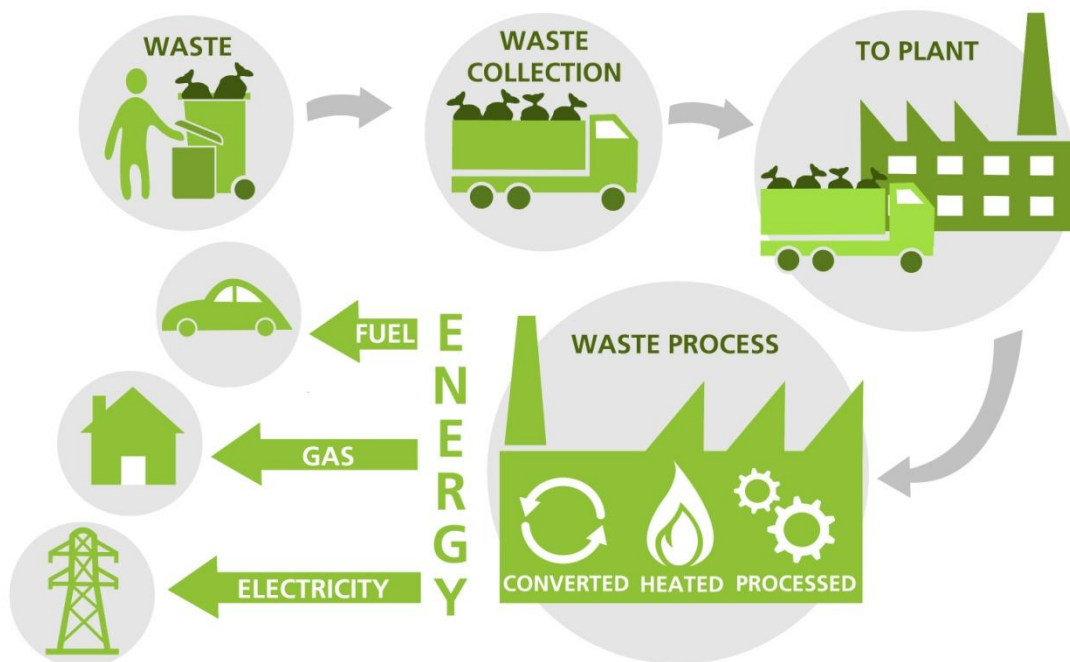




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός διεργασιών προς παραγωγή ενέργειας
από Αστικά Στερεά Απορρίμματα.
Μελέτη περίπτωσης: Αττική



Κρητικός Νικόλαος – Αλέξανδρος

Υπεύθυνος καθηγητής: Χατζηαβραμίδης Δημήτριος

Αθήνα, Απρίλιος 2014

Ευχαριστίες

Η εργασία που ακολουθεί συντάχθηκε με καταβολή προσωπικού χρόνου, κόπου και πολλής φαιά ουσίας αλλά θα ήταν ακατόρθωτο χωρίς την συμβολή ορισμένων ατόμων. Για τον λόγο αυτό θέλω να ευχαριστήσω:

Τον καθηγητή μου, κ. Χατζηαβραμίδη Δημήτριο που μου έδωσε την ευκαιρία να συνεργαστώ μαζί του, ένα άτομο του οποίου το προσωπικό έργο με έπεισε για την ικανότητα, την σημασία και την αξία του χημικού μηχανικού.

Τον πατέρα μου, που με τον, έστω και ανορθόδοξο, τρόπο του με βοήθησε να καλλιεργήσω έναν ικανό και σθεναρό χαρακτήρα.

Την μητέρα μου, που με την, παραπάνω από επαρκή, παρουσία της μέχρι σήμερα με στηρίζει και με ωθεί να προχωρήσω εμπρός στην ζωή μου.

Την αγαπημένη μου αδερφή, που για μένα είναι το ζωντανό παράδειγμα ότι ο άνθρωπος μπορεί να προσπαθήσει πολύ σκληρά και επίμονα όταν κυνηγάει τα όνειρά του.

Τους φίλους μου, που ήταν εκεί με όλες τις όμορφες αλλά και διδακτικές εμπειρίες σε όλες τις ευχάριστες και δυσάρεστες στιγμές.

Το διδακτικό και μη προσωπικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου που με την προσωπική του εργασία μου επέτρεψε να κάνω αυτό το όμορφο ταξίδι προς τον κόσμο των Χημικών Μηχανικών.

Και τέλος, αλλά εξίσου, τον διοικητή της μονάδος μου Β' ΕΑΝΕΘ που με την άδειά του μου επέτρεψε να απουσιάζω από τα στρατιωτικά μου καθήκοντα και να ολοκληρώσω την διπλωματική εργασία μου και τις σπουδές μου.

Αθήνα, 05 Απριλίου 2014

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	7
Εισαγωγή	8
Απορρίμματα	8
Ενέργεια	9
Απορρίμματα και ενέργεια	9
Κεφάλαιο 1^ο: Απορρίμματα	11
Σύσταση ΑΣΑ Αττικής.....	11
Περιορισμοί – Οδηγίες προς διαχείριση ΑΣΑ	13
Ρεύματα ανακύκλωσης – ανάκτησης ενέργειας.....	16
Ενεργειακό περιεχόμενο ΑΣΑ	16
Κεφάλαιο 2^ο : Διεργασίες παραγωγής Ενεργειακών Προϊόντων	19
<u>Καύση – Αντι-ρύπανση</u>	20
Υποδοχή και χειρισμός απορριμμάτων	21
Διατάξεις καύσης – προδιαγραφές καυσίμου.....	22
Εστία κινούμενων σχαρών	22
Εστία περιστρεφόμενου κλιβάνου.....	23
Εστία ρευστοποιημένης κλίνης	23
Μονάδα ανάκτησης ενέργειας.....	27
Διαχείριση τέφρας πυθμένα – ιπτάμενης τέφρας	28
Μονάδα αντι-ρύπανσης.....	28
<u>Τεχνολογίες Δέσμευσης Άνθρακα</u>	33
Χρησιμότητα	33
Κατηγορίες τεχνολογιών	34
Διεργασίες δέσμευσης CO ₂	35
Ρόφηση	35
Προσρόφηση	37
Μεμβράνες	38
Κρυογονικός διαχωρισμός.....	42
Καταλληλότητα διεργασιών δέσμευσης άνθρακα.....	42
Αποτίμηση τεχνολογιών CCS	43
<u>Παραγωγή RDF</u>	44
Στάδια – διαδικασίες παραγωγής RDF.....	44
Τεμαχιστές και αλεστές.....	45

Κόσκινα	47
Μαγνητικοί διαχωριστήρες	48
Μη-μαγνητικοί διαχωριστήρες.....	49
Διαχωριστήρες αέρα.....	49
Επιλογή διεργασίας	50
Προδιαγραφές και αξιοποίηση RDF	51
<u>Καβούρδισμα</u>	54
Επιλογή διεργασίας	57
Προϋποθέσεις	57
Διάταξη διεργασίας	58
Τροφοδοσία – προϊόντα.....	59
<u>Πυρόλυση</u>	63
Προϊόντα της πυρόλυσης.....	63
Οδοί πυρόλυσης.....	64
Επιλογή καταλληλότερης οδού πυρόλυσης.....	65
Τύποι αντιδραστήρων πυρόλυσης	66
Ενεργειακές απαιτήσεις διεργασίας	69
Επιλογή διεργασίας	69
<u>Αεριοποίηση</u>	71
Προϊόντα της αεριοποίησης – αεριοποιητικά μέσα.....	71
Οδοί αεριοποίησης	72
Επιλογή καταλληλότερης οδού αεριοποίησης	77
Τύποι αντιδραστήρων αεριοποίησης.....	78
Αντιδραστήρες κινούμενης κλίνης.....	78
Αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης	80
Αντιδραστήρας ροής συμπαράσυρσης	81
Αντιδραστήρες αναβράζουσας κλίνης	84
Μεταφορικοί αεριοποιητές.....	85
Συστήματα δίδυμων αντιδραστήρων.....	85
Αεριοποιητής χημικού βρόγχου	86
Ενεργειακές απαιτήσεις διεργασίας	86
Επιλογή διεργασίας	87
<u>Ειδικές περιπτώσεις αεριοποίησης</u>	89

Αεριοποίηση πλάσματος	89
Αεριοποίηση με υπερκρίσιμο νερό.....	90
<u>Συγκριτική συνεκτίμηση πυρόλυσης - αεριοποίησης</u>	92
<u>Παραγωγή και διάσπαση πίσσας</u>	97
Παραγωγή πίσσας.....	98
Αντιμετώπιση της πίσσας	100
<u>Αναερόβια χώνευση</u>	106
Προϊόντα της αναερόβιας χώνευσης	106
Οδοί της αναερόβιας χώνευσης.....	107
Επιλογή καταλληλότερης οδού της αναερόβιας χώνευσης.....	111
Τύποι αντιδραστήρων της αναερόβιας χώνευσης	112
Dranco	113
Valorga	114
Komrogas.....	116
Ενεργειακές απαιτήσεις.....	116
Επιλογή διεργασίας	117
<u>Αλκοολική ζύμωση</u>	118
Προϊόντα της αλκοολικής ζύμωσης	118
Βασικοί οδοί της αλκοολικής ζύμωσης.....	119
Όξινη υδρόλυση	119
Ενζυμική υδρόλυση.....	120
Υδροθερμική υδρόλυση	121
Σύντομη τεχνικο-οικονομική αποτίμηση	121
Κεφάλαιο 3^ο: Μελέτη περίπτωσης – Αττική	123
Ανασκόπηση.....	123
Βασικές προϋποθέσεις - παραδοχές	123
Οι διεργασίες: Τροφοδοσία – Μέθοδος – Προϊόντα.....	126
Τροφοδοσία	126
Μέθοδος	127
Προϊόντα.....	127
Παρούσα ενεργειακή κατάσταση και άμεσο μέλλον	128
Βασικό οικονομικό δυναμικό.....	128
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	130

Οι διεργασίες.....	131
<u>Αναερόβια χώνευση</u>	133
Περιγραφή της διεργασίας	135
Σημαντικά σημεία της διεργασίας.....	136
Ισοζύγια μάζας ενέργειας	137
Πρόχειρο οικονομικό δυναμικό.....	138
Συνολική αποτίμηση.....	139
<u>Μηχανική προκατεργασία (παραγωγή RDF)</u>	141
Περιγραφή της διεργασίας	141
Ισοζύγια μάζας - ενέργειας.....	142
<u>Καύση</u>	143
Περιγραφή της διεργασίας	143
Ισοζύγια μάζας - ενέργειας.....	144
Πρόχειρο οικονομικό δυναμικό.....	145
Συνολική αποτίμηση.....	146
<u>Πυρόλυση - Καύση</u>	147
Περιγραφή της διεργασίας	149
Σημαντικά σημεία της διεργασίας.....	149
Ισοζύγια μάζας – ενέργειας	152
Πρόχειρο οικονομικό δυναμικό.....	152
Συνολική αποτίμηση.....	153
<u>Πυρόλυση – Αεριοποίηση - Καύση</u>	154
Περιγραφή της διεργασίας	156
Σημαντικά σημεία της διεργασίας.....	156
Ισοζύγια μάζας – ενέργειας	157
Πρόχειρο οικονομικό δυναμικό.....	158
Συνολική αποτίμηση.....	159
Επίλογος	160
Βιβλιογραφία	161

Περίληψη

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η ανάγκη ορθής διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων και παραγωγής ενέργειας και μελετάται ο σχεδιασμός διεργασιών για την ικανοποίησή τους. Η μελέτη διεξάγεται συγκεκριμένα για την περίπτωση της Αττικής.

Η ήδη μεγάλη και ολοένα αυξανόμενη παραγωγή ΑΣΑ με τις τρέχουσες μεθόδους διαχείρισης, την υγειονομική ταφή, παρουσιάζει μια επιτακτική ανάγκη για ανεύρεση εναλλακτικών τρόπων διαχείρισης. Αντίστοιχα οι υψηλές και συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες σε συνδυασμό με τα εξαντλούμενα ορυκτά καύσιμα και τις δριμύτατες επιπτώσεις στο περιβάλλον απαιτούν την ανεύρεση ενός φιλικότερου πόρου και αποδοτικότερης παραγωγής. Τα παραπάνω συνδυάζονται μέσω της παραγωγής ενέργειας από απορρίμματα (Waste to Energy).

Για τον λόγο αυτό μελετώνται όλες οι δυνατές τεχνολογίες κατεργασίας απορριμμάτων προς παραγωγή ενέργειας, βιοχημικές και θερμοχημικές: αναερόβια χώνευση, αλκοολική ζύμωση, καβούρδισμα, παραγωγή RDF, καύση, πυρόλυση, αεριοποίηση. Με σεβασμό προς το περιβάλλον μελετώνται και οι τεχνολογίες αντιρύπανσης αλλά και δέσμευσης και κατάσχεσης διοξειδίου του άνθρακα. Κατόπιν επιμέρους αλλά και συνολικής αξιολόγησης γίνεται επιλογή και συνδυασμός των καταλληλότερων και πραγματοποιείται σχεδιασμός της εκάστοτε προτεινόμενης διεργασίας ο οποίος συνοδεύεται από μια βασική οικονομική αποτίμηση.

Abstract

In this study is presented the need of good practice for management of Municipal Solid Wastes and energy production and is executed the process design to cover this need. The study is aimed for the case of Attiki.

The huge and still growing MSW production faced by waste burying requires a more suitable practice of waste management. Also the already high and still rising energy demands that currently are met by slowly depleting fossil fuels are in need of an alternative more environmental friendly resource. The above can be combined through Waste to Energy technologies.

For this purpose all suitable Waste to Energy technologies are being reviewed biochemical and thermochemical: anaerobic digestion, fermentation, torrefaction, RDF production, Incineration, Pyrolysis and Gasification. With respect to the environment anti-pollution and carbon capture and sequestration methods are also included in the study. After individual and overall evaluation the most suitable are chosen and combined in separate processes, each followed by a short and approximate economic feasibility estimation.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ:

ΑΠΟΡΡΙΜΑΤΑ:

Ως απόρριμμα/απόβλητο ορίζεται «το αντικείμενο που πετιέται ως άχρηστο» (1). Ο χαρακτηρισμός ως απόρριμμα λοιπόν αποτελεί ορόσημο στην λήξη της χρηστικής αξίας του οποιουδήποτε αντικειμένου, δηλαδή υποδεικνύει το τέλος του κύκλου ζωής του.

Στον όρο αστικά στερεά απόβλητα η ΑΣΑ (Municipal Solid Waste, MSW) 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). Περιλαμβάνει επίσης ογκώδη απόβλητα (στρώματα, έπιπλα κ.α.) και απόβλητα κήπων, φύλλα, κλαδιά, κηπευτικά, καθώς και απόβλητα από καθαρισμό δρόμων. (2)

Η έννοια του απόβλητου-απορρίμματος είναι συνυφασμένη με την ανθρώπινη δραστηριότητα καθότι κάθε ανθρώπινη ενέργεια παράγει αποτελέσματα εκ των οποίων ορισμένα είναι τα προσδοκώμενα και επιθυμητά, ενώ άλλα από αδιάφορα ως ανεπιθύμητα. Στις φυσικές δραστηριότητες του ανθρώπου, αυτά τα αποτελέσματα τα οποία δεν έχουν κάποια χρηστική αξία για τον ίδιο, χαρακτηρίζονται ως απόβλητα.

Παρόλα αυτά, αυτό το οποίο προσδίδει την χρηστική αξία σε ένα προϊόν, είναι η εκάστοτε ανάγκη που ο άνθρωπος καλείται να ικανοποιήσει. Επομένως ένα αντικείμενο που είναι άχρηστο σε μία περίπτωση μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμο και αξιοποιήσιμο σε μία άλλη. Αναμφίβολα η καταλληλότητα του κάθε αντικειμένου για την ικανοποίηση μίας ανάγκης διαφέρει, αλλά πολλές φορές απαιτείται και φαντασία προκειμένου να διαπιστωθεί ένας τρόπος αξιοποίησης του εκάστοτε αντικειμένου προκειμένου να καλυφθεί η ανάγκη.

Πλέον λοιπόν είναι πιο ξεκάθαρο ότι ο χαρακτηρισμός ως απόβλητο-απόρριμμα είναι τουλάχιστον παροδικός και υπό προϋποθέσεις, αν όχι συνολικά αυθαίρετος.

Όσον αφορά την σύγχρονη εποχή, ο μοντέρνος τρόπος ζωής ευνοεί τόσο την παραγωγή όσο και την συσσώρευση των (αστικών στερεών) απορριμμάτων. Η αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού, ο τρόπος ζωής και η τάση για ανανέωση και αντικατάσταση των χρηστικών μας αντικειμένων, δημιουργεί συνεχώς πλήθος από άλλα αντικείμενα που χάνουν την αξία τους και παρουσιάζεται η ανάγκη να αποβληθούν από την ζωή μας. Η οργάνωση της πολιτείας, που απλώς τα απομακρύνει από εμάς και μας απαλλάσσει από το «βάρος», μας εκπαιδεύει σε μία νοοτροπία αδιάκριτης απόρριψης, και εκείνη με την σειρά της, διαφορώντας επίσης για την δυνητική τους αξία τα αποθέτει σε γεωγραφικές περιοχές μακριά από την ανθρώπινη αντίληψη (ή και ενίοτε όχι) και από εκείνο το σημείο και έπειτα η ύπαρξή τους αγνοείται.

Αντίθετα η φύση δεν μπορεί να τα αγνοήσει, με αποτέλεσμα η άκριτη απόθεση και εν συνεχεία συσσώρευση των απορριμμάτων σε Χώρους «Υγειονομικής» Ταφής Απορριμμάτων και Χώρους Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΥΤΑ και ΧΑΔΑ)

να διογκώνεται και να παρουσιάζεται σωρεία περιβαλλοντικών (ρύπανση και μόλυνση αέρα, υπεδάφους και υπόγειων υδροφόρων οριζόντων, παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου κ.ά.) και κοινωνικών (επιβάρυνση της υγείας) προβλημάτων.

Παρουσιάζεται λοιπόν ξεκάθαρα η ανάγκης μίας αρτιότερης διαχείρισης των απορριμμάτων προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πρόκληση των παραπάνω ανεπιθύμητων συνεπειών.

ΕΝΕΡΓΕΙΑ:

Για την πραγματοποίηση της οποιασδήποτε δραστηριότητας απαιτείται η «καταβολή» ενός ποσού ενέργειας. Επομένως η ικανοποίηση των αναγκών και κατ' επέκταση η ανθρώπινη δραστηριότητα είναι επίσης συνυφασμένη με την κατανάλωση ενέργειας, και συνεπώς με την -πρωταρχικώς- παραγωγή της. Με την είσοδο -διαδοχικά- των ζώων, της ανθρώπινης δουλείας, της ατμομηχανής και του πετρελαίου στις δημιουργικές διεργασίες κατέστη δυνατή η ολοένα και μεγαλύτερη παραγωγή έργου και ικανοποίηση ανθρώπινων αναγκών.

Όσον αφορά την σύγχρονη εποχή, ο ίδιος μοντέρνος-καταναλωτικός τρόπος ζωής που ευνοεί την παραγωγή απορριμμάτων, επιτάσσει και την κατανάλωση ήδη μεγάλων και ολοένα αυξανόμενων ποσών ενέργειας. Πλέον, οι τεράστιες ενεργειακές απαιτήσεις σε συνδυασμό με την ανακάλυψη της ύπαρξης άφθονου, πλούσιου σε χημική ενέργεια και εύκολα αξιοποιήσιμου (μέσω της καύσης) πετρελαίου και λοιπών ορυκτών καυσίμων έχουν οδηγήσει σε έναν μονόδρομο παραγωγής ενέργειας αποκλειστικά και μόνο από καύση αυτών. Η συνεχής και αυξανόμενη καύση των ορυκτών «ανθράκων» (υγρών και στερεών) συνεπάγεται πέρα από την παραγωγή της πολύτιμης ενέργειας, την συμπαράγωγή και άλλων ανεπιθύμητων προϊόντων, όπως αερίων τοξικών ρύπων, ιπτάμενων μικροσωματιδίων και διοξειδίου του άνθρακα, του σημαντικότερου αερίου του θερμοκηπίου. Όλα αυτά τα αέρια απόβλητα έχουν τόσο περιβαλλοντικό (φαινόμενο του θερμοκηπίου, όξινη βροχή κ.ά.) όσο και κοινωνικό (προβλήματα υγείας) αντίκτυπο.

Σήμερα όμως που η «οικονομία του πετρελαίου» φτάνει σε ένα κρίσιμο σημείο, αυτό της επερχόμενης εξάντλησης των αποθεμάτων, παρουσιάζεται όλο και πιο επιτακτικά η ανάγκη κάλυψης των εκτεταμένων ενεργειακών απαιτήσεων από άλλες πηγές. Και στα πλαίσια μίας πιο φρόνιμης στρατηγικής αναζητούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (προκειμένου να μην επαναληφθεί το κρίσιμο πρόβλημα της εξάντλησης των ενεργειακών πόρων)

ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ:

Μελετώντας λοιπόν την διαχείριση των απορριμμάτων και την παραγωγή ενέργειας, γίνεται προφανές ότι και τα δύο πέρα από τον σκοπό που εξυπηρετούν συνοδεύονται από μία σωρεία ανεπιθύμητων επιδράσεων στο περιβάλλον και τον άνθρωπο, οι οποίες και πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Επιπροσθέτως, πρέπει σαφώς και να ληφθεί υπ' όψιν η οικονομική παράμετρος που συνοδεύει και τις δύο αυτές δραστηριότητες. Πέρα από το αρχικό κόστος που απαιτεί η εγκατάσταση μίας μονάδας απόθεσης απορριμμάτων ή παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, υπάρχει και το πάγιο κόστος που αφορά την διατήρηση-λειτουργία του ΧΥΤΑ ή την αγορά/εξόρυξη του καυσίμου.

Παρουσιάζεται λοιπόν μία πρόκληση βελτιστοποίησης τριών ταυτοχρόνως προβλημάτων:

- Ορθή διαχείριση απορριμμάτων
- Ορθή παραγωγή ενέργειας
- Ελαχιστοποίηση (συνολικού) κόστους διαχείρισης απορριμμάτων και παραγωγής ενέργειας

Εστιάζοντας σε μία βασική παρατήρηση η λύση φαίνεται υπαρκτή και απλή.

Οι πρώτη ύλη για την παραγωγή ενέργειας είναι ορυκτά καύσιμα, δηλαδή οργανικές ουσίες, προσφιλείς στην οξειδωτική αντίδραση της καύσης και με ικανή θερμογόνο δύναμη. Τα (αστικά στερεά) απορρίμματα επίσης σε μεγάλο ποσοστό αποτελούνται από οργανικές ουσίες ικανές να παράξουν ενέργεια είτε απευθείας με άμεση καύση τους, είτε έμμεσα με μετασχηματισμό τους σε καύσιμα.

Σε μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση δηλαδή, τα αστικά στερεά απόβλητα, δεν θα καταλήγουν σε ΧΥΤΑ αλλά σε καινούργιες μονάδες που θα παράγουν ενέργεια απευθείας από αυτά ή σε μονάδες όπου θα παράγουν, με αυτά ως πρώτη ύλη, καύσιμα για άλλες διατάξεις παραγωγής ενέργειας (ή έργου).

Η ιδέα αυτή υπάρχει εδώ και πολλές δεκαετίες (3) και έχει εξελιχθεί έως σήμερα σε σημαντικά επίπεδα αποδοτικότητας ακριβώς λόγω των σκοπών που εξυπηρετεί.

Κρίνεται λοιπόν αναγκαία, ακριβώς λόγω της έκτασης των σημερινών αναγκών η εφαρμογή μιας τέτοιας λύσης γενικότερα στην Ελλάδα και ειδικότερα για την ευρύτερη περιοχή της πρωτεύουσας, δηλαδή την περιφέρεια Αττικής.

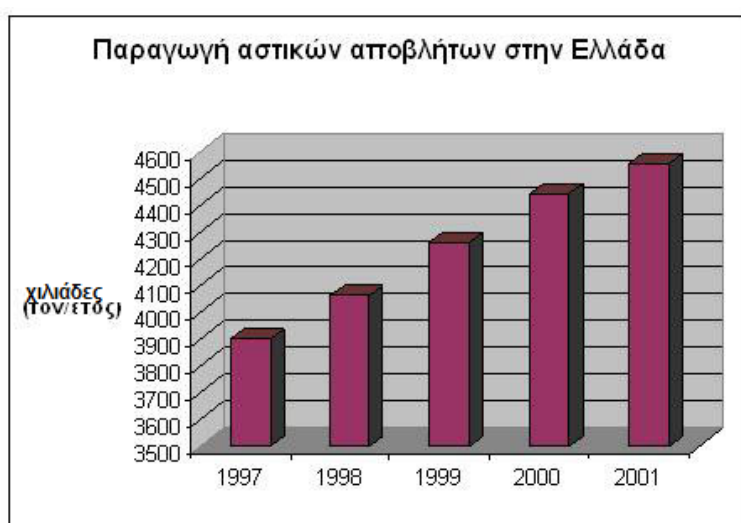
Κεφάλαιο 1^ο: Απορρίμματα

Σύσταση ΑΣΑ Αττικής: ποσοτική-ποιοτική

Ο νομός Αττικής φιλοξενεί 3,830,000 κατοίκους (4) όπου εκτιμάται ότι σήμερα παράγουν περίπου 2,190,000 τόνους Αστικών Στερεών Αποβλήτων ετησίως, περίπου το 40% της συνολικής παραγωγής σε όλη την έκταση της Ελλάδας (5). Τα ΑΣΑ αυτά αποτελούν σύμμεικτα αστικά απορρίμματα, δηλαδή πρακτικά ότι μπαίνει στις οικιακές σακούλες σκουπιδιών και ότι προέρχεται μεν από εμπορικές δραστηριότητες (καταστήματα, εστιατόρια κ.ά.) αλλά έχει δε παρόμοια σύσταση με τα οικιακά απορρίμματα. Πιο συγκεκριμένα στα αστικά απορρίμματα που διαχειρίζονται οι φορείς αποκομιδής περιλαμβάνονται:

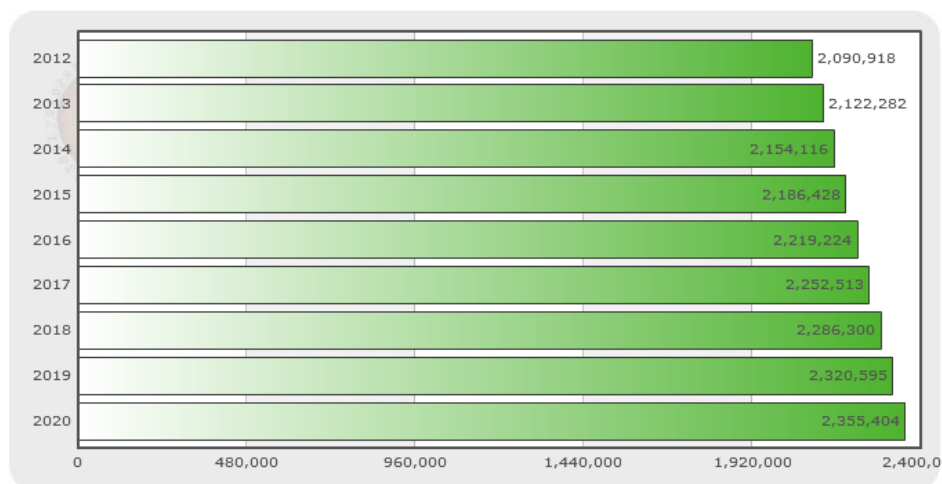
- Κατάλοιπα κάθε φύσης, όπως οικιακά απορρίμματα, φύλλα, σκουπίσματα, χαρτιά που τοποθετούνται μέσα στις πλαστικές σακούλες.
- Απορρίμματα από εμπορικές εγκαταστάσεις και βιοτεχνίες, κτίρια γραφείων που τοποθετούνται επίσης σε σακούλες ή κάδους όπως τα οικιακά
- Κοπριές, αφυδατωμένες ιλύες, προϊόντα από καθαρισμούς δρόμων και δημοσίων χώρων, που συγκεντρώνονται σε μεγάλα δοχεία για την αποκομιδή τους.
- Κατάλοιπα από χώρους εκθέσεων αγορές, εορτές, κλπ , που συγκεντρώνονται επίσης σε μεγάλα δοχεία για την αποκομιδή τους.
- Απορρίμματα από σχολεία, στρατιωτικές εγκαταστάσεις, νοσοκομεία (πλην των μολυσματικών) που συγκεντρώνονται σε ειδικούς χώρους.
- Ογκώδη αντικείμενα (6)

Σημειωτέον ότι η παραγωγή των απορριμμάτων συνεχώς αυξάνεται από το παρελθόν έως σήμερα ενώ αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται και στο μέλλον



(5)

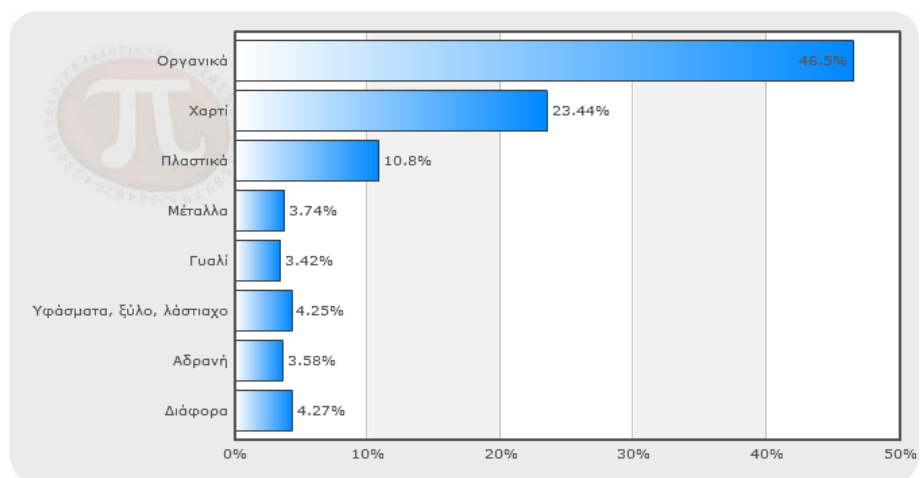
Ετήσια παραγωγή απορριμμάτων στην Αττική
Πρόβλεψη, από το 2012 έως το 2020, σε τόνους



(7)

Εν συνεχεία και ειδικότερα για την περιοχή της Αττικής η σύσταση των ΑΣΑ προσδιορίζεται ως εξής:

Μέση παραγόμενη σύσταση των παραγόμενων αποβλήτων σύμφωνα με τον Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων στην Αττική



(7)

Με απλούς αριθμητικούς υπολογισμούς έχουμε ότι στην Αττική το 2012 παρήχθησαν ως ΑΣΑ

<u>Οργανικά (ζυμώσιμα):</u>	<u>1,018,350 t/a</u>
<u>Χαρτί:</u>	<u>513,336 t/a</u>
<u>Πλαστικό:</u>	<u>236,520 t/a</u>
<u>Μέταλλο:</u>	<u>75,993 t/a</u>
<u>Γυαλί:</u>	<u>74,898 t/a</u>
<u>Υ-Ξ-Λ:</u>	<u>93,075 t/a</u>
<u>Αδρανή:</u>	<u>78,402 t/a</u>
<u>Διάφορα:</u>	<u>93,523 t/a</u>

Περιορισμοί – Οδηγίες προς διαχείριση ΑΣΑ:

Καθότι η ύπαρξη και η διαχείριση των αποβλήτων έχουν μεγάλο αντίκτυπο στο περιβάλλον αλλά και την υγεία του ανθρώπου, είναι αναμενόμενο και απαραίτητο κάθε οργανωμένη Πολιτεία να μεριμνά για την ορθή διαχείριση τους ούτως ώστε να ελαχιστοποιούνται τέτοια πιθανά προβλήματα. Τόσο λοιπόν στο νομοθετικό πλαίσιο όσο και στους άτυπους κανόνες της κοινωνίας υπάρχουν προϋποθέσεις και περιορισμοί που πρέπει να ακολουθούνται προκειμένου η παραγωγή των απορριμμάτων να μην παρακωλύει την αρμονική συνύπαρξη των μελών της.

Επιπροσθέτως, λόγω της υπερεκμετάλλευσης των φυσικών πόρων, που σταδιακά οδηγεί προς την εξάντληση τους, παρουσιάζεται η ανάγκη τα αγαθά και προϊόντα να μην καθίστανται τόσο σύντομα ως απορρίμματα, μετά την χρήση τους, αλλά να συμβάλλουν και αυτά στην δημιουργία των νέων αγαθών, αξιοποιώντας τα υλικά κατασκευής τους. Αυτό προφανώς αποσκοπεί στην μείωση της άντλησης υλικών από τους περιβαλλοντικούς πόρους και άρα στην μετριασμένη και πιο ήπια εκμετάλλευση του περιβάλλοντος.

Έτσι λοιπόν, τόσο η εθνική νομοθεσία όσο και το ευρωπαϊκό πλαίσιο, ως μέλη της ευρωπαϊκής κοινότητας-ένωσης, μέσω νόμων και οδηγιών εξασφαλίζουν ότι με ενέργειες όπως πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, επαναχρησιμοποίηση των αγαθών και παράταση του κύκλου ζωής τους, ανακύκλωση των απόβλητων αγαθών και ανάκτηση των υλικών κατασκευής τους ως πρώτη ύλη για παρόμοια αγαθά, ανάκτηση του ενεργειακού περιεχομένου των υλικών των απορριμμάτων και τέλος διάθεση σε χώρους όπου θα παραμείνουν χωρίς περαιτέρω επεξεργασία.

Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι ένα κλάσμα των ΑΣΑ να είναι «δεσμευμένο» καθώς σύμφωνα με αυτούς τους κανονισμούς-οδηγίες η Πολιτεία οφείλει ένα συγκεκριμένο κλάσμα, συγκεκριμένης σύστασης να διαχειρίζεται με συγκεκριμένο τρόπο (π.χ. ανακύκλωση). Έτσι λοιπόν παρουσιάζεται η ανάγκη μελέτης των διάφορων εθνικών και ευρωπαϊκών κανονισμών προκειμένου να προσδιοριστεί

Εθνικό νομοθετικό πλαίσιο – Ευρωπαϊκή οδηγία:

Ήδη από το 1964 έχει αρχίσει η επίσημη τοποθέτηση της πολιτείας για κανόνες, υποχρεώσεις και περιορισμούς στην διαχείριση και τελική διάθεση των αστικών αποβλήτων και συνεχίζεται μέχρι σήμερα μέσω νόμων, κοινών υπουργικών αποφάσεων και προεδρικών διαταγμάτων.

Σήμερα, ο πιο πρόσφατος και καθ' ολικός νόμος είναι ο Ν. 4042/2012 (ΦΕΚ 24/Α'/13.2.2012) ο οποίος είναι σε εναρμόνιση με τις οδηγίες 2008/98/EK και 2008/99/EK (απόβλητα και κατάργηση ορισμένων οδηγιών και προστασία του περιβάλλοντος μέσω ποινικού δικαίου) (8). Στον νόμο αυτό μεταξύ των υποχρεώσεων και περιορισμών των προσώπων για την παραγωγή και διαχείριση των αποβλήτων και τις αντίστοιχες (χρηματικές) ποινές – κυρώσεις καθορίζεται επίσης ότι:

Άρθρο 27 παρ2: Για την επίτευξη των στόχων του παρόντος και τη μετάβαση σε μια Κοινωνία Ανακύκλωσης, με υψηλό επίπεδο αποδοτικότητας των πόρων, λαμβάνονται τα αναγκαία μέτρα ώστε να εξασφαλισθεί η επίτευξη των ακόλουθων στόχων:

α) έως το 2020 η προετοιμασία για την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση των υλικών αποβλήτων, όπως τουλάχιστον το χαρτί, το μέταλλο, το πλαστικό και το γυαλί από τα νοικοκυριά και ενδεχομένως άλλης προέλευσης στο βαθμό που τα απόβλητα αυτά είναι παρόμοια με τα απόβλητα των νοικοκυριών, πρέπει να αυξηθεί κατ' ελάχιστον **στο 50% κατά βάρος**,

β) έως το 2020 η προετοιμασία για την επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση και η ανάκτηση άλλων υλικών, συμπεριλαμβανομένων των εργασιών επίχωσης (backfilling) όπου γίνεται χρήση αποβλήτων για την υποκατάσταση άλλων υλικών, μη επικίνδυνων αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων εξαιρουμένων των υλικών που απαντώνται στη φύση [...] πρέπει να αυξηθεί κατ' ελάχιστον **στο 70% κατά βάρος**. (8) (9)

Ενώ προϋπάρχουν και οι οδηγίες που αφορούν συγκεκριμένα στην ανακύκλωση συσκευασιών. Πιο συγκεκριμένα οι 94/62/EΚ η οποία τροποποιείται από την 2004/12/EΚ περί συσκευασιών και απορριμμάτων συσκευασιών καθορίζουν ότι:

Άρθρο 6: 1. Προκειμένου να συμμορφωθούν προς τους στόχους της παρούσας οδηγίας, τα κράτη μέλη λαμβάνουν τα αναγκαία μέτρα για την επίτευξη των ακόλουθων στόχων που καλύπτουν το σύνολο της επικράτειάς τους:

α) έως τις 30 Ιουνίου 2001 το αργότερο, ανάκτηση ή αποτέφρωση σε εγκαταστάσεις αποτεφρώσεως απορριμμάτων με ανάκτηση ενέργειας μεταξύ 50 % τουλάχιστον και 65 % το πολύ κατά βάρος, των απορριμμάτων συσκευασίας·

β) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2008 το αργότερο, ανάκτηση ή αποτέφρωση σε εγκαταστάσεις αποτεφρώσεως απορριμμάτων με ανάκτηση ενέργειας 60 % τουλάχιστον κατά βάρος, των απορριμμάτων συσκευασίας·

γ) έως τις 30 Ιουνίου 2001 το αργότερο, ανακύκλωση μεταξύ 25 % τουλάχιστον και 45 % το πολύ, κατά βάρος, του συνόλου των υλικών συσκευασίας που περιέχονται στα απορρίμματα συσκευασίας, με ελάχιστο ποσοστό 15 % κατά βάρος, για κάθε υλικό συσκευασίας·

δ) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2008 το αργότερο, ανακύκλωση μεταξύ 55 % τουλάχιστον και 80 % το πολύ, κατά βάρος, των απορριμμάτων συσκευασίας·

ε) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2008 το αργότερο, επίτευξη των ακόλουθων ελάχιστων στόχων ανακύκλωσης για υλικά που περιέχονται σε απορρίμματα συσκευασίας:

i) 60 %, κατά βάρος, για το γυαλί,

ii) 60 %, κατά βάρος, για το χαρτί και χαρτόνι,

iii) 50 %, κατά βάρος, για τα μέταλλα,

iv) 22,5 %, κατά βάρος, για τα πλαστικά, λαμβάνοντας αποκλειστικά υπόψη υλικά που ανακυκλώνονται εκ νέου σε πλαστικά,

v) 15 %, κατά βάρος, για το ξύλο.

Να σημειωθεί ότι ορισμένες χώρες, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, αποτελούσαν εξαίρεση ως προς την καταληκτική ημερομηνία επίτευξης των στόχων

αλλά η ημερομηνία αυτή έχει πλέον παρέλθει και άρα οι στόχοι είναι, στο παρόν, δεσμευτικοί. (10) (11)

Εκ των ανωτέρω προκύπτει ένα ελάχιστο κλάσμα των ΑΣΑ που είναι μη διαθέσιμο προς ενεργειακή εκμετάλλευση. Ο λόγος που γίνεται αναφορά σε «ελάχιστο κλάσμα» οφείλεται στο ότι η ανακύκλωση πραγματοποιείται ήδη σε σημαντικό βαθμό στην Ελλάδα γενικότερα και στην Αθήνα ειδικότερα. Έτσι λοιπόν σε περίπτωση όπου μία δραστηριότητα ανακύκλωσης επεξεργάζεται ποσοστό απορριμμάτων μεγαλύτερο από το ελάχιστο απαιτούμενο, όπως αυτό ορίζεται από την οδηγία της ευρωπαϊκής ένωσης, τότε δεν θα ήταν δόκιμο να μειωθεί το συγκεκριμένο ρεύμα ανακύκλωσης προκειμένου να επωφεληθεί η διεργασία ανάκτησης ενέργειας. Για τον λόγο αυτό παρουσιάζεται η ανάγκη να μελετηθεί εάν η ήδη υπάρχουσα ανακύκλωση, σε κάθε μία υποκατηγορία απορριμμάτων, υπερβαίνει την ελάχιστη απαιτούμενη.

Όσον αφορά τον τομέα της Αθήνας δραστηριοποιείται εντονότερα η επιχείρηση «Ελληνική Εταιρεία Αξιοποίησης – Ανακύκλωσης Α.Ε.». Μέσα στο 2012 ανακυκλώθηκαν (βάση δεδομένων για μέρος του 2012, και πλήρους του 2011):

- Συσκευασίες: ~45,000 t
 - Γυαλί: ~3,924 t
 - Χαρτί: ~576 t
 - Μέταλλο (χάλυβ.): ~987 t
 - Πλαστικά: ~4.65 t
- Σύνολο: 50,492 t

Αυτά όσον αφορά το δίκτυο ανακύκλωσης της ΕΕΑΑ («μπλε κάδοι»). Πέραν από αυτό, τα δημοτικά απορριμματοφόρα περισυλλέγουν 900 τόνους ΑΣΑ καθημερινά από την Αθήνα («πράσινοι κάδοι») -σε αντιδιαστολή με τους 6,000 τόνους που εκτιμάται ότι παράγονται καθημερινά στην Αττική- εκ των οποίων το 45% οδηγείται προς εργοστάσιο μηχανικής ανακύκλωσης – κομποστοποίησης παράγοντας 45% RDF, 12% κομπόστ, 0.9% μέταλλο. Εν προκειμένω, 1,330 t μέταλλο το χρόνο.

Αντίστοιχα οι απόλυτες αριθμητικές τιμές για την απαιτούμενη, από την οδηγία, ανακύκλωση, αναλογικά προς τα δεδομένα της Αττικής είναι:

- Συνολική ανακύκλωση απορριμμάτων συσκευασιών:
512,475 – 745,418 t/a
- Γυαλί: 44,938 t/a
- Χαρτί: 308,001 t/a
- Μέταλλο: 37,996 t/a
- Πλαστικά: 53,217 t/a
- Ξύλο: ~4,654 t/a

(οι παραπάνω τιμές προκύπτουν θεωρώντας το σύνολο των απορριμμάτων γυαλί-χαρτί-μέταλλο-πλαστικό ως απορρίμματα συσκευασίας και το 1/3 των απορριμμάτων

Υ-Ε-Α ως συσκευασία ξύλου. Αυτό αποτελεί ένα χερίστο σενάριο μεν, αλλά την πλέον ασφαλή υπόθεση εργασίας δε)

Αντιδιαστέλλοντας τις επιτευχθείσες, στο 2012, με τις (ευρωπαϊκά) απαιτούμενες τιμές ανακύκλωσης είναι ευδιάκριτο ότι οι στόχοι, για την Αττική, προς το παρόν επιτυγχάνονται περίπου στο 1/10 συνολικά (και σε καμία επιμέρους κατηγορία στο ελάχιστο). Ακόμα και αν οι τιμές της ανακύκλωσης του 2012 αφορούν μόνο την Αθήνα, και μόνο μία εταιρία που δραστηριοποιείται (πλην, την μεγαλύτερη) είναι βάσιμο ότι συνολικά όλες οι δραστηριότητες ανακύκλωσης σε όλη την Αττική δεν υπερβαίνουν τα κατώτερα όρια που έχει θέσει η ευρωπαϊκή ένωση, και άρα οι τιμές – στόχοι θα είναι οι τελικοί περιορισμοί στο μέγεθος των ρευμάτων προς ανάκτηση ενέργειας.

Ρεύματα ανακύκλωσης – ανάκτησης ενέργειας:

Καταλήγοντας μπορούν πλέον να οριστούν οι τιμές των ρευμάτων κάθε είδους ΑΣΑ προς ανακύκλωση και ενεργειακή αξιοποίηση. Πριν οριστούν οι τελικές τιμές πρέπει να επισημανθεί ότι τα ρεύματα απορριμμάτων μετάλλου και γυαλιού δεν έχουν καμία ενεργειακή αξία οπότε και θα προωθηθούν προς ανακύκλωση κατά 100%. Σε περίπτωση που τελική ποσότητα δεν καλύπτει το ελάχιστο «55%» της οδηγίας τότε θα αντληθούν υλικά και από τα υπόλοιπα ρεύματα. Έτσι λοιπόν προκύπτει:

t/a	Παραγωγή ΑΣΑ συσκευασίας	Απαιτούμενη ανακύκλωση	Προοριζόμενη Ανακύκλωση	Προοριζόμενη Ανακύκλωση	Προς Ενέργεια
Γυαλί	74,898	60%	100%	74,898	0
Χαρτί	513,336	60%	60%	308,002	205,334
Μέταλλο	75,993	50%	100%	75,993	0
Πλαστικό	236,520	22,5%	22,5%	53,217	183,303
Ξύλο	31,026	15%	15%	4,654	26,372
Σύνολο	931,773			516,764	415,009

Με τον παραπάνω καταμερισμό ανακύκλωσης – ενεργειακής αξιοποίησης προκύπτει ότι το τελικό ποσοστό ανακύκλωσης των απορριμμάτων συσκευασίας είναι 55,4% και άρα το παραπάνω πλάνο καλύπτει τις απαιτήσεις της σχετικής ευρωπαϊκής οδηγίας.

Αυτό λοιπόν καθορίζει μία μάζα 415,009 t/a συσκευασιών προς ενεργειακή αξιοποίηση, πρόσθετη στους 1,018,350 t/a οργανικά (ζυμώσιμα) απορρίμματα. Τα ΑΣΑ που κατηγοριοποιούνται ως «αδρανή» και «διάφορα» θεωρείται ότι η ανάκτηση ενέργειας από αυτά είναι αδύνατη ή ασύμφορη (π.χ. άφλεκτα, μικρό ενεργειακό περιεχόμενο, υψηλή παραγωγή τοξικών ρύπων κατά την καύση).

Ενεργειακό περιεχόμενο ΑΣΑ:

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι πρώτη ύλη προς ανάκτηση ενέργειας αποτελείται από 71% «ζυμώσιμα» (υπολείμματα κυρίως τροφών), 14% χαρτί, 13% πλαστικά και 2% ξύλο, δηλαδή 87% βιομάζα. Ακόμα και αν ληφθεί υπ' όψιν ότι τα

ζυμώσιμα μπορεί να περιέχουν έως και 90% υγρασία, η πλειονότητα των ΑΣΑ παραμένει βιομάζα (~65%). Αυτό παρά την συνολική ετερογένεια, προσδίδει μια κοινή βάση για την αξιολόγηση και «χειρισμό» των ΑΣΑ ως πηγή ενέργειας, την θεώρησή τους ως βιομάζα. Αξιοποιώντας βασικές θερμοδυναμικές αρχές είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θερμογόνου δύναμης της.

Η βιομάζα αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από υγρασία. Καθότι όμως το νερό δεν αποτελεί καύσιμο, σε ξηρή βάση η βιομάζα αποτελείται κυρίως από κυτταρίνη, ημικυτταρίνη, λιγνίνη και σε μικρότερο βαθμό άμυλο-πολυσακχαρίτες (κυρίως για τα υπολείμματα τροφίμων). Καθώς η βιομάζα έχει παρουσιάσει ήδη ενδιαφέρον ως πηγή ενέργειας, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες και μοντελοποιήσεις που δίνουν μια πρόχειρη βάσιμη εκτίμηση για την ονομαστική και ουσιαστική θερμογόνο ικανότητα της βιομάζας (ανώτερη και κατώτερη θερμογόνος αξία).

Γνωρίζοντας την στοιχειακή σύσταση της βιομάζας προκύπτει από τον παρακάτω τύπο η ανώτερη θερμογόνος δύναμη:

$$HHV = 349.1C + 1178.3H + 100.5S - 103.4O - 15.1N - 21.1ASH \text{ kJ/kg}$$

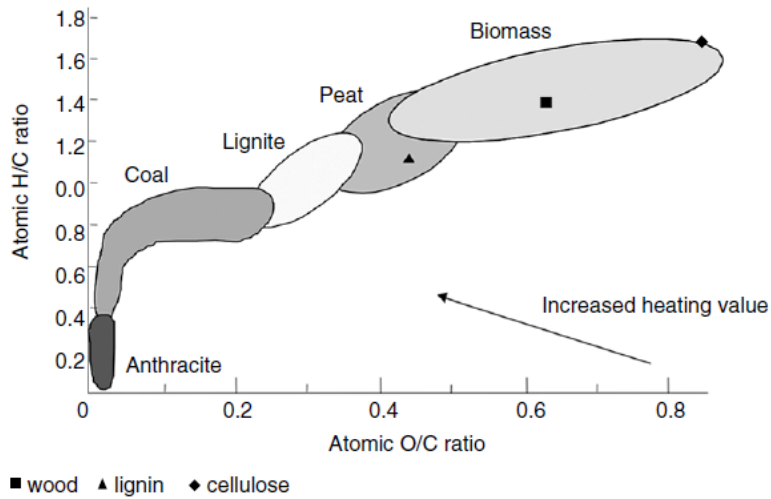
Όπου άνθρακας, υδρογόνο, θείο, οξυγόνο, άζωτο και ανόργανη τέφρα αντίστοιχα η επί τοις εκατό περιεκτικότητα σε ξηρή βάση

Ένα απλούστερο μοντέλο επιτρέπει τον υπολογισμό με βάση τον απαιτούμενο όγκο/μάζα αέρα για την πλήρη καύση:

$$HHV = 3220 \times \text{μάζα αέρα για καύση 1kg βιομάζας, kJ/kg}$$

Όλα αυτά για μία μέση σύσταση βιομάζας και λαμβάνοντας υπ' όψιν την ενέργεια που απορροφάται από το παραγόμενο νερό για την εξάτμιση του (δηλαδή ενέργεια που δεν μπορεί άμεσα να ανακτηθεί) οδηγούν σε ένα αποτέλεσμα της τάξης των 19.5 – 21 MJ/Kg κατώτερη θερμογόνο αξία, σε ξηρή βάση. Τα πλαστικά αντίστοιχα για μία μέση σύσταση έχουν θερμογόνο αξία περί τα 32 MJ/Kg (δεδομένα από Η.Π.Α.) (12). Τα πετρελαϊκά καύσιμα (βενζίνη, ντίζελ κλπ) έχουν τιμές θερμογόνου δύναμης στα 41-43 MJ/Kg και το φυσικό αέριο στα 35MJ/m³ (13). Υπάρχει συγκεκριμένος λόγος που υφίσταται τέτοιο χάσμα μεταξύ των πετρελαϊκών και των άλλων καυσίμων υλών.

Η βιομάζα περιέχει σε μεγάλη αναλογία, συγκριτικά με τα πετρελαϊκά καύσιμα, οξυγόνο, 30-40% κατά μάζα. Το οξυγόνο αποτελεί οξειδωτικό μέσο και όχι καύσιμο και παρέχεται στην καύση συνήθως ελεύθερα μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα. Για τον λόγο αυτό μια καύσιμη ύλη πλούσια σε οξυγόνο στην ουσία περιέχει άκαυστα συστατικά και άρα η ενεργειακή πυκνότητα είναι μικρότερη, εξ' ου και χαμηλότερη θερμογόνος δύναμη. Η τοποθέτηση της βιομάζας όσον αφορά περιεκτικότητα σε υδρογόνο και οξυγόνο σε σχέση με άλλα καύσιμα φαίνεται παρακάτω:



■ wood ▲ lignin ◆ cellulose

Για τον λόγο αυτό απαιτείται η κατεργασία και μετατροπή των ΑΣΑ σε καύσιμες ύλες με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ενέργεια και φύση που διευκολύνει την πλήρη καύση με μικρή εκπομπή ρύπων. Αυτό θα εξετασθεί πως μπορεί να επιτευχθεί μέσω των διεργασιών που ακολουθούν (14).

Κεφάλαιο 2^ο: Διεργασίες Παραγωγής Ενεργειακών Προϊόντων

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή ο στόχος είναι τριπλός: η ορθή διαχείριση των ΑΣΑ της Αττικής με ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Ταυτόχρονα δεν θα πρέπει να προσβάλλεται το περιβάλλον, η κοινωνία και η δημόσια υγεία από την επίτευξη του στόχου.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου υπάρχει η γενικότερη απαίτηση της καταλληλότητας και αποδοτικότητας της διεργασίας, η οποία αναλύεται παρακάτω σε ορισμένες επιμέρους συγκεκριμένες έννοιες:

- Απόδοση: η διεργασία πρέπει να επιτυγχάνει τις βέλτιστες τιμές όσον αφορά την μετατροπή της τροφοδοσίας και την απόδοση στο προϊόν ενδιαφέροντος
- Κόστος – πολυπλοκότητα εξοπλισμού: ο εξοπλισμός που θα απαρτίζει την διεργασία πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απλούστερος και μικρός σε μέγεθος. Αυτό συνεπάγεται χαμηλό κόστος αγοράς, μικρό κόστος λειτουργίας και λίγες απαιτήσεις στην εξοικείωση με χειρισμό – ρύθμιση – παρακολούθηση της ομαλής λειτουργίας του. Επίσης σε περίπτωση απροόπτου είναι πάντοτε ευκολότερο να αποκατασταθεί η λειτουργία μιας απλής διάταξης.
- Δυναμικότητα: λόγω της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας και του μεγάλου όγκου τροφοδοσίας (ΑΣΑ) απαιτείται οι διεργασίες να επιτυγχάνουν την υψηλότερη δυνατή δυναμικότητα ανά «μονάδα μεγέθους» της διεργασίας δηλαδή πρέπει να επιλέγεται ο εξοπλισμός-διεργασία με το μικρότερο μέγεθος-κόστος και τον υψηλότερο ρυθμό παραγωγής
- Εξοικονόμηση: καθώς η οποιαδήποτε επιχείρηση πρέπει να είναι κερδοφόρος για να μπορεί να επιβιώσει βασικό κριτήριο είναι να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας και αναλώσιμων στην μονάδα και να μεγιστοποιείται η παραγωγικότητα και η ποιότητα του προϊόντος καθώς αυτό συνεπάγεται κερδοφορία και άρα βιωσιμότητα και ανάπτυξη.
- Ευελιξία: η κάθε διεργασία πρέπει να είναι όσο περισσότερο κατά το δυνατόν ευέλικτη και από άποψη τροφοδοσίας αλλά και από άποψη επέκτασης. Τα ΑΣΑ δεν έχουν σταθερή και προκαθορισμένη σύσταση και αυτό δεν θα πρέπει να αποτελεί πρόβλημα για την ομαλή λειτουργία της διεργασίας. Επίσης θα πρέπει εξ αρχής να μπορεί με τις λιγότερες δυνατές μετατροπές να τροποποιείται και να προσαρμόζεται εύκολα σε νέες ανάγκες.

Όλα τα παραπάνω συνεκτιμούνται προκειμένου να κριθεί η καταλληλότερη διεργασία και συνηθέστερο ενιαίο κριτήριο είναι η τελική οικονομική αποτίμηση. Παράλληλα όμως προτιμάται να πληρούνται και τα παραπάνω επιμέρους κριτήρια καθώς το κάθε ένα από αυτά έχει ιδιαίτερη σημασία για την ομαλή και παραγωγική λειτουργία της μονάδας βραχυπρόθεσμα αλλά και μακροπρόθεσμα.

Οι απαιτήσεις αυτές θα λαμβάνονται υπ' όψιν πριν την τελική επιλογή των διατάξεων της κάθε μονάδας των διεργασιών που ακολουθούν. Για λόγους ευκολίας και συνοχής θα πραγματοποιηθεί μια αρχική διάκριση των διεργασιών παραγωγής ενέργειας και ενεργειακών προϊόντων σε άμεσες και έμμεσες.

Άμεσες:

Με τον όρο άμεσες θα χαρακτηριστούν, αυθαίρετα, όλες αυτές οι διεργασίες που οδηγούν στην παραγωγή ενός ενεργειακού προϊόντος χωρίς να συνεπάγονται πολύπλοκες αλλαγές στην φυσική και χημική σύσταση των ΑΣΑ κατά την διαδικασία παραγωγής. Χαρακτηρίζονται από απλότητα στην διαδικασία και την πιθανή κινητική των αντιδράσεων. Ορίζονται έτσι κυρίως για να διαχωριστούν από τις υπόλοιπες, αντίστοιχα «έμμεσες» (και πάλι αυθαίρετα ορισμένα), οι οποίες παρουσιάζουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά και απαρτίζουν ένα πιο συνεκτικό υποσύνολο μεταξύ τους, απ' ότι με αυτές. Ως άμεσες διεργασίες θεωρούνται η απευθείας καύση των απορριμμάτων και η παραγωγή RDF.

Καύση (Comb) – Αντι-ρύπανση:

Όπως έχει προαναφερθεί η καύση των ΑΣΑ αποτελεί μια μέθοδο κυρίως για την ελαχιστοποίηση του όγκου και της ρυπογόνου φύσης των απορριμμάτων και δευτερευόντως για την παραγωγή ενέργειας από αυτά. Με την έννοια «καύση των απορριμμάτων» χαρακτηρίζεται η οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες (800-1500 °C) παρουσία οξειδωτικού μέσου (ατμοσφαιρικού αέρα συνήθως) του οργανικού μέρους των ακατέργαστων απορριμμάτων σε εγκαταστάσεις ελεγχόμενων συνθηκών με ταυτόχρονη ανάκτηση μέρους της ενέργειας και δέσμευσης των ρύπων και λοιπών παθογόνων και επιβαρυντικών αερίων και στερεών εκλύσεων (καυσαέρια και τέφρα). (15) Η καύση των απορριμμάτων είναι από τις πρώτες επιλογές «ορθής διαχείρισης» των απορριμμάτων καθώς είναι απλή, οικονομική και σαφώς καλύτερη από την άμεση απόθεση σε ΧΥΤΑ. Παρόλα αυτά, δεν αποτελεί μια αξιόλογη μέθοδο παραγωγής ενέργειας ή μία μέθοδο που εξασφαλίζει ότι τα απορρίμματα δεν θα επιβαρύνουν το περιβάλλον και την δημόσια υγεία.

Το αποτέλεσμα της καύσης τόσο σε υλική όσο και σε ενεργειακή σύσταση εξαρτάται από την καύσιμο ύλη, το οξειδωτικό μέσο και τις συνθήκες καύσης (θερμοκρασία, πίεση, υγρασία). Καθότι μέσω των τεχνολογικών και επιστημονικών μέσων είναι δυνατός ο απόλυτος έλεγχος των συνθηκών καύσης και η σύσταση του οξειδωτικού μέσου, η καύσιμος ύλη είναι μία μη ελεγχόμενη παράμετρος. Η σύσταση των απορριμμάτων είναι ετερογενής και μεταβάλλεται τοπικά και περιοδικά. Αυτό συνεπάγεται μεγάλη μεταβολή αντίστοιχα και στην αποδιδόμενη ενέργεια αλλά και στην σύσταση των καυσαερίων, απαιτώντας στην ουσία μια εξαιρετικά ευέλικτη (και συνεπώς οικονομικά απαιτητική) μονάδα ούτως ώστε να μπορεί να αντισταθμίζει τάχιστα αυτές τις διακυμάνσεις και να αποδίδει, ανεξάρτητα από τα εκάστοτε απορρίμματα που επεξεργάζεται, σταθερή παραγωγή ενέργειας και «καθαρά» (ανταποκρινόμενα στις προδιαγραφές) καυσαέρια.

Για τον λόγο αυτό είναι σημαντικό να τεθεί νωρίς το ζήτημα της προτυποποίησης των ΑΣΑ ως καύσιμο, προκειμένου η καύση τους να ανταποκρίνεται ταυτόχρονα και στην ορθή διαχείριση των απορριμμάτων και στην αποδοτική παραγωγή ενέργειας αλλά και στην ελαχιστοποίηση του οικονομικού κόστους χωρίς όμως ποτέ να επιβαρύνεται το περιβάλλον ή ο άνθρωπος.

Απάντηση σε αυτό το ζήτημα δίνει η παραγωγή του RDF που θα αναλυθεί παρακάτω. Εν προκειμένω, αρκεί να αποσαφηνιστεί ότι στις παρακάτω προτεινόμενες μονάδες επεξεργασίας/καύσης των ΑΣΑ τα απορρίμματα είναι αυστηρότερα ελεγχόμενης σύστασης (θεωρείται ότι προέρχονται από αμιγή κλάσματα που προκύπτουν από διαλογή στην πηγή) και υφίστανται μία στοιχειώδη επεξεργασία ομογενοποίησης, περεταίρω συνέχεια της οποίας μπορεί να είναι η παραγωγή RDF. Κάτι τέτοιο αναδεικνύει από τώρα την προοπτική συνδυασμού μονάδων παραγωγής RDF με καύση απορριμμάτων ούτως ώστε να μειωθεί το κόστος από την προ-επεξεργασία που εμφανίζεται κοινή και στις δύο διεργασίες.

Στα πλαίσια της περιβαλλοντικής και κοινωνικής πολιτικής επιβάλλεται να υπάρχει και κατάλληλη διάταξη για την ασφαλή απόθεση των αποβλήτων της διεργασίας (αερίων ρύπων, τέφρας κ.ά.) ενώ ως ανταπόκριση στις επιτακτικές περιβαλλοντικές ανάγκες σχετικά με τα αέρια του θερμοκηπίου, θα προστεθεί και μονάδα δέσμευσης του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα ούτως ώστε να επιτευχθούν, όχι απλώς μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αλλά στην ουσία αρνητικές καθώς το παραγόμενο CO₂ είναι κυρίως φυτικής προέλευσης (σύμφωνα με την σύσταση των απορριμμάτων: χαρτί, ξύλο, οργανικά υπολείμματα). Δεδομένου ότι η καύση είναι η κατάληξη όλων των ενεργειακών προϊόντων και άρα η ανάγκη αντι-ρύπανσης είναι κοινή για την καύση και όλες τις υπόλοιπες διεργασίες, τα μέτρα αντι-ρύπανσης και δέσμευσης του παραγόμενου CO₂ θα παρουσιαστούν ανεξάρτητα στην συνέχεια.

Μια τυπική μονάδα καύσης ΑΣΑ και ανάκτησης ενέργειας περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- Υποδοχή απορριμμάτων και χειρισμός τους
- Διάταξη καύσης
- Μονάδα ανάκτησης ενέργειας
- Μονάδα αντι-ρύπανσης καυσαερίων
- Μονάδα διαχείρισης τέφρας πυθμένα – ιπτάμενης τέφρας/υπολειμμάτων αντι-ρύπανσης

Υποδοχή και χειρισμός απορριμμάτων:

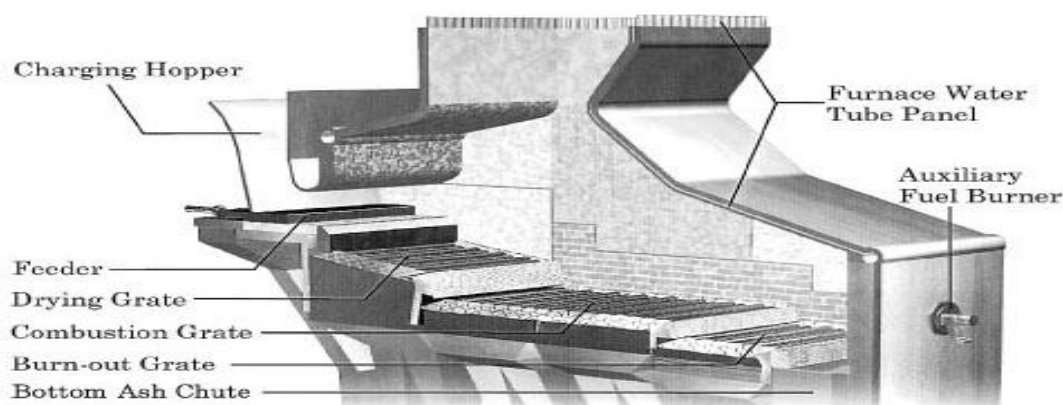
Τα απορρίμματα πρέπει να συλλεχθούν μετά την μεταφορά τους στην μονάδα, να αναμιχθούν/ομογενοποιηθούν προκειμένου να έχουν ενιαίο ενεργειακό περιεχόμενο και να υποστούν συνήθως μια βασική ελάττωση μεγέθους, σε διαφορετικό βαθμό ανάλογα με την τεχνολογία του καυστήρα, ώστε να έχουν και πιο ομοιογενή ανταπόκριση κατά την καύση. Η αρχική συλλογή τους πραγματοποιείται συνήθως σε χώρο τύπου δεξαμενής με απλό άδειασμα των οχημάτων/μέσων μεταφοράς των ΑΣΑ στην τάφρο. Από εκεί με γερανούς εξοπλισμένους με αρπάγες φορτώνονται στην είσοδο του καυστήρα ή της μονάδας προ-κατεργασίας, π.χ. ελάττωσης μεγέθους ή παραγωγής RDF. Ο χώρος υποδοχής των απορριμμάτων πρέπει να έχει δυνατότητα αποθήκευσης όγκου τουλάχιστον 3 ημερών λόγω των ημερησίων και εποχιακών αυξομειώσεων της παραγωγής ΑΣΑ από τις δραστηριότητες των κατοίκων της

Αττικής. Βασικότερο πρόβλημα του χώρου υποδοχής – αποθήκευσης είναι η έκλυση οσμών και η όχληση. Αυτό επιλύεται με αναρρόφηση του αέρα καύσης από τον χώρο της αποθήκευσης.

Διατάξεις καύσης – Προδιαγραφές καυσίμου:

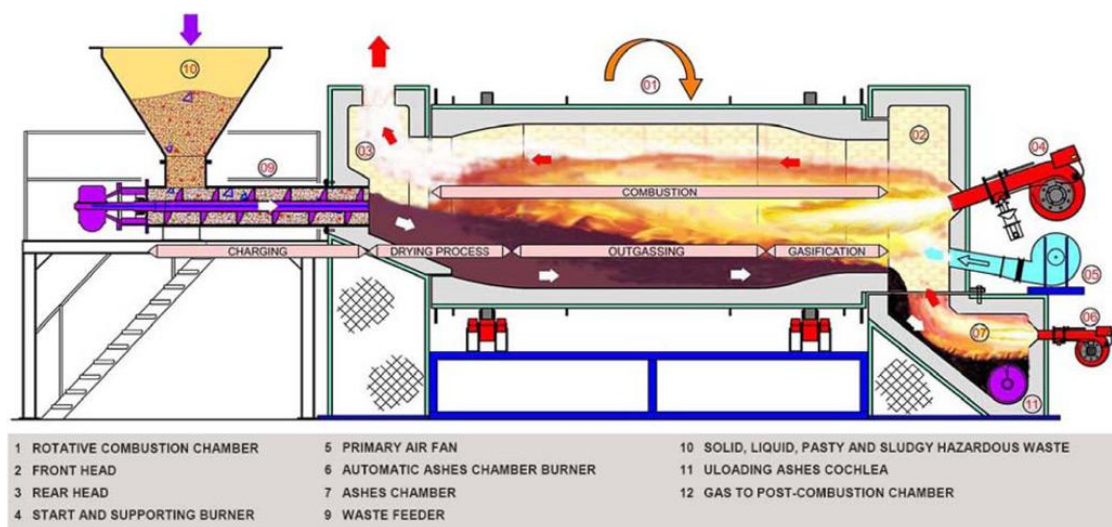
Αυτή είναι η καρδιά της μονάδας αποτέφρωσης ΑΣΑ και ανάκτησης ενέργειας. Η διάταξη καύσης είναι υπεύθυνη για την πλήρη οξείδωση των ΑΣΑ ούτως ώστε μοναδικό προϊόν να είναι ενέργεια και αβλαβή καυσαέρια. Αυτή είναι η εξιδανικευμένη απόδοση μιας μονάδας καύσης και η βελτιστοποίηση της ρύθμισής τους ανάγεται στην προσέγγιση αυτής της ιδανικής επίδοσης. Κάθε είδους θέρμανση μέχρι ανάφλεξης και προσφορά οξειδωτικού μέσου μπορεί να αποτελέσει διάταξη καύσης αλλά για λόγους τεχνικούς και βελτιστοποίησης οι βασικότερες διατάξεις είναι οι εξής τρεις:

- **Εστία κινούμενων σχαρών:** σε αυτή τη διάταξη τα απορρίμματα φορτώνονται μετά από μικρή ή καμία προκατεργασία (αφαίρεση ογκωδών, ελάττωση μεγέθους) σε ένα σύστημα μηχανικά μετακινούμενων σχαρών κατά μήκος του θαλάμου καύσης. Οι σχάρες πραγματοποιούν την μεταφορά τους από την χοάνη τροφοδοσίας έως την έξοδο της τέφρας ενώ κατά μήκος αυτής της γραμμής τα απορρίμματα περνούν σταδιακά από ξήρανση, πυρόλυση, καύση και ολοκλήρωση της καύσης. Επίσης υπάρχει εξοπλισμός που τροφοδοτεί τον θάλαμο με το οξειδωτικό μέσο, συνήθως αέρας, ενώ προκειμένου να εξασφαλιστεί η πλήρης καύση των απορριμμάτων μπορεί να υπάρχει βοηθητικός καυστήρας που καταναλώνει συμβατικό καύσιμο και θάλαμος μετα-καύσης των καυσαερίων που πιθανώς περιέχουν καύσιμα αέρια. Είναι μια πολύ διαδεδομένη τεχνολογία καύσης ΑΣΑ καθώς είναι απλή, με ευελιξία στην σύσταση και το μέγεθος των σωμάτων στην τροφοδοσία και υψηλή δυναμικότητα (έως 50 t/h). Παρόλα αυτά λόγω των μηχανικώς κινούμενων μερών (σχάρες) και την επαφή τους με τις διαβρωτικές στάχτες σε υψηλή θερμοκρασία απαιτείται σχετικά συχνά διακοπή της λειτουργίας και συντήρηση. Η απόδοση είναι έως 85%. (16) (17)



Εστία κινούμενων σχαρών (16) (17)

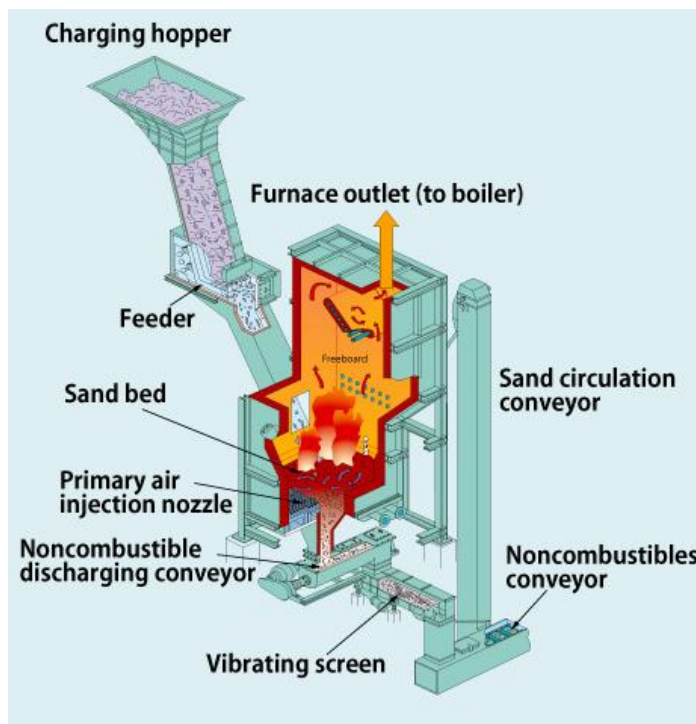
- Εστία περιστρεφόμενου κλιβάνου: εδώ ο κύριος θάλαμος καύσης αποτελείται από έναν οριζόντιο κεκλιμένο κύλινδρο οποίος τροφοδοτείται με τα ΑΣΑ στο υψηλότερο άκρο και μέσω της περιστροφικής του κίνησης τα αναδεύει και τα οδηγεί προς το χαμηλότερο. Παράλληλα καυστήρας στο χαμηλό άκρο παράγει έντονη φλόγα που αυξάνει την θερμοκρασία του θαλάμου και προωθεί την καύση των ΑΣΑ. Η συνεχής ανάδευση του κλιβάνου βοηθά στην καλή θέρμανση και επαφή του υλικού με το οξειδωτικό που διοχετεύεται ταυτόχρονα στον θάλαμο. Αυτό οδηγεί μεν στην ταχεία καύση των υλικών αλλά όμως σε συνδυασμό με τον μικρό χρόνο παραμονής η καύση είναι συνήθως ατελής. Αυτό απαιτεί μεγαλύτερη περίσσεια οξυγόνου (100-150%) απ' ό τι στις άλλες διατάξεις και θαλάμους μετα-καύσης τόσο των καυσαερίων του κυρίως θαλάμου όσο και της παραγόμενης στάχτης που περιέχει σε μεγάλο βαθμό καύσιμο στερεό προϊόν (π.χ. απανθράκωμα). Η διάταξη έχει μεγάλη ανοχή στην σύσταση και κατανομή μεγέθους της τροφοδοσίας καθώς και ικανή δυναμικότητα (έως 20t/h) σε σύγκριση με μονάδα κινούμενων σχαρών ίδιου «μεγέθους». Παρόλα αυτά έχει μεγάλο κόστος επένδυσης για την κατασκευή της και την συντήρηση και απαιτείται προσοχή στους μετα-καυστήρες προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης καύση για την αποφυγή μειωμένης απόδοσης της μονάδας και υπερφόρτωσης του συστήματος αντι-ρύπανσης. (16) (17)



Εστία περιστρεφόμενου κλιβάνου (18)

- Εστία ρευστοποιημένης κλίνης: εδώ ο θάλαμος καύσης είναι αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης. Το υλικό εισέρχεται στο επίπεδο της αδρανής κλίνης (πυριτική άμμος, αλούμινα κλπ) και από την έντονη ροή του αέρα (οξειδωτικό και μερική ανακύκλωση καυσαερίων) αναδεύεται και θερμαίνεται γρήγορα από την κλίνη. Με τον τρόπο αυτό τα απορρίμματα αντιδρούν γρήγορα και αποδοτικά. Τα παραγόμενα καυσαέρια κατά την ανοδική τους πορεία μπορεί να αναμειχθούν εκ νέου με οξειδωτικό προκειμένου να ολοκληρωθεί η καύση τους ενώ τα σωματίδια που πιθανώς παρασύρονται διαχωρίζονται από κυκλώνα και

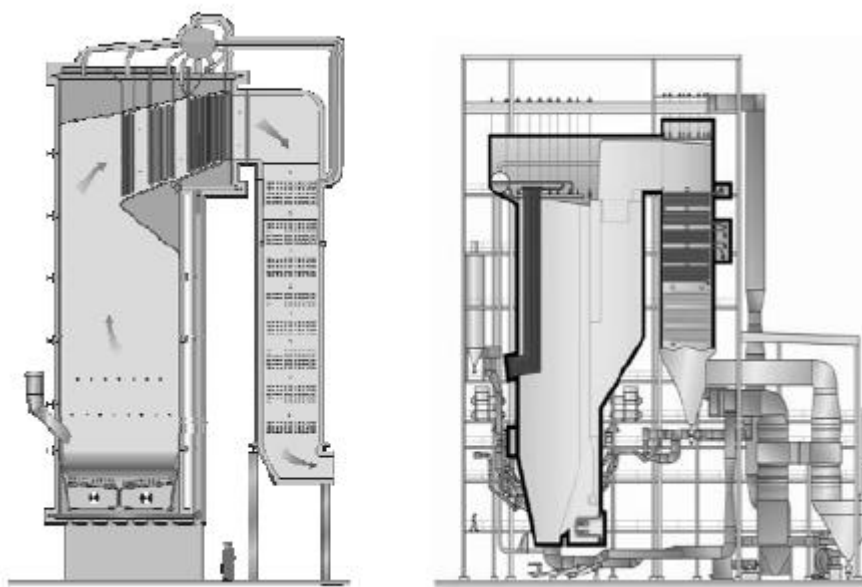
επανεισάγονται προκειμένου να καούν τελείως. Η διεργασία αυτή παρότι είναι νέα και όχι τόσο εκτενώς χρησιμοποιημένη όσο οι προηγούμενες παρουσιάζει πολλά οφέλη. Η γρήγορη θέρμανση της τροφοδοσίας λόγω της κλίνης, η καλή ανάμειξη οξειδωτικού και στερεού καυσίμου και η διατήρηση σταθερής και ενιαίας θερμοκρασίας κάνουν την μέθοδο αυτή ικανή για υψηλότερες ενεργειακές αποδόσεις, μικρότερη απώλεια ενέργειας από την τέφρα, πλήρη αντίδραση της τροφοδοσίας, ελαχιστοποίηση των παραγόμενων οργανικών ρύπων και μικρότερη απαίτηση για περίσσεια αέρα (50% έναντι 100-150% των άλλων τύπων εστιών). Όλα αυτά οδηγούν σε πολύ υψηλή απόδοση ενέργειας περί το 90%. Σχετικά με την τροφοδοσία, είναι ευέλικτη στην σύσταση και μπορεί να διαχειριστεί επιτυχώς και υγρά καύσιμα αρκεί να είναι ρυθμισμένη κατάλληλα για κάθε διαφορετική σύσταση. Όσον αφορά όμως το μέγεθος των στερεών σωμάτων της τροφοδοσίας απαιτεί προκατεργασία. Το μέγιστο μέγεθος πρέπει να είναι τέτοιο που να ανταποκρίνεται στην επιδιωκόμενη ανταπόκριση-συμπεριφορά του μέσα στην κλίνη και άρα η ελάττωση μεγέθους είναι απαραίτητη. (16) (17)



Εστία ρευστοποιημένης κλίνης (19)

Ακριβώς λόγω των παραπάνω προτερημάτων η τεχνολογία της ρευστοποιημένης κλίνης τείνει να εκτοπίζει προοδευτικά τις άλλες τεχνολογίες καύσης ΑΣΑ και αυτή προτείνεται να χρησιμοποιηθεί και εν προκειμένω. Πριν την κατάληξη όμως στην τεχνολογία εστίας ρευστοποιημένης κλίνης πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν ορισμένες παράμετροι που μπορεί να αποδειχθούν απαγορευτικές: οι επικαθίσεις, η ρύπανση, η διάβρωση και η συσσωμάτωση της κλίνης. Περισσότερο με αυτές συσχετίζονται η σύσταση του καυσίμου και η θερμοκρασία λειτουργίας. Τροφοδοσία με υψηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια (και ορισμένοι τύποι βιομάζας έχουν ιδίως σε κάλιο)

οδηγεί σε συσσωματώματα στην κλίνη που απαγορεύουν την λειτουργία της. Τροφοδοσία πλούσια σε χλώριο και θείο σε συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες πραγματοποιεί εκτεταμένη διάβρωση και μειώνει τον χρόνο ζωής. Υψηλές συγκεντρώσεις αζώτου με υψηλές θερμοκρασίες δημιουργούν υψηλές εκπομπές σε NOx. Όλα αυτά, εκτός από την υψηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια που απαιτεί επιλογή εστίας άλλου τύπου, μπορούν να αντιμετωπιστούν με κατάλληλες διατάξεις καθαρισμού των καυσαερίων, σωστή ρύθμιση της θερμοκρασίας και αντι-διαβρωτική επένδυση του αντιδραστήρα. Δεδομένου ότι εγκρίνεται η χρήση της τεχνολογίας αυτής, οι δύο βασικότερες παραλλαγές είναι αυτές της αναβράζουσας (bubbling fluidized bed, BFB) και της ανακυκλοφορούσας (circulating fluidized bed, CFB). Στην μεν πρώτη, η ταχύτητα ροής του ρευστοποιητικού μέσου (ο αέρας της καύσης και ίσως μέρος των καυσαερίων) είναι τέτοιος που προκαλεί έντονη ανατάραξη σε μια κλίνη αδρανούς στερεού (άμμος). Το υλικό εισάγεται στην επιφάνεια της κλίνης και από την ανάδευση αναμειγνύεται με την κλίνη. Αποκτώντας την θερμοκρασία της κλίνης και παρουσία του οξειδωτικού αέρα αντιδρά δίνοντας καυσαέρια και ενέργεια. Στην δεύτερη περίπτωση η ταχύτητα του μέσου είναι τέτοια που τα σωματίδια της τροφοδοσίας παρασύρονται προς την έξοδο των αερίων. Κατά την παραμονή τους στον αντιδραστήρα καίγονται, μερικώς, ενώ στην έξοδο διαχωρίζονται μέσω κυκλώνα και επανεισέρχονται στον αντιδραστήρα προκειμένου να αντιδράσουν εκ νέου. (20)



BFB και CFB εστίες καύσης ΑΣΑ (20)

Και οι δύο τεχνολογίες είναι εξαιρετικά αποδοτικές, με μεγάλη ευελιξία στην σύσταση του καυσίμου και χαμηλές εκπομπές. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων μπορούν να εφαρμοστούν και οι δύο. Η επιλογή όμως βασίζεται σε κυρίως 4 κρίσιμες παραμέτρους: κόστος επένδυσης, προδιαγραφές καυσίμου, εκπομπές ρύπων και ιδιότητες παραγόμενου ατμού. Όσον αφορά την BFB, είναι παλαιότερη και πιο οικεία, έχει χαμηλότερο κόστος επένδυσης, δέχεται καύσιμα με μικρότερη θερμογόνο δύναμη και υψηλότερη υγρασία, έχει ελαφρώς περισσότερες εκπομπές και παράγει

χαμηλότερης πίεσης και θερμοκρασίας ατμό σε σχέση με την CFB. Επίσης οι μονάδες BFB έχουν εύρος δυναμικότητας 10-400 MW ενώ οι CFB, 50-1000MW. (20)

Συνδυάζοντας τα παραπάνω δεδομένα με την σύσταση των ΑΣΑ προς καύση (χαρτί και πλαστικό, άρα υψηλή θερμογόνο δύναμη) αλλά και την μεγάλη ποσότητά τους (~415,000 t/a) παρότι το κόστος θα είναι υψηλότερο και η τεχνογνωσία πιο απαιτητική, η τεχνολογία CFB εκτιμάται ότι πρέπει να προτιμηθεί καθώς θα είναι σημαντικά αποδοτικότερη και ικανή να διαχειριστεί τον μεγάλο όγκο των ΑΣΑ χωρίς όμως να είναι απαγορευτικά πολύπλοκη/δύσχρηστη καθώς ακόμη και αν υπάρχει μικρή εξοικείωση στον ελληνικό χώρο με αυτό, υπάρχουν εταιρίες που ειδικεύονται στην εγκατάσταση και έναρξη λειτουργίας μονάδων τέτοιου τύπου.

Όσον αφορά τις προδιαγραφές της καύσης πρέπει να ήδη να εισαχθεί η έννοια της αντι-ρύπανσης από την οπτική της πρόληψης. Οι συνθήκες της καύσης πρέπει να είναι τέτοιες όπου όλη η μάζα οξειδώνεται στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό, ενώ το περιεχόμενο άζωτο να μετατρέπεται σε αέριο άζωτο ή στερεά άλατα του αζώτου, αντίστοιχα για το θείο, προκειμένου να είναι εύκολη η δέσμευσή τους. Η εξιδανικευμένη κατάσταση αυτή είναι σαφώς δύσκολο να επιτευχθεί και αυτή η αδυναμία συνεπάγεται παραγωγή ρύπων όπως μονοξείδιο του άνθρακα, φουράνια, διοξίνες και άλλες αλογονο-οργανικές ενώσεις πολύ επικίνδυνες για την υγεία. Προκειμένου να επιτευχθεί λοιπόν η τελειότερη δυνατή καύση πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν παράμετροι τόσο θερμοδυναμικής όσο και κινητικής των αντιδράσεων πλήρους οξείδωσης των πολυποίκιλων οργανικών ενώσεων της τροφοδοσίας. Η επιστημονική μελέτη επάνω στο θέμα έχει καταλήξει σε ορισμένα θεμελιώδη πορίσματα, σχετικά με την ελαχιστοποίηση των παραγόμενων ρύπων, αναφερόμενα ως τα τρία "t" της καύσης:

- Θερμοκρασία (temperature): ο σχηματισμός των φουρανίων/διοξινών οφείλεται κυρίως σε αντιδράσεις μεταξύ προϊόντων της ατελούς καύσης. Η ολοκληρωτική διάσπασή τους πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες άνω των 850 C οπότε και η ελάχιστη θερμοκρασία καύσης οφείλει να είναι αυτή. Σχετικά με τα ανθρακούχα μικροσωματίδια η διάσπασή τους επιτυγχάνεται άνω των 1000 C οπότε και η αντιμετώπισή τους απαιτεί την ανάλογη θερμοκρασία.
- Χρόνος (time): ο ελάχιστος χρόνος παραμονής των οργανικών ουσιών στον χώρο καύσης πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να αντιδράσουν τόσο που να μετατραπούν σε αβλαβές CO₂. Εν προκειμένω για τους 850 C ορίζεται 2 s ενώ για τους 1000 C, 1 s.
- Τυρβώδης ανάμιξη (turbulence): προκειμένου να αντιδράσουν επιτυχώς τα οργανικά μόρια απαιτείται κατάλληλη ανάμιξη με το οξειδωτικό μέσο. Στην περίπτωση των ρευστών η ένταση της ανάμιξης μιας ροής μπορεί να υποδειχθεί μέσω του αριθμού Reynolds. Το τυρβώδες εντός του θαλάμου καύσης πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο 10,000 Re ενώ για την βέλτιστη δυνατή απόδοση απαιτείται αριθμός $Re > 50,000$.

Ακόμη ένα μέσο βελτίωσης της επίτευξης της τέλει καύσης είναι η παρουσία περίσσειας οξυγόνου, καθότι αυξάνει το χημικό δυναμικό να οξειδωθούν παρά να συνθέσουν άλλα μόρια οι οργανικές ουσίες που υπάρχουν στον θάλαμο καύσης. Για τον λόγο αυτό απαιτείται ελάχιστη περίσσεια οξυγόνου 3-6% κατ' όγκο (15-30% κατ' όγκο περίσσεια αέρα). (21)

Τέλος προκειμένου να κατανεμηθεί αποδοτικότερα το οξειδωτικό μέσο στα σημεία που απαιτείται, η εισαγωγή του προτείνεται να γίνει σε στάδια. Κατ' αυτόν τον τρόπο το οξυγόνο εισάγεται, αντιδρά και εξαντλείται/ελαττώνεται και επανεισάγεται κατά μήκος του θαλάμου καύσης. Η μεθοδολογία αυτή βοηθά στην ταχύτερη και αποδοτικότερη πλήρη οξείδωση των οργανικών. (20)

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί μια σημαντική παράμετρος λειτουργίας που σχετίζεται με την φθορά του εξοπλισμού. Υπό τους 850 και 1000 C στον θάλαμο καύσης, τις οξειδωτικές συνθήκες και την υψηλή συγκέντρωση, δραστικών σε αυτές τις συνθήκες, διαβρωτικών όπως χλώριο και θείο απαιτείται μέριμνα για την προστασία των τοιχωμάτων του καυστήρα και ελάττωση της φθοράς τους. Οι κοινότερες λύσεις είναι δύο: α) Τα τοιχώματα κατασκευάζονται από πυρίμαχο υλικό. Αυτό συνεπάγεται εξαιρετικά αυξημένο κόστος και για αυτό αξιοποιείται μόνο στις «έντονες» ζώνες του καυστήρα, εάν υπάρχουν τέτοιες. β) τα τοιχώματα κατασκευάζονται μεν από μέταλλο (ειδικά κράματα) αλλά είναι διπλά και στο ενδιάμεσο κυκλοφορεί ψυκτικό μέσο, συνήθως νερό.

Η δεύτερη τεχνολογία είναι και η πιο διαδεδομένη και μπορεί να συνδυαστεί και με εσωτερική πυρίμαχη, ανθεκτική στην διάβρωση, επίστρωση. Η υδρόψυξη μειώνει αποτελεσματικά την θερμοκρασία των τοιχωμάτων με αποτέλεσμα να μην καταπονούνται έντονα από την διάβρωση και την φθορά γενικότερα. (20)

Μονάδα ανάκτησης ενέργειας:

Η μονάδα- διάταξη ανάκτησης ενέργειας είναι από τα σημαντικότερα σημεία της συνολικής μονάδας παραγωγής ενέργειας από ΑΣΑ. Η αποδοτική ανάκτηση ενέργειας εγγυάται την υψηλότερη δυνατή παραγωγή ωφέλιμης ενέργειας, συνήθως ηλεκτρικής. Η βασικότερη μέθοδος είναι η ροή νερού μέσω σωληνώσεων, μέσα από τον χώρο διέλευσης των θερμών καυσαερίων προς την απορρύπανση και διοχέτευσή τους στο περιβάλλον. Κατά την πορεία αυτή το νερό αυξάνει την θερμοκρασία του, αεριοποιείται (παραγωγή ατμού) και αυξάνεται και η πίεσή του. Στα πλαίσια της υψηλότερης δυνατής ανάκτησης πραγματοποιείται ροή του νερού από όλες τις θερμές περιοχές της διάταξης καύσης όπως, τα υδρόψυκτα τοιχώματα, τον κυκλώνα πρωτογενούς διαχωρισμού, τον χώρο απομάκρυνσης της τέφρας πυθμένα κλπ κατά αντιρροή, δηλαδή από τις ψυχρότερες προς τις θερμότερες περιοχές. Η καλή ανάκτηση θερμότητας είναι απαραίτητη καθώς ο ατμός που αξιοποιείται από τους ατμοστρόβιλους πρέπει να είναι τόσο υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης ούτως ώστε να μην πραγματοποιηθεί υγροποίηση του εντός του ατμοστρόβιλου καθώς τα σχηματιζόμενα σταγονίδια κινούμενα στις απαιτούμενες υψηλές ταχύτητες θα κατέστρεφαν τα πτερύγια του ατμοστρόβιλου. Η παραγωγή τέτοιου ατμού (ενδεικτική τιμή: 450 C, 60 bar) απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας σε υψηλές

θερμοκρασίες και αποδοτική μεταφορά θερμότητας κάτι που μόνο ένα αποδοτικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας μπορεί να επιτύχει. Για τον λόγο αυτό γίνεται προσεκτική μελέτη των θερμοκρασιακών ζωνών του εκάστοτε καυστήρα και σχεδιάζεται αναλόγως το δίκτυο ροής του νερού για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού.

Προσοχή πρέπει να δοθεί στις επιμέρους διατάξεις εναλλαγής θερμότητας καθώς ορισμένες εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες, υψηλές πιέσεις και διαβρωτικές συνθήκες. (22)

Διαχείριση τέφρας πυθμένα – ιπτάμενης τέφρας:

Όπως έχει αναφερθεί η καύση των ΑΣΑ, και του RDF στην συνέχεια, συνοδεύεται από σχετικά μεγάλη παραγωγή τέφρας. Μέρος αυτής της τέφρας απομακρύνεται από τον πυθμένα ενώ μέρος της παρασύρεται από τα καυσαέρια (ιπτάμενη τέφρα). Στην ιπτάμενη τέφρα προστίθεται και η μάζα των ρύπων που έχουν δεσμευτεί από /μετατραπεί σε στερεά μέσα. Η σύσταση της τέφρας είναι πολυποίκιλη. Στην τέφρα πυθμένα κυριότερο συστατικό είναι τα ανθρακικά άλατα και συνήθως διαχειρίζεται μέσω απλής απόθεσης. Ωστόσο η ιπτάμενη τέφρα που συνοδεύεται από μεγάλο μέρος των ρύπων απαιτείται αδρανοποίησή τους για την ασφαλή διάθεσή της. Η απλούστερη κατεργασία περιλαμβάνει ανάμιξη με τσιμέντο και τσιμεντοποίηση της μάζας σε αδρανές στερεό συμπαγές σώμα που μπορεί να αποτεθεί ασφαλώς. (22)

Μονάδα αντι-ρύπανσης:

Λόγω της σύστασης της τροφοδοσίας και των πραγματικών συνθηκών καύσης παράγεται πλήθος ρυπαντών κατά την καύση των ΑΣΑ:

- Σωματιδιακοί ρυπαντές: κατά την καύση παράγεται ιπτάμενη τέφρα και πολλά από τα βαρέα μέταλλα αεριοποιούνται και κατά την ψύξη των καυσαερίων επανέρχονται στην στερεά κατάσταση ως επικαθίσεις πάνω στην ιπτάμενη τέφρα (Sb, As, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Hg, Ni, Tl, V)
- Αέριοι ρυπαντές: στοιχεία όπως χλώριο, θείο, φθόριο και άζωτο στην τροφοδοσία (και στον αέρα καύσης για την περίπτωση του αζώτου) υπό τις συνθήκες της καύσης μετατρέπονται σε υδροχλώριο, υδροφθόριο, οξειδία του θείου και του αζώτου. Ακόμη λόγω της μερικής καύσης πραγματοποιείται σχηματισμός διοξινών και φουρανίων, οργανικών ουσιών εξαιρετικά επιβλαβών για την υγεία.

Καθώς οι παραπάνω ρύποι είναι επικίνδυνοι και στην περίπτωση καύσης των απορριμμάτων παράγονται μεγάλοι όγκοι καυσαερίων έχουν θεσπιστεί κανονισμοί και όρια σχετικά με την μέγιστη δυνατή εκπομπή. Αυτά διαφέρουν ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση (γεω-πολικοί, κοινωνικοί, τεχνολογικοί και οικονομικοί παράγοντες) αλλά μπορούν να διαχωριστούν σε τρία επίπεδα αυξανόμενης αυστηρότητας: βασικό, μέτριο και προχωρημένο και διαμορφώνονται, ενδεικτικά, παρακάτω (καυσαέρια σε πρότυπες συνθήκες: 0 C, 1 atm):

Raw flue gas concentrations and emission standards (mg/Nm₃, dry, 11% O₂)

Parameter	Raw flue gas	Emission standard		
		Basic	Medium	Advanced
Particles	2000	30	30	10
HCl	600	n.a.	50	10
HF	5	n.a.	2	1
SO ₂	250	n.a.	300	50
NO _x (as NO ₂)	350 ^a	n.a.	n.a.	200
Hg	0.3	n.a.	n.a.	0.05
Hg + Cd	1.8	n.a.	0.2	n.a.
Cd + Tl	1.6	n.a.	n.a.	0.05
Ni + As	1.3	n.a.	1	n.a.
Pb + Cr + Cu + Mn	50	n.a.	5	n.a.
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V	60	n.a.	n.a.	0.5
Dioxins and furans. ng/Nm ³	3	n.a.	n.a.	0.1

Διάφορες προδιαγραφές καυσαερίων (17)

Εν προκειμένω προτιμότερη κρίνεται η πληρέστερη δυνατή απορρύπανση των καυσαερίων καθώς η περιοχή της Αττικής είναι πυκνοκατοικημένη και ήδη η περιβαλλοντική επιβάρυνση προκαλεί πληθώρα υγειονομικών προβλημάτων στον πληθυσμό της. Επομένως δεν υπάρχει κανένα περιθώριο ανοχής για περιβαλλοντική επιβάρυνση με άμεσο αντίκτυπο στον ανθρώπινο οργανισμό.

Η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων από τέτοιες μονάδες μπορεί να αντιμετωπιστεί με πρωτογενή ή δευτερογενή μέτρα. Ως πρωτογενή ορίζονται τα μέτρα που προλαμβάνουν τον σχηματισμό των ρύπων. Χαρακτηριστικά, ο σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα η χαμηλή θερμοκρασία καύσης (850 C) να συνεπάγεται μικρότερη εκπομπή NO_x. Ακόμη ο σχηματισμός διοξινών αυξάνεται στους 250-400 C και η καταστροφή τους σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 900 C. Επειδή καθώς φαίνεται αυτά τα μέτρα είναι ανεπαρκή για την επιθυμητή ελάττωση των ρύπων γίνεται και αξιοποίηση των δευτερογενών που απαρτίζονται από συσκευές που διαχωρίζουν τους ρύπους σε ένα ρεύμα το οποίο στην συνέχεια διαχειρίζεται καταλλήλως.

Για την επίτευξη λοιπόν αυτών των τιμών υφίστανται διάφορες τεχνολογίες – διατάξεις «ελέγχου ρύπανσης του αέρα» (Air Pollution Control, APC). Οι βασικότερες εξ αυτών είναι:

- Κυκλώνας (Cyclone): η απλούστερη διάταξη διαχωρισμού στερεών σωματιδίων από αέριο ρεύμα. Ωστόσο ακόμη και μόνο στον διαχωρισμό στερεών δεν είναι αποδοτικός (με άριστο σχεδιασμό φτάνει τα 150 mg/Nm³).
- Υγροί καθαριστές (Wet Scrubbers, WS): βασικότερη διάταξη είναι ο καθαριστής τύπου Venturi. Εδώ, σε συσκευή τύπου Venturi, εισέρχονται τα καυσαέρια και ένα ρευστό μέσο, συνήθως νερό. Λόγω του φαινομένου Venturi

νερό και καυσαέρια αναμιγνύονται αποδοτικά με αποτέλεσμα να απορροφούνται οι στερεοί ρυπαντές (έως και 100 mg/Nm^3 στην έξοδο) αλλά και τα οξέα όπως υδροχλώριο και υδροφθόριο. Σε περίπτωση που προστεθεί και αλκάλιο στο νερό έκπλυσης (π.χ. ασβέστης) πραγματοποιείται και δέσμευση των οξειδίων του θείου. Παρότι φθηνή και απλή διάταξη έχει αυξημένο κόστος λειτουργίας και συντήρησης (υψηλή πίεση νερού, διαβρωτικές συνθήκες) και παράγει υγρό απόβλητο προς διαχείριση και απόθεση.

- Ξηροί καθαριστές (Dry Scrubbers, DS): η αρχή είναι παρόμοια με αυτή των υγρών μόνο που εδώ το ρευστό με το αλκάλιο είναι σε τέτοια αναλογία προς τα καυσαέρια και την θερμοκρασία τους ώστε το νερό εξατμίζεται και απομένει μόνο στερεό και καθαρά καυσαέρια τα οποία και διαχωρίζονται. Εδώ επιτυγχάνεται έως και 70% δέσμευση των όξινων αερίων. Τόσο όμως ξηροί όσο και υγροί καθαριστές δεσμεύουν ελάχιστα τις διοξίνες και τα φουράνια.
- Σακκόφιλτρα (Fabric Filters, FF): αποτελούνται από σάκους υφασμένου υαλοβάμβακα μέσω των οποίων διαρρέουν τα καυσαέρια. Είναι οικονομικοί σε κατασκευή και συντήρηση και πολύ αποδοτικοί στον διαχωρισμό των στερεών ρύπων (λόγω της πορώδους φύσης του υαλοβάμβακα μπορούν να συγκρατήσουν σωματίδια μικρότερα και από $1 \mu\text{m}$, με συνολική δέσμευση που αφήνει στα καυσαέρια στερεά 10 mg/Nm^3) και πραγματοποιείται και σε κάποιο βαθμό δέσμευση βαρέων μετάλλων, όξινων αερίων και οργανικών ως επικαθίσεις πάνω στα σωματίδια των στερεών ρύπων. Ωστόσο είναι αρκετά ευπαθή όσον αφορά υψηλές θερμοκρασίες (λειτουργούν κάτω από 200 C), παρουσία όξινων αερίων, υγρασία και σπίθες από την καύση. Για τον λόγο αυτό δεν αξιοποιούνται ποτέ από μόνα τους και πάντοτε προς το τέλος της μονάδας αντι-ρύπανσης.
- Κεραμικά φίλτρα: γνωστά και ως φίλτρα-‘κεριά’ (candle filters) αποτελούνται από έναν κοίλο σωλήνα κεραμικού υλικού συγκεκριμένου πορώδους που επιτρέπει την διέλευση μέσω των τοιχωμάτων του στα αέρια ενώ τα σωματίδια κατακάθονται στην επιφάνεια. Το πλεονέκτημά τους οφείλεται στο ότι λόγω του υλικού κατασκευής τους είναι δυνατή η χρήση τους σε υψηλές θερμοκρασίες έως $800-900 \text{ C}$ και έτσι επιτρέπουν τον εν θερμώ καθαρισμό των αερίων ρευμάτων από σωματίδια, όπου αυτός απαιτείται. Και εδώ απαιτείται καθαρισμός των επικαθίσεων καθώς η μεγάλη πτώση πίεσης που προκαλείται σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασιακή καταπόνηση μπορεί να οδηγήσει σε ράγισμα του φίλτρου και άρα ακύρωση της διαχωριστικής του ικανότητας και όποια επιπλοκή αυτό συνεπάγεται στον εξοπλισμό παρακάτω.
- Ηλεκτροστατικοί διαχωριστήρες (Electrostatic Precipitators): είναι οι κατ’εξοχήν προτιμητέες μονάδες δέσμευσης σωματιδιακών ρύπων. Η λειτουργία τους βασίζεται στην είσοδο των καυσαερίων εντός ενός έντονου ηλεκτροστατικού πεδίου, την φόρτιση των σωματιδίων και την προσκόλλησή τους πάνω σε αντίθετα φορτισμένες πλάκες. Για την καλύτερη απόδοση χρησιμοποιούνται σε σειρά με διαφορετική τάση πεδίου ανά διάταξη. Συνήθως χρησιμοποιούνται κοντά στην είσοδο της μονάδας αντι-ρύπανσης και

διαχωρίζονται σε θερμούς (hot-side) και ψυχρούς (cold-side). Το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας τους είναι 130-450 C αλλά διαφέρουν στην θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων. Για τους μεν είναι πάνω από 230 C και για τους δε αντίστοιχα, κάτω. Παρότι η απόδοσή τους είναι καλή (στερεά στην έξοδο: 20-150 mg/Nm³) και το κόστος λειτουργίας χαμηλό, έχουν υψηλό κόστος επένδυσης αλλά κυρίως, στο θερμοκρασιακό εύρος που λειτουργούν συνήθως πραγματοποιείται σύνθεση διοξινών. Παρότι μέρος αυτών συγκρατείται από τον διαχωρισμό των σωματιδίων, η αυξημένη σύνθεσή τους οδηγεί σε καθαρή αύξηση της συγκέντρωσής τους στην έξοδο. Επομένως σε περίπτωση επιλογής ESP αυτός πρέπει να είναι cold-side με θερμοκρασία λειτουργίας κάτω των 200 C, για να περιοριστεί αυτό το φαινόμενο.

- Προσρόφηση παρασυρόμενης ροής (Entrained flow adsorber): εδώ γίνεται εμφύσηση υπό υψηλή πίεση ενεργού άνθρακα ή κωκ εστίας φούρνου (Hearth Oven Coke, HOC) εντός αντιδραστήρα μαζί με τα καυσαέρια. Οι προσροφητικές ικανότητες του άνθρακα αυτού του τύπου επιτυγχάνουν την δέσμευση πολλών αέριων ρύπων (κυρίως οργανικά). Ο άνθρακας ανακυκλώνεται μέχρι να εξαντληθεί η ικανότητα ρόφησης του και κατόπιν μπορεί να οδηγηθεί στην τροφοδοσία του καυστήρα προς καταστροφή των οργανικών ρύπων. Μια μέση κατανάλωση άνθρακα είναι περί τα 50 mg/Nm³.
- Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (Selective Catalytic Reduction, SCR): αποτελεί την διαβίβαση των καυσαερίων μέσω καταλυτών για την αναγωγή των NO_x σε άζωτο. Είναι από τις ακριβότερες μεθόδους και απαιτείται πολύ καλός καθαρισμός των καυσαερίων πριν από αυτό το στάδιο για να αποφευχθεί η δηλητηρίαση των καταλυτών από τους άλλους ρύπους. Επειδή στοχεύει αποκλειστικά στα οξειδία του αζώτου, μια εξίσου αποδοτική αλλά οικονομικότερη εναλλακτική λύση (μικρότερης όμως κλίμακας) είναι ο υγρός καθαρισμός μέσω διαλύματος ουρίας ή η εν θερμώ (900 C) κατεργασία με αμμωνία που έχει την ιδιότητα να διασπά αυτά τα οξειδία.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί η υψηλή απαίτηση για μειωμένη εκπομπή διοξινών. Το όριο εκπομπής είναι έως και 4 τάξεις μεγέθους μικρότερο από αυτό των άλλων ρύπων. Η υψηλή αυτή απαίτηση υποδεικνύει και την προσοχή που πρέπει να δοθεί λόγω της σοβαρότητας αυτού του ρύπου. Σύμφωνα με τα επιστημονικά πορίσματα κατά τα πρωτογενή μέτρα αντι-ρύπανσης σημασία έχει πέρα από τις συνθήκες λειτουργίας και το μέγεθος του καυστήρα. Μικροί καυστήρες-μονάδες αδυνατούν να διατηρήσουν σταθερότητα στη θερμοκρασία και δεν είναι οικονομικοί στην λειτουργία τους. Αντίθετα μεγάλοι καυστήρες παρουσιάζουν διακυμάνσεις της θερμοκρασίας εντός τους και αδυναμίες ανάμιξης. Όλα αυτά ευνοούν την σύνθεση διοξινών στον χώρο του καυστήρα. Το βέλτιστο μέγεθος λοιπόν εντοπίζεται σε μέγεθος καυστήρα τέτοιο με δυναμικότητα 350-400 t/h τροφοδοσία καυσίμου. Στα δευτερογενή μέτρα, μετά τον θάλαμο καύσης η σύνθεση των διοξινών στα καυσαέρια πραγματοποιείται έντονα στο θερμοκρασιακό εύρος των 300-500 C. Για τον λόγο αυτό πρέπει να πραγματοποιείται όσο το δυνατόν ταχύτερη ψύξη των καυσαερίων στο εύρος αυτό. (17) (21)

Συνυπολογίζοντας όλα τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπ' όψιν την σύσταση του καυσίμου RDF, την ικανότητα του CFB καυστήρα, το κόστος επένδυσης και συντήρησης του συστήματος αντι-ρύπανσης, την εξοικείωση με την επιλεγόμενη τεχνολογία καθώς και εμπειρικά δεδομένα (22), καταλληλότερο κρίνεται ένα σύστημα ημι-ξηρού καθαρισμού με πολφό ασβέστη και ενεργού άνθρακα σε πλυντηρίδα τύπου Venturi και κατόπιν κατακράτηση σωματιδίων από σακκόφιλτρα. Τα καυσαέρια ψύχονται απότομα μέσω του νερού στην πλυντηρίδα, ο ασβέστης δεσμεύει τα όξινα αέρια και ο ενεργός άνθρακας τα οργανικά. Τα ψυχρά καυσαέρια με τα σωματίδια, την σκόνη των αλάτων του ασβέστη και τον ενεργό άνθρακα φιλτράρονται από τα σακκόφιλτρα όπου και γίνεται και η πλήρης δέσμευση των βαρέων μετάλλων. Η παραγωγή οξειδίων του αζώτου αναμένεται να είναι χαμηλότερη των προβλεπόμενων ορίων καθώς η μικρή θερμοκρασία του καυστήρα δεν ευνοεί τον σχηματισμό τους, για αυτό και δεν περιλαμβάνεται στάδιο καθαρισμού τους. Ωστόσο μπορεί εύκολα και οικονομικά να προστεθεί μια πλυντηρίδα διαλύματος ουρίας/αμμωνίας. Το κόστος επένδυσης είναι χαμηλό (απλές και λίγες συσκευές), η φθορά-διάβρωση μικρή και δεν παράγονται υγρά απόβλητα οπότε η διαχείριση περιορίζεται στην απόθεση της τέφρας.

Τεχνολογίες δέσμευσης άνθρακα:

Χρησιμότητα:

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ο κυριότερος ρύπος που παράγεται από όλες τις διεργασίες καύσης και είναι ο πρώτος ρύπος όσον αφορά την δημιουργία και επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνολογίες σχετικά με την δέσμευση αυτού του ρύπου και την διάθεση του σε χώρους πέρα από την ατμόσφαιρα (Carbon Capture and Storage/Sequestration, CCS), όπως σε κατάλληλους γεωλογικούς σχηματισμούς στο υπέδαφος ή στον πυθμένα των ωκεανών. Αυτή η διαχείριση του παραγόμενου CO₂ αφορά την προέλευσή του από ορυκτούς άνθρακες καθώς αυτοί είναι που «εισάγουν» CO₂ στην ατμόσφαιρα και επιβαρύνουν το «ισοζύγιο άνθρακα». Η καύση βιομάζας στην ουσία απελευθερώνει CO₂ που προέρχεται από ύλη η οποία σχηματίστηκε με πρώτη ύλη το ίδιο το CO₂ (μεταβολική δραστηριότητα των φυτών και κατ' επέκταση των φυτοφάγων ζώων, των σαρκοφάγων που τρέφονται με τα φυτοφάγα και στην συνέχεια των απεκκριμάτων τους) επομένως και «ανακυκλώνει» το CO₂ χωρίς να επιβαρύνει το συνολικό ισοζύγιο στην ατμόσφαιρα. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν δεν απαιτείται δέσμευση του παραγόμενου CO₂ κατά την καύση της βιομάζας καθώς δεν επιβαρύνει ουσιαστικά. Η δέσμευση όμως αυτού του CO₂ μπορεί να αντισταθμίσει την απελευθέρωση του στην ατμόσφαιρα από άλλες διεργασίες που αξιοποιούν ως πρώτη ύλη ορυκτό άνθρακα. Αυτό μπορεί να έχει δράση σε διεθνή κλίμακα καθώς σύμφωνα με την συνθήκη του Κιότο, τα δικαιώματα στις εκπομπές ρύπων, άρα και του CO₂, είναι εμπορεύσιμα (23). Αυτό αποτελεί ένα ακόμη έσοδο για την μονάδα παραγωγής ενέργειας που συμβάλει στην κερδοφορία – βιωσιμότητα της.

Αντίθετα όμως προς το μεγάλο περιβαλλοντικό όφελος, η δέσμευση του CO₂ σε μια βιομηχανική μονάδα και συγκεκριμένα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια διεργασία που επιβαρύνει σημαντικά οικονομικά τόσο την εγκατάσταση όσο και την λειτουργία της μονάδας καθώς πέρα από τον εξοπλισμό και τα αναλώσιμα καταναλώνει και ένα μέρος της παραγόμενης ενέργειας. Με την απαιτούμενη κατανάλωση ενέργειας η πρόσθετη οικονομική επιβάρυνση ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας (π.χ. MWh) φτάνει στο 40-85% για μονάδα κονιοποιημένου άνθρακα (Pulverized Coal, PC), 35-70% για μονάδα φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου (Natural Gas Combined Cycle, NGCC) και 20-55% για μονάδα αεριοποίησης-καύσης συνδυασμένου κύκλου (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC). Αυτό πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπ' όψιν κατά την επιλογή ή όχι χρήσης δέσμευσης του CO₂ σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας καθώς κρίνει σε μεγάλο βαθμό την βιωσιμότητα της. (24)

Η απλούστερη μέθοδος δέσμευσης του CO₂ είναι η βελτίωση της απόδοσης της μονάδας. Καθώς η αξιολόγηση των εκπομπών έχει μια βάση ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας, με βελτίωση της απόδοσης η ίδια μάζα καυσίμου, και συνεπώς η ίδια μάζα καυσαερίων, αποδίδει περισσότερη ενέργεια και άρα μειώνεται η εκπομπή των ρύπων. Για κάθε 2% αύξηση της απόδοσης της μονάδας επιτυγχάνεται 5% μείωση στις εκπομπές CO₂ (25). Παρόλα αυτά οι μηδενικές

εκπομπές είναι ένας πολύ πιθανός στόχος των επόμενων δεκαετιών ή ακόμη και ετών και άρα απαιτείται η χρήση επιπρόσθετων τεχνολογιών για την επίτευξή τους.

Κατηγορίες τεχνολογιών:

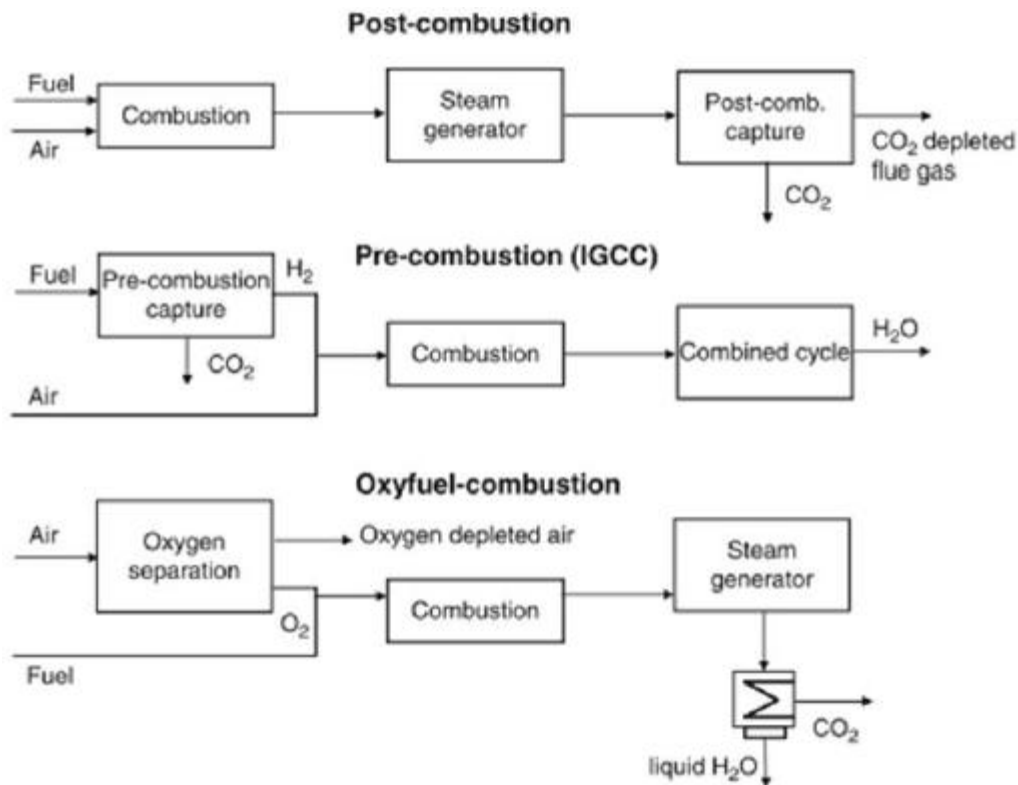
Οι παρούσες τεχνολογίες δέσμευσης άνθρακα κατηγοριοποιούνται με βάση το στάδιο στο οποίο γίνεται η δέσμευση του CO₂:

Δέσμευση προ της καύσης: η κατηγορία αυτή είναι εφαρμόσιμη σε συγκεκριμένη περίπτωση. Αφορά κατ' αποκλειστικότητα σε εγκαταστάσεις αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC) όπου το καύσιμο αεριοποιείται πρώτα και κατόπιν καίγεται. Στην περίπτωση αυτή, αξιοποιώντας την shift-reaction είναι δυνατή η μετατροπή του Syngas (θα αναλυθεί παρακάτω στην αεριοποίηση) σε ρεύμα H₂ και CO₂. Με δέσμευση του CO₂, το απομένον H₂ μπορεί να αξιοποιηθεί ως καύσιμο με μοναδικό προϊόν νερό (και ενέργεια) και άρα να υπάρχει μηδενική εκπομπή CO₂ από την μονάδα παραγωγής ενέργειας.

Δέσμευση μετά της καύσης: εδώ η δέσμευση του CO₂ γίνεται από το ρεύμα των καυσαερίων μετά από καύση με ατμοσφαιρικό αέρα. Η περιεκτικότητα του ρεύματος προς CCS σε CO₂ είναι συνήθως μικρή (3-15% κατ' όγκο). Παρόλα αυτά απαιτείται καθαρισμός του ρεύματος των καυσαερίων από τους υπόλοιπους ρύπους, πριν ή μετά την δέσμευση του CO₂.

Καύση με καθαρό οξυγόνο: αποτελεί μια ειδική περίπτωση δέσμευσης μετά την καύση. Και αυτό γιατί στην περίπτωση καύσης με καθαρό οξυγόνο το ρεύμα των καυσαερίων αποτελείται «μόνο» από CO₂ και H₂O. Εδώ η διεργασία διαχωρισμού είναι απλή καθώς με κοινή ψύξη είναι δυνατόν να παραχθεί συμπύκνωμα νερού και καθαρό CO₂.

Η κάθε κατηγορία έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι δύο πρώτες απαιτούν πιο πολύπλοκες και ενεργοβόρες διεργασίες ενώ η τρίτη είναι εξαιρετικά απλή και οικονομική αλλά προαπαιτεί την παραγωγή καθαρού οξυγόνου που είναι πολύπλοκη και ακριβή. Ακόμη στην πρώτη περίπτωση η δέσμευση είναι ελαφρώς πιο εύκολη, απ' ό,τι στην δεύτερη, καθώς το ρεύμα είναι ήδη υπό πίεση, απλής σύστασης (H₂, CO, CO₂) και έχει αυξημένη περιεκτικότητα σε CO₂ -που διευκολύνουν τον διαχωρισμό- αλλά προαπαιτεί την ύπαρξη μονάδας IGCC. Αντίθετα η δεύτερη μπορεί να προσαρμοστεί σε ήδη υπάρχουσες μονάδες που εκπέμπουν CO₂. (25)



Μέθοδοι δέσμευσης CO₂ (26)

Διεργασίες δέσμευσης CO₂:

Οι βασικότερες διεργασίες δέσμευσης/διαχωρισμού του CO₂ που εφαρμόζονται σήμερα είναι οι:

- Ρόφηση (χημική ή φυσική σε διαλύτη ή στερεό)
- Προσρόφηση (στην επιφάνεια στερεού)
- Μembrάνες (βάση διαφορετικής διαπερατότητας των αερίων)
- Κρυογονικός διαχωρισμός (βάση διαφορετικής πτητικότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες)

Ρόφηση

Κατά την ρόφηση το αέριο προς καθαρισμό ρέει εντός αντιδραστήρα και καταιονίζεται με διαλύτη οποίος απορροφά το αέριο CO₂ από την μάζα των λοιπών αερίων. Κατόπιν ο διαλύτης αναγεννάται (συνήθως μέσω θέρμανσης αλλά όταν είναι δυνατό και μέσω ελάττωσης πίεσης) και το CO₂ αεριοποιείται και πάλι αλλά πλέον σε καθαρή μορφή, κατάλληλο προς διάθεση. Η διεργασία αυτή είναι γενικότερα γνωστή ως «καθαρισμός όξινων αερίων» (Acid Gas Scrubbing, AGS).

Ο «διαλύτης» είναι συνήθως οργανικός διαλύτης που πραγματοποιεί χημική ή φυσική ρόφηση του CO₂. Η διεργασία αυτή είναι και η πιο διαδεδομένη,

συγκεκριμένα με διαλύτη αμίνη και αξιοποιείται ήδη για καθαρισμό αερίων ρευμάτων παροχής, τυπικά, της τάξης των 200,000 Nm³/h και περιεκτικότητας σε CO₂ ακόμη και από 2% κατ' όγκο. Λόγω της ευρείας εφαρμογής της έχουν σχεδιαστεί και αξιοποιηθεί διάφοροι διαλύτες:

Solvent name	Type	Chemical name	Vendors
Rectisol	Physical	Methanol	Lurgi and Linde, Germany Lotepro Corporation, USA
Purisol	Physical	N-methyl-2-pyrrolidone (NMP)	Lurgi, Germany
Selexol	Physical	Dimethyl ethers of polyethylene glycol (DMPEG)	Union Carbide, USA
Benfield	Chemical	Potassium carbonate	UOP
MEA	Chemical	Monoethanolamine	Various
MDEA	Chemical	Methyldiethylamine	BASF and others
Sulfinol	Chemical	Tetrahydrothiophene 1,1-dioxide (Sulfolane), an alkoamine and water	Shell

Στοιχεία για διάφορους εμπορικούς διαλύτες διαχωρισμού CO₂ (24)

Η γενικότερη φύση της «πλύσης αερίων» της διεργασίας είναι γνωστή και οικεία εδώ και δεκαετίες σε πολλές γραμμές παραγωγής και η διεργασία αξιοποιεί αρκετά απλό εξοπλισμό. Πέρα του ότι προαπαιτείται ψύξη και καθαρισμός του αερίου ρεύματος από ορισμένους όξινους ρυπαντές και σωματίδια, το βασικότερο μειονέκτημα της όμως είναι ότι δεν μπορεί εύκολα να αναβαθμιστεί, από άποψης μεγέθους, ούτως ώστε να ανταπεξέλθει στον τεράστιο όγκο ροής αερίων των διεργασιών παραγωγής ενέργειας (τα καυσαέρια μιας μονάδας καύσης φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου μπορούν να φτάσουν έως και τα 5,000,000 Nm³/h με περιεκτικότητα CO₂ 3% κατ' όγκο). Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε μεγάλη ποσότητα διαλύτη (τόσο για την λειτουργία της διεργασίας όσο και για την αναπλήρωση αυτού που χάνεται σταδιακά λόγω εξάτμισης, διάσπασης κλπ, περί τα 0.2-1.6kg/t CO₂), πολύ ψηλούς πύργους απορρόφησης και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας για την αναγέννηση του διαλύτη.

Προκειμένου η τεχνολογία αυτή να μπορεί να καταστεί πρακτικά και οικονομικά βιώσιμη απαιτείται η ανάπτυξη διαλυτών με δυνατότητα συγκράτησης μεγάλης ποσότητας CO₂ ανά μονάδα μάζας του διαλύτη, υψηλή ταχύτητα στην αντίδραση δέσμευσης – αποδέσμευσης, και μικρή απαίτηση ενέργειας για την αναγέννηση τους. Λόγω της ήδη μεγάλης πρακτικής εφαρμογής της διεργασίας αναζητούνται άλλοι «διαλύτες» υπό την ευρύτερη έννοια ουσιών που είναι σε θέση να δεσμεύουν το CO₂ και να αναγεννώνται πληρώνοντας τα παραπάνω κριτήρια.

Αποτέλεσμα της έρευνας αυτής είναι η μελέτη της χρήσης ιοντικών υγρών και στερεών ροφητών αντί για οργανικούς διαλύτες. Τα ιοντικά υγρά, φυσικά ή συνθετικά, είναι ουσίες που αποτελούν άλατα με σημείο τήξης χαμηλότερο από αυτό της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ή γενικότερα χαμηλών θερμοκρασιών (με αποτέλεσμα να είναι υγρά άλατα στην φυσική τους μορφή), με εξαιρετική θερμική σταθερότητα, μηδενική πτητικότητα, χαμηλή απαιτούμενη ενέργεια για την αναγέννησή τους και πολλαπλάσια ικανότητα δέσμευσης CO₂ από τους κοινούς διαλύτες. Αυτό τα καθιστά ιδανικά για αξιοποίηση σε μεγαλύτερες δυναμικότητες και υψηλότερες θερμοκρασίες που συνάδουν με μονάδες παραγωγής ενέργειας.

Οι στερεοί ροφητές αντίστοιχα είναι μεταλλικές ενώσεις, συνηθέστερα αλκάλια-αλκαλικές γαίες (νάτριο, κάλιο, λίθιο, ασβέστιο κλπ) τα οποία παρουσία CO₂ αντιδρούν προς τα αντίστοιχα ανθρακικά άλατά τους, κατόπιν διαχωρίζονται από το αέριο ρεύμα και σε διαφορετικό αντιδραστήρα «ασβεστοποιούνται» δηλαδή μέσω έντονης θέρμανσης (από 600 μέχρι και άνω των 900 C) αποβάλλουν το καθαρό CO₂ και μετατρέπονται στα αντίστοιχα οξειδία τους έτοιμα να δεσμεύσουν εκ νέου το CO₂ από το ρεύμα ενδιαφέροντος. Οι στερεοί ροφητές ως απλές στοιχειακές ενώσεις (άλατα μετάλλων) μπορούν να αξιοποιηθούν σε υψηλές θερμοκρασίες, έχουν μηδενική θερμική διάσπαση (εννοώντας αχρήστευση) και άρα ανάγκη για αναπλήρωση, μεγάλες ταχύτητες αντιδράσεων δέσμευσης – αποδέσμευσης του CO₂ και μηδενική απαίτηση για χρήση νερού στην διεργασία. Ωστόσο και τα δύο παραπάνω μέσα ρόφησης είναι πολύ πρόσφατη τεχνολογία στον συγκεκριμένο τομέα και απαιτείται εκτενέστερη μελέτη και δοκιμή πριν την εμπορική εφαρμογή τους, και δη σε τόσο μεγάλες διεργασίες όπως αυτές της παραγωγής ενέργειας. (25) (24)

Προσρόφηση

Η διεργασία της προσρόφησης είναι παρόμοια με αυτή της ρόφησης (αν και ο μηχανισμός σε μοριακό επίπεδο είναι εντελώς διαφορετικός) και διαφορές εντοπίζονται κυρίως στην πρακτική εφαρμογή. Κατά την προσρόφηση μοριακά κόσκινα ή ενεργός άνθρακας χρησιμοποιούνται για να δεσμεύσουν το CO₂ από ένα αέριο ρεύμα υπό ορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Κατόπιν η εκρόφηση γίνεται με αλλαγή είτε της πίεσης είτε της θερμοκρασίας σε συνθήκες που ευνοούν πλέον την εκρόφηση του CO₂, δημιουργώντας έτσι το ρεύμα καθαρού CO₂ προς απόθεση. Αφού το προσροφητικό μέσο «αποφορτιστεί» από το CO₂ είναι πλέον και πάλι έτοιμο να δεσμεύσει νέα ποσότητα. Η εναλλαγή πίεσης ή θερμοκρασίας μεταξύ των δύο συνθηκών προσρόφησης – εκρόφησης δίνει και την αντίστοιχη ονομασία στην συγκεκριμένη διεργασία: παλινδρόμησης/ταλάντευσης πίεσης ή θερμοκρασίας (Pressure / Temperature Swing Adsorption, PSA / TSA) ή και συνδυασμού τους (PTSA). Συνηθέστερα χρησιμοποιείται η PSA καθώς η μεταβολή της πίεσης πραγματοποιείται ταχύτερα και με μικρότερη απαίτηση σε ενέργεια.

Η τεχνική εφαρμογής αυτής της διεργασίας είναι σε παράλληλες σταθερές κλίνες προσροφητικού μέσου. Η πρώτη κλίνη πραγματοποιεί δέσμευση του CO₂ από το αέριο ρεύμα ενδιαφέροντος. Μόλις κορεστεί, το αέριο ρεύμα ανακατευθύνεται προς την δεύτερη κλίνη ενώ ταυτόχρονα αρχίζει η αναγέννηση της πρώτης. Όταν κορεστεί η δεύτερη, η πρώτη είναι και πάλι έτοιμη να δεσμεύσει CO₂, το αέριο ρεύμα ανακατευθύνεται πάλι προς αυτήν και πλέον αναγεννάται η δεύτερη. Η διεργασία συνεχίζεται κυκλικά μην διακόπτοντας ποτέ την λειτουργία της.

Η προσρόφηση ως μέθοδος δέσμευσης του CO₂ από ρεύμα αερίων αξιοποιείται κατ' εξοχήν στην παραγωγή υδρογόνου από μονάδες αεριοποίησης (όπου το αέριο ρεύμα περιέχει CO₂, H₂, H₂O). παρότι η συγκεκριμένη διεργασία απαιτεί απλό εξοπλισμό και μικρή κατανάλωση ενέργειας, η εφαρμογή της δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμη στις κοινές μονάδες παραγωγής ενέργειας λόγω και πάλι του μεγάλου όγκου των παραγόμενων αερίων. Επίσης απαιτεί και απομάκρυνση των προσμίξεων – ρύπων από το αέριο ρεύμα καθώς η αποδοτικότητα των μοριακών κοσκίων και του

ενεργού άνθρακα μειώνεται από την «δηλητηριώδη» δράση τους. Στην περίπτωση της αεριοποίησης για παραγωγή υδρογόνου είναι πολύ προσφιλής καθώς οι λοιποί ρύποι είναι περιορισμένοι και απομακρύνονται εύκολα, η δυνατότητα προσρόφησης του υδρογόνου είναι μηδενική και το αέριο ρεύμα είναι ήδη υπό πίεση, αν και ακόμα και σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα του υδρογόνου είναι αυτό που παράγεται σε υψηλή καθαρότητα. Το ρεύμα πλούσιο σε CO₂ μετά τον διαχωρισμό έχει αρκετές προσμίξεις και απαιτείται και τουλάχιστον ένα ακόμη στάδιο προσρόφησης – εκρόφησης ούτως ώστε να πληροί τις προϋποθέσεις τελικής διάθεσης το CO₂. Σε περίπτωση PSA δύο σταδίων ή PSTA η καθαρότητα του CO₂ είναι 99.0%. Πλέον όμως, λαμβάνοντας υπ' όψιν και την, συνήθως, απαίτηση για ψύξη και ξήρανση ως απαραίτητη προκατεργασία το συνολικό κόστος εξισώνεται με αυτό των παραπάνω χημικών μεθόδων κάνοντας έτσι επιτακτική την ανάγκη βελτίωσης της αποδοτικότητας της διεργασίας μέσω του σχεδιασμού, σύνθεσης και χρήσης αποδοτικότερων προσροφητικών μέσων.

Για την βελτίωση της μεθόδου και την ανάπτυξή της σε κλίμακα μονάδας παραγωγής ενέργειας σχεδιάζονται και αναπτύσσονται νέα υλικά. Χαρακτηριστικότερα εξ αυτών είναι οι μεταλλο- μονολιθικοί ζεόλιθοι «εμβολιασμένοι» με αμίνες (Metal monolithic amine-grafted zeolites). Ωστόσο τέτοια υλικά απέχουν πολύ ακόμα από την εμπορική εφαρμογή. Προς το παρόν και χρησιμοποιώντας ενεργό άνθρακα η κατανάλωση ενέργειας (αντλίες αέρα και αντλίες κενού), σε πιλοτική κλίμακα, για την δέσμευση προκύπτει στις 506 KWh/tCO₂ που για μια μέση απόδοση ενέργειας της μονάδας συνεπάγεται μείωσή της κατά 21% δυσχεραίνοντας κατά πολύ την βιωσιμότητά της. Παρότι τα μοντέλα και οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι υπάρχει βάσιμη προοπτική για αξιοποίηση αυτής της τεχνολογίας στο CCS απαιτείται βελτίωση της απόδοσης όπως προαναφέρθηκε. (24)

Μεμβράνες

Οι μεμβράνες, λεπτά ενιαία φύλλα, μπορεί να αποτελούνται από διάφορα υλικά (συνηθέστερα πολυμερικές, αλλά μπορεί να είναι και κεραμικές ακόμη και μεταλλικές) και είναι διαπερατές στα αέρια. Ωστόσο ανάλογα με την φύση του υλικού της μεμβράνης διαφέρει και η διαπερατότητα στο εκάστοτε αέριο. Αποτέλεσμα αυτού είναι όταν αέριο μίγμα ρέει από την μία πλευρά της μεμβράνης τα «συμβατά» με την μεμβράνη αέρια συστατικά του μίγματος να την διαπερνούν εύκολα και γρήγορα και να μεταβαίνουν στην άλλη πλευρά, διαχωρίζοντας έτσι το μίγμα. Ο ρόλος της μεμβράνης είναι να προβάλλει αντίσταση στην ροή των αερίων διαμέσω της, αλλά σε διαφορετικό βαθμό ανάλογα με το αέριο. Έτσι η ελάχιστη αντίσταση σε ορισμένα σε σύγκριση με την ισχυρή σε άλλα επιτρέπει τον διαχωρισμό τους. Ωστόσο το δυναμικό της μεταφοράς μάζας διαμέσω της μεμβράνης διαμορφώνεται από την μερική πίεση του αερίου εκατέρωθεν της. Για τον λόγο αυτό ο διαχωρισμός αερίων με μεμβράνες απαιτεί υψηλή πίεση και μεγάλες συγκεντρώσεις. Αυτό περιορίζει το εύρος εφαρμογών τους. Ειδικότερα σε περιπτώσεις χαμηλής συγκέντρωσης CO₂ και ατμοσφαιρικής πίεσης η απαιτούμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη και η απόδοση του διαχωρισμού μικρότερη από την τεχνολογία ρόφησης με διαλύτες.

Προκειμένου να επιτευχθεί εμπορική εφαρμογή απαιτείται η ανάπτυξη αποδοτικότερων μεμβρανών. Προσπάθεια γίνεται στην κατασκευή συνθετικών στοχευμένων μεμβρανών με υψηλότερες αποδόσεις υπό ηπιότερες συνθήκες λειτουργίας (χαμηλότερες πιέσεις, μικρότερες συγκεντρώσεις).

Παρόλα αυτά, η βασικότερη και αποδοτικότερη εφαρμογή των μεμβρανών είναι σε συνδυασμό με ρόφηση από διαλύτη. Έχουν αναπτυχθεί συστήματα στα οποία στην μία πλευρά την μεμβράνης ρέει το αέριο ρεύμα προς διαχωρισμό και στην άλλη ρέει ο διαλύτης που προσροφά το αέριο ενδιαφέροντος. Εδώ πλέον η μεμβράνη δεν συμβάλει στον διαχωρισμό τόσο όσο ο διαλύτης. Ο ρόλος της μεμβράνης είναι στο να διαμορφώνει μια σταθερή διεπιφάνεια αερίου – διαλύτη η οποία παρουσιάζει πληθώρα τεχνικών πλεονεκτημάτων: κατ' αρχάς επιτρέπεται πλέον η χρήση οποιασδήποτε ταχύτητας ροής και για τα δύο ρεύματα (αερίου και διαλύτη). Χωρίς την χρήση της μεμβράνης η ταχύτητα του ενός ρεύματος ήταν εξαρτώμενη και περιοριζόταν από αυτή του άλλου καθώς σε συστήματα ροής αερίου και υγρού μπορούν να παρατηρηθούν φαινόμενα όπως αφρισμός του υγρού, πλημμυρική παράσυρση του αερίου από το υγρό, να δημιουργηθούν σταθερά «ρυάκια» του υγρού στον όγκο του ρευστού, παράσυρση των σταγονιδίων από το αέριο ρεύμα κ.ά. Όλα αυτά προκύπτουν από την ελεύθερη επαφή υγρού και αερίου και αποτέλεσμα είναι να μειώνεται η διεπιφάνεια απ' όπου και μεταφέρεται η μάζα άρα και η απόδοση του διαχωρισμού (για δεδομένη διαστασιολόγηση) αλλά και να παρεκτρέπεται η ροή των ρευμάτων (λόγω της παράσυρσης του μεν από το δε) με αποτέλεσμα να παρακωλύεται η ομαλή λειτουργία και να δημιουργούνται επιπλοκές αν όχι και φθορές στον εξοπλισμό. Όλα αυτά αποφεύγονται με την χρήση του συστήματος μεμβράνης – διαλύτη. Εδώ αποφεύγεται η άμεση επαφή υγρού – αερίου η οποία πλέον είναι σταθερή και προκαθορισμένη με αποτέλεσμα τον πολύ υψηλότερο λόγο επιφάνειας/όγκο απ' ότι στους κοινούς πύργους απορρόφησης με διαλύτη. Αυτό επιτρέπει την κατασκευή αποδοτικών και «συμπαγών» διατάξεων πολύ μικρότερου μεγέθους από τους κοινούς. Όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα προωθούν ολοένα και περισσότερο την χρήση συστημάτων μεμβράνης – διαλύτη για τον διαχωρισμό αερίων καθώς είναι σε θέση να λειτουργούν αποδοτικά σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις και πιέσεις. Βασικό μειονέκτημα είναι η απαίτηση για προσεκτική επιλογή μεμβράνης – διαλύτη όσον αφορά θέματα συμβατότητας, διαπερατότητας και απορρόφησης. Επίσης στις συνθήκες λειτουργίας (διαφορά πίεσης 50-100 KPa) να μην πραγματοποιείται μεταφορά του διαλύτη μέσω της μεμβράνης αλλά και να επιτυγχάνεται ανεμπόδιστα η μεταφορά του αερίου.

Η παραπάνω διάταξη είναι μεν αποδοτικότερη συνολικά, αξιοποιώντας τα θετικά και από τις δύο επιμέρους τεχνολογίες (απορρόφηση με διαλύτη και χρήση μεμβρανών για τον διαχωρισμό) αλλά εισάγει ξανά την ανάγκη αναγέννησης του διαλύτη που συνεπάγεται μείωση της ενεργειακής απόδοσης της μονάδας / αύξηση του κόστους λειτουργίας. Συνεπώς, επόμενος στόχος είναι η εξάλειψη και αυτού του σταδίου ή τουλάχιστον η συγχώνευσή του με το στάδιο της ρόφησης σε μια ενιαία διάταξη. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη των μεμβρανών «διευκολυνόμενης» μεταφοράς (Facilitated Transport Membranes). Η λογική λειτουργίας των μεμβρανών αυτού του τύπου είναι ότι πλέον η μεταφορά μάζας από την μία πλευρά στην άλλη

πραγματοποιείται όχι απλώς μέσω της αντίστασης/ευκολίας στην διάχυση της μάζας μέσω της μεμβράνης αλλά αξιοποιώντας ένα «φέρων μέσο» (carrier). Το αέριο συστατικό ενδιαφέροντος ερχόμενο σε επαφή με την πλευρά απορρόφησης της μεμβράνης, που είναι εκτεθειμένη στο αέριο μίγμα προς διαχωρισμό, αντιδρά χημικά με συστατικό της μεμβράνης και μετατρέπεται σε νέα χημική ένωση, το φέρων μέσο. Αυτό μετακινείται πολύ ευκολότερα μέσα στην μεμβράνη (εξ ου και «διευκολυνόμενης» μεταφοράς) κινούμενο υπό την βαθμίδα συγκέντρωσης και κατά, συνέπεια την διαφορά μερικής πίεσης του αερίου συστατικού, στις δύο πλευρές της μεμβράνης και καταλήγει στην πλευρά εκρόφησης/καθαρισμού (sweep). Εκεί κατά την αντίθετη αντίδραση μετατρέπεται πάλι στην αρχική του μορφή το αέριο συστατικό, απελευθερώνεται και απομακρύνεται (από υγρό, φέρον αέριο ή κενό) σε καθαρή μορφή, εξαιλείοντας έτσι την ανάγκη για ενεργοβόρα αναγέννηση του διαλύτη σε ξεχωριστό στάδιο.

Ο αρχικός σχεδιασμός περιλάμβανε τον εγκλωβισμό ενός λεπτού στρώματος διαλύματος μεταξύ δύο μεμβρανών γνωστό ως «μεμβράνες υποστηριζόμενου/ακίνητοποιημένου υγρού» (Supported/ Immobilized Liquid Membrane, SLM/ILM). Ο σχεδιασμός αυτός παρουσίαζε κάποια πολυπλοκότητα και δυσχέρεια και αντικαταστάθηκε από αυτόν της «περιεχόμενου υγρού μεμβράνης» (Contained Liquid Membrane, CLM). Εδώ πλέον το υγρό ακινητοποιείται εντός του μικροπορώδους ενός στερεού επί του οποίου ρέει το αέριο μίγμα, ουσιαστικά χωρίς να παρεμβάλλεται «μεμβράνη». Πιο αποδοτική διάταξη έχει αποδειχθεί αυτή των κοίλων (κούφια) ινών. Εδώ το ρεύμα προς διαχωρισμό και το ρεύμα παράσυρσης ρέουν εντός δύο ομάδων κοίλων ινών εμποτισμένων με τον κατάλληλο «διαλύτη» οι οποίες και περιβάλλονται από κατάλληλο προς τον «διαλύτη» υλικό εντός ενός μεγαλύτερου δοχείου. Η μεταφορά πραγματοποιείται από το ρεύμα της τροφοδοσίας, μέσω του «διαλύτη» και διαμέσω του πορώδους στον ενδιάμεσο χώρο (έξω από την ίνα) και εντός του πορώδους της ίνας που περιβάλλει το ρεύμα απομάκρυνσης όπου και εκροφάται και απομακρύνεται. Η διαδρομή πραγματοποιείται με το αέριο υπό την μορφή του φέροντος μέσου.

Ο «διαλύτης» που χρησιμοποιείται εν προκειμένω δεν είναι όντως διαλύτης. Είναι μια ουσία που επιτρέπει την εύκολα αντιστρεπτή μετατροπή του αερίου ενδιαφέροντος σε μια πιο «ευκίνητη» μορφή (φέρων μέσο). Στην περίπτωση του CO₂ αυτή η μορφή είναι είτε το διττανθρακικό ιόν (HCO₃⁻) είτε μια καρβονική ένωση. Το CO₂ μετατρέπεται εύκολα σε διττανθρακικό και ανθρακικό ιόν με αντιστρεπτές αντιδράσεις. Ωστόσο για να επιταχυνθεί αυτή η δράση χρησιμοποιούνται πρόσθετες ουσίες («διαλύτες»). Αρχικά μελετήθηκε η χρήση αλκαλικών διττανθρακικών/ανθρακικών αλάτων. Η προσθήκη διαλύματος που περιέχει ήδη το διττανθρακικό/ανθρακικό ιόν διευκολύνει την μετακίνηση του CO₂ (υπό την αντίστοιχη μορφή) στο διάλυμα ενώ το αλκαλικό ιόν αυξάνει την συγκέντρωση των υδροξυλίων που ευνοεί την μετατροπή του CO₂ στο φέρον μέσο. Επιδιώκοντας να επιταχυνθεί η μετατροπή του CO₂ σε διττανθρακικό ιόν αξιοποιήθηκαν και άλλοι καταλύτες εκ των οποίων αποδοτικότεροι είναι η καρβονική ανυδράση (ένζυμο) και το αρσενικό οξύ. Η καρβονική ανυδράση (Carbonic Anhydrase, CA) ως ένζυμο επιταχύνει κατά μερικές τάξεις μεγέθους την αντίδραση αλλά παραμένει και ευπαθής

σε θερμοκρασία και pH. Η μετατροπή του CO₂ σε καρβαμική ένωση γίνεται με την εισαγωγή αμινών στο διάλυμα εμποτισμού του πορώδους υλικού. Όσον αφορά ταχύτητα και εκλεκτικότητα στον διαχωρισμό CO₂ βέλτιστος «διαλύτης» κρίθηκε το μίγμα CA – διττανθρακικά αλκάλια. Στην περίπτωση του διαχωρισμού οξυγόνου μελετάται η χρήση βιο-μιμητικών μέσω όπως παράγωγα της αιμογλοβίνης που δεσμεύει φυσικά το οξυγόνο. (24) (27)

Σχετικά με την χρήση μεμβρανών για τον διαχωρισμό οξυγόνου από τον αέρα (για την καύση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου) έχουν αναπτυχθεί «μεμβράνες» κεραμικές ανάμεικτες με μεταλλικά οξείδια (ceramic mixed metal oxides) χαρακτηριζόμενες ως μεμβράνες μεταφοράς ιόντων/οξυγόνου (Ion/Oxygen Transport Membranes, ITM/OTM). Αυτού του είδους υλικά (με τυπικές κρυσταλλικές δομές perovskites και brownmillerites) παρουσιάζουν μεγάλη αγωγιμότητα σε ιόντα οξυγόνου και ηλεκτρόνια σε θερμοκρασίες άνω των 500 C (κατά προτίμηση άνω των 700 C). Υπό αυτές τις συνθήκες το οξυγόνο κατά την επαφή με το υλικό δέχεται ηλεκτρόνια και μετατρέπεται σε ιοντική μορφή και μετακινείται καθοδηγούμενο από την διαφορά σχετικής πίεσης προς την άλλη πλευρά της μεμβράνης. Στην πλευρά της αποδέσμευσης το ιόν αποβάλλει τα ηλεκτρόνιά του και απελευθερώνεται στο αέριο ρεύμα ενώ τα ηλεκτρόνια επιστρέφουν προς την άλλη πλευρά κινούμενα μέσω των μεταλλικών ιόντων για να «δεσμεύσουν» άλλο μόριο οξυγόνου. Η εκλεκτικότητα αυτής της μεμβράνης είναι άπειρη, σημαίνοντας ότι μόνο το οξυγόνο μπορεί να την διαπεράσει. Η τεχνική αξιοποίησής τους είναι είτε μέσω κοίλων σωλήνων με την τροφοδοσία (σε υψηλή πίεση) και το διαχωρισμένο αέριο να ρέουν εκατέρωθεν του σωλήνα σε συνεχή λειτουργία, είτε μέσω σβόλων μεμβράνης που υποβάλλονται σε κυκλική συνεχή διεργασία δέσμευσης – αποδέσμευσης. Συνηθέστερα το αέριο ρεύμα παράσυρσης – απομάκρυνσης του διαχωρισμένου οξυγόνου είναι το φτωχό σε οξυγόνο θερμό καυσαέριο που ανακυκλώνεται προς τον καυστήρα.

Αυτή η τεχνολογία διαχωρισμού του οξυγόνου κρίνεται πολλά υποσχόμενη και συγκριτικά ανώτερη από την παραγωγή του μέσω κρυογονικής απόσταξης του αέρα καθώς αποφεύγεται η ενεργοβόρα ψύξη του αέρα. Σε περίπτωση αξιοποίησης της μέσω της τεχνικής του ρεύματος παράσυρσης καυσαερίου επιδιώκεται μείωση της ενέργειας κατά 25% σε σχέση με την απόσταξη του αέρα ενώ σε περίπτωση που η μεμβράνη αξιοποιηθεί εντός του καυστήρα κρίνεται ότι το ενεργειακό κόστος διαχωρισμού του οξυγόνου μπορεί να μειωθεί και στο 1/10. Λόγο της ιδιαίτερης αξίας της είναι από εντονότερα μελετώμενες και ταχύτερα ανερχόμενες τεχνολογίες με μονάδες να λειτουργούν ήδη σε πιλοτική κλίμακα. (24) (28)

Οι μεμβράνες γενικώς είναι από τις ανερχόμενες τεχνολογίες διαχωρισμού συστατικών. Ακόμη και για τον διαχωρισμό του υδρογόνου έχουν μελετηθεί πειραματικά μεμβράνες από υλικά όπως μικροπορώδη κεραμικά και άνθρακας αλλά και ζεόλιθοι και κράματα μετάλλων. Η προοπτική χρήσής τους είναι εντός του χώρου παραγωγής του υδρογόνου (water-gas shift reaction ή steam methane reforming) στους 500-600 C με ταυτόχρονο διαχωρισμό του υδρογόνου. Έτσι από τον αντιδραστήρα εξέρχεται ένα ρεύμα καθαρού υδρογόνου και ένα πλούσιο σε CO₂ με ελάχιστες προσμίξεις που καθαρίζεται ευκολότερα με τις κοινές μεθόδους. Ωστόσο η μέθοδος αυτή είναι σε πολύ αρχικό στάδιο ακόμη. (24)

Κρυογονικός διαχωρισμός

Κάθε αέριο μπορεί μέσα από διαδοχική συμπίεση και ψύξη να μετατραπεί σε υγρό. Στην υγρή φάση πλέον μπορεί να υποβληθεί σε κλασματική απόσταξη προς διαχωρισμό των συστατικών του αρχικού αερίου μίγματος. Μέσω αυτής της μεθόδου διαχωρίζεται οξυγόνο από τον αέρα αλλά και διοξείδιο του άνθρακα από καυσαέρια. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η απόσταξη είναι μια ευρέως αξιοποιούμενη διεργασία και άρα υπάρχει εκτενής εξοικείωση και βελτιστοποίηση της μεθόδου ενώ επίσης μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύ μεγάλη κλίμακα με ανάλογα υψηλή δυναμικότητα παραγωγής. Ωστόσο η κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ υψηλή καθώς απαιτείται ακόμη περισσότερη ενέργεια για την ψύξη παρά για την θέρμανση ενός ρευστού, όπως συμβαίνει στην κοινή απόσταξη. Παρόλα αυτά είναι η βασικότερη μέθοδος για την παραγωγή οξυγόνου στις Oxy-fuel μονάδες καθώς μόνο αυτή μπορεί να ανταπεξέλθει αξιόπιστα στην απαιτούμενη παραγωγή οξυγόνου. (24)

Καταλληλότητα διεργασιών δέσμευσης άνθρακα:

Η κάθε μία από τις παραπάνω διεργασίες που αξιοποιούνται για την δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθιστώντας την καταλληλότερη για κάποιες μεθόδους και λιγότερο αποδοτική για άλλες. Η καταλληλότητα κρίνεται με βάση:

- την συγκέντρωση του αερίου προς διαχωρισμό στο μίγμα της τροφοδοσίας
- την πίεση του ρεύματος τροφοδοσίας
- την απαιτούμενη θερμοκρασία
- την ανάγκη καθαρότητας (λοιποί ρύποι, σωματίδια) του ρεύματος τροφοδοσίας

Στην δέσμευση μετά την καύση, η συγκέντρωση του διοξειδίου είναι μικρή και η πίεση των καυσαερίων συνήθως ατμοσφαιρική. Σε αυτή την περίπτωση δύναται να ανταποκριθεί η ρόφηση με διαλύτη μετά από καθαρισμό και ψύξη των καυσαερίων. Υπάρχει ήδη πρακτική εφαρμογή αλλά σε περιορισμένη κλίμακα. Βασικά μειονεκτήματα είναι ο μεγάλος όγκος καυσαερίων (υψηλό κόστος μεγάλου εξοπλισμού) η απαιτούμενη ενέργεια, και οι απώλειες του διαλύτη από θερμική και οξειδωτική διάσπαση. Περισσότερο υποσχόμενη κρίνεται η χρήση μεμβρανών – διαλύτη ή CLM που αξιοποιούν μικρότερο εξοπλισμό και αποδίδουν καλά σε μικρές πιέσεις και συγκεντρώσεις. Ωστόσο απαιτείται περαιτέρω έρευνα πριν την εμπορική εφαρμογή.

Στην δέσμευση σε συνθήκες καύσης καθαρού οξυγόνου απαιτούνται δύο διαχωρισμοί: το οξυγόνο από τον αέρα και του καθαρού CO₂ από τα καυσαέρια. Οι ανάγκες για οξυγόνο μιας Oxy-fuel μονάδας παραγωγής ενέργειας μπορεί να καλυφθεί μόνο από κρυογονική απόσταξη του αέρα (παραγωγή έως και 3500 tO₂/d). Δεδομένου όμως ότι τα καυσαέρια εδώ περιέχουν κυρίως νερό και CO₂ ο διαχωρισμός του υψηλής περιεκτικότητας CO₂ (90%) ρεύματος αυτού μπορεί να επιτευχθεί εύκολα με απλή ψύξη έως πολύ ήπιο κρυογονικό διαχωρισμό (διεξάγεται στους -55 C) με μικρή απαίτηση σε ενέργεια και χωρίς απαίτηση για περαιτέρω

κατεργασία πριν την τελική διάθεση. Βασικό μειονέκτημα είναι η τεράστια απαίτηση σε ενέργεια για την παραγωγή του οξυγόνου (200-240 KWh/tO₂ 95% κατ' όγκο καθαρότητα).

Στην δέσμευση πριν την καύση (παραγωγή υδρογόνου από αεριοποίηση) η συγκέντρωση, η πίεση και η θερμοκρασία του CO₂ είναι υψηλή και απουσία λοιπών ρύπων (ανάλογα με την τροφοδοσία). Ήδη εφαρμόζεται η προσρόφηση με ενεργό άνθρακα (τεχνική PSA/PSTA) αλλά χωρίς καλή αποδοτικότητα για την παραγωγή καθαρού CO₂. Για τον λόγο αυτό και καθώς εδώ ο όγκος του αερίου ρεύματος προς κατεργασία είναι μικρότερος από αυτόν των καυσαερίων στην δέσμευση μετά της καύσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ρόφηση με διαλύτη για την δέσμευση καθαρού CO₂ και κατόπιν PSA για την παραγωγή του καθαρού υδρογόνου. Κατά αυτόν τον τρόπο παράγεται και ένα τρίτο ρεύμα το οποίο περιέχει καύσιμο, υδρογόνο και διοξείδιο. Αυτό μπορεί να καεί για την παραγωγή ενέργειας προς κάλυψη μέρους των ενεργειακών αναγκών της μονάδας αεριοποίησης. (24)

Αποτίμηση τεχνολογιών CCS:

Με την ανάγκη για δέσμευση του CO₂ σε καθαρή μορφή από τις μονάδες παραγωγής ενέργειας παρουσιάζεται μια νέα διαφορετική πρόκληση: ο διαχωρισμός καθαρού CO₂ από ρεύματα πολύ μεγάλων ογκομετρικών παροχών. Οι υπάρχουσες τεχνολογίες αδυνατούν να ανταπεξέλθουν με ευχέρεια στις καινούργιες προϋποθέσεις, καθώς δεν σχεδιάστηκαν για αυτόν τον σκοπό, και για αυτόν τον λόγο απαιτείται ο επανασχεδιασμός και η αναπροσαρμογή τους. Η απλή αναβάθμιση του μεγέθους τους (scale-up) προκειμένου να ανταποκριθούν οδηγεί σε «τερατώδη» εξοπλισμό με υπερβολικό κόστος αγοράς/κατασκευής και εξίσου τεράστια έξοδα λειτουργίας (ενέργεια – αναλώσιμα).

Συγκεκριμένα το κόστος επένδυσης και το κόστος παραγωγής ενέργειας με δέσμευση CO₂ περί το 90%, είναι 40-80% περισσότερο απ' ότι χωρίς αν και πάντοτε εξαρτάται από επιμέρους παραμέτρους όπως τύπο μονάδας παραγωγής ενέργειας και αν πρόκειται για νέα μονάδα ή αναπροσαρμοσμένη (retro-fit).

Λαμβάνοντας υπ' όψιν το παραπάνω είναι προφανές ότι η ενσωμάτωση τεχνολογιών CCS μειώνει σημαντικά την κερδοφορία και απειλεί άμεσα την βιωσιμότητα μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας. Προς το παρόν δεδομένου ότι δεν είναι απαγορευτική – υπό περιορισμό η εκπομπή CO₂, όπως με άλλους ρύπους, και ότι η αγορά δικαιωμάτων εκπομπής CO₂ δεν είναι διαδεδομένη και άρα σημαντικά κερδοφόρος δεν κρίνεται δόκιμο να συμπεριληφθεί διάταξη CCS στην μονάδα.

Παρόλα αυτά με τον καλπάζοντα ρυθμό ανάπτυξης της ανθρωπότητας και την ακόρεστη ανάγκη για ενέργεια που συνεπάγεται πληθώρα περιβαλλοντικών επιπτώσεων με παρούσες μεθόδους παραγωγής της, οι εκπομπές CO₂ στο μέλλον θα υπόκεινται σε ολοένα αυστηρότερες προδιαγραφές και τότε θα αυξηθεί και η αξία των δικαιωμάτων εκπομπής τους. Μέριμνα πρέπει λοιπόν να ληφθεί προκειμένου όταν η επένδυση στην εγκατάσταση διάταξης CCS κριθεί κερδοφόρος, η ήδη υπάρχουσα μονάδα να μπορεί να διασυνδεθεί άμεσα με ελάχιστο επιπρόσθετο κόστος.

Παραγωγή RDF (RDF):

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα ΑΣΑ έχουν χαμηλή θερμογόνο δύναμη σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα, παρότι όμως μερικά από τα συστατικά τους έχουν ικανοποιητικά υψηλή θερμογόνο δύναμη. Εδώ εισέρχεται η ανάγκη παραγωγής του RDF. Το RDF όπως ορίζει και η ονομασία του είναι καύσιμος ύλη που προέρχεται από απορρίμματα (Refuse Derived Fuel). Ο χαρακτηρισμός του ως «καύσιμο» υποδηλώνει και την ικανή θερμογόνο δύναμη του και πρότυπη συμπεριφορά του ως καύσιμος ύλη. Ο βασικός στόχος λοιπόν μιας μονάδας παραγωγής RDF είναι ο διαχωρισμός των σύμμεικτων απορριμμάτων σε δύο κύρια ρεύματα: ένα καύσιμο και πλούσιο σε ενέργεια και ένα αδρανές/μικρής θερμογόνου αξίας. Το πρώτο ρεύμα αποτελεί και το επιθυμητό RDF ενώ το δεύτερο, συνήθως σε διάφορα σημεία κατά μήκος της γραμμής παραγωγής, διαχωρίζεται σε επιμέρους ρεύματα όπως οργανική ύλη, γυαλί, σιδηρούχο μέταλλευμα, μη σιδηρούχο μέταλλευμα κ.ά.

Όπως γίνεται αντιληπτό η λειτουργία μιας μονάδας παραγωγής RDF είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση ύπαρξης σύμμεικτων απορριμμάτων. Μέσω των τεχνικών που αξιοποιούνται αφαιρούνται τα μη καύσιμα (γυαλί και μέταλλο) και τα «κακά» καύσιμα (οργανικά με χαμηλή θερμογόνο δύναμη/υψηλή υγρασία) απομονώνοντας έτσι ένα κλάσμα «αξιόλογου» καύσιμου.

Εν προκειμένω, όπως έχει προαναφερθεί, θεωρείται ότι στα ΑΣΑ της Αττικής πραγματοποιείται διαχωρισμός στην πηγή (σε κλάσματα σύστασης που θα διευκρινιστεί στην συνέχεια) με αποτέλεσμα να μπορεί εύκολα, μέσω απλής ανάμειξης να συσταθεί το στερεό καύσιμο από απορρίμματα. Κάτι τέτοιο κάνει και την ύπαρξη μιας πλήρους μονάδας παραγωγής RDF περιττή. Αυτή όμως η διεργασία πέρα από τον διαχωρισμό του κατάλληλου κλάσματος επιτυγχάνει και την μετατροπή του σε μορφή με κατάλληλες ιδιότητες ως καύσιμο. Όσον αφορά αυτό οι κυριότεροι στόχοι είναι η ελάττωση μεγέθους, ομογενοποίηση και τελική μορφοποίηση σε κατάλληλο μέγεθος όπως «χνούδι», πέλετς, μπρικέτες ή άλλο. (29)

Για τους παραπάνω λόγους η συγκεκριμένη διεργασία θα εστιάζει στις τεχνικές ελάττωσης μεγέθους και ομογενοποίησης και όχι στις τεχνικές διαχωρισμού των σύμμεικτων ΑΣΑ, οι οποίες όμως θα αναφερθούν για λόγους εναλλακτικών σχεδιασμών. Επίσης θα εξετασθεί και η δυνατότητα αναβάθμισης του οργανικού – χαμηλού σε υγρασία αλλά και αξιοποίησης του οργανικού – υψηλού σε υγρασία κλάσματος σε περίπτωση που δεν είναι δυνατή η πλήρης απορρόφηση του σε διεργασίες καταλληλότερες (αναερόβια χώνευση).

Στάδια – διαδικασίες παραγωγής RDF:

Η παραγωγή του RDF σχετίζεται με τον διαχωρισμό και την ελάττωση μεγέθους των υλικών του ρεύματος τροφοδοσίας. Για την επίτευξη αυτών των στόχων αξιοποιεί εξοπλισμό που διαχωρίζει τα υλικά με βάση ορισμένες ιδιότητες τους (π.χ. μέγεθος, μαγνητισμό, ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες, πυκνότητα) και τα ελαττώνει σε μέγεθος με διάφορες μεθόδους (π.χ. κρούση, διάτμηση, θλίψη, τριβή). Τέτοια μηχανήματα είναι:

- Τεμαχιστές και αλεστές (Shredders and Grinders)
- Κόσκινα (Trommel Screening)
- Μαγνητικούς διαχωριστήρες (Magnetic Separators)
- Μη-μαγνητικούς διαχ. (ρευματοδινών, Eddy Current Separators, ECS)
- Διαχωριστήρες αέρα (Air classifiers)

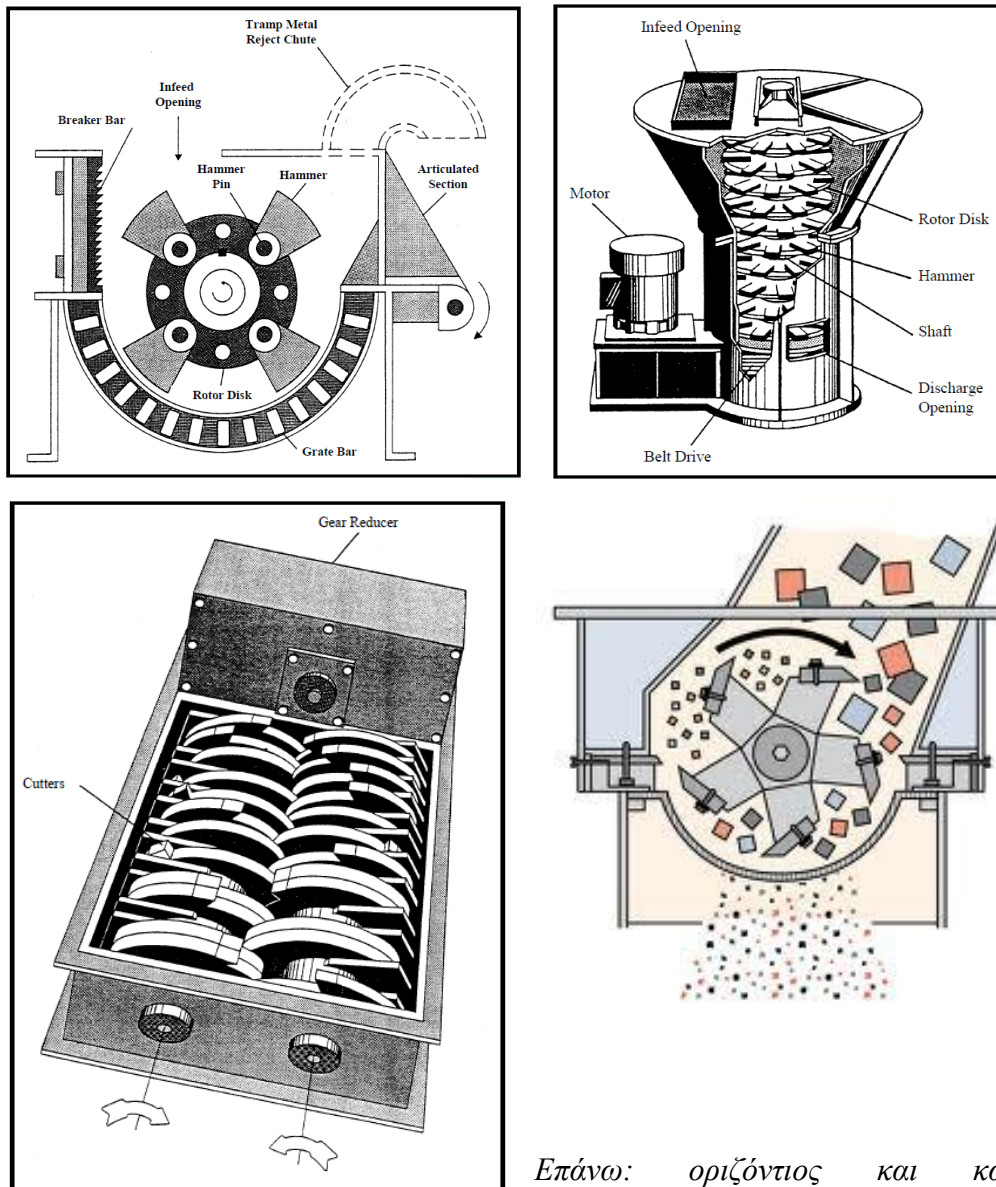
Τεμαχιστές και αλεστές:

Βασικότεροι αντιπρόσωποι αυτής της κατηγορίας είναι οι σφυρόμυλοι (hammermill) και οι τεμαχιστές διάτμησης (Shear shredder). Οι σφυρόμυλοι απαρτίζονται από έναν περιστρεφόμενο άξονα στον οποίο είναι προσαρμοσμένες μεταλλικές κεφαλές που λειτουργούν ως σφυριά. Κατά την γρήγορη περιστροφή των σφυριών (1,000 - 1,500 rpm) το υλικό που εισέρχεται από την κορυφή θρυμματίζεται σε μικρότερα τμήματα, κυρίως μέσω κρούσης με της κεφαλές, τα ειδικά διαμορφωμένα τοιχώματα και μεταξύ του, και εξέρχεται από την σχάρα στον πυθμένα. Όσο το μέγεθός του παραμένει μεγαλύτερο από αυτό της σχάρας παραμένει μέσα στον μύλο μέχρι να ελαττωθεί αρκετά. Οι σφυρόμυλοι έχουν υψηλή δυναμικότητα και ανταποκρίνονται σε μεγάλο εύρος υλικών. Παρόλα αυτά όμως, λόγω της υψηλής ταχύτητας λειτουργίας και της έντονης μηχανικής καταπόνησης υπόκεινται γρήγορα σε φθορά, καταναλώνουν πολύ ενέργεια και καθώς κατεργάζονται το υλικό κυρίως μέσω της κρούσης είναι ακατάλληλοι για πιο ελαστικά υλικά ή γενικά καθόλου ψαθυρά.

Οι τεμαχιστές διάτμησης αντίστοιχα αποτελούνται από δύο συζευγμένους οριζόντιους κυλίνδρους με κατάλληλες προεξοχές (συνήθως αποτελούνται από αλληπάλληλους δίσκους ειδικά σχεδιασμένης μορφολογίας) οι οποίοι κινούνται ετερόστροφα αναγκάζοντας το υλικό να κινηθεί προς τον ενδιάμεσο χώρο τους όπου και θρυμματίζεται σταδιακά καταπονούμενο από τις προεξοχές. Οι τεμαχιστές αυτοί λειτουργούν σε χαμηλότερες στροφές (20-70 rpm) αλλά με πολύ υψηλότερες ροπές. Η ελάττωση μεγέθους εδώ πραγματοποιείται μέσω καταπονήσεων διάτμησης και παραμόρφωσης κάτι που επιτρέπει και την κατεργασία πιο ελαστικών αλλά συνάμα ανθεκτικών υλικών (π.χ. ελαστικά αυτοκινήτων). Λόγω της σταδιακής κατεργασίας του υλικού είναι δυνατή και η εισαγωγή εξαιρετικά ογκωδών αντικειμένων. Παρόλα αυτά η μικρή ταχύτητα περιστροφής συνεπάγεται και μικρή δυναμικότητα συγκριτικά με έναν ισομέγεθι σφυρόμυλο. (29)

Δεδομένου ότι το προς κατεργασία υλικό είναι κυρίως χαρτί και πλαστικό και η κρουστική κατεργασία ενός σφυρόμυλου δεν θα ήταν αποδοτική, καταλληλότερη κρίνεται η χρήση του τεμαχιστή διάτμησης. Ειδικότερα για την συγκεκριμένη περίπτωση ισχύει ότι το ρεύμα προς κατεργασία αποτελείται από υλικό με αρκετά χαμηλή σκληρότητα και γενικότερα μηχανική αντοχή. Επομένως η υψηλή ροπή του τεμαχιστή θα ήταν προτιμότερα υψηλότερη παραγωγικότητα. Στην ειδική αυτή περίπτωση πλέον καταλληλότερη κρίνεται η χρήση λεπίδο-μύλου (Knife mill). Η κατασκευή του είναι παρόμοια με του σφυρόμυλου μόνο που πλέον οι βαριές κεφαλές αντικαθίστανται από κοφτερές λεπίδες. Οι περιστρεφόμενες λεπίδες σε συνδυασμό με σταθερές στα τοιχώματα τεμαχίζουν συνεχώς και ταχύτατα το «μαλακό» υλικό σε ελάχιστο τελικό μέγεθος 250-1200 μm. Μόλις το υλικό είναι σε

μέγεθος μικρότερο από τις οπές του πλέγματος στον πυθμένα, εξέρχεται από εκεί. Προσοχή πρέπει να δοθεί στην σύσταση του ρεύματος εισόδου καθώς αντικείμενα υψηλής σκληρότητας (π.χ. μέταλλα) φθείρουν έντονα τις λεπίδες και μπορεί να προξενήσουν βλάβες στον εξοπλισμό. Πιθανή προκατεργασία σε ορισμένες περιπτώσεις θα εξασφαλίζει το κατάλληλο μέγεθος σωματιδίων στην είσοδο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το κλάσμα των ΑΣΑ (χαρτί και πλαστικό) είναι κατάλληλης σκληρότητας και σε πολύ μεγάλο ποσοστό μικρού, κατάλληλου, μεγέθους και δεν ενέχεται τέτοιος κίνδυνος. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η μικρή παραγωγή σκόνης αλλά και η δυνατότητα κατεργασίας θερμο-ευαίσθητων υλικών, όπως τα πλαστικά, καθώς η διάτμηση είναι απότομη με ελάχιστη προκαλούμενη παραμόρφωση (αντίθετα με τον τεμαχιστή διάτμησης) ελαχιστοποιώντας έτσι την παραγωγή θερμότητας με κίνδυνο να λιώσουν τα πλαστικά δημιουργώντας επιπλοκές. (30)



Επάνω: οριζόντιος και κάθετος σφυρόμυλος

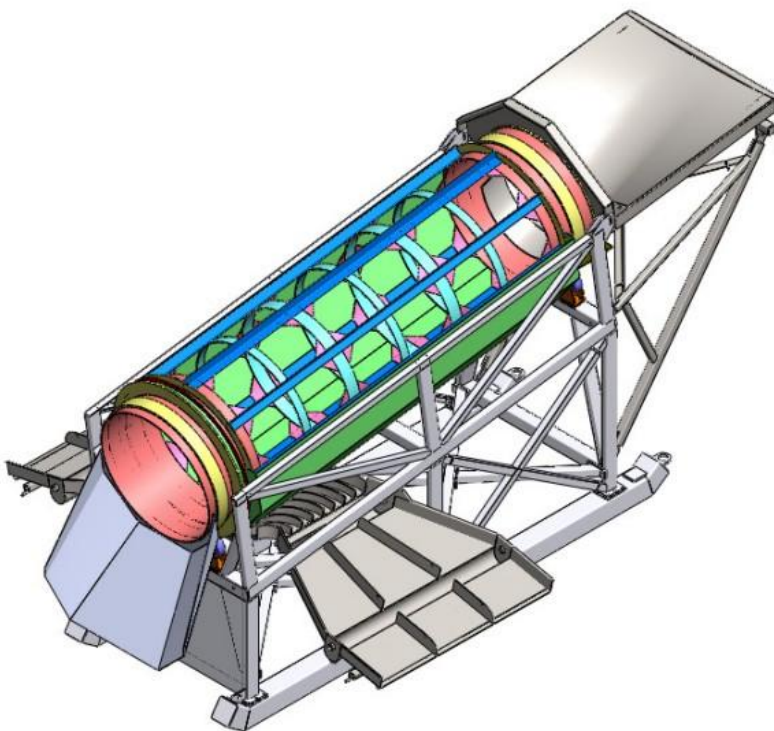
Κάτω: τεμαχιστής διάτμησης και λεπιδό-μυλος (29)

Κόσκινα:

Η αρχή λειτουργίας διαχωρισμού του κόσκινου βασίζεται στην διαφορά μεγέθους των σωματιδίων. Το ανάμεικτο υλικό περνώντας πάνω από μία σήτα ή διάτρητη πλάκα συγκεκριμένου μεγέθους οπών, διαχωρίζεται σε δύο κλάσματα. Το ένα με ελάχιστο μέγεθος σωματιδίων μεγαλύτερο από αυτό των οπών που παραμένει πάνω στην σήτα/πλάκα (oversize) και το άλλο με μέγιστο μέγεθος μικρότερο από αυτό των οπών που περνά κάτω από την σήτα/πλάκα (undersize). Παρότι υπάρχουν διάφοροι τύποι κοσκίνων όπως δονούμενης επίπεδης κλίνης (vibratory flat bed screen), δίσκων (disc screen) και περιστρεφόμενου τυμπάνου (trommel screen) αποδοτικότερο έχει αποδειχθεί αυτό του περιστρεφόμενου τυμπάνου.

Το κόσκινο τυμπάνου αποτελείται από έναν οριζόντιο κεκλιμένο περιστρεφόμενο κύλινδρο του οποίου η επιφάνεια είναι συρμάτινη σήτα ή διάτρητη πλάκα (ανάλογα με το μέγεθος διαχωρισμού). Τα υλικά εισέρχονται από το ένα άκρο και με την περιστροφική κίνηση του κόσκινου ανακινούνται. Η κλίση οδηγεί τα υλικά προς το χαμηλότερο άκρο. Λόγω των οπών το undersize κλάσμα διαπερνά τα τοιχώματα και πέφτει κάτω ενώ το oversize εξέρχεται από το άκρο του κυλίνδρου. Το κόσκινο τυμπάνου είναι πολύ αποδοτικό γιατί η συνεχής ανακίνηση των υλικών εντός του επιτρέπει τον διαχωρισμό τυχών συσσωματωμάτων ή την αποδέσμευση μικρών σωματιδίων από μεγαλύτερα και άρα τον επιτυχή διαχωρισμό τους.

Εν προκειμένω το κοσκίνισμα μπορεί να αξιοποιηθεί για τον διαχωρισμό των ήδη μικρών σωματιδίων των ΑΣΑ από τα μεγαλύτερα πριν εισέλθουν στον μύλο. Αυτό συνεπάγεται μικρότερη φόρτιση του μύλου, από κλάσμα που δεν απαιτεί περαιτέρω ελάττωση μεγέθους και άρα μεγαλύτερη συνολική δυναμικότητα.



Κόσκινο περιστρεφόμενου τυμπάνου. (29)

Μαγνητικοί διαχωριστήρες:

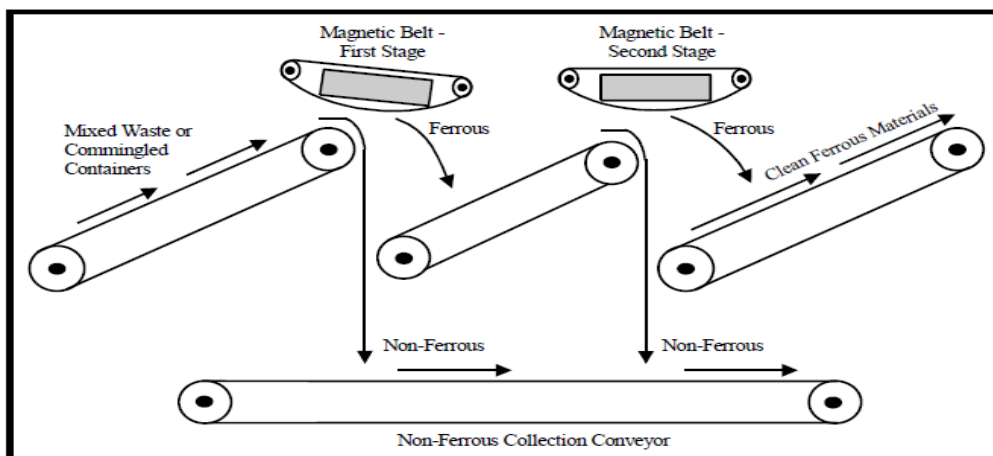
Η αρχή λειτουργίας των μαγνητικών διαχωριστήρων βασίζεται στις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών και συγκεκριμένα στην ιδιότητα του σιδήρου να έλκεται από τα μαγνητικά πεδία. Η χρήση των μαγνητικών διαχωριστήρων χρησιμοποιεί μαγνήτες μόνιμους ή ηλεκτρομαγνητικούς και αξιοποιείται αποκλειστικά στην ανάκτηση σιδηρούχων μεταλλευμάτων από το κλάσμα των ΑΣΑ και είναι εξαιρετικά απλή και φθηνή με ικανοποιητικές, υπό προϋποθέσεις, αποδόσεις. Τρεις είναι οι βασικές διατάξεις μαγνητικού διαχωρισμού:

Μαγνητική τροχαλία κορυφής (magnetic head pulley): εδώ η τροχαλία που προκαλεί την κίνηση ενός μεταφορικού ιμάντα είναι μαγνητισμένη με αποτέλεσμα στην άκρη του ιμάντα, τα σιδηρούχα υλικά να παραμένουν προσκολλημένα στον ιμάντα και να περιστρέφονται κατά μικρή τροχιά γύρω από την τροχαλία όταν τα υπόλοιπα μη-μαγνητικά υλικά ακολουθούν απλή βαλλιστική τροχιά καθώς πέφτουν από το άκρο του μεταφορικού ιμάντα. Τα σιδηρούχα υλικά μετά την μικρή περιστροφική τροχιά πέφτουν λίγο πιο πίσω από τα υπόλοιπα υλικά και η διαφορά απόστασης τους είναι αρκετή για τον διαχωρισμό τους.

Μαγνητικό τύμπανο (magnetic drum): περιστρεφόμενο τύμπανο κοντά στον μεταφορικό ιμάντα των υλικών, τοποθετημένο συνήθως σε σταθερή απόσταση πάνω από τον ιμάντα, περιέχει σταθερό μαγνήτη. Καθώς τα υλικά μεταφέρονται από τον ιμάντα το σιδηρούχο κλάσμα παρασύρεται από το μαγνητικό πεδίο, προσκολλάται πάνω στο τύμπανο και απομακρύνεται από το υπόλοιπο ρεύμα.

Μαγνητικές (μεταφορικές) ταινίες (magnetic belt): η διάταξη είναι αυτή της απλής μεταφορικής ταινίας απλώς μεταξύ των τροχαλιών τοποθετείται ισχυρός μαγνήτης. Με αυτόν τον τρόπο τα σιδηρούχα σωματίδια προσκολλώνται στην μεταφορική ταινία και παρασύρονται μακριά από το υπόλοιπο κλάσμα. Είναι προς το παρόν η αποδοτικότερη και πιο εύχρηστη διάταξη μαγνητικού διαχωρισμού.

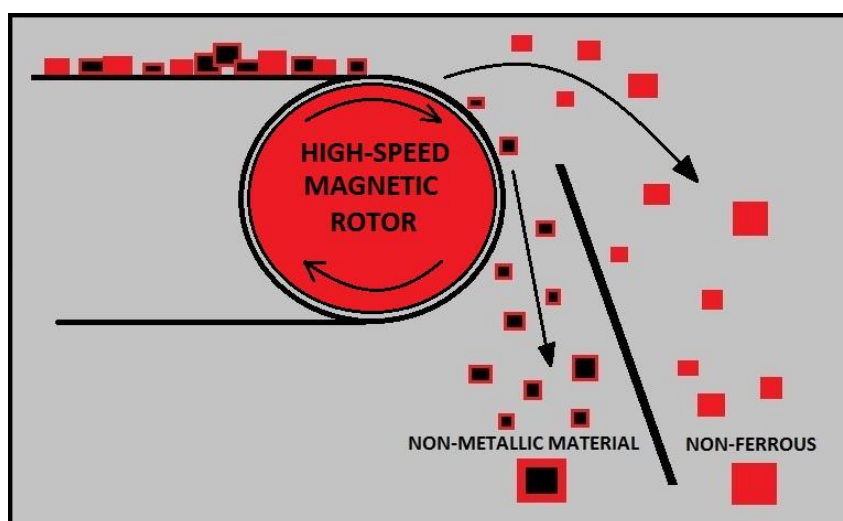
Προσοχή πρέπει να δοθεί καθώς πολλές φορές η ανάμιξη των υλικών στην μάζα των ΑΣΑ εμποδίζει τον αποδοτικό διαχωρισμό του σιδηρούχου κλάσματος. Για τον λόγο αυτό ο μαγνητικός διαχωρισμός πραγματοποιείται συνήθως σε πολλαπλά στάδια και μετά από άλλες διεργασίες διαχωρισμού που απομακρύνουν αποδοτικά τα ελαφριά κλάσματα (π.χ. αερο-διαχωρισμός). (29)



Διαδοχική χρήση μαγνητικών ταινιών για υψηλότερη απόδοση διαχωρισμού (29)

Μη-μαγνητικοί διαχωριστήρες (Eddy Current Separators): αρχή λειτουργίας του ECS είναι η ανταπόκριση των μεταλλικών υλικών σε εναλλασσόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Η διάταξη του ECS τοποθετείται συνήθως στο άκρο μιας κοινής μεταφορικής ταινίας. Το ECS παράγει ένα συνεχώς εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο ασκεί δυνάμεις ηλεκτρομαγνητικής φύσεως σε μεταλλικά υλικά όπως αλουμίνιο, χαλκό, μπρούτζο κ.α. με αποτέλεσμα να τα ωθεί προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, συνήθως επιλέγεται προς τα εμπρός. Έτσι ενώ τα μη μεταλλικά υλικά ακολουθούν απλή βαλλιστική τροχιά μετά το τέλος της μεταφορικής ταινίας, τα μεταλλικά υλικά εκτοξεύονται προς τα εμπρός πιο μακριά από τα υπόλοιπα με αποτέλεσμα να είναι και δυνατός ο διαχωρισμός τους. Το ECS είναι μια οικονομική και αποδοτική διάταξη με μεγάλο εμπορικό ενδιαφέρον στον διαχωρισμό των υλικών καθώς απομονώνει το αλουμίνιο που έχει μεγάλη εμπορική αξία. Προσοχή πρέπει να δοθεί καθώς έντονα μαγνητικά υλικά όπως ο σίδηρος αναπτύσσουν θερμοκρασία μέσα στο πεδίο του ECS σε σημείο που ενέχει σοβαρούς κινδύνους π.χ. πυρκαγιάς.

Σχετικά με τον διαχωρισμό του γυαλιού, υφίστανται διεργασίες όπως δεξαμενές αφρισμού και εξάφρισης ή με οπτικό διαχωριστήρα αλλά δεν έχουν εμπορικό αξία. Συνηθέστερα απομονώνονται με βάση το μέγεθος και μετά λαμβάνονται ως υπόλειμμα μικρής καθαρότητας από τις υπόλοιπες διεργασίες διαχωρισμού. (29)

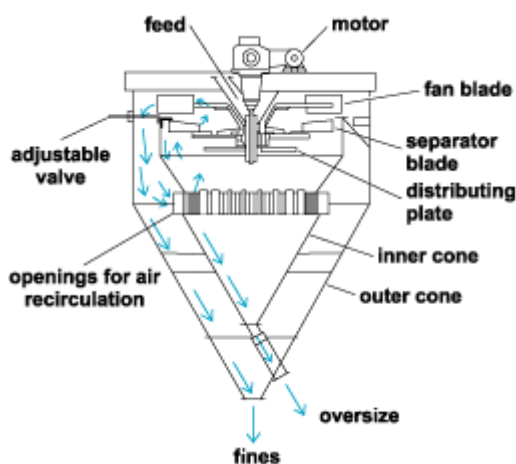


Eddy Current Separator (29)

Διαχωριστήρες Αέρα: αρχή λειτουργίας του αερο-διαχωριστήρα είναι η διαφορετική αεροδυναμική συμπεριφορά των σωματιδίων, ως συνάρτηση της σχέσης οπισθέλκουσας δύναμης του αέρα σε σύγκριση με το βάρος τους. Ένα ρεύμα αέρα προκαλείται εντός ενός περιορισμένου χώρου όπου ρέουν τα (τεμαχισμένα) υλικά. Δεδομένης της ταχύτητας του αέρα τα σωματίδια ανάλογα με το μέγεθος, σχήμα και πυκνότητα τους ή θα παρασυρθούν από το ρεύμα αέρα (συνηθέστερα χαρτί και πλαστικό) ή θα συνεχίσουν την πορεία που ορίζει η δύναμη της βαρύτητας (συνήθως γυαλί και μέταλλο). Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό δεν είναι απόλυτη μέθοδος

διαχωρισμού ακριβώς γιατί το κριτήριο διαχωρισμού είναι πολύ-παραμετρικό. Μικρά σωματίδια γυαλιού μπορούν να βρεθούν στο «ελαφρύ» κλάσμα και νωπά χαρτιά ή ολόκληρα πλαστικά δοχεία στο «βαρύ» κλάσμα. Έτσι λοιπόν συνηθέστερα η μέθοδος αυτή δρα συμπληρωματικά ως προκατεργασία (π.χ. προ-διαχωρισμός ελαφρών για αποδοτικότερο διαχωρισμό σιδηρούχων) ή επιπρόσθετη κατεργασία (π.χ. διαχωρισμός ελαφρύτερου αλουμινίου από τα βαρύτερα μη-σιδηρούχα μεταλλεύματα χαλκό και μπρούτζο μετά από ECS).

Οι διατάξεις διαχωρισμού είναι πολυποίκιλες ανάλογα με τις ειδικότερες ανάγκες της μονάδας. Βασικότερη είναι αυτή του κάθετου ή πλάγιου αερο-διαχωριστήρα. (29)

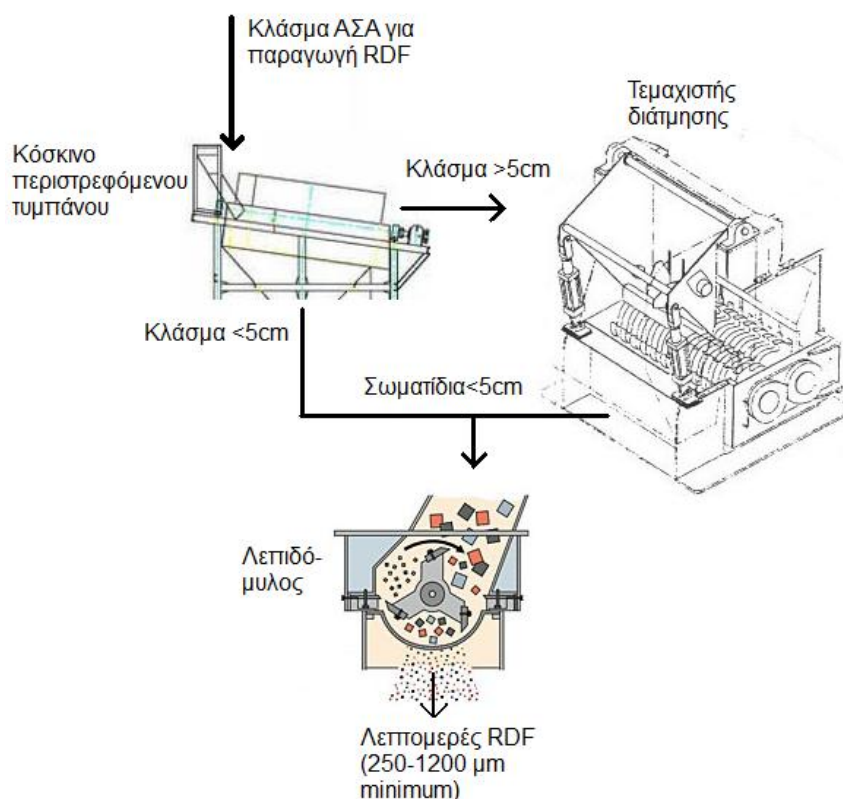


Κάθετος αερο-διαχωριστήρας τύπου διπλού κυκλώνα (29)

Επιλογή διεργασίας:

Στην συγκεκριμένη περίπτωση το ρεύμα των υλικών προς παραγωγή RDF προέρχεται από διαλογή στην πηγή με αποτέλεσμα να μην απαιτείται «ποιοτικός» διαχωρισμός των συστατικών. Τα προς παραγωγή RDF υλικά θα είναι χαρτί, πλαστικό, υφάσματα, ξύλο και κάθε άλλη οργανική ουσία με χαμηλή περιεχόμενη υγρασία (<30%). Παρόλα αυτά κρίνεται απαραίτητη η ομογενοποίηση και ελάττωση μεγέθους των υλικών. Καθώς τα ΑΣΑ και ιδίως τα οικιακά απορρίμματα δεν είναι ιδιαίτερα ογκώδη είναι πιθανό το μέγεθός τους να είναι μικρότερο από 5cm όπου είναι η συνήθης τροφοδοσία του λεπιδό-μυλου. Για τον λόγο αυτό θα ήταν περιττή σπατάλη ενέργειας η διοχέτευση όλης της τροφοδοσίας προς προκαταρκτική ελάττωση μεγέθους. Για τον σκοπό αυτό θα αξιοποιηθεί ο διαχωρισμός με κόσκινο τυμπάνου του κλάσματος κατάλληλου για απευθείας είσοδο στο λεπιδό-μυλο και το oversize θα οδηγηθεί σε ελάττωση μεγέθους με τεμαχιστή διάτμησης. Τέλος τα δύο ρεύματα (πρωτογενές και προκατεργασμένο κάτω των 5cm) θα οδηγηθούν στον λεπιδό-μυλο. Ο προκαταρκτικός διαχωρισμός μέσω του περιστρεφόμενου τυμπάνου και η άλεση στον λεπιδό-μυλο εμπεριέχουν έντονη ανακίνηση των υλικών με κάτι που συνεπάγεται και έντονη ανάδευση – ανάμιξη τους. Για τις παρούσες ανάγκες θεωρείται ότι αρκεί και δεν απαιτείται η χρήση άλλης διάταξης ανάμιξης και ομογενοποίησης του υλικού. Να υπενθυμισθεί ότι το μικρότερο δυνατό τελικό μέγεθος ελάττωσης στον λεπιδό-μυλο είναι 250-1200 μm, ενώ το μέγιστο μέγεθος

εισόδου μπορεί να είναι και μεγαλύτερο των 5 cm οπότε και το κόσκινο και η προκαταρκτική ελάττωση προσαρμόζονται ανάλογα.



Προτεινόμενης διεργασίας παραγωγής RDF

Προδιαγραφές και αξιοποίηση RDF:

Το παραγόμενο RDF κατέχει σαφώς ανώτερα χαρακτηριστικά καυσίμου από το πρωταρχικό μίγμα των ΑΣΑ και η παραγωγή του είναι συνολικά ωφέλιμη. Η παραγωγή ενέργειας από καύση RDF έναντι σύμμεικτων ΑΣΑ συνεπάγεται υψηλότερη θερμογόνο δύναμη καυσίμου, μικρότερη εκπομπή τοξικών ρύπων και αποδοτικότερη ανάκτηση ενέργειας (31). Παρόλα αυτά δεν είναι απολύτως απαλλαγμένο από ανεπιθύμητες ιδιότητες και αυτές πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπ' όψιν κατά την αξιοποίηση του.

Καταρχάς η θερμογόνο δύναμη κυμαίνεται στα 12-16 MJ/Kg, η περιεχόμενη υγρασία στο 15-25% και η παραγόμενη τέφρα είναι 10-22% της αρχικής μάζας. Συγκριτικά με τον ορυκτό άνθρακα και τα σύμμεικτα ΑΣΑ φαίνεται παρακάτω:

Type of Fuel	Heating Value As-Received (J/g)	Moisture Content (%)	Ash Content (%)
RDF	12,000 to 16,000	15 to 25	10 to 22
Coal	21,000 to 32,000	3 to 10	5 to 10
MSW	11,000 to 12,000	30 to 40	25 to 35

Παράμετροι καυσίμου για RDF, ορυκτό άνθρακα και σύμμεικτα ΑΣΑ (29)

Η αξία του RDF ως καυσίμου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Ενώ η τεχνολογία και ο εξοπλισμός παραγωγής του είναι εκτενώς μελετημένα και εφαρμοσμένα, η βέλτιστη ποιότητα RDF εξαρτάται κυρίως από την σύσταση της πρώτης ύλης και τον συνδυασμό του εξοπλισμού (επιλογή και διαδοχή) στην γραμμή παραγωγής. Βασικότερη προκύπτει η κατάλληλη αξιοποίηση του κοσκινίσματος και η εύστοχη τοποθέτηση του στην διαδοχή των εργασιών. Σε έναν βέλτιστο σχεδιασμό 90% των μη-καύσιμων υλικών (αδρανών) μπορούν να αφαιρεθούν και μόνο με κοσκίνισμα, με την μορφή του undersize κλάσματος. Έτσι λοιπόν απομακρύνοντας τα λεπτομερή αδρανή αυξάνεται η θερμογόνος δύναμη (κοσκινισμένο RDF περιέχει 95% χαρτί, ενώ πριν το κοσκίνισμα μόνο 60%) και μειώνεται η παραγόμενη τέφρα. Μετά την απομάκρυνση των αδρανών και των υδαρών οργανικών υλικών (κλάσμα undersize) η θερμογόνος δύναμη μπορεί να αυξηθεί και κατά 20% και η υγρασία να μειωθεί κατά 25-50% (29). Εν προκειμένω βεβαία το μίγμα προς παραγωγή RDF θεωρείται προ-διαλεγμένο αλλά σε αντίθετη περίπτωση, από όλα τα παραπάνω, γίνεται εμφανής η ανάγκη για επιτυχή και αποδοτικό διαχωρισμό των ΑΣΑ.

Παράλληλα, το RDF παρουσιάζει σημαντικές ιδιαιτερότητες κατά τον χειρισμό και την καύση του και αυτό γιατί είναι ένα ετερογενές μίγμα υλικών που το καθένα έχει τα δικά του χαρακτηριστικά, απαιτήσεις και συμπεριφορά κατά την καύση.

Όσον αφορά τον χειρισμό, παρότι ο εξοπλισμός που απαιτείται για την κατεργασία των ΑΣΑ και την παραγωγή του RDF μπορεί να χρησιμοποιείται επιτυχώς και σε άλλες μονάδες παρόμοιας κατεργασίας υλικών (άλεση και ελάττωση μεγέθους) πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η φύση των ΑΣΑ ειδάλως θα προκύψουν σοβαρές επιπλοκές που θα διακινδυνεύσουν την απρόσκοπτη λειτουργία της μονάδας. Πριν την εκκίνηση λειτουργίας πρέπει να εξασφαλιστεί η συμβατότητα του υλικού με όλες της διατάξεις που θα έρθει σε επαφή. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην διάταξη καύσης του RDF.

Σχετικά με την καύση και σε σύγκριση με τον κονιοποιημένο άνθρακα έχει προκύψει εμπειρικά ότι το RDF παρουσιάζει δυσκολία στην τροφοδοσία, απαιτεί υψηλότερη περίσσεια αέρα και μεγαλύτερο χρόνο παραμονής και έχει μικρότερη θερμογόνο δύναμη. Όλα αυτά είναι παράμετροι που μπορούν να τροποποιηθούν στον καυστήρα προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η απόδοση ελαχιστοποιώντας ανεπιθύμητες παρενέργειες.

Σχετικά με την σύσταση και τα προϊόντα της καύσης:

- Βασικότερο πρόβλημα θεωρείται η παρουσία του χλωρίου στην πρώτη ύλη. Υπό τις συνθήκες της οποίας θερμικής κατεργασίας το χλώριο μετατραπεί σε υδροχλώριο το οποίο στις έντονες θερμικές συνθήκες έχει εξαιρετικά διαβρωτική δράση. Κατάλληλα μέτρα πρέπει να ληφθούν προκειμένου το υδροχλώριο να δεσμεύεται και να αδρανοποιείται το συντομότερο δυνατόν μετά τον σχηματισμό του.
- Η παρουσία μικροσωματιδίων μετάλλου και γυαλιού (<1250μm) στις συνθήκες του καυστήρα οδηγεί στην συσσώρευση πυριτικών και μεταλλικών οξειδίων στις επιφάνειες μειώνοντας την θερμική διαπερατότητα τους, κάτι που μειώνει

την απόδοση του λέβητα ενώ παράλληλα διαβρώνει και σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να απαιτείται και πρόωρη διακοπή της λειτουργίας για συντήρηση.

- Αναλογικά στο ίδιο ποσό παραγόμενης θερμότητας το RDF παράγει 4 – 6 φορές περισσότερη στάχτη από τον ορυκτό άνθρακα (μέση ποιότητα). Αυτό πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά την χρήση προκειμένου να μην αντιμετωπιστεί υπερφόρτωση και ανακοπή των συστημάτων συλλογής τέφρας, ιπτάμενης και πυθμένα.

Τέλος, σχετικά με την αξιοποίηση του RDF, το RDF αποτελεί μία ικανή αλλά δύσχρηστη καύσιμη ύλη μακριά από τα πρότυπα και τις προδιαγραφές των υπολοίπων στερεών καυσίμων. Έτσι λοιπόν συνήθως χρησιμοποιείται σε απλούς καυστήρες (π.χ. για παραγωγή κλίνκερ) και μαζί με στερεό άνθρακα (co-firing). Η προτίμηση του ως υποκατάστατο καύσιμο οφείλεται κυρίως στο χαμηλό του κόστος και προκειμένου η παραγόμενη θερμότητα να είναι ικανοποιητική χρησιμοποιείται σε μέγιστη περιεκτικότητα 30% στο καύσιμο μίγμα.

Επιστημονικές μελέτες σχετικές με την οικονομική βιωσιμότητα μιας μονάδας παραγωγής RDF, και λαμβάνοντας υπ' όψιν την χαμηλή αξία και μικρή αγορά του RDF, αναδεικνύουν ότι στις παρούσες συνθήκες κρίνεται κερδοφόρα η παραγωγή του μόνο σε περίπτωση που πραγματοποιείται επί τόπου ανάκτηση ενέργειας, ενώ είναι οριακά βιώσιμη σε περίπτωση που γίνεται συμπαραγωγή οργανικού κομποστ. (32)

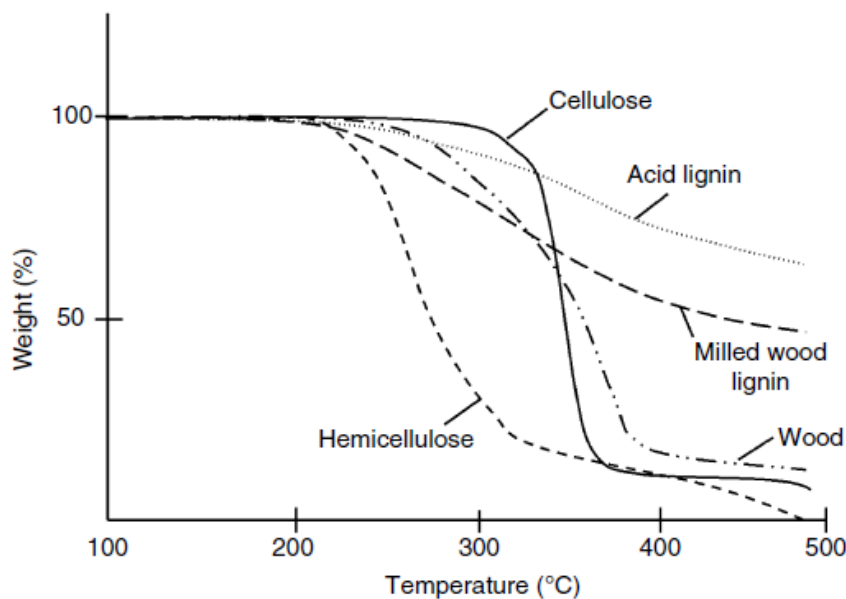
Συνεκτιμώντας όλα τα παραπάνω κρίνεται ότι η παραγωγή του RDF θα απευθύνεται στην βελτιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος στην τοπική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής και μόνο.

“Καβούρδισμα” (Torrefaction):

Στην αρχή της παραγράφου αναφέρθηκε η δυνατότητα αναβάθμισης του βιο-οργανικού κλάσματος και αξιοποίησης μέρους του υψηλής υγρασίας βιο-οργανικού κλάσματος. Βασικά μειονεκτήματα των βιολογικής προέλευσης υλικών είναι η σχετικά υψηλή περιεχόμενη υγρασία και η μικρή θερμογόνο δύναμη που συνεπάγονται πολύ χαμηλή κατώτερη θερμογόνο αξία. Μια αποδοτική αναβάθμιση αυτών των ιδιοτήτων τους οδηγεί άμεσα σε καύσιμα υλικά ανώτερης ποιότητας. Μια ικανή μέθοδος είναι αυτή του «καβουρδίσματος» (torrefaction).

Η διεργασία του torrefaction παραπέμπει στο καβούρδισμα του καφέ. Στην ουσία αποτελεί μία πολύ ήπια μορφή πυρόλυσης, ακόμα ηπιότερη από αυτή της απανθράκωσης. Τα οργανικά υλικά θερμαίνονται στους 200-300 C απουσία οξυγόνου. Κατ’ αυτόν τον τρόπο η βιομάζα ξηραίνεται και εξαερώνεται μερικώς. Έτσι, μέρος της μάζας και της περιεχόμενης ενέργειας χάνεται με την μορφή αερίων προϊόντων. Η απώλεια όμως είναι δυσανάλογη, δηλαδή η μάζα μειώνεται κατά περίπου 30% ενώ η ενέργεια κατά μόλις 10% με αποτέλεσμα το καβουρδισμένο υλικό να έχει ενεργειακή πυκνότητα περίπου 30% μεγαλύτερη από το αρχικό. Η ενεργειακή πυκνότητα σε ένα καύσιμο είναι πολύ σημαντική παράμετρος καθώς, πέρα από χαμηλότερα κόστη μεταφοράς υλικού με ίδια ποσά ενέργειας, συνεπάγεται περισσότερη ενέργεια στην ίδια τελική μάζα καυσαερίων και συνεπώς υψηλότερη θερμοκρασία που αυξάνει την απόδοση των διατάξεων μεταφοράς/μετατροπής ενέργειας.

Αναλυτικότερα, στις συνθήκες του καβουρδίσματος πραγματοποιούνται διάφορες αντιδράσεις αποσύνθεσης των οργανικών μορίων. Βάση κινητικής, στο εύρος 150-280 C πραγματοποιείται διάσπαση της ημικυτταρίνης με μεγιστοποίηση του ρυθμού στους 200-300 C του καβουρδίσματος. Παρακάτω φαίνεται σχηματικά το σύνολο των αντιδράσεων και η κινητική τους:



Διάγραμμα μάζας/θερμοκρασίας για τα κύρια συστατικά της βιομάζας (14)

Τα προϊόντα διάσπασης της ημικυτταρίνης και των λοιπών συστατικών της βιομάζας είναι κυρίως νερό με μικρές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα και ελάχιστα πτητικά οργανικά αέρια χαμηλής θερμογόνου δύναμης. Η απομάκρυνση των παραπάνω συνεπάγεται την από-υδροξυλίωση του υλικού, την ελάττωση του λόγου οξυγόνου/άνθρακα και την διάσπαση της ημικυτταρίνης. Πέρα από την εύξηση της ενεργειακής πυκνότητας, το καθένα από αυτά παρουσιάζει μοναδικά πλεονεκτήματα για την φύση του καυσίμου:

- Η απομάκρυνση των υδροξυλομάδων από το υλικό μειώνει θεαματικά την υγροσκοπικότητα του καυσίμου με αποτέλεσμα να μην απαιτούνται αυστηρές προϋποθέσεις κατά την αποθήκευσή του και να μην ελαττώνεται η θερμική του αξία με την πάροδο του χρόνου. Συγκεκριμένα για υπολείμματα από ζαχαροκάλαμο η απορρόφηση νερού μειώθηκε από 186% σε μόλις 6%, για δεδομένες συνθήκες.
- Η ελάττωση του περιεχόμενου οξυγόνου εξασφαλίζει καλύτερο χειρισμό των διεργασιών οξείδωσης του υλικού και ειδικότερα κατά την ελεγχόμενη οξείδωση. Στην περίπτωση δηλαδή αεριοποίησης της βιομάζας, το χημικά περιεχόμενο οξυγόνο στην πρώτη ύλη παροτρύνει την οξείδωσή με αποτέλεσμα την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα που συνεπάγεται την θερμογόνο δύναμη του αερίου καυσίμου.
- Η διάσπαση της ημικυτταρίνης επιτρέπει την ευκολότερη κατεργασία του υλικού. Η ημικυτταρίνη δρα ως συνδετικό υλικό στην δομή της φυτικής βιομάζας. Διασπώντας την, το τελικό υλικό είναι πιο εύθρυπτο με αποτέλεσμα το κόστος κατεργασίας – ελάττωσης μεγέθους να είναι έως και 90% μικρότερο (33). Ακόμη, το καβουρδισμένο υλικό έχει μηχανική συμπεριφορά παρόμοια με του ορυκτού άνθρακα με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς προσαρμογή του εξοπλισμού σε καυστήρες/λέβητες κονιοποιημένου άνθρακα (Pulverized Coal fired boilers) και αεριοποιητές συμπαρασυρόμενης ροής (Entrained flow gasifiers).

Από όλα τα παραπάνω είναι πλέον προφανές ότι ένα καβουρδισμένο στερεό βιοκαύσιμο είναι ανώτερο σε ιδιότητες από ένα μη θερμικά κατεργασμένο. Σχετικά όμως με την ονομαστική του θερμογόνο δύναμη είναι σημαντικό να αναλυθεί η μεταβολή της κατά την κατεργασία καθώς αυτή απαιτεί ένα ποσό ενέργειας το οποίο και πρέπει να είναι μικρότερο από την αύξηση της περιεχόμενης στο υλικό ενέργειας ειδάλλως μπορεί η διεργασία να μην είναι βιώσιμη.

Η μεταβολές που πραγματοποιούνται στο υλικό κατά την κατεργασία, και συνεπώς το τελικό αποτέλεσμα, εξαρτώνται κυρίως από την θερμοκρασία, τον ρυθμό θέρμανσης και τον χρόνο παραμονής. Βέλτιστη θερμοκρασία κρίνονται οι 250 C και ο τυπικός χρόνος θέρμανσης είναι περί τα 30 λεπτά. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από τους 200 C πρέπει να είναι κατά το δυνατόν ηπιότερος, μικρότερος από 1 C/s. Τα πειραματικά αποτελέσματα του καβουρδίσματος για υπολείμματα ζαχαροκάλαμου συγκεκριμένα φαίνονται παρακάτω:

Table 3.7 Changes in the Bagasse Properties after Torrefaction at 250 °C

Property	Torrefaction Time (min)		
	15	30	45
Mass yield (%)	69	68.33	62
Energy yield (%)	88.86	91.06	83.23
Energy density (% energy yield/% mass yield)	1.29	1.33	1.34
Energy required (MJ/kg product)	2.34	2.58	2.99
Higher heating value (HHV) (MJ/kg product)	19.88	20.57	20.72
Rise in HHV (%)	22.35	24.96	25.51
HHV (MJ/kg raw material)	15.44	15.44	15.44
Net energy (MJ/kg product)	17.54	17.99	17.73

Note: Moisture absorption after 2 hr in water: Raw bagasse, 186%; torrefied bagasse, 7.63%.
Source: Adapted from Pimchua et al., 2009.

Επίδραση χρόνου καβουρδίσματος στις τελικές ιδιότητες. (14)

Όπως φαίνεται τα 30 λεπτά είναι ο πλέον αποδοτικός χρόνος. Σχετικά με το κέρδος ενέργειας, η γραμμή “Net energy” υποδηλώνει την τελική θερμογόνο δύναμη του προϊόντος αν αφαιρεθεί η ενέργεια που καταναλώθηκε για την κατεργασία του. Δεδομένου ότι η τιμή είναι μεγαλύτερη από αυτή του ακατέργαστου υλικού (17.99 έναντι 15.44 “HHV (MJ/Kg raw material)”) προκύπτει ότι το καβούρδισμα είναι μια όντως αποδοτική και επικερδής διεργασία. (14)

Ειδικότερα στην περίπτωση όπου η συγκεκριμένη διεργασία ολοκληρωθεί ενεργειακά με την υπόλοιπη μονάδα το ενεργειακό κέρδος είναι ακόμη μεγαλύτερο. Εν προκειμένω για τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής πολλές διατάξεις ατμοστροβίλων έχουν θερμοκρασία ατμού στην έξοδο περί τους 350 C (πηγή SIEMENS (34)). Αυτό είναι ικανή θερμοκρασία για την θέρμανση της διάταξης καβουρδίσματος ώστε να επιτευχθεί η τιμή των 250 C που απαιτούνται. Έτσι με μηδενική κατανάλωση ενέργειας αλλά με ανάκτηση από ένα ρεύμα που οδηγείται ούτως ή άλλως προς ψύξη είναι δυνατή η αναβάθμιση του παραγόμενου καυσίμου.

Εντέλει όμως πρέπει να σημειωθεί ότι αξιοποίηση του καβουρδίσματος πραγματοποιείται προκειμένου η παραγόμενη καύσιμη ύλη να προσιδιάζει εγγύτερα στην φύση του ορυκτού άνθρακα ή του ξυλάνθρακα. Αυτό είναι σημαντικό σε περίπτωση που πρόκειται να καεί σε εστίες σχεδιασμένες για άνθρακα, προκειμένου να μην απαιτείται εκτενής αναπροσαρμογή της εστίας για το νέο καύσιμο. Σε περίπτωση όπου η βιομάζα πρόκειται να καεί άμεσα σε εστία/καυστήρα σχεδιασμένο ειδικά για βιομάζα, τότε το πρωτύερο καβούρδισμα δεν έχει να αποδώσει κάποιο σημαντικό όφελος και άρα περιττεύει. (35)

Επιλογή διεργασίας:

Προϋποθέσεις:

Το καβούρδισμα της βιομάζας είναι μία σχετικά νέα τεχνολογία η οποία αξιοποιείται ως επί το πλείστον για την κατεργασία σκληρής ξυλείας (hardwood) και την παραγωγή πέλετς καυσίμου. Εν προκειμένω η περιεχόμενη ξυλεία στη μάζα των ΑΣΑ είναι αρκετά μικρή (~30,000 t/a, 1.3% w/w) με αποτέλεσμα να είναι αμφίβολη έως προφανώς μη-βιώσιμη η εγκατάσταση μίας μονάδας καβουρδίσματος.

Παρόλα αυτά στο κλάσμα αυτό δεν περιλαμβάνονται ξυλουργικά απορρίμματα από άλλες δραστηριότητες κάτι που μπορεί να αύξανε σημαντικά την ανάγκη για μια τέτοια μονάδα. Σημαντικότερη όμως είναι η αξιολόγηση αυτής της προ-κατεργασίας και των υπολοίπων ΑΣΑ προς παραγωγή ενέργειας από θερμοχημικές μεθόδους (καύση κλπ). Το χαρτί που συνιστά και το μεγαλύτερο μέρος αυτού του κλάσματος των ΑΣΑ παρότι αποτελείται κυρίως από κυτταρίνη είναι άγνωστο κατά πόσο αναβαθμίζεται ως τροφοδοσία καυσίμου από το καβούρδισμα ενώ είναι περιορισμένη και η μελέτη/εφαρμογή του στα πλαστικά (36). Η συναφής φύση του χαρτιού και λιγότερου των πλαστικών (οργανικά μακρομόρια με οξυγόνο) με του ξύλου είναι αρκετά υποσχόμενη για να μελετηθεί η επίδραση του καβουρδίσματος στις ιδιότητες τους.

Τέλος η βασικότερη προοπτική αξιοποίησης του καβουρδίσματος έγκειται στην αναβάθμιση οργανικού κλάσματος υψηλού σε υγρασία όπως τα ζυμώσιμα σε κατάλληλο στερεό καύσιμο. Λόγω της μεγάλης υγρασίας τους και της ευκολότερα βιο-αποδομήσιμης φύσης τους, τα ζυμώσιμα είναι καταλληλότερα για κατεργασία με αναερόβια χώνευση (που θα παρουσιαστεί παρακάτω). Παρόλα αυτά η παραγωγή ζυμώσιμων απορριμμάτων είναι εξαιρετικά μεγάλη στην Αττική (~1,000,000 t/a) με αποτέλεσμα η πλήρης κατεργασία τους από μονάδες αναερόβιας χώνευσης να είναι υψηλού ρίσκου (φρόνιμο κρίνεται να αρχίσει η λειτουργία μιας σχετικά μικρής μονάδας μέχρι να επιτευχθεί εξοικείωση με το αντικείμενο) ή ακόμη και ανέφικτη (οι μεγαλύτερες μονάδες μπορούν να κατεργαστούν μέχρι ~250,000 t/a και άρα η πλήρης κατεργασία τους απαιτεί ανέφικτα υψηλό επενδυτικό κόστος). Σε περίπτωση που ήταν αποδοτική η διοχέτευσή τους σε μονάδες ταχύτερης κατεργασίας όπως οι θερμοχημικές θα μπορούσε να επιτευχθεί ακόμη μεγαλύτερη ανάκτηση ενέργειας από τα ΑΣΑ. Εάν αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ξήρανση και καβούρδισμα τότε μία μονάδα torrefaction θα ήταν απαραίτητη.

Η μετατροπή των ζυμώσιμων ΑΣΑ σε στερεό καύσιμο δεν έχει μελετηθεί, τουλάχιστον δεν έχει λάβει καμία εμπορική έκταση αυτό το ενδεχόμενο, καθώς κάτι τέτοιο θα προ-απαιτούσε την ξήρανση τους. Αυτό είναι εμπορικά ανέφικτο καθώς για να απομακρυνθεί η 40-70% περιεχόμενη υγρασία απαιτούνται απαγορευτικά μεγάλα ποσά ενέργειας και άρα έξοδα. Κάτι τέτοιο όμως δεν αποτελεί πρόβλημα σε περίπτωση ενεργειακής ολοκλήρωσης της διεργασίας με άλλες. Δεδομένου ότι ο αέρας της ξήρανσης πρέπει να είναι 70-100 C είναι πολύ εύκολο η απαιτούμενη ενέργεια να ανακτηθεί, καθώς το θερμαντικά μέσα μιας μονάδας, κυρίως ο ατμός, θεωρείται ενεργειακά εξαντλημένος όταν φτάσει σε τέτοια επίπεδα θερμοκρασίας και οδηγείται προς συμπύκνωση και αναγέννηση στον λέβητα. Η «άχρηστη» ενέργεια

που περιέχει ο ατμός στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί αντί να απορριφθεί να αξιοποιηθεί εδώ. Αν λοιπόν η θερμογόνο δύναμη επί ξηρής, πλέον, βάσης των ζυμώσιμων ΑΣΑ είναι ικανοποιητική τότε, δεδομένου ότι η ξήρανση τους έχει ελάχιστο κόστος μέσω ενεργειακής ολοκλήρωσης, μπορούν να συμπεριληφθούν στην παραγωγή στερεού καυσίμου.

Σχετικά με το ενεργειακό περιεχόμενο των ξηρών ζυμώσιμων προϊόντων δεν υπάρχουν άμεσα στοιχεία. Μια καλή ένδειξη όμως είναι το θερμιδικό περιεχόμενο των τροφίμων, καθώς η πλειονότητα των ζυμώσιμων ΑΣΑ είναι υπολείμματα τροφίμων. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις θερμίδες (kcal) και την υγρασία ορισμένων ενδεικτικά τροφίμων (37) προκύπτει μια μέση ενεργειακή αξία 2,500-3,500 kcal/kg σε ξηρή βάση (10.5-14.7 MJ/Kg σε ξηρή βάση). Η τιμή αυτή είναι παρεμφερής με τα υπόλοιπα στερεά κλάσματα που περιέχονται στα ΑΣΑ που συνεπάγεται ότι τα ξηρά ζυμώσιμα είναι ικανή πρώτη ύλη για παραγωγή RDF, βάση ενεργειακού περιεχομένου.

Διάταξη διεργασίας:

Δεδομένου ότι το καβούρδισμα είναι μία ήπια διεργασία πυρόλυσης δηλαδή αναερόβιας θέρμανσης του υλικού η απαιτούμενη διάταξη για την διεξαγωγή της είναι πολύ απλή και πολλές φορές μπορεί να είναι και ήδη χρησιμοποιούμενη διάταξη για ξήρανση υλικών. Οι βασικότερες διατάξεις για αυτή την διεργασία είναι:

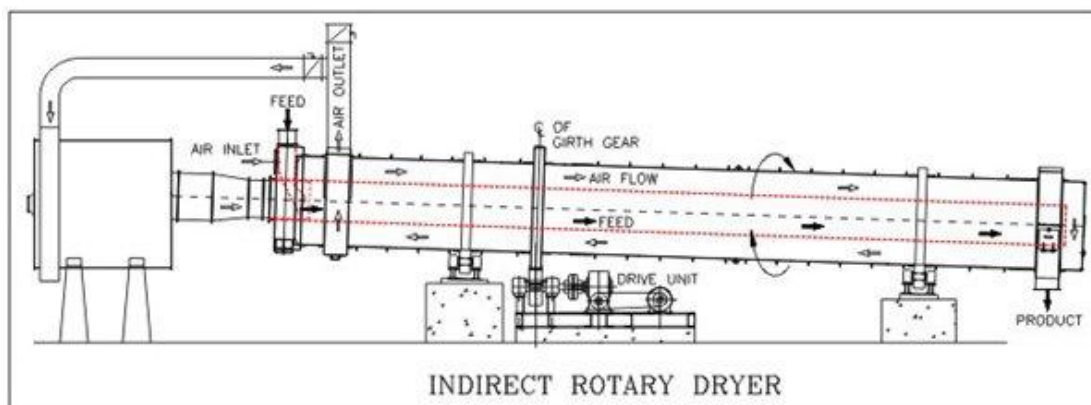
- Περιστρεφόμενου τυμπάνου
- Σταθερής/μετακινούμενης κλίνης
- Ρευστοποιημένης κλίνης
- Κοχλία
- Μεταφορικής ταινίας
- Μικροκυμάτων
- Καυστήρας πολλαπλών εστιών

Η καθεμιά διάταξη παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της με αποτέλεσμα η καταλληλότερη επιλογή να γίνεται με βάση την σύσταση της τροφοδοσίας και το επιθυμητό τελικό προϊόν.

Όσον αφορά όμως την επιλογή της διεργασίας πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν μια βασική σχεδιαστική παράμετρος: ο τρόπος θέρμανσης της πρώτης ύλης. Προκειμένου η πρώτη ύλη να φτάσει στην απαιτούμενη θερμοκρασία μπορεί να θερμανθεί είτε άμεσα, με την διοχέτευση ενός μη οξειδωτικού θερμού μέσου, όπως καυσαέρια, απευθείας μέσα από την μάζα της, είτε έμμεση δηλαδή με θέρμανση του περιβλήματος του 'αντιδραστήρα' και άρα αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του και στο υλικό κατ' επέκταση.

Η πλειονότητα των παραπάνω είναι δεσμευτική ή αυστηρά εκλεκτική ως προς τον τρόπο θέρμανσης του υλικού. Ευέλικτη παρουσιάζεται μόνο η διάταξη περιστρεφόμενου τυμπάνου. Εδώ η θέρμανση μπορεί να γίνει είτε με ροή θερμών καυσαερίων μέσα από το τύμπανο (άμεση), είτε με θέρμανση των τοιχωμάτων του κυλίνδρου με ατμό (έμμεση). Η διάταξη αποτελείται από έναν κεκλιμένο οριζόντιο

κύλινδρο που περιστρέφεται περί τον άξονά του. Τα υλικά εισέρχονται από το υψηλότερο άκρο και εξέρχονται από το κατώτερο καθοδηγούμενα από την βαρύτητα και παρακινούμενα από την περιστροφική κίνηση του τυμπάνου. Η κλίση, το μήκος και η ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου καθορίζουν κατά κύριο λόγο τον χρόνο παραμονής του υλικού μέσα στον αντιδραστήρα καβουρδίσματος. (38)



Διάταξη περιστρεφόμενου τυμπάνου με έμμεση θέρμανση (39)

Τροφοδοσία-Προϊόντα:

Σχετικά με την σύσταση και τις προδιαγραφές της τροφοδοσίας, όπως έχει αναφερθεί ως τροφοδοσία μπορεί να είναι κάθε ουσία οργανικής προέλευσης, εφόσον κριθεί αποδοτική η κατεργασία της με αυτή την μέθοδο (υπενθυμίζεται η έλλειψη δεδομένων για χαρτί και πλαστικά). Στην περίπτωση που κριθεί κατάλληλη και η αξιοποίηση των ζυμώσιμων θα πρέπει να προηγηθεί ξήρανση τους. Δεδομένου ότι η ξήρανση απαιτεί παρόμοια κατεργασία αλλά με ροή θερμού και ξηρού αέρα δια μέσω του υλικού (προκειμένου η περιεχόμενη στα στερεά υγρασία να μεταβεί στο αέριο ρεύμα) δεν μπορεί να συνυπάρξει με το καβούρδισμα στον ίδιο αντιδραστήρα, στην περίπτωση της έμμεσης θέρμανσης. Επομένως απαιτείται η σύνδεση ενός παρόμοιου αντιδραστήρα ξήρανσης (και σε αυτή την περίπτωση περιστρεφόμενου τυμπάνου) σε σειρά με έξοδο του ξηρού υλικού ως τροφοδοσία στην διεργασία καβουρδίσματος. Επίσης το μέγεθος των υλικών μέσα στις διατάξεις πρέπει να είναι σχετικά μικρό ούτως ώστε να διευκολύνει την μεταφορά θερμότητας και μάζας προκειμένου η τροφοδοσία να θερμαίνεται γρήγορα και ομοιόμορφα και η υγρασία στο πρώτο στάδιο (ξηρανση) και τα αέρια προϊόντα στο δεύτερο (καβούρδισμα) να απομακρύνονται εύκολα. Αυτό απαιτεί την είσοδο του υλικού μετά από μία βασική ελάττωση μεγέθους, π.χ. κατόπιν προ-κατεργασίας με τεμαχιστή διάτμησης.

Καθώς το καβούρδισμα κάνει την ύλη σημαντικά πιο εύθρυπτη, η τελική ελάττωση μεγέθους μπορεί να τοποθετηθεί έπειτα από το καβούρδισμα. Επίσης η υψηλή θερμοκρασία εξόδου του καβουρδισμένου υλικού μπορεί να βοηθήσει στην επερχόμενη διεργασία ανάκτησης ενέργειας (καύση, αεριοποίηση κλπ). Η ιδανική διεργασία λοιπόν θα περιλάμβανε ξήρανση, καβούρδισμα, και χωρίς ψύξη του προϊόντος εν θερμώ άλεση και απευθείας εισαγωγή στον αντιδραστήρα της διεργασίας παραγωγής ενέργειας-ενεργειακών προϊόντων. Σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζεται το εξής μειονέκτημα: στους 200-300 C, του καβουρδίσματος, τόσο η

λιγνίνη της φυτικής βιομάζας όσο και τα πλαστικά είναι είτε εύπλαστα είτε τήγμα. Αυτό θα μπορούσε να δημιουργήσει επιπλοκές στην λειτουργία του λεπιδό-μυλου.

Όλα τα παραπάνω αποτελούν θεωρητικές υποθέσεις που υπάρχουν ελάχιστα ή καθόλου πειραματικά στοιχεία που να τα επιβεβαιώνουν. Από αυτά τα θεωρητικά δεδομένα και συμπεράσματα το καβούρδισμα των οργανικών και των ζυμώσιμων, κατόπιν ξήρανσης, ΑΣΑ έχει βάσιμες προοπτικές στην αύξηση της παραγωγής ενέργειας-ενεργειακών προϊόντων. Απαραίτητο όμως είναι αυτό να υποστηριχθεί από πειραματικά πορίσματα πριν την προσπάθεια εμπορικής εφαρμογής τους.

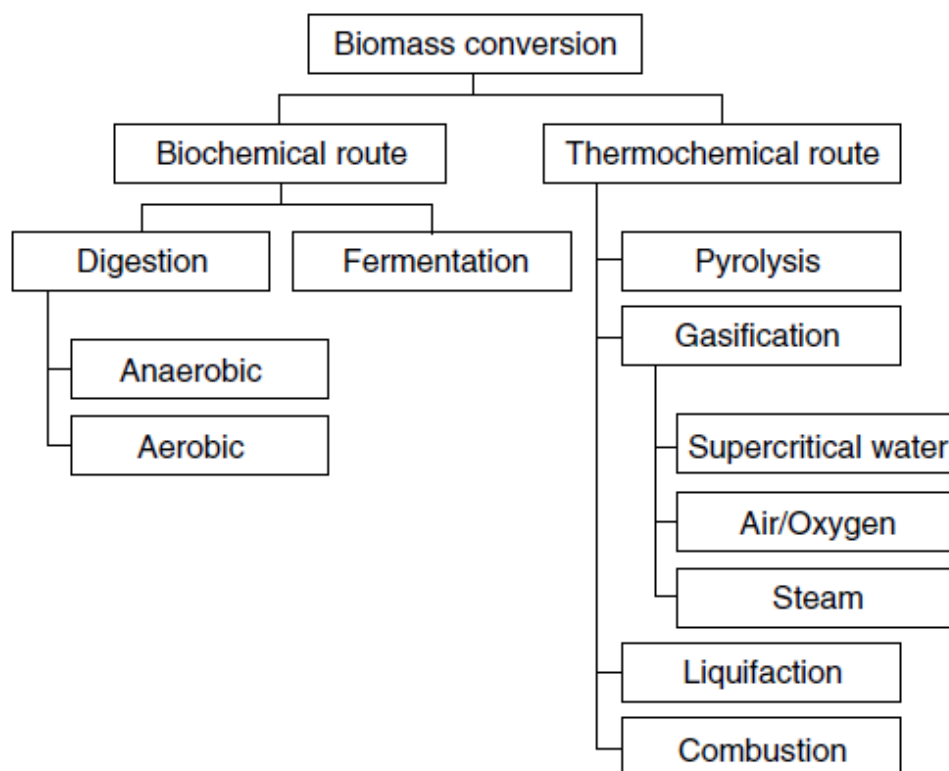
Έμμεσες:

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, η έντονη ανάγκη για μεγάλες ποσότητες ενέργειας και άμεσα διαθέσιμες έχει οδηγήσει στην εκτεταμένη χρήση του πετρελαίου και των παραγώγων του ως πηγή ενέργειας. Αυτό οφείλεται στο ότι τα πετρελαϊκά παράγωγα έχουν μεγάλο ενεργειακό περιεχόμενο συγκεντρωμένο σε σχετικά μικρή και εύχρηστη μάζα και άμεσα διαθέσιμο, μέσω της εύκολης καύσης τους. Στον αντίποδα, η βιομάζα και τα πλαστικά, συνεπώς τα απορρίμματα, είναι εξαιρετικά δύσχρηστα ως καύσιμος ύλη. Παρουσιάζουν μεγάλη δυσχέρεια στον χειρισμό, την αποθήκευση και την μεταφορά, έχουν σχετικά μικρό και ευμετάβλητο ενεργειακό περιεχόμενο, δεν είναι εξίσου προσφιλή στην καύση και σύνθετη στοιχειακή/μοριακή τους σύνθεση οδηγεί σε παραγωγή πολλών ρύπων και παραπροϊόντων όταν καίγονται χωρίς να λαμβάνονται ειδικά μέτρα και να πραγματοποιούνται προσεκτικοί χειρισμοί. Σήμερα λιγότερο από το 22% των ενεργειακών αναγκών παγκοσμίως καλύπτεται από την αξιοποίηση της βιομάζας και αυτό περισσότερο στις υποανάπτυκτες περιοχές. Προκειμένου λοιπόν να είναι βιώσιμη η αξιοποίηση τους ως πηγή ενέργειας και εναλλακτική καύσιμη ύλη, είναι απαραίτητη η μετατροπή τους σε υλικά με «συμπεριφορά» πλησιέστερη σε αυτή των οικείων πετρελαϊκών παραγώγων. (14)

Εδώ λοιπόν εισέρχονται οι «έμμεσες» διεργασίες. Στόχος αυτών είναι η μετατροπής της μάζας της εκάστοτε πρώτης ύλης, εν προκειμένω των απορριμμάτων, σε οργανικές ουσίες απλούστερες και πλησιέστερες στις τρέχουσες απαιτήσεις για καύσιμες ύλες. Μέσω αυτών των διεργασιών οι πολύπλοκες οργανικές ενώσεις των βιολογικής προέλευσης πρώτων υλών και τα μακρομόρια των πλαστικών μετατρέπονται σε οργανικές ενώσεις μικρού μοριακού βάρους και απλούστερης στοιχειακής σύστασης οι οποίες συμβαδίζουν άμεσα με τις προδιαγραφές των καυσίμων και τις διατάξεις καύσης και παραγωγής ενέργειας που υπάρχουν σήμερα. Τα προϊόντα των «έμμεσων» διεργασιών μπορούν να αξιοποιηθούν ως καύσιμο στην πλειονότητα των μηχανών εσωτερικής καύσης ή εστιών θέρμανσης/λεβήτων που ήδη υπάρχουν, με πολύ μικρές ή και μηδενικές τροποποιήσεις αυτών. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο όλες αυτές οι διεργασίες παρουσιάζουν πολύ μεγάλο ενδιαφέρον και η εφαρμογή τους είναι εξαιρετικά υποσχόμενη στην ομαλή μετάβαση από τις ορυκτές στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Παρά όμως την μεγάλη χρησιμότητα τους, η εφαρμογή τους χαρακτηρίζεται από πολυπλοκότητα, η οποία πηγάζει από την ιδιαίτερη κινητική των χημικών αντιδράσεων της μετατροπής της πρώτης ύλης σε ενεργειακά προϊόντα. Αυτό τις καθιστά απαιτητικές όσον αφορά τον σχεδιασμό και την λειτουργία, το απαιτούμενο τεχνολογικό και επιστημονικό υπόβαθρο, καθώς και πιο ευαίσθητες στις μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας, της πρώτης ύλης και των οποιοδήποτε παραμέτρων επηρεάζουν την διεργασία. Όλα αυτά αυξάνουν το οικονομικό κόστος, κάτι που τελικά ενίοτε τις καθιστά μη συμφέρουσες και άρα απορριπτές ως επιλογές. Η μεγάλη τους χρησιμότητα όμως οδηγεί στην συνεχή μελέτη και εξέλιξη τους προκειμένου να αποτελέσουν μία βιώσιμη πηγή ενέργειας για μια νέα εποχή.

Δύο είναι οι κύριες οδοί για την μετατροπή βιομάζας και πλαστικών σε ενεργειακά προϊόντα προστιθέμενης αξίας: οι βιοχημικές και οι θερμοχημικές. Η πρώτη κατηγορία αξιοποιεί μεταβολικές οδούς έμβιων (μικρο)οργανισμών και παρουσιάζει μεγάλη εκλεκτικότητα ως προς την πρώτη ύλη, η οποία θα πρέπει να είναι απαραίτητως βιομάζα, δηλαδή ύλη που προέρχεται από κάτι προηγουμένως έμβιο (π.χ. τα οργανικά υπολείμματα από τις τροφές, το χαρτί από το ξύλο κλπ). Οι δύο διεργασίες κύριου ενδιαφέροντος είναι η αναερόβια χώνευση που παράγει μεθανιούχο αέριο καύσιμο και η αλκοολική ζύμωση που παράγει αιθανόλη. Ακόμη υπάρχει και η αερόβια χώνευση, η οποία όμως δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον -εν προκειμένω- καθότι δεν ωφελεί στην παραγωγή ενέργειας αλλά μόνο στην μετατροπή της «άχρηστης» βιομάζας σε θρεπτική καλλιεργητική ύλη (κομπόστ). Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει καθαρά χημικές μεθόδους οι οποίες εκμεταλλεύονται τις υψηλές θερμοκρασίες και τις δραστικές συνθήκες προκειμένου να διασπάσουν τους δεσμούς στις μεγάλες οργανικές και να τις μετατρέψουν σε μικρότερες. Αυτές είναι η πυρόλυση, που διασπά την πρώτη ύλη σε γενικώς αέριες υγρές και στερεές ενώσεις, η αεριοποίηση που στοχεύει στην παραγωγή αποκλειστικά αερίων ουσιών και η υγροποίηση που στοχεύει αντίστοιχα στην παραγωγή υγρών. Το σύνολο των προϊόντων των παραπάνω διεργασιών αποτελείται από μία πληθώρα απλών οργανικών ουσιών οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν καύσιμο για παραγωγή ενέργειας αλλά και αντιδρώντα για την παραγωγή σωρείας ουσιών εμπορικού ενδιαφέροντος (14). Εδώ οι διεργασίες μελετώνται αποκλειστικά για το τελικό ενεργειακό τους ενδιαφέρον αλλά μεταγενέστερα σαφώς και μπορούν να προσφέρουν σημαντικά στο εμπόριο χημικών ειδών, κάτι που καθιστά ακόμη πιο επιτακτική την περαιτέρω μελέτη και άμεση εφαρμογή τους.



Οι βασικότεροι οδοί μετατροπής βιομάζας σε χρήσιμες πρώτες ύλες (14)

Θερμοχημικές μέθοδοι:

Οι θερμοχημικές μέθοδοι κατεργασίας των απορριμμάτων παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Είναι μέθοδοι συνεχούς κατεργασίας με μικρούς χρόνους παραμονής που συνεπάγονται και μία αντίστοιχη παραγωγικότητα. Μεταξύ τους διαφοροποιούνται ως προς την ένταση της θερμοκρασίας και των επικρατουσών συνθηκών, την χρήση καταλυτών, την παρουσία οξυγόνου στον χώρο της αντίδρασης και σαφώς τα παραγόμενα προϊόντα. Η κάθε μία παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάτι που τις καθιστά καταλληλότερες ανάλογα με την περίπτωση. Συνοπτικά συγκρίνονται παρακάτω:

TABLE 1.2 Comparison of Four Major Thermochemical Conversion Processes

Process	Temperature (°C)	Pressure (MPa)	Catalyst	Drying
Liquefaction	250–330	5–20	Essential	Not required
Pyrolysis	380–530	0.1–0.5	Not required	Necessary
Combustion	700–1400	>0.1	Not required	Not essential, but may help
Gasification	500–1300	>0.1	Not essential	Necessary

Source: Adapted from Demirbas, 2009.

Συνοπτική σύγκριση των 4 κυριότερων θερμοχημικών κατεργασιών (14)

Πυρόλυση (pyr):

Ως πυρόλυση ορίζεται η θερμοχημική αποσύνθεση της πρώτης ύλης, εδώ των απορριμμάτων, σε απλούστερα και μικρότερα μόρια με την μορφή αερίου, υγρού και στερεού εναποθέματος (απανθράκωμα). Διεξάγεται σε, συγκριτικά με τις υπόλοιπες θερμοχημικές διεργασίες, χαμηλές θερμοκρασίες 300–650 °C και το βασικό χαρακτηριστικό είναι η απουσία οξυγόνου (ή σε ορισμένες περιπτώσεις η περιορισμένη παρουσία του προκειμένου να τροφοδοτείται η απαιτούμενη ενέργεια για την διεξαγωγή της πυρόλυσης)

Προϊόντα της πυρόλυσης:

Καθότι εκεί επικεντρώνεται το ενδιαφέρον είναι δόκιμο να αναφερθούν πρώτα αυτά και στην συνέχεια ο τρόπος παρασκευής τους και οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση σε αυτά. Όπως προαναφέρθηκε είναι αέρια, υγρά και στερεά. Πιο συγκεκριμένα:

- Στερεά: απανθράκωμα και στερεός άνθρακας
- Υγρά: πίσσες, βαρύτεροι υδρογονάνθρακες και νερό
- Αέρια: CO₂, H₂O, CO, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, C₆H₆, κλπ

Το στερεό απανθράκωμα περιέχει κυρίως άνθρακα (85%) αλλά μπορεί και να περιέχει και οξυγόνο και υδρογόνο καθώς και ελάχιστη ανόργανη τέφρα, λόγω της κυρίως βιολογικής προέλευσης. Η θερμογόνος ενέργειά του είναι περί τα 38 MJ/Kg

Το υγρό προϊόν, επονομαζόμενο και πίσσα, βιο-πετρέλαιο (bio-oil/biocrude) είναι ένα μαύρο πηκτώδες υγρό που περιέχει κυρίως φαινολικές ενώσεις, σύνθετους υδρογονάνθρακες (υδροξυαλδεΐδες-κετόνες, σάκχαρα, καρβοξυλικά οξέα) οξυγόνο και έως 20% νερό. Είναι αποτέλεσμα μη εκτεταμένης πυρόλυσης η οποία διακόπτεται νωρίς, μέσω απότομης ψύξης, και έτσι οι ενώσεις αυτές δεν προλαβαίνουν να πυρολυθούν περεταίρω σε ακόμη μικρότερες. Η θερμογόνος ενέργεια αυτού είναι περί τα 13-18 MJ/Kg.

Τα πρωτογενή παραγόμενα από την πυρόλυση αέρια, στην θερμοκρασία εξόδου, χωρίζονται σε συμυκνώσιμα και μη. Μετά την ψύξη του ρεύματος εξόδου τα συμυκνώσιμα (βαρύτερα μόρια) συμπεριλαμβάνονται στο υγρό κλάσμα, ενώ τα μη συμυκνώσιμα αποτελούνται από διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, αιθάνιο και αιθυλένιο. Αυτό το κλάσμα έχει θερμογόνου δύναμη 11 MJ/Nm³. Σε περίπτωση που πραγματοποιηθεί και δευτερογενής διάσπαση των αρχικών (συμυκνώσιμων και μη) αερίων, το τελικό αέριο κλάσμα ενισχύεται και από δευτερογενή αέρια και φτάνει στα 20 MJ/Nm³ (14).

Οδοί πυρόλυσης:

Η βασική διαφοροποίηση μεταξύ των υπαρχόντων μεθόδων πυρόλυσης ενάγεται κυρίως στον συνολικό χρόνο πυρόλυσης – αύξησης της θερμοκρασίας σε σύγκριση με τον Χαρακτηριστικό Χρόνο Πυρολυτικής Αντίδρασης και δευτερευόντως από το μέσο και την πίεση που διεξάγεται. Ανάλογα με τις συνθήκες πυρόλυσης προκύπτει και η σύσταση του ρεύματος προϊόντων, επομένως ορισμένοι τύποι πυρόλυσης ενδείκνυνται για παραγωγή καυσίμου, ενώ άλλοι για παραγωγή χημικών πρώτων υλών. Όσον αφορά την παραγωγή ενεργειακών προϊόντων οι βασικοί τύποι πυρόλυσης είναι οι εξής:

- Αργή πυρόλυση ($t_{\theta\epsilon\rho\mu\alpha\nu\sigma\eta\varsigma} \gg t_{X.X.II.A.}$)
- Γρήγορη Πυρόλυση ($t_{\theta\epsilon\rho\mu\alpha\nu\sigma\eta\varsigma} \ll t_{X.X.II.A.}$)
- Υδρογονο-πυρόλυση (hydrolysis, παρουσία υδρογόνου, υψηλή πίεση)

Η ταχύτερη πυρόλυση συνδυάζεται συνήθως και με υψηλότερες τελικές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα την αύξηση του αέριου κλάσματος προϊόντων. Έτσι λοιπόν ανάλογα με την ανάγκη για στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα γίνεται και η επιλογή του αντίστοιχου τύπου πυρόλυσης.

- Για μέγιστη παραγωγή απανθρακώματος αξιοποιείται μικρός ρυθμός θέρμανσης (<0.01-2.0 C/s), χαμηλή τελική θερμοκρασία και μεγάλος χρόνος παραμονής
- Για μέγιστη παραγωγή υγρού κλάσματος αξιοποιείται υψηλός ρυθμός θέρμανσης, μέση τελική θερμοκρασία (450-600 C) και μικρός χρόνος παραμονής

- Για μέγιστη παραγωγή αερίων αξιοποιείται μικρός ρυθμός θέρμανσης, υψηλή τελική θερμοκρασία (700-900 C) και μεγάλος χρόνος παραμονής

Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικότερα οι μέθοδοι πυρόλυσης με τις επιμέρους συνθήκες και αντίστοιχα προϊόντα:

Table 3.2 Characteristics of Some Pyrolysis Processes

Pyrolysis Process	Residence Time	Heating Rate	Final Temperature (°C)	Products
Carbonization	Days	Very low	400	Charcoal
Conventional	5–30 min	Low	600	Char, bio-oil, gas
Fast	<2 s	Very high	~500	Bio-oil
Flash	<1 s	High	<650	Bio-oil, chemicals, gas
Ultra-rapid	<0.5 s	Very high	~1000	Chemicals, gas
Vacuum	2–30 s	Medium	400	Bio-oil
Hydropyrolysis	<10 s	High	<500	Bio-oil
Methanopyrolysis	<10 s	High	>700	Chemicals

Λεπτομέρειες διεργασιών πυρόλυσης (14)

Επιλογή καταλληλότερης οδού πυρόλυσης:

Δεδομένου ότι εν προκειμένω η πυρόλυση εστιάζεται στην παραγωγή καυσίμων είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του «κατάλληλου» καυσίμου. Ένα πρότυπο καύσιμο πρέπει να έχει ικανή θερμογόνο δύναμη, ευχέρεια στην καύση (να προϋποθέτει απλές συνθήκες) και ευκολία στον χειρισμό. Παρότι το στερεό απανθράκωμα έχει την μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη η στερεά φύση του το καθιστά δύσχρηστο (ετερογενής καύση στερεού-αερίου, δυσκολία στην μεταφορά) και άρα όχι ευρείας χρήσης. Τα αέρια καύσιμα, καλύπτονται σε μεγάλο βαθμό από τις διεργασίες της αεριοποίησης που ακολουθούν και άρα πλεονάζει η παραγωγή τους και από τις διεργασίες της πυρόλυσης. Αυτό λοιπόν που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η παραγωγή βιο-πετρελαίου και άρα η χρησιμοποίηση της τεχνολογίας της πυρόλυσης οφείλει να επικεντρωθεί εκεί. Η ανάγκη είναι έντονη, αν και αφανής. Ο λόγος είναι ότι μέσα στο κλίμα των εναλλακτικών «πράσινων» καυσίμων υφίσταται μία σταδιακή μετάβαση από τα υγρά πετρελαϊκά καύσιμα στα βιο-καύσιμα. Η σημερινή αγορά βιο-καυσίμων επικεντρώνεται γύρω από το βιο-ντίζελ (37.5 MJ/Kg) και την αιθανόλη (27 MJ/Kg) (13). Αυτά ως καύσιμα δεν διαφέρουν εκτενώς από το βιο-πετρέλαιο αλλά στην πλειονότητα τους παράγονται από βρώσιμη πρώτη ύλη και όχι από απορρίμματα. Κάτι τέτοιο αφαιρεί μερίδιο από την παγκόσμια παραγωγή τροφίμων και το διοχετεύει στην παραγωγή ενέργειας. Με

την αυξανόμενη τάση για βιο-καύσιμα αυτό το φαινόμενο αναμένεται να διογκωθεί στο μέλλον σε βαθμό που προκαλεί δριμύτατες κοινωνικές, περιβαλλοντικές και πολιτικές επιδράσεις. Για τον λόγο αυτό η παραγωγή υγρών βιο-καυσίμων από μη-βρώσιμη πρώτη ύλη είναι μία όλο και πιο επιτακτική ανάγκη.

Ακόμη, από την επιλεχθείσα διεργασία υπάρχει και η γενικότερη απαίτηση για αυξημένο ρυθμό παραγωγής, καλή μετατροπή των πρώτων υλών και ευκολία στον χειρισμό της διεργασίας. Για τους παραπάνω λόγους καταλληλότερη κρίνεται η «αστραπιαία» πυρόλυση (flash pyrolysis).

Κατά την αστραπιαία πυρόλυση η βιομάζα θερμαίνεται τάχιστα στους 450 – 600 C σε πλήρη απουσία οξυγόνου. Συγκεκριμένα για την παραγωγή υγρού προϊόντος η βέλτιστη τελική θερμοκρασία είναι περί τους 500 C. Ο χρόνος παραμονής στον αντιδραστήρα πυρόλυσης είναι πολύ μικρός, 30 με 1500 ms, (κάτι που εξασφαλίζει και μεγάλο ρυθμό παραγωγής) και το μίγμα των συμπυκνούμενων και μη αερίων οδηγείται προς ψύξη. Με την σχετικά χαμηλή θερμοκρασία ελαχιστοποιείται το αμιγώς αέριο κλάσμα προϊόντων ενώ με τον πολύ μικρό χρόνο παραμονής δεν υπάρχει αρκετός χρόνος για να υπάρξει πολυμερισμός και να σχηματιστεί απανθράκωμα. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται απόδοση σε υγρό προϊόν (βιο-πετρέλαιο) 70-75% με το υπόλοιπο σε πλειονότητα αέριο.

Για την πυρόλυση των πλαστικών (μειονότητα στην πρώτη ύλη των ΑΣΑ) ισχύει επίσης η αυξημένη τάση για την παραγωγή υγρού προϊόντος σε παραπλήσιες αναλογίες, για τις δεδομένες συνθήκες πυρόλυσης (40). Επομένως μια διεργασία αστραπιαίας πυρόλυσης στοχευμένη στην παραγωγή υγρού καύσιμου συμπυκνώματος από πρώτη ύλη βιομάζα – πλαστικά είναι μια εύστοχη και υποσχόμενη επιλογή.

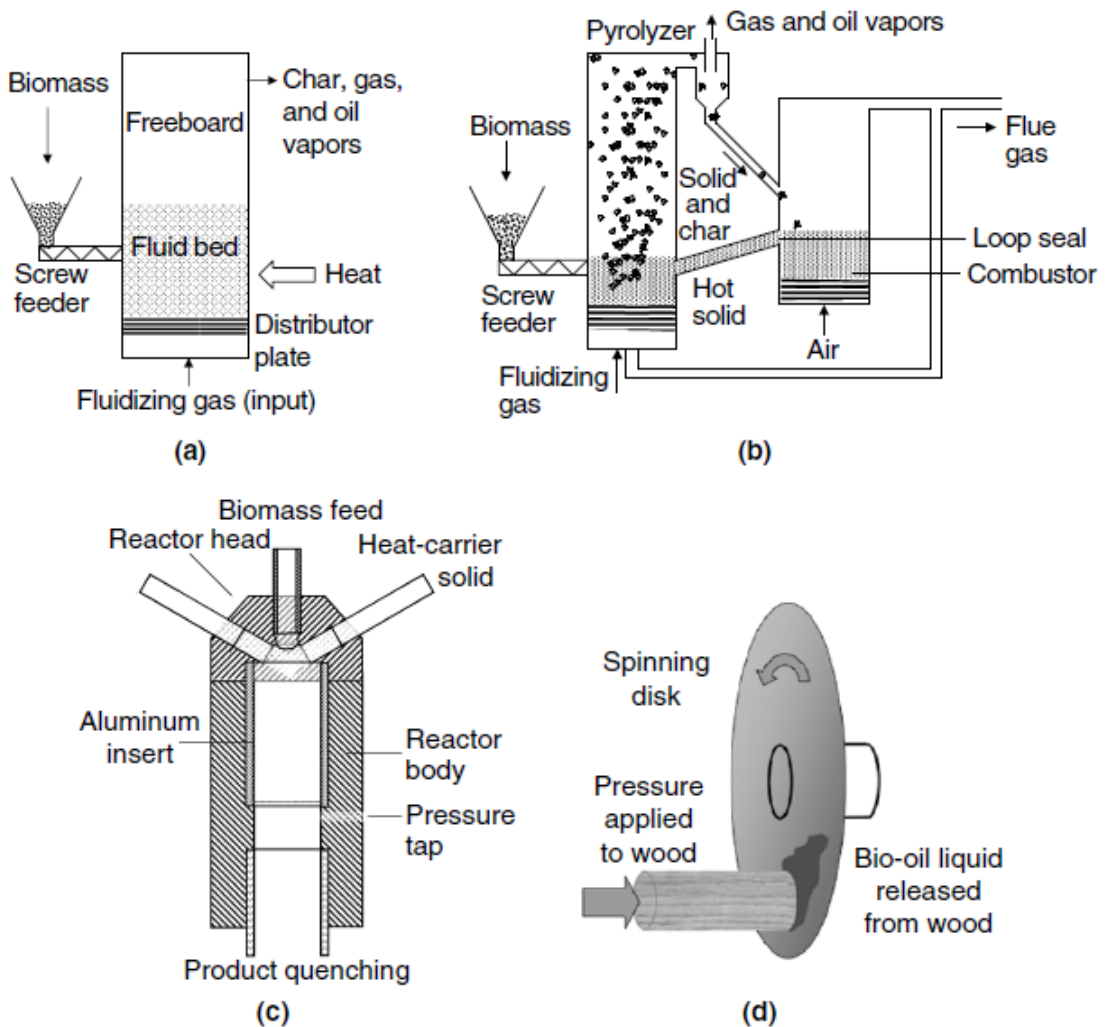
Τύποι αντιδραστήρων πυρόλυσης:

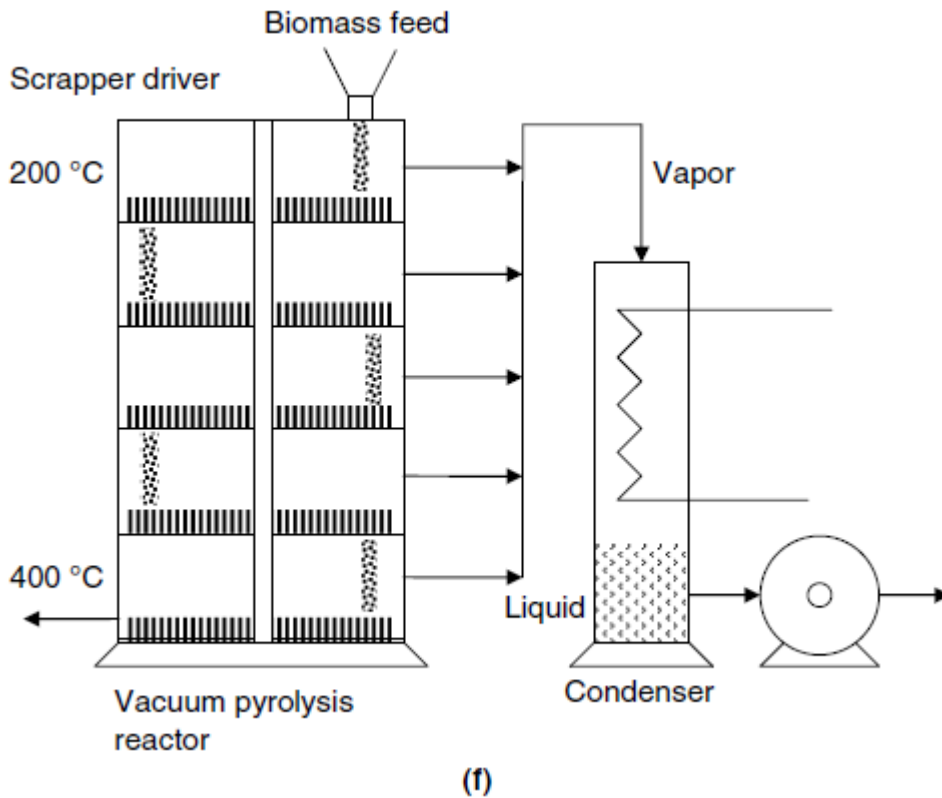
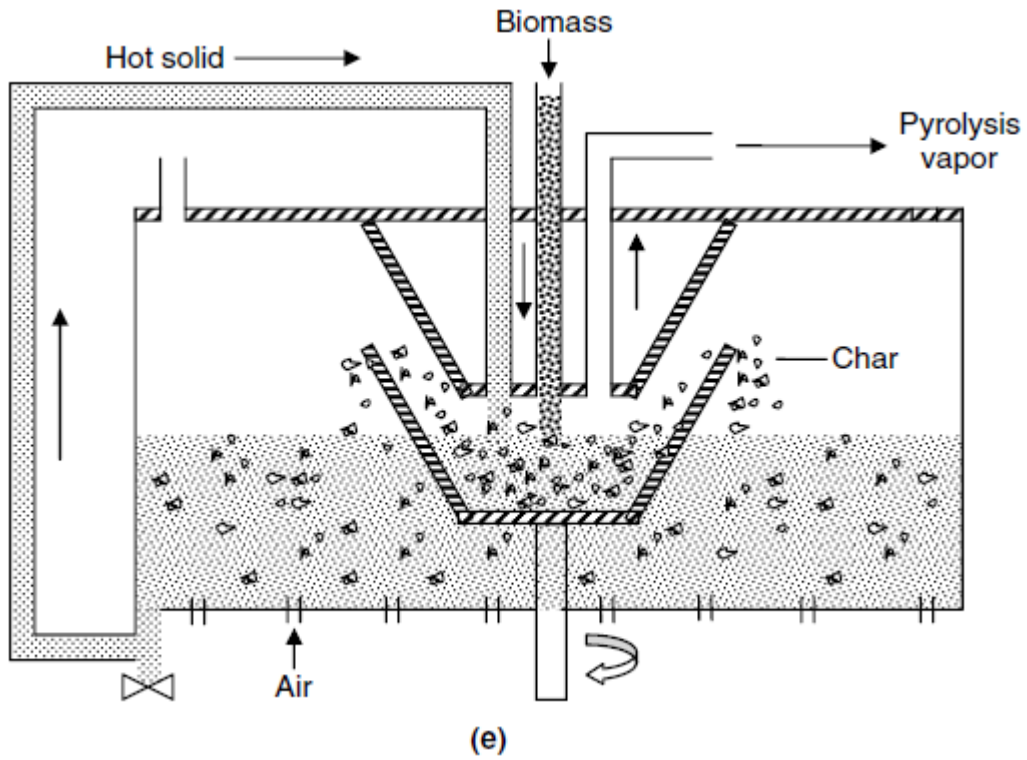
Όπως έχει αναφερθεί ανάλογα με την μεγιστοποίηση του επιθυμητού προϊόντος (στερεού, υγρού ή αερίου) πρέπει να επιλεχθούν και οι κατάλληλες συνθήκες οι οποίες ευνοούνται από διαφορετικούς τύπους αντιδραστήρων. Καθότι σημαντική παράμετρος στην πυρόλυση και την τελική σύσταση των προϊόντων είναι η θέρμανση (ρυθμός και τελική θερμοκρασία), η κυριότερη διαφοροποίηση των αντιδραστήρων έγκειται στον τρόπο μετάδοσης της θερμότητας από ένα θερμό μέσο στα σωματίδια της βιομάζας. Οι κυριότεροι εξ αυτών είναι:

- Σταθερής ή κινούμενης κλίνης (fixed or moving bed): λόγω της ογκώδους φύσης του συσσωματώματος της πρώτης ύλης ο ρυθμός θέρμανσης και η τελική θερμοκρασία είναι δεσμευτικοί παράγοντες με αποτέλεσμα την κατά κύριο λόγο παραγωγή στερεού προϊόντος
- Αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης (Bubbling fluidized bed): θρυμματισμένη βιομάζα (2-6mm) εισέρχεται σε κλίνη άμμου ή οποία θερμαίνεται και ρευστοποιείται από αδρανές θερμό αέριο ή καπναέρια. Απόδοση σε υγρό 70-75%
- Κυκλοφορούσας ρευστοποιημένης κλίνης (Circulating fluidized bed): παρόμοια με την αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη αλλά με μεγαλύτερο ρυθμό ροής

(αερίων ρεύματος ρευστοποίησης και συνεπώς τροφοδοσίας) με έντονη ανακυκλοφορία. Απόδοση σε υγρό έως 83%

- Υπερ-ταχείας πυρόλυσης (Ultra-rapid): θερμό ρεύμα αδρανούς αερίου, συνήθως και στερεού, (άζωτο με άμμο) βομβαρδίζει εισερχόμενο ρεύμα βιομάζας σε συνολικό χρόνο παραμονής 100-240 ms το οποίο ψύχεται απότομα κατά την έξοδο. Απόδοση σε υγρό έως 90%
- Περιστρεφόμενου κώνου (Rotating Cone): σωματίδια βιομάζας με περίσσεια θερμού στερεού αδρανούς (άμμος) τροφοδοτούνται σε περιστρεφόμενο θερμό κώνο. Λόγω φυγοκέντρου δύναμης έρχονται σε επαφή με τα θερμά τοιχώματα και πυρολύονται ενώ ταυτόχρονα προωθούνται προς την έξοδο. Δεν χρησιμοποιείται φέρων αέριο. Απόδοση σε υγρό 60-70 %
- Θερμοαπαγωγού (Ablative): συμπαγής βιομάζα (π.χ. κορμοί ξύλου) πιέζονται επί περιστρεφόμενου θερμού δίσκου οδηγώντας σε άμεση πυρόλυση στην διεπιφάνεια δίσκου-βιομάζας. Απόδοση σε υγρό έως 80%
- Κενού (Vacuum): η βιομάζα εισέρχεται στην κορυφή και κατέρχεται διαδοχικά σε όλο και θερμότερους δίσκους ενώ αντλία κενού απορροφά τα παραγόμενα αέρια και ατμούς. Απόδοση σε υγρό 35-50%





Διάφοροι τύποι πυρολυτικών αντιδραστήρων: a) αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης b) κυκλοφορούσας ρευστοποιημένης κλίνης c) υπερ-ταχείας πυρόλυσης d) θερμοαπαγωγού e) περιστρεφόμενου κώνου f) κενού (14)

Ενεργειακές απαιτήσεις διεργασίας:

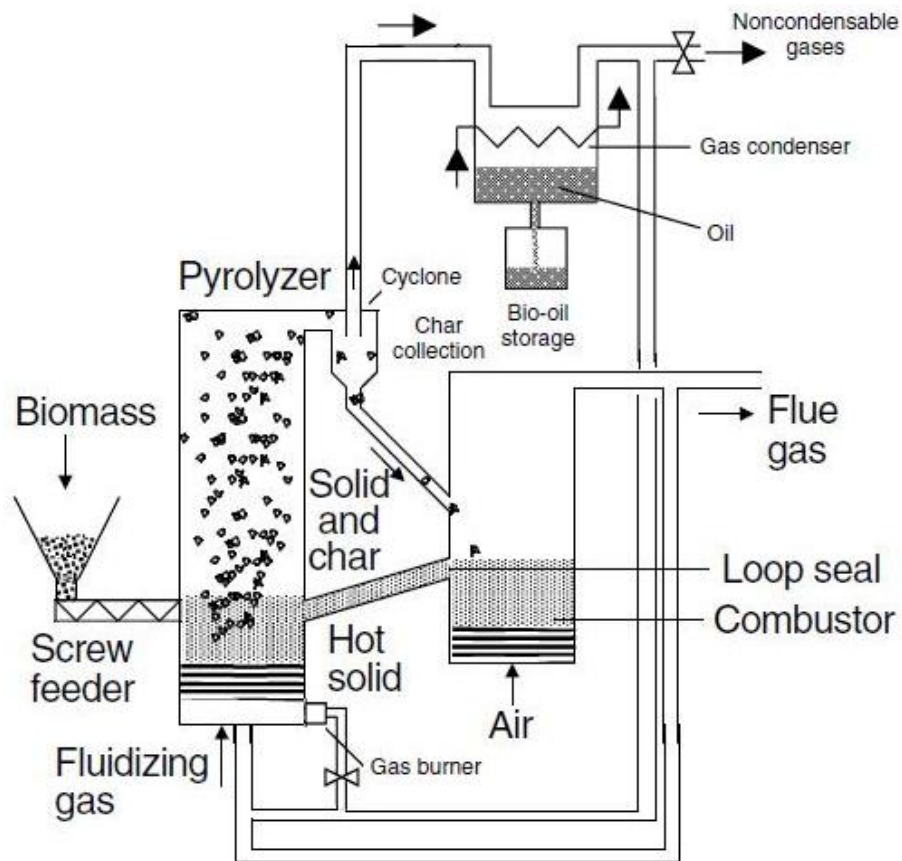
Όπως έχει αναφερθεί απαιτείται η θέρμανση του ρεύματος εισόδου σε υψηλές θερμοκρασίες για την πραγματοποίηση των πυρολυτικών αντιδράσεων. Επομένως είναι και απαραίτητη η αρχική προσφορά ενέργειας. Έπειτα κατά την πυρόλυση πραγματοποιούνται ποικίλες αντιδράσεις. Ορισμένες εξ' αυτών είναι εξώθερμες και άλλες ενδόθερμες. Λαμβάνοντας όλα αυτά υπ' όψιν σε ένα ενιαίο ισοζύγιο ενέργειας προκύπτει το ερώτημα εάν η πυρόλυση είναι τελικά μια ενεργειακά αυτόνομη διεργασία. Αυτό εξαρτάται τόσο από την ανάγκη για αρχική θέρμανση όσο και από την συνολική ενθαλπία των επιμέρους αντιδράσεων. Εμπειρικά προκύπτει ότι συνήθως δεν είναι «πρωτογενώς» αυτόνομη, δηλαδή η άμεσα παραγόμενη ενέργεια από τις εξώθερμες αντιδράσεις δεν αρκεί για την απαίτηση σε ενέργεια από την θέρμανση του ρεύματος εισόδου και τις ενδόθερμες αντιδράσεις. Αξιοποιώντας όμως την δυνατότητα ενεργειακής ολοκλήρωσης, όπως εναλλαγή θερμότητας μεταξύ επιμέρους ρευμάτων και καύση των παραγόμενων αέριων προϊόντων και του απανθρακώματος είναι δυνατή η πλήρης αυτονόμηση της. Αυτό είναι μια κρίσιμη παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν καθώς η βιωσιμότητα της διεργασίας μπορεί να εξαρτάται από αυτό.

Επιλογή διεργασίας:

Καθότι το ζητούμενο είναι η μεγιστοποίηση του υγρού προϊόντος και άρα θα χρησιμοποιηθεί η αστραπιαία πυρόλυση απαιτείται ένας τύπος αντιδραστήρα με υψηλή απόδοση σε υγρό τελικό προϊόν, καλή μεταφορά θερμότητας και μικρούς χρόνους παραμονής. Στα πλαίσια βελτιστοποίησης της διεργασίας και του ολοκληρωμένου σχεδιασμού πρέπει να περιληφθεί μία μέθοδος παραγωγής ενέργειας από τα μη εμπορικού ενδιαφέροντος προϊόντα της πυρόλυσης. Τέλος η τεχνολογία των ρευστοποιημένων κλινών παρουσιάζει μεγάλα πλεονεκτήματα και υπάρχει ήδη εκτενής εξοικείωση με την χρήση της σε διάφορους τομείς στην Ελλάδα. Έτσι λοιπόν καταλληλότερος τύπος αντιδραστήρα κρίνεται ο συνδυασμός της αναβράζουσας – κυκλοφορούσας ρευστοποιημένης κλίνης.

Συγκεκριμένα η τεμαχισμένη πρώτη ύλη (2-6 mm) εισέρχεται στον αντιδραστήρα. Το ανερχόμενο θερμό ρεύμα ρευστοαιώρησης πυρολύει τα σωματίδια και τα παρασύρει στην έξοδο. Μέσω κυκλώνων διαχωρίζονται η αέρια και η στερεή φάση. Η στερεή φάση (αδρανές, μερικώς αντιδράσουσα πρώτη ύλη και απανθράκωμα) οδηγείται σε καυστήρα για την παραγωγή θερμών καπναερίων (φέρων αέριο και μέσο θέρμανσης) και επανεισάγεται στον αντιδραστήρα. Η αέρια φάση ψύχεται για την συμπύκνωση και συλλογή του υγρού προϊόντος και τα μη συμπυκνούμενα αέρια οδηγούνται είτε προς καύση και συνδυάζονται με το ρεύμα των καπναερίων του καυστήρα είτε συνδυάζονται απευθείας με τα καπναέρια και επανεισάγονται στον αντιδραστήρα.

Ενδεικτικά:



Προτεινόμενος συνδυασμός αναβράζουσας και κυκλοφορούσας ρευστοποιημένης κλίνης με διατάξεις για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

Επιπρόσθετα στα προαναφερθέντα βασικά πλεονεκτήματα είναι και τα εξής:

- Ανακυκλοφορία των μερικώς αντιδρασάντων σωματιδίων πρώτης ύλης για περεταίρω πυρόλυση και αύξηση του επιθυμητού κλάσματος προϊόντων
- Απομάκρυνση του απανθρακώματος που επιδρά καταλυτικά στην συνέχιση της πυρόλυσης στα αέρια προϊόντα (secondary cracking) και άρα μείωση του τελικού υγρού κλάσματος
- Μεγάλη ευελιξία στον χειρισμό: η ύπαρξη πληθώρας ελεγχόμενων παραμέτρων όπως ρεύμα ανακύκλωσης αερίων, ρεύμα καύσης αερίων, ρεύμα απομάκρυνσης και επανεισόδου στερεών και απανθρακώματος, καύση απανθρακώματος επιτρέπουν τον ακριβή χειρισμό και την άμεση προσαρμογή σε οποιαδήποτε απαιτούμενη αλλαγή.
- Μεγάλη ευελιξία στην σύσταση προϊόντων: αυτός ο τύπος αντιδραστήρα δεν είναι απόλυτα δεσμευτικός ως προς τον συγκεκριμένο τύπο πυρόλυσης. Η τελική θερμοκρασία, ο ρυθμός αύξησης της και ο χρόνος παραμονής μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα σε περίπτωση όπου η ανάγκη για στερεό ή αέριο προϊόν αυξηθεί, ή ακόμη προτιμηθεί η μεταστροφή στην παραγωγή χημικών πρώτων υλών.
- Ευκολία στην επέκταση της μονάδας και αναπροσαρμογή σε υψηλότερες δυναμικότητες (scale up)

Αεριοποίηση (gas):

Αεριοποίηση, όπως υποδεικνύει και ο όρος, είναι η μετατροπή μίας στερεάς ή υγρής πρώτης ύλης σε μίγμα αερίων. Αυτό συνήθως είναι αέρια καύσιμα ή απλές χημικές ενώσεις, πρώτη ύλη για την χημική βιομηχανία. Έχει πολλά κοινά τόσο με την πυρόλυση όσο και με την καύση καθώς στην ουσία είναι κάτι «ενδιάμεσο» (τόσο η πυρόλυση όσο και η μερική καύση υπάρχουν μέσα στην διεργασία της αεριοποίησης) πράγμα που την διαφοροποιεί σημαντικά από τις δύο άλλες συγγενείς διεργασίες και την καθιστά μοναδική. Η ομοιότητα με την πυρόλυση είναι ότι μέσω θερμικής κατεργασίας παράγει αέρια από στερεή ή υγρή πρώτη ύλη. Διαφέρει όμως στο ότι η πρώτη ύλη δεν διασπάται απουσία αέρα αλλά οξειδώνεται μέσω ενός «αεριοποιητικού μέσου» (gasifying medium/agent). Με την καύση αντίστοιχα, πραγματοποιείται οξείδωση και στις δύο διεργασίες αλλά το τελικό προϊόν της τέλει καύσης είναι διοξείδιο του άνθρακα και νερό, δηλαδή καυσαέρια, και ενέργεια ενώ της αεριοποίησης είναι αέρια καύσιμα. Αντί να απελευθερώνει ενέργεια, την αποθηκεύει σε χημικούς δεσμούς μεταξύ των στοιχείων. Επίσης αυξάνει και την αναλογία υδρογόνου/άνθρακα του παραγόμενου αερίου (ή υγρού) κάτι που δεν συμβαίνει με την πυρόλυση.

Προϊόντα της αεριοποίησης – αεριοποιητικά μέσα:

Δεδομένου ότι η αεριοποίηση περιέχει το στάδιο της οξείδωσης των ενδιάμεσων προϊόντων, η τελική ποιοτική σύσταση του αερίου μίγματος είναι περιορισμένη σε μικρότερο εύρος απ' ό,τι στην πυρόλυση. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων το αέριο ρεύμα εξόδου αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από

- μονοξείδιο του άνθρακα CO
- υδρογόνο H₂
- μεθάνιο CH₄
- αιθένιο C₂H₄
- νερό H₂O
- διοξείδιο του άνθρακα CO₂

Η ακριβής σύσταση επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και η επιθυμητή σύσταση καθορίζει το είδος αεριοποιητικού μέσου που θα χρησιμοποιηθεί, τις συνθήκες αεριοποίησης και τον γενικότερο σχεδιασμό της διάταξης της διεργασίας. Για την παραγωγή αερίου καυσίμου επιδιώκεται η αύξηση του κλάσματος υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα στο τελικό προϊόν.

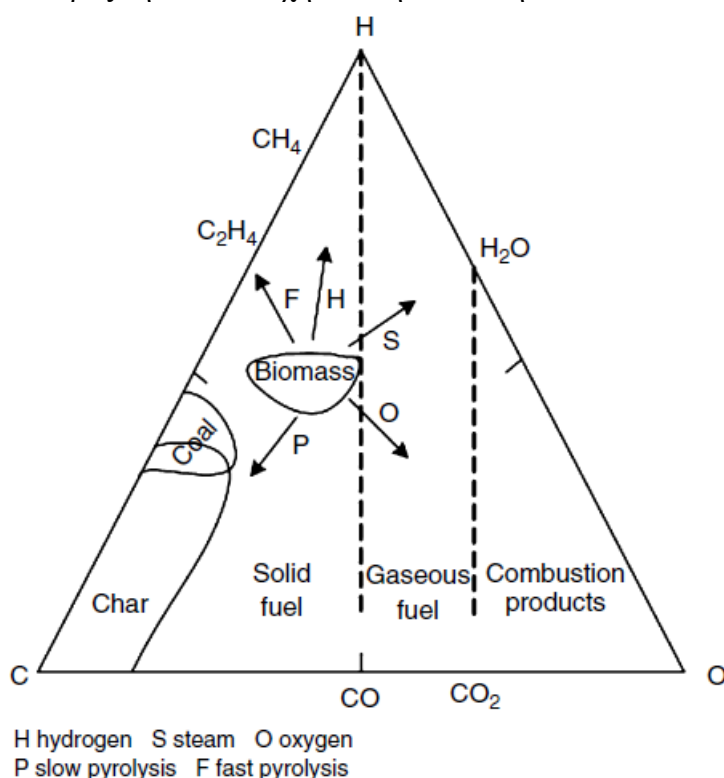
Σημαντικότερη επίδραση στο τελικό αέριο μίγμα έχει το αεριοποιητικό μέσο, το οποίο και επιτρέπει την οξείδωση της πρώτης ύλης. Τα βασικότερα είναι:

- οξυγόνο
- ατμός
- ατμοσφαιρικός αέρας

Η χρήση οξυγόνου ευνοεί την μερική καύση και η στοιχειομετρική αναλογία του οξυγόνου οδηγεί από την παραγωγή του CO ως την παραγωγή του CO₂. Σε απόλυτη στοιχειομετρία ή περίσσεια έχουμε πλήρη καύση και άρα το αέριο είναι σχεδόν καθαρό διοξείδιο με μηδενική αξία θέρμανσης. Το οξυγόνο μπορεί να είναι καθαρό ή να προέρχεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Στην δεύτερη περίπτωση το τελικό προϊόν είναι πλούσιο σε αδρανές άζωτο, λόγω του ατμοσφαιρικού αέρα, και άρα πολύ υποδεέστερο σε θερμογόνο δύναμη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αερίου με θερμογόνο δύναμη 4-7 MJ/Nm³ στην περίπτωση του αέρα ενώ 12-28 MJ/Nm³ στην περίπτωση του καθαρού οξυγόνου. Να σημειωθεί όμως ότι η προμήθεια του καθαρού οξυγόνου αυξάνει σημαντικά το κόστος της όλης διεργασίας.

Η χρήση ατμού είναι πιο οικονομική ενώ προσφέρει και υδρογόνο στο τελικό μίγμα με αποτέλεσμα να βελτιώνει την θερμογόνο δύναμη του προϊόντος. Η τελική θερμογόνος δύναμη σε αυτή την περίπτωση είναι 10-18 MJ/Nm³.

Πιο παραστατικά η επίδραση του αεριοποιητικού μέσου και του τρόπου πυρόλυσης στην τελική σύσταση φαίνονται παρακάτω όπου η μέση αρχική σύσταση της πρώτης ύλης «μετακινείται» ανάλογα με τις συνθήκες και την αναλογία του μέσου προς την αντίστοιχη τελική σύσταση:



Μεταβολή τελικής σύστασης αναλόγως αεριοποιητικού μέσου και τύπου πυρόλυσης (14)

Οδοί αεριοποίησης:

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η εισαγωγή της αντίδρασης οξείδωσης της πρώτης ύλης περιορίζει σε μεγάλο βαθμό το εύρος της τελικής ποιοτικής σύστασης του ρεύματος εξόδου. Κατά αυτόν τον τρόπο δεν υφίστανται διακριτές διαφορετικές κατηγορίες αεριοποίησης παρά μόνον μία βασική η οποία και διαφοροποιείται σε επιμέρους

σημεία αναλόγως των συγκεκριμένων συνθηκών όπου επιλέγονται. Παράλληλα όμως η χρήση του αεριοποιητικού μέσου εισάγει εκτενώς την έννοια της αντίδρασης στην διαδικασία. Έτσι λοιπόν το ενδιαφέρον εδώ επικεντρώνεται στην επίδραση του εκάστοτε μέσου στην εξέλιξη της διεργασίας και την τελική του επίπτωση στην σύσταση του προϊόντος. Ανεξάρτητα όμως από το μέσο η αεριοποίηση περιλαμβάνει τα παρακάτω βασικά στάδια:

- Προθέρμανση και ξήρανση
- Πυρόλυση
- Αεριοποίηση απανθρακώματος
- Μερική καύση (/οξειδωση)

Παρότι οι παραπάνω επιμέρους διεργασίες παρουσιάζονται ξεχωριστά, εμπράκτως δεν αποτελούν διακριτά στάδια στην διάταξη της αεριοποίησης. Πραγματοποιούνται διαδοχικά και πολλές φορές ταυτόχρονα, κατά κύριο λόγο, εντός του αντιδραστήρα. Η επιτυχής όμως ολοκλήρωση της κάθε μίας συμβάλει σημαντικά στην ποιότητα του τελικού προϊόντος ενώ αντίστοιχα η όποια και οσοδήποτε αποτυχία προκαλεί πληθώρα επιπλοκών που διακυβεύουν την αποδοτικότητα και βιωσιμότητα της μονάδας. Αναλυτικότερα:

Κατά την προκατεργασία και την ξήρανση, η πλειονότητα της υγρασίας της πρώτης ύλης απομακρύνεται. Αυτό είναι απαραίτητο καθώς η αεριοποίηση είναι μία θερμοχημική μέθοδος κατεργασίας και άρα η ενέργεια/θέρμανση είναι κρίσιμες παράμετροι. Η παρουσία του νερού δεσμεύει μεγάλο μέρος της προσφερόμενης στο σύστημα ενέργειας (2260 kJ για κάθε kg νερού) καθότι με την αύξηση της θερμοκρασίας το νερό απορροφά ενέργεια για να μεταβεί στην αέρια φάση. Η ενέργεια αυτή είναι μη ανακτήσιμη εάν το νερό δεν ψυχθεί κάτω από τους 100 C (σε ατμοσφαιρική πίεση) θερμοκρασία πολύ μικρή για τις παρούσες διεργασίες. Επομένως η οποιαδήποτε παρουσία νερού απλώς «αχρηστεύει» ενέργεια.

Έτσι λοιπόν είναι απαραίτητη η απομάκρυνση όσο το δυνατόν περισσότερου νερού από την πρώτη ύλη πριν την είσοδο της στον κυρίως αντιδραστήρα. Για την παραγωγή αερίου καυσίμου με ικανή θερμογόνο δύναμη είναι απαραίτητο το ρεύμα εισόδου στον αεριοποιητή να έχει μέγιστη υγρασία 10-20 % κ.β. Μετά την είσοδο του, τα θερμά αέρια εντός του αντιδραστήρα θερμαίνουν το υπόλοιπο νερό και από τους 100 C αρχίζει να απομακρύνεται αναντίστρεπτα. Ταυτόχρονα εξατμίζονται και οι μικρού μοριακού βάρους περιεχόμενες ενώσεις. Καθότι αυτές αποτελούν ωφέλιμο πρώτη ύλη είναι σημαντικό αυτό το στάδιο της διεργασίας να πραγματοποιηθεί εντός του αντιδραστήρα ακόμη και αν συνεπάγεται μικρή έκλυση υγρασίας. Ένα μικρό ποσοστό υγρασίας δεν επιβαρύνει την διαδικασία καθώς όπως έχει γίνει γνωστό το νερό αποτελεί μέσο αεριοποίησης αλλά πρέπει απαραίτητα να μην υπερβαίνει την κατάλληλη αναλογία. Το στάδιο αυτό συνεχίζει μέχρι τους 200 C.

Κατά την πυρόλυση, η προκατεργασμένη ξηρή πρώτη ύλη δεν έχει έρθει ακόμα εκτενώς σε επαφή με το αεριοποιητικό μέσο. Σε αυτό το στάδιο διασπάται σε απλούστερες οργανικές ενώσεις αλλά σχετικά μεγάλου μοριακού βάρους. Δοθέντος αρκετού χρόνου σχηματίζεται και στερεό απανθράκωμα. Το περιεχόμενο στις

οργανικές ενώσεις της πρώτης ύλης οξυγόνο, αντιδρά υπό αυτές τις συνθήκες (υποβοηθώντας και την σχάση των μακρομορίων) και απομακρύνεται, ελαττώνοντας έτσι την περιεκτικότητά του.

Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί εδώ στο ενδιάμεσο προϊόν των βαρύτερων οργανικών ενώσεων. Αυτό σε περιβαλλοντικές συνθήκες συμπυκνώνεται σε ένα μαύρο, ιξώδες και κολλώδες ρευστό, την πίσσα. Σε περίπτωση που η πίσσα δεν οξειδωθεί πλήρως κατά την αεριοποίηση και περάσει στο ρεύμα εξόδου, κατά την ψύξη του δημιουργεί επικαθίσεις σε όλο τον εξοπλισμό που παρακωλύουν την διαδικασία, εμποδίζουν την λειτουργία και μειώνουν την συνολική αποδοτικότητα της μονάδας. Η παραγωγή της πίσσας δημιουργεί μεγάλα πρακτικά προβλήματα σε όλες τις υπάρχουσες μονάδες αεριοποίησης και γίνεται στοχευμένος αρχικός σχεδιασμός μαζί με λήψη επιπρόσθετων μέτρων για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού. Αυτό θα αποτελέσει βασικό κριτήριο και εδώ στην συνέχεια, κατά την επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού και λειτουργίας, προκειμένου να αποφευχθεί.

Στην συνέχεια στον αντιδραστήρα αρχίζει η διεξαγωγή της αεριοποίησης, δηλαδή της αντίδρασης του αεριοποιητικού μέσου με το μίγμα των οργανικών ενώσεων και το απανθράκωμα. Καθότι οι οργανικές ενώσεις και το μέσο είναι σε αέρια φάση, η οξείδωση-αεριοποίηση αυτών είναι μία ομογενής αντίδραση. Ως ομογενής αντίδραση διεξάγεται με ευχέρεια οδηγώντας στην παραγωγή κυρίως CH₄, CO, CO₂, H₂, H₂O.

Μεγαλύτερης σημασίας είναι η αεριοποίηση του απανθρακώματος. Αυτή είναι μία ετερογενής αντίδραση καθώς το απανθράκωμα είναι σε στερεή φάση και η αντιδράσεις του με το αέριο μέσο ενέχουν πολυπλοκότητες. Επίσης το απανθράκωμα από βιομάζα διαφέρει από τα υπόλοιπα κοινά απανθρακώματα (π.χ. κωκ). Είναι περισσότερο πορώδες (40-50%), με μεγαλύτερους πόρους (20-30 μm) και η δραστηριότητα του αυξάνει με τον χρόνο αντίδρασης. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην σύστασή του. Το απανθράκωμα βιομάζας δεν περιέχει μόνο άνθρακα όπως αυτό των ορυκτών ανθράκων αλλά σε σημαντικά ποσοστά και υδρογόνο και οξυγόνο αλλά και ανόργανα αλκάλια που δρουν ως καταλύτες σε πολλές αντιδράσεις. Αυτή η ειδική συμπεριφορά του πρέπει σαφώς να ληφθεί υπ' όψιν στον εν συνεχεία σχεδιασμό.

Για την παραγωγή ενός ενεργειακά πλούσιου αερίου μίγματος είναι σημαντικό να υπάρχει γνώση και κατανόηση των αντιδράσεων και της βασικής κινητικής τους, ούτως ώστε οι συνθήκες στον αντιδραστήρα να ρυθμίζονται ανάλογα προκειμένου να ευνοούν αυτές τις οποίες αποθηκεύουν την περισσότερη ενέργεια στους χημικούς δεσμούς των προϊόντων. Οι κυριότερες εξ αυτών είναι:

TABLE 5.2 Typical Gasification Reactions at 25 °C

Reaction Type	Reaction
Carbon Reactions	
R1 (Boudouard)	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 172 \text{ kJ/mol}^1$
R2 (water-gas or steam)	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 + 131 \text{ kJ/mol}^2$
R3 (hydrogasification)	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 - 74.8 \text{ kJ/mol}^2$
R4	$C + 0.5 O_2 \rightarrow CO - 111 \text{ kJ/mol}^1$
Oxidation Reactions	
R5	$C + O_2 \rightarrow CO_2 - 394 \text{ kJ/mol}^2$
R6	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2 - 284 \text{ kJ/mol}^4$
R7	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O - 803 \text{ kJ/mol}^3$
R8	$H_2 + 0.5 O_2 \rightarrow H_2O - 242 \text{ kJ/mol}^4$
Shift Reaction	
R9	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 - 41.2 \text{ kJ/mol}^4$
Methanation Reactions	
R10	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2 - 247 \text{ kJ/mol}^4$
R11	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O - 206 \text{ kJ/mol}^4$
R14	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O - 165 \text{ kJ/mol}^2$
Steam-Reforming Reactions	
R12	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 + 206 \text{ kJ/mol}^3$
R13	$CH_4 + 0.5 O_2 \rightarrow CO + 2H_2 - 36 \text{ kJ/mol}^3$

¹Source: Higman and van der Burgt, 2008, p. 12.

²Source: Klass, 1998, p. 276.

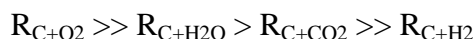
³Source: Higman and van der Burgt, 2008, p. 3.

⁴Source: Knoef, 2005, p. 15.

Οι βασικότερες αντιδράσεις αεριοποίησης (14)

Εύκολα παρατηρεί κανείς ότι υπάρχουν ορισμένες ενδόθερμες αντιδράσεις (R1, R2, R12) οι οποίες μετατρέπουν καυσαέρια (CO₂, H₂O) σε καύσιμες ύλες (CO, H₂). Προφανώς και αυτές οι αντιδράσεις οδηγούν σε ένα ανώτερο ενεργειακά τελικό προϊόν και άρα μέριμνα πρέπει να δοθεί στην προώθηση της διεξαγωγής τους.

Ο ρυθμός της αεριοποίησης του απανθρακώματος εξαρτάται πρωτίστως από την δραστηριότητα του και το «δυναμικό» αντίδρασης του μέσου αεριοποίησης. Το οξυγόνο είναι το πιο ενεργό ακολουθούμενο από τον ατμό και έπειτα το διοξείδιο του άνθρακα. Η καύση του άνθρακα με οξυγόνο είναι η ταχύτερη αντίδραση και καταναλώνει άμεσα την πλειονότητα του οξυγόνου, μην αφήνοντας υπόλοιπο για να συμμετέχει σε άλλες αντιδράσεις. Ο ατμός στην ίδια θέση έχει 3-5 φορές πιο αργή αντίδραση ενώ το διοξείδιο του άνθρακα 6-7 φορές πιο αργό. Τέλος η αντίδραση του άνθρακα με υδρογόνο είναι η βραδύτερη όλων. Συμβολικά οι ρυθμοί των παραπάνω αντιδράσεων μπορούν να διαταχθούν ως:



Σημαντικό είναι να αναλυθούν επιμέρους λεπτομέρειες για ορισμένες, εκ των βασικότερων, αντιδράσεις αεριοποίησης:

- Η αντίδραση Boudouard είναι μία αντίδραση σε στάδια, ένα εκ των οποίων αποτελεί ισορροπία. Έτσι λοιπόν προκύπτει ότι ο ρυθμός αεριοποίησης μέσω CO₂ είναι αμελητέος κάτω από τους 1000 K.
- Η αντίδραση water-gas αποτελεί, ίσως, την βασικότερη αντίδραση αεριοποίησης. Και αυτή είναι σύνθετη αντίδραση, με αμφίδρομα στάδια και εξαιρετικά ευαίσθητη στην μερική πίεση του υδρογόνου. Περικεκτικότητα αντιδρώντος μίγματος σε υδρογόνο 30% μπορεί να μειώσει τον ρυθμό έως και 15 φορές και άρα μέγιστη μέριμνα πρέπει να δοθεί στην συνεχή απομάκρυνση του παραγόμενου H₂ από τον χώρο διεξαγωγής της αντίδρασης.
- Η αντίδραση water-gas shift παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην διαδικασία της αεριοποίησης καθώς καταναλώνοντας μονοξείδιο και παράγοντας υδρογόνο μπορεί εύκολα να ρυθμίσει την αναλογία τους, σημαντική παράμετρο στην παραγωγή syngas. Είναι επίσης αμφίδρομη αλλά επηρεάζεται περισσότερο από την θερμοκρασία και λιγότερο από την μερική πίεση αντιδρώντων / προϊόντων. Σε υψηλές θερμοκρασίες (1000 K) φτάνει γρήγορα σε ισορροπία αλλά σε χαμηλότερες απαιτείται κατάλυση για την επίτευξη ικανοποιητικού ρυθμού (χαλκού στους 300-510 C, χαλκού-ψευδαργύρου-αλούμινας στους 180-270 C).

Η καύση του άνθρακα με οξυγόνο προς μονοξείδιο και διοξείδιο είναι η βασικότερη που προσφέρει ενέργεια στην διεργασία, απαιτούμενη κυρίως για την προθέρμανση-ξήρανση και τις αντιδράσεις πυρόλυσης. Εντονότερη είναι η πλήρης καύση ενώ η μερική προσφέρει λιγότερη ενέργεια και είναι σαφώς πιο αργή. Μέσω μοντελοποίησης προκύπτει ότι η αναλογία των παραγόμενων καυσαερίων CO/CO₂ αυξάνεται (σύμφωνα με σχέση τύπου Arrhenius) ανάλογα με την επιφανειακή θερμοκρασία του απανθρακώματος. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στις αντιδράσεις καύσης καθώς ευνοούνται έναντι των αντιδράσεων αεριοποίησης στις ίδιες συνθήκες. Μπορούν να έχουν ρυθμούς έως και μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερους και ευνοούνται περαιτέρω με την μείωση του μεγέθους των σωματιδίων απανθρακώματος (και άρα ελάττωση της διάχυσης μέσα στους πόρους).

Για τους παραπάνω λόγους η σχετική ποσότητα πρώτης ύλης και οξειδωτικού-αεριοποιητικού μέσου πρέπει να είναι προσεκτικά επιλεγμένη καθώς για πλειονότητα μέσου, οι καύσεις εντείνονται, η θερμοκρασία αυξάνει και συνολικά ευνοείται η παραγωγή CO₂ το οποίο αραιώνει την σύσταση και άρα την θερμογόνο δύναμη του τελικού αερίου μίγματος.

Τέλος, αν και δεν είναι απαραίτητη, πολλές φορές προτιμάται η χρήση καταλυτών. Πέρα από την αναγκαιότητα της για την διεξαγωγή ορισμένων από τις παραπάνω αντιδράσεις αεριοποίησης, η χρήση καταλυτών παρουσιάζει δύο ακόμη σημαντικά πλεονεκτήματα:

- Διάσπαση της πίσσας στο ρεύμα εξόδου των αερίων προϊόντων

- Μετατροπή του μεθανίου σε μίγμα CO/H₂ (ιδιαίτερα χρήσιμο όταν στόχος είναι η παραγωγή syngas)

Καθότι εδώ η διάσπαση του μεθανίου δεν είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος (το παραγόμενο αέριο προορίζεται για καύσιμο) η προσοχή επικεντρώνεται στην διάσπαση της παραγόμενης πίσσας σε επιθυμητά αέρια προϊόντα. Όπως σε κάθε διεργασία που περιλαμβάνει κατάλυση έτσι και εδώ υπάρχουν ορισμένες απαιτήσεις για τον καταλύτη. Θα πρέπει να είναι αποδοτικός, να αντιστέκεται στην απενεργοποίηση από ρύπανση του άνθρακα και να μην συντήκεται στις συνθήκες λειτουργίας, να αναγεννάται εύκολα, να είναι ανθεκτικός στην τριβή και με μικρό κόστος αγοράς. Η δράση του μπορεί να είναι είτε *in situ*, στον αντιδραστήρα, είτε σε μεταγενέστερο στάδιο της διεργασίας. Αυτό εξαρτάται από την συμπεριφορά του καταλύτη στις συνθήκες αεριοποίησης ή εάν αλλιώς απαιτεί διαφορετικές για την δική του αποδοτική λειτουργία. Για την κατάλυση των αντιδράσεων της βιομάζας οι καταλύτες χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

Αλκαλικές γαίες: αποδοτικότερος είναι ο δολομίτης (CaCO₃.MgCO₃), όσον αφορά την διάσπαση της πίσσας ενώ δεν έχει καμία επίδραση στο μεθάνιο. Είναι εξαιρετικά φθηνός και άρα αναλώσιμος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο *in situ* όσο και σε μεταγενέστερη επεξεργασία. Ο ασβεστοποιημένος δολομίτης είναι ακόμα αποδοτικότερος και η αναμόρφωση της πίσσας με CO₂ είναι ταχύτερη απ' ό,τι με τον ατμό.

Αλκάλια: το ανθρακικό νάτριο και κάλιο μπορεί να δράσει καταλυτικά και στην μετατροπή του μεθανίου, με το κάλιο να είναι πιο δραστικό. Το κάλιο υπάρχει φυσικά σε σημαντική ποσότητα στην βιομάζα και στις συνθήκες αεριοποίησης μετατρέπεται σε καταλυτικό K₂CO₃. Στον αντίποδα όμως, σε συνθήκες ρευστοποιημένης κλίνης συσσωματώνεται, κάτι που μειώνει δραματικά την αποδοτικότητα του.

Νικελιούχες ενώσεις: είναι εξαιρετικά δραστική κατηγορία καταλυτών για την διάσπαση και της πίσσας και του μεθανίου. Επίσης είναι σχετικά οικονομικός, αλλά όχι όσο ο δολομίτης. Ως μειονέκτημα, παρουσιάζει έντονη απενεργοποίηση από εναποθέσεις άνθρακα.

Επιλογή καταλληλότερης οδού αεριοποίησης:

Όπως αναφέρθηκε υπάρχει μία βασική οδός αεριοποίησης αλλά αυτή διαφοροποιείται σημαντικά από το μέσο αεριοποίησης και την ενδεχόμενη επιλογή καταλύτη. Από τα υπάρχοντα μέσα καταλληλότερο κρίνεται ο ατμός. Η χρήση του αέρα οδηγεί σε σαφώς υποβαθμισμένο ενεργειακό προϊόν, λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε αδρανές άζωτο. Παράλληλα, παρότι το καθαρό οξυγόνο δίνει το ανώτερο, ενεργειακά, προϊόν το κόστος αγοράς/παραγωγής του είναι πολύ υψηλότερο από αυτό του ατμού, το κόστος εξοπλισμού είναι υψηλότερο για την διαχείριση του και ενέχει δυσκολίες στον χειρισμό του καθώς αποθηκεύεται υπό πίεση και είναι πολύ επικίνδυνο σε περίπτωση ατυχήματος, ειδικά σε πυρκαγιές. Ο ατμός είναι

κατάφορα η ορθότερη επιλογή από συνολικής σκοπιάς οικονομίας, απόδοσης και ευκολίας στον χειρισμό.

Όσον αφορά την χρήση των καταλυτών, η πίσσα αποτελεί μείζον πρακτικό πρόβλημα στις μονάδες αεριοποίησης και η αντιμετώπιση της είναι προτεραιότητα. Η χρήση του δολομιτικού καταλύτη είναι μία ικανοποιητική επιλογή από άποψη κόστους και αποδοτικότητας, ενώ η αδράνεια του όσον αφορά την μετατροπή του μεθανίου δεν αποτελεί εδώ πρόβλημα. Επίσης η προτίμηση του στην χρήση του CO₂ ως μέσου αναμόρφωσης της πίσσας, εξασφαλίζει ελαχιστοποίηση της (ήδη μειωμένης λόγω χρήσης ατμού ως μέσου) παρουσίας του καυσαερίου αυτού στο τελικό προϊόν και άρα ανώτερη τελική ενεργειακή αξία.

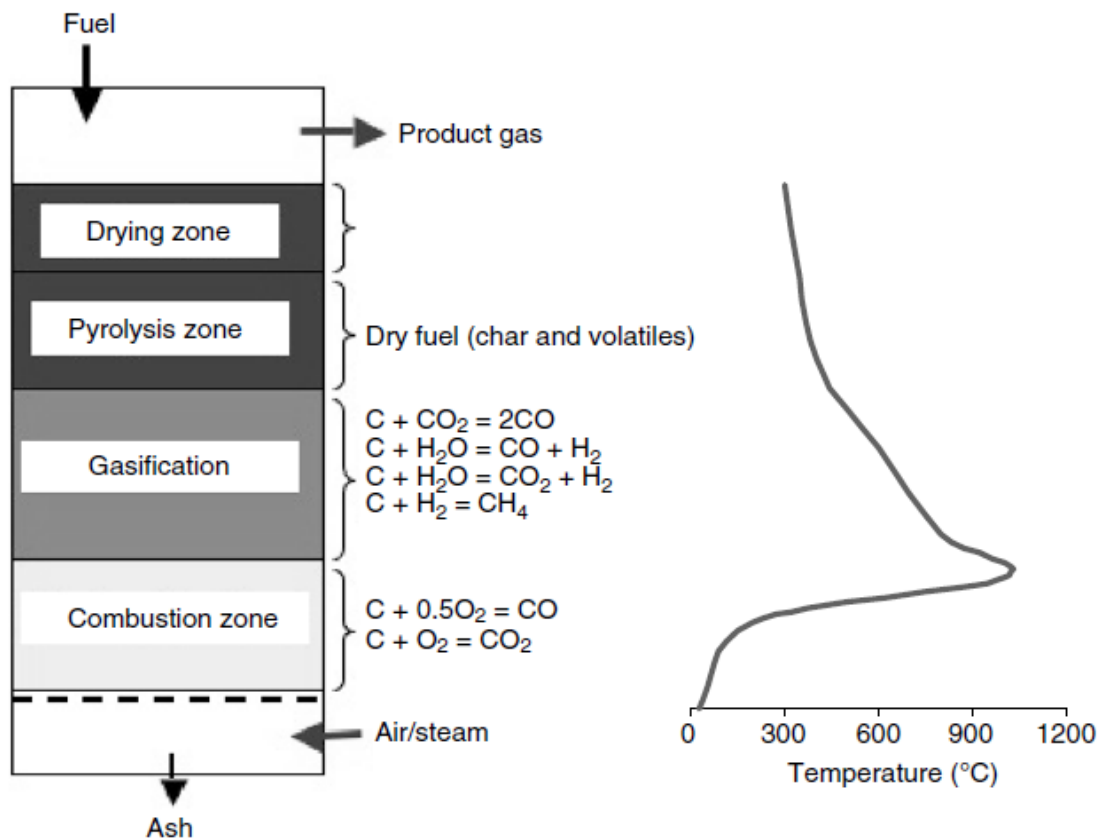
Τύποι αντιδραστήρων αεριοποίησης:

Η διαδοχή των σταδίων-αντιδράσεων αεριοποίησης και κατά συνέπεια και το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται σε ορισμένο βαθμό και από τον τύπο αντιδραστήρων επαφής στερεού-αερίου που χρησιμοποιείται. Ακολουθούν οι βασικότεροι τύποι:

Αντιδραστήρες κινούμενης κλίνης (moving bed reactors): εδώ η πρώτη ύλη εισέρχεται από την κορυφή και πέφτοντας, μέχρι να φτάσει στον πυθμένα του αντιδραστήρα, αεριοποιείται σε τέφρα και αέριο προϊόν. Υπάρχουν δύο βασικές διαφοροποιήσεις όσον αφορά την κατεύθυνση ροής του αεριοποιητικού μέσου.

Η πρώτη υποκατηγορία είναι οι αντιδραστήρες ανοδικής ροής (updraft gasifier) όπου το αεριοποιητικό μέσο εισέρχεται από τον πυθμένα, κινείται κατά αντηροή με την εισερχόμενη από την κορυφή βιομάζα και το παραγόμενο αέριο προϊόν εξέρχεται από την κορυφή. Αυτό επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο που διεξάγονται οι αντιδράσεις. Καθώς το ελαφρά προθερμασμένο μέσο, πλούσιο σε οξυγόνο (/γενικότερα οξειδωτικό μέσο), εισέρχεται από τον πυθμένα συναντά τέφρα και υπολείμματα απανθρακώματος και αντιδρά αρχικά σε πλήρη καύση και μετά την εξάντληση της πλειονότητας του οξειδωτικού σε μερική. Έτσι απελευθερώνεται ενέργεια και θερμαίνεται το ανερχόμενο αέριο ρεύμα. Το ρεύμα που εξέρχεται από την ζώνη καύσης είναι θερμό και πλούσιο σε CO₂, CO και H₂O. Ερχόμενο σε επαφή με το απανθράκωμα πραγματοποιείται η αεριοποίηση του επιφέροντας και μεγάλη μείωση στην συγκέντρωση του CO₂, ενώ ταυτόχρονα παράγεται και η πλειονότητα των προϊόντων της αεριοποίησης (CO, H₂, CH₄). Η απαιτούμενη ενέργεια αντλείται από την υψηλή θερμοκρασία του ανοδικού ρεύματος και έτσι το ρεύμα ψύχεται ελαφρώς. Συνεχίζοντας την ανοδική του πορεία συναντά την ζώνη πυρόλυσης, όπου εδώ η ξηρή πρώτη ύλη έρχεται σε επαφή με το θερμό ρεύμα αερίων, που όμως δεν έχει οξειδωτική δράση πλέον καθώς το μέσο έχει ήδη αντιδράσει και έτσι αποτελείται κυρίως από αέρια προϊόντα. Η ξηρή βιομάζα επομένως απλώς πυρολύεται υπό την επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας και μετατρέπεται σε αέρια προϊόντα (συμπυκνώσιμα και μη) και απανθράκωμα. Οι ενδόθερμες αντιδράσεις της πυρόλυσης ψύχουν περαιτέρω το ανοδικό αέριο ρεύμα. Φτάνοντας πλέον στην κορυφή του αντιδραστήρα, στην είσοδο της «φρέσκιας» βιομάζας, η θερμοκρασία του ρεύματος αναγκάζει την περιεχόμενη υγρασία να εξατμιστεί και να απομακρυνθεί, αφήνοντας έτσι ξηρή πρώτη ύλη να εισέλθει στον χώρο αντιδράσεων

του αντιδραστήρα. Η εξάτμιση του νερού εδώ προκαλεί σημαντική ψύξη ανάλογη με την αρχική υγρασία της πρώτης ύλης. Το ρεύμα πλέον έχει φτάσει στην έξοδο της κορυφής του αντιδραστήρα ανοδικού ρεύματος, είναι σχετικά ψυχρό και περιέχει αέρια προϊόντα αεριοποίησης και πυρόλυσης. Η διεργασία σχηματικά καθώς και το προφίλ θερμοκρασιών φαίνεται παρακάτω:

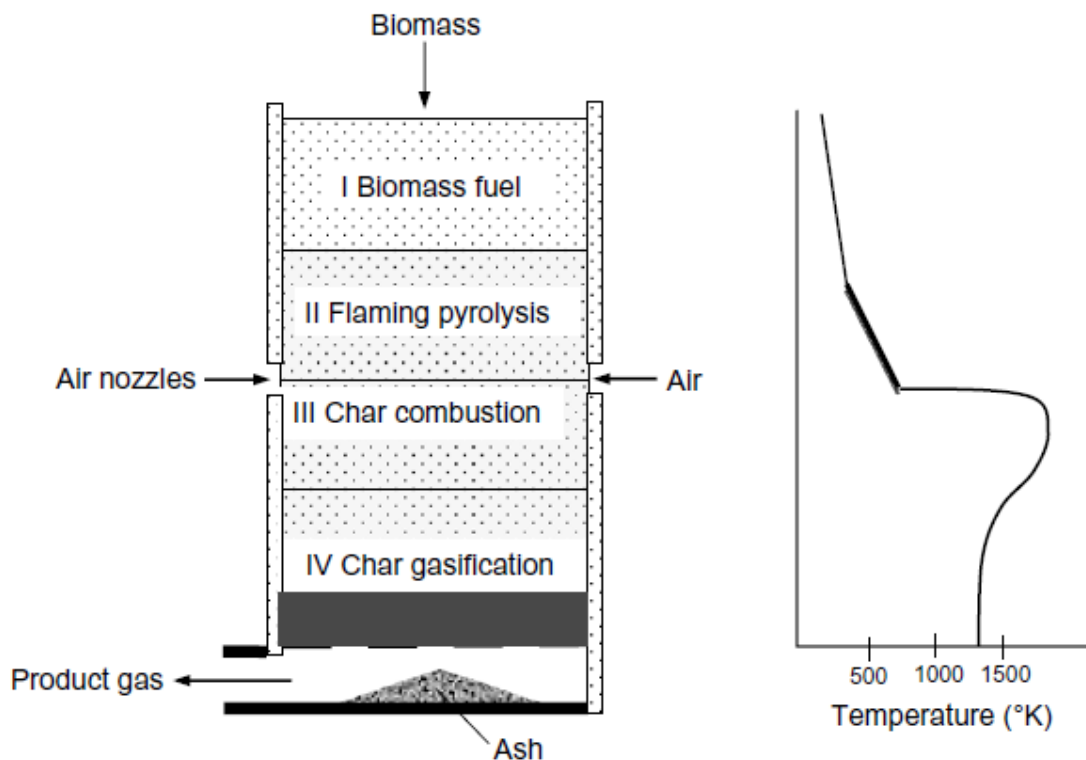


Τα στάδια, τα ρεύματα και οι θερμοκρασίες στον αντιδρ. ανοδικής ροής (14)

Η διεργασία αυτή χαρακτηρίζεται από ψυχρό αέριο προϊόν, με ποικιλία συστατικών (προϊόντα αεριοποίησης και πυρόλυσης) τα οποία όμως έχουν σημαντική θερμογόνο δύναμη. Το βασικό μειονέκτημα είναι η περιεκτικότητα σε συμπυκνώσιμα αέρια, τα οποία κατά την ψύξη τους σχηματίζουν πίσσα και προκαλούν τις αντίστοιχες ανεπιθύμητες συνέπειες της παρουσίας της πίσσας.

Η δεύτερη υποκατηγορία είναι οι αντιδραστήρες καθοδικής ροής (downdraft gasifier). Εδώ ενώ η πρώτη ύλη εισέρχεται από την κορυφή, το αεριοποιητικό μέσο εισέρχεται όχι από τον πυθμένα αλλά από ένα χαμηλό σημείο του αντιδραστήρα. Από το σημείο εκείνο και έπειτα, στερεά και αέριο ρεύμα ρέουν κατά ομορροή προς τον πυθμένα και την έξοδο του αντιδραστήρα. Κατά την είσοδο της στον θερμό αντιδραστήρα η πρώτη ύλη ξηραίνεται και πυρολύεται. Στο σημείο εισόδου του μέσου τα θερμά προϊόντα της πυρόλυσης έρχονται σε επαφή με το οξειδωτικό μέσο και αναφλέγονται. Οδεύοντας προς τον πυθμένα μέρος τους καίγεται και τα θερμά καυσαέρια συναντούν τα σωματίδια του απανθρακώματος όπου και πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις της αεριοποίησης. Τέφρα και αέριο προϊόν

απομακρύνονται από τον πυθμένα. Σχηματικά και μαζί με το προφίλ των θερμοκρασιών παρουσιάζεται παρακάτω:



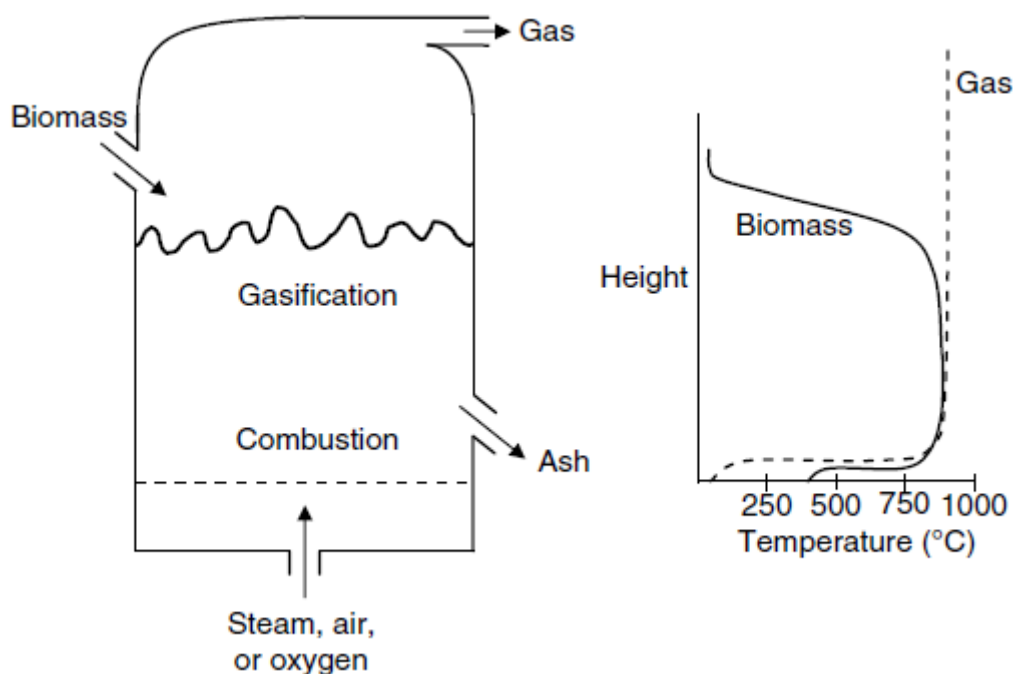
Τα στάδια, ρεύματα και θερμοκρασίες στον αντιδρ. καθοδικής ροής (14)

Εδώ το εξερχόμενο ρεύμα είναι θερμό, απαιτεί διαχωρισμό της τέφρας από το αέριο και έχει συστατικά με υποβιβασμένη θερμική ισχύ. Παρόλα αυτά προτιμάται γιατί τα προϊόντα της πυρόλυσης περνώντας από την εξαιρετικά θερμή ζώνη της αεριοποίησης εξασφαλίζουν την διάσπαση της πίσσας και άρα εκμηδενίζεται η παρουσία της, ενώ η υψηλή θερμοκρασία δεν επιτρέπει την υγροποίηση της.

Αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed): Εδώ η πρώτη ύλη εισάγεται σε (αναβράζουσα) ρευστοποιημένη κλίνη όπου γρήγορα αποκτά την θερμοκρασία της κλίνης και υπόκειται σε αντιδράσεις πυρόλυσης και αεριοποίησης. Το αεριοποιητικό μέσο αποτελεί και το μέσο ρευστοαιώρησης οπότε και εισέρχεται από τον πυθμένα. Τα στερεά συστατικά της κλίνης τελούν υπό συνεχή ανάδευση λόγω της αναβράζουσας φύσης της κλίνης διαχέοντας έτσι γρήγορα την παραγόμενη θερμότητα από την καύση του απανθρακώματος σε όλη την μάζα της κλίνης. Το αέριο ρεύμα αντίθετα ακολουθεί μοντέλο εμβολικής ροής. Στην είσοδό του στον πυθμένα πραγματοποιεί καύση του απανθρακώματος θερμαίνοντας έτσι όλη την κλίνη και το ίδιο. Καθώς ανέρχεται πλούσιο σε CO₂ πραγματοποιεί τις αεριοποιητικές αντιδράσεις. Έχοντας εξαντλήσει την οξειδωτική του ικανότητα, στα ανώτερα στρώματα προκαλεί απλώς πυρόλυση της πρώτης ύλης. Βασικό μειονέκτημα είναι η αδυναμία διάχυσης των αερίων από την ανερχόμενη φυσαλίδα στο αιώρημα των στερεών. Έτσι λοιπόν παρουσιάζεται δυσχέρεια στην διεξαγωγή των αεριοποιητικών αντιδράσεων και στην πυρόλυση των βαρύτερων οργανικών ενώσεων. Καθώς αυτές δεν έρχονται σε εκτενή επαφή με τα θερμά στερεά, δεν πυρολύονται περεταίρω σε μη συμπυκνώσιμα αέρια και έτσι σχηματίζεται πίσσα και

απανθράκωμα κατά την έξοδο. Ακόμη, η συνεχής ανάδευση του απανθρακώματος στην κλίνη δεν επιτρέπει την πλήρη μετατροπή του, ενώ και μέρος του απανθρακώματος απομακρύνεται συμπαρασυρόμενο από το ανοδικό ρεύμα αερίων. Όλα αυτά μειώνουν την αποδοτικότητα της διεργασίας σε ωφέλιμο προϊόν.

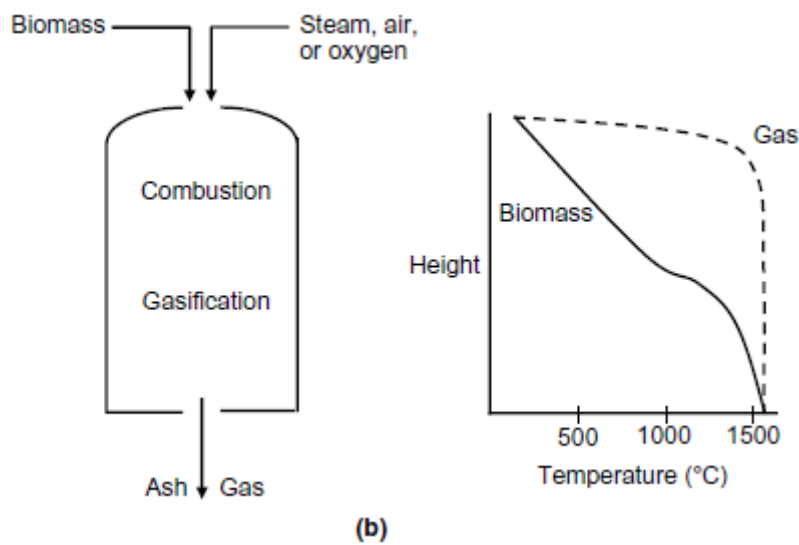
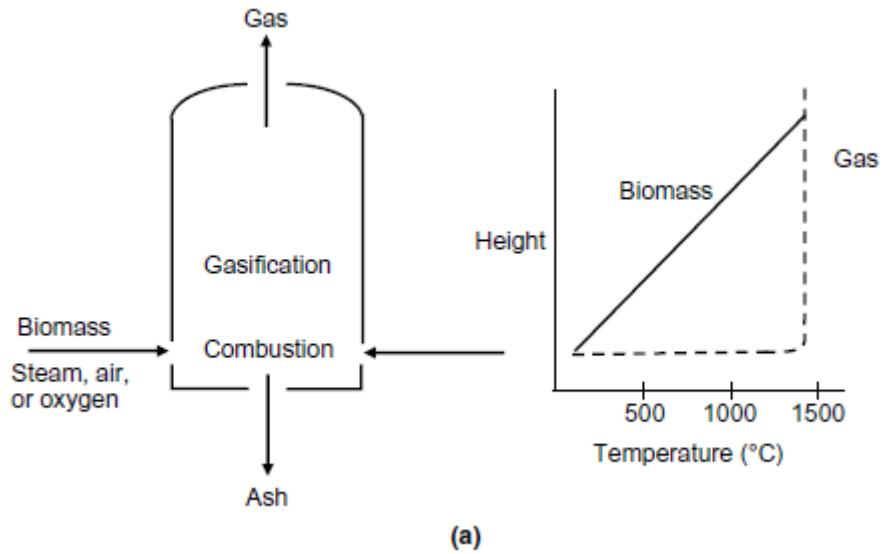
Η προσθήκη ενός ρεύματος ανακυκλοφορίας των στερεών που συμπαρασύρονται στη έξοδο οδηγεί στην δημιουργία του αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία (circulating fluidized bed, CFB). Εδώ δεν υφίσταται η ύπαρξη φυσαλίδων στην κλίνη, και άρα τα προβλήματα μειωμένης διάχυσης και ελαττωμένης αντίδρασης, και ο μεγαλύτερος χρόνος παραμονής των στερεών στον αντιδραστήρα εξασφαλίζει καλύτερη μετατροπή συνολικά. Η χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας που συνοδεύουν αυτόν τον τύπο αντιδραστήρα (800-1000C) συνεπάγονται και αποφυγή συσσωμάτωσης της τέφρας. Ο τύπος αυτός ενδείκνυται ιδιαίτερα για καύσιμα με πιθανή διακύμανση στην σύσταση και την παροχή όπως ακριβώς η βιομάζα και τα ΑΣΑ.



Τα στάδια, ρεύματα και θερμοκρασίες στον αντιδρ. ρευστοποιημένης κλίνης (14)

Αντιδραστήρας ροής συμπάρασυσης (entrained flow): Εδώ το κονιορτοποιημένο καύσιμο εισέρχεται παρασυρόμενο από το ρεύμα αεριοποιητικού μέσου στον αντιδραστήρα. Οι θερμοκρασίες και πιέσεις λειτουργίας είναι υψηλές (1400 C, 20-70 bar). Η πρώτη ύλη είναι εξαιρετικά λεπτομερής (<75 micron) και η μετωπική ταχύτητα του μέσου πολύ υψηλή προκειμένου να συμπαρασύρεται το καύσιμο από το ρεύμα του οξειδωτικού. Σε περίπτωση που είναι υψηλές οι πιέσεις η πρώτη ύλη διαβρέχεται προς την δημιουργία πολφού. Αυτό απαιτεί μεγαλύτερο όγκο αντιδραστήρα και υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις (για την εξάτμιση του νερού). Παρόλα αυτά προτιμάται στις μονάδες ολοκληρωμένης αεριοποίησης συνδυαστικού κύκλου (integrated gasification combined cycle, IGCC) λόγω της υψηλής

θερμοκρασίας που συνεπάγεται τήγμα τέφρας στην έξοδο, και ολική καταστροφή πίσσας και βαρύτερων οργανικών.



Τα στάδια, ρεύματα και θερμοκρασίες στον αντιδρ. συμπαρασυρόμενης ροής για είσοδο a) από το πλάι και b) από την κορυφή. (14)

Αναλυτικότερα στοιχεία για τους προαναφερθέντες τύπους αντιδραστήρων δίνονται παρακάτω:

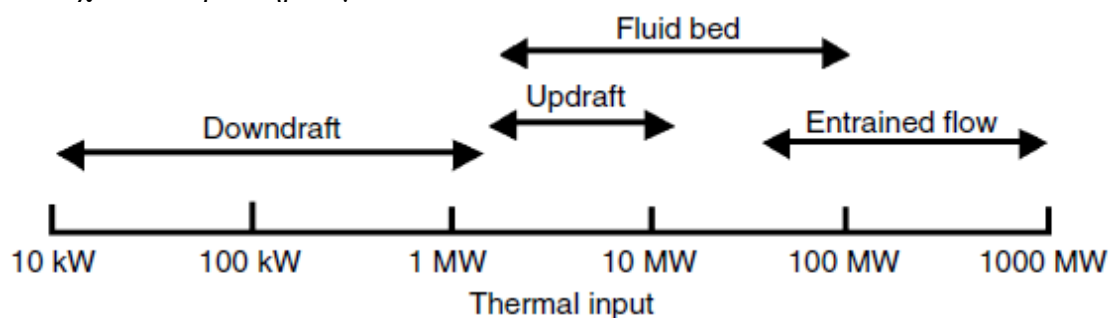
TABLE 6.1 Comparison of Some Commercial Gasifiers

Parameters	Fixed/Moving Bed	Fluidized Bed	Entrained Bed
Feed size	<51 mm	<6 mm	<0.15 mm
Tolerance for fines	Limited	Good	Excellent
Tolerance for coarse	Very good	Good	Poor
Exit gas temperature	450–650 °C	800–1000 °C	>1260 °C
Feedstock tolerance	Low-rank coal	Low-rank coal and excellent for biomass	Any coal including caking but unsuitable for biomass
Oxidant requirements	Low	Moderate	High
Reaction zone temperature	1090 °C	800–1000 °C	1990 °C
Steam requirement	High	Moderate	Low
Nature of ash produced	Dry	Dry	Slagging
Cold-gas efficiency	80%	89%	80%
Application	Small capacities	Medium-size units	Large capacities
Problem areas	Tar production and utilization of fines	Carbon conversion	Raw-gas cooling

Source: Data compiled from Basu, 2006.

Παράμετροι λειτουργίας, περιορισμοί και αποδόσεις για τους τύπους αντιδραστήρων αεριοποίησης (14)

Στο σημείο αυτό πλέον πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η δυναμικότητα των αντίστοιχων αντιδραστήρων μονάδων:



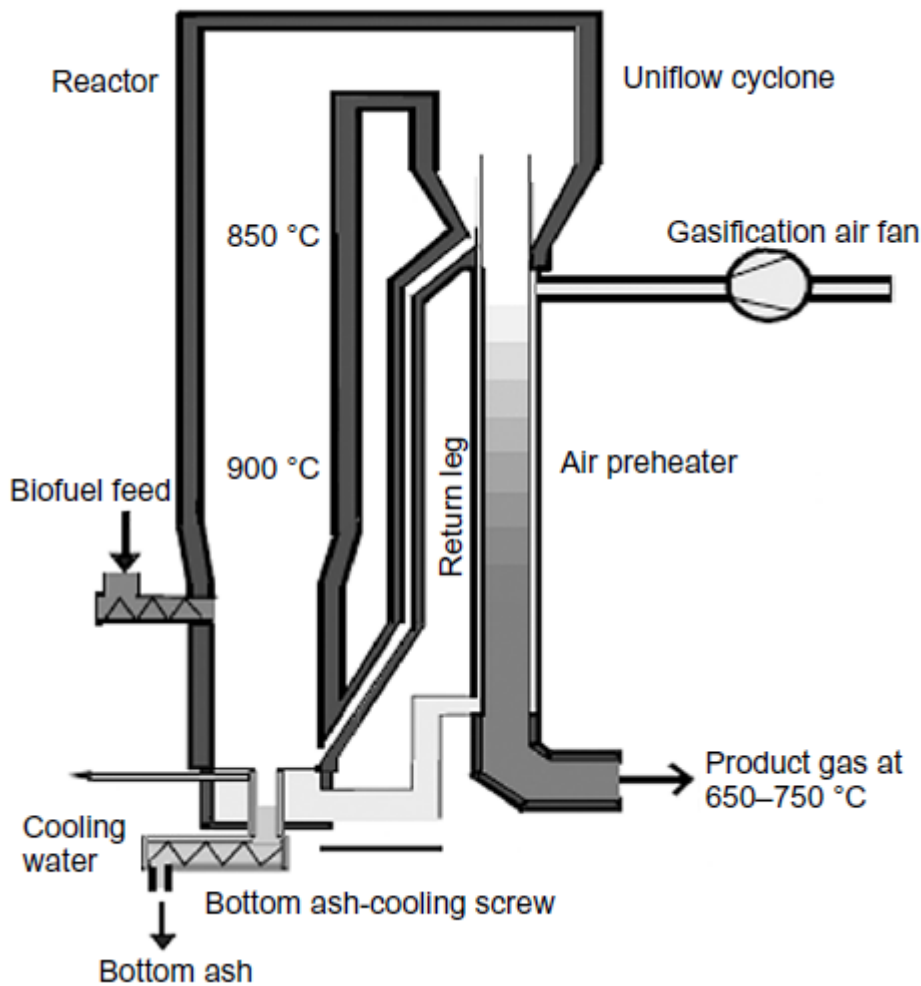
Δυναμικότητα σε θερμικούς όρους για τους τύπους αντιδραστήρων αεριοποίησης (14)

Δεδομένων των υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων της Αττικής, ενδεικτικά σε ηλεκτρικό ρεύμα, και σε σύγκριση με άλλες ΑΠΕ (26) η δυναμικότητα των αντιδραστήρων κινούμενης κλίνης δεν μπορεί να ανταποκριθεί ρεαλιστικά στην

κάλυψη ενεργειακών αναγκών. Επίσης για τους αντιδραστήρες ροής συμπαράσυρσης είναι ακατάλληλη η χρήση βιομάζας ως καύσιμο, πιθανώς λόγω αδυναμίας κονιοποίησης και της ιδιαίτερης φύσης της ως καύσιμη ύλη. Το μοναδικό εναπομένον είδος αντιδραστήρα είναι της ρευστοποιημένης κλίνης και η μελέτη του σχεδιασμού της διεργασίας θα συνεχιστεί πάνω σε αυτό.

Αντιδραστήρες αναβράζουσας κλίνης: είναι ο παλαιότερος τύπος αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης και χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια για αεριοποίηση από γαιάνθρακα/κωκ. Είναι ένας από τους δημοφιλέστερους τύπους αντιδραστήρων αεριοποίησης βιομάζας. Συγκεκριμένα η δυναμικότητα του είναι σχετικά μικρή (<25 MWth) και χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες ανάλογα με την θερμοκρασία λειτουργίας (χαμηλή και υψηλή). Οι πίεση λειτουργίας είναι είτε ατμοσφαιρική είτε ενίοτε υψηλότερη. Ο τύπος αντιδραστήρα που αναφέρθηκε ανωτέρω εμπίπτει στους χαμηλής θερμοκρασίας. Στους υψηλής θερμοκρασίας το αεριοποιητικό μέσο εισέρχεται και σε σημείο πάνω από την κλίνη αυξάνοντας τοπικά την θερμοκρασία στους 1000 C προκειμένου να αντιδράσουν οι βαρύτερες οργανικές ενώσεις και το μεθάνιο, αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα. Σχεδόν πάντοτε υπάρχει κυκλώνας που διαχωρίζει τα συμπαρασυρόμενα σωματίδια και τα επιστρέφει στην κλίνη.

Αντιδραστήρες ανακυκλοφορούσας κλίνης: όπως είναι πλέον γνωστό, η ειδοποιός διαφορά αυτού του τύπου αντιδραστήρα είναι η σκόπιμη εκτενής επανακυκλοφορία των παρασυρόμενων από το αέριο μέσο σωματιδίων. Αυτή η τεχνική ανακυκλοφορίας διαφέρει από την «τυχαία» παράσυρση, διαχωρισμό και επιστροφή των σωματιδίων στην περίπτωση της αναβράζουσας κλίνης. Εδώ η διάταξη αποτελείται σίγουρα από έναν ανυψωτή (riser), έναν κυκλώνα και μια συσκευή ανακύκλωσης στερεών. Στον αντιδραστήρα ανακυκλοφορούσας κλίνης τα στερεά κατανέμονται καθ' όλο το μήκος του ανυψωτή παρασυρόμενα από το ανοδικό αέριο ρεύμα. Το μεγάλο ύψος επιτρέπει και τον μακρύ χρόνο παραμονής. Η ταχύτητα ρευστοποίησης είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή της αναβράζουσας κλίνης (3.5-5.5 m/s έναντι 0.5-1.0 m/s αντίστοιχα) και κατά συνέπεια είναι και μεγαλύτερο το ποσοστό των συμπαρασυρόμενων στην έξοδο στερεών. Ο ρυθμός ανακύκλωσης των στερεών και η ταχύτητα ρευστοποίησης στον ανυψωτή χαρακτηρίζουν αυτήν την ειδική κατάσταση ρευστοποίησης ως «ταχεία ρευστοποιημένη κλίνη» (fast fluidized bed). Η θερμοκρασία λειτουργίας του ανυψωτή είναι στους 800-1000 C που σε συνδυασμό με τον μεγάλο χρόνο παραμονής εγγυάται καλές μετατροπές και μειωμένη περιεκτικότητα σε πίσσα. Αφού το αέριο ρεύμα περάσει την έξοδο, ο κυκλώνας διαχωρίζει τα στερεά και τα επιστρέφει στον πυθμένα της κλίνης για να συνεχιστεί η αεριοποίησή τους, ενώ το θερμό ρεύμα μέσω διάταξης εναλλαγής θερμότητας ψύχεται και θερμαίνει το εισερχόμενο φρέσκο αεριοποιητικό μέσο.



Αντιδραστήρας ανακυκλοφορούσας ρευστοποιημένης κλίνης (14)

Μεταφορικοί αεριοποιητές: σε αυτόν τον τύπο αντιδραστήρα ο σχεδιασμός παραπέμπει σε αντιδραστήρα ανακυκλοφορούσας κλίνης αλλά οι ρυθμοί ανακύκλωσης, οι ταχύτητες ροής και η πυκνότητα του μίγματος στον ανυψωτή είναι σαφώς μεγαλύτερες. Η έντονη συνθήκη ροής και μεταφοράς σωματιδίων, καθώς και η συνεπαγόμενη ανάγκη για κονιοποιημένη τροφοδοσία παραπέμπουν σε αντιδραστήρες ροής συμπαράσυρσης. Όπως έχει αναφερθεί αυτός ο τύπος αντιδραστήρα είναι ακατάλληλος για αεριοποίηση βιομάζας και δεν θα αναλυθεί περαιτέρω.

Συστήματα δίδυμων αντιδραστήρων: δημιουργήθηκαν για την αντιμετώπιση του υψηλού κόστους αεριοποίησης μέσω ατμού ή οξυγόνου αλλά και την αποφυγή της αραίωσης του τελικού προϊόντος λόγω χρήσης ατμοσφαιρικού αέρα ως μέσου. Η λογική λειτουργίας είναι απλή: η καύση/απανθράκωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με αέρα αλλά η αεριοποίηση πραγματοποιείται σε επόμενο στάδιο με αποδοτικότερο μέσο. Αυτό είναι εύκολο επιτεύξιμο διαχωρίζοντας τον καυστήρα της πρώτης ύλης από τον αεριοποιητή και απομακρύνοντας τα καυσαέρια. Η όλη διαδικασία της ανακυκλοφορίας μπορεί να πραγματοποιείται εξωτερικά, σε χωριστούς αντιδραστήρες ή εσωτερικά σε έναν αντιδραστήρα με διαχωριστικό τοίχωμα μεταξύ

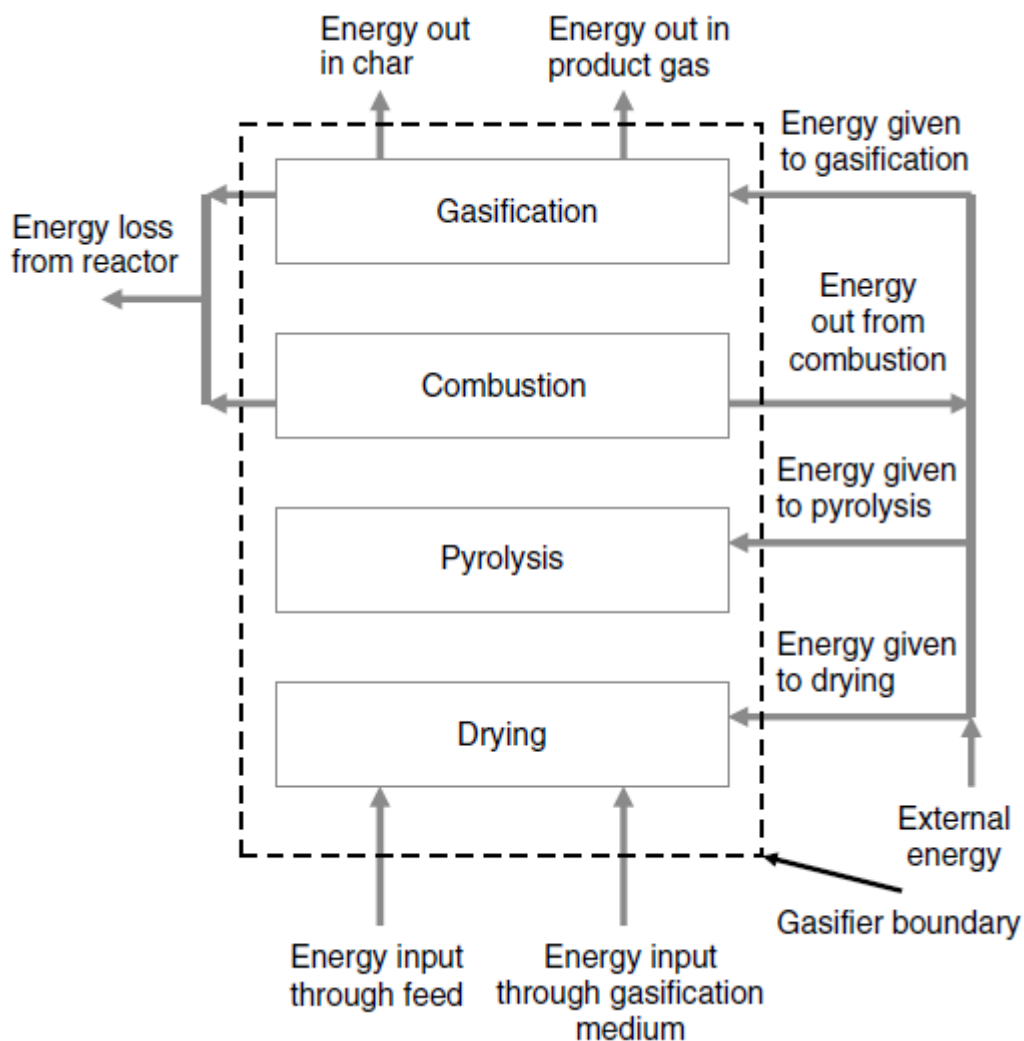
δύο παράπλευρων διαμερισμάτων που επικοινωνούν από την κοινή ανοιχτή κορυφή και ένα παράθυρο στον πυθμένα.

Οι εργαστηριακές μελέτες επισήμαναν δύο βασικά μειονεκτήματα: αφενός το παραγόμενο απανθράκωμα από την καύση δεν περιέχει αρκετή θερμότητα για να πραγματοποιηθούν οι ενδόθερμες αεριοποιητικές δράσεις στην συνέχεια και έτσι απαιτείται υπερθέρμανση του ατμού ή άλλη πηγή εξωτερική θέρμανσης στον αντιδραστήρα αεριοποίησης. Αφετέρου, παρατηρήθηκε ότι ο απαιτούμενος ατμός (για να επιτευχθεί ρευστοαιώρηση) αντιδρά σε ποσοστό <10% με αποτέλεσμα να ξοδεύονται μεγάλα ποσά ενέργειας χωρίς λόγο και να αραιώνεται το τελικό προϊόν. Για τους λόγους αυτούς η εφαρμογή του αν και υποσχόμενη δεν έχει βρει ευρεία εφαρμογή

Αεριοποιητής χημικού βρόγχου (chemical looping gasifier): εδώ στον απλό αντιδραστήρα αεριοποίησης χρησιμοποιείται ένα μέσο χημικής ρόφησης του παραγόμενου CO₂ με αποτέλεσμα αέριο προϊόν πλούσιο σε υδρογόνο. Καθώς το CO₂ κατάσχεται οι συνθήκες μπορούν να ρυθμιστούν κατάλληλα για μεγιστοποίηση του παραγόμενου υδρογόνου ανεξάρτητα από την επίπτωση σε παραγόμενο CO₂ και έτσι αυτός ο αντιδραστήρας έχει ειδική εφαρμογή σε τέτοιες περιπτώσεις. Το μέσο ρόφησης του CO₂ είναι συνήθως ασβέστης ο οποίος αναγεννάται με ασβεστοποίηση (υψηλή θέρμανση που οδηγεί σε διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου σε οξείδιο του ασβεστίου και διοξείδιο του άνθρακα) σε άλλο αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης. Έτσι λοιπόν το CO₂ της αεριοποίησης μπορεί να απομακρυνθεί σε ξεχωριστό ρεύμα, αφήνοντας το ρεύμα της αεριοποίησης πλούσιο σε υδρογόνο. Ωστόσο η ειδική εφαρμογή του και η υψηλή απαίτηση σε ενέργεια για την αναγέννηση του χημικού ροφητή περιορίζουν τις δυνατότητες χρήσης του στην προκειμένη περίπτωση.

Ενεργειακές απαιτήσεις διεργασίας:

Λόγω των διάφορων αντιδράσεων που διεξάγονται σε έναν αεριοποιητή το ισοζύγιο ενέργειας είναι πιο πολύπλοκο. Καθώς πραγματοποιούνται τόσο ενδόθερμες όσο και εξώθερμες αντιδράσεις πρέπει όλα να ληφθούν υπ' όψιν για να υπολογιστεί κατά πόσο η διεργασία είναι αυτόνομη ή απαιτεί εξωτερική προσφορά θερμότητας. Η βασικότερες πηγές προσφοράς ενέργειας στο σύστημα είναι η καύση του απανθρακώματος και η περιεχόμενη θερμότητα στον ατμό που χρησιμοποιείται. Η βασικότερη κατανάλωση ενέργειας είναι η ενέργεια που απορροφάται από τις ενδόθερμες αντιδράσεις της πυρόλυσης – αεριοποίησης. Αξιοποιώντας την ενεργειακή ολοκλήρωση η διεργασία είναι δυνατόν να αυτονομηθεί και σε περίπτωση που αυτό δεν αρκεί (π.χ. επιδιώκοντας και την παραγωγή ατμού), τότε μέρος της τροφοδοσίας μπορεί να καεί για να καλυφθούν οι ανάγκες. Σε περίπτωση που η επιπρόσθετη καύση πραγματοποιηθεί μέσα στον αντιδραστήρα αεριοποίησης το παραγόμενο CO₂ μπορεί να δεσμευθεί στην έξοδο μέσω των διαφόρων μεθόδων κατάσχεσης CO₂ που υπάρχουν.



Ισοζύγιο ενέργειας στον αντιδραστήρα αεριοποίησης (14)

Επιλογή διεργασίας:

Για τον ακριβή προσδιορισμό της διεργασίας πρέπει να αποσαφηνιστούν επιλογές που αφορούν τόσο την διεργασία όσο και τις συσκευές. Έχοντας ως κατευθυντήρια γραμμή την επιθυμητή σύσταση, απόδοση και δυναμικότητα σε προϊόν θα προκύψουν και οι ανάλογες επιλογές όσον αφορά βασικούς παραμέτρους όπως πρώτη ύλη, μέσο αεριοποίησης, συνθήκες λειτουργίας και μέγεθος-τύπος αντιδραστήρα. Υπ' όψιν πρέπει επίσης να ληφθούν οι βασικοί παράμετροι του κόστους (παραγωγή και αντιρρύπανση) και της ευκολίας – εξοικείωσης στον χειρισμό της τεχνολογίας και της μονάδας γενικότερα.

Δεδομένου ότι η αεριοποίηση των ΑΣΑ για παραγωγή ενεργειακών προϊόντων θα εισαχθεί ως βοηθητική διεργασία για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της Αττικής και ως μέθοδος αποδοτικής διαχείρισης των ΑΣΑ δεν υπάρχει συγκεκριμένη απαίτηση για την δυναμικότητα ή την αποδοτικότητα της εκάστοτε μονάδας. Καθώς είναι αρκετά νέα τεχνολογική εφαρμογή για τα δεδομένα της χώρας, επιδιώκεται μια «μέση λύση» μεταξύ α) βελτιστοποίησης της απόδοσης (ποιοτικής & ποσοτικής) και μεγιστοποίησης της δυναμικότητας και β) της ευκολίας – εξοικείωσης στον χειρισμό της μονάδας από το προσωπικό. Αυτή η «μέση λύση» εντοπίζεται στην επιλογή

αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης για την διεξαγωγή της αεριοποίησης. Όσον αφορά την επιλογή του μέσου αεριοποίησης λαμβάνοντας πάλι υπ' όψιν το οικονομικό κόστος, την πολυπλοκότητα στον χειρισμό και την μεγιστοποίηση της θερμογόνου δύναμης του παραγόμενου καυσίμου καταλληλότερο μέσο κρίνεται ο ατμός. Η χρήση ατμού συνεπάγεται μεγάλο κόστος για την παραγωγή του (υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις) και η απόδοση του σε ποιότητα καυσίμου είναι μέτρια, αλλά το οξυγόνο είναι ακριβό στην αγορά/παραγωγή, απαιτεί μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης και θέλει προσεκτικότερο χειρισμό ενώ αντίστοιχα ο αέρας δίνει πολύ κακής ποιότητας προϊόν (αραιώση λόγω ατμοσφαιρικού αζώτου). Καθώς το παραγόμενο προϊόν προορίζεται για καύση και παραγωγή ενέργειας δεν απαιτείται κάποια συγκεκριμένη σύσταση κάτι που δεν εισάγει ειδικές απαιτήσεις στον σχεδιασμό και την όλη διεργασία. Τέλος λόγω της λιγνο-κυτταρινούχου φύσης της (πλειονότητας της) πρώτης ύλης απαιτείται ελάχιστη θερμοκρασία αεριοποίησης 900 C και μεγάλος χρόνος παραμονής. Υπό αυτές τις συνθήκες και σε συνδυασμό με την χρήση καταλύτη (ασβεστοποιημένου δολομίτη) αναμένεται και ικανοποιητική διάσπαση της παραγόμενης πίσσας. Όλες οι παραπάνω προϋποθέσεις καλύπτονται από την χρήση αντιδραστήρα ανακυκλοφορούσας κλίνης.

Επίσης σχετικά με το αεριοποιητικό μέσο και συγκεκριμένα τον ατμό, υπάρχει μία σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την αποδοτικότητα σε υδρογόνο και CO, η αναλογία ατμού/άνθρακα (S/C ratio, moles ατμού που εισάγονται στον αντιδραστήρα ανά moles άνθρακα στην πρώτη ύλη). Για δεδομένη θερμοκρασία και περιεχόμενο στην πρώτη ύλη οξυγόνο, αυξάνοντας την αναλογία ατμού/άνθρακα αυξάνει και η περιεκτικότητα στα δύο αυτά αέρια ενδιαφέροντος. Επίσης αυξάνει με την μείωση της πίεσης λειτουργίας του αντιδραστήρα και του περιεχόμενου οξυγόνου. Ωστόσο η αύξηση του ατμού δεν ωφελεί από ένα σημείο και μετά καθώς αυτός δεν αντιδρά πλήρως και απλώς διαφεύγει με το ρεύμα εξόδου των αερίων προϊόντων, κάτι που συνεπάγεται αραιώση του προϊόντος (σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί απ' ευθείας) και σπατάλη ενέργειας για την παραγωγή πλεονάζοντος ατμού. Η ακριβής τιμή της αναλογίας S/C προσδιορίζεται πρακτικά μέσω δοκιμής για την κάθε εκάστοτε μονάδα και τα επιθυμητά αποτελέσματα αλλά μία εμπειρική τιμή εκκίνησης είναι 2.0 – 2.5. Για την εκάστοτε βέλτιστη αναλογία η μετατροπή του άνθρακα (της πρώτης ύλης σε ωφέλιμα ενεργειακά προϊόντα) είναι περί το 90%. Να υπενθυμισθεί εδώ ότι το προϊόν αεριοποίησης με ατμό έχει κατώτερη θερμογόνο δύναμη 10-18 MJ/m³.

Ειδικές περιπτώσεις Αεριοποίησης:

Εδώ θα παρουσιαστούν δύο μέθοδοι με ειδικό ενδιαφέρον καθώς αξιοποιούν πρωτοπόρες τεχνολογίες που ανταποκρίνονται σε πολύ ειδικές περιστάσεις. Η ξεχωριστή μεταχείριση τους οφείλεται στο ότι η χρήση τους είναι πολύ περιορισμένη λόγω της «νεαρής ηλικίας» τους και δεν μπορούν να συγκριθούν βιομηχανικά σε αποδοτικότητα με τις προαναφερθείσες μεθόδους. Παρόλα αυτά είναι εξαιρετικά υποσχόμενες και δεν μπορούν να παραληφθούν. Αυτές είναι η αεριοποίηση πλάσματος και η αεριοποίηση με υπερκρίσιμο νερό.

Αεριοποίηση πλάσματος:

Η ειδοποιός διαφορά αυτής της μεθόδου είναι η αξιοποίηση του πλάσματος (της τέταρτης κατάστασης της ύλης) για την προσφορά ενέργειας και την διεξαγωγή των απαραίτητων αντιδράσεων. Το πλάσμα αποτελεί ένα υπέρθερμο αέριο το οποίο απορροφώντας ακόμη μεγαλύτερα ποσά ενέργειας μετατρέπεται σε ένα «νέφος» αρνητικά και θετικά φορτισμένων σωματιών. Στην διεργασία ο «πυρσός πλάσματος» αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια διαμέσω των οποίων σχηματίζεται ισχυρό ηλεκτρικό τόξο σε περιβάλλον αδρανούς αερίου.

Δοθείσας της υψηλής θερμοκρασίας του τόξου (13.000 C) και τις δραστικής ιοντικής φύσης το κατερχόμενο, από την κορυφή, ρεύμα πρώτης ύλης έρχεται σε επαφή και διασπάται άμεσα και αποδοτικά σε πολύ μικρότερα μοριακά θραύσματα. Αυτή είναι η «καρδιά» της διεργασίας η οποία και θα μπορούσε να ονομάζεται «πυρόλυση πλάσματος» καθώς στην ουσία αποτελεί θερμική διάσπαση των οργανικών ενώσεων σε μικρότερες και απλούστερες σε συνθήκες έλλειψης οξυγόνου. Τα θερμά και αέρια προϊόντα της πυρόλυσης πλάσματος ανέρχονται προς την έξοδο στην κορυφή. Η θερμοκρασία στην ζώνη που εισάγεται το αεριοποιητικό μέσο, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του τόξου, είναι 2.700 – 4.500 C και έτσι τα μικρά μόρια αεριοποιούνται επιτυχώς σε CO και H₂. Η παραγόμενη τέφρα, στο επίπεδο του ηλεκτρικού τόξου, τήκεται σε μία ηφαιστειακού τύπου λάβα η οποία μετά την ψύξη της σχηματίζει βασαλτική σκωρία. Το παραγόμενο αέριο εξέρχεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, 1000 – 1200 C.

Ο πυρσός πλάσματος αναβαθμίζει την όλη διεργασία της αεριοποίησης σε ανώτερο επίπεδο αλλά συνοδεύεται από ουσιαστικά μειονεκτήματα. Οι έντονα δραστικές συνθήκες, ο μεγάλος χρόνος παραμονής και η υψηλή θερμοκρασία προκαλούν ολοκληρωτική διάσπαση της πίσσας αλλά και τοξικών προϊόντων όπως διοξίνες και φουράνια που και η ελάχιστη παρουσία τους απαιτεί δραστικά μέσα αντιρρύπανσης. Παράλληλα όμως η υψηλή θερμοκρασία και οι δραστικές συνθήκες οδηγούν στην ταχύτατη φθορά του εξοπλισμού διότι ουσίες όπως χλώριο, που συναντάται κατ' εξοχήν σε διάφορα προϊόντα και άρα απορρίμματα, καθίστανται εξαιρετικά δραστικές και διαβρωτικές. Ακόμη καθώς η απαιτούμενη ενέργεια προσφέρεται μέσω του ηλεκτρικού τόξου, η διεργασία δεν επηρεάζεται τόσο από την σύσταση του ρεύματος εισόδου (που ειδάλλως η απαιτούμενη ενέργεια αντλείται από την καύση του) αλλά ο σχηματισμός του τόξου απαιτεί τεράστια ποσά ηλεκτρικής ενέργειας και άρα είναι ένα μεγάλο οικονομικό έξοδο.

Για τους παραπάνω λόγους οι διεργασίες δεν χρησιμοποιούνται εκτενώς αλλά σε ειδικές περιπτώσεις διάθεσης τοξικών ουσιών που η μάζα τους είναι σχετικά μικρή και το κόστος διαχείρισης τους είναι ούτως ή άλλως υψηλό.

Αεριοποίηση με υπερκρίσιμο νερό (super-critical water, SCW):

Οι προσπάθειες αεριοποίησης με νερό και ατμό πάντοτε συνοδεύονταν από παραγωγή πίσσας και απανθρακώματος. Μεταβάλλοντας τις συνθήκες παρατηρήθηκε ότι φέροντας το νερό στην υπερκρίσιμη μορφή του η παραγωγή τους εκμηδενίζονταν και προϊόν αποτελούσαν μόνο τα επιθυμητά αέρια (CO, H₂, ...). Αυτό οδήγησε στην περαιτέρω μελέτη της αεριοποίησης με υπερκρίσιμο νερό (SCWG).

Λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων του νερού στην υπερκρίσιμη κατάσταση (χαμηλή διηλεκτρική σταθερά, μεγάλος συντελεστής διάχυσης και μεταφοράς κλπ) η δυνατότητες του είναι τελείως διαφορετικές από αυτές του υποκρίσιμου νερού. Έτσι λοιπόν, και λαμβάνοντας υπ' όψιν την υψηλή πίεση και θερμοκρασία, το υπερκρίσιμο νερό μπορεί εύκολα να συμμετάσχει/υποβοηθήσει σε αντιδράσεις υδρόλυσης και οξειδωσης των οργανικών ενώσεων.

Καθώς το SCW έχει χαμηλή διηλεκτρική σταθερά αποτελεί πλέον διαλύτη κατάλληλο για οργανικές ενώσεις και αέρια. Η συνήθης αντίδραση της υδρόλυσης απαιτεί όξινους ή βασικούς καταλύτες. Στην υπερκρίσιμη κατάσταση το νερό έχει υψηλό ιοντικό περιεχόμενο και αυτή η ανάγκη εξαλείφεται. Η υδρόλυση πραγματοποιείται αποδοτικότερα και ταχύτερα καθώς πρώτη ύλη και νερό βρίσκονται σε ομογενές μίγμα.

Διαλύοντας οξυγόνο σε SCW δημιουργείται ένα ομογενές μίγμα καυσίμου (π.χ. οργανικών ενώσεων) και οξειδωτικού του οποίο αντιδρά ταχύτατα και αποδοτικά καθώς τα μόρια τους μπορούν να έρθουν γρήγορα σε επαφή (το SCW έχει μια μέτρια πυκνότητα που σε συνδυασμό με το χαμηλό ιξώδες, την μικρή επιφανειακή τάση και μεγάλη διάχυση ευνοεί την εύκολη μεταφορά των συστατικών μέσα σε αυτό). Έτσι λοιπόν οι οργανικές ενώσεις στις υπερκρίσιμες συνθήκες οξειδώνονται άμεσα κατά ποσοστό μεγαλύτερο από 99.9% σε ενώσεις όπως CO₂, N₂, H₂O.

Για όλους τους παραπάνω λόγους η αεριοποίηση μέσω υπερκρίσιμου νερού παρουσιάζεται πολύ υποσχόμενη και κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω μελέτη της και η άμεση εφαρμογή της. Συνοπτικά τα πλεονεκτήματα της έναντι της συμβατικής θερμοχημικής αεριοποίησης είναι:

- Δυνατότητα αποδοτικής κατεργασίας ρευμάτων με υψηλή περιεχόμενη υγρασία (π.χ. υγρά αστικά λύματα). Λόγω της υψηλής ενθαλπίας εξάτμισης και θερμοχωρητικότητας του νερού μια πρώτη ύλη με υγρασία 80% αεριοποιείται με απόδοση 10% με χρήση υποκρίσιμου ατμού ενώ αντίστοιχα 70% με χρήση SCWG.
- Χαμηλή παραγωγή πίσσας. Οι πρόδρομες ουσίες της πίσσας και όλα τα οργανικά είναι ευδιάλυτα στο SCW και μπορούν να κατεργαστούν αποδοτικά στην SCWG.
- Άμεση παραγωγή υδρογόνου, με μικρή περιεκτικότητα σε CO εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για shift-reaction στην συνέχεια.

- Παραγωγή των αερίων σε υψηλή πίεση, έτοιμα για εισαγωγή σε δίκτυο ή θερμοδυναμικά κύκλα παραγωγής ενέργειας.
- Μεγάλη διαλυτότητα του CO₂ στο SCW και άρα εύκολη απομάκρυνσή του από το ρεύμα των προϊόντων
- Άτομα όπως S, N και αλογόνα απομακρύνονται με την υγρή φάση εκμηδενίζοντας την ανάγκη για καθαρισμό του παραγόμενου αερίου. Οι ανόργανες ενώσεις είναι αδιάλυτες στο SCW και έτσι απομακρύνονται εύκολα ως ίζημα
- Το αέριο προϊόν διαχωρίζεται αυτομάτως από το υγρό κλάσμα που περιέχει το σύνολο της πίσσας και του απανθρακώματος, εάν υπάρχει κάποιο.

Όσον αφορά την χημική-κινητική η αεριοποίηση μέσω SCW παρουσιάζει δύο δεσμευτικά μειονεκτήματα:

- Λόγω των δραστικών και οξειδωτικών συνθηκών στοιχεία όπως θείο, άζωτο και φωσφόρος μετατρέπονται στα αντίστοιχα οξέα τους παράγοντας έτσι πολύ διαβρωτικά υγρά λύματα που καθιστούν δύσκολη και ακριβή την διαχείριση τους και μειώνουν τον χρόνο ζωής του εξοπλισμού/αυξάνουν το κόστος κατασκευής – συντήρησης.
- Η οξείδωση σε SCW παρουσιάζει το πλεονέκτημα του μονοφασικού συστήματος αντίδρασης. Αυτό όμως ισχύει για τις υγρές ουσίες στις συνθήκες του υπερκρίσιμου νερού. Τα στερεά σωματίδια δεν ανταποκρίνονται εξίσου καλά με αποτέλεσμα η απόδοση να μειώνεται όσο αυξάνεται το κλάσμα των στερεών.
Οι θερμοδυναμικοί υπολογισμοί υποδεικνύουν ότι για στερεά άνω του 50% της τροφοδοσίας, η απόδοση αρχίζει μειώνεται σημαντικά, αλλά τα πειραματικά δεδομένα υποδεικνύουν ότι αυτό συμβαίνει πολύ νωρίτερα. Συγκεκριμένα για περιεκτικότητα σε στερεά <2% η απόδοση είναι 92-100%. Αυξάνοντας την συγκέντρωση στερεών σε 2-10% η απόδοση πέφτει στο 60-90% και για συγκέντρωση >10% είναι 68-80% αντίστοιχα. Προκειμένου η διεργασία να είναι αποδοτική και συμφέρουσα απαιτείται εκτενής διαχωρισμός των στερεών που αυξάνει απαγορευτικά το κόστος. Για τον λόγο αυτό η διεργασία κρίνεται καταλληλότερη για παραγωγική διαχείριση υγρών (αποχετευτικών) λυμάτων και γενικότερα λυματολάσπης.
- Με την παρούσα επιστημονική και τεχνολογική εξέλιξη το κόστος επένδυσης σε μία μονάδα κατεργασίας λυματολάσπης δυναμικότητας 5,000 kg/h είναι απαγορευτικά υψηλό, 2,500,000-5,000,000 €.

Για τους παραπάνω λόγους η χρήση της αεριοποίησης μέσω υπερκρίσιμου νερού κρίνεται μη αποδοτική και μη συμφέρουσα και δεν θα μελετηθεί εδώ περαιτέρω. Παρόλα αυτά η προοπτική της για κατεργασία των υγρών αστικών λυμάτων ή τοξικών λυμάτων μιας διεργασίας είναι εξαιρετικής σημασίας και επιβάλλεται η τάχιστα μελέτη και η άμεση εφαρμογή της.

Συγκριτική συνεκτίμηση πυρόλυσης – αεριοποίησης:

Οι παραπάνω διεργασίες αφορούν τις δύο θεμελιώδεις μεθόδους θερμοχημικής κατεργασίας ορυκτών ανθράκων – οργανικών ουσιών με στόχο την παραγωγή ενός ανώτερου ενεργειακά προϊόντος. Και οι δύο διεργασίες έχουν την δυνατότητα παραγωγής στερεών, υγρών και αερίων προϊόντων. Ωστόσο η αεριοποίηση στοχεύει αποκλειστικά στην παραγωγή αερίου και γενικότερα η παραγωγή στερεού είναι δευτερεύουσας σημασίας. Έτσι, η πυρόλυση είναι ικανή για παραγωγή υγρού και αερίου προϊόντος. Το προφανέστερο ερώτημα είναι σε περίπτωση που το επιθυμητό προϊόν είναι αέριο ποια από τις δύο διεργασίες πρέπει να προτιμηθεί.

Τα αέρια που προκύπτουν από την κάθε διεργασία έχουν διαφορετική σύσταση. Το παραγόμενο αέριο της πυρόλυσης αποτελείται από μίγμα μονοξειδίου-διοξειδίου του άνθρακα, υδρογόνου, νερού και κυρίως μικρών αερίων υδρογονανθράκων. Το αέριο της αεριοποίησης λόγω της χρήσης οξειδωτικού μέσου αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο ενώ σε μικρότερες ποσότητες μπορεί να περιέχει μεθάνιο, νερό και διοξείδιο του άνθρακα. Σε περίπτωση που το αέριο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για χημική βιομηχανία η διαφορά είναι προφανής και η εκάστοτε διεργασία επιλέγεται ανάλογα με την ανάγκη σε παραγόμενη πρώτη ύλη.

Εν προκειμένω το αέριο αποτελεί ενεργειακό προϊόν και άρα οι ιδιότητες ενδιαφέροντός του είναι η θερμογόνος δύναμη και η «συμπεριφορά» κατά την καύση. Τα δύο παραγόμενα αέρια έχουν κατώτερη θερμογόνος δύναμη 11-20MJ/m³ για την πυρόλυση και 10-18 MJ/m³ για την αεριοποίηση. Η διαφορά τους είναι μικρή επομένως η θερμογόνος δύναμη και μόνον δεν μπορεί να αποτελέσει κριτήριο επιλογής. Η σημαντική διαφορά των δύο προϊόντων είναι στην σύσταση. Στην περίπτωση της πυρόλυσης υπάρχει ένα πολυσυστατικό μίγμα υδρογονανθράκων, όχι αυστηρής σύστασης. Αυτό συνεπάγεται και μία ανάγκη για σχετική ευελιξία σύστασης καυσίμου στην διάταξη καύσης, πέρα ίσως από τις απλές εστίες καύσης με περίσσια οξειδωτικού μέσου (π.χ. ανοιχτές οικιακές εστίες). Αντίστοιχα στην περίπτωση της αεριοποίησης το παραγόμενο προϊόν είναι δύο κυρίως συστατικών (CO, H₂) σε αναλογία που μπορεί να καθοριστεί και επιτευχθεί εύκολα. Το προϊόν αυτό, syngas, αποτελεί ένα πρότυπο προϊόν καθορισμένης σύστασης. Το syngas αποτελεί ένα γνωστό και αξιόπιστο καύσιμο με καθορισμένες ιδιότητες, δηλαδή ένα υλικό με το οποίο υπάρχει εξοικείωση με την χρήση του και αποτελεί ένα σημείο αναφοράς. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς επιτρέπει την εύκολη «επικοινωνία» και εξασφαλίζει την συμβατότητα του καυσίμου με τις διατάξεις που το αξιοποιούν (π.χ. αεριοστρόβιλοι).

Παρά τα προτερήματα του αερίου σύνθεσης έναντι του αερίου πυρόλυσης το δίλημμα εντείνεται πάλι όταν προορίζεται ως καύσιμο σε αεριοστρόβιλο. Η χρήση του αεριοστρόβιλου είναι κρίσιμη στην βιομηχανία παραγωγής ενέργειας καθώς επιτρέπει την εφαρμογή του συνδυασμένου κύκλου που συνεπάγεται ασύγκριτα υψηλότερες ενεργειακές αποδόσεις σε σχέση με τον απλό κύκλο.

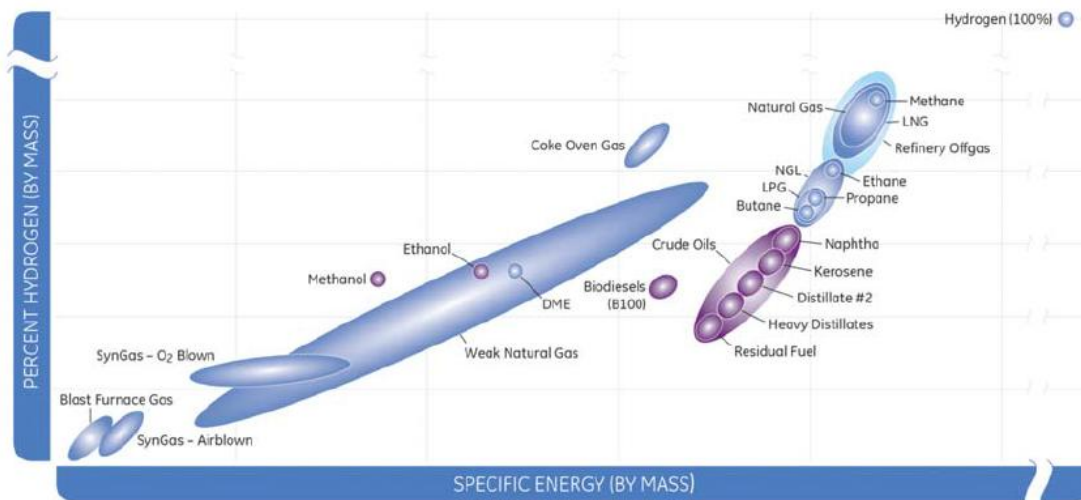
Είναι γεγονός ότι σήμερα υπάρχουν πολλές εγκαταστάσεις που λειτουργούν αεριοστρόβιλοι με καύσιμο αέριο σύνθεσης και ίσως ελάχιστοι με αέριο πυρόλυσης. Κάτι τέτοιο υποδεικνύει ότι υπάρχει μεγαλύτερη εξοικείωση και άρα ίσως προτιμάται

η χρήση του syngas ως καύσιμο έναντι του αερίου πυρόλυσης. Αυτό όμως είναι μια εσφαλμένη αντίληψη. Η χρήση syngas ως καυσίμου είναι λύση ανάγκης και όχι επιλογή βελτιστοποίησης. Αυτό οφείλεται στο ότι η βιομηχανία παραγωγής ενέργειας είναι βασισμένη στον ορυκτό άνθρακα. Η αεριοποίηση αξιοποιήθηκε ως τεχνολογία αναβάθμισης της απόδοσης των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρισμού από γαιάνθρακες. Προκειμένου να εισαχθεί η τεχνολογία του συνδυασμένου κύκλου και της αυξημένης απόδοσης στην αξιοποίηση του γαιάνθρακα ήταν απαραίτητη πρώτα η παραγωγή αερίου καυσίμου από τον στερεό γαιάνθρακα. Μόνη αποδοτική λύση είναι η αεριοποίηση του γαιάνθρακα. Στην περίπτωση της βιομάζας αυτό δεν ισχύει. Η βιομάζα είναι ικανή και μόνο με πυρόλυση να παράξει αέρια καύσιμα. Επί της ουσίας η χρήση syngas έναντι υδρογονανθράκων, όπως στις μονάδες συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου, ως καύσιμο παρουσιάζει πολλές δυσκολίες. Το υδρογόνο που περιέχεται στο syngas τείνει να εκρήγνυται παρά να αναφλέγεται και για τον λόγο αυτό απαιτείται η αραίωση του καυσίμου με ατμό και άζωτο πριν την καύση. Αυτό δημιουργεί ορισμένες σημαντικές επιπλοκές οι δύο κυριότερες εξ αυτών είναι:

~ Η συγκέντρωση του νερού μέσα στον αεριοστρόβιλο αυξάνεται με αποτέλεσμα την εντονότερη μεταφορά θερμότητας στα πτερύγια του στροβίλου και άρα εντονότερη φθορά τους. Η αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου απαιτεί είτε χαμηλότερη θερμοκρασία στον θάλαμο καύσης, μειώνοντας έτσι την απόδοση, είτε ανώτερα υλικά κατασκευής, καλύτερη ψύξη του εξοπλισμού και λοιπές τεχνολογικές αναβαθμίσεις που είτε δεν υφίστανται σε εμπορική κλίμακα είτε αυξάνουν πέραν του βιώσιμου το κόστος κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας

~ Οι διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες του αερίου σύνθεσης ως καυσίμου, από αυτές π.χ. του φυσικού αερίου, απαιτούν μεγαλύτερη τροφοδοσία του στον αεριοστρόβιλο. Αυτό συνεπάγεται και μεγαλύτερη απόδοση σε ενέργεια αλλά πολλές φορές τίθενται περιορισμοί από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων του αεριοστρόβιλου (μέγιστη πίεση του συμπιεστή, μέγιστη ροπή του άξονα, μέγιστη θερμοκρασία εισόδου/χρόνος ζωής υλικού κ.ά.). (41)

Παρά λοιπόν την εκτενή χρήση αερίου σύνθεσης ως καυσίμου σε αεριοστρόβιλους είναι εμφανώς προτιμότερη η χρήση υδρογονανθράκων. Η χρήση του φυσικού αερίου έχει ήδη εμπορική εφαρμογή λόγω του ότι ως καύσιμο είναι συγκεκριμένης σύστασης με εξαιρετική θερμογόνο δύναμη και καλή συμπεριφορά κατά την καύση σε αεριοστρόβιλο. Η ελαφρώς ακαθόριστη σύσταση του αερίου πυρόλυσης και η ανάγκη για την επίτευξη ορισμένων ελάχιστων προδιαγραφών (π.χ. χαμηλή περιεκτικότητα σε πίσσα και ένα μέγιστο μοριακό βάρος των περιεχόμενων υδρογονανθράκων) παρουσιάζει μια πρόκληση στην αξιοποίηση του. Η τεχνολογία των αεριοστρόβιλων όμως έχει εξελιχθεί και εφαρμόζεται πλέον σε μεγάλο εύρος καυσίμων και με μεγάλη ευελιξία ως προς την σύστασή τους. Τα χρησιμοποιούμενα καύσιμα σε αεριοστρόβιλους απεικονίζονται παραστατικά παρακάτω:

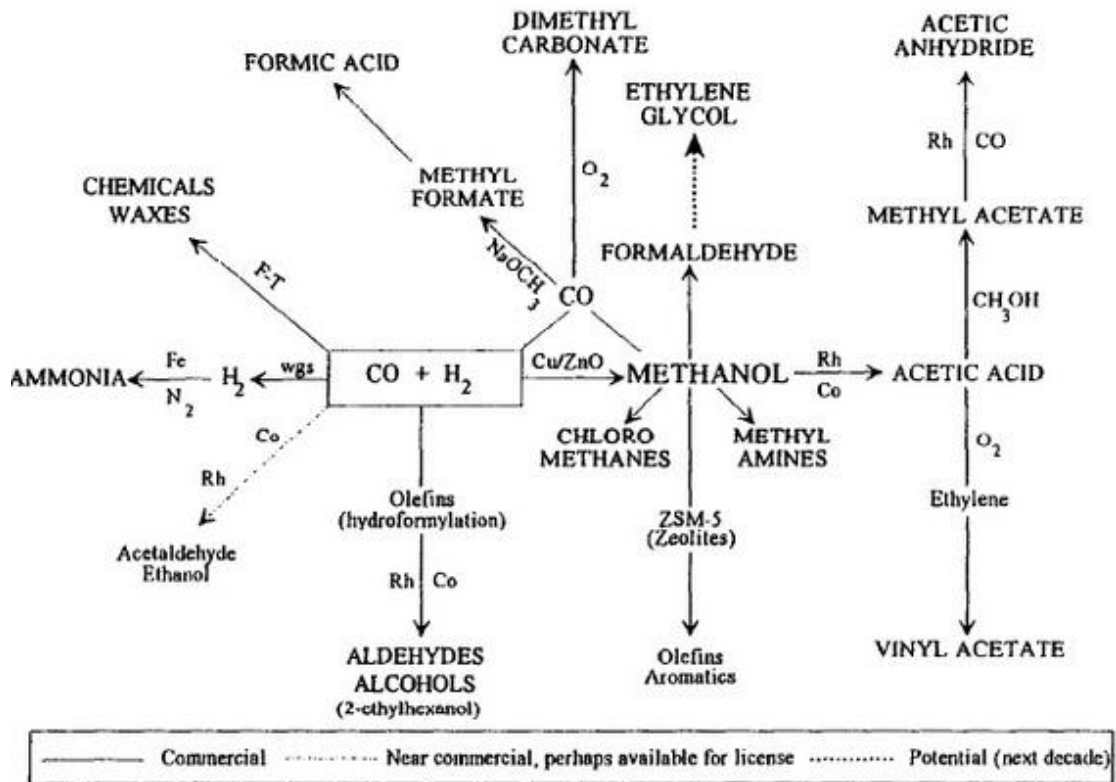


Καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε αεριοστρόβιλους υψηλής απόδοσης (42)

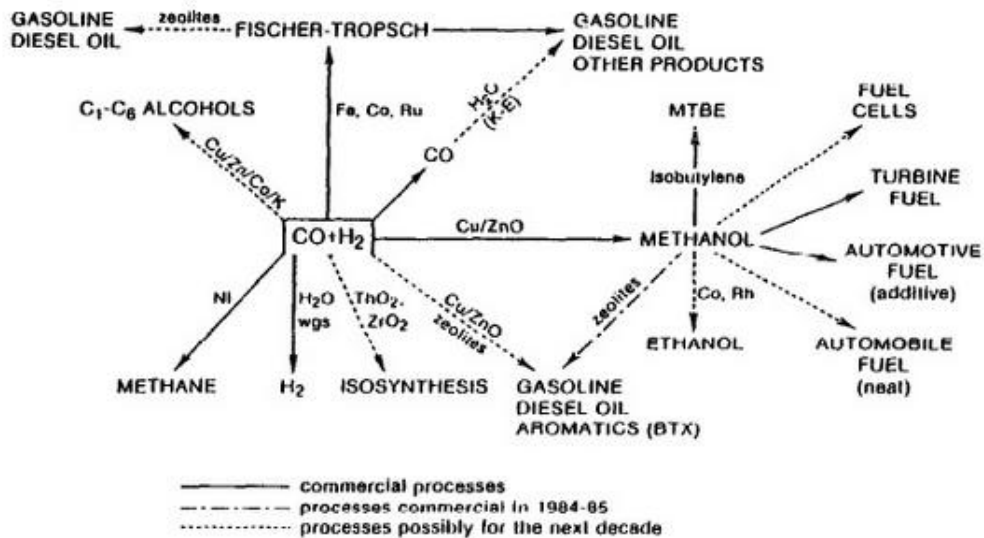
Μια κατάλληλη λοιπόν διεργασία πυρόλυσης είναι σε θέση να παράξει ένα ικανότερο καύσιμο αεριοστρόβιλου απ' ότι μια διεργασία αεριοποίησης.

Πέρα όμως από τον ενεργειακό τομέα, το syngas αποτελεί από μόνο του ένα αντιδραστήριο που οδηγεί σε πληθώρα χημικών προϊόντων και καυσίμων με μεθόδους και τεχνικές που έχουν ήδη μελετηθεί εκτενώς και εφαρμοστεί με εμπορική επιτυχία. Δεδομένου ότι μια επιχειρηματική δραστηριότητα έχει περισσότερες πιθανότητες να είναι επιτυχημένη και κερδοφόρα όταν έχει και περισσότερες δυνατότητες, δηλαδή είναι ευέλικτη, η παραγωγή syngas ως καύσιμο, ή τουλάχιστον η προ-ύπαρξη εγκαταστάσεων που με ελάχιστες τροποποιήσεις/αλλαγές στις ρυθμίσεις μπορεί να το παράξει, επιτρέπει άμεσα την παρεκτροπή του ρεύματος παραγωγής καυσίμου προς την παραγωγή χημικών προϊόντων. Η ύπαρξη μίας μονάδας που παράγει καύσιμα/ενέργεια και μπορεί εναλλακτικά να παράξει άμεσα πρώτη ύλη για πληθώρα πολύτιμων χημικών είναι σαφώς μία εύστοχη επένδυση που είναι εξαιρετικά απίθανο να κριθεί οριακά κερδοφόρος, πόσο μάλλον ζημιογόνος.

Ενδεικτικά ορισμένα από τα προϊόντα διαφόρων αντιδράσεων του syngas:



Commercial, near commercial and potential chemicals from synthesis gas (1994).



Commercial or near commercial processes for the production of liquid fuels from synthesis gas (Wender and Seshadri, 1984).

Αντιδράσεις και χρήσιμα προϊόντα (χημικά και υγρά καύσιμα) από syngas (43)

Τέλος, βασικό προϊόν της αεριοποίησης είναι το υδρογόνο. Η διεργασία μπορεί να ρυθμιστεί ώστε οι αντιδράσεις να επικεντρώνονται και μεγιστοποιούν την παραγωγή του υδρογόνου. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται και την μεγιστοποίηση της παραγωγής του διοξειδίου του άνθρακα. Αξιοποιώντας όμως τις τεχνολογίες κατάσχεσης και αποθήκευσης του CO₂ είναι δυνατή η παραγωγή, σχεδόν, καθαρού υδρογόνου

δηλαδή ενός καυσίμου του οποίου η χρήση έχει μηδενική παραγωγή ρύπων και άρα μηδενικό περιβαλλοντικό και οικονομικό αντίκτυπο, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα ολοένα αυξανόμενα πρόστιμα για την παραγωγή ρύπων και CO₂. Πέρα από το πλέον «καθαρό» καύσιμο το υδρογόνο αποτελεί και πολύτιμο αντιδραστήριο, π.χ. για τις διυλιστήρια και την αναμόρφωση των κλασμάτων του πετρελαίου.

Οι δυνατότητες μιας μονάδας αεριοποίησης είναι, κατά πως προκύπτει, απεριόριστες. Παρότι η πυρόλυση της βιομάζας είναι σε θέση να παράξει ένα καταλληλότερο καύσιμο, η αεριοποίηση αποτελεί σαφώς μια ανώτερη επιλογή από άποψη ευελιξίας στην παραγωγή προϊόντων και ενέχει το σημαντικό πλεονέκτημα της παραγωγής υδρογόνου, του καυσίμου του μέλλοντος. Στην περίπτωση που απαιτείται μια οριστική επιλογή, η αεριοποίηση είναι σαφώς προτιμητέα.

Δεδομένου όμως ότι η πυρόλυση εμπεριέχεται ως στάδιο στην διαδικασία της αεριοποίησης ίσως να μην είναι απαραίτητος ο τόσο αυστηρός διαχωρισμός των δύο αυτών διεργασιών...

Παραγωγή και διάσπαση πίσσας:

Στο σημείο αυτό πρέπει να θιχθεί ένα από τα βασικότερα προβλήματα των διεργασιών της πυρόλυσης – αεριοποίησης των ανθρακούχων υλών και δη της βιομάζας, κατ' επέκταση και των ΑΣΑ: η παραγωγή της πίσσας.

Η πίσσα δεν είναι ένα υλικό με καθορισμένη σύσταση. Αποτελεί ένα πολυσυστατικό μίγμα που προσδιορίζεται περισσότερο από τις ιδιότητες και τις επιδράσεις του στην διεργασία παρά την σύστασή του αυτή καθαυτή. Διάφοροι ορισμοί έχουν δοθεί για την πίσσα, ακριβώς λόγω της ακαθόριστης σύστασής της. Ως πίσσα χαρακτηρίζεται «το σύνολο των οργανικών προσμίξεων με μοριακό βάρος μεγαλύτερο του 78, το μοριακό βάρος του βενζολίου» και «όλες οι οργανικές ενώσεις με σημείο βρασμού μεγαλύτερο από αυτό του βενζολίου πρέπει να θεωρούνται 'πίσσα'» (Neef et al. (1999). Στην προκειμένη περίπτωση, περί αεριοποίησης της βιομάζας, ο πλέον δόκιμος όρος είναι αυτός της ειδικής ομάδας εργασίας του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας:

«Οι οργανικές ενώσεις που παράγονται από διατάξεις θερμικής κατεργασίας ή μερικής οξείδωσης (αεριοποίηση) κάθε οργανικού υλικού, αποκαλούνται 'πίσσα' και γενικώς θεωρούνται, ως επί το πλείστον, αρωματικά» (14)

Από χημικής άποψης η πίσσα είναι ένα σύνολο βαρύτερων υδρογονανθράκων, αρωματικών και πολυκυκλικών αλλά και οξυγονούχων οργανικών ενώσεων παραγώγων της φαινόλης, γουαϊακόλης, βερατρόλης, συρινγκόλης, λιπαρών οξέων και των εστέρων τους, ετεροκυκλικά μόρια κ.ά. (14)

Από πρακτικής άποψης η πίσσα είναι η αχίλλειος πτέρνα των διεργασιών πυρόλυσης και αεριοποίησης βιομάζας καθώς όσο η θερμοκρασία παραμένει υψηλή δεν δημιουργεί καμία επιπλοκή, ωστόσο όταν ψυχθεί το αέριο ρεύμα και η πίσσα υγροποιηθεί δημιουργεί ένα κολλώδες διαβρωτικό υγρό που δημιουργεί επικαθήσεις στα τοιχώματα, αποφράσσει τις διόδους και καταστρέφει τον εξοπλισμό. Δεν είναι υπερβολή ότι η αδυναμία αντιμετώπισής της αποτελεί ίσως και το μοναδικό εμπόδιο από την πλήρη εμπορική εφαρμογή της πυρόλυσης – αεριοποίησης της βιομάζας. Κατά την πυρόλυση η πίσσα αποτελεί ορισμένες φορές και το επιδιωκόμενο προϊόν (bio-oil) αλλά άλλοτε όχι. Όταν προορίζεται για χρήση σε μηχανές εσωτερικής καύσης και αεριοστροβίλους πρέπει η περιεκτικότητα σε πίσσα να είναι εξαιρετικά χαμηλή. Το ίδιο ισχύει και για το προϊόν της αεριοποίησης καθώς είτε ως καύσιμο σε αντίστοιχη περίπτωση είτε ως τροφοδοσία σε αντιδράσεις σύνθεσης η περιεχόμενη πίσσα κατά την ψύξη υγροποιείται σχηματίζοντας αερόλυμα (σταγονίδια <1 μm) και μπορεί να καταστρέψει τον εξοπλισμό και να δηλητηριάσει τους καταλύτες. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν αυστηρές προδιαγραφές για την περιεκτικότητα σε πίσσα, αλλά και στερεά, στο ρεύμα εισόδου τέτοιων διατάξεων:

Upper Limits of Biomass Gas Tar and Particulates		
Application	Particulate (mg/Nm ³)	Tar (mg/Nm ³)
Direct combustion	No limit specified	No limit specified
Syngas production	0.02	0.1
Gas turbine	0.1–120	0.05–5
IC engine	30	50–100
Pipeline transport		50–500 for compressor
Fuel cells		<1.0

Source: Data compiled from Milne et al., 1998.

Για τον λόγο αυτό πραγματοποιείται ήδη εκτενής μελέτη και πειραματισμός πάνω στον σχηματισμό και διάσπαση της πίσσας με υποσχόμενα αποτελέσματα από πιλοτικές και μικρής κλίμακας μονάδες.

Παραγωγή πίσσας:

Η πίσσα αρχικώς σχηματίζεται κατά την θέρμανση της βιομάζας και την έναρξη της πυρόλυσης της περί τους 230 C από την θερμική διάσπαση της κυτταρίνης, ημικυτταρίνης και λιγνίνης. Με την έναρξη της πυρόλυσης η βιομάζα μετατρέπεται ταυτόχρονα σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα. Η κινητική των αντιδράσεων αυτών έχει μελετηθεί και έχει αποτυπωθεί εμπειρικά σε αντιδράσεις 1^{ου} βαθμού. Ενδεικτικά για το ξύλο:

CHAR

↑ k_C

WOOD $\xrightarrow{k_L}$ *LIQUID*, $k = k_C + k_L + k_G$

↓ k_G

$$k_j = A_j e^{-E_j/RT}$$

GAS

$$j = C, L, G$$

Οι τιμές των σταθερών των επιμέρους αντιδράσεων είναι:

$$E_G = 152.7 \text{ kJ/mol}, A_G = 4.4 \times 10^9 \text{ s}^{-1},$$

$$E_L = 148.0 \text{ kJ/mol}, A_L = 1.1 \times 10^{10} \text{ s}^{-1},$$

$$E_C = 111.7 \text{ kJ/mol}, A_C = 3.2 \times 10^9 \text{ s}^{-1} \quad (44)$$

Τα πορίσματα των μοντέλων αυτών επιβεβαιώνονται και από πειραματικά δεδομένα. Συνοπτικά προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

~ Με αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται η παραγωγή αερίων και υγρών έναντι στερεών. Αυτό φτάνει σε ένα μέγιστο στους 600 C απ' όπου και δεν μπορούν να παραχθούν άλλα πτητικά από το απανθράκωμα.

~ Η μέγιστη παραγωγή πίσσας είναι 40-55% β/β του ξηρού ξύλου

- ~ Η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη παράγουν κυρίως υγρά ενώ η λιγνίνη αέρια και στερεό απανθράκωμα
- ~ Σε χαμηλές θερμοκρασίες υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ υγρών και απανθρακώματος με το τελευταίο να επικρατεί
- ~ Σε υψηλότερες θερμοκρασίες και ρυθμούς θέρμανσης αυξάνεται η παραγωγή αερίων λόγω ταχύτερης αποπτητικοποίησης της λιγνίνης.

Ωστόσο το καθεστώς αυτό ισχύει μέχρι τους 500 C καθότι με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας ξεκινούν άλλες αντιδράσεις διάσπασης και σύνθεσης των οργανικών αυτών μορίων που οδηγούν σε παραγωγή νέων «ειδών» πίσσας με διαφορετικές ιδιότητες σχηματίζοντας έτσι, χονδρικά, συνολικά 4 κατηγορίες πίσσας:

Οι πρωτεύουσες πίσσες είναι οι προαναφερθείσες, σχηματιζόμενες από την αρχική διάσπαση των τριών κύριων συστατικών της βιομάζας. Προκύπτουν κυρίως από την διάσπαση της κυτταρίνης και είναι λεβογλυκοζάνες, υδροξυακεταλδεύδες και φουρφουράλες. Η ημικυτταρίνη παράγει τις αντίστοιχες ενώσεις και η λιγνίνη κυρίως μεθοξυφαινόλες. Με αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από τους 500 C τα υγρά προϊόντα (πίσσα) λαμβάνουν μέρος στις παρακάτω αντιδράσεις:

GAS

↑ k_{S1}

LIQUIDS

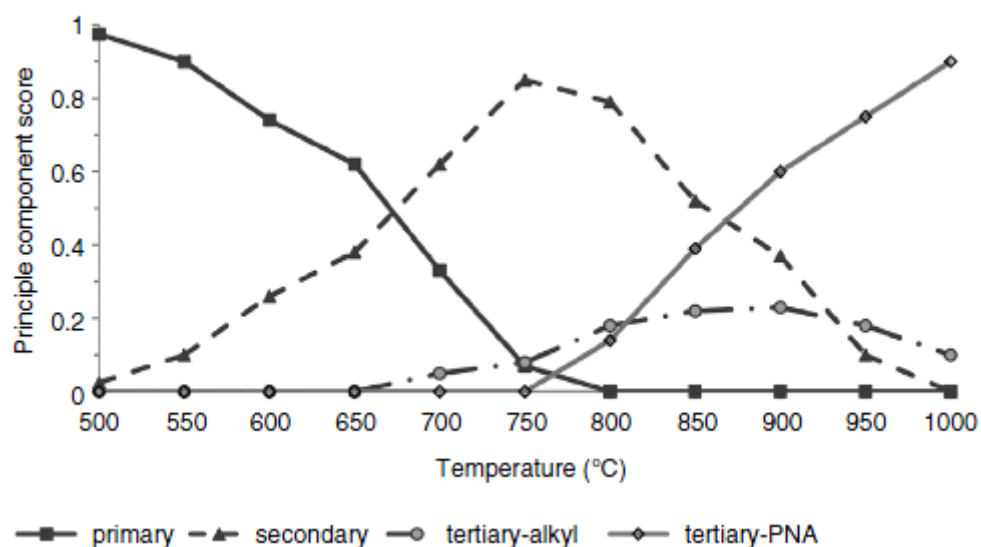
↓ k_{S2}

REFRACTORY-TARS+H₂O

$$k_s = k_{S1} + k_{S2}, k_j = A_j e^{-E_j/RT}, j = S1, S2$$

Μέχρι τους 800 C τα πρωτεύοντα προϊόντα έχουν αντιδράσει πλήρως σχηματίζοντας σταδιακά τις δευτερεύουσες πίσσες. Αυτές είναι φαινολικής και ολεφινικής φύσης και επικρατούν στο εύρος 500-1000 C με μέγιστη συγκέντρωση στους 750 C. Ήδη από τους 650 C έχουν ξεκινήσει παράλληλες αντιδράσεις οι οποίες οδηγούν στον σχηματισμό τριτεουσών πισσών, δηλαδή αλκυλικές ενώσεις, κυρίως μεθυλο-υποκατεστημένα αρωματικά παράγωγα όπως μεθυλ-ακε-ναφθαλίνιο, μεθυλ-ναφθαλίνιο, τολουόλιο και ινδένιο. Ο σχηματισμός των ουσιών αυτής της κατηγορίας συνεχίζεται και μέχρι πάνω από τους 1000 C με μέγιστη παραγωγή περί τους 900 C. Η τέταρτη κατηγορία αφορά προϊόντα διάσπασης και πολυμερισμού των παραπάνω αρωματικών προς σχηματισμό πολύ-αρωματικών υδρογονανθράκων (PolyNuclear Aromatics / PolyAromatic Hydrocarbons, PNA/PAH) χωρίς υποκαταστάτες όπως βενζόλιο, ναφθαλίνιο, ακε-ναφθυλένιο, ανθρακένιο/φαινανθρένιο και πυρένιο. Η σύνθεσή τους ξεκινά από τους 750 C ενώ πάνω από τους 1000 C συνήθως το κυρίαρχο συστατικό της πίσσας είναι το ναφθαλίνιο. Λόγω της σύνθεσης και διατήρησής τους σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες χαρακτηρίζονται ως 'πυρίμαχες'-πίσσες (refractory-tars). Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, πέρα από τους 1200 C οδηγεί σε πλήρη θερμική διάσπαση της πίσσας αλλά και σε σχηματισμό αιθάλης (~0.1μm) που αυτό αντίστοιχα συνεπάγεται άλλες ανεπιθύμητες επιπλοκές. (44)

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω υπάρχει έντονη αλληλοεπικάλυψη του σχηματισμού και εξάλειψης της κάθε κατηγορίας πίσσας. Παραστατικότερα, η ύπαρξή τους στο θερμοκρασιακό εύρος ενός αντιδραστήρα παρατίθεται παρακάτω:



Διακύμανση των κατηγοριών πίσσας αναλόγως της θερμοκρασίας σε χρόνο παραμονής 0.3s (14)

Αναλόγως λοιπόν της θερμοκρασίας, αλλά και του χρόνου παραμονής, στον αντιδραστήρα της θερμοχημικής κατεργασίας πραγματοποιείται σχηματισμός της αντίστοιχης πίσσας με τις εκάστοτε ιδιότητες και σημείο βρασμού.

Αντιμετώπιση της πίσσας:

Δεδομένης λοιπόν της επίδρασης της πίσσας στην εκάστοτε διεργασία πραγματοποιούνται προσεγγίσεις στην αντιμετώπιση της. Οι βασικοί τρόποι επέμβασης στην διεργασία για την ελάττωση της πίσσας χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: την πρόληψη, την in situ διάσπασή της και την αφαίρεσή της σε στάδιο μετά τον αντιδραστήρα. Τα σημεία αυτά συνδυάζονται με συγκεκριμένους τρόπους επέμβασης: την απομάκρυνση, την διάσπαση ή την αναμόρφωση της πίσσας.

Ως πρόληψη ορίζεται η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών για την ελαχιστοποίηση της εξ' αρχής παραγόμενης πίσσας. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα του θερμοκρασιακού προφίλ του αντιδραστήρα και λαμβάνοντας υπ' όψιν και τον χρόνο παραμονής μπορεί να επηρεασθεί η ποσότητα και το είδος της παραγόμενης πίσσας. Σημαντικότερος τρόπος επέμβασης εδώ είναι αυτό καθαυτό το είδος του αντιδραστήρα αεριοποίησης. Οι συνηθέστερες τρεις κατηγορίες είναι σταθερής κλίνης με ανοδική ή καθοδική ροή, και η ρευστοποιημένη κλίνη. Στον σταθερής κλίνης ανοδικής ροής το αέριο ρεύμα περνά από το θερμό σημείο 200-500 C που παράγεται η πίσσα και μετά απομακρύνεται. Έτσι η παραγόμενη πίσσα δεν περνά από την θερμότερη ζώνη με αποτέλεσμα η παραγωγή της να είναι περί τα 100 g/Nm³. Στον σταθερής κλίνης καθοδικής ροής το αέριο ρεύμα κινείται αντίστροφα με αποτέλεσμα η παραγόμενη, και παρασυρόμενη από το αέριο ρεύμα, πίσσα να περνά

από την θερμή ζώνη και να διασπάται φτάνοντας έτσι στην έξοδο μόνο 1 g/Nm^3 . Στον ρευστοποιημένης κλίνης οι συνθήκες είναι πιο ομοιόμορφες και η γενική θερμοκρασία που επικρατεί οδηγούν σε μια αντίστοιχη μέση παραγωγή πίσσας, 10 g/Nm^3 .

Ακόμη και με την επιλογή των καταλληλότερων διατάξεων και συνθηκών η πίσσα ποτέ μπορεί να εξαλειφθεί τελείως. Δοθέντος ότι οι προδιαγραφές για την χρήση του παραγόμενου αερίου μπορεί να απαιτούν μέγιστη συγκέντρωση πίσσας έως και 6 τάξεις μεγέθους χαμηλότερη παρουσιάζεται κατάφορα η ανάγκη επιπρόσθετης μείωσης της περιεχόμενης πίσσας. Οι τεχνικές που υπάρχουν αφορούν είτε διάσπαση της παραχθείσας πίσσας είτε αφαίρεση της από το ρεύμα του αερίου προϊόντος.

Η διάσπαση της πίσσας χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, την απλή διάσπαση και την αναμόρφωση. Η διαφορά μεταξύ τους εντοπίζεται σε διάφορα σημεία. Κατά την αναμόρφωση η πίσσα αντιδρά με ένα μέσο (CO_2 , H_2O , O_2) προς προϊόντα μικρότερου μοριακού βάρους. Εδώ μπορούν να αντιδράσουν όλα τα οργανικά μόρια, από τα βαρύτερα αρωματικά μέχρι και το μεθάνιο. Αναλόγως του μέσου οι αντιδράσεις αναμόρφωσης είναι είτε ενδόθερμες είτε εξώθερμες. Αυτό αντίστοιχα επηρεάζει το θερμικό αλλά και το χημικό ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου ρεύματος μετά την αναμόρφωση.

Κατά την απλή διάσπαση η πίσσα αντιδρά χωρίς κάποιο πρόσθετο μέσο, αλλά απλώς τα βαρύτερα και μεγαλύτερα πολύπλοκα μόρια διασπώνται σχηματίζοντας ελαφρύτερους, μικρότερους απλούς υδρογονάνθρακες. Οι αντιδράσεις αυτές είναι ως επί το πλείστον ενδόθερμες με αποτέλεσμα να μειώνουν το θερμικό περιεχόμενο του ρεύματος αλλά αφήνουν άθικτους ορισμένους μικρούς υδρογονάνθρακες (μεθάνιο, αιθάνιο, προπάνιο κλπ) χωρίς έτσι να υποβιβάζουν έντονα την θερμογόνο δύναμη του μίγματος.

Οι παραπάνω αντιδράσεις συνήθως υποβοηθούνται από καταλύτες και μπορούν να διεξαχθούν τόσο μέσα στον αντιδραστήρα όσο και σε μεταγενέστερο στάδιο μετά την έξοδο του αντιδραστήρα. Το δεύτερο έχει το πλεονέκτημα ότι η καταλυτική κλίνη μπορεί να λειτουργεί σε συνθήκες διαφορετικές από αυτές του αντιδραστήρα και άρα να μεγιστοποιηθεί η απόδοσή της. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το εύρος αλλά και ο τρόπος δράσης των καταλυτικών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

~ Νικέλιο: οι νικελιούχοι καταλύτες χρησιμοποιούνται ευρέως ιδίως στην πετροχημική βιομηχανία για αναμόρφωση των κλασμάτων του πετρελαίου. Είναι εξαιρετικά αποδοτικοί στο εύρος $750\text{-}800 \text{ C}$ και μπορούν να επιτύχουν έως και πάνω από 99% αναμόρφωση της πίσσας. Ωστόσο είναι δηλητηριάζονται από το θείο, το χλώριο και τα αλκάλια, συστατικά που είναι όλα παρόντα στο αέριο ρεύμα αεριοποίησης βιομάζας. Επίσης απενεργοποιούνται από επικαθήσεις άνθρακα και φθείρονται έντονα από την τριβή, συνεπώς και προτιμάται να χρησιμοποιούνται έξω από τον αντιδραστήρα αεριοποίησης, ιδίως όταν είναι ρευστοποιημένης κλίνης, και μετά από κατάλληλο καθαρισμό του ρεύματος προς κατεργασία. Η αποδοτικότερη και ανθεκτικότερη μορφή του νικελιούχου καταλύτη είναι η μονολιθική καθώς έτσι είναι ελάχιστη η φθορά λόγω τριβής και εύκολος ο καθαρισμός των επικαθίσεων. Αυτό όμως βρίσκεται ακόμη σε εργαστηριακή – πιλοτική κλίμακα.

~Δολομίτης & Ολιβίνης: τα δύο αυτά ορυκτά έχουν καταλυτική επίδραση στην διάσπαση της πίσσας και ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την ακριβή χρήση τους. Ο δολομίτης είναι ένα φυσικό ορυκτό σε αφθονία με πολύ χαμηλό κόστος. Αποτελείται κυρίως από ανθρακικά άλατα ασβεστίου και μαγνησίου και γίνεται αποδοτικότερος στην διάσπαση της πίσσας όταν πρώτα ασβεστοποιηθεί. Υπό κατάλληλες συνθήκες (800-900 C) μπορεί και να διασπάσει και πλήρως την πίσσα χωρίς όμως να διασπά τους μικρότερους υδρογονάνθρακες. Η δράση του αποδίδεται στο πορώδες του υλικού και την μεγάλη επιφάνειά του χωρίς όμως να είναι επακριβώς γνωστή. Ωστόσο ο ασβεστοποιημένος δολομίτης είναι εύθρυπτος και παράγει μεγάλη ποσότητα σωματιδιακών ρύπων εάν χρησιμοποιηθεί μέσα στην ρευστοποιημένη κλίνη. Ακόμη απενεργοποιείται έντονα από υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες (950-1000 C @ 25 bar ολική πίεση). Για τον λόγο αυτό προτιμάται να χρησιμοποιείται ως σταθερή κλίνη 'προστασίας' πριν από την καταλυτική κλίνη νικελίου.

Ο ολιβίνης είναι ένα άλλο φθινό ορυκτό που αποτελείται κυρίως από πυριτικά άλατα μαγνησίου και σιδήρου και συναντάται σε κοκκομετρία και πυκνότητα παρόμοια με αυτής της άμμου. Αυτό σε συνδυασμό με την ανθεκτικότητα του στην τριβή το καθιστά ιδανικό για in situ χρήση εντός της ρευστοποιημένης κλίνης. Καθώς δεν είναι πορώδης και έχει πολύ μικρή επιφάνεια σαν υλικό είναι λιγότερο δραστικός από τον δολομίτη (~40%) αλλά σχηματίζει ως και υπο-εξαπλάσια ποσότητα λεπτομερών σωματιδιακών ρύπων. Με θερμική προκατεργασία (με θερμό αέρα στους 900 C για αρκετές ώρες) μπορεί να φτάσει την καταλυτική δράση του δολομίτη. Πρακτικά έχει επιτευχθεί ως και πάνω από 90% μείωση στην πίσσα σε αεριοποιητή με τροφοδοσία βιομάζας και πλήρης καταστροφή στην περίπτωση πλαστικών ως πρώτης ύλης. (45)

~Αλκάλια & αλκαλικές γαίες: ιδιαίτερα τα αλκάλια έχουν δυνατότητα να μειώνουν την πίσσα ακόμη και το μεθάνιο. Η χρήση τους γίνεται με προ-ανάμιξη της βιομάζας πριν την είσοδο στον αντιδραστήρα. Η ανάκτησή τους είναι αδύνατη αλλά είναι τόσο χαμηλό το κόστος που αξιοποιούνται ως καταλύτες μιας χρήσεως. Ωστόσο τείνουν να τήκονται και να συσσωματώνουν την κλίνη καθώς και να αεριοποιούνται (πάνω από τους 600 C) και να δηλητηριάζουν καταλύτες και να δημιουργούν διαβρωτικές επικαθήσεις στον εξοπλισμό όταν ψυχθεί το αέριο ρεύμα. (14)

~ πορώδη σωματίδια/ενεργός άνθρακας/απανθράκωμα: παρότι η φύση τους είναι διαφορετική η δράση τους είναι παρόμοια. Ως πορώδη σωματίδια κατηγοριοποιούνται υλικά όπως ενεργή αλούμινα και ζεόλιθοι. Ο ενεργός άνθρακας αφορά τον κοινό εμπορικό ενεργό άνθρακα και το απανθράκωμα αφορά το στερεό προϊόν της πυρόλυσης. Ο βασικός τρόπος δράσης τους είναι κοινός: το πορώδες του σωματιδίου απορροφά την πίσσα και έτσι αυξάνει τον χρόνο παραμονής της στην κλίνη με αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη διάσπασή της. Τα πορώδη σωματίδια λόγω της μεταλλικής τους φύσης δύναται να έχουν και καταλυτική δράση ενώ το απανθράκωμα της βιομάζας περιέχει αλκάλια που έχουν καταλυτική δράση. Όλα τα παραπάνω έχουν μελετηθεί σε εργαστηριακή και πιλοτική κλίμακα ως σταθερές κλίνες. Συνολικά καλύτερο έχει κριθεί το σενάριο χρήσης του απανθρακώματος ως εξής: η βιομάζα πυρολύεται με στόχο την μεγιστοποίηση του απανθρακώματος (600

C). Κατόπιν το αέριο κλάσμα (πίσσα: 50,000 mg/Nm³) οδηγείται σε αντιδραστήρα αεριοποίησης όπου οι έντονες συνθήκες (1100 C) μειώνουν την πίσσα (500 mg/Nm³). Το αέριο αυτό περνά από σταθερή κλίνη του απανθρακώματος που έχει παραχθεί και εκεί επιτυγχάνεται τελική μείωση της πίσσας σε 5 mg/Nm³. Το σχέδιο αυτό έχει εφαρμοστεί επιτυχώς πιλοτικά σε μονάδα 70 kW_{fuel}. (44)

Μείωση της πίσσας μπορεί να επιτευχθεί και χωρίς την χρήση καταλυτών. Η απλούστερη προσέγγιση αφορά την θερμική διάσπαση της πίσσας. Με απλή θέρμανση του αερίου μίγματος πάνω από τους 1300 C η πίσσα διασπάται και μειώνεται σε επίπεδα της τάξης των 15 mg/Nm³. Στον αντίποδα όμως παράγεται αιθάλη (~3.6 g/Kg ξηρού ξύλου) σωματιδίων μεγέθους ~0.1 μm. Λόγω της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας και της παραγόμενης αιθάλης, που δημιουργεί άλλες επιπλοκές, αυτή η μέθοδος δεν προτιμάται.

Προτιμότερη αυτής παρουσιάζεται η μέθοδος της μερικής οξειδωσης. Αξιοποιώντας ένα οξειδωτικό μέσο (καθαρό οξυγόνο ή αέρα) η πίσσα αντιδρά και στην ουσία αναμορφώνεται. Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν μια αυξομείωση στη συγκέντρωση των επιμέρους συστατικών της πίσσας με τα βαρύτερα (ναφθαλίνιο) να μειώνονται πρώτα. Μείωση όλων των συστατικών παρατηρείται σε $\lambda > 0.6$ (λ : ο λόγος του προσδιδόμενου οξυγόνου προς το στοιχειομετρικά απαιτούμενο για πλήρη καύση). Βελτίωση παρατηρήθηκε κατά την σταδιακή προσθήκη του οξειδωτικού μέσου στον αντιδραστήρα μερικής οξειδωσης της πίσσας. Για εισαγωγή 20% το οξειδωτικού σε δεύτερο στάδιο και θερμοκρασία αντιδραστήρα 830-850 C παρατηρήθηκε μείωση της πίσσας κατά 88% σε τελική ποσότητα 420 mg/Nm³, σε εργαστηριακή κλίμακα. (44)

Ακόμη και με την χρήση όλων των παραπάνω μέσων είναι πιθανό η πίσσα να μην έχει μειωθεί στα απαιτούμενα επίπεδα. Τελευταίος τρόπος αντιμετώπισης είναι ο φυσικός διαχωρισμός της πίσσας από το ρεύμα του προϊόντος. Αυτό συνεπάγεται την απομόνωση καθαρής πίσσας που μετά θέτει θέματα ασφαλούς διαχείρισής της. Να σημειωθεί ότι όσο υψηλότερη η θερμοκρασία σχηματισμού της πίσσας τόσο πιο επικίνδυνη είναι για την ανθρώπινη υγεία (πάνω από 800 C). Το βασικότερο πρόβλημα και εδώ είναι η ιξώδης και κολλώδης φύση της πίσσας. Οι δυνατοί τρόποι διαχωρισμού είναι οι παρακάτω:

~ Υγροί καθαριστές: αφού το αέριο ρεύμα ψυχθεί στους 35-60 C εισέρχεται σε πλυντηρίδα όπου με καταιονισμό το αερόλυμα της πίσσας σχηματίζει μεγαλύτερα σταγονίδια τα οποία παρασύρονται από το νερό. Ωστόσο λόγω της υδροφοβικής φύσης της πίσσας τα αέρια κλάσματα δεν απομακρύνονται. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει πολλές επιπλοκές καθώς η ανάμειξη νερού, σκόνης και πίσσας δημιουργεί ένα υλικό δύσκολο στην διαχείριση. Για τους παραπάνω λόγους έχει μελετηθεί η χρήση οργανικού 'ελαίου' για την έκπλυση του αερίου ρεύματος από την πίσσα. Αυτό έχει την δυνατότητα δέσμευσης και της πίσσας σε αέρια φάση. Επίσης όταν η θερμοκρασία λειτουργίας είναι υψηλότερη από το σημείο υγροποίησης του νερού τότε αποφεύγεται και η παραπάνω επιπλοκή. Η συγκεκριμένη διεργασία έχει μελετηθεί και κατοχυρωθεί με το όνομα OLGA από το Κέντρο έρευνας Ενέργειας της

Ολλανδία (Energy Research center of the Netherlands). Περιλαμβάνει μια στήλη απορρόφησης με ένα ειδικό 'έλαιο' το οποίο οδηγείται κατόπιν σε στήλη απογύμνωσης και η πίσσα επιστρέφεται στον αντιδραστήρα αεριοποίησης για να αντιδράσει εκ νέου προς ωφέλιμα προϊόντα. Η αποδοτικότητα της διάταξης είναι εξαιρετικά υψηλή καθώς στο 'καθαρό' αέριο ρεύμα παρατηρείται υγροποίηση της πίσσας στους -15 C. Ένα τέτοιο ρεύμα παρουσιάζει δυνατότητες ψύξης, συμπύκνωσης, μεταφοράς και χρήσης σε διάφορες διατάξεις χωρίς να δημιουργήσει κανένα πρόβλημα από τα όσα συνεπάγεται η ύπαρξη της πίσσας. Επίσης η διάταξη απορρόφησης και απογύμνωσης δεν δημιουργεί απόβλητα υγρά, το έλαιο ανακυκλώνεται συνεχώς, και δεν πραγματοποιείται ρύπανση. Η συγκεκριμένη μέθοδος αν και εξαιρετικά υποσχόμενη βρίσκεται ακόμη σε πιλοτικό στάδιο και βασικό μειονέκτημα παραμένει το υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας καθώς και η ανταπόκριση σε πολύ υψηλές δυναμικότητες. (46)

~ Υγροί ηλεκτροστατικοί διαχωριστήρες (wet ESPs): ο τρόπος λειτουργίας είναι κοινός με αυτό των κοινών ηλεκτροστατικών διαχωριστήρων, εφαρμογή υψηλής τάσης που φορτίζει τα σωματίδια και τα κάνει να επικάθονται πάνω στα ηλεκτρόδια. Ωστόσο η απομάκρυνση των σωματιδίων της πίσσας από τα ηλεκτρόδια είναι δύσκολη λόγω της κολλώδους φύσης της οπότε και για αυτόν τον λόγο ένα λεπτό φιλμ νερού κυλάει πάνω από τα ηλεκτρόδια και παρασύρει την πίσσα και τα σωματίδια που πάνε να επικαθίσουν. Η αποδοτικότητα είναι υψηλή, απομακρύνονται ως και 99% των σωματιδίων κάτω από 0.1 μm. Αντίστοιχα υψηλό είναι όμως και το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας ενώ υπάρχει πάντοτε και ο κίνδυνος σπινθηρισμών λόγω της υψηλής τάσης με αποτέλεσμα να αποφεύγεται ειδικά στην περίπτωση εύφλεκτων αερίων μιγμάτων όπως το παραγόμενο από την αεριοποίηση αέριο σύνθεσης.

~ Φίλτρα φράγματος: αφορά κάθε είδος φιλτραρίσματος που βασίζεται στην αρχή του κόσκινου/διήθησης (π.χ. σακκόφιλτρα και κεραμικά φίλτρα). Δεν προτιμάται, αν και ωστόσο υπάρχουν επιτυχείς εφαρμογές, καθώς η πίσσα σχηματίζει κολλώδη συνεκτική επικάλυψη που συσσωρευτικά δυσχεραίνει το πέρασμα του αερίου (μεγάλη αύξηση στην πτώση πίεσης) και απομακρύνεται πολύ δύσκολα.

~ Κυκλώνες: και εδώ ο διαχωρισμός της πίσσας είναι ανεπαρκής λόγω του μικρού μεγέθους των σωματιδίων του αερολύματος και πραγματοποιούνται επικαθήσεις σε όλη την επιφάνεια του κυκλώνα (44)

Η πίσσα είναι το τελευταίο εμπόδιο για την εμπορική εφαρμογή της αεριοποίησης της βιομάζας. Όλα τα παραπάνω είναι, είτε λίγο είτε πολύ, αποδοτικές μέθοδοι αντιμετώπισής της, χωρίς όμως να έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε εμπορικό επίπεδο. Ωστόσο αποτελούν ένα ισχυρό οπλοστάσιο που συνδυαστικά και σταδιακά είναι πολύ υποσχόμενο στην ανάπτυξη μιας διεργασίας ικανής για εμπορική εφαρμογή.

Βιοχημικές μέθοδοι:

Οι θερμοχημικές μέθοδοι, όπως μελετήθηκε παραπάνω αξιοποιούν την υψηλή θερμοκρασία και ενίοτε ορισμένα αντιδραστήρια (οξυγόνο ή ατμό) και καταλύτες προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στο επιθυμητό προϊόν.

Αντίστοιχα οι βιοχημικές μέθοδοι αξιοποιούν τις μεταβολικές οδούς μικροοργανισμών προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι αντίστοιχες μεταβολές στην τροφοδοσία με αποτέλεσμα την παραγωγή των προϊόντων. Εδώ οι μικροοργανισμοί μέσα από σωρεία πολύπλοκων και αλληλένδετων αντιδράσεων μεταβολίζουν την πρώτη ύλη σε καύσιμο ύλη ανώτερης ποιότητας. Ωστόσο είναι πολύ απλές διεργασίες καθώς οι πολύπλοκες αντιδράσεις ρυθμίζονται από τους μικροοργανισμούς. Η χρήση ζωντανών οργανισμών όμως παρουσιάζει άλλες προκλήσεις. Απαιτείται ένα σταθερό περιβάλλον με συγκεκριμένες συνθήκες και πρέπει να δοθεί προσοχή στο περιεχόμενο της τροφοδοσίας καθώς μπορεί να δηλητηριαστούν παρουσία τοξικών ή ατροφήσουν λόγω έλλειψης θρεπτικών συστατικών. Σε περίπτωση που απορρυθμιστεί το «οικοσύστημα» της διεργασίας απαιτείται πολύς χρόνος μέχρι την πλήρη αποκατάσταση της λειτουργίας. Ακόμη ο ρυθμός των αντιδράσεων είναι πολύ μικρότερος (έως και τάξεις μεγέθους ολόκληρες) από αυτόν των θερμοχημικών. Αυτό οφείλεται στην φύση των μικροοργανισμών αλλά και, από θερμοδυναμικής – κινητικής σκοπιάς, στις ηπιότερες συνθήκες. Η θερμοκρασία διεξαγωγής των αντιδράσεων, η ορθότερα «ζυμώσεων», δεν υπερβαίνει ποτέ τους 70 C καθώς πέραν αυτού οι οργανισμοί κινδυνεύουν να θανατωθούν. Η απαίτηση χαμηλών θερμοκρασιών και γενικά οι ήπιες συνθήκες είναι ένα βασικό πλεονέκτημα καθώς ελαχιστοποιούνται οι ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας και εκμηδενίζονται οι φθορές και άρα η διακοπή εργασίας προς συντήρηση και τα συνεπαγόμενα κόστη.

Παρότι η τροφοδοσία είναι αρκετά εκλεκτική καθώς απαιτεί βιοαποδομήσιμα και κατά προτίμηση «εύπεπτα» υλικά το βασικότερο πλεονέκτημα είναι η υψηλή απαιτούμενη υγρασία. Αυτό επιτρέπει την κατεργασία μεγάλου κλάσματος των ΑΣΑ, υλικά τα οποία είναι εντελώς ακατάλληλα για τις θερμοχημικές διεργασίες. Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό με την υψηλή απόδοση σε ποιοτικό καύσιμο καθιστούν τις βιοχημικές μεθόδους εξαιρετικά ισχυρό εργαλείο στην παραγωγή ενέργειας από ΑΣΑ. Οι κυριότερες μέθοδοι είναι δύο: η αναερόβια χώνευση και η αλκοολική ζύμωση.

Αναερόβια Χώνευση (dig):

Η αναερόβια χώνευση περιλαμβάνει την βιολογική αποδόμηση οργανικών βιοαποδομήσιμων ουσιών μέσω μικροβιακής δραστηριότητας υπό συγκεκριμένες συνθήκες με βασική προϋπόθεση την απουσία οξυγόνου που οδηγεί σε ανάπτυξη συγκεκριμένων μικροοργανισμών των οποίων οι μεταβολικές οδοί, υπό τις συγκεκριμένες πάντοτε συνθήκες, οδηγούν στην παραγωγή μεθανίου (μεθανιογέννεση). Το παραγόμενο μεθάνιο είναι το πιο απλό αλκάνιο το οποίο έχει και την υψηλότερη θερμογόνο δύναμη ως ανθρακούχο καύσιμο (ανά μονάδα μάζας) με την μικρότερη εκπομπή CO₂ ανά μονάδα ενέργειας. Η αναερόβια χώνευση είναι εδώ και χιλιετίες γνωστή και αξιοποιείται ακόμη και από υποανάπτυκτες χώρες, με πολύ απλοϊκές-εμπειρικές διατάξεις, για την παραγωγή αερίου καυσίμου προς οικιακή χρήση.

Η μελέτη για την εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα και αποδοτικότητα έχει ξεκινήσει εδώ και δεκαετίες και η πρακτική ήδη εφαρμόζεται εκτενέστατα σε διάφορες χώρες. Και μόνο στην ευρωπαϊκή ένωση των 27 υπάρχουν ήδη 9.243 μονάδες. Στην Ελλάδα υπάρχει έντονη δυναμική προς αυτή την κατεύθυνση αλλά οι εν λειτουργία μονάδες αναερόβιας χώνευσης προς παραγωγή ενέργειας είναι συνολικά ισχύος μόνο 40.1 MW (έτος 2010) (47).

Σημαντικό λοιπόν είναι σε αυτή την τάση να δοθεί μία εύστοχη κατεύθυνση ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες και περιορισμούς προκειμένου το αποτέλεσμα να είναι ουσιαστικό και αποδοτικό.

Προϊόντα της αναερόβιας χώνευσης:

Το μοναδικό προϊόν, ενδιαφέροντος, της αναερόβιας χώνευσης είναι το επονομαζόμενο «βιοαέριο». Αποτελεί ένα μίγμα αερίων προϊόντων με κυριότερα συστατικά το μεθάνιο (55-70%) και το διοξείδιο του άνθρακα (30-45%) και σε μικρή περιεκτικότητα άλλα όπως νερό, άζωτο, υδρόθειο και αμμωνία. Η ακριβής τελική σύσταση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες σχετικούς τόσο με την επιλεγόμενη διεργασία όσο και με την σύσταση της πρώτης ύλης. Πέρα από το βιοαέριο, όπου εδώ είναι και το προϊόν ενδιαφέροντος, αποτέλεσμα της διεργασίας είναι και η παραγωγή στερεού υπολείμματος πλούσιου σε ανόργανα άλατα, κατάλληλου προς χρήση ως οργανικό λίπασμα. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσιο ή μετά από κατάλληλη επεξεργασία (διαχωρισμός, ιζηματογένεση, υπερδιήθηση, αντίστροφη όσμωση, stripper) να προσφέρει στερεό λίπασμα, υγρό λίπασμα και νερό άρδευσης.

Το παραγόμενο βιοαέριο αυτούσιο έχει μέση θερμογόνο δύναμη περί τα 22-23 MJ/Nm³. Αυτό οφείλεται στο ότι το πλούσιο σε ενέργεια μεθάνιο είναι αραιωμένο από αδρανές CO₂. Με κατάλληλες τεχνολογίες διαχωρισμού του CO₂, που έχουν αναφερθεί ανωτέρω, είναι δυνατός ο εμπλουτισμός του αερίου σε μεθάνιο και η αναβάθμιση του σε πρότυπο βιομεθάνιο ποιότητας L (89% CH₄) ή ποιότητας H (96% CH₄), βάση της οδηγίας 2003/55/EC, αυξάνοντας την θερμογόνο δύναμη του αερίου πλησιέστερα σε αυτήν του καθαρού μεθανίου (L: 31.9 MJ/Nm³, H: 34.8 MJ/Nm³) (48). Η απόδοση μιας διάταξης μπορεί να κυμαίνεται από 80 έως 130 κυβικά μέτρα ανά τόνο αποβλήτων, ανάλογα με την εκάστοτε αξιοποιούμενη διεργασία. (Το βιολογικό στερεό υπόλειμμα που απομένει μπορεί να αποδώσει 6% στερεό λίπασμα,

20% υγρό λίπασμα και 74% νερό χαμηλό σε άλατα (κατάλληλο για άρδευση) μετά από κατάλληλη κατεργασία) (47). Τα δεδομένα αυτά είναι τουλάχιστον υποσχόμενα και δεδομένων των ενεργειακών αναγκών παροτρύνουν έντονα στην αξιοποίηση αυτής της διεργασίας για παραγωγή ενεργειακών προϊόντων και δη από πρώτη ύλη ΑΣΑ.

Οδοί της αναερόβιας χώνευσης:

Η αναερόβια χώνευση αποτελείται από 4 βασικά στάδια: υδρόλυση, οξεογένεση, ακετογένεση, μεθανογένεση. Η ονομασία του κάθε σταδίου περιγράφει και την αντίστοιχη δράση, της οποίας τα προϊόντα αποτελούν πρώτη ύλη για το επόμενο στάδιο. Τα βιολογικά μακρομόρια (πρωτεΐνες, λιπίδια και υδατάνθρακες) αρχικά διασπώνται σε απλούστερα (αμινοξέα, λιπαρά οξέα και μονοσακχαρίτες). Κατόπιν αυτές οι ουσίες ζυμώνονται από τους μικροοργανισμούς σε πτητικά λιπαρά οξέα των 1-5 ατόμων άνθρακα. Στο επόμενο στάδιο το παραπάνω οξέα μετατρέπονται από βακτηριακές δραστηριότητες σε οξικό οξύ, διοξειδίο του άνθρακα και υδρογόνο. Τέλος, μέσω της ακετοτροφικής, υδρογονοτροφικής και μεθυλοτροφικής μεθανογένεσης τα παραπάνω παράγουν το επιθυμητό μεθάνιο. (49)

Η παραγωγή μεθανίου μέσω αναερόβιας χώνευσης ακολουθεί πάντοτε αυτή τη μεταβολική οδό. Ωστόσο, η διαφοροποίηση σε ορισμένα κομβικά σημεία επηρεάζει σημαντικές παραμέτρους της διεργασίας όπως απόδοση σε αέριο και ρυθμός παραγωγής. Αναλυτικότερα:

- Περιεκτικότητα σε στερεά: η αναερόβια χώνευση είναι μία διεργασία η οποία αρχικά μελετήθηκε και εφαρμόστηκε για την κατεργασία λυμάτων και συγκεκριμένα για την «χώνευση» και σταθεροποίηση των υλών. Στην περίπτωση των λυμάτων η πλειονότητα των οργανικών ενώσεων προς κατεργασία είναι σε υγρή φάση ενώ η περιεκτικότητα σε στερεά είναι περιορισμένη.

Καθώς όμως είναι μια φυσικά προκύπτουσα διεργασία σε συνθήκες ανοξίας (εκτενούς έλλειψης οξυγόνου) παρατηρήθηκε ότι πραγματοποιείται και στις χωματερές και έτσι λήφθηκε σοβαρά υπ' όψιν η προοπτική για την αναερόβια χώνευση στερεών υλικών, που ανταποκρίνεται και στην ανάγκη ορθής διαχείρισης και ενεργειακής εκμετάλλευσης των ΑΣΑ. Καθώς όμως σε ένα στερεό σώμα η ανάπτυξη των μικροοργανισμών και η εκτέλεση των μεταβολικών δραστηριοτήτων τους μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο στην επιφάνειά του, προκύπτει η ανάγκη μελέτης και τροποποίησης του τρόπου αντιμετώπισης της αναερόβιας χώνευσης σε ρεύματα με υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά.

Λόγω του έντονου ενδιαφέροντος για αυτόν τον τομέα υπάρχει διαχωρισμός στις μεθοδολογίες και διατάξεις αναερόβιας χώνευσης πρώτων υλών ανάλογα με την περιεκτικότητα τους σε στερεά. Έτσι λοιπόν υπάρχουν οι εξής κατηγορίες: χαμηλά στερεά (Low Solids, LS): <10%, μεσαία στερεά (Medium Solids, MS): 15-20%, υψηλά στερεά (High Solids, HS): 22-40%. Από τον παραπάνω διαχωρισμό προκύπτει και η αντίστοιχη κατηγοριοποίηση

των διατάξεων αναερόβιας χώνευσης σε υγρής και ξηρής βάσης. Συστήματα με ρεύμα εισόδου περιεκτικότητας στερεών μικρότερης του 15% θεωρούνται υγρής βάσης (wet basis) και ανώτερης, ξηρής βάσης (dry basis) αντίστοιχα.

- Θερμοκρασία χώνευσης: τα πειραματικά δεδομένα και η εμπειρία υποδεικνύουν δύο βέλτιστα εύρη θερμοκρασιών όπου η αναερόβια χώνευση έρχεται σε κατάσταση «ισορροπίας» σε μία «τοπικά μέγιστη» παραγωγικότητα και χωρίζεται αντίστοιχα σε δύο κατηγορίες: η μεσόφιλη και η θερμόφιλη χώνευση.

Μεσόφιλη θεωρείται για εύρος 20-40 C, βέλτιστο 30-35 C, ενώ αντίστοιχα θερμόφιλη για 50-65 C. Παρότι η πρώτη είναι πιο «οικεία» και έχει μικρότερες ενεργειακές απαιτήσεις και απώλειες, είναι γεγονός ότι η δεύτερη συνεπάγεται μικρότερους απαιτούμενους χρόνους παραμονής της βιομάζας στον αντιδραστήρα χώνευσης και άρα υψηλότερη παραγωγικότητα. (49)

- Τρόπος τροφοδοσίας: είναι ήδη γνωστή η ύπαρξη αντιδραστήρων συνεχούς και διαλείποντος έργου. Έτσι και εδώ η τροφοδοσία και η παραλαβή του προϊόντος μπορεί να είναι συνεχής ή και να πραγματοποιείται τροφοδοσία σε «παρτίδες» και η παραλαβή του αερίου να είναι ασυνεχής και με μεταβολές στην παροχή και την σύσταση. Το βασικό πλεονέκτημα των ασυνεχών συστημάτων είναι η απλότητα στην τροφοδοσία των πρώτων υλών. Μετά την φόρτωση του αντιδραστήρα απαιτείται κυρίως ...υπομονή. Μόλις η παραγωγή του αερίου μειωθεί σε επίπεδο μικρότερο του προκαθορισμένου γίνεται εκφόρτωση και φόρτωση του αντιδραστήρα εκ νέου. Αντίθετα στα συνεχή συστήματα η τροφοδοσία πρέπει να ακολουθεί τις συνθήκες ισορροπίας των αντιδράσεων εντός του αντιδραστήρα. Αυτό απαιτεί το ρεύμα εισόδου να είναι «προτυποποιημένο» και όσο το δυνατόν πιο ομοιογενές. Στην περίπτωση αυτών των διατάξεων η τροφοδοσία είναι σε μορφή ομογενοποιημένου πολφού προκειμένου να μπορεί να αντληθεί με ακριβή ρυθμό στον χώρο του αντιδραστήρα ούτως ώστε να μην διαταράξει την επιτευχθείσα ισορροπία αλλά και ώστε να αποφευχθεί ο διαχωρισμός των στερεών από την υγρή μάζα (σε περίπτωση κακής ομογενοποίησης και παρουσίας πολλών αδρανών παρατηρείται εξάφριση της στερεής φάσης που μειώνει την αποδοτικότητα και δημιουργεί προβλήματα στον εξοπλισμό). Κάτι τέτοιο εξασφαλίζει συνεχή και άρα σταθερή, και συνήθως υψηλότερη, παραγωγή, συνεπάγεται όμως πολυπλοκότερο και υψηλότερου κόστους εξοπλισμό καθώς και συνεχή παρακολούθηση της διεργασίας για τον εντοπισμό της οποιαδήποτε ανωμαλίας. (49)

- Στάδια κατεργασίας: καθότι η διεξαγωγή της αναερόβιας χώνευσης γίνεται σε στάδια στα οποία πραγματοποιούνται διαφορετικές αντιδράσεις από διαφορετικούς πληθυσμούς μικροοργανισμών, είναι άμεσα λογικό να εξετασθεί ο διαχωρισμός αυτών των σταδίων σε επιμέρους αντιδραστήρες ούτως ώστε να βελτιστοποιηθεί το κάθε στάδιο ανεξάρτητα, καθώς συνήθως οι εκάστοτε μικροοργανισμοί μεγιστοποιούν την δραστηριότητα τους σε μοναδικές συνθήκες ενώ πολλές φορές δρουν και ανταγωνιστικά οι διαφορετικοί

πληθυσμοί μεταξύ τους.
Ο βασικότερος διαχωρισμός εδώ είναι στις διατάξεις ενός και δύο σταδίων. Στην περίπτωση των δύο σταδίων διαχωρίζεται η φάση της υδρόλυσης και της οξεογένεσης από αυτή της μεθανογένεσης λόγω του ότι οι μεθανοποιητικοί μικροοργανισμοί προτιμούν υψηλότερο pH (7-8.5) από αυτό των υπολοίπων, κάτι που συνεπώς εμποδίζει την βελτιστοποίηση του σταδίου της οξεογένεσης. Επίσης από άποψη κινητικής είναι διαφορετικό το ελέγχον στάδιο της αντίδρασης. Για το πρώτο στάδιο είναι η υδρόλυση των υδατανθράκων ενώ για την μεθανογένεση είναι η κινητική της ανάπτυξης του μικροβιακού πληθυσμού. Άμεσα προκύπτει ότι ο διαχωρισμός της διάταξης σε δύο επιμέρους στάδια μπορεί να ωφελήσει σημαντικά στην αύξηση της παραγωγικότητας. Παρόλα αυτά κάτι τέτοιο συνεπάγεται σαφώς αυξημένο κόστος και πολυπλοκότητα. (49)

Σε όλα τα παραπάνω τίθεται το ζήτημα επιλογής μεταξύ των διαθέσιμων επιλογών ανάλογα με τις υπάρχουσες ανάγκες και περιορισμούς. Υπάρχουν κι άλλες κρίσιμες παράμετροι των οποίων όμως η τιμή δεν εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες αλλά πρέπει πάντοτε να είναι ρυθμισμένες κατά το βέλτιστο δυνατό:

- Πτητικά Στερεά (Volatile Solids, VS): ορίζονται ως το σύνολο των στερεών της πρώτης ύλης μείον αυτό που απομένει μετά από την πλήρη καύση τους. Έτσι διευκρινίζεται το κλάσμα των στερεών που αδυνατούν να μεταβολιστούν από τους μικροοργανισμούς. Στην περίπτωση των ΑΣΑ αυτό είναι κυρίως το κλάσμα των αδρανών (πέτρες, γυαλιά, μέταλλα, άμμο). Τα πτητικά στερεά διαχωρίζονται σε δύο επιμέρους κατηγορίες, τα βιοαποδομήσιμα πτητικά στερεά (Biodegradable Volatile Solids, BVS) και τα «πυρο-κατεργάσιμα» πτητικά στερεά (Refractory Volatile Solids, RVS). Η διαφορά τους έγκειται στην ευχέρεια τους κατά την βιοαποδόμηση. Υλικά όπως πρωτίστως τα λιγνούχα (ξύλα και κλαδέματα) και λιγότερο τα κυτταρινούχα (χαρτικά κλπ) εμπίπτουν στην δεύτερη κατηγορία καθώς δεν μπορούν να διασπαστούν εύκολα από τους μικροοργανισμούς. Η κατεργασία αυτών είναι προτιμότερη με θερμοχημικές μεθόδους για αυτό και χαρακτηρίζονται ως «πυρο-κατεργάσιμα» (refractory). Στην πρώτη κατηγορία κατατάσσονται υλικά όπως υπολείμματα τροφών που είναι πλούσια σε απλούστερους υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λιπίδια. Το καταλληλότερο υπόστρωμα από ΑΣΑ για αναερόβια χώνευση είναι αυτό που έχει υψηλά VS και χαμηλά RVS. (50)
- pH: όπως έχει αναφερθεί κατά την οξεογένεση παράγονται άφθονα οξέα οπότε το pH μπορεί να μειωθεί σε τιμές ακόμη και μικρότερες του 5, ενώ αντίθετα κατά την μεθανογένεση αυξάνεται η συγκέντρωση της αμμωνίας σε επίπεδα που το pH μπορεί να ξεπεράσει και το 8. Για τους παραπάνω λόγους ο διαχωρισμός των δύο αυτών φάσεων σε διαφορετικούς αντιδραστήρες είναι και αποδοτικότερος. Στην περίπτωση πάντως της διεργασίας ενός σταδίου έχει προσδιοριστεί ότι η βέλτιστη τιμή pH ανήκει στο εύρος 5.5-8.5. Αφότου

αρχίσει και η παραγωγή μεθανίου και το σύστημα έρθει σε ισορροπία, το pH συνήθως σταθεροποιείται στο 7.2-8.2. (50)

- Λόγος άνθρακα/αζώτου (C/N ratio): κάθε υλικό έχει μια συγκεκριμένη αναλογία άνθρακα/αζώτου στην σύστασή του. Υλικά καθαρά φυτικά έχουν αυξημένη περιεκτικότητα σε άνθρακα που συνεπάγεται ταχύτατη κατανάλωση του αζώτου και μειωμένη παραγωγή μεθανίου. Υλικά πιο πλούσια σε πρωτεΐνες όπως δημητριακά και πολύ περισσότερο προϊόντα ζωικής προέλευσης έχουν υψηλές περιεκτικότητες σε άζωτο που συνεπάγεται υπερ-παραγωγή αμμωνίας και απαγορευτική αύξηση του pH άνω του 8.5 κατά την αναερόβια χώνευση. Ο βέλτιστος λόγος εντοπίζεται στο 20-30. Συνήθως το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ έχει υψηλότερες τιμές και πρέπει να συμπληρώνεται με λύματα ή ζωική κοπριά. (50)
- Ολικά στερεά/ρυθμό οργανικής φόρτισης (organic loading rate, TS/OLR): τα σύγχρονα συστήματα αναερόβιας χώνευσης έχουν δυνατότητα κατεργασίας ρευμάτων με περιεκτικότητα έως και 40% σε στερεά. Παρόλα αυτά πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν ότι οι βιολογικές δράσεις διεξάγονται στην κυρίως στην υγρή φάση και άρα ο όγκος των στερεών είναι νεκρός όγκος αντιδραστήρα. Αυτό πρέπει να συνυπολογιστεί στον σχεδιασμό του αντιδραστήρα καθώς για δεδομένο όγκο επηρεάζει τον χρόνο παραμονής και μπορεί να μειώσει την απόδοση.
Ο ρυθμός οργανικής φόρτισης είναι ένα μέτρο που προσδιορίζει την δυναμικότητα της βιολογικής μετατροπής. Τροφοδοσία μεγαλύτερη από τον OLR μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση ανασταλτικών ουσιών (π.χ. λιπαρά οξέα) στον πολφό και γενικά σε υπερφόρτωση με αποτέλεσμα να διαταραχθεί η ισορροπία των βιο-πληθυσμών και να μειωθεί η απόδοση της διεργασίας. Η παράμετρος αυτή είναι εξαιρετικής σημασίας στις διατάξεις συνεχούς έργου. Μεγαλύτερος OLR παρουσιάζεται στην περίπτωση υψηλών στερεών. (50)
- Χρόνος παραμονής: είναι ο χρόνος που απαιτείται να παραμείνει μία «στοιχειώδης» μονάδα μάζας στον αντιδραστήρα προκειμένου να περάσει από όλα τα στάδια της αναερόβιας χώνευσης και να αποδώσει την βέλτιστη (με θεώρηση οικονομικής αποτίμησης) ποσότητα βιοαερίου. Στις μεσοφιλικές διεργασίες είναι από 10-40 ημέρες. Στις θερμοφιλικές, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας και συνεπώς του αυξημένου ρυθμού των μεταβολικών δραστηριοτήτων είναι σαφώς μικρότερος. Συγκεκριμένα για θερμοφιλική διεργασία υψηλών στερεών είναι περί τις 14 ημέρες. (50)
- Ανάμιξη: εντός του αντιδραστήρα είναι σημαντικό να υπάρχει ομοιογένεια στο υλικό μέσω συνεχούς ανάδευσης. Αυτό ωφελεί σε πολλές παραμέτρους, καταρχάς επιτρέπει στον μικροβιακό πληθυσμό να έρθει σύντομα σε επαφή με το φρέσκο υλικό και να αρχίσει η διάσπασή του. Επίσης βοηθά στο να διαχέεται σε όλο τον όγκο του αντιδραστήρα ομοιόμορφα η παραγόμενη/προσφερόμενη θερμότητα. Παρόλα αυτά η πολύ έντονη ανάδευση διαταράσσει την ομαλή λειτουργία των μικροοργανισμών. Συνήθως προτιμάται

πιο ήπια ανάδευση, τις οποίας η ακριβής φύση εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του αντιδραστήρα και την περιεκτικότητα σε στερεά. (50)

- Μέγεθος σωματιδίων: στα διαφασικά συστήματα αντιδράσεων μεταξύ ρευστού στερεού υπάρχει μεγάλη παρεμπόδιση στην διάχυση των ουσιών από την ρευστή στην στερεή φάση. Έτσι και εδώ δεδομένου ότι η χώνευση διεξάγεται στην υγρή φάση είναι σημαντικό η στερεή να είναι όσο το δυνατόν πιο λεπτομερής προκειμένου τα σωματίδια να χωνεύονται κατά το ταχύτερο δυνατό, ώστε να υπάρχει και μεγάλη παραγωγικότητα. Για τον λόγο αυτό απαιτείται καλή πολτοποίηση της πρώτης ύλης, πράγμα το οποίο διευκολύνει και τον γενικότερο χειρισμό της διεργασίας.

Καταλήγοντας, πρέπει να σημειωθεί ότι βασικό για την βελτιστοποίηση τις διεργασίας είναι η διατήρηση σταθερών συνθηκών. Λόγω της βιολογικής φύσης της διεργασίας η παραμικρή μεταβολή αναγκάζει τους μικροοργανισμούς να αναπροσαρμοστούν. Κατά την φάση της αναπροσαρμογής στις νέες συνθήκες οι μεταβολικές τους δραστηριότητες μειώνονται και άρα και η παραγωγικότητα της μονάδας. Το όλο σύστημα χαρακτηρίζεται από μία εντονότερη «αδράνεια» από αυτή των θερμοχημικών διεργασιών και έτσι μια μικρή «στιγμιαία» απόκλιση δεν μπορεί να αποκατασταθεί εξίσου γρήγορα. Η επιτυχής και αποδοτική αναερόβια χώνευση βασίζεται σε σταθερή θερμοκρασία, σταθερό pH, και συνεχή, αμετάβλητη τροφοδοσία. (49)

Επιλογή καταλληλότερης οδού της αναερόβιας χώνευσης:

Η ακριβής διεργασία θα προσδιοριστεί από την επιλογή των αρχικών βασικών παραμέτρων σχεδιασμού.

Όσον αφορά την πυκνότητα των στερεών, δεδομένου ότι η προς κατεργασία πρώτη ύλη είναι οργανικό κλάσμα ΑΣΑ η περιεχόμενη σε αυτό υγρασία κυμαίνεται στο 40-70% με το υπόλοιπο μέρος να είναι κυρίως στερεές ουσίες. Προφανώς ένα τέτοιο ρεύμα εμπίπτει στην κατηγορία των υψηλών στερεών (max 40%) και μάλιστα θα χρειαστεί και αραίωση του ρεύματος εισόδου με νερό (ατμός θέρμανσης, φρέσκο νερό, ή ρεύμα απόνερων ανακύκλωσης) προκειμένου να είναι κατάλληλο για την διεργασία. (49)

Σχετικά με την θερμοκρασία λειτουργίας, κρίνεται δόκιμο να προτιμηθεί η θερμοφιλική οδός καθώς εξασφαλίζει μικρότερο χρόνο παραμονής και δεδομένου ότι στόχος είναι, πέρα από την αποδοτικότερη διαχείριση των ΑΣΑ, η παραγωγή ενεργειακών προϊόντων, ο υψηλότερος ρυθμός παραγωγής είναι κάτι το επιθυμητό και η θερμοφιλική διεργασία έχει μικρότερο χρόνο παραμονής και άρα υψηλότερη δυναμικότητα. Οι ενεργειακές απαιτήσεις και η απώλεια ενέργειας που συνοδεύονται από ένα αυξημένο κόστος λειτουργίας αντισταθμίζονται επάξια από τον αυξημένο ρυθμό παραγωγής και δεν υφίστανται αισθητά πιο πολύπλοκα σημεία στην διεργασία απ' ότι με την μεσοφιλική οδό.

Ο τρόπος τροφοδοσίας κρίνεται ότι πρέπει να είναι συνεχής. Παρότι απαιτεί λεπτομερέστερους χειρισμούς από τις batch διεργασίες εξασφαλίζει μία σταθερότητα

στην διεργασία και τον ρυθμό παραγωγής της που συνεπάγεται μια αξιοπιστία ως πηγή ενεργειακών προϊόντων. Επίσης οι συνεχείς διεργασίες έχουν υψηλότερους ρυθμούς παραγωγής από τις ασυνεχείς καθώς η παραγωγή δεν σταματά για άδειασμα-καθαρισμό-φόρτωση του αντιδραστήρα.

Τέλος, περί του αριθμού σταδίων της διεργασίας, παρότι οι διατάξεις αναερόβιας χώνευσης δύο σταδίων παρουσιάζουν υψηλότερες αποδόσεις, η πολυπλοκότητα τους συνεπάγεται μεγάλη δυσχέρεια, αυξημένο κόστος και πιθανότητα συχνότερη εμφάνιση επιπλοκών οπότε και θα προτιμηθεί η διαδικασία ενός σταδίου. Καθώς η ύπαρξη πολλαπλών αντιδραστήρων σε σειρά προσομοιάζει σταδιακά τον αντιδραστήρα εμβολικής ροής, είναι δυνατόν να επιτευχθούν, σε ένα ορισμένο βαθμό, τα πλεονεκτήματα της οδού πολλαπλών σταδίων μέσω ενός αντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης που λειτουργεί κατά το πρότυπο της εμβολικής ροής όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

Τύποι αντιδραστήρων της αναερόβιας χώνευσης:

Λόγω του μεγάλου εμπορικού ενδιαφέροντος της αναερόβιας χώνευσης γίνεται εδώ και δεκαετίες εκτενής εφαρμογή της σε βιομηχανικής κλίμακας μονάδες. Πολλές εταιρίες δραστηριοποιούνται στον κλάδο αυτό και με βάση τις εκάστοτε περιστάσεις, παρόμοια με την ανάλυση παραπάνω, έχουν σχεδιαστεί και οι αντίστοιχες διατάξεις που ανταποκρίνονται καλύτερα και αποδοτικότερα. Οι βασικότερες εξ αυτών είναι:

Process System Name	No. of Plants ¹	Capacity Range (tons/y) ²	No. of Stages		Total Solids Content		Operating Temperatures	
			1	2	< 20%	> 20%	35°C (95°F)	55°C (130°F)
AAT	8	3,000 to 55,000	x		x		x	
ArrowBio	4	90,000 to 180,000		x	x		x	
BTA	23⁴	1,000 to 150,000	x	x	x		x	x
Biocel	1	35,000	x			x	x	
Biopercolat	1	100,000		x		x	x	
Biostab	13	10,000 to 90,000	x		x			x
DBA-Wabio	4	6,000 to 60,000	x		x		x	
DRANCO	17	3,000 to 120,000	x			x		x
Entec	2	40,000 to 150,000	x		x		x	
Haase	4	50,000 to 200,000		x	x		x	x
Kompogas	38	1,000 to 110,000	x			x		x
Linde-KCA/BRV	8	15,000 to 150,000	x	x	x	x	x	x
Preseco	2	24,000 to 30,000						
Schwarting-Uhde	3	25,000 to 87,600		x	x			x
Valorga	22	10,000 to 270,000	x			x	x	x
Waasa	10+	3,000 to 230,000	x		x		x	x

Προδιαγραφές διαφόρων διατάξεων AX (στοιχεία 2008) (49)

Από τις πιο εκτενώς εφαρμοσμένες, κατάλληλες για την συγκεκριμένη περίπτωση κρίνονται οι Dranco, Kompogas και Valorga. Είναι συστήματα ξηρής αναερόβιας

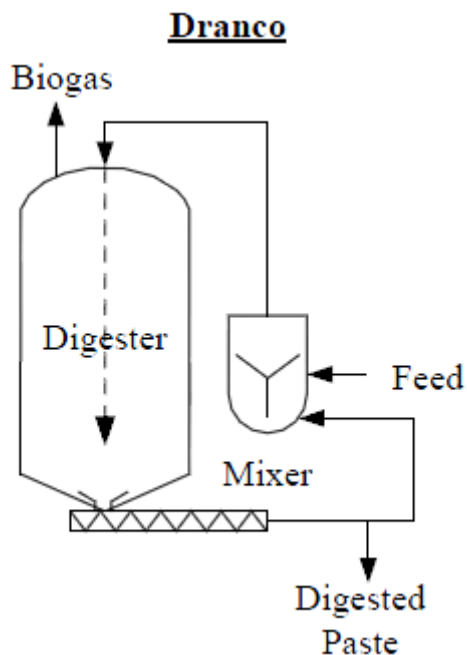
χώνευσης, ενός σταδίου κατάλληλες για θερμοφιλική κατεργασία. Έχουν υψηλή αποδοτικότητα σε βιοαέριο και καλή σταθερότητα στις βιοχημικές αντιδράσεις. Η «πρόκληση» σε αυτού του τύπου τις διατάξεις έγκειται περισσότερο στον χειρισμό, ανάμιξη και άντληση των ρευμάτων υψηλής περιεκτικότητας σε στερεά. Αυτό απαιτεί ικανότερο και ακριβότερο εξοπλισμό, απ' ό,τι των αντίστοιχων διατάξεων υγρής χώνευσης. Αυτό γενικά αντισταθμίζεται από το ότι τα αδρανή υλικά μπορούν να «διαπερνούν» την διεργασία χωρίς να παρεμποδίζουν σημαντικά την διεξαγωγή της χώνευσης και έτσι δεν υπάρχει σημαντική ανάγκη για εξοπλισμό διαχωρισμού των αδρανών από το ρεύμα εισόδου στον αντιδραστήρα. Τέλος λόγω του υψηλού ιξώδους του ρεύματος εισόδου, του ρυθμού φόρτωσης του αντιδραστήρα και της ταχείας υδρόλυσης, η ροή του υλικού στον αντιδραστήρα είναι τύπου εμβολικής ροής. Αυτό συνεπάγεται μηδενική ανάμιξη μέσα στον αντιδραστήρα κάτι που απαιτεί εμβολιασμό εξ αρχής του ρεύματος εισόδου με το τελικό στερεό προϊόν της χώνευσης ούτως ώστε να δοθεί μία αρχική ώθηση στην ανάπτυξη των μικροβιακών πληθυσμών. Η εμβολική ροή όμως και το υψηλό ιξώδες συνεπάγονται και μια τοπική διαφοροποίηση των συνθηκών κατά μήκος του αντιδραστήρα. Αυτό συμβαδίζει με την επιμέρους βελτιστοποίηση των συνθηκών του κάθε βιοχημικού σταδίου της αναερόβιας χώνευσης (υδρόλυση, οξεογένεση, ακετογένεση, μεθανογένεση) κάτι που αυξάνει και την συνολική απόδοση (49).

Dranco:

Η εταιρία Organic Waste Systems εμπορεύεται την κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας διεργασία Dranco (Dry Anaerobic Composting). Αποτελείται από μία κάθετη κυλινδρική δεξαμενή της οποίας η τροφοδοσία γίνεται από την κορυφή. Το υλικό καθώς οδεύει προς τα κάτω, υπό εμβολική ροή χωνεύεται και στον πυθμένα απομακρύνεται από μία κοχλία. Για θερμοφιλική κατεργασία ο υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι περί τις 14 ημέρες. Μέρος του τελικού στερεού προϊόντος της χώνευσης αναμιγνύεται με το εισερχόμενο ρεύμα της τροφοδοσίας για να αυξήσει τον αρχικό μικροβιακό πληθυσμό (υπό ενδεικτική αναλογία 1:6, τροφοδοσία : χωνεμένη ύλη) και το υπόλοιπο οδηγείται σε φιλτρόπρεσσα και παράγεται νερό χαμηλό σε στερεά (~3%) και συμπαγές στερεό υπόλειμμα. Το νερό ανακυκλώνεται για τις ανάγκες αραίωσης του ρεύματος τροφοδοσίας και το στερεό υπόλειμμα κομποστοποιείται υπό αερόβιες πλέον συνθήκες σε ειδικό χώρο που αναδεύεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα για 10-20 ημέρες μέχρι να σταθεροποιηθεί και να είναι κατάλληλο για εφαρμογή ως λίπασμα και εδαφοβελτιωτικό.

Η απόδοση της διεργασίας είναι αρκετά υψηλή. Από δεδομένα από υπάρχουσες μονάδες Dranco (συγκεκριμένα στο Βέλγιο) για ρεύμα εισόδου στον αντιδραστήρα με ρυθμό φόρτωσης 15 kg VS/m³/d και σύσταση 35% κ.β. στερεά εκ των οποίων 55% πτητικά (VS) η παραγωγή του βιοαερίου ήταν 0.468 m³/kg VS (συνολικά 0.103 m³/kg σε υγρή βάση). Η απόδοση αυτή θεωρείται σχετικά μικρή καθώς και η ελάττωση των πτητικών στερεών στην έξοδο του αντιδραστήρα ήταν 65%. Αυτό οφείλεται στο μικρό κλάσμα των βιοαποδομήσιμων πτητικών στερεών (BVS) καθότι μεγάλο μέρος της τροφοδοσίας ήταν υπολείμματα κήπου (75%) και χαρτί (10%). Σε άλλη μονάδα που η τροφοδοσία ήταν 80% υπολείμματα κουζίνας η απόδοση σε αέριο

αυξήθηκε κατά 32% ($0.622 \text{ m}^3/\text{kg VS}$). Συνηθέστερα η τροφοδοσία στις διατάξεις Dranco (θερμοφιλική) είναι περί τα $12 \text{ kg VS}/\text{m}^3/\text{d}$. (49)



Διάγραμμα ροής του αντιδραστήρα Dranco (49)

Valorga:

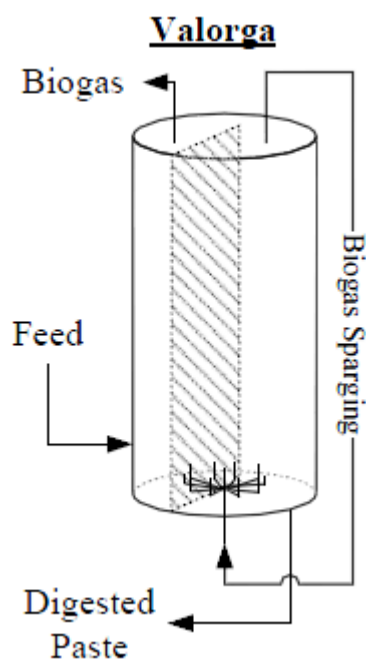
Η εταιρία Waste Recovery Systems, Inc ανέπτυξε την διεργασία Valorga (Steinmüller Valorga process) το 1981 για την κατεργασία οργανικών στερεών αποβλήτων και μπορεί να δεχθεί ΑΣΑ μετά από κατάλληλο διαχωρισμό και απομάκρυνση του δυσχερώς βιοαποδομήσιμου κλάσματος (δηλαδή το RVS). Και αυτή η διεργασία ακολουθεί εμβολική ροή αλλά τροποποιημένη. Ο αντιδραστήρας είναι ένας κάθετος κύλινδρος με έναν ευθύγραμμο εσωτερικό τοίχο που περνά από το κέντρο, το ένα του άκρο είναι σε επαφή με το τοίχωμα του αντιδραστήρα και εκτείνεται στα $2/3$ της διαμέτρου του αντιδραστήρα και σε όλο το ύψος. Η εμβολική ροή εδώ δεν γίνεται κατά τον άξονα του κυλίνδρου αλλά κατά την περιφέρεια. Η τροφοδοσία πραγματοποιείται κοντά στον πυθμένα, στην μία πλευρά του εσωτερικού τοίχου, το υλικό κινείται με εμβολική ροή περιμετρικά και η έξοδος του χωνεμένου προϊόντος γίνεται κοντά στον πυθμένα, από την άλλη πλευρά του τοίχου. Η τροποποίηση της εμβολικής ροής έγκειται στο εξής: στον πυθμένα του αντιδραστήρα είναι τοποθετημένα στόμια από τα οποία διοχετεύεται το παραγόμενο βιοαέριο μέσα στον αντιδραστήρα. Η άνοδος των φυσαλίδων βιοαερίου προκαλεί μία ανάδευση η οποία, προσεγγιστικά, εντοπίζεται μόνο μέσα στον στοιχειώδη όγκο που κινείται αυτούσιος προς την έξοδο του αντιδραστήρα. Η πραγματοποίηση λοιπόν της ανάδευσης κατά αυτόν τον τρόπο, πραγματοποιεί μία ανάμιξη εντός του αντιδραστήρα που εξαλείφει την ανάγκη για προ-«εμβολιασμό» του φρέσκου υλικού

με πληθυσμό μικροοργανισμών από το χωνεμένο προϊόν και διατηρεί τα περιεχόμενα στερεά σε αιώρηση, χωρίς όμως να διαταράσσει, σημαντικά, την εμβολική ροή.

Η τροποποιημένη αυτή εμβολική ροή συνοδεύεται από μικρότερες αποδόσεις. Εμπειρικά τουλάχιστον, η απόδοση εντοπίζεται στο εύρος 0.22-0.27 m³/kg VS ή αλλιώς 0.08-0.16 m³/kg σε υγρή βάση, και με περιεκτικότητα VS 35-60% επί των ολικών. Ο χρόνος παραμονής στον αντιδραστήρα είναι 18-23 ημέρες και το στερεό υπόλειμμα, μετά από διαχωρισμό της πλειονότητας του νερού, απαιτεί αερόβια κομποστοποίηση για 2 εβδομάδες προκειμένου να σταθεροποιηθεί.

Η απόδοση εδώ είναι αισθητά μικρότερη απ' ότι στην διεργασία Dranco σε βαθμό που δεν μπορεί να οφείλεται μόνο στην σύσταση του ρεύματος τροφοδοσίας. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο ότι η ανάμιξη εντός του αντιδραστήρα δεν είναι συνολικά αντάξια της προανάμιξης που γίνεται στην Dranco και ενδεχομένως να είναι αρκετά έντονη ώστε να διαταράσσει ελαφρώς την εμβολική φύση της ροής με αποτέλεσμα να μην μπορεί ο εκάστοτε δραστήριο πληθυσμός μικροοργανισμών να διαμορφώσει τις βέλτιστες συνθήκες τοπικά και άρα να μειώνεται η αποδοτικότητα του μεταβολισμού. Ακόμη περιεκτικότητα σε στερεά μικρότερη από 20% και μικρά σωματίδια δυσχεραίνουν την ομαλή λειτουργία καθώς αποφράσσουν τα ακροφύσια από τα οποία ανακυκλοφορεί το βιοαέριο.

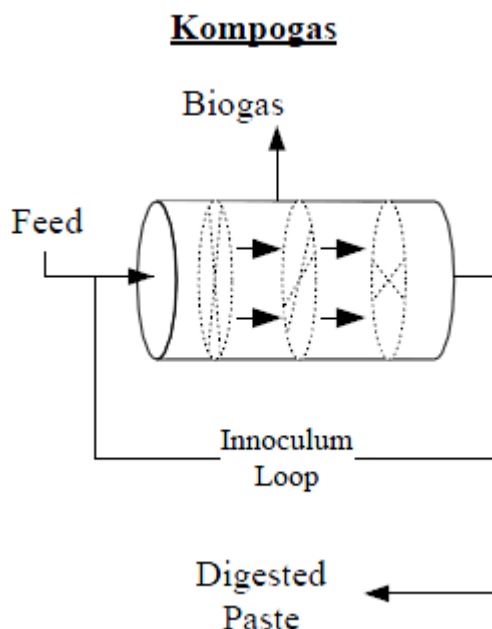
Παρόλα αυτά η διεργασία είναι αρκετά δημοφιλής διότι εξαλείφει την ανάγκη άντλησης και ανάμιξης των πολύ ιξωδών ρευμάτων τροφοδοσίας και προϊόντος χώνευσης που απαιτεί ακριβό εξοπλισμό (αντλίες τσιμέντου), ενέργεια και ενδεχόμενο υψηλότερο κόστος συντήρησης. (49)



Διάγραμμα ροής του αντιδραστήρα Valorga (49)

Kompogas:

Η εταιρία Kompogas AG αξιοποιεί, αντίθετα με τις δύο προηγούμενες, έναν οριζόντιο αντιδραστήρα εμβολικής ροής που είναι εξοπλισμένος με ρότορες προκειμένου να διευκολύνεται η απομάκρυνση του αερίου, η ομογενοποίηση του υλικού και η ομαλότερη προώθηση του προς την έξοδο, κάτι που προαπαιτεί το υλικό στο αντιδραστήρα να έχει υγρασία 72-77%. Οι αντιδραστήρες είναι προκατασκευασμένοι σε δύο μεγέθη και η μεγαλύτερη δυναμικότητα επιτυγχάνεται μέσω λειτουργίας πολλών εν παραλλήλω. Σε θερμοφιλικές συνθήκες ο χρόνος παραμονής είναι 15-20 ημέρες και παραγωγή βιοαερίου 0.11–0.13 m³/kg σε υγρή βάση (χωρίς όμως να υπάρχουν δεδομένα για την σύσταση του ρεύματος εισόδου). Η διεργασία αυτή φαίνεται να προτιμάται για έργα μικρότερης κλίμακας καθώς έχει περισσότερες ενεργές μονάδες από της άλλες δύο, αλλά αισθητά μικρότερης συνολικά δυναμικότητας, (δεδομένα 2008) κάτι που όμως μπορεί να οφείλεται και στην ευκολία εγκατάστασης μιας τέτοιας μονάδας (προκατασκευασμένοι αντιδραστήρες κλπ). (49)



Διάγραμμα ροής του αντιδραστήρα Kompogas (49)

Ενεργειακές απαιτήσεις:

Δεδομένου ότι εδώ οι απαιτήσεις θέρμανσης είναι πολύ μικρές (ανύψωση της θερμοκρασίας της τροφοδοσίας στους 55-60 C) η διεργασία μπορεί άμεσα να αυτονομηθεί καίγοντας μέρος του παραγόμενου βιοαερίου. Επίσης οι απαιτήσεις σε μηχανική ενέργεια (π.χ. άντληση) μπορούν να καλυφθούν εύκολα από μια μικρή μονάδα ηλεκτροπαραγωγής ή άλλη διάταξη (αντλίες σε σύζευξη με κινητήρα εσωτερικής καύσης ή ατμοστρόβιλο)

Επιλογή διεργασίας:

Δεδομένου του υψηλού όγκου οργανικών απορριμμάτων προς κατεργασία (~1,000,000 t/a), εξαρχής η διεργασία Komprogas κρίνεται η λιγότερο κατάλληλη. Από τις δύο απομένουσες, κρίνοντας με βάση την αποδοτικότητα κατ' αρχάς και εν συνεχεία την ευελιξία / εκλεκτικότητα – ανάγκη διαχωρισμού του ρεύματος εισόδου, την πιθανότητα επιπλοκών κατά την λειτουργία και τον ρυθμό παραγωγής (κατ' αντίστροφη αναλογία του χρόνου παραμονής) καταλληλότερη επιλέγεται η διεργασία Dranco (θερμοφιλική).

Ο υψηλός ρυθμός φόρτωσης, ο μικρός χρόνος παραμονής και η αξιοπιστία ανταπόκρισης της διάταξης σε μεγάλο εύρος ποιοτικών συστάσεων του ρεύματος τροφοδοσίας εγγυούνται μια διάταξη που θα λειτουργεί απρόσκοπτα, με ελάχιστα απρόοπτα και θα παράγει συνεχώς και αξιόπιστα το χρήσιμο προϊόν της. Αυτά όλα αντισταθμίζουν την αυξημένη πολυπλοκότητα και ενέργεια που συνεπάγεται η χρήση εξεζητημένου εξοπλισμού άντλησης και ανάμιξης.

Τέλος να σημειωθεί ότι η κατάλληλη σύσταση του ρεύματος προς κατεργασία είναι σημαντική παράμετρος για την σταθερότητα του οικοσυστήματος του αντιδραστήρα. Δεδομένης της σύστασης των βιο-αποδομήσιμων ΑΣΑ είναι πιθανόν να υπάρχει έλλειψη σε μακρο- και μικρο- θρεπτικά συστατικά που είναι απαραίτητα για την αποδοτική λειτουργία και σταθερότητα του βιο-αντιδραστήρα. Η αναπλήρωση των τυχόν ελλειπών θρεπτικών συστατικών μπορεί να γίνει με προσθήκη άλλων ρευμάτων αποβλήτων ή παρασκευασμένων συνθετικών χημικών διαλυμάτων. Ενδείκνυται η χρήση αποβλήτων καθώς τα χημικά διαλύματα, λόγω της καλής διάχυσης των συστατικών, μπορεί να οδηγήσουν σε απευθείας ή συσσωρευτική συγκέντρωση αλάτων σε τοξικά επίπεδα που μειώνει την αποδοτικότητα του αντιδραστήρα. Με την χρήση βιοαποδομήσιμων ΑΣΑ : ζωικής κοπριάς : ιλύος λυμάτων σε αναλογία 14:2:1 βοηθείται η σταθεροποίηση της διεργασίας χώνευσης και αυξάνεται ο ρυθμός παραγωγής βιοαερίου, ως και 30% σε εφαρμοσμένη περίπτωση. (51)

Αλκοολική ζύμωση (ferm):

Από αρχαιοτάτων ετών είναι γνωστή η δυνατότητα παραγωγής αιθανόλης από βιομάζα, και συγκεκριμένα από δημητριακά. Ήδη η πρώτη «μπύρα» παρασκευάστηκε πιθανότατα το 9,500 π.Χ. ενώ επιστημονικές ενδείξεις υπάρχουν από το 3,500-3,100 π.Χ. (52) Τις τελευταίες δεκαετίες όμως, με την αύξηση του ενδιαφέροντος για ενεργειακούς πόρους και ειδικότερα τα τελευταία χρόνια με την ανάγκη για λιγότερο ρυπογόνα καύσιμα, η αιθανόλη απέκτησε ενδιαφέρον και ως καύσιμο. Η ήδη εξελιγμένη επιστήμη και τεχνολογία γύρω από την αλκοολική ζύμωση μέσω ζυμομυκήτων για την παραγωγή αιθανόλης από σακχαρούχες και αμυλούχες ενώσεις έχει οδηγήσει στην, κατά κόρον, δημιουργία μονάδων παραγωγής βιο-αιθανόλης (μαρτυρώντας έτσι την «καταγωγή» της και άρα το μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα κατά την καύση της) από άμυλο καλαμποκιού.

Αυτή η μέθοδος παραγωγής είναι πλέον εύχρηστη αλλά παρουσιάζει ένα βασικό μειονέκτημα: παράγει καύσιμο από βρώσιμη ύλη. Κάτι τέτοιο είναι επίφοβο καθώς, πέρα από το εκτεταμένο πρόβλημα υποσιτισμού και οριακά επαρκούς σίτισης ορισμένων περιοχών, διοχετεύεται μέρος της αγοράς τροφίμων στην αγορά ενέργειας κάτι που αναμένεται να έχει εκτεταμένες οικονομικές, κοινωνικές και πολιτικές συνέπειες. Πιο φρόνιμο λοιπόν είναι η παραγωγή της αιθανόλης από μη-βρώσιμη πρώτη ύλη και πλέον πραγματοποιούνται εκτεταμένες προσπάθειες για την εμπορική παραγωγή αιθανόλης από λιγνο-κυτταρινούχα υλικά βιολογικής προέλευσης, δηλαδή μία (κατά κύριο λόγο) μη-βρώσιμη ύλη. Αυτό παρουσιάζει μεγάλες προοπτικές επιτυχίας καθώς είναι συναφής η φύση των σακχαρινών με την λιγνίνη/κυτταρίνη (14). Κάτι τέτοιο μπορεί άμεσα να συνδυαστεί με την ορθή διαχείριση των ΑΣΑ καθώς μεγάλο κλάσμα τους (συγκεκριμένα για την Αττική) αποτελείται από υπολείμματα βιομάζας και χαρτί, υλικά κατ' εξοχήν λιγνο-κυτταρινούχα.

Η μετατροπή των λιγνο-κυτταρινούχων σε πρώτη ύλη κατάλληλη για μικροβιακή αλκοολική ζύμωση είναι η διεργασία που επιτρέπει την παραγωγή ενεργειακών προϊόντων από κατάλληλο κλάσμα των ΑΣΑ και αυτή κυρίως θα αναλυθεί παρακάτω. Η λιγνίνη και η κυτταρίνη αποτελούν πολυσακχαρίτες οι οποίοι πρέπει να μετατραπούν σε απλούστερα σάκχαρα ώστε να μπορούν να μεταβολιστούν σε αιθανόλη από τους κατάλληλους μύκητες και βακτήρια. Αυτή η αντίδραση μετατροπής τους είναι η υδρόλυση η οποία και μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους βιολογικούς ή χημικούς τρόπους. (14)

Προϊόντα της αλκοολικής ζύμωσης:

Όπως είναι γνωστό το μοναδικό προϊόν αυτής της διεργασίας είναι η αιθανόλη, με κατώτερη θερμογόνο δύναμη 26.9 MJ/Kg (13). Λόγω του βιοχημικού τρόπου παραγωγής της και της φύσης της ως τοξικό παραπροϊόν του μεταβολισμού των μικροοργανισμών η μέγιστη συγκέντρωση στο υδατικό διάλυμα της καλλιέργειας είναι σχετικά μικρή και απαιτείται μεγάλη προσφορά ενέργειας για τον διαχωρισμό της. Η παράμετρος αυτή μπορεί να βελτιωθεί με χρήση συνήθως γενετικά τροποποιημένων μικροοργανισμών, ειδικών για την παραγωγή αιθανόλης, που αντέχουν και σε μεγαλύτερες τελικές συγκεντρώσεις. Παρόλα αυτά, το τελικό προϊόν,

που λαμβάνεται συνήθως με απόσταξη, είναι 95% υδατικό διάλυμα αιθανόλης, που συνεπάγεται ακόμη μικρότερη αξιοποιήσιμη θερμογόνο δύναμη.

Βασικοί οδοί της αλκοολικής ζύμωσης:

Όσον αφορά την αλκοολική ζύμωση καθεαυτή, η μεταβολική οδός είναι λεπτομερώς γνωστή και η μέθοδος – τεχνολογία αξιοποίησης της σε εμπορική κλίμακα είναι ήδη εκτενής και επαρκώς αποδοτική. Η καινοτομία και η πρόκληση εδώ εντοπίζεται στην παραγωγή του υποστρώματος, προς ζύμωση, από λιγνοκυτταρινούχα πρώτη ύλη. Σε αντίθεση με τις συνήθεις διεργασίες αλκοολικής ζύμωσης από σπόρους (συνηθέστερα καλαμπόκι) εδώ εισάγεται το στάδιο μετατροπής της πρώτης ύλης σε απλούστερους υδατάνθρακες ικανούς να μεταβολιστούν από μικροοργανισμούς.

Δεδομένου ότι η πρώτη ύλη εδώ είναι κυρίως βιομάζα αυτό συνεπάγεται ότι η σύσταση της σε ξηρή βάση είναι 40-50% κυτταρίνη και 20-30% ημικυτταρίνη οι οποίες και μπορούν να διασπαστούν σε απλούστερα ζυμώσιμα σάκχαρα. Η λιγνίνη λόγω της δομής και στερεο-μορφής της διασπάται πολύ αργά και από ενεργά σύνολα ενζύμων και μεταβολικών οδών με αποτέλεσμα η ελεγχόμενη και πλήρης διάσπαση της σε χρήσιμα προϊόντα να είναι ανέφικτη στις παρούσες συνθήκες. (53)

Τρεις είναι οι βασικοί τρόποι να επιτευχθεί αυτή η απαιτούμενη μετατροπή:

- Ώξινη υδρόλυση
- Ενζυμική υδρόλυση
- Υδροθερμική υδρόλυση

Ώξινη υδρόλυση:

Σε όξινα διαλύματα τα ελεύθερα πρωτόνια προσβάλλουν τον γλυκοζιτικό δεσμό κάνοντάς τον ευάλωτο σε διάσπαση με αντίδραση ενός μορίου νερού, δοθείσας της κατάλληλης ενέργειας ενεργοποίησης. Έτσι λοιπόν όταν οι κυτταρινικές αλυσίδες θερμανθούν υπό την παρουσία αραιού θειικού οξέως διασπώνται σε μικρότερα μόρια και σε γλυκόζη. Η κρυσταλλική φύση της κυτταρίνης είναι σημαντικό εμπόδιο στην διεξαγωγή αυτής της διάσπασης. Οι άμορφες περιοχές και η ημικυτταρίνη διασπώνται πολύ εύκολα αλλά απαιτούνται δραστικότερες συνθήκες για την αποδοτικότερη διάσπαση της κυτταρίνης. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες και συγκεντρώσεις αυξάνεται και η διάσπαση φτάνοντας έως και το 70% στους 260 C. Σε θερμοκρασίες όμως πέραν των 220 C αυξάνεται ο ρυθμός της πυρόλυσης και άλλων παρά-αντιδράσεων που οδηγούν στον σχηματισμό ανεπιθύμητης πίσσας, ενώ και η γλυκόζη αρχίζει να διασπάται όλο και ταχύτερα σε άχρηστα παραπροϊόντα. Η ικανοποιητική απόδοση σε γλυκόζη 50-60% επιτυγχάνεται περί τους 220 C σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου (batch) ενώ ο χρόνος παραμονής των 6 sec στους 250 C με 1% θειικό οξύ που επιτυγχάνει την μέγιστη απόδοση αποτελεί σημαντική πρόκληση για εφαρμογή της μεθόδου σε εμπορική κλίμακα και δη με αντιδραστήρες δικόχλιους εκβολείς που περιλαμβάνουν ορισμένα εργαστηριακά πειράματα.

Η ημικυτταρίνη αντίθετα διασπάται πολύ πιο εύκολα σε ωφέλιμα σάκχαρα. Σε περιβάλλον οξέως 0.7% και περί τους 160 C η απόδοση μπορεί να φτάσει 85-90%,

για χρόνο παραμονής 10 min, αφήνοντας και ένα υπόλειμμα 85-90% κυτταρίνης εύκολα ενζυματικά κατεργάσιμης για περαιτέρω παραγωγή σακχάρων.

Παρά τις, υπό συνθήκες, καλές αποδόσεις η όξινη υδρόλυση παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα. Το ακριβό κόστος του εξοπλισμού για να είναι ανθεκτικός στις διαβρωτικές συνθήκες του θειικού οξέως, η ανάγκη καθαρισμού του σακχαρούχου διαλύματος από παραπροϊόντα της υδρόλυσης που αναστέλλουν την δράση των μικροοργανισμών που επιτελούν την αλκοολική ζύμωση, η ανάγκη εξουδετέρωσης και διάθεσης του οξέως και τέλος ο ασύμφορα μεγάλος όγκος νερού που απαιτείται συνεπάγονται πολυπλοκότητα και υψηλό κόστος που κάνουν την παραγωγή αιθανόλης από λιγνο-κυτταρινούχα πρώτη ύλη υποσχόμενη και δελεαστική αλλά προς το παρόν εμπορικά ασύμφορη. (53)

Ενζυμική υδρόλυση:

Η διάσπαση της κυτταρίνης επιτυγχάνεται φυσιολογικά από ορισμένους μικροοργανισμούς. Η ικανότητα ενός μικροβίου να μεταβολίζει ή όχι την κυτταρίνη εξαρτάται από την ύπαρξη ή όχι ειδικών ενζύμων που κατηγοριοποιούνται ως κυτταρινάσες. Οι κυτταρινάσες είναι μία ευρεία ομάδα ενζύμων που με διαφορετικό και πολλές φορές συνεργιστικό τρόπο επιδρούν στο μακρομόριο της κυτταρίνης επιτυγχάνοντας την διάσπαση του γλυκοζιτικού δεσμού. Σήμερα, λόγω της επιστημονικής αξίας αυτής της αντίδρασης, υπάρχουν εταιρίες που ασχολούνται με την ανάπτυξη και καλλιέργεια, πολλές φορές αξιοποιώντας βιοτεχνολογικά μέσα, στελεχών με σκοπό την απομόνωση δραστικών ομάδων κυτταρινασών.

Σχετικά με την παραγωγή αιθανόλης από κυτταρινούχα υλικά αρχικά αξιοποιήθηκε η μέθοδος της πρωταρχικής κατεργασίας με κυτταρινάσες και κατόπιν ζύμωσης των παραγόμενων σακχάρων (separate hydrolysis and fermentation, SHF). Η μέθοδος αυτή συνδυαζόμενη με όξινη προ-κατεργασία έδινε υψηλές αποδόσεις με βιώσιμο κόστος διεργασίας. Βασικό μειονέκτημα όμως είναι ότι τα παραγόμενα από την υδρόλυση γλυκόζη και σελλοβιόζη δρουν ως αναστολείς στην δράση της κυτταρινάσης. Αυτό απαιτεί συνεχή διαχωρισμό και απομάκρυνση των προϊόντων ή προσθήκη μεγάλων ποσοτήτων ενζύμου προκειμένου να διατηρείται υψηλός ο ρυθμός παραγωγής, κάτι που συνεπάγεται απαγορευτικά υψηλότερο κόστος.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτή η δυσλειτουργία σχεδιάστηκε η επόμενη μέθοδος που αξιοποιεί την ταυτόχρονη σακχαροποίηση και ζύμωση (simultaneous saccharification and fermentation, SSF) προκειμένου τα παραγόμενα προϊόντα-αναστολείς της ενζυμικής υδρόλυσης να μεταβολίζονται από τους παρόντες μικροοργανισμούς άμεσα σε αιθανόλη, και έτσι να μην μειώνεται η δραστηριότητα του ενζύμου με την εξέλιξη της αντίδρασης. Παρότι η θερμοκρασία εδώ είναι μικρότερη από αυτή της βέλτιστης για την δράση της κυτταρινάσης η διεργασία αποδείχθηκε καλύτερη σε όρους ρυθμού, απόδοσης και συγκέντρωσης αιθανόλης απ' ότι η SHF. Σημειώτέον ότι ο απαιτούμενος χρόνος παραμονής για μέτρια συγκέντρωση αιθανόλης ήταν 5-7 ημέρες. Με την εισαγωγή γενετικά τροποποιημένων μικροοργανισμών ανθεκτικών σε υψηλότερες θερμοκρασίες, χαμηλές συγκεντρώσεις γλυκόζης, υψηλές συγκεντρώσεις αιθανόλης και ικανών να μεταβολίζουν μεγαλύτερη ποικιλία σακχάρων η SSF κατόρθωσε να επιτύχει, θεωρητικά, βιώσιμα κόστη

παραγωγής. Παρόλα αυτά ο κυριότερος τρόπος εργαστηριακής παραγωγής είναι σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου που ενέχουν απαγορευτικές δυσκολίες στην προσαρμογή σε εμπορική κλίμακα. Ελάχιστες είναι οι εργαστηριακές εφαρμογές σε αντιδραστήρες ημιδιαλείποντος και συνεχούς έργου και αυτές απαιτούσαν ειδικά προσαρμοσμένο στις ανάγκες εξοπλισμό και πολύ σπάνια το ρεύμα τροφοδοσίας του αντιδραστήρα περιείχε περισσότερο από 25 g/L κυτταρίνη, κάτι που καθιστά το κόστος για εμπορική παραγωγή απαγορευτικό.

Συνολικά η SSF με όξινη προκατεργασία της κυτταρινούχου ύλης είναι η πιο υποσχόμενη μέθοδος παραγωγής αιθανόλης από κυτταρινούχα υλικά και ο βασικότερος υποψήφιος για εμπορική εφαρμογή στο εγγύς μέλλον. Παρόλα αυτά χρειάζεται μελέτη και βελτίωση της μεθόδου καθώς και ανάπτυξη καταλληλότερων μικροβιακών στελεχών μέχρι να είναι εμπορικά βιώσιμη και ανταγωνιστική. (53)

Υδροθερμική υδρόλυση:

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις διαβρωτικές συνθήκες και το κόστος διαχωρισμού και απόθεσης του θεικού οξέως και το υψηλό κόστος των ενζύμων αλλά την πολυπλοκότητα και αδυναμία προσαρμογής σε εμπορική κλίμακα της SSF και στην προσπάθεια να παρακαμφθούν αυτές οι δυσκολίες μελετήθηκε η υδρόλυση της κυτταρίνης μόνο υπό την επίδραση νερού σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης.

Πρωτότερα επιστημονικά πειράματα έχουν αποδείξει ότι απουσία καταλύτη και μόνο η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να οδηγήσει στην υδρολυτική αποδόμηση της κυτταρίνης. Παρόλα αυτά η υψηλότερη απαιτούμενη θερμοκρασία (215-295 C) είχε έντονη πυρολυτική δράση στην κυτταρίνη και μικρή απόδοση σε γλυκόζη αλλά κυριότερα ο ρυθμός διάσπασης της γλυκόζης σε άχρηστα υπο-προϊόντα ήταν υψηλότερος από αυτόν της υδρόλυσης της κυτταρίνης.

Αξιοποιώντας τις μοναδικές ιδιότητες του υπερκρίσιμου νερού, παρατηρήθηκε ότι πέρα από το κρίσιμο σημείο ο ρυθμός υδρόλυσης αυξάνει παραπάνω από μία τάξη μεγέθους από αυτόν της διάσπασης της γλυκόζης και των λοιπών ολιγοσακχαριτών. Με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται ταχύτερη αύξηση του ρυθμού υδρόλυσης απ' ότι διάσπασης των προϊόντων και έτσι εξασφαλίζοντας μικρό χρόνο παραμονής ήταν δυνατή η παραγωγή ολιγοσακχαριτών καταλληλότερων για αλκοολική ζύμωση. Συγκεκριμένα σε συνθήκες 400 C, 25 MPa, 0.04 s είναι δυνατή η 98% μετατροπή της κυτταρίνης με 75% απόδοση σε ολιγοσακχαρίτες και γλυκόζη.

Τα δεδομένα αυτά είναι ενθαρρυντικά αλλά τα αποτελέσματα είναι καθαρά εργαστηριακά σε αντιδραστήρες ημιδιαλείποντος έργου. Η προσαρμογή των παραπάνω εργαστηριακών συνθηκών σε εμπορική κλίμακα απαιτεί εκτενή μελέτη και ακόμη και αν κριθεί εφικτή το κόστος θα είναι αρκετά υψηλό λόγω ανάγκης για ειδικά κατασκευασμένο για την περίπτωση εξοπλισμό και μεγάλων ενεργειακών αναγκών. (54)

Σύντομη τεχνικο-οικονομική αποτίμηση:

Επί του παρόντος δεν υφίστανται πουθενά μονάδες που να πραγματοποιούν εμπορική παραγωγή αιθανόλης από κυτταρινούχο πρώτη ύλη. Δεδομένου ότι το

κόστος της πρώτης ύλης είναι εξαιρετικά χαμηλό αν όχι μηδενικό, όπως πχ στην περίπτωση των ΑΣΑ, η παραγωγή «κυτταρινικής αιθανόλης» είναι πλέον προτεραιότητα στην ατζέντα της παραγωγής ενέργειας και πολλές κυβερνήσεις χρηματοδοτούν τέτοια προγράμματα. Παρόλα αυτά η γνώσεις επί του θέματος περιορίζουν την δυνατότητα παραγωγής και ακολουθούνται από πολύ υψηλά κόστη παραγωγής.

Το 1979 που πρωτο-εξετάστηκε η εμπορική παραγωγή κυτταρινικής αιθανόλης οι προσαρμογές κλίμακας και οι εκτιμήσεις κατέληγαν σε τελική τιμή πώλησης 3.60\$/gal. Με την πάροδο του χρόνου, την αξιοποίηση της ενζυμικής οδού και την ανάπτυξη εξειδικευμένων μικροβιακών στελεχών και αποδοτικότερων μεθόδων (SSF) ήταν δυνατή η ελάττωση του κόστους παραγωγής και άρα της τιμής πώλησης. Πλέον η καλύτερη εκτίμηση που έχει πραγματοποιηθεί προέβλεπε 1.22 \$/gal. Αυτή η εκτίμηση και πάλι προέκυπτε από χονδρικές εκτιμήσεις προϋποθέτοντας και την αξιοποίηση ειδικού εξοπλισμού. Η εκτιμώμενη τιμή είναι ανταγωνιστική αλλά όχι αρκετά γιατί η τιμή της συμβατικά παραγόμενης αιθανόλης από καλαμπόκι ήταν πολύ χαμηλή αγγίζοντας ακόμα και το 1\$/gal (55) καθιστώντας έτσι την διεργασία μη βιώσιμη οικονομικά.

Παρόλα αυτά με την συνεχώς διακυμαινόμενη αλλά σταθερά αυξανόμενη τιμή της αιθανόλης τα τελευταία χρόνια και την σημερινή τιμή περί τα 2.60\$/gal (56) παρουσιάζεται η ανάγκη επανεκτίμησης της βιωσιμότητας μιας τέτοιας μονάδας. Πέρα από την κυβερνητική προώθηση και χρηματοδότηση και μεμονωμένες εταιρίες αγωνίζονται για την εμπορική εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας αλλά εμποδίζονται από το υψηλό κόστος εγκατάστασης και το μεγάλο ρίσκο ανταπόκρισης της πρωτοπόρας και ποτέ άλλοτε δοκιμασθείσας αυτής τεχνολογίας.

Κεφάλαιο 3^ο: Μελέτη περίπτωσης – Αττική

Ανασκόπηση:

Μέχρι στιγμής έχει αναφερθεί το πρόβλημα της ορθής διαχείρισης των Αστικών Στερεών Αποβλήτων της Αττικής, έχει προσδιοριστεί η ακριβής σύστασή τους και οι περιορισμοί σχετικά με την απόθεση – ανακύκλωση. Ακόμη, έχει αναδειχθεί η ανάγκη παραγωγής ενέργειας από πόρους εναλλακτικούς και ανανεώσιμους, με μεθόδους που μεγιστοποιούν την απόδοση και ελαχιστοποιούν τον αντίκτυπο στο περιβάλλον και την δημόσια υγεία. Ως στόχος έχει τεθεί η ταυτόχρονη ικανοποίηση αυτών των δύο με ελαχιστοποίηση του κόστους και έχουν αναλυθεί και αποτιμηθεί οι διεργασίες που κρίνονται ικανές για την επίτευξη του στόχου αυτού, δηλαδή την παραγωγή ενέργειας ή πρότυπων καυσίμων υλών από τα ΑΣΑ της Αττικής.

Έχοντας πλέον υπ’ όψιν όλες τις κύριες και ανερχόμενες τεχνολογίες μπορεί να γίνει μια εντοπισμένη μελέτη, επικεντρωμένη στην περίπτωση της Αττικής και να εξετασθεί η βιωσιμότητα -λειτουργικότητα αλλά και τα επιμέρους αποτελέσματα συγκεκριμένων σεναρίων σχετικά με την παραγωγή ενέργειας από ΑΣΑ.

Βασικές προϋποθέσεις – παραδοχές:

Κάθε μία διεργασία που αναλύθηκε στο 2^ο κεφάλαιο είχε ιδιαίτερους περιορισμούς ως προς την τροφοδοσία, αξιοποιούσε διαφορετικούς μηχανισμούς και μέσα για την κατεργασία της ύλης και παρήγαγε διαφορετικό προϊόν.

Σχετικά με την τροφοδοσία, η κάθε διεργασία απαιτεί και διαφορετική σύσταση που να ανταποκρίνεται στους περιορισμούς και τις αδυναμίες της. Μέχρι σήμερα η σύσταση της τροφοδοσίας, δηλαδή των ΑΣΑ, είναι εξαιρετικά ετερογενής και ευμετάβλητη πράγμα που οφείλεται στην σύμμεκτη απόρριψη των αποβλήτων. Ο διαχωρισμός των απορριμμάτων με βάση συγκεκριμένες ιδιότητες τους είναι απαραίτητος προκειμένου να είναι αποδοτική η αξιοποίηση τους ως πηγή ενέργειας. Καθώς ο διαχωρισμός των σύμμεκτων ΑΣΑ απαιτεί εξοπλισμό και κατανάλωση ενέργειας αλλά και δεν είναι κατά το επιθυμητό αποδοτικός κρίνεται απαραίτητη η διαλογή στην πηγή και λαμβάνεται ως προϋπόθεση.

Προκειμένου να σχεδιαστούν διεργασίες που έχουν εμπορική και ανταγωνιστική απόδοση σε ενέργεια, από ΑΣΑ, πρέπει η πρώτη ύλη να είναι η βέλτιστη δυνατή. Ένα κλάσμα αμιγές ως προς συγκεκριμένη ιδιότητα, ή τουλάχιστον με ελάχιστες ανεπιθύμητες προσμίξεις, δεν μπορεί να επιτευχθεί με κανενός είδους διαχωρισμό παρά μόνο με διαλογή στην πηγή. Η διαλογή στην πηγή αποφεύγεται καθώς σχετίζεται με την συνείδηση και τις συνήθειες των ανθρωπογενών συνόλων που παράγουν και απορρίπτουν τα στερεά απόβλητα πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει και μικρός έλεγχος στην τήρησή-επιτυχία της. Εδώ θεωρείται ως βασική προϋπόθεση, ειδάλλως πρέπει να αναπτυχθεί ένα εξαιρετικά αποδοτικό σύστημα διαχωρισμού των σύμμεκτων ΑΣΑ που συνεπάγεται κατανάλωση χρόνου, χρημάτων και ενέργειας

δυσανάλογα προς την δράση που πρέπει να ληφθεί προκειμένου να κινητοποιηθούν οι πολίτες και να πραγματοποιείται ορθά η διαλογή στην πηγή.

Καθώς το πώς ακριβώς θα επιτευχθεί ο διαχωρισμός των επιμέρους κλασμάτων των ΑΣΑ ξεφεύγει από τα όρια αυτής της μελέτης, απλώς θα θεωρηθεί εφικτός και η σύσταση των κλασμάτων ως αμιγής προς την επιθυμητή ιδιότητα. Χάρην πρακτικότητας όμως και ολιστικής μελέτης θα αναφερθούν ορισμένα βασικά σημεία. Ο προτεινόμενος τρόπος σύστασης των ρευμάτων προς κάθε διεργασία είναι μέσω της διαλογής στην πηγή σε τρία ρεύματα (η δικαιολόγηση αυτής της επιλογής ακολουθεί στην συνέχεια): οργανικά υψηλής υγρασίας (άνω του 30-40%, δηλαδή κυρίως υπολείμματα τροφίμων), οργανικά χαμηλής υγρασίας (χαρτί, πλαστικό, ξύλο, υπολείμματα κηπευτικών δραστηριοτήτων κ.ά.) και ανακυκλώσιμα (γυαλί και μέταλλα). Η συλλογή των ανακυκλώσιμων αφορά άλλη μονάδα και ούτως ή άλλως απαιτεί διαφορετικό δίκτυο οχημάτων. Επομένως η μέχρι σήμερα απόρριψη των σύμμεικτων στους πράσινους κάδους αντικαθίσταται από ανάγκη ενός απλού διαχωρισμού και απόρριψη σε δύο κάδους. Αυτό δεν εμπεριέχει μεγάλη δυσκολία και πολυπλοκότητα για τους πολίτες. Επίσης πλέον η συσσώρευση των απορριμμάτων ανά κάδο υποδιπλασιάζεται καθώς η ίδια παραγόμενη μάζα απορριμμάτων διοχετεύεται σε δύο κάδους. Με τον τρόπο αυτό δεν απαιτείται αύξηση της συχνότητας των δρομολογίων των απορριματοφόρων οχημάτων καθώς η συλλογή τους μπορεί να γίνεται πιο αραιά και άρα εκ περιτροπής ημερησίως (εδώ υπάρχει μια επιφύλαξη καθώς δεν είναι γνωστό αν η διήμερη παραμονή των βιοαποδομήσιμων υλικών στον κάδο θα προκαλέσει πρόκληση οσμών και άρα πρέπει να ληφθούν μέτρα για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού). Συνεπώς μοναδικό έξοδο επένδυσης κρίνεται η ανάγκη διπλασιασμού των κάδων απορριμμάτων, κόστος σαφώς μικρότερο από την κατασκευή εξίσου αποδοτικής μονάδας διαχωρισμού σύμμεικτων ΑΣΑ.

Η εξασφάλιση της ορθής διαλογής στην πηγή και η αποφυγή της «νόθευσης» των περιεχομένων των κάδων με μη κατάλληλα απορρίμματα βασίζεται κυρίως στην συνείδηση των πολιτών. Καθώς δεν είναι εφικτός ο έλεγχος κατά την στιγμή της απόρριψης (επιτήρηση κάθε κάδου) πρέπει να βρεθεί άλλη μέθοδος τήρησης του κανόνα. Βασικότερος τρόπος για την επίτευξη αυτού είναι η εξοικείωση και δημιουργία συνήθειας από μικρή ηλικία, μέσω παραδειγματισμού και εκπαίδευσης των παιδιών. Άπαξ και τονιστεί η σημασία και το οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό όφελος στα νεαρά άτομα της κοινωνίας και καταστεί μέρος της κουλτούρας και καθημερινή δραστηριότητα ο διαχωρισμός των ΑΣΑ τότε και θα τηρηθεί και θα διαδίδεται στις νεότερες γενιές που ακολουθούν. Προς το παρόν όμως η ανταμοιβή και η ποινή μπορούν να αποτελέσουν ισχυρά κίνητρα για τον πολίτη ώστε να πραγματοποιεί διαχωρισμό των απορριμμάτων και ξεχωριστή απόρριψη. Καθώς πλέον τα ΑΣΑ αποτελούν πρώτη ύλη, κάτι που συνήθως μια μονάδα πληρώνει για να αποκτήσει, ένα μικρό οικονομικό όφελος μπορεί να αποδίδεται στον «ρυπαίνοντα» που την παράγει σε κατάλληλη μορφή. Αντίστοιχα σε περίπτωση που το κάθε ρεύμα «ρυπαίνεται» από ακατάλληλα υλικά θα μπορεί να επιβαρύνεται οικονομικά ο «ρυπαίνων ...ακατάλληλα».

Απαιτούνται ορισμένες διευκρινήσεις πριν την κατάλληλη μορφοποίηση για πρακτική εφαρμογή του μέτρου αυτού. Η παραγωγή ενέργειας από ΑΣΑ μεταξύ των άλλων παρουσιάζει και το προτέρημα ότι η πρώτη ύλη είναι ένα ευτελές υλικό χαμηλού κόστους. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί οικονομικό κίνητρο για την ορθή διαλογή του, προκειμένου αυτό να είναι ικανό και για το μέγεθος του πληθυσμού της Αττικής, προκύπτει ένα μεγάλο σημαντικό, ίσως και καθοριστικό, έξοδο για την μονάδα – επιχείρηση. Προς στιγμήν εφαρμόζεται μια οικονομική χρέωση (πάγια) στον κάθε πολίτη για την απαιτούμενη διαχείριση των απορριμμάτων που παράγει. Η οικονομική αυτή επιβάρυνση μπορεί πλέον να μετακινηθεί, ολοκληρωτικά ή εν μέρει, στην επιχείρηση που αξιοποιεί τα ΑΣΑ ως πρώτη ύλη πλέον. Έτσι λοιπόν σε περίπτωση που η σύσταση του ρεύματος είναι εντός προδιαγραφών και άρα οι πολίτες έχουν μεριμνήσει για την σωστή απόθεση των απορριμμάτων τους θα μπορεί να πραγματοποιείται μια μερική επιστροφή του τέλους που καταβάλουν για την διαχείριση των απορριμμάτων τους. Ο έλεγχος για τον κατάλληλο διαχωρισμό και διάθεση θα μπορεί να γίνεται δειγματοληπτικά ανά απορριμματοφόρο. Γνωρίζοντας ποιο απορριμματοφόρο εξυπηρετεί ποια γειτονιά ανάλογα με το αποτέλεσμα του ελέγχου θα κρίνεται και αν οι κάτοικοι της γειτονιάς αυτής θα επιβραβευσθούν με την επιστροφή του τέλους διαχείρισης που καταβάλουν ή όχι.

Σημαντικό είναι ότι οι διεργασίες παραγωγής ενέργειας έχουν μια ευελιξία ως προς την σύσταση της τροφοδοσίας και άρα οι «προσμίξεις» είναι ανεκτές μέχρι ενός βαθμού. Επομένως και ο έλεγχος της σύστασης κρίνεται αναγκαίος μόνο αν η πρώτη ύλη ως έχει κριθεί εκτός προδιαγραφών. Δεδομένης της απλότητας του διαχωρισμού («υγρά» και «ξηρά» οργανικά) και του μικρού αλλά αισθητού κινήτρου αναμένεται ότι μπορούν εύκολα να τηρηθούν οι προδιαγραφές στην σύσταση των περιεχομένων των δύο κάδων.

Ακόμη δεν υπολογίζεται ο διαχωρισμός του χαρτιού και του πλαστικού που απαιτείται από την Ευρωπαϊκή Οδηγία να ανακυκλωθούν. Αυτά προφανώς και μπορούν να απορριφθούν στους κάδους ανακύκλωσης με το μέταλλο και το γυαλί και να διοχετευτούν προς ανακύκλωση. Δεν λαμβάνεται όμως υπ' όψιν ο διαχωρισμός τους καθώς για τα υλικά αυτά είναι προτιμότερο να ανακυκλώνονται ενεργειακά παρά υλικά. Η ανακύκλωση του χαρτιού είναι γνωστόν ότι αποτελεί μια ενεργοβόρα διεργασία, παράγει χαμηλότερης ποιότητας χαρτί και δεν προστατεύει την χλωρίδα καθώς τα δέντρα που αξιοποιούνται για την πρωτογενή παραγωγή χάρτου είναι δέντρα καλλιεργούμενα ειδικά για αυτόν τον σκοπό. Επίσης τα πλαστικά απαιτούν εκτενή καθαρισμό, είναι δύσκολο να διακριθούν και να απορριφθούν χωριστά ή να διαχωριστούν εκ των υστέρων, και καταπονούνται πολύ από την θερμομηχανική κατεργασία κατά την ανακύκλωσή τους σε νέα προϊόντα με αποτέλεσμα υποβιβασμό των ιδιοτήτων τους και παραγωγή ανεπιθύμητων παραπροϊόντων στο παραγόμενη υλικό. Για τον λόγο αυτό πρέπει να αναθεωρηθεί η ανάγκη υλικής ανακύκλωσης αυτών των υλικών και να προτιμηθεί η ενεργειακή ανακύκλωσή τους.

Σχετικά με το παραγόμενα προϊόντα των διεργασιών, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αυτά ακολουθούν μια ευρεία κατανομή: μπορεί να είναι

απευθείας θερμότητα, ή καύσιμα στερεά, υγρά και αέρια με επιμέρους διαφορετική χημική σύσταση, θερμογόνο δύναμη και ιδιότητες σχετικά με την καύση. Προκειμένου να τεθεί μια κοινή βάση, ώστε να μπορεί να γίνει και σύγκριση – αποτίμηση εδώ θα θεωρηθεί ότι κάθε διεργασία στοχεύει και καταλήγει στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εντός της μονάδας, η οποία και αποτιμάται οικονομικά.

Οι διεργασίες: Τροφοδοσία – Μέθοδος – Προϊόντα

Πριν από τον σχεδιασμό της διεργασίας κρίνεται αναγκαίο να γίνει μια συνοπτική περίληψη της υπάρχουσας τροφοδοσίας, των μεθόδων κατεργασίας και των παραγόμενων προϊόντων από αυτές καθώς και να επισημανθούν ορισμένες ιδιότητες που κρίνονται καθοριστικές για τις επιλογές που πρόκειται να πραγματοποιηθούν.

Τροφοδοσία:

Όπως αναφέρεται στο 1^ο κεφάλαιο τα ΑΣΑ που είναι διαθέσιμα (βάση ευρωπαϊκών οδηγιών περί ανακύκλωσης) για ενεργειακή ανάκτηση είναι τα εξής:

Είδος – Ομάδα (t/a)	Διαθέσιμα	Από σύνολο	Υγρασία (%)	LHV, dry (MJ/Kg)
Χαρτί A	205,334	513,336	6	18
Πλαστικά A	183,303	236,520	2	34
Ξύλο A	26,372	93,075	20	19
Ζυμώσιμα B	1,018,350	1,018,350	40	13

Οι τιμές υγρασίας - LHV δίνονται κατά προσέγγιση για μια μέση περίπτωση υλικού

Οι δύο ομάδες κλασμάτων ΑΣΑ διαμορφώνονται με βάση ένα σημαντικό κριτήριο: την περιεχόμενη υγρασία. Αυτό συμβαίνει διότι το νερό έχει μεγάλη λανθάνουσα ενέργεια εξάτμισης (2.27 MJ/Kg) πράγμα που σημαίνει ότι κατά την καύση – θέρμανση του υλικού μέρος της ενέργειας αντί να αυξήσει την θερμοκρασία των καυσαερίων θα απορροφηθεί από το νερό για να εξατμιστεί. Η ενέργεια αυτή είναι ανακτήσιμη μόνο κατά την αντίστροφη πορεία, δηλαδή την υγροποίηση του νερού, πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει στις συνθήκες λειτουργίας του καυστήρα – λέβητα. Αντίθετα η υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων συνεπάγεται αποδοτικότερη εναλλαγή θερμότητας και παραγωγή θερμότερου και υψηλότερης πίεσης ατμού, συνεπώς συνολικά μεγαλύτερη απόδοση της μονάδας. Κατά τις θερμοχημικές διεργασίες λοιπόν επιδιώκεται η χαμηλότερη δυνατή παρουσία νερού στα καυσαέρια, άρα και στην τροφοδοσία

Αντίθετα στις βιοχημικές διεργασίες, λόγω του ότι το μέσο κατεργασίας της τροφοδοσίας είναι έμβιοι μικροοργανισμοί απαιτείται υψηλή περιεκτικότητα σε νερό (min 60% κατά βάρος) στον αντιδραστήρα. Ακόμη η πρώτη ύλη πρέπει να είναι όχι μόνο βιοαποδομήσιμη αλλά και «εύπεπτη» ενώ δεν πρέπει να απουσιάζουν θρεπτικά συστατικά και ιχνοστοιχεία. Όλες οι παραπάνω προδιαγραφές καλύπτονται από την κατηγορία «Ζυμώσιμα» που περιλαμβάνει υπολείμματα τροφίμων και παρεμφερή

υλικά τα οποία είναι ακατάλληλα για τις θερμοχημικές μεθόδους, για τους λόγους που προαναφέρθηκαν.

Οι παραπάνω διακρίσεις οδηγούν στον διαχωρισμό των επιμέρους κλασμάτων των ΑΣΑ στις δύο αυτές βασικές κατηγορίες και άρα απαιτούνται τουλάχιστον δύο διαφορετικές διεργασίες για την πλήρη κατεργασία των ΑΣΑ.

Μέθοδος:

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι για να ανακτηθεί η ενέργεια που περιέχεται στα ΑΣΑ είτε απευθείας, είτε έμμεσα. Αυτές είναι:

- Καύση: απευθείας οξείδωση, περίσσεια οξυγόνου, των ΑΣΑ και την άμεση παραγωγή θερμότητας. Απόδοση σε ενέργεια 85-95%. Δυναμικότητα έως 1000 MW_{th}, 500,000 t/a ΑΣΑ/RDF.
- RDF: μηχανική κατεργασία και διαχωρισμός των ΑΣΑ προς παραγωγή στερεού καυσίμου με ανώτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Απόδοση σε μάζα 100%
- Πυρόλυση: θερμική διάσπαση των ΑΣΑ απουσία οξυγόνου και παραγωγή άλλων καυσίμων υλών (αέρια, υγρά ή στερεά). Απόδοση σε μάζα 75-90%
- Αεριοποίηση: μερική οξείδωση των ΑΣΑ με αποτέλεσμα την παραγωγή μονοξειδίου και υδρογόνου. Απόδοση σε ενέργεια περιεχόμενη στο καύσιμο 80-90%. Δυναμικότητα έως 1,000 MW_{th}
- Αναερόβια χώνευση: μικροβιακή κατεργασία των ΑΣΑ απουσία οξυγόνου προς παραγωγή αερίου καυσίμου. Απόδοση σε αέριο 80-130 Nm³/t. Δυναμικότητα έως 270,000 t/a BD-MSW.
- Αλκοολική ζύμωση: μικροβιακή κατεργασία των ΑΣΑ προς μετατροπή των σακχάρων σε αλκοόλη. Μικρής παρούσας εμπορικής αξίας.

Προϊόντα:

Από τα ΑΣΑ και μέσω των παραπάνω διεργασιών παράγονται διάφορα προϊόντα με τις αντίστοιχες θερμογόνες δυνάμεις. Προς σύγκριση δίνονται και μερικά πρότυπα ορυκτά καύσιμα:

Προϊόν	LHV (MJ/Kg)	Προϊόν	LHV (MJ/Nm ³)
<i>Ανθρακίτης</i>	30-32	<i>Φυσικό αέριο</i>	35.21
<i>Ασφαλτούχος ανθ.</i>	20-33	<i>Υδρογόνο</i>	10,738
<i>Λιγνίτης</i>	16.1	1 ^ο γενές αέριο pyg	11
<i>Βενζίνη</i>	42.5	2 ^ο γενές αέριο pyg	20
<i>Diesel</i>	42.6	Αέριο από ατμό gas	10-18
<i>Κηροζίνη</i>	43.0	Αέριο από αέρα gas	4-7
<i>Bio-Diesel</i>	37.5	Αέριο από οξυγ. gas	12-28
ΑΣΑ	11-12	Βιοαέριο	22-23
RDF	12-16	Βιοαέριο χωρίς CO ₂	32-34
Απανθράκωμα pyg	38		
Βιο-πετρέλαιο pyg	13-18		
Αιθανόλη	27		

Για άνθρακες, ΑΣΑ και RDF οι LHV δίνονται «ως λαμβάνονται», σε υγρή βάση. Επίσης το εν προκειμένω RDF που προκύπτει έχει υψηλότερη LHV περί τα 17-33 MJ/Kg (χαρτί – πλαστικό) (57) (58)

Παρούσα ενεργειακή κατάσταση και άμεσο μέλλον:

Η ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα σήμερα φτάνει τα 12.7 GW συνολικά από τις εγκατεστημένες μονάδες της ΔΕΗ Α.Ε. Το 2010 παρήχθησαν κατά την διάρκεια του έτους 45.5 TWh ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγόμενη ενέργεια είναι κατά 80 % ορυκτής προέλευσης (47.22% λιγνίτης, 8.15% πετρέλαιο, 24.53% φυσικό αέριο). η βασική πηγή ενέργειας για την Ελλάδα, ο λιγνίτης, υπάρχει σε αφθονία σε διάφορα γεωλογικά κοιτάσματα στον ελλαδικό χώρο και η παραγωγή του είναι πολύ φθηνή, αλλά προβλέπεται η εξάντλησή του σε 45 χρόνια. (59)

Γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι το κόστος για να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες θα είναι τεράστιο μετά την εξάντληση του λιγνίτη και άρα απαιτείται αποδοτικότερη διαχείρισή του, για επιμήκυνση αυτού του διαστήματος 45 ετών , και παράλληλα άμεση ανάπτυξη νέων διεργασιών παραγωγής ενέργειας από άλλους πόρους (ΑΣΑ).

Προς το παρόν, δεν αξιοποιούνται εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όχι τουλάχιστον σε σημαντικό βαθμό. Μονάδες πυρόλυσης και αεριοποίησης βιομάζας υφίστανται μόνο σε ερευνητική-πλοτική κλίμακα ενώ και η παραγωγή βιοαερίου συναντάται μόνο σε μικρές μονάδες (<1 MWe) συνολικής δυναμικότητας 40.1 MW (7/2010). Μέχρι σήμερα είναι γνωστό ότι υπάρχουν αιτήσεις για χορήγηση άδειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο συνολικής δυναμικότητας (πανελλαδικά) 2,041.4 MW.

Ο ενεργειακός χώρος στην Ελλάδα γενικότερα, και άρα στην Αττική, αντιμετωπίζει μια επερχόμενη εξάντληση των συμβατικών μέσων παραγωγής (λιγνίτης) και υπάρχει μηδενική υποδομή για αξιοποίηση εναλλακτικών πόρων, εκτός από μια τάση αύξησης του βιοαερίου. Η στροφή στην παραγωγή ενέργειας από ΑΣΑ κρίνεται υψηλής και άμεσης σημασίας προκειμένου να αποφευχθεί μια επικείμενη ενεργειακή, οικονομική και κοινωνική κρίση στην Ελλάδα.

Βασικό οικονομικό δυναμικό:

Πέρα από τα όποια περιβαλλοντικά ή ενεργειακά κριτήρια υπάρχουν για την αξιοποίηση της ανάκτησης ενέργειας από ΑΣΑ το βασικό κριτήριο που θα αποφανθεί για την υλοποίηση ή όχι μιας μελέτης και την λειτουργία της αντίστοιχης μονάδας είναι το οικονομικό. Μια πρώτη βασική εκτίμηση και αναγκαία συνθήκη περί βιωσιμότητας – κερδοφορίας είναι η μελέτη του κόστους της πρώτης ύλης και της αξίας του παραγόμενου προϊόντος. Καθώς η ενέργεια είναι ένα «βασικό είδος» (commodity) η κερδοφορία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το κόστος λειτουργίας και την ανταγωνιστική τιμή πώλησης. Η συγκεκριμένη περίπτωση παραγωγής ενέργειας αποκλίνει από την τυπική περίπτωση παραγωγής «βασικού είδους».

Καθότι τα ΑΣΑ είναι απόβλητα η παρουσία και διαχείρισή τους απαιτεί ένα κόστος χωρίς κανένα οικονομικό κέρδος. Ο οποιοσδήποτε δέχεται να αποδεχθεί τα

απορρίμματα αποζημιώνεται για αυτό. Στην περίπτωση των ΧΥΤΑ της Ελλάδας το λεγόμενο «τέλος πύλης» (gate fee) αφορά την αποζημίωση για την κατασκευή, λειτουργία και αποκατάσταση του χώρου του ΧΥΤΑ και είναι περί τα 23.5 €/t ΑΣΑ (60). Συνεπώς το κόστος αγοράς της πρώτης ύλης είναι έσοδο. Αντίστοιχα παρότι το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τον πολίτη από την ΔΕΗ είναι 77.93 €/MWh (ή 94.6 €/MWh για κατανάλωση μεγαλύτερη από 800KWh ανά τετράμηνο) (61), η τιμή πώλησης από έναν παραγωγό ηλεκτρικής ενέργειας στον Διαχειριστή Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε (ΔΕΣΜΗΕ) είναι για «Βιομάζα που αξιοποιείται από σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ ≥ 5 MW (εξαιρουμένου του βιοαποδομήσιμου κλάσματος αστικών αποβλήτων) στα 150 €/MWh και για «[...] Βιοαέρια από Βιομάζα (συμπεριλαμβανομένου και του βιοαποδομήσιμου κλάσματος αποβλήτων), με εγκατεστημένη ισχύ > 2 MW» στα 99.45 €/MWh (62). Αυτό οφείλεται στο ότι η ενέργεια που παράγεται από εναλλακτικές – ανανεώσιμες πηγές πριμοδοτείται ως περιβαλλοντικά φιλική κλπ.

Στην προκειμένη περίπτωση λοιπόν το βασικό οικονομικό δυναμικό « (έσοδα από την πώληση του προϊόντος) μείον (έξοδα από κόστος αγοράς της πρώτης ύλης)» είναι κατάφορα θετικό καθώς και τα δύο αποτελούν πηγή εσόδων. Η επένδυση σε μια τέτοια διεργασία κρίνεται υποσχόμενη και απομένει η συνεκτίμηση του κόστους ενέργειας & νερού και κόστους κεφαλαίου επένδυσης προκειμένου να κριθεί ή όχι η εφικτότητά της. Τα δύο τελευταία όμως εξαρτώνται άμεσα από το είδος και την ακριβή διεργασία και είναι και αυτά που θα σχεδιαστούν στην συνέχεια.

Στην προκειμένη περίπτωση, για την εκτίμηση του κόστους, έχει σημασία ο βαθμός ακρίβειας του σχεδιασμού. Οι εγκαταστάσεις των διεργασιών που μελετούνται χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά μεγάλο μέγεθος, υψηλή τεχνολογία και εκτενή προσαρμογή των προκατασκευασμένων διατάξεων στις ανάγκες της μονάδας, ή και εξ ολοκλήρου κατασκευή από απλά υλικά (π.χ. μεταλλικά φύλλα, σωληνώσεις) όχι μόνο εξαρτημάτων αλλά και ολόκληρων διατάξεων της μονάδας (π.χ. αντιδραστήρες και εναλλάκτες). Η εκτίμηση του κόστους αυτών των μερών είναι σαφώς πιο πολύπλοκη από την έρευνα αγοράς ή τους εμπορικούς δείκτες για προκατασκευασμένο εξοπλισμό (π.χ. αντλίες). Για τον λόγο αυτό και απαιτείται η γνώση του ακριβή σχεδιασμού τους για μια ρεαλιστική εκτίμηση κόστους.

Οι παρακάτω προτεινόμενες διεργασίες δεν είναι σχεδιασμένες με την αντίστοιχη ακρίβεια. Αποτελούν περισσότερο ενδεικτικές και 'λογικές' προτάσεις με βάση την υπάρχουσα τεχνολογία και τεχνογνωσία και όχι ακριβή μηχανικά διαγράμματα ροής. Αυτό οφείλεται στο ότι τόσο η ακριβής φύση των πρώτων υλών όσο και των διεργασιών αλλά και των παραγόμενων προϊόντων δεν είναι δυνατόν να καθοριστούν ακριβώς και εύκολα μόνο με μοντέλα και μαθηματικές εκτιμήσεις. Απαιτείται δειγματοληψία και πειραματισμός. Καθώς εδώ εκτιμάται κατ' αρχάς η εφικτότητα των διεργασιών, η προσπάθεια μιας τόσο ακριβούς μελέτης θα ξέφευγε από τα πλαίσια της μελέτης αυτής.

Σε αντίστοιχο πλαίσιο θα κινηθεί και η οικονομική μελέτη του θέματος καθώς η απόπειρα υπολογισμού της με μεγαλύτερη ακρίβεια θα ήταν άστοχη και συνεπώς

άτοπη. Έτσι τα οικονομικά συμπεράσματα θα προκύψουν κυρίως από εμπειρικά και υπολογιστικά δεδομένα ήδη υπαρχουσών ή παρεμφερών μονάδων. Αυτό θα δώσει μια χονδρική εικόνα της τάξης μεγέθους του κόστους επένδυσης και λειτουργίας και συνεπώς μια γενική εικόνα περί της βιωσιμότητας ή μη της εκάστοτε διεργασίας.

Εντέλει το κίνητρο της παραγωγής ενέργειας από βιομάζα είναι περισσότερο περιβαλλοντικό και κοινωνικό απ' ότι οικονομικό και επομένως η ακριβής κερδοφορία δεν είναι ουσιαστικής σημασίας...

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας:

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θερμότητα πραγματοποιείται μέσω δύο βασικών διατάξεων: τον ατμοστρόβιλο και τον αεριοστρόβιλο. Και στις δύο περιπτώσεις ένα ρευστό μέσο εκτονώνεται σταδιακά προκαλώντας την περιστροφή του στρόβιλου παράγοντας μηχανικό έργο το οποίο μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό μέσω μιας ηλεκτρογεννήτριας. Στην περίπτωση του ατμοστρόβιλου η παραγόμενη θερμότητα αξιοποιείται για την παραγωγή θερμού ατμού υπό πίεση. Ο ατμός είναι το ρευστό που κινεί τον στρόβιλο. Για τον αεριοστρόβιλο, το ρευστό είναι τα καυσαέρια που παράγονται σε έναν θάλαμο καύσης. Κατά την καύση ενός καυσίμου η θερμότητα που εκλύεται αυξάνει την θερμοκρασία και την πίεση των παραγόμενων καυσαερίων τα οποία εκτονώνονται στον αεριοστρόβιλο παράγοντας έργο και κατ' επέκταση ηλεκτρισμό.

Ο βασικός περιορισμός στην χρήση της εκάστοτε διάταξης είναι η φύση του καυσίμου. Στην περίπτωση του ατμοστρόβιλου αρκεί μια πηγή θερμότητας για την θέρμανση του ατμού. Να σημειωθεί ότι η απόδοση σε έργο σύμφωνα με την θερμοδυναμική (κύκλο Rankine) σχετίζεται άμεσα με την θερμοκρασία και πίεση του ατμού στην είσοδο και την έξοδο. Η βελτιστοποίηση της απόδοσης έχει οδηγήσει στην χρήση υπερκρίσιμου ατμού (πάνω από 374 C, 220 bar). Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται με επιτυχία εδώ και μερικές δεκαετίες και παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον υπο-κρίσιμο ατμό. Πρόσφατα έχει αρχίσει και η εφαρμογή ακόμα εντονότερων υπερκρίσιμων συνθηκών του ατμού (ultra supercritical: 570 C, 300 bar) για την επίτευξη ακόμη υψηλότερων αποδόσεων. Αντίθετα ο αεριοστρόβιλος απαιτεί ρευστό καύσιμο, γνωστών προδιαγραφών προκειμένου να αναμιχθεί σε κατάλληλη αναλογία με το οξειδωτικό μέσο και να δημιουργηθούν τα κατάλληλα καυσαέρια που θα κινήσουν τον στρόβιλο. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας – πίεσης λειτουργίας και της μεγάλης ταχύτητας του ρευστού ο σχεδιασμός πραγματοποιείται για συγκεκριμένες συνθήκες και άρα πρότυπο καύσιμο – καυσαέριο.

Η αποδοτικότερη διάταξη είναι ο συνδυασμός αεριοστρόβιλου και ατμοστρόβιλου όπου η θερμότητα για την παραγωγή ατμού παρέχεται από τα θερμά καυσαέρια από την έξοδο του αεριοστρόβιλου. Η τεχνολογία αυτή είναι γνωστή και χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες με τον χαρακτηρισμό «συνδυασμένου κύκλου» (Combined Cycle). Η κυριότερη εφαρμογή είναι σε μονάδες αεριοποίησης ορυκτού στερεού άνθρακα και καύσης του παραγόμενου αερίου σύνθεσης σε αεριοστρόβιλο και παραγωγής ατμού για τον ατμοστρόβιλο από τα καυσαέρια, γνωστές ως μονάδες «ολοκληρωμένης

αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου» (Integrated Gasification Combine Cycle, IGCC).

Σε αριθμητικές τιμές η θερμική απόδοση σε ηλεκτρισμό των παραπάνω τεχνολογιών είναι (κατά μία μέση περίπτωση):

- Υπο-κρίσιμου ατμού – αμοστρόβιλου: 36-38%
- Υπερ-κρίσιμου ατμού – αμοστρόβιλου: 40-42%
- Ultra υπερ-κρίσιμου ατμού – αμοστρόβιλου: 48%
- Συνδυασμένου κύκλου: 60%

Να σημειωθεί ότι το κόστος κατασκευής μιας μονάδας υπερκρίσιμου ατμού σε σχέση με μια μονάδα υποκρίσιμου ατμού είναι μόνο κατά 2% υψηλότερο. (63) (64)

Η βελτιστοποίηση της μονάδας απαιτεί την αξιοποίηση του συνδυασμένου κύκλου και άρα θα ληφθεί υπ' όψιν το ενδεχόμενο μετατροπής της τροφοδοσίας των ΑΣΑ σε αέριο καύσιμο σε κάποιο στάδιο της διεργασίας, όπου αυτό είναι δυνατό.

Η διάταξη ανάκτησης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα αντικείμενο που καθεαυτό χρίζει μελέτης και βελτιστοποίησης. Οι ακριβείς συνθήκες λειτουργίας (παροχή, θερμοκρασία – πίεση ρευστού στην είσοδο – έξοδο του κάθε στροβίλου) που επηρεάζουν και την συνολική απόδοση της μονάδας εξαρτώνται τόσο από τον συγκεκριμένο εκάστοτε εξοπλισμό αλλά και από τις ενεργειακές απαιτήσεις άλλων διατάξεων στην μονάδα (ενεργειακή ολοκλήρωση). Για τον λόγο αυτό στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης δεν θα γίνει επέκταση στις ακριβείς συνθήκες λειτουργίας τους αλλά θα εστιαστεί στην βελτιστοποίηση της θερμικής απόδοσης της μονάδας και της επίτευξης ορισμένων βασικών προδιαγραφών (π.χ. παραγωγή αερίου καυσίμου για την αξιοποίηση αεριοστρόβιλου)

Οι διεργασίες:

Όπως προαναφέρθηκε πραγματοποιείται διαχωρισμός των ΑΣΑ σε δύο ομάδες. Σχετικά με την ομάδα του «εύπεπτο» βιοαποδομήσιμου κλάσματος / «Ζυμώσιμα» η τεχνολογία κατεργασίας θα είναι σαφώς η αναερόβια χώνευση. Συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθεί η διάταξη Dranco καθώς χαρακτηρίζεται από απλότητα και μεγάλη αποδοτικότητα. Το παραγόμενο βιοαέριο θα καθαρίζεται και θα αξιοποιείται σε συνδυασμένο κύκλο. Η υψηλή περιεκτικότητα του βιοαερίου σε CO₂ εισάγει τον προβληματισμό του κατά πόσον ο καθαρισμός του από το αδρανές αυτό αέριο θα αυξήσει την απόδοση της μονάδας και πως μεταφράζεται αυτό σε οικονομικούς όρους. Έτσι λοιπόν θα εξεταστούν δύο σενάρια: α) παραγωγή και καύση βιοαερίου, β) παραγωγή, απομάκρυνση CO₂ και καύση βιοαερίου

Οι λοιπές δύο τεχνολογίες κατάλληλες για κατεργασία οργανικού κλάσματος υψηλής υγρασίας, η αεριοποίηση με υπερκρίσιμο νερό και η αλκοολική ζύμωση είναι σε πολύ πρώιμο στάδιο και η εμπορική τους εφαρμογή είναι ακόμη ανώριμη.

Σχετικά με την ομάδα του ξηρού κλάσματος βιομάζας – πλαστικών απαιτείται εντονότερος προβληματισμός όσον αφορά την τελική επιλογή. Οι διάφορες τεχνολογίες απαιτούν διαφορετικά κεφάλαια επένδυσης, απαιτήσεις λειτουργίας, και

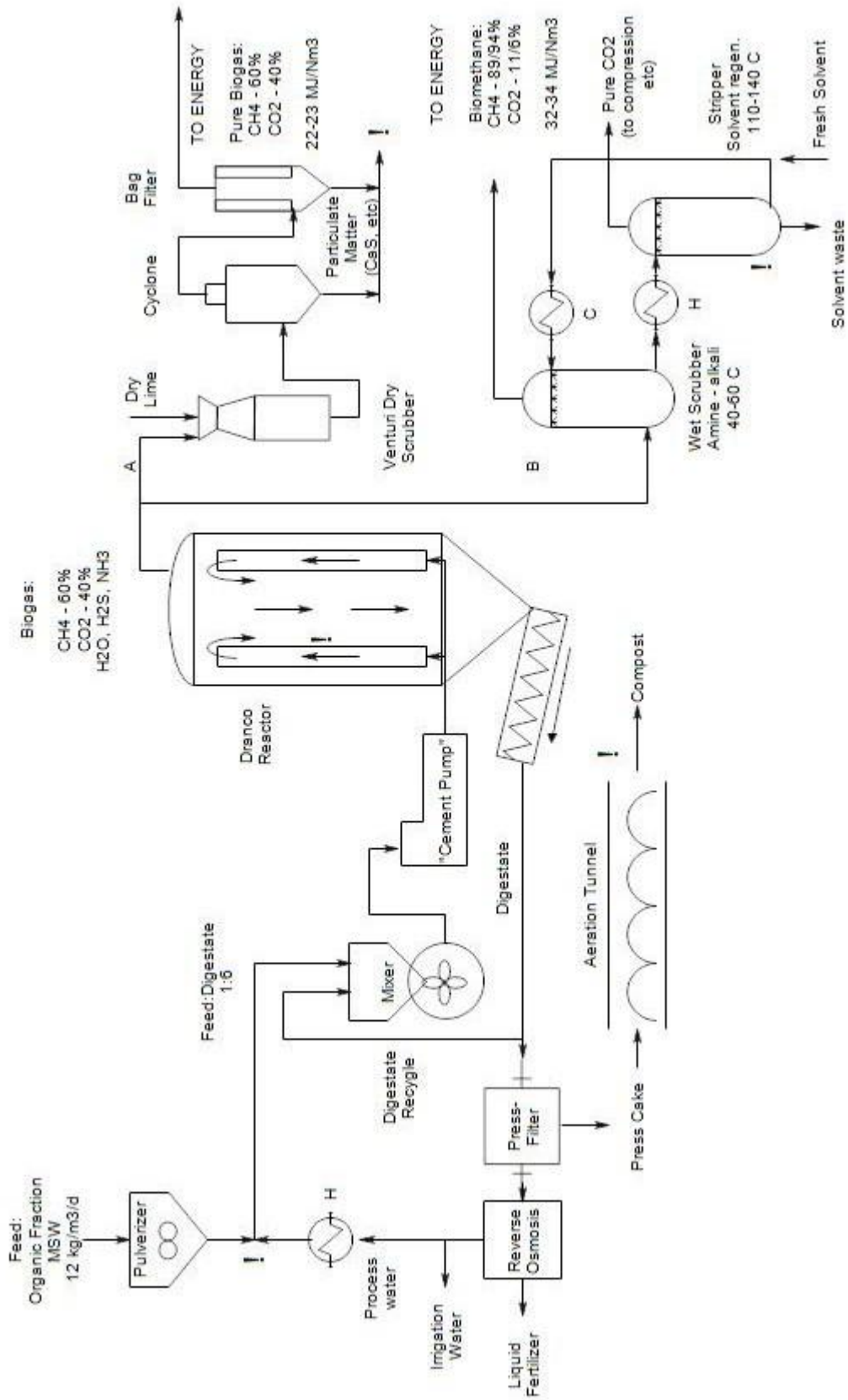
αποδόσεις. Η απλότητα και το μικρό κόστος επένδυσης – λειτουργίας είναι αντιθέτως ανάλογα με την απόδοση της μονάδας. Για τον λόγο αυτό θα εκτιμηθούν διάφορα σενάρια σχετικά με την παραγωγή πρότυπου καυσίμου από τα ΑΣΑ και θα μελετηθούν διάφορες τεχνικές παραγωγής καυσίμου – καύσης – ανάκτησης ενέργειας.

Τα βασικότερα κριτήρια σχεδιασμού θα είναι:

- Απόδοση: η επιτυχής μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια είναι ο βασικός παράγοντας λειτουργίας της κάθε μονάδας. Σε κάθε περίπτωση θα συμψηφίζεται με το απαιτούμενο κόστος επένδυσης – λειτουργίας.
- Εξοικονόμηση: καθώς εδώ το παραγόμενο προϊόν είναι ενέργεια, η ενεργειακή ολοκλήρωση είναι ύψιστης σημασίας ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες και να γίνει η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση του πολύτιμου παραγόμενου προϊόντος.
- Ευελιξία: δεδομένου ότι οι προηγμένες και αποδοτικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας είναι ακόμα υπό συνεχή μελέτη και εξέλιξη με άλλες να είναι πιο καθιερωμένες και άλλες σε πιο πρώιμο στάδιο είναι προτιμότερο η ανάκτηση ενέργειας από ΑΣΑ να ξεκινήσει με μια οικεία και εφαρμοσμένη τεχνολογία αλλά μόλις υπάρξει αρκετή εξοικείωση και δυνατότητα εφαρμογής να επεκταθεί σε μια πιο προηγμένη, που συνοδεύεται και από υψηλότερη συνολική απόδοση. Στον σχεδιασμό πρέπει να κυριαρχεί η έννοια της ευελιξίας καθώς μια ευέλικτη και συνεχώς εξελισσόμενη επιχείρηση που είναι πάντοτε στην αιχμή της προόδου έχει σαφώς μεγαλύτερες προοπτικές βιωσιμότητας και κερδοφορίας.

Αναερόβια Χώνευση

Αυτή η διεργασία αξιοποιείται για να καλύψει το κλάσμα των ζυμώσιμων ΑΣΑ ετήσιας παραγωγής περί το 1,000,000 t. Η τροφοδοσία αποτελείται από υλικά με υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά στερεά και δη βιοαποδομήσιμα (κυρίως από υπολείμματα τροφίμων). Αυτό εγγυάται καλή απόδοση σε βιοαέριο με αναμενόμενη τιμή, τουλάχιστον, περί τα 100 Nm³/t υγρών οργανικών ΑΣΑ. Η περιεκτικότητα σε νερό θα πρέπει να αυξηθεί στο 60%, από 40% που αναμένεται να είναι (χείριστο σενάριο) κατά μέσο. Ο αντιδραστήρας θα είναι τύπου Dranco (λόγω των υψηλών αποδόσεων και της απλότητας – προσαρμοστικότητας). Οι βασικές παράμετροι λειτουργίας θα είναι: οργανικός ρυθμός φόρτωσης 12 kg/m³ (reactor volume)/d, θερμοκρασία 60 C, χρόνος παραμονής 14 d. Η αναμενόμενη σύσταση βιοαερίου αναμένεται να είναι 60% μεθάνιο (λόγω καλής σύστασης τροφοδοσίας). Η παρουσία υδρόθειου απαιτεί τον καθαρισμό του πριν την καύση. Η δυναμικότητα κατεργασίας ΑΣΑ της μονάδας θα είναι 50,000 t/a. Είναι υπο-εικοσαπλάσια από την υπάρχουσα ποσότητα αλλά λόγω της απλότητας κατασκευής η επέκταση της μονάδας με κατασκευή και παράλληλη σύνδεση αντιδραστήρων AX δεν θα κοστίζει πολύ περισσότερο απ' ό τι η εξ' αρχής εγκατάσταση μιας μεγαλύτερης ισοδύναμης μονάδας. Το παραγόμενο βιοαέριο μπορεί να καθαριστεί και καεί αυτούσιο σε αεριοστρόβιλο, ή να αφαιρεθεί το περιεχόμενο CO₂ προς παραγωγή βιομεθανίου με ανώτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά.



Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης διεργασίας.

Περιγραφή της διεργασίας:

Η πρώτη ύλη (ζυμώσιμο κλάσμα ΑΣΑ) υπόκειται σε ελάττωση μεγέθους σε πολτοποιητή μέσω καταπόνησης θλιπτικών και διατμητικών δυνάμεων (κυλινδρόμυλος, λεπιδόμυλος ή άλλο). Κατόπιν αναμειγνύεται με ατμό/θερμό νερό για την επίτευξη της κατάλληλης υγρασίας (60%) και θερμοκρασίας χώνευσης (~60 C). Στη συνέχεια, οδηγείται σε αναμεικτήρα – ζυμωτήρα όπου και αναμειγνύεται με χωνεμένο υπόλειμμα του αντιδραστήρα προς εμβολιασμό με τον κατάλληλο μικροβιακό πληθυσμό. Από εκεί με παλινδρομικές αντλίες οδηγείται στον αντιδραστήρα. Τα προϊόντα του αντιδραστήρα είναι βιοαέριο και στερεό χωνεμένο υπόλειμμα.

Το υπόλειμμα οδηγείται εν μέρει προς ανακύκλωση και το υπόλοιπο περνά από φιλτράρες προς απομάκρυνση του νερού. Το «διήθημα» έπειτα από αναερόβια χώνευση (~2-3 εβδομάδες) είναι κατάλληλο εδαφοβελτιωτικό. Το νερό περιέχει μεγάλη ποσότητα ανόργανων αλάτων και μικροοργανισμών και οδηγείται σε κατάλληλη διάταξη π.χ. υπερδιήθησης - αντίστροφης όσμωσης προς παραγωγή συμπυκνώματος (υγρό λίπασμα) και νερό με μικρή περιεκτικότητα σε άλατα κατάλληλο προς άρδευση – χρήση στην μονάδα.

Το βιοαέριο περιέχει υδρόθειο το οποίο και πρέπει να αφαιρεθεί πριν την οποιαδήποτε καύση. Κατά τον καθαρισμό του βιοαερίου παρουσιάζονται δύο επιλογές. Είτε η απλή απομάκρυνση του υδρόθειου είτε η απομάκρυνση και του CO₂.

Η απλή απομάκρυνση του υδρόθειου παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι δεν χρησιμοποιεί νερό για τον καθαρισμό (και άρα αποφεύγεται η παραγωγή υγρών αποβλήτων προς διαχείριση και ο μικρός εμπλουτισμός του ρεύματος καυσίμου με υγρασία) και δεν απαιτεί θερμότητα. Η δέσμευση του υδρόθειου γίνεται χημικά με προσθήκη ξηρού ασβέστη και έντονη ανάδευση. Το παραγόμενο θειούχο ασβέστιο απομακρύνεται μέσω κυκλώνα και σακκόφιλτρου. Το καθαρό βιοαέριο είναι κατάλληλο προς καύση και οδηγείται σε διάταξη συνδυασμένου κύκλου.

Η παράλληλη δέσμευση του CO₂ απαιτεί την χρήση υδατικών διαλυτών. Αυτό περιλαμβάνει την παραγωγή υγρού απόβλητου και την προσθήκη υγρασίας στο καύσιμο αλλά απομακρύνει και το αδρανές CO₂ αυξάνοντας σημαντικά την θερμογόνο δύναμη. Επίσης απαιτείται η κατανάλωση ενέργειας για την αναγέννηση του διαλύτη. Στην προκειμένη περίπτωση μέσω ενεργειακής ολοκλήρωσης της μονάδας το ενεργειακό κόστος της αναγέννησης εκμηδενίζεται. Η δέσμευση του CO₂ γίνεται σε διάταξη πύργων απορρόφησης – εκρόφησης (αναγέννησης). Ο διαλύτης ρόφησης είναι υδατικό διάλυμα αμινών (MEA, MDEA) με μικρή προσθήκη αλκαλίου. Το αλκάλιο χρησιμεύει στην μόνιμη χημική δέσμευση του υδρόθειου και δεν αναγεννάται αλλά αναπληρώνεται συνεχώς. Αυτό αυξάνει και την διάρκεια ζωής των αμινών. Το καθαρό βιομεθάνιο, πλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποδοτικότερα από το απλό βιοαέριο σε διάταξη συνδυασμένου κύκλου (μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα, υψηλότερη θερμοκρασία καύσης). Λόγω των παραπάνω προτιμάται αυτή η μέθοδος απορρύπανσης του βιοαερίου – παραγωγής βιομεθανίου.

Σχετικά με την γενικότερη αντι-ρύπανση της μονάδας, το παραγόμενο βιομεθάνιο είναι το καθαρότερο καύσιμο. Η απλή δομή του μορίου του μεθανίου δεν ευνοεί την ατελή καύση και παραγωγή σωματιδιακών ρύπων. Η τέφρα απουσιάζει πλήρως όπως

και οι εκπομπές ρύπων του θείου, όταν έχει απομακρυνθεί επιμελώς το υδρόθειο από το καύσιμο. Για τον λόγο αυτό δεν απαιτούνται διατάξεις απορρύπανσης των καυσαερίων. Τα πιθανά οξείδια του αζώτου μπορούν να αντιμετωπιστούν εύκολα με προσθήκη αμμωνίας στα θερμά καυσαέρια.

Σημαντικά σημεία της διεργασίας:

(Σημειωμένα με «!» στο διάγραμμα ροής)

- Ανάμιξη πρώτης ύλης με ατμό – θερμό νερό: η διεργασία απαιτεί την αραίωση της τροφοδοσίας στην κατάλληλη περιεκτικότητα και την διατήρηση της θερμοκρασίας στον αντιδραστήρα. Αυτό πραγματοποιείται με διοχέτευση ατμού στο ρεύμα τροφοδοσίας. Η αραίωση-θέρμανση γίνεται μετά την πολτοποίηση. Η πυκνή πρώτη ύλη συνεπάγεται αποδοτικότερη ελάττωση μεγέθους των σωμάτων που περιέχονται σε αυτή. Αντίθετα η ανάμιξη και η άντληση είναι αποδοτικότερες και απαιτούν μικρότερη ενέργεια για χαμηλότερο ιξώδες ρευστού, κάτι που η αραίωση και η θέρμανση της πρώτης ύλης προκαλούν. Ακόμη η υψηλή θέρμανση της πρώτης ύλης προκαλεί και την παστερίωση/αποστείρωσή της. Αυτό επιτρέπει την παρεμπόδιση εισαγωγής άλλων μικροοργανισμών στον αντιδραστήρα που πιθανώς να δράσουν ανταγωνιστικά παρεμποδίζοντας την ομαλή λειτουργία. Παράλληλα πρέπει να γίνει πριν την ανάμιξη με το υπολείμμα γιατί αν θερμανθεί εκ των υστέρων προκαλεί και την θανάτωση των χρήσιμων μικροοργανισμών του υπολείμματος. Για όλους τους παραπάνω λόγους η αραίωση-θέρμανση πραγματοποιείται στο σημείο αυτό.
- Τροφοδοσία αντιδραστήρα: όπως φαίνεται και στο διάγραμμα ροής, η τροφοδοσία στον αντιδραστήρα πραγματοποιείται μέσω εσωτερικών σωλήνων. Αυτό εξυπηρετεί στην ταυτόχρονη θέρμανση του αντιδραστήρα. Η θερμή τροφοδοσία καθώς διαρρέει μέσω του αντιδραστήρα επιτρέπει την ομοιόμορφη θέρμανση του αντισταθμίζοντας τις μικρές απώλειες ενέργειας στο περιβάλλον. Έτσι αποφεύγεται η χρήση επιπλέον συστήματος θέρμανσης (π.χ. κύκλωμα ή μανδύας θέρμανσης) και αρκεί η καλή μόνωση του αντιδραστήρα.
- Τούνελ κομποστοποίησης: για την σταθεροποίηση του υπολείμματος απαιτείται η αερόβια χώνευση του. Στο αρχικό στάδιο της αερόβιας χώνευσης συνεχίζεται η αναερόβια με αποτέλεσμα την παραγωγή μεθανίου και απελευθέρωσή του στην ατμόσφαιρα. Το μεθάνιο είναι επικίνδυνος ρύπος για το φαινόμενο του θερμοκηπίου (24 φορές ισχυρότερος από το CO₂). Η διαρροή μεθανίου (methane slip) είναι βασικό πρόβλημα στις μονάδες αναερόβιας χώνευσης. Για την αντιμετώπισή της και την αποφυγή επιπλέον διατάξεων δέσμευσης – αντιρύπανσης προτείνεται η αναρρόφηση του αέρα καύσης από τους χώρους αυτούς. Έτσι το διαφεύγον μεθάνιο οδηγείται στον καυστήρα όπου και καταστρέφεται. Αυτό πρέπει να μελετηθεί καθώς η ατμόσφαιρα στον χώρο της κομποστοποίησης περιέχει αυξημένη υγρασία και CO₂ (από την δραστηριότητα

των μικροοργανισμών) και αυτό επηρεάζει τις ιδιότητες του αέρα ως οξειδωτικού μέσου

- Θειούχο ασβέστιο: το παραγόμενο θειούχο ασβέστιο είναι ασταθές και μπορεί εύκολα να υδρολυθεί παρουσία νερού προς παραγωγή υδρόθειου. Αυτό απαιτεί προσοχή κατά τον χειρισμό του. Η φρονιμότερη μέθοδος διαχείρισης είναι η ελεγχόμενη υδρόλυση – παραγωγή υδρόθειου σε πλουσιότερο ρεύμα που μπορεί να κατεργαστεί καταλληλότερα (καταλυτική παραγωγή στοιχειακού θείου / μονάδα στοιχειομετρικής καύσης Claus)
- Ρόφηση CO₂: η χρήση διαλυτών (κυρίως αμίνες) για εμπλουτισμό του βιοαερίου σε μεθάνιο εφαρμόζεται εκτενώς εμπορικά. Προτιμάται από την εναλλακτική PSA με ενεργό άνθρακα που παρουσιάζει εντονότερη διαρροή μεθανίου στην ατμόσφαιρα. Προσοχή πρέπει να δοθεί καθώς το υδρόθειο αντιδρά μη αντιστρεπτά με τις αμίνες του διαλύτη. Για τον λόγο αυτό προστίθεται κατάλληλο αλκάλιο (υδροξείδιο νατρίου ή καλίου) που δεσμεύει μόνιμα το υδρόθειο. Με την διεργασία αυτή παράγονται λύματα που απαιτούν διαχείριση και χρειάζεται και ανανέωση του διαλύτη – αλκαλίου. Επίσης αυξάνεται η υγρασία των καυσίμων αλλά συνολικά αυξάνεται κατά πολύ η θερμογόνο δύναμη λόγω απομάκρυνσης του αδρανούς CO₂, με πολλαπλά οφέλη.

Ισοζύγια μάζας – ενέργειας:

Η μονάδα έχει σχεδιαστεί για δυναμικότητα 50,000 t/a (λειτουργεί σε εβδομαδιαία βάση 16h*5d + 12h*2d = 104h/w). Το ισοζύγιο μάζας διαμορφώνεται ως εξής:

OF-MSW => BioGas + Digestate

TS + H₂O => H-Biomethane + CO₂ + Press cake (→Compost) + Liq.Fert. + H₂O

Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι (καθ' υπόθεση) η πρώτη ύλη έχει υγρασία 40%, η παραγωγή βιοαερίου είναι 100 Nm³/t πρώτης ύλης, με περιεκτικότητα κ.β. 60% CH₄, 40% CO₂ και άρα πυκνότητας 1.22 kg/Nm³ (H-Biomethane: 0.77 kg/Nm³) και το χωνεμένο υπόλειμμα είναι κ.β. 6% στερεό οργανικό υπόλειμμα, 20% υγρό συμπυκνωμένο λίπασμα και 74% νερό διεργασίας/άρδευσης. Για μια μονάδα δυναμικότητας 50,000 t/a (962 t/w, 9.25 t/h) αυτά μεταφράζονται σε

	TS	H ₂ O	H-BM	CO ₂	PC	LF	H ₂ O
t/a	30,000	20,000	3,813	2,287	2,634	8,780	32,486

Για την δεδομένη ποιότητα βιομεθανίου η ετήσια ογκομετρική παραγωγή είναι 4.95*10⁶ Nm³, με θερμογόνο δύναμη 34.8 MJ/Nm³. Εξομοιώνοντας την κατανάλωση του βιοαερίου και την παραγωγή ηλεκτρισμού σε ολόημερη, καθημερινή, για όλο το έτος βάση προκύπτει η θερμική ισχύς της μονάδας: 5.46 MW_{th}. Με ανάκτηση θερμότητας 95% και απόδοση ηλεκτροπαραγωγικής διάταξης 60% η ηλεκτρική ισχύς της μονάδας είναι 3.12 MW_e.

Η ποσότητα αυτή είναι πολύ μικρή (0.17 %) σε σχέση με τις 2 θερμοηλεκτρικές μονάδες της ΔΕΗ Α.Ε. που καλύπτουν την Αττική, συνολικής ισχύος 1,932 MW_e.

Πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν όμως ότι η εκτίμηση παραγωγής βιοαερίου είναι πολύ αυστηρή (ελάχιστη τιμή). Σε παρόμοιες εγκατεστημένες, λειτουργικές μονάδες (τροφοδοσία με ζυμώσιμα υπολείμματα κουζίνας) η απόδοση ήταν έως 622 Nm³/t VS (πτητικά στερεά). Αυτό συνεπάγεται ότι το αναμενόμενο αποτέλεσμα μπορεί να είναι έως και 5πλάσιο, πολλαπλασιάζοντας αντίστοιχα την ισχύ της μονάδας.

Σε περίπτωση μιας τόσο υψηλής απόδοσης σε βιοαέριο, η αξιοποίηση του συνόλου των ζυμώσιμων ΑΣΑ (1,000,000 t/a) συνεπάγεται μια ηλεκτροπαραγωγική ισχύ 312 MWe, δηλαδή το 17% της ισχύος των συμβατικών θερμοηλεκτρικών σταθμών της ΔΕΗ Α.Ε. για την Αττική.

Σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας στην μονάδα, οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι πολύ χαμηλές. Συγκεκριμένα απαιτείται μόνο ήπια θέρμανση της τροφοδοσίας και ήπια θέρμανση του πύργου αναγέννησης του διαλύτη. Για τις θερμοκρασιακές ανάγκες απαιτείται ατμός πολύ χαμηλής πίεσης που στην ουσία δεν επιβαρύνει την απόδοση της μονάδας. Ενδεικτικά:

Η πρώτη ύλη, για την συγκεκριμένη δυναμικότητα και ωράρια λειτουργίας συνεπάγεται ροή 2.57 kg/s. Θεωρώντας μια θερμοχωρητικότητα υλικού ίση με του νερού (4.19 KJ/Kg.K) και θερμοκρασία περί τους 15 C, για να φτάσει στους 80 C (προκειμένου να καλύψει και τις θερμικές απώλειες του αντιδραστήρα) απαιτεί προσφορά θερμότητας 700 KW. Κρίνοντας από την περισσευούμενη θερμική ενέργεια της μονάδας, (το υπόλοιπο 40% της ενέργειας που δεν ανακτήθηκε) περί τα 2,074.8 KW και την αναμενόμενη ελάχιστη θερμοκρασία των ρευστών στην έξοδο της διάταξης ηλεκτροπαραγωγής (σαφώς μεγαλύτερη από 80 C) προκύπτει ότι μέσω ενεργειακής ολοκλήρωσης προσφέρεται ανέξοδα το απαιτούμενο ποσό θερμότητας.

Παρόμοια ισχύει και για την διάταξη ρόφησης όπου εκεί μπορεί να πραγματοποιηθεί και ενεργειακή ολοκλήρωση μεταξύ των πύργων ρόφησης – εκρόφησης.

Μοναδική ενεργειακή επιβάρυνση είναι η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται από τον εξοπλισμό (τεμαχιστές, αναμεικτήρες, αντλίες κλπ).

Πρόχειρο οικονομικό δυναμικό:

Τα βιβλιογραφικά δεδομένα αναφέρουν ότι το 2007 για εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης ξηρού τύπου, με υγρασία 60% όπως εδώ, το κόστος επένδυσης ανερχόταν στα 12-15 M\$ για μονάδες δυναμικότητας 50,000 μετρικών τόνων, όπως στην μονάδα αναφοράς που επιλέχθηκε να σχεδιαστεί. Το αντίστοιχο λειτουργικό κόστος ανέρχεται στα 28-133 \$/τόνο BD-MSW (65). Οι δείκτες αναγωγής κόστους χημικών εγκαταστάσεων (CEPCI) για 2007 και 2013 είναι 525.4 και 567.3 (Σεπτ./'13). Η ισοτιμία δολαρίου-ευρώ σήμερα είναι 0.725. Αυτό συνεπάγεται ένα σημερινό μέσο κόστος εγκατάστασης 10.57 M€ με λειτουργικό μέσο κόστος 56.75 €/t, συνεπώς ετήσιο λειτουργικό κόστος 2,840,000 €

Για εγκατάσταση δυναμικότητας 50,000 t/a και έσχατη παραγωγή βιοαερίου 100 Nm³/t η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανέρχεται σε 27,274.5 MWh και με

την δεδομένη τιμή πώλησης ηλεκτρικού ρεύματος παραγόμενου από βιομάζα-ΑΣΑ, 99,45 €/MWh συνεπάγεται ένα ετήσιο έσοδο 2,712,449€. Σε αυτά πρέπει να προστεθεί και το έσοδο από την ‘διαχείριση’ των απορριμμάτων. Το αντίστοιχο «τέλος πύλης» είναι 23.5 €/t άρα ετησίως 1,175,000 €. Συνοπτικά:

Κόστος εγκατάστασης (Μ€)	Ετήσιο κόστος λειτουργίας (€)	Ετήσια έσοδα ηλεκτρικού ρεύματος (€)	Ετήσια έσοδα διαχείρισης ΑΣΑ (€)	Ετήσιο Κέρδος (€)
-10.57	-2,840,000	+2,712,449	+1,175,000	+1,047,449

Τα παραπάνω συνεπάγονται προφανή κερδοφορία και μάλιστα απόσβεση της επένδυσης εντός μιας 10ετίας.

Να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα αυτά προκύπτουν με βάση μια συντηρητική έως έσχατη εκτίμηση για παραγωγή βιοαερίου 100 Nm³/t βιοαποδομήσιμων ΑΣΑ. Τα εμπορικά δεδομένα έχουν αποδείξει έως και 6πλάσια παραγωγή αερίου για καλή ποιότητα τροφοδοσίας. Εν προκειμένω η τροφοδοσία εκτιμάται ότι είναι σαφώς ανώτερης ποιότητας από την μέση βιομάζα καθώς αποτελείται κυρίως από υπολείμματα τροφίμων που έχουν εξαιρετική μετατροπή από τους μικροοργανισμούς σε βιοαέριο. Τα πραγματικά αποτελέσματα αναμένεται να είναι αντιστοίχως ανώτερα.

Συνολική αποτίμηση:

Η αναερόβια χώνευση είναι μια απλή διεργασία, γνωστή εδώ και αιώνες, που όταν συνδυαστεί με ικανή τεχνολογία έχει μεγάλο περιβαλλοντικό και οικονομικό ενδιαφέρον. Αυτό το επιβεβαιώνουν τόσο οι παραπάνω υπολογισμοί όσο και η εμπειρία. Παγκοσμίως υπάρχουν χιλιάδες μονάδες, μικρής ή μεγάλης κλίμακας, που αξιοποιούν την βιομάζα με αυτόν τον τρόπο. Η τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης είναι μια απλή, γνωστή και οικεία τεχνολογία. Η υψηλή ποιοτική σύσταση των παραγόμενων απορριμμάτων στην Αττική σε συνδυασμό με το μικρό ρίσκο της επένδυσης επιβάλλει την άμεση αξιοποίηση της για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών.

Θερμοχημική Κατεργασία

Η θερμοχημικές διεργασίες καύση/πυρόλυση/αεριοποίηση θα αξιοποιηθούν για την ανάκτηση ενέργειας από τα κλάσματα των ΑΣΑ που χαρακτηρίζονται από μικρή περιεχόμενη υγρασία, δηλαδή χαρτί – πλαστικά – ξύλο συνολικής μάζας 414,000 t/a και σύστασης 50:45:5 αντίστοιχα (με μέση LHV ~24 MJ/Kg). Η πρώτη ύλη θα πρέπει να υποστεί κατάλληλη μηχανική κατεργασία (ελάττωση μεγέθους και ομογενοποίηση) προκειμένου να πληροί τις προϋποθέσεις της τροφοδοσίας στις διεργασίες ανάκτησης ενέργειας που ακολουθούν. Για τον λόγο αυτό θα προηγηθεί η παραγωγή RDF και θα ακολουθήσει η θερμοχημική κατεργασία.

Για την θερμοχημική κατεργασία ισχύει ότι η απόδοση σε ενέργεια είναι «ανάλογη» της «πολυπλοκότητας» της μονάδας. Αυτό συνεπάγεται και ανάλογη αύξηση του κόστους επένδυσης – λειτουργίας αλλά και του κέρδους. Η τελική επιλογή της συγκεκριμένης διεργασίας θα προκύψει από την συνεκτίμηση αρχικού κόστους – πολυπλοκότητας – ρυθμού/χρόνου απόσβεσης της επένδυσης και εν συνεχεία κερδοφορίας.

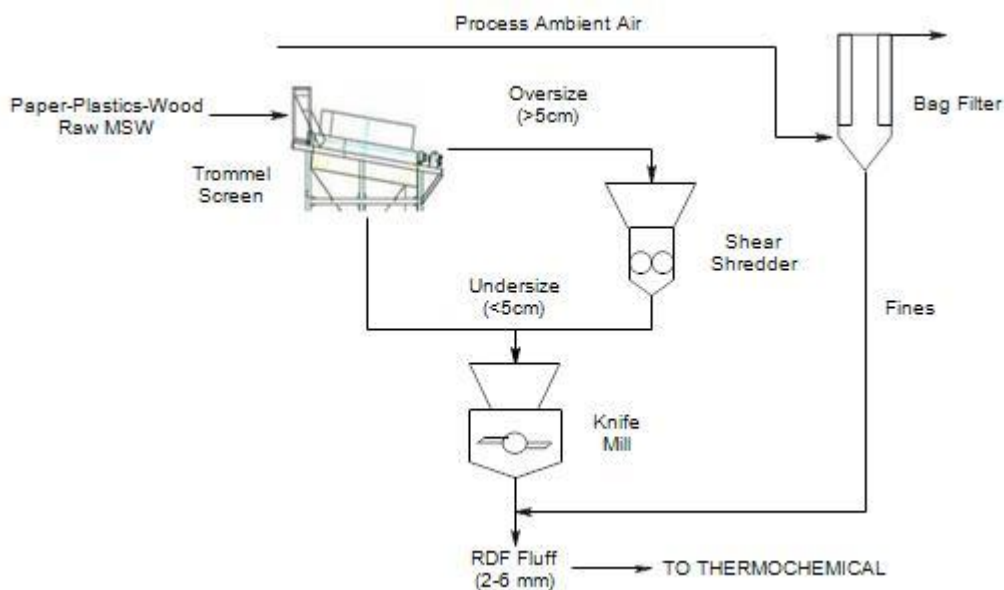
Για λόγους ευελιξίας, βασικό κριτήριο του σχεδιασμού θα είναι και η δυνατότητα – ευκολία επέκτασης από την μία βαθμίδα σχεδιασμού-απόδοσης στην επόμενη. Αναλυτικότερα, οι διακριτές αυτές βαθμίδες (ξεκινώντας πάντοτε από RDF και καταλήγοντας σε ηλεκτρική ενέργεια) θεωρούνται οι εξής:

- Καύση
- Πυρόλυση – Καύση
- [Πυρόλυση – Αεριοποίηση] – Καύση

Κατά την απλή καύση είναι δυνατή η χρήση μόνο ατμοστρόβιλου ενώ με την πυρόλυση το παραγόμενο αέριο καύσιμο μπορεί να αξιοποιηθεί σε προσαρμοσμένο αεριοστρόβιλο και συνολικά σε συνδυασμένο κύκλο. Μέσω της αεριοποίησης και της παραγωγής syngas πέρα από αξιοποίηση σε συνδυασμένο κύκλο με γνωστές παραμέτρους λειτουργίας ευρείας εφαρμογής (πληθώρα IGCC μονάδων), γίνεται και πλέον άμεσα εφικτή η παραγωγή υδρογόνου ως καύσιμο. Αυτό συνεπάγεται την μελλοντική δυνατότητα αξιοποίησης κελιών παραγωγής ενέργειας, μηδενική εκπομπή CO₂ και γενικότερα ανοίγει τον δρόμο προς την εποχή/οικονομία του υδρογόνου.

Μηχανική προκατεργασία (παραγωγή RDF):

Καθότι η πρώτη ύλη (χαρτί – πλαστικό – ξύλο) είναι προ-διαλεγμένη δεν απαιτείται διαχωρισμός του ρεύματος των ΑΣΑ αλλά μόνον ελάττωση μεγέθους. Η απλούστερη και αποδοτικότερη μέθοδος ελάττωσης μεγέθους έχει ήδη μελετηθεί (βλ. Κεφ. 2^ο). Πρόσθετα σε αυτήν είχε μελετηθεί το ενδεχόμενο καβουρδίσματος των οργανικών υλικών προς παραγωγή καυσίμου υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας και χαμηλότερης υγροσκοπικότητας. Καθότι αυτό προσφέρει όφελος μόνο σε περίπτωση εμπορίου-μεταφοράς του καυσίμου ή/και παραμονής του σε αδράνεια, αντίστοιχα, εδώ δεν κρίνεται απαραίτητη η αξιοποίηση αυτής της τεχνολογίας. Ακόμη είχε εξεταστεί η ξήρανση-καβούρδισμα μέρους των ζυμώσιμων (λόγο εξαιρετικά μεγάλου όγκου του ρεύματος αυτού). Αυτό φαίνεται να έχει προοπτική, όπως έχει μελετηθεί νωρίτερα, αλλά αφενός επειδή δεν έχει δοκιμαστεί και αφετέρου επειδή τροποποιεί τις ιδιότητες-συμπεριφορά του καυσίμου (βλ. παρακάτω), ούτε και αυτό θα αξιοποιηθεί. Συνεπώς η προτεινόμενη διεργασία παραγωγής RDF είναι η προ-μελετηθείσα:



Περιγραφή διεργασίας:

Η πρώτη ύλη (χαρτί-πλαστικό-ξύλο) εισάγεται σε κόσκινο περιστρεφόμενου τυμπάνου προκειμένου να διαχωριστεί σε δύο ρεύματα «εκατέρωθεν» του μεγέθους των 5 cm. Το «άνω» κλάσμα οδηγείται σε τεμαχιστή διάτμησης (περιστροφικός κοπτήρας) και το ρεύμα εξόδου (< 5 cm) οδηγείται μαζί με το «κάτω» κλάσμα του κόσκινου σε λεπιδό-μυλο προς τελική ελάττωση μεγέθους στα 2-6 mm. Το μέγεθος αυτό σχετίζεται με τις προδιαγραφές τροφοδοσίας της θερμοχημικής διεργασίας που ακολουθεί (βλ. παρακάτω).

Ο αρχικός διαχωρισμός σε δύο κλάσματα μεγέθους κρίνεται απαραίτητος καθώς η παρουσία ογκωδών σωμάτων (>5 cm) απαιτεί ελάττωση μεγέθους προκειμένου να μπορεί να κατεργαστεί τελικά από τον λεπιδό-μυλο. Σε περίπτωση που η πλειονότητα

της πρώτης ύλης είναι >5 cm τότε ο διαχωρισμός θα περίττευε και οδηγούνταν το σύνολο της στον περιστροφικό κοπτήρα. Αν όμως μόνο ένα μικρό κλάσμα είναι >5 cm τότε ο διαχωρισμός είναι απαραίτητος προκειμένου να μην αυξηθεί το φορτίο του κοπτήρα χωρίς λόγο, από την είσοδο και σωμάτων <5 cm που άρα δεν απαιτούν προκατεργασία πριν την είσοδο στον λεπιδό-μυλο.

Ο συγκεκριμένος τύπος μύλου κρίνεται κατάλληλος λόγω των ιδιοτήτων της πρώτης ύλης. Το χαρτί και το πλαστικό δεν είναι εύθραυστα προκειμένου να κατεργάζονται αποδοτικά από τον σφυρό-μυλο, αλλά είναι και συμπαγή προκειμένου ο περιστροφικός κοπτήρας να κατεργαστεί. Απαιτούνται οξείες κοπτικές επιφάνειες προκειμένου να ασκήσουν τις απαιτούμενες διατμητικές τάσεις για την ελάττωση του μεγέθους και η υψηλή ταχύτητα περιστροφής του λεπιδό-μυλου συνεπάγεται και υψηλή δυναμικότητα. Προσοχή μόνο πρέπει να δοθεί στην φθορά των λεπίδων. Τα εισερχόμενα υλικά είναι αρκετά μικρότερης σκληρότητας από αυτή του υλικού των λεπίδων άρα και δεν προβλέπεται εκτενής φθορά τους.

Από την ανακίνηση, θλίψη και διάτμηση των υλικών παράγονται μικρο-σωματίδια που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα του χώρου εργασίας. Για την αντιμετώπιση αυτού του επικίνδυνου για την υγεία φαινομένου σε κάθε κομμάτι του εξοπλισμού θα πρέπει να προσαρμοστεί απαγωγός ο οποίος και θα αναρροφά τον αέρα με τα σωματίδια και θα τον οδηγεί σε σακκόφιλτρο. Τα συλλεγόμενα σωματίδια μπορούν στην συνέχεια να τροφοδοτηθούν στην μονάδα θερμοχημικής κατεργασίας με το υπόλοιπο RDF.

Ισοζύγια μάζας – ενέργειας:

Ισοζύγιο μάζας δεν υφίσταται καθώς υπάρχει μόνο μηχανική κατεργασία (ελάττωση μεγέθους) της πρώτης ύλης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει μόνο η εκτίμηση της σύστασης του παραγόμενου RDF:

Υλικό	Μάζα (t/a)	Ποσοστό (~%)	LHV (MJ/Kg)
Χαρτί	205,000	50	17
Πλαστικό	183,000	45	33
Ξύλο	26,000	5	20
Σύνολο	414,000	100	(M.O.) ~24

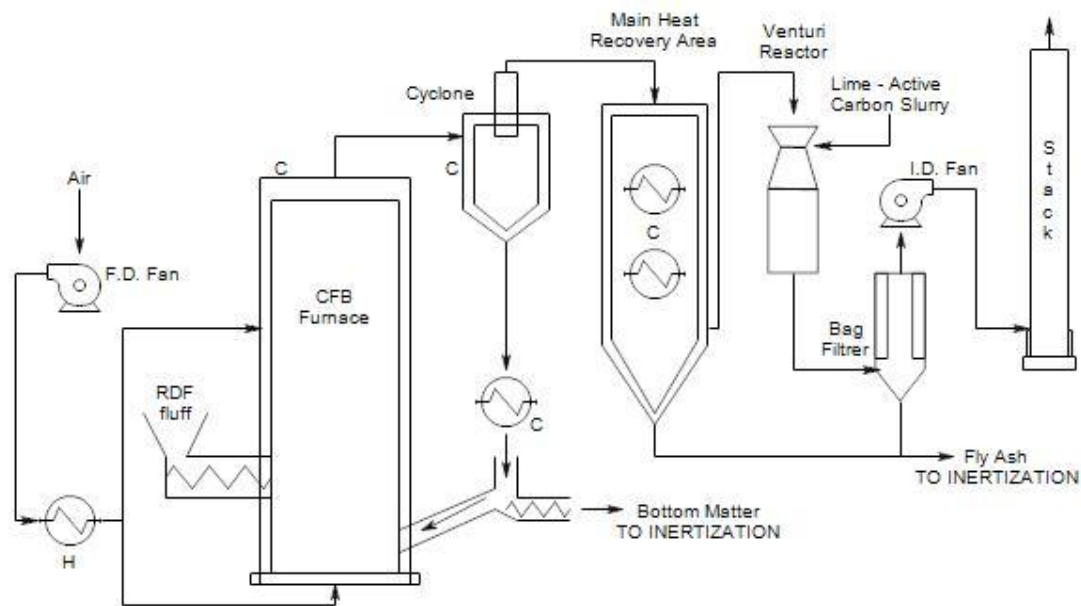
Το παραγόμενο RDF έχει πολύ υψηλή θερμογόνο δύναμη (συγκρινόμενη με αυτή των ορυκτών ανθράκων). Αυτό οφείλεται στην αμιγή σύστασή του σε ικανές καύσιμες ύλες. Το RDF που προκύπτει από διαχωρισμό σύμμεικτων ΑΣΑ στην μονάδα περιέχει πάντοτε μικρό κλάσμα ζυμώσιμων και αδρανών, καθώς και έχει σημαντικά ποσοστά υγρασίας. Εν προκειμένω, η διαλογή στην πηγή εκμηδενίζει αυτές τις ανεπιθύμητες προσμίξεις αποδίδοντας έτσι αυτό το ανώτερο ποιοτικό αποτέλεσμα.

Η μόνη ενέργεια που απαιτείται είναι ηλεκτρική για την λειτουργία του εξοπλισμού. Η κατανάλωση αναμένεται να είναι εξαιρετικά χαμηλή (απλή μηχανική κατεργασία) και θα ληφθεί υπ' όψιν στο κόστος λειτουργίας.

Θερμοχημική Κατεργασία

- **Καύση**

Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, η ανάκτηση ενέργειας θα «ξεκινήσει» με μία απλή και σχετικά αποδοτική διεργασία με δυνατότητα να επεκταθεί εύκολα σε μια ανώτερη και αποδοτικότερη. Η αρχική βασική διεργασία είναι η απευθείας καύση. Ο τύπος του καυστήρα θα είναι (όπως έχει μελετηθεί στο Κεφ.2) ανακυκλοφορούσας ρευστοποιημένης κλίνης (CFB) καθώς πέρα από αποδοτική καύση, έχει και ευελιξία ως προς τη σύσταση του καυσίμου αλλά και είναι μια τεχνολογία με ευρεία εφαρμογή και ανάλογη ευελιξία ως προς την ακριβή χρήση. Τα θερμά καυσαέρια θα τροφοδοτούν τον βραστήρα με θερμότητα και κατόπιν θα καθαρίζονται πριν την διοχέτευση στην καμινάδα. Δεδομένης της θερμογόνου δύναμης του καυσίμου είναι δυνατή η αξιοποίηση κυκλώματος 'βραστήρα' «ενός περάσματος» (Once-Through Utility) που εξαλείφει την χρήση του δοχείου διαχωρισμού ατμού-υγρού και επιτρέπει την λειτουργία της μονάδας και στην υπερκρίσιμη περιοχή του ατμού. Αναλυτικά:



Περιγραφή της διεργασίας:

Το λεπτομερές RDF εισέρχεται στον καυστήρα ανακυκλοφορούσας ρευστοποιημένης κλίνης. Εκεί πραγματοποιείται η καύση του με περίσσεια αέρα 50% κατά βάρος και τα παραγόμενα καυσαέρια οδηγούνται σε κυκλώνα. Το κλάσμα των θερμών σωματιδίων επιστρέφουν μέσω του κυκλώνα στον καυστήρα για να ολοκληρωθεί η καύση τους, ενώ μέρος τους απομακρύνεται προς αποφυγή συσσώρευσης της τέφρας. Τα θερμά καυσαέρια οδηγούνται στον κυρίως χώρο εναλλαγής θερμότητας και αφού ψυχθούν (παράγοντας ατμό) και αυξηθεί η υγρασία τους με ψεκάσμο νερού οδηγούνται σε ημί-ξηρο καθαριστή τύπου Venturi όπου και δεσμεύονται τα όξινα αέρια από ασβέστη και τα βαρέα μέταλλα – οργανικά (π.χ.

διοξίνες) από ενεργό άνθρακα ενώ ψύχονται περαιτέρω και από την εξάτμιση του εισαγόμενου νερού. Τα ψυχρά πλέον καυσαέρια οδηγούνται σε σακκόφιλτρο όπου και γίνεται η δέσμευση των σωματιδίων (ιπτάμενης τέφρας, ασβέστη, ενεργού άνθρακα κλπ) και μετά είναι ασφαλή προς διοχέτευση στην ατμόσφαιρα. Αυτή η μέθοδος αντι-ρύπανσης προτιμάται λόγω της καλής δέσμευσης των διοξινών (βλ. Κεφ. 2). Η ιπτάμενη τέφρα οδηγείται προς αδρανοποίηση μέσω τσιμεντοποίησης από όπου ακολουθεί και η τελική απόθεση. Η τέφρα πυθμένα συνήθως δεν απαιτεί ιδιαίτερη μεταχείριση αλλά απλή απόθεση.

Στον καυστήρα η εισαγωγή αέρα γίνεται σε δύο στάδια για καλύτερη καύση του RDF. Ο αέρας προθερμαίνεται για να μην υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του καυστήρα (~850 C, βλ. Κεφ. 2). Στον καυστήρα υπάρχουν και πλευρικά φλόγιστρα και πυρσοί αερίου καυσίμου (φυσικό αέριο ή βιομεθάνιο) οι οποίοι υποβοηθούν την προθέρμανση του καυστήρα και την διατήρηση της θερμοκρασίας σε υψηλά επίπεδα σε περίπτωση απρόβλεπτης πτώσης. Ο καυστήρας, ο κυκλώνας και ο κυρίως χώρος εναλλαγής θερμότητας είναι κατασκευασμένοι από διπλά τοιχώματα εντός των οποίων ρέει το νερό από το κύκλωμα ατμού. Έτσι τα τοιχώματα ψύχονται συνεχώς μειώνοντας την φθορά. Το RDF μπορεί να περιέχει μεγάλα ποσοστά αλκαλίων και χλωρίου που στις υψηλές θερμοκρασίες δρουν διαβρωτικά. Τα τοιχώματα του καυστήρα και του κυκλώνα επιστρώνονται με πυρίμαχο αντι-διαβρωτικό υλικό προκειμένου να προστατευθούν.

Τα ανακυκλούμενα σωματίδια που περιέχουν αδρανές μέσο, τέφρα και υλικό που δεν έχει καεί πλήρως είναι μια σημαντική πηγή θερμότητας σε υψηλή θερμοκρασία και χρησιμεύουν σημαντικά στην τελική θέρμανση του ατμού (υπερθέρμανση) για τον λόγο αυτό και εκεί αξιοποιείται εναλλάκτης θερμότητας. Η ακριβής διαδοχή του νερού-ατμού μέσα στο κύκλωμα του βραστήρα εξαρτάται από την τοπική θερμοκρασία (η αντιρροή είναι αποδοτικότερη) αλλά και από την απαιτούμενη ψύξη (στα σημεία όπως τα διπλά τοιχώματα) του εξοπλισμού. Για τον λόγο αυτό η κατάσταση της ακριβής πορείας του νερού – ατμού είναι αδύνατον να καταστρωθεί χωρίς να είναι γνωστές οι αντοχές των υλικών και οι συνθήκες λειτουργίας των αμοστροβίλων.

Κατά κύριο λόγο το νερό ρέει πρώτα από το τελευταίο στάδιο του κυρίως χώρου εναλλαγής θερμότητας, έπειτα από τα τοιχώματα προς ψύξη, στην συνέχεια στο πρώτο στάδιο του κυρίως χώρου εναλλαγής θερμότητας και τέλος από την επιστροφή των σωματιδίων στον καυστήρα. Η βασική αυτή πορεία επιτυγχάνει την μέγιστη ανάκτηση θερμότητας σε υψηλή τελική πίεση και θερμοκρασία ατμού εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα και την απαραίτητη ψύξη του εξοπλισμού.

Ισοζύγια μάζας – ενέργειας:

Τα 414,000 t/a RDF είναι στο πλαίσιο δυναμικότητας μίας μονάδας CFB καύσης. Με βάση πραγματικά δεδομένα λειτουργίας μονάδων (120,000 t/a RDF) η παραγόμενη τέφρα είναι 7% πυθμένα και 7% ιπτάμενη κατά βάρος RDF. Εδώ αναμένεται να είναι μικρότερη λόγω καλύτερης σύστασης RDF (λιγότερα αδρανή, λιγότερα ζυμώσιμα, περισσότερα πλαστικά και χαρτί). Το RDF έχει LHV= ~24

MJ/Kg. Τα ισοζύγιο μάζας περιλαμβάνει την καύση του RDF με αέρα (23.2% οξυγόνο, 75.5 άζωτο και ευγενή αέρια) προς παραγωγή CO₂, νερού και τέφρας. Το παραγόμενο CO₂ δεν μπορεί να υπολογιστεί ακριβώς, καθώς εξαρτάται από την χημική σύσταση του καυσίμου που δεν είναι γνωστή. Πάντως αναμένεται να είναι σημαντικά χαμηλότερο από αυτό των συμβατικών καυσίμων καθώς το RDF περιέχει σημαντικό ποσοστό οξυγόνου και υδρογόνου ανά μονάδα μάζας καυσίμου. Ούτως ή άλλως μεγάλο ποσοστό του παραγόμενου CO₂ προέρχεται από βιομάζα (χαρτί) και άρα δεν θεωρείται επιβαρυντικός ρύπος. Το ισοζύγιο μάζας λοιπόν διαμορφώνεται ως εξής:

	RDF	Air		Flue gas (CO ₂ ,H ₂ O,N ₂)	F. Ash	B. Ash
t/a	414,000	NO DATA		NO DATA	29,000	29,000

Από το παραπάνω ισοζύγιο μάζας προκύπτει ότι η ελάττωση του όγκου των αποβλήτων προς απόθεση (από ΑΣΑ σε τέφρα) είναι 86% κατά βάρος και κατά πολύ περισσότερο σε όγκο λόγω της λεπτομερούς φύσης και της πυκνότητας της τέφρας, ένα πολύ σημαντικό επίτευγμα σε σχέση με την διαχείριση των ΑΣΑ.

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει όμως η παραγωγή ενέργειας. Τα 414,000 τόνοι ετησίως RDF με θερμογόνο δύναμη ~24 MJ/Kg σε εξομαλυμένη καθ' όλο το έτος καύση συνεπάγονται μια παραγωγής θερμότητας 315 MW. Με ανάκτηση θερμικής ενέργειας 90% η θερμική ισχύς της μονάδας είναι 283 MW_{th}. Θεωρώντας ατμοστρόβιλους που λειτουργούν με υπο-κρίσιμο ατμό η απόδοση της μετατροπής σε ηλεκτρισμό είναι 37% συνεπώς 105 MW_e. Αντίστοιχα με υπερ-κρίσιμο ατμό η μετατροπή είναι 41% και άρα 116 MW_e. Αυτή η παραγωγή ηλεκτρισμού αντιστοιχεί στο 6% της ηλεκτρικής ισχύος των θερμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής της ΔΕΗ Α.Ε. για την Αττική.

Η κατανάλωση θερμικής ενέργειας στην μονάδα είναι μηδενική καθώς συνεπάγεται την προθέρμανση του αέρα, ενέργεια η οποία επιστρέφεται από αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων και άρα ουσιαστικά δεν αποτελεί κατανάλωση ενέργειας.

Πρόχειρο οικονομικό δυναμικό:

Παρόμοια μονάδα παραγωγής RDF και καύσης με τεχνολογία CFB και αντι-ρύπανση μέσω πολφού ασβέστη και ενεργού άνθρακα και δέσμευση σωματιδίων από σακκόφιλτρα υπάρχει ήδη σε λειτουργία από το 2000, δυναμικότητας παραγωγής – καύσης 160,000 t/a RDF. Το κόστος επένδυσης τότε ανερχόταν σε 130 Μ€ (22). Οι 160,000 t/a είναι ένα ρεαλιστικό μέγεθος μονάδας και αυτό θα μελετηθεί και στους παρακάτω υπολογισμούς. Από δεδομένα λειτουργίας άλλης μονάδας, το κόστος λειτουργίας ανά τόνο καυσίμου είναι περί τα 65\$/t το 2009 (66). Για το 2000, το 2009 και το 2013 οι δείκτες CEPCI είναι 394.1, 525.7 και 567.3 αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές μεταφράζονται σε σημερινό κόστος επένδυσης 187 Μ€ και λειτουργίας 50.85 €/t.

Τα αντίστοιχα έσοδα από την πώληση ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από μη βιοαποδομήσιμα ΑΣΑ είναι 150 €/MWh. Το αντίστοιχο έσοδο διαχείρισης ΑΣΑ έναντι του «τέλους πύλης» για ΧΥΤΑ είναι 23.5 €/t.

Σε αυτό το σημείο, για τον υπολογισμό του πρόχειρου οικονομικού δυναμικού απαιτείται η διευκρίνιση του είδους ατμού που θα χρησιμοποιηθεί στο κύκλο ηλεκτροπαραγωγής. Για υποκρίσιμο ατμό η θερμοδυναμική απόδοση σε ηλεκτρισμό είναι 37% (41 MW_e) ενώ για υπερκρίσιμο είναι 41% (44.8MW_e). Το κόστος επένδυσης αντίστοιχα αυξάνεται κατά 2% στην περίπτωση υπερκρίσιμου ατμού. Το συγκεκριμένο καύσιμο είναι εξαιρετικά υψηλής θερμογόνου δύναμης και θεωρείται πιθανώς ικανό να ανταπεξέλθει στις ανάγκες παραγωγής υπερκρίσιμου ατμού

Για τις 2 αυτές περιπτώσεις προκύπτουν τα παρακάτω οικονομικά αποτελέσματα:

	Κόστος επένδυσης (Μ€)	Ετήσιο κόστος λειτουργίας (Μ€/α)	Ετήσια έσοδα παραγωγής ηλεκτρισμού (Μ€/α)	Ετήσια έσοδα διαχείρισης ΑΣΑ (Μ€/α)	Ετήσιο Κέρδος (Μ€/α)
SubCrit	-187	-8.14	+53.87	+3.76	+49.49
SuperCrit	-191	-8.14	+58.86	+3.76	+54.48

Με τα παραπάνω στοιχεία προκύπτει ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΣΑ είναι μια εξαιρετικά κερδοφόρος δραστηριότητα όταν πραγματοποιείται υπό προϋποθέσεις καλής απόδοσης. Η προκύπτουσα απόσβεση είναι περί τα 3.5 χρόνια με αυτή του υποκρίσιμου ατμού ελαφρώς μεγαλύτερη (3.75 χρόνια). Κάτι τέτοιο είναι πέραν του απλώς «βιώσιμο» για μια επένδυση ~190 εκατομμυρίων ευρώ.

Τα αποτελέσματα αυτά σαφώς και δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα σε περίπτωση υλοποίησης της επένδυσης αλλά αποτελούν έναν καθοριστικά ισχυρό δείκτη περί βιωσιμότητας και κερδοφορίας της επιχείρησης.

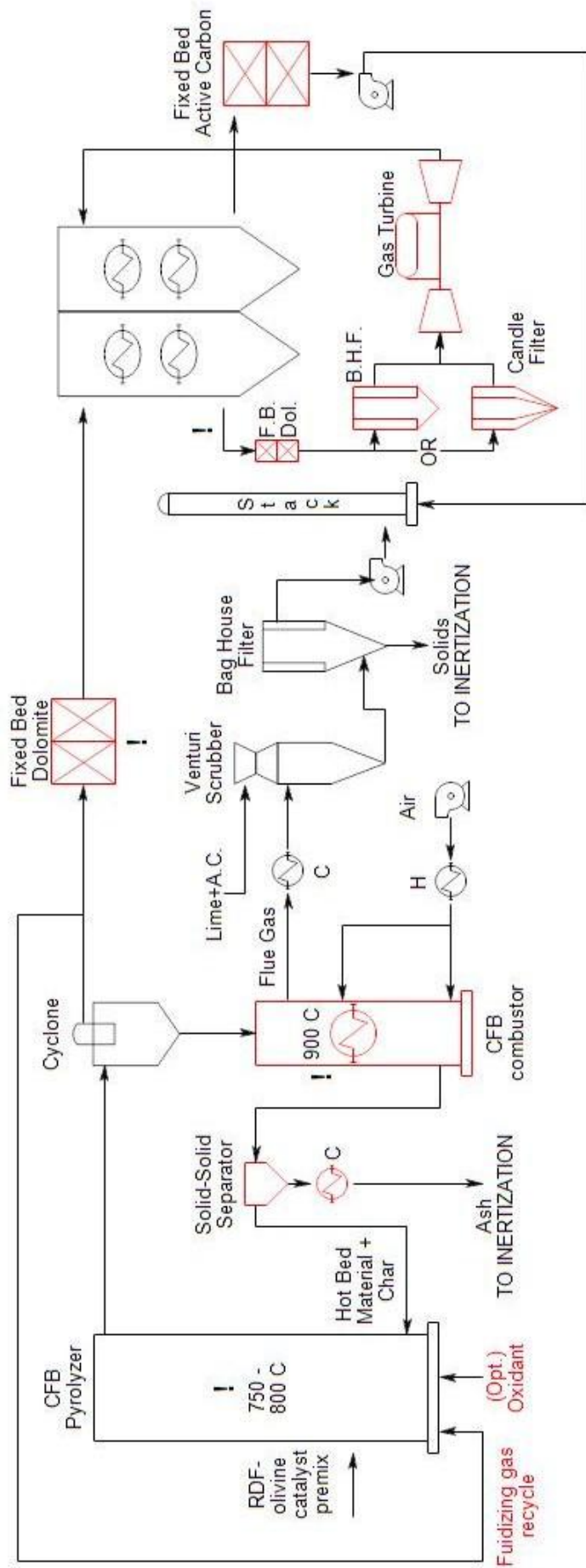
Συνολική αποτίμηση:

Η καύση της βιομάζας είναι μια ανερχόμενη τεχνολογία με πολλαπλά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη που καλύπτει βασικές ανάγκες του ανθρώπινου πληθυσμού. Παρά την πρόσφατη ανάπτυξη της σε αποδοτικό και περιβαλλοντικά φιλικό επίπεδο υπάρχει ήδη ευρεία εμπορική εφαρμογή και μεγάλη εξοικείωση με τον τομέα. Η δημιουργία μιας μονάδας καύσης κατάλληλα κατεργασμένων απορριμμάτων (tMSW/RDF) είναι επιτακτική, άμεση και απαραίτητη τόσο από περιβαλλοντικής όσο και από οικονομικής άποψης.

- **Πυρόλυση – Καύση**

Η απλή καύση του RDF από αστικά απορρίμματα είναι η απλούστερη και άμεσα διαθέσιμη τεχνολογία για την παραγωγή ενέργειας και καλύτερη διαχείριση των ΑΣΑ. Ωστόσο υπάρχει δυνατότητα ακόμη πιο αποδοτικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό είναι εφικτό μέσω της αξιοποίησης του αεριοστρόβιλου που όμως απαιτεί την ύπαρξη αερίου καυσίμου. Για τον λόγο αυτό το RDF δεν θα καίγεται απευθείας, αλλά θα πυρολύεται προς παραγωγή αέριων υδρογονανθράκων οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο σε αεριοστρόβιλο.

Ακολουθώντας το σχέδιο της «σταδιακής ανάπτυξης» της μονάδας προς αποδοτικότερα μοντέλα, ο σχεδιασμός θα συνεχίσει προσθετικά από την μονάδα CFB καύσης του RDF. Η νέα μονάδα πυρόλυσης – καύσης του RDF έχει ως εξής:



Περιγραφή της διεργασίας:

Το RDF πλέον εισέρχεται στον CFB αντιδραστήρα σε συνθήκες έλλειψης οξυγόνου όπου και πυρολύεται. Κατόπιν το παραγόμενο αέριο ρεύμα οδηγείται σε κυκλώνα και διαχωρίζεται.

Τα στερεά εισέρχονται σε μικρότερο καυστήρα επίσης CFB τεχνολογίας όπου το περιεχόμενο απανθράκωμα καίγεται με περίσσεια αέρα προς παραγωγή της απαιτούμενης για την πυρόλυση θερμότητας. Τα θερμά στερεά και τυχόν απανθράκωμα, αφού διαχωριστούν από την τέφρα (μέσω π.χ. κόσκινου ή αεροδιαχωριστήρα), επιστρέφουν στον αντιδραστήρα πυρόλυσης και έτσι προσδίδουν την απαιτούμενη θερμότητα. Τα παραγόμενα καυσαέρια οδηγούνται κανονικά στην διάταξη αντι-ρύπανσης και διοχετεύονται στην καμινάδα.

Το αέριο ρεύμα πυρόλυσης αφού διαχωριστεί από την πλειονότητα των στερεών κατανέμεται σε δύο ρεύματα, ένα ρεύμα που επιστρέφει στον αντιδραστήρα, χρησιμεύοντας ως μέσο ρευστοαιώρησης και ένα που συνεχίζει προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το ρεύμα αφού περάσει από σταθερή κλίνη δολομίτη ψύχεται μερικώς και ξαναπερνά από κλίνη δολομίτη. Μέσω διέλευσης από υφασμάτινα ή κεραμικά φίλτρα το αέριο έχει πλέον κατάλληλα χαμηλή περιεκτικότητα σε στερεά για χρήση ως καύσιμο σε αεριοστρόβιλο. Μετά την καύση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τα θερμά καυσαέρια περνούν από εναλλάκτες θερμότητας για παραγωγή ατμού και αφού ψυχθούν κατάλληλα διοχετεύονται από σταθερή κλίνη ενεργού άνθρακα για την συγκράτηση βαρέων μετάλλων (π.χ. υδράργυρος) και τυχόν οργανικών. Πιθανώς σε αυτό το σημείο να χρειάζεται εισαγωγή νερού για την ρύθμιση της υγρασίας και της θερμοκρασίας προκειμένου η δέσμευση από τον ενεργό άνθρακα να είναι αποδοτικότερη. Κατόπιν διοχετεύονται στην καμινάδα.

Σημαντικά σημεία της διεργασίας:

Σημειωμένα με «!» στο διάγραμμα ροής

- Συνθήκες πυρολυτικού αντιδραστήρα: όπως αναφέρθηκε το αέριο πυρόλυσης πρέπει να έχει μια σύσταση που να πληροί ορισμένες προδιαγραφές ούτως ώστε να είναι κατάλληλο για καύσιμο σε αεριοστρόβιλο. Πρέπει να έχει μια μέση σύσταση με περιορισμένο εύρος συστατικών και συγκεντρώσεων και μια μέγιστη συγκέντρωση για πίσσα και σωματίδια. Καθώς η πίσσα είναι το βασικότερο πρόβλημα όπως έχει θιχθεί νωρίτερα (βλ. Κεφ 2) οι συνθήκες στον αντιδραστήρα προσδιορίζονται με στόχο την ελαχιστοποίηση της. Για τον λόγο αυτό το RDF αναμιγνύεται κατ' αρχάς με ολιβίνη. Το ορυκτό αυτό δρ. καταλυτικά στην διάσπαση της παραγόμενης πίσσας και είναι κατάλληλο για χρήση εντός της ρευστοποιημένης κλίνης. Επίσης η θερμοκρασία του αντιδραστήρα ορίζεται σε σημείο όπου τα παραγόμενα οργανικά είναι της σύστασης που προτιμάται. Στους 750 – 800 C έχουν πλέον εξαλειφθεί οι σχετικά πολύπλοκες οργανικές ενώσεις που παράγονται κατά την αρχική διάσπαση των συστατικών της βιομάζας αλλά

και δεν είναι έντονη η σύνθεση των PAH's που αποτελούν και την πιο δύσκολα διαχειρίσιμη και επιβαρυντική μορφή της πίσσας. Ακόμη η θερμοκρασία είναι ικανή για την επίτευξη ενός υψηλού ρυθμού αντιδράσεων σύμφωνα με την κινητική. Επίσης η αύξηση του χρόνου παραμονής των αερίων, μέσω της ύπαρξης ρεύματος ανακύκλωσης ευνοεί την επίτευξη ομοιογενέστερης σύστασης. Η επιτευχθείσα σύσταση σε αυτή την θερμοκρασία είναι κυρίως γραμμικοί και απλοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, μια κατηγορία που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί συναφής της πετροχημικής νάφθας. Ένα ρεύμα τέτοιας σύστασης είναι σίγουρα προσφιλές καύσιμο.

Σχετικά με την διατήρηση της θερμοκρασίας στον αντιδραστήρα, καθώς η βιομάζα στην πρώτη ύλη αποτελείται κυρίως από χαρτί και πλαστικά, δηλαδή είναι φτωχή σε λιγνίνη είναι πιθανόν το παραγόμενο απανθράκωμα να μην αρκεί για την παραγωγή της απαιτούμενης θερμότητας. για τον λόγο αυτό προστίθεται η δυνατότητα εισαγωγής οξειδωτικού μέσου απευθείας στον αντιδραστήρα (αέρα ή καθαρού οξυγόνου) προκειμένου από την μερική καύση του προϊόντος να καλυφθεί το ενεργειακό έλλειμμα. Αυτό σαφώς παραπέμπει στην αεριοποίηση του RDF ωστόσο η προστιθέμενη ποσότητα θα είναι τόσο μικρή που δεν θα μεταβάλλεται σημαντικά η σύσταση του αερίου πυρόλυσης. Σε περίπτωση όπου αυτό δεν επαρκεί τότε θα πρέπει μέρος του αερίου να διοχετευτεί στον CFB καυστήρα των διαχωριζόμενων στερεών και από εκεί να παραχθεί η απαιτούμενη θερμότητα.

- CFB καυστήρας απανθρακώματος: δεδομένου ότι το απανθράκωμα είναι ανίκανο να παράξει περεταίρω πτητικά προϊόντα και υπάρχει ανάγκη για θέρμανση στον CFB πυρολυτικό αντιδραστήρα, είναι δόκιμο να χρησιμοποιηθεί επιτόπου ως καύσιμο. Με την καύση του μίγματος απανθρακώματος-ολιβίνη-υλικού κλίνης που προκύπτει από τον κυκλώνα ο ολιβίνης και η άμμος της κλίνης θερμαίνονται και έτσι όταν επανεισαχθούν στον αντιδραστήρα πυρόλυσης προσφέρουν και την απαιτούμενη θερμότητα. Η τεχνολογία CFB χρησιμοποιείται και εδώ καθώς στην απαιτούμενη υψηλή θερμοκρασία η συγκέντρωση των αλκαλικών συστατικών στην τέφρα της βιομάζας δημιουργεί προβλήματα συσσωμάτωσης. Στην περίπτωση της ρευστο-αιωρούμενης κλίνης η επαφή του τυχόν τήγματος ή έστω μαλθακού κολλώδους υλικού της αλκαλικής τέφρας ελαχιστοποιείται (σε σχέση με άλλες μεθόδους καύσης) και έτσι ελαττώνεται το πρόβλημα της συσσωμάτωσης των υλικών της κλίνης. Και η επιλογή θερμοκρασίας είναι τέτοια που να μην πραγματοποιείται εκτενής τήξη.
- Σταθερή κλίνη δολομίτη στην έξοδο του κυκλώνα: αμέσως μετά την έξοδο από τον αντιδραστήρα και τον κυκλώνα τοποθετείται σταθερή κλίνη δολομίτη. Ο βασικός στόχος και εδώ είναι η ελλάτωση της πίσσας. Δεδομένης της θερμοκρασίας του ρεύματος μέσα στην κλίνη πραγματοποιούνται αντιδράσεις διάσπασης της πίσσας, μειώνοντας έτσι το σημείο δρόσου της και άρα την πιθανότητα σχηματισμού επικαθίσεων και λοιπών επιπλοκών παρακάτω. Πέρα από τον βασικό αυτό στόχο η σταθερή κλίνη δολομίτη έχει πολλαπλά οφέλη. Κατ' αρχάς ο δολομίτης δεν φθείρεται από την τριβή, σε περίπτωση ρευστοποιημένης κλίνης, και έτσι αποφεύγεται η επιβάρυνση του ρεύματος με

σωματίδια. Λόγω του ότι είναι σταθερή επιτυγχάνεται σε ένα βαθμό και συγκράτηση στερεών αιωρούμενων σωματιδίων. Ακόμη το περιεχόμενο ασβέστιο και μαγνήσιο είναι σε θέση να δεσμεύσουν και μέρος των όξινων αερίων που υπάρχουν στο ρεύμα. Οι συνθήκες λειτουργίας είναι ιδανικές, καθώς η υψηλή θερμοκρασία και η χαμηλή συγκέντρωση CO₂ δεν ευνοούν την από-ασβεστοποίηση και άρα απενεργοποίηση της καταλυτικής κλίνης.

- Έξοδος του εναλλάκτη πριν τον αεριοστρόβιλο: μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στο σημείο αυτό. Το αέριο ρεύμα πρέπει να ψυχθεί πριν την είσοδο στον αεριοστρόβιλο σε κατάλληλα θερμοκρασιακά επίπεδα. Ωστόσο κατά την ψύξη, με την πτώση της θερμοκρασίας κάτω από τους 600 C αρχίζει η υγροποίηση των αέριων αλκαλίων τα οποία είναι εξαιρετικά διαβρωτικά. Επίσης με ψύξη κάτω του σημείου δρόσου της πίσσας πραγματοποιείται και η υγροποίηση της. Τόσο η πίσσα όσο και τα αλκάλια είναι ικανά ακόμη και σε μικρές ποσότητες να προκαλέσουν καταστροφική φθορά στον αεριοστρόβιλο. Για τον λόγο αυτό η θερμοκρασία του ρεύματος πρέπει να μειωθεί όσο τον δυνατόν περισσότερο, προκειμένου να υγροποιηθούν ή ακόμα και στερεοποιηθούν τα αλκάλια χωρίς όμως να υγροποιηθεί η πίσσα, δημιουργώντας επικαθίσεις και επιπλοκές. Η απαιτούμενη τιμή της θερμοκρασίας λοιπόν καθορίζεται από την σύσταση της πίσσας, που αντίστοιχα επηρεάζει και το σημείο δρόσου της. Το ψυγμένο ρεύμα κατά την έξοδο από τον εναλλάκτη περνά από σταθερή κλίνη δολομίτη και πάλι, αλλά πλέον στοχεύοντας κυρίως στην παρακράτηση των αλκαλιούχων σωματιδίων και την δέσμευση μέρους των όξινων αερίων. Και σε αυτό το σημείο θα πραγματοποιηθεί μια μερική διάσπαση της πίσσας αλλά όχι στον βαθμό της αρχικής θερμότερης κλίνης δολομίτη.

Δεδομένης λοιπόν της σύστασης της πίσσας θερμοκρασία του ρεύματος θα επιτρέπεται να μειωθεί υψηλότερα ή χαμηλότερα από τους 200 C. Αυτή η θερμοκρασία είναι κρίσιμη καθώς σε υψηλότερες θερμοκρασίες είναι είτε αδύνατον είτε οικονομικά ασύμφορο να λειτουργήσουν σακκόφιλτρα. Τα σακκόφιλτρα προτιμώνται λόγω της οικονομικής και συνάμα αποδοτικής δέσμευσης αιωρούμενων σωματιδίων. Σε περίπτωση που το αέριο ρεύμα πυρόλυσης δύναται να ψυχθεί κάτω από τους 200 C χωρίς υγροποίηση της πίσσας θα προτιμηθούν τα σακκόφιλτρα, αλλιώς η τελική θερμοκρασία θα ορισθεί πάνω από τους 300 C και θα χρησιμοποιηθούν κεραμικά φίλτρα, που είναι λιγότερο εύχρηστα. Η θερμοκρασία δέσμευσης των σωματιδίων θα είναι πάνω από τους 300 C προκειμένου να αποφευχθούν οι επικαθίσεις χλωριούχου αμμωνίου στα φίλτρα, αυξάνοντας έτσι σημαντικά το φορτίο τους και αντίστοιχα την ανάγκη συχνότερου καθαρισμού τους. Στην έξοδο των φίλτρων το ρεύμα είναι καθαρό από στερεά και η όποια πίσσα βρίσκεται σε αέρια φάση. Έτσι ο αεριοστρόβιλος μπορεί να λειτουργήσει κανονικά.

Ισοζύγια μάζας – ενέργειας:

Ο CFB αντιδραστήρας έχει απόδοση σε υγρό προϊόν πυρόλυσης 70-75%. Το υπόλοιπο είναι στερεό απανθράκωμα και αέρια. Με δευτερογενή αντίδραση του υγρού κλάσματος είναι δυνατή η παραγωγή περισσότερων αερίων. Θεωρώντας ότι το σύνολο αυτό είναι σε θέση να μετατραπεί σε αέριο προϊόν και με απόδοση αερίου προϊόντος τουλάχιστον 75% β/β επί του RDF, καθώς και ότι το υπόλοιπο 25% επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες θέρμανσης του αντιδραστήρα, μέσω της καύσης του, προκύπτει το παρακάτω ισοζύγιο μάζας

RDF → Pyr.GAS + CHAR

CHAR + AIR → ASH + FlueGAS

Η παραγόμενη τέφρα θεωρείται ότι είναι ίση με αυτή της απλής καύσης του RDF καθώς η μετάβαση των στερεών στο αέριο ρεύμα πυρόλυσης εκτιμάται συγκριτικά αμελητέα. Αριθμητικά προκύπτουν τα παρακάτω δεδομένα:

	RDF	AIR		Pyr.GAS	ASH	FlueGAS
t/a	414,000			310,500		
t/a		NO DATA			58,000	NO DATA

Η παραγωγή του αερίου πυρόλυσης από πλήρη αξιοποίηση του RDF που μπορεί να παραχθεί από ΑΣΑ ανέρχεται στους 310,500 τόνους ετησίως. Ωστόσο αυτό δεν μπορεί να αξιοποιηθεί στους υπολογισμούς της ηλεκτροπαραγωγής καθώς η εκτιμώμενη βιβλιογραφικά θερμογόνο δύναμη αφορά ενέργεια ανά μονάδα όγκου και η προκύπτουσα πυκνότητα του αερίου πυρόλυσης δεν είναι ούτε γνωστή ούτε αξιόπιστα υπολογίσιμη.

Από θερμοδυναμικής όμως σκοπιάς, δεδομένου ότι εισέρχεται χημική ενέργεια στο σύστημα και εξέρχεται από αυτό ηλεκτρική και θερμική, τότε για το ίδιο ρεύμα εισόδου ανεξαρτήτως των διεργασιών μέσα στην μονάδα η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να είναι 60% της εισερχόμενης. Για την αρχική ποσότητα και χημική ενέργεια του RDF (414,000 t/a, 24MJ/Kg) η αναμενόμενη θερμική παραγωγή είναι 283 MW_{th}, όπως στην καύση, τα οποία όμως με απόδοση 60% λόγω συνδυασμένου κύκλου παράγουν 170 MW_e, 54 MW_e περισσότερα. Έτσι πλέον η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΣΑ-RDF μπορεί να φτάσει στο 8.7% της υπάρχουσας της ΔΕΗ για την Αττική.

Πρόχειρο οικονομικό δυναμικό:

Είναι γεγονός ότι μονάδα πυρόλυσης και καύσης RDF δεν υφίσταται σε λειτουργία ούτε σε καν σε πιλοτική κλίμακα. Δεν υπάρχει κανένα οικονομικό δεδομένο σχετικά με το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας τέτοιας μονάδας. Για την εκτέλεση των υπολογισμών, προκειμένου να δοθεί μια ενδεικτική εικόνα, θα πραγματοποιηθεί μια λιγότερο ακριβής προσέγγιση. Καθώς, από άποψης σχεδιασμού και εξοπλισμού, η πυρόλυση – καύση είναι κάτι ενδιάμεσο της απλής καύσης και της πυρόλυσης – αεριοποίησης – καύσης τα κόστη επένδυσης και λειτουργίας θα

τοποθετηθούν αντίστοιχα στο μέσο των δύο παραπάνω διεργασιών (σχετικά με το κόστος της αεριοποίησης βλ. παρακάτω). Έτσι λοιπόν για μια μονάδα πυρόλυσης – καύσης RDF 160,000 t/a και δυναμικότητας 65.7 MW_e διαμορφώνεται το παρακάτω οικονομικό δυναμικό:

Κόστος επένδυσης (Μ€)	Ετήσιο κόστος λειτουργίας (Μ€)		Ετήσια έσοδα ηλεκτρικού ρεύματος (Μ€)	Ετήσια έσοδα διαχείρισης ΑΣΑ (Μ€)	Ετήσιο Κέρδος (Μ€)
-246.5	-15.23		+86.32	+3.76	+74.85

Τα αποτελέσματα και πάλι είναι εντυπωσιακά, περισσότερο από πριν, και αυτό οφείλεται κυρίως στην αύξηση της απόδοσης μέσω της αξιοποίησης του συνδυασμένου κύκλου. Εν προκειμένω, ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης υπολογίζεται σε λίγο περισσότερο από 3 έτη. Παρότι τα παραπάνω αποτελέσματα τοποθετούνται σε μια πολύ αυθαίρετη και προσεγγιστική βάση είναι ικανά να υποδείξουν κατάφορα, όσο εντέλει άστοχα και αν είναι, το οικονομικό συμφέρον που προκύπτει από την παραπάνω διεργασία. Σε περίπτωση λοιπόν που είναι εφικτή, από άποψης τεχνικών ζητημάτων, η επιτυχής υλοποίηση της διεργασίας είναι προφανής η ανάγκη και το κέδρος μιας τέτοιας μονάδας.

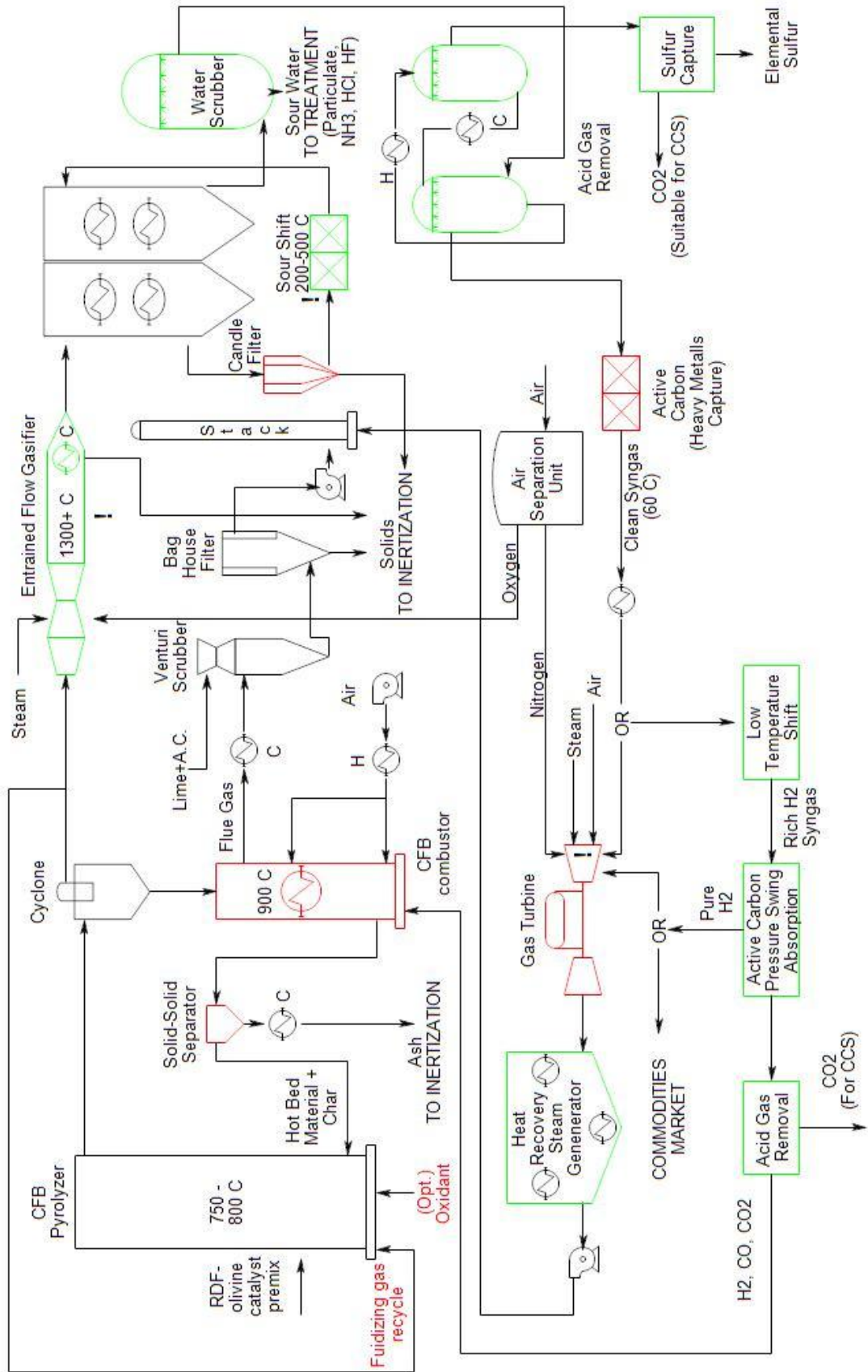
Συνολική αποτίμηση:

Η πυρόλυση της βιομάζας προς παραγωγή αερίου καυσίμου και εφαρμογή συνδυασμένου κύκλου στην ηλεκτροπαραγωγή είναι μια πρώιμη ιδέα. Παρότι υπάρχει μεγάλη απόσταση να καλυφθεί ακόμη μέχρι την επιτυχή εμπορική εφαρμογή τα παρόντα τεχνολογικά και επιστημονικά πορίσματα είναι πολύ υποσχόμενα και υποδεικνύουν σαφέστατα ότι είναι θέμα χρόνου η υλοποίηση αυτής της ιδέας με ισχυρά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

- **Πυρόλυση – Αεριοποίηση – Καύση**

Στο τελευταίο αυτό ‘επίπεδο’ σχεδιασμού της μονάδας θα εισαχθεί η τεχνολογία αεριοποίησης. Δεδομένου ότι η αεριοποίηση μπορεί να διεξαχθεί και σε αντιδραστήρα CFB αναμενόμενο θα ήταν απλώς να προστεθεί οξειδωτικό μέσο σε κατάλληλη αναλογία στον CFB αντιδραστήρα πυρόλυσης. Κάτι τέτοιο θα παρήγαγε αέριο σύνθεσης αλλά το σημαντικό πρόβλημα της πίσσας θα εξακολουθούσε να υπάρχει. Παρότι υπάρχουν μέσα αντιμετώπισής της (βλ. Κεφ. 2) και δεδομένου ότι το αέριο σύνθεσης κατά την επεξεργασία και τον καθαρισμό του ψύχεται αναγκαστικά σε χαμηλές θερμοκρασίες, η υγροποίηση της πίσσας με τα μέσα που έχουν ήδη αξιοποιηθεί στην μονάδα (ολιβίνης και σταθερές κλίνες δολομίτη) είναι αναπόφευκτη. Για τον λόγο αυτό απαιτούνται πρόσθετα μέτρα, καταλύτες νικελίου, που όμως απαιτούν πρώτα το ρεύμα να έχει καθαριστεί από αλκάλια και θείο. Δεδομένου ότι ο καταλύτης νικελίου δρα σε υψηλές θερμοκρασίες (~780 C) αλλά ο καθαρισμός του ρεύματος γίνεται σε χαμηλές (60-80 C) παρουσιάζεται ήδη το πρόβλημα υγροποίησης της πίσσας και απαιτείται αναθέρμανση του ρεύματος κάτι που αυξάνει το κόστος και μειώνει την απόδοση.

Για τον λόγο αυτό θα προτιμηθεί μια διαφορετική οδός αεριοποίησης η οποία και εξαλείφει εξ αρχής την παρουσία της πίσσας, με αποτέλεσμα το ρεύμα να μην χρειάζεται αναθέρμανση σε κανένα σημείο της μετέπειτα κατεργασίας του. Αυτή η οδός είναι του αντιδραστήρα συμπαρασυρόμενης ροής. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την αεριοποίηση στερεού άνθρακα. Ωστόσο ο άνθρακας αλέθεται λεπτομερώς, αναμειγνύεται με νερό και τροφοδοτείται ως πολφός στον αντιδραστήρα. Επομένως είναι βάσιμη η προσδοκία να τροφοδοτηθεί αντί πολφού με ρεύμα αερίου πυρόλυσης σε υψηλή πίεση και να πραγματοποιηθεί επιτυχώς η αποδοτική αεριοποίηση με ταυτόχρονη καταστροφή της πίσσας. Το γεγονός ότι το αέριο πυρόλυσης δεν περιλαμβάνει στερεά καύσιμο ύλη συνεπάγεται θεωρητικά και καλύτερη συνολικά αντίδραση μέσα στον αντιδραστήρα, καθώς εξαλείφονται τα παρεμποδιστικά φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας στο εσωτερικό του στερεού σωματιδίου του καυσίμου. Η προτεινόμενη διεργασία έχει ως εξής:



Περιγραφή της διεργασίας:

Η διεργασία εδώ συνεχίζει από το σημείο εξόδου του πυρολυτικού CFB αντιδραστήρα. Το ρεύμα αυτό εισέρχεται απευθείας σε αντιδραστήρα αεριοποίησης συμπαρασυρόμενης ροής. Εκεί οι έντονες συνθήκες υψηλής πίεσης, υψηλής θερμοκρασίας και έντονου τυρβώδους αεριοποιούν γρήγορα και αποδοτικά τις οργανικές ενώσεις, καταστρέφουν πλήρως την περιεχόμενη πίσσα και τήκουν όλα τα συμπαρασυρόμενα σωματίδια. Αφού το ρεύμα ψυχθεί περνά από κεραμικό φίλτρο και εισέρχεται σε καταλυτικό αντιδραστήρα όξινης 'αντίδρασης μετατόπισης' (Sour Shift Reaction). Στην έξοδο του αντιδραστήρα το ρεύμα έχει την επιθυμητή, εφ' όσον επιτρεπτή των συνθηκών, αναλογία CO/H₂. Κατόπιν ψύχεται περαιτέρω προκειμένου να φτάσει σε κατάλληλα θερμοκρασιακά επίπεδα για έκπλυση με νερό και αφαίρεση των όξινων αερίων. Από την αφαίρεση των όξινων είναι δυνατή η απομόνωση στοιχειακού θείου και η συμπίεση του CO₂ προς αποθήκευση. Το αέριο σύνθεσης, εφ' όσον καθαριστεί και από τα περιεχόμενα βαρέα μέταλλα πληροί όλες τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Από το σημείο αυτό και έπειτα μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο στον αεριοστροβίλο, είτε με περαιτέρω αντίδραση μετατόπισης και κατάλληλο διαχωρισμό να παράξει καθαρό υδρογόνο.

Η όλη διεργασία αεριοποίησης απαιτεί και την ύπαρξη μονάδας διαχωρισμού αέρα (Air Separation Unit, ASU) για την παραγωγή του απαιτούμενου οξυγόνου. Εδώ καταναλώνεται ένα σημαντικό ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας για τις ανάγκες συμπίεσης και ψύξης του αέρα. Το ενεργειακό κόστος ελαφρύνεται με διοχέτευση μέρους του συμπιεσμένου αέρα του αεροσυμπιεστή του στροβίλου προς την μονάδα ASU.

Σημαντικά σημεία της διεργασίας:

Σημειωμένα με «!» στο διάγραμμα ροής

- Αντιδραστήρας αεριοποίησης συμπαρασυρόμενης ροής: αυτή η τεχνολογία αποτελεί το κομβικό σημείο που επιτρέπει εντέλει την συγκεκριμένη αποδοτική και απλοϊκή διαμόρφωση της διεργασίας. Πέραν της αποδοτικής αεριοποίησης με ολική καταστροφή της πίσσας ο αντιδραστήρας αυτού του τύπου παρουσιάζει και το εξής πλεονέκτημα: στην επικρατούσα θερμοκρασία τα στερεά σωματίδια τήκονται (παραγωγή sinter). Το προκύπτων υαλώδες υλικό είναι λεπτόρρευστο στις συνθήκες του αντιδραστήρα και όταν ψυχθεί κατά την έξοδο στερεοποιείται σε σωματίδια. Τα σωματίδια αυτά έχουν κατάλληλο λόγο μάζας/μεγέθους ούτως ώστε να είναι εύκολος ο διαχωρισμός τους. Αποτέλεσμα αυτού είναι τα τελικά αιωρούμενα στερεά στην έξοδο να είναι μειωμένα.

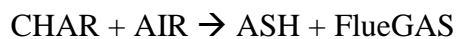
Επίσης εδώ η θερμοκρασία εισόδου του καύσιμου ρεύματος στον αντιδραστήρα είναι ήδη υψηλή καθώς προέρχεται απευθείας από την έξοδο του προηγούμενου. Κατά την αεριοποίηση χρησιμοποιείται ως οξειδωτικό μίγμα οξυγόνου και ατμού. Ο ατμός, ως μέσο αεριοποίησης παράγει περισσότερο υδρογόνο αλλά η αντίδραση αυτή είναι έντονα ενδόθερμη. Για τον λόγο αυτό προστίθεται και οξυγόνο προκειμένου να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες για

την επίτευξη της απαιτούμενης θερμοκρασίας και κάλυψης της ενέργειας των ενδόθερμων αντιδράσεων. Στην προκειμένη περίπτωση, η ήδη υψηλή θερμοκρασία του ρεύματος εισόδου εισάγει ενέργεια στον αντιδραστήρα και άρα συνεπάγεται ελάττωση του λόγου O₂/H₂O του οξειδωτικού μέσου με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης σε υδρογόνο.

- Όξινη αντίδραση μετατόπισης: σχετικά με την Shift Reaction που επιτρέπει την διόρθωση της αναλογίας CO/H₂ υπάρχουν δύο οδοί, η πρώτη αφορά τον αρχικό καθαρισμό του ρεύματος και κατόπιν την αναθέρμανση του και είσοδο του στον καταλυτικό αντιδραστήρα. Αυτό συμβαίνει καθώς ορισμένοι καταλύτες δηλητηριάζονται από την παρουσία όξινων αερίων, κυρίως του υδρόθειου. Η δεύτερη αφορά την άμεση κατεργασία του syngas πριν τον καθαρισμό. Αυτή η οδός προέκυψε μεταγενέστερα με την δημιουργία καταλυτών που είναι ανθεκτικοί στις προσμίξεις του ‘ωμού’ syngas. Πλέον προτιμάται η δεύτερη καθώς εξαλείφει ορισμένα στάδια κατεργασίας (π.χ. ψύξη, υδρόλυση, αναθέρμανση) και συνεπώς είναι πιο συμφέρουσα.
- Αεριοστρόβιλος: όπως έχει αναφερθεί τα ανθρακούχα καύσιμα μπορούν να καούν απευθείας στον αεριοστρόβιλο. Για λόγους μείωσης της καταπόνησης του εξοπλισμού απλώς προ-αναμειγνύονται με λίγο αέρα. Στην περίπτωση όμως του syngas η μεγάλη περιεκτικότητα σε υδρογόνο απαιτεί την προ-ανάμειξή του με ατμό και άζωτο ούτως ώστε να αραιωθεί η συγκέντρωση του υδρογόνου και να αποφευχθούν ζημιές από την βίαιη καύση του. Παράλληλα η πυκνότητα και η θερμογόνος δύναμη του syngas απαιτούν την μεγαλύτερη παροχή του στον στρόβιλο για την ομαλή λειτουργία του. Ωστόσο η μεγαλύτερη παροχή αυτού του ιδιαίτερου καυσίμου αυξάνει την εκπομπή της θερμότητας μέσα στον στρόβιλο αλλά και αναγκάζει συμπιεστή και άξονα να ασκούν περισσότερη δύναμη. Όλη αυτή η επιπρόσθετη καταπόνηση, σε σχέση με απλά καύσιμα π.χ. φυσικό αέριο, μειώνει τον χρόνο ζωής του στροβίλου και έτσι μέριμνα πρέπει να δοθεί στην χρήση κατάλληλου εξοπλισμού.

Ισοζύγια μάζας ενέργειας:

Πλέον το RDF μετατρέπεται σε αέριο σύνθεσης ή υδρογόνο. Το ισοζύγιο μάζας έχει ως εξής:



Καθότι η ακριβής σύσταση του τελικού προϊόντος εξαρτάται από τις εκάστοτε ανάγκες το μερικό ισοζύγιο μάζας συμπληρώνεται ως εξής:

	RDF	AIR	O ₂	H ₂ O		CO	CO ₂	H ₂	ASH	FlueGAS
t/a	414,000									
		NO DATA							58,000	NO DATA
			Var.	Var.		Var.	Var.	Var.		

Όπου “Var.” αφορά μεταβλητή τιμή.

Από ενεργειακής άποψης είναι επίσης ανέφικτος ο υπολογισμός της θερμικής απόδοσης καθώς δεν είναι γνωστή ούτε η παροχή ούτε η θερμογόνος δύναμη του syngas. Από θερμοδυναμικούς και μόνο υπολογισμούς, με βάση την εισερχόμενη στο σύστημα ενέργεια και την απόδοση του συνδυασμένου κύκλου 60% προκύπτει ηλεκτροπαραγωγή ίδια με αυτή της πυρόλυσης, 170 MW_e. Στην συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να είναι και ελαφρώς μικρότερη καθώς η εισαγωγή της μονάδας διαχωρισμού αέρα πραγματοποιεί σημαντική κατανάλωση ενέργειας κάτι που αυξάνει τις απώλειες και άρα μειώνει την απόδοση.

Πρόχειρο οικονομικό δυναμικό:

Σύμφωνα με επενδυτικά δεδομένα για μια μονάδα αεριοποίησης, ορυκτού άνθρακα όμως, με αντιδραστήρα τύπου συμπαρασυρόμενης ροής και εγκαταστάσεις διαχωρισμού αέρα δυναμικότητας 630 MW_e το εκτιμώμενο επενδυτικό κόστος ανερχόταν στα \$1,813/KW_e και το κόστος λειτουργίας σε \$0.0133/KW_e (δεδομένα για το 2007) (67). Τα δεδομένα αφορούν μια μονάδα αρκετά διαφορετική από την παραγωγή RDF και αεριοποίηση, σε ξεχωριστά στάδια πυρόλυσης αεριοποίησης, για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Συγκεκριμένα, από άποψης σχεδιασμού η μονάδα της βιβλιογραφίας περιλαμβάνει, περίπου, όλα τα μέρη του εξοπλισμού που προστίθενται στην υπάρχουσα διεργασία της καύσης του RDF προκειμένου να επιτευχθεί η αεριοποίηση. Αυθαίρετα θα θεωρηθεί ότι το κόστος επένδυσης και λειτουργίας της συγκεκριμένης μονάδας είναι το άθροισμα του κόστους της υπάρχουσας διεργασίας καύσης RDF με αυτό της μονάδας IGCC της βιβλιογραφίας. Αυτή η επιλογή αναμένεται να δώσει ένα όχι και τόσο αντιπροσωπευτικό οικονομικό δυναμικό, ωστόσο το βέλτιστο δυνατό με βάση τα λιγοστά στοιχεία που υπάρχουν για αυτή την περίπτωση.

Έτσι λοιπόν για την μονάδα αναφοράς των 160,000 t/a RDF η ηλεκτροπαραγωγή ανέρχεται σε 65.7 MW_e. Με αναγωγή του κόστους στο παρόν, την ισοτιμία και την τιμή πώλησης ηλεκτρισμού και διαχείρισης των ΑΣΑ προκύπτει:

	Κόστος επένδυσης (Μ€)	Ετήσιο κόστος λειτουργίας (Μ€)		Ετήσια έσοδα ηλεκτρικού ρεύματος (Μ€)	Ετήσια έσοδα διαχείρισης ΑΣΑ (Μ€)	Ετήσιο Κέρδος (Μ€)
Υπάρχουσα μον. καύσης	-187	-8.14				
Προσθήκη E.F. Gasifier	-119	-14.18				
RDF – Pyr – Gas	-306	-22.32		+86.32	+3.76	+67.76

Τα παραπάνω, χονδρικά, δεδομένα συμπεραίνουν έναν χρόνο απόσβεσης 4.5 έτη. Και αυτή η διεργασία, εφ' όσον τελικά εφικτή, είναι κάτι πολύ παραπάνω από βιώσιμη, με ανοχή σε μεγάλη απόκλιση των πραγματικών οικονομικών στοιχείων από τα παραπάνω. Σε άμεση σύγκριση με την προηγούμενη διεργασία, πυρόλυση –

καύση, η αεριοποίηση είναι λιγότερο συμφέρουσα καθώς έχει μεγαλύτερο κόστος επένδυσης, μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος και ίσα έσοδα. Αυτό συμφωνεί με την αυξημένη πολυπλοκότητα της διεργασίας. Ωστόσο η αεριοποίηση μπορεί εύκολα και αποδοτικά να συνδυαστεί με δέσμευση του CO₂ και παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία ως προς το τελικό προϊόν, δύο ουσιώδη γεγονότα που σίγουρα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν.

Συνολική αποτίμηση:

Η διεργασία της αεριοποίησης της βιομάζας είναι σε θέση να παράξει ένα γνωστό και πρότυπο υλικό, το αέριο σύνθεσης. Παρότι η καύση του είναι καθαρότερη (εξαιρετικά απλά συστατικά) από αυτή των υδρογονανθράκων, το ίδιο το υλικό έχει πολλή περισσότερη αξία ως πρώτη ύλη σε χημικές βιομηχανίες. Παράλληλα μέσω του syngas είναι δυνατή η μαζική παραγωγή υδρογόνου, του καθαρότερου και ισχυρότερου καυσίμου που υπάρχει μετά την πυρηνική ενέργεια όντας όμως ασύγκριτα πιο εύχρηστο. Λόγω αυτής ακριβώς της φύσης του, το υδρογόνο αναμένεται να αποτελέσει στυλοβάτη των οικονομιών και κοινωνιών του μέλλοντος. Η παραπάνω διεργασία τόσο λόγω της πρώτης ύλης όσο και λόγω των συγκεκριμένων συνθηκών που εφαρμόζονται, είναι σε θέση να παράξει αυτόνομα μεγάλες ποσότητες υδρογόνου, ικανές να 'ενεργοδοτήσουν' τις δραστηριότητες και να ικανοποιήσουν τις ανάγκες του μέλλοντος.

Επίλογος

Όπως όλες οι ανθρώπινες κοινωνίες, έτσι και η δική μας παράγει απορρίμματα και έχει ενεργειακές ανάγκες. Η ορθή διαχείριση των απορριμμάτων αποτελεί συχνά ένα μελανό σημείο της κοινωνίας καθώς η συνηθέστερη πρακτική είναι η υγειονομική ταφή. Παράλληλα οι καθημερινές δραστηριότητες των πολιτών απαιτούν μεγάλα ποσά ενέργειας τα οποία κατά κόρον προκύπτουν από ορυκτά καύσιμα, έχοντας έτσι έναν αντίστοιχο αντίκτυπο στο περιβάλλον και κατ' επέκταση πίσω σε εμάς τους ίδιους.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε πως μπορεί να επιτευχθεί μια ταυτόχρονη επίλυση των δύο αυτών προβλημάτων. Η παραγωγή ενέργειας από ΑΣΑ βασιζόμενη στην καλή απόδοση και την ελαχιστοποίηση της παραγόμενης ρύπανσης παρουσιάστηκε ως η βέλτιστη λύση. Για τον λόγο αυτό εξετάστηκε μια πληθώρα πρακτικών και παραμέτρων που να εξασφαλίζουν αυτό το αποτέλεσμα. Με βάση την βιβλιογραφία, την εμπειρία και κυρίως την κρίση του μηχανικού επιλέχθηκαν εντέλει τέσσερις διεργασίες: η αναερόβια χώνευση, η καύση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση. Από αυτές η κάθε μία χρησιμεύει για την κατεργασία διαφορετικού κλάσματος των ΑΣΑ και παράγει ένα διαφορετικό ιδιαίτερο προϊόν. Πέρα από τους οποιουδήποτε υπολογισμούς και εκτιμήσεις είναι γεγονός ότι δύο από αυτές πληρούν όλες τις προϋποθέσεις για την άμεση εφαρμογή τους: η αναερόβια χώνευση και η καύση. Οι λοιπές δύο έχουν σαφώς ανώτερα αποτελέσματα αλλά απαιτούν ακόμη εκτενή μελέτη και πειραματισμό μέχρι να επιτευχθεί η εμπορική αξιοποίηση τους.

Ανεξάρτητα από την συγκεκριμένη τεχνική επεξεργασίας των ΑΣΑ, αυτός ο τρόπος διαχείρισης παρουσιάζει πολλαπλά οφέλη καθώς είναι σε θέση να αξιοποιεί τα απορρίμματα, να παράγει ενέργεια, να προστατεύει το περιβάλλον, να προσφέρει εργασία, να ενισχύει την οικονομία και κυρίως να αποδεικνύει ότι πάντοτε υπάρχει τρόπος κάτι που θεωρείται ζημιογόνο να μετατραπεί σε κάτι με αξία. Είναι απλώς θέμα τρόπου προσέγγισης του εκάστοτε θέματος.

Το ουσιώδες συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι τα απορρίμματα λαμβάνουν αδίκως τον χαρακτηρισμό του «άχρηστου» και αποθέτονται σωρηδόν σε ΧΥΤΑ. Όπως όλα μπορούν να τεθούν και αυτά σε μια αεικίνητη τροχιά και να προσφέρουν συνεχώς κάτι το χρήσιμο. Ο μόνος περιορισμός στην αξιοποίηση του κάθε τινός είναι η φαντασία και η πρόθεση του ανθρώπου, και αυτό ακριβώς είναι το σημείο όπου επιδέχεται βελτίωση: είναι θέμα παιδείας και αρετής η ορθή διαχείριση όχι μόνο των φυσικών πόρων αλλά και του ίδιου μας του εαυτού και μέσω αυτής είναι δυνατή η αντιμετώπιση του οποιουδήποτε προβλήματος, «μηχανικού» ή μη.

Καλή συνέχεια.

Βιβλιογραφία

1. **Μπαμπινιώτης**. *Λεξικό της Νέας Ελληνικής*. Αθήνα : s.n., 2005.
2. **ΕΕΔΣΑ**. [Ηλεκτρονικό] <http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=94>.
3. [Ηλεκτρονικό]
<http://www.window.state.tx.us/specialrpt/energy/renewable/municipal.php>.
4. **ΕΛ.ΣΤΑΤ.** [Ηλεκτρονικό]
http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/BUCKET/General/A1602_SAM01_DT_DC_00_2011_02_F_GR.pdf.
5. **ΕΕΔΣΑ**. [Ηλεκτρονικό] <http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=95>.
6. —. [Ηλεκτρονικό] <http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=94>.
7. **π.** [Ηλεκτρονικό] <http://www.3comma14.gr/pi/?survey=15335>.
8. *Εφημερίς της Κυβερνήσεως*. **Δημοκρατία, Ελληνική**. 1, 13/02/2012, Τόμ. Φύλλο 24.
9. *ΟΔΗΓΙΑ 2008/98/ΕΚ*. Ένωση, Ευρωπαϊκή. L312/3, 22/11/2008.
10. *ΟΔΗΓΙΑ 94/62/ΕΚ*. Ένωση, Ευρωπαϊκή. L 365, 31.12.1994.
11. *ΟΔΗΓΙΑ 2004/12/ΕΚ*. Ένωση, Ευρωπαϊκή. L 47/26, 18/02/2004.
12. **University, Columbia**. *Energy and economic value of NRP and MSW in USA*. 2011.
13. *Biomass Energy Data Book*. [Ηλεκτρονικό] U.S. Department of energy.
http://cta.ornl.gov/bedb/appendix_a/Lower_and_Higher_Heating_Values_of_Gas_Liquid_and_Solid_Fuels.pdf.
14. **Basu, Prabir**. *Biomass gasification and pyrolysis practical desing*. Oxford : Academic Press, Elsevier, 2010.
15. **Ι.Μαρία, Αθανασιάδη**. *Διπλ.Εργ: Αποτίμηση τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης αστικών απορριμμάτων*. Αθήνα : ΕΜΠ, 2011.
16. **affairs, Department for environment food & rural**. *Incineration of Municipal Solid Waste*. United Kingdom : www.defra.gov.uk, 2013.
17. **REPORT, WORLD BANK TECHNICAL GUIDANCE**. *Municipal Solid Waste Incineration*. Washington, D.C. : s.n., 1999.
18. [Ηλεκτρονικό] <http://www.jeag.com/?id=20>.
19. [Ηλεκτρονικό] http://www.biomassenergyresearch.ca/combustion_expertise.htm.

20. **Peña, José Alberto Pascual.** *BFB When to use this technology?* s.l. : Foster Wheeler Global Power Group, 2011.
21. **McKay, Gordon.** *Dioxin characterisation, formation and minimisation during municipal solid waste (MSW) incineration: review.* Kowloon, Hong Kong (University of Science and Technology) : Elsevier, 2001.
22. *LOMELLINA WASTE-TO-ENERGY PLANT.* s.l. : Foster Wheller.
23. [Ηλεκτρονικό]
https://unfccc.int/kyoto_protocol/mechanisms/emissions_trading/items/2731.php.
24. **Bert Metz, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos, Leo Meyer.** *Carbon Dioxide Capture and Storage.* s.l. : CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2005.
25. **INSTITUTE, GLOBAL CCS.** *CO2 CAPTURE TECHNOLOGIES.* s.l. : GLOBAL CCS INSTITUTE, 2012.
26. **ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΥ, ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ.** *Παραγωγή ενέργειας από λιγνίτη με μηδενική έκλυση αερίων θερμοκηπίου και σύγκριση με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την Ελλάδα.* s.l. : ΕΜΠ, 2011.
27. **Michael C. Trachtenberg, Lihong Bao Carbozyme, Inc.** *CO2 Capture: Enzyme vs. Amine.* 2005.
28. **Laboratory, National Energy technology.** *Carbon Capture Technology Research and Breakthrough Concepts.* s.l. : Department of Energy, USA gov, 2008.
29. International Environmental Technology Centre. *United Nations Environment Programme* . [Ηλεκτρονικό] <http://www.unep.org/ietc/Portals/136/SWM-Vol1-Part2.pdf>.
30. **Scott Wennerstrum, Tom Kendrick, John Tomaka, and Jerry Cain.** Size reduction solutions for hard-to-reduce materials. *The Fitzpatrick Co.* [Ηλεκτρονικό]
http://www.fitzmill.com/PDFs/articles_pdf/hard_to_reduce.pdf.
31. **Ying-Hsi Chang, W.C. Chen, Ni-Bin Chang.** *Comparative evaluation of RDF and MSW incineration.* Taiwan : Elsevier, 1998.
32. **Antonio C. Caputo, Pacifico M. Pelagagge.** *RDF production plants: II Economics and profitability.* L'Aquila, Italy : Pergamon, 2001.
33. **Dutta, Animesh.** *TORREFACTION AND OTHER PROCESSING OPTIONS.* s.l. : University of Guelph. <http://www.ofa.on.ca/uploads/userfiles/files/animesh%20dutta.pdf>.
34. [Ηλεκτρονικό] http://www.energy.siemens.com/mx/pool/hq/power-generation/steam-turbines/Industrial_Steam_Turbines_en.pdf.
35. **Jaap Koppejan, Shahab Sokhansanj, Staffan Melin, Sebnem Madrali.** *Status overview of torrefaction technologies.* s.l. : IEA Bioenergy , 2012.

36. [Ηλεκτρονικό] <http://www.mackaygreenenergy.ph/torrefaction.html>.
37. [Ηλεκτρονικό] <http://jtmadhavan.files.wordpress.com/2009/09/the-calorie-chart-of-indian-food.pdf>.
38. [Ηλεκτρονικό] <http://www.lippel.com.br/en/drying-of-biomass/rotary-drum-dryers.html#.UIRB9PI5LZ4>.
39. [Ηλεκτρονικό] http://www.alibaba.com/product-gs/327444058/hot_sale_Rotary_Drum_Dryer.html.
40. **Gao, Feng.** *Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels*. s.l. : University of Canterbury, 2010. <http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/4303>.
41. **Maurstad, Ola.** *An Overview of coal based IGCC Technology*. Massachusetts : Massachusetts Institute of Technology Laboratory for Energy and the Environment, 2005.
42. **Robert Jones, Jeffrey Goldmeer, Bruno Monetti.** *Addressing Gas Turbine Fuel Flexibility*. s.l. : GE Energy.
43. **Wender, Irving.** *Reactions of synthesis gas*. USA : Elsevier, 1996.
44. **Jan Fjellerup, Jesper Ahrenfeldt, Ulrik Henriksen, Benny Gøbel.** *Formation, Decomposition and Cracking of Biomass Tars in*. s.l. : Technical University of Denmark, 2005.
45. **Sundac, Nikola.** *Catalytic cracking of tar from biomass*. Lund, Sweden : Department of Chemical Engineering,, Lund University.
46. **Luc P. L. M. Rabou, * Robin W. R. Zwart, Berend J. Vreugdenhil, and Lex Bos.** *Tar in Biomass Producer Gas, the Energy research Centre of The Netherlands (ECN) Experience: An Enduring Challenge*. Petten, The Netherlands : the Energy research Centre of The Netherlands (ECN), 2009.
47. **Χ. Ζαφείρης, Ι. Αγαπητίδης.** *ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ*. Αθήνα : ΕΕΔΣΑ (4ο Παν. Συν.), 2012.
48. *Basic Data on Biogas*. s.l. : Swedish Gas Centre, 2012.
49. **Board, Integrated Waste Management.** *AgencyCurrent Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste*. California : California Environmental Protection Agency, 2008.
50. **VERMA, SHEFALI.** *ANAEROBIC DIGESTION OF BIODEGRADABLE ORGANICS IN MUNICIPAL SOLID WASTES*. s.l. : Department of Earth & Environmental Engineering (Henry Krumb School of Mines) Fu Foundation School of Engineering & Applied Science Columbia University, 2002.
51. **RICH, M. KAYHANIAN and D.** *PILOT-SCALE HIGH SOLIDS THERMOPHILIC ANAEROBIC DIGESTION OF MUNICIPAL SOLID WASTE WITH AN EMPHASIS ON NUTRIENT REQUIREMENTS*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Davis, Davis, : Pergamon, 1994.

52. Wikipedia. [Ηλεκτρονικό] <http://en.wikipedia.org/wiki/Beer#History>.
53. **Charles E. Wyman, Stephen R. Decker and Michael E. Himmel, John W. Brady and Catherine E. Skopec, Liisa Viikari.** *43 Hydrolysis of Cellulose and Hemicellulose*.
http://nsm1.nsm.iup.edu/jford/projects/misc/HydrolysisOfCelluloseAndHemicellulose_review.pdf.
54. **Mitsuru Sasaki, Bernard Kabyemela, Roberto Malaluan, Satoshi Hirose, Naoko Takeda, Tadafumi Adschiri, Kunio Arai.** *Cellulose hydrolysis in subcritical and supercritical water*.
Tohoku University, Japan : Elsevier, 1997.
55. Energy Justice Network. [Ηλεκτρονικό] <http://www.energyjustice.net/prices>.
56. farmdoc DAILY. *Department of Agricultural and Consumer Economics University of Illinois*. [Ηλεκτρονικό] <http://farmdocdaily.illinois.edu/2013/05/brazilian-ethanol-implications.html>.
57. [Ηλεκτρονικό] http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html.
58. [Ηλεκτρονικό] http://www.engineeringtoolbox.com/coal-heating-values-d_1675.html.
59. ΔΕΗ Α.Ε. [Ηλεκτρονικό] www.dei.gr.
60. European Environment Agency. [Ηλεκτρονικό] <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/typical-charge-gate-fee-and>.
61. ΔΕΗ. [Ηλεκτρονικό] <http://www.dei.gr/el/eksupiretisi-pelatwn/oikiakoi-pelates/timologia/oikiako-timologio-xwris-xronoxrewsi-g1>.
62. ΔΕΣΜΗΕ. [Ηλεκτρονικό] <http://www.desmie.gr/ape-sithya/adeiodotiki-diadikasia-kodikopoiisi-nomotheias-ape/periechomena/timologisi-energeias-apo-ape/>.
63. *Cogeneration & On-Site power production*. [Ηλεκτρονικό]
<http://www.cospp.com/articles/print/volume-11/issue-3/features/gas-turbines-breaking.html>.
64. Department of Energy. *National Energy Technology Laboratory*. [Ηλεκτρονικό]
http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/cfpp/technologies/supercritical_utltr_boilers.html.
65. **Lawson, Tom.** *Overview of anaerobic digestio and digesters*. s.l. : NorthEast Biogas.
66. [Ηλεκτρονικό] http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/noticias_eventos/waste-to-energy.pdf.
67. **Julianne M. Klara, John G. Wimer.** *GE Energy IGCC Plant*. s.l. : General Electric.

68. USA National Energy Technology laboratory. [Ηλεκτρονικό]
<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/gasifipedia/pdfs/production-refuse-derived-fuel-chapter12.pdf>.

69. Springer Link. [Ηλεκτρονικό] http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-1-4614-5752-7_6.pdf.