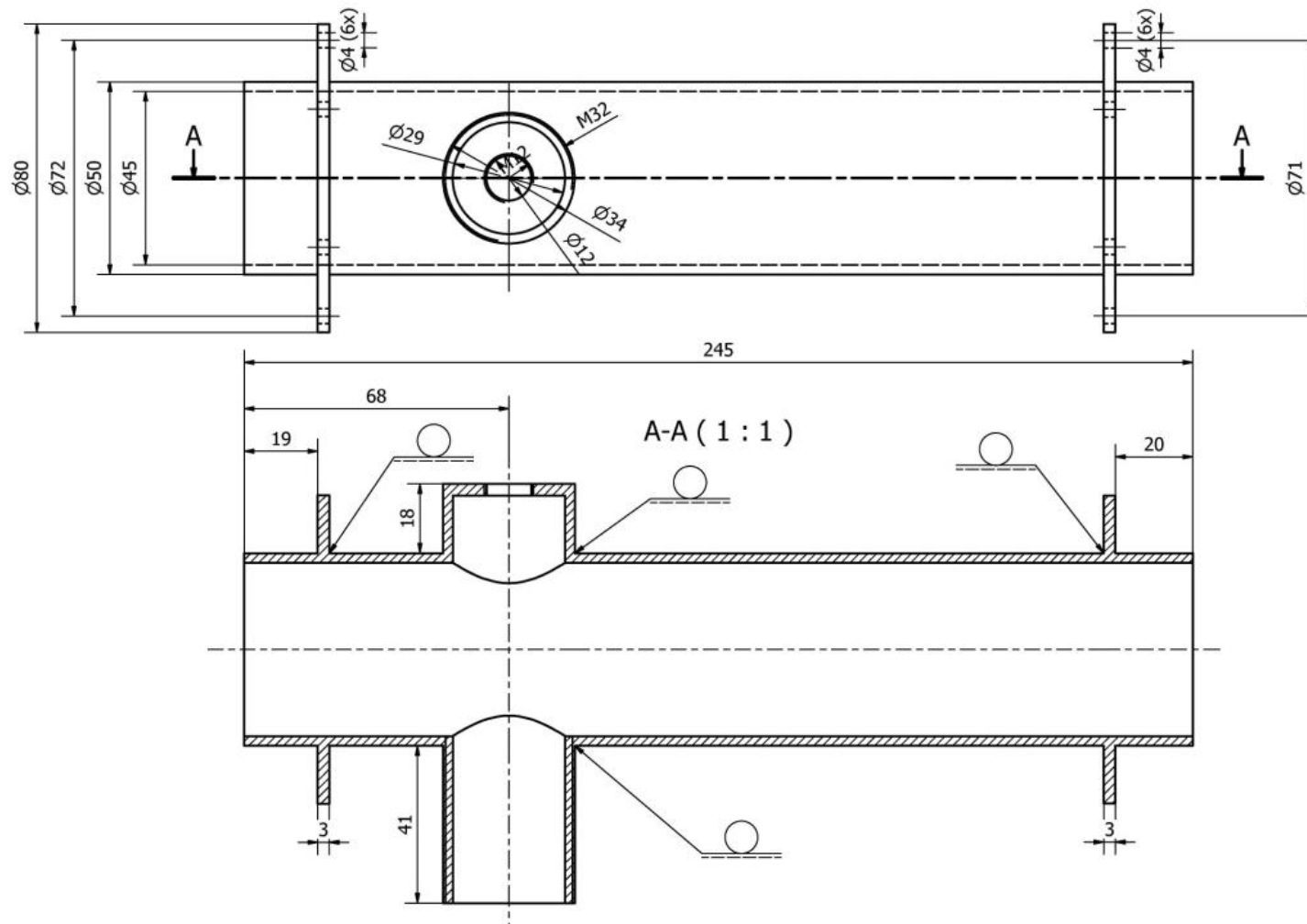
Σχήμα 3.2: Κατασκευαστικό Σχέδιο Φλάντζας Σιλό.



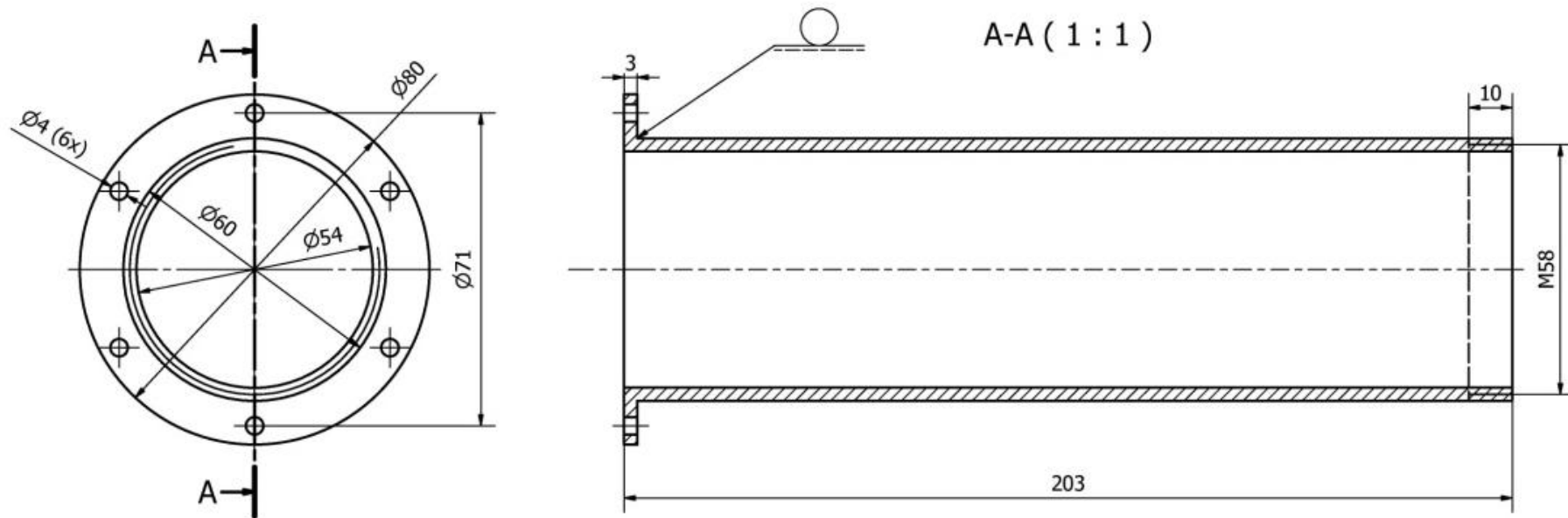
Σχήμα 3.3: Κατασκευαστικό Σχέδιο Κοχλία.



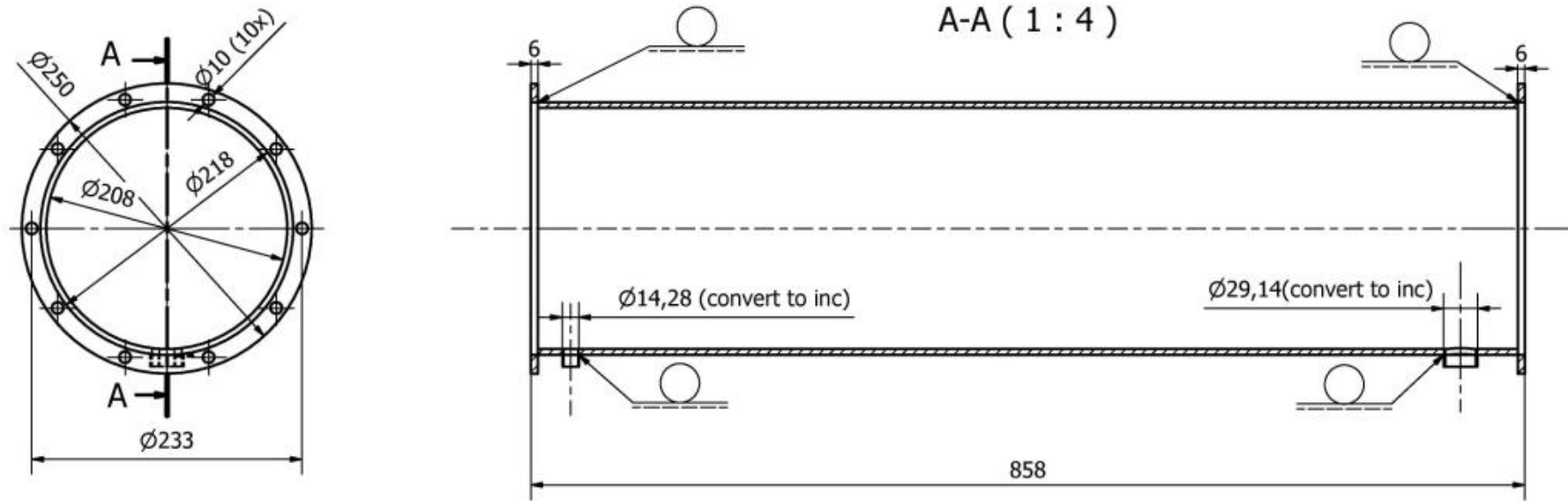
Σχήμα 3.4: Κατασκευαστικό Σχέδιο Φλάντζας (80 mm).



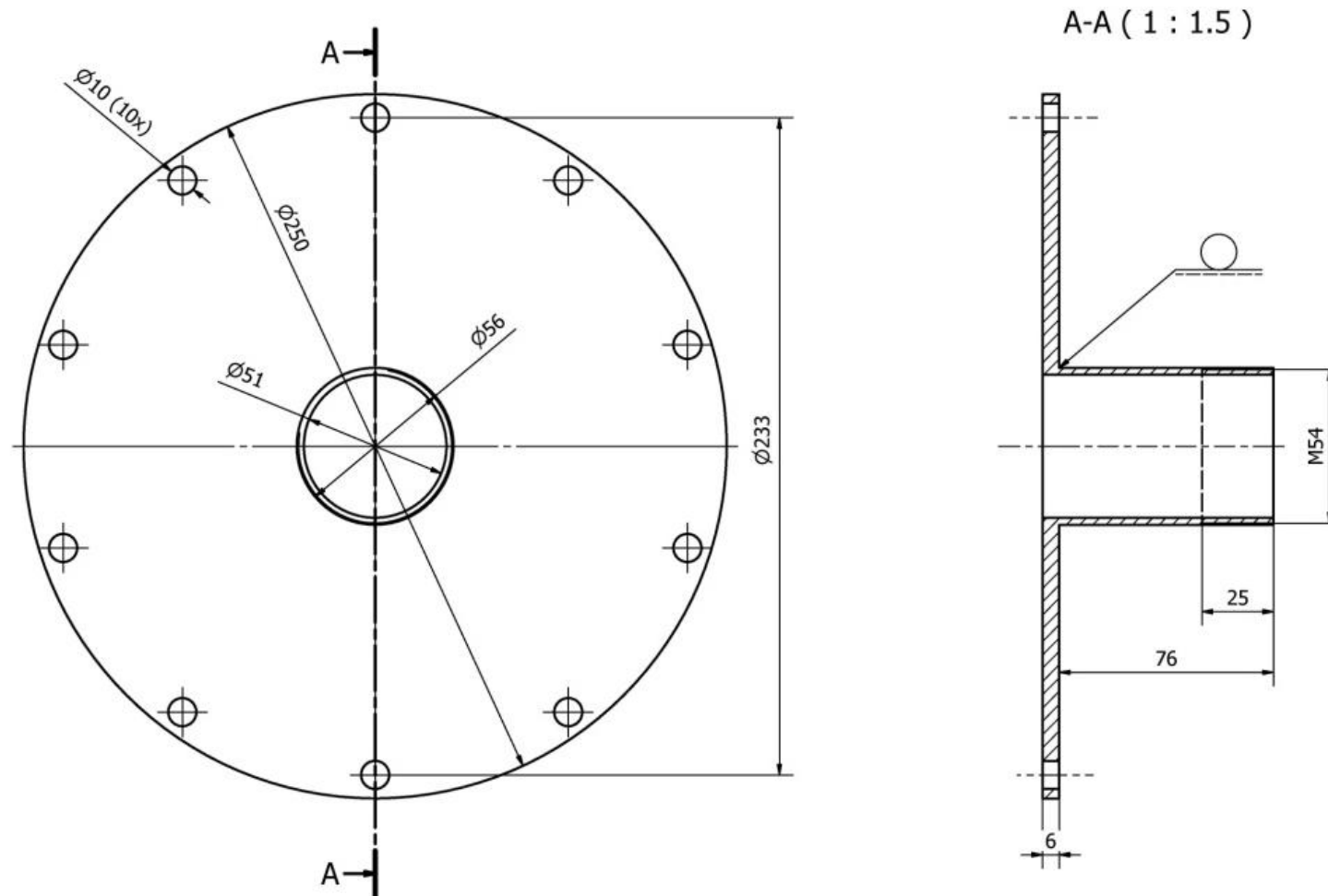
Σχήμα 3.5: Κατασκευαστικό Σχέδιο Σωλήνα (50 mm).



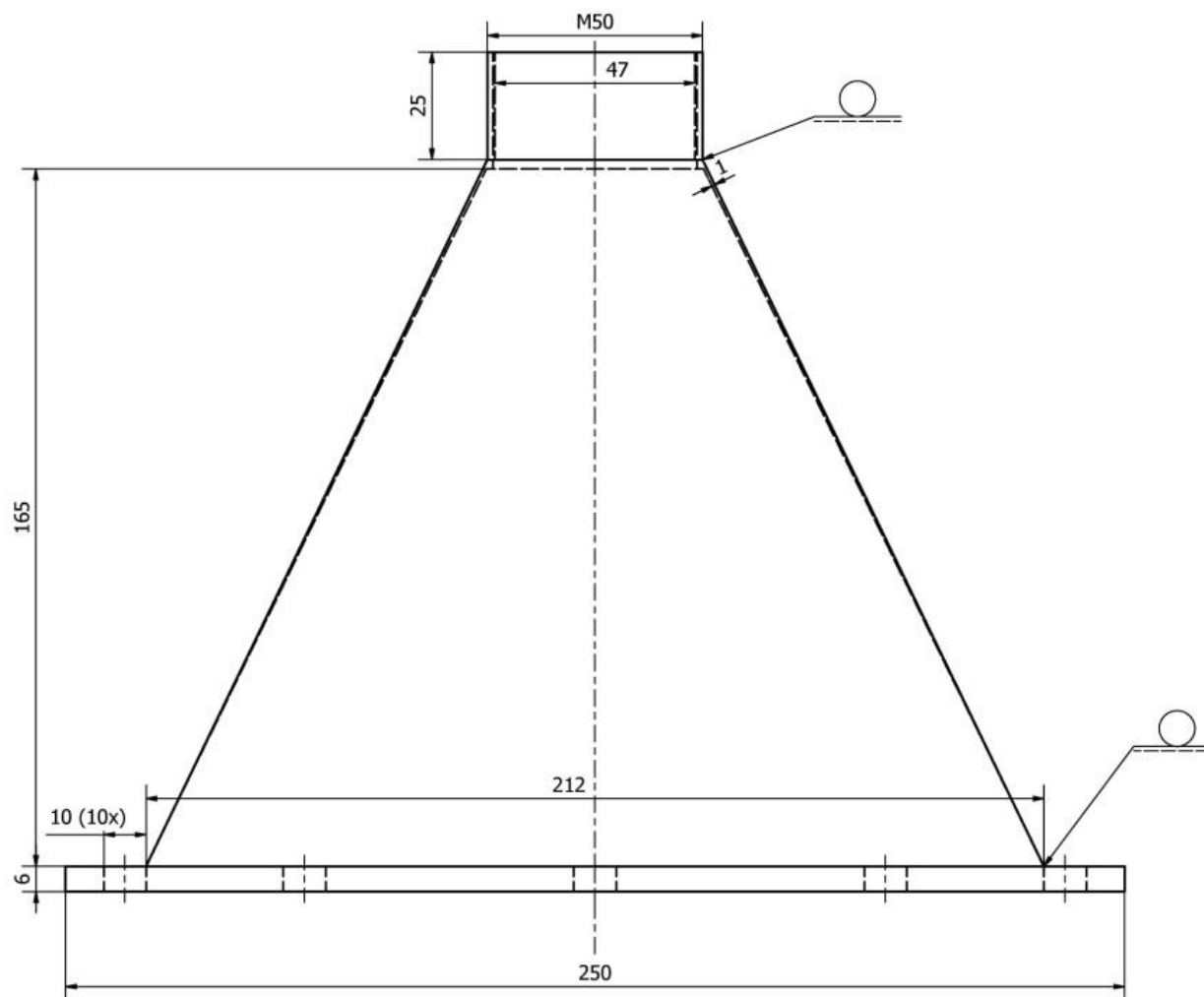
Σχήμα 3.6: Κατασκευαστικό Σχέδιο Σωλήνα (60 mm).



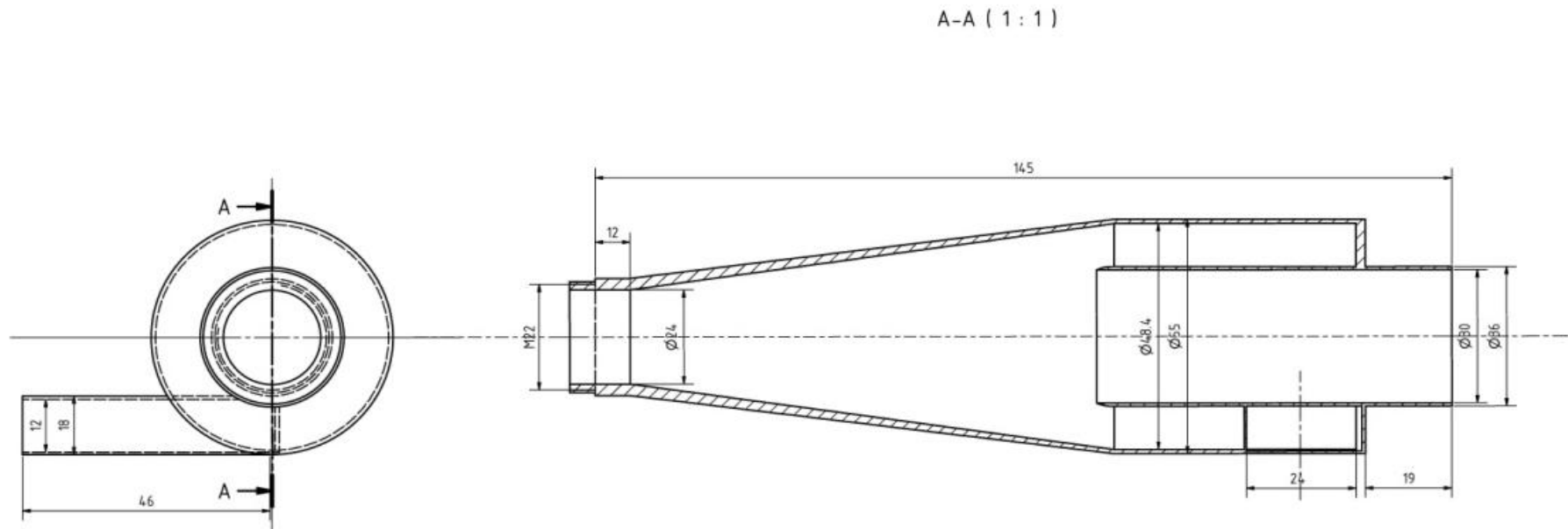
Σχήμα 3.7: Κατασκευαστικό Σχέδιο Κυλίνδρου Αντιδραστήρα.



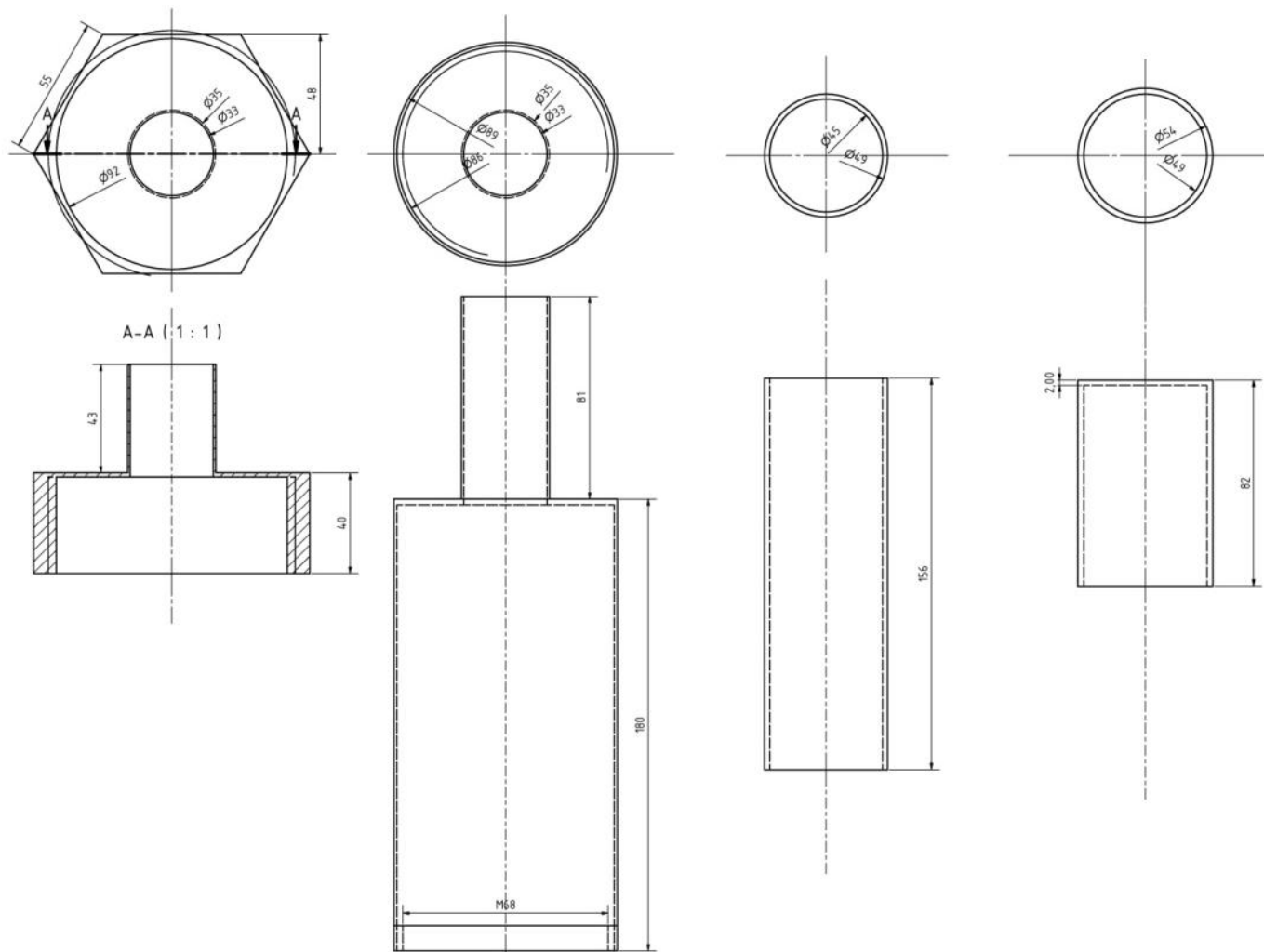
Σχήμα 3.8: Κατασκευαστικό Άνω Φλάντζας Αντιδραστήρα.



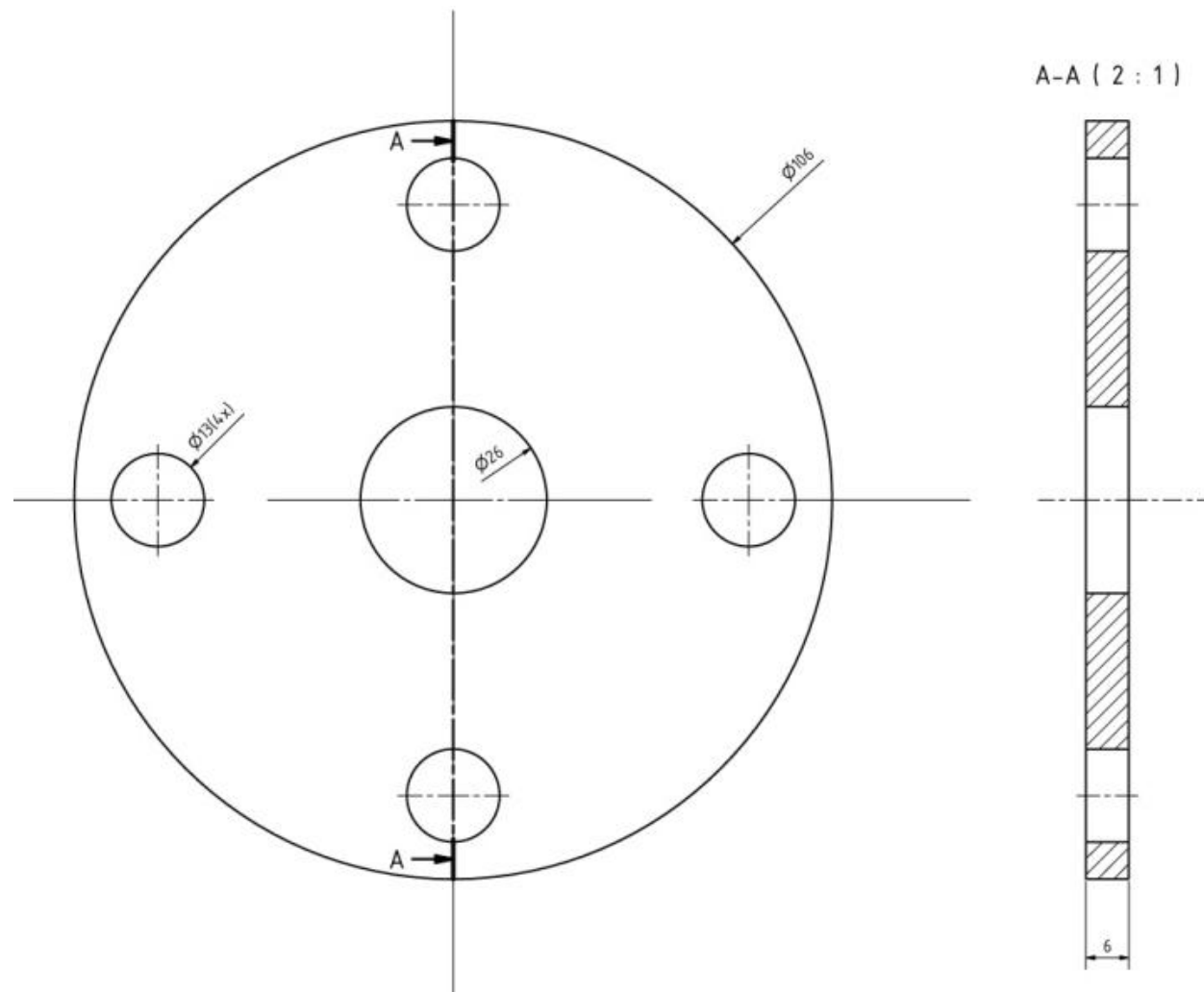
Σχήμα 3.9: Κατασκευαστικό Σχέδιο Κάτω Φλάντζας Αντιδραστήρα.



Σχήμα 3.10: Κατασκευαστικό Σχέδιο Κύκλωνα.



Σχήμα 3.11: Κατασκευαστικά Σχέδια Συστήματος Φίλτρου.



Σχήμα 3.12: Κατασκευαστικό Σχέδιο Φλάντζας (106 mm).

3.2. ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Υποσύστημα	Σχήμα	Ποσότητα	Κόστος Υλικών	Κόστος Εργασιών	Κόστος Εξαρτημάτων	Σύνολο
<i>Components</i>	<i>Picture</i>	<i>Quantity</i>	<i>Material</i>	<i>Process and Tooling</i>	<i>Fasteners and Fittings</i>	<i>Total</i>
Σύστημα Τροφοδοσίας						
Σιλό	3.1	1	70,00	50,00		120,00
Φλάντζα Σιλό	3.2	1	30,00	40,00		70,00
Κοχλίας	3.3	1	100,00	150,00		250,00
Φλάντζα (80 mm)	3.4	1	20,00	20,00		40,00
Σωλήνας (50 mm)	3.5	1	60,00	20,00		80,00
Σωλήνας (60 mm)	3.6	1	40,00	20,00		60,00
Κοχλίες (M4x30)		12			0,05	0,55
Κοχλίες (M14x40)		16			0,40	6,40
Περικόχλια (M4)		12			0,03	0,36
Περικόχλια (M14)		16			0,08	1,20
Σφαιρική Βάνα (2")		2			42,00	84,00
Αεριοποιητής						
Κύλινδρος Αντιδραστήρα	3.7	1	180,00	50,00		230,00
Πάνω φλάντζα	3.8	1	50,00	50,00		100,00
Κάτω φλάντζα	3.9	1	70,00	50,00		120,00
Εσχάρα		1	20,00	10,00		30,00
Σωλήνας (0,5")		1			1,50	1,50
Σωλήνας (1")		1			2,50	2,50
Σωλήνας (2")		1			4,50	4,50
Φλάντζα (106 mm)	3.12	1	30,00	15,00		45,00
Κοχλίες (M10x25)		20			0,15	3,00

Περικόχλια (M10)		20			0,04	0,70
Σφαιρική Βάνα (2")		1			42,00	42,00
Σύστημα Καθαρισμού						
Κυκλώνας	3.10	1	30,00	50,00		80,00
Φιλτροθήκη Α	3.11	1	10,00	30,00		40,00
Φιλτροθήκη Β		1	10,00	20,00		30,00
Μεταλλικό Πλέγμα		1		5,00	15,00	20,00
Σωλήνας (1,5")		1			5,50	5,50
Σωλήνας (2")		3		5,00	7,15	36,45
Φλάντζα (106 mm)	3.12	8	30,00	15,00		360,00
Κοχλίες (M10x20)		20			0,14	2,70
Περικόχλια (M10)		20			0,04	0,70
Σφαιρική Βάνα (2")		1			42,00	42,00
Λοιπός Ηλεκτρο-μηχανολογικός Εξοπλισμός						
Κινητήρας (1 HP)		1			98,50	98,50
Γεννήτρια Ρεύματος (6,5 HP)		1			265,00	265,00
Μετρητής Θερμοκρασίας (Κ)		5			15,00	75,00
Μετρητής Πίεσης		4			15,00	60,00
Quartz Wool (5 gr)		2			15,00	30,00
Μονωτικά Φλαντζών		15			2,50	37,50
Συνολικό Κόστος Κατασκευής (€)						2.475,06

3.3. ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

3.3.1. Καύσιμο Αμόλυβδη Βενζίνη

Η γεννήτρια ρεύματος 6,5 HP που επιλέχτηκε έχει μέγιστη απόδοση ίση με 3,5 KVA, λειτουργώντας στο μέγιστο φορτίο της ο κατασκευαστής δίνει κατανάλωση βενζίνης ίση με 1,45 L/h.

Η σύγκριση των καταναλώσεων οφείλει να γίνει στο ίδιο χρονικό διάστημα, δηλαδή στις ώρες λειτουργίας της πειραματικής μονάδας αεριοποίησης βιομάζας, όπως υπολογιστήκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Έτσι για την λειτουργία της γεννήτριας στο διάστημα 2 ÷ 3 h έχουμε κατανάλωση 2,9 με 4,35 L βενζίνης.

Η τιμή της βενζίνης, στις αρχές του μηνά Σεπτέμβρη, κυμάνθηκε στα 1,55 €/L.

Όποτε, το κόστος κατανάλωσης καύσιμου της γεννήτριας θα είναι:

$$1,55 \text{ €/L} * (2,9 \div 4,35 \text{ L}) = \mathbf{4,50 \div 6,74 \text{ €}}$$

3.3.2. Καύσιμο Αέριο Σύνθεσης

Για την λειτουργία της γεννήτριας ρεύματος, στο ίδιο χρονικό διάστημα, απαιτείται παροχή παραγομένου αερίου τουλάχιστον 12 kg/h. Για την παραγωγή αυτού του αερίου, πρέπει να γίνει αεριοποίηση περίπου 4,62 kg/h πελλετών ξύλου.

Έτσι για την λειτουργία της γεννήτριας στο διάστημα 2 ÷ 3 h έχουμε κατανάλωση 9,24 με 13,86 kg πελλετών ξύλου.

Η τιμή λιανικής αγοράς πακέτου 15 kg πελλετών, στις αρχές του μηνά Σεπτέμβρη, κυμάνθηκε στα 4,5 €. Δηλαδή 0,3 €/kg.

Όποτε, το κόστος κατανάλωσης καύσιμου της γεννήτριας θα είναι:

$$0,3 \text{ €/kg} * (9,24 \div 13,86 \text{ kg}) = \mathbf{2,77 \div 4,16 \text{ €}}$$

3.3.3. Συμπεράσματα

Τελικά, έπειτα από τους παραπάνω υπολογισμούς πρόεκυψε ότι το κόστος κατανάλωσης βιομάζας, για την παραγωγή ρεύματος, είναι μειωμένο κατά 62.4% σε σχέση με το αντίστοιχο της βενζίνης. Όποτε, γίνεται κατανοητό ότι η χρήση του παραγομένου αερίου ως καύσιμο της γεννήτριας συμφέρει οικονομικά σε σχέση με αυτήν της βενζίνης (βλ. Παράρτημα 4).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

4.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της εισαγωγής, η βιομάζα αποτελεί μια σημαντική πηγή ενέργειας, η οποία αν αξιοποιηθεί σωστά μπορεί να αποτελέσει τον αντικαταστατή των ορυκτών καυσίμων. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, στην περίοδο κρίσης που διανύουμε, τόσο για την μείωση των εξόδων για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και για την προστασία του περιβάλλοντος.

Η μελέτη που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία έδειξε ότι:

- Η κατασκευή μια μικρής μονάδας αεριοποίησης βιομάζας μπορεί να γίνει εφικτή με ελάχιστα έξοδα και σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα.
- Η παραγωγή ρεύματος, με αεριοποίηση πελλετών ξύλου συμφέρει οικονομικά σε σχέση με αυτήν της καύσης βενζίνης για το ίδιο χρονικό διάστημα.
- Υπάρχει χώρος για την περαιτέρω βελτίωση της συνολικής κατασκευής αλλά και του κάθε υποσυστήματος.
- Η χρήση μιας τέτοιας μονάδας ενδείκνυται για μη αστικά μέρη, αποκομμένα από κεντρικά δίκτυα ηλεκτροδότησης, όπως ορεινά χώρια και νησιά.
- Η επιλογή των διαστάσεων της μονάδας κρίθηκε βάσει των αναμενόμενων αποτελεσμάτων, στο περιθώριο ενός επιτυχούς και ασφαλούς πειράματος.
- Τα υλικά κατασκευής των υποσυστημάτων πληρούν όλες τις προδιαγραφές για τους κινδύνους που περιέχει ένα τέτοιο πείραμα.

4.2. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Το επόμενο βήμα αυτής της εργασίας αποτελεί κυρίως η κατασκευή της μονάδας αυτής, βάσει της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε. Ωστόσο, βασιζόμενοι στην παρούσα ανάλυση, προτείνεται επίσης η εξέλιξη κάποιων υποσυστημάτων για την βελτίωση της διεργασίας της αεριοποίησης και η ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων που θα ακολουθούσουν.

Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται:

- Η κατασκευή και η λειτουργία της πειραματικής εγκατάστασης.
- Η εξέλιξη του συστήματος τροφοδοσίας, ώστε i) να είναι ικανό να παρέχει συνδυασμό πολλών ειδών βιομάζας, ως καύσιμο στον αντιδραστήρα, και ii) να μην υπάρχει πιθανότητα backflow του παραγομένου αερίου προς το δοχείο παραμονής της βιομάζας.
- Η μελέτη των θερμικών απωλειών από τον αντιδραστήρα και ο σχεδιασμός μιας κατάλληλης μονωτικής διάταξης.
- Η μελέτη των θερμοκρασιών και των πιέσεων που αναπτύσσονται κατά την πορεία του αερίου στις σωληνώσεις. Πιθανή η τοποθέτηση ενός εναλλάκτη θερμότητας για περεταίρω μείωση της θερμοκρασίας του αερίου, πριν την είσοδο του στην ΜΕΚ.
- Ανάλυση των πιεσών που παράγονται.
- Ανάλυση του αερίου που παράγεται.
- Σχεδιασμός μιας νέας μεγαλύτερης μονάδας, με στόχο, την αύξηση της παραγόμενης ισχύος σε συνδυασμό με την μείωση του συνολικού κόστους κατασκευής και λειτουργίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Basu P. Biomass Gasification and Pyrolysis, Practical Design and Theory. Elsevier, 2010.
- [2] Babu B.V. Biomass Pyrolysis: A State-of-the-art Review. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2008: p 2:393.
- [3] Renewable Energy Blog, Biomass Energy,
<http://www.solarpowerwindenergy.org/biomass-energy/>
- [4] Φούντη Μ. Θεωρία Καύσης & Συστήματα Καύσης, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2005.
- [5] Αεριοποίηση, Συνέργεια,
www.wtert.gr/201010207/Συνέργεια/Αεριοποίηση.html
- [6] Woodgas.nl,
<http://woodgas.nl/GB/index.html>
- [7] All Power Labs, How Gasification Works,
<http://www.gekgasifier.com/info/gasification-basics/gasification-explained>
- [8] van der Hoeven T.A. Partial Product Gas Combustion for Tar Reduction. Technische Universiteit Eindhoven, 2007.
- [9] Dr. Sadaka S. Gasification. Associate Scientist, Center for Sustainable Environmental Technologies Adjunct Assistant Professor, Department of Agricultural and Biosystems Engineering, Iowa State University.
- [10]. Reed T.B and Das A. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. Colorado: Solar Energy Research Institution Technical Library, 1988.
- [11] Glenlyon Woodfuel Initiative,
<http://glenlyonwoodfuel.blogspot.gr/2010/03/there-are-number-of-features-which-set.html>
- [12] Peakprosperity, Resilient Life,
<http://www.peakprosperity.com/blog/wood-gasification-intriguing-emergency-fuel-source/58332>
- [13] Wikipedia, Combustion,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Combustion>
- [14] Wikipedia, Gasification,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Gasification>
- [15] Biofuel,
<http://biofuel.org.uk/what-is-syngas.html>

- [16] Wikipedia, Tar,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Tar>
- [17] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Wood gas as engine fuel: Mechanical Wood Products Branch, 1986.
- [18] Speight J. Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes. Elsevier, 2011.
- [19] Φασουλόπουλος Κ. Διπλωματική εργασία: Αεριοποίηση βιομάζας σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης και προκαταρκτική μελέτη της χρήσης του παραγόμενου αερίου σε μικροστρόβιλο. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων. Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011.
- [20] Eigenberger G. Fixed Bed Reactors. Institut für Chemische Verfahrenstechnik, Universität Stuttgart, 1992.
- [21] Alakangas E. New European Pellets Standards. EUBIONET III.
- [22] Kythavone S. Promotion of the Efficient Use of Renewable Energies in Developing Countries, Chapter VI Gasification, REEPRO, 2008.
- [23] <http://www.southeastwoodpellets.co.uk>
- [24] Metal Ravne Steel Selector, Steel PK333,
<http://www.metalravne.com/selector/steels/pk333.html>
- [25] Metal Ravne Steel Selector, Steel PK10,
<http://www.metalravne.com/selector/steels/pk10.html>
- [26] Okuga A. Analysis and Operability Optimization of an Updraft Gasifier Unit. Eindhoven University of Technology.
- [27] Keith R. and Cummer R.C.B. Ancillary Equipment for Biomass Gasification, Biomass and Bioenergy Elsevier, Pergamon, 2002.
- [28] Τομαράς Δ. Διπλωματική εργασία: Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο παραγόμενο αέριο από αεριοποίηση βιομάζας σε ρευστοποιημένη κλίνη. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων. Αθήνα, Οκτώβριος 2012.
- [29] Syngas Purification Units From Gasification to Chemicals,
www.airliquide.com
- [30] Southern Research Institute, Syngas Cleaning,
<http://www.southernresearch.org/environment-energy/syngas-cleaning>
- [31] All Power Labs, Final Filtration,
<http://wiki.gekgasifier.com/w/page/36793148/Final%20Filtration%3A%20Paper%2C%20foam%2C%20cotton%20gauze>

- [32] Industrial Ceramic Solutions, Syngas Cleaning,
<http://www.indceramics.com/biomass-power-generation>
- [33] Dr. Rubow K.L, Huang B, Wilson M. and Mahon E. Hot Gas Filtration Using Sintered Metal Filters. Mott Corporation, 2006.
- [34] Gibson L. Sufficiently cleansing and efficiently reforming syngas are complicated elements of gasification for biofuels production and continued research seeks to optimize both. Biomass Magazine, February 2010,
<http://biomassmagazine.com/articles/3451/syngas-tasks>
- [35] Hasler P. and Nussbaumer Th. Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification. Biomass and Bioenergy, 1999: p 16:385.
- [36] Wang L. Theoretical Study of Cyclone Design. Office of Graduate Studies of Texas A&M University, 2004.
- [37] Cooper C.C. and Alley G.C. A Design Approach. Prospect Heights: Waveland Press, Inc, 1994.
- [38] Lapple C.E. Processes use Many Collector Types. Chemical Engineering Science, 1951: p 58:144.
- [39] Parnell C.B.J. Cyclone Design for Cotton Gins, 1990.
- [40] Neundorfer, Baghouse/Fabric Filter,
http://www.neundorfer.com/knowledge_base/baghouse_fabric_filters.aspx
- [41] WiseGeek, What Is a Wet Scrubber,
<http://www.wisegeek.com/what-is-a-wet-scrubber.htm>
- [42] Wikipedia, Spray Tower,
http://en.wikipedia.org/wiki/Spray_tower
- [43] Wikipedia, Cyclonic spray scrubber,
http://en.wikipedia.org/wiki/Cyclonic_spray_scrubber
- [44] Wikipedia, Venturi scrubber,
http://en.wikipedia.org/wiki/Venturi_scrubber
- [45] GES Insulations, Ατμοηλεκτρικές μονάδες, Ηλεκτροστατικά φίλτρα,
<http://www.ges-ins.com/index/gr/industrial-applications/steam-electric-power-plants/electrostatic-precipitators.php>
- [46] Wikipedia, Electrostatic precipitator,
http://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_precipitator
- [47] Wikipedia, Electric generator,
http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_generator
- [48] Energy Efficiency, How do generators produce electricity,
http://www.hk-phy.org/energy/power/act_ac_gen_e.html

[49] Klinger Australia,

<http://www.klinger.com.au>

[50] The Quartz Corporation, France,

<http://www.thequartzcorp.com/en/applications/quartz-wool.html>

[51] KDtools, Γεννητριες,

<http://www.kdtools.gr/KUMATSUGEN>

[52] Thermometrics Corporation,

<http://www.thermometricscorp.com/thermocouple.html>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Απόσταση

$$1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$$

$$1 \text{ m} = 39.37 \text{ in}$$

$$1 \text{ in} = 25.4 \text{ mm}$$

Χρόνος

$$1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ sec}$$

Ισχύς

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Joule/sec}$$

$$1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$$

$$1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$$

$$1 \text{ HP} = 0.7355 \text{ kW}$$

Μάζα

$$1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$$

Όγκος

$$1 \text{ m}^3 = 10^9 \text{ mm}^3$$

Θερμοκρασία

$$1^{\circ}\text{C} = 274.15 \text{ K}$$

Πίεση

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

Δεδομένα

Μοριακά Βάρη

- Βιομάζα (Πελλετ): C, H(1.4), O(0.6) = 23.
- Αέρας: N₂ (78%), O₂ (21%), CO₂ (0.03%) = 29.
- CO = 28 (σ.σ: σχεδόν ίσο με του αέρα το οποίο καθιστά το μονοξείδιο του άνθρακα πολύ επικίνδυνο για τον άνθρωπο).
- Νερό (ή ατμός) = 18.
- Αέριο σύνθεσης = 28 (Θεωρώντας ένα τυπικό μίγμα: 20% CO (=28), 10% H₂ (=2), 15% CO₂ (=44) και 55% N₂ (=28)).

Πυκνότητες (σε θερμοκρασία 20°C και πίεση 1 atm)

- Αέρας: 1,205 kg/m³.
- Πελλετ: 1000 kg/m³.
- Αέριο σύνθεσης: 0,950 kg/m³.

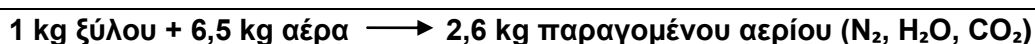
Στοιχειομετρία Καύσης και Αεριοποίησης

Για την πλήρη καύση 1 kg ξηρού ξύλου (0% υγρασίας) χρειάζονται περίπου 6,5 kg αέρα. Αύτη η τιμή αναφέρεται ως στοιχειομετρικό αναλόγιο αέρα καύσης. Ένας τυπικός καυστήρας ξύλου ενδέχεται να χρησιμοποιήσει το 150% του απαιτούμενου αέρα, το οποίο αναφέρεται και ως 50% περίσσεια αέρα, έτσι η αναλόγιο θα γίνει 9,75 kg αέρα ανά kg καύσιμου.

Στις αντιδράσεις της αεριοποίησης, η συνήθης πρακτική είναι να δίνεται ο λόγος ισοδυναμίας (equivalence ratio ή ER). Στην περίπτωση των ξηρών καυσίμων, υψηλές αποδόσεις επιτυγχάνονται με λόγους κοντά στο 0,25, με το τυπικό εύρος του λογιού ισοδυναμίας να κυμαίνεται από 0,20 έως και 0,33. Βασικοί λόγοι που απαιτούν λόγο μεγαλύτερο του 0,25 αποτελούν κυρίως οι θερμικά αναποτελεσματικοί αεριοποίητες, οι οποίοι έχουν μεγάλες απώλειες και η χρήση καυσίμων με μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία, όπου χρειάζεται επιπλέον αέρας για μερική καύση και μείωση της υγρασίας.

Στην αεριοποίηση, σπάμε την διαδικασία της καύσης σε δυο βήματα:

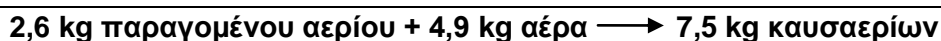
- I. Διάσπαση του ξύλου και παραγωγή του αερίου σύνθεσης:



Αν η αεριοποίηση γίνει με λόγο ισοδυναμίας 0,25 ο απαιτούμενος αέρας είναι:

$$(0,25 \cdot 6,5 =) 1,6 \text{ kg ανά kg καύσιμου.}$$

- II. Καύση του παραγομένου αερίου:



Η καύση του αερίου γίνεται με τον υπόλοιπο αέρα:

$$(0,75 \cdot 6,5 =) 4,9 \text{ kg ανά kg καύσιμου.}$$

Σύνοψη

Για την αεριοποίηση 1 kg βιομάζας απαιτείται 1,6 kg αέρα. Το παραγόμενο αέριο έχει μάζα 2,6 kg.

- 1,6 kg αέρα = 1,328 m³.
- 2,5 kg αερίου σύνθεσης = 2,738 m³.
- Αναλογία εισερχομένου αέρα με εξερχόμενο αέριο = 0,485:1 (ή 1:2,062).

Όποτε ως γενικός κανόνας, προκύπτει ότι ο όγκος του παραγομένου αέρα είναι δυο φορές του όγκου του εισερχομένου αέρα (σε σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΥ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΥΨΟΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΗ

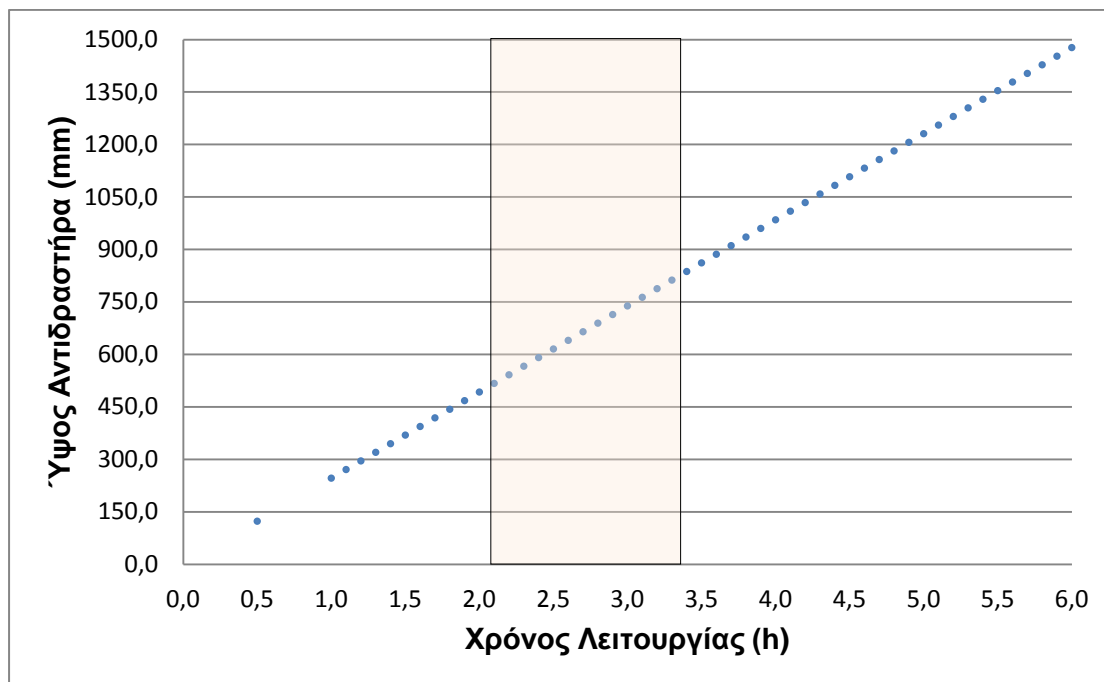
Ο υπολογισμός του ύψους του αεριοποιητή εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής του καύσιμου μέσα στον αντιδραστήρα, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εξίσωση:

$$H = \frac{SGR \cdot T}{\rho_{fuel}}$$

Όπου:

- H : Το ύψος του αντιδραστήρα, σε m.
- SGR : Ο ειδικός βαθμός αεριοποίησης καύσιμου, ίσος με 0,0444 kg/sec m².
- T : Ο χρόνος παραμονής του καύσιμου, σε s.
- ρ_{fuel} : Η φαινομενική πυκνότητα του καύσιμου, ίση με 650 kg/m³.

Για τον καθορισμό του χρόνου αυτού έγιναν δοκιμές και πρόεκυψε το ακόλουθο διάγραμμα:



Οπού τελικά, όπως φαίνεται και στην μαρκαρισμένη περιοχή του διαγράμματος, προκύπτει ότι για μια αποτελεσματική αεριοποίηση πελλετών ξύλου το βέλτιστο εύρος χρονικής διάρκειας ήταν 2,1 με 3,3 hr, και επιλέχτηκε ύψος αεριοποιητή ίσο με 858 mm.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Ο υπολογισμός του κόστους κατανάλωσης καύσιμου της γεννήτριας ρεύματος, βασίστηκε στην παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Συνολικό Κόστος (€)} = \text{Χρόνος (h)} \times \text{Κατανάλωση Καύσιμου (kg/h)} \times \text{Κόστος Καύσιμου (€/kg)}$$

- I. Κόστος Βενζίνης: **1,55 €/L**.
Κατανάλωση Βενζίνης: **1,45 L/h**.
- II. Κόστος Πελλετών Ξύλου: **0,3 €/kg**.
Κατανάλωση Βιομάζας: **4,62 kg/h**.

Θεωρώντας σταθερές την τιμή της κατανάλωσης καύσιμου και το κόστος του καύσιμου, για τις δυο περιπτώσεις αντίστοιχα, έγιναν δόκιμες για τις διάφορες ώρες λειτουργίας, και προέκυψε το ακόλουθο διάγραμμα:

