

Αριθμητική προσομοίωση μονάδας αεριοποίησης βιομάζας σε ρευστοποιημένη κλίνη

Διπλωματική Εργασία

Σωτήριος Κοζαλάν

Επιβλέποντες : DIPL. -ING. Θ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ
PROF. DR. -ING. Ε. ΚΑΚΑΡΑΣ
PROF. DR. -ING. Η. SPLIETHOFF

Έναρξη : 01.03.2011

Παράδοση : 31.08.2011

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αναπτύχθηκε εξ ολοκλήρου και υποστηρίχθηκε από το Ινστιτούτο Ενεργειακών Συστημάτων (Institute of Energy Systems), στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Μονάχου (Technical University of Munich, Germany), και το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο της Αθήνας.

Από αυτή τη θέση θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Prof. Dr.-Ing., Ε. Κακαρά, για την ευκαιρία που μου έδωσε να αναπτύξω αυτή την εργασία στο Μόναχο, εγκρίνοντας το πρόγραμμα ανταλλαγής φοιτητών Erasmus. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κύριο Prof. Dr.-Ing., Η. Spliethoff, για την αποδοχή και την υποδοχή μου στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Μονάχου.

Είμαι ευγνώμων για την υποστήριξη του κυρίου As. Prof. Dr.-Ing., Σ. Καρέλλα, ο οποίος, μέσω της ακατάπαυστης προσπάθειας και καθοδήγησης του, με έχει οδηγήσει προς ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες και βιώσιμες λύσεις στη Μηχανολογία. Έχει σταθεί ανελλιπώς δίπλα στους φοιτητές του υποστηρίζοντας και εμπυχώνοντας τους όλα αυτά τα χρόνια. Ειδικές ευχαριστίες αποδίδω προς τον επιβλέποντα μου Dipl. -Ing., Θ. Παπαδόπουλο για τη βοήθεια και την εξαιρετική καθοδήγηση του σε όλη την πορεία αυτής της ερευνητικής δραστηριότητας. Με υποστήριξε για ό,τι χρειαζόμουν από την αρχή μέχρι και το πέρας αυτής της εργασίας.

Ειδική αναφορά στην οικογένεια μου, που πίστεψε σε εμένα και στάθηκε πλάι μου σε κάθε περίπτωση όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία πρωτίστως στην αγαπητή μου Σοφία και τους υπέροχους φίλους μου Κλάιντ, Ιάσονα, Μαργαρίτα και Ηρώ, οι οποίοι με στήριξαν και υπέμειναν αμέτρητες συζητήσεις για την προσομοίωση βιομάζας τους τελευταίους μήνες.

Αυτή η εργασία δεν θα ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί χωρίς την Υποτροφία του Προγράμματος Erasmus, από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο της Αθήνας, την οποία εκτιμώ ιδιαίτερα.

Περίληψη

Ένα τριδιάστατο αριθμητικό μοντέλο αναπτύχθηκε για να περιγραφεί η διαδικασία αεριοποίησης βιομάζας μέσα σε μια ρευστοποιημένη κλίνη ατμού. Χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό πακέτο FLUENT 13.0, λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα ξήρανσης, απελευθέρωσης πτητικών, καύσης και αεριοποίησης. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις (3) φάσεις για την προσομοίωση του αντιδραστήρα (άμμος, στερεά φάση για το καύσιμο και αέρια φάση). Η άμμος και η στερεά φάση περιγράφηκαν με την κινητική θεωρία των κοκκωδών ροών (kinetic theory of granular flows - KTGF). Όλες οι φάσεις περιγράφηκαν χρησιμοποιώντας την προσέγγιση κατά Euler για τη μεταφορά μάζας, ενέργειας και ορμής. Το χημικό μοντέλο αποτελείται από τρεις (3) ετερογενείς και δύο (2) ομογενείς αντιδράσεις. Η ξήρανση και η απελευθέρωση πτητικών υποτέθηκαν ότι λαμβάνουν χώρα ακαριαία στην περιοχή εισόδου του καυσίμου. Όλοι οι ρυθμοί αντίδρασης καθορίστηκαν από εξισώσεις Arrhenius, με κινητικές παραμέτρους από τη βιβλιογραφία. Ο αντιδραστήρας ερευνήθηκε σε ατμοσφαιρικές συνθήκες λειτουργίας. Η επικύρωση της ισχύος του μοντέλου έγινε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του με τα πειραματικά. Διαπιστώθηκε η ακριβής απόδοση του ύψους ρευστοποίησης, η κατανομή της θερμοκρασίας και πίεσης, και οι συγκεντρώσεις των συστατικών των επιμέρους φάσεων. Η κύρια συνεισφορά της παρούσας εργασίας είναι το υπολογιστικό μοντέλο, το οποίο αναπτύχθηκε για μια τριδιάστατη ρεαλιστική μονάδα αεριοποίησης, με χρήση του κώδικα CFD ευρείας χρήσης FLUENT 13.0.

Περιεχόμενα

Ονοματολογία	VIII
1 Εισαγωγή	3
1.1 Ενεργειακές Απαιτήσεις	3
1.2 Κίνητρα	6
1.3 Σκοπός της εργασίας	6
1.4 Δομή της Εργασίας	8
2 Βασικές αρχές αεριοποίησης	9
2.1 Ιστορικό σημείωμα	9
2.2 Αεριοποίηση	10
2.3 Βιομάζα	13
2.3.1 Ανάλυση βιομάζας	13
2.3.2 Διαφορές μεταξύ αεριοποίησης λιγνίτη και βιομάζας	14
2.3.3 Εκπομπές	14
2.4 Τύποι αεριοποιητών	17
2.4.1 Αεριοποιητής ανοδικού ρεύματος ή αντιρροής	17
2.4.2 Αεριοποιητής καθοδικού ρεύματος ή ομοροής	19
2.4.3 Αεριοποιητής πλαϊνού ρεύματος	20
2.4.4 Αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης	21
2.4.5 Άλλοι τύποι αεριοποιητών	23
3 Λειτουργικά χαρακτηριστικά	25
3.1 Θερμοκρασία κλίνης	25
3.1.1 Αυτοθερμική και αλλοθερμική θέρμανση	25
3.2 Το μέσο αεριοποίησης	26
3.3 Απόδοση αεριοποιητή	28
4 Χημικές διεργασίες	29
4.1 Ξήρανση	29
4.2 Πυρόλυση	29
4.2.1 Πρωτογενής πυρόλυση	29
4.2.2 Δευτερογενής πυρόλυση	31
4.3 Αλληλεπίδραση εξανθρακώματος - αερίου	31
4.4 Αντιδράσεις αερίου - αερίου	32
4.5 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας	32
4.5.1 Προσεγγίσεις μοντελοποίησης	32

5	Μοντέλο <i>Euler</i>	35
6	Περιγραφή του μοντέλου	37
6.1	Προσέγγιση <i>Euler – Euler</i>	37
6.2	Καύσιμο βιομάζα	38
6.3	Γεωμετρία αντιδραστήρα	39
6.4	Υπολογιστικό πλέγμα	41
6.5	<i>BiomassHeatpipeReformer – BioHPR(TUM)</i>	42
6.6	Φάσεις και Υλικά	43
6.6.1	Οριακές Συνθήκες	44
6.7	Κινητικά συστήματος	45
7	Προσεγγίσεις μοντελοποίησης - Αποτελέσματα	47
7.1	Μοντέλο πυρόλυσης μεθανίου - Προσέγγιση 1	47
7.2	Μοντέλο πυρόλυσης <i>Seebauer</i> - Προσέγγιση 2	52
7.3	Αναθεωρημένη προσέγγιση μοντελοποίησης (3)	56
7.4	Συμπεράσματα	59
8	Προοπτικές	61

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Μηνιαίες στιγμιαίες τιμές του πετρελαίου Brent από τον Μάιο 1987 - Απρίλιο 2011	4
1.2	Διαφορετικοί τρόποι μετατροπής της βιομάζας σε βιοενέργεια	6
2.1	Το Adler Diplomat 3 με γεννήτρια αερίου (1941)	9
2.2	Ακολουθία αντιδράσεων για την αεριοποίηση κάρβουνου ή βιομάζας (από (R. Reimert (1989))	10
2.3	Διαφορετικοί τύποι αεριοποιητών	17
2.4	Αεριοποιητής ανοδικού ρεύματος	18
2.5	Αεριοποιητής καθοδικού ρεύματος	19
2.6	Αεριοποιητής πλαϊνού ρεύματος	21
2.7	Αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης	22
6.1	Βιομάζα - Πελλέτες μαλακού ξύλου <i>Agrol</i>	38
6.2	Δοκιμαστική διάταξη αεριοποίησης <i>TUM</i>	40
6.3	Υπολογιστικό πλέγμα	42
6.4	Αρχή λειτουργίας του αγωγού θερμότητας	42
7.1	Κλάσμα όγκου της άμμου	48
7.2	Κλάσμα όγκου της άμμου <i>3D</i>	48
7.3	Στρώμα τέφρας πάνω από τη στήλη άμμου	49
7.4	Συνθήκες λειτουργίας του αεριοποιητή στα $t = 55s$	50
7.5	Ρυθμοί αντίδρασης στα $t = 55s$	50
7.6	Κλάσματα <i>mol</i> στα $t = 55s$	51
7.7	Αποτελέσματα στην έξοδο	52
7.8	Κλάσμα όγκου της άμμου	53
7.9	Κλάσμα όγκου της άμμου <i>3D</i>	54
7.10	Συνθήκες λειτουργίας του αεριοποιητή στα $t = 46s$	55
7.11	Ρυθμοί αντίδρασης στα $t = 46s$	55
7.12	Κλάσματα <i>mol</i> στα $t = 46s$	56
7.13	Αποτελέσματα εξόδου	57

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Ιδιότητες διαφόρων τύπων βιομάζας	15
2.2	Ανάλυση τυπικής βιομάζας	15
6.1	Proximate και ultimate ανάλυση των πελλετών μαλακού ξύλου <i>Agrol</i>	39
6.2	Κύριες διαστάσεις του αεριοποιητή	41
6.3	Ιδιότητες των κοκκωδών φάσεων	44
6.4	Κύριες οριακές συνθήκες	44
6.5	Ειδικές οριακές συνθήκες	45
6.6	Κινητικές παράμετροι των αντιδράσεων	46
7.1	Σύσταση του αερίου ξύλου από την πρωτογενή πυρόλυση σύμφωνα με τον Seebauer (1999)	53
7.2	Ανάλυση καυσίμου βιομάζας	58
7.3	Ανάλυση πτητικών	58
7.4	Ισορροπία μάζας	58
7.5	Ισορροπία ενέργειας	59
7.6	Συμπεράσματα	59

Ονοματολογία

Λατινικοί χαρακτήρες

Σύμβολο	Μονάδες	Σημασία
A	[1/s]	Προ-εκθετικός παράγοντας
a_i	[%]	Κλάσμα όγκου του συστατικού i
C_D	[-]	Συνάρτηση Έλκουςας
C_{fr}	[-]	Συντελεστής τριβής
C_P	[kJ/kgK]	Ειδική θερμότητα αερίου
d_i	[m]	Διάμετρος του συστατικού i
e	[-]	Συντελεστής αποκατάστασης
E_a	[J/kgmol]	Ενέργεια Ενεργοποίησης
F	[N]	Δύναμη
g_0	[-]	Ακτινική κατανομή
h_q	[kJ/kg]	Ειδική ενθαλπία της φάσης q
H_g	[kJ/m ³]	Θερμογόνος ικανότητα αερίου
I_{2D}	[-]	Δεύτερη αναλλοίωτη του τανυστή τάσεων
k_{θ_s}	[-]	Συντελεστής Διάχυσης
K_{ij}	[-]	Συντελεστής μεταφοράς ορμής μεταξύ των φάσεων i και j
LHV_i	[kJ/kg]	Κατώτερη θερμογόνος δύναμη του i
\dot{m}_{ij}	[kg/s]	Μεταφορά μάζας από την φάση i στην j
M_s	[kg/s]	Κατανάλωση στερεού καυσίμου
p	[N/m ²]	Πίεση
\vec{q}_q	[J]	Ροή θερμότητας
Q_g	[m ³ /s]	Ροή όγκου αερίου
Q_{ij}	[-]	Ένταση μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των φάσεων i και j
R_{ij}	[N]	Δύναμη αλληλεπίδρασης μεταξύ των φάσεων i και j
S_i	[kg/s]	Όρος πηγής μάζας της φάσης i
S_q	[kJ/kg]	Όρος πηγής ενθαλπίας
U_{mf}	[m/s]	Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης
V	[m ³]	Όγκος

Ελληνικοί χαρακτήρες

Σύμβολο	Μονάδες	Σημασία
$\gamma\theta$	[J]	Ενέργεια διάχυσης σύγκρουσης
ΔT	[K]	Θερμοκρασιακή διαφορά
η_m	[%]	Απόδοση Αεριοποίησης
η_{th}	[%]	Θερμική απόδοση
Θ_i	[m ² /s ²]	Κοκκώδης θερμοκρασία της φάσης i
λ	[-]	Λόγος στοιχειομετρίας
λ_i	[kg/m · s]	Μαζική συνεκτικότητα του συστατικού i
μ_i	[kg/m · s]	Διατμητική συνεκτικότητα του συστατικού i
$\mu_{i,col}$	[kg/m · s]	Συνεκτικότητα σύγκρουσης του συστατικού i
$\mu_{i,fr}$	[kg/m · s]	Συνεκτικότητα τριβής του συστατικού i
$\mu_{i,kin}$	[kg/m · s]	Κινητική συνεκτικότητα του συστατικού i
ν_i	[m/s]	Ταχύτητα του συστατικού i
ρ_i	[kg/m ³]	Πυκνότητα του συστατικού i
$\bar{\rho}_i$	[kg/m ³]	Ενεργή πυκνότητα του συστατικού i
$\bar{\tau}$	[N/m ²]	Τανυστής τάσης - έντασης
τ_s	[s]	Χρόνος χαλάρωσης σωματιδίων
ϕ	[deg]	Γωνία εσωτερικής τριβής
ϕ_{ij}	[J]	Μεταφορά ενέργειας μεταξύ των φάσεων i και j

Σταθερά μεγέθη

Σύμβολο	Αριθμός	Μονάδες	Σημασία
R	8.3144621(75)	[J/molK]	Σταθερά των τέλειων αερίων

Συντμήσεις

Σύντμηση	Σημασία
<i>ar</i>	Ώς έχει
<i>BioHPR</i>	Biomass Heatpipe Reformer
<i>CFD</i>	Υπολογιστική Ρευστομηχανική
<i>CH₄</i>	Μεθάνιο
<i>C₂H₂</i>	Ακετυλένιο
<i>C₂H₄</i>	Αιθυλένιο
<i>C₂H₆</i>	Αιθάνιο
<i>C₃H₆</i>	Προπυλένιο
<i>CHP</i>	Συνδυασμός παραγωγής Θερμότητας και Ισχύος
<i>CO</i>	Μονοξείδιο του άνθρακα
<i>CO₂</i>	Διοξείδιο του άνθρακα
<i>DEM</i>	Μέθοδος Διακριτών Στοιχείων
<i>DNS</i>	Άμεση Αριθμητική Προσομοίωση
<i>GHG</i>	Αέριο θερμοκηπίου
<i>H₂O</i>	Νερό
<i>HFCs</i>	Υδροφθοράνθρακες
<i>HHV</i>	Ανώτερη θερμογόνο δύναμη
<i>KTGF</i>	Κινητική Θεωρία Κοκκωδών Ροών
<i>LES</i>	Προσομοίωση Large Eddy
<i>maf</i>	Χωρίς υγρασία και τέφρα
<i>NO_x</i>	Οξείδια του αζώτου
<i>N₂O</i>	Υποξείδιο του αζώτου
<i>PAH</i>	Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες
<i>PFCs</i>	Υπερφθοράνθρακες
<i>RANS</i>	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
<i>Re</i>	Αριθμός Reynolds
<i>REs</i>	Σχετικός αριθμός Reynolds
<i>SF₆</i>	Εξαφθοριούχο θείο
<i>SO₂</i>	Διοξείδιο του θείου
<i>SRS</i>	Προσομοίωση Επίλυσης Κλίμακας
<i>STBR</i>	Λόγος ατμού προς βιομάζα
<i>TOE</i>	Ισοδύναμος τόνος πετρελαίου
<i>wt%</i>	Βάρος %
<i>3D</i>	Τριδιάστατο

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ενεργειακές Απαιτήσεις

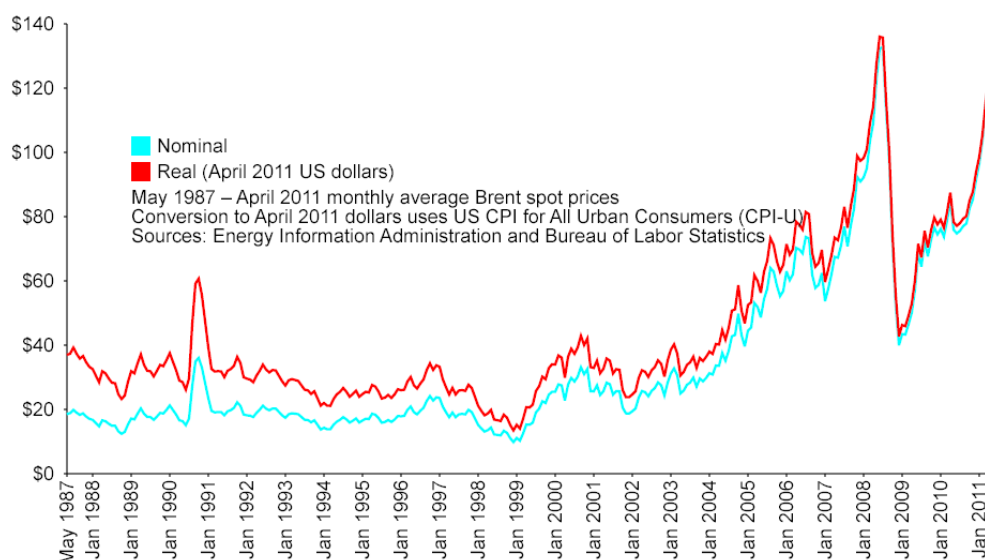
Η σύγχρονη εποχή και η δομή της κοινωνίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την παραγωγή ενέργειας. Έως τώρα, μετά από τη βιομηχανική επανάσταση του 18ου αιώνα, τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό είναι κυρίως το κάρβουνο και το πετρέλαιο. Ωστόσο, η καύση ορυκτών καυσίμων απελευθερώνει CO_2 στην ατμόσφαιρα της Γης. Έχουμε αλλάξει αισθητά την ισορροπία της φυσικής απορρόφησης και εκπομπής CO_2 δημιουργώντας το παγκόσμιο φαινόμενο του Θερμοκηπίου που απασχολεί όλη την ενεργειακή κοινότητα. Η συρρίκνωση των πάγων με την επακόλουθη αύξηση της στάθμης της θάλασσας, οι αυξημένοι μέσοι όροι θερμοκρασιών και τα έντονα καιρικά φαινόμενα είναι κάποιες από τις επιπτώσεις που παρατηρήθηκαν τα τελευταία χρόνια. Επιπρόσθετα, τα ορυκτά καύσιμα δεν υπάρχουν σε ανεξάντλητες ποσότητες. Για αυτούς του λόγους η μετάβαση αυτής της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα σε βιώσιμες πηγές ενέργειας έχει γίνει επιτακτική.

Τα Ηνωμένα Έθνη αποφάσισαν να λάβουν μέτρα έτσι ώστε να σταθεροποιηθούν οι συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα και υπέγραψαν το Πρωτόκολλο του Κιότο, στις 11 Δεκεμβρίου 1997 στην Ιαπωνία. Σύμφωνα με το Πρωτόκολλο, 37 βιομηχανοποιημένες χώρες δεσμεύτηκαν να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (*GHG*) με μέσο όρο - στόχο το 5% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 στην χρονική περίοδο 2008-2012. Το Πρωτόκολλο τέθηκε σε ισχύ από τον Φεβρουάριο του 2005. Συμφωνήθηκε η μείωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), του μεθανίου (CH_4), του υποξειδίου του αζώτου (N_2O), του εξαφθοριούχου θείου (SF_6), των υδρογονανθράκων (*HFCs*) και των υπερφθορανθράκων (*PFCs*).

Εκτός από τους περιορισμούς που έθεσε το Πρωτόκολλο του Κιότο, η πρόσφατη αύξηση της τιμής του αργού πετρελαίου ¹ Εικ. 1.1 ,(Oil-price), και η έλλειψη των ορυκτών καυσίμων έχουν οδηγήσει προς τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμία και η βιομάζα.

Η εκμετάλλευση της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας με διαδικασίες αεριοποίησης είναι μια καλοήθης περιβαλλοντική λύση. Με την αεριοποίηση γενικότερα, απόβλητα ή πρώτες ύλες χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου όπως η βιομάζα, δημοτικά απόβλητα, κατάλοιπα διυλιστηρίων, οπτάνθρα-

¹Το αργό πετρέλαιο Brent είναι η μεγαλύτερη από τις πολλές κύριες κατατάξεις του αργού πετρελαίου. Η τιμή του χρησιμοποιείται ως μονάδα κοστολόγησης των δύο τρίτων των παγκόσμιων αποθεμάτων αργού πετρελαίου που εμπορεύονται αυτή τη στιγμή. Οι άλλες γνωστές κατατάξεις (στις οποίες αναφέρονται ως αναφορές ή σημεία αναφοράς) είναι οι OPEC Reference Basket, Dubai Crude και West Texas Intermediate .



Σχήμα 1.1: Μηνιαίες στιγμιαίες τιμές του πετρελαίου Brent από τον Μάιο 1987 - Απρίλιο 2011

κες πετρελαίου, και γενικά κάθε είδους ανθρακούχας ένωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας ή ισχύος με μεγάλη απόδοση. Ειδικότερα, η βιομάζα είναι ελεύθερη CO_2 . Αυτό ισχύει διότι το περιεχόμενο άνθρακα της βιομάζας έχει απορροφηθεί από την ατμόσφαιρα. Έτσι, η καθαρή παραγωγή CO_2 είναι μηδενική. Το προϊόν της αεριοποίησης ονομάζεται syngas ή παράγωγο αέριο. Αυτό το αέριο έχει υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο, το οποίο πλεονεκτεί έναντι όλων των άλλων καυσίμων επειδή το μοναδικό παράγωγο της καύσης του είναι το νερό. Αυτοί οι λόγοι καθιστούν την αεριοποίηση της βιομάζας μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για την παραγωγή θερμότητας και ισχύος.

Στην Ελλάδα, τα αγροτικά και δασικά υπολείμματα είναι ενεργειακά ισοδύναμα με 3-4 εκατομμύρια τόνους πετρελαίου (TOE) το χρόνο. Το δυναμικό των ενεργειακών καλλιεργειών είναι της ίδιας ή και μεγαλύτερης ποσότητας. Αυτό το ποσοστό αντιστοιχεί στο 30-40% της ετήσιας κατανάλωσης πετρελαίου, με την υπόθεση ότι 1 τόνος βιομάζας έχει την ίδια θερμογόνο ικανότητα με 0.4 τόνους πετρελαίου. Ωστόσο, μόνο το 3% της ενέργειας παράγεται από τη βιομάζα (Biomass-Potential).

Τα κύρια πλεονεκτήματα από την εκμετάλλευση της βιομάζας είναι :

1. Μείωση της εκπομπής CO_2 . Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, η βιομάζα έχει ήδη δεσμεύσει το περιεχόμενο της σε άνθρακα από την ατμόσφαιρα μέσω της φωτοσύνθεσης. Το CO_2 που απελευθερώνεται ακολουθεί έναν κλειστό κύκλο με μηδενική καθαρή παραγωγή CO_2 .
2. Μείωση του SO_2 , το οποίο απελευθερώνεται από τους συμβατικούς σταθμούς ορυκτών καυσίμων και συμβάλλει στην όξινη βροχή. Η βιομάζα έχει αμελητέες ποσότητες θείου.
3. Μικρότερη εξάρτηση από τους εξωτερικούς προμηθευτές και ενίσχυση του ενεργειακού μίγματος της χώρας.

4. Αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας και εργασιακές ευκαιρίες από τις ενεργειακές καλλιέργειες.

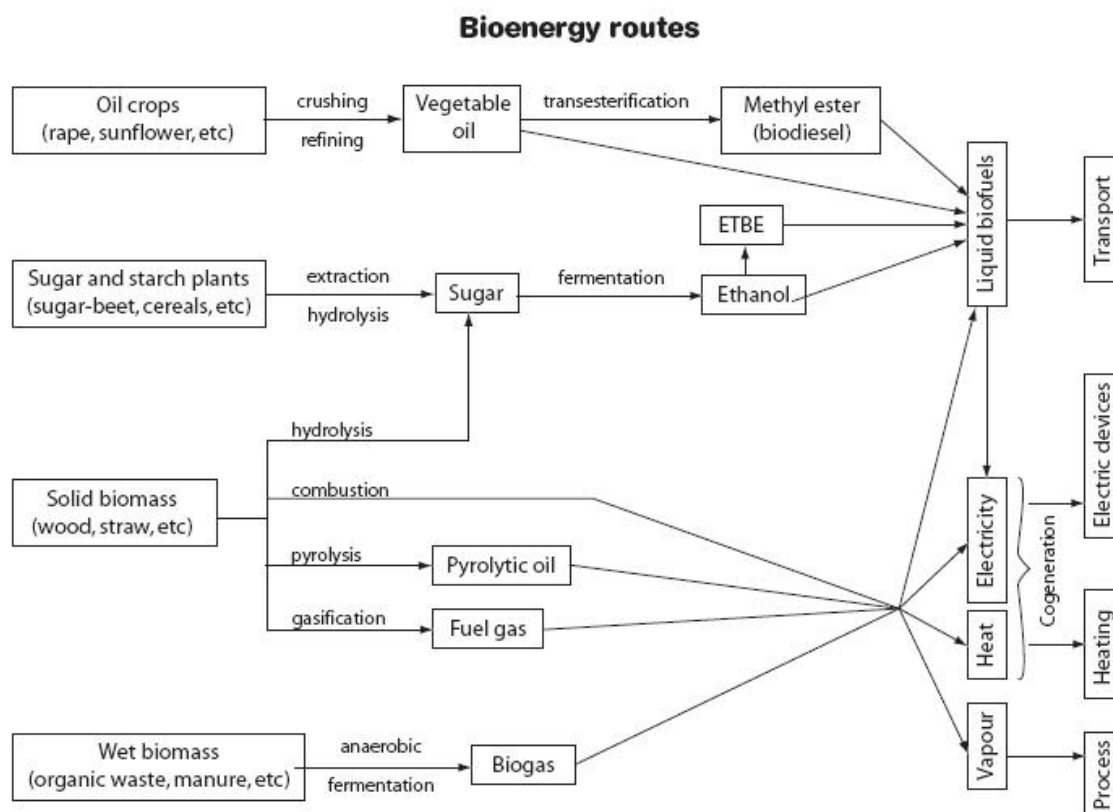
Εδώ, αξίζει να αναφερθεί ότι οι ενεργειακές καλλιέργειες δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση να εκτείνονται σε γεωργικές περιοχές. Είναι ανεπιθύμητο να μειωθούν οι περιοχές παραγωγής βασικών ειδών διατροφής για την παραγωγή ενέργειας.

Τα μειονεκτήματα της βιομάζας σχετίζονται με τη φύση της :

1. Μικρή ενεργειακή πυκνότητα λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία.
2. Δυσκολία συλλογής, μεταφοράς και αποθήκευσης συγκριτικά με τα ορυκτά καύσιμα.
3. Μεγαλύτερες εγκαταστάσεις με ακριβότερο εξοπλισμό λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας.
4. Εποχιακή συμπεριφορά και διαφοροποίηση ποιότητας.

Αυτά τα μειονεκτήματα μαζί με την προφανή εκπομπή CO_2 για τη μεταφορά και το χειρισμό της βιομάζας μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η βιομάζα θα πρέπει να αξιοποιείται κοντά στις πηγές παρά σε κεντρικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας.

Η βιομάζα μπορεί να αξιοποιηθεί με πολλούς τρόπους. Κάθε πηγή βιομάζας έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς την θερμογόνο ικανότητα, το περιεχόμενο σε υγρασία και τέφρα, και έτσι απαιτεί κατάλληλες τεχνολογίες μετατροπής για την παραγωγή βιοενέργειας. Αυτές οι διαδρομές μετατροπής χρησιμοποιούν χημικές, θερμικές και/ή βιολογικές διεργασίες. Τελικά, η βιομάζα μπορεί να καταταχθεί ανάλογα με την τελική χρήση όπως φαίνεται παρακάτω (Bioenergy-routes). Η παρούσα εργασία ακολουθεί την αεριοποίηση στερεάς βιομάζας για την παραγωγή καύσιμου αερίου.



Σχήμα 1.2: Διαφορετικοί τρόποι μετατροπής της βιομάζας σε βιοενέργεια

1.2 Κίνητρα

Η τεχνολογία αεριοποίησης υπάρχει πολύ καιρό αλλά οι αρχές της δεν είναι γνωστές. Η ρευστοδυναμική πολλαπλών φάσεων, η ροή αέριας και στερεάς φάσης, οι χημικές αντιδράσεις που καταλήγουν σε κατάσταση εκτός ισορροπίας, η τύρβη και η μεταφορά θερμότητας, συνιστούν ένα πρόβλημα άλυτο έως τώρα. Η έλλειψη της θεμελιώδους κατανόησης αυτών των διεργασιών έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή εμπειρικών κατασκευών βασισμένων σε πειραματικές και πιλοτικές μονάδες. Η μοντελοποίηση της διεργασίας με εργαλεία προσομοίωσης θα βοηθήσει τελικά το σχεδιασμό και την περαιτέρω βελτιστοποίηση των μονάδων αεριοποίησης σε βιομηχανικό επίπεδο. Η παρούσα εργασία αποτελεί μια προσέγγιση προς αυτό το σκοπό.

1.3 Σκοπός της εργασίας

Στο τμήμα Ενεργειακών Συστημάτων του Τεχνικού Πανεπιστημίου του Μονάχου κατασκευάστηκε μια μονάδα εργαστηριακής κλίμακας αεριοποίησης βιομάζας σε ρευστοποιημένη κλίνη για το έλεγχο διαφόρων βιο-καυσίμων. Για την υποστήριξη των πειραματικών ερευνών αναπτύχθηκε ένα μοντέλο CFD του αεριοποιητή. Η εργασία είναι αφιερωμένη στην προσομοίωση του αεριοποιητή βιομάζας σε ρευστοποιημένη κλίνη. Η κατανόηση των βασικών αρχών της τεχνολογίας και το επίπεδο της παρούσας γνώσης έπρεπε να διερευνηθούν σχολαστικά ώστε να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα με επιτυχία. Χρησιμοποιήθηκε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης ώστε να επιτύχουμε τα σημερινά στάνταρ

προσομοίωσης και να καταλήξουμε στα επιθυμητά αποτελέσματα. Οι σκοποί αυτής της εργασίας είναι :

- Εισαγωγή στο θέμα
- Ανασκόπηση των υπαρχόντων μοντέλων για ρευστοποιημένες κλίνες στη βιβλιογραφία
- Προσομοίωση της διεργασίας της αεριοποίησης βιομάζας
- Επικύρωση με τα πειραματικά δεδομένα
- Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Η εργασία αυτή συνδυάζει τα προτεινόμενα μοντέλα για τις μεμονωμένες διεργασίες, όπως αυτά έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Έγινε πειραματικός έλεγχος για να συγκρίνουμε και να επικυρώσουμε το μοντέλο.

1.4 Δομή της Εργασίας

Η δομή της εργασίας συζητείται παρακάτω :

1. Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή σχετικά με τις ενεργειακές απαιτήσεις και το δυναμικό της βιομάζας ως βιώσιμη εναλλακτική πηγή ενέργειας. Κατόπιν, μετά από ένα σύντομο ιστορικό σημείωμα, ορίζεται η βιομάζα και η διαδικασία αεριοποίησης της, καθώς και οι διαφορές της με το κάρβουνο. Το κεφάλαιο καταλήγει με τη σχετική δουλειά που έχει γίνει μέχρι σήμερα.
2. Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι αεριοποιητών. Ανάλογα με τον τύπο συζητούνται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα. Περισσότερη έμφαση δίνεται στον τύπο αναβράζουσας κλίνης, ο οποίος είναι και ο αεριοποιητής που μελετάται εδώ.
3. Το τρίτο κεφάλαιο αναλύει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά. Η θερμοκρασία της κλίνης και το μέσο αεριοποίησης παίζουν σημαντικό ρόλο στο προκύπτον παράγωγο αέριο. Κατόπιν ορίζεται η απόδοση του αεριοποιητή και το κεφάλαιο κλείνει με την προσέγγιση Euler-Euler, η οποία και εφαρμόστηκε στη διαδικασία προσομοίωσης.
4. Το τέταρτο κεφάλαιο ασχολείται με τις χημικές αντιδράσεις. Η ξήρανση, η πρωτογενής και δευτερογενής πυρόλυση, και η αεριοποίηση εξηγούνται περαιτέρω και παρουσιάζονται οι μέθοδοι προσομοίωσης για κάθε βήμα.
5. Στο πέμπτο κεφάλαιο, εξηγούνται αναλυτικά οι βασικές αρχές της προσέγγισης Euler. Παρουσιάζονται οι εξισώσεις κλάσματος όγκου και διατήρησης, η κινητική θεωρία των κοκκωδών ρών και συμπληρωματικά μοντέλα για να εξηγηθεί η προσέγγιση.
6. Το έκτο κεφάλαιο περιγράφει το μοντέλο που αναπτύχθηκε για τη διαδικασία προσομοίωσης. Δίνεται η γεωμετρία του αντιδραστήρα μαζί με τις φάσεις και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Ορίζονται οι οριακές συνθήκες και ακολουθούν οι κινητικές του συστήματος.
7. Το έβδομο κεφάλαιο τελειώνει με τρεις (3) προσεγγίσεις μοντελοποίησης, τα αποτελέσματά τους και συζήτηση.
8. Στο όγδοο κεφάλαιο, δίνονται οι προοπτικές για περαιτέρω εξέλιξη. Οι αναφορές και οι παραπομπές περιλαμβάνονται στη Βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 2

Βασικές αρχές αεριοποίησης

2.1 Ιστορικό σημείωμα

Η παραγωγή ενέργειας με τη μέθοδο της αεριοποίησης υπάρχει περισσότερο από 180 χρόνια. Αρχικά, χρησιμοποιούνταν τύρφη και λιγνίτης για την παραγωγή φωταερίου για φωτισμό και μαγείρεμα την πρώτη δεκαετία του 1800. Ενώ το φυσικό αέριο σταδιακά αντικατέστησε την ανάγκη για παράγωγο αέριο, το τελευταίο χρησιμοποιείται για την παραγωγή συνθετικών χημικών από τη δεκαετία του 1920.

Κατά τη διάρκεια και των δύο παγκόσμιων πολέμων, ειδικά στο Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο όπου ακολουθήθηκαν πολιτικές απαγόρευσης για το πετρέλαιο, η ανάγκη για αεριοποίηση ήρθε ξανά στην επιφάνεια. Η λύση ήταν να χρησιμοποιηθούν γεννήτριες αερίου από την αεριοποίηση ξύλου ώστε να χρησιμοποιηθούν στα μηχανοκίνητα οχήματα στην Ευρώπη. Το 1945 υπήρχαν φορτηγά, λεωφορεία και γεωργικά μηχανήματα με μια εκτίμηση 9.000.000 οχημάτων που λειτουργούσαν με παράγωγο αέριο σε όλο τον κόσμο. Εικ. 2.1,(Wikipedia).



Σχήμα 2.1: Το Adler Diplomat 3 με γεννήτρια αερίου (1941)

Μετά το τέλος του Πολέμου, το πετρέλαιο κέρδισε διοικητική θέση στην παραγωγή ενέργειας και

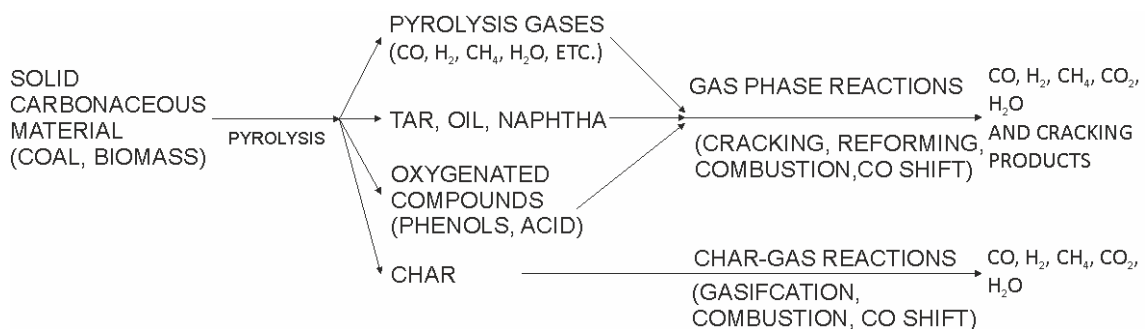
ισχύος βάζοντας στην άκρη τη βιομηχανία του παράγωγου αερίου. Η Σουηδία ήταν η μόνη χώρα που συνέχισε τις έρευνες για την τεχνολογία αεριοποίησης κυρίως μετά την Κρίση του Καναλιού του Σουέζ το 1956, συμπεριλαμβάνοντας αεριοποιητές στα στρατηγικά της σχέδια εκτάκτου ανάγκης. Αμέσως μετά την κρίση του πετρελαίου το 1973 και το 1979, πολλές χώρες άρχισαν να ασχολούνται ξανά με την τεχνολογία της αεριοποίησης για να ανεξαρτητοποιηθούν από τους ξένους προμηθευτές.

Σήμερα, υπάρχουν πολλές μονάδες που παράγουν παράγωγο αέριο ή κάνουν μικτή καύση σε υπάρχουσες μονάδες άνθρακα. Μονάδες που λειτουργούν με βιομάζα και/ή απόβλητα περιλαμβάνουν αυτό στο Rudersdorf στη Γερμανία (500t/d απόβλητα) και στο Geertruidenberg στην Ολλανδία (400t/d υπολείμματα ξύλου) με κλίνες ανακυκλοφορίας. Στο Rudersdorf το αέριο καίγεται σε τσιμεντοκλίβανο, ενώ στο Geertruidenberg το ζεστό αέριο που βγαίνει από τον κυκλώνα με μια θερμοκρασία περίπου 500 °C τροφοδοτεί άμεσα έναν καυστήρα λιθάνθρακα 600 MW_e (Christopher Higman (2008)).

2.2 Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση είναι μια διαδικασία που μετατρέπει τα οργανικά ή ανθρακούχα υλικά σε μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και άζωτο (εάν χρησιμοποιηθεί ο αέρας ως οξειδωτικό μέσο). Αυτό επιτυγχάνεται με την αντίδραση του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες με ελεγχόμενη ποσότητα αέρα, οξυγόνου ή ατμού. Η συσκευή παραγωγής αερίου, που ονομάζεται και αεριοποιητής, είναι μια απλή συσκευή που αποτελείται από ένα κυλινδρικό δοχείο στις περισσότερες εφαρμογές.

Η διαφορά μεταξύ της αεριοποίησης και της καύσης είναι η ποσότητα του οξειδωτικού που παρέχεται. Στην καύση, η ποσότητα του αέρα που παρέχεται είναι μεγαλύτερη από το στοιχειομετρικό λόγο που απαιτείται για την πλήρη καύση ($\lambda > 1$), ενώ στην αεριοποίηση είναι χαμηλότερη με συνήθεις τιμές $\lambda \sim 0.2-0.3$. Το μίγμα αερίου που παράγεται ονομάζεται syngas, συνθετικό αέριο ή παράγωγο αέριο και είναι καύσιμο. Η ακολουθία των αντιδράσεων για την αεριοποίηση βιομάζας φαίνεται στην Εικ. 2.2.



Σχήμα 2.2: Ακολουθία αντιδράσεων για την αεριοποίηση κάρβουνου ή βιομάζας (από (R. Reimert (1989))

Ο σκοπός της μοντελοποίησης της αεριοποίησης είναι (Christopher Higman (2008)):

1. Υπολογισμός της σύστασης του αερίου
2. Υπολογισμός των σχετικών ποσοτήτων οξυγόνου και/ή ατμού και/ή θερμότητας που απαιτούνται ανά μονάδα καυσίμου
3. Βελτιστοποίηση της ενέργειας με τη μορφή θερμότητας καύσης του παράγωγου αερίου ή, εναλλακτικά, της παραγωγής συνθετικού αερίου ανά μονάδα καυσίμου
4. Μελέτη των σημείων ελέγχου για τον έλεγχο της διαδικασίας

Το συνθετικό αέριο μπορεί να καεί άμεσα σε κινητήρες αερίου, σε μηχανές εσωτερικής καύσης (και με συμπίεση και με ανάφλεξη), μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του καυσίμου λεβήτων σε εφαρμογές που απαιτείται θερμότητα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει με οικονομικό τρόπο μεθανόλη ως χημική πρώτη ύλη για τις βιομηχανίες. Μπορεί επίσης να μετατραπεί μέσω της διεργασίας Fischer-Tropsch σε συνθετικό καύσιμο (S.T. Sie (1999)).

Η διαδικασία μετατροπής είναι περισσότερο περίπλοκη από την καύση, και επηρεάζεται από την ποσότητα οξειδωτικού, τη σύσταση του καυσίμου, τη θερμοκρασία του αεριοποιητή, τη γεωμετρία του αντιδραστήρα και την επαφή αερίου-στερεού. Οι χημικές διεργασίες λαμβάνουν χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες $> 700 \text{ }^\circ\text{C}$, διαφέροντας σημαντικά από τις βιολογικές διεργασίες, όπως η αναερόβια ζύμωση που παράγουν βιοαέριο. Το πλεονέκτημα της θερμοχημικής έναντι της βιοχημικής μετατροπής του ξύλου είναι ότι η λιγνίνη αξιοποιείται ενεργειακά χωρίς κάποιο ειδικό χειρισμό.

Το παράγωγο αέριο που παράγεται είναι δυνητικά περισσότερο αποδοτικό από την απευθείας καύση του αρχικού καυσίμου επειδή μπορεί να καεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες ή ακόμα και σε κυψέλες καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν με ηλεκτροχημική αντίδραση και άρα δεν ισχύει στην περίπτωση τους ο κανόνας του Carnot για το άνω όριο στην απόδοση. Ένα άλλο πλεονέκτημα, είναι ότι επειδή το καύσιμο που εισάγεται έχει μετατραπεί σε αέρια μορφή, είναι δυνατό να αφαιρεθούν οι ρυπαντές πριν την καύση. Αυτό οδηγεί σε δραστηκή μείωση των εκπομπών όταν συγκρίνεται με τις παραδοσιακές μονάδες παραγωγής ενέργειας. Η αεριοποίηση της βιομάζας έχει αποδειχθεί ότι είναι μια πετυχημένη επιλογή για τη διαχείριση αποβλήτων, την παραγωγή χημικών και ενέργειας από μη-συμβατικές πρώτες ύλες όπως τα δασικά υπολείμματα, τα αγροτικά απόβλητα, απόβλητα πουλερικών και τα δημοτικά λύματα.

Η κύρια πρόκληση της τεχνολογίας αεριοποίησης είναι να βελτιωθεί ο έλεγχος της σύστασης του παράγωγου αερίου, η οποία καθορίζει την έκταση του εξοπλισμού που ακολουθεί για τον καθαρισμό του. Ο σχηματισμός πρισών (ανώτερων υδρογονανθράκων C_xH_y) μπορεί να θέσει μια επένδυση σε μεγάλο ρίσκο. Αυτή η έλλειψη ελέγχου οφείλεται στην πολυπλοκότητα της δυναμικής της κλίνης. Η ροή πολλαπλών φάσεων, η αλληλεπίδραση αέριας και στερεής φάσης, οι χημικές αντιδράσεις και η τύρβη είναι υπεύθυνα για τη σύσταση του καθαρού παράγωγου αερίου.

Μέχρι τώρα, έχουν αναπτυχθεί εμπειρικά μοντέλα και διατάξεις που αδυνατούν να βελτιστοποιήσουν τη τεχνολογία που θα οδηγήσει σε μονάδες βιομηχανικής κλίμακας. Γι' αυτό το λόγο, αναπτύσσονται προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Ωστόσο, η έλλειψη της γνώσης στον

τομέα των χημικών αντιδράσεων θέτει ένα μεγάλο εμπόδιο στην ακρίβεια των σχεδίων προσομοίωσης.

2.3 Βιομάζα

Βιομάζα ορίζεται ως η ανανεώσιμη οργανική ύλη όπως οι γεωργικές καλλιέργειες, η ξυλεία και τα απόβλητα ξυλείας, τα οργανικά συστατικά από τα δημοτικά και τα βιομηχανικά απόβλητα, ή τα ζωικά απόβλητα. Είναι μια φυσική ουσία που συσσωρεύει την ηλιακή ενέργεια και την αποθηκεύει ως χημική ενέργεια, μέσω της φωτοσύνθεσης. Το καύσιμο από τη βιομάζα μπορεί να είναι σε υγρή, στερεά ή αέρια μορφή ανάλογα τη μέθοδο μετατροπής.

Η βιομάζα περιέχει κυτταρίνη, ημι-κυτταρίνη και λιγνίνη, με μια μέση σύσταση $C_6H_{10}O_5$, με ελαφριές αποκλίσεις. Για την πλήρη καύση της βιομάζας, η θεωρητικά απαιτούμενη ποσότητα αέρα (που ορίζεται ως η στοιχειομετρική ποσότητα) είναι 6 με 6.5 kg αέρα ανά kg βιομάζας, και τα τελικά προϊόντα είναι το CO_2 και το H_2O .

Στην αεριοποίηση, η βιομάζα υποβάλλεται σε μερική πυρόλυση σε υπο-στοιχειομετρικές συνθήκες με την ποσότητα του αέρα να φτάνει μόλις τα 1.5 - 1.8 kg αέρα ανά kg βιομάζας. Το μίγμα αερίων που προκύπτει κατά την αεριοποίηση ονομάζεται παράγωγο αέριο, περιέχει CO και H_2 και είναι καύσιμο. Το καθαρό παράγωγο αέριο περιέχει επίσης πίσσες και σωματίδια τα οποία πρέπει να αφαιρεθούν όταν χρησιμοποιείται σε εφαρμογές κινητήρων.

2.3.1 Ανάλυση βιομάζας

Όπως και για το λιγνίτη και το λιθάνθρακα, οι ίδιοι δύο τύποι ανάλυσης ακολουθούνται και για τη βιομάζα, έτσι ώστε να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά της καύσης της. Αυτοί είναι η proximate και η ultimate ανάλυση :

Proximate ανάλυση

Με την proximate ανάλυση καθορίζονται η υγρασία, η ποσότητα πτητικών, η τέφρα και η σταθερή ποσότητα άνθρακα. Αυτή η μέθοδος παρέχει μια αρχική ένδειξη της ποιότητας και του τύπου του καυσίμου. Οι μέθοδοι για τη διεξαγωγή αυτών των αναλύσεων είναι τυποποιημένες από όλους τους κύριους Οργανισμούς Πιστοποίησης (ASTM, ISO, DIN, BS κλπ.).

Πρώτα καθορίζεται η υγρασία. Με την ξήρανση της βιομάζας σε τυποποιημένες συνθήκες για 1 ώρα στους 104-110 °C απελευθερώνεται η επιφανειακή και η περιεχόμενη υγρασία.

Η ποσότητα των πτητικών καθορίζεται από τη θέρμανση της βιομάζας μέσα σε ένα καλυμμένο χωνευτήρι για συγκεκριμένο χρόνο, σε συγκεκριμένη θερμοκρασία απουσία οξυγόνου. Αυτές οι τιμές διαφέρουν μεταξύ των οργανισμών πιστοποίησης. Η διαφορά της μάζας της βιομάζας μείον τη μάζα της υγρασίας, αναπαριστά τη μάζα των πτητικών που σχηματίστηκαν κατά την πυρόλυση στις συνθήκες που αναφέρονται.

Η τέφρα είναι το ανόργανο υπόλειμμα που μένει μετά την καύση της βιομάζας. Αποτελείται κυρίως

από άλατα. Κύρια συστατικά της τέφρας της βιομάζας είναι το κάλιο, το ασβέστιο και ο φώσφορος, και λιγότερο το νάτριο, το μαγνήσιο, ο σίδηρος, το πυρίτιο και ιχνοστοιχεία. Η τέφρα της βιομάζας έχει χαμηλό σημείο τήξης, 800 °C για παράδειγμα, και έχει πολύ επιθετικό χαρακτήρα προς τα πυρίμαχα υλικά (Christopher Higman (2008)).

Αν και η proximate ανάλυση μας λέει πολλά για το καύσιμο, η στοιχειώδης σύσταση των υδρογονανθράκων της βιομάζας είναι επίσης σημαντική.

Ultimate ανάλυση

Στην ultimate ανάλυση, καθορίζονται τα ποσοστά άνθρακα, υδρογόνου, οξυγόνου, θείου και αζώτου. Το ποσοστό οξυγόνου, το οποίο είναι σχετικά υψηλό στη βιομάζα, μας δίνει πληροφορίες για την αντιδραστικότητα της αεριοποίησης και της καύσης. Το ποσοστό του θείου είναι συνήθως χαμηλό, πολύ χαμηλότερο από 1% (κ.β. ξηρό). Το άζωτο που περιέχεται στη βιομάζα είναι ο λόγος που δεν απαιτείται αεριοποίηση με υπερ-καθαρό οξυγόνο, ακόμα και όταν το αέριο χρησιμοποιείται για παραγωγή υδρογόνου.

Τυπικά δεδομένα για κάποιες φυτικές βιομάζες περιέχονται στους Πίνακες 2.1, και 2.2, (Christopher Higman (2008)):

2.3.2 Διαφορές μεταξύ αεριοποίησης λιγνίτη και βιομάζας

Αν και η αεριοποίηση λιγνίτη και λιθάνθρακα χρησιμοποιείται συχνά για να μοντελοποιήσουμε την αεριοποίηση της βιομάζας, υπάρχουν κάποιες βασικές διαφορές μεταξύ λιγνίτη και βιομάζας. Η βιομάζα είναι δραστικότερη λόγω του υψηλού ποσοστού οξυγόνου (~ 45%). Πυρολύεται γρήγορα, έχει περισσότερα πτητικά και υγρασία, μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα και χαμηλά επίπεδα τέφρας και θείου. Επιπρόσθετα, η φυτική βιομάζα έχει ινώδη χαρακτηριστικά. Γι' αυτούς τους λόγους, στην αεριοποίηση βιομάζας πρέπει να προστεθεί ένα άλλο στερεό που ονομάζεται ρευστοποιητής, και είναι συνήθως πυριτική άμμος ή ολιβίνη.

Αυτές οι διαφορές κάνουν σαφή την ανάγκη ανάπτυξης ενός μοντέλου ειδικά για την αεριοποίηση βιομάζας. Ωστόσο, υπάρχουν ελάχιστα αναλυτικά και αναπτυγμένα μοντέλα στη βιβλιογραφία (Alvaro Sanz (2005); D. Lathouwers (2001a); Michael Oevermann (2009); Priyanka Kaushal (2010); S. Gerber (2010)).

2.3.3 Εκπομπές

Με την ενέργεια που παρέχεται από τη βιομάζα ως ανανεώσιμη πηγή, δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου καθαρή παραγωγή CO_2 , καθώς το CO_2 που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα θα απορροφηθεί από τη βλάστηση σε σύντομο χρονικό διάστημα. Με την αντικατάσταση του κάρβουνου ή άλλων στερεών ορυκτών καυσίμων από τη βιομάζα, οι καθαρές εκπομπές CO_2 θα μειωθούν σημαντικά. Ακόμα, εάν τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιομάζας, την μεταφορά,

Πίνακας 2.1: Ιδιότητες διαφόρων τύπων βιομάζας

Βιομάζα	HHV (MJ/kg)	Υγρασία (κ.β.)	Τέφρα (κ.β.)	Θείο (κ.β.)	Χλώριο (κ.β. ξηρό)
Κάρβουνο	25-32	1-10	0.5-6		
Ξύλο	10-20	10-60	0.25-1.7	0.01	0.01
Κέλυφος καρύδας	18-19	8-10	1-4		
Άχυρο	14-16	10	4-5	0.07	0.49
Κελύφη καρπών	17	2-3	10		
Φλούδες καφέ	16	10	0.6		
Υπολείμματα από βαμβάκι (μί- σχοι)	16	10-20	0.1		
Φλούδες κακάο	13-16	7-9	7-14		
Υπολείμματα φοινικόδεντρων (κελύφη)	15	15			
Φλοιοί ρυζιού	13-14	9-15	15-20		
Άχυρο σόγιας	15-16	8-9	5-6		
Υπολείμματα από βαμβάκι (υ- πόλειμμα εκκοκκισμού)	14	9	12		
Αραβόσιτος (μίσχοι)	13-15	10-20	2(3-7)	0.05	1.48
Υπολείμματα φοινικόδεντρων (ίνες)	11	40			
Πριονίδια	11	35	2		
Ζαχαροκάλαμο	8-10	40-60	1-4		
Υπολείμματα φοινικόδεντρων (στελέχη καρπών)	5	63	5		
Φλοιός δένδρων				0.7	0.49

Πίνακας 2.2: Ανάλυση τυπικής βιομάζας

Proximate ανάλυση		Ultimate ανάλυση	
Πτητικά	κ.β. maf > 70	C κ.β.	54.7
Τέφρα	κ.β. ar 1.5	H κ.β.	6.0
Υγρασία	κ.β. ar 20	O κ.β.	38.9
Άνθρακας	κ.β. ar < 15	N κ.β.	0.3
		S κ.β.	0.1

την μετατροπή και τη διανομή αντικαθίσταντο από βιομάζα, θα ήταν δυνατό να μειώσουμε περαιτέρω ή ακόμα και να εκμηδενίσουμε τις καθαρές εκπομπές CO_2 .

Οι εκπομπές του SO_2 είναι μικρότερες από τους σταθμούς λιγνίτη ή λιθάνθρακα επειδή το αρχικό ποσοστό του θείου στη βιομάζα είναι πολύ χαμηλό. Επιπρόσθετα, τα θερμικά NO_x είναι αμελητέα λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργίας.

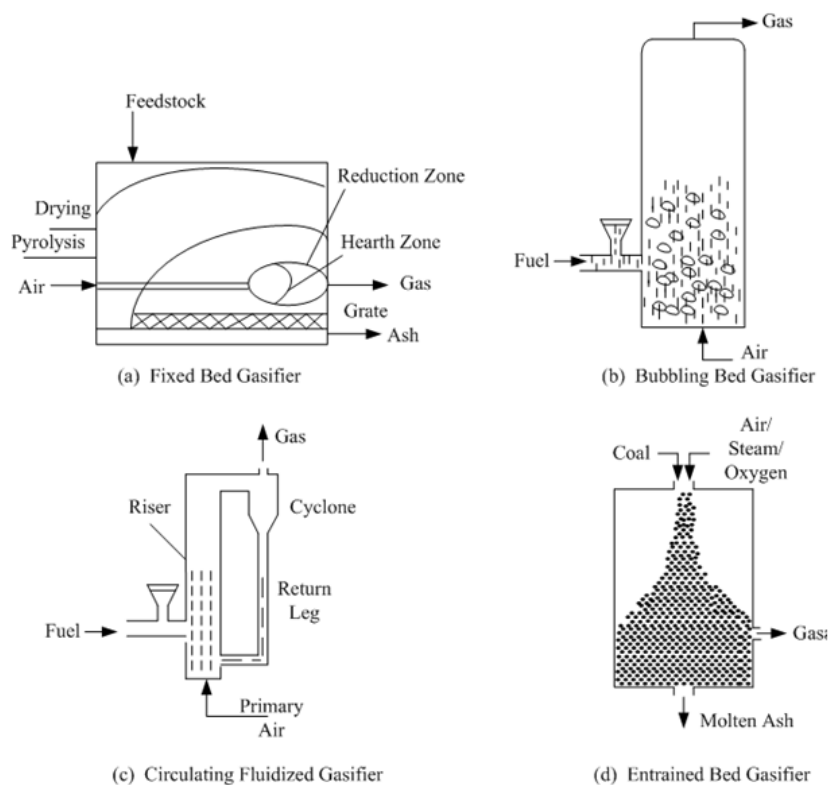
2.4 Τύποι αεριοποιητών

Υπάρχουν πολλοί τύποι αεριοποιητών που ξεκινούν με απλές και καταλήγουν σε περισσότερο εξειδικευμένες γεωμετρίες. Η ανάγκη για διαφορετικές κατασκευές έχει προκύψει για τον χειρισμό της τέφρας που παραμένει μέσα στον αεριοποιητή ή για τη μείωση των πιεσών μέσα στο παράγωγο αέριο. Οι πιέσεις είναι μεγάλο πρόβλημα επειδή όταν συμπυκνώνονται κολλάνε στα τοιχώματα του εξοπλισμού και προκαλούν σοβαρές ζημιές.

Ο αντιδραστήρας της μονάδας αεριοποίησης ονομάζεται αεριοποιητής και μπορεί να πάρει μία από τις παρακάτω μορφές (Prabir Basu (2009)) :

1. Αεριοποιητής σταθερής κλίνης (Ανοδικού ρεύματος, Καθοδικού ρεύματος, Πλαϊνού ρεύματος)
2. Αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης (αναβράζουσα κλίση, κλίση ανακυκλοφορίας, κλίση εκροής ρευστού)
3. Κλίση παράσυρσης

Τα σχήματα των παραπάνω διατάξεων φαίνονται στο Σχ. 2.3 (Prabir Basu (2009)).



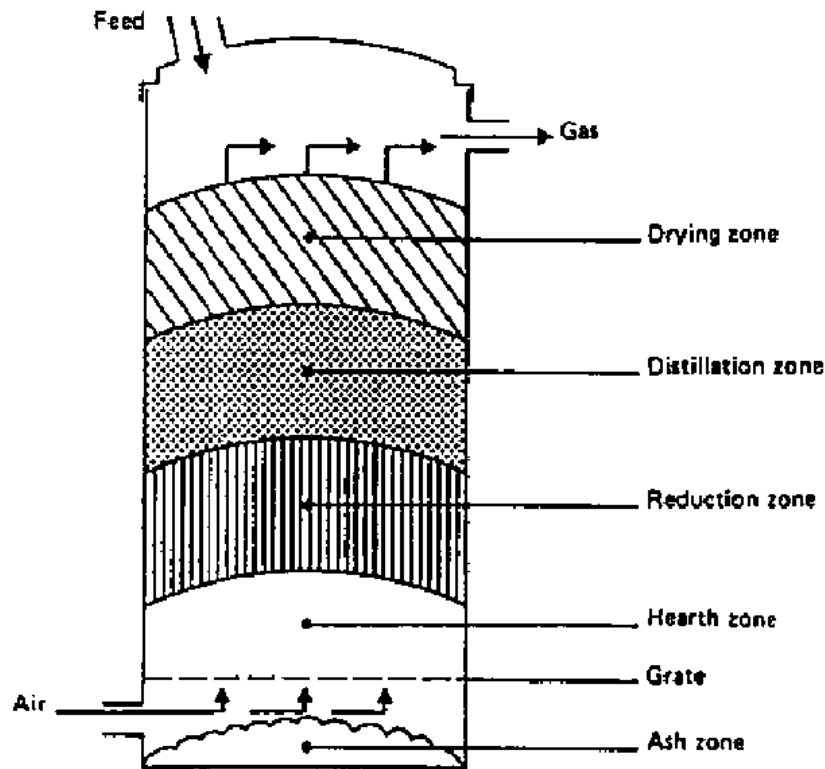
Σχήμα 2.3: Διαφορετικοί τύποι αεριοποιητών

2.4.1 Αεριοποιητής ανοδικού ρεύματος ή αντirroής

Ο αεριοποιητής ανοδικού ρεύματος αποτελείται από μια σταθερή κλίση με ανθρακούχο καύσιμο (π.χ. κάρβουνο ή βιομάζα), μέσα από το οποίο ρέει το μέσο αεριοποίησης (ατμός, οξυγόνο, αέρας ή διο-

ξείδιο του άνθρακα) με διάταξη αντιρροής. Η τέφρα που παράγεται είτε αφαιρείται ξηρή, είτε με μορφή επικαθίσεων, ανάλογα τη θερμοκρασία λειτουργίας. Η θερμική απόδοση είναι υψηλή επειδή η θερμοκρασία εξόδου του αερίου είναι σχετικά χαμηλή. Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγή πίσσων και μεθανίου είναι σημαντική και το παράγωγο αέριο πρέπει να καθαριστεί πριν τη χρήση.

Ο αεριοποιητής ανοδικού ρεύματος ή αντιρροής είναι ο παλιότερος και απλούστερος τύπος αεριοποιητή, και φαίνεται στην Εικ.2.4, (FAO). Η εισαγωγή αέρα γίνεται από το κάτω μέρος και το αέριο φεύγει από την καρυφή. Κοντά στη σχάρα στο κάτω μέρος γίνονται οι αντιδράσεις καύσης, οι οποίες ακολουθούνται από τις αντιδράσεις υποβάθμισης λίγο ψηλότερα στον αεριοποιητή. Στο πάνω μέρος του αεριοποιητή, λαμβάνουν χώρα οι αντιδράσεις θέρμανσης και πυρόλυσης, σαν αποτέλεσμα της μεταφοράς θερμότητας μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής και ακτινοβολίας από τις χαμηλότερες ζώνες. Οι πίσσες και τα πτητικά που παράγονται σε αυτή τη διαδικασία θα ακολουθήσουν το ρεύμα του αερίου. Η τέφρα αφαιρείται από το κάτω μέρος του αεριοποιητή.



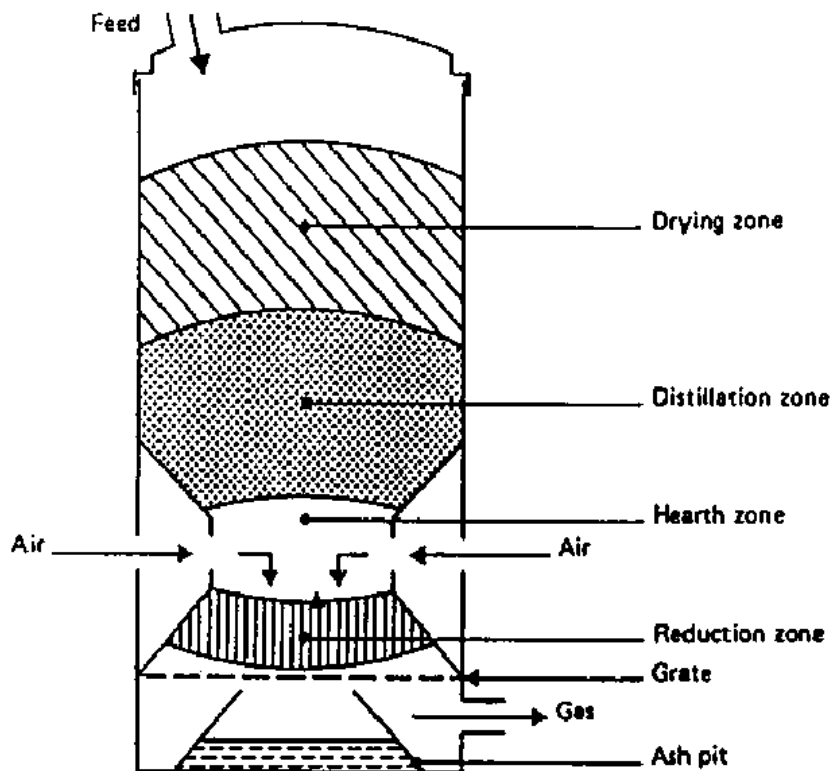
Σχήμα 2.4: Αεριοποιητής ανοδικού ρεύματος

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτού του τύπου αεριοποιητή είναι η απλότητα του, η υψηλή μετατροπή του άνθρακα, και η εσωτερική μεταφορά θερμότητας που οδηγεί σε χαμηλές θερμοκρασίες εξόδου του αερίου και υψηλή απόδοση του εξοπλισμού, καθώς και η δυνατότητα λειτουργίας με πολλά διαφορετικά είδη πρώτων υλών (πριονίδια, φλοιούς δημητριακών, κλπ.).

Τα κύρια μειονεκτήματα προέρχονται από την πιθανότητα του φαινομένου channelling¹ στον εξοπλισμό. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ξεσπάσματα οξυγόνου και επικίνδυνες, εκρηκτικές καταστάσεις και την ανάγκη για τοποθέτηση αυτόματων κινούμενων εσχαρίων. Επίσης προβλήματα δημιουργούνται από την απόρριψη των συμπυκνωμάτων που περιέχουν πίσσες και προκύπτουν από τις εργασίες καθαρισμού του αερίου. Το τελευταίο είναι μηδενικής σημασίας στις εφαρμογές άμεσης θέρμανσης, στις οποίες οι πίσσες απλά καίγονται. Λόγω του υψηλού περιεχομένου σε πίσσες στο παράγωγο αέριο (μέχρι και 150 g/m^3), οι αεριοποιητές ανοδικού ρεύματος δεν είναι κατάλληλοι για κινητήρες και στροβίλους χωρίς τον καθαρισμό του αερίου (C. Mandl (June/July 2009)).

2.4.2 Αεριοποιητής καθοδικού ρεύματος ή ομοροής

Ο αεριοποιητής καθοδικού ρεύματος είναι παρόμοιος με τον τύπο ανοδικού, αλλά το μέσο ρευστοποίησης ρέει σε διάταξη ομοροής με το καύσιμο. Αυτή η διάταξη ανεβάζει τη θερμοκρασία εξόδου του παράγωγου αερίου, βοηθώντας στη διάσπαση των πηκτών, και έτσι τα επίπεδα πηκτών είναι πολύ χαμηλότερα από την περίπτωση αντιρροής. Το παράγωγο αέριο αφαιρείται από το κάτω μέρος της συσκευής, έτσι ώστε το καύσιμο και το αέριο να κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση, όπως φαίνεται σχηματικά στο Σχ. 2.5, (FAO).



Σχήμα 2.5: Αεριοποιητής καθοδικού ρεύματος

¹Το Channelling είναι ένα λειτουργικό πρόβλημα. Ο αέρας δεν κατανέμεται ομοιόμορφα μέσα από τον αεριοποιητή αλλά ακολουθεί κανάλια χαμηλής πίεσης. Αυτό μπορεί να προκύψει από ανεπαρκή παροχή αέρα ή συνθήκες συμπαγούς κλίνης.

Κατά την πορεία που ακολουθούν προς τα κάτω, τα οξέα και πισσώδη παράγωγα από το καύσιμο πρέπει να περάσουν μέσα από ένα τμήμα πυράκτωσης με άνθρακα και επομένως μετατρέπονται σε μόνιμα αέρια, όπως υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα, μονοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο. Ανάλογα με τη θερμοκρασία της ζεστής ζώνης και το χρόνο παραμονής των ατμωδών πισσών, επιτυγχάνεται σχεδόν ολοκληρωτική διάσπαση των πισσών. Το κύριο πλεονέκτημα των αεριοποιητών καθοδικού ρεύματος έγκειται στο γεγονός ότι μπορούν να παράξουν παράγωγο αέριο χωρίς πίσσες, κατάλληλο για εφαρμογές κινητήρων. Λόγω του μικρότερου επιπέδου των οργανικών συστατικών στο συμπύκνωμα, οι αεριοποιητές καθοδικού ρεύματος έχουν λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τους αεριοποιητές ανοδικού τύπου.

Στην πράξη, ωστόσο, η παραγωγή ενός αερίου με πλήρη απουσία πισσών είναι αμφίβολο εάν επιτυγχάνεται σε όλο το εύρος λειτουργίας του εξοπλισμού : ένας λόγος λειτουργίας χωρίς πίσσες προς το σβήσιμο του αντιδραστήρα ίσος με 3 θεωρείται καλός, ενώ ένας λόγος 5-6 θεωρείται άριστος.

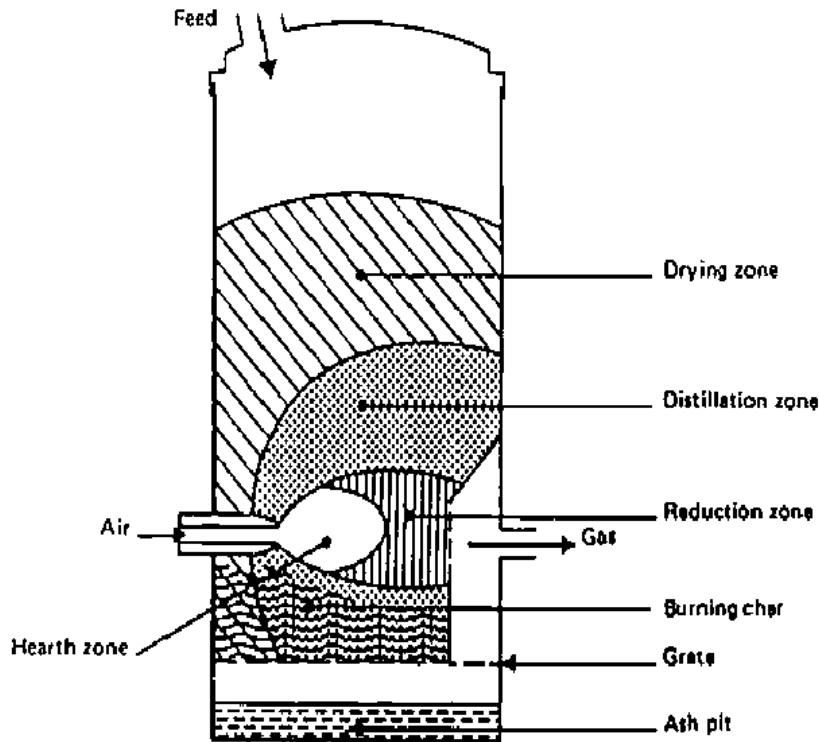
Ένα κύριο μειονέκτημα του αεριοποιητή καθοδικού ρεύματος έγκειται στην αδυναμία του να λειτουργεί με ακατέργαστα καύσιμα. Συγκεκριμένα, χνουδωτά, χαμηλής πυκνότητας καύσιμα δημιουργούν προβλήματα στη ροή και προκαλούν μεγάλες πτώσεις πίεσης, και τα στερεά καύσιμα πρέπει να μετατραπούν σε μορφή πελλετών ή πλίνθων πριν χρησιμοποιηθούν. Οι αεριοποιητές καθοδικού ρεύματος υποφέρουν επίσης από προβλήματα που σχετίζονται με καύσιμα με μεγάλες περιεκτικότητες σε τέφρα (επικαθίσεις) σε μεγαλύτερο βαθμό από τους αεριοποιητές ανοδικού ρεύματος. Μικρότερα μειονεκτήματα του συστήματος καθοδικού ρεύματος, σε σύγκριση με το ανοδικού ρεύματος, είναι η μικρότερη απόδοση που προκύπτει από την έλλειψη εσωτερικής μεταφοράς θερμότητας καθώς και από τη χαμηλότερη θερμογόνο ικανότητα του παράγωγου αερίου. Εκτός από αυτό, η χρήση των αεριοποιητών σε ένα εύρος ισχύος πάνω από περίπου 350 kW (ισχύς άξονα) καθίσταται ανέφικτη εξαιτίας της ανάγκης για τη διατήρηση ομοιόμορφων υψηλών θερμοκρασιών σε μια δεδομένη περιοχή.

2.4.3 Αεριοποιητής πλαϊνού ρεύματος

Οι αεριοποιητές πλαϊνού ρεύματος, όπως φαίνονται και στο Σχ. 2.6, (FAO) είναι μια προσαρμογή για τη χρήση κάρβουνου. Η αεριοποίηση κάρβουνου έχει ως αποτέλεσμα πολύ υψηλές θερμοκρασίες (1.500 °C και ψηλότερες) στη ζώνη οξειδωσης, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε προβλήματα υλικών. Στους αεριοποιητές πλαϊνού ρεύματος η μόνωση έναντι αυτών των υψηλών θερμοκρασιών παρέχεται από το ίδιο το καύσιμο (κάρβουνο).

Τα πλεονεκτήματα του συστήματος σχετίζονται με το πολύ μικρό εύρος στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει. Εγκαταστάσεις μικρότερες των 10 kW (ισχύς άξονα) μπορούν, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, να είναι οικονομικά εφικτές. Ο λόγος είναι το πολύ απλό σύστημα καθαρισμού αερίου (μόνο ένας κυκλώνας και ένα φίλτρο υψηλής θερμοκρασίας), το οποίο μπορεί να λειτουργήσει σε συνδυασμό με μικρότερους κινητήρες.

Ένα μειονέκτημα των αεριοποιητών πλαϊνού ρεύματος είναι οι μικρές ικανότητες μετατροπής των πισσών που διαθέτουν και η επακόλουθη ανάγκη για υψηλής ποιότητας κάρβουνο (χαμηλό ποσοστό πτητικών). Εξαιτίας της αβεβαιότητας της ποιότητας του κάρβουνου, πολλές μονάδες χρησιμοποιούν αεριοποιητές καθοδικού ρεύματος, τουλάχιστον για να διατηρήσουν την ικανότητα διάσπασης των



Σχήμα 2.6: Αεριοποιητής πλαινού ρεύματος

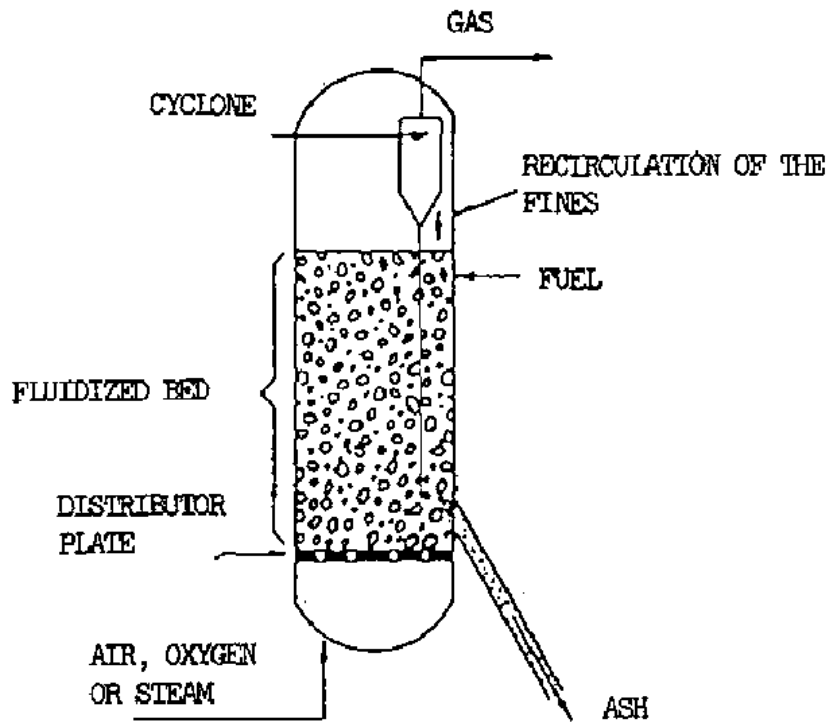
πισσών.

2.4.4 Αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης

Η λειτουργία και των δύο παραπάνω τύπων επηρεάζεται από τις μορφολογικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες του καυσίμου. Τα προβλήματα που συχνά απαντώνται είναι: επικαθίσεις και υπερβολικές πτώσεις πίεσης κατά ύψος του αεριοποιητή. Μια σχεδιαστική προσέγγιση που στοχεύει στην εξάλειψη των παραπάνω δυσκολιών είναι ο αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης που φαίνεται στο Σχ. 2.7, (FAO).

Σε έναν αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης τα κοκκώδη αδρανή στερεά (συνήθως πυριτική άμμος) ρευστοποιούνται μαζί με το καύσιμο με τη χρήση του μέσου ρευστοποίησης. Η αρχή της ρευστοποίησης είναι απλή. Με τη διέλευση ενός ρευστού μέσα από μία συμπαγή κλίνη με στερεά σωματίδια, δημιουργείται μια πτώση πίεσης λόγω της έλκουσας του ρευστού. Όταν η δύναμη του ρευστού γίνει ίση με το βάρος της κλίνης, τα σωματίδια δεν ακουμπούν πλέον το ένα πάνω στο άλλο, και έτσι δημιουργείται μια κίνηση που θυμίζει την κίνηση ρευστού. Η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης συμβολίζεται με U_{mf} , και δείχνει την ελάχιστη ταχύτητα του ρευστού με την οποία η κλίνη ρευστοποιείται. Η αεριοποίηση είναι ενδόθερμη αντίδραση, και γι' αυτό θα πρέπει να αποδίδεται εσωτερικά ή εξωτερικά θερμότητα στο σύστημα, ώστε να διατηρείται το φαινόμενο. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι συνήθως 800-950°C.

Οι αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης είναι κατάλληλοι για καύσιμα που δημιουργούν έντονα διαβρωτική τέφρα, που θα προκαλούσε ζημιά στους αεριοποιητές με επικαθήσεις. Η βιομάζα ως καύσιμο περιέχει γενικά υψηλά ποσοστά διαβρωτικής τέφρας. Η παραγωγή αερίου από ξύλο σε μονάδες ρευστοποιημένης κλίνης θεωρείται ως μία από τις περισσότερο υποσχόμενες τεχνολογίες για την αποδοτική αξιοποίηση της ενέργειας από τη βιομάζα.



Σχήμα 2.7: Αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης

Ο αέρας ωθείται μέσα από μια κλίνη με στερεά σωματίδια με μια επαρκή ταχύτητα για να τα κρατήσει σε κατάσταση αιώρησης. Η κλίνη αρχικά θερμαίνεται εξωτερικά και το καύσιμο εισάγεται μόλις επιτευχθεί μια επαρκώς υψηλή θερμοκρασία. Τα σωματίδια καυσίμου εισάγονται στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα, αναμιγνύονται πολύ γρήγορα με το υλικό της κλίνης και σχεδόν ακαριαία θερμαίνονται μέχρι τη θερμοκρασία της κλίνης. Ως αποτέλεσμα αυτού του χειρισμού, το καύσιμο πυρολύεται πολύ γρήγορα, και μετατρέπεται σε μίγμα συστατικών με μια σχετικά μεγάλη ποσότητα αέριων υλικών. Περαιτέρω αντιδράσεις αεριοποίησης και μετατροπής των πηκτών γίνονται στην αέρια φάση. Τα περισσότερα συστήματα εξοπλίζονται με έναν εσωτερικό κυκλώνα έτσι ώστε να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η διαφυγή εξανθρακώματος. Τα σωματίδια τέφρας μεταφέρονται επίσης στο πάνω μέρος του αντιδραστήρα και πρέπει να αφαιρεθούν από το ρεύμα του αερίου εάν το αέριο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές κινητήρων.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των αεριοποιητών ρευστοποιημένης κλίνης προκύπτουν από την ευελιξία στα καύσιμα για τον έλεγχο της θερμοκρασίας, η οποία μπορεί να διατηρηθεί κάτω από το σημείο τήξης της τέφρας (φλοιοί ρυζιού), και την ικανότητα τους να λειτουργούν με χνουδωτά και λεπτό-

κοκκα υλικά (πριονίδια κλπ.), χωρίς την ανάγκη για προ-επεξεργασία. Ωστόσο, κάποια προβλήματα με την τροφοδοσία, την αστάθεια της κλίνης και συσσωματώσεις ιπτάμενης τέφρας στα κανάλια του αερίου μπορεί να προκύψουν με κάποια κάυσιμα βιομάζας (FAO).

Τα μειονεκτήματα του αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης προκύπτουν από τις σχετικά υψηλές περιεκτικότητες πηλάνων στο παράγωγο αέριο (μέχρι και 500 mg/m^3 αερίου), τη μη ολοκληρωμένη μετατροπή του καυσίμου, και τις αργές αποκρίσεις του συστήματος στις αλλαγές φορτίου.

Ειδικά επειδή χρειάζεται ελεγκτικός εξοπλισμός για την αντιμετώπιση του τελευταίου προβλήματος, δεν προβλέπονται πολύ μικροί αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης και το εύρος εφαρμογής πρέπει να είναι πάνω από τα 500 kW (ισχύς άξονα). Οι αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης είναι προσωρινά διαθέσιμοι σε ημι-εμπορική μορφή από διάφορους κατασκευαστές στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.

2.4.5 Άλλοι τύποι αεριοποιητών

Αεριοποιητές κλίνης παράσυρσης

Στους αεριοποιητές κλίνης παράσυρσης, Εικ. 2.3, ένα ξηρό κονιοποιημένο στερεό, ένα υγρό καύσιμο σε μορφή μικρών σταγόνων ή ένα υδαρές καύσιμο αεριοποιείται με το οξυγόνο (λιγότερο συχνά με αέρα) σε ομοροή. Οι αντιδράσεις αεριοποίησης λαμβάνουν χώρα σε ένα πυκνό σύννεφο πολύ λεπτών σωματιδίων. Επιτυγχάνονται υψηλές θερμοκρασίες ώστε να μην εμφανίζονται πίσσες ή μεθάνιο στο παράγωγο αέριο, αλλά η ανάγκη για οξυγόνο στο ρόλο του μέσου ρευστοποίησης είναι απαιτητική σε δαπάνη. Το μεγαλύτερο μέρος της τέφρας αφαιρείται ως επικαθίσεις επειδή η θερμοκρασία λειτουργίας είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης της τέφρας. Οι αεριοποιητές κλίνης παράσυρσης έχουν γίνει ο επιθυμητός τύπος για σκληρούς λιθάνθρακες, και έχουν επιλεγεί για την πλειψηφία των εφαρμογών *IGCC* εμπορικού μεγέθους (Christopher Higman (2008)).

Άλλοι τύποι αεριοποιητών βιομάζας (διπλής καύσης, τηγμένου λουτρού), οι οποίοι είναι μερικώς εμπνευσμένοι από τη τεχνολογία αεριοποίησης του λιθάνθρακα, είναι προσωρινά υπό ανάπτυξη. Σε κάποιες περιπτώσεις αυτά τα συστήματα περιέχουν περιττές βελτιώσεις και πολυπλοκότητες, και σε άλλες το μέγεθος και η επιτήδευση του εξοπλισμού κάνουν τη βραχυπρόθεσμη εφαρμογή τους στις αναπτυσσόμενες χώρες μάλλον απίθανη. Γί αυτούς τους λόγους παραλείπεται η περαιτέρω αναφορά στην παρούσα εργασία.

Κεφάλαιο 3

Λειτουργικά χαρακτηριστικά

3.1 Θερμοκρασία κλίνης

Η θερμοκρασία της κλίνης έχει πολύ σημαντική επίδραση σε όλη τη διαδικασία και τα προϊόντα από κάθε άποψη. Καθορίζει τη σύσταση ισορροπίας του αερίου. Η τέφρα της βιομάζας έχει σημείο τήξης περίπου 1.000°C . Γι' αυτό, είναι σημαντικό να διατηρείται η θερμοκρασία λειτουργίας κάτω από αυτό το επίπεδο, ώστε να αποφευχθεί η συσσωμάτωση και η επικάλυψη της τέφρας. Η υψηλότερη θερμοκρασία της κλίνης περιορίζεται επίσης από την συσσωμάτωση του εξανθρακώματος. Αυτό συμβαίνει όταν οι ρυθμοί αντίδρασης είναι χαμηλοί και η συνολική απόδοση αεριοποίησης μειώνεται επειδή μέρος του καυσίμου παραμένει σε μορφή εξανθρακώματος που δεν έχει μετατραπεί σε αέριο. Όπως έχει παρατηρηθεί από τον αεριοποιητή εργαστηριακής κλίμακας, τα σωματίδια εξανθρακώματος που δεν έχουν αντιδράσει μπορούν να φτάσουν σε πολύ μεγάλες τιμές θερμογόνου ικανότητας 30 MJ/kg , όταν το αρχικό καύσιμο έχει μόλις 20 MJ/kg . Αυτή η συμπύκνωση ισχύος μεταφράζεται σε απώλεια ενέργειας για το σύστημα και είναι ανεπιθύμητη.

Από την άλλη πλευρά, η θερμοκρασία του αεριοποιητή θα πρέπει να είναι επαρκώς υψηλές ώστε να παράγουν μη-συμπυκνώσιμες πίσσες, ώστε να απογεύγονται προβλήματα στον εξοπλισμό που ακολουθεί τον αεριοποιητή. Εάν το παράγωγο αέριο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές κινητήρων ή στροβίλων αντί για άμεση θέρμανση, οι πίσσες θα πρέπει να διασπώνται ή να αφαιρούνται από πριν. Αυτός είναι ο λόγος, για τον οποίο ο σχηματισμός πίσσών στο παράγωγο αέριο μπορεί να κάνει τη διεργασία ακατάλληλη από τεχνική και οικονομική άποψη, όπως αναφέρεται στο (A. Gomez-Barea (2010)).

Η συνήθης θερμοκρασία που συνδυάζει όλα τα πλεονεκτήματα είναι περίπου οι 800°C . Αυτή είναι και η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται και μετρείται στην παρούσα πειραματική διάταξη. Οι χημικές αντιδράσεις της αεριοποίησης αθροίζονται και προκύπτει συνολικά ενδόθερμη κατάσταση μέσα στον αντιδραστήρα. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η ποσότητα της ενέργειας για τη διατήρηση του φαινομένου θα πρέπει να δοθεί από μια άλλη πηγή. Υπάρχουν αυτοθερμικές και αλλοθερμικές διεργασίες για την υποστήριξη της θέρμανσης ανάλογα με το μέσο αεριοποίησης.

3.1.1 Αυτοθερμική και αλλοθερμική θέρμανση

Η αυτοθερμική θέρμανση είναι όταν το οξειδωτικό μέσο είναι αέρας ή οξυγόνο και η θερμότητα μπορεί να εξασφαλισθεί από τη μερική καύση του καυσίμου μέσα στον αντιδραστήρα. Από την άλλη πλευρά, στην αλλοθερμική θέρμανση χρησιμοποιείται ατμός σαν οξειδωτικό μέσο και η θερμότητα

θα πρέπει να αποδοθεί από εξωτερική πηγή.

Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιείται ατμός ως οξειδωτικό μέσο, και διάφορες αλλοθερμικές διεργασίες συζητούνται παρακάτω. Οι δύο κύριες ιδέες για την επίλυση του προβλήματος μεταφοράς θερμότητας είναι είτε να ανακυκλοφορούνται σωματίδια υψηλής θερμοκρασίας (π.χ. υλικό της κλίνης) από μια ζώνη καύσης (π.χ. αεριοποιητής Batelle, αεριοποιητής Gussing κλπ.), ή να χρησιμοποιηθούν συστήματα αεριοποιητών ρευστοποιημένης κλίνης εμμέσως θερμαινόμενα, με ενσωματωμένους σωλήνες μετάδοσης θερμότητας (S. Karellas (2008)).

Άλλες ιδέες είναι να εκτεθεί ο αντιδραστήρας σε εστιασμένη ηλιακή ενέργεια και να χρησιμοποιηθούν ανθρακούχα υλικά μόνο για την αεριοποίηση. Οι A. Z' Graggen (2008) πρότειναν έναν αντιδραστήρα άμεσα εκτεθειμένο σε εστιασμένη ηλιακή ενέργεια. Με αυτό τον τρόπο, η εξωτερική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του αντιδραστήρα είναι λιγότερη (μόνο κατά τη διάρκεια της νύχτας), μειώνοντας έτσι τις συνολικές εκπομπές CO_2 . Σε αυτή την περίπτωση, το αρχικό κόστος κεφαλαίου αυξάνεται, όπως και τα λειτουργικά κόστη για τα κινούμενα μέρη των καθρεπτών που χρησιμοποιούνται. Οι πολύ υψηλής θερμοκρασίας πυρηνικοί αντιδραστήρες μπορούν να πετύχουν το ίδιο, αποφεύγοντας την ανάγκη διαθεσιμότητας ήλιου και τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι E.D. Gordillo (2011), χρησιμοποίησαν κορεσμένο ατμό από έναν πυρηνικό αντιδραστήρα σαν τη μοναδική πηγή ενέργειας. Η τεχνολογία της πυρηνικής ενέργειας είναι πλήρως κατανοητή αλλά τα θέματα ασφαλείας είναι πάντα στο επίκεντρο.

Εδώ η μεταφορά θερμότητας γίνεται με τέσσερις (4) ηλεκτρικούς σωλήνες μεταφοράς θερμότητας μέσα στον αντιδραστήρα στο επίπεδο της άμμου. Περισσότερη συζήτηση γίνεται στην ενότητα 6.5.

3.2 Το μέσο αεριοποίησης

Όταν το μέσο αεριοποίησης είναι ο αέρας, η διαδικασία ονομάζεται αεριοποίηση αέρα και το παράγωγο αέριο έχει χαμηλότερη ποιότητα από σκοπιά θερμογόνου ικανότητας ($LHV \sim 4-7 MJ/Nm^3$) λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του αζώτου που αναμιγνύεται σε αυτό. Αυτό το αέριο είναι κατάλληλο για λέβητες, κινητήρες και στροβίλους.

Εάν το μέσο αεριοποίησης είναι καθαρό οξυγόνο ή ατμός, η διαδικασία λέγεται αεριοποίηση οξυγόνου ή αεριοποίηση ατμού αντίστοιχα. Σε αυτή την περίπτωση, το παράγωγο αέριο έχει σχετικά υψηλή θερμογόνο ικανότητα ($LHV \sim 10-18 MJ/Nm^3$) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετατροπή σε μεθανόλη και βενζίνη (G. Schuster (2001)) .

Η αεριοποίηση με υπερ-καθαρό οξυγόνο O_2 δεν είναι πρακτική λόγω του απαγορευτικά υψηλού κόστους για την παραγωγή του O_2 με χρήση της παρούσας εμπορικής τεχνολογίας. Έτσι, η αεριοποίηση ατμού μοντελοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη. Τα πλεονεκτήματα της αεριοποίησης ατμού είναι η μέγιστη παραγωγή υδρογόνου, η αποδοτική μείωση των πισσών, και η υψηλότερη μετατροπή του εξανθρακώματος (C. Franco (2002); C. Lucas (2004)).

Είναι κοινό να εκφράζεται η ποσότητα της προσθήκης ατμού, ως ο λόγος ατμού προς βιομάζα (*STBR*) :

$$STBR = \frac{Steam + Fuelmoisture(kg/s)}{Drybiomass(kg/s)} \quad (3.1)$$

Η ελάχιστη τιμή για το λόγο ατμού προς βιομάζα θα πρέπει να είναι $STBR_{min} \approx 0.4$, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η πλήρης μετατροπή του άνθρακα σε αέρια συστατικά, όπως προβλέπεται από τη θερμοδυναμική.

3.3 Απόδοση αεριοποιητή

Ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την πραγματική τεχνική λειτουργία, όπως και την οικονομική βιωσιμότητα ενός συστήματος αεριοποίησης, είναι η απόδοση της αεριοποίησης.

Όταν το αέριο χρησιμοποιείται για εφαρμογές κινητήρων, η απόδοση ορίζεται ως εξής :

$$\eta_m = \frac{H_g \cdot Q_g}{LHV_s \cdot M_s} \cdot 100(\%) \quad (3.2)$$

όπου

η_m = η απόδοση της αεριοποίησης % (μηχανικός βαθμός απόδοσης)

H_g = θερμογόνος ικανότητα του αερίου (kJ/m^3)

Q_g = ροή όγκου του αερίου (m^3/s)

LHV_s = κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου (kJ/kg)

M_s = κατανάλωση στερεού καυσίμου του αεριοποιητή (kg/s)

Εάν το αέριο χρησιμοποιείται για άμεση καύση, η απόδοση της αεριοποίησης ορίζεται ως :

$$\eta_{th} = \frac{(H_g \cdot Q_g) + (Q_g \cdot \rho_g \cdot C_p \cdot \Delta T)}{LHV_s \cdot M_s} \cdot 100(\%) \quad (3.3)$$

όπου

η_{th} = η απόδοση της αεριοποίησης % (θερμικός βαθμός απόδοσης)

ρ_g = η πυκνότητα του αερίου (kg/m^3)

C_p = η ειδική θερμότητα του αερίου (kJ/kgK)

ΔT = η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αερίου στην είσοδο του καυστήρα και του καυσίμου που μπαίνει στον αεριοποιητή (K).

Κανονικές τιμές για το η_m είναι 60-75 % ανάλογα τον τύπο και το σχεδιασμό του αεριοποιητή και 93 % για τον η_{th} , για τις περιπτώσεις θερμικών εφαρμογών (FAO).

Κεφάλαιο 4

Χημικές διεργασίες

Η διαδικασία της αεριοποίησης μπορεί να διαχωρισθεί περαιτέρω στα ακόλουθα βήματα :

1. Ξήρανση
2. Πυρόλυση
3. Αεριοποίηση και καύση εξανθρακώματος

Η καύση του εξανθρακώματος παρέχει μέρος της απαιτούμενης θερμότητας που απαιτείται από τις ενδόθερμες αντιδράσεις αεριοποίησης.

4.1 Ξήρανση

Μόλις το καύσιμο εισέλθει στον αεριοποιητή θερμαίνεται και ξηραίνεται, απελευθερώνοντας υγρασία μέχρι περίπου τους 200°C . Μετά τους 100°C , η επιφανειακή υγρασία από τη βιομάζα αφαιρείται μη-αντιστρεπτά. Κατόπιν, η εσωτερική υγρασία της βιομάζας απελευθερώνεται. Κατά τη διαδικασία αυτή, αρχίζουν να αλεπουθερώνονται και τα πτητικά. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο είναι κοινή πρακτική να συνδυάζονται οι ξήρανση με την πυρόλυση, καθώς οι δύο διαδικασίες αλληλοεπικαλύπτονται.

Η ξήρανση είναι πολλές τάξεις μεγέθους ταχύτερη από οποιαδήποτε από τις αντιδράσεις αεριοποίησης που λαμβάνουν χώρα μέσα στον αντιδραστήρα. Γι' αυτό το λόγο, στην παρούσα μελέτη, υποτίθεται η ακαριαία ξήρανση του καυσίμου στο σημείο εισόδου του καυσίμου. Αυτό μοντελοποιείται ως μια χημική αντίδραση στην οποία η υγρασία του στερεού καυσίμου μεταφέρεται στο στοιχείο νερού της αέριας φάσης, με πολύ γρήγορους ρυθμούς αντίδρασης, δηλαδή μεγάλους συντελεστές κινητικών ρυθμών στην εξίσωση Arrhenius (βλέπε ενότητα 6.7):



4.2 Πυρόλυση

4.2.1 Πρωτογενής πυρόλυση

Η πρωτογενής πυρόλυση είναι η αρχική θερμοχημική διάσπαση της οργανικής ύλης σε υψηλές θερμοκρασίες, απουσία οξυγόνου. Αρχίζει να συμβαίνει όταν το ξηρό καύσιμο θερμαίνεται στο εύρος

των 200-500°C και διασπάται σε μόνιμα αέρια, συμπυκνώσιμο ατμό -πίσσες, και στερεό υπόλειμμα -εξανθράκωμα. Κάθε ένα από αυτά τα προϊόντα είναι ένα περίπλοκο μίγμα διαφορετικών ειδών. Η ακριβής σύσταση του αερίου από το ξύλο και οιπίσσες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το ρυθμό θέρμανσης, (Blasi (2008); Christopher Higman (2008)), και τη θερμοκρασία θέρμανσης (Gronli (1996)).

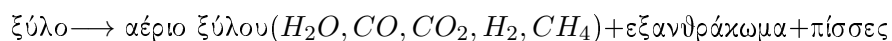
Εάν ο ρυθμός θέρμανσης είναι χαμηλός, η πυρόλυση ξεκινά από τους 350°C. Η αεριοποίηση των πτητικών και του εξανθρακώματος με τον ατμό είναι πολύ αργές σε αυτή τη θερμοκρασία. Η συγκέντρωση των πτητικών εξωτερικά του σωματιδίου βιομάζας αυξάνεται ταχύτατα, και η αεριοποίηση ξεκινά μόνο αφού τελειώσει η απελευθέρωση των πτητικών. Ωστόσο, εάν ο ρυθμός θέρμανσης είναι υψηλός, τότε η πυρόλυση και η αεριοποίηση γίνονται ταυτόχρονα, και δεν επιτρέπεται η αύξηση της συγκέντρωσης των πτητικών με τον ίδιο βαθμό (Christopher Higman (2008)).

Μια μεγάλη απόδοση πισσών μπορεί να είναι επιθυμητή (π.χ. παραγωγή ελαίου πυρόλυσης) ή ανεπιθύμητη (π.χ. παραγωγή αερίου για κινητήρες αερίου), αλλά σε κάθε περίπτωση η γνώση των αντιδράσεων διάσπασης έχει μεγάλη σημασία για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας και ενός βέλτιστου σχεδιασμού του αντιδραστήρα (J. Rath (2001)).

Είναι σημαντικό στη μοντελοποίηση να γνωρίζουμε τις σχετικές ποσότητες των προϊόντων της πυρόλυσης (π.χ. αέριο,πίσσες και εξανθράκωμα) επειδή αυτά τα προϊόντα χρησιμοποιούνται αργότερα στην αεριοποίηση και τη μερική καύση και καθορίζουν την τελική σύσταση του παράγωγου αερίου. Έτσι, η γνώση των κινητικών φαινομένων και φαινομένων μεταφοράς που χαρακτηρίζουν τον αντιδραστήρα είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας της πυρόλυσης, ώστε να καταλήξουμε σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Μια επισκόπηση των διαθέσιμων μοντέλων πυρόλυσης με μια εκτεταμένη έρευνα της βιβλιογραφίας μπορεί να βρεθεί στην επιθεώρηση του (Blasi (2008)). Κάποια μοντέλα πυρόλυσης που έχουν αναπτυχθεί χρησιμοποιούν δεδομένα στο πλαίσιο της προσέγγισης Euler-Lagrange και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα μοντέλα Euler-Euler (για τις διαφορές βλέπε την ενότητα 4.5.1).

Ο Gronli (1996) πρότεινε ένα μοντέλο για την πρωτογενή πυρόλυση το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί αργότερα από τους J. Larfeldt (2000) και S. Gerber (2010), υποθέτοντας μια πορεία αντίδρασης:



Η σύσταση του αερίου από το ξύλο, που προκύπτει από την πρωτογενή πυρόλυση, εξαρτάται πολύ από το ρυθμό θέρμανσης, τη θερμοκρασία θέρμανσης και τη φύση του ξύλου που χρησιμοποιείται. Η πραγματική σύσταση και οι ρυθμοί αντίδρασης του καυσίμου μπορούν να βρεθούν μόνο μετά από πειραματική έρευνα.

Οιπίσσες είναι ένα περίπλοκο μίγμα διαφορετικών συστατικών, κυρίως Πολυκυκλικών Αρωματικών Υδρογονανθράκων (PAH) όπως η ναφθαλίνη, ή το φαινανθρένιο και το ανθρακένιο. Η γενική χημική τους φόρμουλα είναι C_xH_y και γνωρίζουμε ελάχιστα για τις ακριβείς χημικές αντιδράσεις

που οδηγούν σε τόσο περίπλοκους σχηματισμούς. Για αυτούς τους λόγους, οι πίσσες, όπως και οι αδρανείς πίσσες, δεν λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα εργασία.

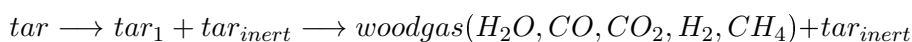
Το εξανθράκωμα υποτίθεται ότι αποτελείται από καθαρό άνθρακα, το οποίο είναι η συνήθης μέθοδος προσομοίωσης του στη βιβλιογραφία. Μοντελοποιείται ως μια στερεά φάση με σταθερή διάμετρο.

4.2.2 Δευτερογενής πυρόλυση

Η δευτερογενής πυρόλυση αναφέρεται στις διεργασίες όπως είναι η διάσπαση, ο πολυμερισμός, η συμπύκνωση, ή η απόθεση άνθρακα που προκύπτουν από την αντίδραση των προϊόντων της πρωτογενούς πυρόλυσης σε υψηλές θερμοκρασίες και επαρκώς μεγάλους χρόνους παραμονής, (Smoot L.Douglas (1985)). Αυτές οι αντιδράσεις συμβαίνουν ομογενώς στην αέρια φάση και ετερογενώς στη στερεά ή στα σωματίδια εξανθρακώματος (J.C. Wurzenberger (2002)). Η έκθεση των πισσών του ξύλου σε υψηλές θερμοκρασίες με μεγάλους χρόνους παραμονής προκαλεί τη διάσπαση του μεγαλύτερου μέρους τους σε ελαφριά αέρια. Εάν ο αντιδραστήρας λειτουργούσε ως πυρολύτης, με αέριο αδρανές μέσο, θα εντοπιζόταν όλη η ποσότητα αυτών των αερίων.

Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν το ρυθμό πυρόλυσης και τις αποδόσεις, τη σύσταση και τις ιδιότητες του παράγωγου αερίου. Οι κύριοι είναι η θερμοκρασία, η πίεση, ο ρυθμός θέρμανσης και οι ιδιότητες της βιομάζας, όπως η χημική σύσταση, το περιεχόμενο της τέφρας και η σύσταση της, το μέγεθος των σωματιδίων και το σχήμα τους, η πυκνότητα και η υγρασία. Ο C. A. Kouforanos (1989) πρότεινε μια καθολική μέθοδο για τη μοντελοποίηση της πυρόλυσης της βιομάζας θεωρώντας της ως άθροισμα των κύριων συστατικών της, δηλαδή της κυτταρίνης, της ημι-κυτταρίνης και της λιγνίνης.

Το μοντέλο του M.J. Boroson (1989) υποθέτει ότι οι πίσσες από την πρωτογενή πυρόλυση αποσυντίθενται δίνοντας αέριο ξύλου μέσω των αντιδραστικών tar_1 και των αδρανών πισσών :



Η αναλογία των αδρανών πισσών διαφέρει μεταξύ των υπαρχόντων μοντέλων. Είναι πλήρως κατανοητό ότι η ακριβής ποσότητα των αδρανών πισσών εξαρτάται από τη θερμοκρασία, καθώς κάθε αρωματική ένωση θα διασπαζόταν σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Άλλα μοντέλα προτείνουν δύο ομάδες πισσών που αντιδρούν με διαφορετικούς ρυθμούς αντίδρασης. Το τελικό προϊόν της δευτερογενούς πυρόλυσης υποτίθεται ότι περιέχει H_2O , CO , CO_2 , H_2 και CH_4 στις περισσότερες μηχανολογικές εφαρμογές αγνοώντας πιθανά κλάσματα μάζας C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_2H_2 ως αμελητέες ποσότητες.

4.3 Αλληλεπίδραση εξανθρακώματος - αερίου

Αεριοποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία κάθε ανθρακούχα ένωση μπορεί να μετατραπεί σε αέριο καύσιμο που ονομάζεται παράγωγο αεριο μέσω της μερικής οξειδωσης, όπως ήδη συζητήθηκε

στην ενότητα 2.2. Αυτή η διαδικασία γίνεται στο θερμοκρασιακό εύρος των 800-1800°C, (Christopher Higman (2008)). Η ακριβής θερμοκρασία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του καυσίμου, ειδικότερα από της θερμοκρασίες τήξεως και πήξεως της τέφρας που περιέχεται σε αυτό.

Το εξανθράκωμα που παραμένει από το βήμα της πυρόλυσης θεωρείται ότι αποτελείται από καθαρό άνθρακα και αντιδρά ετερογενώς για να παράξει ένα μέρος του παράγωγου αερίου. Οι αντιδράσεις που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό είναι οι παρακάτω :

1. Μερική οξείδωση του εξανθρακώματος : $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO -111 MJ/Kmol$
2. Αντίδραση Boudouard : $C + CO_2 \rightarrow 2CO +172 MJ/Kmol$
3. Ετερογενής αντίδραση νερού - αερίου : $C + H_2O \rightarrow CO + H_2 +131 MJ/Kmol$

4.4 Αντιδράσεις αερίου - αερίου

Εκτός από τις ετερογενείς αντιδράσεις, υπάρχουν επίσης και ομογενείς στην αέρια φάση. Οι δύο σημαντικότερες αντιδράσεις παρουσιάζονται εδώ :

1. Αντίδραση μετατροπής νερού - αερίου : $CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2 -41 MJ/kmol$
2. Αντίδραση ανασχηματισμού ατμού μεθανίου : $CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2 +206 MJ/kmol$

4.5 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

Πολλοί ερευνητές έχουν συνεισφέρει στη δημιουργία μοντέλων που αναλύουν τις διαδικασίες αεριοποίησης. Η δημοσιευμένη δραστηριότητα που σχετίζεται με την αεριοποίηση της βιομάζας είναι ελάχιστη συγκριτικά με την αεριοποίηση λιγνίτη και τις περισσότερες φορές, το μοντέλα που αφορούν στο λιγνίτη τροποποιούνται ώστε να ταιριάζουν στη βιομάζα, απλά αλλάζοντας τη σύσταση του καυσίμου. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή ο λιγνίτης και η βιομάζα έχουν τα ίδια χημικά συστατικά, μόνο σε διαφορετικές αναλογίες.

4.5.1 Προσεγγίσεις μοντελοποίησης

Δύο κύριες προσεγγίσεις μοντελοποίησης μπορούν να αναγνωρισθούν. Η πρώτη είναι η προσέγγιση Euler-Lagrange. Σε αυτήν, ακολουθούνται η τροχιά και η κατάσταση (θερμοκρασία, μάζα, σύσταση και ταχύτητα) κάθε ενός από τα ανεξάρτητα σωματίδια της στερεάς φάσης χωρικά και χρονικά, ολοκληρώνοντας τις εξισώσεις κίνησης, ενέργειας και μάζας για κάθε σωματίδιο. Η ακρίβεια της μοντελοποίησης που επιτυγχάνεται με αυτό τον τρόπο, συνοδεύεται και από υπολογιστικό κόστος, ευθέως ανάλογο προς τον αριθμό των στερεών σωματιδίων. Γί αυτό το λόγο, όταν μελετούνται

πυκνές ρευστοποιημένες κλίνες, όπου ο αριθμός των στερεών σωματιδίων είναι τάξης μεγέθους ενός τρισεκατομμυρίου, η χρήση αυτής της προσέγγισης γίνεται ανέφικτη.

Η δεύτερη προσέγγιση μοντελοποίησης είναι η Euler-Euler. Με αυτή την προσέγγιση η σωματιδιακή φάση θεωρείται ότι αποτελεί μία συνεχή φάση που διεισδύει και αλληλεπιδρά με την αέρια φάση. Χρησιμοποιείται η κινητική θεωρία των κοκκωδών ροών, (J. Ding (1990)), για την κατάστροψη των εξισώσεων των στερεών φάσεων και των αλληλεπιδράσεων αέριας - στερεής φάσης. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί λιγότερους υπολογιστικούς πόρους και χρόνους υπολογισμού. Επιτρέπει επίσης τη λεπτομερειακή ανάλυση του πεδίου ροής της κάθε φάσης, το οποίο είναι αποδεκτό για εφαρμογές μηχανολογικού σχεδιασμού. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές έρευνες με τις παραμέτρους των μοντέλων και των δύο προσεγγίσεων.

Οι D. Sofialidis (2001), ερεύνησαν την αεριοποίηση της βιομάζας σε μια αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη. Η αδρανής κλίνη άμμου μοντελοποιήθηκε ως ένα στατικό ιστροπικό πορώδες μέσο που περιέχει προδιαγραφημένους σφαιρικούς όγκους για τη μοντελοποίηση των φυσαλλίδων που ανεβαίνουν προς τα πάνω. Τα σωματίδια βιομάζας μοντελοποιήθηκαν κατά Lagrange. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του ξήρανση και απελευθέρωση πτητικών, ετερογενείς αντιδράσεις εξανθράκωματος, και μια μοναδική αντίδραση στην αέρια φάση μετατροπής του νερού και του μεθανίου σε μονοξειδίο του άνθρακα και υδρογόνο. Οι συγκεντρώσεις της προσομοίωσης του αερίου εξόδου του 3D αεριοποιητή συμφωνούν αρκετά με τα δεδομένα που προέκυψαν από μετρήσεις για τις συγκεντρώσεις H_2 , O_2 , CO_2 , και το H_2O , αλλά υπο-εκτιμούν το CO_2 και υπερ-εκτιμούν το CO .

Οι D. Lathouwers (2001a,b) χρησιμοποίησαν την προσέγγιση Euler-Euler για την προσομοίωση της πυρόλυσης βιομάζας μέσα σε μία πυκνή ρευστοποιημένη κλίνη ενός αντιδραστήρα εργαστηριακού μεγέθους. Χρησιμοποιήθηκαν στερεές φάσεις για τη βιομάζα, για μία ενεργή ενδιάμεση φάση, για το εξανθράκωμα, και για τα αδρανή σωματίδια της άμμου με ένα απλό μοντέλο πυρόλυσης. Παρουσιάστηκαν ποιοτικά αποτελέσματα για τις αποδόσεις των πισσών κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Στον περιορισμένο χρόνο 5 s προσομοίωσης, δεν κατέληξαν σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και συγκριτικά αποτελέσματα με πειραματικά δεδομένα δεν περιλαμβάνονται στη μελέτη. Ο στόχος της μελέτης είναι η βελτίωση των ποσοστών των πισσών από την πυρόλυση, και δεν περιλαμβάνονται αποτελέσματα άλλα από των πισσών.

Οι Liang Yu (2007) χρησιμοποίησαν την κινητική θεωρία των κοκκωδών ροών για να προσομοιώσουν την αεριοποίηση κάρβουνου σε μία αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη. Το μοντέλο υποθέτει ακαριαία ξήρανση και απελευθέρωση των πτητικών στη ζώνη εισαγωγής του καυσίμου με αναλογίες της κατανομής των προϊόντων που προκύπτουν από πειράματα. Το εξανθράκωμα μοντελοποιείται ως μια ανεξάρτητη στερεή φάση με σταθερή διάμετρο, και περιλαμβάνονται ετερογενείς και ομογενείς αντιδράσεις. Μελετώνται διαφορετικές περιπτώσεις για την παροχή του καυσίμου, την παροχή αέρα, την παροχή ατμού, και τη θερμοκρασία με καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών και των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης.

Οι K. Papadikis (2008) χρησιμοποίησαν την προσέγγιση Euler-Euler για να μοντελοποιήσουν τη συμπεριφορά της άμμου, και Euler-Lagrange για τη διερεύνηση της μεταφοράς ορμής ενός σωματιδίου

ου βιομάζας μέσα στον αντιδραστήρα. Η προσομοίωση διήρκησε 3 δευτερόλεπτα και η μελέτη έδινε κυρίως έμφαση στη συμπεριφορά ρευστοποίησης.

Οι S. Gerber (2010) παρουσίασαν μια πολυφασική Eulerian προσέγγιση για να μοντελοποιήσουν την αεριοποίηση ξύλου μέσα σε αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη, χρησιμοποιώντας εξανθράκωμα ως υλικό της κλίνης. Τα αποτελέσματα τους επιβεβαιώθηκαν με πειραματικά δεδομένα μια ρευστοποιημένης κλίνης εργαστηριακού μεγέθους, αλλά τα κινητικά μεγέθη του μοντέλου δεν μπορούσαν να χειριστούν γενικές πολυσύστατες βιομάζες.

Σε μια άλλη εργασία, οι Michael Oevermann (2009) παρουσίασαν μία μέθοδο Euler-Lagrange / Discrete Element Method (DEM) για την προσομοίωση της αεριοποίησης ξύλου σε μια ρευστοποιημένη κλίνη σε ημι-διδιάστατη γεωμετρία. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο σύγκρουσης μαλακής - σφαίρας και θεωρήθηκαν οι αντιδράσεις πυρόλυσης, ετερογενείς αντιδράσεις αεριοποίησης και ομογενείς αντιδράσεις αερίου. Αν και επιτεύχθηκε αξιόλογη συμφωνία μεταξύ των πειραμάτων και του μοντέλου, συμπεραίνεται ότι πλήρης τριδιάστατη προσομοίωση με προσέγγιση Euler-Lagrange μιας ροής αερίου - στερεού για έναν αντιδραστήρα πραγματικών διαστάσεων είναι υπολογιστικά αδύνατη. Υπέθεσαν βήμα πυρόλυσης χωρίς μεταφορά ενέργειας και αγνόησαν τις αδρανείς πίσσες.

Συμπεραίνοντας, τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την αεριοποίηση βιομάζας σε ρευστοποιημένη κλίνη είναι ελάχιστα και λαμβάνουν υπόψη διαφορετικές προσεγγίσεις και υποθέσεις. Τριδιάστατα μοντέλα που θεωρούν ξήρανση, πυρόλυση, αεριοποίηση, μεταφορά θερμότητας, τύρβη και χημικές αντιδράσεις μέσα στο πλαίσιο εμπορικών προγραμμάτων (CFD) είναι ακόμα λιγότερα. Η παρούσα εργασία ελπίζει να συνεισφέρει προς αυτή την κατεύθυνση.

Κεφάλαιο 5

Μοντέλο *Euler*

Ο αναγνώστης παραπέμπεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο της αρχικής αγγλικής έκδοσης του παρόντος για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις λεπτομέρειες και την ανάπτυξη του μοντέλου *Euler*.

Κεφάλαιο 6

Περιγραφή του μοντέλου

Ένα τριδιάστατο αριθμητικό μοντέλο αναπτύχθηκε για να περιγραφεί η διαδικασία αεριοποίησης βιομάζας μέσα σε μια ρευστοποιημένη κλίνη ατμού. Χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό πακέτο FLUENT 13.0, λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα ξήρανσης, απελευθέρωσης πτητικών, καύσης και αεριοποίησης. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις (3) φάσεις για την προσομοίωση του αντιδραστήρα (άμμος, στερεά φάση για το καύσιμο και αέρια φάση). Η άμμος και η στερεά φάση περιγράφηκαν με την κινητική θεωρία των κοκκωδών ροών (kinetic theory of granular flows - KTGF). Όλες οι φάσεις περιγράφηκαν χρησιμοποιώντας την προσέγγιση κατά Euler για τη μεταφορά μάζας, ενέργειας και ορμής. Το χημικό μοντέλο αποτελείται από τρεις (3) ετερογενείς και δύο (2) ομογενείς αντιδράσεις. Η ξήρανση και η απελευθέρωση πτητικών υποτέθηκαν ότι λαμβάνουν χώρα ακαριαία στην περιοχή εισόδου του καυσίμου. Όλοι οι ρυθμοί αντίδρασης καθορίστηκαν από εξισώσεις Arrhenius, με κινητικές παραμέτρους από τη βιβλιογραφία. Ο αντιδραστήρας ερευνήθηκε σε ατμοσφαιρικές συνθήκες λειτουργίας. Η επικύρωση της ισχύος του μοντέλου έγινε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του με τα πειραματικά.

6.1 Προσέγγιση Euler – Euler

Η προσέγγιση Euler-Euler επιλέχθηκε για την προσομοίωση του αεριοποιητή. Αυτό γίνεται επειδή, με τις τρέχουσες και τις προσδόκιμες ικανότητες των υπολογιστών, δεν φαίνεται ελπιδοφόρα η χρήση περισσότερο λεπτομερειακών μοντέλων, όπως οι μέθοδοι Euler-Lagrange, που μπορούν να οδηγήσουν σε αντιδραστήρες βιομηχανικής κλίμακας.

Στην προσέγγιση μοντελοποίησης Euler-Euler, η σωματιδιακή φάση θεωρείται συνεχής φάση που αναμιγνύεται και αντιδρά με την αέρια φάση. Τα πολυδισπαρμένα συστήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν με αυτή την προσέγγιση με πολλαπλές στερεές φάσεις, όπου κάθε φάση χαρακτηρίζει μια διαφορετική κλάση σωματιδίων. Χρησιμοποιείται η κινητική θεωρία των κοκκωδών ροών ως θεωρητικό υπόβαθρο, για να καταλήξουμε σε καταστατικές εξισώσεις για τις στερεές φάσεις και τις αλληλεπιδράσεις αερίου - στερεών. Ωστόσο, η προσέγγιση Euler-Euler πρέπει να πλαισιωθεί με συμπληρωματικά μοντέλα που περιγράφουν τη μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας μεταξύ των διαφόρων συνεχών φάσεων. Fluent.

Για να πετύχουμε σύγκλιση σε αποδεκτό υπολογιστικό χρόνο, ενσωματώθηκαν κάποιες απλοποιητικές παραδοχές στα μοντέλα της ρευστοδυναμικής και των χημικών αντιδράσεων, τα οποία είναι :

- Τα στερεά σωματίδια μέσα στην κλίνη είναι σφαιρικά, με σταθερή διάμετρο
- Χρησιμοποιείται η κινητική θεωρία των κοκκωδών ροών (*KTGF*) στην εξίσωση μεταφοράς, για να περιγραφεί η σύγκρουση των σωματιδίων και η διακύμανση μέσα στον αεριοποιητή
- Η ξήρανση και η απελευθέρωση των πτητικών θεωρείται ότι συμβαίνουν ακαριαία στην περιοχή εισόδου του καυσίμου Liang Yu (2007)
- Η αέρια φάση υποτίθεται ότι είναι διαφανής, έτσι ώστε η ενέργεια ακτινοβολίας δεν απορροφάται ούτε εκπέμπεται, Liang Yu (2007). Ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η συναγωγή
- Οι αντιδράσεις υδρογόνωσης του άνθρακα $C + H_2 \rightarrow CH_4$, και η μεθανοποίηση $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$, δεν συμπεριλήφθησαν επειδή και οι δύο απαιτούν υψηλές πιέσεις και καταλύτες, συνθήκες που απουσιάζουν από τη μελέτη μας.

6.2 Καύσιμο βιομάζα

Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη είναι πελλέτες μαλακού ξύλου *Agrol*¹. Κατασκευάζονται από τα πριονίδια και τα ροκανίδια που παράγονται από τους μύλους ξυλείας. Ένας μοναδικός μύλος ξυλείας μπορεί να αποτελέσει τη μοναδική πηγή πρώτης ύλης που απαιτείται για ένα μύλο πελλετών, και το περισσότερο της ξυλείας είναι μαλακό ξύλο. Τα δέντρα αποφλοιώνονται προτού κοπούν σε ξυλεία, και έτσι παραμένει πολύ λίγη βρωμιά ή φλοιός στα πριονίδια, σχηματίζοντας έτσι πολύ ανοιχτόχρωμες, καθαρές, χαμηλές σε τέφρα πελλέτες, όπως φαίνονται στην Εικ. 6.1, με συνεπή χαρακτηριστικά καύσης.



Σχήμα 6.1: Βιομάζα - Πελλέτες μαλακού ξύλου *Agrol*

Δεν χρησιμοποιούνται πρόσθετα για να δημιουργηθούν οι πελλέτες, καθώς η φυσική λιγνίνη του ξύλου δρα ως ενωτικό υλικό. Υπάρχουν επίσης πελλέτες που φτιάχνονται από προϊόντα αγροτικών αποβλήτων και γρασίδι. Αυτές οι πελλέτες έχουν ελαφρώς υψηλότερη περιεκτικότητα τέφρας, αλλά

¹Οι Πελλέτες Ξύλου *Agrol* συμμορφώνονται προς το στάνταρ της Σουηδίας *SS 187120* και το Γερμανικό *DIN+* για πελλέτες Οικιακού Βαθμού 1 και είναι άριστης ποιότητας.

παρέχουν μεγαλύτερη πηγή πρώτων υλών. Κάποιες από τις πρώτες ύλες μπορεί να είναι πριονίδια, απόβλητα μύλων ξυλείας ή ακόμα και ολόκληρα δένδρα που είναι ακατάλληλα για ξυλεία. Οι πρώτες ύλες μπορεί να είναι πράσινου χρώματος, ή φρεσκοκομμένα, μπορεί να είναι μερικώς ξηρά, ή ακόμα και θερμοασμένα από καμίνι. Επεξεργάζοντας αυτές τις πρώτες ύλες όλες κατά τον ίδιο τρόπο, το τελικό προϊόν έχει σταθερή περιεκτικότητα σε υγρασία, θερμογόνο ικανότητα, περιεκτικότητα σε τέφρα, και χαρακτηριστικά καύσης Woodpellets. Η proximate και ultimate ανάλυση των πελλετών μαλακού ξύλου *Agrol*, που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη, δίνονται στον Πίνακα 6.1.

Οι πελλέτες μαλακού ξύλου χρησιμοποιούνται προς το παρόν σε μικρής κλίμακας οικιστικές μονάδες καύσης, και η αγορά θα αναπτυχθεί περισσότερο τα επόμενα χρόνια. Οι πελλέτες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε μικρής κλίμακας, αεριοποιητές σταθερής κλίνης για σκοπούς θέρμανσης καθώς και για εφαρμογές μικρό-*CHP* (π.χ. μηχανή Stirling ή μικροτουρμπίνες).

Πίνακας 6.1: Proximate και ultimate ανάλυση των πελλετών μαλακού ξύλου *Agrol*

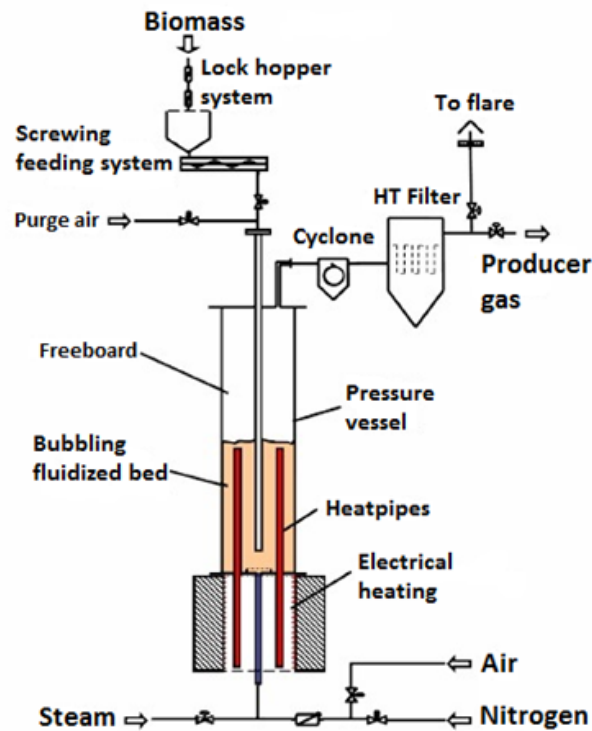
Proximate ανάλυση		Ultimate ανάλυση (% κ.β. επί ξηρού)	
Πτητικά (% κ.β. ξηρό)	81.5	<i>C</i>	47.4
Άνθρακας (% κ.β. ξηρό)	13.6	<i>H</i>	6.4
Υγρασία (% κ.β.)	4.8	<i>O</i>	46.0
Τέφρα	0.1	<i>N</i>	0.1
Θερμογόνος Ικανότητα		<i>S</i>	0.1
<i>LHV</i> (<i>kJ/kg</i> υγρό)	20.600		

6.3 Γεωμετρία αντιδραστήρα

Ο αεριοποιητής που μοντελοποιήθηκε είναι εργαστηριακής κλίμακας, αλλοθερμικός αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης, και ανήκει στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Μονάχου. Έχει κυλινδρικό σχήμα με έναν εσωτερικό ομόκεντρο κύλινδρο για την είσοδο της βιομάζας. Ο ατμός εισάγεται από τρύπες από το κάτω μέρος του αντιδραστήρα σε σχήμα σταυρού. Το σημείο τροφοδοσίας της βιομάζας βρίσκεται κοντά στην είσοδο του ατμού, έτσι ώστε οι πελλέτες βιομάζας να διασκορπίζονται από το κοντινό ρεύμα ατμού. Ολόκληρη η γεωμετρία είναι αξονοσυμμετρική. Η απαιτούμενη θερμότητα για τις ενδόθερμες αντιδράσεις αεριοποίησης παρέχεται από ηλεκτρικά θερμαινόμενους αγωγούς μεταφοράς θερμότητας. Ο αεριοποιητής απεικονίζεται στην Εικ. 6.2.

Τα κύρια σχεδιαστικά δεδομένα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη :

1. Δοχείο πίεσης αεριοποιητή
2. Αγωγοί θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας
3. Ηλεκτρική θέρμανση



Σχήμα 6.2: Δοκιμαστική διάταξη αεριοποίησης TUM

4. Κοχλιωτό σύστημα τροφοδοσίας και σύστημα κλειδαριάς χοάνης
5. Κυκλώνας
6. Κεραμικό φίλτρο υψηλής θερμοκρασίας

Η βιομάζα τροφοδοτείται άμεσα μέσω ενός κοχλιωτού συστήματος τροφοδοσίας μέσα στον αεριοποιητή αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης. Η μέγιστη είσοδος καυσίμου είναι 50 kW_{th} , και βασίζεται σε βιομάζα ξύλου. Το κυλινδρικό δοχείο κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα (*AISI314*, *DIN X15 CrNiSi 25 20*, 1.4841), το οποίο μπορεί να φέρει πιέσεις μέχρι και 5 bar . Το κοχλιωτό σύστημα τροφοδοσίας είναι ένα ορθογωνικό δοχείο (20 l όγκος) με έναν κοχλία, ο οποίος μπορεί να πιεσθεί επίσης (μέχρι τα 10 bar). Ένα σύστημα κλειδαριάς χοάνης ζευγαρώνεται με το κοχλιωτό σύστημα τροφοδοσίας, για να εξασφαλίσει το συνεχές γέμισμα του ορθογωνικού δοχείου με πελλέτες βιομάζας.

Η κλίνη ρευστοποιείται με ατμό και το υλικό ρευστοποίησης είναι άμμος ολιβίνης. Κορεσμένος ατμός παράγεται από μια ατμογεννήτρια και αφού θερμανθεί σε μια θερμοκρασία των $530 \text{ }^\circ\text{C}$ με τη βοήθεια ενός υπερθερμαντήρα, εγχύεται μέσα στον αντιδραστήρα μέσω του σταυρωτού εγχυτήρα. Η απώλεια πίεσης μετράται με διαφορικούς αισθητήρες πίεσης που τοποθετούνται στο κάτω μέρος και την κορυφή του αντιδραστήρα αντίστοιχα. Η θερμοκρασίες της κλίνης και του ελεύθερου αγωγού ελέγχονται από θερμοστοιχεία τύπου K που βρίσκονται σε όλο το μήκος του αεριοποιητή.

Το παράγωγο αέριο φεύγει από τον αντιδραστήρα από το πάνω μέρος και αφού περάσει μέσα από έναν κυκλώνα, οδηγείται σε ένα κεραμικό φίλτρο, για τον περαιτέρω καθαρισμό του. Τα υπόλοιπα

Πίνακας 6.2: Κύριες διαστάσεις του αεριοποιητή

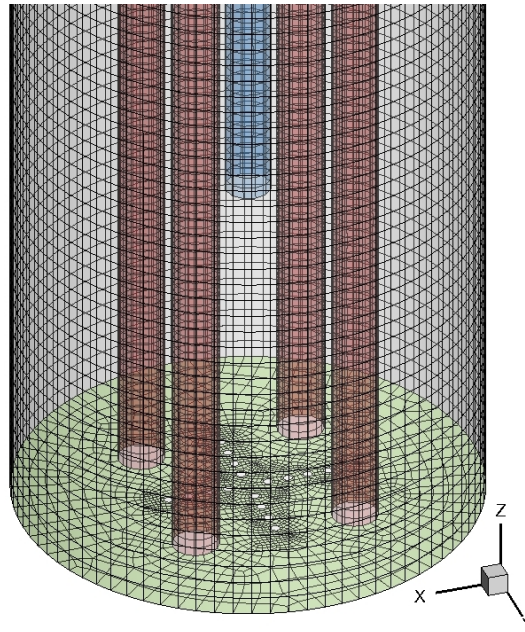
Μέρος	Χαρακτηριστικό	Τιμή	Μονάδες
Δοχείο αντιδραστήρα	Μήκος αντιδραστήρα	1500	mm
	Διάμετρος αντιδραστήρα (εσωτερική)	154	mm
	Ύψος ρευστοποιημένης κλίνης	700	mm
	Ύψος ελεύθερου σωλήνα	800	mm
Σωλήνας έγχυσης καυσίμου	Διάμετρος σωλήνα	48	mm
	Ύψος σωλήνα μέσα στο δοχείο	1400	mm
	Θέση του σωλήνα στον αντιδραστήρα	κέντρο	-
Αγωγοί θέρμανσης (x4)	Διάμετρος αγωγών θέρμανσης	19	mm
	Μήκος αγωγού θέρμανσης μέσα στον αντιδραστήρα	650	mm
Τρύπες έγχυσης ατμού	Διάμετρος	1.5	mm
Έξοδος του παράγωγου αερίου	Διάμετρος τρύπας	21	mm
Υλικό κλίνης (άμμος ολιβίνης)	Πυκνότητα	1450	kg/m ³
	Μέση διάμετρος των σωματιδίων	200	μm
Πελλέτες ξύλου	Μήκος της πελλέτας	20	mm
	Διάμετρος της πελλέτας	6	mm
	Μέση πυκνότητα των πελλετών	1.2	g/cm ³

σωματίδια εξανθρακώματος που δεν έχουν αντιδράσει διαχωρίζονται και αφαιρούνται στον κυκλώνα.

6.4 Υπολογιστικό πλέγμα

Ο αντιδραστήρας μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα 3D υπολογιστικό πλέγμα. Η γεωμετρία, όπως συζητήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, χτίστηκε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Gambit. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 865.000 εξαεδρικά κελιά, και ένα μέρος του πλέγματος φαίνεται παρακάτω :

Εδώ, οι τρύπες του ατμού στη σταυρωτή διάταξη μπορούν να αναγνωρισθούν από την πράσινη βάση του αντιδραστήρα. Οι τέσσερις αγωγοί θερμότητας φαίνονται με κόκκινο, και ο σωλήνας έγχυσης καυσίμου φαίνεται με μπλε. Η βιομάζα τροφοδοτείται μέσα από την κούφια βάση του μπλε κυλίνδρου. Το παράγωγο αέριο βγαίνει από τη γεωμετρία από το επάνω μέρος μέσα από μία τρύπα. Όλες οι επιφάνειες, εκτός από τις τρύπες, θεωρούνται αδιαπέραστοι τοίχοι.

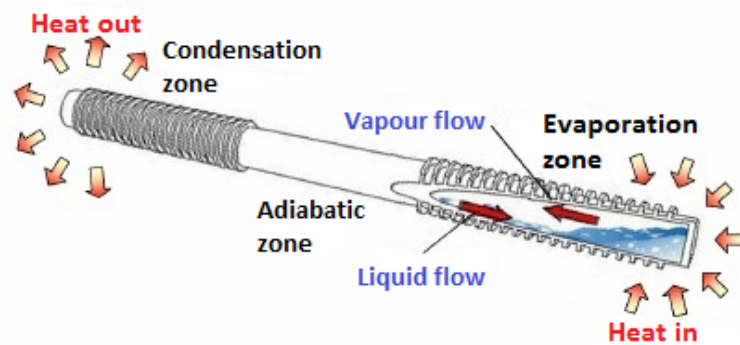


Σχήμα 6.3: Υπολογιστικό πλέγμα

6.5 BiomassHeatpipeReformer – BioHPR(TUM)

Το Biomass Heatpipe Reformer-BioHPR (TUM) είναι μια καινοτόμα ιδέα στην αεριοποίηση με αλλοθερμική μεταφορά θερμότητας, μέσω αγωγών θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας.

Οι αγωγοί θερμότητας είναι εναλλάκτες θερμότητας, που βασίζονται σε κλειστά συστήματα δύο φάσεων. Τα συστατικά είναι ένα ερμητικά κλειστά δοχείο, μια σπειροειδής εσωτερική δομή και μια μικρή ποσότητα του εργαζόμενου μέσου (συνήθως ακετόνη, αιθανόλη, νερό, νάτριο, υδράργυρος κλπ.), η οποία βρίσκεται σε ισορροπία με τους ατμούς του. Ο αγωγός θερμότητας χωρίζεται σε τρεις (3) ζώνες : τη ζώνη εξάτμισης, όπου μεταφέρεται θερμότητα προς τον αγωγό, τη ζώνη συμπύκνωσης, όπου η θερμότητα παρέχεται προς το περιβάλλον και ένα ενδιάμεσο τμήμα, που ονομάζεται αδιαβατική ζώνη. Η αρχή λειτουργίας του αγωγού φαίνεται στην Εικ. 6.4.



Σχήμα 6.4: Αρχή λειτουργίας του αγωγού θερμότητας

Οι αγωγοί θερμότητας χρησιμοποιούν την αλλαγή φάσης ενός εργαζόμενου μέσου σε ένα πλήρως κενωμένο και ερμητικά κλειστό δοχείο. Το ρευστό βρίσκεται μέσα στον αγωγό ως υγρός κορεσμένος ατμός. Όταν προσδίδεται θερμότητα στη ζώνη εξάτμισης, το εργαζόμενο μέσο εξατμίζεται και μετά συμπυκνώνεται στη ζώνη συμπύκνωσης, αποδίδοντας τη θερμότητα πίσω στο περιβάλλον. Αυτή η διαδικασία γίνεται κυκλικά όσο υπάρχει επαρκής πίεση, για να οδηγήσει το συμπύκνωμα πίσω στη ζώνη εξάτμισης. Η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης κατά την αλλαγή φάσης χρησιμοποιείται και έχει ως αποτέλεσμα μια πολύ αποδοτική μεταφορά θερμότητας.

Σε μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας θάλαμος καύσης κάτω από τον αεριοποιητή για τη μετάδοση θερμότητας στη ζώνη εξάτμισης, με την καύση των σωματιδίων εξανθρακώματος που συλλέγονται από τον κυκλώνα. Επιπρόσθετα, με αυτή τη σχεδίαση το κάτω μέρος του αεριοποιητή θερμαίνεται και με ακτινοβολία από τον θάλαμο καύσης. Όσον αφορά αυτή τη μελέτη, οι αγωγοί θερμότητας μοντελοποιήθηκαν σαν αδιαπέραστες επιφάνειες τοίχου με συνθήκη μη ολίσθησης για τις διατμητικές τάσεις, και έχουν σταθερή θερμοκρασία $1.100\text{ }^{\circ}\text{C}$ στην εξωτερική τους επιφάνεια.

6.6 Φάσεις και Υλικά

Η μελέτη περίπτωσης μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τρεις (3) φάσεις, οι οποίες μπαίνουν στον αεριοποιητή μέσω οριακών συνθηκών, και αλληλεπιδρούν με ανταλλαγή μάζας, ορμής, θερμοκρασίας και ειδών. Αυτές οι τρεις (3) φάσεις είναι :

1. Αέρια φάση - Κύρια φάση. Η αέρια φάση χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της εισόδου ατμού και της εξόδου παράγωγου αερίου. Αυτό γίνεται με την εισαγωγή όλων των ειδών σε μία φάση, έτσι ώστε οι εξισώσεις μάζας και ορμής να επιλύονται μία φορά ανά χρονικό βήμα. Αποτελείται από O_2 , N_2 , H_2O , H_2 , CO , CO_2 και CH_4 . Οι ιδιότητες αυτών των ειδών λήφθηκαν από τη βάση δεδομένων του Ansys Fluent.
Το μέσο αεριοποίησης είναι ατμός, όπως συζητήθηκε στην ενότητα 3.2, με ένα σταθερό ρυθμό ροής μάζας.
2. Άμμος - Δευτερεύουσα φάση. Αυτή τη φάση αναπαριστά το υλικό ρευστοποίησης της κλίνης, το οποίο είναι ολιβίνη στην περίπτωση μας. Η άμμος μοντελοποιείται κοκκώδης και αδρανής, με μια σταθερή διάμετρο $200\ \mu\text{m}$ και πυκνότητα $1450\ \text{kg}/\text{m}^3$, και ανήκει στην ομάδα κατάταξης Geldart B. Οι υπόλοιπες ιδιότητες της άμμου λήφθηκαν από τη βάση δεδομένων του Ansys Fluent.
3. Στερεή φάση - Δευτερεύουσα. Αυτή η φάση αναπαριστά το καύσιμο που εισάγεται στον αεριοποιητή. Θεωρείται κοκκώδης φάση, με μια σταθερή διάμετρο $6\ \text{mm}$. Αποτελείται από στερεό άνθρακα C_s που αναπαριστά το εξανθράκωμα, H_2O για την υγρασία του καυσίμου, CH_4 για τα πτητικά, και τέφρα. Οι κοκκώδεις ιδιότητες της άμμου και της στερεάς φάσης είναι οι ίδιες, και δίνονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Ιδιότητες των κοκκωδών φάσεων

Ιδιότητες	Μοντέλο
Κοκκώδης κινηματικότητα $\mu_{s,kin}$, ($kg/m \cdot s$)	D. Gidaspow (1992)
Κοκκώδης κινηματικότητα όγκου λ_s , ($kg/m \cdot s$)	C. K. K. Lun (1984)
Κινηματικότητα τριβής $\mu_{s,fr}$, ($kg/m \cdot s$)	Schaeffer (1987)
Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi = 30$ μοίρες	<i>default</i> , Fluent
Πίεση τριβής ∇p_{fr} , (N/m^2)	<i>KTGF</i> , J. Ding (1990)
Μέτρο τριβής (N/m^2)	<i>Derived</i> , Fluent
Όριο εγγύτητας τριβής $\alpha_{s,fr}$, (-)	σταθερό=0.5
Κοκκώδης θερμοκρασία Θ , (m^2/s^2)	M. Syamlal (1993)
Πίεση στερεών ∇p_s , (N/m^2)	C. K. K. Lun (1984)
Ακτινική κατανομή g_0 , (-)	D. Ma (1990)
Μέτρο ελαστικότητας (N/m^2)	<i>Derived</i> , Fluent
Όριο εγγύτητας $\alpha_{s,max}$, (-)	σταθερό=0.62

6.6.1 Οριακές Συνθήκες

Η βάση του εσωτερικού κυλίνδρου είναι η είσοδος των σωματιδίων καυσίμου, από όπου οι πελλέτες μπαίνουν στον αντιδραστήρα, ενώ ο ατμός εισάγεται από το κάτω μέρος. Μαζί με τις πελλέτες ξύλου, μπαίνει και μια ποσότητα βοηθητικού αέρα πλύσης. Αυτή η ποσότητα αέρα είναι σταθερή 2 λίτρα/λεπτό. Οι οριακές συνθήκες της μελέτης περίπτωσης παραμένουν σταθερές, και παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.4 και 6.5. Τα κλάσματα μαζών των ειδών προκύπτουν από την proximate ανάλυση των πελλετών ξύλου (Πίνακας 6.1) :

Πίνακας 6.4: Κύριες οριακές συνθήκες

Πειραματικά δεδομένα	Μελέτη περίπτωσης
Ροή μάζας βιομάζας	2 kg/h
Ροή μάζας ατμού	2 kg/h
Πίεση	1 atm

Το $STBR$ (λόγος ατμού προς βιομάζα) μπορεί να βρεθεί εφαρμόζοντας την Εξ. 3.1, όπου η υγρασία του καυσίμου είναι $H_2O_{fuel} \cdot \dot{m}_{fuel}$:

$$STBR = \frac{2kg/h + 0.048 \cdot 2kg/h}{(1 - 0.048) \cdot 2kg/h} = 1.1 > 0.4 \quad (6.1)$$

Πίνακας 6.5: Ειδικές οριακές συνθήκες

Οριακές συνθήκες	Στερεή φάση		Αέρια φάση	
	Όνομα ζώνης	Είσοδος σωματιδίων	Είσοδος σωματιδίων	Είσοδος ατμού
Ένταση τύρβης (%)	10	10	10	10
Υδραυλική διάμετρος (m)	0.01	0.01	0.01	0.004
Ολική θερμοκρασία (K)	300	300	300	800
Κλάσματα μάζας ειδών	Βιομάζα	Αέρας	Ατμός	
H_2O	0.048	-	1	
$C(s)$	0.136	-	-	
CH_4	0.815	-	-	
Τέφρα	0.001	-	-	
O_2	-	0.23	-	
N_2	-	0.77	-	

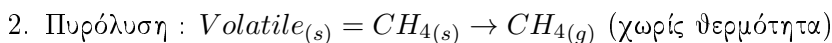
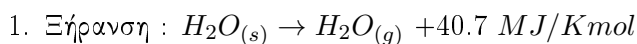
6.7 Κινητικά συστήματος

Η ακρίβεια του μοντέλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις χημικές αντιδράσεις που θα επιλεγούν, και τους ρυθμούς αντίδρασης, οι οποίοι καθορίζουν την τελική σύσταση του παράγωγου αερίου. Μερικές φορές στη βιβλιογραφία λαμβάνονται υπόψη εξαρτώμενες αντιδράσεις, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα του προβλήματος και τον υπολογιστικό χρόνο για σύγκλιση. Γι' αυτό το λόγο μοντελοποιήθηκαν τρεις (3) ετερογενείς και δύο (2) ομογενείς ανεξάρτητες αντιδράσεις. Οι κύριες επιδράσεις της διαδικασίας μετατροπής της αέριας φάσης και της αεριοποίησης της στερεής φάσης δίνονται από τις ακόλουθες αντιδράσεις. Οι ρυθμοί αντίδρασης δίνονται στη μορφή εξίσωσης *Arrhenius*:

$$k = A \cdot \exp(-E_a/RT) \quad (6.2)$$

Σε αυτή την εξίσωση, το A είναι ο προ-εκθετικός παράγοντας, και καθορίζει την ταχύτητα της αντίδρασης, ενώ το E_a είναι η ενέργεια ενεργοποίησης. Το R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων ($R = 8.314 \text{ kJ/kgK}$).

Όπως είδαμε ήδη στις ενότητες 4.3, και 6.6, οι συνολικές χημικές αντιδράσεις που γίνονται μέσα στον αντιδραστήρα είναι η ξήρανση, η πυρόλυση, ομογενείς αντιδράσεις και ετερογενείς αντιδράσεις μεταξύ της στερεής και της αέριας φάσης. Όλες οι αντιδράσεις παρουσιάζονται εδώ :



3. Μερική οξείδωση του εξανθρακώματος : $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO -111 \text{ MJ/Kmol}$
4. Αντίδραση Boudouard : $C + CO_2 \rightarrow 2CO +172 \text{ MJ/Kmol}$
5. Ετερογενής αντίδραση νερού - αερίου : $C + H_2O \rightarrow CO + H_2 +131 \text{ MJ/Kmol}$
6. Αντίδραση μετατροπής νερού - αερίου : $CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2 -41 \text{ MJ/Kmol}$
7. Αντίδραση ανασχηματισμού ατμού - μεθανίου : $CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2 +206 \text{ MJ/Kmol}$

Οι παράμετροι της εξίσωσης *Arrhenius*, δηλαδή ο προ-εκθετικός παράγοντας και η ενέργεια ενεργοποίησης βρέθηκαν από τη βιβλιογραφία που παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.6 :

Πίνακας 6.6: Κινητικές παράμετροι των αντιδράσεων

Αρ.	Όνομα	Αντίδραση	A(1/s)	$E_a(kJ/mol)$	Αναφορά
1	Οξείδωση εξανθρακώματος	$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	11.12	130	Fennell PS (2005)
2	Boudouard	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	36.16	77.39	Y. Wang (1993)
3	Ετερ. νερού-αερίου	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	15170	121.62	Y. Wang (1993)
4	Μετατρ. νερού-αερίου μπροστ.	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	$2.98 * 10^{10}$	169	Αερ. άνθρακα
5	Μετατρ. νερού-αερίου πίσω	$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$	$3 * 10^9$	130	Αερ. άνθρακα
6	Ανασχηματισμός ατμού	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	$2.98 * 10^{11}$	369	Αερ. άνθρακα
7	Καύση CO	$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	$4.4 * 10^{12}$	168	Αερ. άνθρακα

Κεφάλαιο 7

Προσεγγίσεις μοντελοποίησης - Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των μοντέλων προσομοίωσης παρουσιάζονται εδώ με χρήση διαγραμμάτων. Ακολουθεί σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα, για κάθε προσέγγιση.

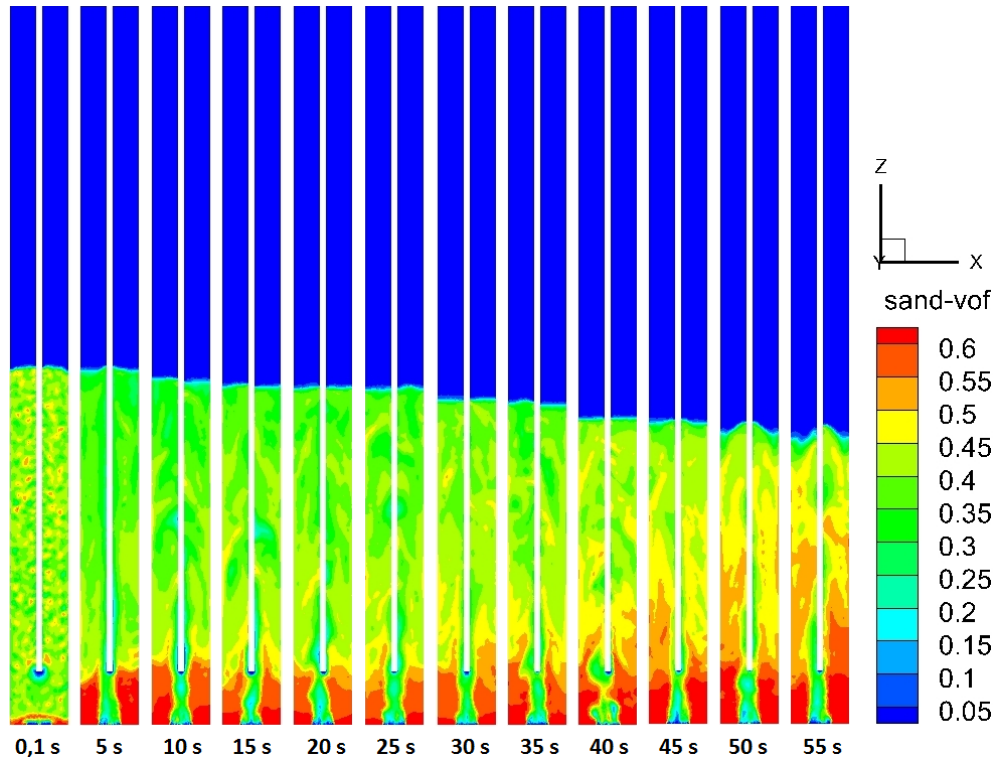
7.1 Μοντέλο πυρόλυσης μεθανίου - Προσέγγιση 1

Η πρώτη προσέγγιση θεωρεί το μεθάνιο ως το μοναδικό προϊόν πυρόλυσης. Αυτό σημαίνει ότι τα πτητικά του καυσίμου μεταφέρονται στην αέρια φάση ως μεθάνιο. Στην Εικ. 7.1, φαίνεται το κλάσμα όγκου της άμμου σε διαφορετικά χρονικά βήματα από την αρχή της προσομοίωσης μέχρι τη μόνιμη κατάσταση. Χρησιμοποιούμε τον άξονα $z - x$ του αντιδραστήρα για καλύτερη οπτικοποίηση και σύγκριση. Η μπλε περιοχή είναι η ελεύθερη περιοχή, που έχει μηδενική συγκέντρωση άμμου ενώ η χρωματιστή περιοχή μη-μηδενική, όπως εξηγείται και στο υπόμνημα στο πλάι.

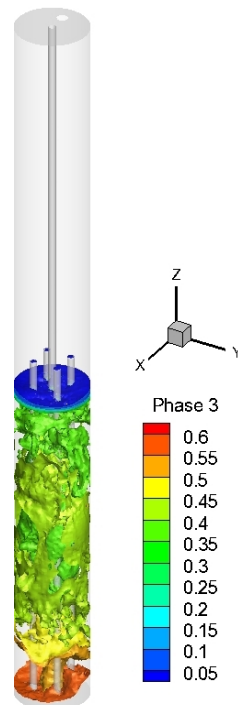
Το μέγιστο όριο εγγύτητας της άμμου τέθηκε 0.62, και οι κόκκινες περιοχές δείχνουν αυτήν ακριβώς την τιμή. Αυτό συμβαίνει στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα κυρίως γύρω από το ρεύμα ατμού, λόγω του βάρους της άμμου. Το αρχικό ύψος της άμμου τέθηκε στο 1 m, με όριο εγγύτητας 0.4 για ολόκληρη τη φάση. Επιλέχθηκε αυτή η τιμή ώστε ο ατμός να μπορεί εύκολα να διεισδύσει μέσα από τη φάση της άμμου από την αρχή της προσομοίωσης, μακριά από συνθήκες όπου οι κόκκοι έχουν έρθει πολύ κοντά ο ένας στον άλλο και εμποδίζουν τη διέλευση του ρευστού.

Το πραγματικό 3D κλάσμα όγκου της άμμου φαίνεται με ισοεπιφάνειες στη μόνιμη κατάσταση, στην Εικ. 7.2. Ο χαρακτήρας ρευστοποίησης και αναβρασμού της κλίνης συμφωνεί με την πραγματικότητα αλλά όπως εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί, το συνολικό ύψος της άμμου βρίσκεται κάτω από το μέγιστο ύψος των σωλήνων μεταφοράς θερμότητας, οδηγώντας το σύστημα σε απώλεια ενέργειας. Το πραγματικό ύψος της άμμου θα έπρεπε να είναι στο επίπεδο των σωλήνων μεταφοράς θερμότητας.

Προβλήματα που παρουσιάστηκαν Το επίπεδο της άμμου πέφτει κάτω από τους αγωγούς μεταφοράς θερμότητας κυρίως λόγω της επιλογής του αρχικού ύψους της. Ένας άλλος λόγος είναι η πίεση που δέχεται η στήλη της άμμου από το σχηματισμό ενός προβληματικού επιπέδου στερεής φάσης. Όπως είδαμε στην ενότητα 6.6, η στερεή φάση αποτελείται από στερεό άνθρακα C_s που αναπαριστά το εξανθράκωμα, H_2O για την υγρασία του καυσίμου, CH_4 για τα πτητικά και τέφρα.

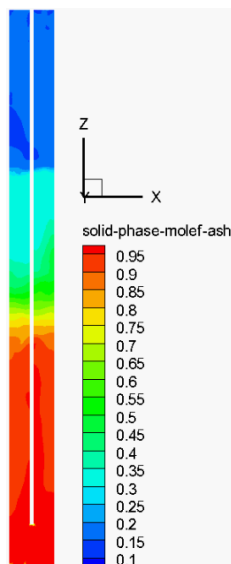


Σχήμα 7.1: Κλάσμα όγκου της άμμου



Σχήμα 7.2: Κλάσμα όγκου της άμμου 3D

Ενώ ο C_s , το H_2O και το CH_4 αντιδρούν, απελευθερώνονται στην αέρια φάση, και αφήνουν την τέφρα ως το μοναδικό υπολειπόμενο είδος μέσα στη στερεή φάση που έχει σταθερή διάμετρο. Καθώς ο χρόνος περνάει, δημιουργείται αναπόφευκτα ένα στρώμα τέφρας στην κορυφή της στήλης άμμου, όπως το λάδι πάνω στο νερό, όπως μπορεί να φανεί με ανοιχτό μπλε χρώμα στην Εικ. 7.3.



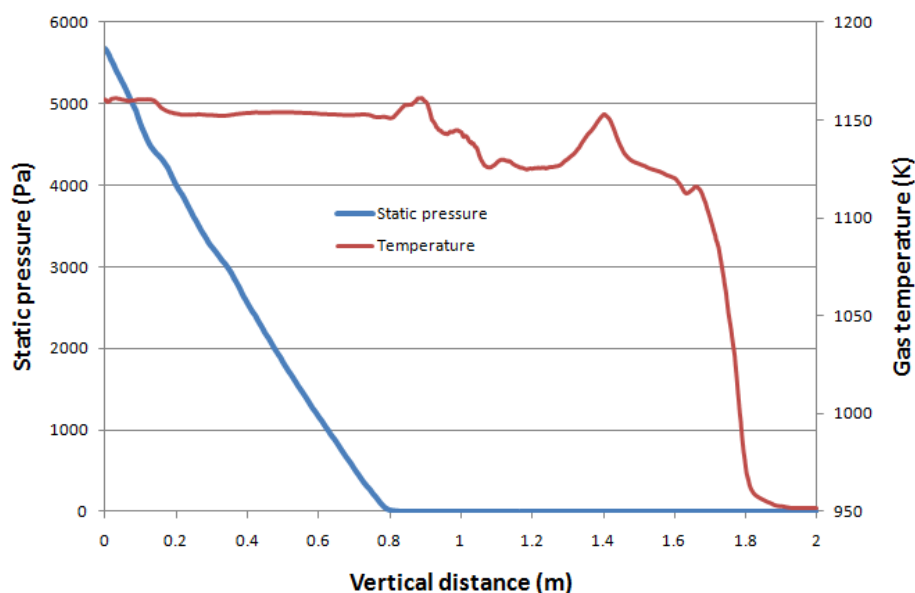
Σχήμα 7.3: Στρώμα τέφρας πάνω από τη στήλη άμμου

Στην Εικ. 7.4, παρουσιάζονται οι συνθήκες λειτουργίας μέσα στον αντιδραστήρα στη μόνιμη κατάσταση. Η στατική πίεση και η θερμοκρασία του αερίου σχεδιάζονται πάνω σε μια ευθεία γραμμή, που ξεκινάει από το κάτω μέρος του αντιδραστήρα, ανεβαίνει εσωτερικά καθ' όλο το ύψος του και καταλήγει στο κέντρο της τρύπας εξόδου του παράγωγου αερίου.

Όπως μπορεί να φανεί, η στατική πίεση έχει πολύ καλή συμφωνία με την πραγματικότητα, πέφτοντας γραμμικά από την αρχή μέχρι το τέλος της στήλης άμμου. Η θερμοκρασία έχει μια σταθερή τιμή 1.150 K (877 °C) μέσα στη φάση της άμμου, κυμαίνεται γύρω από τους 1.130 K μέσα στη στρώση στερεάς φάσης, και τελικά πέφτει, όπως αναμενόταν, στην ελεύθερη περιοχή, με μια σταθερή τιμή 950 K (677 °C). Αυτή η θερμοκρασιακή πτώση συμβαίνει πολύ ψηλά μέσα στον αντιδραστήρα επειδή η προαναφερθείσα προβληματική στρώση περιορίζει την ελεύθερη περιοχή του αντιδραστήρα.

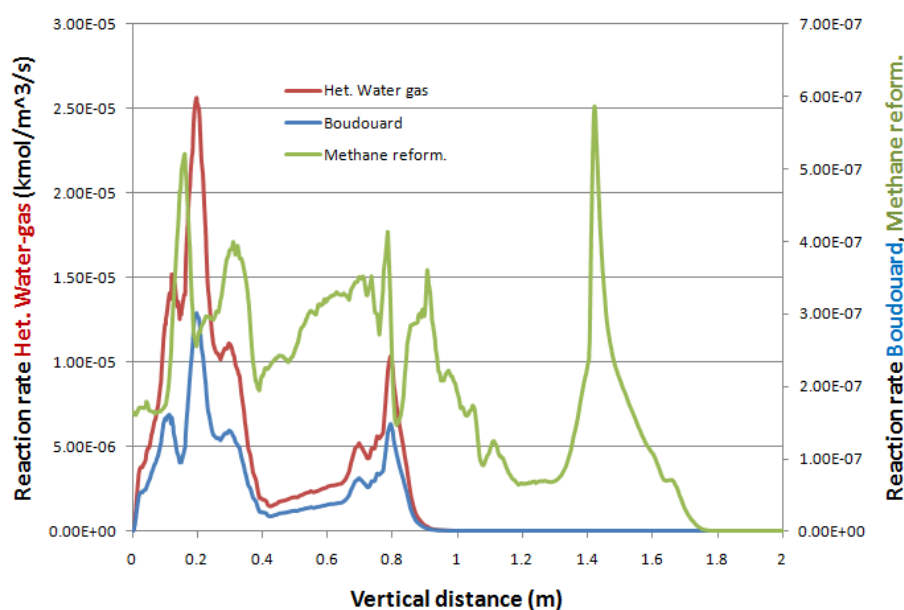
Στην Εικ. 7.5, φαίνονται οι ρυθμοί αντίδρασης τριών (3) αντιδράσεων στη μόνιμη κατάσταση στην ίδια ευθεία γραμμή που χρησιμοποιείται για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Όπως μπορούμε να δούμε, η *Boudouard* και η *Ετερ.* αντίδραση νερού-αερίου ακολουθούν ακριβώς την ίδια τάση μέσα στη στήλη της άμμου και γίνονται μηδέν όταν βγουν από αυτή. Αυτό συμβαίνει επειδή αναφέρονται και οι δύο στο εξανθράκωμα, το οποίο υπάρχει μόνο μέσα στη στήλη της άμμου. Και οι δύο αντιδράσεις φτάνουν σε ένα μέγιστο γύρω στα 0.2 m, όπου εισάγεται το καύσιμο στον αεριοποιητή, και ένα δεύτερο μέγιστο υπάρχει αμέσως μετά από το τέλος του επιπέδου της άμμου, πράγμα που υποδεικνύει συσσώρευση εξανθράκωματος σε εκείνη την περιοχή.

Η αντίδραση αναμόρφωσης μεθανίου λαμβάνει χώρα μέσα στη φάση της άμμου αλλά και στη στρώ-



Σχήμα 7.4: Συνθήκες λειτουργίας του αεριοποιητή στα $t = 55s$

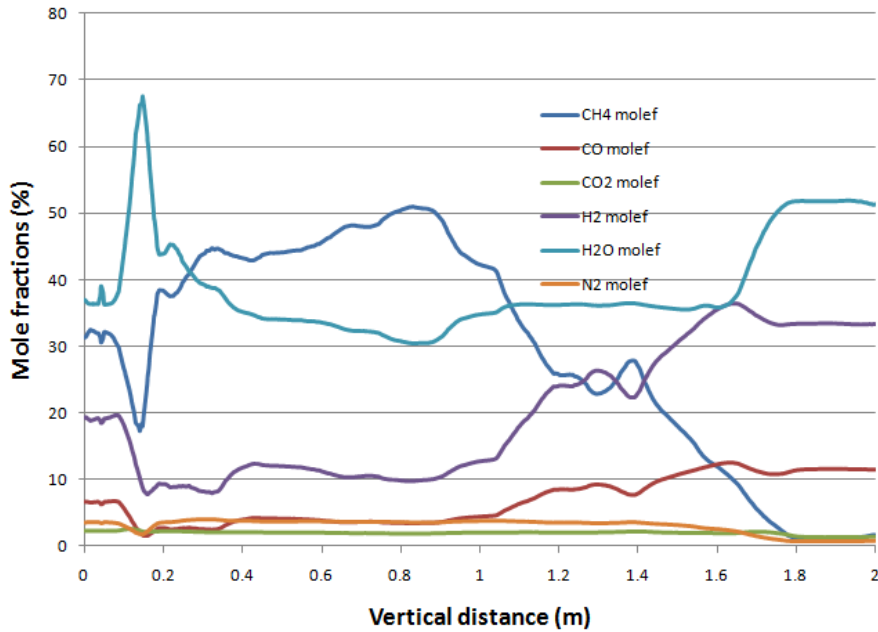
ση της τέφρας. Έχει ένα μέγιστο στην αρχή της ελεύθερης περιοχής στα 1.45 m και καταλήγει στο μηδέν γύρω στα 1.8 m . Όλοι οι ρυθμοί αντίδρασης καταλήγουν σε μηδενική τιμή, επιβεβαιώνοντας την ισορροπία του συστήματος στη μόνιμη κατάσταση.



Σχήμα 7.5: Ρυθμοί αντίδρασης στα $t = 55s$

Στην Εικ. 7.6, σχεδιάζονται οι συγκεντρώσεις των συστατικών του αερίου στη μόνιμη κατάσταση σε όλο το μήκος του αντιδραστήρα. Η κορυφή του H_2O στα 0.2 m δείχνει την είσοδο του ατμού στο κάτω μέρος του αεριοποιητή. Οι συγκεντρώσεις σε mol ποικίλλουν κατά τον κατακόρυφο άξονα λόγω της επίδρασης των χημικών αντιδράσεων. Για ακόμα μία φορά, οι σταθερές συγκεντρώσεις

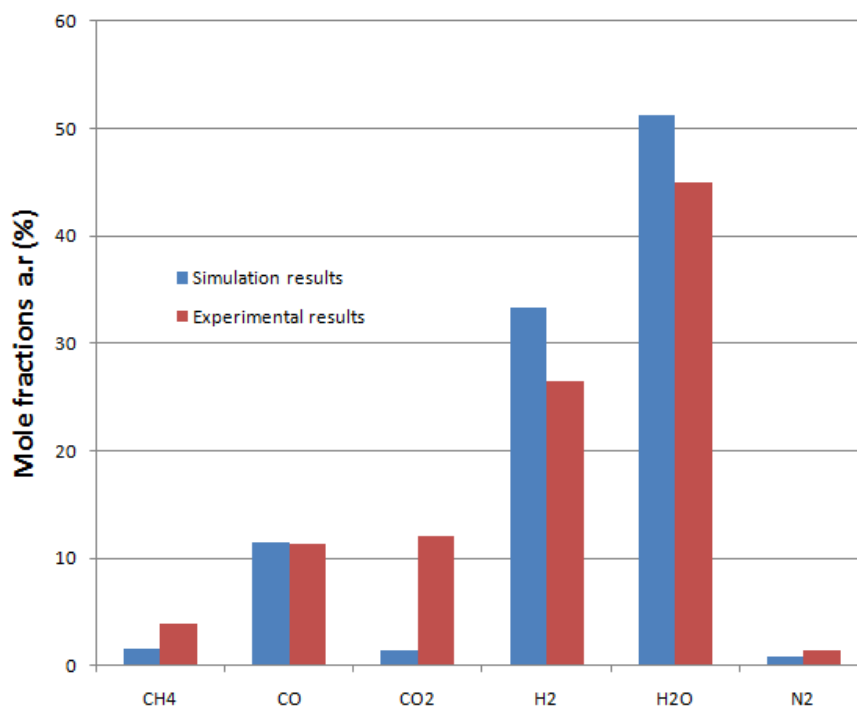
στην περιοχή εξόδου επιβεβαιώνουν ότι το σύστημα βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση.



Σχήμα 7.6: Κλάσματα *mol* στα $t = 55s$

Τελικά, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (ως έχουν - *a.r.*) συγκρίνονται με το πραγματικό πείραμα στην Εικ. 7.7. Είναι αξιοσημείωτο ότι το H_2 και το H_2O υπερ-εκτιμώνται, ενώ το CO_2 υπο-εκτιμάται. Τα κλάσματα *mol* των CO , CH_4 , και N_2 έχουν αξιόλογη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Οι λόγοι για αυτές τις αποκλίσεις μπορούν να ομαδοποιηθούν ως εξής :

1. Τα προϊόντα της πυρόλυσης υποτέθηκαν ότι είναι 100% μεθάνιο. Αυτή είναι μια εισαγωγική υπόθεση, αλλά είναι σημαντικά υπεύθυνη για την ακρίβεια του μοντέλου. Η σύνθεση του αερίου συνδέεται άρρηκτα με τη σύσταση των πτητικών και τον τρόπο μοντελοποίησης τους.
2. Οι αντιδράσεις υποτέθηκε ότι βρίσκονταν σε ισορροπία και οι κινητικές παράμετροι λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία.



Σχήμα 7.7: Αποτελέσματα στην έξοδο

7.2 Μοντέλο πυρόλυσης Seebauer- Προσέγγιση 2

Το μοντέλο πυρόλυσης μεθανίου απέκλινε σημαντικά από την πραγματικότητα εξαιτίας των πολλών απλοποιητικών παραδοχών που λήφθηκαν υπόψη. Γι' αυτό και χρειάστηκε να γίνει περισσότερη έρευνα.

Για να εξαλείψουμε την προβληματική στρώση των στερεών σωματιδίων θεωρήθηκε μία διαφορετική προσέγγιση. Και πάλι τρεις (3) φάσεις εισάγονται στον αεριοποιητή. Αυτή τη φορά, η τέφρα δεν μοντελοποιείται καθόλου (το καύσιμο έχει πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα και μπορεί να παραλειφθεί χωρίς να προκληθεί σημαντικό σφάλμα στην μοντελοποίηση) και η στερεή φάση αποτελείται μόνο από C_s και N_2 . Από προεπιλογή, στο Ansys Fluent, κάθε φάση θα πρέπει να περιέχει ένα αδρανές υλικό (N_2) για λόγους διατήρησης της συνέχειας. Όταν το C_s αντιδρά και δημιουργεί αέρια συστατικά, το κλάσμα μάζας του N_2 αυξάνεται στην στερεή φάση. Με αυτό τον τρόπο, η στερεή φάση διατηρείται καθ' όλη τη διαδικασία μοντελοποίησης. Τα υπόλοιπα συστατικά της στερεής φάσης υποτέθηκαν ότι είναι μέρος της αέριας φάσης, δηλαδή η υγρασία του καυσίμου H_2O , και τα πτητικά.

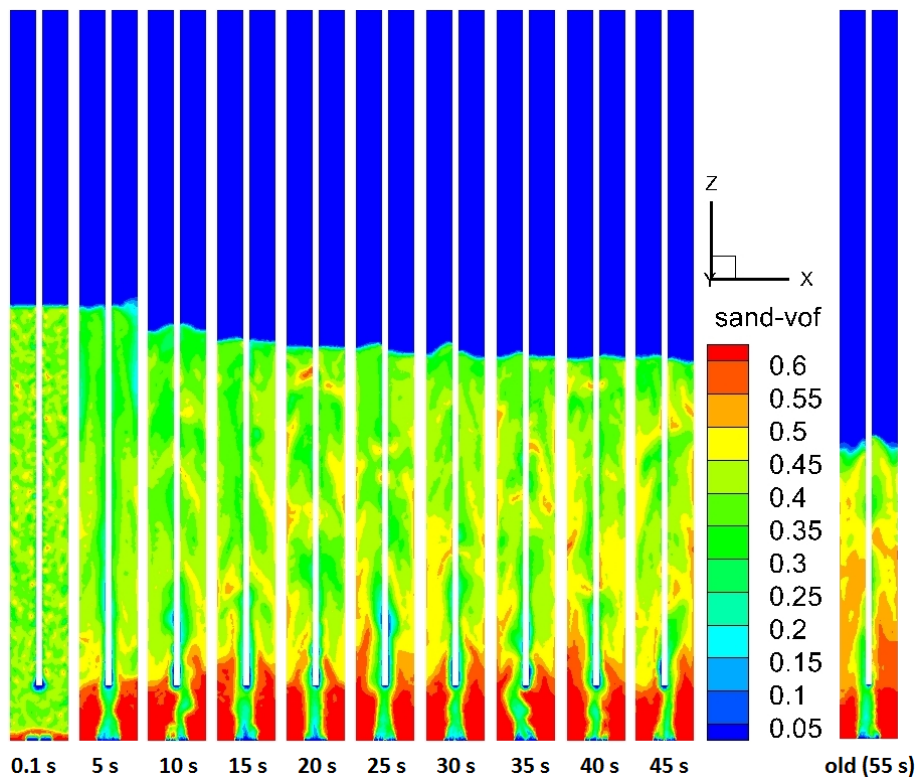
Για να εφαρμόσουμε καλύτερες τεχνικές προσομοίωσης, η σύσταση των πτητικών λήφθηκε από τη μελέτη του Seebauer (1999). Τα πτητικά του ξύλου με γρήγορη πυρόλυση και στις θερμοκρασίες που μελετούμε αποτελείται από τα συστατικά με τις αναλογίες που φαίνονται στον Πίνακα 7.1.

Αυτή τη φορά, η άμμος τέθηκε σε αρχικό ύψος ψηλότερα στα 1.2 m, με το ίδιο όριο εγγύτητας 0.4 για να μπορεί η αέρια φάση να διεισδύει μέσα από τη στήλη της άμμου. Το μέγιστο όριο εγγύ-

Πίνακας 7.1: Σύσταση του αερίου ξύλου από την πρωτογενή πυρόλυση σύμφωνα με τον Seebauer (1999)

Συστατικό	Κλάσμα μάζας
H_2	0.032
CO	0.270
CO_2	0.386
CH_4	0.056
H_2O	0.256
Συνολικό	1.000

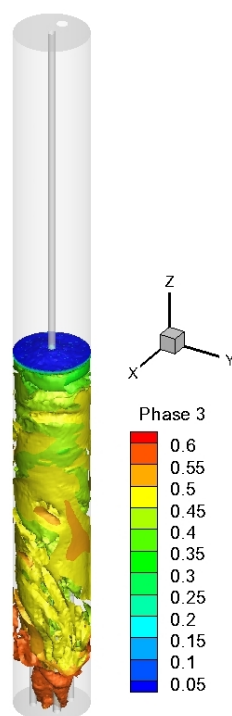
τητας της άμμου τέθηκε ξανά 0.62. Όπως μπορούμε να δούμε στην Εικ. 7.8, το κλάσμα όγκου της άμμου παρουσιάζει μια γενικά καλύτερη συμπεριφορά από πριν. Δεν δημιουργήθηκε στερεή φάση πάνω από τη στήλη άμμου που να την συμπιέζει ή να περιορίζει την ελεύθερη περιοχή του αεριοποιητή.



Σχήμα 7.8: Κλάσμα όγκου της άμμου

Ο αναβράζων χαρακτήρας επιτεύχθηκε και το σύστημα έφτασε στη μόνιμη κατάσταση στα $t = 45s$. Επιπρόσθετα, στην Εικ. 7.9, το όριο ύψους της άμμου βρίσκεται πάνω από τους σωλήνες μεταφοράς θερμότητας, και τους καλύπτει όπως και στην πραγματικότητα.

Στην Εικ. 7.10, παρουσιάζονται οι συνθήκες λειτουργίας του αεριοποιητή στη μόνιμη κατάσταση.



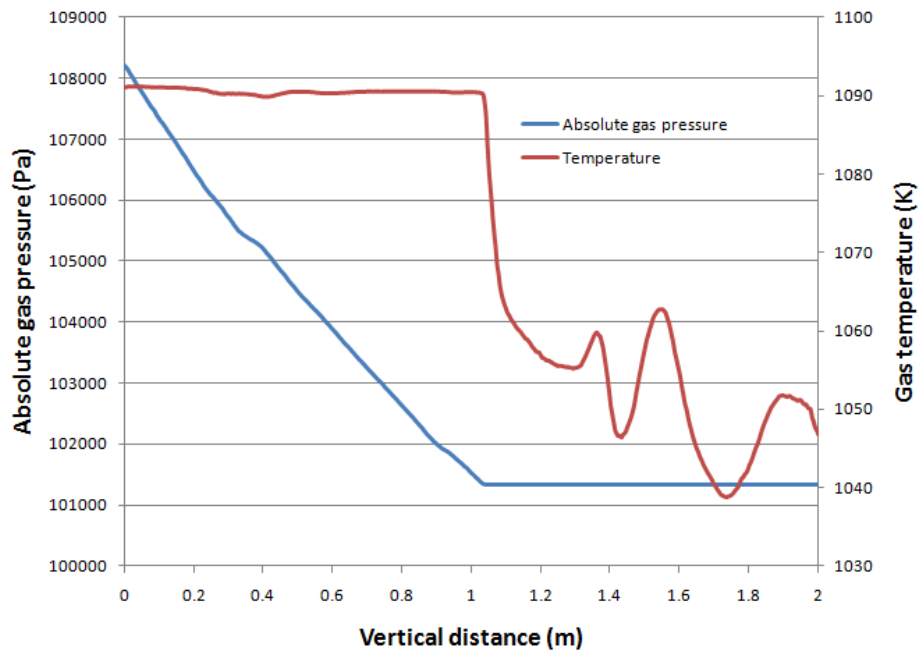
Σχήμα 7.9: Κλάσμα όγκου της άμμου 3D

Σχεδιάζονται η απόλυτη πίεση και η θερμοκρασία του αερίου, στην ίδια ευθεία γραμμή μέσα στον αεριοποιητή.

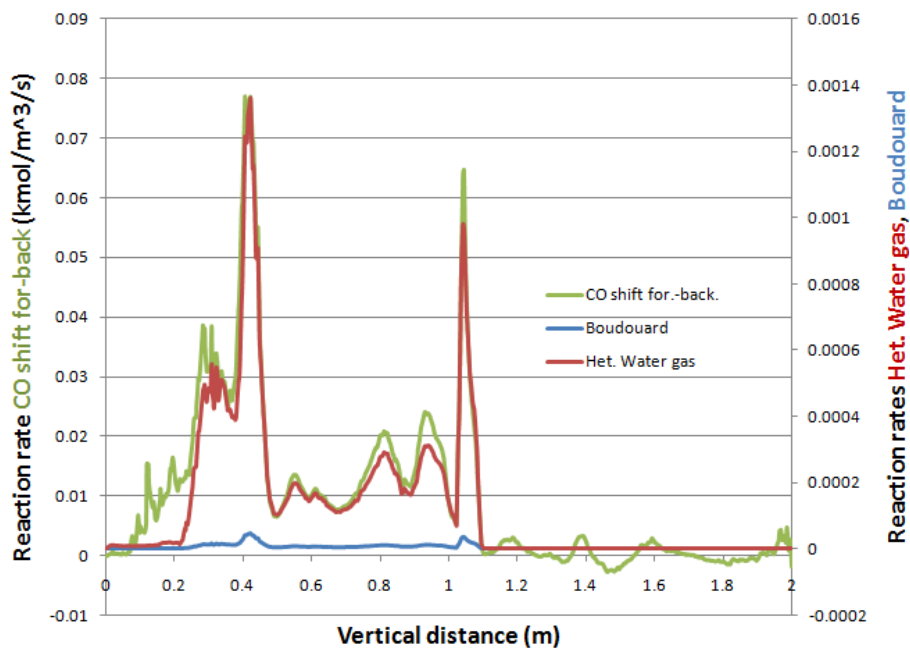
Η απόλυτη πίεση έχει πολύ καλή συμφωνία με την πραγματικότητα με γραμμική συμπεριφορά. Φτάνει την τιμή του 1 bar στην έξοδο της στήλης της άμμου. Η θερμοκρασία έχει σταθερή τιμή 1.090 K (817 °C) μέσα στη φάση της άμμου, και πέφτει όπως αναμένεται, στην ελεύθερη περιοχή με μια σταθερή τιμή 1.050 K (777 °C) στην έξοδο. Τώρα η πτώση της θερμοκρασίας συμβαίνει ακριβώς μετά από τη φάση της άμμου στα 1.05 m, επισημαίνοντας την αρχή της ελεύθερης περιοχής.

Στην Εικ. 7.11, φαίνονται τρεις (3) ρυθμοί αντιδράσεων. Τώρα, σχεδιάζονται ο μπροστά μείον τον πίσω ρυθμό της μετατροπής CO, η Boudouard και η ετερογενής αντίδραση. Η ετερογενής αντίδραση νερού αερίου αναφέρεται στην αντίδραση του εξανθρακώματος με το νερό. Έχει μέγιστο αμέσως μετά την είσοδο του ατμού στα 0.4 m, και αμέσως μετά από το τέλος του επιπέδου της άμμου. Στην ελεύθερη περιοχή, όπου δεν υπάρχει πλέον εξανθράκωμα για να αντιδράσει, ο ρυθμός της αντίδρασης είναι μηδέν. Το ίδιο ισχύει και για την αντίδραση Boudouard, μόνο που έχει γενικότερη πολύ χαμηλότερες τιμές ρυθμών αντίδρασης. Η αντίδραση μετατροπής CO (μπροστά-πίσω) δείχνει ότι ο μπροστινός ρυθμός ενισχύεται μέσα στην κλίνη, ενώ η πίσω στην ελεύθερη περιοχή. Γι' αυτό βλέπουμε αρνητικές τιμές μετά τα 1.1 m.

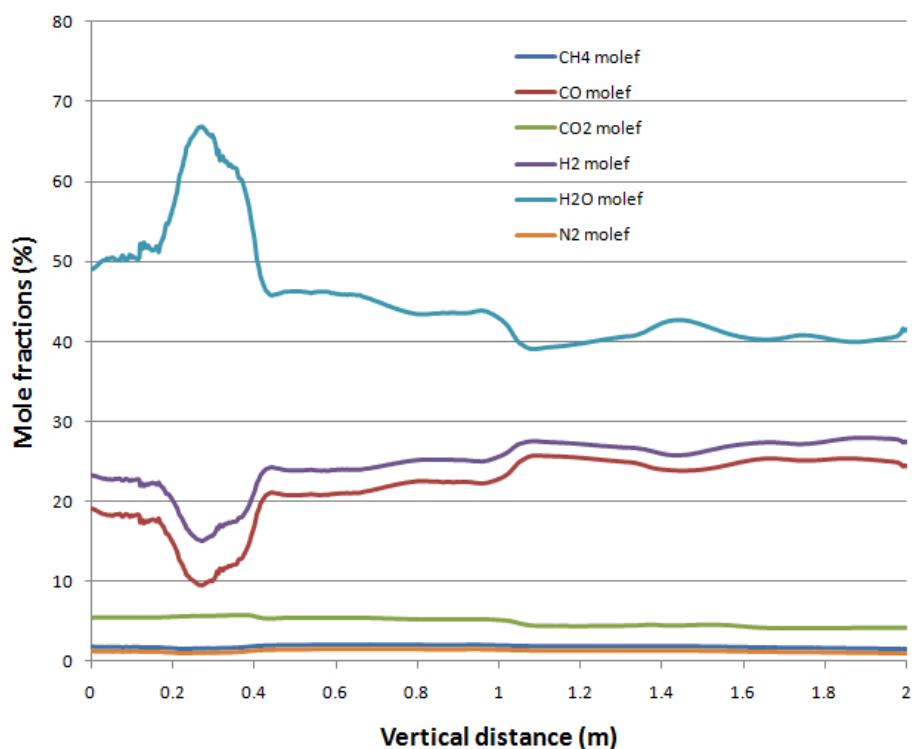
Στην Εικ. 7.12, βλέπουμε τα κλάσματα mol των συστατικών της αέριας φάσης στη μόνιμη κατάσταση μέσα στον αντιδραστήρα. Παρατηρείται μια καλύτερη και περισσότερη ευσταθής συμπεριφορά, που δείχνει καλύτερη επίδοση για την παρούσα προσέγγιση μοντελοποίησης.



Σχήμα 7.10: Συνθήκες λειτουργίας του αεριοποιητή στα $t = 46s$



Σχήμα 7.11: Ρυθμοί αντίδρασης στα $t = 46s$

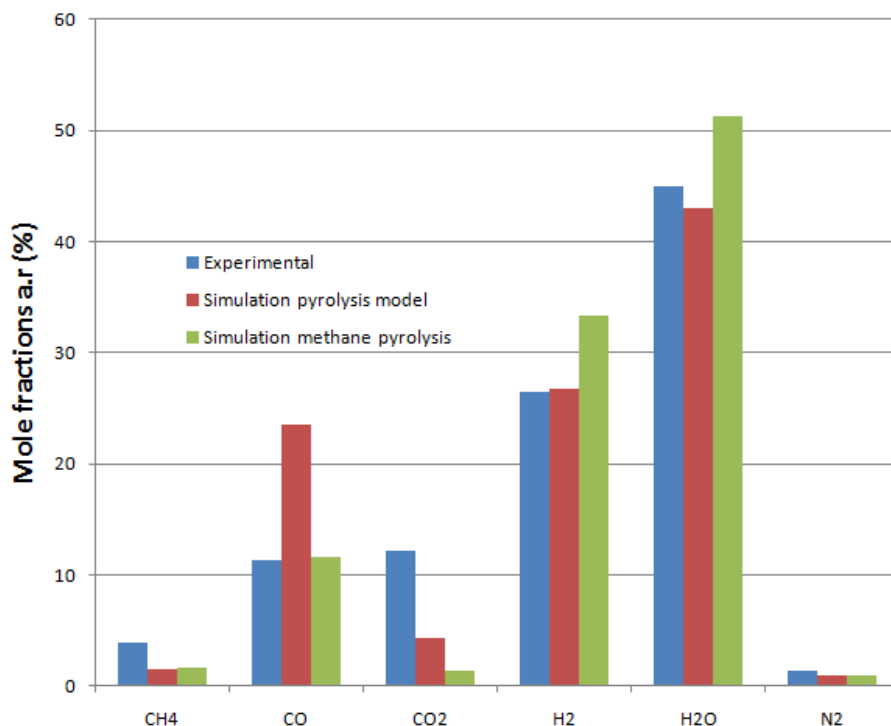
Σχήμα 7.12: Κλάσματα *mol* στα $t = 46s$

Τελικά, συγκρίνονται οι δύο προσεγγίσεις (ως έχουν - *a.r.*) με τις πειραματικές τιμές στην Εικ. 7.13. Με τη δεύτερη προσέγγιση, το H_2 και το H_2O είναι όπως και οι πειραματικές τιμές, αλλά ακόμα το CO υπερ-εκτιμάται και το CO_2 υπό-εκτιμάται. Αν και τα αποτελέσματα τώρα δείχνουν καλύτερη συνέπεια από αυτά με το μοντέλο πυρόλυσης μεθανίου, έχουμε ακόμα κάποιες αποκλίσεις από την πραγματικότητα. Ξανά οι λόγοι γι' αυτό είναι :

1. Τα προϊόντα πυρόλυσης λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία. Τα ακριβή προϊόντα πυρόλυσης πρέπει να υπολογιστούν από την ultimate ανάλυση, ελέγχοντας τη διατήρηση της ενέργειας και της μάζας.
2. Οι ρυθμοί αντίδρασης λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία.

7.3 Αναθεωρημένη προσέγγιση μοντελοποίησης (3)

Αφού ελέγξαμε τις προηγούμενες προσεγγίσεις, προέκυψε η ανάγκη για μία αναθεωρημένη προσέγγιση. Είναι προφανές ότι χρειάζεται να ανπτυχθεί ένα εστιασμένο μοντέλο πυρόλυσης, για να προβλεφθούν με ακρίβεια τα πειραματικά αποτελέσματα. Το μοντέλο πυρόλυσης μεθανίου ήταν η πρώτη απλοποιητική προσπάθεια. Ακολούθησε το μοντέλο *Seebauer*, με ένα περισσότερο λεπτομερές βήμα πυρόλυσης. Το παρόν αναθεωρημένο μοντέλο λαμβάνει υπόψη την proximate και ultimate ανάλυση των πελλετών ξύλου Agrol, για να υπολογισθεί η ακριβής σύσταση των πτητικών.



Σχήμα 7.13: Αποτελέσματα εξόδου

Δεδομένης της proximate και ultimate ανάλυσης στον Πίνακα 6.1, μπορούμε να υπολογίσουμε τη σύσταση των πτητικών. Η διαδικασία συζητείται παρακάτω.

Από την proximate ανάλυση μπορούμε να καθορίσουμε τον αριθμό των *mol* του άνθρακα, και τα *mol* της υγρασίας, που είναι συμπυκνωμένο νερό. Από την ultimate ανάλυση μπορούμε να καθορίσουμε τον αριθμό των *mol* των μεμονωμένων συστατικών. Για να το κάνουμε αυτό, διαιρούμε το % βάρος, με το αντίστοιχο μοριακό βάρος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.2.

Αφαιρώντας τα *mol* που δεσμεύονται από τον άνθρακα και την υγρασία από τα συνολικά, μπορούμε να υπολογίσουμε τα *mol* και τα κλάσματα μάζας των συστατικών που περιέχονται στα πτητικά (Πίνακας 7.3).

Όπως συζητήθηκε στην παρούσα εργασία, τα πτητικά πυρολύονται, μέσω της πρωτογενούς και δευτερογενούς πυρόλυσης, δίνοντας τα αέρια στοιχεία H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , H_2O , και N_2 . Η ποσότητα αυτών των στοιχείων πρέπει να βρίσκεται σε ισορροπία μάζας και ενέργειας (θερμογόνος ικανότητα), με τα πτητικά.

Η ισορροπία μάζας (Πίνακας 7.4) είναι μια επαναληπτική διαδικασία. Υποθέτουμε τα κλάσματα μάζας των προϊόντων της πυρόλυσης, μέχρι οι τιμές να συμφωνήσουν με τις δεδομένες τιμές του Πίνακα 7.3. Όσο τα οξείδια θείου δεν μοντελοποιούνται, το κλάσμα μάζας S θα παραμείνει μηδέν. Αυτό δεν έχει σημαντική επίδραση στην περίπτωση μας, επειδή το S έχει πολύ μικρή τιμή.

Πίνακας 7.2: Ανάλυση καυσίμου βιομάζας

Proximate ανάλυση		Μοριακή μάζα (kg/kmol)	Mol (kmol/kg καυσίμου)	Ultimate ανάλυση		Μοριακή μάζα (kg/kmol)	Mol (kmol/kg καυσίμου)
Πτητικά (% κ.β. ξηρό)	81.5	-	-	C	47.4	12.01	0.03946711
Άνθρακας (% κ.β. ξηρό)	13.6	12.01	0.0113239	H	6.4	1.001	0.06349206
Υγρασία (% κ.β.)	4.8	18.016	0.0026643	O	46.0	16.00	0.02875
Τέφρα (Κάλιο)	0.1	138.205	-	N	0.1	14.008	7.1388E-05
Θερμογόνος Ικα- νότητα				S	0.1	32.066	3.1186E-05
LHV (kJ/kg υ- γρό)	20.600						

Πίνακας 7.3: Ανάλυση πτητικών

Συστατικά πτητικών	Mol (kmol/kg καυσίμου)	Μάζα (kg/kg καυ- σίμου)
C	0.028143214	0.338
H	0.058163467	0.05862877
O	0.026085702	0.41737123
N	7.13878E-05	0.001
S	3.11857E-05	0.001

Πίνακας 7.4: Ισορροπία μάζας

Στοιχεία πυρόλυσης	Κλάσμα μάζας (kg/kg καυσί- μου)	Στοιχεία πτητικών	Κλάσμα μάζας (kg/kg καυσί- μου)
H ₂	0.01373173	C	0.337970459
CO	0.239092353	H	0.058617908
CO ₂	0.379551859	O	0.417411636
CH ₄	0.17615033	N	0.001
H ₂ O	0.00547373	S	0
N ₂	0.0001		
Συν.	0.815		0.815

Αντίστοιχα η ισορροπία ενέργειας φαίνεται στον Πίνακα 7.5. Η διαφορά της ενέργειας μεταξύ της πυρόλυσης και των στοιχείων των πτητικών είναι η ενέργεια σχηματισμού, και κατ' επέκταση η ενέργεια της πυρόλυσης.

Πίνακας 7.5: Ισορροπία ενέργειας

Στοιχεία πυρόλυσης	HHV (kJ/kg)	Ενέργεια (kJ/kg καυσίμου)	Στοιχεία πτητικών	HHV (kJ/kg)	Ενέργεια (kJ/kg καυσίμου)
H_2	141790	1947.022038	C	34080	11518.03324
CO	10095	2413.637307	H	141790	4155.716619
CO_2	0	0	O	0	0
CH_4	55530	9781.627843	N	0	0
H_2O	0	0	S	9200	0
N_2	0	0			
Συν.	-	14142.28719	-	-	15673.74986

Δυστυχώς, τα αποτελέσματα από την αναθεωρημένη προσέγγιση μοντελοποίησης δεν έχουν εκδοθεί ακόμα. Προβλέπεται ότι θα προβλέπουν καλύτερα τις πειραματικές τιμές, και θα παρουσιαστούν στην επόμενη εργασία του συγγραφέα.

7.4 Συμπεράσματα

Σε αυτή τη μελέτη, ερευνήθηκε με μεγάλη προσοχή η σχετική βιβλιογραφία. Τα μοντέλα προσομοίωσης πέτυχαν στην πρόβλεψη του χαρακτήρα ρευστοποίησης της ρευστοποιημένης κλίνης, τη κατανομή θερμοκρασιών και πιέσεων. Τα αποτελέσματα από τις δύο (2) προσεγγίσεις συλλέγονται και παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.6.

Πίνακας 7.6: Συμπεράσματα

Συστατικά εξόδου	Μοντέλο πυρόλυσης μεθανίου	Μοντέλο Seebauer
H_2O	Υπέρ-εκτιμήθηκε	Προβλέφθηκε
H_2	Υπέρ-εκτιμήθηκε	Προβλέφθηκε
CO_2	>Υπό-εκτιμήθηκε	Υπό-εκτιμήθηκε
CO	Προβλέφθηκε	Υπέρ-εκτιμήθηκε

Κεφάλαιο 8

Προοπτικές

Αυτή η εργασία στόχευσε να μοντελοποιήσει μια μονάδα αεριοποίησης ρευστοποιημένης κλίνης, και πέτυχε από πολλές πλευρές. Ωστόσο, δεν παρουσιάζεται ως πανάκεια, και η μελλοντική μελέτη θα πρέπει να προχωρήσει με την ακόλουθη έρευνα :

- Τις κινητικές παραμέτρους των αντιδράσεων και επιβεβαίωση με πειράματα
- Εξειδικευμένα μοντέλα πυρόλυσης και σχηματισμού πηκτών με Συναρτήσεις Χρήστη (User defined functions - UDF)
- Έλεγχος ανεξαρτησίας πλέγματος
- Προσέγγιση Lagrange - σύγκριση με την προσέγγιση Euler
- Προσομοίωση διαφόρων βιο-καυσίμων, για να χτίσουμε ένα περιεκτικό εργαλείο πρόβλεψης

Bibliography

- [Bioenergy-routes] : *AEBIOM European Biomass Association , Biomass to bioenergy conversion*. – URL <http://www.aebiom.org/?cat=4>
- [Fluent] : *ANSYS Fluent 13.0 User's Guide*
- [Woodpellets] : *Description from Wood-Pellets*. – URL <http://www.woodpellets.com/>
- [Biomass-Potential] : *Έρευνα από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) περί του δυναμικού της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας, Ελλάδα*. – URL http://www.cres.gr/energy-saving/images/pdf/biomass_guide.pdf
- [Oil-price] : *Τιμή πετρελαίου - Wikipedia*. – URL http://en.wikipedia.org/wiki/Price_of_petroleum
- [A. Gomez-Barea 2010] A. GOMEZ-BAREA, B. L. ; F., Winter (Hrsg.): *Gasification of Biomass and Waste. Handbook of Combustion*. Wiley-VCH, 2010
- [A. Z' Graggen 2008] A. Z' GRAGGEN, A. S.: A two-phase reactor for steam gasification of carbonaceous materials under concentrated thermal radiation. In: *Chemical Engineering and Processing* 47 (2008), S. 655–662
- [Alvaro Sanz 2005] ALVARO SANZ, Jose C.: Modeling circulating fluidized bed biomass gasifiers. Results from a pseudo-rigorous 1-dimensional model for stationary state. In: *Fuel Process Technology* 86 (2005), S. 247–258
- [Blasi 2008] BLASI, Colomba D.: Modeling chemical and physical processes of wood and biomass gasification. In: *Science Direct* 34 (2008), S. 47–90
- [C. A. Koufopoulos 1989] C. A. KOUFOPOANOS, A. L.: Kinetic modeling of the Pyrolysis of Biomass and Biomass Components. In: *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 67 (1989), S. 75–83
- [C. Franco 2002] C. FRANCO, I. Gulyurtlu I. C.: The study of reactions influencing the biomass steam gasification process. In: *Fuel* 82 (2002), S. 835–842
- [C. K. K. Lun 1984] C. K. K. LUN, D. J. Jeffrey N. C.: Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field. In: *The Journal of Fluid Mechanics* 140 (1984), S. 223–256
- [C. Lucas 2004] C. LUCAS, W. Blasiak S. M.: High temperature air and steam gasification of densified biofuels. In: *Biomass and Bioenergy* 27 (2004), S. 563–575

- [C. Mandl June/July 2009] C. MANDL, F. B.: Updraft fixed-bed gasification of softwood pellets : Mathematical modeling and comparison with experimental data. In: *17th European biomass conference and exhibition, Hamburg, ETA-Renewable Energies (Ed.), Italy*, June/July 2009
- [Christopher Higman 2008] CHRISTOPHER HIGMAN, Maarten J. van der B. ; ELSEVIER (Hrsg.): *Gasification*. Gulf Professional Publishing, 2008
- [D. Gidaspow 1992] D. GIDASPOW, J. D.: Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach. In: *Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, 75-82*, 1992
- [D. Lathouwers 2001a] D. LATHOUWERS, J. B.: Modelling of dense gas-solid reactive mixtures applied to biomass pyrolysis in a fluidized bed. In: *International Journal of Multiphase Flow* 27 (2001), S. 2155–2187
- [D. Lathouwers 2001b] D. LATHOUWERS, J. B.: Yield optimization and scaling of fluidized beds for tar production from biomass. In: *Energy Fuels* 15 (2001), S. 1247–1262
- [D. Ma 1990] D. MA, G. A.: A Thermodynamical Formulation for Dispersed Multiphase Turbulent Flows. In: *International Journal of Multiphase Flow* 16 (1990), S. 323–351
- [D. Sofialidis 2001] D. SOFIALIDIS, O. F.: Simulation of biomass gasification in fluidized beds using computational fluid dynamics approach. In: *Thermal Science* 5(2) (2001), S. 95–105
- [E.D. Gordillo 2011] E.D. GORDILLO, A. B.: A two phase model of high temperature steam-only gasification of biomass char in bubbling fluidised bed reactors using nuclear heat. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (2011), S. 374–381
- [FAO] FAO: *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Types of gasifiers*. – URL <http://www.fao.org/docrep/t0512e/T0512e0a.htm>
- [Fennell PS 2005] FENNELL PS, Dennis J.: The kinetics of oxidation of chars from three different coals, as measured in fluidized beds. In: *18th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, 2005, S. 881–894
- [G. Schuster 2001] G. SCHUSTER, K. Weigl H. H.: Biomass steam gasification - an extensive parametric modeling study. In: *Bioresource Technology* 77 (2001), S. 71–79
- [Gronli 1996] GRONLI, M. G.: *A theoretical and experimental study of the thermal degradation of biomass*, NTNU, Trondheim, Norway, Dissertation, 1996
- [J. Ding 1990] J. DING, D. G.: A Bubbling Fluidization Model Using Kinetic Theory of Granular Flow. In: *AIChE* 36(4) (1990), S. 523–538
- [J. Larfeldt 2000] J. LARFELDT, M.C. M.: Modelling and measurements of the pyrolysis of large wood particles. In: *Fuel* 79 (2000), S. 1637–1643
- [J. Rath 2001] J. RATH, S. S.: Cracking Reactions of Tar from Pyrolysis of Spruce Wood. In: *Fuel* 80 (2001), S. 1379–1389

-
- [J.C. Wurzenberger 2002] J.C. WURZENBERGER, H. Raupenstrauch J.G. K.: Thermal conversion of biomass: Comprehensive reactor and particle modeling. In: *AIChE Journal* 48 (2002), S. 2398–2411
- [K. Papadikis 2008] K. PAPADIKIS, S. G.: CFD modelling of the fast pyrolysis of biomass in fluidised bed reactors, Part A: Eulerian computation of momentum transport in bubbling fluidised beds. In: *Chemical Engineering Science* 63 (2008), S. 4218–4227
- [Liang Yu 2007] LIANG YU, Xiangping Zhang Suojian Z.: Numerical simulation of the bubbling fluidized bed coal gasification by the kinetic theory of granular flow (KTGF). In: *Fuel* 86 (2007), S. 722–734
- [M. Syamlal 1993] M. SYAMLAL, T. J. O.: MFIx Documentation: Volume1, Theory Guide / National Technical Information Service, Springfield, VA. DOE/METC-94/1004, NTIS/DE94000087. 1993. – Forschungsbericht
- [Michael Oevermann 2009] MICHAEL OEVERMANN, Frank B.: Euler-Lagrange/DEM simulation of wood gasification in a bubbling fluidized bed reactor. In: *Particuology* 7 (2009), S. 307–316
- [M.J. Boroson 1989] M.J. BOROSON, J. H.: Product yields and kinetics from vapor phase cracking of wood pyrolysis. In: *AIChE Journal* 35 (1989), S. 120
- [Prabir Basu 2009] PRABIR BASU, Kaushal P.: Modeling of Pyrolysis and Gasification of Biomass in Fluidized Beds: A Review. In: *Chemical Product and Process Modeling* 4 (2009), S. Iss. 1, Article 21
- [Priyanka Kaushal 2010] PRIYANKA KAUSHAL, Nader M.: A comprehensive mathematical model for biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor,. In: *Fuel* 89 (2010), S. 3650–3661
- [R. Reimert 1989] R. REIMERT, G. S.: Gas Production. In: *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry* 5th edn, Vol A 12. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft (1989), S. pp.215
- [S. Gerber 2010] S. GERBER, M. O.: An Eulerian modeling approach of wood gasification in a bubbling fluidized bed reactor using char as bed material. In: *Fuel* 89 (2010), S. 2903–2917
- [S. Karellas 2008] S. KARELLAS, T. Papadopoulos C. Schaefer J. K.: Hydrogen production from allothermal biomass gasification by means of palladium membranes. In: *Fuel Processing Technology* 89 (2008), S. 582–588
- [Schaeffer 1987] SCHAEFFER, D. G.: Instability in the Evolution Equations Describing Incompressible Granular Flow. In: *Journal of Differential Equations* 66 (1987), S. 19–50
- [Seebauer 1999] SEEBAUER, V.: *Experimentelle Untersuchungen zur Pyrolyse von Kohle und Holz*, Graz University of Technology, Dissertation, 1999
- [Smoot L.Douglas 1985] SMOOT L.DOUGLAS, Smith Philip J.: *Coal combustion and gasification*. Plenum Press, 1985
-

- [S.T. Sie 1999] S.T. SIE, R. K.: *Applied Catalysis A: General* 186, 55-70. 1999
- [Wikipedia] WIKIPEDIA: *Article of Wikipedia on biomass gasification*. – URL http://en.wikipedia.org/wiki/Biomass_gasification
- [Y. Wang 1993] Y. WANG, C.M. K.: Kinetic model of biomass gasification. In: *Solar Energy* 51 (1993), S. 19–25