



---

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Εργαστήριο Ατμοπαραγωγών & Θερμικών εγκαταστάσεων

---

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***«ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ  
ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ  
ΑΠΟ ΣΤΕΡΕΟ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟ»***

**Του Φοιτητή**

Γεωργίου Πανούση

**Επιβλέπων**

Εμμανουήλ Κακαράς, Καθηγητής,  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

---

Αθήνα, Ιούλιος 2009

## Πρόλογος

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας περατώνονται οι σπουδές μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Εμμανουήλ Κακαρά, καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π , τόσο για τις γνώσεις που έλαβα από αυτόν κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών, όσο και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης ευχαριστώ τον Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό Σωτήριο Καρέλλα για την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας αλλά και για την ουσιαστική συμβολή του προς την κατεύθυνση της ολοκλήρωσης της. Ακόμη οφείλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π Μιχάλη Αγρανιώτη για την βοήθεια που μου πρόσφερε οποιαδήποτε στιγμή του τη ζήτησα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Δημήτριο και Κωνσταντίνα που με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου τόσο ηθικά όσο και υλικά και βρίσκονται πάντα δίπλα μου στις εύκολες και δύσκολες στιγμές μου.

*Πάνουσης Γεώργιος*

## Περίληψη

Η διαχείριση των αστικών απορριμμάτων και η σημερινή παγκόσμια κατάσταση όσον αφορά την κρίση στις ενεργειακές πηγές αποτελούν σημαντικά προβλήματα. Η τεχνολογία θερμικής αξιοποίησης, που εφαρμόζεται στα αστικά απορρίμματα θεωρείται ως μία από τις καλύτερες προσεγγίσεις για να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την ταφή τους σε χωματερές, ενώ παράλληλα η ανάκτηση ενέργειας από αυτά συμβάλλει στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων. Παρόλο που η καύση είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος θερμικής αξιοποίησης, άλλες τεχνολογίες όπως η πυρόλυση και η αεριοποίηση έχουν αναπτυχθεί στον τομέα της ανάκτησης ενέργειας από βιομάζα και υπολείμματα. Η τεχνολογία της αεριοποίησης έχει εφαρμοστεί στη βιομάζα τόσο σε πιλοτική όσο και σε εμπορική κλίμακα με επιχορηγήσεις από διάφορα κράτη, αφού η βιομάζα θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας, παρόλα αυτά, δεν έχει προοδεύσει στον τομέα των απορριμμάτων, καθώς υπάρχουν ανησυχίες για την αξιοπιστία του συστήματος καθαρισμού του παραγόμενου αερίου, αλλά και για την οικονομική βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος. Το στερεό ανακτηθέν καύσιμο (SRF ή RDF) που λαμβάνεται ύστερα από μηχανική και βιολογική επεξεργασία των απορριμμάτων με σκοπό τη βελτίωση των φυσικών ιδιοτήτων και των ιδιοτήτων καύσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως απευθείας στερεό καύσιμο, είτε να υποστεί αεριοποίηση όπου το αέριο σύνθεσης (syngas) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αέριο καύσιμο σε αντίστοιχες μηχανές. Το βασικό πλεονέκτημα της μετατροπής του RDF σε αέριο καύσιμο σε σύγκριση με την απευθείας καύση του είναι η χρήση του σε υψηλού βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγικό σύστημα. Στην παρούσα διπλωματική έγινε μια προσπάθεια δημιουργίας ενός απλού μοντέλου αεριοποίησης του στερεού δευτερογενούς καυσίμου Stabilat® της εταιρίας Herhof GmbH στηριγμένο στη χημική ισορροπία με βάση βιβλιογραφικές αναφορές. Εν συνεχεία ακολούθησε η σύζευξη αυτού του μοντέλου με συστήματα παραγωγής ενέργειας με κύκλο ατμού και με χρήση μικροτουρμπίνας. Τέλος πραγματοποιήθηκε και μια εξεργειακή ανάλυση των παραπάνω συστημάτων.

Λέξεις κλειδιά: Αεριοποίηση, Συμπαραγωγή, Αστικά Απορρίμματα, RDF/SRF, Κύκλος Ατμού, Μικροτουρμπίνα.

## Abstract

The management of municipal solid waste (MSW) and the current status of world energy resources are important problems. The technology of thermal treatment that is applied in MSW is considered to be one of the best approaches in order to be reduced the environmental impacts from their land filling, while the energy recovery contribute to energy resources saving. Although incineration is the most widespread method concerning the thermal treatment of MSW other approaches such as pyrolysis and gasification have been developed in the field of energy recovery from biomass and residues. Technology of biomass gasification has been tested in demonstration and commercial scale in many countries, as biomass is considered a renewable energy source. But the application of this technology in MSW does not have a significant progress because of the concerns that are raised about the reliability of the gas cleaning system and the financial feasibility of such system. Solid recovered fuel (SRF or RDF) that produced after the mechanical and biological treatment of waste can be used directly as solid fuel or can be gasified in order to produce gaseous fuel. The main advantage of conversion of RDF in gaseous fuel ,comparatively with its direct combustion, is its use in higher efficiencies energy production systems. In this diploma thesis a thermodynamic equilibrium model for the gasification of solid recovered fuel Stabilat®, based on equilibrium constants according to the literature ,was developed. Then an integration of that model with energy production systems was tried. Finally an exergetic analysis of the above systems was implemented.

Key words: Gasification, Combined heat and power, Municipal Solid Wastes, SRF/RDF, Steam cycles, Microturbines.

## Περιεχόμενα

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>1</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	<b>4</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>7</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ &amp; ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ</b> .....	<b>9</b>
2.1 Εισαγωγή στη συμπαγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού .....	<b>9</b>
2.2 Η Συμπαγωγή στην Ευρωπαϊκή ένωση .....	<b>12</b>
2.3 Οι επιπτώσεις από τη συμπαγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού .....	<b>15</b>
2.3.1 Γενικά.....	15
2.3.2 Θετικές επιπτώσεις .....	15
2.3.3 Αρνητικές επιπτώσεις.....	17
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-ΣΤΕΡΕΟ ΑΝΑΚΤΗΘΕΝ ΚΑΥΣΙΜΟ ΑΠΟ ΑΣΤΙΚΑ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΑ</b> .....	<b>18</b>
3.1 Εισαγωγή .....	<b>18</b>
3.2 Παραγωγή στερεού ανακτηθέντος καυσίμου .....	<b>18</b>
3.3 Το καύσιμο Stabilat <sup>®</sup> από την Herhof GmbH.....	<b>20</b>
3.4 Κοινωνική στρατηγική για τα αστικά απόβλητα .....	<b>27</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΕΡΕΟΥ ΑΝΑΚΤΗΘΕΝΤΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ</b> .....	<b>29</b>
4.1 Γενικά περί αεριοποίησης .....	<b>29</b>
4.1.1 Ορισμός – αρχές διεργασίας .....	29
4.1.2 Η ποιότητα του παραγόμενου αερίου .....	31
4.2 Αντιδραστήρες αεριοποίησης.....	<b>33</b>
4.2.1 Αεριοποιητές σταθερής κλίνης (fixed bed gasifiers).....	33
4.2.2 αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης (fluidised bed gasifiers) .....	38
4.2.3 Αλλοθερμικοί αντιδραστήρες αεριοποίησης (indirect gasifiers).....	40

4.3 Ανάπτυξη μοντέλου αεριοποίησης .....	42
4.3.1 Περιγραφή μοντέλου .....	42
4.3.2 Εγκυρότητα μοντέλου αεριοποίησης .....	46
4.4 Καθαρισμός του παραγόμενου αερίου .....	47
4.4.1 Τεχνικές επεξεργασίας του παραγόμενου αερίου .....	48
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ STABILAT® .....</b>	<b>51</b>
5.1 Εισαγωγή .....	51
5.2 Συστήματα κύκλου Rankine νερού - υδρατμού .....	51
5.2.1 Γενικά .....	51
5.2.2 Περιγραφή λειτουργίας κύκλου Rankine .....	52
5.2.3 Επίδραση παραμέτρων κύκλου στις επιδόσεις .....	55
5.2.4 Παραλλαγές – τρόποι βελτίωσης του κύκλου .....	59
5.3 Τμήματα ατμοηλεκτρικής εγκατάστασης .....	59
5.3.1 Ατμοπαραγωγός .....	59
5.3.2 Αντλίες .....	64
5.3.3 Συμπυκνωτής και ψυκτικός πύργος .....	65
5.3.4 Ατμοστρόβιλος .....	68
5.3.5 Παλινδρομική μηχανή ατμού .....	72
5.3.6 Απαεριωτής .....	74
5.4 Παραγωγή ενέργειας με μικροτουρμπίνα .....	76
5.4.1 Γενικά .....	76
5.4.2 Περιγραφή λειτουργίας .....	77
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6-ΕΞΕΡΓΕΙΑ .....</b>	<b>81</b>
6.1 Η ποιότητα της ενέργειας .....	81
6.2 Η έννοια της εξέργειας .....	83
6.3 Εξέργεια έργου και θερμότητας .....	84
6.3.1 Εξέργεια έργου .....	84
6.3.2 Θερμική εξέργεια .....	84
6.4 Εξέργεια συστήματος .....	85
6.4.1 Ορισμός .....	85
6.4.2 Συνιστώσες εξέργειας συστήματος .....	85
6.5 Εξέργεια ροής .....	86
6.5.1 Ορισμός .....	86
6.5.2 Συνιστώσες εξέργειας ροής .....	87

6.6 Χημική εξέργεια .....	89
6.6.1 Ορισμός .....	89
6.6.2 Χημική εξέργεια μίγματος .....	90
6.6.3 Χημική εξέργεια στερεών και υγρών καυσίμων .....	91
6.7 Κριτήρια αποδοτικότητας με βάση την εξέργεια .....	92
6.7.1 Διατύπωση ισολογισμού εξέργειας .....	93
.....	93
6.7.2 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης	
6.7.3 Εννοιολογική διαφορά μεταξύ ενεργειακού και εξεργειακού βαθμού απόδοσης.	94
6.7.4 Άλλα μεγέθη της εξεργειακής ανάλυσης .....	94
6.7.5 Παραδείγματα εξεργειακού βαθμού απόδοσης συστημάτων (ή υποσυστημάτων).	
.....	96
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7-ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ STABILAT® .....</b>	<b>101</b>
7.1 Εισαγωγή .....	101
7.2 Παραγωγή ενέργειας με χρήση κύκλου νερού – υδρατμού 2 βαθμών ελευθερίας.	101
7.2.1 Περιγραφή και επιδόσεις συστήματος .....	101
7.2.2 Επίδραση παραμέτρων στις επιδόσεις του συστήματος .....	105
7.2.3 Εξεργειακή ανάλυση συστήματος .....	108
7.3 Παραγωγή ενέργειας με κύκλο νερού-υδρατμού 1 βαθμού ελευθερίας .....	113
7.3.2 Περιγραφή συστήματος .....	113
7.3.3 Εξεργειακή ανάλυση συστήματος .....	115
7.4 Παραγωγή ενέργειας με χρήση μικροτουρμπίνας .....	117
7.4.1 Περιγραφή και επιδόσεις συστήματος .....	117
7.4.2 Εξεργειακή ανάλυση συστήματος .....	121
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 .....</b>	<b>124</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>127</b>

## Κεφάλαιο 1

### Εισαγωγή

Η ενέργεια επηρεάζει κάθε πτυχή της ζωής μας. Χρειαζόμαστε ενέργεια για να ζεστάνουμε, να δροσίσουμε και να φωτίσουμε τα σπίτια μας όπως επίσης για να μαγειρέψουμε ή να ψύξουμε την τροφή μας. Η ενέργεια τροφοδοτεί τα αυτοκίνητα μας και όλα τα μέσα μεταφοράς. Ενέργεια χρειάζονται οι βιομηχανίες μας, τα γραφεία μας και οι υπόλοιποι χώροι εργασίας μας. Σήμερα στην βιομηχανική κοινωνία μας αυτή η ενέργεια παράγεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) και σε μικρότερο βαθμό από υδροηλεκτρικά και πυρηνική ενέργεια. Τα ορυκτά καύσιμα φαίνονται να είναι άφθονα, φθηνά και άμεσα διαθέσιμα. Αν εξαιρέσουμε τους φόρους, ένα λίτρο βενζίνης κοστίζει όσο ένα λίτρο εμφιαλωμένου νερού. Ανοίγουμε τις συσκευές μας και τα φώτα μόνο με ένα διακόπτη χωρίς να δίνουμε σημασία στο πως παράγεται αυτή η ενέργεια που χρησιμοποιούμε, ή τις επιπτώσεις που έχουμε από την παραγωγή της. Γεμίζουμε τα ντεπόζιτα των αυτοκινήτων μας χωρίς να ενδιαφερόμαστε από πού προέρχεται το καύσιμο ή τις συνέπειες που έχει η εντατική του χρήση. Η χρήση ενεργειακών πηγών χαρακτηρίζει όμως τους ανθρώπινους πολιτισμούς πολύ πριν την εμφάνιση των βιομηχανικών κοινωνιών. Για σχεδόν 500.000 χρόνια οι άνθρωποι χρησιμοποίησαν τη φωτιά του ξύλου για να ζεσταίνονται, να φωτίζονται και να μαγειρεύουν την τροφή τους. Αργότερα η φωτιά χρησιμοποιήθηκε για την εξόρυξη και τη χρήση μετάλλων, για την κατασκευή πήλινων αγγείων και τούβλων. Χρησιμοποιήθηκε δηλαδή καύσιμο για να παρέχει θερμότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες για την άνεση και εξυπηρέτηση των ανθρώπων και σε υψηλές θερμοκρασίες για την παραγωγή φωτισμού και τη δημιουργία χημικών ή φυσικών αλλαγών στα υλικά για να τα καταστήσει πιο χρήσιμα. Τα ζώα χρησιμοποιήθηκαν για έλξη από την αρχή της αγροτικής εκμετάλλευσης. Ο αέρας χρησιμοποιήθηκε για την κίνηση πλοίων και ανεμόμυλων. Με άλλα λόγια οι φυσικές δυνάμεις χρησιμοποιήθηκαν κατά διάρκεια πολλών αιώνων και σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Αυτές οι τρεις κατηγορίες χρήσης: θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών για την ανθρώπινη άνεση, θερμότητα υψηλών θερμοκρασιών για φωτισμό και την επεξεργασία υλικών και δύναμη εφαρμοζόμενη για τη δημιουργία κίνησης είναι ακόμη και σήμερα οι κυρίαρχες κατηγορίες ενεργειακής χρήσης.



Η αλλαγή που οδήγησε τις σημερινές ανεπτυγμένες κοινωνίες στη παρούσα χρήση καυσίμων και την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα ,άρχισε και ήταν άρρηκτα συνδεδεμένη με τη βιομηχανική επανάσταση.

Με την εφεύρεση της ατμομηχανής ,ο άνθρακας άρχισε να υποκαθιστά το νερό και τον αέρα ως ενεργειακή πηγή. Κατά τη διάρκεια του 19<sup>ου</sup> αιώνα ο συνδυασμός ορυχείων άνθρακα που παρείχαν το καύσιμο και οι ατμομηχανές που χρησιμοποιούνταν στις μεταφορές τροφοδότησαν την βιομηχανοποίηση . Στη συνέχεια η πρόοδος ήταν αλματώδης με τις μηχανές εσωτερικής καύσης και την χρήση του ηλεκτρισμού , καθώς βασική επιδίωξη ήταν η διαρκής αύξηση του όγκου και του ρυθμού παραγωγής αγαθών για ικανοποίηση, υπαρκτών ή πλασματικών, παλαιών και διαμορφούμενων νέων αναγκών. Έτσι άρχισε να αναπτύσσεται μια άμεση εξάρτηση μεταξύ της ανάπτυξης των κοινωνιών και των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων· η ύπαρξη πολυάριθμων ενεργειακών πηγών, που ήταν δυνατό να αξιοποιηθούν με την υπάρχουσα τεχνολογία της εκάστοτε εποχής, πυροδοτούσε μια ταχύτατη ανάπτυξη. Η ανάπτυξη αυτή συχνά οδηγούσε σε υπερεκμετάλλευση των ενεργειακών πηγών και σε αναζήτηση νέων πηγών ή νέων τεχνολογιών, ενώ πολλές φορές αποτέλεσε αιτία διαμάχης μεταξύ κρατών.

Φτάνοντας στο σήμερα ,στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα οι ανάγκες για ενέργεια έχουν πολλαπλασιαστεί και είναι μεγάλες όσο ποτέ άλλοτε λόγω της ανάπτυξης των κοινωνιών αλλά κυρίως λόγω της αλόγιστης σπατάλης της. Το σίγουρο είναι ότι ο άνθρωπος έχει αρχίσει να αντιλαμβάνεται ότι οι ενεργειακές πηγές γύρω του δεν είναι ανεξάντλητες αλλά θα πρέπει να τις χρησιμοποιήσει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη φειδώ και ταυτόχρονα να αναπτύξει τεχνολογίες που να αξιοποιούν καλύτερα τα διαθέσιμα ενεργειακά αποθέματα καθώς και τεχνολογίες που στηρίζονται σε ανανεώσιμες/εναλλακτικές πηγές ενέργειας ενώ παράλληλα πρέπει να στοχεύει στη ελάχιστη δυνατή περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι δυο παραπάνω στόχοι, δηλαδή εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων και περιορισμός των ρύπων, είναι αναγκαίο η ενέργεια να παράγεται με μεθόδους όσο το δυνατό μεγαλύτερου βαθμού απόδοσης αλλά και με χρήση τεχνολογιών που συντελούν στη μείωση των εκπομπών. Η ενεργειακή αξιοποίηση των απορριμμάτων στοχεύει προς αυτή την κατεύθυνση αφού η εκμετάλλευση τους συντελεί στην εξοικονόμηση φυσικών πηγών ενέργειας, ενώ προηγμένες τεχνικές θερμικής επεξεργασίας τους όπως η πυρόλυση και η αεριοποίηση μπορούν να συνδυαστούν με συστήματα παραγωγής ενέργειας υψηλής απόδοσης.

## Κεφάλαιο 2

# Συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού

### 2.1 Εισαγωγή στη συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού

Ο συμβατικός τρόπος κάλυψης των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων ενός καταναλωτή (ή μιας ομάδας καταναλωτών) είναι η αγορά ηλεκτρισμού από το εθνικό δίκτυο και η καύση κάποιου καυσίμου (σε λέβητα, κλίβανο, κ.λπ.) για την παραγωγή θερμότητας. Όμως, η ολική κατανάλωση καυσίμων μειώνεται σημαντικά εάν εφαρμοσθεί η Συμπαραγωγή (στα Αγγλικά: Cogeneration ή Combined Heat and Power, CHP).

*Συμπαραγωγή είναι η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής (ή μηχανικής) και θερμικής ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας.*

Διευκρινίζεται ότι η θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη ή κλιματισμό. Η ψύξη ή ο κλιματισμός επιτυγχάνονται με μηχανές απορρόφησης, που λειτουργούν με ατμό ή θερμό νερό.

Κατά τη λειτουργία ενός συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού, μεγάλα ποσά θερμότητας αποβάλλονται στο περιβάλλον είτε μέσω των ψυκτικών κυκλωμάτων (συμπυκνωμάτων ατμού, πύργων ψύξης, ψυγείων νερού κινητήρων Diesel, κ.λπ.) είτε μέσω των καυσαερίων (αεριοστροβίλων, κινητήρων Diesel, κινητήρων Otto, κ.λπ.). Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της θερμότητας μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα. Έτσι, ενώ οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής έχουν βαθμό απόδοσης 30-45%, ο βαθμός απόδοσης των συστημάτων συμπαραγωγής φθάνει το 80-85%. Μια τυπική σύγκριση, ως προς τον βαθμό απόδοσης, της συμπαραγωγής με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας παρουσιάζει το Σχήμα 1.

Η Συμπαραγωγή πρωτοεμφανίστηκε στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α. γύρω στα 1890. Κατά τις πρώτες δεκαετίες του 20ού αιώνα, οι περισσότερες βιομηχανίες είχαν δικές τους μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με ατμολέβητα-στρόβιλο, που λειτουργούσαν με άνθρακα. Πολλές από τις μονάδες αυτές ήταν συμπαραγωγικές.

Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι περίπου το 58% του ηλεκτρισμού, που παραγόταν σε βιομηχανίες των Η.Π.Α. στις αρχές του αιώνα, προερχόταν από μονάδες συμπαραγωγής.

Κατόπιν ακολούθησε κάμψη κυρίως για δύο λόγους:

α) ανάπτυξη των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρισμού, που προσέφεραν σχετικά φθηνή και αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια, και

β) διαθεσιμότητα υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου σε χαμηλές τιμές, που έκανε τη λειτουργία λεβήτων οικονομικά συμφέρουσα.

Συνεχίζοντας με το παράδειγμα των Η.Π.Α., η βιομηχανική συμπαραγωγή μειώθηκε στο 15% του όλου δυναμικού ηλεκτροπαραγωγής μέχρι το 1950 και έπεσε στο 5% μέχρι το 1974. Η πορεία αυτή έχει πλέον αντιστραφεί όχι μόνον στις Η.Π.Α. αλλά και σε χώρες της Ευρώπης, στην Ιαπωνία κ.α., γεγονός το οποίο οφείλεται κυρίως στην απότομη αύξηση των τιμών των καυσίμων, από το 1973 και μετά.



(α) Συμβατικό σύστημα παραγωγής ενέργειας



(β) Σύστημα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας

### Σχήμα 2.1 : Σχηματική αναπαράσταση συμπαραγωγής

Η ανοδική πορεία στη διάδοση της συμπαραγωγής συνοδεύτηκε και από αξιοσημείωτη πρόοδο της σχετικής τεχνολογίας. Οι βελτιώσεις και εξελίξεις συνεχίζονται και νέες τεχνικές αναπτύσσονται και δοκιμάζονται, αλλά ήδη η συμπαραγωγή έχει φθάσει σε επίπεδο ωριμότητας με αποδεδειγμένη

αποδοτικότητα και αξιοπιστία. Μια μεγάλη ποικιλία συστημάτων, από πλευράς είδους, μεγέθους και λειτουργικών χαρακτηριστικών, είναι διαθέσιμη.

Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, που επιτυγχάνεται με τη συμπαραγωγή, συντελεί, εν γένει, σε μείωση και των εκπεμπόμενων ρύπων. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ενδεχόμενη η αύξηση των ρύπων σε τοπική κλίμακα, γεγονός το οποίο επιβάλλει ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του είδους της μονάδας και του πρόσθετου εξοπλισμού της.

Οι εφαρμογές της συμπαραγωγής διακρίνονται σε τέσσερις κύριους τομείς: σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας, βιομηχανικός, εμπορικός -κτιριακός και αγροτικός τομέας.

Η συμπαραγωγή στον τομέα των μεταφορών είναι πλέον κάτι αυτονόητο: π.χ., ο κινητήρας ενός αυτοκινήτου ή πλοίου καλύπτει τις ανάγκες σε μηχανικό έργο, ηλεκτρισμό και θερμότητα, η οποία ανακτάται από τα ψυκτικά κυκλώματα ή και τα καυσαέρια.

Η εξοικονόμηση ενέργειας και η μείωση (τουλάχιστον σε σφαιρική κλίμακα) των ρύπων ίσως δεν είναι αρκετά κίνητρα για μια επένδυση σε σύστημα συμπαραγωγής, εάν και η ίδια η επένδυση δεν είναι οικονομικά βιώσιμη.

Η μεγάλη σημασία που έχει η συμπαραγωγή στην εξοικονόμηση φυσικών και οικονομικών πόρων αλλά και το γεγονός ότι η λειτουργία των συστημάτων έχει άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρισμού μιας χώρας, είναι αιτίες ώστε η συμπαραγωγή να αποτελεί αντικείμενο νομοθετικών, οικονομικών, και άλλων ρυθμίσεων εκ μέρους της πολιτείας.

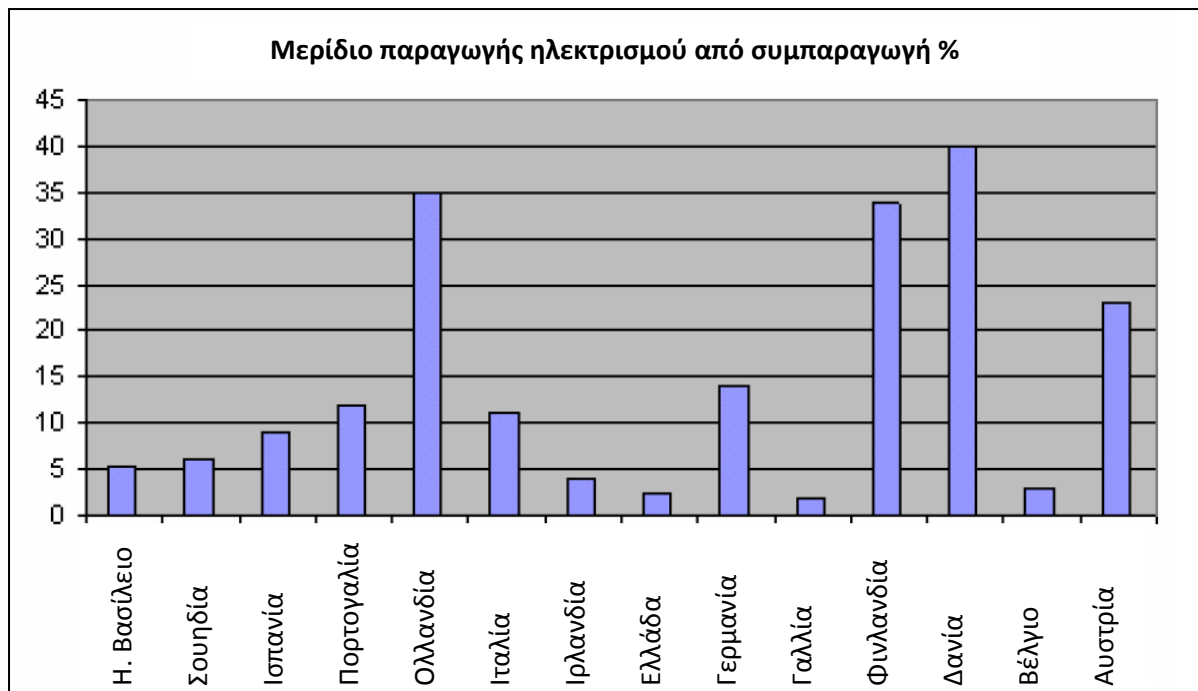
Από την άλλη πλευρά, η εξεύρεση πόρων για τις σχετικές επενδύσεις και οι οικονομικές συνθήκες, κάτω από τις οποίες θα λειτουργήσει μια μονάδα συμπαραγωγής, είναι κρίσιμης σημασίας για την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης.

## 2.2 Η Συμπαραγωγή στην Ευρωπαϊκή ένωση

Η συμπαραγωγή στην αγορά ενέργειας της Ευρώπης ποικίλει σημαντικά. Το μερίδιο στην παραγωγή ηλεκτρισμού διαφέρει ανάμεσα στις ευρωπαϊκές χώρες, όπως επίσης διαφέρει και ο τρόπος και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται.

Στις ευρωπαϊκές χώρες η συμπαραγωγή κατέχει μόνο το 10 % της συνολικής παραγωγής ηλεκτρισμού. Ενδεικτικό στοιχείο που δείχνει την ανομοιομορφία της διείσδυσης της συμπαραγωγής στην αγορά ενέργειας της κάθε χώρας είναι το γεγονός ότι στην Ολλανδία και στην Δανία οι μέθοδοι συμπαραγωγής συνεισφέρουν πάνω από 30 % στη ζήτηση ηλεκτρισμού ενώ σε χώρες όπως η Γαλλία και η Ελλάδα το ποσοστό αυτό είναι λιγότερο από το 5 %.

Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας που δείχνει το μερίδιο της συμπαραγωγής στην ηλεκτροπαραγωγή μερικών ευρωπαϊκών χωρών.



**Διάγραμμα 2.1 :** Μερίδιο ηλεκτροπαραγωγής από συμπαραγωγή

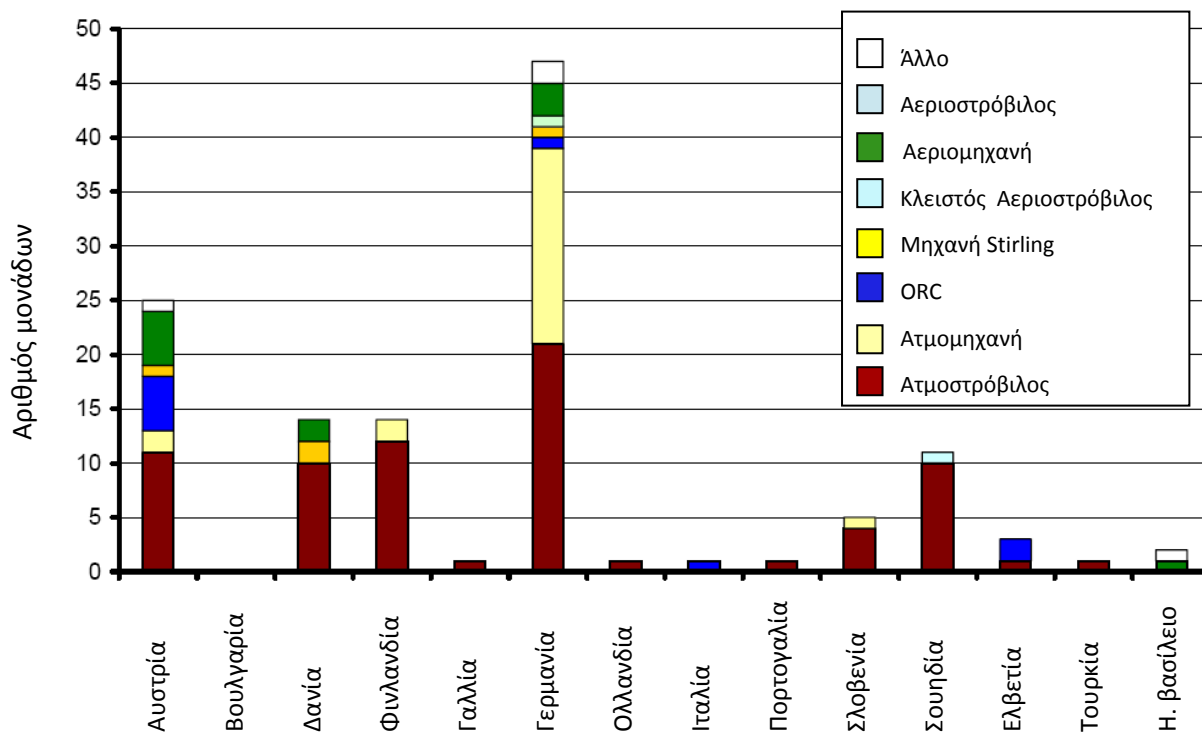
Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα οι τρόποι συμπαραγωγής διαφέρουν σημαντικά. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο διαθέσιμο καύσιμο και στην αποδοτικότητα του εκάστοτε συστήματος. Ενδεικτικά οι τεχνικές συμπαραγωγής είναι

- Συστήματα ατμοστροβίλου
- Συστήματα αεριοστροβίλου
- Συστήματα συνδυασμένου κύκλου
- Συστήματα με εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσεως

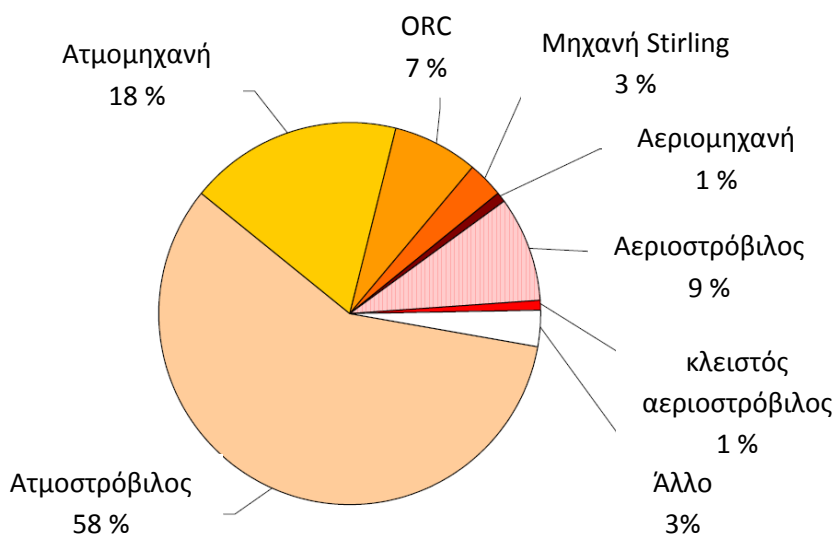
Συμπαγωγικά συστήματα αξιοποίησης παραγόμενου αερίου από στερεό δευτερογενές καύσιμο

- Συστήματα με ατμομηχανές
- Συστήματα με οργανικό κύκλο Rankine
- Συστήματα με μηχανές Stirling
- Συστήματα κυψελών καυσίμου
- Συστήματα με μικροτουρμπίνες

Στα επόμενα γράφηματα παρουσιάζεται η χρήση των διαθέσιμων τεχνικών στις χώρες της ευρωπαϊκής ένωσης καθώς και το ποσοστό χρήσης τους.



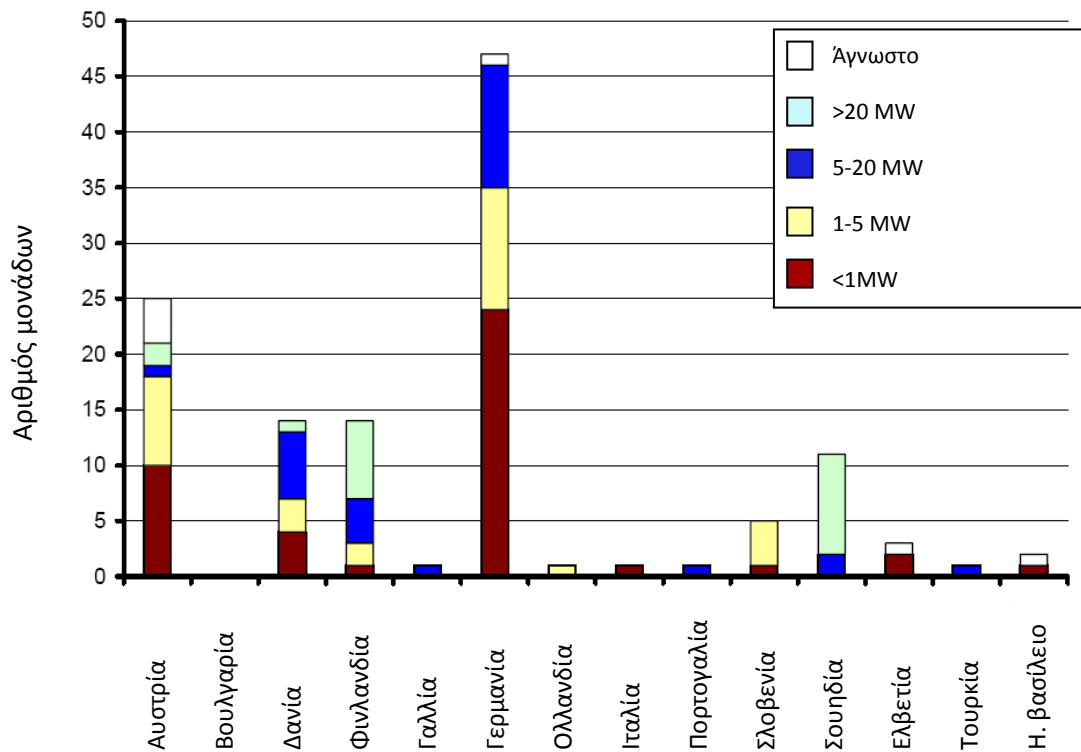
Διάγραμμα 2.2 : Μονάδες συμπαγωγής στην Ε.Ε



Διάγραμμα 2.3 : Ποσοστό χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών για συμπαγωγή στην Ε.Ε

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω γραφήματα η ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι αυτή που χρησιμοποιεί υδρατμό ο οποίος κινεί είτε ατμομηχανή είτε ατμοστρόβιλο.

Επίσης η εγκατεστημένη ισχύς στις μονάδες συμπαγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού φαίνεται στο κάτωθι διάγραμμα ανά χώρα.



**Διάγραμμα 2.4 :** Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων συμπαγωγής στην Ε.Ε

Όπως είναι φανερό η πλειονότητα των μονάδων είναι κάτω του 1 MW γεγονός που καταδεικνύει την ύπαρξη διεσπαρμένης ηλεκτροπαραγωγής.

### 2.3 Οι επιπτώσεις από τη συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού

#### 2.3.1 Γενικά

Η συμπαραγωγή μπορεί να έχει τόσο θετικές όσο και αρνητικές επιπτώσεις στην εξάντληση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στο σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας, στο περιβάλλον και στην κοινωνία. Οι πιθανές αρνητικές επιπτώσεις μπορούν να μετριασθούν ή και να εξαλειφθούν με σωστή επιλογή του είδους και της θέσης του συστήματος συμπαραγωγής, την προσεκτική ένταξή του στο ευρύτερο ενεργειακό σύστημα της περιοχής ή της χώρας και με την επιμελημένη συντήρηση κατά τη διάρκεια της ζωής του.

#### 2.3.2 Θετικές επιπτώσεις

Συνοπτικά τα πλεονεκτήματα της συμπαραγωγής, αν εφαρμοστεί σωστά, είναι:

**Βαθμός απόδοσης:** Υψηλότερος βαθμός απόδοσης σε σχέση με συμβατικές τεχνολογίες χωριστής ηλεκτροπαραγωγής και παραγωγής θερμότητας.

**Εξοικονόμηση καυσίμου:** Με τα συστήματα συμπαραγωγής επιτυγχάνεται η καλύτερη αξιοποίηση της πρωτογενούς πηγής ενέργειας, δεδομένου ότι αξιοποιείται και η θερμική, η οποία αναπόφευκτα παράγεται κατά την διαδικασία μετατροπής της πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Με αυτόν τον τρόπο συμβάλλουν στην εξοικονόμηση καυσίμων και εμμέσως στην αποφυγή εξάντλησης των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

**Ελαχιστοποίηση απωλειών:** Τα συστήματα συμπαραγωγής βρίσκονται κοντά στον καταναλωτή σε σχέση με τους κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που είναι της τάξης του 8–10%. Οι μειωμένες απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένας άλλος παράγοντας που συμβάλλει στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.

**Ενίσχυση του ενεργειακού δυναμικού:** Παρέχει ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε τοπικές ενεργειακές ανάγκες και ασφάλεια εφοδιασμού. Τα συστήματα συμπαραγωγής μπορούν να σχεδιάζονται και να εγκαθίστανται ακόμα και σε γεωγραφικά απόμακρες περιοχές, εξυπηρετώντας τις ανάγκες των τοπικών καταναλωτών. Προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε απρόβλεπτες μεταβολές της ζήτησης του ηλεκτρισμού. Σε κρατικό επίπεδο, η συμπαραγωγή αυξάνει το δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής και περιορίζει τις ανάγκες κατασκευής νέων μεγάλων κεντρικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, αυξάνει τη



σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου της χώρας και την αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

**Αύξηση της αξιοπιστίας ηλεκτροδότησης των καταναλωτών:** Αυξάνεται η αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας με την παράλληλη λειτουργία συστημάτων συμπαραγωγής και των κεντρικών σταθμών. Η σύνδεση της μονάδας συμπαραγωγής με το ηλεκτρικό δίκτυο εγγυάται την αδιάκοπη παροχή ηλεκτρισμού, αφού σε περίπτωση διακοπής της λειτουργίας της μονάδας, το δίκτυο μπορεί να παρέχει την ζητούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Απαιτείται όμως ιδιαίτερη προσοχή στη σύνδεση των συστημάτων συμπαραγωγής με το δίκτυο έτσι ώστε να μην δημιουργηθούν προβλήματα στην ευστάθεια του δικτύου. Τα προβλήματα αυτά περιορίζονται ή και αποφεύγονται, όταν το σύστημα συμπαραγωγής και η σύνδεσή του με το δίκτυο πληρούν ορισμένες προδιαγραφές.

**Αύξηση της σταθερότητας ηλεκτρικών δικτύων:** Η «Διανεμημένη Παραγωγή» της ηλεκτρικής ενέργειας μειώνει την φόρτιση και τις απώλειες των δικτύων μεταφοράς και διανομής.

**Μείωση εκπομπόμενων ρύπων προς το περιβάλλον:** Επιτυγχάνεται με την αποδοτικότερη εκμετάλλευση καυσίμου μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων προς το περιβάλλον σε σφαιρική κλίμακα, με την προϋπόθεση ότι το καύσιμο που χρησιμοποιείται δεν είναι κατώτερης ποιότητας από εκείνο της χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου συνοδεύεται από μια έμμεση μείωση των ρύπων από τον υπόλοιπο κύκλο του καυσίμου (εξόρυξη, επεξεργασία, μεταφορά, αποθήκευση). [1] Το πλεονέκτημα αυτό καθίσταται ιδιαίτερα σημαντικό σήμερα, ενόψει της ραγδαίας επιβάρυνσης και καταστροφής του περιβάλλοντος σε παγκόσμια κλίμακα. Η μείωση των μολυσματικών ρύπων είναι ένας στόχος άλλωστε που έχει τεθεί και από το Πρωτόκολλο του Κιότο.

**Κοινωνικά οφέλη:** Η γεωγραφική διασπορά των συστημάτων συμπαραγωγής δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας, συγκρατεί εκεί το εργατικό δυναμικό και συμβάλλει στην οικονομική ανάπτυξη του τόπου με την ανάπτυξη νέων δραστηριοτήτων, που σχετίζονται με την κατασκευή, συντήρηση και λειτουργία των μονάδων.

**Ανατρέπει τα οποιαδήποτε μονοπώλια στην αγορά:** Αποτελεί ευκαιρία να δημιουργηθούν συνθήκες ανταγωνισμού και ποικιλότητα στην ηλεκτροπαραγωγή. Το γεγονός αυτό την καθιστά από τα πιο σημαντικά εργαλεία στην προώθηση της απελευθέρωσης της αγοράς ενέργειας.

### 2.3.3 Αρνητικές επιπτώσεις

Όπως προαναφέρθηκε εάν δεν γίνει προσεκτική επιλογή του είδους και της θέσης της μονάδας, υπάρχει η περίπτωση η τεχνολογία της συμπαραγωγής όχι μόνο να μην έχει τα παραπάνω αποτελέσματα, αλλά οι επιπτώσεις της να είναι ιδιαίτερα επιζήμιες κυρίως σε οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο.

Η εξάπλωση της συμπαραγωγής μπορεί να έχει αρνητικές οικονομικές επιπτώσεις στο εθνικό σύστημα ηλεκτρισμού, εάν αυτό έχει ικανότητα παραγωγής μεγαλύτερη από τη ζήτηση ή εάν ο ρυθμός αύξησης της ικανότητας με την κατασκευή νέων σταθμών είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό αύξησης της ζήτησης και για διάφορους λόγους δεν μπορεί να επιβραδυνθεί. Τότε το κόστος κεφαλαίου μοιράζεται σε μικρότερη ποσότητα παραγόμενου ηλεκτρισμού με αποτέλεσμα την αύξηση του μοναδιαίου κόστους.

Επίσης μπορεί εν γένει η συμπαραγωγή να συντελεί στην μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, αλλά είναι ενδεχόμενη η αύξηση των ρύπων σε τοπική κλίμακα. Όταν πολλές μικρές και διεσπαρμένες μονάδες συμπαραγωγής αντικαθιστούν μεγάλους κεντρικούς σταθμούς με υψηλές καπνοδόχους, τότε δεν είναι εξασφαλισμένη η βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Οι κεντρικοί σταθμοί βρίσκονται κατά κανόνα έξω από αστικά κέντρα και οι υψηλές καπνοδόχοι συντελούν σε ικανοποιητικό διασκορπισμό των ρύπων. Αντίθετα, οι μικρές μονάδες συμπαραγωγής, που έχουν σχετικά χαμηλότερες καπνοδόχους, είναι εγκατεστημένες κοντά ή και μέσα σε κατοικημένες περιοχές, επιβαρύνοντας το περιβάλλον τους. Η επίπτωση της συμπαραγωγής στο περιβάλλον εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως από την τεχνολογία συμπαραγωγής και το καύσιμο που χρησιμοποιεί, σε σχέση με την συμβατική χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, και τις τοπικές συνθήκες. Επίσης η διακίνηση των καυσίμων και η απομάκρυνση των στερεών καταλοίπων της καύσης μπορεί να προκαλέσει ρύπανση του εδάφους και των υδάτων της περιοχής. Επομένως η εγκατάσταση συστήματος συμπαραγωγής σε κατοικημένες περιοχές, πρέπει να πληρεί ορισμένες προϋποθέσεις:

- επιλογή τεχνολογίας με χαμηλές εκπομπές ρύπων,
- προσεκτική επιλογή του τύπου εγκατάστασης,
- τοποθέτηση εξοπλισμού ελέγχου και περιορισμού των εκπεμπόμενων ρύπων,
- κατασκευή καπνοδόχου υψηλότερης των γειτονικών κτιρίων,
- εγκατάσταση μέσων συλλογής και αποκομιδής των στερεών και υγρών καταλοίπων.

## Κεφάλαιο 3

# Στερεό ανακτηθέν καύσιμο από αστικά απορρίμματα

### 3.1 Εισαγωγή

Το στερεό ανακτηθέν καύσιμο SRF (Solid Recovered Fuel) είναι ένα στερεό καύσιμο που προκύπτει από τη μηχανική επεξεργασία των αστικών αποβλήτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις έχει ορισμένα χαρακτηριστικά, ιδιότητες και σύνθεση και μπορεί να διακινηθεί ως καύσιμο προοριζόμενο για παραγωγή ενέργειας. Το SRF προσφέρει σημαντικές δυνατότητες, αφού οι κύριες πηγές ρύπων των αστικών αποβλήτων έχουν απομακρυνθεί κατά τη διεργασία της μηχανικής προ-επεξεργασίας. Έχει συνήθως σχετικά υψηλή θερμογόνο ικανότητα και μπορεί να τυποποιηθεί ως εμπορεύσιμο καύσιμο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με διάφορα άλλα στερεά καύσιμα, όπως ο ορυκτός άνθρακας ή/ και η βιομάζα σε διεργασίες μικτής καύσης ή να παραχθεί από αυτό καύσιμο αέριο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανάκτηση ενέργειας υψηλότερου βαθμού αποδόσης.

### 3.2 Παραγωγή στερεού ανακτηθέντος καυσίμου

Το SRF παράγεται σε ειδικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων οι οποίες λειτουργούν από ιδιωτικές ή και δημόσιες επιχειρήσεις. Τα εισερχόμενα ρεύματα υλικών είναι αστικά απόβλητα και υπολείμματα από διάφορες παραγωγικές δραστηριότητες, καθώς και υλικά συσκευασίας, χαρτί/ χαρτόνι και υφάσματα. Κοινές τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων είναι :

- Μηχανική επεξεργασία με σκοπό το διαχωρισμό του κλάσματος με υψηλή θερμογόνο ικανότητα και την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων συστατικών (π.χ. PVC)
- Εγκαταστάσεις μηχανικής-βιολογικής επεξεργασίας με ενσωματωμένες διεργασίες διαχωρισμού/ επεξεργασίας των κλασμάτων υψηλής θερμογόνου ικανότητας

Ανάλογα με τη γραμμή παραγωγής, τα προϊόντα SRF προκύπτουν κυρίως σε μορφή δέματος, χύδην, μαλακών ή σκληρών πελλετών.



**Εικόνα 3.1** : SRF σε μαλακές και σκληρές πελλέτες

Τα απόβλητα που είναι κατάλληλα για την παραγωγή των στερεών ανακτηθέντων καυσίμων ορίζονται βάσει του καταλόγου αποβλήτων και της Απόφασης της Ευρωπαϊκής Επιτροπής 2000/532/EC. Σύμφωνα με τις κατηγορίες των αποβλήτων, τα εισερχόμενα υλικά μπορούν να χωριστούν σε πέντε κύριες ομάδες :

- Ομάδα 1: ξύλο, χαρτί, χαρτόνι και χαρτονένιες κούτες
- Ομάδα 2: υφάσματα και ίνες
- Ομάδα 3: πλαστικά και καουτσούκ
- Ομάδα 4: άλλα υλικά (π.χ. απόβλητο μελάνι, χρησιμοποιημένα απορροφητικά υλικά used absorbents, spend activated carbon)
- Ομάδα 5: κλάσματα υψηλής θερμογόνου ικανότητας από σύμμεικτα απόβλητα

Η έννοια της μηχανικής (βιολογικής) επεξεργασίας αποβλήτων περιλαμβάνει τέσσερις διαφορετικές τεχνικές, κατά τις οποίες οι μηχανικές, βιολογικές και θερμικές διεργασίες συνδυάζονται ανάλογα με το σκοπό της επεξεργασίας :

- Διαχωρισμός των ρευμάτων των υλικών
- Μηχανική-βιολογική σταθεροποίηση με βιολογική ξήρανση
- Μηχανική-φυσική σταθεροποίηση με θερμική ξήρανση
- Μηχανική-βιολογική προ-επεξεργασία και θερμική επεξεργασία

Ο διαχωρισμός των ρευμάτων των υλικών επιτυγχάνεται με μηχανική μέθοδο, κατά την οποία διαχωρίζεται ένα κλάσμα υψηλής θερμικής αξίας των στερεών αποβλήτων, που προορίζεται για την παραγωγή καυσίμου, από τα υπόλοιπα υλικά προς ανακύκλωση.

Στόχος της μηχανικής-βιολογικής σταθεροποίησης είναι σε πρώτο στάδιο να σταθεροποιηθεί η ποσότητα του περιεχόμενου άνθρακα καθώς και το βιολογικά αποικοδομήσιμο μέρος των αποβλήτων μέσω της βιολογικής ξήρανσης. Σε δεύτερο στάδιο το χρήσιμο αυτό μέρος των αποβλήτων να μεταφερθεί κατά το δυνατό ακέραιο στο υψηλής θερμικής αξίας κλάσμα, το οποίο προορίζεται για την παραγωγή καυσίμου. Σε αυτή τη διεργασία παίζει σημαντικό ρόλο το μέσο ξήρανσης στο διαχωρισμό των αποβλήτων ως καύσιμα, ανακυκλώσιμα και αδρανή υλικά. Βιολογική ξήρανση εφαρμόζεται στο εργοστάσιο επεξεργασίας της εταιρείας Herhof GmbH στη μεθοδολογία παραγωγής του οποίου θα γίνει εκτενής αναφορά στις παραγράφους που ακολουθούν.

### 3.3 Το καύσιμο Stabilat® από την Herhof GmbH

Η ονομασία stabilat® είναι το σήμα κατατεθέν του στερεού ανακτηθέντος καυσίμου που παράγει η εταιρία Herhof GmbH, 100 % θυγατρική της ελληνικής εταιρίας ΗΛΕΚΤΩΡ Α.Ε, η οποία δραστηριοποιείται στο χώρο της διαλογής και επεξεργασίας αστικών αποβλήτων. Η Herhof είναι μία εταιρεία με παράδοση στην κομποστοποίηση των οικιακών απορριμμάτων. Διαθέτει πενήντα εγκαταστάσεις διαχείρισης απορριμμάτων σε Ευρώπη και Καναδά, ενώ έχει ξεκινήσει συνεργασία με εταιρεία από την Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Η Herhof/Ηλέκτωρ έχει υπογράψει 17ετή σύμβαση με τις τοπικές Αρχές για τη διαχείριση των οικιακών απορριμμάτων της πόλης και της επαρχίας του Osnabruck, συνολικού πληθυσμού 350.000 κατοίκων, με τιμή 83 ευρώ ανά τόνο. Η μονάδα ολοκληρώθηκε σε 18 μήνες και κόστισε περίπου 35 εκατ. ευρώ.



**Εικόνα 3.2 :** Μονάδα παραγωγής Stabilat στο Osnabrück

Υποδέχεται καθημερινά γύρω στους 350 τόνους απορριμμάτων (90.000 τον χρόνο), τους οποίους επεξεργάζεται μέσω μηχανικής/βιολογικής διαδικασίας ξήρανσης, διαχωρισμού και καθαρισμού. Ως τελικό προϊόν αποδίδεται υψηλής ποιότητας καύσιμη ύλη (εμπορική ονομασία Stabilat), που μπορεί να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα (λιγνίτη, πετρέλαιο και φυσικό αέριο). Παράλληλα ανακτώνται χρήσιμα υλικά.

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα το βασικό κομμάτι της μεθοδολογίας παραγωγής του SRF από την συγκεκριμένη εταιρία είναι η σταθεροποίηση των αποβλήτων με βιολογική ξήρανση. Πιο αναλυτικά όμως η διαδικασία έχει ως εξής:

#### Βήμα 1 : αρχική μηχανική διαλογή και τεμαχισμός

Σε πρώτη φάση το ρεύμα των αποβλήτων διαχωρίζεται από ογκώδη στερεά και επιβλαβή συστατικά (πχ μπαταρίες ,ηλεκτρονικά απόβλητα κλπ) ενώ το απομένων τμήμα τεμαχίζεται σε μέγεθος όχι πάνω από 250 mm. Εν συνεχεία τα απορρίμματα οδηγούνται μέσω αυτοματοποιημένου συστήματος αρπάγης στα βιολογικά κουτιά ξήρανσης (Bioboxes).

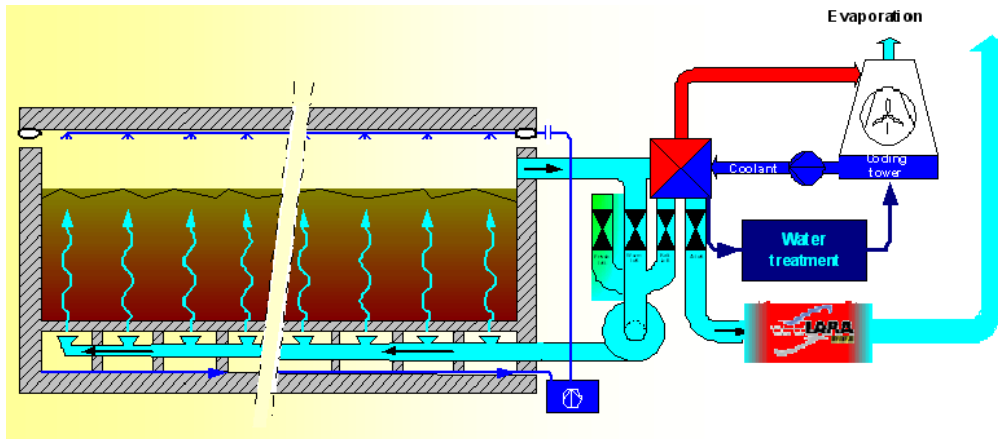
#### Βήμα 2: βιολογική ξήρανση

Στο δεύτερο στάδιο τα απορρίμματα οι αυτοματοποιημένες αρπάγες τοποθετούν τα απορρίμματα στα βιολογικά κουτιά , την καρδιά του συστήματος παραγωγής του Stabilat. Εδώ το νερό απομακρύνεται και τα απομένοντα ξηρά απορρίμματα μπορούν τώρα να διαχωριστούν. Ο υπολογιστής του συστήματος ελέγχου σιγουρεύει ότι όλα τα κουτιά θα γεμίσουν με ίση ποσότητα απορριμμάτων. Τα απόβλητα παραμένουν στους χώρους αυτούς για 7 ημέρες όπου μικροοργανισμοί τα αποσυνθέτουν υπό ελεγχόμενο τρόπο με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η βιολογική τους σταθεροποίηση.



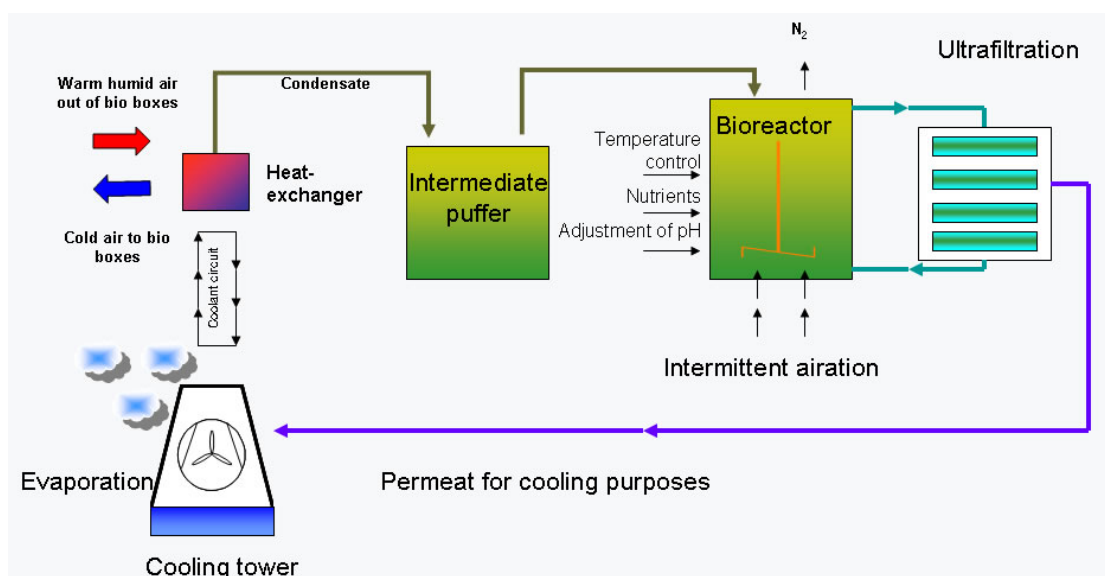
**Εικόνα 3.3 :** Βιολογικό κουτί (BioBox®) μονάδας στο *Osnabrück*

Ανεμιστήρες διοχετεύουν αέρα στο κάτω μέρος των βιολογικών κουτιών με σκοπό τα μικρόβια να έχουν τις κατάλληλες συνθήκες για να δράσουν. Όταν το οργανικό περιεχόμενο των αποβλήτων αποσυντίθεται αυξάνεται η θερμοκρασία εντός του βιολογικού κουτιού, έτσι ο ψεκασμός του αέρα αποτελεί ένα μέσο ελέγχου της διαδικασίας. Ο αέρας παραλαμβάνει την υγρασία που απομακρύνεται από τα απορρίμματα καθώς και τα διάφορα αέρια παραπροϊόντα της βιολογικής διεργασίας. Με αυτόν τον τρόπο τα επίπεδα της υγρασίας στα απορρίμματα πέφτουν στο 15 % , συνθήκες που είναι ιδανικές για τον διαχωρισμό τους σε επαναχρησιμοποιήσιμα υλικά και σε ενεργειακούς πόρους. Εν συνέχεια το υγρό ρεύμα αέρα περνά από εναλλάκτη θερμότητας όπου ψύχεται με αποτέλεσμα την συμπύκνωση της υγρασίας. Ένα τμήμα του εργαζόμενου αέρα ανακυκλοφορεί ενώ άλλο αποβάλλεται στο περιβάλλον. Σχηματικά η παραπάνω διεργασία φαίνεται στην κάτωθι εικόνα.



Σχήμα 3.1 : Διεργασία βιολογικής ξήρανσης Stabilat®

Το συμπύκνωμα που απομακρύνεται από τον εναλλάκτη θερμότητας περνά από το σύστημα διαχείρισης νερού προκειμένου να καθαριστεί. Σε πρώτη φάση το νερό, είναι συγκρίσιμο με τα ακάθαρτα νερά ενός νοικοκυριού, περνά από ένα δοχείο (buffer) όπου γίνεται ομογενοποίηση των συγκεντρώσεων των διάφορων συστατικών (πχ COD ,  $\text{NH}_4$  κλπ). Έπειτα το υγρό ρεύμα εισέρχεται στον βιοαντιδραστήρα όπου υπό ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας ,pH κλπ μικροοργανισμοί διασπούν το οργανικό υλικό που περιέχεται στο νερό. Τελικώς το ρεύμα καταθλίβεται στο σύστημα φιλτραρίσματος όπου το καθαρό νερό μόνο περνά την διαπερατή μεμβράνη του φίλτρου ενώ η καλλιέργεια των μικροοργανισμών επανακυκλοφορεί στο σύστημα βιοαντιδραστήρα –φίλτρου. Το ρεύμα που έχει διαπεράσει τη μεμβράνη και έχει καθαριστεί οδηγείται στο ρεύμα του ψυκτικού νερού του εναλλάκτη θερμότητας και εν μέρει εξατμίζεται στον ψυκτικό πύργο ανοιχτού κυκλώματος της εγκατάστασης.



Σχήμα 3.2 : Σύστημα επεξεργασίας συμπυκνωμάτων νερού



Τέλος το ρεύμα αέρα που αποβάλλεται από την εγκατάσταση περνά πρώτα από το σύστημα θερμικού καθαρισμού τηρώντας αυστηρά τους ομοσπονδιακούς κανονισμούς εκπομπών (BimSchV).

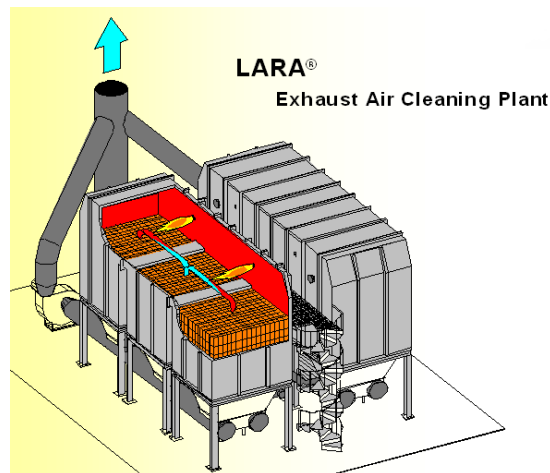
Ο σκοπός του συστήματος αυτού ,εν συντομία LARA® είναι :

- Η εξόντωση των μικροοργανισμών που μπορεί να περιέχονται στο ρεύμα αέρα που αποβάλλεται
- Η εξουδετέρωση των οσμών

Η απόδοση του συστήματος για την εξουδετέρωση των οσμών ξεπερνά το 95%.

Στο σύστημα επεξεργασίας και καθαρισμού αέρα οι υδρογονάνθρακες που προέρχονται από τη διαδικασία της αποσύνθεσης και φέρουν διάφορες οσμές οξειδώνονται σε θάλαμο καύσης υπό θερμοκρασία 850 °C με χρόνο παραμονής εντός αυτού τουλάχιστον 2 δευτερόλεπτα.

Με το πατενταρισμένο αυτό σύστημα επιτυγχάνεται η αυστηρή τήρηση των εκπομπών που θέτει η ευρωπαϊκή επιτροπή.

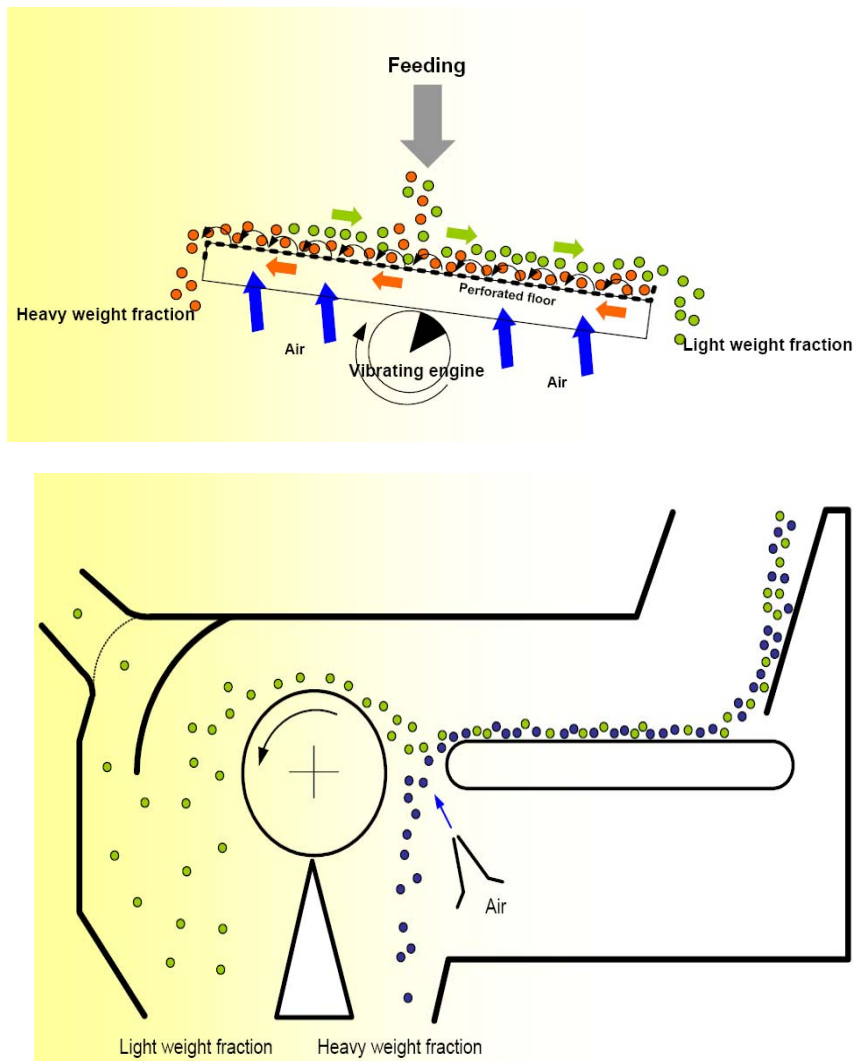


**Σχήμα 3.3 :** Σύστημα επεξεργασίας αέρα LARA®

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα όλων των παραπάνω διεργασιών είναι η πλήρης αυτοματοποιημένη λειτουργία τους και ύπαρξη κλειστών κυκλωμάτων επεξεργασίας με μη βλαβερά προϊόντα εξόδου ενώ η κυρίαρχη λογική είναι ότι “Τίποτα δεν πηγαίνει χαμένο”.

**Βήμα 3 :** τελικός διαχωρισμός των υλικών

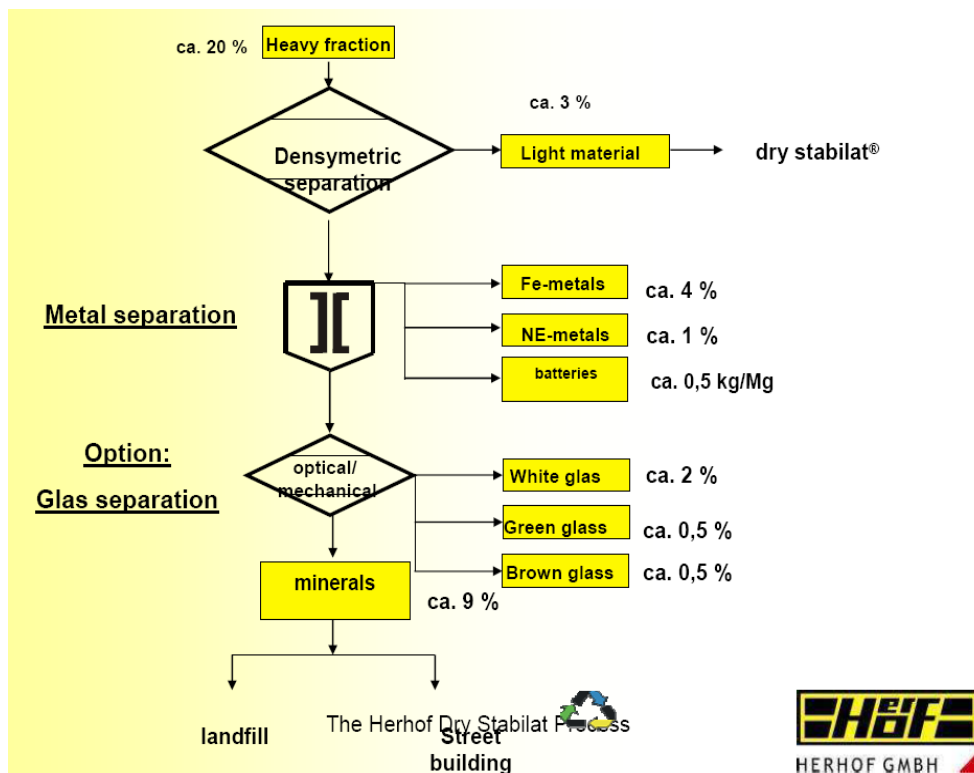
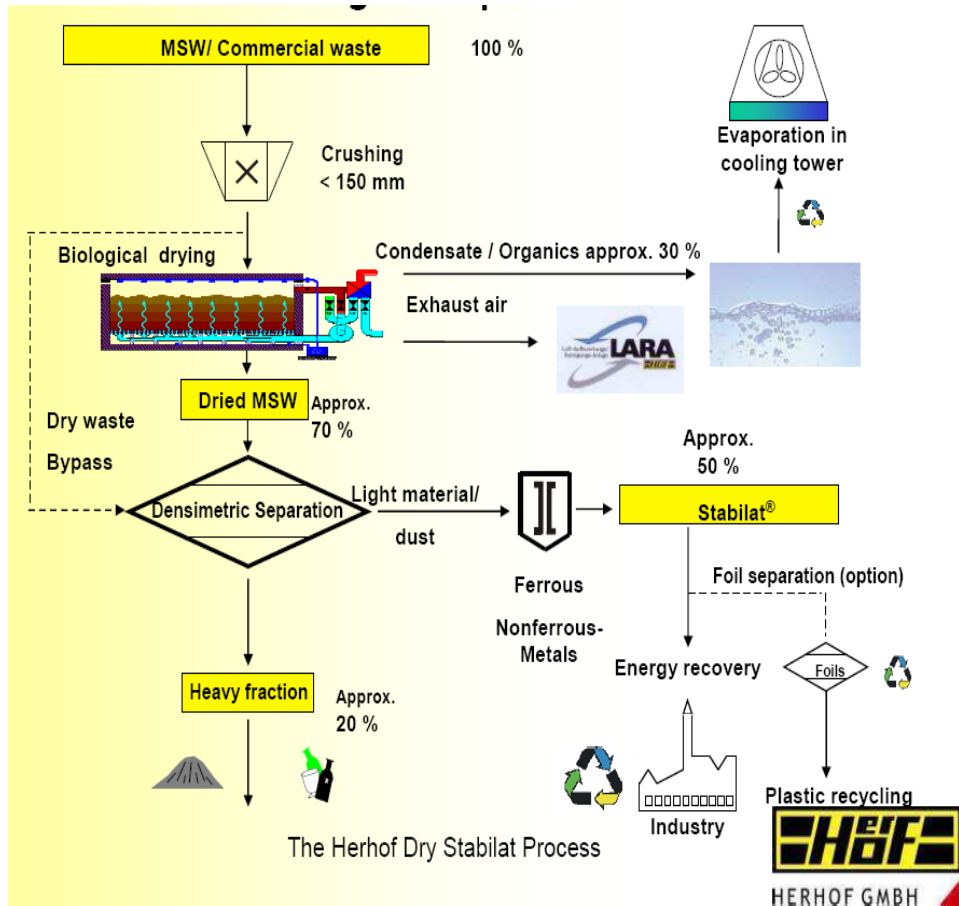
Τα τεμαχισμένα και πλέον ξηρά απορρίμματα με περιεχόμενο υγρασίας περίπου 15% εισέρχονται μέσω αυτοματοποιημένων ταινιών μεταφοράς σε μηχανικούς διαχωριστές όπου με διάφορες τεχνικές όπως εμφύσηση αέρα ,ταλαντώσεις διαχωρίζεται το ελαφρύ κλάσμα υλικών ,όπως καύσιμα συστατικά από χαρτί, ξύλο, πλαστικό, από το βαρύ κλάσμα των μετάλλων και των ορυκτών υλικών, όπως πέτρα, γυαλί κλπ. Τα μέταλλα εν συνεχεία διαχωρίζονται σε σιδηρούχα και μη σιδηρούχα με τη χρήση μαγνητών και οδηγούνται προς ανακύκλωση. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται σχηματικά ο τρόπος λειτουργίας αυτών των μηχανών διαχωρισμού.



**Σχήμα 3.4 :** Διαχωριστές με εμφύσηση αέρα

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται αναλυτικά η διαδικασία παραγωγής του Stabilat που περιγράφηκε στις τρεις ανωτέρω φάσεις.

Συμπαγωγικά συστήματα αξιοποίησης παραγόμενου αερίου από στερεό δευτερογενές καύσιμο



Σχήμα 3.5 : Πλήρης απεικόνιση διεργασιών παραγωγής Stabilat®

Η σύσταση του παραγόμενου καυσίμου όπως αυτό οδηγήθηκε προς ανάλυση είναι ακόλουθη :

Συστατικό	% κ.β
C	39
H	5.09
N	1.22
O	29.85
S	0.39
Υγρασία	3.94
Τέφρα	20.51

### 3.4 Κοινοτική στρατηγική για τα αστικά απόβλητα

Το SRF (ή RDF), όπως αναφέρθηκε προηγουμένως προέρχεται από τα Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ). Τα Αστικά Στερεά Απόβλητα είναι κυρίως απόβλητα που παράγονται από τα νοικοκυριά, αλλά περιλαμβάνουν και ορισμένα εμπορικά και βιομηχανικά απόβλητα όμοιας φύσεως, τα οποία αποτίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Τα αστικά απόβλητα αποτελούν μεν επιβάρυνση στην περίπτωση που απαιτείται η απόθεσή τους σε χωματερές, αντιπροσωπεύουν δε έναν υπολογίσιμο φυσικό πόρο που μπορεί ωφέλιμα να ανακτηθεί, είτε μέσω της νακύκλωσης των υλικών όπως αλουμίνιο, μέταλλα, γυαλί, ύφασμα κλπ. είτε μέσω διεργασιών ανάκτησης όπως η μετατροπή σε ενέργεια και η κομποστοποίηση. Παρόλα αυτά, σημαντικές ποσότητες ΑΣΑ εξακολουθούν να αποτίθενται σε χωματερές σε μεγάλη κλίμακα, εξαιτίας του χαμηλού κόστους και της άμεσης διαθεσιμότητας. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση η Οδηγία για την Ταφή των Αποβλήτων (1999/31/EC), όπως και αρκετοί εθνικοί κανονισμοί, στοχεύουν μέχρι το 2016 σε σχέση με το έτος 1995, στη μείωση κατά 65% της ποσότητας των βιοαποικοδομήσιμων υλικών, που καταλήγουν στην ταφή. Στους χώρους ταφής των αποβλήτων, το βιοαποικοδομήσιμο μέρος των ΑΣΑ (χαρτί, απόβλητα τροφίμων) αποσυντίθενται και εκλύουν μεθάνιο, το οποίο ανήκει στα αέρια του θερμοκηπίου και είναι 23 φορές ισχυρότερο του διοξειδίου του άνθρακα (IPCC, 2001) και επίσης προκαλεί σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα. Εκτός από τη μόλυνση που προκαλείται στο περιβάλλον με την απόθεση σε χώρους ταφής, χάνονται σημαντικοί φυσικοί πόροι. Για τους ανωτέρω λόγους, οι περισσότερες χώρες προσπαθούν να μειώσουν την εξάρτηση από την απόθεση σε χώρους ταφής για τα αστικά απόβλητα. Στους χώρους υγειονομικής ταφής το παραγόμενο βιοαέριο από τη χώνευση των απορριμμάτων χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ΜΕΚ. Τα βήματα που υιοθετούνται σήμερα για τη διαχείριση των αποβλήτων σύμφωνα με την κοινοτική στρατηγική (COM (96) 399 final ) είναι:

- Ελαχιστοποίηση
- Επαναχρησιμοποίηση
- Ανακύκλωση
- Ανάκτηση
- Ταφή

Οι έρευνες σήμερα εστιάζουν στην ισορροπία ανάμεσα την μείωση των αποβλήτων, την ανακύκλωση των υλικών, την ανάκτηση ενέργειας και την ταφή των μη αποικοδομήσιμων κλασμάτων. Από την επεξεργασία των ΑΣΑ και την απομάκρυνση των υλικών που προορίζονται για ανακύκλωση, προκύπτει ένα υπόλοιπο σημαντικής θερμογόνου ικανότητας, το οποίο είναι κατάλληλο για διεργασίες ανάκτησης ενέργειας. Παραδοσιακά η πρακτική που ακολουθείται είναι η αποτέφρωση των στερεών αποβλήτων σε ειδικές εγκαταστάσεις, πλέον όμως στις νέες εγκαταστάσεις υπάρχει η τάση για αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και για αξιοποίηση της καύσης μέσω συμπαραγωγής ενέργειας και θερμότητας, μάλιστα σε ορισμένες χώρες ισχύει η απαίτηση ενός ελάχιστου βαθμού απόδοσης των εγκαταστάσεων αυτών. Σύμφωνα με πρόσφατη νομοθεσία στην ΕΕ και την Αυστραλία μόνο το ανανεώσιμο βιομαζικής προέλευσης κλάσμα των αστικών αποβλήτων θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Το κύριο πλεονέκτημα της ανάκτησης ενέργειας από ΑΣΑ είναι η μείωση των αερίων ρυπαντών που εκλύονται στην περίπτωση ταφής τους. Πρόσφατα ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας ολοκλήρωσε μία εκτενή μελέτη σχετικά με τα θετικά και αρνητικά αποτελέσματα ενός μεγάλου εύρους εφαρμογών τεχνολογιών ανανεώσιμης ενέργειας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης, για συμβατικά συστήματα αποτέφρωσης ΑΣΑ, η συνολική εκπομπή CO<sub>2</sub> είναι 1100 kg/t ΑΣΑ και 1833 gr/kWh. Διάφορες εκθέσεις παρουσιάζουν το 60-80% του άνθρακα στα ΑΣΑ προκύπτει από βιομάζα (εξαρτώμενο έντονα από τη χωριστή διαλογή του χαρτιού από τα οργανικά απόβλητα) και κατά συνέπεια μπορεί να θεωρηθεί ως ανανεώσιμη πηγή. Εκτιμήσεις σχετικά με τις κύριες περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ΑΣΑ (ή τους δείκτες αειφορίας) , οι οποίες βασίζονται στην ανάλυση του κύκλου ζωής, παρουσιάζουν τα θετικά οφέλη της ανάκτησης ενέργειας από τα ΑΣΑ:

- Μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου
- Μειωμένες εκπομπές όξινων αερίων
- Εξοικονόμηση φυσικών πόρων (ορυκτά καύσιμα και υλικά)
- Μείωση της μόλυνσης των υδάτων
- Μείωση της μόλυνσης του εδάφους

## Κεφάλαιο 4

# Αεριοποίηση στερεού ανακτηθέντος καυσίμου

### 4.1 Γενικά περί αεριοποίησης

#### 4.1.1 Ορισμός – αρχές διεργασίας

Σαν θερμοχημική αεριοποίηση ορίζεται η μετατροπή ενός στερεού καυσίμου σε αέριο φορέα ενέργειας (αέριο καύσιμο). Τεχνικά η διεργασία αυτή βρίσκεται ανάμεσα στην πυρόλυση (θέρμανση απουσία οξυγόνου) ,που παράγει αέριο ,ανθρακούχο υπόλειμμα ,και πίσσα , και την καύση ,που καταλήγει με ολοκληρωτική οξείδωση του καυσίμου σε διοξείδιο του άνθρακα και νερά. Στην αεριοποίηση προστίθεται μόνο ένα μικρό ποσό αέρα ή οξυγόνου (περίπου 30-50 % ) του στοιχειομετρικά απαιτούμενου για την πλήρη καύση. Η μικρή ποσότητα οξυγόνου αντιδρά με τον άνθρακα και το υδρογόνο απελευθερώνοντας ενέργεια η οποία ανυψώνει τη θερμοκρασία στην περιοχή των 700-1000 °C.

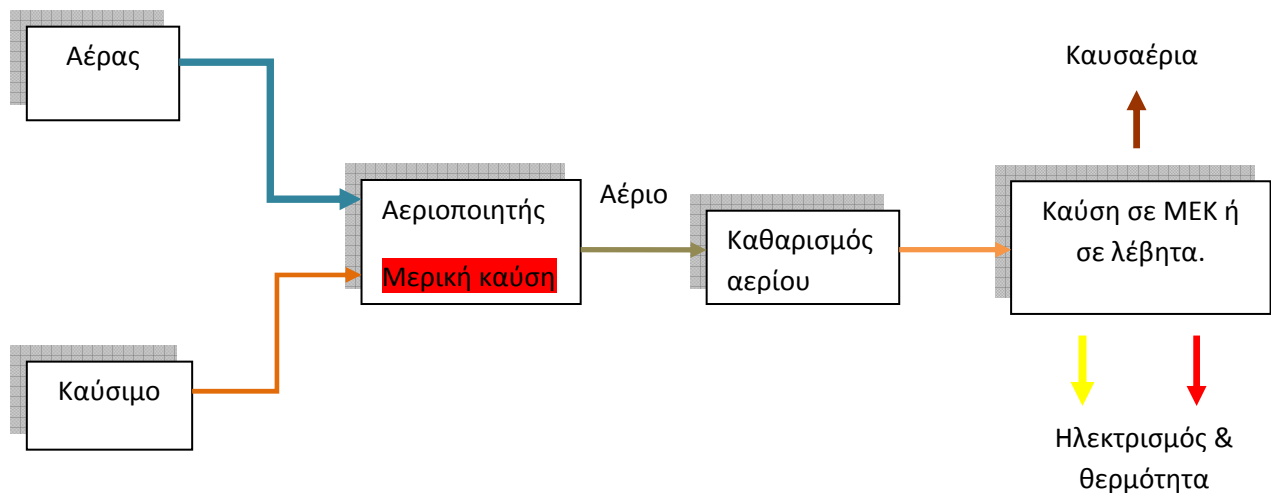
Η αεριοποίηση επιτελείται μέσω των ακόλουθων σταδίων :

- Ξήρανση για την εξάτμιση της υγρασίας.
- Πυρόλυση για την παραγωγή αερίου ,ατμών πισσοδών ή ελαιωδών ουσιών και στερεού ανθρακούχου υπολείματος.
- Μερική οξείδωση των στερεών ανθρακούχων υπολειμμάτων ,πυρολυτικών πισσών και αερίων .

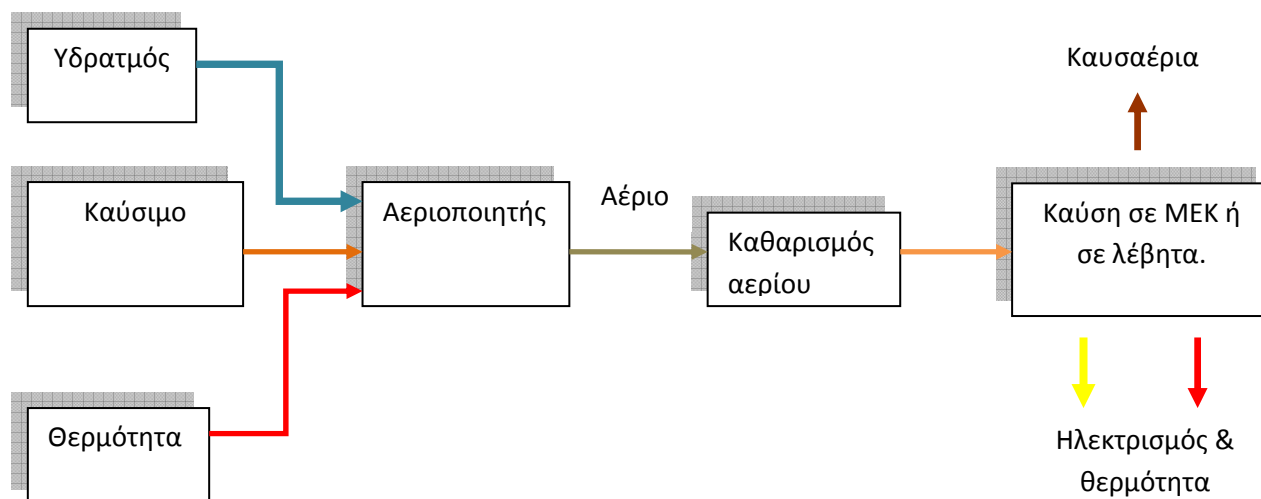
Όταν ένα στερεό καύσιμο θερμένεται στους 300-500 °C ,απουσία οξειδωτικού μέσου ,πυρολύεται προς ανθρακούχο στερεό υπόλειμα ,υδρογονάνθρακες ή πίσσες προς συμπύκνωση και αέρια. Η σχετική παραγωγή αερίων εξαρτάται κυρίως από τον ρυθμό της θέρμανσης και την τελική θερμοκρασία. Γενικά το στάδιο της πυρόλυσης είναι ταχύτερο από της αεριοποίησης ,έτσι το τελευταίο στάδιο είναι αυτό που ελέγχει την αντίδραση. Τα αέρια ,υγρά και στερεά προϊόντα του σταδίου της πυρόλυσης στη συνέχεια αντιδρούν με το οξειδωτικό (συνήθως αέρας ) και παράγουν μόνιμα αέρια (CO,CO<sub>2</sub> ,H<sub>2</sub>) και μικρές ποσότητες αερίων υδρογονανθράκων. Η μερική οξείδωση των στερεών ανθρακούχων υπολειμμάτων προέρχεται από την αλληλεπίδραση του συνδυασμού πολλών αερίου –στερεού και αερίου-αερίου αντιδράσεων κατά τις οποίες η στερεά ανθρακούχα ένωση

οξειδώνεται προς  $\text{CO}, \text{CO}_2$  ενώ  $\text{H}_2$  παράγεται μέσω της “ water-gas shift ” αντίδρασης . Οι αντιδράσεις αερίου στερεού κατά τη διάρκεια της οξείδωσης των στερεών ανθρακούχων υπολειμμάτων είναι πιο αργές και αυτές ελέγχουν την ολική αντίδραση της μερικής οξείδωσης (αεριοποίηση ) .

Ενώ οι φυσικοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα ποικίλουν σημαντικά το αέριο σχηματίζεται κατά κύριο λόγο σε θερμοκρασίες άνω των  $750\text{ }^\circ\text{C}$ . Για οργανικά τροφοδοτικά καύσιμα όπως είναι τα περισσότερα αστικά αποκρίματα το τελικό αέριο είναι κυρίως μείγμα αποτελούμενο από μονοξείδιο του άνθρακα ,υδρογόνο ,μεθάνιο ,νερό και μικρές ποσότητες υψηλών υδρογονανθράκων. Το άζωτο των οργανικών ενώσεων μετατρέπεται κυρίως σε αμμωνία ,ενώ το θείο σε υδρόθειο. Τα αλογόνα παρουσιάζονται είτε ως ενώσεις με υδρογόνο (οξέα) στα αέρια , είτε ως τα αντίστοιχα άλατα στα στερεά κατάλοιπα. Η απαιτούμενη για την αεριοποίηση ενέργεια παρέχεται είτε εξωτερικά(αλλοθερμική αεριοποίηση) είτε με ελεγχόμενη μερική καύση μέρους των οργανικών ενώσεων ,παρουσία οξυγόνου (αυτοθερμική αεριοποίηση). Στην περίπτωση αυτή στην σύνθεση του αερίου περιέχεται και το διοξείδιο του άνθρακα. Η τελική σύνθεση συνεπώς είναι συνάρτηση της πρώτης ύλης ,των συνθηκών αεριοποίησης και της θερμοκρασίας.



**Εικόνα 4.1 :** Σχηματικό διάγραμμα θερμικής επεξεργασίας με αυτοθερμική αεριοποίηση



**Εικόνα 4.2 :** Σχηματικό διάγραμμα θερμικής επεξεργασίας με αλλοθερμική αεριοποίηση

#### 4.1.2 Η ποιότητα του παραγόμενου αερίου

Η σύνθεση του παραγόμενου αερίου από την αεριοποίηση ενός στερεού καυσίμου εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες. Οι πιο σημαντικοί είναι :

- Η φύση και το σχήμα του στερεού καυσίμου (πχ διαστάσεις ,ειδική επιφάνεια των σωματιδίων καυσίμου, υγρασία, χημική σύνθεση),
- Η φύση και η ποσότητα του μέσου αεριοποίησης (πχ αέρας ,οξυγόνο, υδρατμός ,διοξείδιο του άνθρακα , μείγματα αυτών),
- Ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα αεριοποίησης (βαθμός ανάμειξης του καυσίμου με το μέσο αεριοποίησης, χρόνος παραμονής του καυσίμου και του παραγόμενου αερίου στον αντιδραστήρα κλπ),
- Η θερμοκρασία της αεριοποίησης
- Η παρουσία καταλυτών και
- Η πίεση που επικρατεί στον αντιδραστήρα.

Το παραγόμενο αέριο είναι ένα μείγμα αποτελούμενο από καύσιμα αέρια όπως τα  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  και υψηλότερους υδρογονάνθρακες και από μη καύσιμα αέρια όπως  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ .

Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην διαδικασία της αεριοποίησης μπορούν να διαχωριστούν σε ετερογενείς και ομογενείς. Στις ετερογενείς



αντιδράσεις αέρια συστατικά αντιδρούν με στερεό άνθρακα καταλήγοντας σε αέρια προϊόντα. Ο πίνακας 4.1 παρουσιάζει τις κύριες ετερογενείς αντιδράσεις που συμβαίνουν κατά τη διαδικασία της αεριοποίησης.

$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H_R = -406 \text{ kJ/mol}$	Oxidation of carbon	Εξώθερμη
$2C + O_2 \rightarrow 2CO$	$\Delta H_R = -123 \text{ kJ/mol}$	Partial oxidation of carbon	Εξώθερμη
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	$\Delta H_R = +119 \text{ kJ/mol}$	Heterogeneous water-gas reaction	Ενδόθερμη
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	$\Delta H_R = +162 \text{ kJ/mol}$	Boudouard reaction	Ενδόθερμη
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	$\Delta H_R = -87 \text{ kJ/mol}$	Hydrogen gasification	Εξώθερμη

**Πίνακας 4.1:** Ετερογενείς αντιδράσεις αεριοποίησης

Οι ομογενείς αντιδράσεις συντελούνται μεταξύ αέριων αντιδρώντων και συνοψίζονται στον κάτωθι πίνακα 4.2

$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H_R = -283 \text{ kJ/mol}$	Oxidation of carbon monoxide	Εξώθερμη
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	$\Delta H_R = -242 \text{ kJ/mol}$	Oxidation of hydrogen	Εξώθερμη
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	$\Delta H_R = -802 \text{ kJ/mol}$	Oxidation of methane	Εξώθερμη
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	$\Delta H_R = -42 \text{ kJ/mol}$	Shift reaction	Εξώθερμη
$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	$\Delta H_R = +206 \text{ kJ/mol}$	Reforming	Ενδόθερμη

**Πίνακας 4.2 :** Ομογενείς αντιδράσεις αεριοποίησης

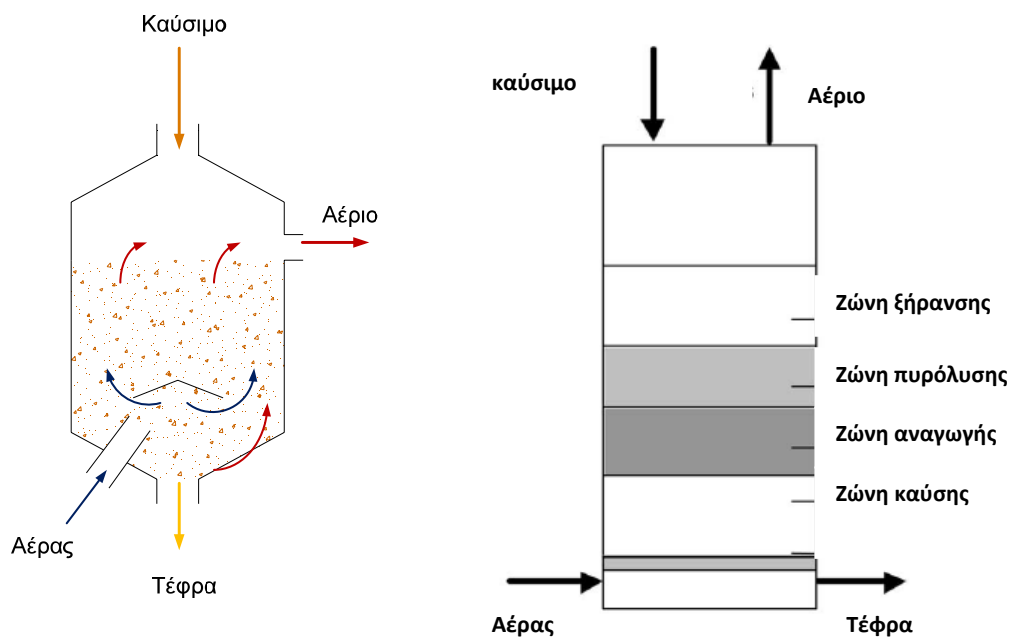
## 4.2 Αντιδραστήρες αεριοποίησης

### 4.2.1 Αεριοποιητές σταθερής κλίνης (fixed bed gasifiers)

Ο αεριοποιητής σταθερής κλίνης ήταν και παραμένει η παραδοσιακή διεργασία που χρησιμοποιείται για την αεριοποίηση, λειτουργώντας σε θερμοκρασίες περίπου 1000 °C. Ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής του αέρα, οι αεριοποιητές είναι ταξινομημένοι ως ανερχόμενης ροής, κατερχόμενης ροής ή διασταυρωμένης ροής.

- Ανερχόμενης ροής

Στους αεριοποιητές ανερχόμενης ροής η τροφοδοσία εισέρχεται από την κορυφή και ο αέρας από το κατώτατο σημείο της μονάδας μέσω μιας σχάρας. Αμέσως επάνω από τη σχάρα το στερεό υπόλειμμα (το οποίο παραμένει μετά από την απελευθέρωση των πτητικών ουσιών) που δημιουργείται στο πάνω μέρος του αεριοποιητή καίγεται και η θερμοκρασία φθάνει σε περίπου 1000 °C. Η τέφρα πέφτει μέσω της σχάρας στο κατώτατο σημείο και τα καυτά αέρια περνούν προς τα πάνω και ανάγονται. Το υλικό τροφοδοσίας κινείται αντίθετα από τη ροή του αερίου και διαπερνά διαδοχικά τις ζώνες ξήρανσης, απόσταξης/ πυρόλυσης, αναγωγής και καύσης.



**Εικόνα 4.2 :** Σχηματική απεικόνιση αντιδραστήρα ανερχόμενης ροής

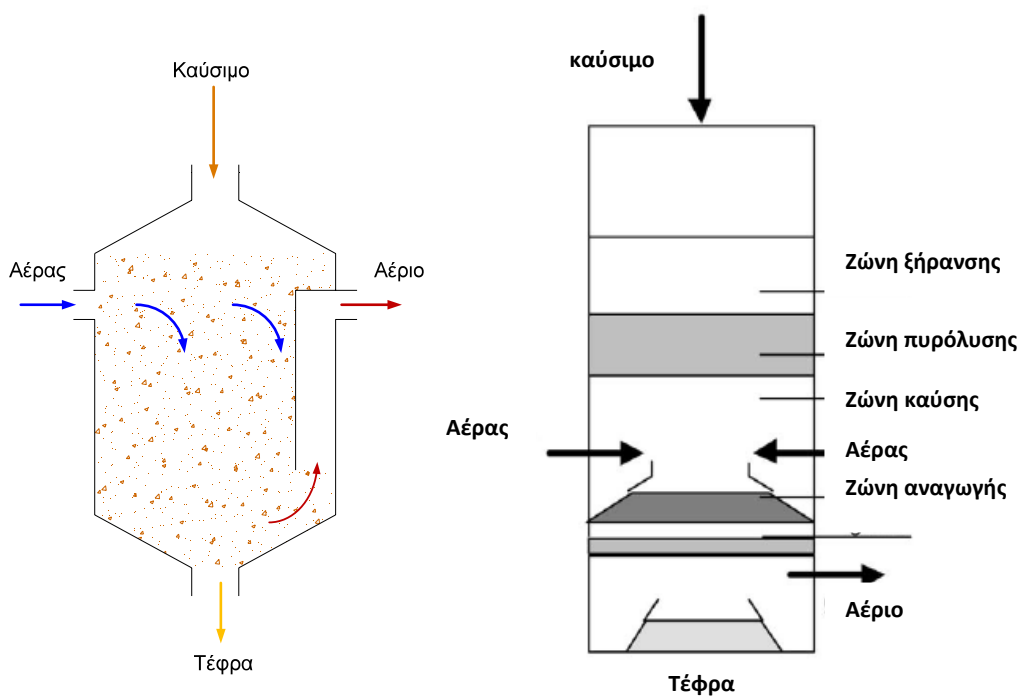
Στη ζώνη ξήρανσης η τροφοδοσία ξηραίνεται, ψύχοντας τα αέρια στους 200–300 °C απομακρύνοντας την υγρασία. Στη ζώνη απόσταξης ή πυρόλυσης, πραγματοποιείται διάσπαση του στερεού καυσίμου σε πτητικά αέρια και στερεά υπολείμματα άνθρακα. Δημιουργούνται όμως σημαντικές ποσότητες πίσσας όπου συμπυκνώνονται εν μέρη στη βιομάζα, επάνω ψηλά, και διαφεύγει εν μέρει από τον αεριοποιητή με το αέριο προϊόν. Η θερμότητα για την πυρόλυση και την ξήρανση παρέχεται κυρίως από το ανερχόμενο παραγόμενο αέριο και μερικώς από την ακτινοβολία στη ζώνη οξείδωσης. Στη ζώνη αναγωγής πραγματοποιούνται αντιδράσεις στις οποίες ο άνθρακας μετατρέπεται και παράγονται μονοξείδιο του άνθρακα καθώς και υδρογόνο ως τα κύρια συστατικά του παραγόμενου αερίου. Η θερμοκρασία στη ζώνη αεριοποίησης ελέγχεται με την προσθήκη ατμού στον αέρα, που χρησιμοποιείται για την αεριοποίηση, ή υγροποιώντας τον αέρα. Λόγω του ότι τα αέρια που εγκαταλείπουν τον αεριοποιητή έχουν χαμηλή θερμοκρασία, η γενική ενεργειακή αποδοτικότητα της διεργασίας είναι υψηλή αλλά τόσο επίσης υψηλό είναι και το περιεχόμενο του αερίου σε πίσσα. Η επίδραση φιλτραρίσματος της τροφοδοσίας βοηθά στη παραγωγή ενός αερίου με χαμηλό μοριακό περιεχόμενο.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου αεριοποιητή είναι η απλότητα του, η υψηλή καύση των στερεών υπολειμμάτων άνθρακα και η εσωτερική εναλλαγή θερμότητας που οδηγεί σε χαμηλές θερμοκρασίες εξόδου του αερίου και σε υψηλής απόδοσης αεριοποίηση. Εξαιτίας της εσωτερικής εναλλαγής θερμότητας, το καύσιμο ξηραίνεται στην κορυφή του αεριοποιητή. Επομένως, καύσιμα με υψηλά ποσά υγρασίας (60 %) μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επιπλέον, αυτό το είδος αεριοποιητή μπορεί να λειτουργήσει με σχετικά μικρά σωματίδια καυσίμου και με μεγάλη ποικιλία στο σχήμα του τροφοδοτούμενου καυσίμου. Ο αεριοποιητής ανερχόμενης ροής επιτυγχάνει την υψηλότερη απόδοση καθώς το θερμό αέριο διαπερνά την κλίση καυσίμου και απομακρύνεται σε χαμηλή θερμοκρασία. Η αισθητή θερμότητα που προσδίδεται από το αέριο χρησιμοποιείται για την προθέρμανση και ξήρανση του καυσίμου.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα του είναι τα υψηλά ποσά πίσσας (λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας) και τα προϊόντα πυρόλυσης, αφού το αέριο πυρόλυσης δεν διαπερνά τη ζώνη οξείδωσης και επομένως δεν αναφλέγεται. Το παραπάνω είναι μηδαμινής σημασίας εφόσον το παραγόμενο αέριο χρησιμοποιείται για απευθείας καύση στην οποία η πίσσα καίγεται. Έτσι, το αέριο προσφέρεται σχεδόν αποκλειστικά για απευθείας καύση ενώ είναι πρακτικά αδύνατη η χρησιμοποίησή του σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Όταν το καύσιμο χρησιμοποιείται σε μηχανές απαιτείται εκτεταμένος καθαρισμός.

- Κατερχόμενη ροή

Στον αεριοποιητή κατερχόμενης ροής, η τροφοδοσία και ο αέρας κινούνται στην ίδια κατεύθυνση. Τα αέρια προϊόντα εγκαταλείπουν τον αεριοποιητή αφού περάσουν μέσω της θερμής ζώνης, διευκολύνοντας έτσι την μερική διάσπαση της πίσσας που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της αεριοποίησης, παρέχοντας ένα αέριο με χαμηλό περιεχόμενο σε πίσσα.



**Εικόνα 4.3 :** Σχηματική απεικόνιση αντιδραστήρα κατερχόμενης ροής

Επειδή τα αέρια εγκαταλείπουν την μονάδα του αεριοποιητή στους 900–1000 °C περίπου, η γενική ενεργειακή απόδοση του αεριοποιητή κατερχόμενης ροής είναι χαμηλή, λόγω του υψηλού περιεχομένου θερμότητας που μεταφέρεται από το θερμό αέριο. Το περιεχόμενο του αερίου σε πίσσα είναι πιο χαμηλό για ένα αεριοποιητή ανερχόμενης ροής αλλά το περιεχόμενο σε σωματίδια είναι υψηλό. Οι ζώνες είναι παρόμοιες με τις ζώνες του αντιδραστήρα ανερχόμενης ροής αλλά με διαφορετική σειρά. Η βιομάζα αρχικά ξηραίνεται στη ζώνη ξήρανσης και στη συνέχεια πυρολύεται. Αυτές οι ζώνες θερμαίνονται κυρίως από ακτινοβολία (και

μερικώς από συναγωγή) της ζώνης οξείδωσης, όπου τμήμα του υπολείμματος του άνθρακα καίγεται. Τα αέρια της πυρόλυσης διαπερνούν αυτή τη ζώνη και καίγονται επίσης. Ο βαθμός καύσης τους εξαρτάται από το σχεδιασμό, την τροφοδοσία του καυσίμου και τις ικανότητες του χειριστή, όσον αφορά στην απομάκρυνση της τέφρας. Μετά τη ζώνη οξείδωσης, τα εναπομείναντα υπολείμματα άνθρακα και τα προϊόντα καύσης- διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμοί – περνούν στη ζώνη αναγωγής όπου μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο σχηματίζονται.

Περilhπτικά οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στις εκάστοτε ζώνες είναι οι εξής :

1. Ζώνη ξήρανσης (Drying zone): Το στερεό καύσιμο (με ποσοστό υγρασίας 5 έως 35%) εισάγεται στην κορυφή του αεριοποιητή και ως αποτέλεσμα της μεταφοράς θερμότητας από τα κατώτερα τμήματά του πραγματοποιείται ξήρανση του. Σε υψηλότερη θερμοκρασία από 100°C, η υγρασία απομακρύνεται και μετατρέπεται σε υδρατμούς. Οι υδρατμοί κατέρχονται και προστίθενται σε εκείνους της ζώνης οξείδωσης. Ένα μέρος τους ανάγεται σε υδρογόνο και το υπόλοιπο καταλήγει ως υγρασία στο παραγόμενο αέριο. Στη ζώνη ξήρανσης δεν πραγματοποιείται χημική διάσπαση του καυσίμου.

2. Ζώνη πυρόλυσης (Pyrolysis zone): Σε θερμοκρασίες άνω των 250 °C το καύσιμο της βιομάζας πυρολύεται. Πυρόλυση ονομάζεται η θερμική διάσπαση του καυσίμου βιομάζας, απουσία οξυγόνου. Κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης απελευθερώνονται τρία είδη προϊόντων: στερεά, υγρά και αέρια. Η αναλογία των προϊόντων εξαρτάται από την χημική σύνθεση του καυσίμου και τις συνθήκες λειτουργίας. Τα προϊόντα πυρόλυσης ρέουν στις θερμότερες ζώνες του αεριοποιητή, μέρος αυτών καίγονται στη ζώνη οξείδωσης και τα υπόλοιπα διασπώνται σε άλλα μικρότερα σωματίδια υδρογόνου, μεθανίου, διοξειδίου του άνθρακα, εφόσον παραμείνουν αρκετή ώρα στη ζώνη. Αν ο χρόνος παραμονής τους είναι μικρός ή η θερμοκρασία χαμηλή, τότε τα μεσαίου μεγέθους σωματίδια συμπυκνώνονται σαν πίσσα και έλαια, στα τμήματα χαμηλής θερμοκρασίας του συστήματος. Η θερμογόνο δύναμη του παραγόμενου αερίου είναι χαμηλή (3,5 έως 9 MJ/m<sup>3</sup>).

3. Ζώνη οξείδωσης (Oxidation/Burning/Hearth zone): Η ζώνη οξείδωσης σχηματίζεται με την εισαγωγή οξυγόνου, ή αέρα. Οι αντιδράσεις πραγματοποιούνται σε θερμοκρασία 700-2000 °C και είναι εξώθερμες. Εκτός από την παραγωγή θερμότητας σκοπός της οξείδωσης είναι η μετατροπή και οξείδωση των συμπυκνώσιμων προϊόντων της πυρόλυσης. Η ταχύτητα εισαγωγής του αέρα καθώς και η γεωμετρία του αντιδραστήρα επιλέγονται προσεκτικά για την αποφυγή ψυχρών σημείων στη ζώνη οξείδωσης.

4. Ζώνη αναγωγής (Reduction zone): Τα προϊόντα οξείδωσης (θερμά αέρια και υπολείμματα άνθρακα) κινούνται στη ζώνη αναγωγής. Η αισθητή θερμότητα μετατρέπεται σε χημική ενέργεια του παραγόμενου αερίου.

Οι στάχτες που προέρχονται από την αεριοποίηση απομακρύνονται περιστασιακά, γι' αυτό απαιτείται συνήθως μια κινούμενη σχάρα στον πυθμένα του αεριοποιητή. Το τελικό προϊόν είναι ένα εύφλεκτο αέριο που χρησιμοποιείται σε μηχανές εσωτερικής καύσης μετά την απομάκρυνση της σκόνης και αφού ψυχθεί ή καίγεται σε έναν λέβητα.

Το κυριότερο πλεονέκτημα του αεριοποιητή κατερχόμενης ροής θεωρείται η παραγωγή αερίου με χαμηλή περιεκτικότητα σε πίσσα. Πρακτικά, σπάνια προκύπτει αέριο απαλλαγμένο από πίσσα. Η κυριότερη αιτία είναι ότι δεν περνούν τις θερμές ζώνες του αεριοποιητή όλα τα αέρια. Επιπλέον, ο χρόνος παραμονής στη ζώνη οξείδωσης μπορεί να είναι πολύ μικρός. Η θερμοκρασία λειτουργίας αυτού του αεριοποιητή είναι υψηλή και έτσι ο σχηματισμός πίσσας πολύ μικρός. Επίσης, η σχεδίαση και η λειτουργία αυτών των αντιδραστήρων σταθερής κλίνης είναι σχετικά απλή.

Τα μειονεκτήματα των αεριοποιητών κατερχόμενης ροής είναι:

➤ Υψηλές ποσότητες στάχτης και σωματιδίων σκόνης παραμένουν στο αέριο αφού το αέριο πρέπει να περάσει τη ζώνη οξείδωσης όπου συλλέγονται μικρά σωματίδια καύσης.

➤ Οι απαιτήσεις καυσίμου είναι αυστηρές. Το καύσιμο πρέπει να είναι ομοιόμορφα τεμαχισμένο από 4-10 cm έτσι ώστε να μην φράσσεται ο «λαιμός» και να επιτρέπεται στα αέρια πυρόλυσης να θερμαίνονται από τη ζώνη οξείδωσης

➤ Υψηλή θερμοκρασία εξόδου οδηγεί σε αεριοποίηση χαμηλότερης απόδοσης.

- Διασταυρωμένης ροής

Σε έναν αεριοποιητή διασταυρωμένης ροής η τροφοδοσία κινείται προς τα κάτω ενώ ο αέρας εισέρχεται από το πλάι, με τα αέρια να εξέρχονται από την αντίθετη πλευρά της μονάδας στο ίδιο επίπεδο. Μια θερμή ζώνη καύσης / αεριοποίησης δημιουργείται γύρω από την είσοδο του αέρα, με τις ζώνες πυρόλυσης και ξήρανσης να δημιουργούνται υψηλότερα στο πάνω μέρος του αεριοποιητή. Η αεριοποίηση των υπολειμμάτων άνθρακα πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες (1500 OC) στη ζώνη οξείδωσης και οδηγεί σε τοπικά προβλήματα υλικού. Η τέφρα απομακρύνεται στο κάτω μέρος και η θερμοκρασία του αερίου που απομακρύνεται από τη μονάδα είναι 800–900 OC περίπου. Κατά συνέπεια αυτό δίνει μια χαμηλή γενική ενεργειακή απόδοση για τη διεργασία και ένα αέριο με υψηλό περιεχόμενο σε πίσσα.

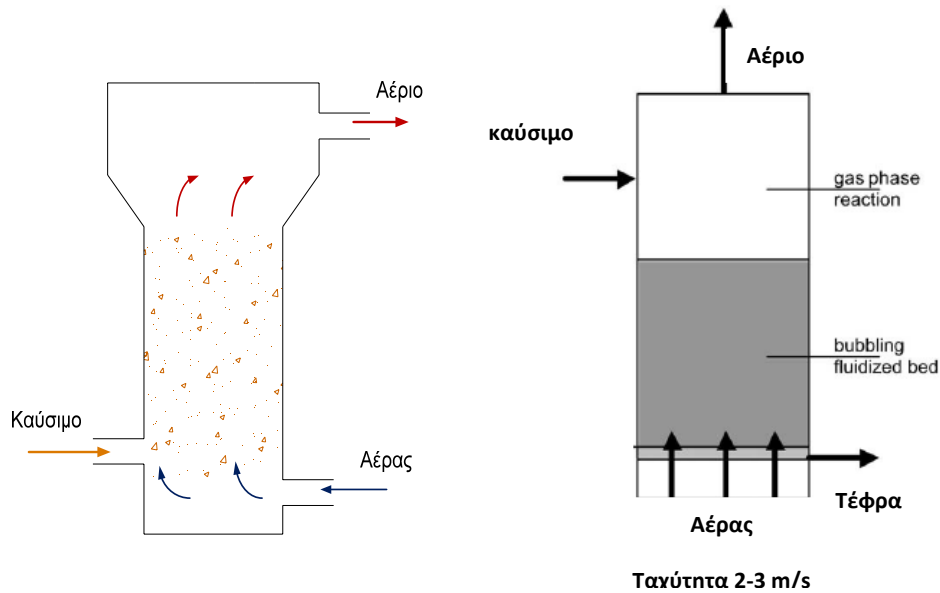
### Λειτουργία αεριοποιητών σταθερής κλίνης

Γενικά οι αεριοποιητές σταθερής κλίνης έχουν το πλεονέκτημα του απλού σχεδιασμού τους αλλά το μειονέκτημα παραγωγής αερίου χαμηλής θερμογόνου δύναμης με υψηλό περιεχόμενο πίσσας. Όταν χρησιμοποιείται αέρας ως μέσο αεριοποίησης, προκύπτει αέριο με υψηλή περιεκτικότητα σε N<sub>2</sub>, διπλασιάζοντας τον όγκο του αερίου και αυξάνοντας το μέγεθος του κατερχόμενου αερίου. Για να ληφθεί ένα αέριο υψηλής θερμογόνου δύναμης η περιεκτικότητα σε υγρασία της τροφοδοσίας πρέπει να είναι < 15–20%, και γι' αυτό το λόγο απαιτείται συνήθως προ-ξήρανση του τροφοδοτούμενου καυσίμου. Η απορριπτόμενη θερμότητα από το σύστημα αεριοποιητή ή το κατάντι σύστημα ανάκτησης ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην προξήρανση του τροφοδοτικού υλικού. Το ενεργειακό περιεχόμενο του παραγόμενου αερίου μπορεί να φθάσει και το 75% του ενεργειακού περιεχομένου της τροφοδοσίας. Οι απώλειες αποτελούνται από την αισθητή θερμότητα στο παραγόμενο αέριο, το θερμικό περιεχόμενο της στάχτης και από απώλειες ακτινοβολίας.

#### 4.2.2 αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης (fluidised bed gasifiers)

- Αντιδραστήρας αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης (Bubbling fluidized bed –BFB gasifier)

Στον αντιδραστήρα αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης η ταχύτητα του προσαγόμενου μέσου αεριοποίησης πρέπει να είναι τόση ώστε να προκαλείται η ρευστοποίηση του υλικού της κλίνης το οποίο είναι συνήθως πυριτική άμμος. Η διατομή ενός τέτοιου αντιδραστήρα είναι συνήθως κυκλική ή τετραγωνική. Η μεγάλη ποσότητα της άμμου σε σχέση με το εισαγόμενο αέριο σταθεροποιεί την θερμοκρασία της κλίνης. Μετά την εισαγωγή του καυσίμου στον αντιδραστήρα ο οποίος περιέχει ρευστοποιημένα θερμά στερεά και αέριο, ένα πρώτο στάδιο της αντίδρασης (μετά την ξήρανση που είναι ταχύτερη) είναι η πυρόλυση, η οποία παράγει αέρια, ανθρακούχο υπόλειμα (char) και πίσσες (tar). Όταν τα προϊόντα αυτά ρέουν προς τα πάνω, στον αντιδραστήρα λαμβάνει χώρα η αντίδραση του δεύτερου σταδίου, η οποία μπορεί να διαχωριστεί στις: ετερογενείς αντιδράσεις (παραγόμενα CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, C, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) και σε ομογενείς με προϊόντα (H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>x</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>2y+2</sub>).

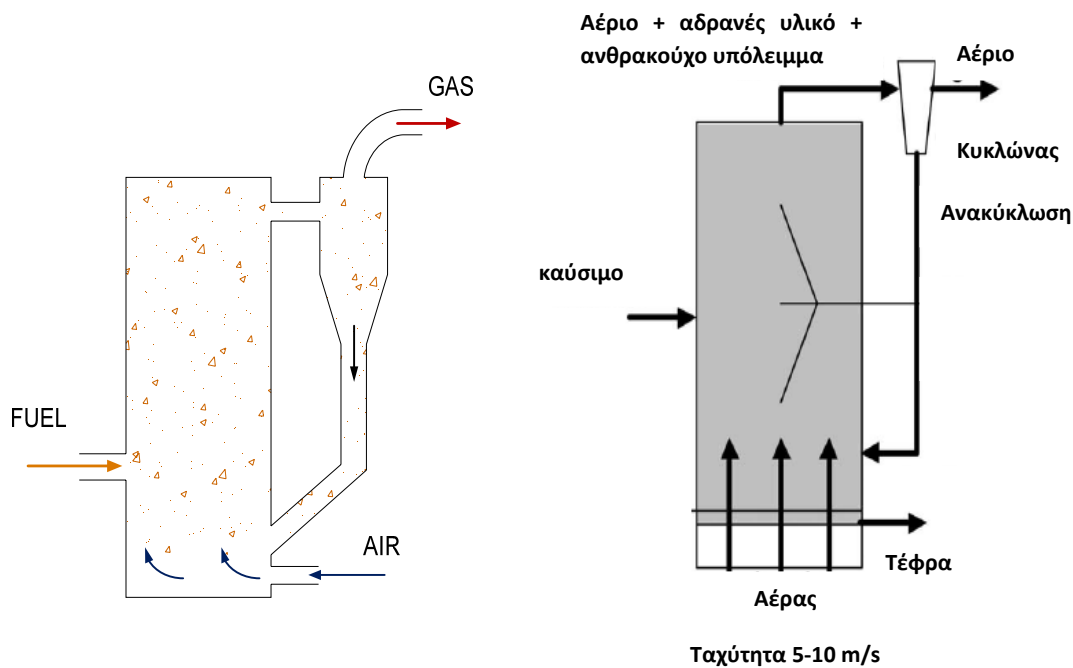


**Εικόνα 5.4 :** Σχηματική απεικόνιση αντιδραστήρα αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης.

- Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία (Circulating fluidized bed –CFB gasifier)

Καθώς η ταχύτητα του προσαγόμενου αερίου αυξάνει η αιώρηση του αδρανούς υλικού και του καυσίμου γίνεται ανεξέλεγκτη με αποτέλεσμα μάζα αυτών να εξέρχεται εκτός του αντιδραστήρα. Το μεγαλύτερο μέρος των στερεών αυτών διαχωρίζεται σε έναν κυκλώνα και επιστρέφει στο κάτω τμήμα του αεριοποιητή αντιδραστήρα. Τα στερεά αυτά περιέχουν ανθρακούχο υπόλειμμα το οποίο καίγεται με τον ρευστοποιημένο αέρα. Αυτή η διεργασία καύσης ,που επιτελείται στο κατώτερο τμήμα του αντιδραστήρα παράγει την απαιτούμενη θερμότητα για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων αεριοποίησης και κατά συνέπεια ενός αυτόθερμου συστήματος.

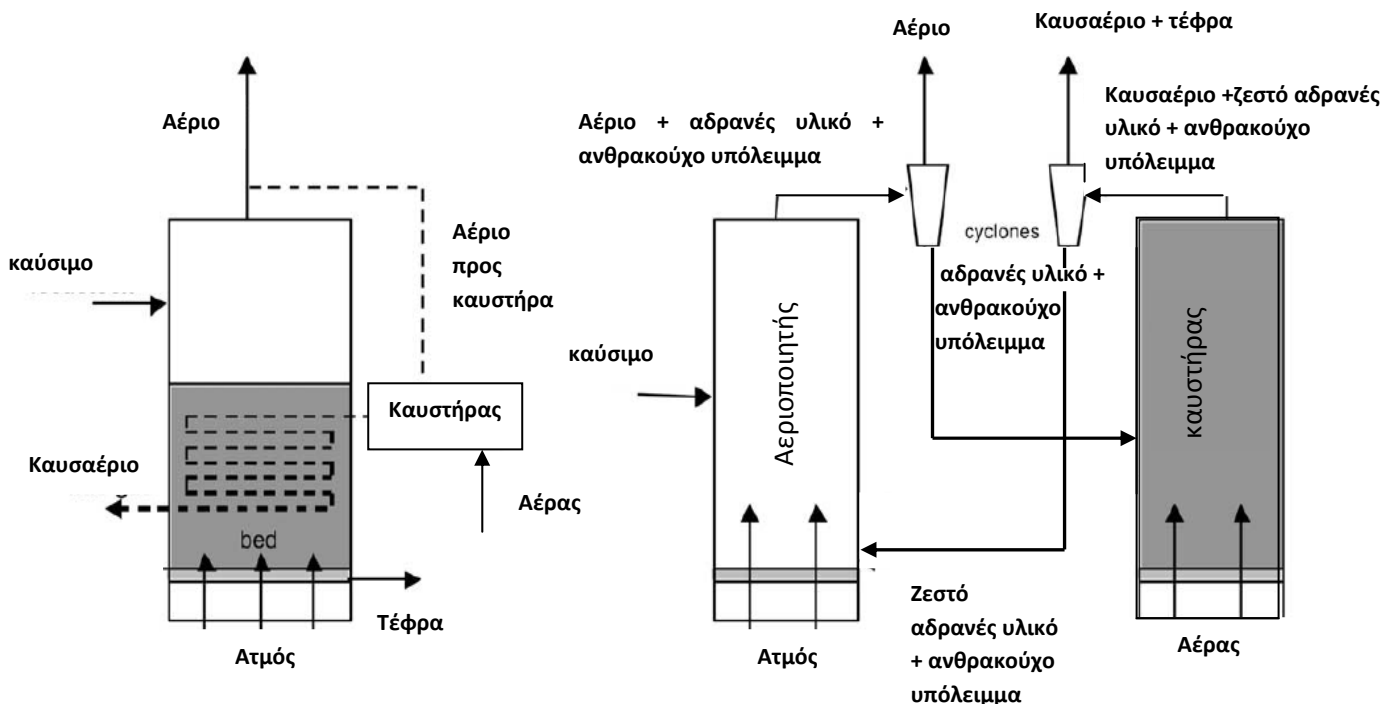




**Εικόνα 5.5 :** Σχηματική απεικόνιση αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία.

#### 4.2.3 Αλλοθερμικοί αντιδραστήρες αεριοποίησης (indirect gasifiers)

Οι αλλοθερμικοί αντιδραστήρες ή αντιδραστήρες έμμεσης αεριοποίησης συνήθως χρησιμοποιούν υδρατμό ως μέσο αεριοποίησης ενώ τους προσδίδεται θερμότητα εξωτερικά ,δηλαδή χωρίς οξείδωση μέρους της προσαγόμενης μάζας καυσίμου. Οι αντιδραστήρες που υπάρχουν σήμερα σε εμπορικά διαθέσιμη μορφή κατηγοριοποιούνται σε έμμεσους αντιδραστήρες ανθρακούχου υπολείμματος (ή δίδυμοι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης) και σε έμμεσους αντιδραστήρες αερίου.



Εικόνα 5.6 : Σχηματική απεικόνιση αλλοθερμικών αντιδραστήρων

Ο αεριοποιητής ανθρακούχου υπολείμματος αποτελείται από δύο ξεχωριστούς αντιδραστήρες : έναν CFB αεριοποιητή υδρατμού που μετατρέπει το στερεό καύσιμο σε αέριο και έναν CFB καυστήρα (combustor) που καίει το ανθρακούχο υπόλειμμα του πρώτου και του παρέχει την απαιτούμενη θερμότητα για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων αεριοποίησης. Το μέσο μεταφοράς θερμότητας από τον καυστήρα στον αεριοποιητή είναι η θερμή άμμος που αποτελεί το υλικό των δύο κλινών και η οποία ανακυκλοφορεί μεταξύ τους. Αυτή η μέθοδος είναι πολύ ταχεία και παράγει αέριο υψηλής θερμογόνου ικανότητας.

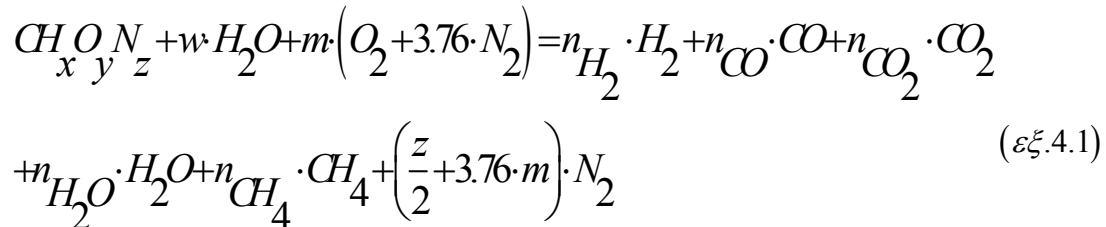
Ο έμμεσος αντιδραστήρας αερίου αποτελείται από έναν BFB αεριοποιητή ο οποίος στο εσωτερικό του περιέχει εναλλάκτη θερμότητας για την πρόσδοση θερμότητας. Στον εναλλάκτη ρέουν τα θερμά καυσαέρια από την καύση μέρους του παραγόμενου αερίου σε εξωτερικό καυστήρα.

Γενικά το μεγάλο πλεονέκτημα της έμμεσης ή αλλοθερμικής αεριοποίησης είναι το αρκετά υψηλής ποιότητας αέριο που παράγεται εν αντιθέσει με το αυξημένο κόστος επένδυσης για την αγορά και συντήρηση των αντιδραστήρων. Ως εκ τούτου πρέπει να συνδυάζεται με συστήματα ανάκτησης ενέργειας υψηλού βαθμού απόδοσης.

### 4.3 Ανάπτυξη μοντέλου αεριοποίησης

#### 4.3.1 Περιγραφή μοντέλου

Για την ανάπτυξη του μοντέλου αεριοποίησης ο χημικός τύπος του καυσίμου θα θεωρηθεί ότι είναι  $CH_xO_yN_z$ . Η γενική εξίσωση αεριοποίησης μπορεί να γρφεί ως εξής:



Όπου X,Y και Z είναι ο αριθμός των ατόμων υδρογόνου ,οξυγόνου και αζώτου ανά άτομο άνθρακα στο καύσιμο. W είναι η ποσότητα υγρασίας ανά kmol καυσίμου και m είναι η ποσότητα οξυγόνου ανά kmol καυσίμου.

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση έχουμε πέντε αγνώστους ,τους

$$n_{H_2}, n_{CO}, n_{CO_2}, n_{H_2O}, n_{CH_4}$$

που αποτελούν και την κατά mole ή κατ' όγκο σύσταση του παραγόμενου αερίου. Συνεπώς για την εύρεση τους απαιτούνται πέντε εξισώσεις.

#### Αρχή διατήρησης μάζας

Οι πρώτες τρεις προέρχονται από την διατήρηση της μάζας του άνθρακα ,του υδρογόνου και του οξυγόνου κατά τη διάρκεια της διεργασίας και έχουν ως εξής :

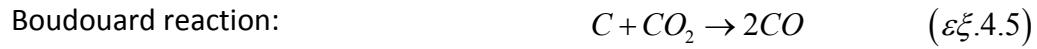
$$n_{CO} + n_{CO_2} + n_{CH_4} - 1 = 0 \quad (\text{εξ.4.2})$$

$$2 \cdot n_{H_2} + 2 \cdot n_{H_2O} + 4 \cdot n_{CH_4} - x - 2 \cdot w = 0 \quad (\text{εξ.4.3})$$

$$n_{CO} + 2 \cdot n_{CO_2} + n_{H_2O} - w - 2 \cdot m - y = 0 \quad (\text{εξ.4.4})$$

#### Χημική ισορροπία

Η κατάσταση χημικής ισορροπίας εξηγείται είτε με ελαχιστοποίηση της ελεύθερης ενέργειας του Gibbs είτε χρησιμοποιώντας τις σταθερές χημικής ισορροπίας της κάθε αντίδρασης που δίδονται στη βιβλιογραφία συναρτήσει της θερμοκρασίας. Οι απομένουσες δύο εξισώσεις λαμβάνονται από τις σταθερές χημικής ισορροπίας των αντιδράσεων που συμβαίνουν στη ζώνη αεριοποίησης όπως φαίνεται παρακάτω:



Ο Zainal [10] και οι Higman και Van der Burgt [12] παραθέτουν ότι οι εξισώσεις (4.5) και (4.6) μπορούν να συνδυαστούν και να δώσουν την αντίδραση water-gas shift αφαιρώντας την (4.5) από την (4.6)

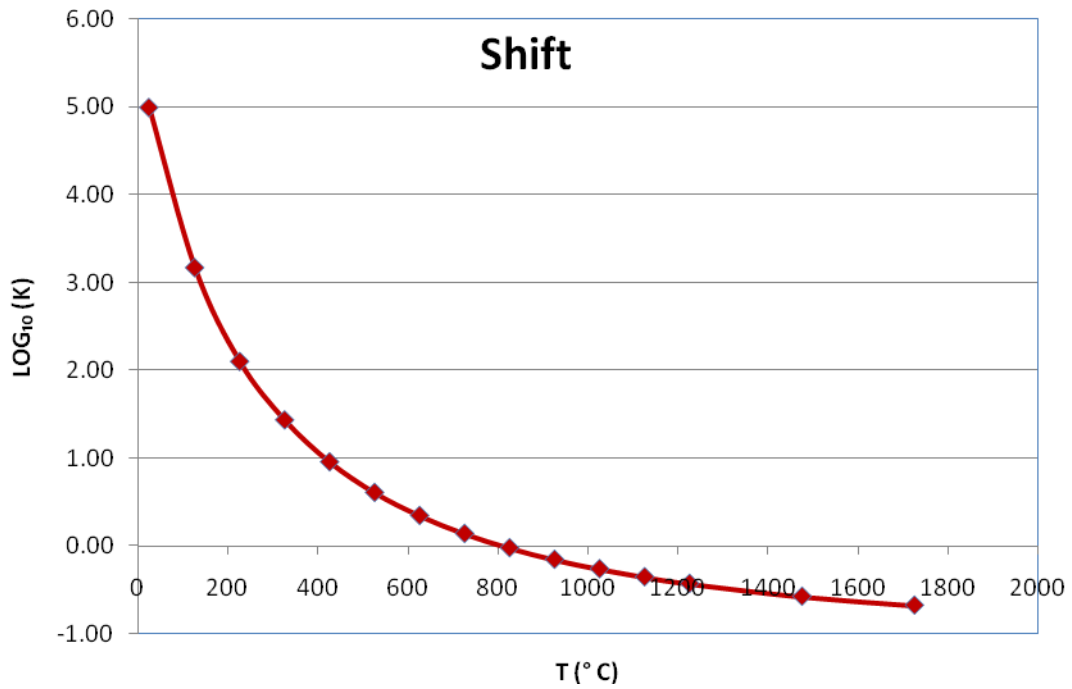


Οι σταθερές χημικής ισορροπίας για τις χρησιμοποιηθέντες αντιδράσεις ορίζονται ως εξής :

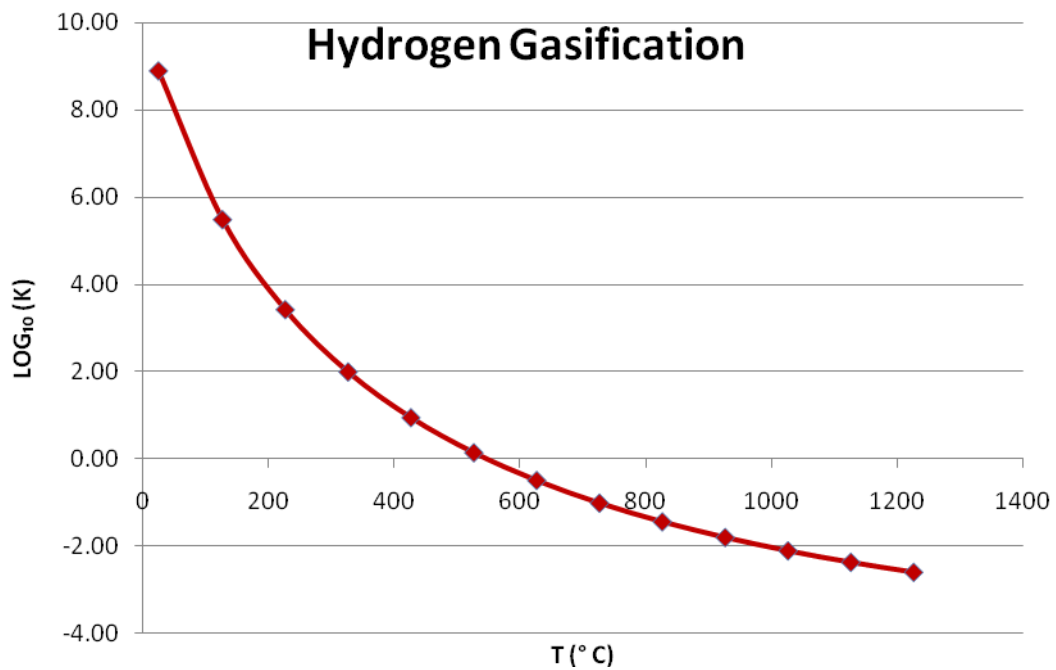
$$K_{shift} = \frac{n_{CO_2} \cdot n_{H_2}}{n_{CO} \cdot n_{H_2O}} \quad (\text{εξ.4.9})$$

$$K_{HG} = \frac{n_{CH_4}}{n_{H_2}^2} \cdot \frac{P_o}{P} \quad (\text{εξ.4.10})$$

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι τιμές των σταθερών ισορροπίας για τις δύο αντιδράσεις.



**Διάγραμμα 4.11:** Σταθερά χημικής ισορροπίας αντίδρασης Shift



**Διάγραμμα 4.12** Σταθερά χημικής ισορροπίας αντίδρασης Hydrogen Gasification

Συνεπώς από τα παραπάνω οι δύο εξισώσεις θα είναι

$$K_{shift} \cdot n_{CO} \cdot n_{H_2O} - n_{CO}^2 \cdot n_{H_2} = 0 \quad (\text{εξ.4.11})$$

$$K_{HG} \cdot n_{CO} \frac{P}{P_o} - n_{CH_4} = 0 \quad (\text{εξ.4.12})$$

#### Ενεργειακό ισοζύγιο

Για να υπολογιστεί η σταθερά χημικής ισορροπίας είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η ενεργειακή εξίσωση λαμβάνοντας υπ' όψιν τις απώλειες του αντιδραστήρα τόσο από τα μη αδιαβατικά του τοιχώματα όσο και από την υπολειπόμενη στάχτη υψηλής θερμοκρασίας. Το ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να γραφεί ως εξής :

$$\sum_{j=react} \bar{h}^o_{f,j} = \sum_{i=prod} n_i (\bar{h}^o_{f,i} + \Delta \bar{h}_{T,i}) + Q_{loss} \quad (\text{εξ.4.13})$$

Όπου  $\bar{h}^o_f$  η ενθαλπία σχηματισμού σε kJ/kmol και  $\Delta \bar{h}_T$  η ενθαλπική διαφορά μεταξύ μιας οποιαδήποτε κατάστασης και της κατάστασης αναφοράς.

Η τελευταία γράφεται

$$\Delta \bar{h}_T = \int_{298}^T \bar{C}_P(T) dT \quad (\text{εξ.4.14})$$

$$\bar{C}_P(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (\text{εξ.4.15})$$

Όπου  $\bar{C}_P(T)$  η μέση ειδική θερμοχωρητικότητα η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και τα a,b,c,d είναι οι πολυωνυμικοί συντελεστές της εκφράσεως της ειδικής θερμοχωρητικότητας για κάθε συστατικό.

#### 4.3.2 Εγκυρότητα μοντέλου αεριοποίησης

Πριν χρησιμοποιηθεί το μοντέλο αυτό για την προσομοίωση της εγκατάστασης στο λογισμικό IPSEPRO είναι σκόπιμο να εξετασθεί η εγκυρότητα του. Για αυτό το σκοπό έγινε μια βιβλιογραφική επισκόπηση σε δημοσιεύσεις ερευνητών που έχουν τόσο υπολογιστικά όσο και πειραματικά αποτελέσματα από την αεριοποίηση ενός στερεού καυσίμου. Στα παραδείγματα που αναφέρονται παρακάτω ως καύσιμο προς αεριοποίηση χρησιμοποιείται βιομάζα προερχόμενη από ξυλεία.

Παρακάτω δίδεται η στοιχειακή ανάλυση της βιομάζας προερχόμενη από ξύλο επί ξηρού.

Υλικό	C	H	N	S	O	Ash	HHV (kJ/kmol)
Ξύλο	50.0	6.0	0.0	0.0	44.0	-	449568

**Πίνακας 4.3 :** Σύσταση βιομάζας από ξύλο

v/v % επί ξηρού	Παρών μοντέλο	Υπολογισμός Zeinal et al	Πειραματικά Zeinal et al
20% υγρασία καυσίμου , 800 °C, τιμές από Zeinal et al			
H <sub>2</sub>	21.74	21.06	15.23
CO	20.31	19.61	23.04
CO <sub>2</sub>	12.34	12.01	16.42
CH <sub>4</sub>	0.00	0.64	1.58
N <sub>2</sub>	45.59	46.68	42.31

**Πίνακας 4.4 :** Σύγκριση αποτελεσμάτων από Zeinal et al με το παρών μοντέλο για ξύλο

v/v % επί ξηρού	Παρών μοντέλο	SynGas model Altafini et al	Cycle-tempo model Altafini et al	Πειραματικά Altafini et al
10% υγρασία καυσίμου , 800 °C, τιμές από Altafini et al				
H <sub>2</sub>	21.43	20.06	21.4	14
CO	24.40	19.7	23	20.14
CO <sub>2</sub>	9.77	10.15	9.74	12.06
CH <sub>4</sub>	0.00	0	0.01	2.31
N <sub>2</sub>	44.38	50.1	45.31	50.79

**Πίνακας 4.5 :** Σύγκριση αποτελεσμάτων από Altafini et al με το παρών μοντέλο για ξύλο

Όπως φαίνεται από τους παραπάνω συγκριτικούς πίνακες τα αποτελέσματα του παρόντος μοντέλου χημικής ισορροπίας είναι ικανοποιητικά κοντά στις τιμές που προβλέπουν οι άλλοι ερευνητές αλλά και κοντά στα πειραματικά τους αποτελέσματα. Η παρατηρούμενη διαφορά μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών τιμών μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι δεν επιτυγχάνεται ισορροπία κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Σε αυτή την άποψη οδηγεί και η παρατήρηση της αυξημένης ποσότητας μεθανίου και στα δύο πειράματα γεγονός που δεν αναμένεται όταν θεωρητικώς επέλθει χημική ισορροπία.

#### 4.4 Καθαρισμός του παραγόμενου αερίου

Η ανάλυση του παραγόμενου αερίου από την αεριοποίηση ενός οργανικού καυσίμου, είτε αυτό προέρχεται από φυτική βιομάζα είτε από αστικά απορρίμματα, είναι καθοριστικής σημασίας για την περεταίρω χρήση του σε διάφορες μηχανές. Όταν η σύνθεση είναι γνωστή, η θερμογόνος δύναμη είναι επίσης γνωστή και αυτό επιτρέπει τον έλεγχο της μηχανής. Παρόλα αυτά εκτός από τα βασικά συστατικά που περιέχονται στο παραγόμενο αέριο υπάρχουν και πολλές ακαθαρσίες ή επιβλαβή συστατικά που μπορούν να δημιουργήσουν λειτουργικό πρόβλημα στο σύστημα ανάκτησης ενέργειας αλλά και να θέσουν πρόβλημα εκπομπής ρυπαντών. Ως εκ τούτου, εν αντιθέσει με την περίπτωση που χρησιμοποιείται φυσικό αέριο απαιτείται η σωστή επεξεργασία του αερίου πριν αυτό εισέλθει σε μια μηχανή. Οι περισσότερες μηχανές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενεργειακή εκμετάλλευση του αερίου όπως αεριοστροβίλοι και εμβολοφόρες αεριομηχανές προορίζονται συνήθως για τη χρήση φυσικού αερίου, ουσιαστικά δηλαδή  $\text{CH}_4$ . Συνεπώς, η χρήση αερίων με χαμηλή θερμογόνο ικανότητα ή με υψηλή περιεκτικότητα σε  $\text{H}_2$  απαιτεί την τροποποίηση αυτών των μηχανών. Τα επιβλαβή συστατικά που περιέχονται στο αέριο από αεριοποίηση αστικών απορριμμάτων ή βιομάζας είναι η σκόνη, το  $\text{H}_2\text{S}$ , αλκαλικά στοιχεία όπως Na, K, βαρέα μέταλλα, και το πιο σημαντικό οι πηκώδεις ουσίες. Ο σχεδιασμός του συστήματος επεξεργασίας του αερίου είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με το είδος του συστήματος ανάκτησης ενέργειας που ακολουθεί. Στον πίνακα περιγράφονται εν συντομία οι συνηθέστεροι ρυπαντές και η επίδρασή τους, ενώ στον πίνακα παρατίθενται οι απαιτούμενες



ιδιότητες του αερίου ,όσον αφορά τις συγκεντρώσεις ρυπαντών, για τα διάφορα συστήματα. Υπάρχουν δύο τύποι καθαρισμού του παραγόμενου αερίου: ο θερμός και ο ψυχρός καθαρισμός.

#### 4.4.1 Τεχνικές επεξεργασίας του παραγόμενου αερίου

##### Θερμική διάσπαση (Thermal cracking)

Η βιομάζα και τα αστικά απορρίμματα παράγουν πίσσες (tars) οι οποίες είναι αρκετά σταθερές και είναι δύσκολο να διασπαστούν με θερμική επεξεργασία. Τα θερμοκρασιακά εύρη που απαιτούνται κυμαίνονται από 1000-1300 °C (Derper and Jess ,1999 ; Quaak et al ,1999). Δύο διαφορετικές ανταγωνιστικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται στους αντιδραστήρες σταθερής κλίνης για την υλοποίηση της θερμικής διάσπασης : χρήση των υψηλών θερμοκρασιών στην ζώνη της εστίας ( hearth zone) και /ή αύξηση του χρόνου παραμονής του αερίου. Κάποιες ανεπτυγμένες εφαρμογές αντιδραστήρων σταθερής κλίνης κατερχόμενης ροής με εσωτερική επανακυκλοφορία του παραγόμενου αερίου μπορούν να παράγουν με επίπεδα πρισών μικρότερα από 50 mg/Nm<sup>3</sup> (Susanto and Beerackers,1996).

##### Καταλυτική διάσπαση

Η διαδικασία παρουσία καταλύτη για την μετατροπή των πρισών χρειάζεται εύρος θερμοκρασίας για τις χημικές αντιδράσεις περίπου από 800-900 °C. Ο δολομίτης CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> είναι ένας αποδοτικός και φθηνός καταλύτης με τη χρήση του οποίου η απόδοση της απομάκρυνσης των πρισών κυμαίνεται από 90-95 %. Η ποσότητα που απαιτείται σε δολομίτη είναι περίπου 0.03 kg/Nm<sup>3</sup> πρωτογενούς αερίου. Η διαδικασία μπορεί να λάβει χώρα τόσο σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης με προσθήκη του καταλύτη στο υλικό της κλίνης ,όσο και σε ειδικό αντιδραστήρα μετά τον αεριοποιητή. Η πρώτη περίπτωση εκμεταλλεύεται τη θερμοκρασία του αντιδραστήρα αλλά η διάρκεια ζωής του καταλύτη δεν είναι μεγάλη. Με τον δεύτερο αντιδραστήρα ο καταλύτης είναι προστατευμένος από ουσίες που μπορούν να τον απενεργοποιήσουν αλλά απαιτείται πρόσθετο οξυγόνο για να οξειδωθεί το αέριο και να αυξηθεί η θερμοκρασία.

##### Έκπλυση (scrubbing)

Συστήματα έκπλυσης με νερό μπορούν χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της συγκέντρωσης των πρισωδών συστατικών στο αέριο. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από δύο πύργους. Στον πρώτο πύργο το αέριο διαποτίζεται με

σταγονίδια νερού θερμοκρασίας 40-80 °C προκαλώντας έτσι την συμπύκνωση των πισσωδών ουσιών πάνω στις σταγόνες. Στον δεύτερο πύργο μια διεργασία έκπλυσης απομακρύνει τα σταγονίδια με τις συμπυκνωμένες πίσσες. Συνήθως χρησιμοποιείται κάποιο πληρωτικό υλικό για την αύξηση της επιφάνειας επαφής μεταξύ του αερίου και του νερού. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι δημιουργία υγρών αποβλήτων.

#### κυκλώνας ή φυγοκεντρικός διαχωριστής

Οι κυκλώνες ανήκουν στη γενική κατηγορία των αδρανειακών συλλεκτών. Σε έναν κυκλωνικό διαχωριστή το αέριο αναγκάζεται λόγω κατάλληλης διαμόρφωσης της εισόδου να κινηθεί σε κυκλική τροχιά. Κατά την περιστροφή η ταχύτητα εισόδου του αερίου μετασχηματίζεται σε ένα στρόβιλο στον οποίο οι φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται ενεργούν πάνω στα αιωρούμενα σωματίδια και τα οδηγούν στα τοιχώματα του διαχωριστή, όπου προσκρούουν και πέφτουν στη χοάνη συλλογής. Σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί η χαμηλή απόδοση κατακράτησης για σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 5-10 μm.

#### Σακκόφιλτρα

Τα σακκόφιλτρα αποτελούν μια αποδοτική και ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία δέσμευσης σωματιδίων με διάμετρο μεγαλύτερη του 0.1μm, με βαθμό απόδοσης κατακράτησης γύρω στο 99%.

#### Συμπύκνωση αλκαλικών μετάλλων

Τα αλκαλικά μέταλλα συμπυκνώνονται στους 550 °C πάνω στα αιωρούμενα σωματίδια. Συνεπώς αν το αέριο φθάσει στους 550 °C και μετά διέλθει από σακκόφιλτρα τα αλκαλικά μέταλλα θα απομακρυνθούν μαζί με τα σωματίδια.

Στους παρακάτω πίνακες 4.6 και 4.7 παρουσιάζονται τα προβλήματα που προκαλούν οι διάφοροι ρυπαντές και οι απαιτήσεις λειτουργίας διαφόρων συστημάτων.

Συμπαγωγικά συστήματα αξιοποίησης παραγόμενου αερίου από στερεό δευτερογενές καύσιμο

Ρυπαντής	Γενικά	προβλήματα
Αιωρούμενα σωματίδια	Προέρχονται από την τέφρα, το ανθρακούχο υπόλειμμα, το υλικό της ρευστοποιημένης κλίνης	Προκαλούν μηχανική διάβρωση των μεταλλικών εξαρτημάτων και ρύπανση της ατμόσφαιρας.
Αλκάλια	Διάφορα αλκαλικά στοιχεία ,κυρίως νάτριο (Na) και κάλιο (K), υπάρχουν σε ατμώδη μορφή	Προκαλούν σε υψηλές θερμοκρασίες διάβρωση των μετάλλων
Άζωτο καυσίμου	Πιθανός σχηματισμός NOx κατά την διάρκεια της καύσης	Ρύπανση από NOx
Θείο και χλώριο	Είναι σύνηθες και αναμενόμενο να υπάρχουν στη βιομάζα και τα αστικά απορρίμματα	Μπορούν να δημιουργήσουν επικίνδυνους ρυπαντές καθώς και διαβρωτικά οξέα
Πίσσα (Tar)	Είναι πηχώδες έλαιο αποτελούμενο από πολύπλοκους οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες που υπάρχουν σε ατμώδη μορφή μέσα στο παραγόμενο αέριο. Είναι δύσκολο να απομακρυνθεί με απλή συμπύκνωση.	Φράσει τα φίλτρα και τις βαλβίδες και προκαλεί μεταλλική διάβρωση

**Πίνακας 4.6 :** Παρουσία ρυπαντών στο παραγόμενο αέριο και σχετικά προβλήματα

	Λέβητας		Εμβολοφόρος M.E.K	Αεριοστρόβιλος
	Μόνος του	Co-firing		
LHV (MJ/Nm <sup>3</sup> )	> 4	Καμία	> 4	> 4
Σωματίδια (mg/Nm <sup>3</sup> )	Καμία	Καμία	< 5-20	< 5-7
Tars (g/Nm <sup>3</sup> )	Καμία	Καμία	< 0.5	< 0.1-0.5
Αλκαλικά μέταλλα (ppm)	Καμία	Καμία	< 1-2	< 0.2-1

**Πίνακας 4.7:** Απαιτήση ποιότητας αερίου για διάφορα συστήματα ανάκτησης ενέργειας

## Κεφάλαιο 5

# Ενεργειακή αξιοποίηση αερίου από STABILAT®

### 5.1 Εισαγωγή

Με τον όρο ενεργειακή αξιοποίηση του παραγόμενου αερίου εννοούμε την καύση του για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας για την κάλυψη των ανάγκων του εργοστασίου μηχανικής ανακύκλωσης Herhof από το οποίο και παράγεται το στερεό καύσιμο που αεριοποιείται. Η συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού γίνεται μέσω της υλοποίησης ενός θερμοδυναμικού κύκλου. Σε έναν θερμοδυναμικό κύκλο το εργαζόμενο μέσο εκτελεί μια κυκλική μεταβολή που ποικίλλει ανάλογα με την φύση και την λειτουργία της εγκατάστασης, στην οποία υπάρχει ένα θερμό θερμοδοχείο, που είναι συνήθως η εστία, ο καυστήρας, ή γενικότερα ο χώρος στον οποίο γίνεται η καύση ή η είσοδος της θερμότητας στον κύκλο, και από τον οποίο απορροφάται θερμότητα μέσω του εργαζόμενου μέσου. Μέρος αυτής της θερμότητας μετατρέπεται σε μηχανικό έργο και, καθώς καμία θερμική μηχανή δεν μπορεί να μετατρέψει πλήρως την θερμότητα σε έργο λόγω του δευτέρου θερμοδυναμικού αξιώματος, η υπόλοιπη θερμότητα αποβάλλεται σε ένα ψυχρό θερμοδοχείο.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ταυτόχρονη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού σε βιομηχανικό επίπεδο.

### 5.2 Συστήματα κύκλου Rankine νερού - υδρατμού

#### 5.2.1 Γενικά

Είναι τα πιο διαδεδομένα συστήματα συμπαραγωγής, κατάλληλα για ισχείς 500 kW-100 MW ή και μεγαλύτερες. Τα συστήματα νερού ατμού υλοποιούν τον κύκλο Rankine και μπορούν να χρησιμοποιήσουν οποιοδήποτε καύσιμο. Ακόμη και στερεά απόβλητα καίγονται σε ειδικούς λέβητες εφοδιασμένους με συστήματα

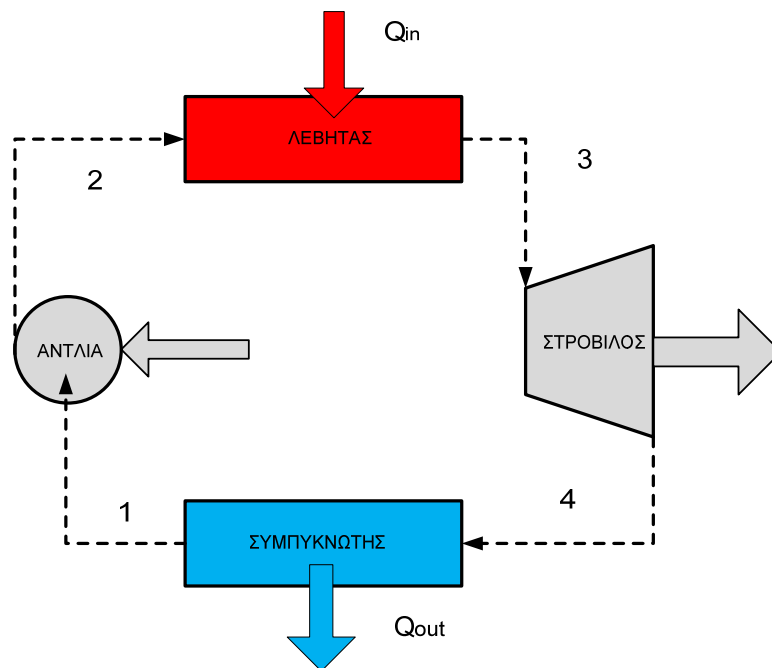
κατακράτησης ή και εξουδετέρωσης ρύπων και τοξικών ουσιών, που δημιουργούνται κατά την καύση. Ο βαθμός απόδοσης φθάνει το 60-85%.

Για σύγκριση, υπενθυμίζεται ότι ο βαθμός απόδοσης ενός συμβατικού ατμοηλεκτρικού σταθμού βρίσκεται στην περιοχή του 35%.

Τα συστήματα ατμοστροβίλου έχουν υψηλή αξιοπιστία, που φθάνει το 95%, υψηλή διαθεσιμότητα (90-95%) και μεγάλη διάρκεια ζωής (25-35 έτη).

### 5.2.2 Περιγραφή λειτουργίας κύκλου Rankine

Ο κύκλος Rankine είναι θερμοδυναμικός κύκλος που μετατρέπει την θερμότητα σε έργο. Η θερμότητα παρέχεται εξωτερικά σε ένα κλειστό κύκλωμα, που χρησιμοποιεί σαν εργαζόμενο μέσο νερό.



**Σχήμα 5.1 :** Κύκλος Rankine

Στον απλό κύκλο Rankine γίνονται οι ακόλουθες διεργασίες:

-Διεργασία 1-2 :Το εργαζόμενο μέσο αντλείται από χαμηλή σε υψηλή πίεση και καθώς το εργαζόμενο μέσο είναι ασυμπίεστο ρευστό η διεργασία αυτή απαιτεί μικρή σχετικά ισχύ.

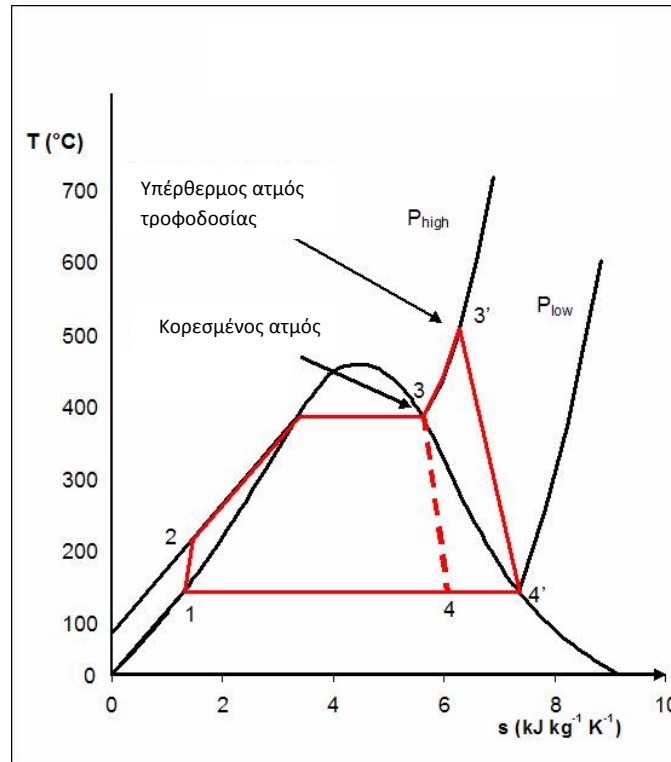
- Διεργασία 2-3: Το υψηλής πίεσης υγρό εισέρχεται σε έναν ατμοπαραγωγό, όπου

θερμαίνεται σε σταθερή πίεση (πρακτικά πάντα υπάρχουν κάποιες απώλειες πίεσης) από εξωτερική πηγή θερμότητας ώστε να μετατραπεί σε ξηρό ατμό (κορεσμένος στον κύκλο κορεσμένου ατμού, υπέρθερμος στον κύκλο του υπέρθερμου ατμού). Η διεργασία αυτή μπορεί να χωριστεί στα ακόλουθα στάδια:

- Στάδιο προθέρμανσης που γίνεται από την έξοδο της αντλίας (υπόψυκτο νερό) ως την κατάσταση κορεσμού του νερού. Γίνεται στους προθερμαντήρες και στον οικονομητήρα του ατμοπαραγωγού.
- Στάδιο ατμοποίησης: το κορεσμένο νερό ατμοποιείται πλήρως ούτως ώστε να μετατραπεί σε κορεσμένο ατμό. Συντελείται στον ατμοποιητή, ο οποίος δίνει την λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης ανάλογα με την πίεση του τροφοδοτικού νερού.
- Στάδιο υπερθέρμανσης : ο κορεσμένος ατμός, που έχει παραχθεί στον ατμοποιητή, εισέρχεται στον υπερθερμαντή και θερμαίνεται μέχρι την υψηλότερη θερμοκρασία του κύκλου. Αν ο κύκλος είναι κύκλος κορεσμένου νερού τότε δεν υπάρχει υπερθερμαντής.

- Διεργασία 3-4 : όπου ο ατμός (κορεσμένος στον κύκλο κορεσμένου ατμού, υπέρθερμος στον κύκλο του υπέρθερμου ατμού) οδηγείται και εκτονώνεται στον ατμοστρόβιλο. Κατά την εκτόνωση μειώνεται η θερμοκρασία και η πίεση του ατμού. Η πίεση εξόδου καθορίζεται από το κενό του συμπυκνωτή. Ανάλογα με την πίεση εξόδου μπορεί να παρουσιαστεί και μερική συμπύκνωση.

- Διεργασία 4-1: όπου ο υγρός ατμός χαμηλής πίεσης οδηγείται στον συμπυκνωτή όπου ψύχεται σε (περίπου) σταθερή πίεση και μετατρέπεται σε κορεσμένο υγρό. Η πίεση και η θερμοκρασία που επικρατούν στον συμπυκνωτή καθορίζονται από την θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου (νερό ή αέρας).



Σχήμα 5.2 : Κύκλος Rankine σε διάγραμμα T-S νερού-υδρατμού

Στον ιδανικό κύκλο Rankine η συμπίεση στις αντλίες και η εκτόνωση στον ατμοστρόβιλο θεωρούνται ισεντροπικές, όπως επίσης θεωρείται ότι δεν υπάρχουν απώλειες πίεσης στον ατμοπαραγωγό και στον συμπυκνωτή. Ωστόσο στην πραγματικότητα αυτές οι μεταβολές δεν είναι ισεντροπικές, είναι μη αναστρέψιμες και αυτό σημαίνει ότι η αντλία καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από την ιδανική αντλία και ο στρόβιλος αποδίδει λιγότερη ενέργεια από τον ιδανικό στρόβιλο.

Η μορφή του απλού κύκλου Rankine φαίνεται στο σχήμα 6.1. Η καθαρή ισχύς που παράγεται από τον κύκλο προκύπτει από την ισχύ που παράγει ο στρόβιλος αν αφαιρεθεί η ισχύς για την κίνηση των αντλιών τροφοδοσίας και συμπυκνωμάτων.

Συνεπώς η καθαρή ισχύς ανα μονάδα μάζας εργαζόμενου μέσου είναι σύμφωνα με την αρίθμηση του σχήματος

$$wi = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) \quad (\text{εξ.5.1})$$

Η προσδιδόμενη θερμότητα από τον ατμοπαραγωγό ανά μονάδα μάζας εργαζόμενου μέσου είναι

$$qi = h_3 - h_2 \quad (\text{εξ.5.2})$$

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου προκύπτει ως το πηλίκο της καθαρής παραγόμενης ισχύος προς την προσδιδόμενη θερμότητα που παρέχεται ανά μονάδα μάζας ατμού.

Έτσι έχουμε :

$$n_{th} = \frac{w_i}{q_i} \quad (\varepsilon\xi.5.3)$$

Σημειώνεται ότι ο κύκλος καθορίζεται πλήρως από την πίεση και την θερμοκρασία του ατμού τροφοδοσίας του ατμοστροβίλου, την πίεση του συμπηκνωτή και τους βαθμούς απόδοσης αντλίας και στροβίλου.

### 5.2.3 Επίδραση παραμέτρων κύκλου στις επιδόσεις

Θα δούμε τώρα πως επηρεάζεται η επίδοση ενός κύκλου νερού – ατμού από τα βασικά μεγέθη του κύκλου ,δηλαδή την πίεση και θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο καθώς και την πίεση εξόδου από αυτόν. Η έννοια του ισοδύναμου κύκλου Carnot είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην αξιολόγηση αυτή.

Για την κατανόηση της έννοιας του ισοδύναμου κύκλου Carnot ορίζεται μια μέση θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας στον κύκλο με την ακόλουθη σχέση:

$$\overline{T}_B = \frac{\int_2^3 T ds}{S_3 - S_2} = \frac{Q_{23}}{S_3 - S_2} \quad (\varepsilon\xi.5.4)$$

Ο αριθμητής ισούται με την θερμότητα που προσδίδεται στον κύκλο του Rankine και η θερμοκρασία  $\overline{T}_B$  είναι τέτοια ώστε η θερμότητα που θα προσδιδόταν σε έναν κύκλο Carnot να είναι ίση με τη θερμότητα  $Q_{41}$  που προσδίδεται στον κύκλο Rankine. Παρόμοια ορίζεται και η μέση θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας

$$\overline{T}_A = \frac{\int_4^1 T ds}{S_4 - S_1} = \frac{Q_{41}}{S_4 - S_1} \quad (\varepsilon\xi.5.5)$$

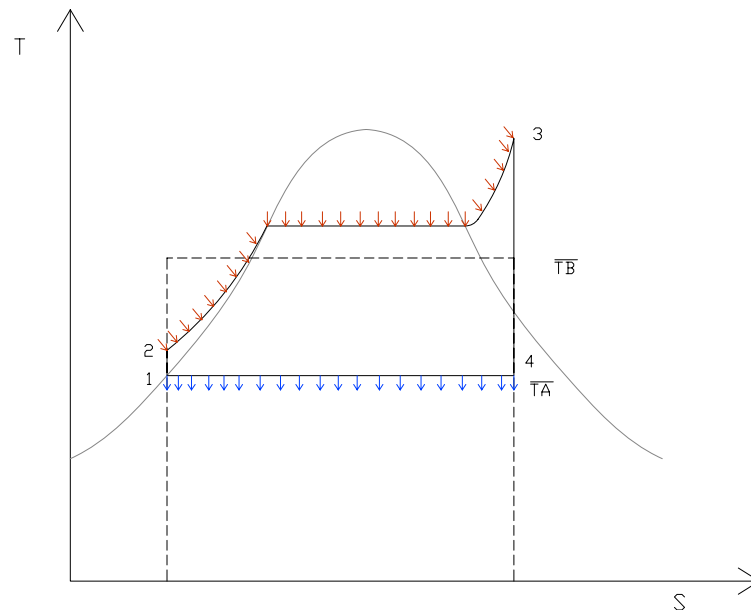


Εδώ η μέση θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας είναι ίση με την πραγματική θερμοκρασία απόρριψης αφού αυτή γίνεται μέσα στη διφασική περιοχή και συνεπώς υπό σταθερή θερμοκρασία.

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$n_{th} = \frac{Q_{23} - Q_{41}}{Q_{23}} = 1 - \frac{Q_{41}}{Q_{23}} = 1 - \frac{(S_4 - S_1) \cdot \overline{T}_A}{(S_3 - S_2) \cdot \overline{T}_B} = 1 - \frac{\overline{T}_A}{\overline{T}_B} \quad (\text{εξ.5.6})$$

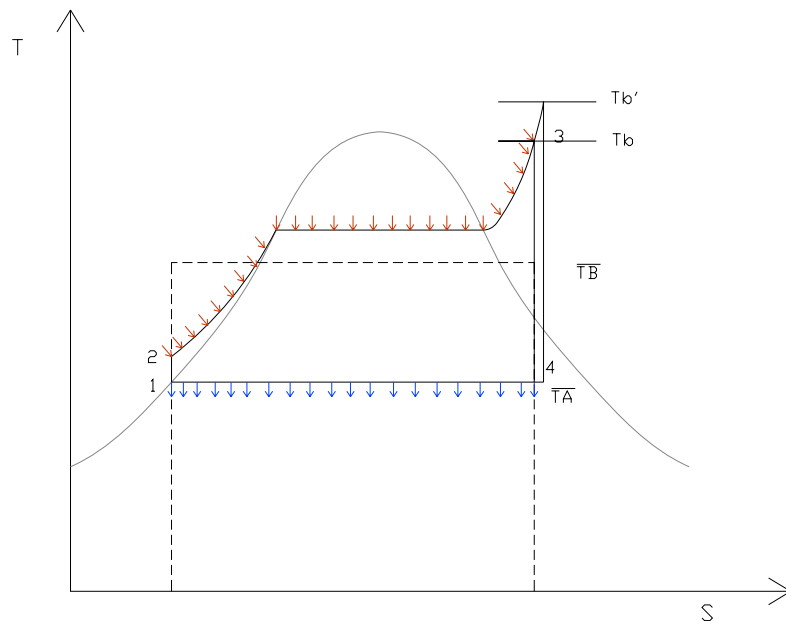
Βλέπουμε ότι ο βαθμός απόδοσης ενός κύκλου Rankine είναι ίσος με αυτόν ενός κύκλου Carnot που λειτουργεί στις μέσες θερμοκρασίες πρόσδοσης και απόρριψης θερμότητας και μπορεί να ονομαστεί ισοδύναμος κύκλος Carnot. Για να δούμε λοιπόν πως επηρεάζεται ο κύκλος Rankine μπορούμε να εξετάσουμε πως επηρεάζεται ο ισοδύναμος του κύκλος Carnot.



**Σχήμα 5.3 :** Κύκλος Rankine και ισοδύναμος κύκλος Carnot

### Επίδραση θερμοκρασίας τροφοδοσίας

Η μεταβολή του κύκλου όταν αυξάνει η θερμοκρασία τροφοδοσίας στην είσοδο του στροβίλου φαίνεται στο σχήμα. Ενώ η θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας παραμένει σταθερή η μέση θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας αυξάνεται με αποτέλεσμα την αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του κύκλου.

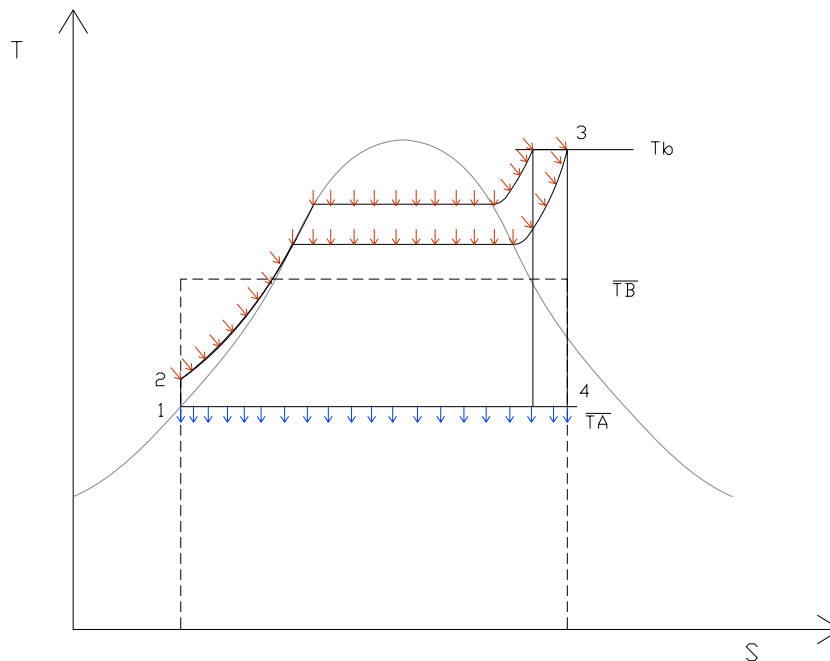


**Σχήμα 5.4 :** Επίδραση αύξησης της θερμοκρασίας τροφοδοσίας σε κύκλο ατμού

Μια επιπλέον ευεργετική επίδραση της αύξησης θερμοκρασίας τροφοδοσίας προκύπτει από τη μείωση της υγρασίας του ατμού στην έξοδο του ατμοστροβίλου. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία δεν μπορεί να ανεβεί πάνω από τα όρια που θέτει η αντοχή των υλικών του ατμοστροβίλου.

### Πίεση τροφοδοσίας

Αύξηση της πίεσης τροφοδοσίας ,με σταθερή τη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου , σημαίνει αύξηση της θερμοκρασίας κορεσμού και συνεπώς αύξηση της μέσης θερμοκρασίας πρόσδοσης θερμότητας στον κύκλο εφ' όσον η πίεση είναι κάτω της κρίσιμης. Έτσι έχουμε αύξηση του βαθμού απόδοσης.



**Σχήμα 5.5 :** Επίδραση αύξησης της πίεσης τροφοδοσίας σε κύκλο ατμού

#### πίεση εξόδου ατμού

Η αύξηση της υποπίεσης στην έξοδο του στροβίλου έχει ευεργετικά αποτελέσματα στις επιδόσεις του κύκλου. Η ευεργετική επίδραση μπορεί να γίνει κατανοητή από το γεγονός ότι η ενθαλπική πτώση για δεδομένη πτώση πίεσης είναι πολύ μεγαλύτερη σε χαμηλές πιέσεις. Έτσι για παράδειγμα μια ενθαλπική μεταβολή 50 kJ/kg από μια αρχική πίεση 20 bar απαιτεί πτώση πίεσης της τάξεως των 3 bar, ενώ από μια αρχική πίεση των 0.5 bar απαιτεί πτώση 0.15 bar. Αυτό μας δείχνει ότι μικρή πτώση πίεσης στο συμπυκνωτή ισοδυναμεί με μεγάλη αύξηση της πίεσης της αντλίας τροφοδοσίας.

Από την άλλη μεριά το μέγεθος της υποπίεσης παίζει σημαντικό ρόλο στο βαθμό απόδοσης του κύκλου και μάλιστα αυτός αυξάνει με μείωση της πίεσης. Το πόσο χαμηλή είναι η πίεση εξαρτάται από τη θερμοκρασία συμπυκνώσεως. Έτσι είναι ιδιαίτερα σημαντικό να διατηρείται ο συμπυκνωτής σε χαμηλή θερμοκρασία, που πετυχαίνεται πχ όταν χρησιμοποιείται νερό χαμηλής θερμοκρασίας. Το μέγεθος του κενού  $P_c$  μέσα στον συμπυκνωτή εξαρτάται από την μερική πίεση του ατμού  $P_{st}$  και τη μερική πίεση του αέρα  $P_a$ , με το άθροισμα των οποίων ισούται  $P_c = P_{st} + P_a$

#### 5.2.4 Παραλλαγές – τρόποι βελτίωσης του κύκλου

##### Κύκλος με αναθέρμανση

Σε αυτήν την περίπτωση ο ατμός αφού εκτονωθεί κατά ένα μέρος στον ατμοστρόβιλο στις βαθμίδες υψηλής πίεσης (ΥΠ), αναθερμαίνεται περίπου σε παρόμοια θερμοκρασία με αυτήν της υπερθέρμανσης, και μετά οδηγείται ξανά στον ατμοστρόβιλο στις υπόλοιπες βαθμίδες (μέσης και χαμηλής πίεσης ΜΠ και ΧΠ αντίστοιχα). Αυτό το μέτρο αυξάνει την μέση θερμοκρασία πρόσδοσης της θερμότητας και αυξάνει τον βαθμό απόδοσης, περιορίζει την συμπύκνωση σταγονιδίων στον ατμοστρόβιλο και έτσι αυξάνει τον βαθμό απόδοσης και του ατμοστροβίλου. Συνήθως γίνεται μια ή δυο αναθερμάνσεις.

##### Κύκλος με αναγεννητική προθέρμανση

Κατά την αναγεννητική προθέρμανση γίνεται προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού με ατμό που απομαστεύεται από συγκεκριμένες θέσεις του ατμοστροβίλου. Οι προθερμαντές μειώνουν την απαιτούμενη ενέργεια για την θέρμανση του νερού αλλά μειώνουν και την αποδιδόμενη ενέργεια στον ατμοστρόβιλο. Με σωστό σχεδιασμό μπορούν να αυξήσουν τον βαθμό απόδοσης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι προθερμαντών, όπως ανοικτού τύπου, κλειστού τύπου όπου τα συμπυκνώματα οδηγούνται προς τα εμπρός (αναμειγνύονται με το προθερμαινόμενο νερό αφού αυξηθεί η πίεσή τους από κατάλληλη αντλία) και κλειστού τύπου όπου τα συμπυκνώματα οδηγούνται προς τα πίσω (στραγγαλίζονται και οδηγούνται προς τον συμπυκνωτή).

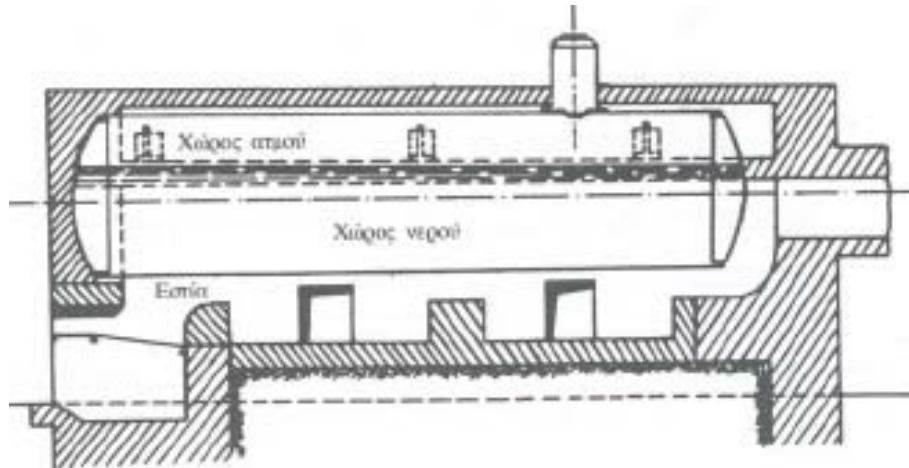
### 5.3 Τμήματα ατμοηλεκτρικής εγκατάστασης

#### 5.3.1 Ατμοπαραγωγός

Ο ατμοπαραγωγός είναι ένα από τα απαραίτητα τμήματα μιας ατμοηλεκτρικής εγκατάστασης καθώς σε αυτόν προσδίδεται η θερμότητα στον κύκλο και πραγματοποιείται η ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου.

Στις πρώτες κατασκευές ατμοπαραγωγών, το εργαζόμενο μέσο (νερό/ατμός) βρισκόταν στο εσωτερικό ενός μεγάλου κυλινδρικού δοχείου (τυμπάνου), ενώ το καυσαέριο κυκλοφορούσε στο εξωτερικό του δοχείου και μέρος της εξωτερικής επιφάνειας αποτελούσε την θερμαινόμενη επιφάνεια του ατμοπαραγωγού. Ωστόσο, επειδή αυτές οι κατασκευές είχαν ελάχιστη θερμαινόμενη επιφάνεια σε

σχέση με τον όγκο τους, είχαν μικρό βαθμό απόδοσης, λόγω της μικρής θερμικής εκμετάλλευσης της θερμικής ενέργειας και έδιναν μικρές παροχές ατμού, ενώ ταυτόχρονα ήσαν δαπανηρές. Ακόμα ο ατμός ήταν μικρής πίεσης και θερμοκρασίας, λόγω περιορισμών από την ίδια την κατασκευή.

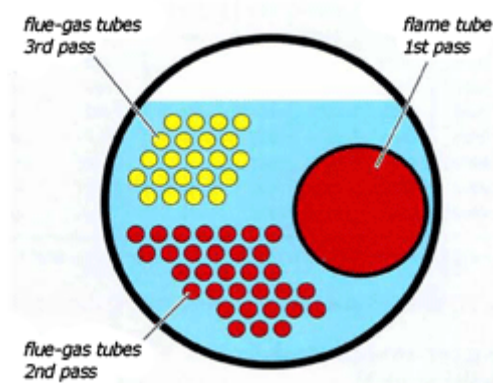
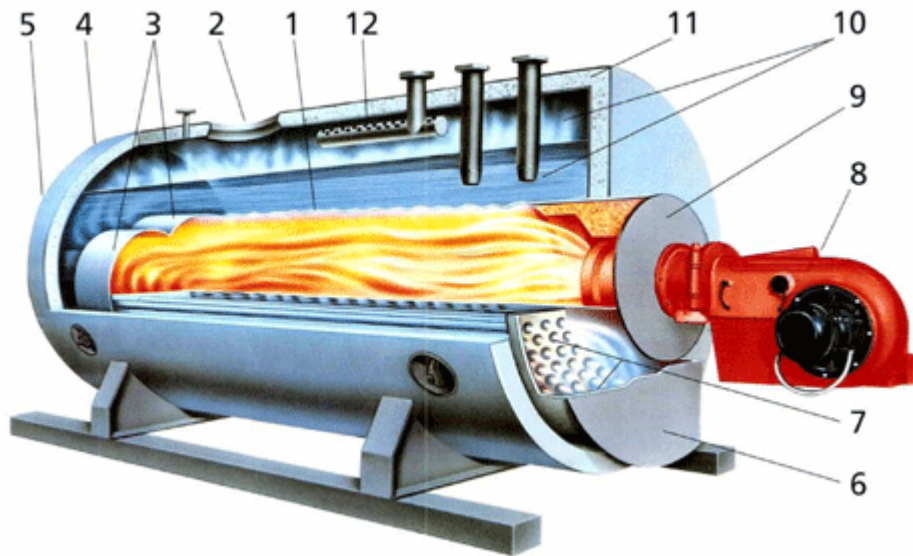


**Σχήμα 5.6 :** Πρώτη κατασκευή ατμοπαραγωγού

Επόμενες προσπάθειες κατασκευής ήταν ο ατμοπαραγωγός με φλογοσωλήνα, όπου στο εσωτερικό του τυμπάνου βρίσκεται σωλήνας μέσα στον οποίο γίνεται η καύση και αποτελεί την πρώτη διαδρομή του καυσαερίου, ο ατμοπαραγωγός με φλογοσωλήνα και αεριαυλούς, παρόμοιος με τον προηγούμενο αλλά στους αεριαυλούς το καυσαέριο ρέει σε δεύτερη ή και τρίτη διαδρομή αυξάνοντας τη συναλλασσόμενη θερμική ισχύ, ενώ υπήρξαν και παραλλαγές των παραπάνω τύπων, π.χ. ατμοπαραγωγός μόνο με αεριαυλούς.

Οι ατμοπαραγωγοί με φλογοσωλήνα και αεριαυλούς αποτελούν έως σήμερα το κύριο είδος ατμοπαραγωγού για μικρού μεγέθους βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Η εικόνα ενός σύγχρονου αεριαυλωτού ατμοπαραγωγού φαίνεται στο σχήμα 5.6



Σχήμα 5.7 : Αεριαυλωτός ατμοπαραγωγός

Τα τμήματα από τα οποία αποτελείται είναι

1. Φλογοσωλήνας
2. Ανθρωποθυρίδα
3. Αναστροφέας καυσαερίων
4. Οπές παρατήρησης φλόγας
5. Ασφάλεια έναντι deflagration
6. Ανοιγόμενη θυρίδα επίσκεψης αεριαυλών
7. Αεριαυλοί
8. Εμπρόσθιος παρατηρητής φλόγας

9. Έκκεντρη τοποθέτηση φλογοσωλήνα για φυσική κυκλοφορία του εργαζόμενου μέσου
10. Υδροθάλαμος και ατμοθάλαμος
11. Μόνωση υδροθαλάμου και ατμοθαλάμου
12. Εξαγωγή ατμού

#### Ενεργειακή ανάλυση ατμοπαραγωγού

Ο βαθμός απόδοσης του ατμοπαραγωγού ορίζεται ως ο λόγος του έργου που αποδίδεται για κατανάλωση προς το έργο που προσδίδεται σε αυτόν, συνήθως μέσω του καυσίμου. Συνεπώς ορίζεται :

$$n = \frac{Q_{\omega\phi}}{Q} \quad (\text{εξ.5.7})$$

Στον ατμοπαραγωγό, όπως και σε κάθε θερμική μηχανή, η αξιοποίηση του προσδιδόμενου θερμικού έργου δεν είναι πλήρης (δηλαδή κατά το μετασχηματισμό σε ωφέλιμο έργο, χάνεται ένα μέρος του προς το περιβάλλον υπό τη μορφή διάφορων απωλειών). Έτσι το ωφέλιμο έργο πάντα υπολείπεται του προσδιδόμενου κατά τις απώλειες αυτές, με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης να είναι πάντα μικρότερος της μονάδας. Έτσι μπορεί να γραφεί:

$$n = \frac{Q_{\omega\phi}}{Q} = \frac{Q - \sum Q_i}{Q} \quad (\text{εξ.5.8})$$

Όπου :

$\sum Q_i$  το άθροισμα των θερμικών απωλειών

Το ωφέλιμο έργο είναι εκείνο που ατμοπαραγωγός προσδίδει στο τροφοδοτικό νερό για να το μετατρέψει σε υπέρθερμο ατμό και ορίζεται ως εξής:

$$Q_{\omega\phi} = m_D \cdot (h_u - h_w) \quad (\text{εξ.5.9})$$

Όπου:

$m_D$  η παροχή ατμού  $kg/sec$

$h_w$  η ενθαλπία του τροφοδοτικού νερού σε  $kJ/kg$

$h_u$  η ενθαλπία του ατμού που εξέρχεται του ατμοπαραγωγού σε  $kJ/kg$

Ως προσδιδόμενο θερμικό έργο εννοείται αυτό αποδίδεται κατά την καύση του καυσίμου, καθώς και οποιαδήποτε άλλη θερμική ποσότητα εισέρχεται στον θάλαμο καύσης του ατμοπαραγωγού όπως π.χ η θερμότητα  $m_L \cdot \Delta h_L$  εάν υπάρχει προθέρμανση του αέρα καύσης ή αντίστοιχη θερμότητα αν το καύσιμο εισέρχεται προθερμασμένο. Γενικά όμως ισχύει:

$$Q = m_B \cdot H_u \quad (\text{εξ.5.10})$$

Όπου:

$m_B$  η παροχή καυσίμου σε  $kg/sec$

$H_u$  η θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου σε  $kJ/kg$

Οι απώλειες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες

Απώλειες εστίας: οι απώλειες που παρατηρούνται στην εστία του ατμοπαραγωγού οφείλονται στο γεγονός ότι τι καύσιμο που εισάγεται σε αυτήν, είτε δεν καίγεται όλο είτε δεν καίγεται τελείως. Οι απώλειες εστίας εκφράζονται με το βαθμό απόδοσης της εστίας

$$n_E = \frac{Q_1}{Q} = \frac{m_{B1} \cdot H_u}{m_B \cdot H_u} = \frac{m_{B1}}{m_B} \quad (\text{εξ.5.11})$$

Όπου:

$m_{B1}$  το πραγματικά καιόμενο καύσιμο σε  $kg/sec$

Απώλειες λόγω θερμών καυσαερίων: Η απώλεια αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα καυσαέρια εξέρχονται του ατμοπαραγωγού με σχετικά μεγάλη θερμοκρασία (100-120 °C ανάλογα με την περιεκτικότητα σε θείο στο καύσιμο). Η απώλεια αυτή εκφρασμένη σε θερμική ισχύ γράφεται



$$Q_G = m_{B1} \cdot \mu_G \cdot (h_{Ga} - h_{Go}) \quad (\text{εξ.5.12})$$

Όπου:

$\mu_G$  η μάζα των καυσαερίων ανα Kg πραγματικά καιόμενου καυσίμου

$h_{Ga}$  η ενθαλπία των καυσαερίων στην έξοδο του ατμοπαραγωγού

$h_{Go}$  η ενθαλπία των καυσαερίων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στις απώλειες ακτινοβολίας: Οι απώλειες ακτινοβολίας αντιπροσωπεύουν τις απώλειες προς το περιβάλλον από τα ζεστά τοιχώματα του ατμοπαραγωγού και εξεργώνται από μέγεθός του ,το φορτίο λειτουργίας και το είδος του καυσίμου.

Μια ικανοποιητική σχέση που δίδει τις απώλειες συναρτήσει του ωφέλιμου φορτίου είναι η εξής:

$$Q_L = c \cdot Q_{\omega\phi}^{0.7} \quad (\text{εξ.5.13})$$

Όπου :

C παράγοντας που εξαρτάται από το καύσιμο.

### 5.3.2 Αντλίες

Σε μια εγκατάσταση συμπαραγωγής μικρής κλίμακας οι κύριες αντλίες που χρησιμοποιούνται είναι :

Η τροφοδοτική αντλία, η οποία είναι η βασική αντλία και αυξάνει την πίεση του εργαζόμενου μέσου για την υλοποίηση του κύκλου του Rankine. Η τροφοδοτική αντλία αντλεί το νερό από το τροφοδοτικό δοχείο – απαεριωτή και το καταθλίβει στον ατμοπαραγωγό. Κατά τον υπολογισμό της πίεσης της τροφοδοτικής αντλίας πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι ακόλουθες αντιστάσεις:

- Αντίσταση των σωλήνων μεταξύ αντλίας ατμοπαραγωγού
- Αντίσταση οικονομητήρα
- Αντίσταση απομονωτικών βαλβίδων και οργάνων
- Αντίσταση ρυθμιστικών βαλβίδων
- Αντιστάσεις μέσα στον ατμοπαραγωγό

Αντλία συμπυκνώματος, η οποία χρησιμοποιείται για τη αύξηση της πίεση του συμπυκνώματος έως την πίεση του τροφοδοτικού δοχείου. Τούτο συμβαίνει μόνο εάν χρησιμοποιείται στρόβιλος συμπύκνωσης όπου η πίεση εξόδου είναι χαμηλότερη τη εξωτερικής όπως θα εξηγηθεί παρακάτω.

### 5.3.3 Συμπυκνωτής και ψυκτικός πύργος

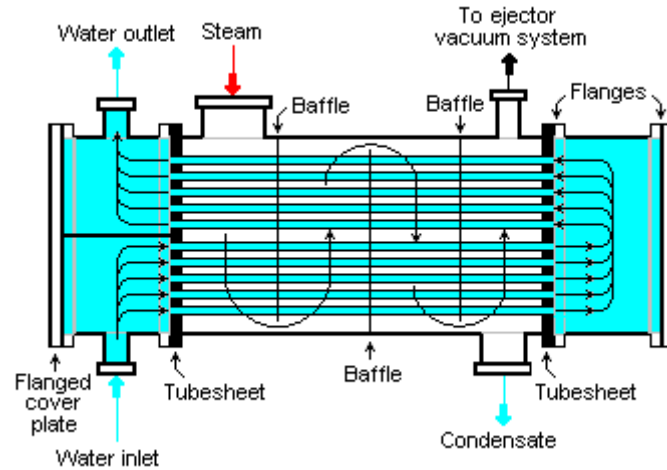
Σε μια ατμοηλεκτρική εγκατάσταση συμπαραγωγής είναι δυνατό να μην χρησιμοποιείται η αποβαλλόμενη θερμότητα συμπύκνωσης του ατμού για τις θερμικές ανάγκες καθώς αυτές μπορεί να είναι μικρότερες από την απορριπτόμενη θερμότητα. Για την αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης είναι αναγκαίο η εγκατάσταση να είναι εξοπλισμένη με έναν συμπυκνωτή ,ο οποίος δεν είναι παρά ένας εναλλάκτης θερμότητας στον οποίο ο ατμός που εξέρχεται του στροβίλου συμπυκνώνεται με τη βοήθεια κάποιου ψυκτικού μέσου (νερό ή αέας).

Τα τμήματα από τα οποία αποτελείται ο συμπυκνωτής είναι :

1. Τον κυρίως εναλλάκτη
2. Αντλίες ψυκτικού μέσου οι ανεμιστήρες ψυκτικού αέρα
3. Αντλίες συμπυκνώματος
4. Συσκευές δημιουργίας κενού
5. Σωλήνες ,βαλβίδες κλπ.

Οι συμπυκνωτές ανάλογα με το ψυκτικό μέσο διακρίνονται σε:

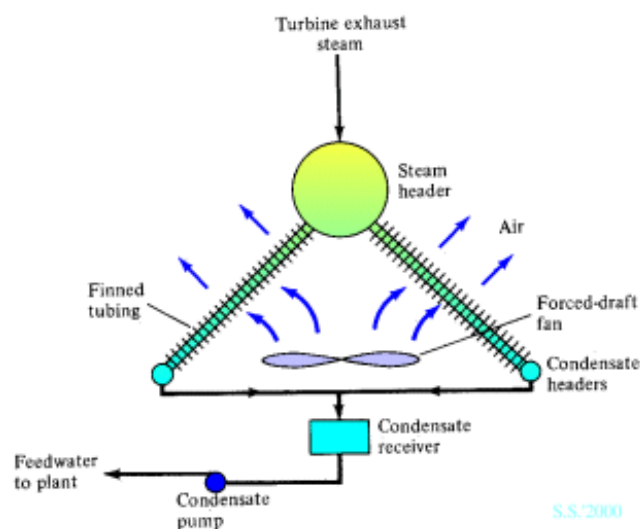
- 1) Υδρόψυκτους συμπυκνωτές. Σε αυτούς το νερό ως ψυκτικό μέσο μπορεί να προέρχεται από τη θάλασσα η ένα ποτάμι (ανοικτό σύστημα) ή να ψύχεται σε ψυκτικό πύργο (κλειστό σύστημα). Η μορφή ενός συμπυκνωτή που λειτουργεί με νερό ως ψυκτικό μέσο φαίνεται στο κάτωθι σχήμα.



**Σχήμα 5.8 :** Υδρόψυκτος συμπυκνωτής

Η παραπάνω περίπτωση αποτελεί τον επιφανειακό υδρόψυκτο συμπυκνωτή όπου τα ρεύματα του συμπυκνώματος και του ψυκτικού νερού είναι σαφώς διαχωρισμένα. Εναλλακτικός τρόπος είναι ο ατμός να συμπυκνώνεται με έγχυση νερού. Ποσότητα νερού ίση με την ποσότητα του ατμού επιστρέφει πίσω στο θερμικό κύκλωμα ενώ η παραμένουσα ποσότητα οδηγείται για ψύξη με αέρα σε επιφανειακό εναλλάκτη θερμότητας (σύστημα Heller).

- 2) Αερόψυκτους συμπυκνωτές. Σε αυτήν την περίπτωση αέρας ρέει εξωτερικά της επιφάνειας του εναλλάκτη και συμπυκνώνει άμεσα τον ατμό. Η μορφή ενός τέτοιου συμπυκνωτή είναι η εξής στο σχήμα

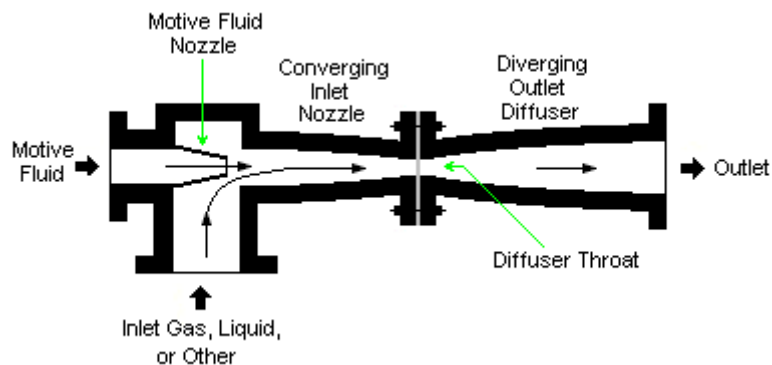


**Σχήμα 5.9:** Αερόψυκτος συμπυκνωτής

### Δημιουργία κενού

Σε προηγούμενη παράγραφο εξετάστηκε η σημασία της ύπαρξης υποπίεσης στην έξοδο του στροβίλου για την αύξηση του βαθμού απόδοσης. Για να επιτευχθεί πίεση μικρότερης της ατμοσφαιρικής μέσα στον συμπυκνωτή να δημιουργηθεί και να διατηρείται κενό. Παρόλα αυτά Κατά την λειτουργία του ατμοστροβίλου μπορεί να έχουμε είσοδο αέρα από ατελή κατασκευή του άκρου χαμηλής πίεσης που λειτουργεί με πιέσεις κάτω από την ατμοσφαιρική. Ο αέρας αυτός πρέπει να αφαιρεθεί, γιατί μειώνει την απόδοση του κύκλου αυξάνοντας την πίεση του συμπυκνωτή και μειώνοντας το αποδιδόμενο έργο του ατμοστροβίλου. Έτσι χρησιμοποιούνται διατάξεις για την αναρρόφηση του αέρα αυτού.

Συνήθως χρησιμοποιείται σύστημα έγχυσης ατμού ή νερού. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην δημιουργία χαμηλής πίεσης με επιτάχυνση του ρευστού έγχυσης μέσα από συγκλίνον ή συγκλίνον/αποκλίνον ακροφύσιο. Αέρας μαζί με ατμό αναρροφάται από τον συμπυκνωτή αναμειγνύεται με την δέσμη υψηλής ταχύτητας και στην συνέχεια επιβραδύνεται για αύξηση της πίεσης με σκοπό η τελική πίεση να γίνει μεγαλύτερη ή ίση με την ατμοσφαιρική, ώστε να γίνει δυνατή η αποβολή του στην ατμόσφαιρα. Για να γίνει αυτό μπορεί να απαιτηθούν πολλαπλές βαθμίδες έγχυσης. Τέτοιου είδους διατάξεις χρησιμοποιούνται για την αρχική δημιουργία του κενού κατά την έναρξη λειτουργίας. Εκτός από τους εγχυτές χρησιμοποιούνται και αντλίες εκτοπίσεως για τη δημιουργία του κενού στον συμπυκνωτή.



**Σχήμα 5.10 :** Διάταξη δημιουργίας κενού

### 5.3.4 Ατμοστρόβιλος

Ο ατμοστρόβιλος είναι η μηχανή που μετατρέπει την θερμική ενέργεια που έχει προσδοθεί στον κύκλο σε μηχανική ενέργεια μέσω της εκτόνωσης του ατμού στις περιστρεφόμενες βαθμίδες του. Οι ατμοστρόβιλοι αποτελούν τη μοναδική αποτελεσματική λύση για μεγάλες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής αλλά υπάρχουν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μηχανές με ισχύ κάτω του 1 MW όπως ο εικονιζόμενος.



**Εικόνα 5.1 :** Ατμοστρόβιλος 500 kW της εταιρίας Spilling

Η κατηγοριοποίηση των ατμοστροβίλων μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους :

- Με βάση τον τύπο των πτερυγώσεων που χρησιμοποιούνται.

Ο σχεδιασμός της κινητής και σταθερής πτερύγωσης ενός στροβίλου στηρίζεται στην αεροθερμοδυναμική ανάλυση της ροής. Χαρακτηριστικό των πτερυγώσεων είναι ο βαθμός αντίδρασης. Με βάση τον βαθμό αντίδρασης μπορούμε να διακρίνουμε δυο τύπους βαθμίδων, τις βαθμίδες δράσης και αντίδρασης. Ο βαθμός αντίδρασης ορίζεται ως η ενθαλπική πτώση που συμβαίνει στην κινητή πτερύγωση (στάτορα) προς την συνολική ενθαλπική πτώση όλης της βαθμίδας δηλαδή

$$r = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3} \quad (\text{εξ.5.14})$$

Ταυτόχρονα δηλώνει που γίνεται η μεταβολή της πίεσης.

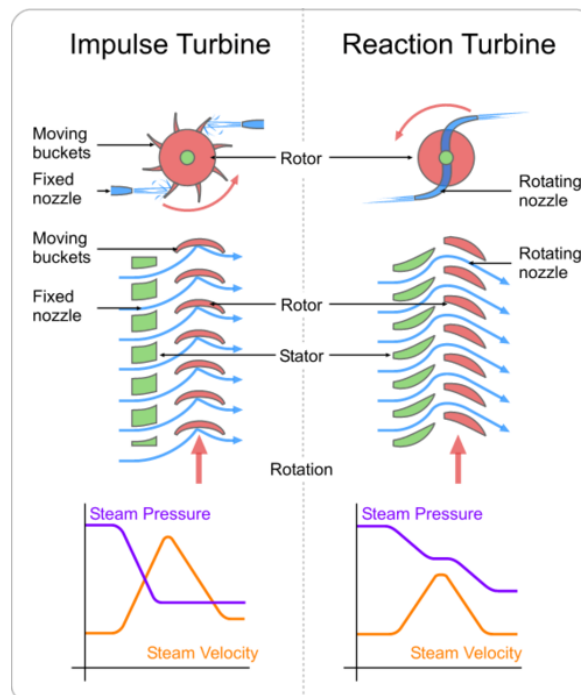
Έτσι στους στροβίλους δράσης ο βαθμός αντίδρασης ( $r$ ) είναι κοντά στο 0 και η μεταβολή πίεσης είναι πολύ μεγαλύτερη στην σταθερή πτερύγωση. Τέτοιοι ατμοστρόβιλοι είναι οι :

1. Μονοβάθμιοι στροβίλοι δράσης
2. Βαθμίδες ταχύτητας (Curtis)

### 3. Βαθμίδες πίεσης (Rateau)

Στους στροβίλους δράσης (ισόθλιπτοι, impulse turbines) η μορφή των σταθερών πτερυγίων είναι τέτοια ούτως ώστε να σχηματίζουν ακροφύσια και να επιταχύνουν την ροή, ελαττώνοντας την πίεση. Η ροή αφού εξέλθει από την σταθερή πτερύγωση προσπίπτει στην κινητή πτερύγωση και ωθεί τα πτερύγιά της με δύναμη που ασκεί σε αυτά λόγω μεταβολής της ορμής του ρευστού και μόνο. Η δύναμη που προκαλείται οφείλεται στην μεταβολή της κατεύθυνσης της ροής, χωρίς να μεταβάλλεται η σχετική ταχύτητα της πτερωτής. Κατά την δίοδο του ρευστού μέσω των κινούμενων πτερυγίων δεν έχουμε μεταβολή της στατικής πίεσης μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του ρότορα.

Στους στροβίλους με βαθμό αντίδρασης μεγαλύτερο του μηδενός (υπέρθλιπτοι, reaction turbines), ανάλογα με τον βαθμό αντίδρασης έχουμε πτώση πίεσης τόσο στο ρότορα όσο και στο στάτορα. Σε έναν αξονικό στρόβιλο με βαθμό αντίδρασης 100% τα σταθερά πτερύγια μεταβάλλουν την γωνία ροής χωρίς μεταβολή της πίεσης η οποία γίνεται αποκλειστικά στα κινητά πτερύγια, που δημιουργούν συγκλίνοντα ακροφύσια, επιταχύνοντας τη ροή και ασκώντας δύναμη αντίδρασης που περιστρέφει τα κινητά πτερύγια. Οι δυο μηχανισμοί ανάπτυξης δύναμης πάνω στα πτερύγια δεν έχουν φυσική διαφορά, καθώς ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσονται δυνάμεις στις αεροτομές είναι ουσιαστικά ο ίδιος. Στην πράξη έχουμε πάντα συνδυασμό και των δυο μηχανισμών εξάσκησης δυνάμεων πάνω στις πτερυγώσεις, απλά σε ορισμένες περιπτώσεις ένας από τους δυο μηχανισμούς είναι προεξέχων.



**Σχήμα 5.11 :** Μηχανισμοί λειτουργίας στροβίλων δράσης και αντίδρασης

- Με κριτήριο τις συνθήκες τροφοδοσίας και τη ροή του ατμού.

-Ατμοστροβίλοι συμπυκνώσεως όπου η έξοδος του ατμοστροβίλου γίνεται στο συμπυκνωτή όπου έχουμε χαμηλές πιέσεις μικρότερες της ατμοσφαιρικής. Επίσης στην έξοδο του ατμοστροβίλου εμφανίζεται μερική υγροποίηση του ατμού. Συνήθως μέγιστο όριο υγροποίησης είναι η ξηρότητα να είναι  $x=85\%$ . Αυτοί οι στροβίλοι συνήθως χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής. Χρησιμοποιούνται σε όλους τους λιθανθρακικούς, πυρηνικούς και συνδυασμένου κύκλου σταθμούς, Η συμπυκνούμενη υγρασία που εμφανίζεται στις τελευταίες βαθμίδες απαιτεί ιδιαίτερη κατασκευή των πτερυγίων με υψηλή αντοχή.

-Ατμοστροβίλοι αντίθλιψης όπου ο ατμός στην έξοδο έχει μεγάλη πίεση, δηλαδή 1-6bar. Αυτοί οι στροβίλοι χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν καταναλώσεις ατμού σε μεγάλη πίεση και θερμοκρασία ή ακόμα και ένας άλλος στροβίλος χαμηλότερης πίεσης. Η πίεση εξόδου του στροβίλου καθορίζεται από μια ρυθμιστική βαλβίδα που ρυθμίζει την πίεση ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

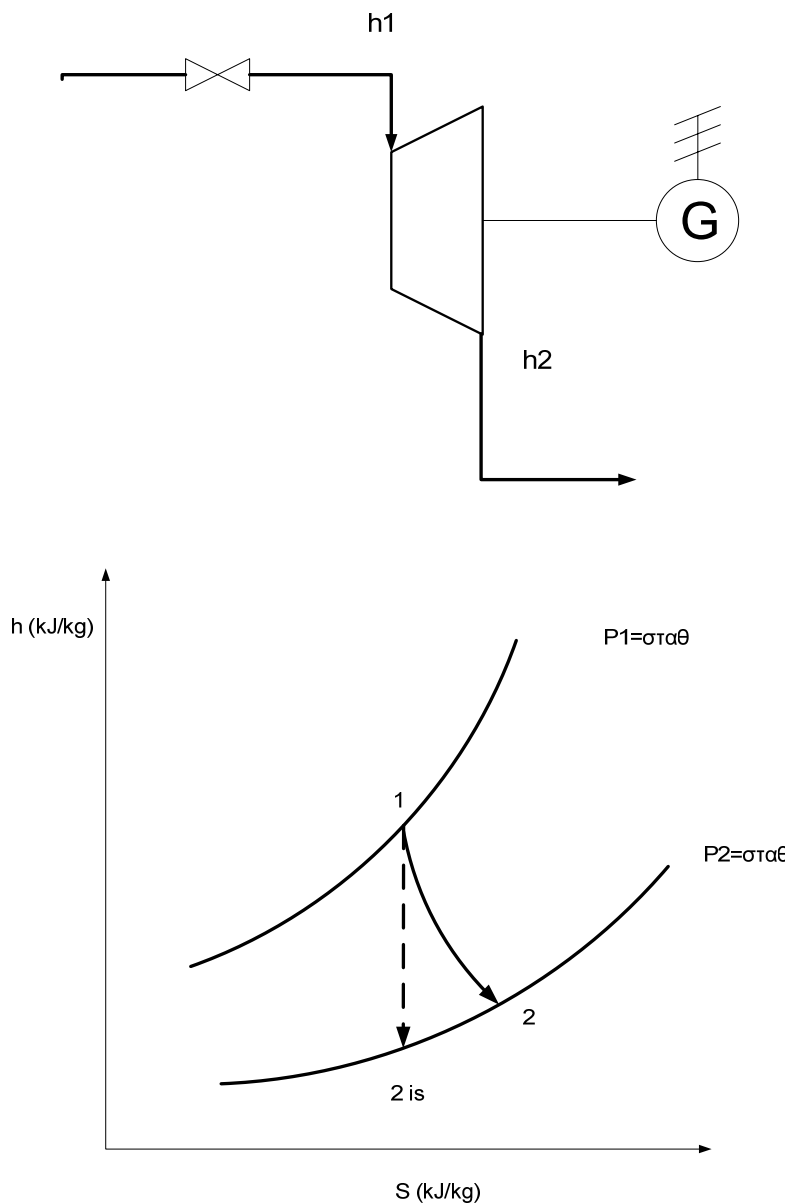
-Ατμοστροβίλοι με αναθέρμανση που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στην παραγωγή ενέργειας. Στη διάταξη με αναθέρμανση ο ατμός εξέρχεται από το τμήμα υψηλής πίεσης του στροβίλου και επιστρέφει στον ατμοποιητή όπου αναθερμένεται. Μετά ο ατμός εισέρχεται στο τμήμα μέσης πίεσης και συνεχίζει την εκτόνωση.

-Ατμοστροβίλοι με απομαστεύσεις για εξωτερική τροφοδοσία, όπου μέρος του ατμού απομαστεύεται σε κατάλληλο μέρος του ατμοστροβίλου, ώστε να έχει την επιθυμητή πίεση, για την επιτέλεση κάποιας άλλης διεργασίας. Έτσι δεν εκτονώνεται όλη η ποσότητα του ατμού στο στροβίλο. Σε έναν θερμικό σταθμό οι απομαστεύσεις μπορεί να εξυπηρετούν π.χ. την προθέρμανση του νερού. Οι απομαστεύσεις μπορεί να υπόκεινται σε έλεγχο πίεσης με στραγγαλιστική βαλβίδα ή να μην ελέγχονται. Ωστόσο πάντα υπάρχει μια βαλβίδα μιας κατεύθυνσης σε κάθε έξοδο απομάστευσης. Επίσης υπάρχει βαλβίδα ασφαλείας που ελέγχει την πίεση στις απομαστεύσεις σε περίπτωση θέσης εκτός λειτουργίας.

Ενεργειακή ανάλυση ατμοστροβίλου

Το βασικότερο χαρακτηριστικό του ατμοστροβίλου όσον αφορά την ενεργειακή ανάλυση της εκτόνωσης είναι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{is}$ .

Στα παρακάτω γραφήματα φαίνεται σχηματικά η εκτόνωση στο στρόβιλο.



**Σχήμα 5.12 :** Εκτόνωση σε στρόβιλο

Ο ατμός κατάστασης 1 θα εκτονωθεί στην κατάσταση 2. Αν η εκτόνωση ήταν ιδανική τότε η μεταβολή παριστάνεται θερμοδυναμικά στο παρακάτω διάγραμμα T-S με την ευθεία 1-2<sub>is</sub>. Στην πραγματικότητα όμως η εκτόνωση δεν είναι ισεντροπική με αποτέλεσμα να αυξάνεται η εντροπία του εργαζόμενου μέσου το



οποίο ακολουθεί την καμπύλη 1-2. Για να εκφραστεί το πόσο απέχει η εκτόνωση από την αντίστοιχη ισεντροπική ορίζεται ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ως εξής :

$$n_{is} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2_{is}}} \quad (\text{εξ.5.15})$$

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τυπικές τιμές του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης για διαφόρου μεγέθους μηχανές.

Ισχύς (kW)	Τύπος	Πίεση τροφοδοσίας (bar)	Θερμοκρασία τροφοδοσίας (°C)	$n_{is}$
1000	Single/Curtis	20-50	Κορεσμένος-535	0.55-0.7
5000	Multi-stage	30-60	480-520	0.7-0.8
10000	Multi-stage	40-80	480-540	0.8-0.85
30000	Multi-stage	60-150	500-560	0.85-0.88

**Πίνακας 5.1 :** Ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης ατμοστροβίλων

Η ισχύς που αποδίδει στην ηλεκτρογεννήτρια  $\eta$  σε οποιαδήποτε άλλη κινούμενη από αυτόν μηχανή πχ. αντλία κλπ είναι

$$P = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) \cdot \eta_m \quad (\text{εξ.5.16})$$

Όπου :

$\dot{m}$  : η παροχή μάζας του ατμού

$\eta_m$  : ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου που συνήθως κυμαίνεται 0.97-0.98

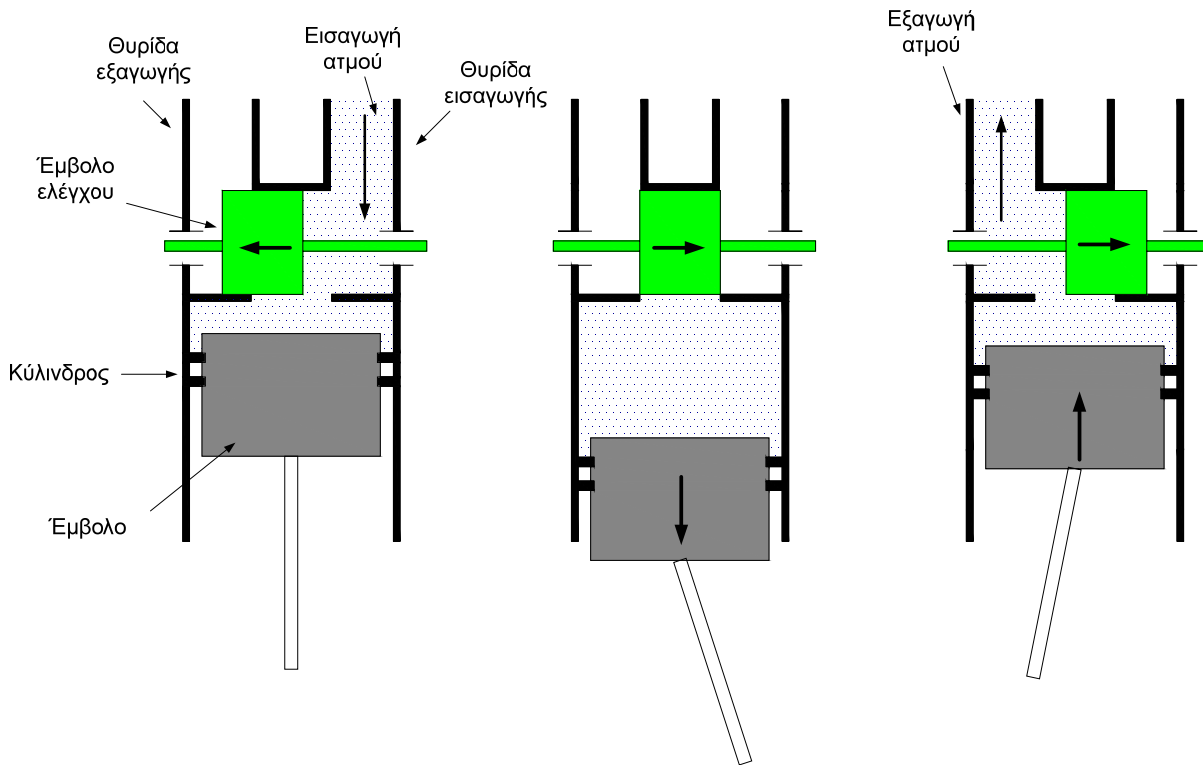
### 5.3.5 Παλινδρομική μηχανή ατμού

Οι παλινδρομικές μηχανές ατμού είναι γνωστές από παλιά. Σήμερα έχουν έρθει πάλι στο προσκήνιο όσον αφορά τη χρήση τους σε εφαρμογές συμπαραγωγής μεσαίας και μικρής κλίμακας 100 kW-2000 kW αφού σε αυτά τα μεγέθη ισχύος είναι ανταγωνιστικότερες μηχανές έναντι των στροβίλων από πλευράς απόδοσης. Η φιλοσοφία του κύκλου του ατμού είναι η ίδια ,δηλαδή νερό καταθλίβεται σε ατμολέβητα ο οποίος παράγει ατμό σε κορεσμένη ή υπέρθερμη κατάσταση και τροφοδοτεί την ατμομηχανή που πλέον έχει αντικαταστήσει τον στρόβιλο σαν παραγωγό μηχανικού έργου.



**Εικόνα 5.2 :** Ατμομηχανή σε μονάδα συμπαγωγής ισχύος 500 kWel

Η λειτουργία μιας τέτοιας μηχανής συνδυάζει τον τρόπο λειτουργίας των παλιών γνωστών ατμομηχανών και μιας σύγχρονης μηχανής εσωτερικής καύσης. Ο ατμός υπό υψηλή πίεση εισέρχεται από τη θυρίδα εισαγωγής όταν το έμβολο βρίσκεται στο άνω νεκρό σημείο (ΑΝΣ) μέχρις ότου διακοπεί η τροφοδοσία από το έμβολο ελέγχου. Ο ατμός εκτονώνεται ωθώντας το έμβολο προς τα κάτω παράγοντας μηχανικό έργο μέσω του μηχανισμού στροφάλου-διωστήρα. Καθώς αυξάνει ο όγκος η πίεση μειώνεται. Όταν το έμβολο φτάσει το κάτω νεκρό σημείο (ΚΝΣ) αυτό αρχίζει να ακολουθεί αντίθετη πορεία και να ανεβαίνει προς τα πάνω. Παράλληλα το έμβολο ελέγχου απελευθερώνει την θυρίδα εξαγωγής με αποτέλεσμα ο ατμός να εξωθείται προς τα έξω. Όταν το έμβολο φτάσει στο ΑΝΣ η διαδικασία επαναλαμβάνεται.



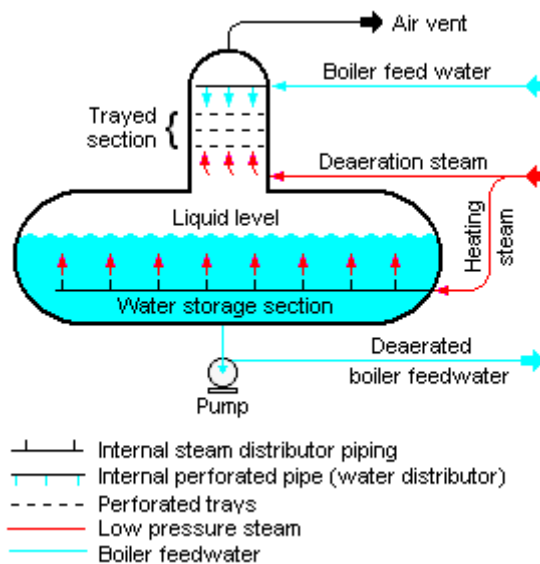
**Σχήμα 5.13:** Τρόπος λειτουργίας παλινδρομικής μηχανής ατμού

Οι πίεση τροφοδοσίας μιας τέτοιας μηχανής μπορεί να κυμαίνεται από 6-60 bar, με πίεση εξόδου έως και 20 bar ανάλογα με την απαίτηση της ποιότητας ατμού του καταναλωτή που ακολουθεί πίσω από τη μηχανή.

### 5.3.6 Απαερίωτής

Η απαερίωση είναι μια διαδικασία απαραίτητη για την σωστή λειτουργία του ατμοπαραγωγού προκειμένου να απαλλάξει το νερό από αέριες διαλυμένες ουσίες που μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση. Γενικά ονομάζουμε απαερίωση την διαδικασία με την οποία απομακρύνονται από το νερό διαλυμένα αέρια, η παρουσία των οποίων θα προκαλούσε επικίνδυνες διαβρώσεις σε σωλήνες, τύμπανα, συλλέκτες και προθερμαντήρες νερού. Αυτά τα αέρια είναι το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα και το χλώριο. Το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα είναι διαλυμένα στο φυσικό νερό μαζί με άλλα αδρανή αέρια, όπως άζωτο. Το χλώριο βρίσκεται σε νερό που έχει υποστεί διαδικασία απομάκρυνσης των βλαβερών μικροοργανισμών. Η σπουδαιότερη μέθοδος απαερίωσης είναι η θερμική απαερίωση. Ο τρόπος λειτουργίας αυτής της μεθόδου βασίζεται στο ότι η διαλυτότητα των αερίων στο νερό ελαττώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Σύμφωνα με τους νόμους του Henry και του Dalton η διαλυτότητα ενός αερίου στο

νερό είναι κατευθείαν ανάλογη της μερικής πίεσης του αερίου στο νερό. Με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει η πίεση του υδρατμού και μειώνονται έτσι οι μερικές πιέσεις των διαλυμένων αερίων. Στο σημείο βρασμού η πίεση υδρατμού είναι τόσο υψηλή ώστε οι μερικές πιέσεις των αερίων να είναι μηδενικές. Έτσι θερμαίνεται το νερό μέχρι την θερμοκρασία βρασμού, οπότε μηδενίζεται η διαλυτότητα των αερίων και τα αέρια μπορούν να απομακρυνθούν. Τα αέρια μπορούν να εξέλθουν μόνον από την εξωτερική επιφάνεια του νερού που βρίσκεται σε κατάσταση βρασμού. Για τον λόγο αυτό σε μια εγκατάσταση θερμικής απαερίωσης θα πρέπει να δημιουργείται όσο το δυνατό μεγαλύτερη επιφάνεια νερού. Αύξηση της επιφάνειας του νερού γίνεται με καταιονισμό και διασκορπισμό του νερού ώστε να δημιουργηθούν σωματίδια. Έτσι τα αέρια μπορούν να απομακρυνθούν γρήγορα, εφόσον το νερό έχει θερμανθεί αρκετά. Ο πιο διαδεδομένος τύπος θερμικού απαεριωτή είναι ο απαεριωτής ανάμειξης με πτώση νερού.



**Σχήμα 5.14 :** Απαεριωτής

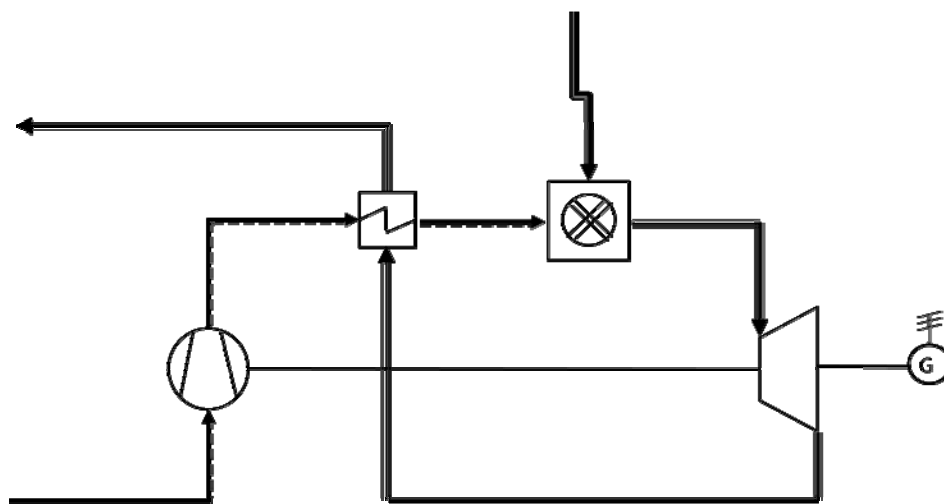
Το νερό εισέρχεται στην κεφαλή του απαεριωτή, όπου με την βοήθεια ακροφυσίων ή άλλης διάταξης κατανέμεται σ' όλη την διατομή του κυλίνδρου του απαεριωτή. Με την τοποθέτηση κατάλληλων διαφραγμάτων επιβραδύνεται η πτώση του νερού, ενώ συγχρόνως διασπάται σε όλο και μικρότερα σταγονίδια. Έτσι προκύπτει μεγάλη επιφάνεια νερού που μεταβάλλεται συνέχεια. Η διαδρομή διάχυσης των αερίων προς την επιφάνεια είναι πολύ μικρή και έτσι μπορούν εύκολα τα αέρια να απομακρυνθούν από το νερό. Σε αντίθετη ροή προς το νερό δηλαδή από κάτω προς τα πάνω ρέει υπέρθερμος ατμός ο οποίος προθερμαίνει το νερό μέχρι το σημείο βρασμού. Μια καλή απαερίωση μπορεί να επιτευχθεί μόνο αν η θερμοκρασία του νερού είναι το πολύ 15°C περίπου κάτω από το σημείο βρασμού. Με τον τρόπο

αυτό εξασφαλίζεται ικανοποιητική ροή ατμού από κάτω προς τα άνω ενώ τα αέρια με μια ποσότητα ατμού εξέρχονται από την κεφαλή του απαεριωτή. Το απαεριωθέν νερό συγκεντρώνεται στην τροφοδοτική δεξαμενή κάτω από ένα στρώμα ατμού. Εάν έχουμε υψηλές απαιτήσεις για τροφοδοτικό νερό, τότε υπάρχει στην τροφοδοτική δεξαμενή μια επιπλέον εγκατάσταση παροχής ατμού. Με αυτόν τον τρόπο το νερό διατηρείται σε κατάσταση κορεσμού. Η εγκατάσταση αυτή χρησιμεύει και για προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού μέχρι το σημείο βρασμού λειτουργώντας έτσι ως προθερμαντής τροφοδοτικού νερού ανοικτού τύπου.

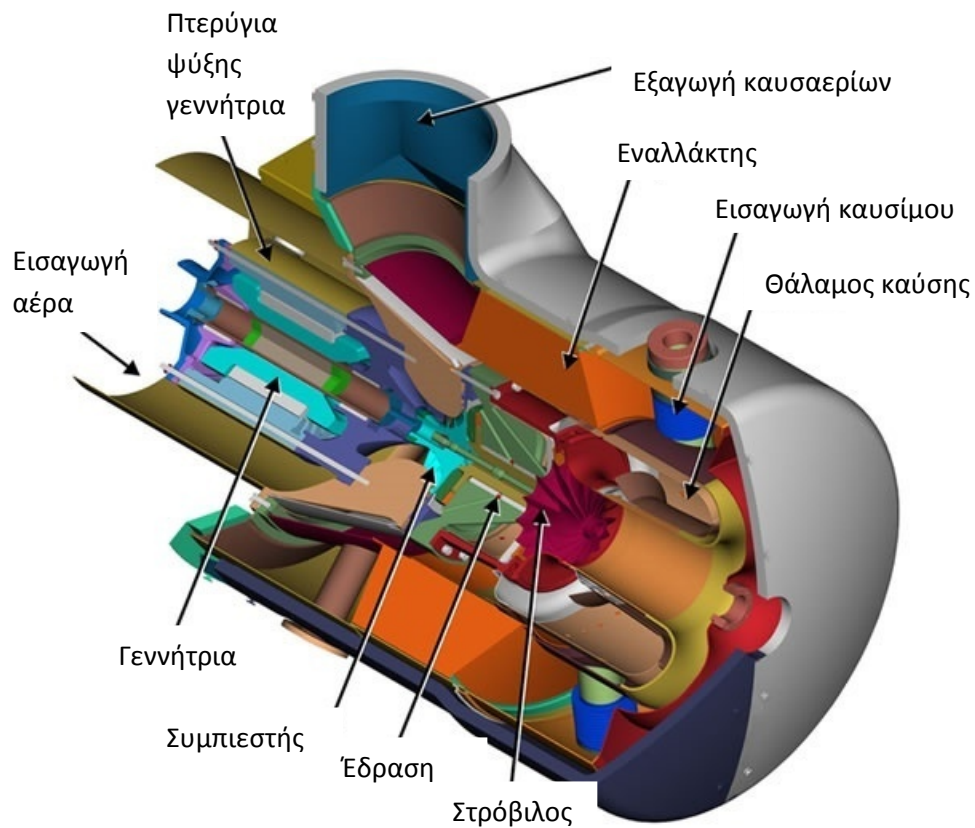
#### 5.4 Παραγωγή ενέργειας με μικροτουρμπίνα

##### 5.4.1 Γενικά

Οι μικροτουρμπίνες είναι μικροί αεριοστρόβιλοι κατάλληλοι για αποκεντρωμένες εφαρμογές παραγωγής ενέργειας μικρής σχετικά ισχύος. Βασικό τους χαρακτηριστικό αποτελεί η ύπαρξη εναλλάκτη θερμότητας (Recuperator) που χρησιμοποιεί την θερμότητα των ζεστών καυσαερίων για να προθερμάνει τον αέρα πριν αυτός εισέλθει στον θάλαμο καύσης. Δηλαδή με λίγα λόγια όπως φαίνεται από το σχήμα ο αέρας συμπιέζεται από τον συμπιεστή (συνήθως ακτινικό), θερμένεται από τον εναλλάκτη και οδηγείται στο θάλαμο καύσης. Το καυσαέριο με θερμοκρασία έως και 1000 °C εισέρχεται στο στρόβιλο, εκτονώνεται και περνώντας από τον εναλλάκτη εγκαταλείπει τη μικροτουρμπίνα με θερμοκρασία 250-350 °C. Η ισχύς αυτών των μηχανών ποικίλει από 30 kW μέχρι 200 kW με βαθμό απόδοσης 25 %-33 %.



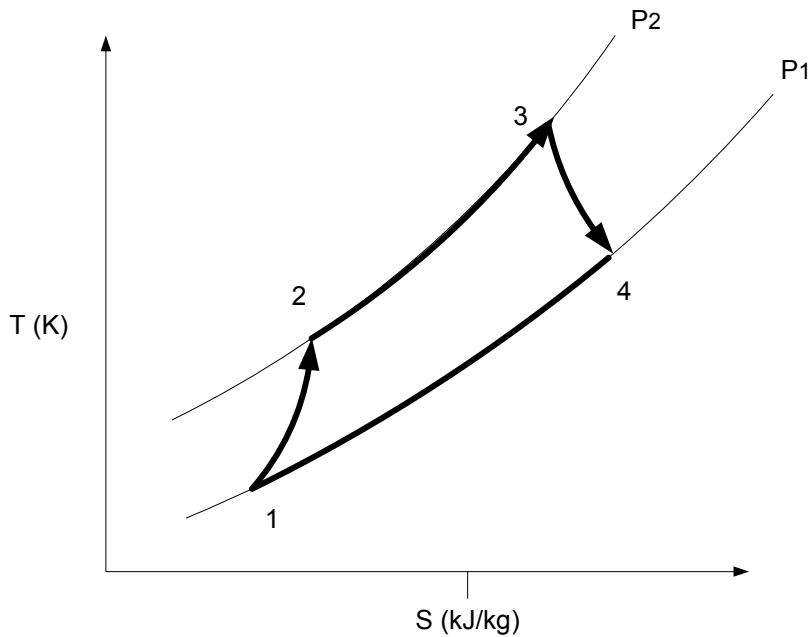
**Σχήμα 5.15 :** Μικροτουρμπίνα



**Σχήμα 5.16 :** Τομή μικροτουρμπίνας

#### 5.4.2 Περιγραφή λειτουργίας

Οι μικροτουρμπίνες λειτουργούν με βάση τον κύκλο Joule-Brayton ο οποίος φαίνεται στο σχήμα 6.16



Σχήμα 5.17 : Κύκλος Joule-Brayton

Οι διεργασίες που συμβαίνουν στον απλό κύκλο Joule-Brayton είναι οι ακόλουθες: ο αέρας του εξωτερικού περιβάλλοντος αναρροφάται στο συμπιεστή, όπου και συμπιέζεται (1-2), μετά οδηγείται στο θάλαμο καύσης, όπου αναμειγνύεται με το καύσιμο και αναφλέγεται (2-3) και, τέλος, τα καυσαέρια οδηγούνται στο στρόβιλο, όπου και εκτονώνονται μέχρι την τελική πίεση που είναι η ατμοσφαιρική (3-4). Η μεταβολή (4-1), που είναι ισόθλιπτη αποβολή θερμότητας γίνεται μόνο στους αεροστροβίλους κλειστού κυκλώματος. Ο βαθμός απόδοσης του απλού κύκλου εξαρτάται άμεσα από την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, που αυτή είναι η θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυτή, τόσο αυξάνεται και η απόδοση και η συγκέντρωση ισχύος. Ωστόσο υπάρχει περιορισμός που τίθεται από τα υλικά του στροβίλου λόγω αντοχής στις συνεχείς υψηλές θερμοκρασίες. Όσον αφορά την σχέση λόγου πίεσης και βαθμού απόδοσης, υπάρχει ένας βέλτιστος λόγος πίεσης που εξαρτάται από τις θερμοκρασίες εισόδου συμπιεστή και στροβίλου και το βαθμό απόδοσής τους. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης της μηχανής ορίζεται από τη σχέση

$$\eta = \frac{P}{\dot{m}_f \cdot H_u} \quad (\text{εξ.5.17})$$

Όπου:

$P$  η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στους ακροδέκτες της γεννήτριας,

$\dot{m}_f$  η παροχή καυσίμου σε kg/s,

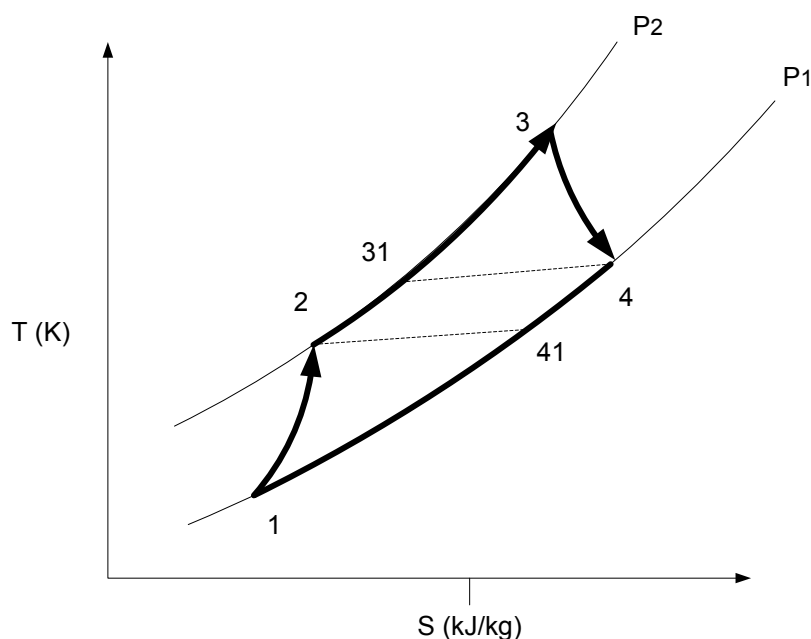
$H_u$  η θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου σε kJ/kg.

Προς την κατεύθυνση της αύξησης των επιδόσεων μιας μηχανής που υλοποιεί τον κύκλο του αεριοστρόβιλου υπάρχουν διάφορες παραλλαγές με κυριότερες τις εξής:

- Ανακόμιση θερμότητας
- Ενδιάμεση ψύξη συμπίεστη
- Αναθέρμανση

Στις μικροτουρμπίνες γίνεται εφαρμογή της πρώτης μεθόδου ,της ανακόμισης θερμότητας, η οποία όπως αναφέρθηκε πραγματοποιείται με τον εναλλάκτη αέρα καυσαερίων που τοποθετείται προ του θαλάμου καύσης. Λόγω του ότι οι μικροτουρμπίνες έχουν τη λογική μιας compact μηχανής που μπορεί να βρουν εφαρμογή ακόμα και σε κτιριακές εγκαταστάσεις οι άλλες δύο τεχνολογικές προσεγγίσεις είναι πρακτικά αδύνατες.

Παρακάτω στο σχήμα 6.17 Φαίνεται ο κύκλος joule-Brayton με ανοκόμιση θερμότητας.



**Σχήμα 5.18 :** Κύκλος Joule-Brayton με ανακόμιση θερμότητας

Η αύξηση του βαθμού απόδοσης με χρήση ανακόμισης θερμότητας είναι εμφανής. Το εργαζόμενο μέσο πλέον πρέπει να έρθει στην κατάσταση 3 με αφετηρία την κατάσταση 31 αντί της 2, δηλαδή "σπαταλάμε" λιγότερο καύσιμο. Οστόσο υπάρχει



μια προϋπόθεση για την εφαρμογή αυτής της τεχνικής. Πρέπει η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων να είναι μεγαλύτερη αυτής του αέρα εξερχόμενου του συμπιεστή ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί συναλλαγή θερμότητας.

## Κεφάλαιο 6

### Εξέργεια

#### 6.1 Η ποιότητα της ενέργειας

Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της διεργασίας κάτω από κάποιους περιορισμούς. Όσον αφορά τη σχεδίαση ενός θερμικού συστήματος αυτό σημαίνει βελτιστοποίηση της μετατροπής και χρήσης της ενέργειας και ως εκ τούτου ελαχιστοποίηση των απωλειών. Κρίσιμης σημασίας στη προσπάθεια αυτή είναι η συνειδητοποίηση του ότι :

- 1) Η ενέργεια χαρακτηρίζεται όχι μόνο από ποσότητα αλλά και από *ποιότητα* ,δηλαδή ικανότητα ενός ποσού ενέργειας να παράγει χρήσιμο έργο, και
- 2) Κατά τις μετατροπές συχνά η ενέργεια υποβαθμίζεται ,δηλαδή η ικανότητα παραγωγής χρήσιμου έργου από την ίδια ποσότητα ενέργειας μειώνεται. Μέρος της ικανότητας αυτής έχει καταστραφεί για πάντα ,παρ' όλο που η ίδια ποσότητα ενέργειας εξακολουθεί ,σύμφωνα με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, να υπάρχει κάπου (είτε στο σύστημα είτε στο περιβάλλον).

Για την κατανόηση των ανωτέρω μπορούν να χρησιμοποιηθούν μερικά παραδείγματα. Εάν , π.χ., είναι διαθέσιμο 1 kJ θερμικής ενέργειας σε θερμοκρασία 500 °C και το περιβάλλον έχει θερμοκρασία 25 °C ,τότε με βάση τον ιδανικό κύκλο Carnot μπορεί να παραχθούν 0.614 kJ ωφέλιμου έργου. Εάν το 1 kJ βρισκόταν σε θερμοκρασία 1000 °C τότε κάτω από τις ίδιες συνθήκες θα μπορούσαν να παραχθούν 0.766 kJ ωφέλιμου έργου. Μέσω αυτού του παραδείγματος γίνεται κατανοητή η έννοια της ποιότητας της ενέργειας. Ένα άλλο παράδειγμα για την κατανόηση και του (2) είναι η διέλευση ενός ρευστού από μια στραγγαλιστική βαλβίδα. Ακόμα και αν ο στραγγαλισμός θεωρηθεί ισενθαλπικός (δηλαδή μηδενικές απώλειες ενέργειας) η ικανότητα του ρευστού για παραγωγή έργου είναι μικρότερη από ότι πριν τη βαλβίδα. Κρίνεται συνεπώς απαραίτητο να υπάρχει ένα «μέτρο» για

την ποιότητα της ενέργειας. Εάν διαφορές ποιότητας της ενέργειας δεν ληφθούν υπόψη κατά την ανάλυση ενός ενεργειακού συστήματος υπάρχει κίνδυνος να προκύψουν λανθασμένα και παραπλανητικά αποτελέσματα. Η ποιότητα της ενέργειας έχει να κάνει με τη μορφή με την οποία αυτή είναι αποθηκευμένη.

Γενικά υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες μορφών : *διατεταγμένες* και *αδιάτακτες* μορφές. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν η δυναμική ενέργεια και η διατεταγμένη κινητική ενέργεια (περιστροφόμενος σφόνδυλος, δέσμη ιδανικού ρευστού). Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν η εσωτερική ενέργεια, η χημική ενέργεια, η θερμική ακτινοβολία, η ενέργεια ρευστού σε τυρβώδη κίνηση. Οι διατεταγμένες μορφές ενέργειας έχουν τα ακόλουθα γνωρίσματα:

- Πλήρης μετατροπή της μιας μορφής ενέργειας σε άλλη αν η διεργασία είναι αντιστρεπτή.
- Η μεταφορά διατεταγμένης μορφής ενέργειας από ένα σύστημα σε ένα άλλο παρουσιάζεται σαν αλληλεπίδραση έργου και όχι θερμότητας.
- Κατά την αντιστρεπτή μεταφορά διατεταγμένης ενέργειας μεταξύ συστημάτων ,οι εντροπίες των συστημάτων δε μεταβάλλονται. Η ανάλυση μπορεί να στηριχθεί στο πρώτο θερμοδυναμικό νόμο ,χωρίς τη χρήση του δεύτερου.
- Δεν απαιτούνται οι παράμετροι του περιβάλλοντος για τον υπολογισμό της διατεταγμένης ενέργειας που μεταφέρεται μεταξύ συστημάτων.

Μια αδιάτακτη μορφή ενέργειας είναι δυνατό να μετατραπεί σε διατεταγμένη μορφή με τη χρήση μιας μηχανής (πχ μια θερμική μηχανή). Τα συμπεράσματα τα οποία έχουν εξαχθεί για τη μεγιστοποίηση της μετατροπής αδιάτακτης σε διατεταγμένη μορφή ενέργειας είναι ότι :

- Οι χρησιμοποιούμενες διεργασίες πρέπει να είναι πλήρως αντιστρεπτές
- Το ανώτατο όριο της μετατροπής εξαρτάται από θερμοδυναμικές παραμέτρους τόσο του συστήματος (στο οποίο είναι αποθηκευμένη η ενέργεια) όσο και του περιβάλλοντος.
- Η ανάλυση των διεργασιών απαιτεί τη χρήση του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου.
- Η μετατροπή συνοδεύεται, εν γένει, από αλλαγές στις εντροπίες των συστημάτων που συμμετέχουν.

## 6.2 Η έννοια της εξέργειας

Όπως έγινε κατανοητό από την προηγούμενη παράγραφο είναι αναγκαίο κατά τη σχεδίαση ενός ενεργειακού συστήματος να λαμβάνεται υπόψη η διαφορετική ποιότητα των διαφόρων μορφών αδιάτακτης ενέργειας που υπάρχουν στο σύστημα. Ένα λογικό και εύχρηστο πρότυπο της ποιότητας είναι το μέγστο έργο που μπορεί να παραχθεί από μια δεδομένη μορφή ενέργειας. Το πρότυπο αυτό ονομάζεται εξέργεια και ορίζεται ως εξής:

*Εξέργεια μιας δεδομένης μορφής ενέργειας είναι το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί από την ενέργεια αυτή με κατάσταση αναφοράς ,εκείνη του περιβάλλοντος.*

Έτσι η εξέργεια είναι ένα μέτρο του πόσο απέχει η κατάσταση ενός θερμοδυναμικού συστήματος από την κατάσταση του περιβάλλοντος. Επομένως η εξέργεια είναι χαρακτηριστικό του συστήματος και του περιβάλλοντος. Από τη στιγμή όμως που το περιβάλλον έχει καθορισθεί ,η εξέργεια προσδιορίζεται ως συνάρτηση μόνο των ιδιοτήτων του συστήματος και μπορεί να θεωρηθεί ως ιδιότητα αυτού. Οι διατεταγμένες μορφές ενέργειας μπορούν με αντιστρεπτές διεργασίες να μετατραπούν εξ ολοκλήρου σε έργο ,και επομένως η εξέργεια είναι ίση με την ενέργεια τους. Η εξέργεια παραμένει σταθερή μόνο σε αντιστρεπτές διεργασίες. Όλες οι πραγματικές διεργασίες που είναι μη αντιστρεπτές συνοδεύονται από καταστροφή της εξέργειας. Έτσι δεν μπορεί να διατυπωθεί για την εξέργεια κάποιος νόμος διατήρησης ,όπως συμβαίνει με την ενέργεια ή την μάζα. Έτσι με την εξεργειακή ανάλυση ενός ενεργειακού συστήματος είναι δυνατόν να εντοπίσουμε τις ατέλειες (αν-αντιστρεπτότητες) και να δούμε τι περιθώρια βελτίωσης υπάρχουν.

Όπως φάνηκε από τις προηγούμενες παραγράφους το περιβάλλον παίζει κυρίαρχο ρόλο στον προσδιορισμό της εξέργειας. Το ιδεατό περιβάλλον που αποτελεί την κατάσταση αναφοράς για την εξεργειακή ανάλυση είναι ένα μέσο που βρίσκεται σε κατάσταση τέλειας θερμοδυναμικής ισορροπίας. Δεν υπάρχουν σε αυτό διαφορές πίεσης ,θερμοκρασίας ,χημικού δυναμικού, δυναμική και κινητική ενέργεια και για αυτό δεν υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής έργου από αυτό. Εάν οποιοδήποτε άλλο σύστημα έχει κάποια παράμετρο διαφορετική ως προς το περιβάλλον (πίεση ,θερμοκρασία ,χημικό δυναμικό) τότε έχει δυναμικό παραγωγής έργου ως προς το

περιβάλλον. Το περιβάλλον μπορεί γενικά να αλληλεπιδρά με ένα σύστημα με τρεις τρόπους :

α) θερμική αλληλεπίδραση ,σαν θερμοδοχείο θερμοκρασίας Το που θεωρείται ότι παραμένει σταθερή.

β) μηχανική αλληλεπίδραση, σαν δεξαμενή αχρησιμοποίητου έργου που παρουσιάζεται π.χ., όταν ένα σύστημα διαστέλλεται σιγά σιγά ( $P_0 \Delta V$ ).

γ) χημική αλληλεπίδραση, σαν δεξαμενή από την οποία ένα ανοικτό σύστημα παίρνει ή προς την οποία αποβάλλει συστατικά χαμηλού δυναμικού. Το περιβάλλον υποτίθεται ότι αποτελείται από συστατικά που βρίσκονται σε χημική ισορροπία μεταξύ τους. Μέσω αυτών των αλληλεπιδράσεων το περιβάλλον ορίζει το μηδενικό επίπεδο αναφοράς της θερμοκρασίας ,της πίεσης, και του χημικού δυναμικού που είναι απαραίτητο για τους εξεργειακούς υπολογισμούς. Οι υπολογισμοί αυτοί μπορούν να γίνουν ως προς το πραγματικό περιβάλλον ( $P_0, T_0, \mu_{i00}$ ) είτε ως προς το πρότυπο περιβάλλον ( $P^0, T^0, \mu^{i00}$ ). Ως πρότυπη πίεση και θερμοκρασία θεωρούνται οι τιμές

$$P^0=1,013 \text{ bar}, \quad T^0=25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Τα σύμβολα  $\mu_{i00}$  και  $\mu^{i00}$  δηλώνουν το χημικό δυναμικό του συστατικού  $i$  στο πραγματικό και πρότυπο περιβάλλον αντίστοιχα.

## 6.3 Εξέργεια έργου και θερμότητας

### 6.3.1 Εξέργεια έργου

Από τον ορισμό της εξέργειας προκύπτει ότι η εξέργεια μιας ποσότητας έργου  $W$  είναι ίση ακριβώς με το έργο αυτό. Π.χ., η εξέργεια που αντιστοιχεί στην ισχύ  $W_s$  ενός άξονα ατμοστροβίλου είναι ίση με  $W_s$ .

### 6.3.2 Θερμική εξέργεια

Η εξέργεια θερμότητας  $Q$  που μεταφέρεται μέσα από μια επιφάνεια συναλλαγής θερμοκρασίας  $T_A$  είναι ίση με το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί από τη θερμότητα αυτή χρησιμοποιώντας το περιβάλλον ως θερμοδοχείο μηδενικής θερμικής ενέργειας. Ονομάζεται θερμική εξέργεια και δίνεται από τη σχέση

$$\varepsilon^Q = Q \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_A} \right) \quad (\varepsilon\xi 6.1)$$

Συμβατικά το  $Q$  θεωρείται θετικό όταν η θερμότητα κατευθύνεται προς το σύστημα. Άρα εάν  $T_A > T_0$ , τότε μεταφορά θερμότητας προς το σύστημα αυξάνει τη θερμική του

εξέργεια. Εάν όμως  $T_A < T_0$  τότε μεταφορά θερμότητας από το σύστημα (ψύξη) αυξάνει τη θερμική του εξέργεια.

## 6.4 Εξέργεια συστήματος

### 6.4.1 Ορισμός

*Εξέργεια συστήματος είναι το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί όταν από την αρχική του κατάσταση το σύστημα έρθει σε νεκρή κατάσταση αλληλεπιδρώντας μόνο με το περιβάλλον.*

Έχει αποδειχθεί [Evans 1969 Moran 1989] ότι η εξέργεια συστήματος δίνεται από τη σχέση :

$$\Xi = E + P_0 V - T_0 S - \sum_i \mu_{i00} n_i \quad (\text{εξ}6.2)$$

Όπου

$E$  η ολική ενέργεια του συστήματος :  $E = U + E^{KN} + E^\Delta + \dots$

$U$  η εσωτερική ενέργεια,

$E^{KN}$  η κινητική ενέργεια,

$E^\Delta$  η συναμική ενέργεια,

.... Άλλες μορφές ενέργειας (ηλεκτρική, μαγνητική κλπ),

$V$  ο όγκος του συστήματος στην αρχική κατάσταση,

$S$  η εντροπία του συστήματος στην αρχική κατάσταση,

$\mu_{i00}$  το χημικό δυναμικό του σώματος  $i$  ως συστατικού του περιβάλλοντος

$n_i$  ο αριθμός γραμμομορίων του συστατικού  $i$  στο σύστημα.

### 6.4.2 Συνιστώσες εξέργειας συστήματος

Αποδεικνύεται ότι η παραπάνω σχέση για την εξέργεια συστήματος μπορεί να πάρει τις εναλλακτικές εκφράσεις :

$$\Xi = (E + P_0V - T_0S) - (E + P_0V_0 - T_0S_0) - \sum_i (\mu_{i0} - \mu_{i00})n_i \quad (\varepsilon\xi 6.3)$$

$$\Xi = [(U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)] + (E^{KN} - E_0^{KN}) + (E^\Delta - E_0^\Delta) + \dots + \sum_i (\mu_{i0} - \mu_{i00})n_i \quad (\varepsilon\xi 6.4)$$

Όπου ο δείκτης (0) αναφέρεται στην κατάσταση περιβάλλοντος.

Ο όρος μέσα στην αγκύλη είναι το έργο που παράγεται από μεταβολές πίεσης και θερμοκρασίας του συστήματος ,και λέγεται φυσική εξέργεια :

$$\Xi^{PH} = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (\varepsilon\xi 6.5)$$

Οι υπόλοιποι τρεις όροι είναι οι εξής :

$$\text{Κινητική εξέργεια : } \Xi^{KN} = E^{KN} - E_0^{KN} \quad (\varepsilon\xi 6.6)$$

$$\text{Δυναμική εξέργεια : } \Xi^\Delta = E^\Delta - E_0^\Delta \quad (\varepsilon\xi 6.7)$$

$$\text{Χημική εξέργεια : } \Xi^{CH} = \sum_i (\mu_{i0} - \mu_{i00})n_i \quad (\varepsilon\xi 6.8)$$

Συνεπώς ισχύει :

$$\Xi = \Xi^{PH} + \Xi^{KN} + \Xi^\Delta + \dots + \Xi^{CH} \quad (\varepsilon\xi 6.9)$$

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν και για ειδικά μεγέθη ,δηλαδή ανά μονάδα μάζας του σώματος, π.χ., η ειδική εξέργεια γράφεται ως εξής:

$$\xi = \xi^{PH} + \xi^{KN} + \xi^\Delta + \dots + \xi^{CH} \quad (\varepsilon\xi 6.10)$$

## 6.5 Εξέργεια ροής

### 6.5.1 Ορισμός

Εξέργεια ρευστού που ρέει σε σταθερή ροή είναι το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί όταν από την αρχική του κατάσταση το ρευστό έρθει σε νεκρή κατάσταση αλληλεπιδρώντας μόνο με το περιβάλλον.

Η εξέργεια αυτή ονομάζεται εξέργεια ροής (Flow exergy). Η ικανότητα παραγωγής έργου που έχει το ρευστό ως ένα θερμοδυναμικό σύστημα αυξάνεται λόγω της

ροής κατά το έργο εξώθησης PV μείον το έργο  $P_0V$  που δαπανάται για την υπερνίκηση της πίεσης του περιβάλλοντος. Έτσι η εξέργεια ροής δίνεται από τη σχέση

$$\mathcal{E} = \Xi + (P - P_0)V \quad (\text{εξ}6.11)$$

Η ειδική εξέργεια ροής είναι αντίστοιχα

$$\varepsilon = \xi + (P - P_0)v \quad (\text{εξ}6.12)$$

Με αντικατάσταση της εξίσωσης εξέργειας συστήματος στην παραπάνω προκύπτει η έκφραση

$$\mathcal{E} = E + PV - T_0S - \sum_i \mu_{i00}n_i \quad (\text{εξ}6.13)$$

### 6.5.2 Συνιστώσες εξέργειας ροής

Εάν το  $\Xi$  από την Εξ.(7.4) αντικατασταθεί στην Εξ.(7.11) και ληφθεί υπόψη ότι  $H=U+PV$  προκύπτει η σχέση

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}^{PH} + \mathcal{E}^{KN} + \mathcal{E}^{\Delta} + \dots + \mathcal{E}^{CH} \quad (\text{εξ}6.14)$$

Όπου  $\mathcal{E}^{PH}$ ,  $\mathcal{E}^{KN}$ ,  $\mathcal{E}^{\Delta}$ ,  $\mathcal{E}^{CH}$ , ... η φυσική, η κινητική, η δυναμική, η χημική και οι άλλες συνιστώσες της εξέργειας ροής :

$$\mathcal{E}^{PH} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (\text{εξ}6.15)$$

$$\mathcal{E}^{KN} = \Xi^{KN} \quad (\text{εξ}6.16)$$

$$\mathcal{E}^{\Delta} = \Xi^{\Delta} \quad (\text{εξ}6.17)$$

$$\mathcal{E}^{CH} = \Xi^{CH} \quad (\text{εξ}6.18)$$

Τα ίδια ισχύουν και με ειδικά μεγέθη. Από τις παραπάνω εξισώσεις η 6.15 χρησιμοποιείται ευρύτατα για όλα τα συστατικά με τις κατάλληλες τιμές για την ενθαλπία και την εντροπία. Επίσης πολύ συχνά παρουσιάζονται διαφορές εξέργειας μεταξύ δύο καταστάσεων 1,2 που προσδιορίζονται από τη σχέση



$$e_{1 \rightarrow 2}^{PH} = e_2^{PH} - e_1^{PH} = (H_2 - H_1) - T_0 (S_2 - S_1) \quad (\epsilon\xi 6.19)$$

ή

$$e_{1 \rightarrow 2}^{PH} = \epsilon_2^{PH} - \epsilon_1^{PH} = (h_2 - h_1) - T_0 (s_2 - s_1) \quad (\epsilon\xi 6.20)$$

Η ειδική γραμμομοριακή ενθαλπία και εντροπία των διαφόρων συστατικών που θα συναντήσουμε στην πορεία της εργασίας, στις πρότυπες συνθήκες είναι

	$h^0$	$s^0$
<b>CO</b>	-110528	197.648
<b>CO2</b>	-393521	213.794
<b>H2</b>	0	130.679
<b>H2O</b>	-241856	188.824
<b>H2S</b>	-20501	205.757
<b>N2</b>	0	191.610
<b>O2</b>	0	205.146
<b>SO2</b>	-296833	284.094
<b>CH4</b>	-74872	186,251

**Πίνακας 6.1 :** Ενθαλπίες και εντροπίες συστατικών σε kJ/kmol και kJ/kmol K υπό συνθήκες 1 bar και 25 °C.

Για τον προσδιορισμό των ενθαλπιών και εντροπιών σε θερμοκρασίες άνω της πρότυπης παρατίθενται οι κάτωθι συσχετίσεις

$$\bar{h} = 10^3 \left[ H^+ + ay + \frac{b}{2} y^2 - cy^{-1} + \frac{d}{3} y^3 \right] \quad (\epsilon\xi 6.21)$$

$$\bar{s}^0 = S^+ + a \ln(T) + by - \frac{c}{2} y^{-2} + \frac{d}{2} y^2 \quad (\epsilon\xi 6.22)$$

Οι συντελεστές των παραπάνω σχέσεων δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

	<b>H+</b>	<b>S+</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>
<b>CO</b>	-120.809	18.937	30.962	2.439	-0.28	0
<b>CO2</b>	-413.886	-87.078	51.128	4.368	-1.469	0
<b>H2</b>	-7.823	-22.966	26.882	3.586	0.105	0
<b>H2O</b>	-253.871	-11.75	34.376	7.841	-0.423	0

<b>H2S</b>	-32.887	1.142	34.911	10.686	-0.448	0
<b>N2</b>	-9.982	16.203	30.418	2.544	-0.238	0
<b>O2</b>	-9.589	36.116	29.154	6.477	-0.184	-1.017
<b>SO2</b>	-315.422	-43.725	49.936	4.766	-1.046	0
<b>CH4</b>	-81.242	96.731	11.933	77.647	0.142	-188.414

**Πίνακας 6.2:** Συντελεστές εξισώσεων 7.21 , 7.22

Η εντροπία που υπολογίζεται από την εξίσωση 7.22 αναφέρεται σε  $T > T_{Ref}$  αλλά στην πίεση περιβάλλοντος  $P_{Ref}$ . Για τον υπολογισμό όμως της εντροπίας ενός μίγματος ρευστού (π.χ., καυσαέρια) πρέπει να υπολογιστεί η εντροπία κάθε συστατικού στη μερική του πίεση. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται η έκφραση

$$\bar{s}_i = \bar{s}_i^0 - \bar{R} \ln \frac{x_i P}{P_{Ref}} \quad (\text{εξ.6.23})$$

Όπου

$i$  το κάθε συστατικό ,

$P$  η ολική πίεση του μίγματος,

$P_{Ref}$  η πίεση αναφοράς του πρότυπου περιβάλλοντος,

$\bar{R}$  η παγκόσμια σταθερά των αερίων ίση με 8.314 kJ/kmol K.

## 6.6 Χημική εξέργεια

### 6.6.1 Ορισμός

Η έννοια της χημικής εξέργειας μπορεί να αποδοθεί με τον ακόλουθο ορισμό

*Χημική εξέργεια σώματος είναι το μέγστο έργο που μπορεί να παραχθεί, όταν από αρχική κατάσταση μηχανικής και θερμικής ισορροπίας με το περιβάλλον, το σώμα έρθει στη νεκρή κατάσταση με διεργασίες που περιλαμβάνουν συναλλαγή θερμότητας και μάζας μόνο με το περιβάλλον.*

Ο προσδιορισμός της χημικής εξέργειας στηρίζεται στη διαφορά μεταξύ του χημικού δυναμικού του σώματος και εκείνου κατάλληλα διαλεγμένων συστατικών του περιβάλλοντος. Τα συστατικά αυτά ονομάζονται σώματα αναφοράς και βρίσκονται σε πλήρη ισορροπία με τα υπόλοιπα συστατικά του περιβάλλοντος. Το σώμα αναφοράς ενός χημικού στοιχείου είναι εκείνο από τα συστατικά του

περιβάλλοντος (που περιέχουν το στοιχείο), το οποίο έχει το χαμηλότερο χημικό δυναμικό. Έτσι για τον υπολογισμό της χημικής εξέργειας πέρα από την πίεση και θερμοκρασία πρέπει να καθορισθεί η σύνθεση του πρότυπου περιβάλλοντος. Η χημική εξέργεια μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση 7.8, αλλά για περιπτώσεις που εμφανίζονται συχνά στην ανάλυση ενεργειακών συστημάτων έχουν αναπτυχθεί θεωρητικές ή ημιεμπειρικές αναλυτικές εκφράσεις που δίνονται παρακάτω.

### 6.6.2 Χημική εξέργεια μίγματος

Στην εξεργειακή ανάλυση ενός ενεργειακού συστήματος είναι αναγκαίο να προσδιορισθεί η χημική εξέργεια ροής μιγμάτων αερίων όπως π.χ., καυσαέρια, αέρια καύσιμα κλπ. Με τη θεώρηση ότι πρόκειται για μίγμα τελείων αερίων αποδεικνύεται [Kotas, 1995] ότι η χημική του εξέργεια μπορεί να προσδιορισθεί από τη σχέση

$$\bar{\varepsilon}^{-CH} = \sum x_i \bar{\varepsilon}_i^{-CH} + \bar{R}T_0 \sum x_i \ln x_i \quad (\varepsilon\xi 6.24)$$

Όπου

$x_i$  η κ.ό. περιεκτικότητα του κάθε συστατικού,

$\bar{\varepsilon}_i^{-CH}$  η ειδική γραμμομοριακή εξέργεια του κάθε συστατικού.

Επειδή οι όροι  $x_i \ln x_i$  είναι αρνητικοί, η χημική εξέργεια μίγματος πάντοτε από το άθροισμα των χημικών εξεργειών των συστατικών του (στην ίδια πίεση και θερμοκρασία).

Οι ειδικές γραμμομοριακές εξέργειες των βασικών συστατικών που αφορούν ένα ενεργειακό σύστημα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα

	$\bar{\varepsilon}^{-CH}$
<b>CO</b>	269412
<b>CO2</b>	14176
<b>H2</b>	235249
<b>H2O(g)</b>	8636
<b>H2O(l)</b>	45
<b>H2S</b>	799890
<b>N2</b>	639

<b>O2</b>	3951
<b>SO2</b>	301939
<b>CH4</b>	824348

**Πίνακας 6.3 :** Χημική εξέργεια συστατικών σε kJ/kmol υπό συνθήκες 1 bar και 25 °C.

### 6.6.3 Χημική εξέργεια στερεών και υγρών καυσίμων

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αναλυτικές σχέσεις για τον προσδιορισμό της χημικής εξέργειας καυσίμων αλλά αυτό προϋποθέτει την ακριβή γνώση της σύστασης τους καθώς και των θερμοχημικών ιδιοτήτων των συστατικών που συμμετέχουν στην καύση. Όμως τα περισσότερα στερεά και υγρά καύσιμα αποτελούνται χημικές ενώσεις, η σύσταση των οποίων δεν επακριβώς γνωστή. Για τις περιπτώσεις αυτές προτείνεται η σχέση

$$\varepsilon^{-CH} = \varphi H_u^0 \quad (\varepsilon\xi 6.25)$$

Όπου

$H_u^0$  η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα σε πρότυπες συνθήκες περιβάλλοντος,

$\varphi$  συντελεστής που προσδιορίζεται από ημιεμπειρικές σχέσεις.

Για υγρά καύσιμα δίνεται η ημιεμπειρική σχέση

$$\varphi = 1.0401 + 0.1728 \frac{h}{c} + 0.0432 \frac{o}{c} + 0.2169 \frac{s}{c} \left( 1 - 2.0628 \frac{h}{c} \right) \quad (\varepsilon\xi 6.26)$$

Όπου c, h, o, s η κατά μάζα περιεκτικότητα του καυσίμου σε άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο και θείο αντίστοιχα. Η ακρίβεια αυτής της σχέσης εκτιμάται σε  $\pm 0,38\%$ .

Για στερεά καύσιμα η χημική εξέργεια δίνεται από τη σχέση

$$\varepsilon^{-CH} = \left( H_u^0 + w h_{fg}^0 \right) \varphi_\xi + \left( \varepsilon_s^0 - H_{us}^0 \right) s \quad (\varepsilon\xi 6.27)$$

Όπου

$W, s$  η περιεκτικότητα του καυσίμου σε υγρασία και θείο,

$h_{fg}^0$  η λανθάνουσα θερμότητα του νερού σε θερμοκρασία  $T_0$ ,

$\epsilon_s^0$  χημική εξέργεια του θείου

$H_{us}^0$  κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του θείου,

$\varphi_\xi$  συντελεστής που προσδιορίζεται από τις ακόλουθες ημιεμπειρικές συσχετίσεις (αφορά ξηρό καύσιμο).

Εάν  $\frac{o}{c} < 0.667$ , τότε

$$\varphi_\xi = 1.0437 + 0.1882 \frac{h}{c} + 0.0610 \frac{o}{c} + 0.0404 \frac{n}{c} \quad (\text{εξ}6.28)$$

Όπου  $n$  η κατά μάζα περιεκτικότητα του καυσίμου σε άζωτο. Η εξίσωση 7.28 δίνει ακρίβεια  $\pm 1\%$  μέσα στην προκαθορισμένη περιοχή του  $o/c$ .

Εάν  $0.667 < \frac{o}{c} < 2.67$  τότε

$$\varphi_\xi = \frac{0.7929 + 0.00615 \frac{h}{c} + 0.0383 \frac{n}{c}}{1 - 0.3035 \frac{o}{c}} \quad (\text{εξ}6.29)$$

Η εξίσωση 7.29 δίνει επίσης ακρίβεια  $\pm 1\%$ .

Για  $P^0=1.013 \text{ bar}$ ,  $T^0=298.15 \text{ K}$  είναι  $h_{fg}^0=2442 \text{ kJ/kg}$ , και για ρομβικό θείο είναι  $\epsilon_s^0=18676 \text{ kJ/kg}$  και  $H_{us}^0=9259 \text{ kJ/kg}$ , οπότε η εξίσωση 7.27 γράφεται

$$\bar{\epsilon}^{CH} = (H_u^0 + 2442w) \varphi_\xi + 9417s \quad (\text{εξ}6.30)$$

όπου  $H_{us}^0, \epsilon^{ch}$  σε  $\text{kJ/kg}$ .

## 6.7 Κριτήρια αποδοτικότητας με βάση την εξέργεια

### 6.7.1 Διατύπωση ισολογισμού εξέργειας

Μια διεργασία ή ένα σύστημα τροφοδοτείται με εξέργεια και παράγει ένα ή περισσότερα χρήσιμα προϊόντα που μπορούν γενικά να εκφραστούν σε εξέργεια. Ένα μέρος της εξέργειας με την οποία τροφοδοτείται το σύστημα καταστρέφεται εξαιτίας εσωτερικά μη αντιστρεπτών διεργασιών (*εσωτερική αναντιστρεπτότητα*). Επίσης από το φυσικό όριο του συστήματος αποβάλλονται ποσά θερμότητας και μάζας που περιέχουν εξέργεια. Η εξέργεια αυτή αποτελεί απώλεια για το σύστημα και εάν δεν ανακτηθεί κάπου αλλού διασκορπίζεται στο περιβάλλον και τελικά καταστρέφεται, οπότε χαρακτηρίζεται ως *εξωτερική αναντιστρεπτότητα*. Επομένως ο εξεργειακός ισολογισμός του συστήματος μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\dot{\mathcal{E}}_F = \dot{\mathcal{E}}_P + \dot{\mathcal{E}}_L + \dot{I} \quad (\text{εξ}6.31)$$

Όπου

$\dot{\mathcal{E}}_F$  η ολική εξέργεια με την οποία τροφοδοτείται το σύστημα,

$\dot{\mathcal{E}}_P$  το σύνολο των προϊόντων εκφρασμένο σε εξέργεια,

$\dot{\mathcal{E}}_L$  εξεργειακές απώλειες του συστήματος,

$\dot{I}$  εσωτερική αναντιστρεπτότητα του συστήματος.

### 6.7.2 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης

Ορίζεται από την εξίσωση

$$\zeta = \frac{\dot{\mathcal{E}}_P}{\dot{\mathcal{E}}_F} \quad (\text{εξ}6.32)$$

Από τις εξισώσεις 6.31 και 6.32 προκύπτει η σχέση

$$\zeta = 1 - \frac{\dot{\mathcal{E}}_L}{\dot{\mathcal{E}}_F} - \frac{\dot{I}}{\dot{\mathcal{E}}_F} \quad (\text{εξ6.33})$$

Σύμφωνα με τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο είναι

$$\dot{I} \geq 0 \quad (\text{εξ6.34})$$

Οπότε

$$\zeta \leq 1 \quad (\text{εξ6.35})$$

Η ισότητα με τη μονάδα ισχύει μόνον εάν οι απώλειες είναι μηδενικές και οι διεργασίες είναι αντιστρεπτές. Η ιδιότητα αυτή κάνει τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης ιδιαίτερα κατάλληλο κριτήριο του βαθμού της θερμοδυναμικής τελειότητας μιας διεργασίας.

### 6.7.3 Εννοιολογική διαφορά μεταξύ ενεργειακού και εξεργειακού βαθμού απόδοσης

Ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης προσφέρει ένα μέτρο της συμπεριφοράς ( απόδοσης) ενός συστήματος, αλλά δεν μπορεί να αποτελέσει κριτήριο της αποδοτικότητας ή τελειότητας ενός συστήματος ή μιας διεργασίας. Στην γενική περίπτωση ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης δεν δείχνει πόσο μια διεργασία απέχει από την ιδανική, π.χ., την αντιστρεπτή. Συχνά η τιμή του ενεργειακού βαθμού απόδοσης είναι αρκετά κάτω από τη μονάδα ακόμη και για «τέλειες» διεργασίες. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε μπορεί να αποτελέσει ορθολογικό κριτήριο της αποδοτικότητας ή τελειότητας. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης μιας ιδανικής διεργασίας είναι ίσος με τη μονάδα.

### 6.7.4 Άλλα μεγέθη της εξεργειακής ανάλυσης

#### Συντελεστής εξεργειακών απωλειών

Ορίζεται από την εξίσωση

$$\lambda = \frac{\dot{\mathcal{E}}_L}{\dot{\mathcal{E}}_F} \quad (\text{εξ}6.36)$$

και είναι το κλάσμα της  $\dot{\mathcal{E}}_F$ , που χάνεται (αποβάλλεται) από το σύστημα, δηλαδή δεν καταστρέφεται μέσα στα όρια του συστήματος.

#### Βαθμός αναντιστρεπτότητας

Ορίζεται από την εξίσωση

$$\delta = \frac{\dot{I}}{\dot{\mathcal{E}}_F} \quad (\text{εξ}6.37)$$

και είναι το κλάσμα της  $\dot{\mathcal{E}}_F$  που καταστρέφεται εξαιτίας της μη αντιστρεπτότητας των διεργασιών του συστήματος.

#### Σχετική αναντιστρεπτότητα

Ένα σύστημα μπορεί να αποτελείται από επιμέρους υποσυστήματα, το καθένα με αναντιστρεπτότητα  $\dot{I}_i$ . Τότε ισχύει ότι

$$\dot{I} = \sum \dot{I}_i \quad (\text{εξ}6.38)$$

Σε αυτή την περίπτωση, ένας χρήσιμος δείκτης της συμβολής του κάθε στοιχείου στην αναντιστρεπτότητα του όλου συστήματος είναι η σχετική αναντιστρεπτότητα που ορίζεται ως εξής

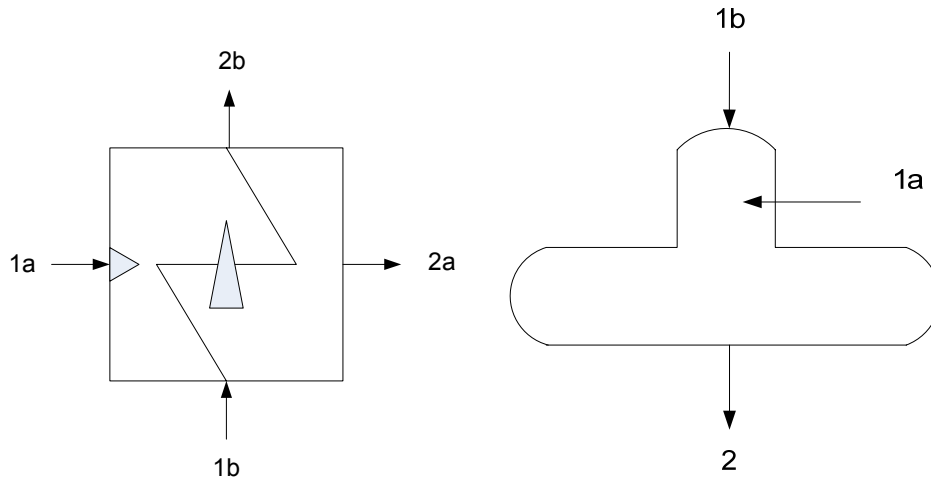
$$I_i^* = \frac{\dot{I}_i}{\dot{I}} \quad (\text{εξ}6.39)$$



6.7.5 Παραδείγματα εξεργειακού βαθμού απόδοσης συστημάτων (ή υποσυστημάτων).

Εναλλάκτης θερμότητας

Ο σκοπός των εναλλακτών ποικίλει και εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Ο τύπος των εναλλακτών διακρίνεται σε εναλλάκτες επιφανείας και σε εναλλάκτες αναμίξεως.



**Εικόνα 6.1 :** Εναλλάκτες επιφανείας και αναμίξεως

α) θέρμανση ρευστού με τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του ψυχρού και θερμού ρεύματος μεγαλύτερες ή ίσες της  $T_0$ .

Σκοπός είναι η θέρμανση του ρευστού b με θερμότητα που προσφέρει το ρευστό a.

Για εναλλάκτη επιφανείας είναι

$$\zeta = \frac{\dot{\mathcal{E}}_P}{\dot{\mathcal{E}}_F} = \frac{\dot{\mathcal{E}}_{2b} - \dot{\mathcal{E}}_{1b}}{\dot{\mathcal{E}}_{1a} - \dot{\mathcal{E}}_{2a}} \quad (\text{εξ}6.40)$$

Σε εναλλάκτη αναμίξεως η έξοδος είναι κοινή και η εξίσωση 7.40 παίρνει τη μορφή

$$\zeta = \frac{\dot{\mathcal{E}}_P}{\dot{\mathcal{E}}_F} = \frac{\dot{m}_b (\varepsilon_2 - \varepsilon_{1b})}{\dot{m}_a (\varepsilon_{1a} - \varepsilon_2)} \quad (\text{εξ}6.41)$$

β) ψύξη ρευστού με τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του ψυχρού και θερμού ρεύματος μικρότερες ή ίσες της  $T_0$ .

Σκοπός είναι η ψύξη του ρευστού a με εξέργεια που προσφέρεται από το ρευστό b.

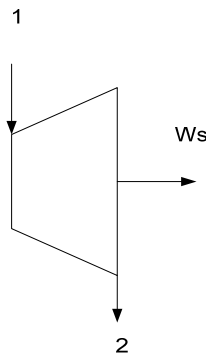
Για εναλλάκτη επιφανείας είναι

$$\zeta = \frac{\dot{\mathcal{E}}_P}{\dot{\mathcal{E}}_F} = \frac{\dot{\mathcal{E}}_{2a} - \dot{\mathcal{E}}_{1a}}{\dot{\mathcal{E}}_{1b} - \dot{\mathcal{E}}_{2b}} \quad (\text{εξ}6.42)$$

### Στρόβιλος

Σκοπός του στροβίλου είναι να παράγει ωφέλιμη ισχύ, άρα

$$\dot{\mathcal{E}}_P = \dot{W}_s$$



**Εικόνα 6.2 :** Στρόβιλος

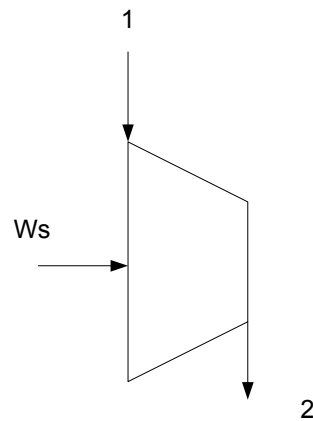
Η εξέργεια που προσφέρεται για αυτό το σκοπό είναι

$$\dot{\mathcal{E}}_F = \dot{\mathcal{E}}_1 - \dot{\mathcal{E}}_2$$

Επομένως ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης εξ' ορισμού είναι

$$\zeta = \frac{\dot{\mathcal{E}}_P}{\dot{\mathcal{E}}_F} = \frac{\dot{W}_s}{\dot{\mathcal{E}}_1 - \dot{\mathcal{E}}_2} \quad (\text{εξ}6.43)$$

### Συμπιεστής (ή αντλία)



**Εικόνα 6.2 :** Συμπιεστής

Σκοπός του συμπιεστή είναι η αύξηση της εξέργειας του ρευστού

$$\dot{\mathcal{E}}_P = \dot{\mathcal{E}}_2 - \dot{\mathcal{E}}_1$$

Η εξέργεια που προσφέρεται είναι

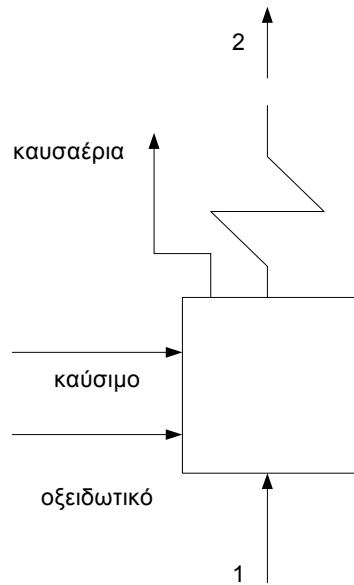
$$\dot{\mathcal{E}}_F = \dot{W}_s$$

Επομένως ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης εξ' ορισμού είναι

$$\zeta = \frac{\dot{\mathcal{E}}_P}{\dot{\mathcal{E}}_F} = \frac{\dot{\mathcal{E}}_2 - \dot{\mathcal{E}}_1}{\dot{W}_s} \quad (\text{εξ6.44})$$

### Λέβητας

Στον λέβητα εισέρχονται οι ροές εξέργειας του καυσίμου, του οξειδωτικού (αέρας) και του προς θέρμανση ρευστού ενώ εξέρχονται τα καυσαέρια και το θερμό ρευστό.



**Εικόνα 6.3 :** Λέβητας

Ο σκοπός του λέβητα είναι η αύξηση της εξέργειας του ρευστού , δηλαδή

$$\dot{\mathcal{E}}_P = \dot{\mathcal{E}}_2 - \dot{\mathcal{E}}_1$$

Η προσφερόμενη εξέργεια είναι αυτή του καυσίμου μείον την εξέργεια των θερμών καυσαερίων που αποτελούν απώλεια για το λέβητα

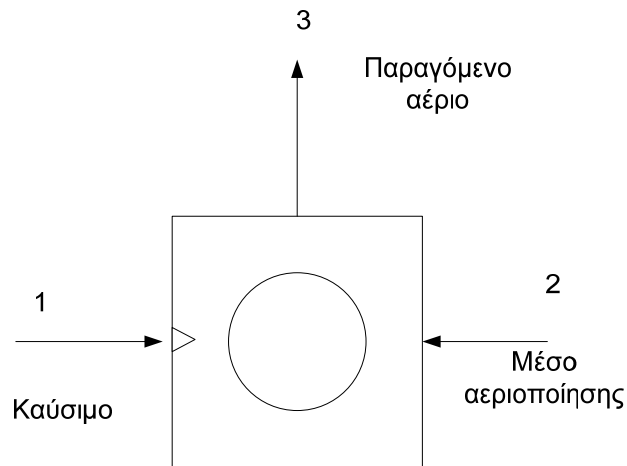
$$\dot{\mathcal{E}}_F = \dot{\mathcal{E}}_{fuel} - \dot{\mathcal{E}}_{ex\_gas}$$

Αν θεωρηθεί ότι το όριο του συστήματος είναι πριν από τυχόν προθέρμανση του αέρα τότε  $\dot{\mathcal{E}}_{air} = 0$  αφού βρίσκεται σε συνθήκες περιβάλλοντος. Έτσι

$$\zeta = \frac{\dot{\mathcal{E}}_P}{\dot{\mathcal{E}}_F} = \frac{\dot{\mathcal{E}}_2 - \dot{\mathcal{E}}_1}{\dot{\mathcal{E}}_{fuel} - \dot{\mathcal{E}}_{ex\_gas}} \quad (\text{εξ6.45})$$

### Αεριοποιητής

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της εξέργειας ροής του παραγόμενου αερίου προς το άθροισμα των εξεργειών ροής του καυσίμου και του μέσου αεριοποίησης.



**Εικόνα 6.4 :** Αεριοποιητής

Έτσι

$$\zeta = \frac{\dot{\mathcal{E}}_3}{\dot{\mathcal{E}}_1 + \dot{\mathcal{E}}_2} \quad (\text{εξ } 6.46)$$

## Κεφαλαίο 7

# Σενάρια παραγωγής ενέργειας από την αεριοποίηση του Stabilat®

### 7.1 Εισαγωγή

Για τη δημιουργία, ανάλυση και παρατήρηση των συστημάτων παραγωγής ενέργειας σε σύνδεση με έναν αυτοθερμικό αεριοποιητή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό IPSEpro. Το IPSEpro είναι ένα άκρως ευέλικτο πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό ισοζυγίων μάζας και ενέργειας, ανάλυση θερμικών συστημάτων αλλά και σχεδιασμό των επιμέρους εξαρτημάτων που συνθέτουν ένα θερμικό σύστημα. Το IPSEpro συμπεριλαμβάνεται ανάμεσα στα πιο ανεπτυγμένα εμπορικά πακέτα για τον υπολογισμό θερμοδυναμικών διεργασιών []. Το πρόγραμμα διαθέτει βιβλιοθήκες με πληθώρα ρευστών που χρησιμοποιούνται σε θερμικά κυκλώματα ,ψυκτικές διεργασίες καθώς και έτοιμα προγραμματισμένα εξαρτήματα όπως στροβίλους, εναλλάκτες κλπ. Αλλά το σημαντικότερο πλεονέκτημα η δυνατότητα που δίνεται στο χρήστη να μετατρέψει τον κώδικα των ήδη υπάρχοντων εξαρτημάτων αλλά και το σχεδιασμό νέων. Με βάση αυτή τη δυνατότητα προγραμματίστηκε ο αεριοποιητής που χρησιμοποιείται παρακάτω με βάση το μοντέλο αεριοποίησης που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 5.3.

### 7.2 Παραγωγή ενέργειας με χρήση κύκλου Rankine νερού – υδρατμού 2 βαθμών ελευθερίας

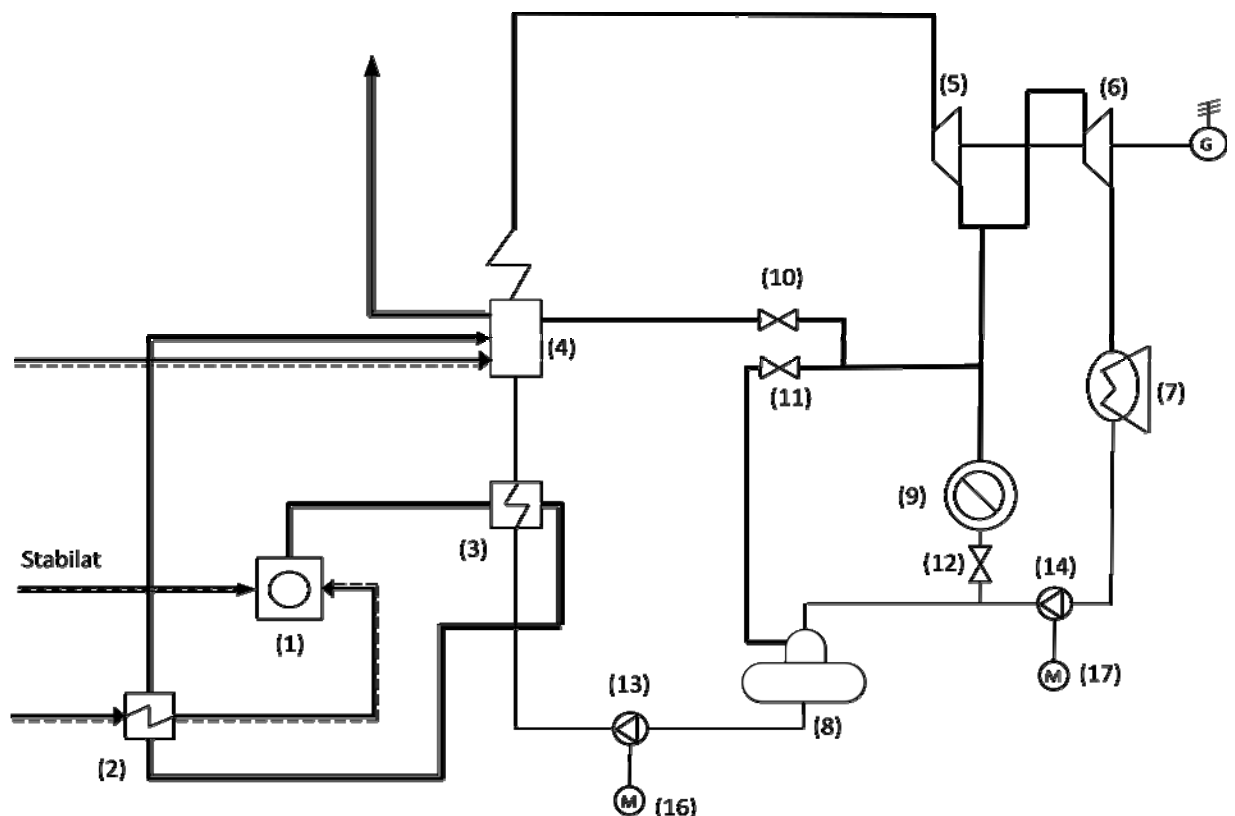
#### 7.2.1 Περιγραφή και επιδόσεις συστήματος

Το σύστημα νερού- υδρατμού που χρησιμοποιείται σε σύνδεση με τον αεριοποιητή φαίνεται στο σχήμα 8.1. Αποτελείται από :

- τον αεριοποιητή (1) στον οποίο εισέρχεται το στερεό καύσιμο Stabilat® και ο ατμοσφαιρικός αέρας ως μέσον αεριοποίησης.
- Τους εναλλάκτες θερμότητας (2), (3) οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την προθέρμανση του αέρα που εισέρχεται στον αεριοποιητή και την

προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού εκμεταλλευόμενοι την υψηλή αισθητή θερμότητα του ρεύματος του παραγόμενου αερίου.

- Τον ατμοπαραγωγό (4), ο οποίος προθερμαίνει, ατμοποιεί και υπερθερμαίνει το εργαζόμενο μέσο.
- Τους στροβίλους (5), (6) αντίθλιψης και συμπύκνωσης αντίστοιχα.
- Τον συμπυκνωτή (7)
- Τον εναλλάκτη αναμίξεως (8) στον οποίο προθερμαίνεται το εργαζόμενο μέσο ενώ παράλληλα γίνεται και θερμική απαερίωση αυτού.
- Τον εναλλάκτη θερμότητας (9) της θερμικής κατανάλωσης ο οποίος χρησιμοποιεί ατμό από την έξοδο του στροβίλου αντίθλιψης.
- Τους σταθμούς μείωσης πίεσης (10), (11), (12) που χρησιμοποιούνται για τη μείωση της πίεσης του εργαζόμενου μέσου όπου αυτό είναι απαραίτητο.
- Τις αντλίες (13), (14) που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της πίεσης του εργαζόμενου μέσου στην πίεση λειτουργίας του κύκλου και την κυκλοφορία του συμπυκνώματος αντίστοιχα.
- Τη γεννήτρια (15), και τους κινητήρες (16), (17) των αντλιών (13), (14).



Σχήμα 7.1: Σύστημα παραγωγής ενέργειας με νερό-υδρατμό 2 βαθμών ελευθερίας





Συμπαγωγικά συστήματα αξιοποίησης παραγόμενου αερίου από στερεό  
δευτερογενές καύσιμο

Τα μεγέθη που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν την περίπτωση αναφοράς που εικονίζεται στο σχήμα 8.2. Σημαντικοί παράγοντες είναι η θερμοκρασία αεριοποίησης που έχει τεθεί ίση με 800 °C, και η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον αεριοποιητή ίση με 150 °C. Η θερμική κατανάλωση προσομοιάζεται την παραγωγή ζεστού νερού προς χρήση. Στον πίνακα 8.1 παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη του συστήματος, ενώ στον πίνακα 8.2 η σύσταση του παραγόμενου αερίου.

Αεριοποιητής Stabilat®			
Εισερχόμενο καύσιμο	$\dot{m}_B$	0.78	tn/h
Εισερχόμενος αέρας	$\dot{m}_{air}$	1.31	tn/h
Λόγος αέρα	$\lambda$	0.35	-
Σύστημα παραγωγής ενέργειας			
Θερμογόνος ικανότητα αερίου	$H_u$	4924.8	kJ/kg
Εισερχόμενο αέριο	$\dot{m}_G$	1.94	tn/h
Καθαρή ηλεκτρική ισχύς	$P_{el}$	501	kW
Θερμική ισχύς	Q	130	kW
Επιδόσεις			
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	$\eta_{el}$	15.17	%
Ολικός βαθμός απόδοσης	$\eta_{TOT}$	19.11	%

**Πίνακας 7.1 :** Χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος αναφοράς

Συστατικό	Vol.-%	Vol.-% επί ξηρού
CO	23.55	24.99
CO <sub>2</sub>	7.05	7.48
CH <sub>4</sub>	0.00	0.00
H <sub>2</sub>	20.12	21.35
H <sub>2</sub> O	5.77	0.00
N <sub>2</sub>	43.40	46.05

**Πίνακας 7.2 :** Σύσταση παραγόμενου αερίου στο σύστημα αναφοράς

### 7.2.2 Επίδραση παραμέτρων στις επιδόσεις του συστήματος

#### Διευκρίνιση ορισμού των δεικτών επίδοσης του συστήματος

Πρώτα από όλα η απόδοση του αεριοποιητή είναι πολύ σημαντική για την όλη διεργασία. Ορίζεται ως εξής:

$$\eta_G = \frac{\dot{m}_G \cdot H_{u,G}}{\dot{m}_B \cdot H_{u,B}} \quad (\text{εξ.7.1})$$

Όπου :

$\dot{m}_G$  η μάζα του εξερχόμενου αερίου σε [kg/sec],

$H_{u,G}$  η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του αερίου σε [kJ/kg],

$\dot{m}_B$  η εισερχόμενη μάζα Stabilat<sup>®</sup>,

$H_{u,B}$  η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του Stabilat<sup>®</sup>.

Η ηλεκτρική απόδοση της εγκατάστασης ορίζεται ως :

$$\eta_{el} = \frac{P_{el} - P_{M1} - P_{M2}}{\dot{m}_B \cdot H_{u,B}} \quad (\text{εξ.7.2})$$

Όπου :

$P_{el}$  η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει η γεννήτρια

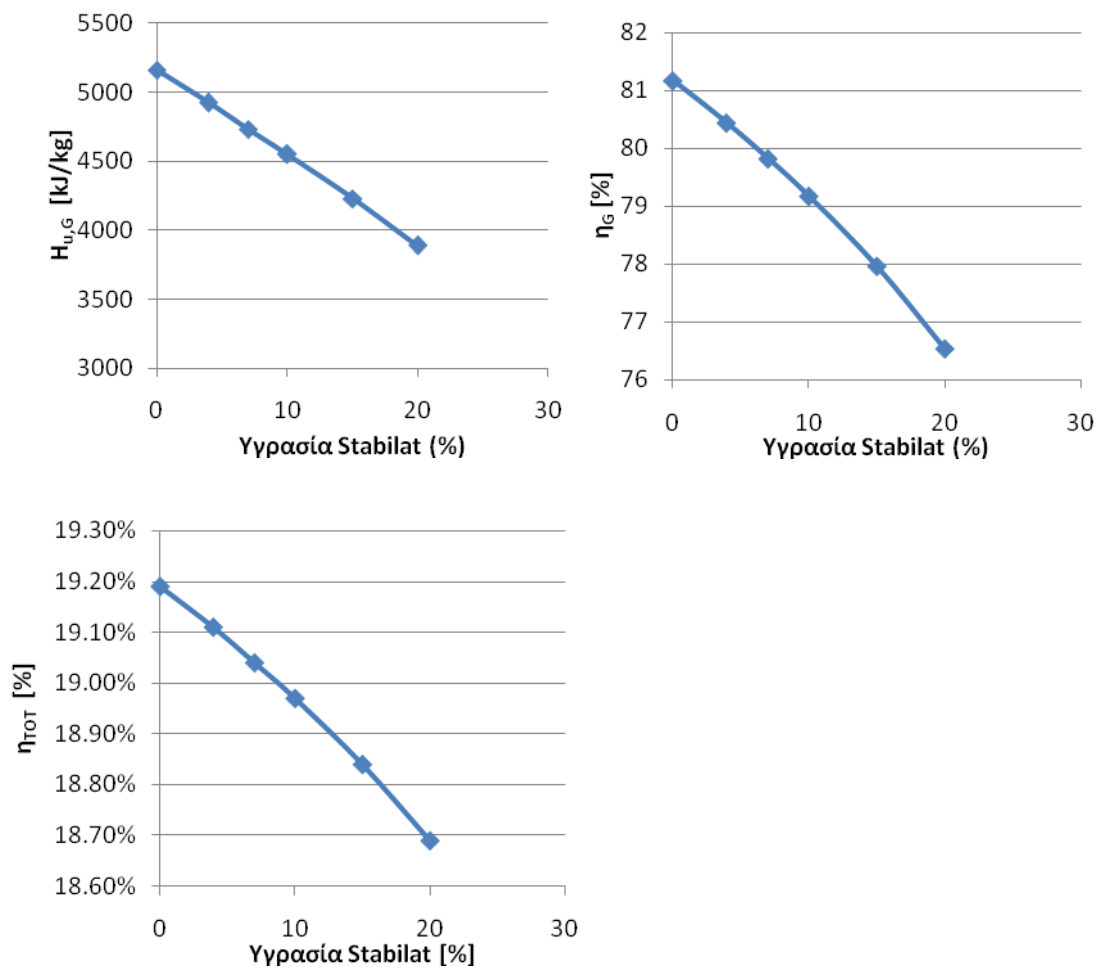
$P_{M1}, P_{M2}$  η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται για την κίνηση των αντλιών (1),(2).

Ενώ η ολικός βαθμός απόδοσης συμπεριλαμβάνει και την παραγόμενη θερμότητα και ορίζεται ως:

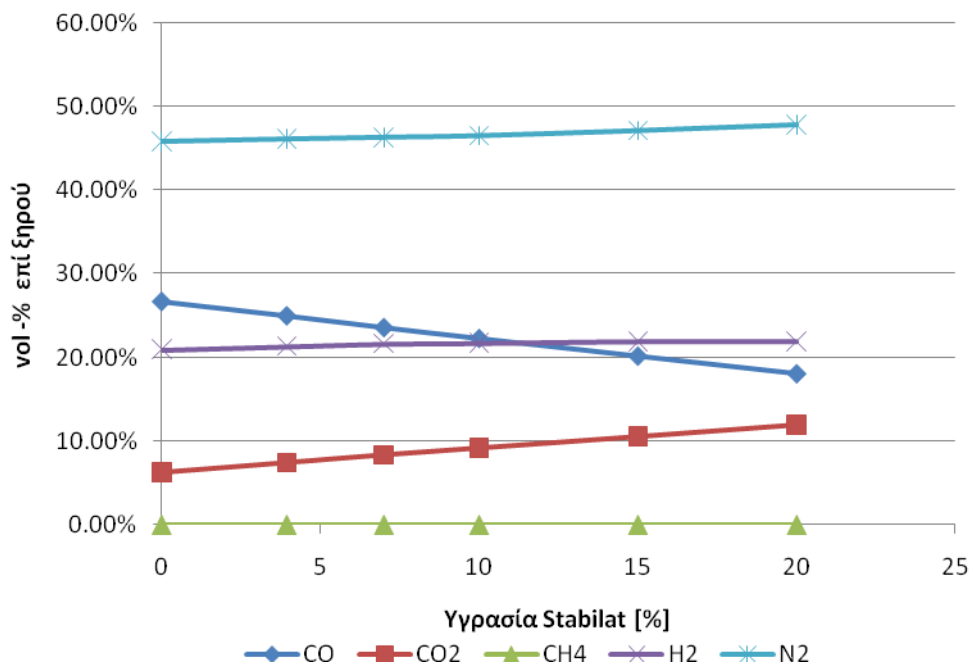
$$\eta_{el} = \frac{P_{el} + Q - P_{M1} - P_{M2}}{\dot{m}_B \cdot H_{u,B}} \quad (\text{εξ.7.3})$$

### Επίδραση της υγρασίας του καυσίμου

Ένας πού σημαντικός παράγοντας που επιδρά άμεσα στο σύστημα αεριοποίησης αστικών απορριμμάτων είναι η περιεχόμενη υγρασία στο καύσιμο. Η σύσταση των απορριμμάτων μπορεί να διαφοροποιείται συνεχώς ανάλογα με το οργανικό υπόλειμμα που περιέχουν, συνεπώς διαφορετική είναι και η υγρασία του καυσίμου. Η επίδραση της υγρασίας του καυσίμου στην θερμογόνο ικανότητα του παραγόμενου αερίου καθώς και στην απόδοση της αεριοποίησης φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα.



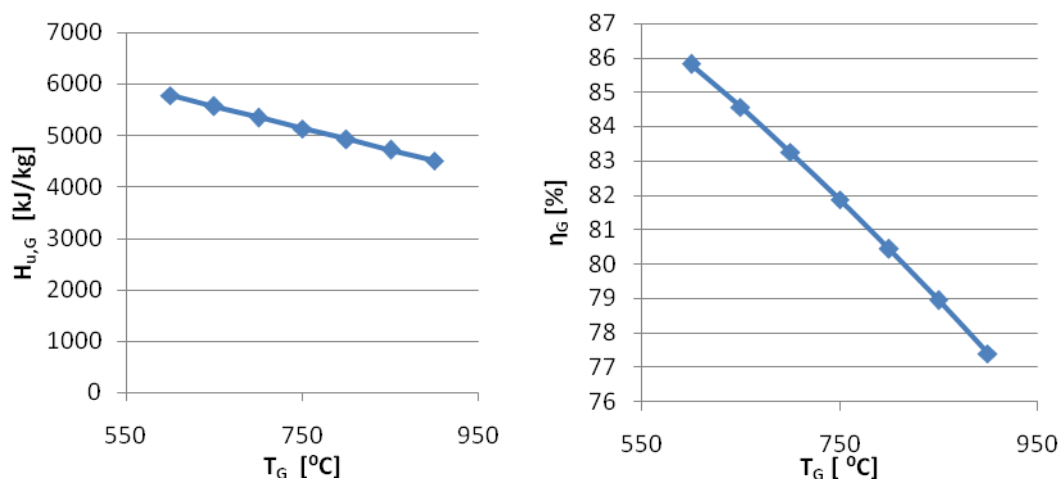
**Διάγραμμα 7.1:** Επίδραση της υγρασίας του καυσίμου στην θερμογόνο ικανότητα, στην απόδοση της αεριοποίησης και στον ολικό βαθμό απόδοσης



**Διάγραμμα 7.2:** Επίδραση της υγρασίας του καυσίμου στην σύνθεση του αερίου

### Επίδραση της θερμοκρασίας αεριοποίησης

Η μεταβολή της θερμοκρασίας αεριοποίησης μεταβάλλει τη σύσταση του παραγόμενου αερίου και ως εκ τούτου την θερμογόνο του ικανότητα. Η επίδραση της τόσο στη θερμογόνο ικανότητα όσο και στην απόδοση της αεριοποίησης στο σύστημα αναφοράς παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα.



**Διάγραμμα 7.3:** Επίδραση της υγρασίας του καυσίμου στην θερμογόνο ικανότητα και την απόδοση της αεριοποίησης

### 7.2.3 Εξεργειακή ανάλυση συστήματος

Παρακάτω γίνεται εξεργειακή ανάλυση του συστήματος αναφοράς που εικονίζεται στο σχήμα 7.2. Η αρίθμηση των ρευμάτων φαίνεται στο σχήμα.

Ρεύμα	Ρευστό	$E^{PH}$ [kW]	$E^{CH}$ [kW]	E [kW]
1	Stabilat	0	3448.734	3448.734
2	Αέρας	0	0	0
3	Αέρας	15.649	0.769	16.418
4	Αέριο σύνθεσης	315.121	2544.151	2859.272
5	Αέριο σύνθεσης	156.124	2544.151	2700.275
6	Αέριο σύνθεσης	122.06	2544.151	2666.211
7	Αέρας	0	0	0
8	Καυσαέριο	60.837	82.362	143.199
9	Νερό	983.07	2.343	985.413
10	Νερό	592.571	2.343	594.914
11	Νερό	23.397	0.092	23.489
12	Νερό	569.111	2.25	571.361
13	Νερό	209.622	2.25	211.872
14	Νερό	6.003	2.25	8.253
15	Νερό	6.137	2.25	8.387
16	Νερό	3.544	0.148	3.692
17	Νερό	3.607	0.148	3.755
18	Νερό	38.296	0.148	38.444
19	Νερό	14.951	0.056	15.007
20	Νερό	61.347	0.23	61.577
21	Νερό	46.396	0.174	46.57
22	Νερό	39.877	0.173	40.05
23	Νερό	88.457	0.23	88.687
24	Νερό	8.356	2.398	10.754
25	Νερό	37.068	2.572	39.64
26	Νερό	41.088	2.573	43.661
27	Νερό	99.053	2.573	101.626
28	Νερό	6.535	3.885	10.42
29	Νερό	20.239	3.885	24.124
30	Νερό	47.968	77.2	125.168
31	Νερό	0.371	77.2	77.571
32	Ισχύς στροβίλου1	-	-	282
33	Ισχύς στροβίλου2	-	-	246.9
34	Ισχύς αντλίας 1	-	-	0.191
35	Ισχύς αντλίας 1	-	-	5.823

**Πίνακας 7.3 :** Εξέργειες ρευμάτων συστήματος

Οι φυσικές εξέργειες των ρευμάτων του παραγόμενου αερίου, των καυσαερίων και του αέρα πέρα της κατάστασης περιβάλλοντος υπολογίστηκαν με βάση τα όσα περιγράφονται στην παράγραφο 7.5.1, ενώ η χημική εξέργεια τους με βάση την εξίσωση 7.24. η χημική εξέργεια του στερεού καυσίμου υπολογίστηκε από τη σχέση 7.30. Με βάση τις εξέργειες όλων των ρευμάτων ακολουθούν οι ισολογισμοί εξέργειας για κάθε στοιχείο καθώς και ο υπολογισμός του εξεργειακού βαθμού απόδοσης τους.

#### Αεριοποιητής

$$\dot{I}_G = \dot{E}_1 + \dot{E}_3 - \dot{E}_4$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_G = \frac{\dot{E}_4}{\dot{E}_1 + \dot{E}_3}$

#### Ατμοπαραγωγός

$$\dot{I}_B = \dot{E}_6 + \dot{E}_7 + \dot{E}_{27} - \dot{E}_8 - \dot{E}_{23} - \dot{E}_9$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_B = \frac{\dot{E}_9 + \dot{E}_{23} - \dot{E}_{27}}{\dot{E}_6 + \dot{E}_7 - \dot{E}_8}$

#### Στρόβιλος 1

$$\dot{I}_{T1} = \dot{E}_9 - \dot{E}_{10} - \dot{W}_{T1}$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_{T1} = \frac{\dot{W}_{T1}}{\dot{E}_9 - \dot{E}_{10}}$

#### Στρόβιλος 2

$$\dot{I}_{T2} = \dot{E}_{12} - \dot{E}_{13} - \dot{W}_{T2}$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_{T2} = \frac{\dot{W}_{T2}}{\dot{E}_{12} - \dot{E}_{13}}$

#### Απαεριοτής

$$\dot{I}_D = \dot{E}_{22} + \dot{E}_{24} - \dot{E}_{25}$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_D = \frac{\dot{m}_{24} \cdot (\varepsilon_{25} - \varepsilon_{24})}{\dot{m}_{22} \cdot (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{25})}$

Στραγγαλιστική βαλβίδα 1

$$\dot{I}_{V1} = \dot{E}_{23} - \dot{E}_{20}$$

Στραγγαλιστική βαλβίδα 2

$$\dot{I}_{V2} = \dot{E}_{21} - \dot{E}_{22}$$

Στραγγαλιστική βαλβίδα 3

$$\dot{I}_{V1} = \dot{E}_{17} - \dot{E}_{16}$$

Προθερμαντής νερού

$$\dot{I}_{PH1} = \dot{E}_4 + \dot{E}_{26} - \dot{E}_{27} - \dot{E}_5$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_{PH1} = \frac{\dot{E}_{27} - \dot{E}_{26}}{\dot{E}_4 - \dot{E}_5}$

Προθερμαντής αέρα

$$\dot{I}_{PH2} = \dot{E}_2 + \dot{E}_5 - \dot{E}_3 - \dot{E}_6$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_{PH2} = \frac{\dot{E}_3 - \dot{E}_2}{\dot{E}_5 - \dot{E}_6}$

Εναλλάκτης κατανάλωσης

$$\dot{I}_H = \dot{E}_{28} + \dot{E}_{18} - \dot{E}_{17} - \dot{E}_{29}$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_H = \frac{\dot{E}_{29} - \dot{E}_{28}}{\dot{E}_{18} - \dot{E}_{17}}$

Συμπυκνωτής

$$\dot{I}_{con} = \dot{E}_{13} + \dot{E}_{31} - \dot{E}_{30} - \dot{E}_{14}$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_{con} = \frac{\dot{E}_{30} - \dot{E}_{31}}{\dot{E}_{13} - \dot{E}_{14}}$

**Αντλία 1**

$$\dot{I}_{Pu1} = \dot{E}_{14} + \dot{W}_{Pu1} - \dot{E}_{15}$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_{Pu1} = \frac{\dot{E}_{15} - \dot{E}_{14}}{\dot{W}_{Pu1}}$

**Αντλία 2**

$$\dot{I}_{Pu2} = \dot{E}_{25} + \dot{W}_{Pu2} - \dot{E}_{26}$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_{Pu2} = \frac{\dot{E}_{26} - \dot{E}_{25}}{\dot{W}_{Pu2}}$

Στον πίνακα 8.4 και 8.5 φαίνονται οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης του κάθε στοιχείου καθώς και ο εξεργειακός ισολογισμός για ολόκληρο το σύστημα.

Στοιχείο	ζ [%]
Αεριοποιητής	82.5
Ατμοπαραγωγός	39.3
Στρόβιλος 1	72.2
Στρόβιλος 2	68.7
Απαεριωτής	70.1
Προθερμαντής νερού	24.8
Προθερμαντής αέρα	48.2
Εναλλάκτης κατανάλωσης	39.5
Συμπυκνωτής	23.4
Αντλία 1	70.4
Αντλία 2	69.0
Κύκλος ατμού	55.8
Συνολικός	15.7

**Πίνακας 7.4:** Εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης στοιχείων



Συμπαραγωγικά συστήματα αξιοποίησης παραγόμενου αερίου από στερεό  
δευτερογενές καύσιμο

---

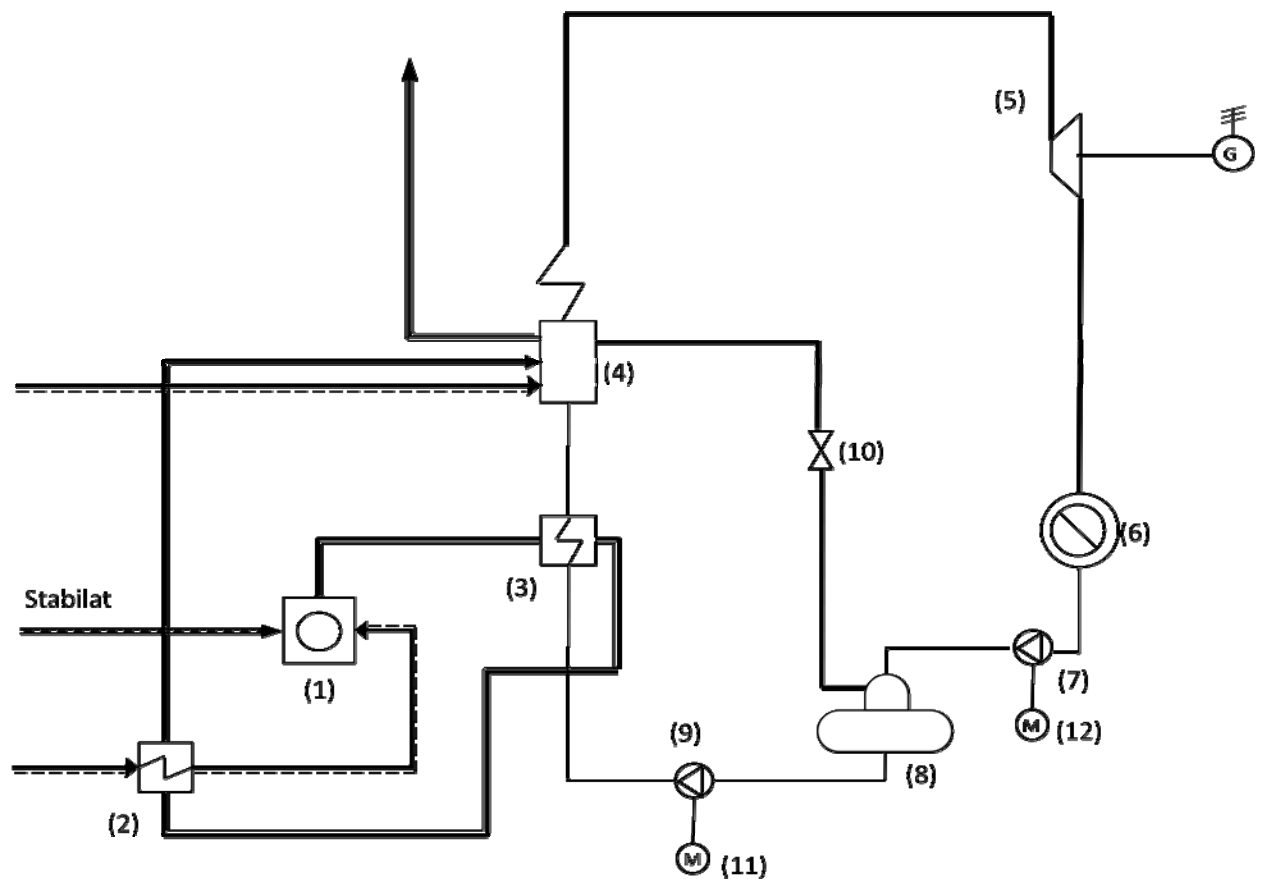
	[kW]
<b>Αναντιστρεπτότητες</b>	
Αεριοποιητής	605.879
Ατμοπαραγωγός	1550.538
Στρόβιλος 1	108.499
Στρόβιλος 2	112.59
Εναλλάκτης ανάμιξης	11.164
Στραγγαλιστική βαλβίδα 1	27.11
Στραγγαλιστική βαλβίδα 2	6.52
Στραγγαλιστική βαλβίδα 3	0.064
Προθερμαντής νερού	101.032
Προθερμαντής αέρα	17.647
Εναλλάκτης κατανάλωσης	20.985
Συμπυκνωτής	156.022
Αντλία 1	0.057
Αντλία 2	1.802
<b>Απώλειες συστήματος</b>	
Εξεργειακές απώλειες συμπυκνωτή	47.597
Εξεργειακές απώλειες καυσαερίων	143.199
<b>Χρήσιμα προϊόντα</b>	
Ηλεκτρισμός	522.886
Θερμότητα	13.704
<b>Σύνολο</b>	$3448.295 = \dot{E}_1$

**Πίνακας 7.5 :** Εξεργειακός ισολογισμός συστήματος 2 βαθμών ελευθερίας

### 7.3 Παραγωγή ενέργειας με κύκλο νερού-υδρατμού 1 βαθμού ελευθερίας

#### 7.3.2 Περιγραφή συστήματος

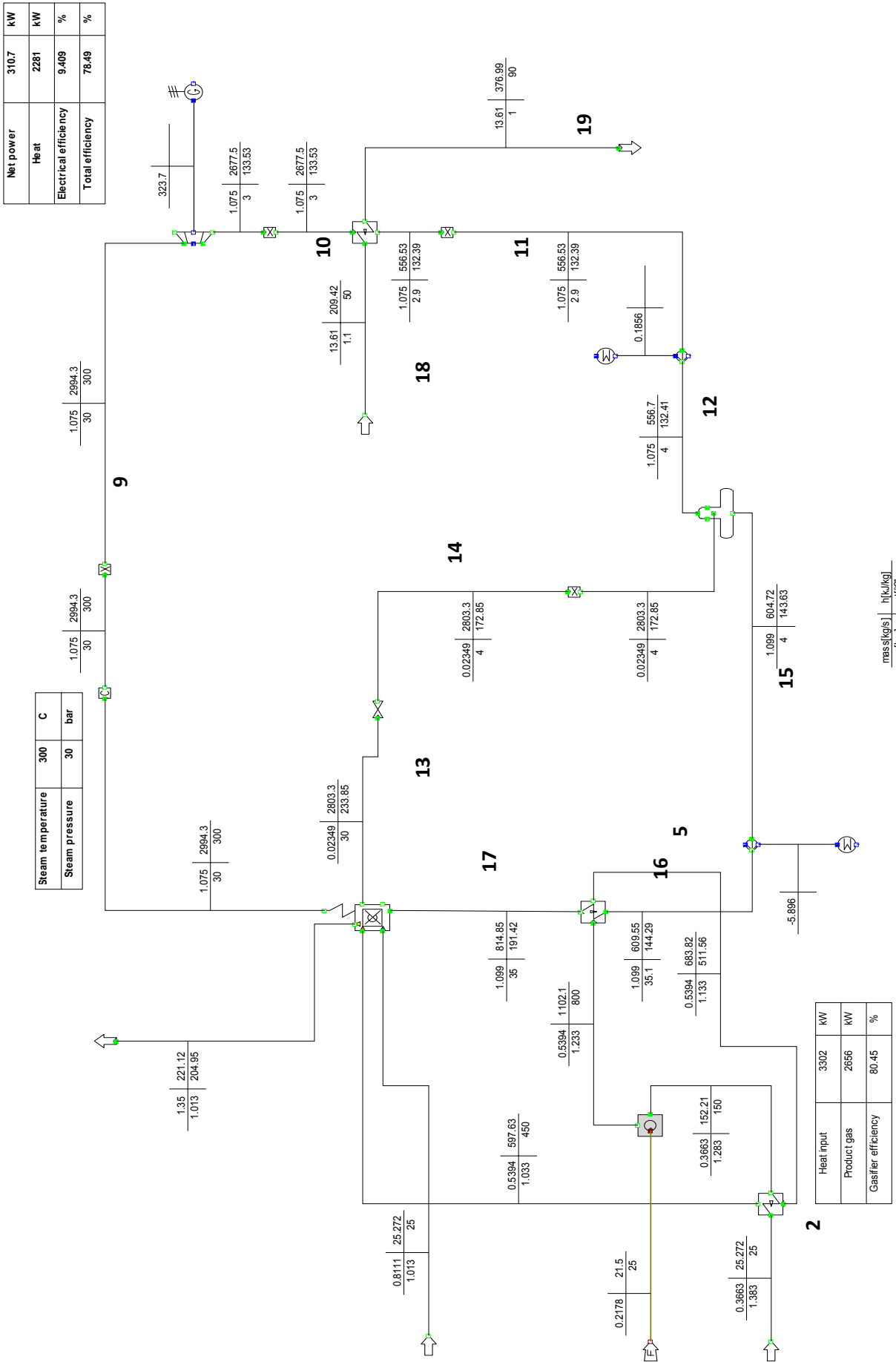
Με την ίδια παροχή καυσίμου επιχειρήθηκε ο υπολογισμός ενός συστήματος 1 βαθμού ελευθερίας, δηλαδή με χρήση μόνο στροβίλου αντίθλιψης. Το σύστημα αυτό εικονίζεται στο σχήμα 7.3. Εδώ η διαφορά είναι ότι χρησιμοποιείται ένας στρόβιλος όπου εκβάλει σε πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής ώστε η θερμότητα του εξερχόμενου ατμού να είναι εκμεταλλεύσιμη, ενώ τη θέση του συμπυκνωτή έχει πάρει ένας εναλλάκτης όπου συμπυκνώνουμε το εργαζόμενο μέσο αποδίδει όλη την θερμική ενέργεια στην κατανάλωση.



Σχήμα 7.3 : Σύστημα παραγωγής ενέργειας με νερό-υδρατμό 1 βαθμού ελευθερίας

Ο υπολογισμός του συστήματος αφορά φαίνεται στο σχήμα 7.4

## Συμπαγωγικά συστήματα αξιοποίησης παραγόμενου αερίου από στερεό δευτερογενές καύσιμο



**Σχήμα 7.4:** Περίπτωση αναφοράς συστήματος παραγωγής ενέργειας 1 βαθμών ελευθερίας

Οι συνθήκες στον αεριοποιητή είναι όπως στην προηγούμενη περίπτωση, δηλαδή προκύπτει ίδια σύσταση καυσίμου. Όπως ειπώθηκε νωρίτερα η παροχή καυσίμου μένει η ίδια. Τα μεγέθη του κύκλο φαίνονται στον πίνακα 7.6

Αεριοποιητής Stabilat®			
Εισερχόμενο καύσιμο	$\dot{m}_B$	0.78	tn/h
Εισερχόμενος αέρας	$\dot{m}_{air}$	1.31	tn/h
Λόγος αέρα	$\lambda$	0.35	-
Σύστημα παραγωγής ενέργειας			
Θερμογόνος ικανότητα αερίου	$H_u$	4924.8	kJ/kg
Εισερχόμενο αέριο	$\dot{m}_G$	1.94	tn/h
Καθαρή ηλεκτρική ισχύς	$P_{el}$	310.7	kW
Θερμική ισχύς	Q	2281	kW
Επιδόσεις			
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	$\eta_{el}$	9.40	%
Ολικός βαθμός απόδοσης	$\eta_{TOT}$	78.49	%

**Πίνακας 7.6 :** Χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος αναφοράς 1 βαθμού ελευθερίας

### 7.3.3 Εξεργειακή ανάλυση συστήματος

Παρακάτω γίνεται εξεργειακή ανάλυση του συστήματος αναφοράς που εικονίζεται στο σχήμα 7.4. Η αριθμηση των ρευμάτων φαίνεται στο σχήμα.

Ρεύμα	Ρευστό	$E^{PH}$ [kW]	$E^{CH}$ [kW]	E [kW]
1	Stabilat	0	3448.734	3448.734
2	Αέρας	0	0	0
3	Αέρας	15.649	0.769	16.418
4	Αέριο σύνθεσης	315.121	2544.151	2859.272
5	Αέριο σύνθεσης	156.124	2544.151	2700.275
6	Αέριο σύνθεσης	122.06	2544.151	2666.211
7	Αέρας	0	0	0
8	Καυσαέριο	60.837	82.362	143.199
9	Νερό	1049.056	2.688	1130.423
10	Νερό	679.772	2.688	682.459
11	Νερό	71.399	2.688	74.086
12	Νερό	71.442	2.688	74.13
13	Νερό	22.637	0.059	22.696
14	Νερό	16.607	0.059	16.66

Συμπαραγωγικά συστήματα αξιοποίησης παραγόμενου αερίου από στερεό  
δευτερογενές καύσιμο

15	Νερό	87.507	2.748	90.254
16	Νερό	91.668	2.748	94.416
17	Νερό	164.66	2.748	167.413
18	Νερό	57.369	34.025	91.394
19	Νερό	354.858	34.025	388.883
20	Ισχύς στρόβιλου	-	-	323.7
21	Ισχύς αντλίας 1	-	-	0.1856
22	Ισχύς αντλίας 1	-	-	5.896

**Πίνακας 7.7 :** Εξέργειες ρευμάτων συστήματος

Ακολουθούν οι βαθμοί απόδοσης των επιμέρους στοιχείων και ο ισολογισμός εξέργειας για όλο το σύστημα. ο τρόπος υπολογισμού είναι όπως και νωρίτερα.

<u>Στοιχείο</u>	<u>ζ [%]</u>
Αεριοποιητής	82.5
Ατμοπαραγωγός	39.1
Στρόβιλος	72.3
Απαεριοτής	96.0
Προθερμαντής νερού	45.9
Προθερμαντής αέρα	48.2
Εναλλάκτης κατανάλωσης	48.2
Αντλία 1	23.3
Αντλία 2	70.6
Κύκλος ατμού	63.0
Συνολικός	18.0

**Πίνακας 7.8 :** Εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης στοιχείων

	[kW]
<b>Αναντιστρεπτότητες</b>	
Αεριοποιητής	605.879
Ατμοπαραγωγός	1537.307
Στρόβιλος 1	124.263
Εναλλάκτης ανάμιξης	0.541
Στραγγαλιστική βαλβίδα 1	6.03
Προθερμαντής νερού	86
Προθερμαντής αέρα	17.647
Εναλλάκτης κατανάλωσης	310.884
Αντλία 1	0.142
Αντλία 2	1.735
<b>Απώλειες συστήματος</b>	
Εξεργειακές απώλειες καυσαερίων	143.199
<b>Χρήσιμα προϊόντα</b>	
Ηλεκτρισμός	317.61
Θερμότητα	297.489
<b>Σύνολο</b>	<b>3448.726</b>

**Πίνακας 7.9 :** Εξεργειακός ισολογισμός συστήματος 1 βαθμών ελευθερίας

#### 7.4 Παραγωγή ενέργειας με χρήση μικροτουρμπίνας

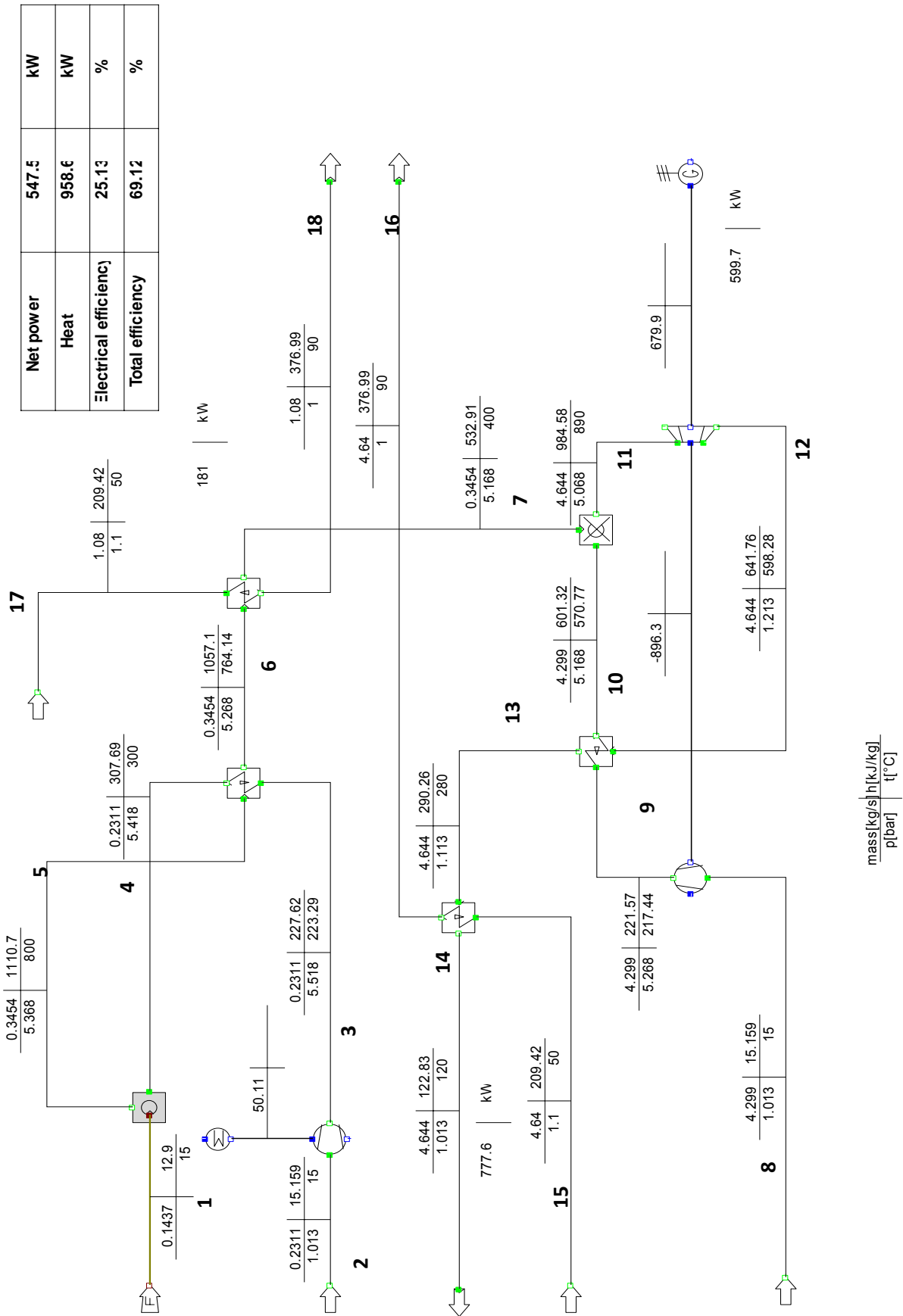
##### 7.4.1 Περιγραφή και επιδόσεις συστήματος

Ένα απλό σύστημα παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού με χρήση μικροτουρμπίνας σε σύνδεση με έναν αυτοθερμικό αεριοποιητή αποτελείται από τρία κύρια μέρη (βλ. σχήμα 7.3 ):

- Τον αεριοποιητή (1) , στον οποίο εισάγεται το στερεό καύσιμο Stabilat® και ο αέρας ως μέσον αεριοποίησης. Στην προκειμένη περίπτωση ο αεριοποιητής πρέπει να λειτουργεί υπό πίεση για την σύζευξή του με το θάλαμο καύσης της μικροτουρμπίνας. Γι ' αυτό ο αέρας πριν εισαχθεί στον αεριοποιητή συμπιέζεται από τον συμπιεστή (2) στην πίεση λειτουργίας του αντιδραστήρα. Επίσης ο αέρας πριν την εισαγωγή του προθερμαίνεται στον εναλλάκτη (3) από το παραγόμενο αέριο υψηλής θερμοκρασίας.
- Τη μικροτουρμπίνα, η οποία αποτελείται από τον συμπιεστή (4), τον θάλαμο καύσης 5(), τον στρόβιλο (6) τον αναγεννητή (7) και τη γεννήτρια (8).



Συμπαραγωγικά συστήματα αξιοποίησης παραγόμενου αερίου από στερεό δευτερογενές καύσιμο



Σχήμα 7.6: Περίπτωση αναφοράς συστήματος παραγωγής ενέργειας με μικροτουρμπίνα



Τα μεγέθη του συστήματος φαίνονται στον πίνακα 7.10 που ακολουθεί. Η σύσταση του παραγόμενου αερίου παρουσιάζεται στον πίνακα 7.11. Η διαφορά σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις έγκειται στο γεγονός ότι εδώ υπάρχει μεγαλύτερη προθέρμανση του αέρα.

Αεριοποιητής Stabilat®			
Εισερχόμενο καύσιμο	$\dot{m}_B$	0.51	tn/h
Εισερχόμενος αέρας	$\dot{m}_{air}$	0.828	tn/h
Λόγος αέρα	$\lambda$	0.33	-
Σύστημα παραγωγής ενέργειας			
Θερμογόνος ικανότητα αερίου	$H_u$	5205.6	kJ/kg
Εισερχόμενο αέριο	$\dot{m}_G$	1.242	tn/h
Καθαρή ηλεκτρική ισχύς	$P_{el}$	547.1	kW
Θερμική ισχύς	$Q$	958.6	kW
Επιδόσεις			
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	$\eta_{el}$	25.13	%
Ολικός βαθμός απόδοσης	$\eta_{TOT}$	69.12	%

**Πίνακας 7.10 :** Χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος αναφοράς

Συστατικό	Vol.-%	Vol.-% επί ξηρού
CO	24.61	26.01
CO <sub>2</sub>	6.59	6.97
CH <sub>4</sub>	0	0.00
H <sub>2</sub>	21.01	22.21
H <sub>2</sub> O	5.39	0.00
N <sub>2</sub>	42.28	44.69

**Πίνακας 7.11 :** Σύσταση παραγόμενου αερίου στο σύστημα αναφοράς

#### 7.4.2 Εξεργειακή ανάλυση συστήματος

Παρακάτω γίνεται εξεργειακή ανάλυση του συστήματος αναφοράς που εικονίζεται στο σχήμα 8.2. Η αρίθμηση των ρευμάτων φαίνεται στο σχήμα.

Ρεύμα	Ρευστό	$E^{PH}$ [kW]	$E^{CH}$ [kW]	$E$ [kW]
1	Stabilat	0	2275.404	2275.404
2	Αέρας	0	0	0
3	Αέρας	46.796	0.484	47.281
4	Αέρας	53.166	0.484	53.65
5	Αέριο σύνθεσης	257.627	1719.514	1977.141
6	Αέριο σύνθεσης	246.544	1719.514	1966.058
7	Αέριο σύνθεσης	124.232	1719.514	1843.746
8	Αέρας	0	0	0
9	Αέρας	768.04	9.032	777.072
10	Αέρας	1715.658	9.032	1724.69
11	Καυσαέριο	3080.707	16.347	3097.054
12	Καυσαέριο	1390.579	16.347	1406.926
13	Καυσαέριο	395.658	16.347	412.005
14	Καυσαέριο	65.539	16.347	81.886
15	Νερό	19.571	11.607	31.179
16	Νερό	121.059	11.607	132.666
17	Νερό	4.654	2.76	7.414
18	Νερό	28.785	2.76	31.545
19	Ισχύς στροβίλου	-	-	1577.4
20	Ισχύς συμπιεστή 1	-	-	897.1
21	Ισχύς συμπιεστή 2	-	-	101.487

**Πίνακας 7.12 :** Εξέργειες ρευμάτων συστήματος

Ο υπολογισμός των εξεργειών έγινε όπως και στην προηγούμενη παράγραφο. Έτσι έχω:

Αεριοποιητής

$$\dot{I}_G = \dot{E}_1 + \dot{E}_4 - \dot{E}_5$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_G = \frac{\dot{E}_5}{\dot{E}_1 + \dot{E}_4}$

Στρόβιλος

$$\dot{I}_T = \dot{E}_{11} - \dot{E}_{12} - \dot{W}_T$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_T = \frac{\dot{W}_T}{\dot{E}_{11} - \dot{E}_{12}}$

Προθερμαντής αέρα

$$\dot{I}_{PH} = \dot{E}_3 + \dot{E}_5 - \dot{E}_4 - \dot{E}_6$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_{PH} = \frac{\dot{E}_4 - \dot{E}_3}{\dot{E}_5 - \dot{E}_6}$

Εναλλάκτης κατανάλωσης 1

$$\dot{I}_{H1} = \dot{E}_{12} + \dot{E}_{15} - \dot{E}_{14} - \dot{E}_{16}$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_{H1} = \frac{\dot{E}_{16} - \dot{E}_{15}}{\dot{E}_{13} - \dot{E}_{14}}$

Εναλλάκτης κατανάλωσης 2

$$\dot{I}_{H2} = \dot{E}_6 + \dot{E}_{17} - \dot{E}_7 - \dot{E}_{18}$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_{H2} = \frac{\dot{E}_{18} - \dot{E}_{17}}{\dot{E}_6 - \dot{E}_7}$

Συμπιεστής 1

$$\dot{I}_{C1} = \dot{E}_8 + \dot{W}_{C1} - \dot{E}_9$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_{Pu1} = \frac{\dot{E}_9 - \dot{E}_8}{\dot{W}_{C1}}$

Συμπιεστής 2

$$\dot{I}_{C2} = \dot{E}_2 + \dot{W}_{C2} - \dot{E}_3$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_{C2} = \frac{\dot{E}_3 - \dot{E}_2}{\dot{W}_{C2}}$

#### Αναγεννητής

$$\dot{I}_R = \dot{E}_9 + \dot{E}_{12} - \dot{E}_{13} - \dot{E}_{10}$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_R = \frac{\dot{E}_{10} - \dot{E}_9}{\dot{E}_{12} - \dot{E}_{13}}$

#### Θάλαμος καύσης

$$\dot{I}_{CC} = \dot{E}_{10} + \dot{E}_7 - \dot{E}_{11}$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι  $\zeta_R = \frac{\dot{E}_{11} - \dot{E}_{10}}{\dot{E}_7}$

Στον πίνακα 8.4 και 8.5 φαίνονται οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης του κάθε στοιχείου καθώς και ο εξεργειακός ισολογισμός για ολόκληρο το σύστημα.

Στοιχείο	ζ [%]
Αεριοποιητής	82.5
Στρόβιλος	39.3
Εναλλάκτης νερού 1	72.2
Εναλλάκτης νερού 2	68.7
Προθερμαντής αέρα	70.1
Συμπιεστής 1	24.8
Συμπιεστής 2	48.2
Θάλαμος καύσης	39.5
Αναγέννητης	23.4
Συνολικός	33.1

**Πίνακας 7.13** : Εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης στοιχείων

Συμπαγωγικά συστήματα αξιοποίησης παραγόμενου αερίου από στερεό  
δευτερογενές καύσιμο

	[kW]
<b>Αναντιστρεπτότητες</b>	
Αεριοποιητής	351.914
Συμπιεστής 1	120.028
Συμπιεστής 2	4.479
Στρόβιλος	112.728
Εναλλάκτης αέρα	4.714
Εναλλάκτης νερού 1	228.632
Εναλλάκτης νερού 2	98.181
Αναγεννητής	47.303
Θάλαμος καύσης	471.382
<b>Απώλειες συστήματος</b>	
Απώλειες καυσαερίων	81.886
<b>χρήσιμα προϊόντα</b>	
Ηλεκτρισμός	628.54
Θερμότητα	125.618
<b>Σύνολο</b>	<b>2275.41</b>

**Πίνακας 7.14 :** Εξεργειακός ισολογισμός συστήματος μικροτουρμπίνας

## Κεφάλαιο 8

### Συμπεράσματα-Προτάσεις

Ο βασικός σκοπός αυτής της εργασίας ήταν η κατασκευή ενός μοντέλου χημικής ισορροπίας αυτοθερμικής αεριοποίησης βασισμένο σε σταθερές ισορροπίας. Όπως φάνηκε στην παράγραφο 4.3.2 το μοντέλο αυτό δίνει αποτελέσματα πολύ κοντά εν συγκρίσει με αυτά άλλων ερευνητών όσον αφορά την αεριοποίηση βιομάζας προερχόμενης από ξυλεία. Επίσης τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά κοντά με αντίστοιχα πειραματικά, πάλι όσον αφορά την ξυλεία, τα οποία εξήχθησαν από τους ίδιους ερευνητές και υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Ωστόσο στις παραπάνω συγκρίσεις υπάρχει διαφορά στην σύσταση του μεθανίου. Το μοντέλο ισορροπίας δεν προβλέπει την ύπαρξη μεθανίου στο παραγόμενο αέριο εν αντιθέσει με τα πειραματικά αποτελέσματα που εμφανίζουν μεθάνιο της τάξης του 1-2% vol. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην απλότητα του μοντέλου αλλά και στη σημαντική πιθανότητα να μην επιτεύχθηκε ισορροπία κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών.

Εν συνεχεία το θεωρητικό αυτό μοντέλο εφαρμόστηκε για την αεριοποίηση του στερεού δευτερογενούς Stabilat® της εταιρίας Herhof GmbH και συνδυάστηκε με διάφορα συστήματα παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πρώτο σύστημα που υλοποιείται ο κύκλος αμμοστροβίλου 2 βαθμών ελευθερίας, παραγωγής ηλεκτρισμού 501 kW και θερμότητας 130 kW, επιτυγχάνεται ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{el} = 15.17\%$  και συνολικός  $\eta_{TOT} = 19.11\%$  για παροχή στερεού καυσίμου 780 kg/h. Ο συνολικός βαθμός χαρακτηρίζεται μικρός για ένα σύστημα συμπαγωγής. Βέβαια αυτό είναι λογικό καθώς οι απαιτήσεις που τίθενται σε ενέργεια είναι οι ανωτέρω και το γεγονός ότι η θερμική ισχύς είναι πολύ μικρότερη της ηλεκτρικής δικαιολογεί τον μικρό αυτό βαθμό απόδοσης. Όσον αφορά την θερμογόνο ικανότητα του παραγόμενου αερίου, αυτή ανέρχεται στα 4924.8 kJ/kg με προθέρμανση του μέσου αεριοποίησης (αέρας) στους 150 °C. Επίσης εξετάστηκε η επίδραση της υγρασίας του καυσίμου και της θερμοκρασίας αεριοποίησης στην θερμογόνο ικανότητα του αερίου αλλά και στις επιδόσεις του αεριοποιητή. Με αύξηση της υγρασίας παρατηρείται μείωση της θερμογόνου ικανότητας του αερίου καθώς και μείωση της απόδοσης αεριοποίησης όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 7.1. Ακόμη αύξηση της θερμοκρασίας αεριοποίησης οδηγεί επίσης σε μείωση της θερμογόνου ικανότητας, αφού αυξάνεται έντονα ο λόγος αέρα και υπάρχει πολύ άζωτο στο παραγόμενο αέριο, και σε μείωση της απόδοσης αεριοποίησης.

Στη συνέχεια για την ίδια παροχή στερεού καυσίμου στον αεριοποιητή χρησιμοποιήθηκε κύκλος ατμοστροβίλου 1<sup>ος</sup> βαθμού ελευθερίας, δηλαδή με χρήση ενός και μόνο στροβίλου αντίθλιψης. Οι συνθήκες αεριοποίησης παρέμειναν ίδιες. Η έννοια του 1<sup>ος</sup> βαθμού ελευθερίας είναι ότι η ηλεκτρική ισχύς είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την θερμική και ο λόγος τους παραμένει σταθερός. Για το ανωτέρω σύστημα με παροχή καυσίμου 780 kg/h η ηλεκτρική ισχύς είναι 310.7 kW και η θερμική 2281 kW. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης είναι  $\eta_{TOT} = 78.49\%$  ενώ ο ηλεκτρικός  $\eta_{el} = 9.40\%$ . Το γεγονός ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι αρκετά μικρότερος από την προηγούμενη περίπτωση οφείλεται στο γεγονός της χρήσης στροβίλου αντίθλιψης. Η αυξημένη πίεση εξόδου από τον συμπυκνωτή έχει αρνητική επίδραση στην απόδοση του κύκλου Rankine. Αυτό το σύστημα θεωρείται ακατάλληλο διότι αφενός υπάρχει αλληλεξάρτηση της θερμικής με την ηλεκτρική ισχύ γεγονός που προϋποθέτει συγκεκριμένες σταθερές καταναλώσεις και αφετέρου στην προκειμένη περίπτωση υπάρχει τεράστια περίσσεια θερμικής ισχύος. Η ύπαρξη ενός τέτοιου συστήματος θα είχε νόημα μόνον εάν το εργοστάσιο παρείχε θερμότητα και σε άλλους καταναλωτές π.χ. γειτονικές οικιακές καταναλώσεις.

Τέλος εξετάστηκε η περίπτωση χρήσης μηχανής εσωτερικής καύσεως, συγκεκριμένα εμπορικής μικροτουρμπίνας 600 kwe<sub>el</sub>. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι σαφώς καλύτερος  $\eta_{el} = 25.13\%$  και η καθαρή ηλεκτρική ισχύς που λαμβάνεται είναι 547.1 kW. Η θερμική ισχύς που μπορεί να ληφθεί από την ανάκτηση της ενέργειας των καυσαερίων και από την ψύξη του αερίου ανέρχεται στα 958.5 kW ενώ ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι  $\eta_{TOT} = 69.12\%$ . Η θερμογόνο ικανότητα σε αυτή την περίπτωση είναι 5205.6 kJ/kg, μεγαλύτερη από τις προηγούμενες περιπτώσεις λόγω της μεγαλύτερης προθέρμανσης του αέρα στους 300 °C. Αυτό εξηγείται από το ότι με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα απαιτείται μικρότερη παροχή μάζας αυτού με αποτέλεσμα τη μείωση του αδρανούς αζώτου στο αέριο.

Όλα τα παραπάνω αποτελούν μια πρώτη προσέγγιση του θέματος της ενεργειακής αξιοποίησης του Stabilat® μέσω αεριοποίησης. Το επόμενο στάδιο είναι η εκτενής πειραματική διερεύνηση της αεριοποίησης του Stabilat® για να εξαχθούν συμπεράσματα για τη σύσταση του παραγόμενου αερίου και για την θερμογόνο του ικανότητα. Αυτό είναι απαραίτητο για την πιστοποίηση του θεωρητικού μοντέλου αεριοποίησης και για την διόρθωση του. Μόνο τότε θα υπάρχει σαφής εικόνα του τι σύστημα παραγωγής ενέργειας θα πρέπει ή θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αλλά και θα δοθεί η δυνατότητα μιας τεχνοοικονομικής μελέτης της τεχνολογίας αυτής.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Εμμ. Κ. Κακαράς. : Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί, εκδόσεις Φούντας.
2. Ν. Παπαγεωργίου. : Ατμοπαραγωγοί I Γενικές αρχές, εκδόσεις Συμεών.
3. Κ. Μαθιουδάκης. : Λειτουργία αεριοστρόβιλων και ατμοστροβίλων.
4. S.Karellas. : Online analysis of the composition of biogenous gases and their effect on microturbine and fuel cell systems.
5. Χ.Φραγκόπουλος. : Ανάλυση και βελτιστοποίηση ενεργειακών συτημάτων, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2005.
6. Adrian Bejan, George Tsatsaronis, and Michael Moran. : [Thermal Design and Optimization](#), John Wiley & Sons, New York.
7. T.J.Kotas. : The exergy method of thermal plant analysis, Krieger Publishing Company.
8. Μ.Φούντη. :Θεωρία καύσης και συστήματα καύσης, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2005.
9. Sompop Jarungthammachote and Animesh Dutta. : Thermodynamic Equilibrium Model and Second Law Analysis of a Downdraft Waste Gasifier, The 2nd Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)" 21-23 November 2006, Bangkok, Thailand.
10. Z.A.Zainal, R.Ali, C.H.Lean, K.N.Seetharamu. : Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials, Energy Conversion & Management 2001; 42: 1499-1515
11. Α. Mountouris , Ε. Voutsas, D. Tassios. : Solid waste plasma gasification: Equilibrium model development and exergy analysis
12. Higman C, van der Burgt MJ. Gasification. USA: Gulf Professional Pub.; 2003.
13. Altafini CR, Wander PR, Barreto RM. Prediction of the working parameters of a wood waste gasifier through an equilibrium model 2003; 44:2763-77.