



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« Μαθηματική μοντελοποίηση και προσομοίωση της διεργασίας της αεριοποίησης πλάσματος για τη διαχείριση αποβλήτων με ταυτόχρονη ανάκτηση ενέργειας.»

Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας

Κουτμάνη Κωνσταντίνας

Επιβλέπων

Επαμεινώνδας Βουτσάς, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.1	Γενικά.....	9
1.2	Θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων.....	11
1.2.1	Αποτέφρωση.....	15
1.2.2	Πυρόλυση.....	20
1.2.3	Αεριοποίηση.....	25
1.3	Σκοπός της εργασίας.....	30
2	ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	32
2.1	Γενικά.....	32
2.2	Η φάση του πλάσματος.....	32
2.3	Εφαρμογές της τεχνολογίας του πλάσματος.....	35
2.4	Χαρακτηριστικά της διεργασίας θερμικού πλάσματος για την διαχείριση στερεών αποβλήτων.....	35
2.5	Αεριοποίηση πλάσματος.....	36
2.5.1.	Διάγραμμα ροής.....	38
2.5.2.	Αντιδραστήρας αεριοποίησης.....	40
2.5.3.	Πυρσοί Πλάσματος.....	44
2.5.4.	Ξηραντήρας - Εναλλάκτης θερμότητας.....	45
2.5.5.	Συστήματα Καθαρισμού.....	46
2.5.6.	Συστήματα ανάκτησης ενέργειας.....	49
2.5.7.	Διαφορές με συμβατική αεριοποίηση.....	50
3	Προσομοίωση διεργασίας αεριοποίησης σε Aspen Plus 7.2.....	53
3.1	Aspen Plus v7.2.....	53
3.1.1	Τμήματα διεργασίας Aspen.....	56
3.2	Παραδοχές και θερμοδυναμικό υπόβαθρο προσομοίωσης.....	58
3.2.1	Υπολείμματα στερεού άνθρακα.....	58
3.2.2	Μοντέλο Electrolyte-NRTL για τη περιγραφή της ισορροπίας φάσεων στην απορρόφηση.....	59
3.2.3	Καταστατική εξίσωση και θερμοδυναμικά δεδομένα.....	60
3.2.4	Χρήση αμίνης MEA για την απορρόφηση CO ₂	61
3.2.5	Απορρόφηση CO ₂ και εισαγωγή παραμέτρων στο Aspen.....	63
3.3	Επικύρωση Aspen με το θερμοδυναμικό μοντέλο Gasifex.....	67

3.3.1 Σύσταση τυπικού ελληνικού σκουπιδιού	67
3.3.2 Σύσταση πιλοτικής μονάδας Thermoselect	68
4 Αποτελέσματα-Ενεργειακή και οικονομική εκτίμηση	70
4.1 Αποτελέσματα-Ενεργειακή Εκτίμηση.....	70
4.1.1 Αποτελέσματα αεριοποίησης	70
4.1.2 Ενεργειακή αποτύπωση αεριοποίησης της διεργασίας	75
4.2 Οικονομική Εκτίμηση	78
4.2.1 Διαστασιολόγηση εξοπλισμού.....	78
4.2.2 Οικονομικά στοιχεία.....	82
5 Συμπεράσματα.....	86
6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	89
7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	93

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:	« Μαθηματική μοντελοποίηση και προσομοίωση της διεργασίας της αεριοποίησης πλάσματος για τη διαχείριση αποβλήτων με ταυτόχρονη ανάκτηση ενέργειας»
ΦΟΙΤΗΤΗΣ:	Κουτμάνη Κωνσταντίνα
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:	Επαμεινώνδας Βουτσάς, Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:	2013-2014

Σύνοψη

Η ανάγκη διαχείρισης των απορριμμάτων με φιλικό για το περιβάλλον τρόπο, σε συνδυασμό με τη συνεχή επικαιροποίηση της νομοθεσίας όσον αφορά τη προστασία του περιβάλλοντος, καθίσταται ολοένα και πιο επιτακτική.

Συνηθέστερες μέθοδοι για την διαχείριση σκουπιδιών είναι η απόθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) και η ανακύκλωση, καθώς και οι βιολογικές διεργασίες και οι θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας- καύση και αεριοποίηση-, οι οποίες συνεισφέρουν επιπρόσθετα και στη παραγωγή ενέργειας. Δεδομένου ότι οι βιολογικές διεργασίες μειονεκτούν στην απαίτηση για αυστηρό διαχωρισμό των προς επεξεργασία αποβλήτων, οι θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας και πιο συγκεκριμένα η αεριοποίηση, καθίστανται πιο αποτελεσματικές και φιλικές μέθοδοι διαχείρισης αποβλήτων προς το περιβάλλον.

Αεριοποίηση είναι ο διαχωρισμός των απορριμμάτων σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες παρουσία οξυγόνου σε απλά μόρια. Από τη αεριοποίηση, η οποία επιτυγχάνεται σε θερμοκρασίες 400-850°C, παράγεται ανόργανο υαλώδες υλικό και αέριο σύνθεσης κατάλληλο για τη παραγωγή ενέργειας αλλά και για να αποτελέσει πηγή μοριακού υδρογόνου σύνθεσης. Με χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας, επιτυγχάνεται η αεριοποίηση των αποβλήτων με ελάχιστη καύση σε πιο υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα περισσότερος άνθρακας να μετατρέπεται σε αέριο σύνθεσης. Τότε μιλάμε για αεριοποίηση πλάσματος όπου το προϊόν, δηλαδή το αέριο σύνθεσης, είναι καθαρότερο ενώ έχουμε και απουσία τέφρας, διοξινών και άλλων τοξικών ουσιών που εμφανίζονται ως παραπροϊόντα της απλής αεριοποίησης.

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής είναι η σπουδή στην αεριοποίηση πλάσματος με μαθηματική μοντελοποίηση και προσομοίωση της διεργασίας κάνοντας χρήση του υπολογιστικού προγράμματος ASPEN.

Περίληψη

Από τα μεγαλύτερα προβλήματα που απασχολούν διεθνώς σε ερευνητικό και κοινωνικό επίπεδο τα τελευταία χρόνια, είναι η διαχείριση αποβλήτων, αστικών και βιομηχανικών. Με τον όρο αστικά απόβλητα (ΑΣΑ) περιλαμβάνονται τα οικιακά απόβλητα, καθώς και άλλα απόβλητα, τα οποία λόγω φύσης ή σύνθεσης, είναι παρόμοια με τα οικιακά, όπως απόβλητα από εμπορικές και συναφείς δραστηριότητες, κτίρια γραφείων και ιδρύματα (σχολεία, νοσοκομεία, κυβερνητικά κτίρια) καθώς και ογκώδη απόβλητα (στρώματα, έπιπλα κ.α.) αλλά και απόβλητα κήπων, φύλλα, κλαδιά, κηπευτικά, ή προερχόμενα από καθαρισμό δρόμων.

Συνηθέστερες πρακτικές, για την διαχείριση των ΑΣΑ είναι αρχικά η πρόληψη-ελαχιστοποίηση αυτών και ακολούθως, η επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση, οι θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας και η ταφή αυτών σε (ΧΥΤΑ). Όταν επιβληθεί να εφαρμοστεί κάποια θερμική μέθοδος επεξεργασίας η

επιλογή γίνεται ανάμεσα στη πυρόλυση, την καύση, την αεριοποίηση και την αεριοποίηση με τεχνολογία πλάσματος. Δεδομένου βασικών πλεονεκτημάτων της αεριοποίησης πλάσματος έναντι των υπολοίπων, όπως η απουσία τέφρας, αλλά και η ποικιλία απορριμμάτων προς διαχείριση, στη παρούσα διπλωματική θα διερευνηθεί η τεχνολογία αεριοποίησης πλάσματος. Πιο αναλυτικά, αεριοποίηση είναι ο διαχωρισμός των απορριμμάτων σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες παρουσία οξυγόνου σε απλά μόρια. Από τη αεριοποίηση, η οποία επιτυγχάνεται σε θερμοκρασίες 400-850°C, παράγεται ανόργανο υαλώδες υλικό και αέριο σύνθεσης κατάλληλο για τη παραγωγή ενέργειας αλλά και για να αποτελέσει πηγή μοριακού υδρογόνου σύνθεσης. Με χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας, επιτυγχάνεται η αεριοποίηση των αποβλήτων με ελάχιστη καύση σε πιο υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα περισσότερος άνθρακας να μετατρέπεται σε αέριο σύνθεσης. Τότε μιλάμε για αεριοποίηση πλάσματος όπου το προϊόν, δηλαδή το αέριο σύνθεσης, είναι καθαρότερο ενώ έχουμε και απουσία τέφρας, διοξινών και άλλων τοξικών ουσιών που εμφανίζονται ως παραπροϊόντα της απλής.

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής είναι η σπουδή στην αεριοποίηση πλάσματος με μαθηματική μοντελοποίηση και προσομοίωση της διεργασίας κάνοντας χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Aspen Plus V7.2. Αρχικά δομήθηκε η διάταξη αεριοποίησης στο περιβάλλον προσομοίωσης. Η διάταξη της διεργασίας περιλαμβάνει την κύρια μονάδα αεριοποίησης καθώς και μονάδα απορρόφησης CO₂ από το αέριο σύνθεσης με στόχο το καθαρισμό του.

Έπειτα για δεδομένη σύσταση τυπικού Ελληνικού σκουπιδιού ως τροφοδοσία, μελετήθηκαν οι λειτουργικές παράμετροι της διεργασίας – θερμοκρασία, υγρασία, οξειδωτικό μέσο - και πώς αυτές μεταβαλλόμενες επηρεάζουν τη σύσταση του αερίου σύνθεσης. Παρατηρήθηκε πώς αυξανόμενης της υγρασίας και του οξειδωτικού μέσου - εν προκειμένω αέρας – μειώνεται η σύσταση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης σε μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο με αποτέλεσμα να μειώνεται και η θερμογόνο δύναμη του αερίου σύνθεσης. Η αύξηση της θερμοκρασίας οδήγησε σε μικρή αύξηση της θερμογόνου δύναμης του αερίου σύνθεσης.

Στα πλαίσια της διπλωματικής έγινε ενεργειακή και οικονομική εκτίμηση της διεργασίας ενώ έγινε επικύρωση της προσομοίωσης της διάταξης χρησιμοποιώντας το θερμοδυναμικό μοντέλο Gasifex, το οποίο αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Θερμοδυναμικής της σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή κυρίου Επαμεινώνδα Βουτσά, από τον Διδάκτορα Ανδρέα Μουντούρη.

Τέλος έγινε μια ανακεφαλαίωση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη παρούσα εργασία και προτάθηκαν θέματα προς διερεύνηση.

POST-GRADUATE THESIS: **« Mathematical Modeling and Simulation of Plasma Process Gasification with Energy Recovery»**

STUDENT: **Koutmani Konstantina**

SUPERVISOR: **Epaminondas C. Voutsas, Associate Professor,**
School of Chemical Engineering

ACADEMIC YEAR: **2013-2014**

Abstract

The need to manage waste in an environmentally friendly manner, in combination with the continuous updating of the legislation regarding the protection of the environment, is becoming increasingly urgent.

The most common methods for waste management is landfill disposal and recycling, as well as biological processes and thermal processing, such as combustion and gasification, which also contribute to energy production. Since biological processes are at disadvantage when it comes to requirements for strict separation of waste to be treated, thermal processing methods of waste management and especially gasification, become more efficient and environmentally friendly.

Gasification is the separation of waste at high temperatures in the presence of oxygen in simple molecules. Gasification, which is achieved at temperatures 400-850 °C, is followed by the production glassy inorganic material and synthesis gas (syngas), suitable for generating energy and also, to serve as a source of molecular hydrogen composition. The use of an external power source allows waste gasification to be achieved with a minimum combustion at higher temperatures resulting in higher carbon conversion to syngas; this gasification technique is known as plasma gasification and it's characterized by cleaner products (i.e. syngas), as well as the absence of ash, dioxins and other toxic substances which are the byproducts of plain gasification.

The purpose of this dissertation is the study of plasma gasification based on mathematical modeling and simulation of the process using the computer software ASPEN.

Summary

Over the past few years, one of the biggest issues that have aroused on international scale, both with regards to research and society, is urban and industrial waste management. The term urban waste includes household waste and other types of waste, that due to its nature or composition bears similarities to household waste, i.e. waste from commercial activities, office buildings and institutions (schools, hospitals, government buildings), bulk waste (mattresses, furniture, etc.), garden waste (such as leaves, twigs and vegetables) or waste related to road cleaning.

The most common practice with regards to urban waste management is to initially prevent and minimize of waste, followed by reuse, recycling, thermal processing and use of landfills as a disposal option. Most common thermal processing techniques are pyrolysis, combustion, gasification and plasma gasification technology. The present dissertation will examine the plasma gasification technology in particular, due to its main advantages over other practices, such as the absence of ash and its ability to manage a wide variety of waste.

More specifically, gasification is the separation of waste at high temperatures in the presence of oxygen in simple molecules. Gasification, which is achieved at temperatures 400-850 °C, is followed by the production glassy inorganic material and synthesis gas (syngas), suitable for generating energy and also, to serve as a source of molecular hydrogen composition. The use of an external power source allows waste gasification to be achieved with a minimum combustion at higher temperatures resulting in higher carbon conversion to syngas; this gasification technique is known as plasma gasification and it's characterized by cleaner products (i.e. syngas), as well as the absence of ash, dioxins and other toxic substances which are the byproducts of plain gasification.

The purpose of this dissertation is the study of plasma gasification based on mathematical modeling and simulation of the process using the computer software Aspen Plus V7.2.

The first step was to design the gasification layout in a simulation environment. The setup includes the main gasification unit, as well as the unit of CO₂ absorption from syngas, that serves as means of cleaning.

The functional process parameters (temperature, humidity, oxidants) were studied for a given composition of waste feed, using the typical load generated by greek households. The effect of changes in the functional process parameters on the composition of syngas was also examined. It was observed that increases in humidity and oxidizing agent - in this case air - reduced the composition of the produced syngas in carbon monoxide and hydrogen, which resulted in reduction of the calorific value of syngas. The increase in temperature led to a slight increase in the calorific value of syngas.

The present dissertation involved an energy assessment and financial assessment of the gasification process, whereas the process simulation was validated using the thermodynamic model Gasifeq, which was developed in the Laboratory of Thermodynamics NTUA School of Chemical Engineering by Doctor Andrea Mountouris, under the supervision of Associate Professor Mr. Epaminondas Voutsas.

Finally, a summary of conclusions drawn from this project was provided and topics suitable for investigation were recommended.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Από τα μεγαλύτερα προβλήματα που απασχολούν διεθνώς σε ερευνητικό και κοινωνικό επίπεδο τα τελευταία χρόνια, είναι η διαχείριση αποβλήτων, αστικών και βιομηχανικών. Σε συνδυασμό με τη συνεχή επικαιροποίηση της νομοθεσίας όσον αφορά τη προστασία του περιβάλλοντος, γίνεται πιο επιτακτική η ανάγκη για εξεύρεση και διερεύνηση τεχνολογιών που θα συμβάλλουν στη διαχείριση απορριμμάτων με φιλικό για το περιβάλλον τρόπο.

Στην Ελλάδα μόνο κάθε χρόνο παράγονται περισσότεροι από 4,5 εκατομμύρια τόνοι Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) χωρίς να συμπεριλαμβάνονται στις ποσότητες αυτές τα απόβλητα της βιομηχανίας και της γεωργίας - κτηνοτροφίας, καθώς και τα απόβλητα από κατασκευές και κατεδαφίσεις. Παράλληλα, στην Ελλάδα παράγονται σημαντικές ποσότητες επικινδύνων αποβλήτων, κυρίως βιομηχανικού χαρακτήρα, η ποσότητα των οποίων είναι της τάξης των 300.000 τόνων σε ετήσια βάση, χωρίς να συνυπολογίζονται στις ποσότητες αυτές και τα επικίνδυνα απόβλητα των ενόπλων δυνάμεων. Το σύνολο των αποβλήτων αυτών χρειάζεται να διαχειριστούν με τρόπο αποτελεσματικό και ασφαλή τόσο για το περιβάλλον όσο και για την ανθρώπινη υγεία. Δεν είναι τυχαίο λοιπόν ότι στην εποχή μας η διαχείριση και διάθεση των στερεών αποβλήτων αποτελούν επίκαιρο ζήτημα που αποκτά ολοένα και αυξανόμενο ενδιαφέρον ακόμα και για τον απλό πολίτη, αλλά και αντικείμενο στο οποίο δραστηριοποιούνται εταιρείες και επιστήμονες.

Η νέα περιβαλλοντική νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης προωθεί την ανακύκλωση και την ανάπτυξη βιώσιμων τεχνολογιών, απομακρυνόμενη από τις ξεπερασμένες πλέον μεθόδους της υγειονομικής ταφής και διάθεσης αποβλήτων χωρίς επεξεργασία. Επιπρόσθετα, το νομοθετικό πλαίσιο θεσπίζει αυστηρά όρια και προδιαγραφές έτσι, ώστε η επεξεργασία που επιλέγεται κάθε φορά να λαμβάνει χώρα με τρόπο που να περιορίζει στο ελάχιστο τις περιβαλλοντικές ενοχλήσεις και να προστατεύεται το περιβάλλον και η δημόσια υγεία. Οι τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων περιλαμβάνουν:

- Ανάκτηση υλικών συσκευασίας
- Ανάκτηση / αξιοποίηση οργανικού υλικού (Κομποστοποίηση)
- Ανάκτηση / αξιοποίηση οργανικού υλικού με ανάκτηση ενέργειας (Αναερόβια Χώνευση)
- Ανάκτηση υλικών που μπορούν να αξιοποιηθούν ως εναλλακτικό καύσιμο
- Ανάκτηση ενέργειας με Θερμική Επεξεργασία
- Υγειονομική ταφή υπολειμμάτων (XYTY) [1,2]

Με βάση την πυραμίδα ιεράρχησης των προτεραιοτήτων στη διαχείριση των στερεών αποβλήτων (Σχήμα 1.1), η πρόληψη και ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων βρίσκονται στην κορυφή της πυραμίδας. Ακολουθεί η επαναχρησιμοποίηση, στη συνέχεια η ανακύκλωση, έπεται η ανάκτηση ενέργειας μέσω θερμικών μεθόδων επεξεργασίας και ως λιγότερο επιθυμητή επιλογή εμφανίζεται η διάθεση σε χώρους ταφής. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, γιατί πλέον είναι ξεκάθαρο πως αφού ανακυκλωθούν όσο το δυνατόν περισσότερα υλικά, τα απόβλητα που απομένουν θα πρέπει να αξιοποιηθούν ενεργειακά και, στη συνέχεια, να ακολουθήσει η επιλογή της υγειονομικής ταφής.



Σχήμα 1.1: Πυραμίδα ιεράρχησης των προτεραιοτήτων στη διαχείριση των στερεών αποβλήτων.

Τα προηγούμενα χρόνια η απόθεση των σκουπιδιών σε χώρους υγειονομικής ταφής (XYTA), αποτελούσε και τη συνηθέστερη μέθοδο, όμως ο κίνδυνος ρύπανσης των υπογείων υδάτων από βαρέα μέταλλα και διοξίνες και ο κίνδυνος διαφυγής μέρους

του παραγόμενου μεθανίου, όσο και πρακτικά ζητήματα όπως ο περιορισμένος χρόνος λειτουργίας ενός ΧΥΤΑ, η μεγάλη έκταση εγκατάστασης και το μεγάλο κόστος μελλοντικής αποκατάστασης της επιλεγόμενης περιοχής, οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στο αυξημένο ενδιαφέρον για εναλλακτικές προτάσεις, όπως η ανακύκλωση, καθώς και άλλες όπως οι βιολογικές διεργασίες και οι θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας - καύση και αεριοποίηση-, οι οποίες συνεισφέρουν επιπρόσθετα και στη παραγωγή ενέργειας. Όσον αφορά στις βιολογικού τύπου διεργασίες, αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μεγάλη επιτυχία για την παραγωγή ενέργειας από το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των αποβλήτων, κάτι όμως που απαιτεί σωστό διαχωρισμό των αποβλήτων πριν την διεργασία. Επίσης, μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην ποιότητα του στερεού προϊόντος - compost - έτσι ώστε να μην περιέχει ανεπιθύμητα υπολείμματα ρύπων και να μπορεί να διατεθεί στη συνέχεια με ασφάλεια προς τελικές χρήσεις. Δεδομένου ότι οι βιολογικές διεργασίες μειονεκτούν στην απαίτηση για αυστηρό διαχωρισμό των προς επεξεργασία αποβλήτων, οι θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας και πιο συγκεκριμένα η αεριοποίηση, καθίστανται πιο αποτελεσματικές και φιλικές μέθοδοι διαχείρισης αποβλήτων προς το περιβάλλον.

1.2 Θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων

Με τον όρο «θερμική επεξεργασία» αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) εννοούνται συγκεκριμένες διαδικασίες μετατροπής των απορριμμάτων σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα, με ταυτόχρονη ή συνεπακόλουθη έκλυση θερμικής ενέργειας.

Η θερμική επεξεργασία των στερεών αποβλήτων αποσκοπεί στην ελάττωση του όγκου τους, στη μετατροπή τους σε υλικά μη επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία και στην εκμετάλλευση της περιεχόμενης σε αυτά ενέργειας. Παλαιότερα, η θερμική επεξεργασία ήταν άμεσα συνδεδεμένη με την καύση ως μοναδική τεχνολογική επιλογή. Εξαιτίας όμως της αυστηρότερης νομοθεσίας με την πάροδο των χρόνων για τις αέριες εκπομπές (π.χ., διοξίνες, φουράνια) και το στερεό υπόλειμμα της διεργασίας (π.χ. τοξική τέφρα με βαρέα μέταλλα), αυξήθηκε το ενδιαφέρον για πιο σύγχρονες τεχνολογίες θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων.

Οι τεχνικές θερμικής επεξεργασίας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

- ❖ **καύση – αποτέφρωση**
- ❖ **πυρόλυση**
- ❖ **αεριοποίηση**
- ❖ **αεριοποίηση με τεχνολογία πλάσματος**

Πρόσθετες καινοτόμες μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας συνδυάζουν την καύση, την πυρόλυση και την αεριοποίηση, οι οποίες αποτελούν και τις τρεις βασικές τεχνολογίες θερμικής επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων. Οι μονάδες εφαρμογής τους αποτελούνται από τυποποιημένες κατασκευές συμβατικών μονάδων. Οι σπουδαιότεροι λόγοι της γρήγορης εξάπλωσης των νέων μεθόδων είναι τα οφέλη που προκύπτουν κατά την εφαρμογή τους, όπως :

- **οικολογικά** (μειωμένες εκπομπές αέριων ρύπων και μικρές ποσότητες τηγμένης σκωρίας μέσω διαχωρισμού πλύσης)
- **ενεργειακά** (εξοικονόμηση και ενεργειακή ανεξάρτηση)

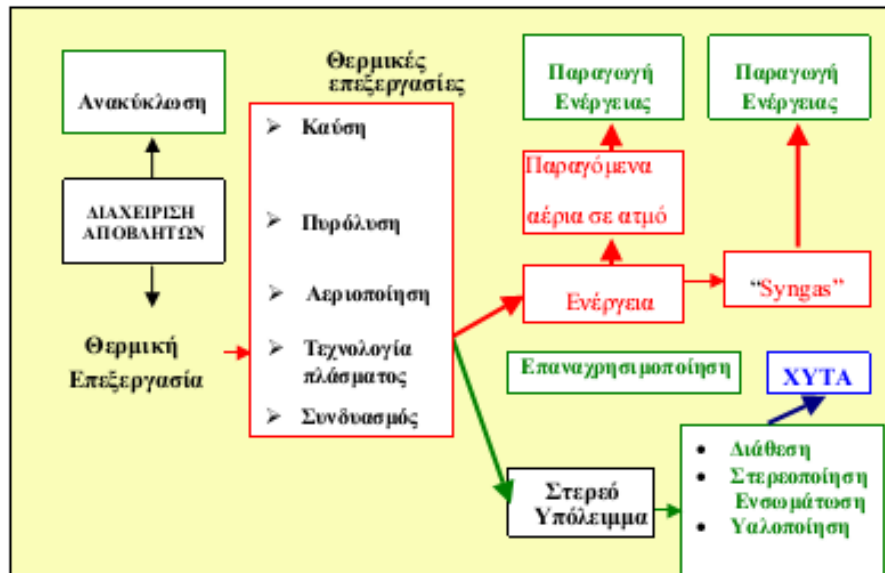
Οι σημαντικότεροι στόχοι της θερμικής επεξεργασίας είναι:

- Η ελαχιστοποίηση της ποσότητας των αποβλήτων που οδηγούνται στους ΧΥΤΑ.
- Η αδρανοποίησή τους (μετατροπή τους σε υλικά λιγότερο επιβλαβή).
- Η μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης, ειδικότερα η αποφυγή δημιουργίας και εκπομπής οργανικών ενώσεων, όπως οι διοξίνες.
- Η εκμετάλλευση της θερμογόνου δύναμής τους προς ανάκτηση ενέργειας (θέρμανση, ηλεκτρικό ρεύμα, καύσιμη ύλη).

Οι βασικές αρχές λειτουργίας που πρέπει να διέπουν τις εγκαταστάσεις θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ είναι:

- Σταθερές συνθήκες λειτουργίας.
- Ευκολία προσαρμογής σε απότομες αλλαγές της σύστασης και της ποσότητας τροφοδοσίας.
- Ευελιξία προσαρμογής στις βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες διακυμάνσεις της σύνθεσης και της ποσότητας του χρησιμοποιούμενου καυσίμου.
- Πλήρης έλεγχος των ρύπων στις εκπομπές.

- Μεγιστοποίηση της αξιοποίησης της θερμικής ενέργειας, κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας. [7]



Σχήμα1.2: Επιλογές θερμικής επεξεργασίας στερεών αποβλήτων. [3]

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της θερμικής επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων. [4,5,6]

Πίνακας 1.1: Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα θερμικής επεξεργασίας ΣΑ

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μειώνει τον όγκο των αποβλήτων σε μεγάλο βαθμό και ο όγκος των τελικών υπολειμμάτων ανέρχεται περίπου στο 10% του αρχικού όγκου των προς επεξεργασία αποβλήτων.	Υψηλό κόστος κατασκευής: Μεγάλο μέρος του συνολικού κόστους επένδυσης αντιστοιχεί στην τεχνολογία για την προστασία του περιβάλλοντος, καθώς απαιτείται χρήση δαπανηρών συστημάτων ελέγχου της προκαλούμενης ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
Λόγω της οξειδωσης των ουσιών και της μετατροπής τους σε αέριες ενώσεις, προκύπτει σημαντική μείωση του βάρους των αποβλήτων.	Υψηλό κόστος λειτουργίας: Το κόστος μειώνεται δραστικά, όσο αυξάνεται η δυναμικότητα της μονάδας.
Επιτυγχάνεται ανάκτηση και αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας.	Ανάγκη απασχόλησης εξειδικευμένου προσωπικού.
Είναι ανταγωνιστική των συμβατικών καυσίμων (κάρβουνο, αέριο, πετρέλαιο) στην περίπτωση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.	Μη άμεση αξιοποίηση υλικών από τα απόβλητα.

<p>Είναι ο πλέον κατάλληλος τρόπος επεξεργασίας κυρίως για ρεύματα αποβλήτων τα οποία περιέχουν συστατικά που είναι ανθεκτικά σε βιοαποδόμηση, είναι πτητικά, δεν μπορούν να διατεθούν με ασφάλεια σε χώρους υγειονομικής ταφής επικινδύνων αποβλήτων ή να υποστούν αποτελεσματική επεξεργασία με άλλες μεθόδους. Έτσι, αποτελούν το μόνο ή τον πλέον αξιόπιστο τρόπο για την επεξεργασία ορισμένων ρευμάτων αποβλήτων, όπως τα νοσοκομειακά ή ορισμένες κατηγορίες τοξικών και επικινδύνων αποβλήτων.</p>	<p>Δυσκολία αξιοποίησης της παραγόμενης θερμότητας (ιδιαίτερα σε μικρές εγκαταστάσεις).</p>
<p>Χαρακτηρίζονται από την απαίτηση μικρών εκτάσεων για την εγκατάστασή τους. Οι μέθοδοι της πυρόλυσης και της αεριοποίησης πλεονεκτούν σε σύγκριση με την αποτέφρωση σε αυτό το σημείο.</p>	<p>Εκπομπές επικινδύνων ρύπων μέσω των καυσαερίων.</p>
<p>Τα προϊόντα της θερμικής επεξεργασίας, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται, χαρακτηρίζονται από πλήρη απουσία παθογόνων παραγόντων.</p>	<p>Απαίτηση αυξημένων πληθυσμών: Ιδιαίτερα οι μονάδες καύσης απαιτούν μία ελάχιστη δυναμικότητα, ώστε να κρίνονται οικονομικά βιώσιμες.</p>
	<p>Πέραν της καύσης, οι υπόλοιπες τεχνολογίες θερμικής επεξεργασίας χαρακτηρίζονται ως ευαίσθητες για σύμμεκτα ΑΣΑ. Ωστόσο, η εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών για κλάσματα των στερεών απορριμμάτων(π.χ. RDF – καύσιμο κλάσμα, χαρτί, πλαστικά, ξύλα, ελαστικά, κλπ.) έχει δώσει καλά αποτελέσματα.</p>

Οι πλέον βασικές μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας κατηγοριοποιούνται βάση των απαιτήσεων τους σε αέρα:

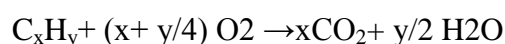
- ✓ **Αποτέφρωση (πλήρης καύση)**, ορίζεται ως η ταχεία μετατροπή της χημικής ενέργειας σε θερμική, με οξείδωση της οργανικής ύλης των ΑΣΑ, υπό συνθήκες περίσσειας οξυγόνου, προς διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Τα ανόργανα συστατικά των απορριμμάτων παραμένουν στο παραγόμενο στερεό υπόλειμμα.

- ✓ **Πυρόλυση**, ορίζεται ως η αποδόμηση των οργανικών ουσιών των ΑΣΑ, απουσία οξυγόνου (ή ελαχίστων ποσοτήτων). Τα προϊόντα πυρόλυσης είναι στερεά, υγρά και αέρια και η σύσταση τους εξαρτάται από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μονάδας, όπως τη θερμοκρασία και τον χρόνο παραμονής των απορριμμάτων στον πυρολυτικό θάλαμο.
- ✓ **Αεριοποίηση**, ορίζεται ως η μερική οξείδωση (με αέρα ή οξυγόνο) της οργανικής ύλης των ΑΣΑ, η οποία μετατρέπεται σε μείγμα αερίων (π.χ. μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και μεθάνιο). Σε όλα τα στάδια αυτής της διαδικασίας παράγονται αέρια, στερεό υπόλειμμα και θερμική ενέργεια, η οποία απαιτείται για την πραγματοποίηση αλυσιδωτών αντιδράσεων.

1.2.1 Αποτέφρωση

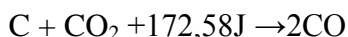
Η αποτέφρωση ή κοινώς καύση είναι η οξείδωση, δηλαδή η ένωση των χημικών στοιχείων με το O₂, με σκοπό τη μετατροπή της χημικής ενέργειας της οργανικής ύλης των στερεών αποβλήτων σε θερμική, παρουσία φλόγας, για την οξείδωση των επιμέρους στοιχείων αυτών. Αυτό πραγματοποιείται με χρήση είτε της απαιτούμενης στοιχειομετρικά ποσότητας αέρα ή με περίσσεια αέρα. Η μέθοδος αυτή αποτελεί την παλαιότερη και πιο διαδεδομένη θερμική διεργασία.

Τα προϊόντα καύσης αποτελούνται κυρίως από CO₂ και ατμούς. Η σημαντικότερη παράμετρος κατά την καύση είναι η παρουσία O₂. Κατά την πλήρη καύση επικρατεί περίσσεια O₂, συνεπώς ο στοιχειομετρικός συντελεστής του O₂ στην αντίδραση καύσης είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Εάν ο παραπάνω συντελεστής είναι ίσος με τη μονάδα, θεωρητικά δεν παράγεται CO και η μέση θερμοκρασία του αερίου είναι 1.200°C. Οι αντιδράσεις που συμβαίνουν τότε είναι:



Σε περίπτωση έλλειψης O₂, οι αντιδράσεις αεριοποίησης που συμβαίνουν χαρακτηρίζονται ως «αντιδράσεις ατελούς καύσης», κατά τις οποίες το παραγόμενο

CO₂ ενώνεται με C που δεν έχει ακόμα καταναλωθεί και μετατρέπεται σε CO σε υψηλότερες θερμοκρασίες.



Επίσης, κατά τη διάρκεια της καύσης λαμβάνουν χώρα επιπρόσθετες διεργασίες, όπως η θερμική διάσπαση του H₂O, η οξείδωση του S και η χημική αντίδραση N₂.

Προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης καύση των στερεών αποβλήτων, πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

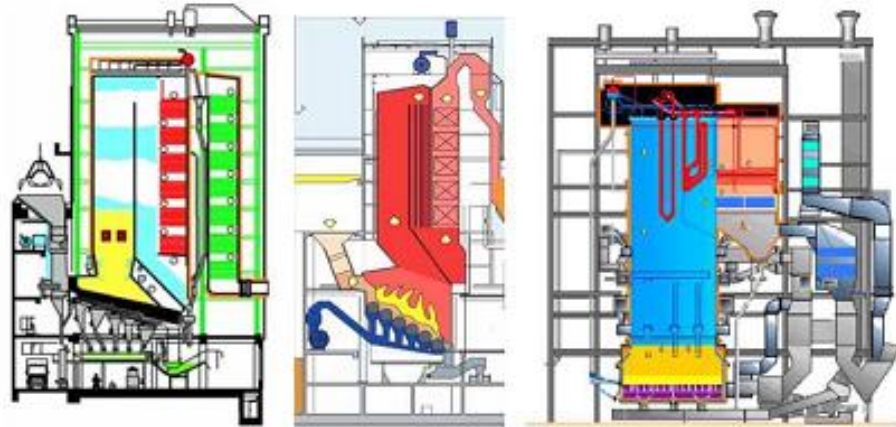
- ✓ αρκετό καύσιμο υλικό και οξειδωτικό μέσο στην εστία καύσης
- ✓ εφικτή θερμοκρασία ανάφλεξης
- ✓ σωστή αναλογία μίγματος
- ✓ συνεχής απομάκρυνση των αερίων τα οποία παράγονται κατά την καύση
- ✓ συνεχής απομάκρυνση των υπολειμμάτων της καύσης
- ✓ διατήρηση κατάλληλης θερμοκρασία στον κλίβανο
- ✓ τυρβώδης ροή των αερίων
- ✓ επαρκής χρόνος παραμονής των αποβλήτων στην περιοχή καύσης
- ✓ δημιουργία τύρβης και ανακίνηση των απορριμμάτων [7]

Διάφορες τεχνολογίες καύσης μπορεί να εφαρμοστούν ανάλογα με το είδος των προς επεξεργασία αποβλήτων, στην περίπτωση των ΑΣΑ όμως, η όλη διαδικασία της καύσης λαμβάνει χώρα σε ειδικές εστίες καύσης, η δυναμικότητα των οποίων κυμαίνεται από 8 έως 25 Mg/h και οι πλέον διαδεδομένοι τύποι αυτών είναι οι:

- εστία κινούμενων σχάρων,
- εστία περιστρεφόμενου κλιβάνου,
- εστία ρευστοποιημένης κλίνης.

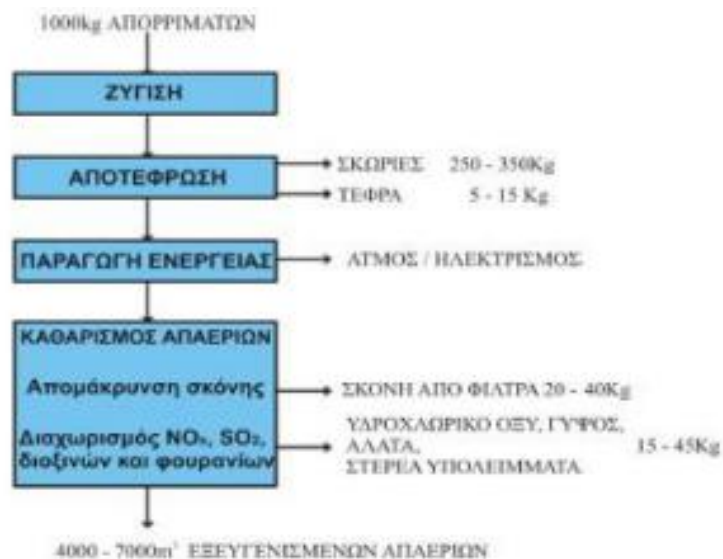
Για απόβλητα με κατώτερη θερμογόνο δύναμη της τάξης των 8 MJ/kg (1.910 kcal/kg), η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται σε 520 kWh/t αποβλήτων. Εάν από την παραπάνω ποσότητα αφαιρεθεί η ίδια κατανάλωση του εργοστασίου, που ανέρχεται σε 70 kWh/t, η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας, που μπορεί να διατεθεί, είναι της τάξης των 450 kWh/t αποβλήτων.

Για την εφαρμογή της αποτέφρωσης προϋπόθεση είναι τα ΑΣΑ να έχουν μια ελάχιστη κατώτερη θερμογόνο δύναμη 6 MJ/kg (1.433 kcal/kg), σε όλες τις εποχές του έτους και μια μέση ετήσια κατώτερη θερμογόνο δύναμη τουλάχιστον 7 MJ/kg (1.672 kcal/kg).



Σχήμα 1.3: Τύποι Αποτεφρωτών (α) κινούμενων σχάρων (β) περιστρεφόμενου κλιβάνου (γ) ρευστοποιημένης κλίνης (Finbioenergy, 2006)

Η διεργασία της αποτέφρωσης των ΑΣΑ μπορεί να απεικονιστεί από το ακόλουθο διάγραμμα ισοζυγίου μάζας (Σχήμα 1.4):



Σχήμα 1.4: Τυπική ροή μονάδας αποτέφρωσης.

Μια εγκατάσταση αποτέφρωσης στερεών αποβλήτων αποτελείται, στη γενική περίπτωση, από τα ακόλουθα επιμέρους συστήματα:

Ζυγιστήριο: Το σύστημα ζύγισης των στερεών αποβλήτων αποσκοπεί στον έλεγχο και την καταγραφή των εισερχόμενων φορτίων και πρέπει να είναι πρακτικό και να ελαχιστοποιεί το χρόνο παραμονής των οχημάτων σε αυτό.

Χώρος Υποδοχής: Η προσκόμιση των αποβλήτων δεν γίνεται σε συνεχή βάση σε αντίθεση με την τροφοδοσία της εγκατάστασης. Είναι απαραίτητη η ύπαρξη χώρου υποδοχής– προσωρινής αποθήκευσής τους. Ο σχεδιασμός του χώρου υποδοχής πρέπει να βασίζεται στην ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (κατάλληλη κλίση του πυθμένα του χώρου για την απομάκρυνση των στραγγισμάτων και των νερών έκπλυσης, σύστημα απομάκρυνσης και ανανέωσης του αέρα λόγω της σκόνης που δημιουργείται, αποφυγή της παραμονής των στερεών αποβλήτων στο χώρο για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των δύο ημερών, λόγω της έκλυσης οσμών).

Σύστημα τροφοδοσίας: Το σύστημα τροφοδοσίας (γερανός, ταινία) πρέπει να είναι προσαρμοσμένο στο ρυθμό και την ταχύτητα τροφοδοσίας της εγκατάστασης. Επίσης, βασική προϋπόθεση είναι η ισομερής τροφοδοσία της εστίας καύσης, η οποία επιτυγχάνεται μηχανικά ή υδραυλικά.

Εστίες Καύσης: Η ανάφλεξη των στερεών αποβλήτων στις εγκαταστάσεις καύσης επιτυγχάνεται με χρήση ειδικού καυστήρα, ο οποίος λειτουργεί με βοηθητικό καύσιμο. Βασικές παράμετροι για τη σωστή λειτουργία των εστιών καύσης είναι η επίτευξη της ελάχιστης επιθυμητής θερμοκρασίας, επαρκής χρόνος καύσης, επίτευξη συνθηκών στροβιλισμού/ ομοιογενούς καύσης των αποβλήτων.

Λέβητας: Ο λέβητας είναι το σύστημα με το οποίο ανακτάται το ενεργειακό περιεχόμενο της καύσιμης ύλης (θερμά απαέρια), μέσω παραγωγής ατμού, ο οποίος μπορεί να αξιοποιηθεί κατάλληλα, π.χ. σε γειτονικές βιομηχανικές μονάδες ή για την τηλεθέρμανση αστικών περιοχών. Βασικές παράμετροι για τη σωστή λειτουργία του λέβητα είναι η πίεση, η θερμοκρασία και ο ρυθμός παραγωγής του ατμού. Η κατασκευή του φέρει εξωτερική επένδυση έτσι, ώστε να επιτυγχάνεται στεγανοποίηση, αποφυγή εισροής αέρα και θερμομόνωσή του. Επιπλέον, τα υλικά κατασκευής του πρέπει να είναι ανθεκτικά τόσο στις υψηλές θερμοκρασίες που

αναπτύσσονται στο εσωτερικό όσο και στις μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές που παρατηρούνται ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό της κατασκευής. Επίσης, υφίσταται και δεύτερο εξωτερικό στρώμα μόνωσης για το οποίο δεν απαιτούνται ειδικές αντοχές σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (πυρίμαχα τούβλα, υαλοβάμβακας, κλπ.).

Σύστημα απομάκρυνσης των υπολειμμάτων: Τα υπολείμματα αποτελούν το 20–40% του βάρους των εισερχομένων απορριμμάτων. Τα υπολείμματα συγκεντρώνονται σε χοάνες από όπου με ειδικό σύστημα μεταφέρονται για ψύξη.

Σύστημα ελέγχου εκπομπών: Ο ρόλος του συστήματος ελέγχου εκπομπών επικεντρώνει σε σωματίδια, HCl, HF, SO₂, διοξίνες και βαρέα μέταλλα. Μετά τη διέλευσή τους από τον ατμολέβητα, τα απαέρια διέρχονται από την εγκατάσταση καθαρισμού και κατόπιν διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα. Στα συστήματα καθαρισμού εφαρμόζονται διάφορες, δοκιμασμένες και ασφαλείς τεχνολογίες, με σκοπό την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών, των οξέων, των NO_x, των διοξινών και άλλων. Τα συστήματα ελέγχου εκπομπών εκπροσωπούνται από διάφορες διατάξεις, όπως πλυντηρίδες, ηλεκτροστατικά φίλτρα, κυκλώνες, σακόφιλτρα, η επιλογή των οποίων βασίζεται στη σύσταση των προς επεξεργασία απαερίων και στα επιτρεπτά όρια εκπομπών της όλης εγκατάστασης. [7]

Από τη διαδικασία της αποτέφρωσης απορριμμάτων προκύπτουν αέρια, υγρά και στερεά απόβλητα [8]. Τα αέρια περιέχουν N₂ και περίσσεια O₂, σωματίδια σκόνης, τα τυπικά προϊόντα της καύσης και άλλες επιβλαβείς ουσίες, που εξαρτώνται από τη σύνθεση των απορριμμάτων, κυριότερα των οποίων είναι τα: SO₂, NO_x, HCl, HF, τα βαρέα μέταλλα και οι πολυκυκλικοί Η/С, που είναι από τους πιο επικίνδυνους ρύπους των καυσαερίων, όπως οι διοξίνες και τα φουράνια. Πιο συγκεκριμένα:

Διοξίνες: Αποτελούνται από δύο αρωματικούς δακτυλίους ενωμένους με ένα ζεύγος ατόμων οξυγόνου. Οι τοξικές επιδράσεις των διοξινών [9] και των φουρανίων δεν είχαν γίνει κατανοητές στις Η.Π.Α. και στον υπόλοιπο κόσμο, παρά μόνο προς τα τέλη της δεκαετίας του '80.

Φουράνια: Διαφέρουν από τις διοξίνες μόνο στο ότι οι δύο αρωματικοί δακτύλιοι ενώνονται με ένα άτομο οξυγόνου. Σε αυτήν την ομάδα ενώσεων υπάγονται 75

συνολικά ενώσεις, γνωστές και ως πολυχλωριωμένες διβενζο-π-διοξίνες (PCDD) και 135 διβενζοφουράνια (PCDF). [9]

Οι διοξίνες και τα φουράνια παράγονται σε όλες σχεδόν τις διαδικασίες καύσης, στην αέρια φάση, με άγνωστο τον ακριβή μηχανισμό σχηματισμού τους. Είναι γνωστό ότι μια θερμοκρασία σχηματισμού τους είναι οι 300°C, κατά την οποία δύο αντιδράσεις είναι πιθανές, ο σχηματισμός και η αποσύνθεση. Η παρουσία χλωριωμένων οργανικών ενώσεων στα απορρίμματα και η αύξηση της περιεκτικότητάς τους σε οξυγόνο ενθαρρύνουν τη δημιουργία τους. Συνεπώς, οι συνθήκες λειτουργίας του αποτεφρωτήρα επηρεάζουν καθοριστικά τη δημιουργία διοξινών και όχι η σύνθεση των απορριμμάτων και η ποσότητα PVC που περιέχεται σε αυτά.

Από τον άνθρωπο μπορούν να προσληφθούν μέσω της αναπνοής ή της απορρόφησης από το δέρμα, σε περιπτώσεις που αυτές εκλύονται σε πολύ μικρή απόσταση από τους αποδέκτες. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις η εισαγωγή τους στον ανθρώπινο οργανισμό οφείλεται στις τροφές και πιο συγκεκριμένα στα φρούτα και τα λαχανικά. Υπάρχουν ενδείξεις για τη συμβολή των διοξινών και φουρανίων σε διαδικασίες καρκινογένεσης σε ανθρώπους, που καθιστούν απαραίτητη τη λήψη μέτρων για τη μείωση της εκπομπής τους.[9]

1.2.2 Πυρόλυση

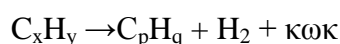
Ως πυρόλυση ορίζεται η αποδόμηση των οργανικών ουσιών των απορριμμάτων, απουσία (ή παρουσία ελαχίστου) οξυγόνου. Η πυρόλυση αποτελεί μια σχετικά νέα θερμική διεργασία, η οποία αν και αναπτύχθηκε στα τέλη του 19ου αιώνα, άρχισε να εφαρμόζεται στην επεξεργασία ΑΣΑ τα τελευταία 20-30 χρόνια. Γενικά, δεν αποτελεί μια ιδιαίτερα διαδεδομένη μέθοδο θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ, τουλάχιστον στην Ευρώπη, λόγω της μειωμένης ενεργειακής απόδοσης και οικονομικής βιωσιμότητάς της. Η πυρόλυση εκπροσωπεί την θερμική αποσύνθεση των οργανικών συστατικών των απορριμμάτων, απουσία οξυγόνου (ή ελάχιστων ποσοτήτων οξυγόνου) και άλλων παραγόντων πρόκλησης αεριοποίησης, όπως CO₂, ατμού, κ.α.

Σε αντίθεση με την καύση και την αεριοποίηση, πρόκειται για μια διεργασία ισχυρά ενδόθερμη για τη διεξαγωγή της οποίας απαιτείται εξωτερική πηγή ενέργειας. Στην πραγματικότητα βέβαια, δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν συνθήκες περιβάλλοντος πλήρους απουσίας O₂, επομένως, πραγματικά πυρολυτικά συστήματα λειτουργούν με ποσότητες O₂ μικρότερες των στοιχειομετρικών.

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα αρχικά είναι κυρίως αντιδράσεις διάσπασης, όπου οργανικά συστατικά χαμηλής πτητικότητας, μετατρέπονται σε άλλα περισσότερο πτητικά:



Επίσης, στα αρχικά στάδια της πυρόλυσης συμβαίνουν αντιδράσεις συμπύκνωσης, αφυδρογόνωσης και αντιδράσεις σχηματισμού δακτυλίων, που οδηγούν στο σχηματισμό ενός στερεού ανθρακούχου υπολείμματος από οργανικές ενώσεις χαμηλής πτητικότητας:



Στη συνέχεια, συμβαίνουν και άλλες αντιδράσεις των οργανικών ρύπων. Στην περίπτωση ύπαρξης O₂ σχηματίζεται CO και CO₂ ή είναι πιθανή η αλληλεπίδραση με H₂O. Το παραγόμενο κωκ μπορεί να εξαερωθεί σε O₂ και CO₂.

Τα παραγόμενα προϊόντα μπορεί να είναι υγρά, στερεά και αέρια. Οι αναλογίες τους εξαρτώνται από τη φύση των αποβλήτων, τις συνθήκες θέρμανσης, τη θερμοκρασία και το χρόνο της επεξεργασίας. Η δε χρήση τους είναι κυρίως για την παραγωγή ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα:

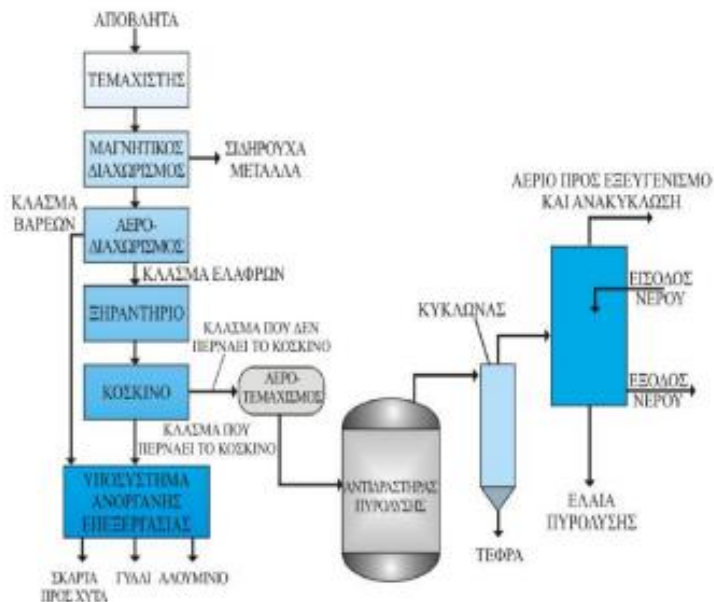
Αέρια: Αποτελούνται κυρίως από H₂, CH₄, CO, CO₂ και διάφορα άλλα αέρια, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των στερεών αποβλήτων

Υγρά: Το υγρό κλάσμα είναι ελαιώδες με υψηλή πυκνότητα και ιξώδες και περιέχει απλά καρβοξυλικά οξέα (π.χ. CH₃COOH), κετόνες (π.χ. CH₃COCH₃), αλκοόλες (π.χ. CH₃OH), καθώς και σύνθετους οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες. Με περαιτέρω επεξεργασία το κλάσμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνθετικό καύσιμο.

Στερεά: Το στερεό υπόλειμμα περιέχει σχεδόν καθαρό άνθρακα και τυχόν αδρανή υλικά που υπάρχουν στα στερεά απόβλητα.

Κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης, τα απορρίμματα βρίσκονται μέσα σε ατσάλινους αγωγούς και δεν έρχονται σε άμεση επαφή με φλόγα, καθιστώντας εφικτή την παραγωγή αερίων, χωρίς την άμεση αποτέφρωσή τους. Η πυρόλυση σε χαμηλές θερμοκρασίες παράγει υγρό καύσιμο. Με την μέθοδο αυτή το απόβλητο τεμαχίζεται σε διάσταση μικρότερη των 50 mm, κατόπιν γίνεται διαχωρισμός με αέρα του οργανικού κλάσματος και ξήρανση σε ξηραντήριο αέρα. Το οργανικό κλάσμα κοσκινίζεται, περνά από σφαιρόμυλο για περαιτέρω μείωση μεγέθους σε κάτω των 3 mm, και τέλος πυρολύεται σε αντιδραστήρα υπό ατμοσφαιρική πίεση. Το στερεό απόβλητο μετατρέπεται σε ιώδες υγρό στους 500°C.

Το στερεό υποπροϊόν που παράγεται (είδος τέφρας), είτε χρησιμοποιείται στην κάλυψη ΧΥΤΥ, είτε σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές ανάλογα με την σύνθεση και επεξεργασία του. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει αισθητά το στερεό υπόλειμμα, ελαττώνει το υγρό κλάσμα και αυξάνει τα αέρια προϊόντα.



Σχήμα 1.5: Ροή της διεργασίας της πυρόλυσης

Υπάρχουν δύο βασικές διαδικασίες πυρόλυσης, η ταχεία και η συμβατική. Στην πρώτη αυξάνεται η απόδοση των υγρών προϊόντων ενώ στη δεύτερη αυξάνεται η απόδοση των καυσαερίων, σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, χαμηλού ποσοστού

θέρμανσης και παρουσίας καταλύτη, ή του άνθρακα, σε χαμηλή θερμοκρασία και χαμηλό ποσοστό θέρμανσης.

Οι καταλύτες που μπορεί να χρησιμοποιηθούν χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, αυτούς που:

- προστίθενται απευθείας στην πρώτη ύλη (πρωτογενής καταλύτης)
- τοποθετούνται σε δευτερεύοντα αντιδραστήρα που βρίσκεται μετά τον αντιδραστήρα της πυρόλυσης
- τοποθετούνται στον αντιδραστήρα πυρόλυσης και έρχεται σε άμεση επαφή με τους εκλυόμενους ατμούς της πυρόλυσης και τα στερεά. [12]

Υπάρχουν πολλοί τύποι αντιδραστήρων που χρησιμοποιούνται όπως:

- ρευστοποιημένη κλίνη φυσαλίδων
- κλίνη με ανακυκλοφορία
- περιστρεφόμενου κώνου
- αφαιρετικής πυρόλυσης
- πυρόλυσης κενού
- σταθερής κλίνης [13]

Στην εγκατάσταση πυρόλυσης λαμβάνουν χώρα τα εξής:

- Ξήρανση των στερεών αποβλήτων(100-200°C)
- Αρχική διάσπαση ενώσεων, έναρξη διάσπασης του H₂S και του CO₂(250°C)
- Διάσπαση των συνδέσμων των αλειφατικών ενώσεων- Έναρξη του διαχωρισμού του CH₄ και άλλων αλειφατικών ενώσεων(340°C)
- Εμπλουτισμός του παραγόμενου υλικού σεC (380°C)
- Διάσπαση των δεσμών C-O και C-N (400°C)
- Μετατροπή των πισσασφαλτούχων υλικών σε καύσιμη ύλη και πίσσα(400 - 600°C)
- Σχάση των πισσασφαλτούχων υλικών σε υλικά ανθεκτικά στη θερμότητα- Δημιουργία αρωματικών ενώσεων(600°C)
- Παραγωγή αρωματικών ενώσεων, διαδικασίες αφυδρογόνωσης οργανικών, π.χ. βουταδιενίου, κ.λπ. (>600°C)

Τα ουσιώδη πλεονεκτήματα, συγκριτικά με την καύση, που αφορούν την τεχνική της πυρόλυσης είναι:

- ❖ Η θερμοκρασία διάσπασης είναι πολύ χαμηλότερη από τη θερμοκρασία καύσης, με ανάλογη πολύ μικρότερη θερμική καταπόνηση της όλης εγκατάστασης.
- ❖ Η διάσπαση γίνεται σε αναγωγική ατμόσφαιρα και όχι σε οξειδωτική, όπως η καύση. Η απαίτηση μικρότερης ποσότητας O_2 έχει παράλληλα σαν αποτέλεσμα την εκπομπή λιγότερων αέριων εκπομπών.
- ❖ Η περιεκτικότητα της τέφρας σε άνθρακα είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ό τι στην καύση.
- ❖ Τα μέταλλα που περιέχουν τα απορρίμματα δεν οξειδώνονται κατά την πυρόλυση και είναι πιο εύκολα εμπορεύσιμα.
- ❖ Το αέριο παράγεται σε άλλη εστία και ίσως σε άλλο χώρο από τον πυρολυτικό αντιδραστήρα.
- ❖ Από την καύση του αερίου της πυρόλυσης δεν παράγεται τέφρα και ο καθαρισμός των απαερίων είναι απλούστερος.
- ❖ Ο αρχικός όγκος των απορριμμάτων μειώνεται περισσότερο σε σύγκριση με την καύση.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της πυρόλυσης είναι:

- ❖ Το μεγαλύτερο πρόβλημα της μεθόδου είναι ότι απαιτείται τεμαχισμός και διαχωρισμός των απορριμμάτων πριν την πυρόλυση και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αρκετά υψηλό κόστος για την εγκατάσταση και τη λειτουργία μιας τέτοια μονάδας.
- ❖ Τα παράγωγα της πυρόλυσης έχουν αρκετά προβλήματα και σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να διατεθούν στο περιβάλλον όπως έχουν.
- ❖ Οι εγκαταστάσεις καθαρισμού των αερίων και των υγρών αποβλήτων απαιτούν υψηλό κόστος.
- ❖ Στο παρόν στάδιο, η εφαρμογή της μεθόδου σε ευρεία κλίμακα είναι περιορισμένη. Μεγαλύτερες προοπτικές εξέλιξης δείχνουν πάντως να έχουν οι αντιδραστήρες μέσης θερμοκρασίας με τη μορφή περιστροφικού τυμπάνου ή ρευστοποιημένης κλίνης.

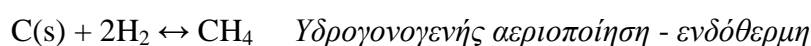
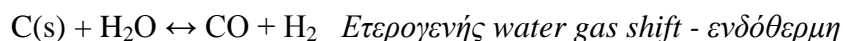
1.2.3 Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση είναι μια μέθοδος ατελούς καύσης των στερεών αποβλήτων. Ποικιλία διεργασιών λαμβάνουν χώρα, ενώ το αέριο σχηματίζεται σε θερμοκρασίες άνω των 800°C και είναι πλούσιο σε H₂, CH₄, H₂O, N₂, CO, CO₂ και μικρές ποσότητες υψηλών υδρογονανθράκων. Σκοπός της μεθόδου είναι η μέγιστη απελευθέρωση CO και H₂. Το μείγμα CO και H₂ είναι γνωστό σαν αέριο σύνθεσης (**synthesis gas ή syngas**).

Αποτελεί θεωρητικά το επόμενο στάδιο της πυρόλυσης. Στο στάδιο αυτό το υπολειμματικό κωκ οξειδώνεται σε θερμοκρασίες (>800°C). Ως μέσο αεριοποίησης χρησιμοποιείται ατμός, καθαρό O₂ ή αέρας. Ένα από τα πιο συνηθισμένα λάθη είναι η ταύτιση της πυρόλυσης με την αεριοποίηση των απορριμμάτων. Η βασική διαφορά κατά την εφαρμογή τους, συνοψίζεται ως εξής:

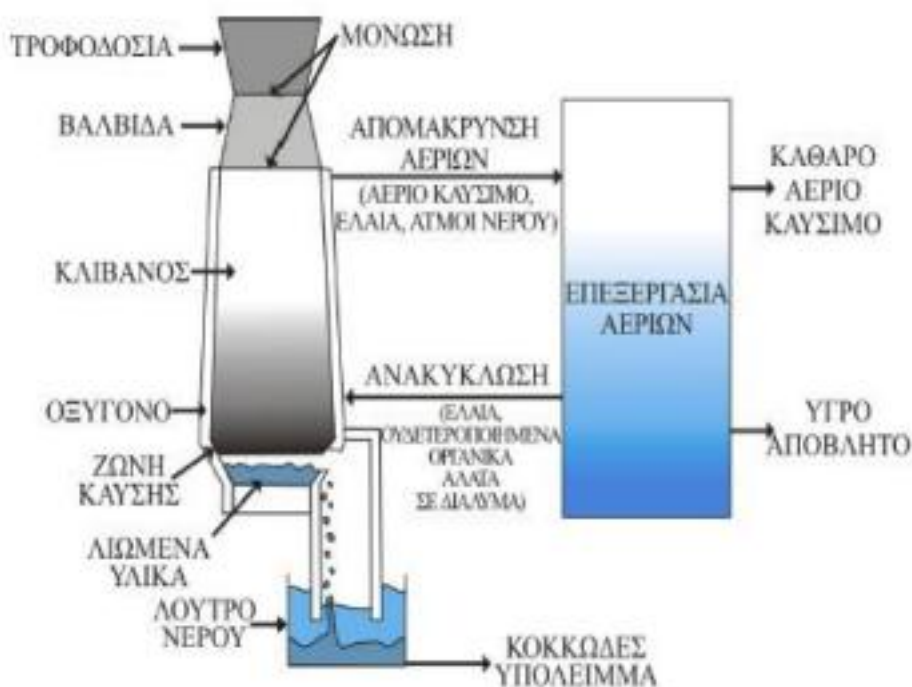
- Η πυρόλυση χρησιμοποιεί εξωτερική πηγή θερμότητας για να ενεργοποιηθούν οι ενδόθερμες αντιδράσεις θερμικής διάσπασης των απορριμμάτων, σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου.
- Η αεριοποίηση είναι αυτοσυντηρούμενη (χωρίς εξωτερική πηγή ενέργειας μετά το στάδιο της ανάφλεξης) και χρησιμοποιεί πρόσθετο καύσιμο αέριο, όπως για παράδειγμα ατμό, αέρα ή οξυγόνο, για την επιπλέον μετατροπή των οργανικών υπολειμμάτων σε αέρια προϊόντα. Η ενέργεια που απαιτείται για την αντίδραση αεριοποίησης παράγεται με καύση μέρους του οργανικού υλικού στον αντιδραστήρα αεριοποίησης . [7]

Οι κύριες αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διαδικασία της αεριοποίησης είναι [14] :



Η θερμότητα για τη διατήρηση της διεργασίας προέρχεται από τις εξώθερμες αντιδράσεις, ενώ τα καύσιμα προϊόντα παράγονται κυρίως μέσω των ενδόθερμων αντιδράσεων. Είναι πιθανό να λάβουν χώρα και άλλες αντιδράσεις κατά τις οποίες σε χαμηλές θερμοκρασίες με την προσθήκη H_2O σχηματίζεται CO_2 και σε υψηλότερες CO . Η ταχύτητα και η πορεία της αντίδρασης αεριοποίησης, καθώς επίσης και η σύσταση των παραγόμενων προϊόντων εξαρτώνται από το μέγεθος, τη διάμετρο των πόρων και την εσωτερική δομή της καύσιμης ύλης, την περιεχόμενη υγρασία, την επιφάνεια επαφής στερεών –αερίων, την αναπτυσσόμενη πίεση και θερμοκρασία και τον χρόνο παραμονής των ΑΣΑ εντός του αντιδραστήρα.

Κατά την διαδικασία της αεριοποίησης γίνεται διαλογή των αποβλήτων και απομακρύνονται αυτά που δεν μπορούν να υποστούν αεριοποίηση. Αποθηκεύονται σε δοχεία και παρέχονται με σταθερό ρυθμό στον αεριοποιητή. Καθώς τα απόβλητα εισέρχονται στον αεριοποιητή, περνάνε διαδοχικά από τα στάδια της ξήρανσης, πυρόλυσης, αεριοποίησης. Ο αέρας καύσης εισάγεται στη βάση του σωρού των καυσίμων. Τα απόβλητα μετατρέπονται σε μη εύφλεκτη τέφρα, η οποία εναποτίθεται στη σχάρα που βρίσκεται στη βάση του αεριοποιητή, από όπου απομακρύνεται κατά διαστήματα διαμέσου ανοιγμάτων. Τα ανοίγματα συνήθως καλύπτονται από μία περιστρεφόμενη πλάκα η οποία, υδραυλικά, ευθυγραμμίζεται με τα ανοίγματα. Στο παρακάτω σχήμα περιγράφεται η ροή της διεργασίας της αεριοποίησης.



Σχήμα 1.6: Ροή της διεργασίας της πυρόλυσης

Τρία είναι τα βασικά είδη αεριοποιητών που χρησιμοποιούνται, κατηγοριοποιημένοι ως προς το πως ο αντιδραστήρας έρχεται σε επαφή με τον άνθρακα και το αντιδρών αέριο. Οι κατατάξεις για αυτό το διαχωρισμό είναι σταθερής / κινούμενης κλίνης, ρευστοποιημένης κλίνης και εισερχόμενης ροής. [15]

Στους αεριοποιητές **κινούμενης κλίνης**, οι οποίοι λειτουργούν με αντιρροή, το ανθρακούχο υλικό εισάγεται από την κορυφή της κλίνης και ο αέρας ή το οξυγόνο από την βάση. Καθώς ο άνθρακας κινείται σιγά προς τα κάτω, αεριοποιείται και η εναπομένουσα στάχτη πέφτει στον πυθμένα. Λόγω της διάταξης αντιρροής, η θερμότητα της αντίδρασης από την αεριοποίηση χρησιμεύει στην προθέρμανση του ανθρακούχου υλικού πριν αυτό μπει στη ζώνη αντίδρασης της αεριοποίησης. Συνεπώς, η θερμοκρασία του παραγόμενου αερίου στην έξοδο είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή που χρειάζεται για την ολική μετατροπή του άνθρακα.

Ο αεριοποιητής **σταθερής κλίνης** χωρίζεται:

- Σε **αεριοποιητή ανοδικού ρεύματος σταθερής κλίνης (up draft fixed bed gasifier)**, ο οποίος αποτελείται από μία στερεά κλίνη που περιέχει το ανθρακούχο υλικό προς επεξεργασία, διαμέσου του οποίου με ανοδική ροή περνά το αντιδραστήριο αεριοποίησης που συνήθως είναι ατμός, οξυγόνο και/η αέρας. Το προς επεξεργασία υλικό θα πρέπει να έχει μικρή απομείωση και να μην σχηματίζει συσσωματώματα για να μην βουλώσει η στήλη του αεριοποιητή. Το σύστημα λειτουργεί θερμικά αυτόνομα και η θερμοκρασία του παραγόμενου αερίου στην έξοδο του αεριοποιητή είναι χαμηλή. Η απόδοση του συγκεκριμένου τύπου αεριοποιητή είναι σχετικά μικρή. Το παραγόμενο αέριο περιέχει σημαντικά ποσά μεθανίου και πίσσας στις συνήθεις θερμοκρασίες λειτουργίας και θα πρέπει να καθαριστεί πριν χρησιμοποιηθεί.

- Σε **αεριοποιητή καθοδικού ρεύματος**, ο οποίος λειτουργεί όπως ο παραπάνω τύπος αλλά με καθοδική ροή του αντιδραστήριου αεριοποίησης (**down draft fixed bed gasifier**). Στην περίπτωση αυτή απαιτείται προσθήκη θερμότητας στο πάνω μέρος της κλίνης η οποία τις περισσότερες φορές λαμβάνεται με καύση μέρους του υλικού επεξεργασίας. Το παραγόμενο αέριο έχει υψηλή θερμοκρασία και το μεγαλύτερο μέρος αυτής μεταφέρεται στην τροφοδοτούμενη στερεά φάση στην κορυφή του αεριοποιητή βοηθώντας στην θερμική αυτονομία της λειτουργίας του.

Επειδή όλες οι παραγόμενες πίστες περνούν από μια ζεστή κλίση, τα επίπεδα συγκέντρωσής τους είναι χαμηλότερα συγκριτικά με τον προηγούμενο τύπο αεριοποιητή.

Ο δεύτερος τύπος αεριοποιητή είναι αυτός της **ρευστοποιημένης κλίσης**. Η απόδοση του συγκεκριμένου τύπου αεριοποιητή είναι υψηλότερη από εκείνη των δύο παραπάνω τύπων, θέτει όμως όρια στο μέγεθος των προς επεξεργασία σωματιδίων. [16] Τέτοιοι αεριοποιητές χρησιμοποιούνται για επεξεργασία υλικών που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις διαβρωτικών υλικών κα βαρέων μετάλλων οι οποίες στις προηγούμενες περιπτώσεις θα κατέστρεφαν τα τοιχώματα της στερεάς κλίσης όπως οι διάφοροι τύποι βιομάζας.

Ο τελευταίος τύπος είναι ο **αεριοποιητής παρασυρόμενης ροής (entrained flow gasifier)**. Στερεά που αποτελούνται από λεπτόκοκκο υλικό ή που μπορούν να αλεστούν πριν την εισαγωγή τους στο σύστημα είναι ιδανικά για επεξεργασία με τον τύπο αυτό του αεριοποιητή στον οποίο χρησιμοποιείται σαν αντιδραστήριο αεριοποίησης το οξυγόνο και σπάνια ο αέρας. Οι αντιδράσεις αεριοποίησης πραγματοποιούνται σε ένα πυκνό σύννεφο λεπτόκοκκων σωματιδίων. Η θερμοκρασία και η πίεση λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου αεριοποιητή είναι υψηλότερη των άλλων τύπων με ενεργειακό κόστος βέβαια αλλά με πλεονέκτημα την απουσία της πίστες και του μεθανίου από το παραγόμενο αέριο.

Τα τελικά προϊόντα της αεριοποίησης είναι [17]:

- ❖ Αέριο πλούσιο σε μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και κορεσμένους υδρογονάνθρακες (κυρίως μεθάνιο), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο.
- ❖ Στερεό υπόλειμμα, που αποτελείται από άνθρακα και αδρανή.
- ❖ Συμπυκνωμένο υγρό υπόλειμμα, που παρουσιάζει σύσταση παρόμοια σε αυτή του υγρού κλάσματος, που παράγεται κατά την πυρόλυση.

Το παραγόμενο αέριο μπορεί να αξιοποιηθεί κατά διάφορους τρόπους, όπως [18,19,20,21,22]:

✓ Καύση για παραγωγή ατμού. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζεται, έναντι της αποτέφρωσης, είναι ότι τα αέρια καθαρίζονται πριν την καύση, προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα λειτουργίας του ατμολέβητα σε υψηλότερες πιέσεις και του υπερθερμαντήρα του ατμού σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ώστε να επιτυγχάνονται και βελτιωμένες αποδόσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, που μπορούν να πλησιάσουν το 30%.

✓ Τροφοδοσία μηχανής εσωτερικής καύσης που κινεί ηλεκτρογεννήτρια. Η απόδοση σε ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να ξεπεράσει το 40%, αλλά προϋποθέτει πολύ καλό καθαρισμό των αερίων πριν την τροφοδοσία της μηχανής.

✓ Κίνηση αεριοστρόβιλου και ατμοπαραγωγή σε συνδυασμένο κύκλο. Και η μέθοδος αυτή, που προϋποθέτει επίσης πολύ καλό καθαρισμό των αερίων πριν την τροφοδοσία, μπορεί να οδηγήσει σε αποδόσεις της τάξης του 40% σε ηλεκτρική ενέργεια.

✓ Διοχέτευση στο δίκτυο αερίου πόλης. Ο καλός καθαρισμός και η σταθερή ποιότητα αποτελούν απαραίτητες προϋποθέσεις για την αξιοποίηση του αερίου με αυτόν τον τρόπο.

✓ Παροχή του αερίου σε βιομηχανία, όπως τσιμεντοβιομηχανία για απ' ευθείας καύση σε εστία. Στην περίπτωση αυτή μειώνονται σε σημαντικό βαθμό οι απαιτήσεις καθαρισμού.

✓ Παροχή του αερίου σε βιομηχανία όπου χρησιμοποιείται για ατμοπαραγωγή. Οι απαιτήσεις καθαρισμού είναι συνάρτηση των συνθηκών λειτουργίας του ατμολέβητα.

Η αεριοποίηση, λόγω της χρήσης μηδενικών ή έστω ελάχιστων ποσοτήτων οξυγόνου αέρα, παράγει μικρότερες ποσότητες απαερίων, σημαντικό, όμως, είναι το γεγονός ότι ένας μεγάλος αριθμός ρύπων (π.χ. θείο, βαρέα μέταλλα, κα.) παραμένει στην παραγόμενη τέφρα, χωρίς να μεταφέρεται στην αέρια φάση και να επιβαρύνει την ποιότητα της ατμόσφαιρας. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι το παραγόμενο αέριο χρησιμοποιείται περαιτέρω ως καύσιμο, πολλές φορές περιορίζει τον αριθμό και το είδος των αναγκαίων τεχνολογιών αντιρρύπανσης.



Εικόνα 1.1: Μονάδα αεριοποίησης ΑΣΑ στη Chiba (Ιαπωνία)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή της τεχνολογίας πλάσματος, που τα τελευταία χρόνια έχει γνωρίσει ιδιαίτερη ανάπτυξη, στην επεξεργασία αποβλήτων. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται εκτενής ανάλυση της διεργασίας της αεριοποίησης πλάσματος, μιας τεχνολογικά προηγμένης και περιβαλλοντικά φιλικής διεργασίας επεξεργασίας αποβλήτων, η οποία προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά και ενεργειακά πλεονεκτήματα.

1.3 Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η προσομοίωση της διεργασίας αεριοποίησης πλάσματος κάνοντας χρήση του υπολογιστικού προγράμματος ASPEN, λαμβάνοντας υπόψη τις λειτουργικές παραμέτρους - θερμοκρασία, υγρασία αποβλήτου-παροχή αέρα - που την καθορίζουν. Παράλληλα για την επικύρωση της προσομοίωσης στο Aspen έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων αεριοποίησης με το θερμοδυναμικό μοντέλο Gasifeq, το οποίο αναπτύχθηκε προγενέστερα στο εργαστήριο Θερμοδυναμικής της Σχολής Χημικών Μηχανικών υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση του Αναπληρωτή Καθηγητή του ΕΜΠ, κ. Βουτσά Επαμεινώνδα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2 ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

2.1 Γενικά

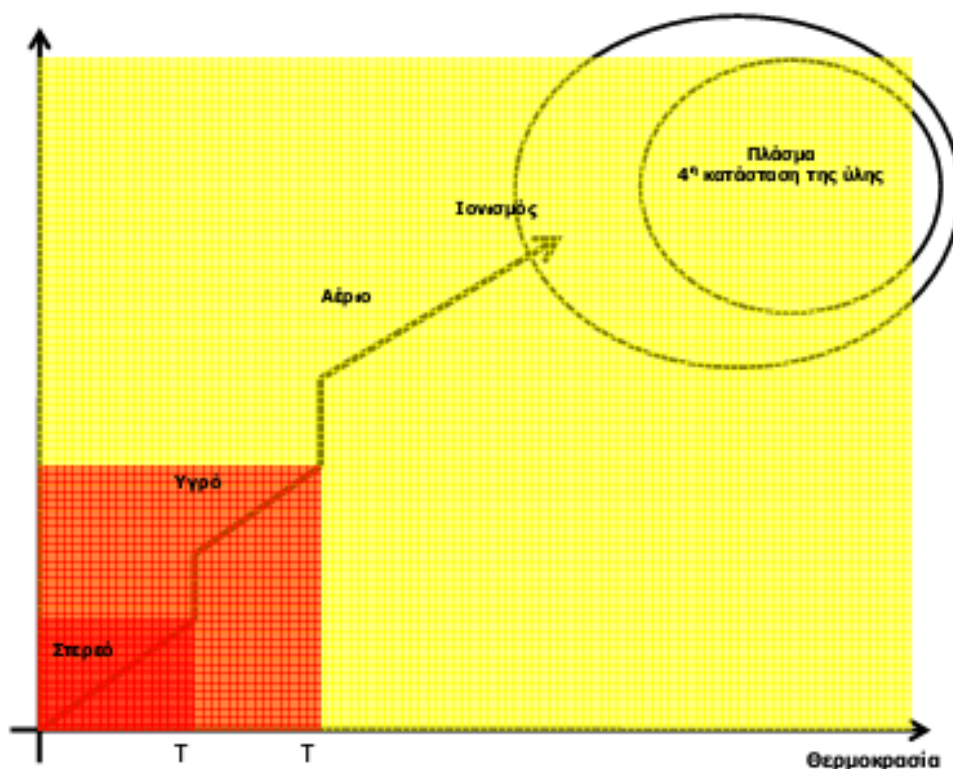
Το πλάσμα αναφέρεται ως η τέταρτη φάση της ύλης και δημιουργείται, συνήθως, με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε δύο αντίθετα φορτισμένους πόλους-ηλεκτρόδια. Τα μόρια του αερίου μέσου μεταξύ των πόλων διασπώνται σε ελεύθερα άτομα και αυτά σε αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια και θετικά φορτισμένα ιόντα, ως αποτέλεσμα των πολύ υψηλών θερμοκρασιών ($>10.000^{\circ}\text{C}$) που αναπτύσσονται. Η κατάσταση αυτή του θερμού ιονισμένου αερίου ονομάζεται πλάσμα.

Με την **αεριοποίηση του πλάσματος** γίνεται επεξεργασία των στερεών αποβλήτων προς παραγωγή αερίου σύνθεσης (καύσιμο αέριο) και αδρανούς υαλώδους στερεού υπολείμματος. Το πρώτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μηχανές αερίου για ενεργειακή εκμετάλλευση και το δεύτερο, έχοντας σημαντικά πολύ μικρότερο όγκο από τον αρχικό, είτε χρησιμοποιείται ως οικοδομικό υλικό επικάλυψης είτε εναποτίθεται σε ΧΥΤΑ. Η τεχνολογία αυτή είναι κατάλληλη για την επεξεργασία μιας μεγάλης ποικιλίας αποβλήτων που έχουν υψηλό ποσοστό ανόργανων συστατικών και χαμηλή θερμιδική αξία, γεγονός που οφείλεται στο ότι ένα μεγάλο ποσοστό της απαιτούμενης θερμότητας δίνεται από το πλάσμα και όχι από την οξείδωση των αποβλήτων. [23]

2.2 Η φάση του πλάσματος

Ο Άγγλος φυσικός Sir William Crookes προσδιόρισε το 1879 μια τέταρτη κατάσταση της ύλης, γνωστή σήμερα ως πλάσμα. Το 1928 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τους Langmuir και Tonks για την απόδοση του ιονισμένου αερίου που περιέχεται μέσα σε ένα σωλήνα ηλεκτρικής εκκένωσης. Το πλάσμα αναπτύχθηκε γρήγορα λόγω των σημαντικών λύσεων που προσφέρει σε ποικίλες εφαρμογές. Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη δημιουργεί δομή, όπως σταθερά άτομα, μόρια και κρυσταλλικές δομές. Όλες οι δομές έχουν ενέργειες δεσμών μεγαλύτερες από τη θερμική ενέργεια και όταν τοποθετούνται σε υψηλές θερμοκρασίες αποσυντίθενται. Το ίδιο συμβαίνει και όταν η θερμοκρασία ξεπερνά τις ατομικές

ενέργειες ιονισμού, οπότε δημιουργούνται θετικά φορτισμένα ιόντα και αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια που αλληλεπιδρούν έντονα μεταξύ τους, κάνοντας κινήσεις μεγάλου σθένους και πολυπλοκότητας. Μια τέτοια κατάσταση λέγεται πλάσμα.[24]



Σχήμα 2.1: Πλάσμα(4^η κατάσταση της ύλης).

Το πλάσμα περιέχει σημαντικά περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τα αέρια ή τα υγρά αφού απαιτείται 10 φορές περισσότερη ενέργεια για την αλλαγή φάσης από αέριο σε πλάσμα απ' όσο απαιτείται για την αλλαγή από υγρό σε αέριο ή από στερεό σε υγρό.

Οι μορφές πλάσματος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση:

- ❖ τον τύπο της ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του πλάσματος: ηλεκτρικό ρεύμα, ραδιοσυχνότητες και μικροκύματα
- ❖ την πίεση λειτουργίας: υπό κενό, δηλαδή πίεσης μικρότερης των 10 mTorr, μέσης πίεσης, δηλαδή 1 Torr και ατμοσφαιρικής πίεσης, δηλαδή 760 Torr
- ❖ το βαθμό ιονισμού του πλάσματος: πλήρως ιονισμένο πλάσμα, μερικώς ιονισμένο πλάσμα και ελάχιστα ιονισμένο πλάσμα.

- ❖ τις θερμοκρασιακές σχέσεις μέσα στο πλάσμα: θερμικό πλάσμα, μη θερμικό πλάσμα ή ψυχρό πλάσμα.
- ❖ το υλικό παρασκευής του ηλεκτροδίου που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του πλάσματος.
- ❖ το βαθμό μαγνητοποίησης των σωματιδίων του πλάσματος: μαγνητισμένο πλάσμα, μερικώς μαγνητισμένο πλάσμα και μη μαγνητισμένο πλάσμα.
- ❖ τις εφαρμογές του

Η πιο ευρέως διαδεδομένη μορφή είναι το θερμικό και το μη θερμικό πλάσμα. Το θερμικό πλάσμα μπορεί να χαρακτηρίζεται από την κατά προσέγγιση ισότητα των θερμοκρασιών μεταξύ βαρέων σωματιδίων και ηλεκτρονίων και παρουσιάζει πολυάριθμα πλεονεκτήματα συμπεριλαμβανομένων υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πυκνότητα ενέργειας. Το θερμικό πλάσμα που έχει δημιουργηθεί με ηλεκτρισμό μπορεί να φθάσει σε θερμοκρασία ~ 10.000 °C ή περισσότερο, την στιγμή που μόνο το ανώτερο όριο των 2.000 °C μπορεί να επιτευχθεί από την καύση των ορυκτών καυσίμων. Για το λόγο αυτό, το θερμικό πλάσμα έχει χρησιμοποιηθεί κατά παράδοση σε διεργασίες με υψηλή θερμοκρασία και μεγάλη ενθαλπία. [14]

Η τεχνολογία του θερμικού πλάσματος έχει εφαρμοστεί σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, όπως κοπή, συγκόλληση, ψεκασμός, μεταλλουργία, φασματοσκοπία μάζας, σύνθεση νανοσωματιδίων, σφαιριοποίηση σκόνης και επεξεργασία αποβλήτων. Κατά την τελευταία δεκαετία, η τεχνολογία αυτή έχει θεωρηθεί ως μια βιώσιμη εναλλακτική λύση για την αντιμετώπιση εξαιρετικά τοξικών αποβλήτων, όπως υπολειμμάτων αέριων ρύπων ελέγχου (APC), ραδιενεργών, και ιατρικών αποβλήτων. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι η διαδικασία αυτή είναι φιλική προς το περιβάλλον, καθώς παράγεται αδρανής ύλη και ελάχιστοι ατμοσφαιρικοί ρύποι που είναι μέσα στα όρια των τοπικών κανονισμών. Η τεχνολογία θερμικού πλάσματος χρησιμοποιεί εξαιρετικά υψηλή με την απουσία ή σχεδόν απουσία O₂ για την επεξεργασία ΑΣΑ που περιέχουν οργανικά και άλλα υλικά. Τα ΑΣΑ διασπώνται στα χημικά συστατικά τους, « μεταμορφώνονται» σε άλλα υλικά μερικά από τα οποία είναι πολύτιμα προϊόντα. Τα οργανικά συστατικά μετατρέπονται σε αέριο σύνθεσης, που αποτελείται κυρίως από H₂ και CO και τα ανόργανα συστατικά υαλοποιούνται σε αδρανή υλικό. [14]

2.3 Εφαρμογές της τεχνολογίας του πλάσματος

Οι εφαρμογές της τεχνολογίας πλάσματος ποικίλουν και περιλαμβάνουν [25,26,27]:

- Δύναμη Τήξης (Fusion Power)
- Ενέργεια μαγνητικής τήξης(MFE) — tokamak, stellarator, μαγνητικός καθρέφτης, πυκνή εστίαση πλάσματος
- Αδρανής ενέργεια τήξης (IFE) (επίσης αδρανής τήξη ICF)
- Εξοπλισμός βασισμένος στο πλάσμα
- Επεξεργασία τροφίμων (μη θερμικό πλάσμα)
- Τόξο πλάσματος που μετατρέπει τα απόβλητα σε επαναχρησιμοποιήσιμο υλικό και παράγει ενέργεια.
- Μικροκύματα πλάσματος (microwave plasma) ως εναλλακτική λύση των καυσίμων πετρελαίου ή αερίου για την ανάφλεξη και τη σταθεροποίηση της καύσης λιθάνθρακα σε μονάδες παραγωγής ενέργειας.

2.4 Χαρακτηριστικά της διεργασίας θερμικού πλάσματος για την διαχείριση στερεών αποβλήτων

Η διεργασία θερμικού πλάσματος έχει λάβει τα τελευταία χρόνια μεγάλη προσοχή για την κάλυψη των σύγχρονων αναγκών στη διαχείριση αποβλήτων, δίνοντας λύση στα προβλήματα αύξησης της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Σε σύγκριση με τις συνήθως χρησιμοποιούμενες μεθόδους καύσης για την επεξεργασία αποβλήτων, το θερμικό πλάσμα παρέχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- (1) υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και θερμοκρασία, και οι γρήγοροι χρόνοι αντίδρασης προσφέρουν τη δυνατότητα για μεγάλη απόδοση
- (2) υψηλές πυκνότητες θερμικής ροής στα όρια του κλιβάνου οδηγούν στη γρήγορη επίτευξη συνθηκών σταθερής κατάστασης. Αυτό επιτρέπει την ταχεία εκκίνηση και τερματισμό σε σύγκριση με άλλες θερμικές επεξεργασίες, όπως η αποτέφρωση.
- (3) Μόνο ένα μικρό ποσό του οξειδωτικού χρειάζεται να δημιουργηθούν τα αέρια σύνθεσης, ως εκ τούτου, ο όγκος του αερίου που παράγεται είναι πολύ μικρότερος

από ό, τι στις συμβατικές διεργασίες καύσης και έτσι είναι ευκολότερο και λιγότερο δαπανηρό να διαχειριστεί.

Τα χαρακτηριστικά αυτά κάνουν τη θερμική διεργασία πλάσματος μια ιδανική εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών μεθόδων επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων.[14]

Πέντε είναι οι διακριτοί τύποι διεργασιών με πλάσμα που προωθούνται για την επεξεργασία αποβλήτων:

- Πυρόλυση με την τεχνική του πλάσματος
- Καύση– Αποτέφρωση με την τεχνική του πλάσματος(επίσης ονομάζεται και αποτέφρωση πλάσματος ή οξείδωση πλάσματος)
- Υαλοποίηση με την τεχνική του πλάσματος
- Αεριοποίηση με την τεχνική του πλάσματος (με δύο διακριτά διαφορετικούς τρόπους)
- Ο καθαρισμός με χρήση πλάσματος (χρήση πλάσματος για καθαρισμό απαερίων).

Οι κύριες διαφορές μεταξύ αυτών των μεθόδων παρουσιάζονται στην αναλογία αέρα που χρησιμοποιείται κατά την επεξεργασία των αποβλήτων και στη φύση των εξερχόμενων προϊόντων. Εμπορικές διεργασίες μπορούν να σχεδιασθούν ούτως, ώστε δύο ή ακόμη και τρεις από τις ανωτέρω τεχνολογίες να μπορούν να συνδυαστούν σε ένα μόνο σύστημα λειτουργίας. [28] Το θέμα της παρούσας εργασίας επικεντρώνεται στη διεργασία της αεριοποίησης με την τεχνική του πλάσματος, η οποία αναλύεται εκτενώς στις επόμενες παραγράφους.

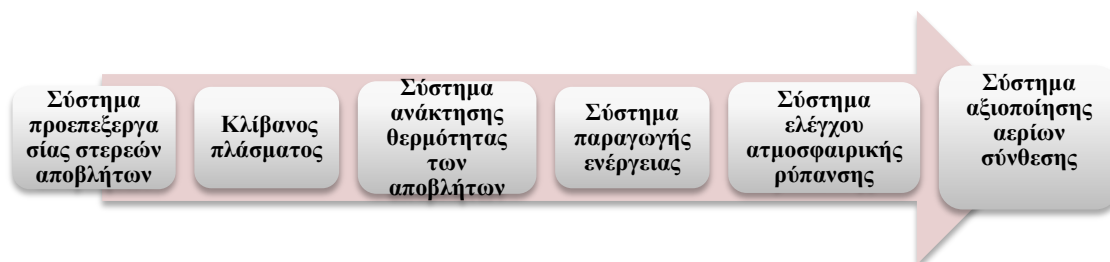
2.5 Αεριοποίηση πλάσματος

Η αεριοποίηση πλάσματος έχει στόχο την επεξεργασία στερεών απορριμμάτων προς παραγωγή καύσιμου αερίου γνωστού ως αέριο σύνθεσης και αδρανούς υαλώδους στερεού υπολείμματος. Το καύσιμο αέριο μπορεί να γίνει ενεργειακά εκμεταλλεύσιμο σε μηχανές αερίου ή άλλο ενεργειακό σύστημα ενώ το υαλώδες υπόλειμμα, το οποίο έχει υποπολλαπλάσιο όγκο από το αρχικό σκουπίδι, μπορεί είτε να εναποτεθεί σε

ΧΥΤΑ είτε ακόμα να χρησιμοποιηθεί ως φθινό οικοδομικό υλικό. Από τα παραπάνω φαίνεται ο διπλός ρόλος που έχει ο αντιδραστήρας πλάσματος: Από τη μία, το οργανικό μέρος της τροφοδοσίας συμμετέχει σε ενδόθερμες αντιδράσεις αεριοποίησης προς παραγωγή του καύσιμου αερίου και από την άλλη το ανόργανο μέρος τήκεται και υαλοποιείται. Τόσο η αεριοποίηση όσο και η υαλοποίηση απαιτούν ενέργεια για να πραγματοποιηθούν. Η ενέργεια αυτή παρέχεται με τη μορφή ηλεκτρισμού μέσω των πυρσών πλάσματος. Από τους πυρσούς διέρχεται αέριο μέσο, όπως ο ατμοσφαιρικός αέρας ή το καθαρό οξυγόνο. Λόγω των ηλεκτρικών εκκενώσεων που οφείλονται στη διαφορά δυναμικού ανόδου – καθόδου του πυρσού, το αέριο ιονίζεται και γίνεται πλάσμα σε θερμοκρασίες που τοπικά μέσα στον πυρσό υπερβαίνουν τους 7000 °C. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας που μπορούν να επιτευχθούν συμβάλλουν θετικά στην όλη διεργασία τόσο περιβαλλοντικά όσο και ενεργειακά. Εκτός από το αέριο μέσο που εισέρχεται με τη μορφή πλάσματος στον αντιδραστήρα, η αεριοποίηση απαιτεί και νερό, το οποίο εισέρχεται ως υγρασία του απορρίμματος. Η τιμή της υγρασίας ρυθμίζεται στα επιθυμητά επίπεδα από ξηραντήρα άμεσης επαφής, ο οποίος λειτουργεί εκμεταλλευόμενος την αισθητή θερμότητα του εξερχόμενου από τον αντιδραστήρα θερμού αερίου σύνθεσης. Συνοψίζοντας τα παραπάνω προκύπτει ότι οι μαζικές ροές εισόδου στον αντιδραστήρα είναι τρεις: απορρίμματα, αέρας και υγρασία ενώ υπάρχει μία ενεργειακή ροή εισόδου, αυτή της ηλεκτρικής ενέργειας που προσδίνεται μέσω των πυρσών. Επιπλέον υπάρχουν και δυο μαζικές ροές εξόδου: το αέριο σύνθεσης και το υαλώδες υλικό.

Το αέριο σύνθεσης που παράγεται στον αντιδραστήρα διέρχεται από σειρά συστημάτων καθαρισμού για την απομάκρυνση στερεών σωματιδίων και όξινων αερίων και έπειτα μεταβαίνει στα συστήματα ανάκτησης ενέργειας όπου και καίγεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλό κύκλο ατμού, συνδυασμένο κύκλο και μηχανές εσωτερικής καύσης. Η θερμογόνο δύναμη του αερίου σύνθεσης είναι ιδιαίτερα χαμηλή (περίπου το ένα τρίτο αυτής του φυσικού αερίου) και για αυτό απαιτούνται εξειδικευμένες μηχανές για την καύση του. Στα συστήματα συνδυασμένου κύκλου χρησιμοποιείται και το θερμικό περιεχόμενο των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου για την παραγωγή ατμού και χρήση του σε αμοστρόβιλο. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται σημαντικά η ενεργειακή απόδοση της διεργασίας.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα διαδοχικά συστήματα ελέγχου της διεργασίας, καθώς και τα συστήματα ασφαλείας [14]:



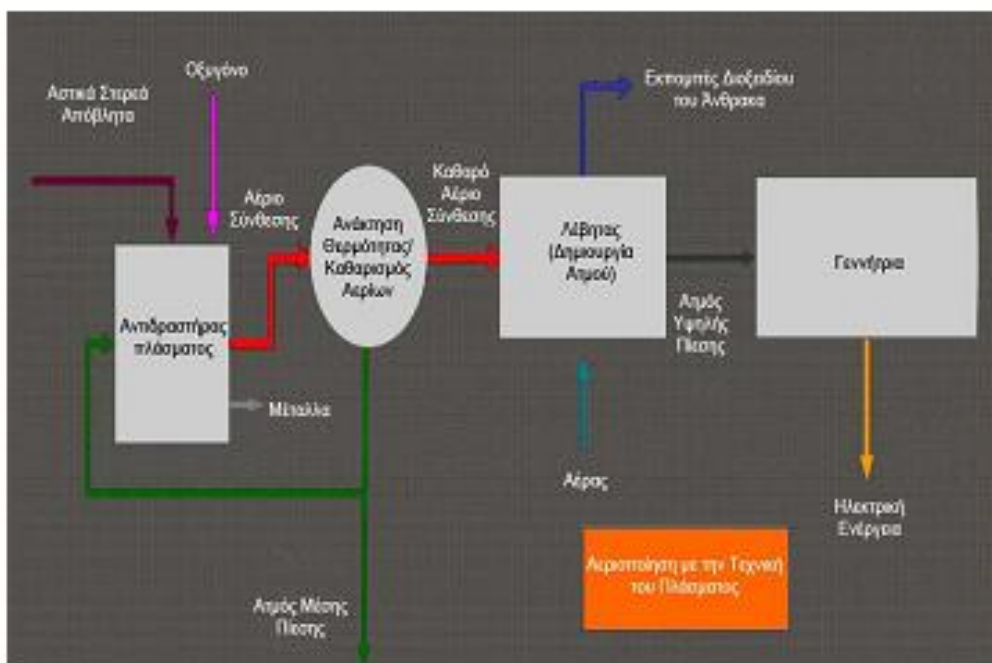
Σχήμα 2.2: Τεχνολογίες εργοστασίου αεριοποίησης θερμικού πλάσματος για την επεξεργασία των στερεών αποβλήτων.

2.5.1. Διάγραμμα ροής

Κατά τη διάρκεια της διεργασίας πραγματοποιούνται τα εξής στάδια [36]:

1. Έναρξη: Αρχικά το σύστημα θερμαίνεται θέτοντας σε λειτουργία τη συσκευή φλόγας πλάσματος (πρωτογενής θάλαμος). Παράλληλα, θερμαίνεται ο δευτερογενής θάλαμος καύσης από καυστήρα αερίων. Η διαδικασία της έναρξης μπορεί να διαρκέσει αρκετές ώρες.
2. Τροφοδοσία αποβλήτων: Ο βέλτιστος ρυθμός τροφοδοσίας των αποβλήτων διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο και τις ποσότητες των αποβλήτων. Η μονάδα πλάσματος συνήθως είναι εξοπλισμένη με τεμαχιστή, σε περίπτωση που λόγω του μεγέθους των εισερχόμενων αποβλήτων απαιτείται στάδιο μείωσης του μεγέθους τους.
3. Πρωτογενής θάλαμος αεριοποίησης: Πραγματοποιείται η δημιουργία αερίου σε μορφή πλάσματος και με τον τρόπο αυτόν επίτευξη των κατάλληλων θερμοκρασιών και δραστικών συνθηκών, που ενεργοποιούν τις διαδικασίες μετατροπής των στερεών αποβλήτων σε αέρια προϊόντα και ανόργανο τηγμένο υλικό.
4. Άντληση του υπολείμματος: Το τηγμένο υπόλειμμα απομακρύνεται με συχνότητα η οποία εξαρτάται από την ποσότητα των ανόργανων συστατικών που περιέχονται στα προς επεξεργασία απόβλητα. Στη συνέχεια, ψύχεται και μετατρέπεται σε αδρανοποιημένο υαλώδους μορφής υλικό.

5. Δευτερογενής θάλαμος καύσης: Στο θάλαμο αυτό, που λειτουργεί με βοηθητικό καύσιμο, πραγματοποιείται η καύση των οργανικών ενώσεων που παράγονται στον κλίβανο αεριοποίησης.
6. Σύστημα καθαρισμού αερίων καύσης και κατακράτησης σωματιδίων: Χρησιμοποιείται σύστημα διαβροχής νερού για τη μείωση της θερμοκρασίας των αερίων που εγκαταλείπουν το δευτερογενή θάλαμο καύσης. Η ροή του νερού εξαρτάται από την επιθυμητή θερμοκρασία που πρέπει να έχουν τα απαέρια, καθώς οδηγούνται προς συστήματα καθαρισμού (σακόφιλτρο και σύστημα υγρού καθαρισμού). Στο σακόφιλτρο κατακρατούνται τα λεπτόκοκκα σωματίδια, ενώ στο σύστημα υγρού καθαρισμού απαερίων (scrubber) απομακρύνονται συστατικά, όπως NO_x και SO_2 , χλωριούχα και φθοριούχα συστατικά, κ.λπ. με τη χρήση χημικών, π.χ. διαλύματος NaOH .
7. Σύστημα ψύξης: Προκειμένου να διατηρούνται οι θερμοκρασίες λειτουργίας του συστήματος παραγωγής πλάσματος σε επιθυμητές τιμές και να αποφεύγεται η διάβρωση των χρησιμοποιούμενων ηλεκτροδίων (η κάθοδος είναι συχνά κατασκευασμένη από βολφράμιο, μολυβδαίνιο, γραφίτη, χαλκό ή κράματά του, ενώ η άνοδος από χαλκό ή γραφίτη) απαιτείται η ύπαρξη συστήματος ψύξης, με χρήση νερού.



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα ροής αεριοποίησης πλάσματος

2.5.2. Αντιδραστήρας αεριοποίησης

Σε πραγματική κλίμακα έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται δύο βασικές κατηγορίες αντιδραστήρων: οι **αντιδραστήρες κινούμενης κλίνης (moving bed reactor)** και οι **αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed reactor)**. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται στην αεριοποίηση λιγνίτη και αντιδραστήρες γνωστοί στην ξένη βιβλιογραφία ως entrained flow reactors. Οι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης δεν προσφέρονται στην αεριοποίηση πλάσματος επειδή το πηκτό τηγμένο υλικό δεν επιτρέπει τη διέλευση επαρκούς ποσότητας αέρα εμποδίζοντας έτσι τη ρευστοποίηση της κλίνης απορριμμάτων. Ο πιο χρησιμοποιημένος τύπος αντιδραστήρας είναι αυτός της *κινούμενης κλίνης*, που αναλύονται παρακάτω.

Αντιδραστήρες κινούμενης κλίνης

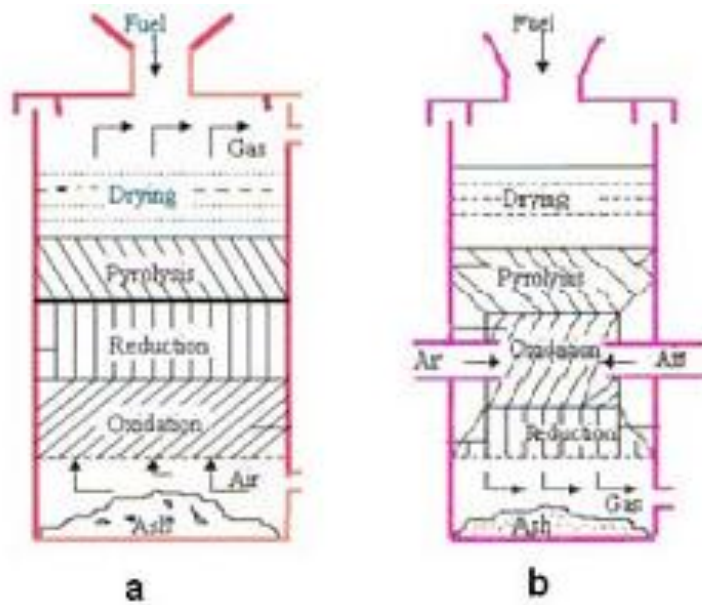
Οι αντιδραστήρες κινούμενης κλίνης είναι οι πρώτοι που χρησιμοποιήθηκαν στην αεριοποίηση. Μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες κοντά στους 1000 °C ή και υψηλότερες, ενώ αναλόγως με τον τρόπο εισαγωγής του αερίου μέσου αεριοποίησης χωρίζονται στους αντιδραστήρες αντιρροής (updraft) και ομορροής (downdraft). Εκτός από αυτούς τους δύο τύπους έχουν αναπτυχθεί και αντιδραστήρες όπου τροφοδοσία και αέρας εισέρχονται κατά αντιρροή από τα πλευρικά τοιχώματα του δοχείου. [30]

Και στις δύο υποκατηγορίες αντιδραστήρων τα στερεά απορρίμματα εισέρχονται συνεχώς από την κορυφή, κατέρχονται λόγω βαρύτητας και καταναλώνονται κατά την κάθοδο τους στον αντιδραστήρα. Τα οργανικά συστατικά καταναλώνονται προς αέρια προϊόντα τα οποία κινούνται προς την κορυφή του αντιδραστήρα ενώ τα ανόργανα τήκονται και εγκαταλείπουν το θάλαμο αντίδρασης κινούμενα προς τα κάτω σε θάλαμο ψύξης και υαλοποίησης. Έτσι συνεχώς καταναλώνεται ένα στρώμα υλικού και αναπληρώνεται από το αμέσως επάνω λόγω της επίδρασης της βαρύτητας.

Στους αντιδραστήρες αντιρροής, το μέσο αεριοποίησης εισέρχεται από τον πάτο και διαμορφώνονται έτσι «ζώνες διεργασιών». Πιο συγκεκριμένα, στον πάτο του αντιδραστήρα, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης σε οξυγόνο και των υψηλών θερμοκρασιών που επιβάλλουν οι πυρσοί πλάσματος ευνοούνται οι αντιδράσεις

καύσης του οργανικού μέρους του απορρίμματος. Η καύση είναι επιθυμητή διεργασία παρόλο που καταναλώνει ύλη η οποία θα μπορούσε να αεριοποιηθεί. Η ενέργεια που απελευθερώνεται λόγω των εξώθερμων φαινομένων χρησιμοποιείται από τις ενδόθερμες αντιδράσεις αεριοποίησης. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι απαιτήσεις σε παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στην κάμινο πλάσματος. Πάνω από τη ζώνη καύσης βρίσκεται η ζώνη αεριοποίησης. Το οξυγόνο που φθάνει σε αυτήν την περιοχή μέσω της ζώνης καύσης δεν είναι αρκετό για να κάψει τα συστατικά του σκουπιδιού αλλά δεν είναι και λίγο για να δημιουργήσει συνθήκες πυρόλυσης. Η ποσότητα του οξυγόνου είναι κατάλληλη για την πραγματοποίηση της αεριοποίησης. [31,32]

Τέλος, πάνω από τη ζώνη αεριοποίησης βρίσκεται η ζώνη πυρόλυσης και προθέρμανσης της τροφοδοσίας. Το οξυγόνο που απελευθερώνεται από τους πυρσούς πλάσματος έχει καταναλωθεί πρωτογενώς στη καύση και δευτερογενώς στην αεριοποίηση οπότε ελάχιστες ποσότητες οξυγόνου φθάνουν στο επάνω τμήμα της κλίνης σκουπιδιών. Οι συνθήκες είναι κατάλληλες για πυρόλυση. Η πυρόλυση οδηγεί σε παραγωγή ελαφρών υδρογονανθράκων (tars-chars) οι οποίοι ανιχνεύονται στο αέριο σύνθεσης και πρέπει να απομακρυνθούν από αυτό. Επιπλέον είναι πιθανή η παράσυρση στερεών σωματιδίων απορρίμματος από το εξερχόμενο αέριο σύνθεσης. Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι η πυρόλυση είναι παράπλευρο ανεπιθύμητο φαινόμενο. Εκτός από την πυρόλυση πραγματοποιείται ψύξη του αερίου σύνθεσης λόγω άμεσης επαφής με το κατερχόμενο απόρριμμα το οποίο προθερμαίνεται προτού φτάσει στη ζώνη αεριοποίησης. Σε αυτή τη ζώνη ένα μικρό μέρος της τροφοδοσίας παρασύρεται από το αέριο σύνθεσης, παρακρατείται από τον κυκλώνα και επιστρέφει στον αντιδραστήρα. [31]



Σχήμα 2.4: Ζώνες διεργασιών σε αντιδραστήρα (α) αντιρροής (updraft) και (β) ομορροής (downdraft)

Είναι εμφανές ότι στους αντιδραστήρες αντιρροής πραγματοποιούνται διεργασίες ομαλά συνδεδεμένες μεταξύ. Για παράδειγμα η προθέρμανση της τροφοδοσίας γίνεται αρχικά στο επάνω μέρος του αντιδραστήρα όπου συναντώνται οι χαμηλότερες θερμοκρασίες. Έπειτα η προθερμασμένη τροφοδοσία αεριοποιείται στη ζώνη αεριοποίησης και το εναπομένον υλικό όντας ακόμη θερμότερο λόγω της επαφής με το παραγόμενο αέριο σύνθεσης κινείται στη ζώνη καύσης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι αντιδραστήρες αυτού του τύπου έχουν τομειονέκτημα της εμφάνισης ακαθαρσιών στο αέριο σύνθεσης, οι οποίες πρέπει να αφαιρεθούν στα συστήματα καθαρισμού. Επίσης εμφανίζουν μειωμένες ενεργειακές αποδόσεις αφού το αέριο σύνθεσης κατά την άνοδο του στην κορυφή του αντιδραστήρα ψύχεται θερμαίνοντας την τροφοδοσία. [30]

Στους αντιδραστήρες ομορροής το αέριο μέσο αεριοποίησης κινείται στην ίδια κατεύθυνση με την τροφοδοσία. Οι βασικές διαφορές με τους αντιδραστήρες ομορροής είναι οι εξής [30]:

- Το αέριο σύνθεσης εξέρχεται από τον αντιδραστήρα σε υψηλότερες θερμοκρασίες από ότι στη περίπτωση της αντιρροής αφού δεν προθερμαίνει τη τροφοδοσία και αυξάνει έτσι τη θερμική απόδοση της διεργασίας.
- Η πυρόλυση δεν ευνοείται στην περίπτωση της ομορροής και έτσι οι υδρογονάνθρακες είναι σχεδόν ανύπαρκτοι στη σύσταση του αερίου σύνθεσης.

Η χρήση του πλάσματος συμβάλλει στην αντιμετώπιση των προβλημάτων θερμικής απόδοσης και καθαρότητας του αερίου σύνθεσης. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, οι αντιδράσεις αεριοποίησης πραγματοποιούνται με πολύ ταχείς ρυθμούς επιτρέποντας τη γρήγορη αποσύνθεση του απορρίμματος (ως και 10000 φορές γρηγορότερα από τη συμβατική καύση). Τα καθαρότερα προϊόντα και οι υψηλότερες ενεργειακές αποδόσεις λόγω επίτευξης υψηλών θερμοκρασιών κάνουν την τεχνολογία αεριοποίησης πλάσματος ανταγωνιστική, τουλάχιστον σε τεχνικό – περιβαλλοντικό επίπεδο. [23]

Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται απαιτούνται πολύ ακριβά υλικά κατασκευής για τους αντιδραστήρες κινούμενης κλίνης όπως κεραμικά και κράματα υψηλής περιεκτικότητας σε χρώμιο και νικέλιο. Επιπλέον αποτελούνται από διπλό τοίχωμα όπου ανάμεσα ρέει νερό ψύξης ώστε να διατηρεί τα τοιχώματα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ο χώρος ανάμεσα στα τοιχώματα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την προθέρμανση του αέρα που εισέρχεται στον αντιδραστήρα. Στην κορυφή και στον πυθμένα του αντιδραστήρα υπάρχουν αντίστοιχα συστήματα εισόδου του απορρίμματος και εξόδου του τηγμένου υλικού τα οποία εξασφαλίζουν την αεροστεγή μετάβαση των υλικών προς και από τον αντιδραστήρα. Ο αντιδραστήρας αποτελείται στην ουσία από τα 2 παραπάνω συστήματα, το θάλαμο αντίδρασης και το θάλαμο ψύξης και υαλοποίησης του ανόργανου υλικού .

Τέλος, κάτω από το σύστημα τροφοδοσίας τοποθετούνται διανομείς του σκουπιδιού ώστε να διαμοιράζεται όσο το δυνατόν ομοιόμορφα η τροφοδοσία και να επιτυγχάνεται έτσι καλή επαφή αερίου- στερεού.

2.5.3. Πυρσοί Πλάσματος

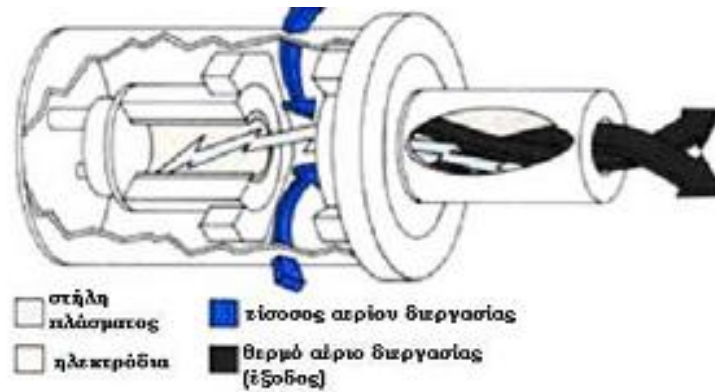
Στις σύγχρονες εφαρμογές χρησιμοποιούνται πυρσοί πλάσματος. Οι πυρσοί πλάσματος είναι συσκευές που μεταδίδουν ηλεκτρικό ρεύμα σε αέριο μέσο, μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων που οφείλονται στη διαφορά δυναμικού δύο ηλεκτροδίων ανόδου - καθόδου. Έτσι, δημιουργείται τόξο πλάσματος (plasma-arc) και μετατρέπεται το αέριο σε πλάσμα. Με βάση τη διάταξη των ηλεκτροδίων, χωρίζονται σε πυρσούς μεταβίβασης και μη μεταβίβασης.

➤ **Μεταβίβασης**

Αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο εσωτερικά του πυρσού και σε κάποιο άλλο αγωγίμο υλικό εκτός πυρσού, το οποίο βρίσκεται είτε στα τοιχώματα του αντιδραστήρα πλάσματος εκ κατασκευής είτε υπάρχει αυτούσιο στα απορρίμματα που τροφοδοτούνται. Το τόξο πλάσματος δημιουργείται εντός του αντιδραστήρα και το αέριο που υπάρχει ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, το οποίο μπορεί να είναι αέρας (προτιμάται λόγω χαμηλού κόστους), καθαρό O₂, He, Ar κ.ά., περνάει στη φάση του πλάσματος.

➤ **Μη μεταβίβασης**

Το τόξο πλάσματος δημιουργείται εντός του πυρσού αφού τα ηλεκτρόδια βρίσκονται μέσα σε αυτόν. Το αέριο εισέρχεται στον πυρσό μέσω θαλάμου εισαγωγής, όπου βρίσκονται δύο κυλινδρικά ηλεκτρόδια, ανάμεσα στα οποία πραγματοποιούνται εκκενώσεις. Το αέριο μέσο διέρχεται μέσα από το ηλεκτρικό πεδίο και γίνεται πλάσμα εντός του πυρσού και έπειτα εισέρχεται στον αντιδραστήρα. Τα ηλεκτρόδια ψύχονται με νερό που κινείται στα εξωτερικά τοιχώματα του πυρσού και για αυτόν το λόγο, σε αυτή την κατηγορία υπάρχουν ενεργειακές απώλειες και δεν γίνεται 100% μετατροπή του ηλεκτρικού ρεύματος σε χρήσιμη θερμική ενέργεια, με απόδοση που κυμαίνεται από 75 ως 95%.



Σχήμα 2.5: Πυρσός πλάσματος μη μεταβίβασης

Για άριστη μετατροπή του άνθρακα απαιτείται χρήση και των δύο τύπων πυρσού ωστόσο, αναλόγως την εφαρμογή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ο ένας είτε ο άλλος μόνο. Στον πυρσό μεταβίβασης, το ηλεκτρόδιο γραφίτη που χρησιμοποιείται πρέπει να αντικαθίσταται καθώς καταναλώνεται λόγω του χημικού περιβάλλοντος του αντιδραστήρα ενώ του άλλου τύπου, λόγω τοποθέτησης εκτός αντιδραστήρα, δεν έχει υψηλές απαιτήσεις συντήρησης.

2.5.4. Ξηραντήρας - Εναλλάκτης θερμότητας

Το ρεύμα τροφοδοσίας απορριμμάτων εισέρχεται σε ξηραντήρα πριν μπει στον αντιδραστήρα και υπάρχουν δύο διαδεδομένοι τύποι: μεταφορικής ταινίας και περιστροφικός, ο οποίος προτιμάται λόγω των υψηλότερων συντελεστών μεταφοράς θερμότητας. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν και κοχλιωτοί ξηραντήρες, οι οποίοι όμως δεν προσφέρονται για μεγάλες τροφοδοσίες. Για την ξήρανση χρησιμοποιείται ατμοσφαιρικός αέρας ο οποίος θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία από εναλλάκτη που βρίσκεται στην έξοδο του αντιδραστήρα. Συνεπώς, η παροχή και η θερμοκρασία του αερίου σύνθεσης επηρεάζει άμεσα την παροχή και θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης, η οποία πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες από 30 ως 180°C. Για την ξήρανση χρησιμοποιείται ατμοσφαιρικός αέρας, ο οποίος θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία από εναλλάκτη αερίου – αερίου που βρίσκεται στην έξοδο του αντιδραστήρα. Το σύστημα ξηραντήρα - εναλλάκτη θερμότητας αποτελεί μια συνολική διεργασία αφού η παροχή και η θερμοκρασία του αερίου σύνθεσης επηρεάζει άμεσα την παροχή και τη θερμοκρασία του αέρα ο οποίος χρησιμοποιείται

για ξήρανση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ξήρανση θα γίνεται σε ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του αερίου σύνθεσης. Ο καταλληλότερος τύπος εναλλάκτη θερμότητας είναι ο περιστρεφόμενος ανακομιστής. Η επιφάνεια επαφής του, μπορεί να έχει εύρος από 1200–3000 m², άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές μεγάλης δυναμικότητας. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι απαιτούνται υλικά κατασκευής ίδια με αυτά του αντιδραστήρα για να εξασφαλισθεί η αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες και στη χημική διάβρωση.[33]

2.5.5. Συστήματα Καθαρισμού

Μέσω των συστημάτων καθαρισμού, αφαιρούνται σωματίδια και ανεπιθύμητες ουσίες και έτσι, επιτυγχάνεται η ασφαλής καύση του αερίου σύνθεσης ως προς την προστασία τόσο του περιβάλλοντος όσο και των συστημάτων παραγωγής ενέργειας που απαιτούν καύσιμο αέριο υψηλής καθαρότητας. Η πορεία που ακολουθεί το αέριο σύνθεσης είναι η εξής: κυκλώνας κατακράτησης σωματιδίων, θάλαμος ψεκασμού με νερό ώστε να ψυχθεί απότομα και να αποφευχθεί ο επανασηματισμός των επικίνδυνων μορίων, θάλαμος venturi, ηλεκτροστατικός διαχωριστής και τέλος, πύργος επαφής για απομάκρυνση όξινων αερίων και πύργος απορρόφησης υδροθείου.

Κυκλώνας

Οι κυκλώνες βρίσκονται μετά την έξοδο του αερίου σύνθεσης στον αντιδραστήρα. Σκοπό έχουν τη συλλογή και επαναφορά στον αντιδραστήρα σωματιδίων που περιέχονται στο ρεύμα του αερίου με επιβολή φυγόκεντρων δυνάμεων. Η απόδοση των κυκλώνων είναι ικανοποιητική για σωματίδια κυρίως τέφρας διαμέτρου μεγαλύτερη από 10 μm. Η χρήση τους έγκειται στην απομάκρυνση των μεγαλύτερων σε μέγεθος σωματιδίων ώστε να μεταβεί το αέριο στα υπόλοιπα πιο εξειδικευμένα συστήματα κατακράτησης σωματιδίων με μικρότερο «φόρτο» σε σωματίδια. Εξασφαλίζεται έτσι η σωστή λειτουργία των εξειδικευμένων συστημάτων τα οποία είναι πολύ πιο ακριβά από τους κυκλώνες και μη λειτουργικά σε υπερβολικές ποσότητες σωματιδίων. Επιπλέον, η ανακύκλωση των στερεών βελτιώνει τη χημική μετατροπή του αντιδραστήρα. Για την μεγιστοποίηση της διαχωριστικής απόδοσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί συστοιχία μικρότερων κυκλώνων συνδεδεμένων παράλληλα αφού η απόδοση είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη διάμετρο του

κυκλώνα. Οι κυκλώνες είναι απλές συσκευές χαμηλού πάγιου και λειτουργικού κόστους.. [34]

Θάλαμος ψεκασμού νερού

Μετά από τον κυκλώνα, το επόμενο σύστημα καθαρισμού είναι ο θάλαμος ψεκασμού. Το αέριο σύνθεσης, το οποίο έχει διέλθει από εναλλάκτη θερμότητας εισέρχεται στο θάλαμο σε θερμοκρασία 500 °C και ψεκάζεται με νερό. Ο ψεκασμός συντελεί στην απότομη ψύξη του αερίου σύνθεσης ώστε να αποφευχθεί ο επανασηματισμός πολύπλοκων μορίων όπως οι διοξίνες και τα φουράνια. Τα αέρια συστατικά ψύχονται μέχρι τη θερμοκρασία κορεσμού τους σε νερό. Τυπικές θερμοκρασίες εξόδου κυμαίνονται από 70 ως 90 °C. [34]

Διαχωριστής Venturi

Ο διαχωριστής Venturi χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση σωματιδίων διαμέτρου μικρότερης από 10 μm. Αναλόγως με τον τρόπο λειτουργίας και την κατασκευή του διαχωριστή, η απόδοση του κυμαίνεται από 70 ως 99%. Και σε αυτή τη συσκευή προστίθεται νερό στο εισερχόμενο αέριο. Έπειτα το ρεύμα διέρχεται από στόμιο μεταβλητής διατομής όπου και επιταχύνεται. Η επιτάχυνση έχει ως αποτέλεσμα τη διάσπαση του νερού σε σταγονίδια. Τα σταγονίδια και τα σωματίδια έρχονται σε επαφή στο μέσο του σωλήνα Venturi (λαιμός) ενώ έπειτα επιβραδύνονται επειδή διέρχονται από διατομή αυξανόμενης διατομής. Η επιβράδυνση έχει ως αποτέλεσμα τη συσσωμάτωση των σωματιδίων και των σταγόνων νερού. Τα συσσωμάτωμα, έχοντας μεγάλο πλέον μέγεθος διαχωρίζονται εύκολα από το υπόλοιπο ρεύμα αέρα.

Υγροί ηλεκτροστατικοί διαχωριστές

Οι ηλεκτροστατικοί διαχωριστές χρησιμοποιούνται για να αφαιρέσουν στερεά σωματίδια με απόδοση μεγαλύτερη από 99%. Από τους ηλεκτροστατικούς διαχωριστές επιλέχθηκαν οι υγροί επειδή αυτοί έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας αερίου ρεύματος που περιέχει νερό και είναι εύφλεκτο. Στους ηλεκτροστατικούς διαχωριστές επιβάλλεται διαφορά δυναμικού από 10000 ως 100000 volt. Τα

σωματίδια του αερίου σύνθεσης φορτίζονται από ιόντα, τα οποία σχηματίζονται από επιβολή διαφοράς δυναμικού σε μία δράση γνωστή ως κορόνα, χωρίς να φορτίζεται η κύρια μάζα του αερίου σύνθεσης. Τα φορτισμένα σωματίδια έλκονται από δίσκους (πιάτα) συλλογής αντίθετης πολικότητας. Το φορτίο που αποκτούν τα σωματίδια εξαρτάται από το μέγεθος τους, έτσι τα μεγαλύτερα σωματίδια αποκτούν μεγαλύτερο φορτίο και άρα έλκονται με ισχυρότερη ηλεκτρική δύναμη από τους φορτισμένους δίσκους. Η ύλη που συλλέγεται στους δίσκους απομακρύνεται με ψεκάσμο σπρέι νερού με συνεχή ή ασυνεχή τρόπο. Η διάταξη του ηλεκτροστατικού διαχωρισμού τοποθετείται μετά από τους θαλάμους ψεκάσμού αφού η θερμοκρασία λειτουργίας δεν πρέπει να υπερβαίνει τη θερμοκρασία βρασμού του νερού. Επιπλέον η χαμηλότερη θερμοκρασία οδηγεί σε υψηλότερες αποδόσεις και σε καλύτερη λειτουργική συμπεριφορά. [34]

Πύργος απορρόφησης και χημικής αντίδρασης όξινων αερίων

Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των όξινων αερίων, κυρίως του υδροχλωρικού οξέος με απορρόφηση. Το αέριο ρεύμα έρχεται σε επαφή με την υγρή φάση και απορροφάται από αυτήν. Το υγρό ρεύμα έχει διαλύτη NaOH και έτσι μετά την απορρόφηση γίνεται χημική αντίδραση του HCl με το NaOH προς παραγωγή H₂O και NaCl. Για να αυξηθεί η επιφάνεια επαφής υγρής και αέριας φάσης χρησιμοποιείται πληρωτικό υλικό. Το αέριο εισέρχεται από τον πυθμένα του πύργου ενώ το υγρό διάλυμα από την κορυφή κινούμενο κατά αντιστροφή. Η θερμοκρασία λειτουργίας του πύργου απορρόφησης και χημικής αντίδρασης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη ώστε να ευνοείται η διάλυση του HCl στο υγρό διάλυμα. [34]

Πύργος απορρόφησης H₂S

Το θείο που υπάρχει στη σύσταση του απορρίμματος μετατρέπεται σε H₂S το οποίο πρέπει να απομακρυνθεί από το αέριο σύνθεσης πριν το τελευταίο χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιείται στήλη απορρόφησης με δίσκους όπου το αέριο σύνθεσης έρχεται σε επαφή με διάλυμα αμίνης ή μεθανόλης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απορρόφηση του H₂S από το διάλυμα, το οποίο αναγεννιέται στον αναγεννητή όπου και διαχωρίζεται τελικώς το H₂S. [34]

✚ Φίλτρα HEPA και Ενεργού Άνθρακα (HEPA and Activated Carbon Filter)

Μετά την απομάκρυνση των στερεών σωματιδίων, των όξινων αερίων και του υδρόθειου, το αέριο σύνθεσης μπορεί ακόμα να περιέχει ίχνη βαρέων μετάλλων ή άλλων ρύπων. Για την απομάκρυνση όλων των εναπομεινάντων στερεών σωματιδίων, μολύβδου, καδμίου, υδραργύρου και θείου, πρόσθετα φίλτρα τοποθετούνται ακριβώς μετά το σύστημα απομάκρυνσης του υδρόθειου για τον όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερο καθαρισμό του αερίου σύνθεσης.

2.5.6. Συστήματα ανάκτησης ενέργειας

Το σύστημα ανάκτησης ενέργειας μπορεί να βασιστεί σε απλό κύκλο ατμού με ατμοστρόβιλο , σε μηχανές αερίων, ή σε συνδυασμένο κύκλο αεριοστρόβιλου – ατμοστρόβιλου. Η επιλογή γίνεται ανάλογα με την θερμογόνο δύναμη, τη καθαρότητα και την ποσότητα του αερίου σύνθεσης. Ο αεριοστρόβιλος απαιτεί μεγάλη ποσότητα καυσίμου, υψηλής θερμογόνου δύναμης χωρίς ακαθαρσίες σε στερεά σωματίδια και μέταλλα επειδή καταστρέφονται τα πτερύγια του. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας του αεριοστρόβιλου επιτρέπουν τη χρήση συνδυασμένου κύκλου. Τα καυσαέρια οδηγούνται σε boiler παραγωγής ατμού ο οποίος οδηγείται σε ατμοστρόβιλο για περαιτέρω παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης φαίνεται να έχουν κάνει μεγάλη πρόοδο ως προς την ελάχιστη τιμή θερμογόνου δύναμης καυσίμου που μπορούν να εκμεταλλευτούν. Εξειδικευμένες εταιρίες μηχανών εσωτερικής καύσης έχουν αναπτύξει μηχανές με πολύ χαμηλές προδιαγραφές θερμογόνου δύναμης καυσίμου. Οι μηχανές αερίου είναι πιο δεκτικές στην παρουσία ακαθαρσιών αφού τα μηχανικά τους μέρη δεν είναι τόσο ευαίσθητα όσο τα πτερύγια του αεριοστρόβιλου. Το απλό κύκλο ατμού είναι το πιο εφαρμόσιμο αυτή τη στιγμή σε σχέση με τα υπόλοιπα τα οποία αναπτύσσονται. Το αέριο σύνθεσης καίγεται σε λέβητα (thermal oxidizer) όπου και παράγεται ατμός ο οποίος χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ατμοστρόβιλο. Στη περίπτωση του απλού κύκλου τα συστήματα καύσης προηγούνται των

συστημάτων καθαρισμού. Το αέριο σύνθεσης καίγεται με τις ακαθαρσίες. Τελικώς καθαρίζονται τα παραγόμενα καυσαέρια πριν εξέλθουν στην ατμόσφαιρα.

Από όλα τα ενεργειακά συστήματα το συνδυασμένο κύκλο αεριοστρόβιλου – ατμοστρόβιλου είναι αυτό που προσφέρει τις υψηλότερες ενεργειακές αποδόσεις. Απαιτεί όμως καλής ποιότητας αέριο σύνθεσης διαθέσιμο σε μεγάλες ποσότητες. Στα συστήματα αυτά η ανάμειξη με φυσικό αέριο ή μεθάνιο μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα αποδοτική. [35]

2.5.7. Διαφορές με συμβατική αεριοποίηση

Η θερμοκρασία των αερίων που εξέρχονται της περιοχής του πλάσματος είναι κοντά στους 5000°C ή και ακόμα υψηλότερα, η οποία είναι 4 με 5 φορές υψηλότερη από την αντίστοιχη θερμοκρασία στη συμβατική καύση. Η πολύ υψηλή αυτή θερμοκρασία παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους θερμικής επεξεργασίας. Αρχικά, η χημική αποσύνθεση των μορίων λαμβάνει χώρα περίπου 10.000 φορές γρηγορότερα από τη συμβατική καύση. Κατά δεύτερο λόγο, η υψηλή θερμοκρασία οδηγεί σε πολύ υψηλές μοριακές ταχύτητες οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την πλήρη αποσύνθεση πολύπλοκων μορίων σε ατομικό επίπεδο. Αυτό συνεπάγεται καθαρότερα προϊόντα αντίδρασης. Τρίτον, πάνω από τους 5000°C, το μοριακό οξυγόνο μετατρέπεται σχεδόν πλήρως στην ατομική του μορφή, ενώ σχηματίζονται επίσης και άλλες ισχυρώς ενεργές ρίζες, όπως το OH. [23] Αυτά τα πολύ ενεργά συστατικά δημιουργούν νέους δρόμους οι οποίοι ενισχύουν την γρήγορη αποσύνθεση των αποβλήτων. Τέλος, η χρήση του πλάσματος ως κύρια πηγή ενέργειας καθιστά τη διεργασία αποσύνθεσης λιγότερο εξαρτημένη από την χημική ενέργεια του προς επεξεργασία αποβλήτου.

Στην περίπτωση της τεχνολογίας συμβατικής αεριοποίησης, οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται στο εσωτερικό του αντιδραστήρα εκτείνονται στο εύρος από 400 έως 850 °C. Σε αυτή την περίπτωση δε χρησιμοποιείται καμία εξωτερική πηγή ενέργειας και η διεργασία εξαρτάται από την ενέργεια που παράγεται εσωτερικά για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων. Στην ουσία, οι συμβατικοί αεριοποιητές είναι «ημι-καυστήρες» και ένα σημαντικό μέρος του άνθρακα μετέχει σε αντιδράσεις

καύσης για την απελευθέρωση ενέργειας και την ολοκλήρωση των αντιδράσεων αεριοποίησης. Κατά την διεργασία συμβατικής αεριοποίησης παράγεται ένα καύσιμο αέριο παρόμοιας σύστασης με το αέριο που παράγεται κατά την αεριοποίηση πλάσματος, με μόνη διαφορά ότι αυτό είναι περισσότερο ρυπασμένο και περιέχει υπολείμματα σωματιδίων άνθρακα. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας δεν δίνουν την δυνατότητα διάσπασης όλων των μορίων των υλικών. Σαν αποτέλεσμα του παραπάνω γεγονότος, στη συμβατική αεριοποίηση πρέπει να απομακρυνθούν κάποια υλικά πριν την τροφοδοσία του ρεύματος αποβλήτου στον αντιδραστήρα και να υποστούν άλλου είδους επεξεργασία. Εξαιτίας των χαμηλών θερμοκρασιών, το παραγόμενο αέριο από ένα συμβατικό αεριοποιητή περιέχει κυρίως ποσότητες ανεπιθύμητων υδρογονανθράκων (tars) οι οποίες είναι δύσκολο να απομακρυνθούν και άλλων αρωματικών οργανικών ουσιών από τις οποίες θα πρέπει περαιτέρω να καθαριστεί για να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια και αποδοτικά σε συστήματα ανάκτησης ενέργειας, όπως μηχανές αερίου ή λέβητες. Τα υπολείμματα στερεού άνθρακα που δεν διασπώνται (char) φτάνουν σε ποσοστό το 15% του βάρους του επεξεργαζόμενου αποβλήτου και αυτά θα πρέπει με κάποιο τρόπο να εναποτεθούν σε ένα χώρο ταφής αποβλήτων. Επιπλέον των παραπάνω αδύνατων σημείων, στις διεργασίες συμβατικής αεριοποίησης υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις προεπεξεργασίας και ομογενοποίησης του τροφοδοτούμενου αποβλήτου.[23]



Σχήμα 2.6: Τυπική μονάδα αεριοποίησης πλάσματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

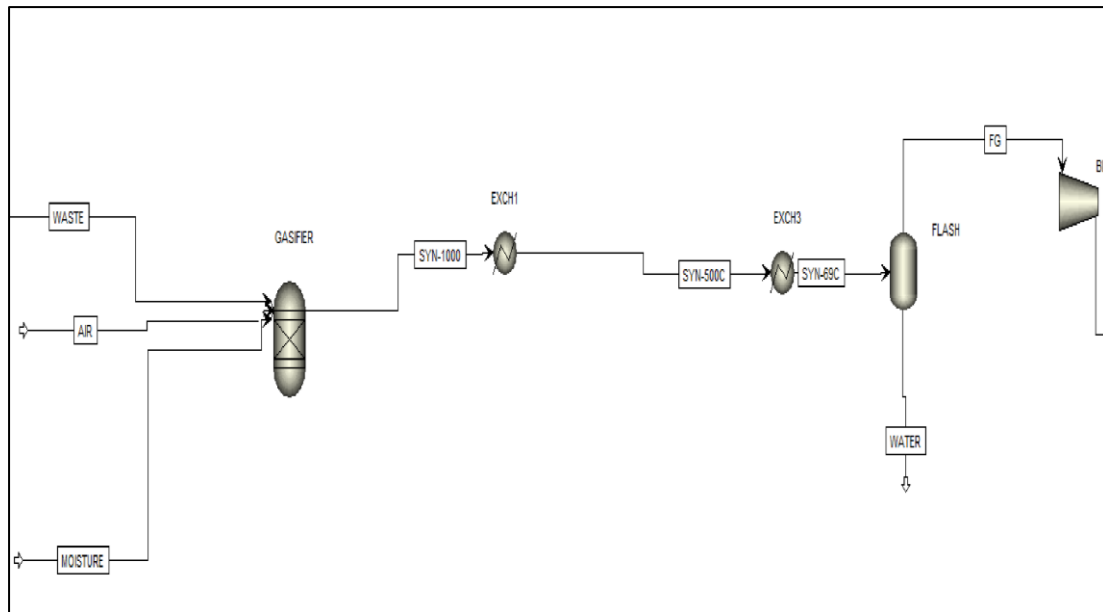
3 Προσομοίωση διεργασίας αεριοποίησης σε Aspen Plus 7.2

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκε μια τυπική διάταξη διεργασίας αεριοποίησης όπως αυτή παρουσιάζεται βιβλιογραφικά αλλά και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται τα τμήματα της διεργασίας αυτής, όπως αυτή προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα Aspen, στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας, καθώς και η επικύρωση του προγράμματος με τη χρήση του θερμοδυναμικού μοντέλου Gasifex.

3.1 Aspen Plus v7.2

Το Aspen Plus είναι ένας προσομοιωτής διεργασιών (process simulator) ο οποίος χρησιμοποιεί βασικές εξισώσεις της χημικής μηχανικής και επιτρέπει τη μελέτη και τη βελτιστοποίηση πολύπλοκων διεργασιών. Κατέχει ηγετική θέση στην αγορά και η πληθώρα εφαρμογών του επιτρέπει αρχικά στους κατασκευαστές με τη χρήση του, να εφαρμόσουν τις καλύτερες πρακτικές τους έχοντας ως πεδία εφαρμογών τη βελτιστοποίηση των εργασιών χημικού μηχανικού, τη μεταποίηση και την αλυσίδα εφοδιασμού. Δευτερευόντως, με τη χρήση του εν λόγω υπολογιστικού προγράμματος στα πανεπιστήμια παγκοσμίως, καθώς και το ότι το ίδιο το πρόγραμμα προσφέρει ένα ολοκληρωμένο πακέτων προϊόντων, επιτρέπεται στους καθηγητές να διδάξουν στους μαθητές την έννοια και την ικανότητα της βελτιστοποίησης της μηχανικής. [36]

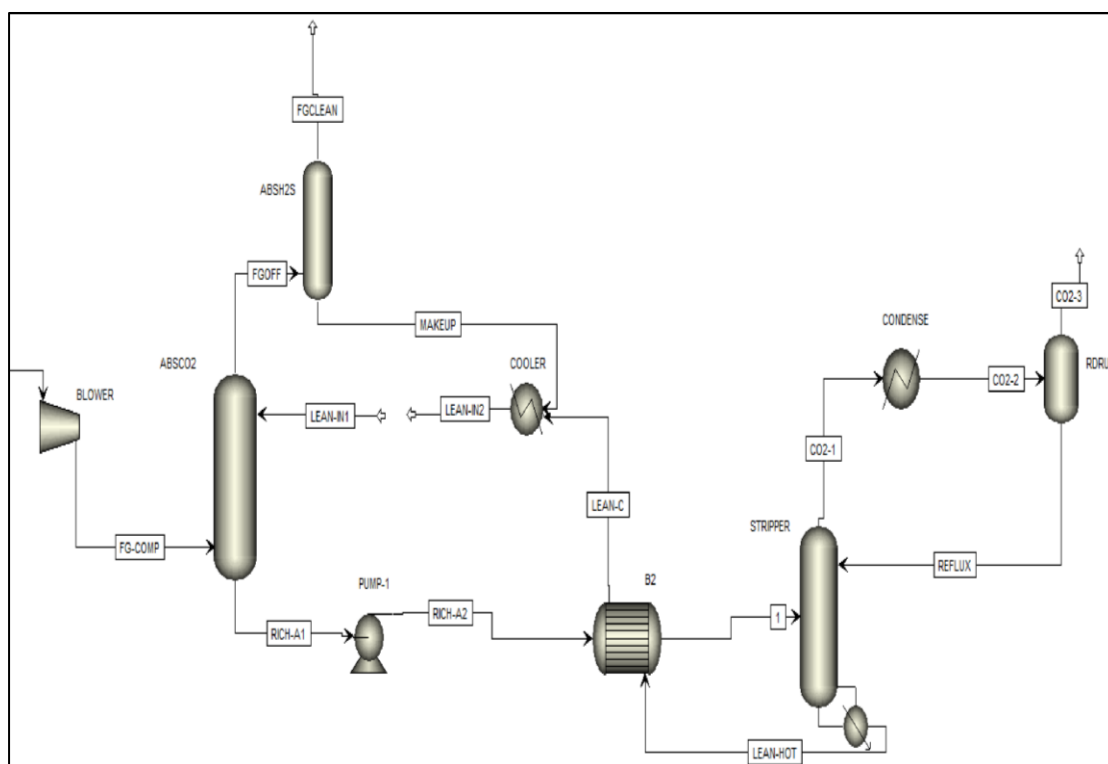
Με χρήση αυτού του προσομοιωτή δημιουργήθηκε η διάταξη της αεριοποίησης πλάσματος. Πιο παραστατικά απεικονίζεται στις ακόλουθες εικόνες που αποτελούν το διάγραμμα ροής της διεργασίας:



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής - 1^ο τμήμα της διάταξης της αεριοποίησης.

Στο πρώτο τμήμα του διαγράμματος ροής της διεργασίας εισέρχονται στον αντιδραστήρα αεριοποίησης τρεις ανεξάρτητες μαζικές ροές, αυτές του αποβλήτου, της υγρασίας και του οξειδωτικού μέσου που μπορεί να είναι είτε αέρας, είτε καθαρό O₂. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε αέρας σε αναλογία 21% O₂ και 79% N₂. Εξερχόμενο το αέριο σύνθεσης από τον αντιδραστήρα σε θερμοκρασία 1473K, διοχετεύεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας για να γίνει εκμετάλλευση μέρους της θερμότητάς του καθώς μειώνεται η θερμοκρασία του έως τους 773K. Εν συνεχεία, ο δεύτερος εναλλάκτης προσομοιώνει έναν ψεκαστή νερού, κατά τον οποίο το αέριο σύνθεσης ψύχεται απότομα κάτω από τους 100°C, για αποφυγή τους σχηματισμού φουρανίων και διοξινών, δηλαδή επικίνδυνων τοξικών ενώσεων και ενδεχομένως καρκινογόνων. Εξερχόμενο το ψυχρό πια αέριο για τις ανάγκες της προσομοίωσης εισέρχεται σε ένα διαχωριστή αέριας και υγρής φάσης ώστε τυχόν υγρή φάση που έχει δημιουργηθεί να απομακρυνθεί. Τα ρεύματα του ρευστού που απορροφά τη θερμότητα του αερίου σύνθεσης, καθώς και το υαλώδες ανόργανο υλικό που προκύπτει από την αεριοποίηση και λαμβάνεται από το κάτω μέρος του αντιδραστήρα έχουν παραληφθεί καθώς ο στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν να προσομοιωθεί στο Aspen αρχικά η βασική διάταξη της διεργασίας της αεριοποίησης.

Ακολουθεί το δεύτερο τμήμα του διαγράμματος ροής της διεργασίας:



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής - 2^ο τμήμα της διάταξης της αεριοποίησης.

Στο δεύτερο τμήμα του διαγράμματος ροής της διεργασίας το ψυχρό πλέον αέριο σύνθεσης μετά από μικρή ανύψωση της πίεσής του εισέρχεται από το κάτω μέρος στη στήλη απορρόφησης του CO₂. Μέσα στη στήλη λαμβάνει χώρα απορρόφηση CO₂ με χημική αντίδραση, που περιγράφεται από χημική ισορροπία στην υγρή φάση μεταξύ αντιδρώντων και προϊόντων και από ισορροπία φάσεων μεταξύ αέριας και υγρής φάσης. Εξέρχεται από τη κορυφή της στήλης και οδηγείται σε μονάδα απορρόφησης H₂S και HCl. Έπειτα το καθαρό πλέον αέριο σύνθεσης κατευθύνεται προς το σύστημα ανάκτησης θερμότητας όπου καιόμενο θα παράξει ηλεκτρική ενέργεια προς χρήση.

Στη στήλη απορρόφησης CO₂ από το κάτω μέρος της στήλης απομακρύνεται το διάλυμα της αμίνης MEA, πλούσιο σε CO₂ με κατεύθυνση την στήλη αναγέννησης της MEA και επαναχρησιμοποίησης της στη στήλη απορρόφησης CO₂. Βλέπουμε πως υπάρχει ανακυκλοφορία της αμίνης στη στήλη αναγέννησης της μέσω του συμπυκνωτή και του δοχείου, καθώς και πώς η επανατροφοδότηση της αμίνης στην αρχική στήλη της απορρόφησης αποτυπώνεται μέσω ενός ανοιχτού loop που

περιλαμβάνει έναν εναλλάκτη, για της ανάγκες σύγκλισης του προγράμματος προσομοίωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η στήλη του H_2S και HCl έχει προστεθεί για την πληρότητα της διπλωματικής εργασίας, καθώς η σύσταση του σκουπιδιού που εξετάστηκε είχε πολύ μικρές τιμές σε S και Cl, οπότε και αμελήθηκε η συνεισφορά τους μετά τον αντιδραστήρα της αεριοποίησης. Αντί αυτού, η ύπαρξη σημαντικής ποσότητας CO_2 οδήγησε στην ανάγκη διερεύνησης της απορρόφησης του στα πλαίσια της προσομοίωσης.

Στη συνέχεια περιγράφονται τα βασικά κομμάτια ή blocks που αποτελούν τη διάταξη της αεριοποίησης στο Aspen.

3.1.1 Τμήματα διεργασίας Aspen

I. Αντιδραστήρας Gibbs

Ο αντιδραστήρας ελεύθερης ενέργειας Gibbs ελαχιστοποιεί την ελεύθερη ενέργεια Gibbs υπό τους περιορισμούς των ατομικών ισοζυγίων. Προσομοιώνει μονοφασικά μοντέλα χημικής ισορροπίας. Δεν απαιτείται να καθοριστεί στοιχειομετρία αντίδρασης. Μπορεί να καθορίσει την ισορροπία φάσεων, χωρίς χημική αντίδραση, ιδιαίτερα για πολλαπλές υγρές φάσεις. Ακόμη προσομοιώνει στερεά. Το μοντέλο RGibbs καθίσταται ιδιαίτερα χρήσιμο για:

- Πύρο-μεταλλουργικές εφαρμογές
- Μοντελοποίηση και κεραμικά κράματα

II. Heater-Εναλλάκτης

Τα μοντέλα εναλλάκτη θερμότητας στο Aspen Plus προσομοιώνουν απόδοση των θερμαντήρων ή δύο ή πολλαπλών εναλλακτών θερμότητας. Ο εναλλάκτης θερμότητας κάνει διαχωρισμό φάσεων (flash). Καθορίζει το απαιτούμενο θερμικό περιεχόμενο για να διαχωριστεί η αέρια φάση. Προσθέτει ή αφαιρεί ποσότητα ενέργειας που καθορίζεται από τις ανάγκες προσομοίωσης.

III. Separator flash - Διαχωριστής

Ο διαχωριστής ρευμάτων χρησιμοποιείται για συνδυασμό ρευμάτων τροφοδοσίας ώστε το εξερχόμενο ρεύμα να είναι σύμφωνα με τις σχεδιαστικές προδιαγραφές. Πιο συγκεκριμένα ο διαχωριστής τύπου flash2 που χρησιμοποιήθηκε στην εν λόγω προσομοίωση, επιτυγχάνει τον προσδιορισμό των θερμικών συνθηκών και της φάσης ενός μίγματος με ένα ή περισσότερα ρεύματα εισόδου. Τα μοντέλα “flash” αντιπροσωπεύουν διαχωριστές ενιαίου σταδίου, όπως πχ. τύμπανα. Εκτελούν υπολογισμούς ισορροπίας φάσεως, αδιαβατικούς, ισοθερμοκρασιακούς και ισοβαρείς διαχωρισμούς, καθώς και υπολογισμό σημείων δρόσου και φυσαλίδας.

IV. Radfrac – Κλίνη ή στήλη

Η συγκεκριμένη στήλη προσομοιώνει διαχωρισμό υγρού-αερίου πολλών βαθμίδων. Είναι κατάλληλη για συστήματα τριών φάσεων και συστήματα όπου η υγρή φάση εμφανίζει έντονη απόκλιση από την ιδανικότητα. Εκτός από τη συνήθη απόσταξη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για :

- Απορρόφηση και απορρόφηση με αναβραστήρα
- Απογύμνωση και απογύμνωση με αναβραστήρα
- Αζεοτροπική απόσταξη

Μπορεί να διαχειριστεί οποιαδήποτε δευτερεύουσα υγρή φάση κατά μήκος της στήλης και φάση ελεύθερου νερού, όπως επίσης και να διαχειριστεί την ύπαρξη στερεών. Επιπλέον χρησιμοποιείται οποτεδήποτε απαιτείται προσομοίωση διεργασίας με χημική αντίδραση.

V. Pump – Αντλία

Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει μια αντλία ή υδροστρόβιλο. Το μοντέλο υπολογίζει είτε απαίτηση ισχύος ή η ισχύ που παράγεται, όταν δίνεται μια προδιαγραφή για την πίεση εξόδου. [36]

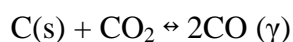
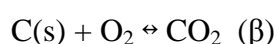
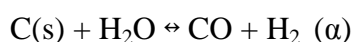
3.2 Παραδοχές και θερμοδυναμικό υπόβαθρο προσομοίωσης

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης έγιναν κάποιες παραδοχές οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

3.2.1 Υπολείμματα στερεού άνθρακα

Τα υπολείμματα στερεού άνθρακα εμφανίζονται στη σύσταση του αερίου σύνθεσης με τη μορφή σωματιδίων μικρής διαμέτρου και αποτελούν ανεπιθύμητο παραπροϊόν της διεργασίας της αεριοποίησης. Η χρήση του πλάσματος μειώνει σημαντικά την εμφάνιση τέτοιων σωματιδίων χωρίς όμως να μπορεί να την εξαλείψει ολοκληρωτικά αφού τοπικά στον αντιδραστήρα δημιουργούνται συνθήκες πυρόλυσης λόγω της περιορισμένης ποσότητας οξυγόνου που φθάνει στην κορυφή του αντιδραστήρα. Στη πραγματικότητα, σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τους 800 °C ο σχηματισμός στερεών υπολειμμάτων άνθρακα οδηγώντας έτσι σε απόδοση μετατροπής άνθρακα κοντά στο 99%.

Ο σχηματισμός στερεών σωματιδίων φαίνεται να επηρεάζεται έντονα από την εισερχόμενη ποσότητα οξυγόνου και υγρασίας. Συγκεκριμένα μικρές ποσότητες υγρασίας και ταυτόχρονα οξυγόνου οδηγούν στο σχηματισμό στερεού άνθρακα αφού η ανεπάρκεια στα παραπάνω εισερχόμενα ρεύματα δεν ευνοεί την ολοκληρωτική μετατροπή του οργανικού κλάσματος του απορρίμματος σε αέριο σύνθεσης. Οι αντιδράσεις που μπορούν να περιγράψουν τα παραπάνω είναι οι εξής:



Από την πρώτη αντίδραση φαίνεται ότι μικρή ποσότητα νερού οδηγεί την αντίδραση ισορροπίας προς τα αριστερά συντελώντας έτσι στη μη μετατροπή του άνθρακα σε αέριο σύνθεσης. Επιπλέον, το σύστημα των δύο επόμενων αντιδράσεων δείχνει ότι η έλλειψη οξυγόνου δεν ευνοεί το σχηματισμό CO₂ το οποίο με τη σειρά του δεν ευνοεί την αντίδραση σχηματισμού CO οδηγώντας σε μη μετατροπή του C στα επιθυμητά προϊόντα.

Θεωρήθηκε λοιπόν ότι στον αντιδραστήρα της αεριοποίησης με θερμοκρασία 1473K δεν δημιουργήθηκε στερεός άνθρακας και επομένως θεωρούμε πως μετά την αεριοποίηση δεν έχω στερεά σωματίδια. [23], [29]

3.2.2 Μοντέλο Electrolyte-NRTL για τη περιγραφή της ισορροπίας φάσεων στην απορρόφηση

Το συγκεκριμένο μοντέλο των Austgen et al. (1989), είναι ένα λεπτομερές θερμοδυναμικό μοντέλο για την περιγραφή της ισορροπίας φάσεων μεταξύ του H₂S και του CO₂ σε υδατικά διαλύματα MEA και DEA είναι αυτό το οποίο βασίζεται στο electrolyte-Nonrandom Two-Liquid (e-NRTL) μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους Chen et al. (1979, 1982). Η περίσσεια της ελεύθερης ενέργειας Gibbs υπολογίζεται από το e-NRTL, ενώ η σταθερά ισορροπίας του καρβαμδικού άλατος προσαρμόστηκε ταυτόχρονα με τις παραμέτρους του e-NRTL στα πειραματικά δεδομένα. Η ισορροπία φάσεων βασίστηκε στη σταθερά του Henry και τα αποτελέσματα ήταν αρκετά καλά. Οι Austgen et al. (1991) εφάρμοσαν το ίδιο μοντέλο για την MDEA και τα μείγματα της με την MEA και DEA επιτυγχάνοντας ίδιας ακρίβειας αποτελέσματα.

Οι Posey and Rochelle (1997) τροποποίησαν το μοντέλο αυτό για να πετύχουν καλύτερα αποτελέσματα και να βρουν παραμέτρους, ώστε να περιγράψουν καλύτερα τις χαμηλές πιέσεις, ενώ οι Bishnoi and Rochelle (2002) για να περιγράψουν το μείγμα MDEA και πιπεραζίνης (PH).

Είναι ένα μοντέλο για τον υπολογισμό της περίσσειας της ελεύθερης ενέργειας Gibbs σε ένα ηλεκτρολυτικό διάλυμα. Το μοντέλο αυτό κάνει την υπόθεση ότι η περίσσεια της ελεύθερης ενέργειας Gibbs είναι το άθροισμα δύο συνεισφορών οι οποίες είναι:

1. Συνεισφορά από δυνάμεις με μικρή απόσταση (*short-range forces*) μεταξύ όλων των συστατικών οι οποίες περιλαμβάνουν αλληλεπιδράσεις μορίου-μορίου, μορίου-ιόντος, ιόντος-ιόντος.
2. Συνεισφορά από δυνάμεις σε μεγάλη απόσταση (*long-range forces*) οι οποίες ουσιαστικά είναι οι ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ιόντων.

Οι δύο βασικές παραδοχές στις οποίες στηρίζεται το Electrolyte-NRTL είναι:

1. *Υπόθεση άπωσης όμοιων ιόντων*: Εξαιτίας των ισχυρών απωστικών δυνάμεων μεταξύ των ιόντων ίδιου φορτίου, γίνεται η παραδοχή ότι η τοπική συγκέντρωση των κατιόντων γύρω από ένα άλλο κατιόν και των ανιόντων γύρω από ένα άλλο ανιόν είναι μηδέν.
2. *Υπόθεση τοπικής ηλεκτρικής ουδετερότητας*: Γίνεται η παραδοχή ότι η κατανομή των κατιόντων και των ανιόντων γύρω από ένα κεντρικό μόριο διαλύτη είναι τέτοια ώστε το τοπικό φορτίο να είναι μηδέν. [37]

3.2.3 Καταστατική εξίσωση και θερμοδυναμικά δεδομένα

Η ατμώδης φάση δεν παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις από την ιδανικότητα, καθώς οι πιέσεις στις οποίες λειτουργεί η μονάδα απορρόφησης είναι χαμηλές. Έτσι, χρησιμοποιούμε την καταστατική εξίσωση Redlich-Kwong για τη μοντελοποίηση της ατμώδους φάσης στα συστήματα διαλυτή που εξετάζουμε. Ο τύπος της καταστατικής Redlich-Kwong είναι:

$$P = \frac{RT}{Vm-b} - \frac{a}{T^{0.5}Vm(Vm+b)} \quad (3-1)$$

$$a = (\sum_i x_i \sqrt{a_i})^2, \quad b = \sum_i x_i b_i, \quad a_i = 0.42748023 \left(\frac{R^2 T_{ci}^{2.5}}{P_{ci}} \right), \quad b_i = 0.08664035 \left(\frac{R T_{ci}}{P_{ci}} \right)$$

όπου:

V_m = ο μολαρικός όγκος

T_{ci} = η κρίσιμη θερμοκρασία του συστατικού

P_{ci} = η κρίσιμη πίεση του συστατικού

Για το τμήμα της αεριοποίησης, ως βάση θερμοδυναμικών δεδομένων χρησιμοποιείται αυτή του προσομοιωτή Aspen ενώ οι υπολογισμοί βασίζονται στην ελαχιστοποίηση της ελεύθερης ενέργειας Gibbs. Τα θερμοδυναμικά δεδομένα που απαιτούνται είναι οι πρότυπες ενέργειες σχηματισμού Gibbs, οι πρότυπες ενθαλπίες σχηματισμού και οι θερμοχωρητικότητες υπό σταθερή πίεση συναρτήσει της θερμοκρασίας. Επίσης θεωρούμε πως ο χρόνος παραμονής της αέριας φάσης ώστε να επιτευχθεί ισορροπία είναι 2-4sec κατά Calaminus & Stanlenberg, ενώ κατά την τήξη

και την υαλοποίηση του ανόργανου μέρους χρειάζονται 1-2h. Καθώς έχουμε ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας χρησιμοποιούμε την πιο εξελιγμένη μορφή της, την RK-BMS η εξίσωση της οποίας είναι η ακόλουθη [36], [37]:

$$P = \frac{RT}{Vm-b} - \frac{a}{Vm(Vm+b)} \quad (3-2)$$

όπου:

$$a = a_0 + a_1$$

$$a = \sum_{i=1}^{\kappa} \sum_{j=1}^{\kappa} x_i x_j \sqrt{a_i a_j} (1 - k_{ij})$$

$$a_1 = \sum_{i=1}^{\kappa} x_i \left(\sum_{j=1}^{\kappa} x_j \left((a_i a_j)^{1/2} l_{ji} \right)^{1/3} \right)^3$$

$$b = \sum_i x_i b_i$$

$$a_i = fcn(T, T_{ci}, p_{ci}, \omega_i)$$

$$b_i = fcn(T_{ci}, p_{ci})$$

$$k_{ij} = k_{ij}^{(1)} + k_{ij}^{(2)}T + k_{ij}^{(3)} / T$$

$$k_{ij} = k_{ji}$$

$$l_{ij} = l_{ij}^{(1)} + l_{ij}^{(2)}T + l_{ij}^{(3)} / T$$

$$l_{ij} \neq l_{ji}$$

$$l_{jw} = l_{wj} = 0$$

3.2.4 Χρήση αμίνης MEA για την απορρόφηση CO₂

Οι αμίνες που αποδεδειγμένα είναι πρωτίστης εμπορικής σημασίας για τον καθαρισμό αερίων ρευμάτων είναι η μονοαιθανολαμίνη (MEA) με μοριακό βάρος 61.08, η διαιθανολαμίνη (DEA) και η N-μεθυλοδιαιθανολαμίνη (MDEA).

Η MEA θεωρείται ένας ελκυστικός διαλύτης για τη διεργασία της απορρόφησης για χαμηλές μερικές πιέσεις διοξειδίου του άνθρακα στο καυσαέριο, διότι αντιδρά ταχύτατα με αυτό και το κόστος των πρώτων υλών για την παραγωγή της είναι χαμηλό σε σχέση με αυτό που απαιτείται για τις δευτεροταγείς, τις τριτοταγείς και τις στερεοχημικά παρεμποδισμένες αμίνες. Όμως, το κόστος για τη διεργασία της απορρόφησης με την χρήση MEA είναι υψηλό εξαιτίας της υψηλής κατανάλωσης

ενέργειας για την ανάκτηση της αμίνης, ενώ παράλληλα υπάρχουν λειτουργικά προβλήματα διάβρωσης και απώλειας διαλύτη εξαιτίας του υποβιβασμού της αμίνης.

Η τριαιθανολαμίνη (TEA) έχει σε μεγάλο βαθμό αντικατασταθεί εξαιτίας της μικρής της απορροφητικής ικανότητας και της χαμηλής της αντιδραστικότητας. Η διυσοπροπανολαμίνη (DIPA) χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες διεργασίες (π.χ. Adip process, Sulfinol process) αλλά σταδιακά αντικαθίσταται από την MDEA. Τέλος, ένας διαφορετικός τύπος αλκανολαμίνης, η 2-(2-αμινοαιθοξυ)-αιθανόλη, που είναι και γνωστή ως διγλυκολαμίνη (DGA), προτάθηκε το 1955. Η ένωση αυτή συνδυάζει τη σταθερότητα και την αντιδραστικότητα της MEA με τη μικρή τάση ατμών και την υγροσκοπικότητα της διαιθυλενογλυκόλης με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από την MEA.

Εκτός από τα υδατικά διαλύματα των προαναφερθέντων αμινών, πολλές εταιρείες αναπτύσσουν κάποιες φόρμουλες, οι οποίες απλά περιέχουν κάποιο πρόσθετο, το οποίο συμβάλλει στην καλύτερη απόδοση της διεργασίας. Έτσι χρησιμοποιούνται συνήθως αναστολείς διάβρωσης (*corrosion inhibitors*), ενώσεις που εμποδίζουν τον αφρισμό (*foam depressants*) και ενεργοποιούν την επιτάχυνση μιας διεργασίας (*activators, promoters*).

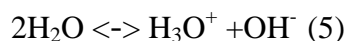
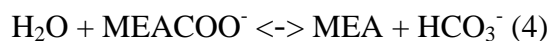
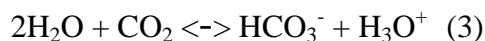
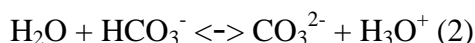
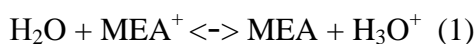
Το 1985 παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία η χρήση μειγμάτων (*blends*) διαφόρων αμινών (συνήθως μεταξύ τριτοταγών και πρωτοταγών ή δευτεροταγών αμινών), έτσι ώστε να προκύψει ένα διάλυμα που να συμπεριλαμβάνει τα πλεονεκτήματα τους και να ελαχιστοποιεί τα μειονεκτήματα.

Τέλος, αναπτύχθηκε από την EXXON μια νέα τάξη αλκανολαμινών, οι στερεοχημικά παρεμποδισμένες αμίνες (*sterically hindered amines*). Οι αμίνες αυτές, π.χ. η AMP, εκμεταλλεζόμενες τη στερεοχημική παρεμπόδιση, συνδυάζουν ένα σχετικά γρήγορο ρυθμό αντίδρασης με το CO₂ και μπορούν να επιτύχουν υψηλότερους λόγους ανθράκωσης από τις MEA και DEA. [37]

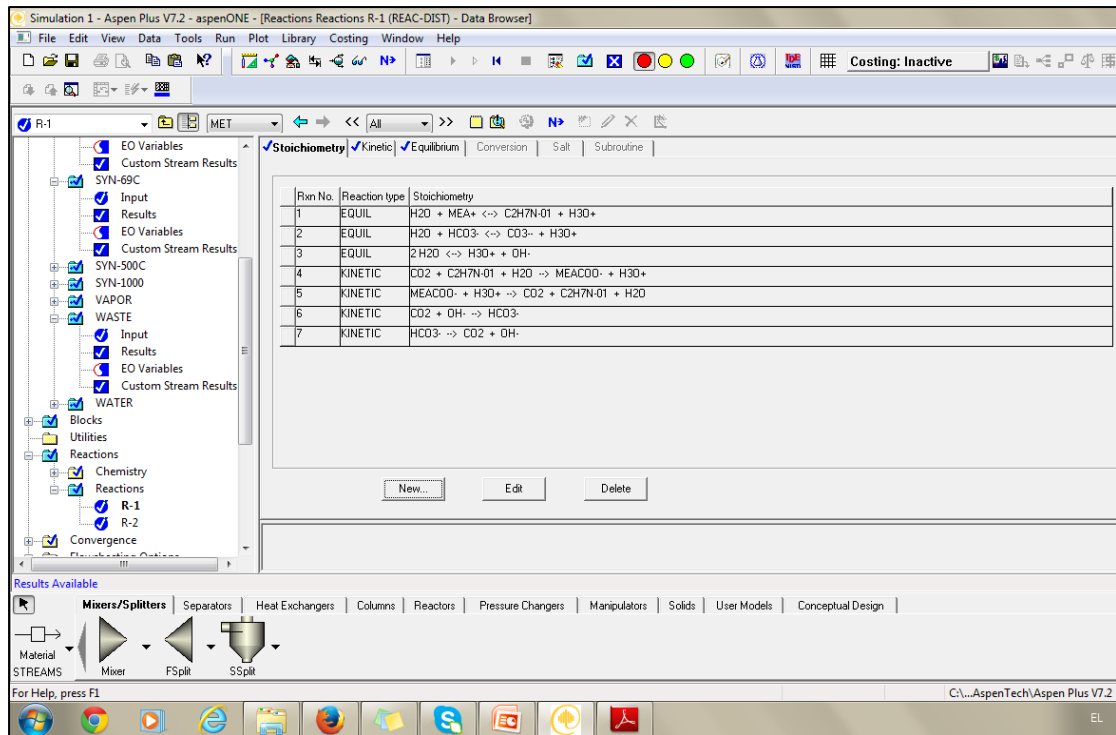
3.2.5 Απορρόφηση CO₂ και εισαγωγή παραμέτρων στο Aspen

Στην απορρόφηση του CO₂ χρησιμοποιείται υδατικό διάλυμα ΜΕΑ για τη δέσμευση του. Η θερμοδυναμική μοντελοποίηση απαιτεί την περιγραφή της συμπεριφοράς ενός τριαδικού μείγματος το οποίο όμως είναι ένα αντιδρών σύστημα και μάλιστα ηλεκτρολυτικό. Στον προσομοιωτή Aspen Plus όταν οριστούν ηλεκτρολύτες είναι απαραίτητο να οριστούν και οι αντιδράσεις που διέπουν ένα τέτοιο σύστημα, όπως για παράδειγμα πλήρης διάσταση ισχυρών ηλεκτρολυτών, μερική διάσταση ασθενών ηλεκτρολυτών, ιοντικές αντιδράσεις μεταξύ των ιόντων. Οι αντιδράσεις αυτές είναι ταχύτατες και άρα μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι επικρατούν συνθήκες χημικής ισορροπίας. Έτσι, η περιγραφή της σύστασης του διαλύματος γίνεται με την εισαγωγή στον προσομοιωτή των σωστών σταθερών ισορροπίας. Η «χημεία» του διαλύματος (*solution chemistry*) επηρεάζει τις διεργασίες που περιλαμβάνουν ηλεκτρολύτες καθώς επιδρά στις φυσικές ιδιότητες, την ισορροπία φάσεων και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του συστήματος και είναι το γενικό μοντέλο με βάση το οποίο γίνονται οι υπολογισμοί με ηλεκτρολύτες.

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα, όταν το CO₂ απορροφάται από ένα υδατικό διάλυμα ΜΕΑ είναι οι ακόλουθες:



και η παρακάτω εικόνα υποδεικνύει πώς γίνεται η είσοδος των αντιδράσεων στον προσομοιωτή Aspen:

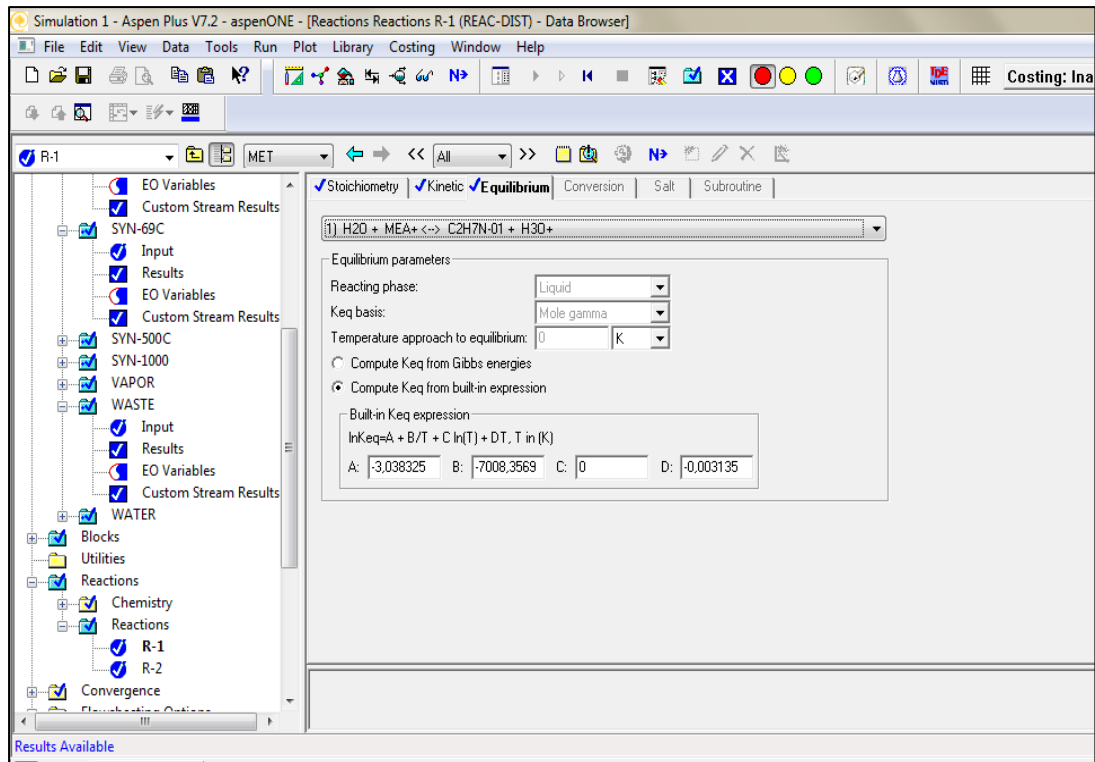


Εικόνα 3.2: Εισαγωγή αντιδράσεων στο Aspen Plus.

Κατόπιν εισαγάγαμε τις σταθερές ισορροπίας και τις κινητικές σταθερές. Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων αυτών αλλά και ο τρόπος εισαγωγής τους στο Aspen. [37]

Αντίδραση	A	B	C	D
1)	-3.038325	-7008.3569	0.0	-0.003135
2)	216.050446	-12431.7	-35.481899	0.0
3)	231.465439	-12092.10	-36.781601	0.0
4)	-0.52135	-2545.53	0.0	0.0
5)	132.89888	-13445.9	-22.477301	0.0
$\ln Keq = A + B/T + C \cdot \ln T + D \cdot T$, Keq σε μονάδες μοριακού κλάσματος, T(K)				

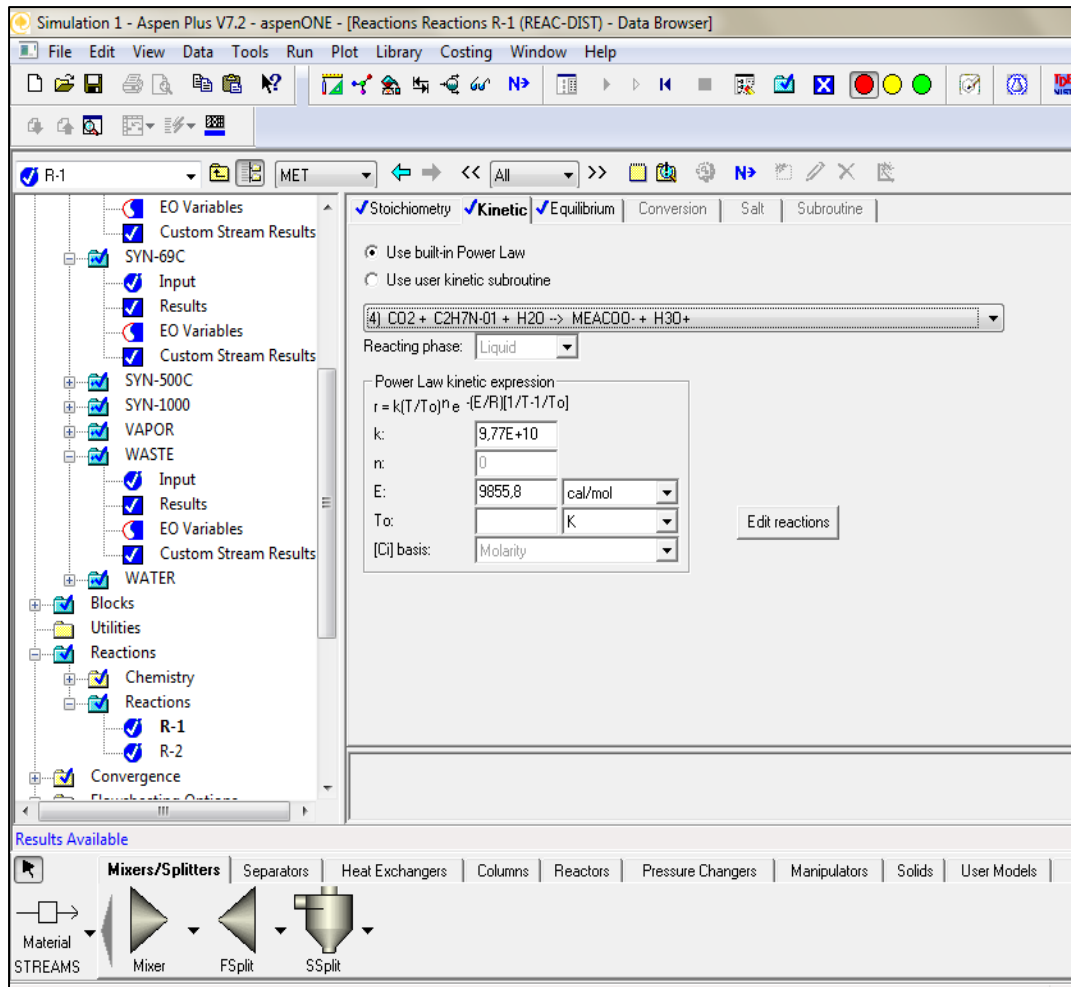
Πίνακας 3.1: Τιμές σταθερών ισορροπίας στο Aspen Plus.



Εικόνα 3.3: Εισαγωγή σταθερών ισορροπίας στο Aspen Plus.

Παράμετροι κινητικών αντιδράσεων	k	E (cal/mol)
$\text{CO}_2 + \text{MEA} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MEACOO}^- + \text{H}_3\text{O}^+$	9.77E+10	9855.8
$\text{MEACOO}^- + \text{H}_3\text{O}^+ \rightarrow \text{CO}_2 + \text{MEA} + \text{H}_2\text{O}$	3.23E+19	15655
$\text{CO}_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{HCO}_3^-$	4.32E+13	13249
$\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 + \text{OH}^-$	2.38E+17	29451

Πίνακας 3.2: Τιμές κινητικών αντιδράσεων.



Εικόνα 3.4: Εισαγωγή κινητικών σταθερών στο Aspen Plus.

Εδώ πρέπει να αναφερθεί πώς το διάλυμα της MEA που τροφοδοτεί τη στήλη απορρόφησης CO₂ περιέχει MEA 30%, εισέρχεται σε θερμοκρασία 40 βαθμών κελσίου και πίεση ατμοσφαιρική, ενώ έχει λόγο ανθράκωσης, ο οποίος αποτελεί και σχεδιαστική παράμετρο, εισόδου 0.2 και εξόδου 0.48.

3.3 Επικύρωση Aspen με το θερμοδυναμικό μοντέλο Gasifeg

Το θερμοδυναμικό μοντέλο GasifEq, σε πρόγραμμα mathCAD, περιγράφει τη διεργασία αεριοποίησης πλάσματος των στερεών αποβλήτων, οργανικής κυρίως σύστασης. Χρησιμοποιεί τα πιο πρόσφατα θερμοδυναμικά δεδομένα, προερχόμενα από το Chemical Properties Handbook, τα οποία είναι σε ισχύ για το θερμοκρασιακό εύρος το οποίο συνδέεται άμεσα με τις θερμικές μεθόδους υψηλής θερμοκρασίας, όπως η τεχνολογία αεριοποίησης πλάσματος. Λαμβάνει υπόψη την ενέργεια που διοχετεύεται στο κεντρικό τμήμα της διεργασίας αεριοποίησης πλάσματος (ηλεκτρική ενέργεια), τον σχηματισμό των βασικών αέριων προϊόντων και την πιθανότητα της ύπαρξης στην ισορροπία, ποσότητας εναπομείναντος στερεού άνθρακα, π.χ. με την μορφή σωματιδίων άνθρακα. Τα θερμοδυναμικά δεδομένα στα οποία βασίστηκε η ανάπτυξη του μοντέλου ισορροπίας για την αεριοποίηση είναι οι ενέργειες σχηματισμού Gibbs στους 298 K, οι ενθαλπίες σχηματισμού στους 298 K και οι θερμοχωρητικότητες σταθερής πίεσης οι οποίες είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και χρειάζονται για τον υπολογισμό της μεταβολής των σταθερών ισορροπίας με τη θερμοκρασία. [23], [29]

3.3.1 Σύσταση τυπικού ελληνικού σκουπιδιού

Για την πρώτη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε ξηρό απόβλητο, απουσία στάχτης στη παρακάτω σύσταση κατά μάζα : C=55.6%, H=7.6%, O=33.3%, N=1.4%, S=0.412% Cl=1.6%, υγρασίας 35,2%, θερμοκρασίας 1473K και παροχής O₂ ίση με 0,869 kmol/kmolDAF. Ακολουθεί ο παρακάτω πίνακας με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα:

Γραμμομοριακά κλάσματα %		
	Aspen	Gasifeg
CO	20,3	20,5
H ₂	25,6	25,4
H ₂ O	18,1	18,4
CO ₂	5,8	5,5
N ₂	29,7	29,6
HCL	0,255	0,265
H ₂ S	0,072	0,071

Πίνακας 3.1: Γραμμομοριακά κλάσματα Aspen-Gasifeg.

Παρατηρούμε ότι τόσο θερμοδυναμικό μοντέλο Gasifeg και όσο και ο προσομοιωτής Aspen δίνουν παρόμοια αποτελέσματα με τις διαφορές να αφορούν στο πρώτο δεκαδικό.

3.3.2 Σύσταση πιλοτικής μονάδας Thermoselect

Για την δεύτερη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε ξηρό απόβλητο, απουσία στάχτης στη παρακάτω σύσταση κατά μάζα : C=39.8%, H=4.4%, O=47.5%, N=6.9%, S=0.33% Cl=1.3%, υγρασίας 22.6%, θερμοκρασίας 1473K και παροχής O₂ ίση με 0,623 kmol/kmolDAF ως καθαρό οξυγόνο. Η σύγκριση έγινε με πειραματικά δεδομένα από την πιλοτική μονάδα της Thermoselect. Το συγκεκριμένο μοντέλο δημοσιεύτηκε το 2008 στο «International Journal of Chemical Reactor Engineering». Ακολουθεί ο πίνακας με τα παρακάτω συγκεντρωτικά αποτελέσματα.

Κλάσματα μάζας %			
	Aspen	MathCAD	Thermoselect
CO	29.8	30.806	30.8
H ₂	1.6	1.6	1.9
H ₂ O	28.1	28.5	28.7
CO ₂	35.6	34.3	34.2
N ₂	3.9	3.9	3.4
HCl	0.759	0.571	0.0151
H ₂ S	0.198	0.195	0.0215

Πίνακας 3.2: Κλάσματα μάζας Aspen-Gasifeg-Thermoselect.

Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Aspen είναι πολύ κοντά με υπολογιστικό μοντέλο που έχει αναπτυχθεί το εργαστήριο θερμοδυναμικής με αποκλίσεις που κυμαίνονται μεταξύ 1%-3%, δηλαδή εντός ορίων σφάλματος.

Συγκεκριμένα για τις συστάσεις HCl και H₂S παρατηρείται μια απόκλιση αν συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα της Thermoselect. Δυστυχώς δεν υπήρχε η δυνατότητα εύρεσης άλλων πειραματικών αποτελεσμάτων για να επιβεβαιωθεί ή όχι η απόκλιση, καθώς δε γνωρίζουμε ακόμη του τρόπο δειγματοληψίας, το σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών και την επαναληψιμότητα της μέτρησης.

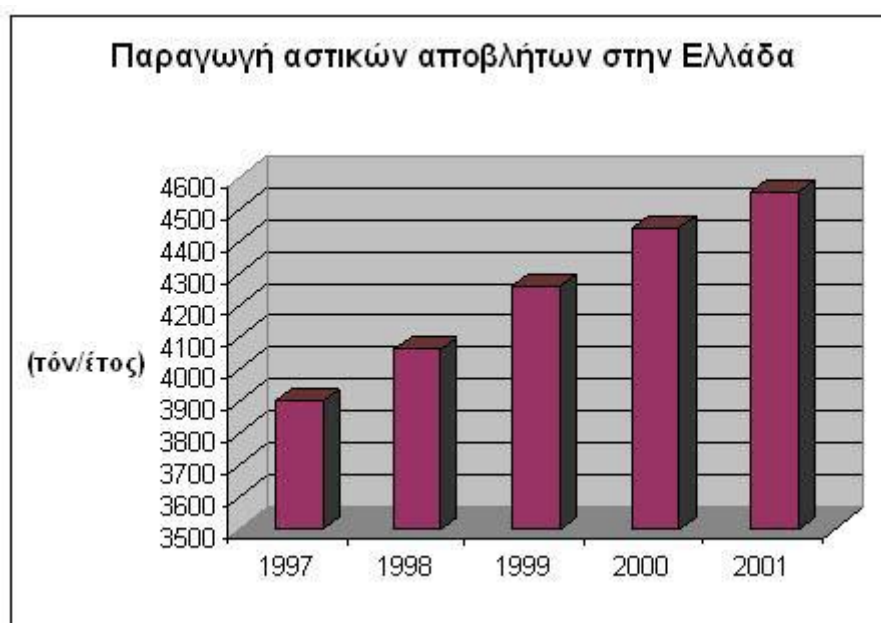
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4 Αποτελέσματα-Ενεργειακή και οικονομική εκτίμηση

4.1 Αποτελέσματα-Ενεργειακή Εκτίμηση

4.1.1 Αποτελέσματα αεριοποίησης

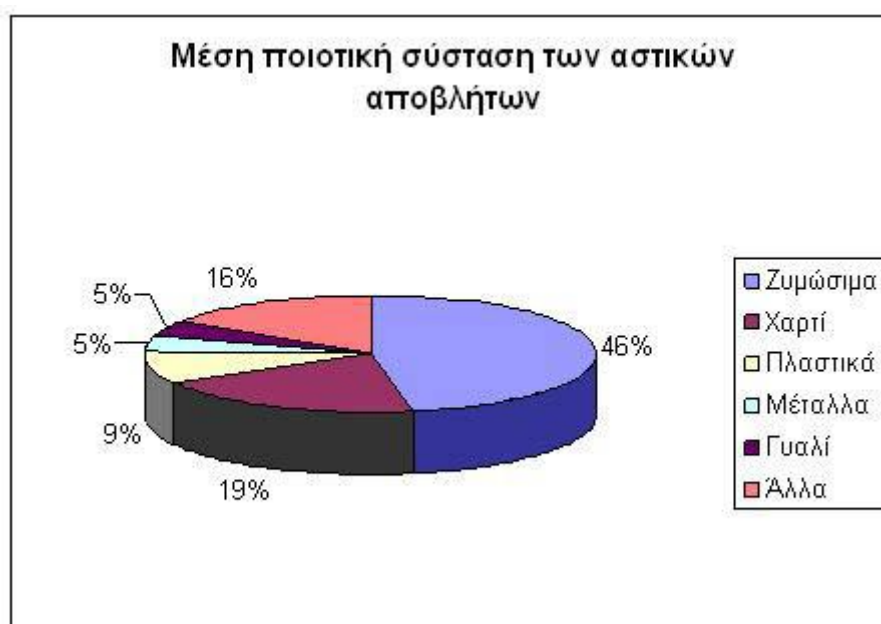
Η προσομοίωση της διεργασίας της αεριοποίησης πραγματοποιήθηκε για τυπική σύσταση πραγματικού Ελληνικού σκουπιδιού. Το Ελληνικό σκουπίδι είναι από τα κακής ποιότητας σκουπίδια, λόγω του ότι περιέχουν υψηλά ποσοστά υγρασίας. Πιο συγκεκριμένα, με βάση τον Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (2003), στην Ελλάδα παράγονται περίπου 4,6 εκατομμύρια τόνοι αστικών αποβλήτων ετησίως. Στην περιφέρεια Αττικής παράγεται το 39% της ετήσιας ποσότητας, ενώ σημαντική ποσότητα (16%) παράγεται και στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας. Το 1997, η μέση παραγωγή ανερχόταν σε 0,97 kg/κάτοικο/ημέρα και το 2001 ανήλθε σε 1,14 kg/κάτοικο/ημέρα. Όπως φαίνεται κι από τις επόμενες εικόνες που παρατίθενται



Σχήμα 4.1: Η παραγωγή αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα με βάση τον Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (2003.)

η ποσότητα αυτή αυξάνεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια, σύμφωνα και με τις εκτιμήσεις των αρμόδιων φορέων που λειτουργούν τους ΧΥΤΑ. Μόνο στην Αττική, εκτιμάται ότι σήμερα η παραγόμενη ποσότητα των αστικών αποβλήτων ξεπερνά τους

6.000 τόνους/ημέρα, ενώ ο κύριος όγκος των αστικών ελληνικών απορριμμάτων είναι ζυμώσιμα. [35]



Σχήμα 4.2: Μέση ποιοτική σύσταση αστικών απορριμμάτων στην Ελλάδα με βάση τον Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (2003).

Η σύσταση της τροφοδοσία μας σε απόβλητο, μαζικής παροχής 750tn/d και 35.2% υγρασίας, φαίνεται στο παρακάτω πίνακα, ενώ η κατώτερη θερμογόνοος δύναμη του ανέρχεται σε 9952kJ/kg.

Κλάσματα μάζας αποβλήτου.	
C	55.6%
H ₂	7.6%
Cl ₂	1.6%
S	0.412%
N ₂	1.4

Πίνακας 4.1: Κλάσματα μάζας τροφοδοσίας αποβλήτου στον αντιδραστήρα.

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης, σε θερμοκρασία αεριοποίησης 1473K, έδωσαν παραγόμενο αέριο σύνθεσης των ακόλουθων χαρακτηριστικών και σύστασης:

Αέριο Σύνθεσης	
MB = 19.30	Όγκος = 14.33m ³ /s
Θερμογόνος Δύναμη = 2.34kWhr/m ³	Πυκνότητα = 0.86 kg/m ³

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά παραγόμενου αερίου σύνθεσης.

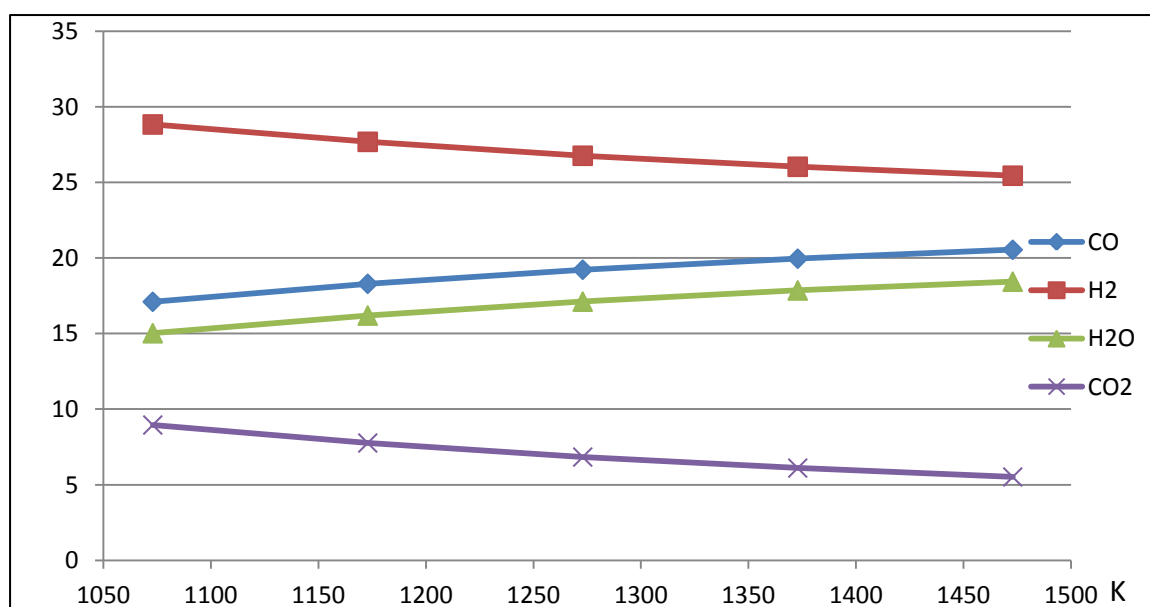
Η σύσταση του αερίου σύνθεσης παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα. Βλέπουμε ότι επιτυγχάνουμε σύσταση υδρογόνου κοντά στο 30% και μονοξειδίου του άνθρακα κοντά στο 24%. Η παρουσία ποσοστού αζώτου οφείλεται στο ότι το οξειδωτικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε για τη διεργασία, ήταν αέρας, ενώ αποτυπώνονται και μικρά ποσοστά H₂S και HCL, η ύπαρξη των οποίων οφείλεται στη παρουσία S και Cl₂ στη σύσταση του αποβλήτου.

Γραμμομοριακό κλάσμα αερίου σύνθεσης	
H ₂	29.98%
N ₂	34.72%
CO	23.76%
CO ₂	0.69%
H ₂ S	0.08%
HCl	0.30%

Πίνακας 4.3: Γραμμομοριακή σύσταση παραγόμενου αερίου σύνθεσης.

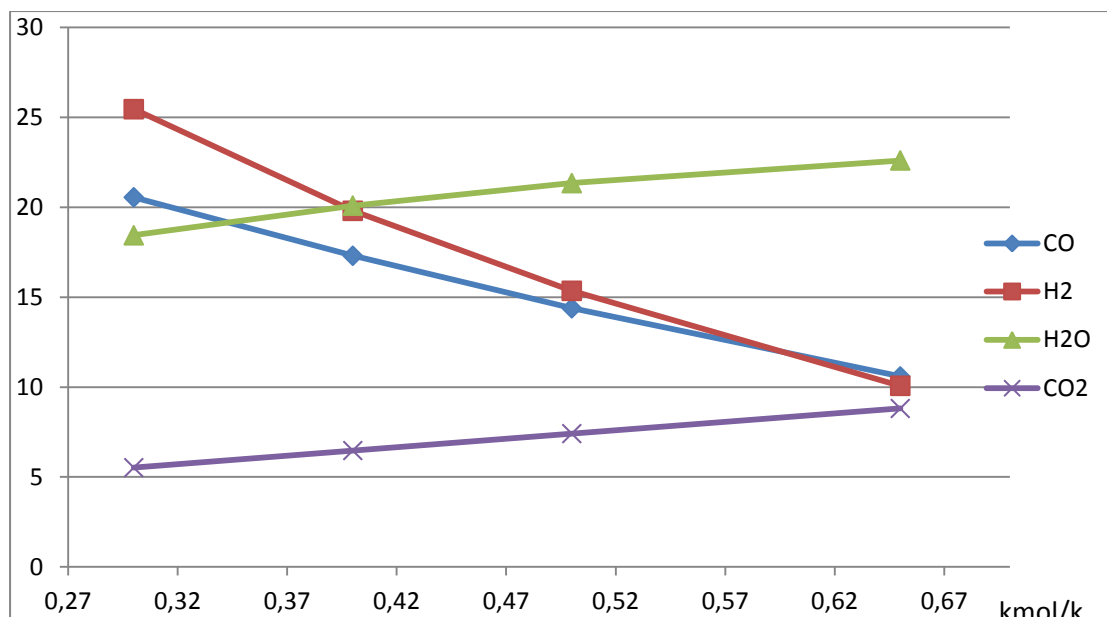
Παρατηρούμε ότι η σύσταση του CO₂ είναι μόλις λίγο πάνω από 0.5%. Αυτό οφείλεται στη μονάδα απορρόφησης CO₂ που χρησιμοποιήθηκε για την απομάκρυνση παραγόμενου CO₂ 6.41% ή 6.313tn/hr, και η οποία επιτυγχάνει 90% απορρόφηση του εν λόγω αερίου.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η μεταβολή των συστάσεων των αποτελούμενων συστατικών του αερίου σύνθεσης με διαδοχική μεταβολή της θερμοκρασίας, της υγρασίας καθώς και του παρεχόμενου αέρα ως οξειδωτικού μέσου. Πιο συγκεκριμένα:



Διάγραμμα 4.1: Μεταβολή της % γραμμομοριακής σύστασης παραγόμενου αερίου σύνθεσης συναρτήσει της θερμοκρασίας K

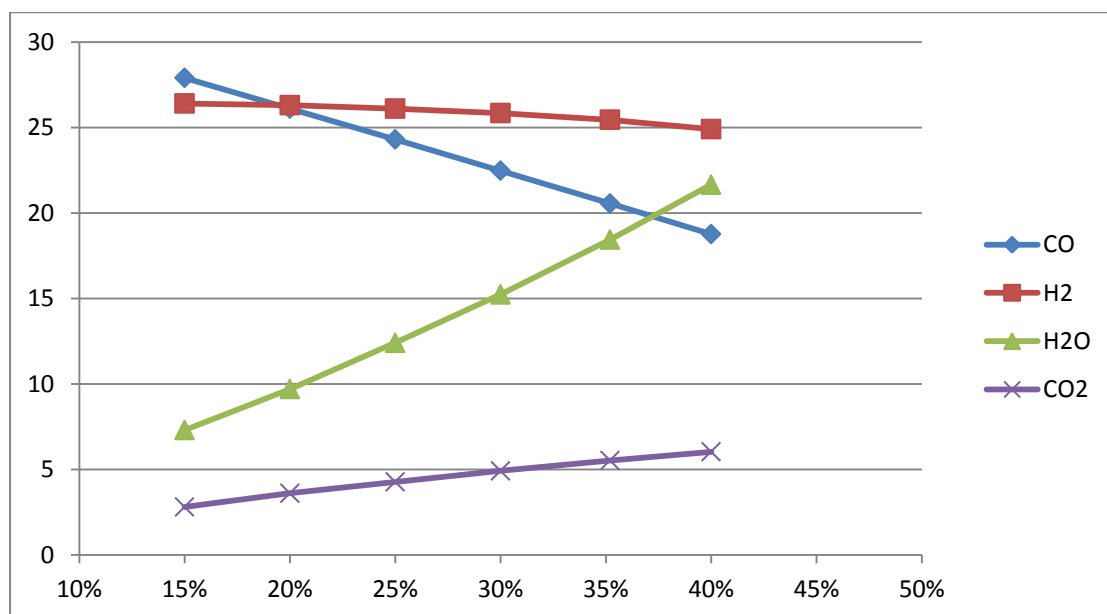
Μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία αεριοποίησης, παρατηρούμε πως αυξάνεται η σύσταση του μονοξειδίου του άνθρακα, ενώ η σύσταση του υδρογόνου παρουσίασε υψηλές τιμές σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες και στη συνέχεια μειώθηκε ελαφρώς έως μια σταθεροποίηση αυτής κοντά στο 25%. Οι μεταβολές που παρατηρούνται είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις μεταβολές των τιμών των σταθερών ισορροπίας των αντιδράσεων με τη θερμοκρασία.



Διάγραμμα 4.2: Μεταβολή της % γραμμομοριακής σύστασης του παραγόμενου αερίου σύνθεσης συναρτήσει της παροχής αέρα.

Μεταβάλλοντας τη παροχή αέρα παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση του οξυγόνου μειώνεται η σύσταση του αερίου σύνθεσης σε μονοξείδιο άνθρακα και υδρογόνο, ενώ αυξάνεται η σύσταση διοξειδίου άνθρακα καθώς και του νερού, υποδηλώνοντας ότι ευνοούνται οι αντιδράσεις καύσης.

Συνεχίζοντας, μεταβάλλοντας την υγρασία μειώνεται η σύσταση του μονοξειδίου του



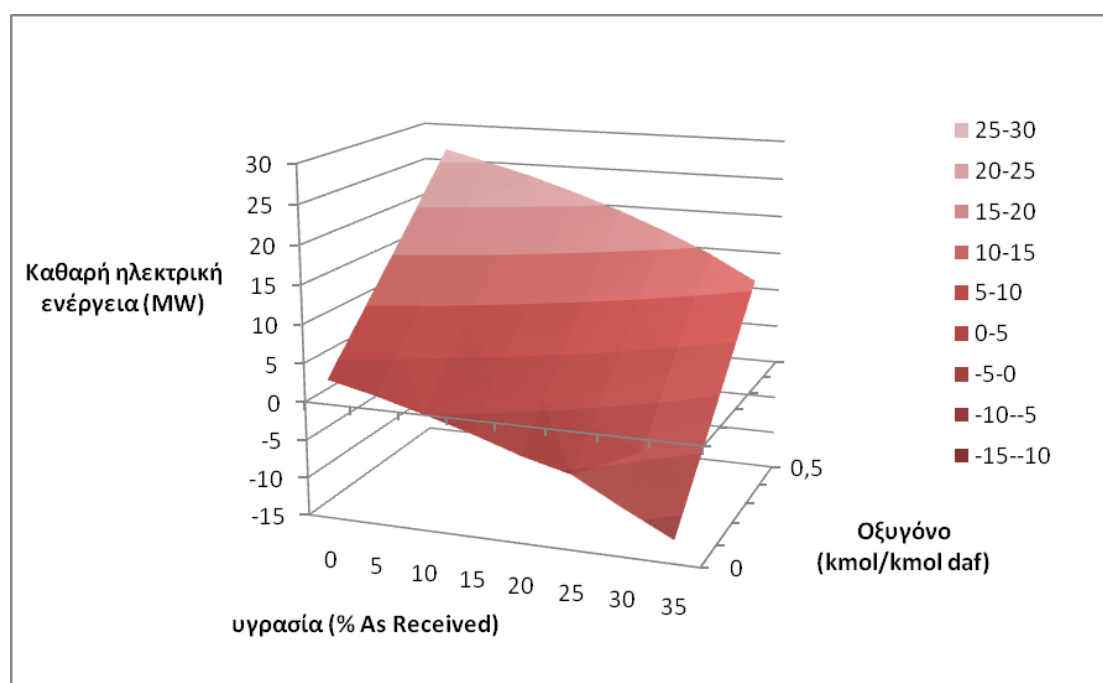
Διάγραμμα 4.3: Μεταβολή της % γραμμομοριακής σύστασης του παραγόμενου αερίου σύνθεσης συναρτήσει της υγρασίας του αποβλήτου.

άνθρακα ενώ παρατηρείται μια μικρή μείωση της σύστασης του υδρογόνου έως μια τιμή κοντά στο 25% όπου σταθεροποιείται. Οι συστάσεις του νερού και το διοξείδιου του άνθρακα αυξάνονται. Και η αύξηση της υγρασίας πέρα από μια τιμή οδηγεί σε συνθήκες καύσης.

4.1.2 Ενεργειακή αποτύπωση αεριοποίησης της διεργασίας

Έχοντας εξετάσει τις λειτουργικές παραμέτρους της διεργασίας μπορούμε να καταλήξουμε στα πρώτα συμπεράσματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της συνολικής διεργασίας αλλά και την κατανάλωση ενέργειας που αυτή απαιτεί. Πρέπει εδώ να αναφερθεί πως η θερμοκρασία της διεργασίας είναι 1473K καθώς έχουν ληφθεί υπ' όψιν δύο περιορισμοί. Βιβλιογραφικά λοιπόν, αρχικά αναφέρεται ότι για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 800 °C επιτυγχάνεται ισορροπία στις χημικές αντιδράσεις της αεριοποίησης και μηδενίζεται η σύσταση του μεθανίου. Δεύτερον, η απαίτηση διάσπασης των υπολειμμάτων υδρογονανθράκων υποδεικνύει την επιλογή ακόμα υψηλότερης θερμοκρασίας.

Στο ακόλουθο διάγραμμα αποτυπώνεται η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.



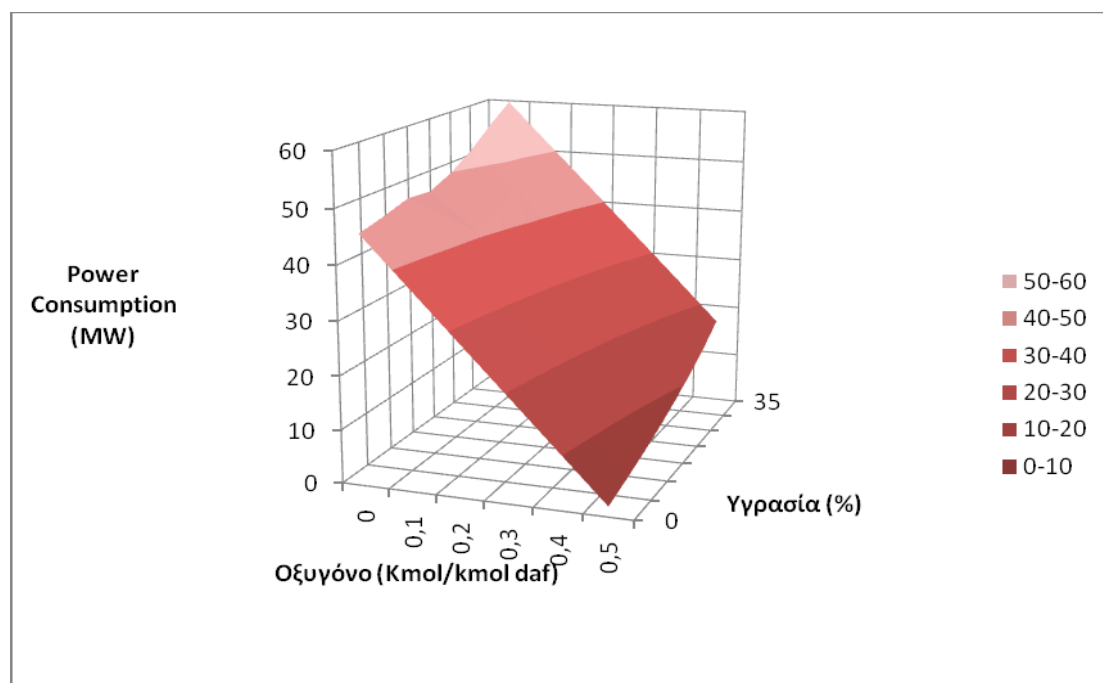
Διάγραμμα 4.4: Μεταβολή της παραγόμενης καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει της υγρασίας του αποβλήτου και της παροχής αέρα.

Παρατηρούμε πώς η αύξηση της υγρασίας οδηγεί σε μείωση της παραγόμενης ενέργειας. Βάση και των παραπάνω διαγραμμάτων, αυτό αιτιολογείται λόγω της μείωσης της σύστασης του μονοξειδίου του άνθρακα και συγκράτησης της σύστασης του υδρογόνου σε μια τιμή κοντά στο 25% με αποτέλεσμα να έχουμε ένα πιο «φτωχό» αέριο σύνθεσης και άρα μικρότερης θερμογόνου δύναμης.

Η παρουσία του οξυγόνου ευνοεί τις εξώθερμες αντιδράσεις καύσης ενώ παράλληλα περιορίζει τις ενδόθερμες αντιδράσεις αεριοποίησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στην τιμή της καθαρά παραγωμομένης ηλεκτρικής ενέργειας. Στην καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επίδραση έχει και η θερμογόνος δύναμη αφού ορίζει το ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου σύνθεσης. Παρόλο όμως που η θερμογόνος δύναμη μειώνεται με αύξηση του οξυγόνου, η καθαρή παραγωγή ενέργειας αυξάνεται. Εξάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι η ελάττωση της καταναλισκόμενης ενέργειας έχει μεγαλύτερη βαρύτητα από την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Το συμπέρασμα αυτό εδραιώνεται αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι στον αντιδραστήρα καταναλώνεται υψηλής ποιότητας ενέργειας (ηλεκτρικό ρεύμα) για την παραγωγή χαμηλότερης ποιότητας ενέργεια αφού από την χημική ενέργεια του καύσιμου αερίου χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μόνο το 40%.

Οπότε για να έχουμε μια ικανοποιητική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα προτιμήσουμε να κινηθούμε σε ένα εύρος ποσοστών υγρασίας κοντά στο 10-15%, συνδυαστικά με μια παροχή αέρα κοντά στο 0.3-04 kmol/ kmol daf.

Στο επόμενο διάγραμμα που ακολουθεί, αποτυπώνεται η ενεργειακή κατανάλωση της διεργασίας:



Διάγραμμα 4.5: Μεταβολή της ενεργειακής κατανάλωσης της διεργασίας συναρτήσει της υγρασίας του αποβλήτου και της παροχής αέρα.

Γενικά θα πρέπει να αναφέρουμε πως η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο επειδή τα τροφοδοτούμενα στον αντιδραστήρα υλικά θα πρέπει να θερμανθούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες αλλά και γιατί ευνοείται η ενδόθερμη αντίδραση water gas shift και έτσι αυξάνονται περαιτέρω οι ενεργειακές απαιτήσεις.

Όσον αφορά τη παροχή οξυγόνου, αυξανόμενη, ελαττώνει τις απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι ευνοούμενες αντιδράσεις καύσης απελευθερώνουν ενέργεια ενώ ταυτόχρονα οι ενδόθερμες αντιδράσεις αεριοποίησης περιορίζονται με την αύξηση του οξυγόνου. Με αυτόν τον τρόπο μέρος της ενέργειας που θα δαπανιόταν από τους πυρσούς καλύπτεται από την ενθαλπία καύσης των συστατικών του απορρίμματος.

Η αύξηση της υγρασίας συμβάλει θετικά στην καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια αφού για τις πρόσθετες ποσότητες νερού πρέπει να δοθεί ενέργεια ίση με τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης και την αισθητή θερμότητα ανύψωσης του νερού στη θερμοκρασία αεριοποίησης. [29]

4.2 Οικονομική Εκτίμηση

Η οικονομική εκτίμηση της διεργασίας της αεριοποίησης περιλαμβάνει την εκτίμηση του πάγιου κόστους εγκατάστασης και του ετήσιου λειτουργικού κόστους της μονάδας.

4.2.1 Διαστασιολόγηση εξοπλισμού

Αρχικά είναι αναγκαίο να γίνει διαστασιολόγηση των βασικών μονάδων για τον υπολογισμό του κόστους αυτών. Αυτές είναι ο αντιδραστήρας και ο εναλλάκτης. Για της ανάγκες της προσομοίωσης στο Aspen Plus V7.2, το σύστημα καθαρισμού του κυκλώνα περιγράφηκε με έναν δεύτερο εναλλάκτη. Ωστόσο στην οικονομική εκτίμηση θα ληφθεί υπ' όψιν το τυπικό κόστος του κυκλώνα, εφόσον αυτό το σύστημα καθαρισμού υφίσταται στις υπάρχουσες εν λειτουργία μονάδες.

4.2.1.1 Αντιδραστήρας

Για την διαστασιολόγηση του αντιδραστήρα θα λάβουμε υπ' όψιν τον όγκο του παραγόμενου αερίου σύνθεσης ο οποίος θα υπολογιστεί βάση της καταστατικής εξίσωσης των τελείων σε θερμοκρασία 1473K και πίεση ατμοσφαιρική. Θυμίζουμε εδώ ότι οι συνθήκες ιδανικότητας καλύπτονται σε χαμηλές πιέσεις έως και 1atm. Ακόμη, βάση του ότι βιβλιογραφικά για την επίτευξη ισορροπίας στον αντιδραστήρα απαιτείται χρόνος παραμονής του αερίου μεταξύ 2-4 sec, ο απαιτούμενος όγκος για την επεξεργασία του αερίου θεωρήθηκε 3 φορές μεγαλύτερος (χρόνος παραμονής 3sec) από την ποσότητα αερίου σύνθεσης που παράγεται ανά δευτερόλεπτο. Ο όγκος αυτός αυξάνεται κατά 50% για να προσομοιώσει και το χώρο που χρειάζεται για την τήξη και υαλοποίηση του ανόργανου υλικού. Παρόλο που το ανόργανο τηγμένο υλικό καταλαμβάνει πολύ μικρότερο όγκο σε σχέση με το αέριο σύνθεσης, η αύξηση αυτή θεωρήθηκε επειδή απαιτεί μεγάλο χρόνο παραμονής. Έτσι λοιπόν, προέκυψε αντιδραστήρας με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Διαστάσεις αντιδραστήρα		
Όγκος αντιδραστήρα: 470m ³	Ύψος: 24.10m	Διάμετρος: 5m
Πυρσοί: 9τεμάχια	Ισχύς:1.2MW ο ένας	

Πίνακας 4.4: Διαστάσεις αντιδραστήρα και χαρακτηριστικά πυρσών.

4.2.1.2 Εναλλάκτης θερμότητας

Για τη διαστασιολόγηση του εναλλάκτη στη μονάδα της αεριοποίησης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του συντελεστή απόδοσης που αναπτύσσεται παρακάτω ενώ θεωρήθηκε ότι πρόκειται για εναλλάκτη κελύφους-σωλήνων.

Εναλλάκτης κελύφους-σωλήνων

Ο εναλλάκτης κελύφους-σωλήνων είναι ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος τύπος εξοπλισμού μεταφοράς θερμότητας στη βιομηχανία (αντιπροσωπεύει τουλάχιστον το 60% των εναλλακτών που χρησιμοποιούνται σήμερα), δεδομένου ότι παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα που καθιστούν προσιτή τη χρήση του και συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- έχει μεγάλη επιφάνεια και σχετικά μικρό όγκο
- έχει καλή μηχανολογική διάταξη και σχήμα που επιτρέπει τη λειτουργία υπό πίεση
- παρουσιάζει ευκολία στο καθαρισμό του
- μπορεί να κατασκευαστεί από μεγάλη ποικιλία υλικών ανάλογα με τις απαιτήσεις των ρευστών που προβλέπεται να χρησιμοποιηθούν για την εναλλαγή θερμότητας, με εμβαδά επιφανειών από 0.1-100000m²
- έχουν αναπτυχθεί καθιερωμένες διαδικασίες σχεδιασμού του
- έχουν αναπτυχθεί αξιόπιστες μέθοδοι κατασκευής

Ο εναλλάκτης κελύφους-σωλήνων αποτελείται από μια δέσμη σωλήνων που περικλείεται από κυλινδρικό κέλυφος. Τα άκρα των σωλήνων είναι προσαρμοσμένα σε σταθερά φύλλα και φέρει στο εσωτερικό του ανακλαστήρες για τη καθοδήγηση της ροής του ρευστού και τη στήριξη των σωλήνων. Οι ανακλαστήρες επίσης αυξάνουν τη ταχύτητα της ροής και βελτιώνουν τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Ανάλογα με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά οι εναλλάκτες κελύφους-σωλήνων διακρίνονται σε:

- Σταθερής προσαρμογής σωλήνων, οποίος χρησιμοποιείται περισσότερο από κάθε άλλο λόγω της απλής και οικονομικής κατασκευής του.
- Σε τύπο U, ο οποίος απορροφά τις τάσεις που οφείλονται σε θερμική διαστολή.
- Σε εναλλάκτες με εσωτερική/ εξωτερική επιπλέονσα κεφαλή, όπου καθαρίζονται ευκολότερα αλλά έχουν περίπλοκη κατασκευή και 25% υψηλότερο κόστος από τον πρώτο τύπο.

ενώ οι διατάξεις των σωλήνων μπορεί να είναι ή ισόπλευρη τριγωνική ή τετραγωνική ή περιστρεμμένη τετραγωνική.

Μέθοδος του συντελεστή απόδοσης

Ανεξάρτητα από τη διάταξη της ροής των ρευστών και τον τύπο του εναλλάκτη, η συνολική θερμορροή μεταξύ θερμού και ψυχρού ρευστού δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{Q} = \dot{m}_h c_{p,h} \cdot (T_{h,i} - T_{h,o}) = \dot{m}_c c_{p,c} \cdot (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (4-1)$$

Όπου :

m: παροχή του ρευστού [kg/sec]

c_p: ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας του ρευστού [kJ/ kg K]

T: η θερμοκρασία του ρευστού [K]

Ο δείκτης 'h' αναφέρεται στο θερμό ρευστό και ο δείκτης 'c' στο ψυχρό, ο δείκτης 'i' υποδηλώνει είσοδο και ο δείκτης ο έξοδο. Ακριβέστερα οι θερμοκρασίες της εξίσωσης (4.1) είναι οι μέσες θερμοκρασίες των δύο ρευστών στην είσοδο και την έξοδο του εναλλάκτη.

Η εξίσωση (4.1) προκύπτει από το ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ των δύο ρευστών λαμβάνοντας τις εξής παραδοχές:

- ▶ οι απώλειες θερμότητας του εναλλάκτη στο περιβάλλον είναι αμελητέες όπως επίσης είναι αμελητέες
- ▶ οι μεταβολές της κινητικής και δυναμικής ενέργειας των ρευστών κατά τη διαδρομή τους μέσα στον εναλλάκτη είναι αμελητέες
- ▶ δεν πραγματοποιείται αλλαγή φάσης στα ρευστά
- ▶ ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας του εναλλάκτη θεωρείται σταθερός.

Με τον όρο βαθμό απόδοσης εναλλάκτη θερμότητας ορίζουμε το λόγο της πραγματικής θερμορροής στον εναλλάκτη προς την μέγιστη δυνατή θερμορροή:

$$\varepsilon \equiv \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} \Rightarrow \varepsilon = \frac{C_h \cdot (T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{\min} \cdot (T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{C_c \cdot (T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{\min} \cdot (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (4-2)$$

Όπου $C_c = \dot{m}_c \cdot c_{p,c}$ και $C_h = \dot{m}_h \cdot c_{p,h}$

ε: η αποδοτικότητα (Effectiveness) του εναλλάκτη θερμότητας

C_{min}: (ελάχιστη ολική θερμοχωρητικότητα) ταυτίζεται με το μικρότερο από τα C_h και C_c

Πρακτικά, η αποδοτικότητα εναλλάκτη θερμότητας (ε) είναι πάντα το πηλίκο της ενέργειας που πραγματικά μεταφέρεται στον εναλλάκτη από το θερμό στο ψυχρό ρεύμα προς το μέγιστο ποσό ενέργειας που θα μπορούσε να μεταφερθεί από το ένα ρεύμα στο άλλο. Η χρησιμότητα της αποτελεσματικότητας ε του εναλλάκτη (προφανώς $0 \leq \varepsilon \leq 1$) προκύπτει από το γεγονός ότι αν είναι γνωστή μαζί με τις θερμοκρασίες εισόδου των ρευστών, τότε η πραγματική θερμορροή στον εναλλάκτη προκύπτει προφανώς από την εξίσωση:

$$\dot{Q} = \varepsilon C_{\min} \cdot (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (4-3)$$

Αποδεικνύεται ότι για κάθε εναλλάκτη η αποτελεσματικότητα ε είναι:

$$\varepsilon = fn \left(\frac{C_{\min}}{C_{\max}}, NTU \right) \quad (4-4)$$

Όπου ο Αριθμός των Μονάδων Μεταφοράς (Number of Transfer Units) είναι μια αδιάστατη παράμετρος που ορίζεται από τη σχέση:

$$NTU = \frac{U \cdot A}{C_{\min}} \quad (4-5)$$

Ο ε προσδιορίζεται θεωρητικά από διαγράμματα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία είτε πρακτικά θα δίνεται από τον κατασκευαστή του εναλλάκτη.

Βάση των παραπάνω αλλά και των ότι:

- Ο εναλλάκτης θερμότητας θεωρήθηκε ότι έχει συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ίσο με $0,1 \text{ kJ/s m}^2 \text{ K}$.
- Η αισθητή θερμότητα του αερίου σύνθεσης αντιστοιχεί στην ελάττωση της θερμοκρασίας του από τους 1473 K (θερμοκρασία αεριοποίησης) στους 773 K και υπολογίζεται εφόσον η μαζική παροχή του αερίου σύνθεσης είναι γνωστή.
- Υπολογίστηκε η μέγιστη τιμή μεταφερόμενης ενέργειας η οποία διορθώθηκε με το συντελεστή απόδοσης. [30],[31]

Με γνωστές όλες τις θερμοκρασίες στα άκρα του εναλλάκτη υπολογίζεται μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά και έπειτα η απαιτούμενη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας η οποία προκύπτει ίση με $A=250\text{m}^2$

4.2.2 Οικονομικά στοιχεία

Οι τιμές που παρατίθενται παρακάτω αντλήθηκαν από τα βιβλία «Σχεδιασμός και Οικονομική Μελέτη Εγκαταστάσεων για Μηχανικούς» των Max S. Peters και Klaus D. Timmerhaus, και «*Gasification technologies, a primer for engineers and scientists*» των Nicholas P. Cheremisinoff και A. John Rezaian και δίνονται ανά κανονικό μέτρο αερίου σύνθεσης. Συγκεκριμένα για τη μονάδα απορρόφησης CO₂ τα οικονομικά στοιχεία αντλήθηκαν από την διπλωματική του Ηλία Νικολαΐδη «*Προσομοίωση της διεργασίας απορρόφησης διοξειδίου του άνθρακα από απαέρια ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων*» ενώ το κόστος των πυρσών προκύπτει από την εταιρεία από επικοινωνία με την εταιρία Phoenix Solutions Co., κατασκευάστριας πυρσών πλάσματος στην Αμερική.

Στον παρακάτω πίνακα είναι συγκεντρωμένα τα εύρη πάγιου κόστους εγκατάστασης και ετήσιου λειτουργικού κόστους για τα συστήματα καθαρισμού. Τα κόστη δίνονται σε δολάρια του 1995 και αναπροσαρμόζονται χρονικά στο 2014 σύμφωνα με δεδομένα που αντλήθηκαν από το *Bureau of Labor Statistics*. Από τα εύρη τιμών που δίνονται για τα κόστη επιλέχθηκαν τα άνω όρια. Αυτό έγινε καταρχήν για να μελετηθεί το πιο ακριβό σενάριο (σύμφωνα με τα δοσμένα δεδομένα). Επιπλέον, αναφέρεται ότι σε διεργασίες υψηλών παροχών και υψηλών συγκεντρώσεων σε ακαθαρσίες το κόστος είναι χαμηλότερο σε σχέση με διεργασίες χαμηλών συγκεντρώσεων και χαμηλών παροχών. [30], [31], [32], [33]

Συστήματα καθαρισμού	Πάγιο κόστος εγκατάστασης (\$1995/Nm ³)	Ετήσιο λειτουργικό κόστος (\$1995/ Nm ³)
Κυκλώνας	4.200 - 5.100	1600 – 27.000
Water Quence	6.700 - 59.000	8.700 – 250.000
Packed bed scrubber (Απορρόφηση HCl)	22.500 – 120.000	33.500 – 153.000
Impingement-Plate/ Tray Tower Scrubbers (Απορρόφηση H ₂ S)	4.500 – 25.000	5.200 – 148.000
Venturi scrubber	6.700 – 59.000	8.700-250.000
Wet electrostatic precipitator	65.000 – 400.000	15.000-25.000

Πίνακας 4.5: Λειτουργικά και πάγια κόστη συστημάτων καθαρισμού τυπικών διατάξεων αεριοποίησης.

Μονάδα	Τιμή
Αντιδραστήρας	50.000 \$/m ³
Πυρσός πλάσματος 1.2MW	1.275.000 / πυρσό
Εναλλάκτης	10.000 \$ /m ²
Κόστος εξοπλισμού απορρόφησης CO ₂	17.238.854 \$
Σύστημα ανάκτησης θερμότητας 33MW (11 μηχανές αερίου των 3MW)	1.515.152 \$/MW

Πίνακας 4.6: Κόστη για τα υπόλοιπα τμήματα της διεργασίας της αεριοποίησης.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω προκύπτει ο ακόλουθο πίνακας κόστους του πάγιου εξοπλισμού της διεργασίας της αεριοποίησης καθώς και το λειτουργικό κόστος της μονάδας μας ανά τόνο αποβλήτου. Ακόμη πρέπει να αναφερθεί πως το πρόστιμο εκπομπών CO₂ είναι 10 €/tnCO₂. Υπενθυμίζουμε πώς η μονάδα απορρόφησης CO₂ απομακρύνει F=6.313tnCO₂/hr, με και πως η τροφοδοσία αστικού αποβλήτου είναι F_{waste}=15.2tn/hr.

Τυπικά Κόστη σε \$	
Κόστος Αντιδραστήρα και πυρσών	55.996.575
Κόστος εναλλάκτη	7.093.430
Κόστος συστήματος ανάκτησης θερμότητας	50.000.000
Κόστος απορρόφησης HCl	2.579.014
Κόστος απορρόφησης CO ₂	17.238.854
Κόστος απορρόφησης H ₂ S	537.294
Κόστος επιπρόσθετου εξοπλισμού (κυκλώνας, ηλ. φίλτρα κλπ)	15.543.035
Συνολικό κόστος εξοπλισμού:	148.988.202\$ ή
	115.494.730€

Πίνακας 4.7: Συνολικό τυπικό κόστος πάγιου εξοπλισμού της εγκατάστασης.

Στα λειτουργικά κόστη της μονάδας περιλαμβάνονται μόνο τα κόστη των συστημάτων καθαρισμού ενώ τα λοιπά λειτουργικά κόστη παραλείπονται. Και στη περίπτωση του κόστους λειτουργίας του εκάστοτε συστήματος καθαρισμού χρησιμοποιήθηκε το άνω όριο εύρους τιμών του πίνακα 4.5. Τα ανηγμένα λειτουργικά κόστη αναπροσαρμόστηκαν χρονικά δεχόμενα αύξηση κατά 45 %, τιμή που αντλήθηκε από το «Bureau of Labor Statistics».

Συστήματα καθαρισμού	Κόστος \$
Κυκλώνας	657.000
Water Quence	6.083.000
Packed bed scrubber (Απορρόφηση HCl)	3.723.000
Impingement-Plate/ Tray Tower Scrubbers (Απορρόφηση H ₂ S)	3.601.000
Venturi scrubber	6.083.000
Wet electrostatic precipitator	608.300
Συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος:	20.755.300\$ ή 16.089.379€
	58.78€/tn αποβλήτου
Κόστος δέσμευσης CO ₂	21.3€/ tn αποβλήτου
Ανηγμένο ετήσιο λειτουργικό κόστος:	80.08€/tn αποβλήτου

Πίνακας 4.8: Συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης.

Ουσιαστικά προκύπτει ότι το συνολικό κόστος εξοπλισμού ανέρχεται σε 115.494.730€ ενώ του ετήσιο ανηγμένο λειτουργικό κόστος σε 80.08€/tn αποβλήτου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5 Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, προσομοιώθηκε η διεργασία της αεριοποίησης πλάσματος με χρήση του προσομοιωτή Aspen Plus. Είναι σημαντικό να αναφερθούμε αρχικά στο γεγονός ότι η πολυπλοκότητα των διεργασιών που προσομοιώνονται μέσω του Aspen είναι δυνατόν να δυσχεραίνει τη σύγκλιση ορισμένων τμημάτων ή “blocks” της προσομοίωσης. Γι’ αυτό το λόγο είναι πολύ σημαντικές οι παραδοχές που θα ληφθούν εξαρχής για την κάθε διεργασία ώστε συνολικά να ελαχιστοποιούνται περιπτώσεις μη σύγκλισης.

Συνεχίζοντας, πρέπει να τονιστεί ότι το θερμοδυναμικό μοντέλο GASifeq, το οποίο αναπτύχθηκε υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή κυρίου Επαμεινώνδα Βουτσά, από τον διδάκτορα Ανδρέα Μουντούρη, επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα που εξάγονται από τον προσομοιωτή Aspen και έχουν βασιστεί στις θερμοδυναμικές βιβλιοθήκες του Aspen.

Πιο συγκεκριμένα για την διεργασία της αεριοποίησης, για δεδομένη σύσταση τροφοδοσίας, προκύπτει πώς με την αύξηση της υγρασίας και της παροχής οξυγόνου, αρχικά οδηγούμαστε σε μείωση της θερμογόνου δύναμης του παραγόμενου αερίου σύνθεσης. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως ενισχύονται οι εξώθερμες αντιδράσεις της διεργασίας, και πως απομακρυνόμαστε από τις συνθήκες αεριοποίησης. Με αύξηση και τις τρίτης λειτουργικής παραμέτρου της διεργασίας, της θερμοκρασίας, παρατηρούμε πως σημειώνεται μια μικρή αύξηση της θερμογόνου δύναμης του αερίου σύνθεσης, καθώς αυξάνεται η σύσταση του μονοξειδίου του άνθρακα. Ακόμη φαίνεται να επιτυγχάνεται παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως 26MW, με μέγιστη ενεργειακή κατανάλωση κοντά στα 50MW.

Όσον αφορά την απορρόφηση του CO₂, επιτεύχθηκε 90% απομάκρυνση CO₂ από το ρεύμα του αερίου σύνθεσης, ενώ η ύπαρξη HCl και H₂S ήταν πολύ μικρή καθαρό αέριο ρεύμα τις διεργασίας.

Από την οικονομική εκτίμηση της διεργασίας, προκύπτει πως το συνολικό λειτουργικό κόστος, συμπεριλαμβανομένου και του κόστους απομάκρυνσης CO₂ της

μονάδας, ανέρχεται στα 80.08€/tn αποβλήτου. Ωστόσο είναι προτιμητέα μια μονάδα διαχείρισης CO₂, από την βούληση για αγορά δικαιωμάτων εκπομπών ρύπων.

Ολοκληρώνοντας την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, θα πρέπει να γίνει μια αναφορά σε επόμενες ενέργειες γύρω από τη σπουδή της αεριοποίησης. Αρχικά θα ήταν ενδιαφέρον αν μελετηθούνε κι άλλες τροφοδοσίες αποβλήτων διαφορετικής σύστασης.

Ακόμη, μια έρευνα όσον αφορά τα υλικά κατασκευής τέτοιων μονάδων και την αντοχή αυτών στις συνθήκες της αεριοποίησης, θα έδινε επιπλέον δεδομένα τόσο για την ίδια τη διεργασία της αεριοποίησης όσο και για το οικονομικό κόστος αυτής.

Τέλος, θα πρέπει να υπάρξει ένα πιο στοχευμένο ενδιαφέρον ως προς την περιβαλλοντική αντίληψη της κοινωνίας και της διεργασίας της αεριοποίησης.

Βιβλιογραφία

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Khoo, H.H., Life cycle impact assessment of various waste conversion technologies, *Waste Management* 29 (2009) 1892–1900.
- [2] Φελεσκούρα, Χ., Παπαϊωάννου, Ε., Σύγχρονες τεχνολογίες ανακύκλωσης απορριμμάτων - Διαχείριση και ενεργειακή αξιοποίηση απορριμμάτων, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Χαλκίδα, 2004.
- [3] Περιφέρεια Αττικής, Αναθεώρηση Περιφερειακού Σχεδίου Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων(ΠΕ.Σ.Δ.Α.) Περιφέρειας Αττικής, 2006.
- [4] Institution of Mechanical Engineers, Energy from waste, A wasted opportunity, United Kingdom, 2007.
- [5] Murphy, J.D., McKeogh, E., Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste, *Renewable Energy* 29 (2004) 1043-1057.
- [6] Weil, S., Hamel, S., Krumm, W., Hydrogen energy from coupled waste gasification and cement production - a thermochemical concept study, *International Journal of Hydrogen Energy* 31 (2006) 1674 – 1689.
- [7] Γιδάρακος, Ε., Επικίνδυνα Απόβλητα, Διαχείριση-Επεξεργασία-Διάθεση, Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη, 2006.
- [8] European Commission, Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, 2006.
- [9] Yang H.C., Kim, J.H., Characteristics of dioxins and metals emission from radwaste plasma arc melter system, *Chemosphere* 57 (2004) 421–428.
- [10] Μαυρόπουλος Α. , «Επεξεργασία αποβλήτων: από την ιδέα στην υλοποίηση», ΟΙΚΟΠΟΛΙΣ Τεύχος 1,2003.
- [11] Κόλλιας Π., Απορρίμματα Αστικά & Βιομηχανικά: Συλλογή – Μεταφορά – Ανακύκλωση – Υγειονομική Ταφή – Λιπασματοποίηση – Καύση, 1993.
- [12] Maoyun He, Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of municipal solid waste (MSW): Influence of catalyst and temperature on yield and product composition, School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, China, 2008.

- [13] Bridgwater A.V., Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading, Aston University Bioenergy Research Group, Birmingham, UK, 2011.
- [14] Youngchul, B., Moohyun, Ch., Soon-Mo, H., and Jaewoo, Ch., Gasification for practical applications, Intech (2012), 183-210.
- [15] Koukouzas, N., Co-gasification of solid waste and lignite – A case study for Western Macedonia, Centre for Research and Technology Hellas (CERTH)/Institute for Solid Fuels Technology and Applications (ISFTA),Ptolemais, Greece, 2007.
- [16] Χριστοφορίδης,Θ., Αριθμητική διερεύνηση καύσης υδρογόνου και αερίου σύνθεσης για εφαρμογές σε συστήματα καύσης και μετατροπής ενέργειας, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Μηχ.Μηχ, 2009.
- [17] Scheidl, K., Boos, R., Prey T. & Wurst, F., High temperature gasification (HTG) pilot plant studies with different waste materials: formation of PCDD/F and older organic pollutants, Chemosphere, 23, (8-10) (1991) 1507-1514.
- [18]Ahmed, I., Gupta, A.K., Evolution of syngas from cardboard gasification, Applied Energy 86 (2009) 1732–1740.
- [19] Belgiorno, V., De Feo, G., Rocca, C. D., Napoli, R.M.A., Energy from gasification of solid wastes, Waste Management 23 (2003) 1-15.
- [20] Bjorklunda, A., Melainab, M., Keoleianb, G., Hydrogen as a transportation fuel produced from thermal gasification of municipal solid waste: an examination of two integrated technologies, International Journal of Hydrogen Energy 26 (2001) 1209 – 1221.
- [21] Brothier, M., Gramondi, P., Poletiko, C., Michon, U., Labrot, M., Hacala, A., Biofuel and hydrogen production from biomass gasification by use of thermal plasma, High Temperature Material Processes 11 (2007) (2) 231-244.
- [22] He, M., Xiao, B., Liu, S., Guo, X., Luo, S., Xu, Z., Feng, Y., Hu, Z., Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of municipal solid waste (MSW): Influence of steam to MSW ratios and weight hourly space velocity on gas production and composition, International Journal of hydrogen energy 34 (2009) 2174-2183.
- [23] Μουντούρης Α., Θερμοδυναμική προσομοίωση της αεριοποίησης πλάσματος για τη διαχείριση αποβλήτων, Διδακτορική διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα, Απρίλιος 2007.
- [24] <http://www.plasmas.org/what-are-plasmas.htm>

- [25] Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Patscheider, J. Promreuk, S., Cocke, D.L., Plasma chemistry as a tool for green chemistry, environmental analysis and waste management, Journal of Hazardous Materials B 79 (2000) 301-320.
- [26] Chang, J.S., Recent development of plasma pollution control technology: a critical review, Science and Technology of Advanced Materials 2 (2001) 571-576.
- [27] Herdrich, G. & Auweter-Kurtz, M., Inductively heated plasma sources for technical applications, Vacuum 80 (2006) 1138-1143.
- [28] Juniper Consultancy Services Limited, Independent Waste Technology Reports, Plasma Its role in waste processing: A DecisionMaker's Guide, September 2006, Bathurst house, Bisley GL6 7NH, England.
- [29] Νικολάου, Α., Θερμοδυναμική Προσομοίωση και Τεχνικοοικονομική Μελέτη της Αεριοποίησης Πλάσματος για την Επεξεργασία Στερεών Αστικών Απορριμμάτων, Διπλωματική εργασία, Σχολή Χημ. Μηχ., ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2010
- [30] Peters, Timmerhaus, West, Σχεδιασμός και Οικονομική Μελέτη Εγκαταστάσεων για Μηχανικούς, 5η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2006.
- [31] Ζαχαρίας Μαρούλης, Food Process Design, Marcel Dekker, 2003.
- [32] Phoenix Solution Company, USA, Minneapolis, www.phoenixsolutionsco.com
- [33] John Rezaian, Nicholas P. Cheremisinoff, Gasification, A Primer for Engineers and Scientists, Taylor & Francis Group (CRC press), 2005.
- [34] Bureau of Labor Statistics, <http://data.bls.gov/cgi-bin/cpicalc.pl>
- [35] <http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=95>
- [36] http://www.aspentech.com/solutions/industry_solutions/index.aspx
- [37] Νικολαΐδης Ηλίας, Προσομοίωση της διεργασίας απορρόφησης διοξειδίου του άνθρακα από απαερία ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων, Αθήνα, 2013

Παράρτημα

7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Σχήμα 1.1: Πυραμίδα ιεράρχησης των προτεραιοτήτων στη διαχείριση των στερεών αποβλήτων. Σελ. 8

Σχήμα1.2: Επιλογές θερμικής επεξεργασίας στερεών αποβλήτων. Σελ. 11

Πίνακας 1.1: Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ Σελ. 11

Σχήμα 1.3: Τύποι Αποτεφρωτών (α) κινούμενων σχάρων (β) περιστρεφόμενου κλιβάνου (γ) ρευστοποιημένης κλίνης (Finbioenergy, 2006). Σελ. 15

Σχήμα 1.4: Τυπική ροή μονάδας αποτέφρωσης. Σελ.15

Σχήμα 1.5: Ροή της διεργασίας της πυρόλυσης. Σελ. 20

Σχήμα 1.6: Ροή της διεργασίας της πυρόλυσης. Σελ. 24

Εικόνα 1.1: Μονάδα αεριοποίησης ΑΣΑ στη Chiba (Ιαπωνία). Σελ.28

Σχήμα 2.1: Πλάσμα(4^η κατάσταση της ύλης). Σελ. 31

Σχήμα 2.2: Τεχνολογίες εργοστασίου αεριοποίησης θερμικού πλάσματος για την επεξεργασία των στερεών αποβλήτων. Σελ. 36

Σχήμα 2.3: Διάγραμμα ροής αεριοποίησης πλάσματος. Σελ. 37

Σχήμα 2.4: Ζώνες διεργασιών σε αντιδραστήρα (α) αντιρροής (updraft) και (β) ομορροής (downdraft). Σελ. 40

Σχήμα 2.5: Πυρσός πλάσματος μη μεταβίβασης. Σελ. 43

Σχήμα 2.6: Τυπική μονάδα αεριοποίησης πλάσματος. Σελ. 49

Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής - 1^ο τμήμα της διάταξης της αεριοποίησης. Σελ. 52

Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής - 2^ο τμήμα της διάταξης της αεριοποίησης. Σελ. 53

Εικόνα 3.2: Εισαγωγή αντιδράσεων στο Aspen Plus. Σελ. 62

Πίνακας 3.1: Τιμές σταθερών ισορροπίας στο Aspen Plus. Σελ. 62

Εικόνα 3.3: Εισαγωγή σταθερών ισορροπίας στο Aspen Plus. Σελ. 63

Πίνακας 3.2: Τιμές κινητικών αντιδράσεων. Σελ. 63

Εικόνα 3.4: Εισαγωγή κινητικών σταθερών στο Aspen Plus. Σελ. 64

Πίνακας 3.1: Γραμμομοριακά κλάσματα Aspen-Gasifeq. Σελ. 65

Πίνακας 3.2: Κλάσματα μάζας Aspen-Gasifeq-Thermoselect. Σελ. 66

Σχήμα 4.1: Η παραγωγή αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα με βάση τον Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (2003.) Σελ. 68

Σχήμα 4.2: Μέση ποιοτική σύσταση αστικών απορριμμάτων στην Ελλάδα με βάση τον Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (2003). Σελ. 69

- Πίνακας 4.1:** Κλάσματα μάζας τροφοδοσίας αποβλήτου στον αντιδραστήρα. Σελ. 69
- Πίνακας 4.2:** Χαρακτηριστικά παραγόμενου αερίου σύνθεσης. Σελ. 70
- Πίνακας 4.3:** Γραμμομοριακή σύσταση παραγόμενου αερίου σύνθεσης. Σελ. 70
- Διάγραμμα 4.1:** Μεταβολή της % γραμμομοριακής σύστασης παραγόμενου αερίου σύνθεσης συναρτήσει της θερμοκρασίας K. Σελ. 71
- Διάγραμμα 4.2:** Μεταβολή της % γραμμομοριακής σύστασης του παραγόμενου αερίου σύνθεσης συναρτήσει της παροχής αέρα. Σελ. 72
- Διάγραμμα 4.3:** Μεταβολή της % γραμμομοριακής σύστασης του παραγόμενου αερίου σύνθεσης συναρτήσει της υγρασίας του αποβλήτου. Σελ. 72
- Διάγραμμα 4.4:** Μεταβολή της παραγόμενης καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει της υγρασίας του αποβλήτου και της παροχής αέρα. Σελ. 73
- Διάγραμμα 4.5:** Μεταβολή της ενεργειακής κατανάλωσης της διεργασίας συναρτήσει της υγρασίας του αποβλήτου και της παροχής αέρα. Σελ. 75
- Πίνακας 4.4:** Διαστάσεις αντιδραστήρα και χαρακτηριστικά πυρσών. Σελ. 76
- Πίνακας 4.5:** Λειτουργικά και πάγια κόστη συστημάτων καθαρισμού τυπικών διατάξεων αεριοποίησης. Σελ. 80
- Πίνακας 4.6:** Κόστη για τα υπόλοιπα τμήματα της διεργασίας της αεριοποίησης. Σελ. 81
- Πίνακας 4.7:** Συνολικό τυπικό κόστος πάγιου εξοπλισμού της εγκατάστασης. Σελ. 81
- Πίνακας 4.8:** Συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης. Σελ. 82