

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ
ΚΛΙΝΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ**

υπό

ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΑ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας Π.Θ., 2001

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2008



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 7914/1
Ημερ. Εισ.: 11-12-2009
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
621.402 3
ΚΩΝ

© 2008 Γεώργιος Κωνσταντάς

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).



Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Πενταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Αναστάσιος Σταματέλλος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανικών	Βιομηχανίας,
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Αναστάσιος Σταμάτης Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών Βιομηχανίας,
Τέταρτος Εξεταστής	Δρ. Κωνσταντίνος Παπαδημητρίου Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών
Πέμπτος Εξεταστής	Δρ. Παναγιώτης Τσιακάρας Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ερρικο Σταπουντζή, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Η παρότρυνση από μέρος του για την υλοποίηση της εργασίας σε ένα εντελώς νέο, προς εμένα, πεδίο εφαρμοσμένης έρευνας με βοήθησε να διερύνω σημαντικά τη γνώση μου στη Μηχανολογία και ειδικότερα στο πεδίο της καύσης στερεών καύσιμων υλών.

Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Αναστάσιο Σταματέλλο, Αναστάσιο Σταμάτη, Κωνσταντίνο Παπαδημητρίου και Νικόλαο Πελεκάση για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Ευχαριστώ τους φίλους και τις φίλες μου για την ηθική υποστήριξή τους. Επίσης, ευχαριστώ την σύντροφό μου Ιωάννα Βαϊνά για την κατανόησή της και την υπομονή της, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Σπύρο και Μαρία Κωνσταντά, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτήν την μεταπτυχιακή εργασία στην ανηψιά μου και τον ανηψιό μου που θα έρθει σε λίγους μήνες στον κόσμο μας.

Γιώργος Κωνσταντάς

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΚΛΙΝΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΑΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2007

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής, Αναπληρωτής Καθηγητής Μηχανικής Ρευστών, Μηχ. Συμπιεστών & Ασυμπίεστων Ρευστών, Εφ. Υδροδυναμικής Θεωρίας & Κατασκευής Δυναμικών Μηχανών

Περίληψη

Τα συστήματα καυστήρων ρευστοποιημένων κλινών ανακυκλοφορίας χρησιμοποιούνται ευρέως για την καύση στερεών καυσίμων προερχόμενα από υπολείμματα γεωργικών και ξυλουργικών εργασιών, σκουπίδια ή/και βιομάζα. Η παρούσα εργασία σχετίζεται με την ανάπτυξη ενός στατικού υπολογιστικού μοντέλου για την προσομοίωση καυστήρων ρευστοποιημένων κλινών ανακυκλοφορίας.

Η ανάπτυξη του μοντέλου αυτού έγινε στο περιβάλλον εξειδικευμένου εμπορικού πακέτου υπολογισμών. Το μοντέλο περιέχει ένα προσαρμοσμένο υδροδυναμικό υπομοντέλο και ένα μοντέλο χημικών αντιδράσεων βασισμένα στην υπάρχουσα βιβλιογραφία και ανεπτυγμένα από λευκό χαρτί. Το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα χρήσης μίγματος δύο στερεών καυσίμων σε οποιαδήποτε αναλογία.

Το υδροδυναμικό μοντέλο χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση των εγγενών φαινομένων της διφασικής ροής αερίου στερεού στον θάλαμο καύσης. Υπολογίζει, με χρήση ημι-εμπειρικών συσχετίσεων, τα χαρακτηριστικά της ροής στην φυσαλιδωτή φάση και την φάση του γαλακτώματος, όπως επίσης και την αλληλεπίδραση των δύο φάσεων. Το μοντέλο χημικών αντιδράσεων χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της σύστασης του καυσαερίου και εστιάζει στα προϊόντα της καύσης του άνθρακα. Επιτυγχάνει επίσης την πρόβλεψη του σχηματισμού των οξειδίων του αζώτου με ικανοποιητική ακρίβεια.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας τα οποία χρησιμοποιούνται και για την βαθμονόμηση του μοντέλου. Το βαθμονομημένο πλέον μοντέλο χρησιμοποιείται για την μελέτη των χαρακτηριστικών λειτουργίας πειραματικής διάταξης ονομαστικής ισχύος 30kW. Τέλος, γίνονται προτάσεις για προσθήκες και βελτίωση μελλοντικών εκδόσεων του μοντέλου.

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL MODEL FOR CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTORS

GEORGE KONSTANTAS

University of Thessaly, Department of Mechanical and Industrial Engineering, 2008

Supervisor: Dr. Erikos Stapountzis, Associate Professor of Fluid Mechanics & Turbomachinery

Abstract

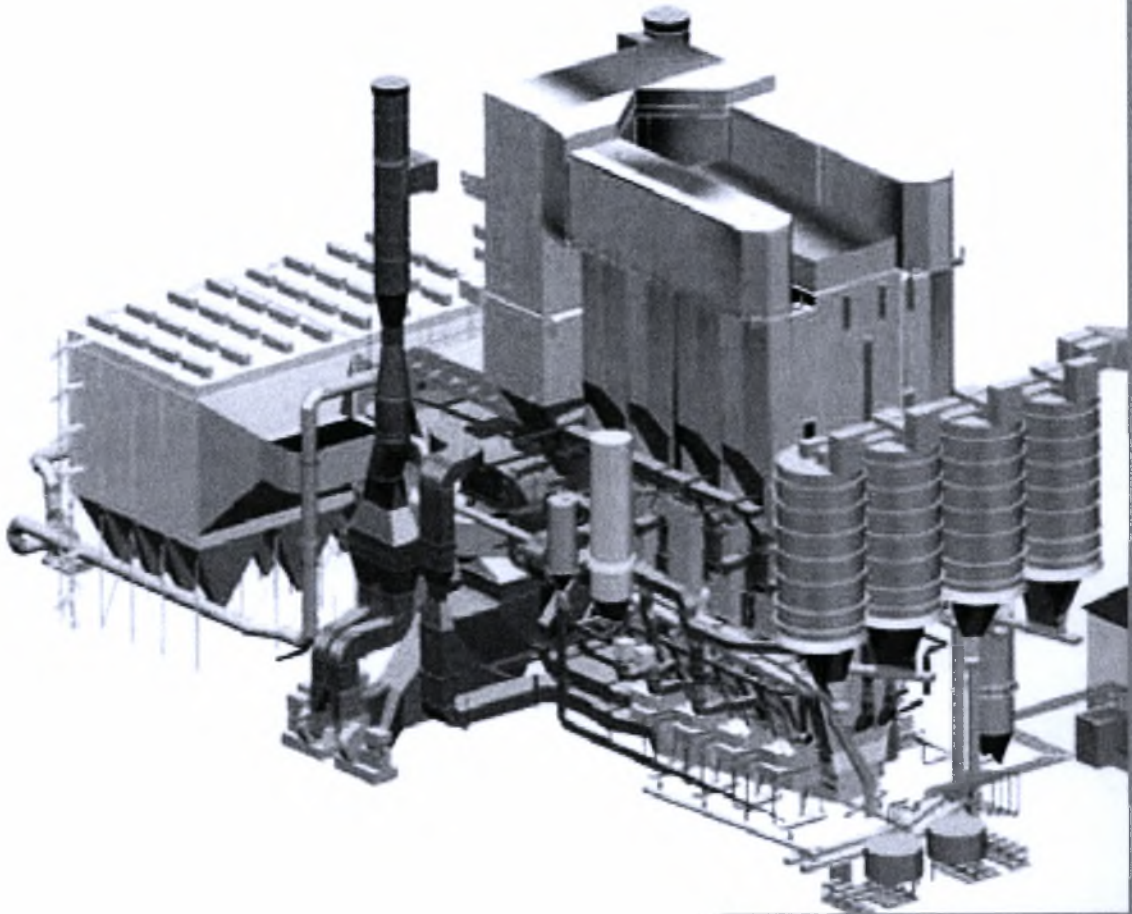
Circulating fluidized bed combustors are used in a wide commercial scale for the combustion of solid fuels coming from agricultural work waste , woodworking waste and/or biomass. The current work deals with the development of steady state computational model for circulating fluidized bed combustors in a commercial software environment.

The model features a hydrodynamic submodel as well as a chemical reaction model. These two models are based in current bibliography and are developed from scratch.

The hydrodynamic model accounts for the intrinsic phenomena of the gas - solid flow in the combustion chamber. It calculates, with the use of semi-empirical correlations, the flow characteristics of the bubble and emulsion phases and their interactions. The chemical reaction model is used for the estimation of the flue gas composition focused in the products from the combustion of char. It also predicts the NO_x formation within an acceptable accuracy. The model features the use of a two kind solid fuel mixture

The computational results are compared with experimental data coming from bibliography and are used for the model calibration. The calibrated model is used for the study of the operation of a pilot 30kW bed combustor. The last chapter contains proposals for extensions and improvements for the future versions of the model.

Ανάπτυξη μοντέλου καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας



Κωνσταντάς Γεώργιος
Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών Βιομηχανίας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μάιος 2008

Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
1.1.	Βασικές αρχές λειτουργίας.....	15
1.2.	Αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης.....	16
1.2.1.	Περιγραφή λειτουργίας.....	16
1.2.2.	Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα.....	19
1.3.	Ρευστοποιημένες κλίνες καύσης (Fluidized bed combustors - FBC).....	20
1.3.1.	Τύποι ρευστοποιημένων κλινών καύσης.....	22
1.3.2.	Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα.....	23
1.3.3.	Εκπομπές ρύπων CFBC.....	24
1.3.4.	Περιγραφή λειτουργίας συστημάτων CFBC.....	24
1.4.	Εφαρμογές Βιομηχανικής Κλίμακας.....	26
1.4.1.	JEА Northside Generating Station (Jacksonville).....	26
1.4.2.	Colmac Energy (Mecca).....	27
1.5.	Στόχος της παρούσας εργασίας.....	28
2.	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	30
2.1.	Ρευστοδυναμικά φαινόμενα στο εσωτερικό της κλίνης.....	30
2.1.1.	Πτώση πίεσης.....	30
2.1.2.	Ταχύτητα ελάχιστης ρευστοποίησης.....	32
2.1.3.	Τερματική ταχύτητα.....	33
2.1.4.	Ζώνες ρευστοποίησης.....	37
2.1.5.	Χαρακτηριστικά διφασικής ροής.....	40
2.2.	Χημεία καύσης και σχηματισμού ρύπων.....	44
2.2.1.	Διάσπαση στερεάς καύσιμης ύλης.....	44
2.2.2.	Καύση απανθρακωμένης μάζας (char).....	45
2.2.3.	Σχηματισμός οξειδίων του Αζώτου (NO _x).....	47
2.2.4.	Δέσμευση διοξειδίου του Θείου (SO ₂).....	49
2.3.	Μεταφορά θερμότητας προς τα τοιχώματα.....	50
2.4.	Προσεγγίσεις μοντελοποίησης καυστήρων ρευστοποιημένων κλινών ανακυκλοφορίας	
	52	

3.	Μοντελοποίηση.....	55
3.1.	Γενική περιγραφή μοντέλου	55
3.2.	Υδροδυναμικό Μοντέλο.....	55
3.2.1.	Παραδοχές υδροδυναμικού μοντέλου	56
3.2.2.	Περιγραφή υδροδυναμικού μοντέλου	56
3.3.	Μοντέλο χημικών αντιδράσεων.....	59
3.3.1.	Παραδοχές μοντέλου χημικών αντιδράσεων.....	59
3.3.2.	Μοντέλο διάσπασης	60
3.3.3.	Μοντέλο καύσης πτητικών.....	61
3.3.4.	Μοντέλο καύσης στερεών.....	61
3.3.5.	Μοντέλο σχηματισμού Οξειδίων του Αζώτου.....	62
3.3.6.	Ρύθμιση μοντέλου χημικών αντιδράσεων	63
3.4.	Παρουσίαση του μοντέλου προσομοίωσης.....	64
3.4.1.	Ξηραντήρας.....	64
3.4.2.	Διάσπαση στερεάς καύσιμης ύλης (πυκνή ζώνη).....	66
3.4.3.	Καύση πτητικών ενώσεων (πυκνή ζώνη)	66
3.4.4.	Καύση απανθρακωμένης μάζας (πυκνή ζώνη).....	67
3.4.5.	Καύση απανθρακωμένης μάζας (αραιή ζώνη)	68
3.4.6.	Σχηματισμός/καταστροφή NO _x (πυκνή και αραιή ζώνη).....	69
3.4.7.	Κυκλώνας.....	70
3.4.8.	Εναλλάκτες θερμότητας	70
3.5.	Συμπληρωματικές σχέσεις υπολογισμού	71
3.5.1.	Ισοζύγιο μάζας Διεργασίας Καύσης.....	71
3.5.2.	Ισοζύγιο μάζας Διεργασίας θέρμανσης προϊόντος.....	72
3.5.3.	Συμπληρωματικά ισοζύγια μάζας.....	72
3.5.4.	Ολικό ισοζύγιο μάζας	73
3.5.5.	Ισοζύγιο ενέργειας διεργασίας καύσης	73
3.5.6.	Ισοζύγιο ενέργειας Διεργασίας θέρμανσης	74
3.5.7.	Ολικό ισοζύγιο ενέργειας	74
3.5.8.	Στοιχειομετρία Καύσης.....	75
3.5.9.	Αδιαβατική Θερμοκρασία Καύσεως	76
3.6.	Διαδικασία προσομοίωσης	76

4.	Πιστοποίηση μοντέλου	80
4.1.	Πιστοποίηση του μοντέλου σε διάταξη ελαιοπυρήνα και λιγνίτη.....	80
4.1.1.	Αρχική ρύθμιση του μοντέλου.....	82
4.1.2.	Εύρεση τιμών των ρυθμιστικών παραμέτρων.....	83
4.1.3.	Καύσιμο: 100% λιγνίτης	85
4.1.4.	Καύσιμο: 25% λιγνίτης – 75% ελαιοπυρήνας.....	90
4.1.5.	Συμπεράσματα.....	93
5.	Μελέτη χαρακτηριστικών λειτουργίας πιλοτικής διάταξης 30 kW	94
5.1.	Περιγραφή της διάταξης.....	94
5.2.	Παραδοχές.....	97
5.3.	Παράμετροι και δεδομένα εισόδου του μοντέλου	97
5.4.	Περίπτωση αναφοράς.....	99
5.5.	Μελέτη χαρακτηριστικών λειτουργίας της διάταξης	103
5.5.1.	Επίδραση της παροχής καυσίμου	103
5.5.2.	Επίδραση του λόγου πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος αέρα καύσης	111
5.5.3.	Επίδραση της ανακυκλοφορίας αδρανών υλικών ρευστοποίησης.....	114
5.6.	Συμπεράσματα μοντελοποίησης πιλοτικής διάταξης	117
6.	Σύνοψη της παρούσας διατριβής	118
6.1.	Συμπεράσματα	118
6.2.	Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση	119
6.3.	Προτάσεις για προσθήκες/βελτιώσεις του μοντέλου	119
6.3.1.	Βελτίωση μοντέλου για την καύση της απανθρακωμένης μάζας	120
6.3.2.	Βελτίωση μηχανισμού σχηματισμού NOx.....	120
6.3.3.	Προσθήκη μοντέλου δέσμησης SO ₂	120
6.3.4.	Προσθήκη μοντέλου δέσμησης CO ₂	121
6.3.5.	Προσθήκη 2-D μοντέλου τύπου Core-Annuulus.....	121
6.3.6.	Βελτίωση μοντελοποίησης ζώνης επιτάχυνσης	121
	Παράρτημα Α – Εγχειρίδιο του μοντέλου	123
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	123
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	124
	Βιβλιογραφικές αναφορές	127

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΩΝ

Συμβολισμός	Ονομασία	Μονάδες
A/F	Λόγος αέρα καυσίμου	$[-]$
A, k_{01}	Προεκθετικός παράγοντας	$[1/s]$
AW	Ατομικό βάρος	$[kg]$
C	συγκέντρωση	$[kmole/m^3]$
C_D	Συντελεστής οπισθέλκουσας	$[-]$
d	διάμετρος	$[m]$
D	διαχυτότητα	$[m^2/s]$
E	Ενέργεια ενεργοποίησης	$[kJ/kmole]$
F	Παροχή μάζας	$[kg/s]$
h	Συντελεστής συναγωγής	$[W/m^3K]$
H	Ύψος	$[m]$
g	Επιτάχυνση βαρύτητας	$[m/s^2]$
G_s	Ανακυκλοφορία στερεών	$[kg/s m^2 riser]$
K	Συντελεστής μεταφοράς μάζας	$[kmole/s]$
k	Σταθερά ρυθμού χημικής αντίδρασης	$[1/s]$
r_c	Ακτίνα σωματιδίων άνθρακα	$[m]$
m	μάζα	$[kg]$
MW	Μοριακό βάρος	$[kg]$
N	πλήθος	$[-]$
Q	Παροχή όγκου	$[m^3/s]$
t	Χρόνος	$[s]$
T	Θερμοκρασία	$[K]$
U	Ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας	$[W/m^3K]$
U, V	Ταχύτητα	$[m/s]$
V	όγκος	$[m^3]$
X_c	Κλάσμα άνθρακα (πτητικό μέρος)	$[-]$
Z	Μήκος (αξονική διεύθυνση)	$[m]$

Ελληνικοί χαρακτήρες

δ	Κλάσμα ροής (φυσαιδωτή φάση)	$[-]$
Δp	Πτώση πίεσης	$[bar]$
$\varepsilon, void$	Κενός χώρος	$[-]$
ε_c	πορότητα	$[-]$
λ	Συντελεστής αγωγής	$[W/mK]$
μ	ιξώδες	$[Pa \cdot s]$
ρ	πυκνότητα	$[kg/m^3]$
Φ	σφαιρικότητα	$[-]$

Δείκτες

<i>acc</i>	Ζώνη επιτάχυνσης ροής
<i>b</i>	Φυσαλιδωτή φάση
<i>ch</i>	choking
<i>dense</i>	Πυκνή ζώνη
<i>e</i>	Φάση γαλακτώματος
<i>F</i>	Ρευστό
<i>fb</i>	Ρευστοποιημένη κλίση
<i>full</i>	Πλήρως ανεπτυγμένη ροή
<i>g</i>	Αέρια φάση
<i>mf</i>	Ελάχιστη ρευστοποίηση
<i>o</i>	Αρχική (ταχύτητα)
<i>p</i>	σωματίδιο
<i>pb</i>	Σταθερή κλίση
<i>r</i>	Ρυθμός αντίδρασης
<i>s, solid</i>	Στερεά φάση
<i>t</i>	Τερματική (ταχύτητα)

Χημικά στοιχεία

<i>char</i>	Απανθρακωμένη μάζα
<i>C</i>	άνθρακας
<i>H</i>	υδρογόνο
<i>O₂</i>	οξυγόνο
<i>S</i>	θείο
<i>VM</i>	Πτητικό μέρος

Αδιάστατοι αριθμοί

<i>Ar</i>	Archimedes number
<i>F_r</i>	Froude number
<i>Re</i>	Reynolds number

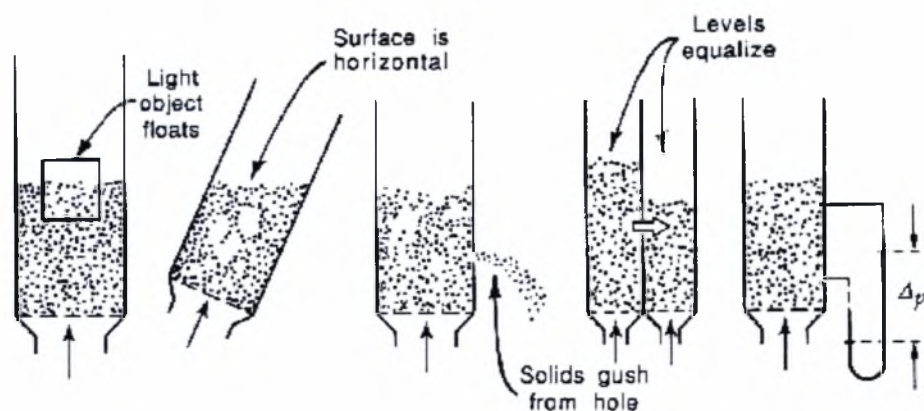
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης είναι μια σχετικά πρόσφατη τεχνολογία στο βιομηχανικό/μηχανολογικό πεδίο. Οι αντιδραστήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε μια πληθώρα βιομηχανικών διεργασιών που απαιτούν ομοιομορφία στις συνθήκες των διεργασιών. Ο πρώτος αντιδραστήρας του είδους κατασκευάστηκε από τον Fritz Winkler στη Γερμανία τη δεκαετία του 1920 για την παραγωγή αερίου. Στις Η.Π.Α. ένας από τους πρώτους αντιδραστήρες που χρησιμοποίησε η πετρελαιοβιομηχανία ήταν η Μονάδα Καταλυτικής Διάσπασης, κατασκευασμένη στο Baton Rouge, LA το 1942 από την Standard Oil Company. Η κατασκευή της πρώτης ρευστοποιημένης κλίνης για καύση στερεών καυσίμων χρονολογείται το 1949 στη Γερμανία.

1.1. Βασικές αρχές λειτουργίας

Η βασική αρχή λειτουργίας των αντιδραστήρων του είδους βασίζεται στη χρήση στερεών σωματιδίων σε κατάσταση αιώρησης στον θάλαμο του αντιδραστήρα για την αύξηση της ενεργής επιφάνειας (όταν πρόκειται για καταλυτική διεργασία) ή την αύξηση των ολικών συντελεστών μετάδοσης θερμότητας (όταν πρόκειται για διεργασίες καύσης). Ειδικά για τις διεργασίες καύσης, θεωρείται ότι διατάξεις του είδους αυξάνουν το συνολικό βαθμό απόδοσης της διεργασίας, ενώ παράλληλα έχουν υψηλό δυναμικό για τη μείωση των ρύπων μέσα στο θάλαμο της διεργασίας, με προσθήκη σωματιδίων ρευστοποίησης με καταλυτικές ιδιότητες.

Η ρευστοποίηση (Fluidization ή fluidizing) μετατρέπει μια κλίνη από στερεά σωματίδια σε μια διεσταλμένη, αιωρούμενη μάζα, η οποία έχει πολλές κοινές ιδιότητες με τα υγρά. Η πάνω επιφάνεια της μάζας αυτής είναι πάντοτε παράλληλη προς το έδαφος, παίρνει το σχήμα του δοχείου στο οποίο περιέχεται ενώ ο όγκος που καταλαμβάνει εξαρτάται από τα δυναμικά χαρακτηριστικά του αερίου που την ρευστοποιεί.



Εικόνα 1 Ομοιότητες της συμπεριφοράς των ρευστοποιημένων κλινών με τα υγρά

Οι χημικές διεργασίες, για τις οποίες χρησιμοποιούνται οι διατάξεις του είδους, λαμβάνουν χώρα στον κενό χώρο που δημιουργείται μεταξύ του αερίου ρευστοποίησης και των αιωρούμενων σωματιδίων. Πρακτικά ο θάλαμος αντίδρασης μπορεί να παρομοιαστεί με ένα χημικό αντιδραστήρα με δαιδαλώδες σχήμα και έντονο πορώδες. Το αέριο της διεργασίας εξαναγκάζεται να έρχεται σε έντονη ανάμιξη και στενή επαφή με τη στερεή φάση, επιτυγχάνοντας ομοιόμορφες συνθήκες σε ολόκληρο το θάλαμο καύσης.

1.2. Αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης

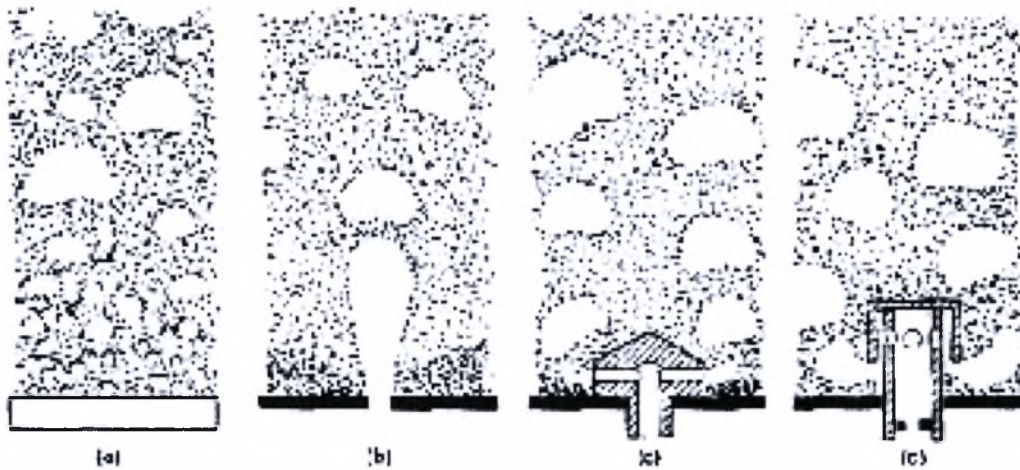
Οι ρευστοποιημένες κλίνες χρησιμοποιούνται επιτυχώς σε πολλαπλές καταλυτικές και μη καταλυτικές χημικές διεργασίες. Ανάμεσα στις καταλυτικές εφαρμογές περιλαμβάνονται η διάσπαση της αλυσίδας των υδρογονανθράκων (hydrocarbon cracking and re-forming) και διεργασίες οξείδωσης. Μερικές μη καταλυτικές χρήσεις είναι το καβούρντισμα των ορυκτών σουλφιδίων (roasting of sulfide ores), η μετατροπή των υπολειμμάτων της πετρελαϊκής απόσταξης σε κωκ (coking of petroleum residues), ο καθαρισμός ορυκτών εν θερμώ (calcination of ores) και διεργασίες ξήρασης. Αυξημένο ενδιαφέρον έχει η καύση σε ρευστοποιημένες κλίνες στερεών καυσίμων, βιομάζας και απορριμμάτων για την παραγωγή ατμού, δεδομένης και της σημαντικής προόδου που έχει σημειωθεί σε τέτοιου είδους διεργασίες.

1.2.1. Περιγραφή λειτουργίας

Το στερεό υπόστρωμα στους αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης στηρίζεται σε μια διάτρητη πλάκα που ονομάζεται διανομέας. Το ρευστό ωθείται μέσω του διανομέα να διασχίσει το στερεό υπόστρωμα με στόχο να ρευστοποιήσει τα στερεά υλικά και να χρησιμοποιηθεί για τις χημικές διεργασίες. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι διανομέα: 1) για χρήση όταν το αέριο εισόδου περιέχει στερεά 2) όταν το αέριο εισόδου είναι καθαρό. Στη δεύτερη περίπτωση ο διανομέας σχεδιάζεται ώστε να αποτρέπει την αντίστροφη ροή. Η κατασκευαστική διαμόρφωση του διανομέα ποικίλει, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, ανάλογα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της ρευστοποίησης.

Το ζητούμενο σε κάθε περίπτωση είναι μια όσο το δυνατόν ομοιόμορφη διασπορά του αερίου στην κλίνη. Η ιδανική μορφή για την επίτευξη αυτού του σκοπού, θα ήταν μια πορώδης μεμβράνη. Αυτή η διαμόρφωση προσεγγίζεται κατασκευαστικά ως μια διάτρητη πλάκα που είναι προϊόν ελεγχόμενης διάβρωσης (sintered plate). Η πιο απλή κατασκευή είναι η διαμόρφωση της πλάκας του διανομέα με μεγάλες οπές που σχηματίζουν jet αερίου στα υλικά της κλίνης (περίπτωση b). Οι περιπτώσεις c και d είναι περισσότερο σύνθετες κατασκευαστικά και συντελούν στην αποτροπή της αντίστροφης ροής των υλικών ρευστοποίησης στο χώρο του αερίου. Παράλληλα διαμορφώνουν ομοιόμορφη διασπορά του αερίου ώστε να αποφεύγονται οι σημαντικές διαφορές πίεσης μέσα στην κλίνη. Σε οποιαδήποτε κατασκευαστική διαμόρφωση του διανομέα χρησιμοποιούνται πολλαπλοί εγχυτήρες αέρα κατανομημένοι ομοιόμορφα στο εμβαδόν της πλάκας του διανομέα. Σε κάθε περίπτωση είναι προτιμητέο να διατηρείται η

ταχύτητα εξόδου του αερίου από τους εγχυτήρες μικρότερη από 70m/s ώστε να μειώνεται η φθορά των υλικών ρευστοποίησης.



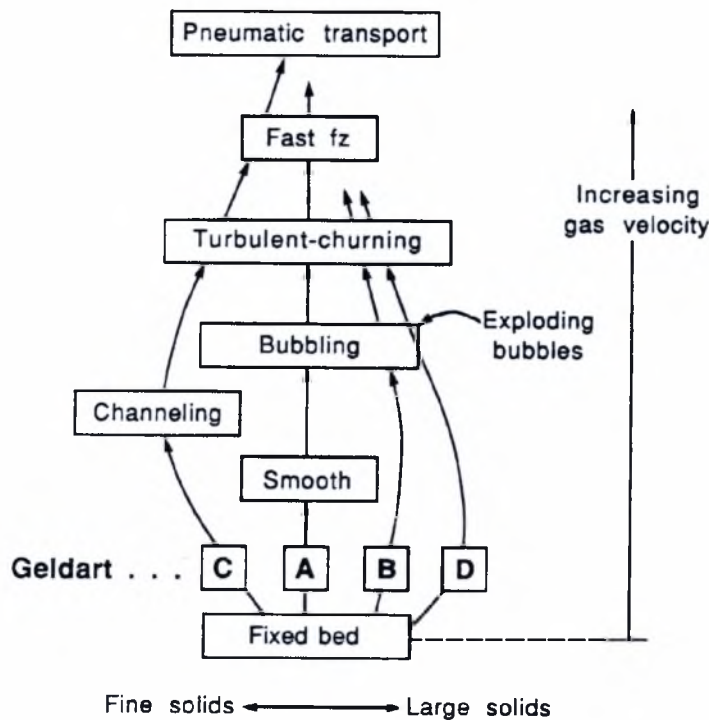
Εικόνα 2 Κατασκευαστική διαμόρφωση διανομέα

Ανάλογα με τη κατασκευαστική διαμόρφωση του διανομέα και τις ταχύτητες ρευστοποίησης δημιουργούνται οι αντίστοιχες καταστάσεις ρευστοποίησης. Η Εικόνα 4 παρουσιάζει σχηματικά μερικές από αυτές. Διακρίνονται τρεις καταστάσεις ανάλογα με την ταχύτητα ρευστοποίησης

1. Σε χαμηλές ταχύτητες του ρευστού τα στερεά σωματίδια παραμένουν στη θέση τους και το ρευστό περνάει ανάμεσα από τον κενό χώρο (voidage) χωρίς να επιφέρει καμιά αλλαγή στην κατάσταση ρευστοποίησης. Η κατάσταση αυτή είναι γνωστή σαν αντιδραστήρας σταθερής κλίνης (packed bed reactor).
2. Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, ο αντιδραστήρας θα φτάσει σε μια κατάσταση ισορροπίας όπου οι δυνάμεις που ασκεί το ρευστό στα σωματίδια αντισταθμίζουν τη δύναμη του βάρους τους. Το στάδιο αυτό ονομάζεται αρχική ρευστοποίηση και λαμβάνει χώρα για την ταχύτητα της ελάχιστης ρευστοποίησης (minimum fluidization velocity).
3. Μόλις η ελάχιστη ταχύτητα υπερκεραστεί, τα σωματίδια αρχίζουν να εκτείνονται και να στροβιλίζονται σε μια κατάσταση που μοιάζει πολύ με αυτή του βρασμού του νερού. Ανάλογα με τις συνθήκες ρευστοποίησης και τις ιδιότητες των υλικών παρατηρούνται διάφορες περιοχές της ροής

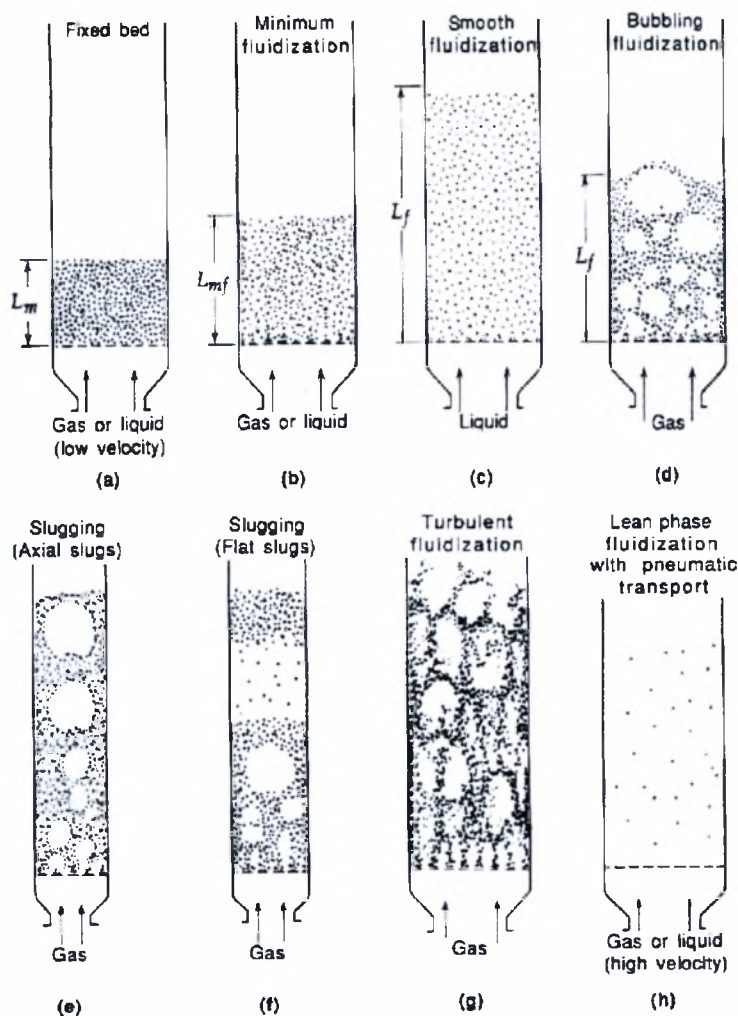
Η ταχύτητα ανόδου των αερίων μαζών κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0.15 m/s και 6 m/s. Η ταχύτητα αυτή υπολογίζεται βάσει της ροής των αερίων σε άδειο θάλαμο και ονομάζεται superficial velocity. Η επιδερμική ταχύτητα (superficial velocity) υπολογίζεται ως η παροχή όγκου αέρα σε κανονικές συνθήκες προς την εσωτερική διατομή της κλίνης. Με την αύξηση της ταχύτητας ρευστοποίησης παρατηρούνται και διάφοροι τύποι ρευστοποίησης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3. Ξεκινώντας από μηδενικές ταχύτητες (σταθερή κλίση), και ανάλογα με τον

τύπο των υλικών ρευστοποίησης, η σταδιακή αύξηση της ταχύτητας συντελεί στη μετάβαση από ομαλή ρευστοποίηση, στη δημιουργία φυσαλιδωτής κλίνης, ενώ με επιπλέον αύξηση της ταχύτητας δημιουργούνται έντονα φαινόμενα τυρβώδους ανάμιξης πριν τη μετάβαση σε καταστάσεις ταχείας ρευστοποίησης που συναντώνται στις ρευστοποιημένες κλίνες ανακυκλοφορίας.



Εικόνα 3 Χαρακτηριστικά ρευστοποίησης συναρτήσει του μεγέθους των υλικών ρευστοποίησης και της ταχύτητας ρευστοποίησης

Το μέγεθος των σωματιδίων ρευστοποίησης ποικίλει σημαντικά από διαμέτρους μικρότερες του 1 mm ως διαμέτρους των 6 cm. Τα σωματίδια κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες αναλύονται στο κεφάλαιο 2, ανάλογα με το μέγεθός τους, το οποίο επηρεάζει και τα χαρακτηριστικά της ρευστοποίησης όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Γενικά έχει παρατηρηθεί ότι κατανομή μεγέθους από 10 ως 150 μm συμπεριφέρονται καλύτερα για την επίτευξη ομαλής ρευστοποίησης (ελάχιστη δημιουργία μεγάλων φυσαλίδων. Τα μεγάλα μεγέθη σωματιδίων προκαλούν αστάθειες στη ρευστοποίηση και μπορεί να καταλήξουν σε αργή ρευστοποίηση (slugging) ή απότομη μαζική μετακίνηση (massive surges). Τα μικρά σωματίδια (τυπικά μικρότερα από 20 mm) συχνά, αν και πλήρως ξηραμένα, συμπεριφέρονται σαν νοτισμένη μάζα (damp), δημιουργούν συσσωματώσεις (agglomerates), σχισμές στη ρευστοποιημένη κλίση (fissures) ή πίδακες (sprouting).



Εικόνα 4 Καταστάσεις ρευστοποίησης. α) Σταθερή κλίνη, β) Ελάχιστη ρευστοποίηση, γ) Ομαλή ρευστοποίηση, δ) Φυσαλιδωτή ρευστοποίηση, ε) Αργή ρευστοποίηση, ς) Απότομη μαζική μετακίνηση, ζ) Τυρβώδης ρευστοποίηση, η) Πνευματική μεταφορά

1.2.2. Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Η αυξητική τάση στη χρήση αντιδραστήρων ρευστοποιημένης κλίνης οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στα έμφυτα πλεονεκτήματα της διάταξης.

Ομοιόμορφη ανάμιξη σωματιδίων: Λόγω της συμπεριφοράς των αναρτώμενων υλικών της κλίνης ως παχύρρευστο υγρό, οι ρευστοποιημένες κλίνες εμφανίζουν υψηλούς ρυθμούς ανάμιξης σε αντίθεση με τις σταθερές κλίνες. Η πλήρης ανάμιξη δίνει τη δυνατότητα παραγωγής ενός ομοιόμορφου προϊόντος. Σε συνθήκες καύσης η πλήρης ανάμιξη ουσιαστικά εξαλείφει τις διαφορές συγκέντρωσης μεγιστοποιώντας τους βαθμούς απόδοσης της καύσης των στερεών καυσίμων.

Ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας: Σύνηθες πρόβλημα στους αντιδραστήρες σταθερής κλίνης είναι η ύπαρξη τοπικών ψυχρών και θερμών σημείων ανάλογα με την εξέλιξη της

χημικής αντίδρασης. Στους συμβατικούς καυστήρες σημαντικός η ύπαρξη θερμοκρασιακών είναι άμεσα συνυφασμένη με την εξέλιξη του μετώπου της φλόγας. Στους αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης οι τοπικές διαφορές θερμοκρασίας ουσιαστικά εξαλείφονται λόγω των υψηλών συντελεστών μετάδοσης θερμότητας εξαιτίας των υλικών ρευστοποίησης βελτιώνοντας την κατανομή της θερμοκρασίας.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα των αντιδραστήρων του είδους συνοψίζονται στα εξής:

Αυξημένος όγκος θαλάμου αντίδρασης: Λόγω της έκτασης των σωματιδίων ρευστοποίησης ο ωφέλιμος χώρος (κενός χώρος) είναι σημαντικά μικρότερος από τις διαστάσεις του θαλάμου. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερες διαστάσεις του θαλάμου καύσης, άρα και υψηλότερο κόστος ήδη από τον αρχικό σχεδιασμό της κατασκευής.

Ενέργεια άντλησης και πτώση πίεσης: Οι υψηλότερες ταχύτητες ροής των αερίων ρευστοποίησης, ώστε να ανταπεξέλθουν στις ανάγκες αιώρησης των σωματιδίων, συνεπάγεται και υψηλότερες απαιτήσεις ισχύος για τον φυσητήρα. Επιπροσθέτως οι απώλειες ισχύος λόγω της πτώσης πίεσης από την αιώρηση των σωματιδίων είναι επίσης αυξημένες.

Διείσδυση σωματιδίων στην αέρια φάση: Οι υψηλές ταχύτητες του αερίου στους αντιδραστήρες του είδους έχει ως αποτέλεσμα μέρος των σωματιδίων ρευστοποίησης (με χαμηλό βάρος) να εισέρχονται στο ρεύμα εξόδου. Τα σωματίδια αυτά πρέπει να διαχωριστούν από τη ροή εξόδου, διεργασία η οποία πραγματοποιείται συνήθως με τη χρήση συστήματος κυκλώνων και ηλεκτροστατικών φίλτρων. Η επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης των διατάξεων αυτών αποτελεί ένα δύσκολο σχεδιαστικά και αρκετά ακριβό πρόβλημα.

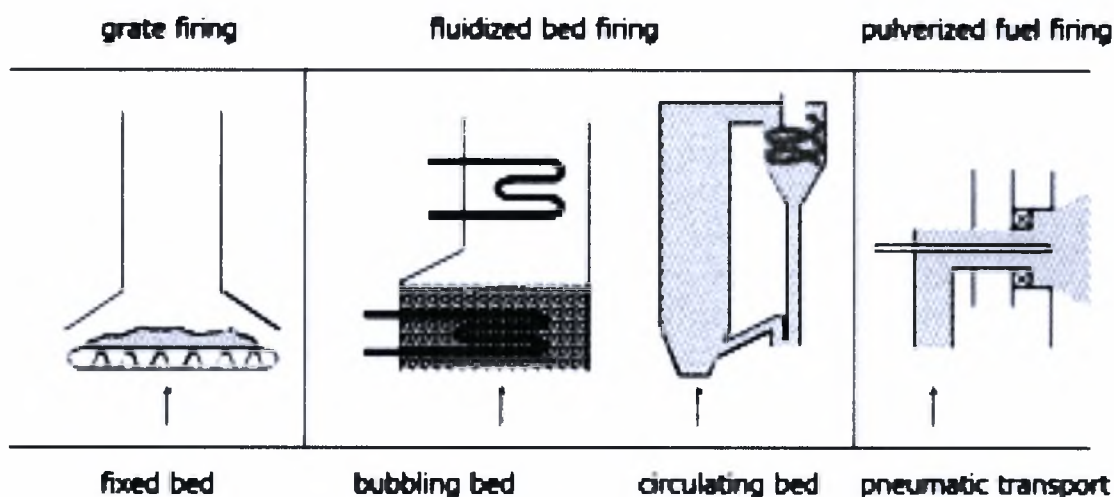
Διάβρωση των εσωτερικών τοιχωμάτων: Η τριβή των στερεών σωματιδίων ρευστοποίησης με τα τοιχώματα του θαλάμου δημιουργεί σημαντική φθορά στα τελευταία. Η ύπαρξη υψηλών θερμοκρασιών και ενώσεων του θείου επιβαρύνει την κατάσταση, επιβάλλοντας αυξημένο κόστος αρχικού σχεδιασμού και συντήρησης.

Έλλειμμα γνώσης των φαινομένων: Το τρέχον επίπεδο γνώσης και κατανόησης των ρευστοδυναμικών φαινομένων και των διεργασιών καύσης στο εσωτερικό της κλίνης είναι αρκετά περιορισμένο λόγω της πολυπλοκότητας τους. Η μοντελοποίηση βασίζεται σε ημι-εμπειρικά μοντέλα τα οποία είναι άμεσα εξαρτημένα από μετρήσεις είτε σε πιλοτική κλίμακα είτε σε διατάξεις βιομηχανικής εφαρμογής. Το scaling-up των πιλοτικών διατάξεων πολλές φορές δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

1.3. Ρευστοποιημένες κλίνες καύσης (Fluidized bed combustors - FBC)

Οι ρευστοποιημένες κλίνες καύσης (Fluidized bed combustors - FBC) είναι μια υποκατηγορία των αντιδραστήρων ρευστοποιημένης κλίνης. Αποτελούν μια ευέλικτη τεχνολογία καύσης σε ό,τι αφορά το είδος της καύσιμης ύλης σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει στις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η δυνατότητα καύσης μια μεγάλης

ποικιλίας υγρών, αερίων και στερεών καυσίμων. Χαρακτηριστικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται είναι το βαριά αποστάγματα πετρελαίου, φυσικό αέριο, άνθρακας, βιομάζα, απορρίμματα, πλαστικά κ.α.). Η συχνότερη χρήση τους είναι για την καύση στερεών καυσίμων και απορριμμάτων χαμηλής θερμογόνου δύναμης. Η λειτουργία των ρευστοποιημένων κλινών καύσης βασίζεται στην ρευστοποίηση σωματιδίων στερεών καυσίμων και αδρανών υλικών (άμμος, ασβεστόλιθος, στάχτη) ως αποτέλεσμα της ροής του ατμοσφαιρικού αέρα καύσης. Η λειτουργία των αδρανών υλικών θα αναλυθεί παρακάτω.



Εικόνα 5 Συστήματα καύσης στερεών καυσίμων. Α) Σταθερή κλίνη, Β) Φυσαλιδωτή ρευστοποιημένη κλίνη, Γ) ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας, Δ) Κονιορτοποίηση στερεού καυσίμου.

Η τυρβώδης ανάμιξη της αέριας μάζας και των στερεών αιωρούμενων σωματιδίων της καύσιμης ύλης προσφέρει αποδοτικότερη καύση, ενώ η ρευστοποίηση των αδρανών βελτιώνει τους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας εντός του θαλάμου καύσης. Σημαντική είναι και η διάσπαση των στερεών καυσίμων από τη σύγκρουσή τους με τα υπόλοιπα στερεά υλικά ρευστοποίησης, μειώνοντας έτσι την απαίτηση για ύπαρξη συνθλιπτή στην είσοδο του καυσίμου. Οι θερμοκρασίες στον θάλαμο καύσης σταθεροποιούνται με την απαγωγή σημαντικού μέρους θερμότητας από τα καυσαέρια προς το λέβητα που περικλείει τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης. Οι ρευστοποιημένες κλίνες εξελίχθηκαν λόγω των προσπαθειών να βρεθεί μια διεργασία καύσης με εγγενή έλεγχο των εκπομπών ρύπων, αποφεύγοντας με αυτό το τρόπο τις πρόσθετες διατάξεις αντιρρύπανσης.

Βασική απαίτηση είναι η προεπεξεργασία της στερεάς καύσιμης ύλης ώστε να έχει ένα ομοιόμορφο μέγεθος, χωρίς όμως να υπάρχει ανάγκη για κονιορτοποίηση, διεργασία που επιβαρύνει σημαντικά το κόστος λειτουργίας. Το επιπλέον κόστος επεξεργασίας της στερεάς καύσιμης ύλης, που είναι κοινό για όλες τις αντίστοιχες διατάξεις, αντισταθμίζεται από την μειωμένη ανάγκη για χρήση συστημάτων αντιρρύπανσης του καυσαερίου, ως αποτέλεσμα του τρόπου καύσης. Γενικά, το μέγεθος των συστημάτων αυτών είναι περιορισμένο γεγονός που δίνει προβάδισμα στα συγκεκριμένα συστήματα, έναντι των συμβατικών συστημάτων καύσης στερεών, για εφαρμογές μικρής κλίμακας.

1.3.1. Τύποι ρευστοποιημένων κλινών καύσης

Υπάρχουν συνολικά τέσσερις τύποι σχεδιασμού καυστήρων ρευστοποιημένης κλίνης. Σε όρους ταχύτητας ρευστοποίησης οι διατάξεις χωρίζονται σε δύο κατηγορίες.

1. Φυσαλιδωτές κλίνες καύσης (Bubbling Fluidised Bed Combustors - BFBC) σε χαμηλές ταχύτητες ρευστοποίησης. Ο σχεδιασμός αυτού του τύπου της κλίνης επιβάλλει μια οιοονεί στατική αιώρηση των σωματιδίων. Το μέγεθος της κλίνης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και τις ιδιότητες των σωματιδίων και επιλέγεται έτσι ώστε το μεγαλύτερο μέρος των σωματιδίων αιώρησης να παραμένει εντός της κλίνης. Τα σωματίδια τα οποία διαφεύγουν με τα καυσαέρια εισέρχονται σε ένα αρκετά μεγάλων διαστάσεων θάλαμο ηρεμίας (freeboard), όπου επιβραδύνονται σημαντικά και τα μεγαλύτερα από αυτά καταπίπτουν. Τα μικρότερης διαμέτρου σωματίδια (fine particles) που διαφεύγουν από το θάλαμο ηρεμίας χρειάζονται πρόσθετες συσκευές για την κατακράτησή τους.
2. Κλίνες καύσης ανακυκλοφορίας (Circulating Fluidised Bed Combustors - CFBC) σε υψηλές ταχύτητες ρευστοποίησης. Σε αυτού του τύπου τις κλίνες οι υψηλές ταχύτητες ρευστοποίησης παρασύρουν σημαντικό μέρος των σωματιδίων ρευστοποίησης προς την έξοδο της κλίνης μαζί με τα καυσαέρια. Το ρεύμα εισέρχεται σε κυκλώνα διαχωρισμού, ο οποίος διαχωρίζει σημαντικό μέρος της στερεής φάσης η οποία περιλαμβάνει και καύσιμο που δεν πρόλαβε να καεί. Το ρεύμα των στερεών, που περιλαμβάνει άκαυστο καύσιμο, στάχτη και υλικά ρευστοποίησης, επιστρέφει στο θάλαμο καύσης (ανακυκλοφορία). Ένα σύστημα ελέγχου καθορίζει την παροχή του καυσίμου ώστε να εξασφαλίζει τις κατάλληλες συνθήκες καύσης. Αποστραγγίσεις στο κάτω μέρος της κλίνης απομακρύνουν μέρος της στάχτης που προορίζεται για άλλες χρήσεις (π.χ. αγροτικά λιπάσματα).

Οι παραπάνω κατηγορίες χωρίζονται σε δύο ακόμη τύπους ανάλογα με την πίεση λειτουργίας των λεβήτων: ατμοσφαιρικές κλίνες (ABFBC και ACFBC) και κλίνες υπό πίεση (PBFBC και PCFBC). Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει κάποια βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας.

Πίνακας 1 Χαρακτηριστικά λειτουργίας BFBC και CFBC

		BFBC	CFBC
Θερμοκρασία λειτουργίας	[°C]	750 -950	
Πίεση λειτουργίας	[bar]	1-20	1(→20)
Ταχύτητα ρευστοποίησης	[m/s]	1-3	6-15
Μέση διάμετρος σωματιδίων	[mm]	1-2	0.2-0.5
Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο τοίχωμα	[W/m ² K]	250-300	80-250
Παραγόμενη ισχύς	[MW/m ²]	≈ 0.7 x (gas velocity) x (pressure)	

1.3.2. Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Οι ρευστοποιημένες κλίνες καύσης προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών συστημάτων σε ό,τι αφορά τους παραγόμενους ρύπους [1].

1. Η τεχνολογία αυτή καίει την καύσιμη ύλη σε θερμοκρασίες (800-900 °C) σημαντικά κάτω από τη θερμοκρασία τήξης της στάχτης για σχηματισμό στερεών υπολειμμάτων.
2. Η διαδικασία απόπλυσης για την απομάκρυνση των σωματιδίων ρευστοποίησης με εμβάπτιση σε νερό αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας και επομένως τη συνολική απόδοση.
3. Η διάταξη έχει σημαντική θερμοχωρητικότητα που επιτρέπει τη καύση ποικίλων τύπων καυσίμου, περιλαμβάνοντας χαμηλής ποιότητας καύσιμα, καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, ή μίγματα καυσίμων.
4. Ο σχηματισμός οξειδίων του αζώτου είναι μειωμένος λόγω της λειτουργίας σε χαμηλές θερμοκρασίες, αρκετά κάτω από τη θερμοκρασία σχηματισμού τους (~1400 °C), ενώ το σύστημα προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για βαθμιαία εισαγωγή αέρα προς καύση.
5. Περίπου το 90% των ενώσεων του θείου που σχηματίζονται κατά την καύση μπορούν να δεσμευθούν από κατάλληλα προσροφητικά υλικά (ασβεστόλιθος¹ ή δολομίτης²)

Βεβαίως σε καμιά περίπτωση δεν σημαίνει ότι οι ρευστοποιημένες κλίνες εκμηδενίζουν τις εκπομπές ρύπων από την καύση στερεών καυσίμων, δεδομένου ότι τα οφέλη από τη δραστική μείωση των NOx και SOx αντισταθμίζονται από τις αυξημένες εκπομπές CO₂ και αρωματικών πολυκυκλικών υδρογονανθράκων (ανάλογα με το καύσιμο).

Κάποια από τα μειονεκτήματα που έχουν τα συγκεκριμένα συστήματα καύσης είναι [1]

1. Δεν υπάρχει ευρεία εμπορική κλίμακα εφαρμογής, επομένως τα οφέλη σε πραγματική εφαρμογή είναι υπό συζήτηση
2. Τα συστήματα παράγουν σημαντικές ποσότητες στερεών υπολειμμάτων (με την προσθήκη προσροφητικών υλικών), μερικά εκ των οποίων απαιτούν ειδική μέριμνα κατά την απόρριψή τους.
3. Υπάρχουν αυξημένα επίπεδα N₂O (με χρήση κάρβουνου/κωκ ή παρόμοιων καυσίμων) λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών καύσης.

Η ραγδαία αύξηση της χρήσης των ρευστοποιημένων κλινών καύσης τα τελευταία χρόνια οφείλεται κυρίως σε δύο λόγους:

¹ Ασβεστόλιθος: (Αγγλ. Limestone)

² Δολομίτης: (Αγγλ. Dolomite)

1. Την ελεύθερη επιλογή σε ό,τι αφορά τη καύσιμη ύλη, γεγονός που τις καθιστά προνομιακή τεχνολογία για την αποτέφρωση των αστικών απορριμμάτων.
2. Τη δραστική μείωση των εκπομπών NO_x και SO_x μέσα στο θάλαμο καύσης χωρίς τη χρήση επιπλέον συστημάτων.

1.3.3. Εκπομπές ρύπων CFBC

Οι ρευστοποιημένες κλίνες ανακυκλοφορίας παρουσιάζουν μειωμένες εκπομπές τοξικών ρύπων. Οι υψηλοί συντελεστές απόδοσης καύσης συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών CO, ενώ η αυτή διεργασία παρουσιάζει μειωμένες εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x) και οξειδίων του αζώτου (NO_x).

Στην περίπτωση των εκπομπών του θείου ο ασβεστόλιθος (αδρανές υλικό) συμβάλλει στην απομάκρυνση των θειούχων ενώσεων που παράγονται κατά την καύση, δεσμεύοντας τα SO₂ με μια χημική διεργασία προσρόφησης. Το παραγόμενο υπόλειμμα της διεργασίας απομακρύνεται από τη διάταξη.

Οι χαμηλές θερμοκρασίες καύσης και η σταδιακή εισαγωγή του αέρα καύσης παρεμποδίζει τις αντιδράσεις σχηματισμού οξειδίων του αζώτου από το άζωτο του ατμοσφαιρικού αέρα. Συστήματα μετεπεξεργασίας καυσαερίου απομακρύνουν σε μεγάλο βαθμό (>60%) τα οξείδια του αζώτου που σχηματίζονται από την οξείδωση των νιτρικών ενώσεων του καυσίμου.

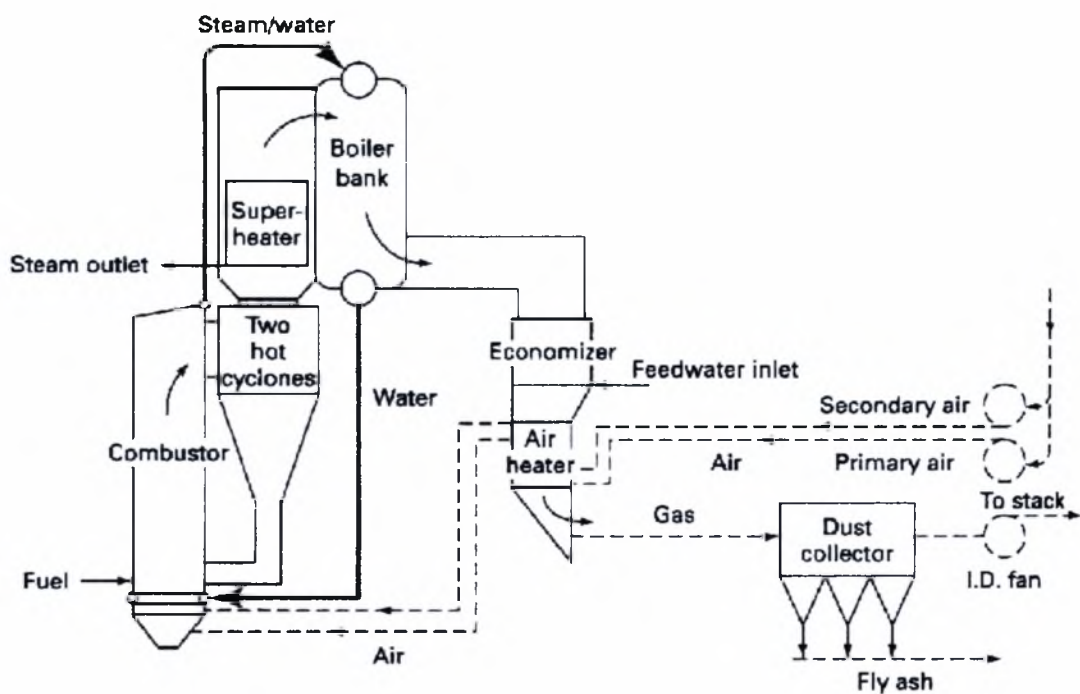
Από την άλλη πλευρά η καύση σε χαμηλές θερμοκρασίες συνεπάγεται αυξημένες εκπομπές πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων, όταν χρησιμοποιούνται ορυκτά καύσιμα.

Κυκλώνες, ηλεκτροστατικά φίλτρα και σακόφιλτρα χρησιμοποιούνται για να απομακρύνουν τα αιωρούμενα σωματίδια (PM10) από τα καυσαέρια με βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο του 99%.

Η παραγόμενη στάχτη από την καύση δεσμεύεται και απομακρύνεται από τη διάταξη προς άλλες χρήσεις

1.3.4. Περιγραφή λειτουργίας συστημάτων CFBC

Η Εικόνα 6 παρουσιάζει ένα τυπικό σύστημα παραγωγής υπέρθερμου ατμού από μια διάταξη ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας. Το σύστημα περιλαμβάνει τη ρευστοποιημένη κλίνη (combustor) και δύο κυκλώνες για το διαχωρισμό αέριας και στερεής φάσης. Ο εκτονωμένος ατμός από το σύστημα παραγωγής ενέργειας επιστρέφει στον βραστήρα (boiler) μέσω ενός εξοικονομητή ενέργειας (economizer). Η θέρμανση του νερού γίνεται από τον λέβητα στα παράπλευρα τοιχώματα της ρευστοποιημένης κλίνης και η υπερθέρμανσή του από εναλλάκτες θερμότητας στον χώρο των καυσαερίων. Ο εξοικονομητής ενέργειας χρησιμοποιείται και για την προθέρμανση του αέρα καύσης. Η έξοδος των καυσαερίων συνοδεύεται από σύστημα συλλογής της αιωρούμενης στάχτης (dust collector).



Εικόνα 6 Βιομηχανική διάταξη συστήματος CFBC για παραγωγή ατμού.

Τα συστήματα του είδους απαιτούν υποβοήθηση από κάποιο καύσιμο υψηλής ποιότητας για την έναρξη και την σταθεροποίηση της λειτουργίας. Αρχικά ο θάλαμος καύσης και τα υλικά ρευστοποίησης προθερμαίνονται με χρήση βοηθητικού καυσίμου. Σταδιακά αυξάνεται η παροχή μάζας του στερεού καυσίμου και μειώνεται η παροχή του βοηθητικού καυσίμου. Στο κατώτερο μέρος του θαλάμου καύσης απελευθερώνονται οι πτητικές ενώσεις του καυσίμου, σημαντικό ποσοστό των οποίων καίγεται ακαριαία αναλόγως του καυσίμου. Τα προϊόντα της καύσης και ο αέρας αναμιγνύονται πλήρως με τα υλικά ρευστοποίησης και τα εναπομείναντα απανθρακωμένα σωματίδια. Η καύση αυτών των σωματιδίων η οποία είναι μια σαφώς βραδύτερη διεργασία ολοκληρώνεται σταδιακά στα υψηλότερα στρώματα της κλίνης. Η συμβολή των υλικών ρευστοποίησης σε αυτή τη διεργασία είναι σημαντική. Λόγω της θερμικής τους μάζας και της κίνησης τους διατηρούν ομοιόμορφη τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης εξαλείφοντας τις τοπικές διαφορές θερμοκρασίας που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε τοπικό «σβήσιμο της φλόγας». Η κίνηση τους επίσης εξασφαλίζει έντονη ανάδευση των αερίων μαζών επιτυγχάνοντας ισοκατανομή του διαθέσιμου αέρα προς καύση. Τέλος η σύγκρουση των υλικών ρευστοποίησης με τα απανθρακωμένα σωματίδια συμβάλλει στη μείωση του μεγέθους των τελευταίων και την απομάκρυνση του εξωτερικού στρώματος στάχτης από αυτά εξασφαλίζοντας πληρέστερη καύση. Σε αρκετές περιπτώσεις γίνεται χρήση προσροφητικών υλικών ρευστοποίησης για την διαχείριση των εκπομπών SO_x .

Σημαντικό μέρος της θερμότητας που παράγεται από την καύση απάγεται από τον λέβητα που περικλείει τον θάλαμο καύσης. Η παροχή του λέβητα ρυθμίζεται ώστε να διατηρεί τη

θερμοκρασία στο εσωτερικό του θαλάμου σε ένα εύρος 800-900°C που εμποδίζει το σχηματισμό NO_x από το άζωτο του ατμοσφαιρικού αέρα. Το καυσαέριο που διαφεύγει από την κλίνη διαχωρίζεται από σύστημα κυκλώνων. Η αέρια φάση οδηγείται μέσα από εναλλάκτες θερμότητας για την απόρριψη σημαντικού μέρους της θερμότητάς της. Σε αυτούς τους εναλλάκτες γίνονται και η κύρια θέρμανση του θερμού προϊόντος της διάταξης. Η στερεή φάση, η οποία περιλαμβάνει τα υλικά ρευστοποίησης και άκαυστη μάζα, συγκεντρώνεται στο σύστημα ανακυκλοφορίας για την επαναπροώθησή της στον θάλαμο καύσης. Το σύστημα ανακυκλοφορίας είναι εξοπλισμένο συνήθως με εναλλάκτες θερμότητας για την ανάκτηση μέρους της θερμότητας των στερεών.

Το καυσαέριο, το οποίο περιλαμβάνει σημαντικό ποσό αιωρούμενης στάχτης, χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του αέρα και του προϊόντος πριν εισέλθει στις επιπλέον διατάξεις αντιρρύπανσης. Οι διατάξεις αυτές περιλαμβάνουν συστήματα κατακράτησης της στάχτης (σακόφιλτρα, ηλεκτροστατικά φίλτρα, θαλάμους ηρεμίας) και επιπλέον διατάξεις αντιρρύπανσης ανάλογα με την εφαρμογή. Η θερμοκρασία εξόδου του καθαρισμένου καυσαερίου είναι της τάξης των 120-150°C.

1.4. Εφαρμογές Βιομηχανικής Κλίμακας

1.4.1. JEA Northside Generating Station (Jacksonville)

Ο ηλεκτροπαραγωγός σταθμός **JEA Northside Generating Station** στο Jacksonville της Florida χρησιμοποιεί δύο μονάδες CFBC ισχύος 300MW η καθεμία, που τέθηκαν σε λειτουργία το 2002. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι λιθάνθρακας και πετ-κωκ. Ο παραγόμενος υπέρθερμος ατμός οδηγείται σε στροβίλους, που λειτουργούν σε ένα τυπικό κύκλο ατμού, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Οι εκπομπές ρύπων από τις δύο μονάδες μετρήθηκαν το καλοκαίρι του 2002. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τις τιμές των εκπομπών ρύπων συγκριτικά με την αντίστοιχη νομοθεσία.

Πίνακας 2 Μετρήσεις εκπομπών ρύπων του JEA Northside Generating Station (600MW)

Ρύπος	Μονάδες	Όρια Νομοθεσίας	Καύσιμο: λιθάνθρακας	Καύσιμο: πετ-κωκ
SO ₂	lb/MMBTU	≤ 0.15	0.0-0.04	0.03-0.13
NO _x	lb/MMBTU	≤ 0.09	0.04-0.06	0.02
Στερεά σωματίδια	lb/MMBTU	≤ 0.011	0.004	0.007

PM10	lb/MMBTU	≤ 0.011	0.006	0.004
SO ₃	lb/hr	≤ 1.1	0.43	0.0
Φθόριο	lb/MMBTU	≤ 1.57×10 ⁻⁴	1.06×10 ⁻⁴	0.95×10 ⁻⁴
Μόλυβδος	lb/MMBTU	≤ 2.6×10 ⁻⁵	0.56×10 ⁻⁵	0.59×10 ⁻⁵
Υδράργυρος	lb/MMBTU	≤ 1.05×10 ⁻⁵	0.095×10 ⁻⁵	0.028×10 ⁻⁵

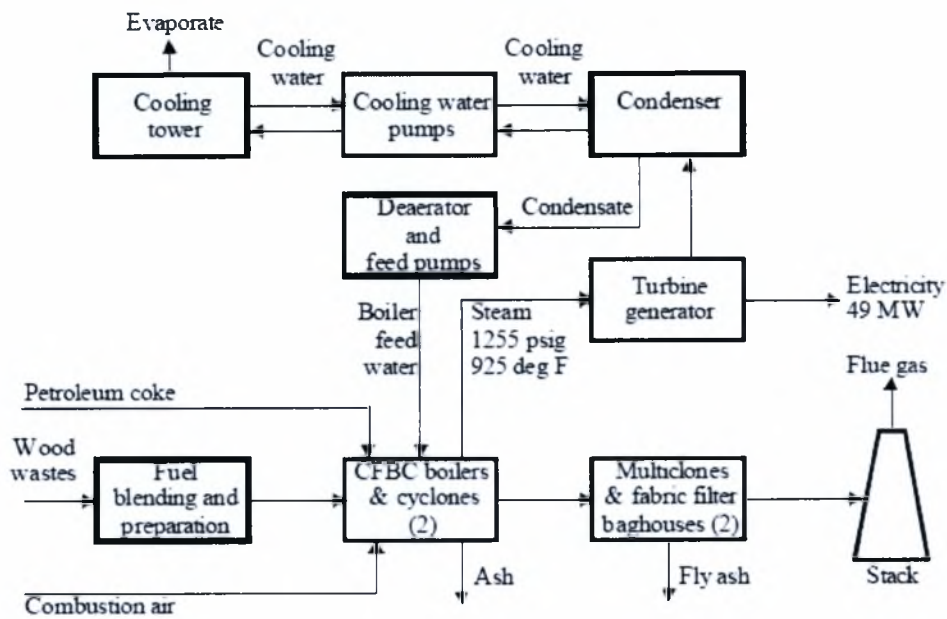
1.4.2. Colmac Energy (Mecca)

Ο ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Colmac Energy στη Mecca της California χρησιμοποιεί δύο μονάδες CFBC για την συνολική παραγωγή 49 MW ηλεκτρικής ενέργειας. Τέθηκε πρώτη φορά σε λειτουργία το 1992. Χρησιμοποιεί σαν κύριο καύσιμο αστικά κατάλοιπα ξύλου, υπολείμματα εσπεριδοειδών και απορρίμματα κλαδέματος και γεωργικών εργασιών και σαν εναλλακτικό πετ-κωκ. Ο θερμικός βαθμός της εγκατάστασης είναι 28%. Ο Πίνακας 3 δείχνει κάποια στατιστικά στοιχεία για την ενεργειακή απόδοση του εργοστασίου

Πίνακας 3 Στατιστικά στοιχεία ενεργειακής απόδοσης σταθμού ηλεκτροπαραγωγής Colmac Energy

Design capacity, net MWe	~49 (see discussion below)			
Configuration	2 circulating FBC boilers			
Fuels:	Urban wood wastes Agricultural wood wastes Petroleum coke			
Year	1995	1996	1997	1998*
Net generation, MWh year	368.000	395.000	382.000	393.000
Annual CF, %	85.8	92.1	89.0	91.6
Net heat rate, Btu/kWh	12.400-12.200			
Thermal efficiency, HHV, %	27.5-28.0			

Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι το εργοστάσιο χρησιμοποιώντας ως καύσιμο τα υπολείμματα ξύλου και αναπτύσσοντας ένα μεγάλο δίκτυο συλλογής τους, πρακτικά εξαφάνισε τη διάσπαρτη καύση τους στη γύρω περιοχή.



Εικόνα 7 Διάγραμμα ροής σταθμού ηλεκτροπαραγωγής Colmac Energy

Το εργοστάσιο είναι εξοπλισμένο με δυο λέβητες της ABB και με εξοπλισμό αντιρρύπανσης που περιλαμβάνει πολλαπλούς κυκλώνες και σακόφιλτρα για τις εκπομπές σωματιδιακών ρύπων. Η διαχείριση των SO_x και NO_x γίνεται μέσα στους θαλάμους καύσης με χρήση ασβεστόλιθου και έγχυση αμμωνίας αντίστοιχα.

1.5. Στόχος της παρούσας εργασίας

Λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων των καυστήρων ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας για καύση στερεών καυσίμων χαμηλής ποιότητας για την παραγωγή ενέργειας, ένας σημαντικός αριθμός ερευνητών ασχολήθηκε με τη μελέτη της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Οι πιο πρόσφατες έρευνες εστιάζουν στην ποσοτικοποίηση και την εξήγηση της συμπεριφοράς αλληλεπίδρασης των φάσεων μέσα στην κλίνη. Συγκεκριμένη θεματολογία της έρευνας αποτελεί η διακύμανση του μεγέθους των σωματιδίων που καίγονται, ο υπολογισμός διαφόρων συντελεστών μετάδοσης θερμότητας, οι επιδράσεις της ταχύτητας ρευστοποίησης και της πτώσης πίεσης και η υπολογιστική μοντελοποίησης.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός υπολογιστικού μοντέλου, το οποίο θα μελετά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας διατάξεων CFBC από μηχανολογική σκοπιά. Σκοπός είναι να λαμβάνει υπόψη του το θεωρητικό υπόβαθρο που έχει αναπτυχθεί μέχρι τώρα και να το χρησιμοποιήσει με απλουστευμένο τρόπο για την μοντελοποίηση διάταξης CFBC σε διάφορες χαρακτηριστικές λειτουργίας.

Το μοντέλο θα αναπτυχθεί με τη χρήση εμπορικού λογισμικού και επιπλέον ρουτινών υπολογισμού όπου χρειάζεται. Σκοπός δεν είναι να δώσει μια λεπτομερειακή εικόνα των διεργασιών στο εσωτερικό της κλίνης, αλλά να προβλέψει με σχετική ακρίβεια χαρακτηριστικά λειτουργίας όπως

- a) Συνολική θερμική απόδοση της διάταξης
- b) Εκπομπές ρύπων στην έξοδο της διάταξης
- c) Προφίλ θερμοκρασιών και ταχυτήτων στη κλίνη
- d) Ορθή διαστασιολόγηση των διαφόρων συσκευών

Η διαμόρφωση της παρούσας διατριβής έχει ως εξής. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια θεωρητική προσέγγιση των διατάξεων του είδους βάσει βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Η μελέτη εστιάζει τόσο στο ρευστοδυναμικό κομμάτι της διασπαικής ροής όσο και στο κομμάτι της χημείας της καύσης και του σχηματισμού ρύπων.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται η παρουσίαση μιας διάταξης πιλοτικής κλίμακας η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την ρύθμιση και πιστοποίηση του μοντέλου. Παρουσιάζονται επίσης κάποιοι μακροσκοπικοί υπολογισμοί διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας της διάταξης, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν για την διασταύρωση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται αναλυτική παρουσίαση του μοντέλου που αναπτύχθηκε και των παραδοχών που χρησιμοποιήθηκαν. Παρουσιάζονται τα μοντέλα για κάθε τμήμα της διάταξης.

Το κεφάλαιο 5 παρουσιάζει την διασταύρωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου για διάφορες περιπτώσεις που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου γίνεται μια παραμετρική μελέτη των συνθηκών λειτουργίας της πιλοτικής διάταξης με στόχο να εξαχθούν κάποιοι χάρτες λειτουργίας που θα συνδυάζουν παροχές μάζας και καυσίμου με διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 θα παρουσιαστούν κάποιες προτάσεις για μελλοντική επέκταση του μοντέλου σε πεδία που δεν περιελήφθησαν στην παρούσα εργασία.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των βασικότερων εργασιών που έχουν γίνει γύρω από τις ρευστοποιημένες κλίνες ανακυκλοφορίας για καύση βιομάζας. Σκοπός του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση των διαφορετικών προσεγγίσεων της μοντελοποίησης δίνοντας έμφαση σε απλοποιημένα μοντέλα, που στόχο έχουν τη παραμετρική μελέτη των συνθηκών λειτουργίας της διάταξης και το σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου αυτής από μηχανολογική σκοπιά.

Το κεφάλαιο χωρίζεται από τη φύση του σε τρεις ενότητες. Η πρώτη ενότητα συνδυάζεται με τις έρευνες που έχουν γίνει γύρω από ρευστοδυναμικά μοντέλα για την ερμηνεία και την μοντελοποίηση της ρευστοποίησης στο εσωτερικό της κλίνης. Η δεύτερη ενότητα αναφέρεται στα μοντέλα καύσης και στα μοντέλα σχηματισμού και δέσμευσης ρύπων. Η τρίτη και τελευταία ενότητα του κεφαλαίου είναι μια βιβλιογραφική αναφορά στις προσεγγίσεις μοντελοποίησης σε διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας.

2.1. Ρευστοδυναμικά φαινόμενα στο εσωτερικό της κλίνης

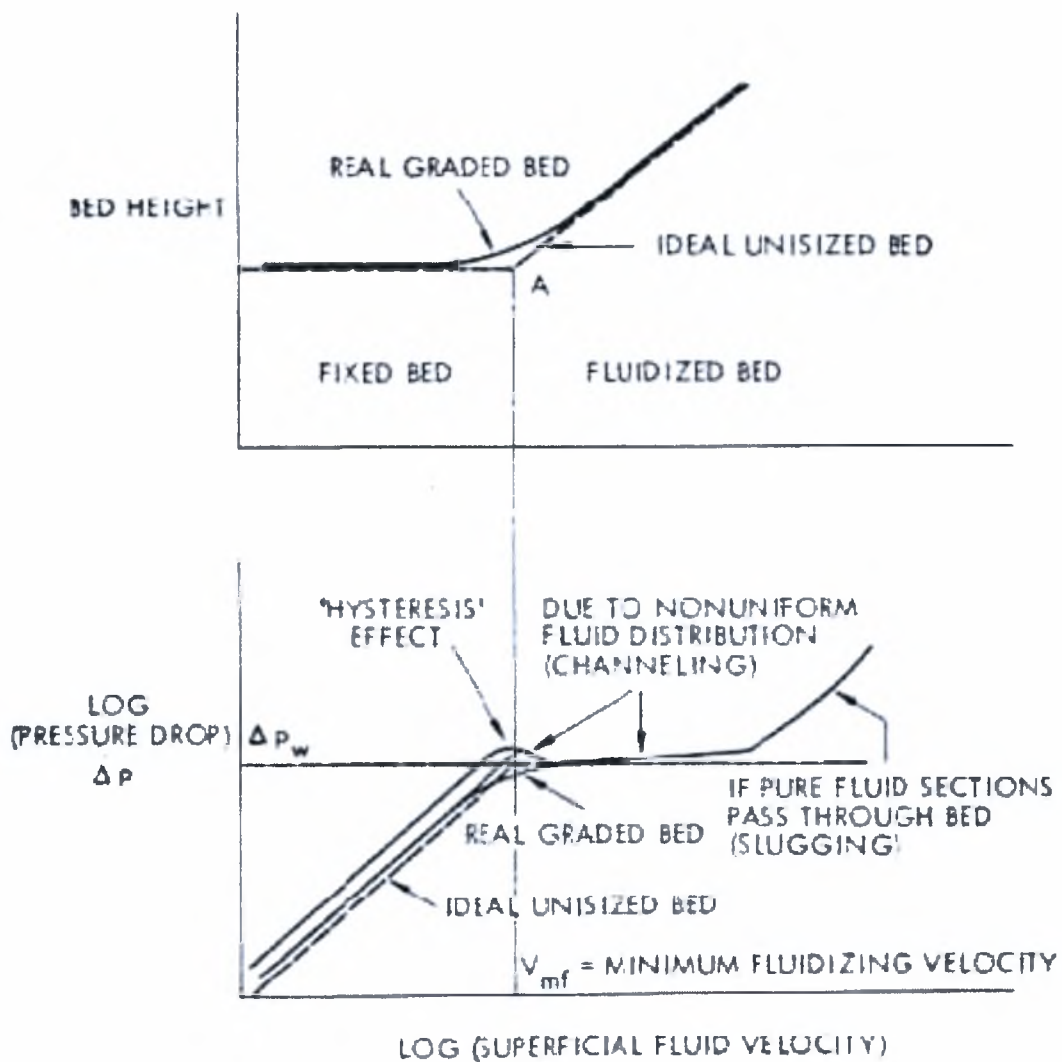
Οι ρευστοποιημένες κλίνες ανακυκλοφορίας χωρίζονται σε δύο διακριτές ζώνες με σημαντικές διαφορές στα υδροδυναμικά τους χαρακτηριστικά: την κατώτερη και την ανώτερη ζώνη. Βασικό κριτήριο διαχωρισμού των δύο ζωνών αποτελούν τα ιδιαίτερα ροϊκά χαρακτηριστικά. Σημαντική παράμετρος για την μοντελοποίηση της κλίνης είναι ο ορισμός των διακριτών ορίων κάθε περιοχής. Κρίσιμο μέγεθος είναι η επιδερμική ταχύτητα ρευστοποίησης, η οποία αποτελεί αναγκαία συνθήκη για την ορθή λειτουργία της κλίνης. Η πτώση πίεσης αποτελεί ένα ακόμη σημαντικό μέγεθος δεδομένου ότι καθορίζει την διαστασιολόγηση του φυσητήρα και επηρεάζει το ενεργειακό ισοζύγιο. Όλες οι παραπάνω παράμετροι λειτουργίας επηρεάζονται άμεσα από τις ιδιότητες των υλικών ρευστοποίησης αλλά και τις καταστατικές συνθήκες στο εσωτερικό της κλίνης.

2.1.1. Πτώση πίεσης

Η πτώση πίεσης στην ρευστοποιημένη κλίνη αποτελεί σημαντικό μέγεθος σχεδιασμού τόσο για την έναρξη της ρευστοποίησης όσο και για το συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο. Καθώς οι αέριες μάζες διαπερνούν τα σωματίδια που βρίσκονται σε ηρεμία η πτώση πίεσης εκφράζεται από τη σχέση υπολογισμού της πτώσης πίεσης σε σταθερή κλίνη (packed bed) (σχέση του Ergun)

$$\frac{\Delta p_{pb}}{H} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u}{(\Phi d_p)^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_F u^2}{\Phi d_p}$$

Καθώς η ταχύτητα ρευστοποίησης αυξάνεται η πτώση πίεσης αυξάνει έως ότου εξισορροπήσει το βάρος των σωματιδίων. Στην ιδανική περίπτωση περαιτέρω αύξησης της παροχής του έρα ρευστοποίησης επιφέρει μεταβολή στο ύψος της ρευστοποιημένης κλίνης ενώ η πτώση πίεσης παραμένει σταθερή.



Εικόνα 8 Επιρροή της ταχύτητας ρευστοποίησης στην πτώση πίεσης και το ύψος της κλίνης [6]

Η πτώση πίεσης σε συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης είναι

$$\frac{\Delta p_{fb}}{H_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_s - \rho_F)g$$

Με πειραματικές μετρήσεις της πτώσης πίεσης και του ύψους της κλίνης σε συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης μπορεί να βρεθεί ο κενός χώρος σε συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης.

2.1.2. Ταχύτητα ελάχιστης ρευστοποίησης

Η ταχύτητα ελάχιστης ρευστοποίησης U_{mf} είναι η ταχύτητα για την οποία επιτυγχάνεται οριακά η ρευστοποίηση μέσα στη κλίνη. Ο υπολογισμός της βασίζεται στην υπερνίκηση της βαρύτητας των σωματιδίων και προκύπτει από τη σχέση

$$150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi^2} Re_{mf} + \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi} Re_{mf}^2 = Ar$$

Αν επιλυθεί το παραπάνω πολυώνυμο ως προς Re_{mf} προκύπτει η γενική λύση συναρτήσει του αριθμού Ar^3

$$Re_{mf} = (a^{*2} + \beta^* Ar)^{0.5} - a^*$$

Με

$$Ar = \frac{d_p^3 g \rho_g (\rho_p - \rho_g)}{\mu^2}$$

$$a^* = 42.86 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\Phi}$$

$$\beta^* = \frac{\Phi \varepsilon_{mf}^3}{1.75}$$

Η ταχύτητα ελάχιστης ρευστοποίησης βρίσκεται από τον Re_{mf}

$$U_{mf} = \frac{\mu Re_{mf}}{d_p \rho_g}$$

Όπως φαίνεται από τις σχέσεις υπολογισμού η ταχύτητα ελάχιστης ρευστοποίησης συνδέεται άμεσα με τις ιδιότητες των υλικών ρευστοποίησης. Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται ευρέως στη βιβλιογραφία. Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει διάφορες δημοσιευμένες τιμές των a^* και β^* σε συνάρτηση με τις τιμές του κενού χώρου σε συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης και την σφαιρικότητα των σωματιδίων.

³ Η φυσική σημασία της διπλής ρίζας του πολυωνύμου αναφέρεται στις κλάσεις των σωματιδίων. Γενικά ο όρος $\frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi^2}$ μπορεί να απαλειφθεί για μεγάλα σωματίδια ενώ ο όρος $\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi}$ απαλείφεται για μικρά σωματίδια

Πίνακας 4 Σχέσεις υπολογισμού του αριθμού Reynolds σε συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης

	ϵ_{mf}	Φ^*	Ref.
$Re_{mf} = (27.2^2 + 0.408 Ar)^{0.5} - 27.2$	0.42-0.45	0.8 - 1	²
$Re_{mf} = (33.7^2 + 0.408 Ar)^{0.5} - 33.7$	0.49	0.65	³

2.1.3. Τερματική ταχύτητα

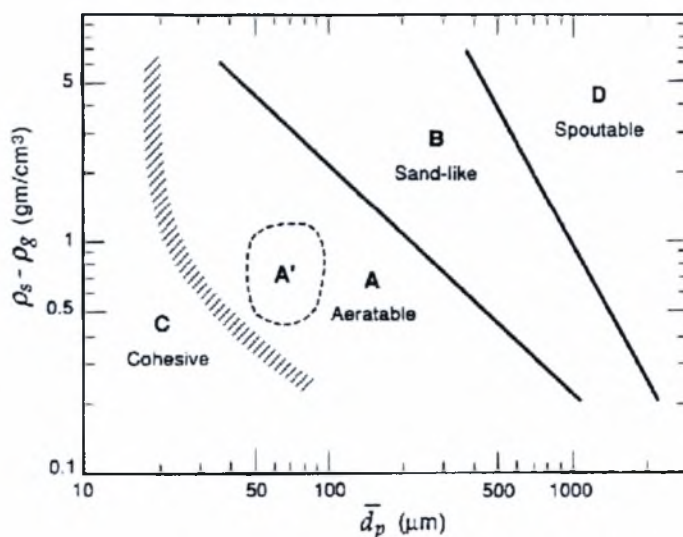
Μια κρίσιμη συνθήκη σχεδιασμού για τις ρευστοποιημένες κλίνες ανακυκλοφορίας είναι η υπέρβαση της τερματικής ταχύτητας των σωματιδίων ώστε να μπορέσουν να σε όλο το ύψος της διάταξης και να εισέλθουν τελικά στο ρεύμα ανακυκλοφορίας.

Τα υλικά ρευστοποίησης ωθούνται από την ροή του αέρα προς ανοδική πορεία. Στην κίνησή τους αυτή αντιτίθενται οι δυνάμεις του βάρους και η αεροδυναμική αντίσταση και καθώς προωθούνται επιβραδύνονται. Η οριακή συνθήκη που προκύπτει από την ισορροπία των δυνάμεων μας δίνει την τερματική ταχύτητα των σωματιδίων

βαρύτητα – ανωστικές δυνάμεις = δύναμη οπισθέλκουσας

$$m_p g - V_p \rho_g g = \frac{\pi}{8} C_D \rho_F u_t^2 d_p^2$$

Ο Geldart [⁴] πρότεινε την κατηγοριοποίηση των υλικών ρευστοποίησης σε τέσσερις κατηγορίες οι οποίες επιδεικνύουν διαφορετικές ιδιότητες κατά την ρευστοποίησή τους με αέρια. Η Εικόνα 9 παρουσιάζει τις κλάσεις των σωματιδίων αναφορικά με τις διαστάσεις και το ειδικό βάρος τους και ο .



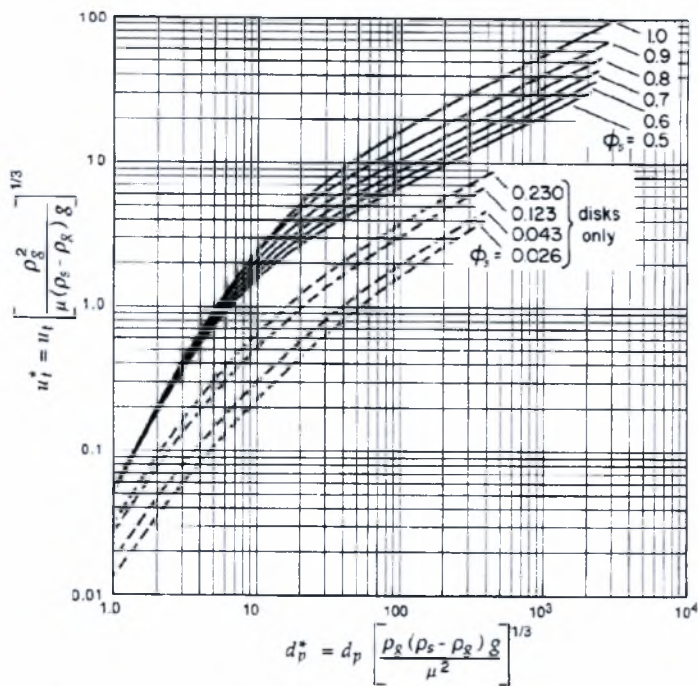
Εικόνα 9 Κατηγοριοποίηση των σωματιδίων ρευστοποίησης κατά Geldart [4]

Τα χαρακτηριστικά των υλικών ρευστοποίησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5 Χαρακτηριστικά υλικών ρευστοποίησης κατά Geldart

GROUP →	GROUP C	GROUP A	GROUP B	GROUP D
Most obvious characteristic	Cohesive. difficult to fluidize	Ideal for fluidization. Exhibits range of non-bubbling fluidization	Starts bubbling at U_{mf}	Coarse solids
Typical solids	Flour, Cement	Cracking catalyst	Building Sand	Gravel, Coffee beans
PROPERTY ▼				
Bed Expansion	Low because of channelling	High	Moderate	Low
De-aeration rate	Initially fast, then exponential	Slow, linear	fast	Fast
Bubble Properties	No bubbles - only channels	Bubbles split and coalesce. Maximum bubble size.	No limit to size	No limit to size
Solids Mixing	Very low	High	Moderate	Low
Gas Backmixing	Very low	High	Moderate	Low
Spouting	No	No	Only in shallow	Yes, even in deep beds

Η τερματική ταχύτητα των σωματιδίων υπολογίζεται από τα διαγράμματα για κάθε κατηγορία υλικών και ανάλογα με την εφαρμογή. Τέτοιου είδους διαγράμματα φαίνονται στην Εικόνα 10 και στην Εικόνα 11

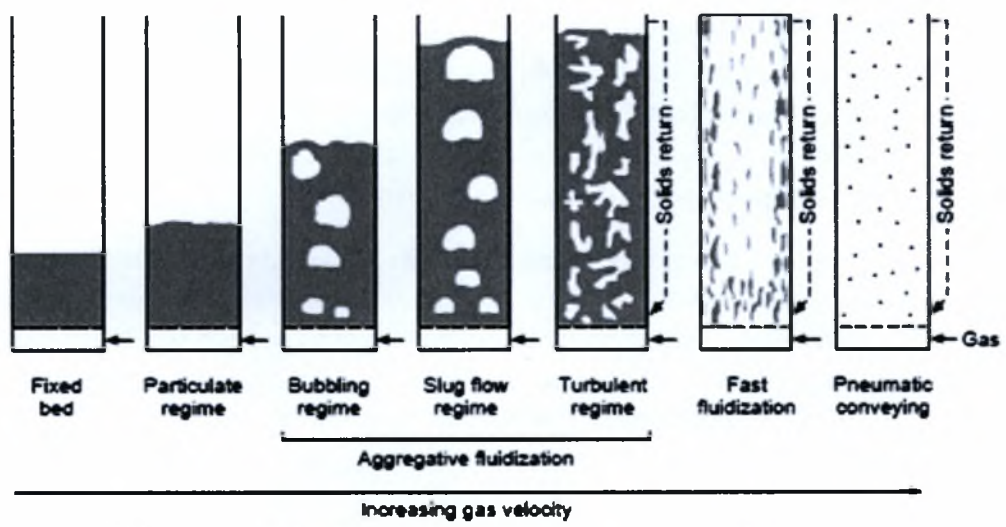
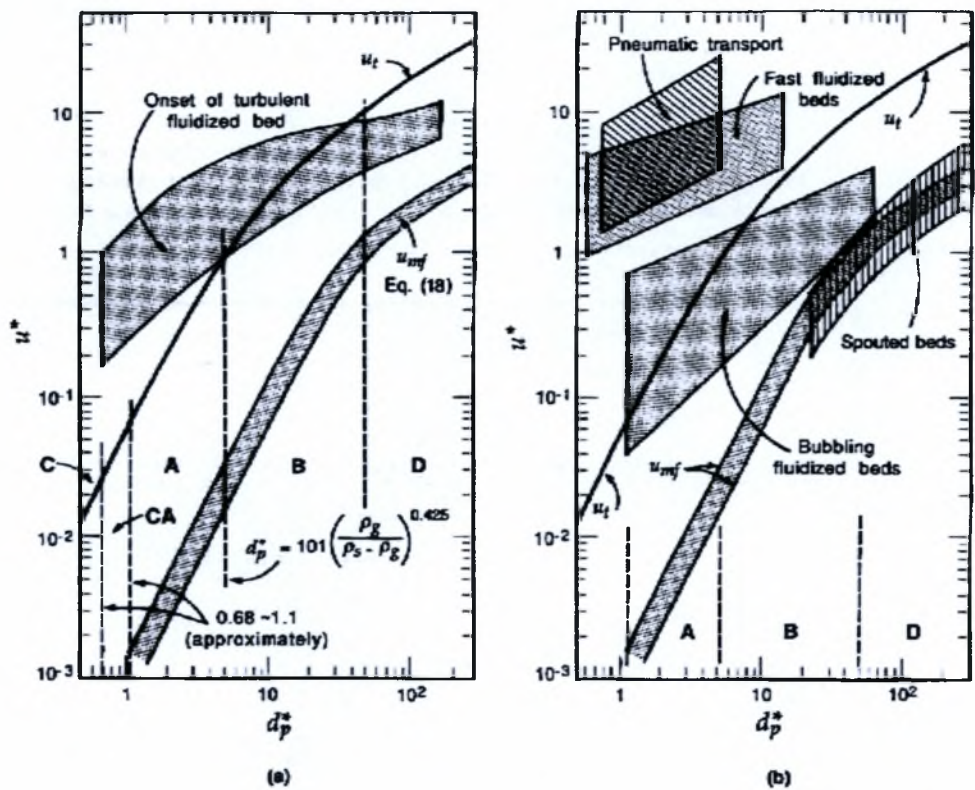


Εικόνα 10 Νομογράφημα εύρεσης τερματικής ταχύτητας [4]

Η διαδικασία εύρεσης της τερματικής ταχύτητας έχει ως εξής: για την αδιάστατη μέση διάμετρο των σωματιδίων ρευστοποίησης προεκτείνουμε μια παράλληλη στον άξονα y μέχρι την τομή με την αντίστοιχη καμπύλη σφαιρικότητας. Από το σημείο τομής προεκτείνουμε παράλληλη προς τον άξονα x για την εύρεση της αδιάστατης τερματικής ταχύτητας από την οποία βρίσκουμε την ζητούμενη τερματική ταχύτητα των σωματιδίων.

Ο Grace [5] σχημάτισε ένα διάγραμμα φάσεων και ένα διάγραμμα περιοχών λειτουργίας (Εικόνα 11) σύμφωνα με το οποίο όρισε τις περιοχές λειτουργίας των ρευστοποιημένων κλινών ανάλογα με τον τύπο τους και τα υλικά ρευστοποίησης. Για να εξασφαλιστεί η καλή λειτουργία της κλίνης θα πρέπει η τερματική ταχύτητα να βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων. Η περίπτωση της ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας εντάσσεται στις κλίνες ταχείας ρευστοποίησης (fast fluidized beds). Οι τυπικές τιμές της ταχύτητας ρευστοποίησης είναι

$$U > 200U_{mf}$$



Εικόνα 11 Περιοχές λειτουργίας ρευστοποιημένων κλινών ανάλογα με τα υλικά ρευστοποίησης και την θερματική ταχύτητα [4⁵]

2.1.4. Ζώνες ρευστοποίησης

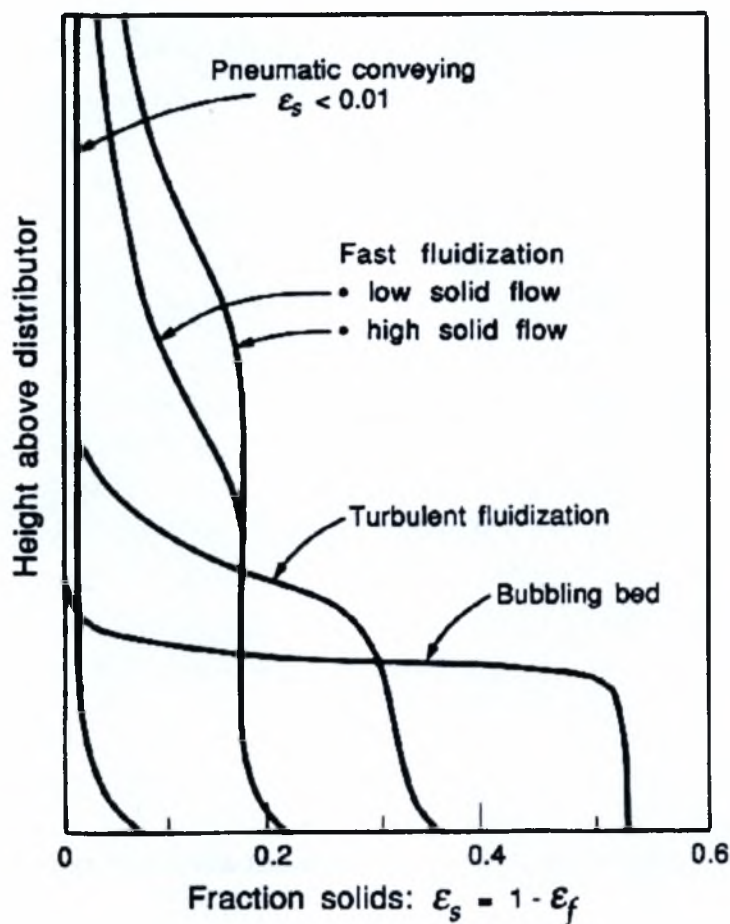
Κατά γενική παραδοχή στη βιβλιογραφία, η ρευστοποιημένη κλίνη χωρίζεται σε δυο κύριες περιοχές. Μια πυκνή κατώτερη περιοχή με σταθερή πυκνότητα αιώρησης (τυρβώδης ρευστοποίηση) και μια πιο αραιή ανώτερη περιοχή με μια φθίνουσα κατά ύψος πυκνότητα αιώρησης. Κορμό της συντριπτικής πλειοψηφίας των δημοσιευμένων εργασιών πάνω στα χαρακτηριστικά ρευστοποίησης αποτελεί το εγχειρίδιο των Kunii and Levenspiel [6]. Το ύψος της κάθε ζώνης εξαρτάται από την υπερκρίσιμη ταχύτητα, τη ροή μάζας των στερεών και τις ιδιότητες στερεών και ρευστών [7, 8].

Η πυκνή ζώνη περιγράφεται από τη διφασική ροή στερεού-ρευστού και χωρίζεται από δυο περιοχές. Τη περιοχή φυσαλιδωτής φάσης και την περιοχή της φάσης του γαλακτώματος των ανυψωμένων στερεών [9]. Η φάση του γαλακτώματος παραμένει σε ρευστοποίηση εφόσον η ταχύτητα της αέριας φάσης είναι υψηλότερη της υπερκρίσιμης ταχύτητας U_{mf} . Στην κατώτερη ζώνη η συγκέντρωση των στερεών διατηρείται σταθερή.

Η ανώτερη ζώνη περιγράφεται από τη διφασική ροή στερεού-ρευστού που υπάρχει στην κατώτερη ζώνη όμως χαρακτηρίζεται από τρεις περιοχές ανάλογα με την συγκέντρωση των στερεών υλικών ρευστοποίησης.

1. Τη ζώνη επιτάχυνσης η οποία βρίσκεται στο κατώτερο μέρος της ανώτερης ζώνης και στην οποία τα σωματίδια επιταχύνονται σε μια σταθερή ταχύτητα ανόδου.
2. Τη ζώνη της πλήρους ανεπτυγμένης ροής όπου τα ροϊκά χαρακτηριστικά παραμένουν αναλλοίωτα καθ' ύψος.
3. Τη ζώνη επιβράδυνσης όπου τα στερεά επιβραδύνονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά εξόδου από τον ανυψωτήρα.

Οι Kunii and Levenspiel [6] παραθέτουν μια γενικευμένη εκτίμηση της συγκέντρωσης των στερεών σωματιδίων καθ' ύψος της ρευστοποιημένης κλίνης (Εικόνα 12). Διακρίνονται καθαρά οι δύο ζώνες ρευστοποίησης ανά περίπτωση του τύπου ροής. Παρατηρείται ότι το ύψος της κατώτερης ζώνης μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες ρευστοποίησης ενώ η συγκέντρωση των στερεών παραμένει σταθερή για κάθε περίπτωση



Εικόνα 12 Συγκέντρωση στερεών σωματιδίων στην ρευστοποιημένη κλίνη μετά τον διανομέα αέρα ρευστοποίησης [6]

Οι Svensson et. al. [10] και οι Werther and Wein [11] έδειξαν ότι η ρευστοδυναμική συμπεριφορά της κατώτερης ζώνης είναι παρόμοια με αυτή της φυσαλιδωτής κλίνης ρευστοποίησης. Οι τελευταίοι πρότειναν και μια συσχέτιση για την εύρεση του κενού χώρου της πυκνής ζώνης βάσει μετρήσεων σε δύο πιλοτικής κλίμακας ρευστοποιημένες κλίνες χωρίς καύση.

Οι αδιάστατοι αριθμοί Re και Ar ορίζονται ως

Τα αποτελέσματα των Leckner et. al. [12] και Montat et. al. [13] έδειξαν ότι η καύση του άνθρακα, η ανάμιξη των σωματιδίων και η μετάδοση θερμότητας στην κατώτερη ζώνη επηρεάζουν τις συνθήκες ρευστοποίησης και είναι καθοριστικές παράμετροι για την συνολική

απόδοση της κλίνης. Οι Johnsson et. al. [14] τροποποίησαν τις παραμέτρους της παραπάνω εξίσωσης με βάση πειραματικές μετρήσεις με καύση.

$$\frac{(\varepsilon_d - \varepsilon_{mf})}{(1 - \varepsilon_{mf})} = 0.19Re_p^{0.77} Ar^{-0.31}$$

Ένας απλούστερος τρόπος υπολογισμού της μέσης τιμής του κενού χώρου στη πυκνή ζώνη συναρτήσει της ταχύτητας ρευστοποίησης παρατίθεται από τους Kunii and Levenspiel [6] θεωρώντας για συνθήκες ηρεμίας μέση τιμή κενού χώρου ίση με 0.5.

$$\varepsilon_d = -A1 \log(u_g) + A2$$

Τα A1 και A2 προσδιορίζονται πειραματικά. Ο Ngampradit [2] δίνει τιμές A1=0.884 και A2=0.279

Το ύψος της πυκνής ζώνης εξαρτάται από την υπερκρίσιμη ταχύτητα ρευστοποίησης, τη ροή μάζας των στερεών και τις ιδιότητες της στερεής και αέριας φάσης [8]. Λόγω των πολύπλοκων φαινομένων συνηθίζεται να προσδιορίζεται πειραματικά. Μια προσφιλή τακτική είναι το ύψος της πυκνής ζώνης να καθορίζεται ως η απόσταση του διανομέα του πρωτεύοντος αέρα ρευστοποίησης μέχρι το σημείο εισαγωγής του δευτερεύοντος αέρα ρευστοποίησης.

Ο κενός χώρος στην ζώνη της επιτάχυνσης μπορεί να προσεγγιστεί από τη παρακάτω σχέση [6]. Η ίδια σχέση υπολογίζει και το ύψος της ζώνης επιτάχυνσης αν όπου $\varepsilon(z)$ βάλουμε την τιμή του κενού χώρου της πλήρους ανεπτυγμένης ροής.

$$\frac{\varepsilon^* - \varepsilon(z)}{\varepsilon^* - \varepsilon_1} = \exp(-aZ)$$

Οι Adanez et. Al [15] προτείνουν μια σχέση υπολογισμού της σταθεράς εξασθένησης συναρτήσει της τερματικής ταχύτητας, της ταχύτητας ρευστοποίησης και της μέσης διαμέτρου των σωματιδίων με παραμέτρους ρυθμισμένες βάσει πειραματικών μετρήσεων.

$$a = \frac{3.45 - 2196d_p}{(U_o - U_t)^{1.44}}$$

Ο Ngampradit [2] ορίζει τον συντελεστή εξασθένησης από ένα διάγραμμα των Kunii and Levenspiel [6] ως

$$a = \frac{5}{U_t}$$

ο κενός χώρος σε συνθήκες κορεσμού ε^* μπορεί να θεωρηθεί ίσος με το choking voidage [2] που υπολογίζεται βάσει των παρακάτω εξισώσεων

$$\frac{U_{ch}}{\varepsilon_c} = U_t + \left[\frac{2gd(\varepsilon_c^{-4.7} - 1)\rho_p^{2.2}}{6.81 \times 10^5 \rho^{2.2}} \right]^{0.5}$$

$$G_s = (U_{ch} - U_t)(1 - \varepsilon_c)\rho_p$$

Η θερματική ταχύτητα υπολογίζεται από τον τύπο

$$U_t = \frac{\mu}{d\rho} \left(\frac{Ar}{7.5} \right)^{0.666}$$

Για το εύρος των τιμών της θερματικής ταχύτητας σε ρευστοποιημένες κλίμες ανακυκλοφορίας (Εικόνα 11) και για διάφορους τύπους υλικών ρευστοποίησης οι τιμές του κενού χώρου σε συνθήκες κορεσμού είναι μεγαλύτερες του 0.975.

Στην πλήρως ανεπτυγμένη ζώνη η μέση τιμή του κενού χώρου καθ' ύψος εκτιμάται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\varepsilon_4 = \frac{1}{1 + \frac{\Phi G_s}{U_g \rho_s}}$$

Όπου το Φ (slip factor) είναι^[16]

$$\Phi = 1 + \frac{5.6}{F_r} + 0.47 F_{rp}^{0.41}$$

Όπου ο αριθμός Froude για την αέρια φάση είναι

$$F_r = \frac{U_g}{\sqrt{g d_r}}$$

Όπου ο αριθμός Froude για τα σωματίδια

$$F_{rp} = \frac{U_p}{\sqrt{g d_r}}$$

Η τιμή του κενού χώρου στην πλήρως ανεπτυγμένη ζώνη μπορεί να θεωρηθεί πολύ κοντά στη μονάδα μικρότερη πάντως της αντίστοιχης τιμής υπό συνθήκες κορεσμού.

2.1.5. Χαρακτηριστικά διφασικής ροής

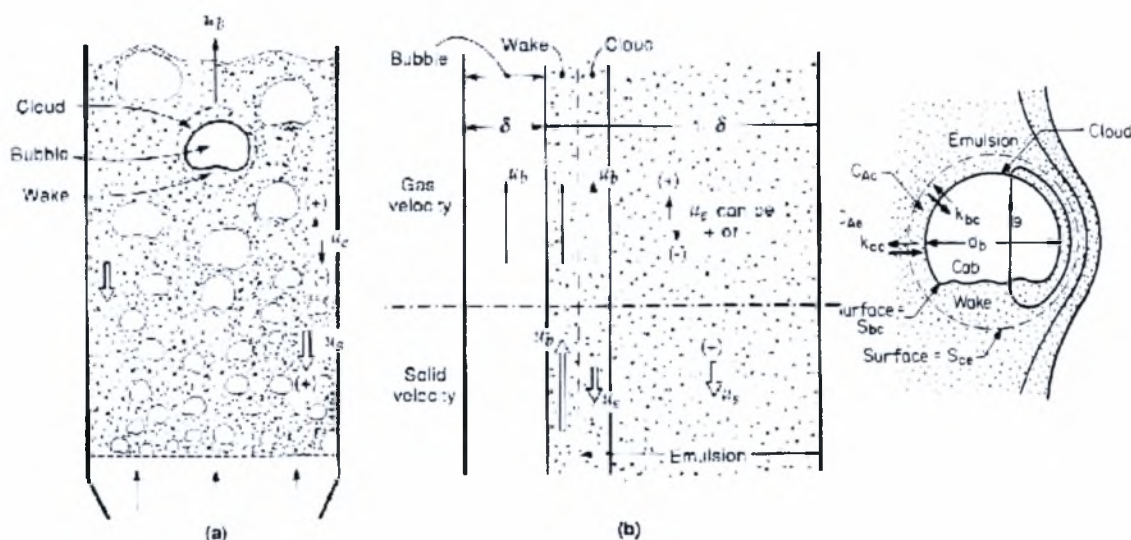
Η διφασική ροή στο εσωτερικό της ρευστοποιημένης κλίνης χαρακτηρίζεται από δύο περιοχές.

- Την περιοχή του γαλακτώματος (emulsion phase) όπου υπάρχει μεγάλη πυκνότητα αιωρούμενων στερεών σωματιδίων σε συνθήκες έντονης ανάμιξης ώστε να συνθέτουν

ένα ρευστό με υψηλό ιξώδες. Η ροή αυτή μπορεί να προσομοιαστεί με ροή σε αντιδραστήρα συνεχούς ροής-συνεχούς ανάδευσης (continuous stirred).

- Την περιοχή των φυσαλίδων (bubble phase) όπου η αέριες μάζες βρίσκονται εγκλωβισμένες σε φυσαλίδες μέσα στο γαλάκτωμα. Τα χαρακτηριστικά των φυσαλίδων καθορίζονται από τη μορφοποίηση του διανομέα αέρα στο κάτω μέρος της κλίνης και από τα χαρακτηριστικά των υλικών ρευστοποίησης. Η ροή σε αυτή τη περίπτωση έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με την αυλωτή ροή (plug flow).

Το μοντέλο φυσαλίδων των Kunii and Levenspiel [6] για ρευστοποιημένες κλίνες περιγράφει πολύ καλά τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της κλίνης. Για την μακροσκοπική μελέτη των φαινομένων μεταφοράς χώρισαν τη ροή σε δύο διακριτά μέρη θεωρώντας μια μεμβράνη μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά μάζας και θερμότητας. Το μέγεθος της φυσαλίδας θεωρείται σταθερό. Στις ρευστοποιημένες κλίνες ανακυκλοφορίας ο σχηματισμός των φυσαλίδων γίνεται μόνο στην κατώτερη πυκνή ζώνη. Αυτό οφείλεται στις πολύ υψηλές ταχύτητες ρευστοποίησης οι οποίες μεταφέρουν στο ρεύμα ανακυκλοφορίας ένα σημαντικό ποσοστό των σωματιδίων ρευστοποίησης^[17].



Εικόνα 13 Μοντέλο διφασικής ροής των Kunii and Levenspiel [6]

Στο μοντέλο τα χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής ροής επηρεάζονται άμεσα από τα χαρακτηριστικά των φυσαλίδων. Για πρακτική εφαρμογή του θεωρητικού μοντέλου θεωρείται μεταβλητό μέγεθος φυσαλίδας καθ' ύψος της κλίνης. Τα βασικά ζητούμενα είναι να βρεθούν

1. το μέρος της ροής που κατευθύνεται στο γαλάκτωμα και το μέρος που βρίσκεται εντός των φυσαλίδων
2. οι συντελεστές μεταφοράς μάζας μεταξύ των δύο περιοχών

Πίνακας 6 Σύνοψη των μελετών για τον υπολογισμό της διαμέτρου της φυσαλίδας σε ρευστοποιημένες κλίνες^[18]

Proponent	Bubble Diameter Equation
Yasui et al. (1958)	$D_b = 0.16 \rho_p d_p \left(\frac{U}{U_{mf}} - 1 \right)^{0.62} h$
Whitehead et al. (1967)	$D_b = 9.76 \left(\frac{U}{U_{mf}} \right)^{0.33} (0.32h)^{0.54}$
Park et al. (1969)	$D_b = 33.3 \cdot 10^3 d_p^{1.5} \left(\frac{U}{U_{mf}} - 1 \right)^{0.77} h$
Kato and Wen (1969)	$D_b = 0.14 \rho_p d_p \left(\frac{U}{U_{mf}} \right) h + D_{bc}$
Rowe et al. (1972)	$D_b = -A_1 + B_1 h + C_1 \left(\frac{U}{U_{mf}} \right) + D_1 h \left(\frac{U}{U_{mf}} \right) + E_1 \left(\frac{U}{U_{mf}} \right)^2$
Rowe (1976)	$D_b = \frac{(U - U_{mf})^{0.5} (h + h_0)^{0.75}}{g^{0.25}}$ where $h_0 = 0$ for porous plate and $h_0 = 0.772 - 0.006h$ for perforated plate
Geldart (1972)	$D_b = 2.05(U - U_{mf})^{0.34} h + D_{bc}$ where $D_{bc} = 0.376(U - U_{mf})$ for porous plate and $D_{bc} = 0.8716 \left(\frac{A(U - U_{mf})}{ND} \right)^{0.4}$ for perforated plate This is valid for group B and D particles
Mori and Wen (1975)	$D_b = D_{bc} - (D_{bc} - D_{bc}) \exp \left(\frac{-0.3h}{D_p} \right)$
Werther (1976)	$D_b = 0.00853 [1 + 27.2(U - U_{mf})]^{0.332} [1 + 6.84h^{1.21}]$ for porous plate, where $D_p > 0.2 \text{ m}$, $0.01 \leq U_{mf} < 0.08 \text{ m/s}$, $100 \leq d_p < 350 \mu\text{m}$, $0.05 \leq U - U_{mf} \leq 0.3 \text{ m/s}$
Darton et al. (1977)	$D_b = \frac{0.54(U - U_{mf})^{0.4} (h + 4\sqrt{A})^{0.8}}{g^{0.2}}$

Η σχέση υπολογισμού του συντελεστή μεταφοράς μάζας από το γαλάκωμα προς τις φυσαλίδες είναι [620]

$$\frac{1}{K_{be}} = \frac{1}{K_{ce}} + \frac{1}{K_{bc}}$$

Όπου ο συντελεστής μεταφοράς μάζας από το φιλμ στο γαλάκωμα είναι [6,20]

$$K_{ce} = 6.77 \left(\frac{D_{AB} u_{br} \epsilon_e}{D_b^3} \right)$$

Και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας από το φιλμ προς τη φυσαλίδα είναι [6,20]

$$K_{bc} = 4.5 \left(\frac{U_e}{D_b} \right) + 5.85 \left(\frac{D_{AB}^{0.5} g^{0.25}}{D_b^{5/4}} \right)$$

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εξισώσεις το κρίσιμο μέγεθος για την εύρεση του συντελεστή μεταφοράς μάζας μεταξύ των δυο φάσεων είναι η εύρεση του μεγέθους της φυσαλίδας. Η βιβλιογραφία παρέχει αρκετούς τύπους υπολογισμού του μεγέθους της φυσαλίδας. Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει μια σύνοψη των σχετικών τρόπων υπολογισμού που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. για τον υπολογισμό της διαμέτρου της φυσαλίδας σε ρευστοποιημένες κλίνες.

Πληθώρα μοντέλων [19,53] χρησιμοποιεί τη σχέση των Mori and Wen [20] η οποία υπολογίζει το μέσο μέγεθος των φυσαλίδων. Η διάμετρος της φυσαλίδας υπολογίζεται ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών μεγεθών ελάχιστης ρευστοποίησης

$$D_b = D_{bm} - (D_{bm} - D_{bo}) \exp \left(- \frac{0.15 h_{mf}}{D_r} \right)$$

Η σχέση υπολογισμού της αρχικής διαμέτρου της φυσαλίδας είναι [20]

$$D_{bo} = 0.8713 \left(\frac{A(U_o - U_{mf})}{N_D} \right)^{0.4}$$

Και η μέγιστη διάμετρος της φυσαλίδας υπολογίζεται από τη σχέση [20]

$$D_{bm} = 1.6377 \left(A(U_o - U_{mf}) \right)^{0.4}$$

Η πιο πρόσφατη σχέση των Darton et. al. [21] υπολογίζει το μέγεθος της φυσαλίδας συναρτήσει του ύψους πάνω από τον διανομέα αέρα και προτιμάται για την μοντελοποίηση των φαινομένων στην αξονική διάσταση της κλίνης.

$$D_b = \frac{0.54(U - U_{mf})^{0.4} (h + 4\sqrt{A/N_o})^{0.8}}{g^{0.2}}$$

Όπου A/N_o η διατομή των οπών του διανομέα

Η αρχική ταχύτητα είναι ανάλογη προς την παροχή του αέρα ρευστοποίησης προς τη διατομή

$$U_o = \frac{Q}{A}$$

Η ταχύτητα των φυσαλίδων υπολογίζεται από τη σχέση των Davidson and Harrison [22]

$$U_b = U_o - U_e + u_{br}$$

Όπου

$$u_{br} = 0.711\sqrt{gD_b}$$

Οι Cui et. al. [23] παρατήρησαν ότι το ποσό της ροής που κατευθύνεται σε κάθε περιοχή της κλίνης επηρεάζεται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε διάταξης. Το ρευστοδυναμικό μοντέλο που ανέπτυξαν απαιτεί ρύθμιση βάσει πειραματικών μετρήσεων. Το κλάσμα της ροής που μεταφέρεται στις φυσαλίδες υπολογίζεται από τη σχέση

$$\delta = 1 - A_{f(1)} - A_{f(2)} \exp\left(-\frac{U_o - U_{mf}}{A_{f(3)}}\right)$$

Ο κενός χώρος της φυσαλιδωτής φάσης υπολογίζεται βάσει του ίδιου μοντέλου

$$\varepsilon_b = 1 - A_{void-b(1)} - A_{void-b(2)} \exp\left(-\frac{U_o - U_{mf}}{A_{void-b(3)}}\right)$$

Και ο κενός χώρος της φάσης του γαλακτώματος

$$\varepsilon_e = 1 - A_{void-e(1)} - A_{void-e(2)} \exp\left(-\frac{U_o - U_{mf}}{A_{void-e(3)}}\right)$$

2.2. Χημεία καύσης και σχηματισμού ρύπων

Οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό της ρευστοποιημένης κλίνης περιλαμβάνουν

1. Τη διάσπαση της στερεάς καύσιμης ύλης και την απελευθέρωση των πτητικών ενώσεων
2. Τη καύση της εναπομένουσας καύσιμης ύλης (απανθρακωμένο κλάσμα)
3. Τις αντιδράσεις σχηματισμού ρύπων
4. Τις αντιδράσεις δέσμησης των ρύπων

Στη συνέχεια κάθε μια κατηγορία θα αναλυθεί ξεχωριστά με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία

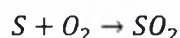
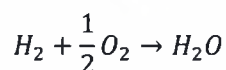
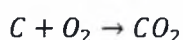
2.2.1. Διάσπαση στερεάς καύσιμης ύλης

Ο χρόνος για την εξαέρωση των πτητικών ενώσεων από ένα σωματίδιο συγκεκριμένης διαμέτρου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση [24]

$$t_v = 10 \left(\frac{1048}{T_g} \right) d_{p,i}$$

Ο χρόνος αυτός είναι πολύ μικρός σε σχέση με το χρόνο παραμονής στο εσωτερικό της κλίνης, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει χώρα στη κατώτερη ζώνη της κλίνης^[25]. Τα αέρια που απελευθερώνονται είναι το οργανικό μέρος του άνθρακα, υδρογόνο και θείο.

Οι πτητικές ενώσεις που απελευθερώνονται θεωρείται ότι αντιδρούν ακαριαία με το οξυγόνο του αέρα καύσης (ομογενείς αντιδράσεις) στο κάτω μέρος της πυκνής ζώνης.



Σε αυτές τις αντιδράσεις οφείλεται σημαντικό μέρος της συνολικής ενέργειας που απελευθερώνεται δεδομένου ότι το κλάσμα του πτητικού μέρους είναι της τάξης του 35-45% της συνολικής στερεής καύσιμης μάζας ^[26]. Ο βαθμός απελευθέρωσης των πτητικών ενώσεων και ο βαθμός ολοκλήρωσης της διεργασίας αυξάνει με αύξηση της θερμοκρασίας ^[27]. Τα υδροδυναμικά φαινόμενα στην περιοχή της πυκνής ζώνης επηρεάζουν τη συνολική διεργασία. Οι πτητικές ενώσεις από ένα μεμονωμένο σωματίδιο συνήθως καίγονται στην περιοχή γύρω από το σωματίδιο. Για υψηλές παροχές καύσιμης ύλης έχει παρατηρηθεί ότι οι πτητικές ενώσεις από κοντινά σωματίδια αναμιγνύονται σχηματίζοντας ένα πλούμιο (plume) ^[28]. Αν το πλούμιο δεν διαχυθεί στη κλίνη αρκετά γρήγορα, μπορεί να δημιουργήσει περιοχές περίσσειας και έλλειψης οξυγόνου και να οδηγήσει σε ατελή καύση ^[26]

2.2.2. Καύση απανθρακωμένης μάζας (char)

Η απανθρακωμένη μάζα αποτελείται κυρίως από άνθρακα, στάχτη, άζωτο και θείο. Σε θερμοκρασίες άνω των 750°C η απανθρακωμένη μάζα οξειδώνεται σε αέρια προϊόντα (CO, CO₂, SO₂, NO, NO₂ και N₂O). Οι ρυθμοί καύσης της απανθρακωμένης μάζας είναι αρκετά υψηλότεροι στις ρευστοποιημένες κλίμες ανακυκλοφορίας κυρίως λόγω του υψηλότερου βαθμού ανάμιξης ^[26]. Η καύση των απανθρακωμένων σωματιδίων θεωρείται ότι ελέγχεται από την χημική αντίδραση στη εξωτερική επιφάνεια και την διάχυση των αερίων. Κρίσιμη συνθήκη για την πλήρη καύση των απανθρακωμένων σωματιδίων είναι ο χρόνος παραμονής τους μέσα στην κλίνη, οποίος είναι ευθέως ανάλογος του ύψους του ανυψωτήρα. Η διάμετρος του απανθρακωμένου σωματιδίου μετά τη καύση συναρτίζεται του χρόνου παραμονής μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση ^[29]

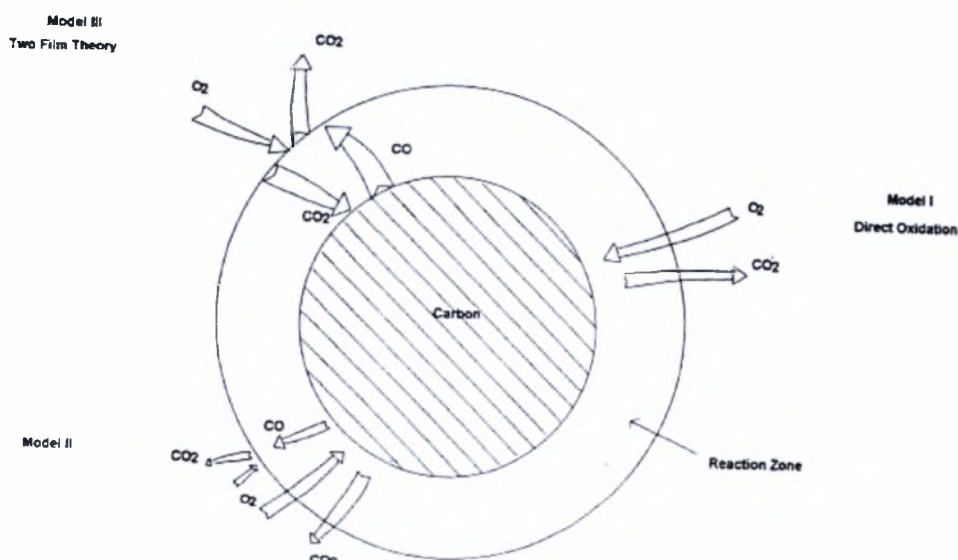
$$d_p = \left(d_{p,o}^3 - \frac{6}{\pi} \frac{k_r t_r}{d_{p,o} C_{char}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Οι Ross and Davidson ^[30] πρότειναν τρεις κύριους μηχανισμούς για την οξείδωση των απανθρακωμένων σωματιδίων οι οποίοι απεικονίζονται στην Εικόνα 14.

Μηχανισμός I: Το οξυγόνο διαχέεται στην επιφάνεια του άνθρακα και τον οξειδώνει σε μονοξείδιο του άνθρακα. Το μονοξείδιο οξειδώνεται περαιτέρω σε μια ομογενή αντίδραση αέριας φάσης πολύ κοντά στη επιφάνεια του σωματιδίου.

Μηχανισμός II: Το οξυγόνο διαχέεται στην επιφάνεια του άνθρακα και παράγει μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα τα οποία διαχέονται ξανά πίσω. Το μονοξείδιο αντιδρά περαιτέρω με το οξυγόνο σε μια ομογενή αντίδραση αέριας φάσης. Πειραματικά δεδομένα βρήκαν και τις δύο ενώσεις (CO και CO_2) σαν προϊόντα της οξείδωσης. Σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών το μονοξείδιο μπορεί να διαφύγει χωρίς να οξειδωθεί.

Μηχανισμός III: Βάσει του συγκεκριμένου μηχανισμού το οξυγόνο δεν μπορεί να φτάσει την επιφάνεια του άνθρακα. Αντιδρά με το CO σε μια ομογενή αντίδραση μακριά από την επιφάνεια του άνθρακα. Μέρος του CO_2 διαχέεται στην επιφάνεια του άνθρακα για να αναχθεί σε CO μέσω μιας ενδόθερμης αντίδρασης (θεωρία διπλού φιλμ).



Εικόνα 14 Μηχανισμοί οξείδωσης των απανθρακωμένων σωματιδίων [26]

Γενικά ένα απανθρακωμένο σωματίδιο είναι πορώδες και η αντίδραση μπορεί να μην λαμβάνει χώρα στην εξωτερική του επιφάνεια. Για παράδειγμα αν ο ρυθμός διάχυσης του οξυγόνου είναι αρκετά υψηλότερος από τον ρυθμό της χημικής αντίδρασης, το οξυγόνο μπορεί να εισχωρήσει πλήρως στους πόρους του σωματιδίου. Το μέγεθος του σωματιδίου καθορίζει και το ποιος από τους δύο μηχανισμούς επικρατεί [26].

Για να γίνει η διάχυση του οξυγόνου από το ρεύμα αέρα προς τα σωματίδια του άνθρακα πρέπει να υπερνικηθούν οι εξής αντιστάσεις.

- a) Η αντίσταση διάχυσης ανάμεσα από τα αδρανή υλικά

- b) Η αντίσταση διάχυσης του υμένα αερίου γύρω από τα σωματίδια
- c) Η αντίσταση διάχυσης του στρώματος στάχτης

Οι Basu and Fraser [31] πρότειναν ένα εμπειρικό μοντέλο για τον υπολογισμό του ρυθμού καύσης

$$q = \frac{c_g}{\frac{1}{h_m} + \frac{1}{k_c}}$$

Όπου ο συντελεστής μεταφοράς μάζας υπολογίζεται από έναν εμπειρικό προσδιορισμό του αριθμού Sherwood ενώ η κινητική σταθερά είναι τύπου Arrhenius και εξαρτάται από τον τύπο καυσίμου. Γενικά στον ρυθμό καύσης έχει ρόλο τόσο η χημική κινητική όσο και τα υδροδυναμικά φαινόμενα στη κλίνη και τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων.

Οι Sotudeh-Gharebaagh et. al. [32] πρότειναν ένα εμπειρικό τύπο υπολογισμού του ρυθμού οξειδωσης του άνθρακα προς μονοξείδιο του άνθρακα που λαμβάνει υπόψη του όλα τα παραπάνω

$$r_{l,i} = \frac{3\eta_{O_2} k_{cr} F_{char,i} (1 - \varepsilon_i)}{\rho_{char} r_c (1 - \varepsilon_c) F_{solid,i}} C_{O_2}$$

$$k_{cr} = k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{R_g T_p}\right)$$

2.2.3. Σχηματισμός οξειδίων του Αζώτου (NO_x)

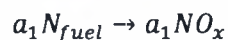
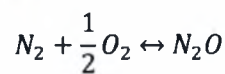
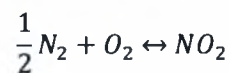
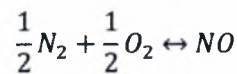
Αν και το μοριακό άζωτο του αέρα καύσης δεν οξειδώνεται σημαντικά στο θερμοκρασιακό εύρος των 800-900°C στο οποίο λειτουργούν οι ρευστοποιημένες κλίνες, το άζωτο του καυσίμου οξειδώνεται σημαντικά [32]. Γενικά η χημεία σχηματισμού των οξειδίων του αζώτου (NO, NO₂, N₂O) είναι μια πολύπλοκη διαδικασία στην οποία λαμβάνουν μέρος πολλαπλά ενδιάμεσα στάδια και καταλυτική δράση των προϊόντων της καύσης. Χαρακτηριστικές είναι οι ερευνητικές προσεγγίσεις στην κατεύθυνση αυτή.

Οι Johnsson et. al. [33] προσέγγισαν τον συνολικό μηχανισμό χρησιμοποιώντας 15 φαινόμενες αντιδράσεις με καταλυτική δράση των απανθρακωμένων σωματιδίων και προσροφητικών υλικών ρευστοποίησης (CaO). Οι Kilpinen, Glardorg and Hupa [34] χρησιμοποίησαν 106 στοιχειακές αντιδράσεις με 28 χημικά στοιχεία και κινητικές σταθερές δανεισμένες από τη βιβλιογραφία. Απλούστερες προσεγγίσεις όπως αυτή των Talukdar and Basu [35] χρησιμοποιούν κλειστού τύπου λύσεις για την πρόβλεψη των θερμικών και υδροδυναμικών επιδράσεων στο σχηματισμό των NO_x. Ένας γενικός οδηγός στις πιθανές αντιδράσεις για τον σχηματισμό των NO_x παρουσιάστηκε από τον Brereton [36]. Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει την επίδραση διαφόρων φυσικών παραμέτρων στις εκπομπές NO_x από ρευστοποιημένες κλίνες καύσης.

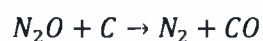
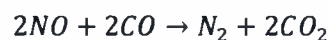
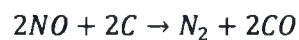
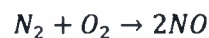
Πίνακας 7 Επίδραση παραμέτρων λειτουργίας και καυσίμου στο σχηματισμό NO_x [37]

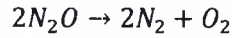
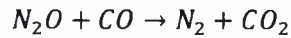
Increasing parameters	NO	N2O
Temperature	Increase	Decrease
Volatile matter in fuel	Increase	Decrease
Nitrogen in fuel	Increase	Increase
Excess air	Increase	Increase
Primary/secondary air	Decrease	Decrease
Limestone addition	Increase	Decrease
SO2 concentration in flue gas	Decrease	Increase
Ammonia or urea injection	Decrease	Increase

Μοντέλα που αναπτύχθηκαν για τον υπολογισμό της θερμικής απόδοσης των διατάξεων και την εκτίμηση των επιπέδων ρύπων χρησιμοποιούν απλούστερους μηχανισμούς, οι οποίοι περιλαμβάνουν πάνω από τέσσερις φαινόμενες αντιδράσεις για την περιγραφή του σχηματισμού των NO_x. Οι Sotudeh-Gharebaagh et. al. [32] χρησιμοποιούν τρεις αντιδράσεις ισορροπίας για το σχηματισμό NO_x από το άζωτο που υπάρχει στην κλίνη και μία αντίδραση οξειδωσης του αζώτου του καυσίμου προς NO_x.



Οι Ngampradit et. al. [38] χρησιμοποίησαν ένα σχήμα 7 αντιδράσεων αποτελούμενο αποκλειστικά από φαινόμενες μονόδρομες αντιδράσεις οι οποίες λαμβάνουν χώρα εν σειρά κατά καθορισμένη προτεραιότητα. Πρώτα εκτελούνται οι αντιδράσεις σχηματισμού και μετά οι αντιδράσεις αποσύνθεσης. Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό της κλίνης η σειρά εκτέλεσης σε κάθε ομάδα αλλάζει εκτελώντας πρώτα τις γρηγορότερες από αυτές. Το σχήμα αντιδράσεων που χρησιμοποίησαν είναι



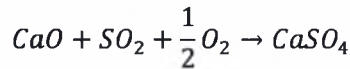
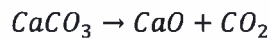


2.2.4. Δέσμευση διοξειδίου του θείου (SO₂)

Κατά την καύση της άνθρακα το περιεχόμενο θείο οξειδώνεται προς διοξείδιο του θείου. Η συνήθης πρακτική για την δέσμευση του διοξειδίου του θείου μέσα στην κλίνη περιλαμβάνει την προσθήκη ασβεστόλιθου (CaCO₃) στα υλικά ρευστοποίησης ο οποίος καθαρίζεται εν θερμώ (calcinated) προς CaO το οποίο αντιδρά με το διοξείδιο και παράγει CaSO₄. Με τη χρήση ενός κυκλώνα το CaSO₄ απομακρύνεται από τη διάταξη εξασφαλίζοντας σημαντικά μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του θείου. Η επιφανειακή προσρόφηση του SO₂ στα σωματίδια των οξειδίων του ασβεστίου έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση μόνο του 30-50% της συνολικής μάζας του ασβεστόλιθου [26]. Τα επίπεδα απομάκρυνσης των προσροφημένων ενώσεων εξαρτώνται στην ενεργότητα των σωματιδίων, το μέγεθός τους, τη θερμοκρασία και την αποτελεσματικότητα του κυκλώνα. Για μηχανολογικούς υπολογισμούς χρησιμοποιείται η σχέση των Basu and Fraser [31]

$$\frac{F_{sor}}{F_c} = \frac{3.12E_{sor}\rho_{bav}HS - 100PU[ASH]E_c \ln(1 - E_{sor})}{E_c[\delta_{max}X_{CaCO_3}\rho_{bav}H + 100PU\ln(1 - E_{sor})]}$$

Το τυπικό σχήμα αντιδράσεων που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του μηχανισμού δέσμευσης του διοξειδίου του θείου περιλαμβάνει δύο αντιδράσεις [32, 38]



Στις θερμοκρασιακές συνθήκες της ρευστοποιημένης κλίνης είναι επίσης δυνατή η οξείδωση του SO₂ σε SO₃ η οποία δρα ως παρεμποδιστής των αντιδράσεων προσρόφησης. Η αντίδραση αυτή πραγματοποιείται παρουσία V₂O₅ που δρα ως καταλύτης και το οποίο βρίσκεται στη στάχτη που παράγεται από την καύση βαρέων ορυκτών καυσίμων.

Η κλασματική μετατροπή του CaO σε CaSO₄ επηρεάζεται σημαντικά από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του ασβεστόλιθου, τις υδροδυναμικές παραμέτρους, την αντίσταση στη μεταφορά μάζας, τη θερμοκρασία, τις συγκεντρώσεις των αντιδρώντων, την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων και τις συνθήκες λειτουργίας της κλίνης. Ο ρυθμός απομάκρυνσης των SO₂ ανά μονάδα όγκου εκφράστηκε από τον Couturier [39] ως εξής

$$r_{SO_2,i} = \frac{V_{CaO}F_1}{100(1 - \varepsilon_1)A\Delta L} \left[\frac{t_1 - \frac{1}{a_1} \ln \left(1 + \frac{3aCY_{SO_2,i}}{R_s K_v} (e^{a_1 t_1} - 1) \right)}{\frac{R_s}{3aCY_{SO_2,i}} - \frac{1}{K_v}} \right]$$

Οι Adanez et. al. [51] πρότειναν έναν απλούστερο τρόπο υπολογισμού της δέσμμευσης των ενώσεων του θείου με βάση την ενεργότητα του υλικού προσρόφησης

$$r_{SO_2} = K_c^o C_{sup} \exp\left(-\frac{K_c^o C_{sup} t}{X_{s,max}}\right)$$

Οι κινητικοί όροι της εξίσωσης (K_c^o και $X_{s,max}$) προσδιορίζονται με βάσει πειραματικές μετρήσεις

2.3. Μεταφορά θερμότητας προς τα τοιχώματα

Ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (U) προς τα τοιχώματα του εναλλάκτη θερμότητας εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες ρευστοποίησης (κενός χώρος) και την τοπική ταχύτητα ρευστοποίησης (superficial velocity). Η βιβλιογραφία παρέχει μέσες τιμές 60-120W/m²K για σωματίδια σε αιώρηση (πυκνή ρευστοποίηση), οι οποίες όμως δεν κρίνονται αξιόπιστες λόγω των μεταβολών των συνθηκών ρευστοποίησης καθ' ύψος και της εσωτερικής ανακυκλοφορίας των στερεών στα τοιχώματα (slip velocity – wetted wall). Ο ακριβής υπολογισμός του U είναι αρκετά περίπλοκος αν ληφθούν υπόψη όλα τα φαινόμενα.

Αναλυτικά συσχετίζεται λαμβάνοντας υπόψη την κάλυψη του τοιχώματος από στερεά σωματίδια, μέσω του μέσου χρόνου επαφής, την ακτινοβολία των σωματιδίων και τη συναγωγή που εξαρτάται από τις ροϊκές συνθήκες. Θεωρώντας πολύ λεπτό τοίχωμα ο ολικός συντελεστής θερμότητας είναι

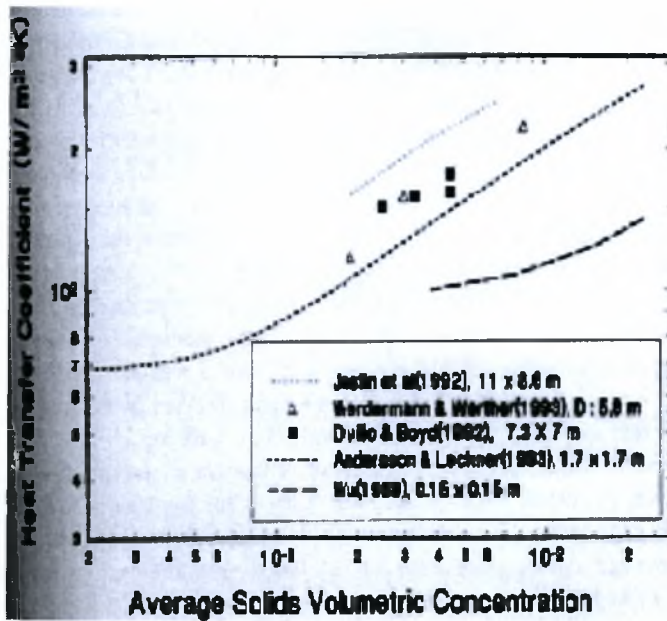
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{bed\ to\ wall}} + \frac{1}{h_{wall\ to\ product}}}$$

Όπου ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από την κλίση προς τα τοιχώματα είναι [⁴⁰]

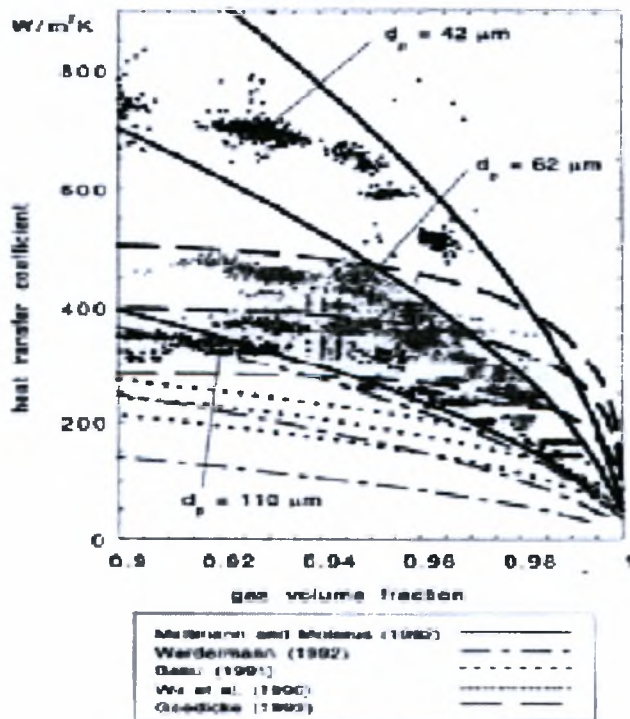
$$h_{bed\ to\ wall} = h_{convection/conduction} + h_{radiation} \\ = fh_{s,convection} + (1-f)h_{g,convection/conduction} + h_{radiation}$$

$$\frac{1}{h_{s,convection}} = \frac{\delta}{\lambda_{gas}} + \sqrt{\frac{\pi t}{\lambda_s \rho_s c_{p,s}}}$$

Η Εικόνα 15 και η Εικόνα 16 παρουσιάζουν συσχετίσεις του ολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από το εσωτερικό της κλίσης προς τα τοιχώματα από τη βιβλιογραφία.



Εικόνα 15 Ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από την ρευστοποιημένη κλίνη προς τα τοιχώματα (πειραματικές μετρήσεις)



Εικόνα 16 Ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από την ρευστοποιημένη κλίνη προς τα τοιχώματα σε σχέση με τον κενό χώρο και τη μέση διάμετρο των σωματιδίων ρευστοποίησης

2.4. Προσεγγίσεις μοντελοποίησης καυστήρων ρευστοποιημένων κλινών ανακυκλοφορίας

Οι δυσκολίες στη μοντελοποίηση της ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας οδήγησαν στην ανάπτυξη διαφόρων τύπων μοντέλων με συγκεκριμένη αποστολή. Οι Harris and Davidson [41] κατέταξαν τα μοντέλα σε τρεις διακριτές κατηγορίες:

1. Τύπου I: πρόκειται για μοντέλα που προβλέπουν την αξονική μεταβολή της ροής των στερεών, αλλά όχι την ακτινική [42].
2. Τύπου II: σε αυτή τη κατηγορία ανήκουν μοντέλα που προβλέπουν την αξονική και την ακτινική μεταβολή της ροής των στερεών υποθέτοντας δύο ή περισσότερες ζώνες, για παράδειγμα πυρήνας και περιφερειακή ζώνη [43].
3. Τύπου III: αυτός ο τύπος μοντέλων περιλαμβάνει βασικές εξισώσεις της δυναμικής ρευστών για την πρόβλεψη διφασικής ροής αέριας/στερεής φάσης. Βασίζονται στις εξισώσεις συνέχειας και ορμής για τις δυο φάσεις και στις κατάλληλες θεμελιώδεις εξισώσεις (μοντέλα CFD) [44, 45]. Τα μοντέλα αυτού του τύπου είναι γενικής εφαρμογής, ανταπεξέρχονται σε διαφορετικές γεωμετρίες όμως εισάγουν υπέρμετρη πολυπλοκότητα για εφαρμογές μηχανολογικού σχεδιασμού των διατάξεων.

Μαζί με τις παραπάνω κατηγορίες διακρίνονται δύο ακόμη τύποι μοντέλων:

1. Τα μοντέλα που βασίζονται στις εξισώσεις του Euler (Eulerian - συνεχή). Τα μοντέλα αυτά θεωρούν όλες τις φάσεις συνεχείς και πλήρως διαπερατές και μοντελοποιούν με σχετικά καλή ακρίβεια την μέση ως προς το χρόνο συγκέντρωση στερεών και τις διανομές μάζας σε ρευστοποιημένες κλίνες ανακυκλοφορίας [46, 47].
2. Τα μοντέλα που βασίζονται στις εξισώσεις του Lagrange (Lagrangian – διακριτών σωματιδίων). Τα μοντέλα αυτά λύνουν τις Νευτωνικές εξισώσεις της κίνησης για κάθε ένα σωματίδιο, λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις από τις συσσωματώσεις και τις δυνάμεις που επενεργούν πάνω τους από την αέρια φάση [48, 49].

Ο Basu [26] παραθέτει μια συγκριτική λίστα των κυριότερων μοντέλων που αναπτύχθηκαν και των διατάξεων στις οποίες ελέγχθηκε η αξιοπιστία τους (Πίνακας 8).

Σε πιο πρόσφατες εργασίες οι Guignor and Eskin [50] ανέπτυξαν ένα μοντέλο διφασικής ροής για τη μελέτη των υδροδυναμικών φαινομένων σε κρύα ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας. Το μοντέλο περιελάμβανε αναλυτικές εκφράσεις για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης, των τριβών και τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων λόγω φθοράς και συγκρίθηκε με πληθώρα πειραματικών δεδομένων. Το μοντέλο έδειξε σημαντικές δυσκολίες στην πρόβλεψη των υδροδυναμικών φαινομένων στην κατώτερη τυρβώδη ζώνη αιώρησης, ενώ συνέκλινε στην ανώτερη ζώνη με σημαντική ακρίβεια. Η εργασία επιβεβαίωσε υπολογιστικά ότι στην ανώτερη ζώνη οι διαφορές στην ακτινική διεύθυνση γίνονται σημαντικές σε ένα εξωτερικό δακτύλιο για $r > 0.8R$ ανάλογα με την απόσταση από την κατώτερη ζώνη.

Πίνακας 8 Σύγκριση μοντέλων για καύση σε ρευστοποιημένες κλίνες ανακυκλοφορίας [26]

Author	Model type	Sub-model included	Validation of the model	Comment
Basu et al. (1987)	I	Char combustion with wide size distribution	Not done	Furnace was divided into number of cells
Weiss, Scholer and Fett (1988)	I	Coal combustion SO ₂ and NO reactions	Validated against 0.28MW pilot plant	Cell model includes Riser, cyclone, EFHE.
Lee and Hyppanen (1989)	I	Size distribution of char and ash particle, Attrition of char	Experimental results of pilot plant	Combustor is divided vertically into a single compartments
Das and Bhattacharya (1990)	II	Char combustion	Data from 0.15 m test rigs	Combustion in annulus ignored
Hyppanen, Lee and Rainio (1991)	III	Coal combustion and communication, sorbent reaction and its size distribution	No direct verification	Partial experimental data are needed as input
Sengupta and Basu (1991)	II	Combustion model SO ₂ , capture model, Combustion assisted attrition	Not validated	
Malandrino et al. (1991)	I	Char combustion, attrition	Data from 0.041 m combustor	Furnace was divided into 3 cells and cyclone one cell
Sarvaia et al. (1993)	I	SO ₂ capture, NO _x combustion of coal heat transfer	Validated against 1.2MW unit	Authors discussed core-annular model but did not use it in balance equations
Basu et al. (1994)	II	Char combustion, SO ₂ , NO _x reactions, particle size distribution	Validated on 0.3MW pilot plant test	
Haider and Linzer (1994)	II	Coal combustion, Sorbent size distribution, cyclone	No verification against experimental data	
Heinbockel and Fett (1995)	I	NO, SO ₂ coal combustion, heat absorption, attrition, size distribution	Validated against 104MW ACFB	Effect of pressure on different processed not considered. System integration
Hannes et al. (1995,1997)	II	Coal combustion, SO ₂ , NO _x reactions, Heat transfer, particle size distribution, cyclone	Validated against 5 CFB boilers in 12-229MW range	No combustion in cyclone
Talukdar (1996) and Talukdar and Basu (1997)	II	Coal combustion, NO _x , SO ₂ , reverse sulfation, heat transfer particle size distribution, cyclone	Validated against 0.3 MWth, 125 MWe & 267 MWth	
Remberg, Nemet, and Fett (1997)	I	Steam cycle Gas turbine Compressor Cyclone and EHE	Validation not released	System integration
Montat et al. (1997)	II	SO ₂ Heat transfer, Cyclone	Validated against 125 MWe	
Park and Basu (1998)	II	Heat transfer Combustion	Validated against 0.3 MWth	Unsteady state model

Οι Adanez et. al. [51] ανέπτυξαν ένα μοντέλο 1.5 διαστάσεων, το οποίο λαμβάνει υπόψη του με εμπειρικές συσχετίσεις τις ανομοιομορφίες στην ακτινική διεύθυνση. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων, χρησιμοποιεί ένα ημι-εμπειρικό απλουστευμένο υπομοντέλο για τις ενώσεις του θείου και εστιάζει στην τυρβώδη ροή της πυκνής ζώνης. Με βάση το μοντέλο επαναπροσδιόρισαν τις σταθερές κάποιων σχέσεων που περιγράφουν τα υδροδυναμικά φαινόμενα ενώ παραθέτουν και ένα νέο τρόπο για τον

υπολογισμό της σταθεράς εξασθένησης (decay constant) του κλάσματος των στερεών στον ανυψωτή.

Οι Huilin et. al. [19] παρουσίασαν ένα μοντέλο το οποίο λαμβάνει υπόψη του τη μεταβολή του μεγέθους των σωματιδίων της απανθρακωμένης μάζας κατά την καύση τους στην κλίνη. Χρησιμοποιώντας ένα υπομοντέλο για την πυκνή ζώνη, ένα υπομοντέλο δύο διαστάσεων για την αραιή ζώνη και φαινόμενες χημικές αντιδράσεις για χημικά φαινόμενα υπολόγισαν τις αξονικές κατανομές θερμότητας και αερίων συγκεντρώσεων.

Αντίστοιχα, οι Ngampradit et. al. [38] ανέπτυξαν ένα μοντέλο στο ASPEN PLUS χρησιμοποιώντας μια σειρά από έτοιμους αντιδραστήρες του εμπορικού πακέτου. Το μοντέλο περιείχε ένα υπομοντέλο shrinking core για την καύση της απανθρακωμένης μάζας, βάσει του οποίου υπολογίζεται η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων στην έξοδο του ανυψωτήρα.

Τον βασικό κορμό του παραπάνω μοντέλου αποτελεί το μοντέλο στο ASPEN PLUS που αναπτύχθηκε από τους Gharebaagh et. al. [32]. Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν οι έτοιμοι αντιδραστήρες του ASPEN PLUS, απλοποιημένες συσχετίσεις για τα υδροδυναμικά φαινόμενα και απλουστευμένες φαινόμενες χημικές αντιδράσεις. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα συνέκλιναν αρκετά καλά με τα πειραματικά. Το απλουστευμένο υδροδυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε έγινε η βάση για αρκετές εργασίες που ακολούθησαν. Η εργασία κατέδειξε την χρησιμότητα των μοντέλων του είδους στο μηχανολογικό σχεδιασμό των διατάξεων και τη μελέτη του συστήματος ελέγχου αυτών.

3. Μοντελοποίηση

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται εκτενώς το μοντέλο ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας που αναπτύχθηκε. Το μοντέλο δημιουργήθηκε στο περιβάλλον ASPEN PLUS και βασίζεται σε προϋπάρχουσες δημοσιευμένες εργασίες [32 και 2]. Οι τεχνικές λεπτομέρειες του μοντέλου παρουσιάζονται εκτενώς στο Παράρτημα Α – Εγχειρίδιο του μοντέλου.

3.1. Γενική περιγραφή μοντέλου

Το μοντέλο της ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας αποτελείται από τις παρακάτω κύριες οντότητες

1. Ξηραντήρας καύσιμης ύλης: μοντελοποιεί τη ξήρανση της καύσιμης ύλης μέσω ενώ θερμού ρεύματος.
2. Ζώνη καύσης πτητικών ενώσεων: σε αυτή τη ζώνη η στερεή καύσιμη ύλη «διασπάται» στο πτητικό μέρος, το οποίο καίγεται πλήρως, και το στερεό βραδύκαυστο μέρος που εισέρχεται στις επόμενες ζώνες καύσης.
3. Ζώνη καύσης ανυψωτήρα: Στον ανυψωτήρα διακρίνονται σε τρεις επιμέρους ζώνες καύσης ανάλογα με τη κατάσταση ρευστοποίησης της κλίνης.
 - a. Πυκνή ζώνη (dense zone):
 - b. Ζώνη επιτάχυνσης (acceleration zone):
 - c. Ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής (fully developed zone):
4. Κυκλώνας διαχωρισμού στερεών
5. Ανακυκλοφορία στερεών

Η αναλυτική περιγραφή του μοντέλου θα γίνει στη βάση των παραπάνω οντοτήτων. Σημαντικό ρόλο στην ορθή λειτουργία του μοντέλου έχει το υδροδυναμικό μοντέλο και το μοντέλο καύσης τα οποία εισάγονται στο μοντέλο του ASPEN PLUS με προσεγγιστικές εμπειρικές σχέσεις. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν εκτενώς τα μοντέλα υδροδυναμικής και χημικών αντιδράσεων και θα συζητηθούν οι ρεαλιστικές παραδοχές που έγιναν για κάθε μοντέλο.

3.2. Υδροδυναμικό Μοντέλο

Ο στόχος του υδροδυναμικού μοντέλου είναι να προβλέψει με σχετική ακρίβεια τις παραμέτρους εκείνες που επηρεάζουν τους ρυθμούς των χημικών αντιδράσεων. Στο μοντέλο αυτής της εργασίας χρησιμοποιούνται απλοποιημένες εμπειρικές σχέσεις από τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε μοντέλα μηχανικών με στόχο τον σχεδιασμό της διάταξης (engineering design) ή/και τον έλεγχο της (control design). Ένα σημαντικό μέρος των παραμέτρων του υδροδυναμικού μοντέλου υπολογίζονται εκ των προτέρων βάσει του

σχεδιασμού της διάταξης. Οι υπόλοιπες παράμετροι υπολογίζονται από τα δυναμικά χαρακτηριστικά της προσομοίωσης.

3.2.1. Παραδοχές υδροδυναμικού μοντέλου

Οι παραδοχές που γίνονται για το υδροδυναμικό μοντέλο είναι οι παρακάτω

- A. Η ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας χωρίζεται εκ φύσεως σε δυο υδροδυναμικές περιοχές:
 - a. Την κατώτερη ζώνη – τυρβώδης ρευστοποιημένη κλίνη (πυκνή ζώνη)
 - b. Την ανώτερη ζώνη (αραιή ζώνη)
- Το όριο μεταξύ των δύο ζωνών καθορίζεται από το ύψος το δευτερεύοντος ψεκασμού αέρα
- B. Θεωρούμε ότι υπάρχει πλήρης ανάμιξη των στερεών σωματιδίων (στάχτη, στερεός άνθρακας, σωματίδια ρευστοποίησης) σε ολόκληρη τη περιοχή ρευστοποίησης. Η παραδοχή αυτή αιτιολογείται από την υψηλή εσωτερική και εξωτερική ανακυκλοφορία των στερεών σωματιδίων στην κλίνη.
 - C. Στην πυκνή ζώνη η κίνηση των αερίων μαζών θεωρείται ως αυλωτή ροή (plug flow) στην περιοχή ανάμεσα στις φυσαλίδες και σαν τέλεια αναμεμιγμένη στην περιοχή «γαλακτώματος» (emulsion phase).
 - D. Οι φυσαλίδες αποκτούν το μέγεθος ισορροπίας τους (equilibrium size) αρκετά γρήγορα ώστε να θεωρείται σταθερή η διάμετρος της φυσαλίδας στο μήκος της πυκνής ζώνης.
 - E. Στον ανυψωτή θεωρούμε ότι δεν έχουν δημιουργία φυσαλίδων λόγω των υψηλών ταχυτήτων ρευστοποίησης.
 - F. Οι ακτινικές ανομοιομορφίες δεν λαμβάνονται υπόψη και η ταχύτητα των αερίων λαμβάνεται σταθερή για κάθε μια περιοχή της κλίνης.
 - G. Ο κενός χώρος (voidage) αυξάνεται κατά μήκος του ανυψωτή

3.2.2. Περιγραφή υδροδυναμικού μοντέλου

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το υδροδυναμικό μοντέλο του Sotudeh-Ghaarebagh. Το μοντέλο θεωρεί ότι η ρευστοποιημένη κλίνη χωρίζεται σε δυο κύριες περιοχές. Την κατώτερη περιοχή με σταθερή πυκνότητα αιώρησης (τυρβώδης ρευστοποιημένη κλίνη) και μια πιο αραιή ανώτερη περιοχή με μια φθίνουσα κατά ύψος πυκνότητα αιώρησης. Το ύψος της κάθε ζώνης εξαρτάται από την υπερκρίσιμη ταχύτητα, τη ροή μάζας των στερεών και τις ιδιότητες στερεών και ρευστών [⁵², ⁵³].

Για την εύρεση του ποσού της ροής που κατευθύνεται σε κάθε φάση (Bubble/Emulsion) και τη μέση τιμή του κενού χώρου σε κάθε μια από αυτές, χρησιμοποιούνται οι απλουστευμένες σχέσεις των Cui et. al. [23] με τις τιμές των σταθερών που δίνονται στην ίδια εργασία για υλικά ρευστοποίησης τύπου B κατά Geldart

Πίνακας 9 Τιμές παραμέτρων υδροδυναμικού μοντέλου

Flow	Τιμή	Bubble	Τιμή	Emulsion	Τιμή
$A_{f(1)}$	0.00	$A_{void-b(1)}$	0.784	$A_{void-e(1)}$	E_{mf}
$A_{f(2)}$	1.00	$A_{void-b(2)}$	-0.139	$A_{void-e(2)}$	0.00061
$A_{f(3)}$	0.62	$A_{void-b(3)}$	0.272	$A_{void-e(3)}$	-0.262

Η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης υπολογίζεται από τον αριθμό Reynolds για συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης για τον υπολογισμό του οποίου χρησιμοποιείται η σχέση των Wen and Yu [3]

$$Re_{mf} = (33.7^2 + 0.408 Ar)^{0.5} - 33.7$$

Για την μοντελοποίηση της διφασικής ροής στην πυκνή ζώνη θεωρούμε δύο τύπους αντιδραστήρων σε παραλληλία. Το ποσό της ροής που κατευθύνεται σε καθέναν καθορίζεται από την τιμή του δ .

Η φυσαλιδωτή φάση (bubble phase) μοντελοποιείται με ένα αντιδραστήρα αυλωτής ροής. Θεωρείται ότι η ροή αποτελείται αποκλειστικά από αέρια φάση χωρίς να περιέχει τη διεπιφάνεια (cloud) που περιγράφεται στο μοντέλο των Kunii and Levenspiel [6]. Ο όγκος του αντιδραστήρα ορίζεται ως

$$V_{PFR} = V_{R,DENSE} \varepsilon_b \delta$$

Το υπόλοιπο μέρος της ροής κατευθύνεται στην φάση του γαλακτώματος (emulsion phase) η οποία μοντελοποιείται με ένα αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης. Η φάση του γαλακτώματος θεωρούμε ότι περιέχει και τη διεπιφάνεια. Ο όγκος του αντιδραστήρα είναι

$$V_{CSTR} = V_R - V_{PFR}$$

Η μέση τιμή του κενού χώρου στην πυκνή ζώνη είναι

$$\varepsilon_{dense} = \varepsilon_b \delta + \varepsilon_e (1 - \delta)$$

Ο συνολικός όγκος της αέριας φάσης στην πυκνή ζώνη είναι

$$\varepsilon_{dense} V_R = \varepsilon_b V_{PFR} + \varepsilon_e V_{CSTR}$$

Με βάση την υπόθεση που έγινε παραπάνω ότι η φυσαλιδωτή φάση αποτελείται εξ'ολοκλήρου από αέρια η παραπάνω σχέση μπορεί να τροποποιηθεί ως εξής

$$\varepsilon_{dense} V_R = \varepsilon_b^* V_{PFR} + \varepsilon_e^* V_{CSTR} \xrightarrow{(\varepsilon_b^*=1)} \varepsilon_e^* = \frac{\varepsilon_{dense} V_R - V_{PFR}}{V_{CSTR}}$$

Η ανώτερη ζώνη αιωρείται τόσο από τα αέρια της καύσης στην κατώτερη ζώνη όσο και από τη δευτερεύουσα εισαγωγή αέρα προς καύση. Η δευτερεύουσα εισαγωγή αέρα προς καύση είναι αυτή που καθορίζει και το όριο μεταξύ των δύο ζωνών. Στο μοντέλο η ανώτερη ζώνη χωρίζεται

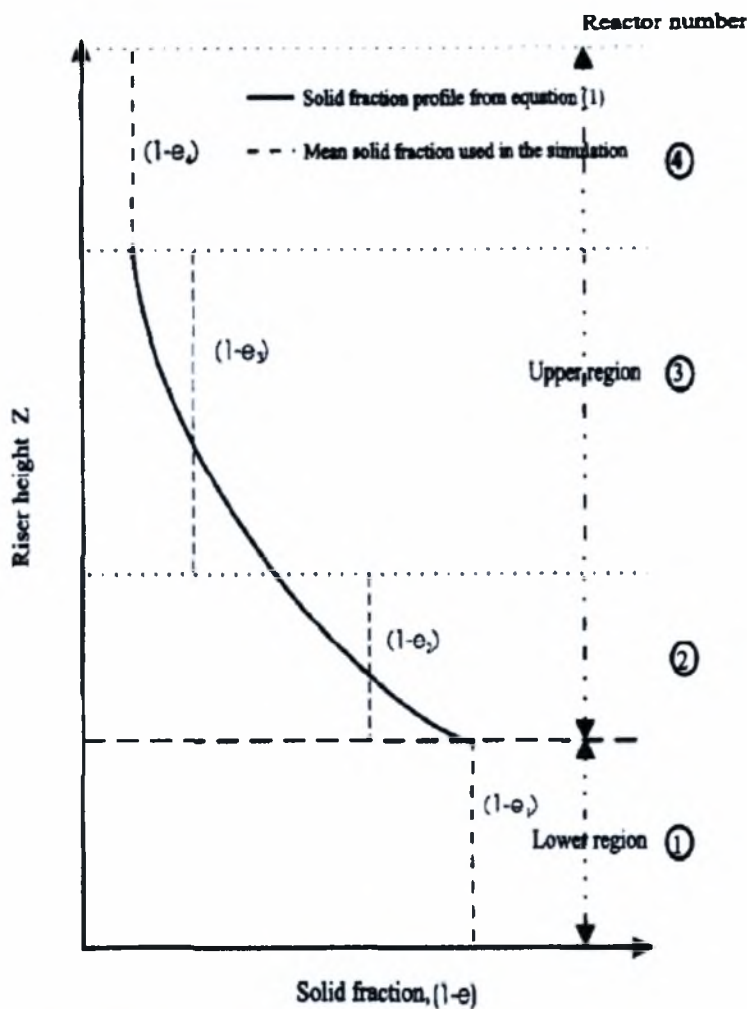
σε δύο επιμέρους περιοχές (ζώνη επιτάχυνσης και ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής) για τις οποίες θεωρούμε σταθερή μέση τιμή του κενού χώρου σύμφωνα με τη σχέση

$$\frac{\varepsilon^* - \varepsilon(z)}{\varepsilon^* - \varepsilon_1} = \exp(-\alpha Z)$$

Ο συντελεστής εξασθένησης ορίζεται ως [6]

$$\alpha = \frac{\beta}{U_t}$$

Όπου η τιμή του β προσδιορίζεται πειραματικά. Στο μοντέλο χρησιμοποιούμε την τιμή $\beta=5$ [2]



Εικόνα 17 μεταβολή κενού χώρου συναρτήσει του ύψους του ανυψωτή

Στην πλήρως ανεπτυγμένη ζώνη η μέση τιμή του κενού χώρου καθ' ύψος εκτιμάται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\varepsilon_4 = \frac{1}{1 + \frac{\Phi G_s}{U_2 \rho_s}}$$

Όπου το Φ είναι

$$\Phi = 1 + \frac{5.6}{F_r} + 0.47 F_{rt}^{0.41}$$

Η μεταβολή του κενού χώρου σε σχέση με το ύψος του ανυψωτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 17

3.3. Μοντέλο χημικών αντιδράσεων

Όταν η στερεά καύσιμη ύλη εισέρχεται σε μια ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας διασπάται σε δύο μέρη:

- Σε ένα μέρος πτητικών ενώσεων πλούσιων σε υδρογόνο οι οποίες καίγονται σχεδόν ακαριαία στην είσοδο του καυσίμου
- Σε ένα μέρος απανθρακωμένης στερεάς μάζας η οποία παραμένει μέσα στην κλίνη και καίγεται με αρκετά βραδύτερο ρυθμό.

Παράλληλα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών μέσα στην κλίνη σχηματίζονται οξειδία του αζώτου μέσα από πολύπλοκους μηχανισμούς. Συνήθως μέρος των στερεών σωματιδίων ρευστοποίησης επιλέγεται ώστε να έχει συγκεκριμένες ιδιότητες που επικουρούν στην αντιρρύπαντική τεχνολογία της κλίνης (καταλύτες, προσροφητικές ενώσεις). Οι συχνότερες εφαρμογές αφορούν τη δέσμευση των οξειδίων του θείου και του διοξειδίου του άνθρακα.

Ο Guignot [54] παραθέτει μια αρκετά ενήμερη λίστα των χημικών αντιδράσεων, των σχέσεων υπολογισμού των ρυθμών τους και των κινητικών παραμέτρων αυτών. Στο συγκεκριμένο μοντέλο επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί η καύση της στερεάς καύσιμης ύλης και ο σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου.

3.3.1. Παραδοχές μοντέλου χημικών αντιδράσεων

Οι παραδοχές που γίνονται για το μοντέλο χημικών αντιδράσεων είναι οι παρακάτω

- A. Η στερεά καύσιμη ύλη και τα αδρανή υλικά εισέρχονται στην κλίνη σε ίδια θερμοκρασία. Το γεγονός αυτό βασίζεται στους υψηλούς ρυθμούς τροφοδότησης που συναντώνται στις βιομηχανικές εφαρμογές όπου οι διαφορές θερμοκρασίας στην τροφοδότηση μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

- B. Δεδομένου ότι ο χρόνος για την καύση των πτητικών ενώσεων είναι πολύ μικρός σε σχέση με τον απαιτούμενο χρόνο για την καύση της απανθρακωμένης μάζας⁴, θεωρείται ότι η καύση των πτητικών ενώσεων είναι ακαριαία και λαμβάνει χώρα στο κατώτερο μέρος της κλίνης. Η καύση της απανθρακωμένης μάζας καυσίμου λαμβάνει χώρα μετά την πλήρη καύση των πτητικών ενώσεων
- C. Θεωρούμε ότι η στερεά καύσιμη ύλη μοιράζεται ομοιόμορφα σε κάθε περιοχή τη κλίνης και ότι το ίδιο ισχύει για τις απελευθερούμενες πτητικές ενώσεις. Η τελευταία παραδοχή ισχύει όταν ο χρόνος εσωτερικής ανακυκλοφορίας των στερεών είναι μικρότερος από τον χρόνο απελευθέρωσης των πτητικών ενώσεων, συνθήκη η οποία θεωρούμε ότι ικανοποιείται από τον σχεδιασμό της κλίνης.
- D. Για την σημαντική απλοποίηση των φαινομένων καύσης μέσα στη κλίνη θεωρούμε ότι οι θερμοκρασίες των αερίων μαζών, του φλεγόμενης απανθρακωμένης καύσιμης μάζας και της κλίνης είναι ίδιες. Στην πραγματικότητα η θερμοκρασία των σωματιδίων του άνθρακα είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή της αέριας φάσης.
- E. Θεωρούμε ότι στο κυκλώνα και το ρεύμα ανακυκλοφορίας δεν έχουμε χημική αντίδραση. Η παραδοχή αυτή αιτιολογείται από το γεγονός ότι έχουμε πολύ μικρό χρόνο παραμονής στον κυκλώνα και σχεδόν απουσία οξυγόνου στο ρεύμα ανακυκλοφορίας.
- F. Θεωρούμε ότι τα σωματίδια του άνθρακα διατηρούν το μέγεθός τους κατά την καύση. Μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τη μείωση της διαμέτρου των σωματιδίων κατά την καύση έχουν ήδη προταθεί στη βιβλιογραφία όμως χάριν απλουστεύσεως παραλήφθηκαν από τη συγκεκριμένη εργασία.
- G. Φαινόμενα συσσωμάτωσης των στερεών σωματιδίων δεν λαμβάνονται υπόψη.

3.3.2. Μοντέλο διάσπασης

Η διάσπαση της καύσιμης ύλης θα γίνει με το υπομοντέλο RYIELD του ASPEN PLUS θεωρώντας ως σύσταση του ρεύματος εξόδου τα συστατικά του καυσίμου που προκύπτουν από την στοιχειακή ανάλυση του καυσίμου. Σε αυτό το μοντέλο η στερεά καύσιμη ύλη διασπάται στο πτητικό και το στερεό της μέρος. Θεωρείται ότι το πτητικό τμήμα βρίσκεται σε αέρια μορφή και αντιδρά ακαριαία με τον αέρα καύσης, ενώ το στερεό μέρος θεωρείται εξολοκλήρου ως απανθρακωμένη καύσιμη ύλη. Τα κλάσματα των στοιχείων στα οποία διασπάται η καύσιμη ύλη προκύπτουν από την άμεση (proximate) και την στοιχειακή (ultimate) ανάλυση της καύσιμης ύλης.

⁴ Η εξέταση των φαινομένων αυτών από τους Borghi, G., Sarofilm, A. F. And Beer J.M. (A model of coal devolatilization and combustion in fluidized beds, paper pres. At the AIChE 70th Ann. Meeting, New York 1977) έδειξε ότι το 90% των πτητικών ενώσεων σωματιδίων 3mm εκτεθειμένων σε 8% O₂ απελευθερώνεται σε διάστημα 3-10s, ενώ οι χρόνοι για την καύση του υπόλοιπου μέρους της απανθρακωμένης μάζας είναι μεταξύ 300-1000s.

3.3.3. Μοντέλο καύσης πτητικών

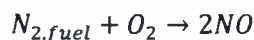
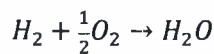
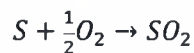
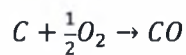
Θεωρούμε ότι το πτητικό μέρος του καυσίμου (VM) αποτελείται από υδρογόνο, θείο και άνθρακα (X_c) και αντιδρά εξ' ολοκλήρου στο κάτω μέρος του ανυψωτή σύμφωνα με τις παρακάτω παραδοχές.

- Όλο το υδρογόνο μετατρέπεται σε νερό κατά τη διεργασία καύσης
- Όλο το θείο αντιδρά προς παραγωγή διοξειδίου του θείου
- Ο άνθρακας του πτητικού μέρους σχηματίζει μονοξείδιο του άνθρακα λόγω έλλειψης οξυγόνου

Ο άνθρακας του πτητικού μέρους υπολογίζεται εμμέσως από τη στοιχειακή ανάλυση

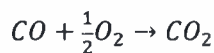
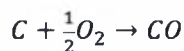
$$X_c = VM - H - S$$

Η διεργασία καύσης του πτητικού μέρους μοντελοποιείται με τον αντιδραστήρα RStoich του ASPEN PLUS χρησιμοποιώντας το παρακάτω σχήμα αντιδράσεων.



3.3.4. Μοντέλο καύσης στερεών

Θεωρούμε ότι το μέρος των απανθρακωμένων σωματιδίων που προέρχεται από τη διάσπαση της στερεάς καύσιμης ύλης αποτελείται από το υπόλοιπο του άνθρακα ($1 - X_c$) της στοιχειακής ανάλυσης και στάχτη. Τα σωματίδια αυτά καίγονται προς μίγμα μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα. Σε αυτό το υπομοντέλο θεωρούνται τρεις κύριες αντιδράσεις



Για την μοντελοποίηση χρησιμοποιούμε αντιδραστήρες συνεχούς ανάδευσης (RCSTR) για την φάση του γαλακτώματος παράλληλα με αντιδραστήρες ταπωμένης ροής (RPlug) για την ροή ανάμεσα στις φυσαλίδες. Το κινητικό μοντέλο για τους ρυθμούς των αντιδράσεων ορίζεται από τον χρήση με εξωτερική υπορουτίνα της FORTRAN.

Για την εύρεση του ρυθμού καύσης των στερεών σωματιδίων θα πρέπει να οριστεί ρητά ο κενός χώρος μέσα στον ανυψωτή καθώς επίσης και η κατανομή των γεωμετρικών στοιχείων των σωματιδίων που αιωρούνται μέσα στον ανυψωτή. Ο ρυθμός της αντίδρασης καύσης είναι τύπου Arrhenius με κινητικούς όρους οι οποίοι λαμβάνουν τιμές από τη βιβλιογραφία. Επίσης χρησιμοποιούνται ρυθμιστικές παράμετροι στο μοντέλο καύσης ώστε να λάβουν υπόψη τις ιδιαιτερότητες του σχεδιασμού του ανυψωτή και την πολυπλοκότητα των φαινομένων. Η εύρεση των τιμών των παραμέτρων αυτών γίνεται έπειτα από μέτρηση των καυσαερίων και των θερμοκρασιών σε διάφορα ύψη του ανυψωτή και ρύθμιση των παραμέτρων ώστε να ταιριαξουν τις πειραματικές μετρήσεις.

$$r_{i,i} = \frac{3\eta_{O_2} k_{cr} F_{char,i} (1 - \varepsilon_i)}{\rho_{char} r_c (1 - \varepsilon_c) F_{solid,i}} C_{O_2}$$

$$k_{cr} = k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{R_g T_p}\right)$$

Ο ρυθμός της περαιτέρω οξειδωσης του μονοξειδίου του άνθρακα προς διοξείδιο περιγράφεται επίσης από έναν ρυθμό αντίδρασης τύπου Arrhenius με γνωστές κινητικές από την βιβλιογραφία. Ο ρυθμός εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία, από τις συγκεντρώσεις του οξυγόνου, του μονοξειδίου του άνθρακα και των υδρατμών στον χώρο καύσης και τον κενό χώρο στον ανυψωτή.

$$r_{CO,i} = \beta_2 f_{CO} f_{O_2}^{0.5} f_{H_2O}^{0.5} \left(\frac{P}{R_1 T_b}\right) \exp\left(-\frac{E_2}{R_g T_b}\right) C_{\varepsilon_i}$$

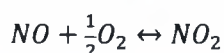
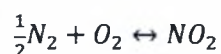
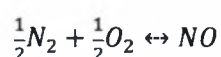
Τα η_{O_2} , β_2 αποτελούν τις ρυθμιστικές παραμέτρους του μοντέλου χημικών αντιδράσεων για την καύση του άνθρακα.

3.3.5. Μοντέλο σχηματισμού Οξειδίων του Αζώτου

Ο σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου είναι αποτέλεσμα ενός συνδυασμού θερμικού σχηματισμού (λόγω θερμοδυναμικής ισορροπίας) και οξειδωσης του αζώτου του καυσίμου. Οι δύο μηχανισμοί λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικό εύρος θερμοκρασιών. Σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες ο θερμικός σχηματισμός οξειδίων του αζώτου από το άζωτο του αέρα καύσης γίνεται σημαντικός ενώ σε χαμηλές θερμοκρασίες επικρατεί ο σχηματισμός οξειδίων του αζώτου λόγω οξειδωσης του αζώτου της καύσιμης ύλης. Βεβαίως θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην πραγματικότητα η χημεία σχηματισμού των οξειδίων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη λόγω της ύπαρξης καταλυτικών αντιδράσεων που περιλαμβάνουν τα απανθρακωμένα σωματίδια, τη στάχτη και τα υλικά ρευστοποίησης. Στο μοντέλο της εργασίας για λόγους απλοποίησης

επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί μόνο ο θερμικός μηχανισμός σχηματισμού, ο οποίος οφείλεται στη θερμοδυναμική ισορροπία.

Ο θερμικός σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου μοντελοποιείται με ένα αντιδραστήρα ισορροπίας (REquil) για κάθε τμήμα του ανυψωτή και περιλαμβάνει τις παρακάτω χημικές αντιδράσεις.



3.3.6. Ρύθμιση μοντέλου χημικών αντιδράσεων

Η χρήση ημι-εμπειρικών προσεγγίσεων στο μοντέλο των χημικών αντιδράσεων απαιτεί και τη ρύθμισή των ρυθμών αντίδρασης ώστε να προσεγγίσουν τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Στο μοντέλο χρησιμοποιούνται δύο συντελεστές διόρθωσης για τους ρυθμούς των χημικών αντιδράσεων: ένας για την οξείδωση του CO προς CO₂ και ένας για την καύση του στερεού άνθρακα. Η φυσική σημασία των συντελεστών διόρθωσης των ρυθμών των χημικών αντιδράσεων είναι η πρόβλεψη των αποκλίσεων των θεωρητικών τιμών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Οι αποκλίσεις από τις θεωρητικές τιμές οφείλονται:

1. στα φαινόμενα έντονης ανάμιξης στο εσωτερικό της κλίνης (υψηλοί συντελεστές μετάδοσης θερμότητας και διάχυσης), σε αντίθεση με τις μετρήσεις σε εργαστηριακές συνθήκες με μεθόδους θερμοβαρομετρίας (thermogravimetric analysis).
2. στο προσεγγιστικό μοντέλο καύσης του στερεού άνθρακα το οποίο θεωρεί όλη τη μάζα του άνθρακα πλήρως διαθέσιμη. Θεωρητικά, κατά την καύση στερεών καυσίμων αντιδρά κατά κύριο λόγο φλούδα της εξωτερικής επιφάνειας, που συνεπάγεται βαθμιαία καύση με παράλληλη μείωση του μεγέθους του σωματιδίου. Τέτοιου είδους διεργασίες μοντελοποιούνται καλύτερα με μοντέλα τύπου συρρικνωμένου πυρήνα (shrinking core models).
3. Στη παραδοχή της μηδενικής αντίστασης διάχυσης του οξυγόνου προς τα σωματίδια. Πολυπλοκότερα μοντέλα τα οποία βρίσκονται πιο κοντά στην πραγματικότητα λαμβάνουν υπόψη τους τη διάχυση του οξυγόνου στην εξωτερική επιφάνεια του άνθρακα και στο εσωτερικό των σωματιδίων (λόγω του πορώδους). Οι συντελεστές αντίστασης διάχυσης επηρεάζονται τόσο από την τοπική συγκέντρωση των υλικών ρευστοποίησης όσο και από τις επικαθίσεις της στάχτης στην εξωτερική επιφάνεια των σωματιδίων.

Η ρύθμιση των συντελεστών διόρθωσης των ρυθμών των χημικών αντιδράσεων γίνεται βάσει πειραματικών μετρήσεων. Για την εύρεση των τιμών θεωρούμε μια αντικειμενική συνάρτηση

που περιλαμβάνει την θερμοκρασία και τις συγκεντρώσεις CO και CO₂ στην έξοδο του ανυψωτήρα. Η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει υπόψη μια σχετική βαρύτητα για κάθε μέτρηση και μια δεδομένη τυπική απόκλιση ως αβεβαιότητα των πειραματικών μετρήσεων. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ικανοποίηση της συνθήκης

$$\text{αριθμός μετρήσεων} \geq \text{αριθμό ρυθμιστικών παραμέτρων}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως [55]

$$f = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{Nsets} \left(W_i \left(\sum_{j=1}^{Nexpi} \left(\sum_{m=1}^{Nrr} \left(\frac{X_{mrr} - X_{rr}}{\sigma_{Xmrr}} \right)^2 \right) \right) \right)$$

Όπου Nsets ο αριθμός των σετ των πειραματικών μετρήσεων, W_i συντελεστές βαρύτητας για κάθε μέτρηση, Nexpi ο αριθμός των πειραμάτων για κάθε σετ μετρήσεων, X_{mrr} η μετρημένη τιμή, X_{rr} η υπολογισμένη τιμή, σ_{Xmrr} η τυπική απόκλιση της μετρημένης τιμής

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως η ελαχιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για τιμές των ρυθμιστικών παραμέτρων σε συγκεκριμένο πεδίο τιμών.

$$\text{MIN}(f), \quad X_{rri} \in [Lbound_i, Ubound_i]$$

3.4. Παρουσίαση του μοντέλου προσομοίωσης

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας σε περιβάλλον εμπορικού πακέτου μηχανολογικού σχεδιασμού διεργασιών. Το εμπορικό λογισμικό παρέχει έτοιμες βιβλιοθήκες για φυσικές και χημικές ιδιότητες των υλικών καθώς επίσης και έτοιμα modules για διάφορους τύπους συσκευών διεργασιών. Για την προσομοίωση της κάθε διάταξης επιλύονται τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας κάθε συσκευής και η σύγκλιση επιτυγχάνεται με χρήση αριθμητικών αλγορίθμων επίλυσης. Λεπτομερή τεχνικά στοιχεία παρατίθενται στον τόμο Β της παρούσας εργασίας με τίτλο «Υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης ρευστοποιημένων κλινών ανακυκλοφορίας - Εγχειρίδιο χρήσης – v.4.3.1»

3.4.1. Ξηραντήρας

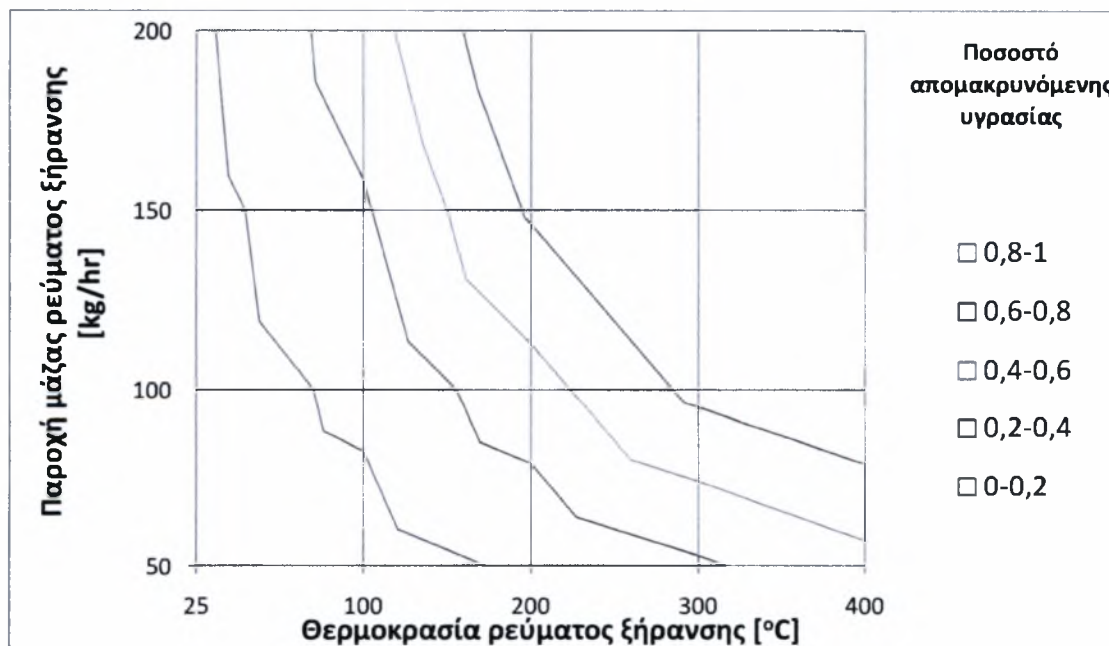
Για τη ξήρανση της καύσιμης ύλης χρησιμοποιείται ένα θερμό αέριο ρεύμα το οποίο απομακρύνει την υγρασία από το καύσιμο. Ως μόνες σχεδιαστικές παράμετροι επιλέχθηκε να είναι η παροχή μάζας και η θερμοκρασία του ρεύματος ξήρανσης.

Θεωρείται ότι ο σχεδιασμός του ξηραντήρα είναι τέτοιος ώστε να υπάρχει αρκετός χρόνος παραμονής και επαρκείς συνθήκες μεταφοράς θερμότητας και μάζας ώστε να επιτευχθεί η

πλήρης ξήρανση της καύσιμης ύλης σε δεδομένες συνθήκες θερμοκρασίας του ρεύματος εισόδου.

Η διεργασία της ξήρανσης πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται ένας στοιχειομετρικός αντιδραστήρας και ένας αντιδραστήρας διαχωρισμού. Στον ξηραντήρα εισέρχονται δύο ρεύματα: το ρεύμα της στερεάς καύσιμης ύλης και το αέριο ρεύμα ξήρανσης. Ο πρώτος αντιδραστήρας, βάσει μιας εικονικής αντίδρασης, καθορίζει το ποσό της υγρασίας που απελευθερώνεται από τη στερεά καύσιμη ύλη, ενώ ο διαχωριστής διαχωρίζει τα δύο ρεύματα βάσει της φάσης που βρίσκονται. Η απομακρυνόμενη υγρασία από το στερεό καύσιμο εισέρχεται στην αέρια φάση και απομακρύνεται μέσω του ρεύματος ξήρανσης. Ο συνδυασμός αυτών των δύο διεργασιών καθορίζει το τελικό ποσό της υγρασίας που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης. Εξ' ορισμού θεωρούμε ότι η ξηρή καύσιμη ύλη περιέχει υγρασία σε ποσοστό 10%⁵.

Σημαντικό ρόλο τόσο στην απομάκρυνση της υγρασίας όσο και στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο της διάταξης έχει το ρεύμα ξήρανσης. Η απαλοιφή της υγρασίας της καύσιμης ύλης βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση του θαλάμου καύσης και μειώνει τα φαινόμενα διάβρωσης στο εσωτερικό του, όμως απαιτεί ποσά ενέργειας που πρέπει να αφαιρεθούν από το συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο. Στην Εικόνα 18 φαίνεται η απόδοση του ξηραντήρα, όσον αφορά την απομακρυνόμενη υγρασία, σε διάφορες συνθήκες του ρεύματος ξήρανσης και για συγκεκριμένες συνθήκες εισόδου της στερεάς καύσιμης ύλης προς ξήρανση.

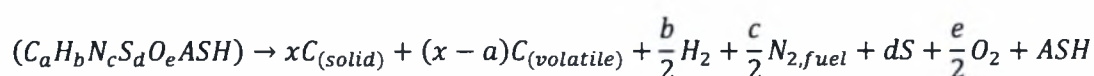


Εικόνα 18 Χάρτης λειτουργίας μονάδας ξήρανσης (δεδομένα στερεάς καύσιμης ύλης προς ξήρανση παροχή: 67 kg/hr, θερμοκρασία: 25°C)

⁵ Το ποσοστό αυτό είναι παράμετρος του μοντέλου και είναι δυνατόν να αλλάξει από το χρήστη. Λεπτομέρειες παρατίθενται στον τόμο Β της εργασίας.

3.4.2. Διάσπαση στερεάς καύσιμης ύλης (πυκνή ζώνη)

Η διάσπαση της στερεάς καύσιμης ύλης πραγματοποιείται με ένα αντιδραστήρα διάσπασης. Στον αντιδραστήρα αυτό η στερεά καύσιμη ύλη διασπάται στα στοιχεία της βάσει της άμεσης και της στοιχειακής ανάλυσης. Μέρος του άνθρακα που προκύπτει από τον συνδυασμό των αναλύσεων παραμένει σε στερεή φάση. Θεωρείται ότι η διεργασία αυτή συντελείται στο κατώτατο μέρος του θαλάμου καύσης με την είσοδο του καυσίμου σε αυτόν. Η θερμότητα που απαιτείται για την διάσπαση του στερεού καυσίμου αφαιρείται αφότου ολοκληρωθούν όλες οι διεργασίες στην πυκνή ζώνη. Σε αυτή τη θερμότητα προστίθεται ένα επιπλέον ποσοστό θερμότητας το οποίο χρησιμοποιείται για να λάβει υπόψη τυχόν αποκλίσεις που μπορεί να υπάρχουν στον υπολογισμό της θερμότητας διάσπασης. Η προστιθέμενη αυτή θερμότητα αποτελεί μια δευτερεύουσα ρυθμιστική παράμετρο του μοντέλου. Η διάσπαση της καύσιμης ύλης περιγράφεται από την εικονική αντίδραση



3.4.3. Καύση πτητικών ενώσεων (πυκνή ζώνη)

Η καύση των πτητικών ενώσεων πραγματοποιείται με ένα στοιχειομετρικό αντιδραστήρα. Δεδομένου ότι η συγκεκριμένη διεργασία είναι ακαριαία, οι αντιδράσεις πραγματοποιούνται βάσει της στοιχειομετρίας της κάθε αντίδρασης μέχρι την πλήρη μετατροπή του ενός εκ των αντιδρώντων. Το μοντέλο θεωρεί ότι υπάρχει πάντοτε αρκετό οξυγόνο για την πλήρη καύση των πτητικών ενώσεων. Σε περιπτώσεις έλλειψης οξυγόνου το μοντέλο χρειάζεται τροποποίηση. Ο Πίνακας 10 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά του μοντέλου καύσης πτητικών.

Πίνακας 10 Χαρακτηριστικά μοντέλου καύσης πτητικών ενώσεων

Κατώτατη περιοχή πυκνής ζώνης	
Μοντέλο αντιδραστήρα	Στοιχειομετρικός
Χημικές Αντιδράσεις	$C_{(volatile)} + 1/2 O_2 \rightarrow CO$ $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$ $N_{2, fuel} + O_2 \rightarrow 2NO$ $S + O_2 \rightarrow SO_2$
Βαθμός μετατροπής	100%
Φάσεις ροής αντιδρώντων	αέρια

3.4.4. Καύση απανθρακωμένης μάζας (πυκνή ζώνη)

Η καύση της απανθρακωμένης μάζας και η περεταίρω οξείδωση του CO των πτητικών ενώσεων μοντελοποιείται με σύζευξη του υδροδυναμικού μοντέλου της πυκνής ζώνης και των μοντέλων καύσης. Θεωρείται ότι η περιοχή της φυσαλιδωτής ροής περιλαμβάνει αντιδράσεις μόνο στην αέρια φάση ενώ στην περιοχή του γαλακτώματος πραγματοποιείται η καύση της απανθρακωμένης μάζας.

Το μοντέλο θεωρεί επίσης μεταφορά θερμότητας από την φυσαλιδωτή ζώνη προς την περιοχή του γαλακτώματος. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι αντιδράσεις στην αέρια φάση είναι σαφέστερα γρηγορότερες από την καύση των στερεών σωματιδίων. Η τελευταία πραγματοποιείται στην εξωτερική επιφάνεια των σωματιδίων και περιγράφεται από μοντέλα τύπου *shrinking core*, τα οποία για λόγους απλότητας δεν χρησιμοποιούνται στη παρούσα εργασία.

Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης επιλέχθηκε ο εικονικός διαχωρισμός της συνολικής ροής που εισέρχεται από τη διεργασία της καύσης των πτητικών σε στερεά και αέρια φάση. Μέρος δV_R της αέριας φάσης κατευθύνεται προς ένα αντιδραστήρα τύπου αυλωτής ροής, ο οποίος προσομοιώνει τη φυσαλιδωτή ροή (καθαρή αέρια φάση), και το υπόλοιπο $(1-\delta)V_R$ μέρος αναμειγνύεται με την στερεή φάση για να εισαχθεί σε ένα αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης που προσομοιώνει την περιοχή του γαλακτώματος (διφασική ροή).

Ο αντιδραστήρας αυλωτής ροής θεωρείται ότι διατρέχεται από ένα ψυκτικό ρεύμα σε ομορροή το οποίο προσομοιώνει τη μεταφορά θερμότητας από τη φυσαλιδωτή περιοχή προς την περιοχή του γαλακτώματος. Το ψυκτικό αυτό ρεύμα (περιλαμβάνει αέρια και στερεά φάση) απορροφά ποσά θερμότητας από τον αντιδραστήρα αυλωτής ροής, θεωρώντας σταθερό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, και εισάγεται σαν ρεύμα εισόδου στον αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αποτελεί παράμετρο του μοντέλου και λαμβάνεται από τη βιβλιογραφία.

Θεωρείται τέλος, ότι οι φυσαλίδες διατηρούν το μέγεθός τους σταθερό καθ' όλη τη παρουσία τους στη πυκνή ζώνη. Ως κρίσιμο μέγεθός τους ορίζεται η μέση διάμετρος φυσαλίδας. Η παρουσία τους μοντελοποιείται καθορίζοντας στον αντιδραστήρα αυλωτής ροής αριθμό αυλών ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση

$$n_{tubes} = \frac{V_{PFR}}{V_{bubble}}$$

Στον αντιδραστήρα αυλωτής ροής πραγματοποιείται αποκλειστικά η οξείδωση του μονοξειδίου του άνθρακα προς διοξείδιο, ενώ στον αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης πραγματοποιείται επιπλέον και η καύση της στερεάς απανθρακωμένης μάζας. Ο Πίνακας 11 παραθέτει τα χαρακτηριστικά του μοντέλου για την καύση στην πυκνή ζώνη.

Πίνακας 11 Χαρακτηριστικά μοντέλου καύσης πυκνής ζώνης

	Φυσαλιδωτή περιοχή (bubble phase)	Περιοχή γαλακτώματος (emulsion phase)
Μοντέλο αντιδραστήρα	Αυλωτής Ροής	Συνεχούς Ανάδευσης
	$CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$	$CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$
	A=1E+04, E=67000	A=1E+04, E=67000
Χημικές Αντιδράσεις		$C + 1/2O_2 \rightarrow CO$
		A=1.5E+07, E=127000
Κενός χώρος (voidage)	1	ϵ_e^*
Όγκος αντιδραστήρα	V_{PFR}	V_{CSTR}
Συντελεστής μεταφοράς Θερμότητας Bubble - Emulsion	450 W/m ² K	-
Κλάσμα ροής αντιδρώντων	δ	1- δ
Φάσεις ροής αντιδρώντων	αέρια	αέρια - στερεή

3.4.5. Καύση απανθρακωμένης μάζας (αραιή ζώνη)

Η μικρή συγκέντρωση στερεών σε συνδυασμό με τις υψηλές ταχύτητες ρευστοποίησης θεωρούμε ότι αποτρέπουν τον σχηματισμό φυσαλίδων στην αραιή ζώνη. Σημαντικό στοιχείο είναι ο καθορισμός της μέσης τιμής του κενού χώρου κατά την αξονική διεύθυνση του ανυψωτήρα και η εύρεση του ύψους της ζώνης επιτάχυνσης.

Η μοντελοποίηση της περιοχής του ανυψωτήρα πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο μοντελοποιείται η ζώνη επιτάχυνσης χρησιμοποιώντας έναν αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης με όγκο που καθορίζεται από το ύψος της ζώνης επιτάχυνσης.

Το ύψος της ζώνης επιτάχυνσης υπολογίζεται από τη σχέση

$$\frac{\epsilon^* - \epsilon_{full}}{\epsilon^* - \epsilon_{dense}} = \exp(-\alpha Z_{acc})$$

Η τιμή του κενού χώρου στη ζώνη της πλήρους ανεπτυγμένης ροής βρίσκεται από τη σχέση

$$\epsilon_{full} = \frac{1}{1 + \frac{\phi G_s}{U_g \rho_s}}$$

Η τιμή του κενού χώρου στη πυκνή ζώνη έχει υπολογιστεί προηγουμένως.

Πίνακας 12 Χαρακτηριστικά μοντέλου ανυψωτήρα

	Ζώνη επιτάχυνσης	Ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής
Μοντέλο αντιδραστήρα	RCSTR	RCSTR
Χημικές Αντιδράσεις	$CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$ $A=1E+04, E=67000$ $C + 1/2O_2 \rightarrow CO$ $A=1.5E+07, E=127000$	
Κενός χώρος (voidage)	ϵ_{acc}	ϵ_{full}
Όγκος αντιδραστήρα	$\frac{\pi d_{riser}^2}{4} Z_{acc}$	$\frac{\pi d_{riser}^2}{4} Z_{full}$
Φάσεις ροής αντιδρώντων	αέρια - στερεή	

Το ύψος της ζώνης της πλήρους ανεπτυγμένης ροής βρίσκεται από το συνολικό ύψος του ανυψωτήρα της διάταξης

$$Z_{full} = H_{riser} - Z_{acc}$$

Η μέση τιμή του κενού χώρου στη ζώνη επιτάχυνσης ορίζεται ως ο μέσος όρος των τιμών του κενού χώρου για την πυκνή ζώνη και τη ζώνη της πλήρους ανεπτυγμένης ροής.

$$\epsilon_{acc} = \frac{\epsilon_{dense} + \epsilon_{full}}{2}$$

Ο Πίνακας 12 παραθέτει τα χαρακτηριστικά του μοντέλου του ανυψωτήρα.

3.4.6. Σχηματισμός/καταστροφή NO_x (πυκνή και αραιή ζώνη)

Ο σχηματισμός/καταστροφή των οξειδίων του αζώτου υπολογίζεται σε αντιδραστήρες ισορροπίας, οι οποίοι δεν σχετίζονται με το υδροδυναμικό μοντέλου. Η στερεά και η αέρια φάση εισέρχονται στον αντιδραστήρα ισορροπίας όπου βάσει της σταθεράς ισορροπίας υπολογίζεται ο βαθμός μετατροπής της κάθε αντίδρασης. Για την προσομοίωση του σχηματισμού ή/και της καταστροφής των οξειδίων του αζώτου χρησιμοποιείται ένας αντιδραστήρας για κάθε ζώνη (πυκνή, ζώνη επιτάχυνσης και ζώνη πλήρως ανεπτυγμένης ροής). Το μοντέλο θεωρεί ότι ο κύριος σχηματισμός των ενώσεων του αζώτου προέρχεται από την οξείδωση του αζώτου του καυσίμου κατά την καύση των πτητικών ενώσεων. Οι αντιδραστήρες

ισορροπίας καθορίζουν τον περαιτέρω σχηματισμό ή την καταστροφή των οξειδίων του αζώτου ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε ζώνη.

Ο Πίνακας 13 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά του μοντέλου καύσης πτητικών.

Πίνακας 13 Χαρακτηριστικά μοντέλου σχηματισμού/καταστροφής οξειδίων του αζώτου

Πυκνή ζώνη, Ζώνη επιτάχυνσης, Ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής	
Μοντέλο αντιδραστήρα	Ισορροπίας
	$C_{(volatile)} + 1/2O_2 \rightarrow CO$
Χημικές Αντιδράσεις	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$
	$N_{2,fuel} + O_2 \rightarrow 2NO$
Βαθμός μετατροπής	$f(K_{eq})$
Φάσεις ροής αντιδρώντων	αέρια

3.4.7. Κυκλώνας

Για τον διαχωρισμό των καυσαερίων από τα στερεά υλικά ρευστοποίησης χρησιμοποιείται η υπομονάδα διαχωρισμού που αποτελείται από ένα κυκλώνα, ένα διαμεριστή και το ρεύμα ανακυκλοφορίας. Το μοντέλο θεωρεί ότι στον κυκλώνα διαχωρίζεται πλήρως η στερεά από την αέρια φάση. Το ρεύμα της στερεάς φάσης οδηγείται στον διαμεριστή ώστε μέρος του να απομακρυνθεί από τη διάταξη για να ικανοποιηθεί το ισοζύγιο μάζας των στερεών υλικών ρευστοποίησης στο μοντέλο. Το υπόλοιπο μέρος αποτελεί το ρεύμα ανακυκλοφορίας το οποίο επιστρέφει τα υλικά ρευστοποίησης στον θάλαμο καύσης. Το λογισμικό παρέχει την δυνατότητα προσομοίωσης της διεργασίας αυτής βάσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κυκλώνα, το οποίο όμως παραλείπεται χάριν διατήρησης της απλότητας του μοντέλου.

3.4.8. Εναλλάκτες θερμότητας

Οι εναλλάκτες θερμότητας προσομοιώνονται από μοντέλα εναλλακτών θερμότητας ομορροής. Ο υπολογισμός των ποσών μεταφοράς θερμότητας γίνεται βάσει σταθερών ολικών συντελεστών μετάδοσης θερμότητας που ορίζονται από το χρήστη. Εναλλακτικά παρέχεται από το λογισμικό η δυνατότητα του υπολογισμού της εναλλαγής θερμότητας βάσει λεπτομερών γεωμετρικών και σχεδιαστικών παραμέτρων των εναλλακτών θερμότητας. Στην παρούσα φάση ανάπτυξης του μοντέλου επιλέχθηκε να μην εισαχθεί επιπλέον πολυπλοκότητα. Οι εναλλάκτες τοποθετούνται στο τέλος κάθε ζώνης και δέχονται σαν θερμή είσοδο τα ρεύματα εξόδου κάθε

ζώνης και σαν ψυχρή είσοδο αέρα σε συνθήκες περιβάλλοντος. Η έξοδος του ψυχρού ρεύματος αποτελεί το παραγόμενο προϊόν της διάταξης.

Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας υπολογίζεται εμπειρικά θεωρώντας δύο ακραίες συνθήκες και τοπική διακύμανση μεταξύ αυτών: κενός χώρος μηδενικός οπότε η μεταφορά θερμότητας γίνεται μέσω αγωγής από τα στερεά υλικά ρευστοποίησης προς τα τοιχώματα και κενός χώρος ίσος με μονάδα οπότε υπάρχει συναγωγή από το καθαρό αέριο ρευστοποίησης προς το τοίχωμα.

Εισάγεται επίσης ένας επιπλέον συντελεστής διόρθωσης $\text{corf}U$ για την συνεκτίμηση της επίδρασης του λόγου λ . Ο λόγος λ επηρεάζει την παροχή μάζας στο εσωτερικό της κλίνης επομένως σχετίζεται και με τον χρόνο επαφής των σωματιδίων με τα τοιχώματα. Ο λόγος λ προτιμήθηκε αντί της εσωτερικής παροχής μάζας για να μπορεί να εκτιμηθεί η μεταβολή του ολικού συντελεστή θερμότητας σε σχέση με μια κατάσταση αναφοράς.

Η σχέση υπολογισμού του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιείται από το μοντέλο είναι

$$U = \frac{[\varepsilon_i U_s + (1 - \varepsilon_i) U_g]}{\lambda \text{corf}U}$$

Οι συντελεστές U_s και $\text{corf}U$ αποτελούν τις ρυθμιστικές παραμέτρους του μοντέλου εναλλαγής θερμότητας. Γενικά, είναι προτιμότερο η εκτίμηση του ολικού συντελεστή θερμότητας να γίνεται πειραματικά σε συνθήκες λειτουργίας της συγκεκριμένης διάταξης για κάθε ζώνη της ρευστοποιημένης κλίνης.

3.5. Συμπληρωματικές σχέσεις υπολογισμού

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες συμπληρωματικές σχέσεις υπολογισμού που αφορούν τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας και τους μακροσκοπικούς υπολογισμούς κάποιων βασικών δεδομένων της διεργασίας καύσης. Τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας θα γίνουν για τις διεργασίες καύσης και θέρμανσης προϊόντος. Οι παρακάτω σχέσεις είναι γραμμένες έτσι ώστε στο αριστερό σκέλος να είναι η είσοδος και στο δεξιό η έξοδος.

3.5.1. Ισοζύγιο μάζας Διεργασίας Καύσης

Στον θάλαμο καύσης εισέρχονται οι ροές καυσίμου, αέρα και ανακυκλοφορίας στερεών και εξέρχονται η διφασική (αέρια+στερεή φάση) ροή των προϊόντων της καύσης. Το ισοζύγιο μάζας είναι

$$\dot{m}_f + \dot{m}_{air,comb} + \dot{m}_{rec} = \dot{m}_{fg}$$

Στον ανυψωτή δεν έχουμε μεταβολές στη ροή της μάζας. Η ροή των αερίων που εξέρχονται από τον θάλαμο καύσης παραμένει σταθερή

$$\dot{m}_{fg,in} = \dot{m}_{fg,out}$$

Στον κυκλώνα διαχωρίζονται οι δύο φάσεις ρεύματος των αερίων που εξέρχονται από τον θάλαμο καύσης

$$\dot{m}_{fg,out} = \dot{m}_e + \dot{m}_s$$

Στον κυρίως εναλλάκτη θερμότητας η ροή της στερεής φάσης παραμένει σταθερή

$$\dot{m}_{s,in} = \dot{m}_{s,out}$$

3.5.2. Ισοζύγιο μάζας Διεργασίας θέρμανσης προϊόντος

Η ροή μάζας που εισέρχεται στη μονάδα συγκέντρωσης και ελέγχου του παραγόμενου θερμού αέρα αποτελείται από τις ροές εξόδου του κυρίως εναλλάκτη θερμότητας, των εναλλακτών θερμότητας των τμημάτων του ανυψωτή, του εναλλάκτη θερμότητας του θαλάμου καύσης

$$\dot{m}_{a,mhe} + \dot{m}_{a,ris} + \dot{m}_{a,che} = \dot{m}_{a,col}$$

Οι παροχές μάζας εισόδου και εξόδου στους εναλλάκτες διατηρούνται σταθερές

3.5.3. Συμπληρωματικά ισοζύγια μάζας

Το ρεύμα ανακύκλωσης διαμέσου της βαλβίδας ανακύκλωσης περιλαμβάνει τα αδρανή όπως επίσης και ένα ρεύμα αέρα που χρησιμοποιείται για την προώθηση τους

$$\dot{m}_{s,rec} + \dot{m}_{a,rec} = \dot{m}_{rec}$$

Η ροή των αδρανών παραμένει αναλλοίωτη καθ'όλη τη διαδρομή επομένως

$$\dot{m}_{s,in} = \dot{m}_{s,out} = \dot{m}_{s,rec} = \dot{m}_s$$

Από τα παραπάνω προκύπτει η απαιτούμενη παροχή μάζας αέρα του συμπιεστή για την τροφοδοσία του θαλάμου καύσης, την προώθηση του ρεύματος ανακύκλωσης και την ροή ψυχρού αέρα προς θέρμανση

$$\dot{m}_{a,comp} = \dot{m}_{a,mhe} + \dot{m}_{a,ris} + \dot{m}_{a,che} + \dot{m}_{a,com} + \dot{m}_{a,rec}$$

Ο συνολικός αέρας που παρέχεται για την καύση της βιομάζας είναι

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a,comp} + \dot{m}_{a,rec}$$

Η μάζα των καυσαερίων είναι

$$\dot{m}_a + \dot{m}_f = \dot{m}_e$$

3.5.4. Ολικό ισοζύγιο μάζας

Είναι το ισοζύγιο μάζας θεωρώντας σαν όγκο ελέγχου τα όρια της διάταξης. Το ρεύμα ανακυκλοφορίας των στερεών δεν λαμβάνεται υπόψη δεδομένου ότι είναι εσωτερικό ρεύμα. Τα ρεύματα εισόδου είναι η ροή καυσίμου και συνολικού αέρα καύσης και τα ρεύματα εξόδου είναι η ροή καυσαερίων. Προκύπτει

$$\dot{m}_{a,com} + \dot{m}_{a,rec} + \dot{m}_f = \dot{m}_e$$

3.5.5. Ισοζύγιο ενέργειας διεργασίας καύσης

Για τον θάλαμο καύσης τα ρεύματα εισόδου-εξόδου περιγράφηκαν ήδη στη παράγραφο 3.5.1. Μέρος της θερμότητας διαφεύγει στα πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου για την διαδικασία της θέρμανσης

$$\dot{m}_f q_{LHV} + \dot{m}_{a,com} h_{a,com} + \dot{m}_{rec} h_{rec} = \dot{m}_{fg} h_{fg} + Q_{com,surr}$$

Όπου η ενέργεια του ρεύματος ανακύκλωσης είναι

$$\dot{m}_{rec} h_{rec} = \dot{m}_{a,rec} h_{a,rec} + \dot{m}_{s,rec} h_{s,rec}$$

Για κάθε τμήμα του ανυψωτή τα ρεύματα εισόδου-εξόδου περιγράφηκαν ήδη στο 3.5.3. Μέρος της θερμότητας διαφεύγει στα πλευρικά τοιχώματα κάθε ανυψωτή για την διαδικασία της θέρμανσης

$$\dot{m}_{fg,in,ris} h_{fg,in,ris} = \dot{m}_{fg,out,ris} h_{fg,out,ris} + Q_{ris,surr}$$

Στον κυκλώνα θεωρούμε πως δεν υπάρχουν εναλλαγές θερμότητας παρά μόνο διαχωρισμός φάσεων.

$$\dot{m}_{fg,out,ris} h_{fg,out,ris} = \dot{m}_{fg,in,cyc} h_{fg,in,cyc}$$

$$\dot{m}_{fg,in,cyc} h_{fg,in,cyc} = \dot{m}_e h_e + \dot{m}_s h_{s,cyc}$$

Η ενθαλπία των καυσαερίων εξαρτάται από την σύστασή τους. Η σύσταση αυτή μπορεί να μετρηθεί στην έξοδο της καπνοδόχου.

$$\dot{m}_e h_e = \sum_i \dot{m}_{i,e} h_{i,e}$$

Στον κυρίως εναλλάκτη θερμότητας έχουμε μεταφορά ενέργειας από τη ροή των αδρανών προς τα τοιχώματα του εναλλάκτη

$$\dot{m}_s h_{s,cyc} = \dot{m}_s h_{s,rec} + Q_{mhe,surr}$$

3.5.6. Ισοζύγιο ενέργειας Διεργασίας Θέρμανσης

Η ενέργεια που εισέρχεται στη μονάδα συγκέντρωσης και ελέγχου του παραγόμενου θερμού αέρα προέρχεται από τα ρεύματα εισόδου-εξόδου όπως περιγράφηκαν ήδη στο 3.5.5

$$Q_{mhe,surr} + Q_{ris,surr} + Q_{com,surr} = Q_{col}$$

Η ενέργεια από κάθε εναλλάκτη μεταφέρεται σε κάθε ρεύμα αέρα μέσω συναγωγής του κυκλοφορούντος αέρα με τα τοιχώματα του εναλλάκτη

$$Q_{mhe,surr} = U_{mhe} A_{mhe} LMTD_{mhe}$$

$$Q_{ris,surr} = U_{ris} A_{ris} LMTD_{ris}$$

$$Q_{com,surr} = U_{com} A_{com} LMTD_{com}$$

3.5.7. Ολικό ισοζύγιο ενέργειας

Είναι το ισοζύγιο ενέργειας θεωρώντας σαν όγκο ελέγχου τα όρια της διάταξης. Τα ρεύματα εισόδου είναι οι ροές καυσίμου και συνολικού αέρα καύσης, ενώ τα ρεύματα εξόδου είναι οι ροές καυσαερίων και θερμότητας προς την μονάδα συγκέντρωσης θερμού αέρα

Προκύπτει

$$\dot{m}_f q_{LHV} + \dot{m}_{a,com} h_{a,com} + \dot{m}_{a,rec} h_{a,rec} = \sum_i \dot{m}_{i,e} h_{i,e} + Q_{col}$$

Όπου η διαφορά ενθαλπίας από την κατάσταση αναφοράς υπολογίζεται ως

$$h = c_p t$$

και η ειδική θερμοχωρητικότητα λαμβάνεται από πίνακες σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Στην περίπτωση του καυσαερίου, η ειδική θερμοχωρητικότητα εξαρτάται επιπλέον από την σύστασή του

$$c_{p,e}(t) = \sum_i x_i c_{p,i}(t)$$

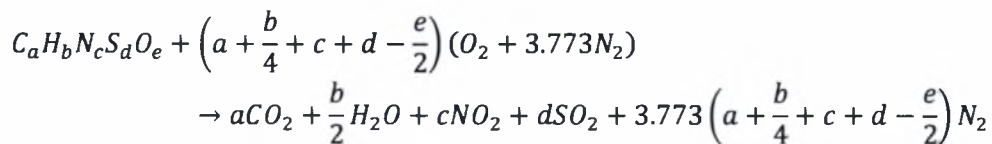
3.5.8. Στοιχειομετρία Καύσης

Για τον υπολογισμό της στοιχειομετρίας της καύσης χρειάζεται να ορίσουμε τον λόγο αέρα καυσίμου, τον στοιχειομετρικό λόγο αέρα-καυσίμου και τον λόγο αέρα καυσίμου προς τον στοιχειομετρικό, που είναι ένα μέτρο της περίσσειας του αέρα καύσης.

Ο λόγος της παροχής μάζας του αέρα προς την παροχή μάζας του καυσίμου που εισέρχονται στον θάλαμο καύσης ονομάζεται λόγος αέρα καυσίμου και είναι

$$\frac{A}{F} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}$$

Ο απαιτούμενος αέρας για την πλήρη καύση του καυσίμου, υπολογίζεται βάσει της αντίδρασης τέλει οξείδωσης. Για καύσιμο σύστασης $C_a H_b N_c S_d O_e$ είναι



όπου τα a, b, c, d, e προκύπτουν από τη στοιχειακή ανάλυση του καυσίμου.

Ο στοιχειομετρικός λόγος αέρα καυσίμου ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του απαιτούμενου αέρα προς την μάζα του καυσίμου που χρησιμοποιείται.

$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = \frac{\left(a + \frac{b}{4} + c + d - \frac{e}{2}\right) (M W_{O_2} + 3.773 M W_{N_2})}{a A W_C + b A W_H + c A W_N + d A W_S + e A W_O}$$

Το μέτρο της περίσσειας του αέρα καύσης είναι ο λόγος αέρα-καυσίμου προς τον στοιχειομετρικό λόγο αέρα-καυσίμου

$$\lambda = \frac{\frac{A}{F}}{\left(\frac{A}{F}\right)_s}$$

Ο λόγος λ μπορεί να υπολογιστεί έμμεσα και από τη σύσταση του καυσαερίου (βλ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ). Ο λόγος λ είναι μια σημαντική ένδειξη της ποιότητας της καύσης και των απωλειών εξέργειας από το ρεύμα του καυσαερίου

3.5.9. Αδιαβατική Θερμοκρασία Καύσεως

Η αδιαβατική θερμοκρασία καύσεως είναι η θεωρητική θερμοκρασία που θα είχαμε αν κατά την καύση δεν είχαμε απώλειες θερμότητας και όλη η ενέργεια αποδίδονταν στα καυσαέρια. Αυτή η θερμοκρασία σε μια διεργασία καύσης με απώλειες θερμότητας μπορεί να θεωρηθεί σαν η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί στη ζώνη καύσης.

Επί του παρόντος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του λόγου αέρα λ ώστε η θερμοκρασία στη ζώνη καύσης

- Να διατηρείται μικρότερη από την θερμοκρασία αντοχής υλικού θαλάμου καύσης και σχηματισμού NO_x
- Να διατηρείται μεγαλύτερη από την θερμοκρασία σχηματισμού ενώσεων αρωματικών υδρογονανθράκων

Για την εύρεση του ελάχιστου λόγου αέρα λ, ο οποίος ανταποκρίνεται στις παραπάνω συνθήκες σχεδιασμού του θαλάμου καύσης, μπορούμε να θεωρήσουμε μια θερμοκρασία σχεδιασμού στους 850°C .

$$q_{LHV} + \lambda_{min} \left(\frac{A}{F}\right)_s c_{p,a} t_a = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_f} c_{p,e} t_{design}$$

Για την αδιαβατική θερμοκρασία καύσης (Α.Θ.Κ.) ισχύει ότι αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα καύσης αυξάνει την Α.Θ.Κ. και αύξηση του λ μειώνει την Α.Θ.Κ.

3.6. Διαδικασία προσομοίωσης

Το μοντέλο της ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας που αναπτύχθηκε ακολουθεί την εξής διαδικασία επίλυσης, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα ροής που απεικονίζεται στην Εικόνα 19:

Η στερεά καύσιμη ύλη ξηραίνεται στο ξηραντήρα. Το ρεύμα ξήρανσης μαζί με το ποσό της υγρασίας που απορρόφησε απομακρύνεται από τη διάταξη.

Η ξηρή καύσιμη ύλη διασπάται στα στοιχεία της και το πτητικό μέρος αυτών οξειδώνεται πλήρως.

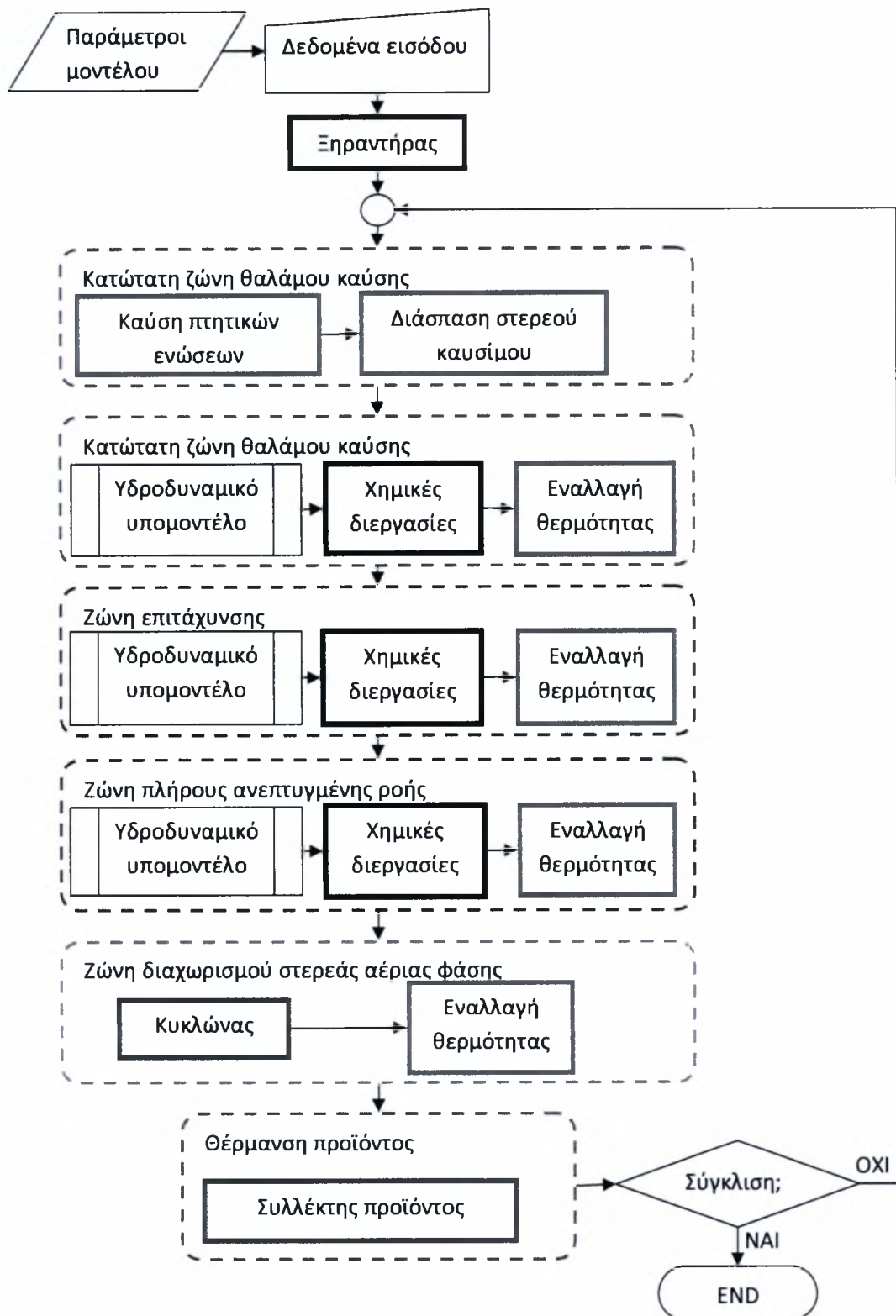
Η υπόλοιπη μάζα η οποία αποτελεί το απανθρακωμένο μέρος του καυσίμου εισέρχεται στο κατώτερο μέρος του ανυψωτή.

Ο ανυψωτής μοντελοποιείται σε τρία μέρη, τη πυκνή ζώνη ρευστοποίησης, τη ζώνη επιτάχυνσης και τη ζώνη της πλήρους ανεπτυγμένης ροής. Σε κάθε τμήμα του χρησιμοποιούνται τα μοντέλα καύσης και σχηματισμού οξειδίων του αζώτου.

Στην έξοδο του κάθε τμήματος του ανυψωτή έχει τοποθετηθεί ένας εναλλάκτης θερμότητας, ο οποίος προσομοιώνει την ανταλλαγή θερμότητας με τον παράπλευρο εναλλάκτη θερμότητας στα τοιχώματα του ανυψωτή.

Η έξοδος του τελευταίου τμήματος του ανυψωτή οδηγείται στον κυκλώνα όπου διαχωρίζεται η στερεά από την αέρια φάση.

Η στερεά φάση αποτελεί το ρεύμα ανακυκλοφορίας το οποίο οδηγείται πίσω στο τμήμα διάσπασης της καύσιμης ύλης.



Εικόνα 19 Διάγραμμα ροής του μοντέλου ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας που αναπτύχθηκε

Τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου οι παράμετροι και οι ρυθμιστικές μεταβλητές του μοντέλου, οι οποίες εισάγονται από τον χρήστη συνοψίζονται στον Πίνακα 14

Πίνακας 14 Παράμετροι μοντέλου

Παράμετροι μοντέλου			
Ξηραντήρας	Υγρασία ξηρού καυσίμου		
Πυκνή ζώνη	Ύψος	Διάμετρος	
Αραιή ζώνη	Ύψος	Διάμετρος	
Εναλλάκτες θερμότητας	Κλάσματα επιμερισμού ροής προϊόντος	Συντελεστές μεταφοράς θερμότητας	
Συσκευές διεργασιών	Θερμοκρασία	Πίεση	Θερμικό Φορτίο

Πίνακας 15 Δεδομένα εισόδου μοντέλου

Δεδομένα εισόδου						
Ρεύμα	Πίεση	Θερμοκρασία εισόδου	Παροχή μάζας	Σύσταση	Κατανομή μεγέθους	Στοιχειακή ανάλυση
Καύσιμη μάζα	X	X	X	X	X	X
Πρωτεύων αέρας καύσης	X	X	X	X		
Δευτερεύων αέρας καύσης	X	X	X	X		
Αέρας ξήρανσης	X	X	X	X		
Υλικά ρευστοποίησης	X	X	X	X	X	
Προϊόν	X	X	X	X		

Πίνακας 16 Ρυθμιστικές παράμετροι μοντέλου

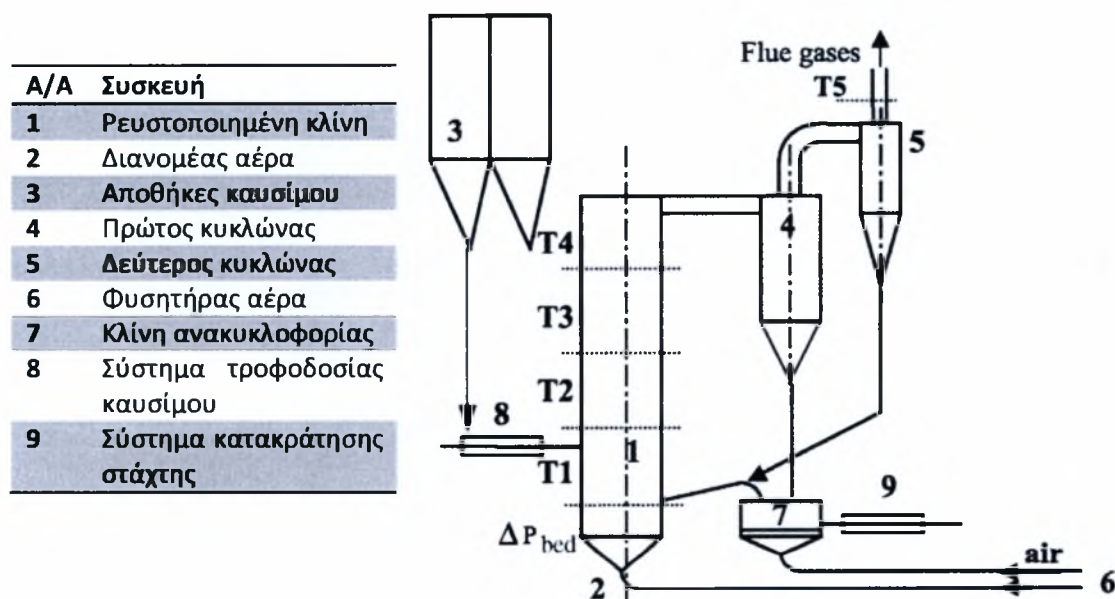
Ρυθμιστικές παράμετροι	
Υδροδυναμικό μοντέλο	Συντελεστές διαμερισμού φάσεων
	Συντελεστές εκτίμησης κενού χώρου φυσαλιδωτής ροής
	Συντελεστές εκτίμησης κενού χώρου γαλακτώματος
	Κενός χώρος σε συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης
	Κενός χώρος σε συνθήκες κορεσμού
	Συντελεστές μετάδοσης θερμότητας γαλακτώματος - φυσαλίδων
Μοντέλο χημικών αντιδράσεων	Συντελεστές διόρθωσης ρυθμών χημικών αντιδράσεων
Μοντέλο εναλλαγής θερμότητας	Συντελεστές διόρθωση ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (*)
(*) : δευτερεύουσα ρυθμιστική παράμετρος του μοντέλου	

4. Πιστοποίηση μοντέλου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πιστοποίηση του μοντέλου βάσει δημοσιευμένων δεδομένων της βιβλιογραφίας. Το μοντέλο θα πιστοποιηθεί για μια διάταξη ισχύος 80kW με δυνατότητα καύσης μίγματος ελαιοπυρήνα και λιγνίτη. Στόχος είναι να βρεθούν οι ρυθμιστικές παράμετροι για να ταιριάξουν με σχετική ακρίβεια τα βιβλιογραφικά δεδομένα.

4.1. Πιστοποίηση του μοντέλου σε διάταξη ελαιοπυρήνα και λιγνίτη

Η 1^η περίπτωση της πιστοποίησης του μοντέλου θα γίνει με βάση τα δεδομένα των Atimtay and Toral [56]. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις φαίνεται στην Εικόνα 20.



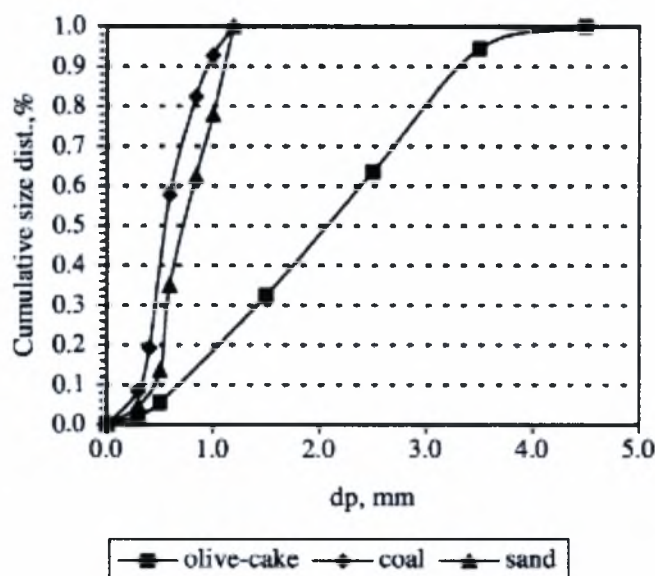
Εικόνα 20 Διάταξη πειραματικής διάταξης καύσης μίγματος ελαιοπυρήνα και λιγνίτη σε ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας

Η διάταξη αποτελείται από την ρευστοποιημένη κλίνη (εσωτερική διάμετρος 125mm, ύψος 1800mm), δύο υψηλής απόδοσης κυκλώνες σε σειρά, μια κλίνη για την ανακυκλοφορία των στερεών, την τροφοδοσία καυσίμου και τα συστήματα απομάκρυνσης της στάχτης. Η εξωτερική διάμετρος της ρευστοποιημένης κλίνης είναι 310mm και εσωτερικά είναι μονωμένη με πυρότουβλα μέχρι την εσωτερική διάμετρο των 125 mm. Ο ανυψωτήρας είναι συνδεδεμένος με μονωμένο αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 80mm. Η ανατροφοδοσία των στερεών γίνεται σε ύψος 370mm πάνω από τον διανομέα με πνευματική μεταφορά. Ο λόγος των δύο ρευμάτων αέρα (πρωτεύων: αέρας πνευματικής μεταφοράς) είναι 5:1. Το ρεύμα της πνευματικής προώθησης δεν λαμβάνεται υπόψη σαν δευτερεύων αέρας.

Ο φυσητήρας που χρησιμοποιήθηκε ήταν ισχύος 7.5Hr με μέγιστη παροχή 1000m³/h. Ο αέρας εισέρχεται στο θάλαμο καύσης από τέσσερις σωλήνες και χρησιμοποιείται τόσο για την καύση όσο και για τη ρευστοποίηση.

Για την προθέρμανση της κλίνης χρησιμοποιείται φυσικό αέριο. Η έναρξη της καύσης γίνεται ως εξής: Ο θάλαμος προθερμαίνεται με χρήση φυσικού αερίου στους 500°C. Σε αυτό το σημείο εισάγονται τα υλικά ρευστοποίησης και η καύση του φυσικού αερίου συνεχίζεται μέχρι η θερμοκρασία να φτάσει τους 700°C. Εισάγεται τότε το στερεό καύσιμο με παράλληλη μείωση της παροχής του φυσικού αερίου μέχρι την σταθεροποίηση της καύσης και την αυτοσυντήρησή της. Η διαδικασία έναρξης και σταθεροποίησης διαρκεί περίπου 2 ώρες.

Τα σωματίδια διαχωρίζονται από την αέρια φάση στου δύο κυκλώνες. Η αθροιστική κατανομή μεγέθους των σωματιδίων του ελαιοπυρήνα, του λιγνίτη και των υλικών ρευστοποίησης δίνεται στην Εικόνα 21.



Εικόνα 21 Αθροιστική κατανομή μεγέθους σωματιδίων ελαιοπυρήνα, του λιγνίτη και των υλικών ρευστοποίησης. Η μέση διάμετρος για κάθε ένα είναι ελαιοπυρήνας: 2.30mm, λιγνίτης: 0.46mm, υλικά ρευστοποίησης: 0.56 mm

Η πιστοποίηση του μοντέλου θα γίνει για τέσσερις συνδυασμούς του μίγματος λιγνίτη και ελαιοπυρήνα της καύσιμης ύλης σε διάφορες τιμές της περίσσειας αέρα για κάθε συνδυασμό (Πίνακας 17).

Πίνακας 17 Τεστ πιστοποίησης μοντέλου

	Τεστ 1	Τεστ 2	Τεστ 3	Τεστ 4
Καύσιμο	100% LIG	75% LIG – 25% OC	50% LIG – 50% OC	25% LIG – 75% OC
Λόγος λ	1.25 – 2.12	1.12 – 2.08	1.10 – 1.96	1.10 – 2.00

4.1.1. Αρχική ρύθμιση του μοντέλου

Η αρχική ρύθμιση του μοντέλου για να ανταποκριθεί στη συγκεκριμένη διάταξη έχει ως εξής:

Οι διαστάσεις της πυκνής και της αραιής ζώνης καθορίζονται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης. Θεωρείται ότι το ύψος της πυκνής ζώνης είναι μέχρι το ύψος έγχυσης του δευτερεύοντος αέρα.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει ξηραντήρας για το καύσιμο ρυθμίζουμε την παροχή του ρεύματος ξήρανσης ίση με μηδέν, και την υγρασία του ξηρού καυσίμου ίση με αυτή που δίνεται από την στοιχειακή ανάλυση.

Πίνακας 18 Παράμετροι ρύθμισης του μοντέλου

Παράμετροι μοντέλου		Τιμή	Μονάδες
Ξηραντήρας	Υγρασία ξηρού καυσίμου	Ανάλυση καυσίμου	
Πυκνή ζώνη	Υψος	0.370	m
	Διάμετρος	0.125	m
Αραιή ζώνη	Υψος	1.430	m
	Διάμετρος	0.125	m
Συσκευές διεργασιών	Πίεση	1	bar
	Θερμοκρασία	Κατά περίπτωση	
	Θερμικό Φορτίο	Κατά περίπτωση	
Εναλλάκτες θερμότητας	Κλάσματα επιμερισμού ροής προϊόντος	Ισομερισμός	

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή θεωρεί ότι η καύσιμη μάζα και ο αέρας καύσης εισέρχονται στον θάλαμο καύσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η σταθεροποιημένη κατάσταση επιτυγχάνεται με σύγκλιση του μοντέλου υπό αυτές τις συνθήκες χωρίς να λαμβάνεται υπόψη προθέρμανση των ρευμάτων εισόδου.

Η εργασία που χρησιμοποιείται για την πιστοποίηση του μοντέλου δεν παρέχει στοιχεία για τον τρόπο εκμετάλλευσης της παραγόμενης ενέργειας. Θεωρούμε ένα σταθερό ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ίσο με $17\text{W/m}^2\text{K}$ που ανταποκρίνεται στη μόνωση της διάταξης.

Θεωρούμε ότι ο λόγος πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος αέρα

Η ακριβής και στοιχειακή ανάλυση των καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζεται στον Πίνακας 20

Πίνακας 19 Δεδομένα εισόδου του μοντέλου

Δεδομένα εισόδου						
Ρεύμα	Πίεση [bar]	Θερμοκρασία εισόδου [°C]	Παροχή μάζας [kg/hr]	Σύσταση	Κατανομή μεγέθους	Στοιχειακή ανάλυση
Καύσιμη μάζα	1	25	16	PURE	(α)	(β)
Πρωτεύων αέρας καύσης	1	25	VAR (γ)	AIR		
Δευτερεύων αέρας καύσης	1	25	VAR (γ)	AIR		
Αέρας ξήρανσης	1	25	0	AIR		
Υλικά ρευστοποίησης (SiO ₂)	1	25	VAR	PURE	(α)	
Προϊόν	1	25	500	AIR		
VAR: μεταβλητό ανά τρέξιμο						
PURE: 100% του στοιχείου, AIR: 79%N ₂ – 21%O ₂						
(α) Εικόνα 21, (β) Πίνακας 20, (γ) λόγος πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος αέρα: 2/3						

Πίνακας 20 Ανάλυση καύσιμης μάζας

Proximate and ultimate analysis of OC and coal samples used (by wt%)

Proximate analysis (wt%)

	FC (wt%)	VM (wt%)	Ash (wt%)	Moisture (wt%)	HHV (kJ/kg)	LHV (kJ/kg)
Olive cake (OC)	15.64	68.82	9.01	6.53	19.813	19.600
Tunchilek Lignite (coal)	41.30	27.50	23.70	7.50	23.212	22.062

Ultimate analysis (dry basis, wt%)

	C	H	N	O	S	Ash
Olive cake (OC)	46.80	6.07	0.68	36.69	0.12	9.64
Tunchilek Lignite (coal)	59.29	4.61	2.10	11.54	1.81	20.65

Ash composition (wt%)

	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	Na ₂ O	K ₂ O
OC	-	32.38	5.93	5.07	1.41	49.82	5.39

FC: fixed carbon, VM: volatile matter, HHV: higher heating value, LHV: lower heating value.

4.1.2. Εύρεση τιμών των ρυθμιστικών παραμέτρων

Το επόμενο βήμα είναι να ρυθμιστεί το μοντέλο για να ταιριάζει ένα ή περισσότερα σετ πειραματικών δεδομένων. Αφότου γίνει η συγκεκριμένη ρύθμιση το μοντέλο θα είναι έτοιμο για την παραμετρική μελέτη των χαρακτηριστικών λειτουργίας της διάταξης. Τονίζεται σε αυτό το σημείο ότι όσο περισσότερα είναι τα σετ των πειραματικών δεδομένων τόσο μικρότερο στατιστικό σφάλμα θα υπάρχει στη ρύθμιση του μοντέλου.

Πίνακας 21 Ρυθμιστικές παράμετροι του μοντέλου

Ρυθμιστικές παράμετροι			
Υδροδυναμικό μοντέλο	Συντελεστές διαμερισμού φάσεων	[23]	[-]
	Συντελεστές εκτίμησης κενού χώρου φυσαλιδωτής ροής	[23]	[-]
	Συντελεστές εκτίμησης κενού χώρου γαλακτώματος	[23]	[-]
	Κενός χώρος σε συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης	[23]	[-]
	Κενός χώρος σε συνθήκες κορεσμού	[23]	[-]
	Συντελεστές μετάδοσης θερμότητας γαλακτώματος - φυσαλίδων	500	[W/m ² K]
Μοντέλο χημικών αντιδράσεων	Συντελεστής διόρθωσης ρυθμού καύσης CO	VAR	[-]
	Συντελεστής διόρθωσης ρυθμού καύσης C	VAR	[-]
Μοντέλο εναλλαγής θερμότητας	Βασική τιμή ολικού συντελεστή Μ.Θ.	VAR	[-]
	Συντελεστής διόρθωσης Μ.Θ.	VAR	[-]
VAR: μεταβλητό κατά τη ρύθμιση			

Οι ρυθμιστικές παράμετροι του μοντέλου χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: στις ρυθμιστικές παραμέτρους του υδροδυναμικού μοντέλου, τις ρυθμιστικές παραμέτρους του μοντέλου των χημικών αντιδράσεων και τις ρυθμιστικές παραμέτρους του μοντέλου εναλλαγής θερμότητας. Η πρώτη κατηγορία απαιτεί μετρήσεις ρευστοδυναμικών χαρακτηριστικών όπως παρουσιάζονται από τους Cui et. al. [23]. Λόγω έλλειψης τέτοιου είδους μετρήσεων χρησιμοποιούνται οι τιμές που υπάρχουν στη βιβλιογραφία [23] για υλικό ρευστοποίησης άμμο.

Η δεύτερη κατηγορία ρυθμιστικών παραμέτρων αφορά τις παραμέτρους διόρθωσης των ρυθμών των φαινόμενων χημικών αντιδράσεων. Η ρύθμιση γίνεται ορίζοντας σταθερές τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας στις διάφορες συσκευές ίσες με αυτές των πειραματικών μετρήσεων για κάθε σετ. Στόχος είναι η βελτιστοποίηση των κινητικών παραμέτρων ώστε να επιτευχθεί η μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε σετ πειραματικών μετρήσεων. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για σύγκριση είναι το μοριακό κλάσμα του μονοξειδίου του άνθρακα και το κλάσμα μάζας του άκαυστου άνθρακα που διαφεύγουν με τα καυσαέρια.

Αφού προσδιοριστούν οι βέλτιστες παράμετροι των χημικών ρυθμών αντίδρασης ρυθμίζεται το μοντέλο εναλλαγής θερμότητας. Η ρύθμιση του γίνεται χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες τιμές των κινητικών παραμέτρων που βρέθηκαν στο προηγούμενο βήμα βελτιστοποίησης. Ως μέτρο σύγκρισης χρησιμοποιείται η μέση θερμοκρασία της κλίνης.

Η ρύθμιση των παραμέτρων γίνεται με βάση ένα αλγόριθμο βελτιστοποίησης τύπου conjugate gradients χρησιμοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίζεται ως η ελαχιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε σετ πειραματικών μετρήσεων.

4.1.3. Καύσιμο: 100% λιγνίτης

Το πρωτόκολλο των πειραματικών μετρήσεων παρουσιάζεται στον Πίνακα 22. Για παροχή καυσίμου ίση με 16kg/hr μεταβάλλεται η περίσσεια του αέρα καύσης μέσω του λόγου λ . Η σύσταση του καυσαερίου μετράται στην έξοδο του ανυψωτή, ενώ η θερμοκρασία που παρατίθεται είναι η μέση θερμοκρασία της κλίνης (Εικόνα 20). Οι μετρήσεις λαμβάνονται σε σταθεροποιημένη κατάσταση.

Πίνακας 22 Πρωτόκολλο πειραματικών μετρήσεων

Operational and thermal performance parameters and emission results of the lignite combustion

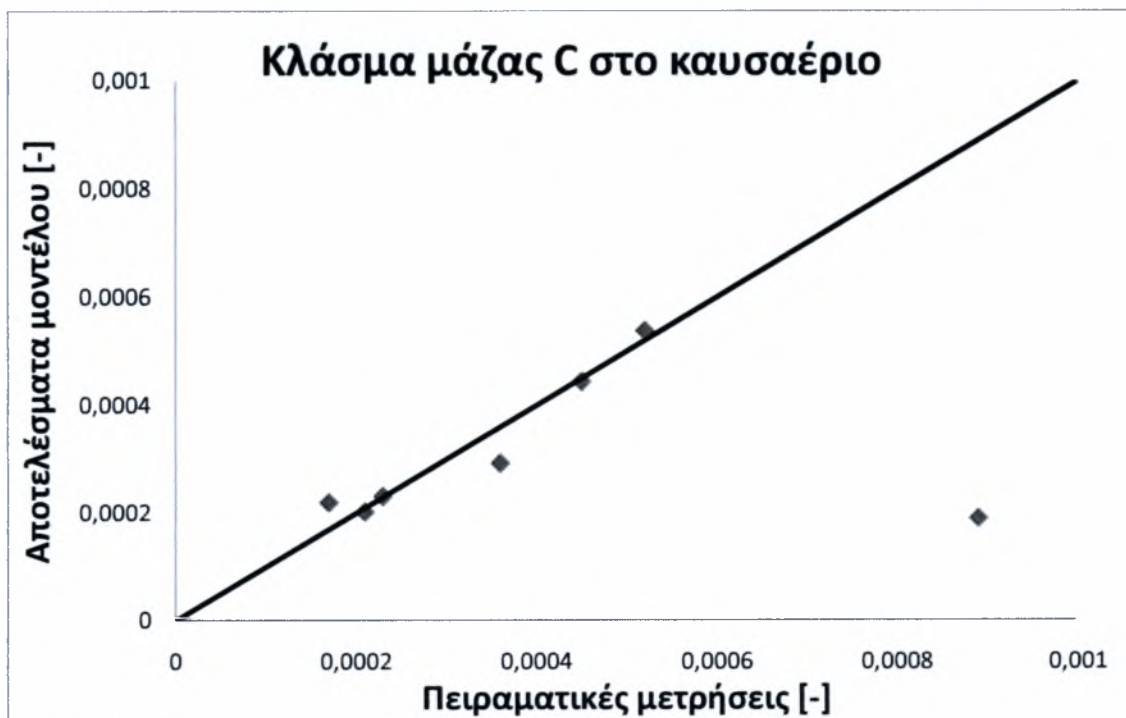
Test run no.	O ₂ (%)	λ (-)	T (°C)	CO (%)	CO ₂ (%)	C _m H _n (ppm)	L _{CO} (%)	L _{cb} (%)	L _C (%)	L _{up} (%)	Comb. eff. (%)
1	4.2	1.25	833	0.089	12.9	511	0.34	1.34	1.85	0	96.5
2	5.0	1.31	841	0.021	12.1	219	0.08	0.60	1.61	0	97.7
3	5.9	1.39	856	0.017	11.2	80	0.07	0.23	1.42	0	98.3
4	7.8	1.59	868	0.023	9.3	80	0.11	0.26	1.18	0	98.4
5	9.3	1.79	872	0.036	7.8	256	0.19	0.92	1.34	0	97.5
6	10.6	2.02	865	0.045	6.5	348	0.26	1.39	1.62	0	96.7
7	11.1	2.12	857	0.052	6.0	423	0.32	1.77	1.64	0	96.3

Τα τρεξίματα έγιναν σε PC Pentium 4.0GHz dual core CPU με 2GB RAM και διήρκησαν για την βελτιστοποίηση και των επτά πειραματικών σετ δύο ώρες. Οι τιμές των βελτιστοποιημένων συντελεστών διόρθωσης των κινητικών παραμέτρων μαζί με τα όρια στατιστικής εμπιστοσύνης παρουσιάζονται στον Πίνακα 23

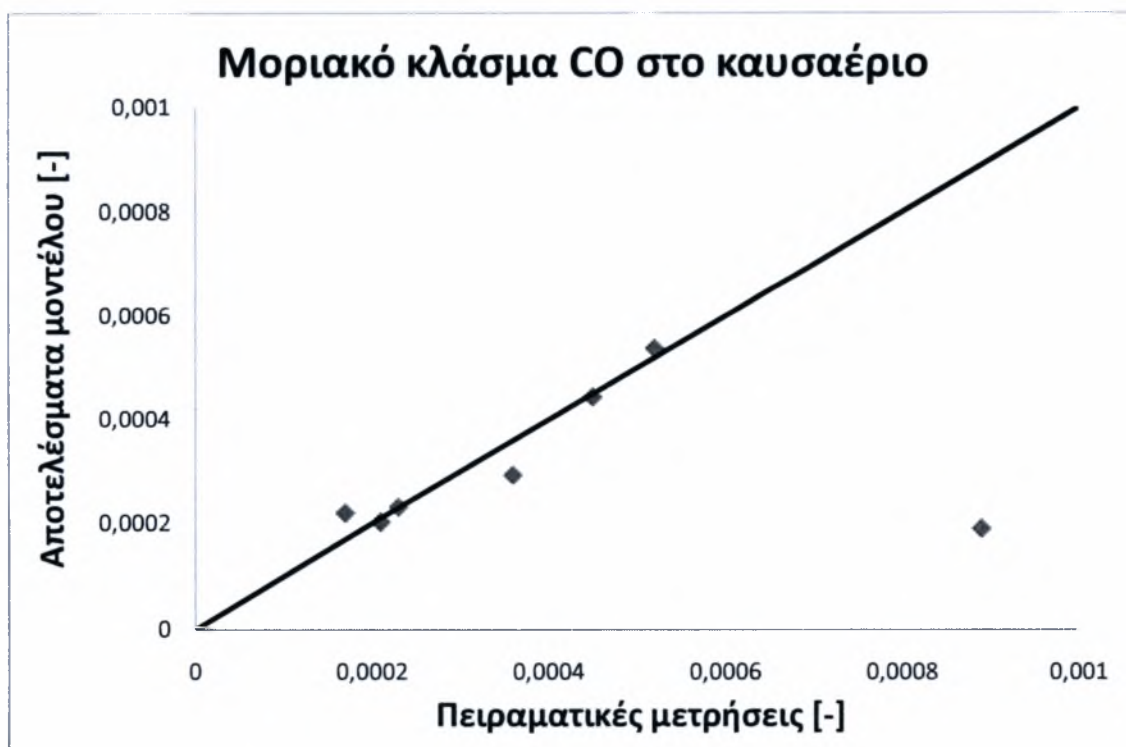
Πίνακας 23 Τιμές βελτιστοποιημένων συντελεστών διόρθωσης κινητικών παραμέτρων

Συντελεστής διόρθωσης	Βελτιστοποιημένη τιμή	Όρια εμπιστοσύνης (95%)	
Καύση C	0.00219	0.00194	0.002479
Καύση CO	6025.6	5914.4	6378.5

Η πρακτική της βελτιστοποίησης σε δύο μέρη αυτή συνετέλεσε στην καλή πρόβλεψη της σύστασης του καυσαερίου όσον αφορά το μονοξειδίο του άνθρακα και το άκαυστο μέρος της καύσιμης ύλης. Η Εικόνα 22 παρουσιάζει το κλάσμα μάζας του άκαυστου άνθρακα στο καυσαέριο. Δεδομένων και των μικρών συγκεντρώσεων του μονοξειδίου του άνθρακα που φαίνονται στην Εικόνα 23 είναι μια σημαντική ένδειξη του βαθμού απόδοσης της διάταξης. Παρατηρείται ότι οι τιμές που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση δίνουν μια καλή πρόβλεψη για τις εκπομπές ρύπων στα έξι από τα επτά πειραματικά σετ.



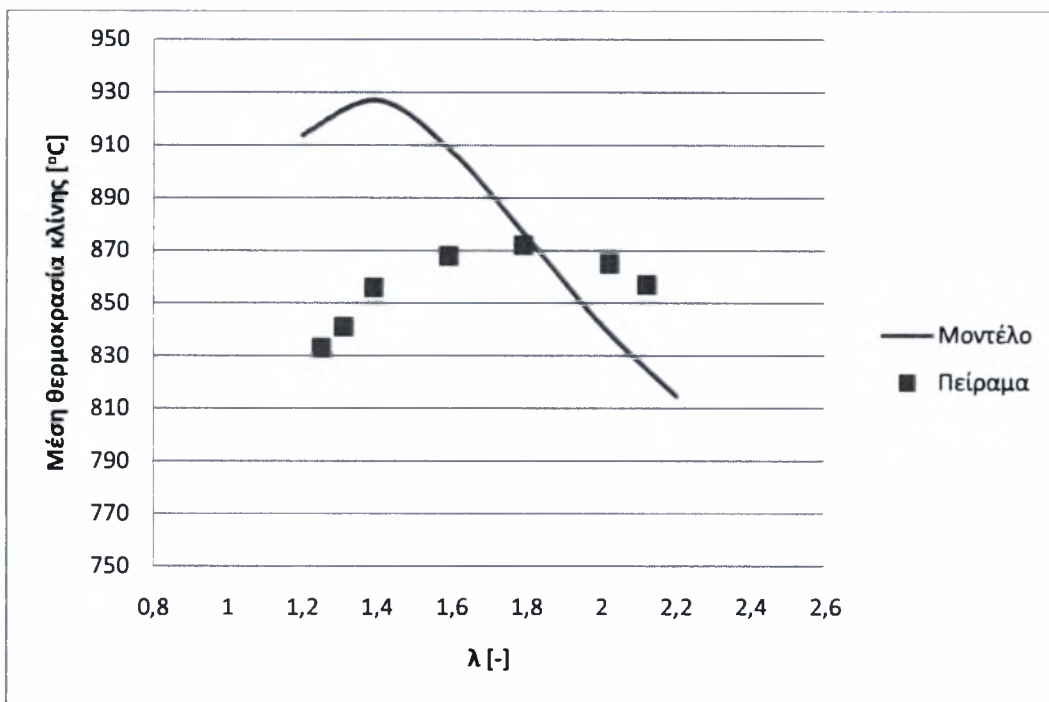
Εικόνα 22 Σύγκριση μετρημένου και υπολογισμένου κλάσματος μάζας άκαυστου άνθρακα στο καυσαέριο



Εικόνα 23 Σύγκριση μετρημένου και υπολογισμένου μοριακού κλάσματος CO στο καυσαέριο

Το έβδομο σημείο (για λόγο αέρα $\lambda=1.25$) είναι μέσα στα αναμενόμενα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου, αποκλίνει όμως από την πειραματική μέτρηση. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε πειραματικό σφάλμα είτε πιθανότερα στις τοπικές συνθήκες έλλειψης οξυγόνου λόγω της χαμηλής περιόσεως. Σημαντικό ρόλο έχει σε αυτό το σημείο και το εμπειρικό μοντέλο καύσης του μοντέλου το οποίο θεωρεί άμεσα διαθέσιμη για καύση ολόκληρη τη ποσότητα του άνθρακα. Είναι πιθανό σε αυτές τις συνθήκες να μην υπάρχει επαρκής διάχυση του οξυγόνου στα στερεά σωματίδια του άνθρακα με αποτέλεσμα να γίνεται ατελής καύση. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 23 για το ίδιο σημείο το μοντέλο αποκλίνει και στις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα.

Το επόμενο στάδιο της ρύθμισης του μοντέλου περιλαμβάνει την χρήση των κινητικών παραμέτρων που βρέθηκαν και βελτιστοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου εναλλαγής θερμότητας.

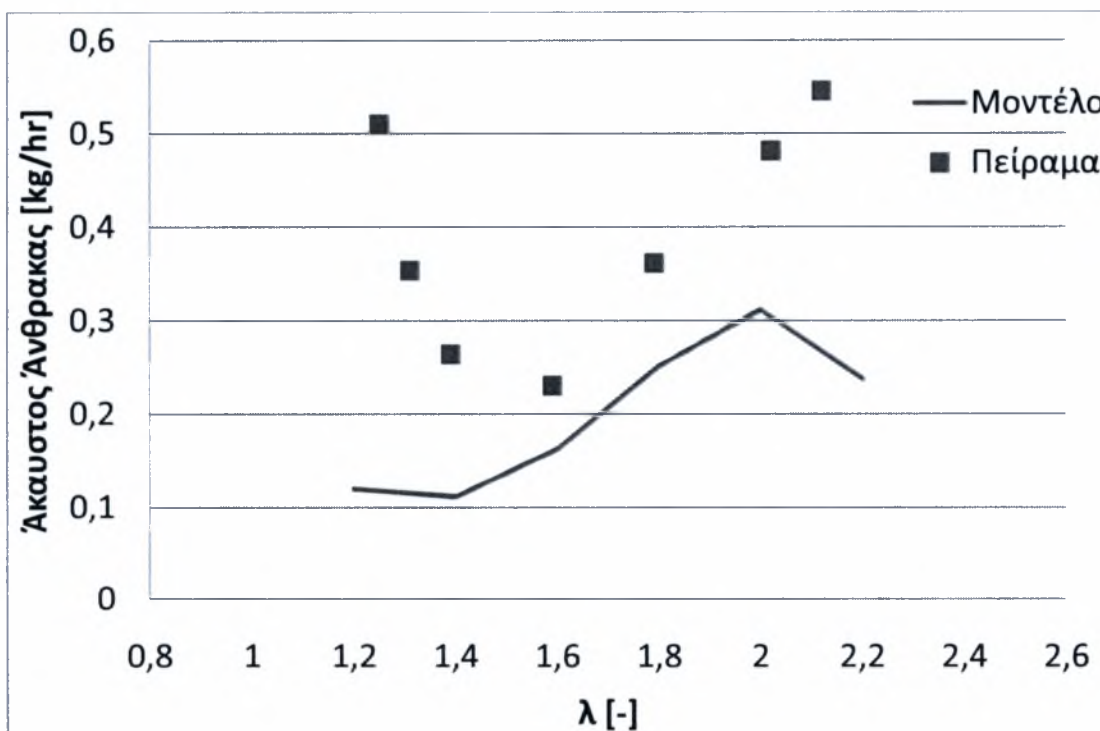


Εικόνα 24 Σύγκριση μετρημένης και υπολογισμένης μέσης θερμοκρασίας κλίνης

Η σύγκριση της υπολογισμένης και της μετρημένης μέσης θερμοκρασίας της κλίνης παρουσιάζεται στην Εικόνα 24. Όσον αφορά την υπολογισμένη διακύμανση της μέσης θερμοκρασίας σε σχέση με τη μεταβολή του λόγου αέρα λ παρατηρείται ότι με αύξηση του λόγου αέρα μειώνεται η μέση θερμοκρασία της κλίνης. Το αποτέλεσμα αυτό κρίνεται φυσιολογικό αν αναλογιστεί κανείς ότι το σταθερό ποσό εκλυόμενης θερμότητας αναμιγνύεται με μεγαλύτερη ποσότητα κρύου αέρα καύσης. Πρακτικά η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας της κλίνης, η οποία φαίνεται στις πειραματικές μετρήσεις, ρυθμίζεται είτε με προθέρμανση του

αέρα καύσης είτε με μεταβαλλόμενη παροχή του αέρα καύσης ή/και μεταβολή του λόγου πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος αέρα μέσω του συστήματος ελέγχου της διάταξης ή με ρύθμιση της παροχής στους εναλλάκτες θερμότητας.

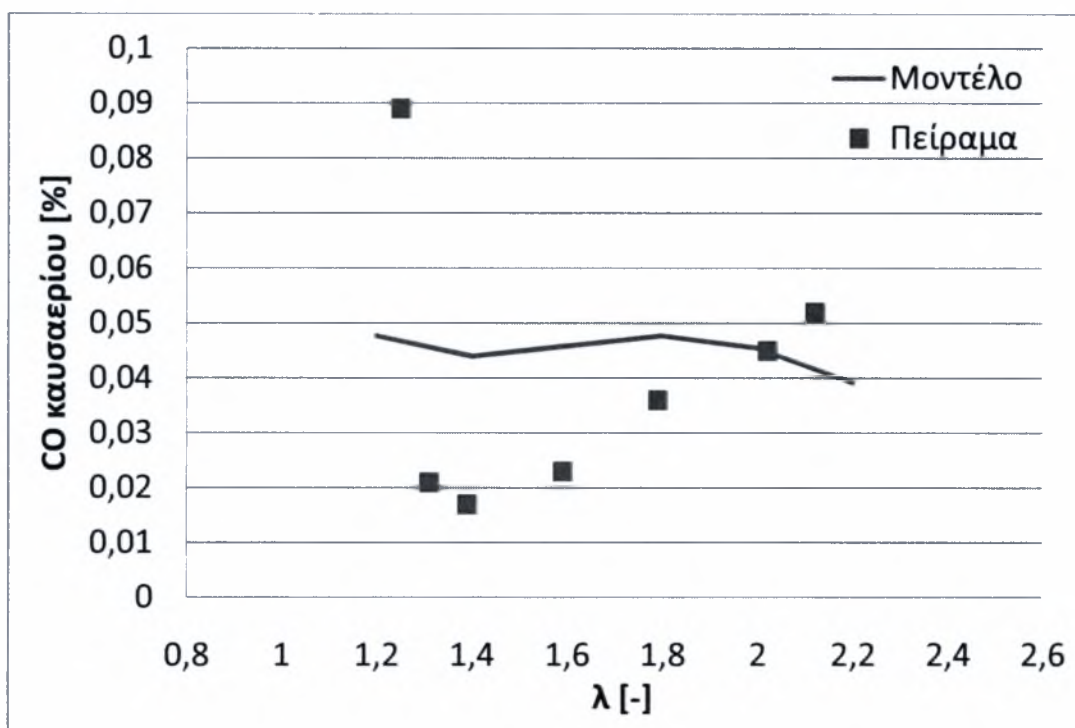
Η απόκλιση που παρατηρείται στην σύγκριση υπολογισμένης και μετρημένης θερμοκρασίας της κλίνης επηρεάζει σαφώς και τα αποτελέσματα σε ό,τι αφορά τις εκπομπές ρύπων από την κλίνη. Η Εικόνα 25 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του μοντέλου, συγκρινόμενα με τις πειραματικές μετρήσεις, σχετικά με τις απώλειες ενέργειας που υπάρχουν από την ατελή καύση της στερεάς μάζας καυσίμου. Παρατηρείται ότι το μοντέλο προβλέπει σε ένα ικανοποιητικό βαθμό, τουλάχιστον ποιοτικά, την ατελή καύση της στερεάς καύσιμης μάζας. Η ποσότητα του άκαυστου άνθρακα που βρίσκεται στην έξοδο του ανυψωτή, συνδέεται στενά με την μέση θερμοκρασία της κλίνης τόσο για το πείραμα όσο και για τον υπολογισμό όπως φαίνεται σε αντιπαράβολή με την Εικόνα 24. Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στην Εικόνα 25 οφείλονται σε σημαντικό βαθμό στις αποκλίσεις στην πρόβλεψη της μέσης θερμοκρασίας της κλίνης.



Εικόνα 25 Σύγκριση υπολογισμένης και μετρημένης ποσότητας άκαυστου άνθρακα που βρίσκεται στην έξοδο του τελευταίου τμήματος του ανυψωτήρα.

Η Εικόνα 26 παρουσιάζει τη σύγκριση των εκπομπών του μονοξειδίου του άνθρακα και η Εικόνα 27 τη σύγκριση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Σε ό,τι αφορά τη σύγκριση των εκπομπών του μονοξειδίου του άνθρακα παρατηρείται σημαντική απόκλιση τόσο στα ποιοτικά όσο και στα ποσοτικά αποτελέσματα. Οι αποκλίσεις αυτές θα πρέπει να συζητηθούν

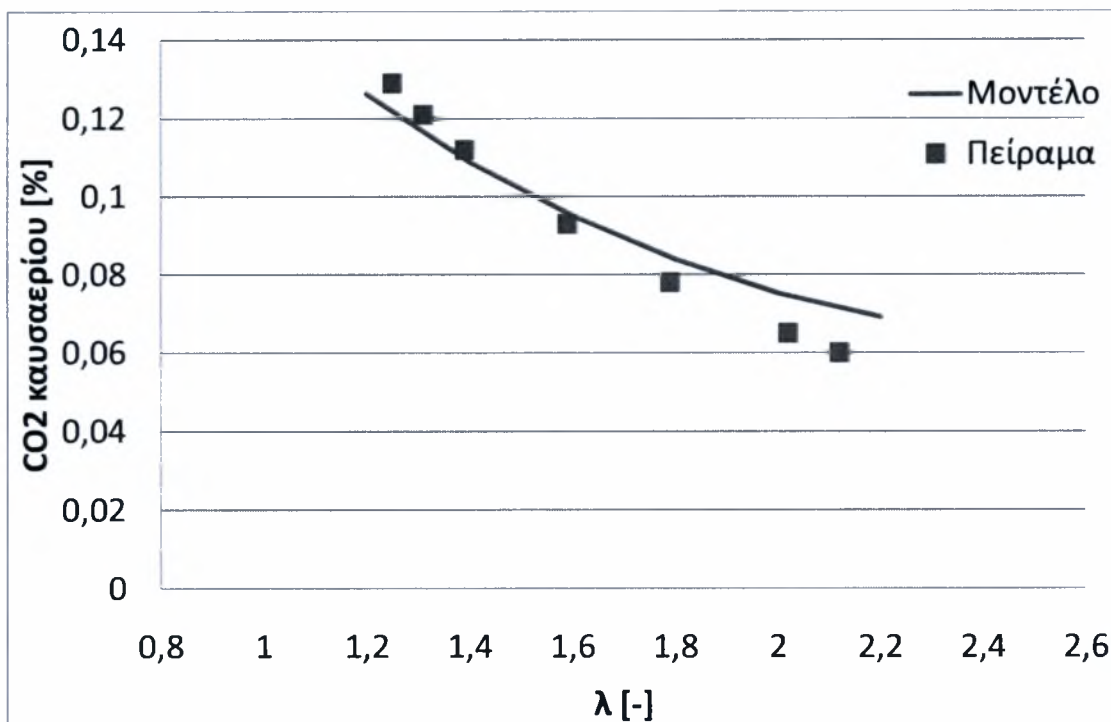
σε σχέση με τα υπόλοιπα αποτελέσματα δεδομένης της άμεσης εξάρτησής τους. Η συμπεριφορά των εκπομπών του μονοξειδίου του άνθρακα σχετίζεται άμεσα με τις εκπομπές του άκαυστου άνθρακα που διαφεύγει από την κλίνη, δεδομένου ότι αποτελεί ένα ενδιάμεσο προϊόν της καύσης. Όσο περισσότερη στερεά καύσιμη ύλη καίγεται τόσο περισσότερο μονοξείδιο του άνθρακα παράγεται, για να οξειδωθεί περαιτέρω προς διοξείδιο του άνθρακα. Η αξονική κατανομή της θερμοκρασίας της κλίνης είναι ουσιαστικά η ρυθμιστική παράμετρος για την ενεργότητα των χημικών αντιδράσεων. Δεδομένων των αποκλίσεων του μοντέλου στη πρόβλεψη της θερμοκρασίας η ποιοτική απόκλιση κρίνεται ικανοποιητική. Ποσοτικά οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα είναι μικρές, της τάξης των 200 με 500 ppm. Το μοντέλο κάνοντας χρήση εμπειρικών συσχετίσεων καταφέρνει να ταιριάζει ποσοτικά αυτή τη τάξη μεγέθους.



Εικόνα 26 Σύγκριση υπολογισμένης και μετρημένης ποσότητας μονοξειδίου του άνθρακα που βρίσκεται στο καυσαέριο της διάταξης.

Η αλληλεξάρτηση των εκπομπών από τη θερμοκρασία αποτυπώνεται καλύτερα στην Εικόνα 27. Για λ μικρότερο του 1,6 όπου το μοντέλο προβλέπει υψηλότερες θερμοκρασίες και υψηλότερη απόδοση καύσης της στερεά μάζας η πρόβλεψη των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα βρίσκεται σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με το πείραμα. Αυτό αντικατοπτρίζεται στην πρόβλεψη των εκπομπών του μονοξειδίου του άνθρακα, που είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το πείραμα. Η κατάσταση αυτή μπορεί να αποδοθεί στον μεγαλύτερο ρυθμό μετατροπής στερεού

άνθρακα σε μονοξείδιο του άνθρακα σε σχέση με τον ρυθμό μετατροπής του μονοξειδίου του άνθρακα σε διοξείδιο, στις θερμοκρασίες που προβλέπει το μοντέλο. Η κατάσταση αντιστρέφεται για λ μεγαλύτερο του 1.6 και οφείλεται στους ίδιους παράγοντες.

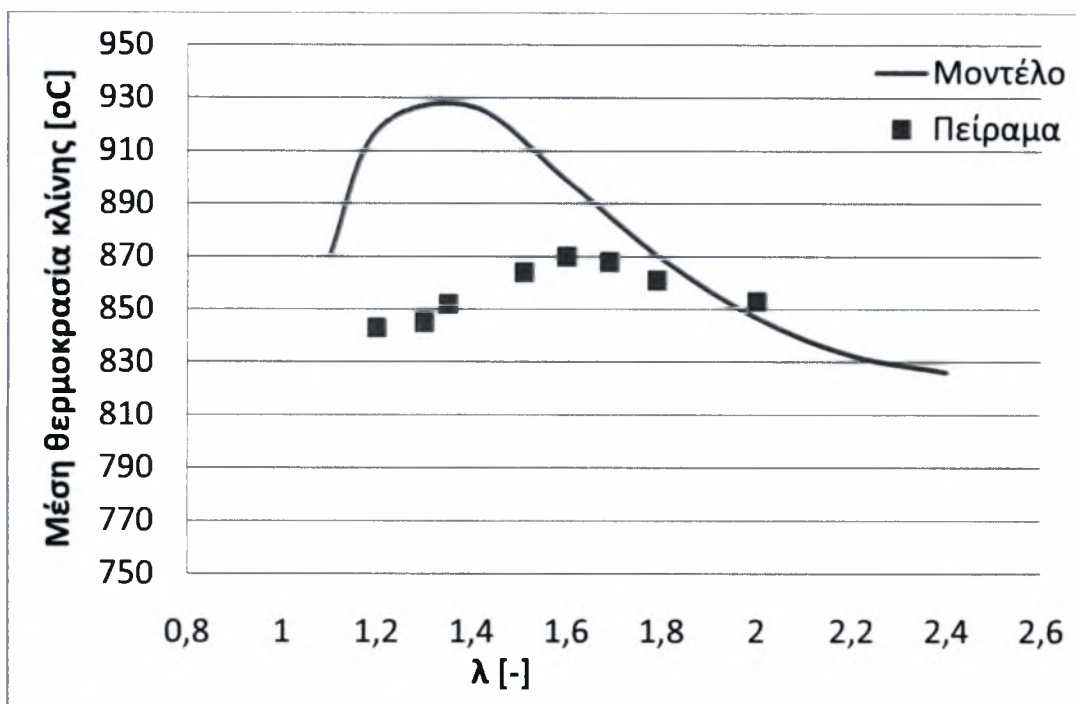


Εικόνα 27 Σύγκριση υπολογισμένης και μετρημένης ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα που βρίσκεται στο καυσαέριο της διάταξης.

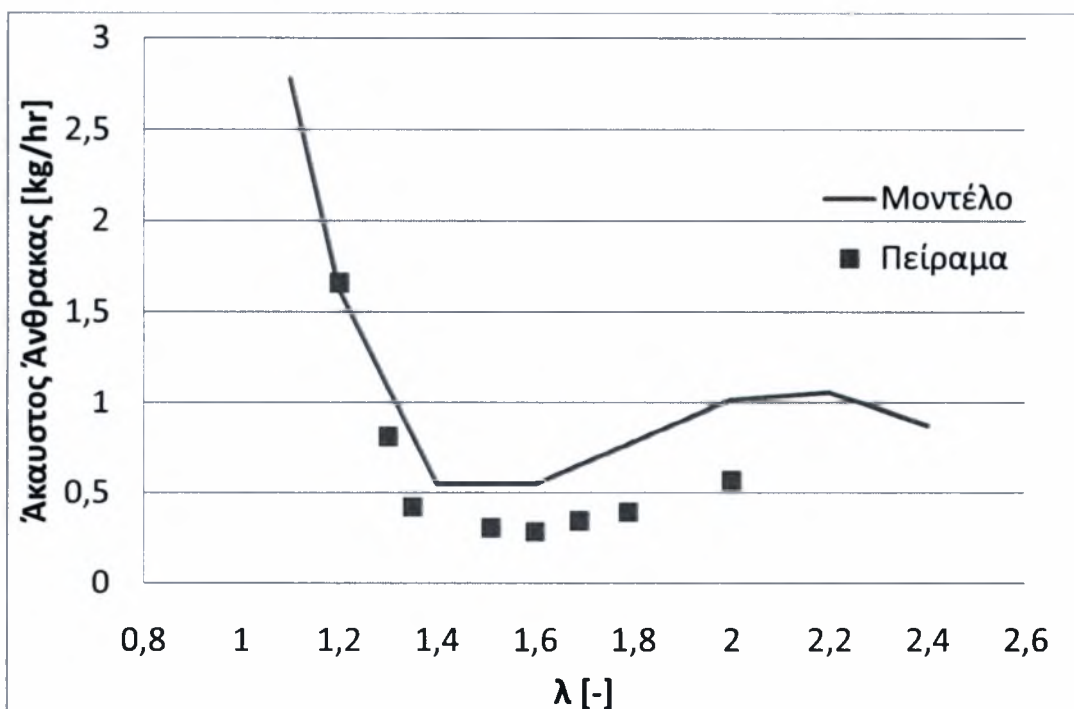
4.1.4. Καύσιμο: 25% λιγνίτης – 75% ελαιοπυρήνας

Το μοντέλο δοκιμάστηκε και σε διαφορετική σύσταση μίγματος καυσίμου αποτελούμενου κατά 25% από λιγνίτη και κατά 75% από ελαιοπυρήνα. Οι τιμές των ρυθμιστικών παραμέτρων που βρέθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο χρησιμοποιήθηκαν και σε αυτή τη περίπτωση.

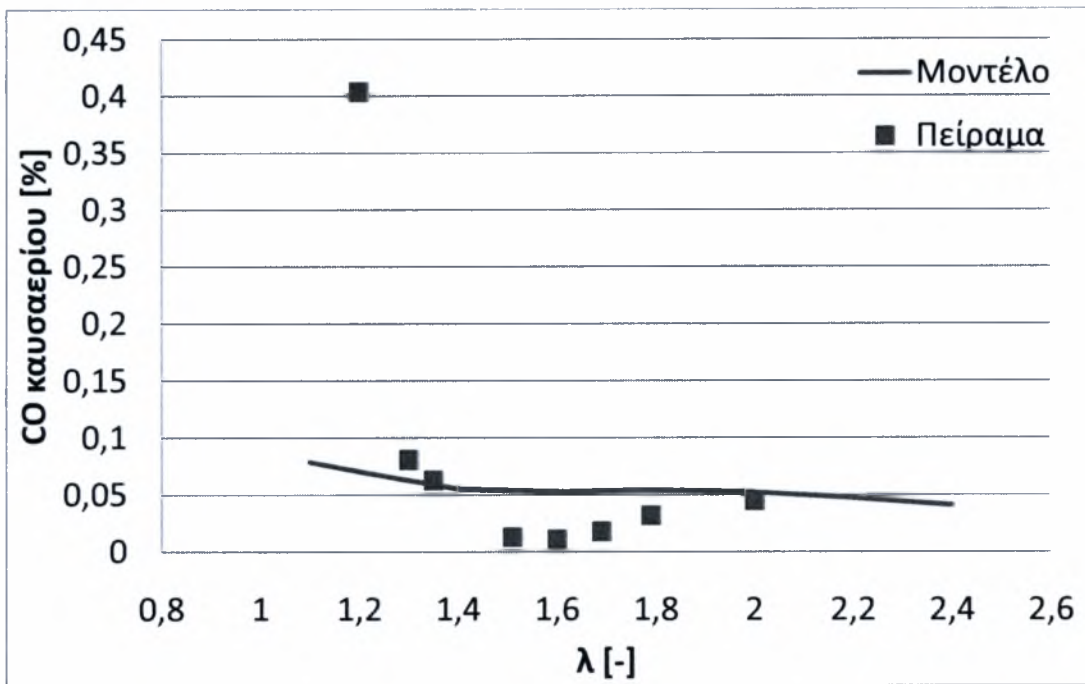
Η Εικόνα 28 παρουσιάζει την σύγκριση μεταξύ μετρημένης και υπολογισμένης θερμοκρασίας. Και σε αυτή τη περίπτωση παρατηρείται απόκλιση της υπολογισμένης τιμής από την μετρημένη. Ποιοτικά το μοντέλο προβλέπει ότι η μέγιστη θερμοκρασία επιτυγχάνεται για λ ίσο με 1.4 σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων που δίνουν τη μέγιστη θερμοκρασία της κλίνης για λ ίσο με 1.6.



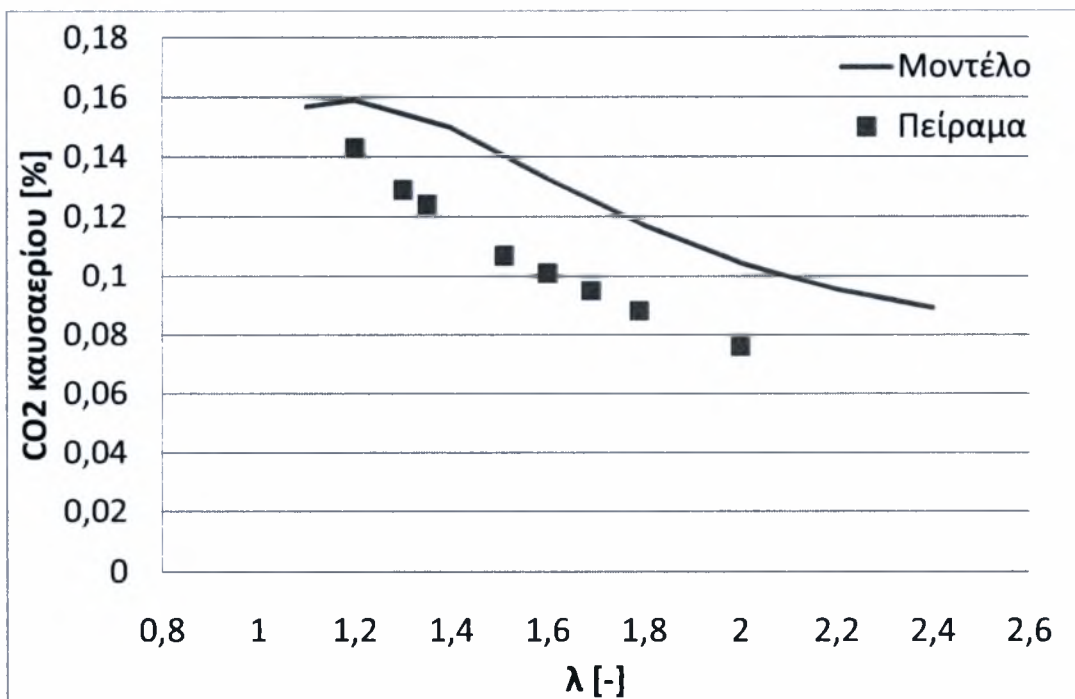
Εικόνα 28 Σύγκριση μετρημένης και υπολογισμένης μέσης θερμοκρασίας κλίνης



Εικόνα 29 Σύγκριση υπολογισμένης και μετρημένης ποσότητας άκαυστου άνθρακα που βρίσκεται στην έξοδο του τελευταίου τμήματος του ανυψωτήρα.



Εικόνα 30 Σύγκριση υπολογισμένης και μετρημένης ποσότητας μονοξειδίου του άνθρακα που βρίσκεται στο καυσαέριο της διάταξης.



Εικόνα 31 Σύγκριση υπολογισμένης και μετρημένης ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα που βρίσκεται στο καυσαέριο της διάταξης.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του μοντέλου όσον αφορά τον άκαυστο άνθρακα που διαφεύγει από τον ανυψωτή για αυτή τη περίπτωση μίγματος καυσίμου (Εικόνα 29) παρατηρείται ότι το μοντέλο ταιριάζει με μεγάλη ακρίβεια ποιοτικά και ποσοτικά την μέτρηση.

Η Εικόνα 30 παρουσιάζει την σύγκριση εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση παρατηρείται μια αδυναμία του μοντέλου να ταιριάζει την πειραματική μέτρηση ποιοτικά πιθανόν λόγω των αποκλίσεων στη υπολογισμένη θερμοκρασία.

Στην Εικόνα 31 παρατηρείται ότι οι προβλεπόμενες από το μοντέλο εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι κατά 20% περίπου σε κάθε περίπτωση υπερεκτιμημένες. Το μοντέλο ταιριάζει ποιοτικά την διακύμανση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με το λ.

4.1.5. Συμπεράσματα

Γενικά παρατηρείται ότι ο υπολογισμός αποκλίνει σημαντικά από την πειραματική μέτρηση. Σε επιπλέον προσομοιώσεις που έγιναν η χρήση προθερμασμένου αέρα καύσης βελτίωσε τη σύγκλιση πειραματικών μετρήσεων και υπολογισμών χωρίς ωστόσο να εξαγεται κάποια ενιαία συμπεριφορά. Η αλλαγή αυτή είχε επίπτωση στις βέλτιστες τιμές των ρυθμιστικών παραμέτρων του μοντέλου εναλλαγής θερμότητας σε κάθε περίπτωση, δεν κατέστη όμως δυνατόν η εξαγωγή μιας ενιαίας συμπεριφοράς. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στη διαφορετική θερμοκρασία προθέρμανσης του αέρα σε κάθε περίπτωση. Για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων όσον αφορά τις ρυθμιστικές παραμέτρους επιλέχθηκε να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία του αέρα καύσης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι σημαντικό μέρος της καύσης πραγματοποιείται στην κατώτερη ζώνη η οποία διατηρείται σε θερμοκρασία κοντά στις τυπικές θερμοκρασίες που επικρατούν στην πυκνή ζώνη και ότι στις υψηλότερες ζώνες η καύση έχει σχεδόν ολοκληρωθεί, θεωρείται ότι δεν επηρεάζονται σημαντικά τα αποτελέσματα των εκπομπών.

Θεωρείται ότι οι ρυθμιστικές παράμετροι του μοντέλου χημικών αντιδράσεων που βρέθηκαν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα δεδομένης της συμπεριφοράς που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 22 και στην Εικόνα 23. Θεωρητικά οι τιμές της καύσης του αέριου μονοξειδίου του άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιαδήποτε σύσταση καυσίμου. Οι τιμές που βρέθηκαν για την καύση του στερεού άνθρακα δύναται να έχουν μικρές αποκλίσεις δεδομένων των διαφοροποιήσεων στα χαρακτηριστικά των στερεών σωματιδίων που προκύπτουν από την καύση διαφορετικών τύπων καυσίμων.

Η βελτιστοποίηση που έγινε στις παραμέτρους του μοντέλου εναλλαγής θερμότητας έδειξε ότι το μοντέλο προσεγγίζει σε κάποιο βαθμό την συμπεριφορά της διάταξης χωρίς όμως να επαρκεί. Ελλείπει επιπλέον στοιχεία σχετικά με τις συνθήκες εισαγωγής του αέρα καύσης θεωρούμε την συγκεκριμένη προσέγγιση της θερμοκρασίας ως την καλύτερη δυνατή.

5. Μελέτη χαρακτηριστικών λειτουργίας πιλοτικής διάταξης 30 kW

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια μελέτη των χαρακτηριστικών λειτουργίας μιας πιλοτικής διάταξης 30kW η οποία είναι υπό κατασκευή. Η διάταξη πρόκειται να χρησιμοποιεί ως καύσιμο ελαιοπυρήνα και πριονίδι. Σκοπός της μελέτης είναι να εξαχθούν κάποιοι χάρτες λειτουργίας οι οποίοι θα βοηθήσουν στον αρχικό σχεδιασμό της διάταξης σε σχέση με τις παραμέτρους λειτουργίας της. Οι χάρτες αυτοί θα εξαχθούν με βάση τα δεδομένα της βιβλιογραφίας και τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου.

Η δεύτερη φάση υλοποίησης, η οποία είναι εκτός των ορίων της παρούσας εργασίας, περιλαμβάνει πειραματικές μετρήσεις, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την ρύθμιση του μοντέλου ώστε να ανταποκρίνεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της διάταξης. Την πιστοποίηση του μοντέλου θα ακολουθήσει παραμετρική μελέτη και βελτιστοποίηση των σχεδιαστικών παραμέτρων των επιμέρους συσκευών διεργασιών της διάταξης (εναλλάκτες θερμότητας, κυκλώνας, κ.α.).

5.1. Περιγραφή της διάταξης

Η Εικόνα 32 παρουσιάζει ένα σκαρίφημα της πιλοτικής διάταξης για την οποία θα γίνει η μελέτη των χαρακτηριστικών λειτουργίας. Στην εικόνα φαίνονται με διακεκομμένες γραμμές τα επιμέρους τμήματα της διάταξης τα οποία περιγράφονται στον Πίνακα 24.

Πίνακας 24 Υπόμνημα τμημάτων πιλοτικής διάταξης CFBC

A/A	Τμήμα	Χρώμα	Ρεύματα Εισόδου	Ρεύματα Εξόδου
1	Θάλαμος καύσης	μωβ	Καύσιμο Πρωτεύων αέρας Υλικά ρευστοποίησης	Καυσαέρια
2	Ανυψωτής	καφέ	Καυσαέρια Δευτερεύων αέρας	Καυσαέρια
3	Κυκλώνας	κόκκινο	Καυσαέρια	Αέρια φάση Στερεή φάση
4	1 ^η ζώνη παραλαβής θερμότητας	πράσινο	Κρύος αέρας	Ζεστός αέρας
5	2 ^η ζώνη παραλαβής θερμότητας	κίτρινο	Κρύος αέρας	Ζεστός αέρας
6	3 ^η ζώνη παραλαβής θερμότητας	γκρι	Κρύος αέρας	Ζεστός αέρας

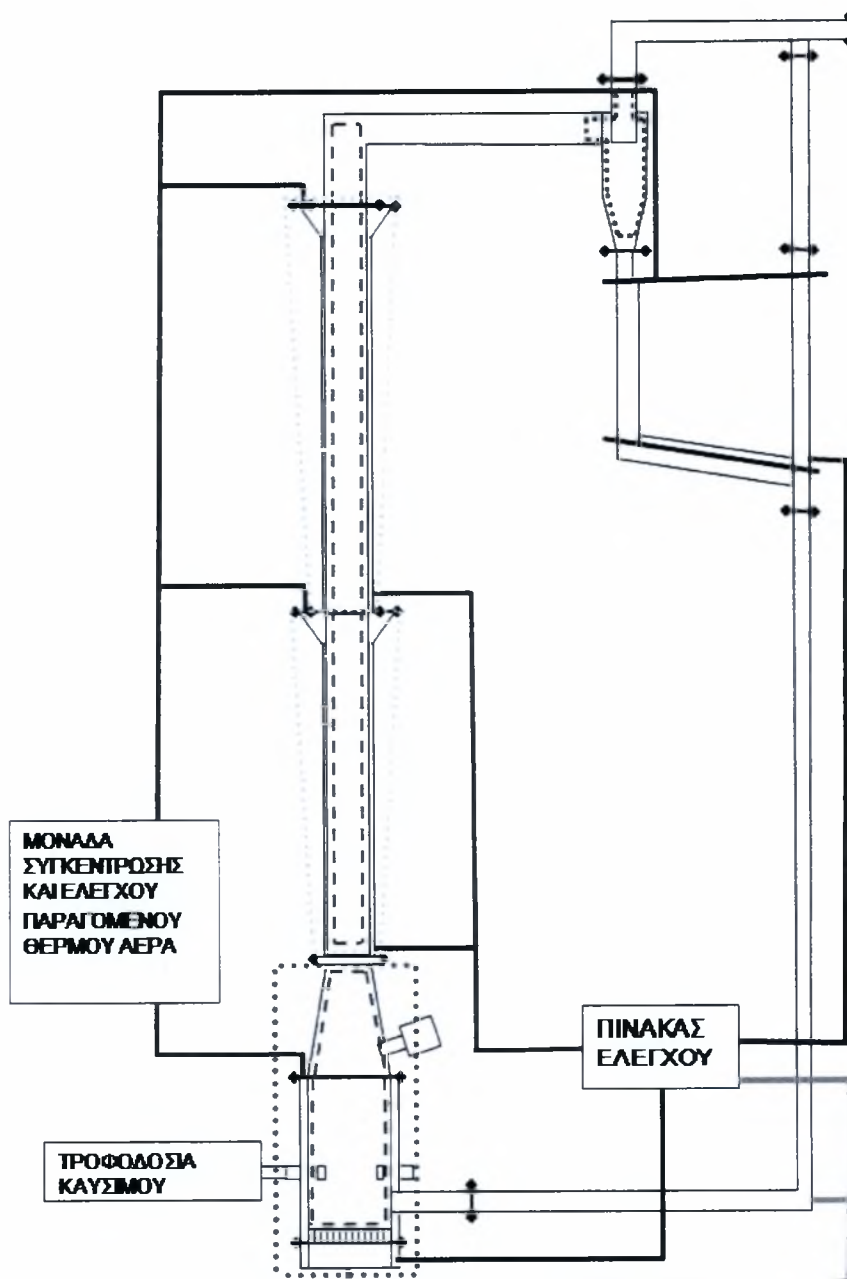
Στον θάλαμο καύσης πραγματοποιείται η καύση των πτητικών ενώσεων και σημαντικού μέρους της απανθρακωμένης στερεής καύσιμης μάζας. Το τμήμα αυτό αποτελεί την πυκνή ζώνη της ρευστοποιημένης κλίνης στο οποίο τα εισερχόμενα αδρανή υλικά ρευστοποίησης από την ανακυκλοφορία ρευστοποιούνται από τον πρωτεύοντα αέρα. Ως αδρανές υλικό χρησιμοποιείται χαλαζίας SiO₂ μέσης διαμέτρου 100μm και πυκνότητας 2500kg/m³. Ο πρωτεύων αέρας διανέμεται ομοιόμορφα με ειδική διαμόρφωση της πλάκας του διανομέα. Ο θάλαμος καύσης έχει εσωτερική διάμετρο 0.3 m, ύψος 1 m και περικλείεται από λέβητα για την θέρμανση του προϊόντος. Συνδέεται με τον ανυψωτή με κώνο προσαρμογής στο πάνω μέρος στον οποίο είναι τοποθετημένη η υποδοχή ενός καυστήρα πετρελαίου για την υποβοήθηση της έναρξης λειτουργία και την σταθεροποίηση της καύσης. Τα καυσαέρια που εξέρχονται από τον θάλαμο καύσης περιέχουν αέριους ρύπους και στάχτη ως προϊόντα της πρωτεύουσας καύσης, τα αδρανή υλικά ρευστοποίησης και την απανθρακωμένη μάζα που δεν κήκε σε στερεή μορφή.

Στον ανυψωτή πραγματοποιείται η συμπληρωματική καύση των υλικών που δεν κήκαν πλήρως στην κατώτερη ζώνη. Ο ανυψωτής αποτελείται από τέσσερα πανομοιότυπα τμήματα εσωτερικής διαμέτρου 0.05 m και ύψους 1 m που συνδέονται με φλάντζες. Κάθε τμήμα περικλείεται από εναλλάκτη θερμότητας τύπου φυσαλιδωτής ροής. Στα τμήματα του ανυψωτή εισέρχεται το μίγμα των καυσαερίων από την κατώτερη ζώνη και καίγεται σημαντικό μέρος της απανθρακωμένης μάζας. Τα καυσαέρια, που διατηρούν την ποιοτική σύσταση τους, εξέρχονται από τον ανυψωτή και εισέρχονται στον κυκλώνα διαχωρισμού.

Στον κυκλώνα διαχωρίζεται η στερεά από την αέρια φάση. Θεωρούμε ότι ο αρχικός σχεδιασμός του κυκλώνα είναι τέτοιος ώστε να επιτυγχάνεται βαθμός διαχωρισμού κοντά στη μονάδα. Η αέρια φάση εξέρχεται στο περιβάλλον, ενώ η στερεά κατακρημνίζεται σε δοχείο συλλογής που αποτελεί και εναλλάκτη θερμότητας. Από το δοχείο συλλογής τα στερεά υλικά επαναπροωθούνται στον θάλαμο καύσης μέσω βαλβίδας τύπου L με πνευματική προώθηση.

Η παραλαβή της θερμότητας από τη διάταξη πραγματοποιείται σε τρεις ζώνες. Η πρώτη ζώνη περιλαμβάνει τον εναλλάκτη θερμότητας που περικλείει τον λέβητα, η δεύτερη τους εναλλάκτες θερμότητας που περιβάλλουν τα τμήματα του ανυψωτή και η τρίτη ζώνη το δοχείο συλλογής της στερεάς φάσης. Οι δύο πρώτες ζώνες είναι εναλλάκτες θερμότητας τύπου μανδύα. Η τρίτη ζώνη παραλαβής θερμότητας αποτελείται από παράλληλες πλάκες οι οποίες λούζονται από τα στερεά υλικά ρευστοποίησης που οδεύουν προς το σύστημα ανακυκλοφορίας.

Η παροχή του απαιτούμενου αέρα για την καύση, την προώθηση των στερεών και του αέρα προς θέρμανση δίνεται από φυσητήρα ισχύος 7.5 HP. Ο έλεγχος της διάταξης γίνεται από κεντρικό σύστημα ελέγχου που ρυθμίζει την παροχή καυσίμου, των επιμερισμό του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αέρα καύσης και τις παροχές στους εναλλάκτες θερμότητας, ώστε να διατηρείται σταθερή θερμοκρασία 800-850°C στους θαλάμους καύσης.



Εικόνα 32 Σκαρίφημα πιλοτικής διάταξης CFBC ονομαστικής ισχύος 30kW. Μπλε χρώμα: αέρας προς θέρμανση, Κόκκινο χρώμα: θερμός αέρας προς κατανάλωση, Γαλάζιο χρώμα: Αέρας προς τον θάλαμο καύσης Διεργασία καύσης Διεργασία εναλλαγής θερμότητας

5.2. Παραδοχές

Οι παραδοχές που γίνονται για την προσομοίωση της διάταξης συνοψίζονται στα παρακάτω.

Θεωρούμε ότι το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη λειτουργία.

Η αρχική υποβοήθηση για την έναρξη της καύσης από τον καυστήρα υγρού καυσίμου και την προθέρμανση δεν λαμβάνεται υπόψη στα ισοζύγια.

Οι ακτινικές ανομοιομορφίες δεν λαμβάνονται υπόψη.

Η αέρια και η στερεή φάση έχουν ίδια θερμοκρασία, όπου συνυπάρχουν, λόγω των υψηλών ρυθμών ανάμιξης και εναλλαγής θερμότητας.

Θεωρούμε ότι έχουμε επαρκή μόνωση ώστε να έχουμε μηδενικές απώλειες θερμότητας από την διάταξη προς το περιβάλλον.

Στους εναλλάκτες τύπου μανδύα κυκλοφορεί και αδρανές υλικό το οποίο όμως λόγω της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας δεν συσσωρεύει θερμότητα. Η λειτουργία του είναι να αυξάνει το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Η απομακρυνόμενη μάζα αδρανών υλικών από το χώρο καύσης είναι ίση με το ρεύμα ανακύκλωσης (δεν υπάρχει συσσώρευση σε κανένα σημείο).

Λόγω της σταθεροποιημένης κατάστασης θεωρούμε ότι το ρεύμα ανακυκλοφορίας περιέχει μόνο αδρανή υλικά. Η άκαυστη μάζα άνθρακα που εισέρχεται με το ρεύμα ανακυκλοφορίας προστίθεται στην συνολική παροχή καυσίμου.

Η καύσιμη μάζα εισέρχεται στον θάλαμο καύσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Ο αέρας εισαγωγής προθερμαίνεται. Η θερμότητα που του προσδίδεται προέρχεται αποκλειστικά από το καυσαέριο που διαφεύγει από την κλίνη.

5.3. Παράμετροι και δεδομένα εισόδου του μοντέλου

Η ρύθμιση του μοντέλου θα γίνει βάσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διάταξης, δεδομένων από τη βιβλιογραφία και αποτελεσμάτων από την πιστοποίηση του μοντέλου που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Θεωρούμε ότι η πυκνή ζώνη είναι ο θάλαμος καύσης της διάταξης, δεδομένου ότι ο δευτερεύων αέρας εισάγεται στην αρχή των τμημάτων του ανυψωτή. Η πίεση λειτουργίας της διάταξης είναι 1bar, τιμή η οποία χρησιμοποιείται από όλα τα υπομοντέλα.

Δεδομένου ότι δεν έχει γίνει χημική ανάλυση του καυσίμου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί θεωρούμε ότι έχει την ίδια χημική σύσταση με τον ελαιοπυρήνα που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το ίδιο ισχύει και για την κατανομή μάζας των σωματιδίων του καυσίμου. Η κατανομή μάζας των υλικών ρευστοποίησης δεν δίνεται οπότε χρησιμοποιείται η γνωστή μέση διάμετρος τους.

Οι παράμετροι ρύθμισης του μοντέλου παρουσιάζονται στον **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** και τα δεδομένα εισόδου στον Πίνακας 26.

Πίνακας 25 Παράμετροι ρύθμισης του μοντέλου

Παράμετροι μοντέλου		Τιμή	Μονάδες
Ξηραντήρας	Υγρασία ξηρού καυσίμου	Ανάλυση καυσίμου	
Πυκνή ζώνη	Ύψος	1.0	m
	Διάμετρος	0.3	m
Αραιή ζώνη	Ύψος	4.0	m
	Διάμετρος	0.05	m
Συσκευές διεργασιών	Πίεση	1	bar
	Θερμοκρασία	Κατά περίπτωση	
	Θερμικό Φορτίο	Κατά περίπτωση	
Εναλλάκτες θερμότητας	Κλάσματα επιμερισμού ροής προϊόντος	Ισομερισμός	

Πίνακας 26 Δεδομένα εισόδου του μοντέλου

Δεδομένα εισόδου						
Ρεύμα	Πίεση [bar]	Θερμοκρασία εισόδου [°C]	Παροχή μάζας [kg/hr]	Σύσταση	Κατανομή μεγέθους	Στοιχειακή ανάλυση
Καύσιμη μάζα	1	25	VAR	PURE	(α)	(β)
Πρωτεύων αέρας καύσης	1	450	VAR (γ)	AIR		
Δευτερεύων αέρας καύσης	1	450	VAR (γ)	AIR		
Αέρας ξήρανσης	1	25	0	AIR		
Υλικά ρευστοποίησης (SiO ₂)	1	800	VAR	PURE	$d_p = 100\mu m$	
Προϊόν	1	25	450	AIR		
VAR: μεταβλητό σε σχέση με το λ ($\lambda=1.2 - 1.6$)						
PURE: 100% του στοιχείου, AIR: 79%N ₂ – 21%O ₂						
(α) Εικόνα 21, (β) Πίνακας 20, (γ) λόγος πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος αέρα: 4/1						

5.4. Περίπτωση αναφοράς

Η προσομοίωση της διάταξης θα γίνει αρχικά για μια περίπτωση αναφοράς χρησιμοποιώντας τα ονομαστικά μεγέθη του αρχικού σχεδιασμού της διάταξης (Πίνακας 27). Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης θα χρησιμοποιηθούν για την συγκριτική μελέτη που θα ακολουθήσει μεταβάλλοντας διάφορα χαρακτηριστικά λειτουργίας της διάταξης.

Πίνακας 27 Δεδομένα εισόδου περίπτωσης αναφοράς

Παροχή καυσίμου	5	kg/hr
Ανακυκλοφορία αδρανών υλικών	50	kg/m ² s
Λόγος λ αέρα καύσης	1.2	-
Λόγος πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος αέρα	4:1	-

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 28. Η μέση θερμοκρασία της κλίνης υπολογίστηκε στους 773 °C θερμοκρασία που είναι λίγο μικρότερη από το εύρος θερμοκρασιών που συναντώνται σε διατάξεις του είδους. Φυσικά οι θερμοκρασίες που υπολογίζονται από το μοντέλο εξαρτώνται άμεσα από τον ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση χρησιμοποιούνται σταθερές τιμές ($U=15W/m^2K$) από τη βιβλιογραφία, δεδομένου ότι δεν υπήρξαν πειραματικές μετρήσεις μέχρι την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Η θερμοκρασία του καυσαερίου στην έξοδο της κλίνης είναι 751 °C. Μέρος της θερμότητας του καυσαερίου χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του αέρα καύσης χαμηλώνοντας τη θερμοκρασία του καυσαερίου στην έξοδο της διάταξης στους 175 °C. Από τη σύσταση του καυσαερίου παρατηρείται ότι επιτυγχάνεται πολύ καλός βαθμός απόδοσης καύσης της τάξης του 99.8%. Η τιμή αυτή είναι ελάχιστα υπερεκτιμημένη συγκριτικά με τις τιμές της βιβλιογραφίας (98-99%) και οφείλεται πιθανώς στις κατ' εκτίμηση κινητικές παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν. Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου οφείλονται αποκλειστικά στην περιεκτικότητα της καύσιμης ύλης σε θείο, δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιείται κάποια διάταξη κατακράτησης του θείου που

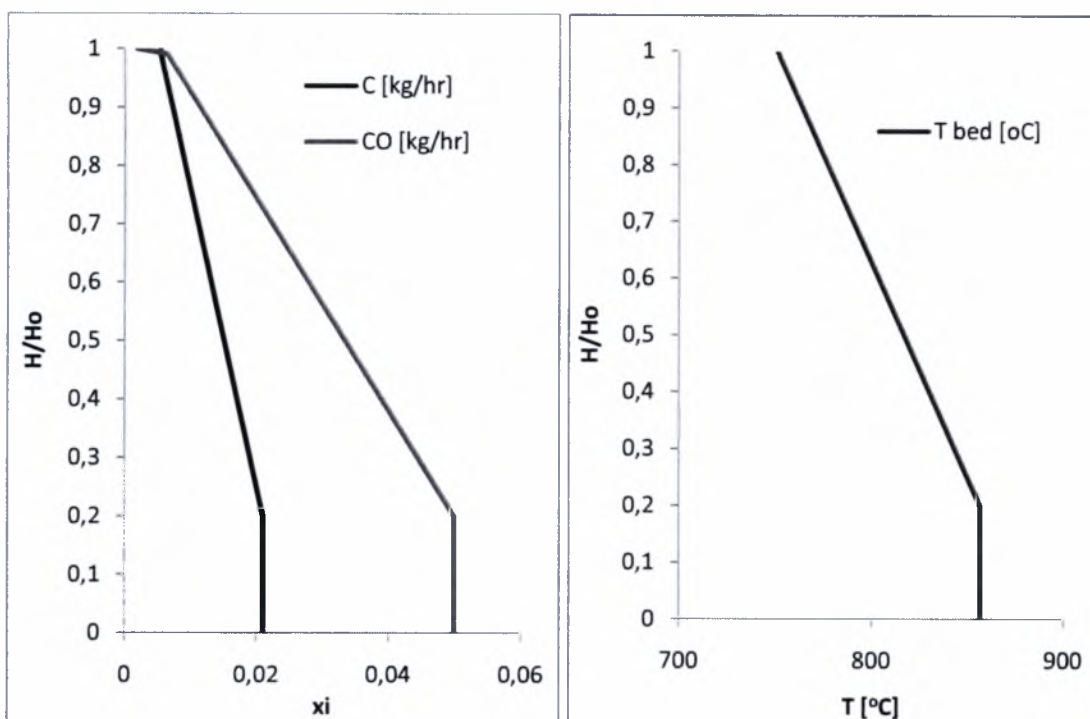
Το προϊόν (αέρας) θερμαίνεται από τη διάταξη στους 179 °C παράγοντας ωφέλιμη ισχύ 19.68kW. Αυτό συνεπάγεται απόδοση του λέβητα στο 68%. Εδώ τονίζεται ότι δεν συνυπολογίζονται οι απώλειες θερμότητας από τον λέβητα προς το περιβάλλον, οι οποίες είναι της τάξης του 20% της ωφέλιμης ενέργειας.

Πίνακας 28 Αποτελέσματα προσομοίωσης

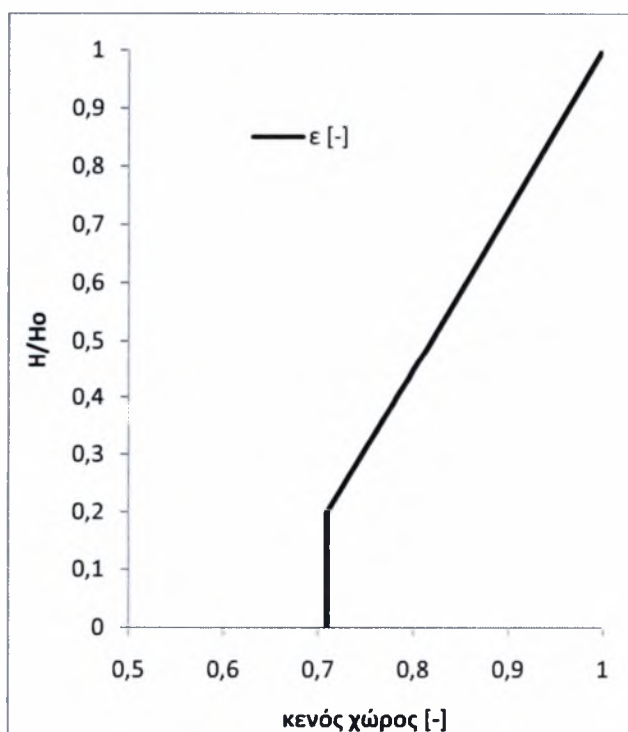
Μέση θερμοκρασία κλίνης	773	°C
Θερμοκρασία προϊόντος	179	°C
Θερμοκρασία καυσαερίου (έξοδος κλίνης)	751	°C
Θερμοκρασία καυσαερίου (έξοδος διάταξης)	175	°C
O ₂	5.81	%
CO ₂	12.06	%
H ₂ O	10.55	%
CO	46	ppm
NO _x	24	ppm
SO ₂	116	ppm
Άκαυστος άνθρακας	0.00543	kg/hr
Βαθμός απόδοσης καύσης	99.82	%
Βαθμός απόδοσης διάταξης	68.01	%

Η Εικόνα 33 παρουσιάζει την μεταβολή της μάζας CO και άκαυστου C καθ' ύψος της κλίνης. Η μάζα του άνθρακα που εισέρχεται στην κλίνη είναι 2.19kg/hr όπως προκύπτει από την στοιχειακή ανάλυση του καυσίμου. Παρατηρείται ότι το 99% του άνθρακα καίγεται στην κατώτερη πυκνή ζώνη της κλίνης. Το υπόλοιπο 1% που δεν πρόλαβε να καεί στην πυκνή ζώνη καίγεται σταδιακά στον ανυψωτή. Το μονοξείδιο του άνθρακα, που παράγεται αποκλειστικά από την καύση του άνθρακα, σύμφωνα με το μοντέλο, παρατηρείται ότι έχει υψηλότερο ρυθμό καύσης στην ζώνη του ανυψωτή. Αυτό οφείλεται σε σημαντικό βαθμό στο γεγονός ότι η αντίδραση καύσης του άνθρακα καταναλώνει το μεγαλύτερο ποσό του διαθέσιμου οξυγόνου. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας που φαίνεται στο δεξί μέρος της ίδιας εικόνας, δείχνει ότι σημαντικό μέρος θερμότητας εκλύεται στην πυκνή ζώνη, που έχει ως αποτέλεσμα η μέση θερμοκρασία της κλίνης σε αυτή τη περιοχή να είναι στους 856 °C. Η θερμοκρασία αυτή μειώνεται κατά το ύψος της κλίνης, δεδομένων των μικρότερων ρυθμών καύσης και της απαγωγής θερμότητας από τους παράπλευρους εναλλάκτες. Η τιμή των 856 °C που προβλέπεται από το μοντέλο ως θερμοκρασία της πυκνής ζώνης όπου συντελείται και το μεγαλύτερο ποσοστό της καύσης και των χημικών αντιδράσεων σχηματισμού ρύπων, είναι μέσα στις τυπικές τιμές που δίνονται από τη βιβλιογραφία για τις διατάξεις του είδους.

Η μεταβολή του κενού χώρου στην αξονική διεύθυνση της κλίνης παρουσιάζεται στην Εικόνα 34. Το μοντέλο προβλέπει ότι η τιμή του κενού χώρου στην πυκνή ζώνη είναι 0.71 και η ροή μοιράζεται κατά 4% στη φυσαλιδωτή φάση και 96% στην φάση του γαλακτώματος. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι έχουμε συνθήκες αραιής αιώρησης με σχηματισμό πολύ μικρών φυσαλίδων κατάσταση που βελτιώνει την ανάμιξη στερεής και αέριας φάσης και συνεπώς και την καύση στην πυκνή ζώνη. Στον ανυψωτή, όπως είναι αναμενόμενο η τιμή του κενού χώρου αυξάνεται στο 0.854 για την ζώνη επιτάχυνσης για να καταλήξει στην τιμή 0.9993 στη ζώνη της πλήρους ανεπτυγμένης ροής. Το μοντέλο προέβλεψε ότι η ζώνη επιτάχυνσης καταλαμβάνει το 96% του ύψους του ανυψωτή.

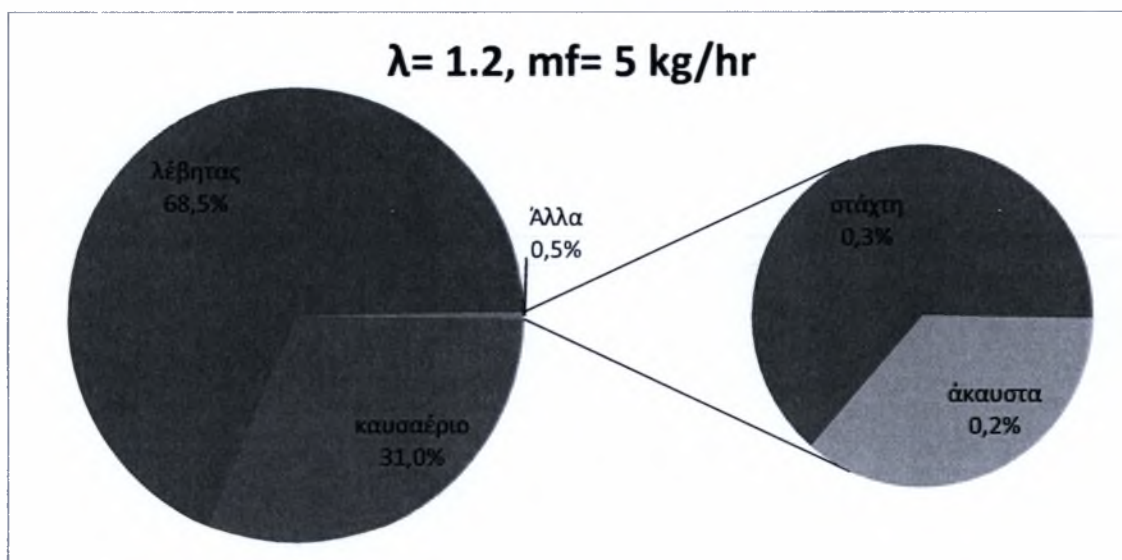


Εικόνα 33 Μεταβολή της μάζας CO και άκαυστου άνθρακα και της θερμοκρασίας καθ' ύψος της κλίνης ($m_f = 5 \text{ kg/hr}$, $\lambda = 1.2$)



Εικόνα 34 Μεταβολή κενού χώρου στην αξονική διεύθυνση της κλίνης

Το ενεργειακό ισοζύγιο της κλίνης για την περίπτωση αναφοράς φαίνεται στην Εικόνα 35. Το καυσαέριο περιέχει 31% της ενέργειας του καυσίμου. Από το ποσό αυτό έχει αφαιρεθεί η θερμότητα που απαιτείται για την προθέρμανση του αέρα καύσης. Μικρό μέρος της ενέργειας διαφεύγει με την μορφή άκαυστων ενώσεων (άνθρακας και μονοξείδιο του άνθρακα) ως αποτέλεσμα του υψηλού βαθμού απόδοσης καύσης. Η ενέργεια που διαφεύγει με την αποσυρόμενη από τη διάταξη στάχτη είναι μικρή (0.31%) λόγω της μικρής μάζας στάχτης που προκύπτει από την στοιχειακή ανάλυση. Ποσοστό 68.5 % της ενέργειας αποδίδεται στον λέβητα σύμφωνα με το μοντέλο. Η τιμή αυτή κρίνεται υψηλή για τα πραγματικά δεδομένα, γεγονός που αποδίδεται τόσο στο ότι οι ολικοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας έχουν εισαχθεί κατ' εκτίμηση όσο και στο ότι το μοντέλο δεν συμπεριλαμβάνει εναλλαγές θερμότητας της διάταξης με το περιβάλλον. Από αυτό το ποσοστό θα πρέπει να αφαιρεθούν απώλειες ενέργειας λόγω ακτινοβολίας και συναγωγής με το περιβάλλον οι οποίες συνήθως κυμαίνονται στο 20% της ενέργειας του προϊόντος.



Εικόνα 35 Ενεργειακό ισοζύγιο κλίνης ($m_f = 5 \text{ kg/hr}, \lambda = 1.2$)

Για τον ακριβέστερο προσδιορισμό του ενεργειακού ισοζυγίου της διάταξης απαιτούνται μετρήσεις των ολικών συντελεστών θερμότητας από την κλίση προς τους εναλλάκτες, όσο και ακριβή στοιχεία για την μόνωση της διάταξης, τα οποία δεν υπήρχαν μέχρι τη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

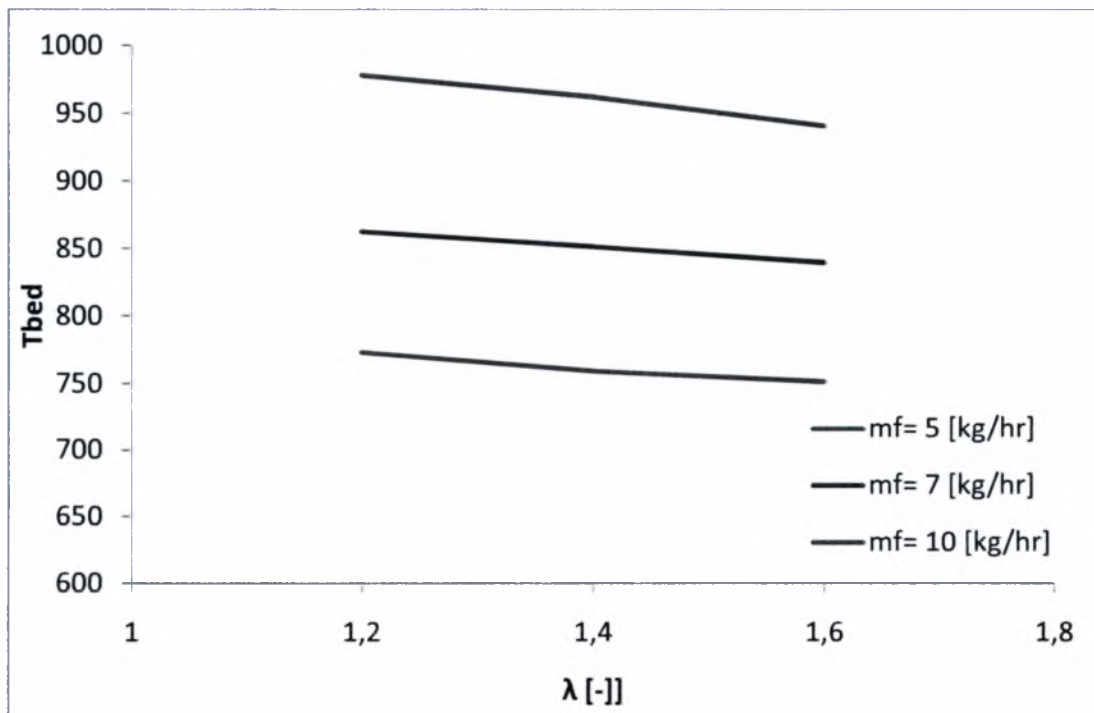
5.5. Μελέτη χαρακτηριστικών λειτουργίας της διάταξης

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί μια μελέτη των χαρακτηριστικών λειτουργίας. Συγκεκριμένα θα μελετηθεί η λειτουργία της κλίνης σε διαφορετικές παροχές καυσίμου και διάφορους λόγους αέρα καυσίμου, καθώς και η επίδραση του λόγου πρωτεύοντος προς δευτερεύων αέρα και του ποσού ανακυκλοφορίας των αδρανών υλικών ρευστοποίησης.

5.5.1. Επίδραση της παροχής καυσίμου

Για την μελέτη της επίδρασης της παροχής του καυσίμου έγιναν προσομοιώσεις του μοντέλου για εννιά συνδυασμούς παροχής καυσίμου και λόγου αέρα καύσης ($m_f = 5, 7, 10 \text{ kg/hr}$ και $\lambda = 1.2, 1.4, 1.6$).

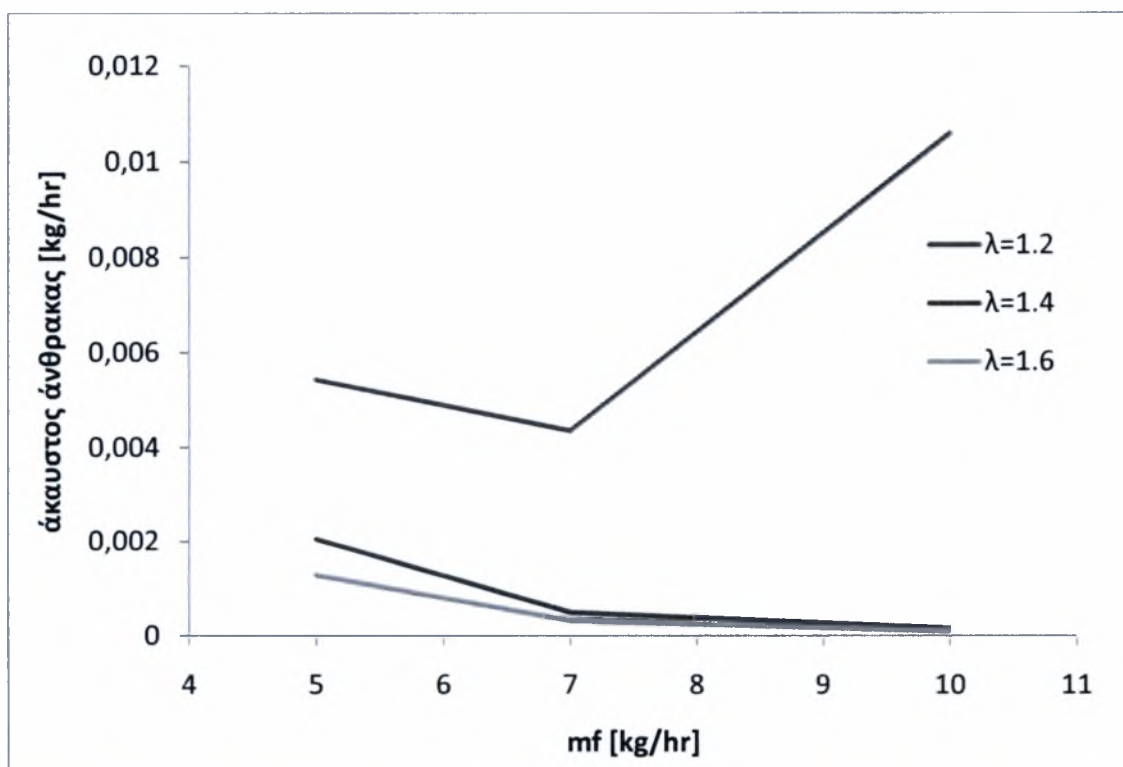
Η Εικόνα 36 παρουσιάζει την επίδραση της παροχής του καυσίμου και του λόγου αέρα καύσης στην μέση θερμοκρασία της κλίνης. Παρατηρείται ότι για κάθε παροχή καυσίμου η μέση θερμοκρασία της κλίνης μειώνεται με αύξηση του λόγου αέρα καύσης ως αποτέλεσμα της εισαγωγής μεγαλύτερης παροχής ψυχρότερου αέρα στην κλίνη. Η πτώση της μέσης θερμοκρασίας της κλίνης με αύξηση του λόγου αέρα είναι μεγαλύτερη για υψηλότερες παροχές καυσίμου, περίπου 100°C για παροχή 10 kg/hr σε αντίθεση με πτώσης θερμοκρασίας 40°C για παροχή καυσίμου 5 kg/hr .



Εικόνα 36 Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας της κλίνης για διάφορες παροχές καυσίμου και λόγους αέρα καύσης

Η μέση θερμοκρασία της κλίνης αυξάνεται με αύξηση της παροχής καυσίμου. Βεβαίως θα πρέπει να επισημανθεί ότι σημαντικό ρόλο έχει η μεταφορά θερμότητας προς τους εναλλάκτες σε κάθε περίπτωση. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η παροχή του προϊόντος διατηρείται σταθερή σε όλες τις περιπτώσεις. Η συνήθης πρακτική είναι η αύξηση της παροχής του προϊόντος για την καλύτερη ενεργειακή εκμετάλλευση της κλίνης. Η βελτιστοποίηση αυτής της παραμέτρου είναι εκτός των ορίων της συγκεκριμένης εργασίας.

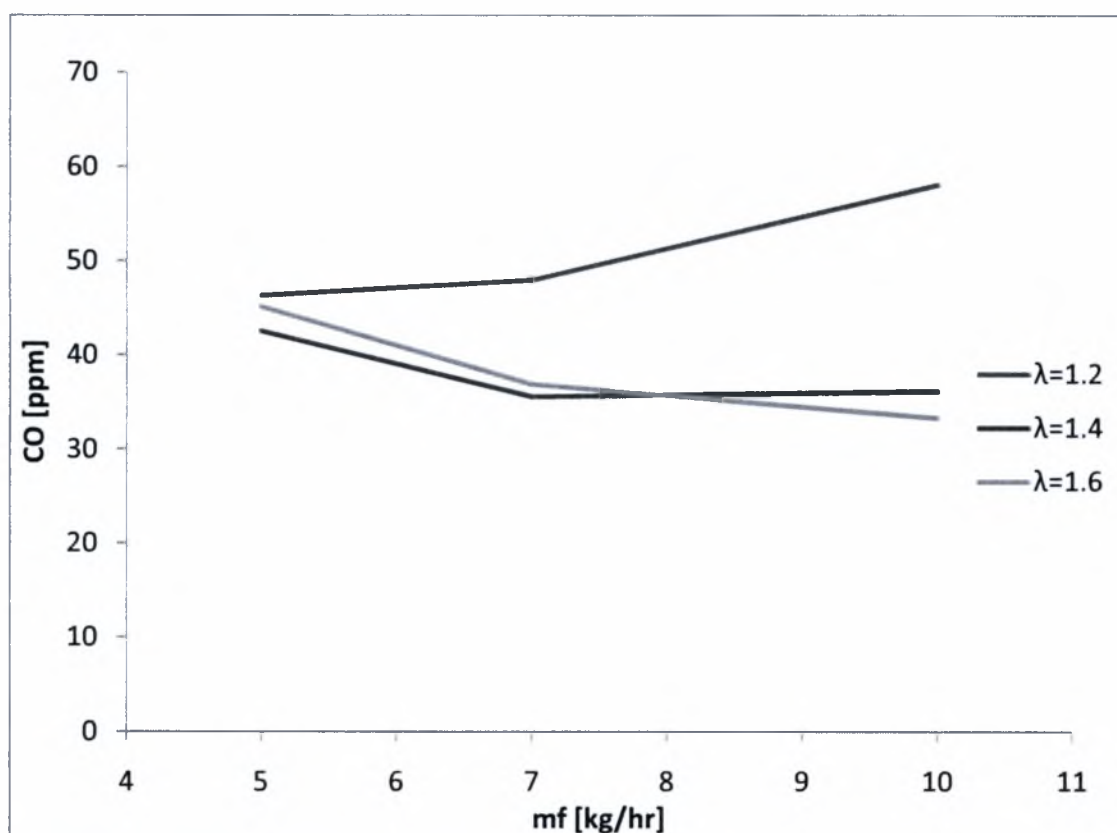
Η ποσότητα του άνθρακα που διαφεύγει από τη διάταξη χωρίς να καεί επηρεάζεται σημαντικά από τον λόγο αέρα καυσίμου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 37 καθώς αυξάνεται ο λόγος αέρα βελτιώνεται η καύση του άνθρακα για σταθερή παροχή καυσίμου, γεγονός το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω της μεγαλύτερης περίσσειας αέρα καύσης. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση για $\lambda=1.2$ και παροχή καυσίμου 10 kg/hr όπου παρατηρούνται υψηλότερες εκπομπές άκαυστου άνθρακα. Αυτό οφείλεται πιθανώς στην έλλειψη οξυγόνου (λόγω της χαμηλής περίσσειας αέρα) σε συνδυασμό με την υψηλότερη ροή μάζας στην διάταξη, άρα και τον μικρότερο χρόνο παραμονής των αντιδρώντων. Γενικά για $\lambda=1.2$ παρατηρούνται υψηλότερες εκπομπές άκαυστου άνθρακα, άρα και μικρότερος βαθμός απόδοσης καύσης



Εικόνα 37 Ποσότητα άκαυστου άνθρακα που διαφεύγει από τη διάταξη για διάφορες παροχές καυσίμου

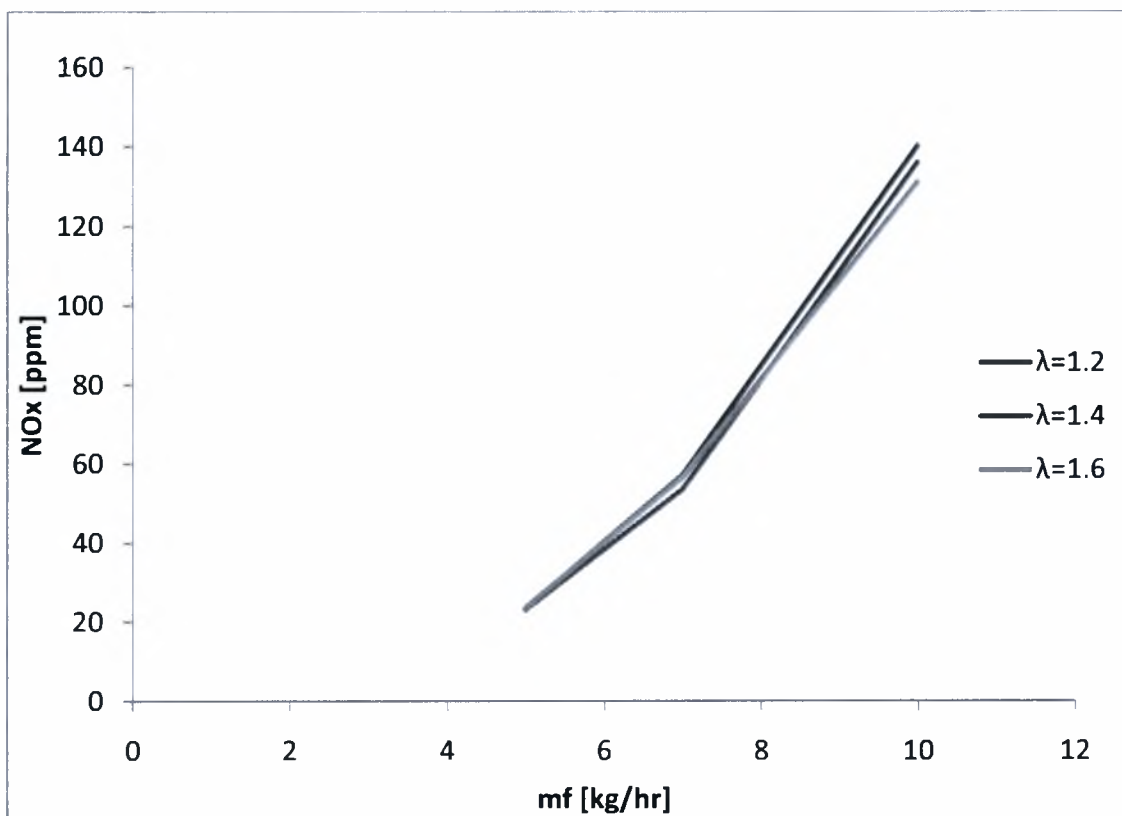
Οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα επηρεάζονται με παρόμοιο τρόπο από την περίσσεια του αέρα καύσης για διάφορες παροχές καυσίμου (Εικόνα 38). Σε γενικές γραμμές αύξηση του λόγου αέρα βελτιώνει την οξείδωση του μονοξειδίου του άνθρακα το οποίο δείχνει να είναι περισσότερο ευαίσθητο στον χρόνο παραμονής των αντιδρώντων στην διάταξη. Βεβαίως η

κάυση του άνθρακα δρα ανταγωνιστικά στην συγκεκριμένη οξείδωση, λαμβάνοντας υπόψη ότι καταναλώνει το διαθέσιμο οξυγόνο. Αν συνυπολογιστεί η αυξημένη παροχή μάζας καυσαερίου η μάζα του μονοξειδίου του άνθρακα αυξάνεται με αύξηση του λόγου αέρα, γεγονός που σημαίνει ότι η περίσσεια του οξυγόνου δρα παρεμποδιστικά στην συγκεκριμένη αντίδραση οξείδωσης. Οι εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα παραμένουν πάντως σε πολύ χαμηλά επίπεδα.



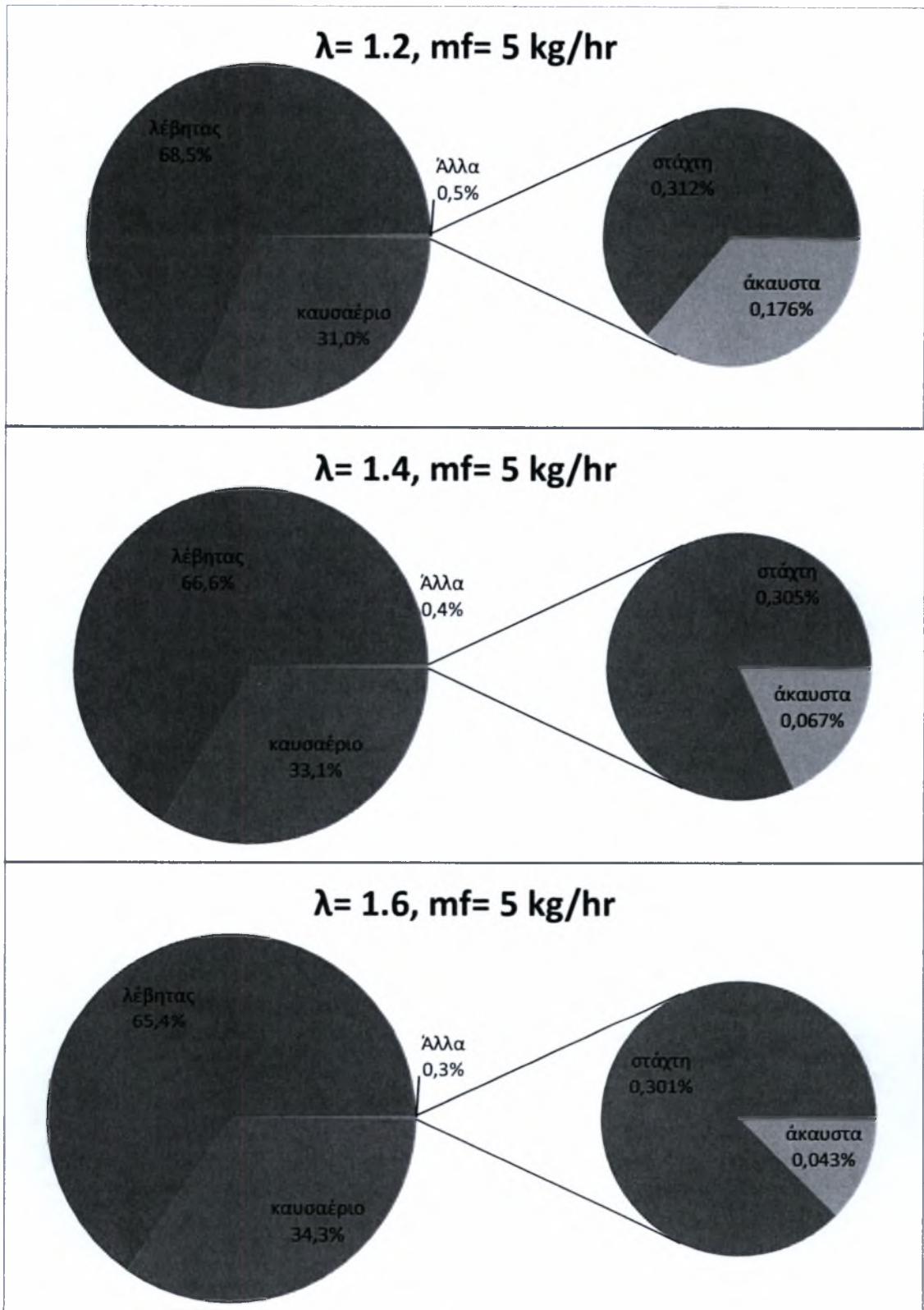
Εικόνα 38 Εκπομπές CO για διάφορες παροχές καυσίμου

Οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου εξαρτώνται άμεσα από την ποσότητα του αζώτου που περιέχεται στο καύσιμο, δεδομένου ότι στο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας της κλίνης δεν υπάρχει οξείδωση του αζώτου που βρίσκεται στον ατμοσφαιρικό αέρα καύσης. Οι προσομοιώσεις του μοντέλου δείχνουν ότι αύξηση στην παροχή καυσίμου επιφέρει αύξηση στις εκπομπές NO_x. Η θερμοκρασία και η περίσσεια του αέρα σε κάθε περίπτωση είναι αυτή που καθορίζει την ισορροπία των αντιδράσεων σχηματισμού καταστροφής των NO_x. Η μεταβολή των NO_x σε σχέση με την περίσσεια του αέρα και την παροχή του καυσίμου φαίνονται στην

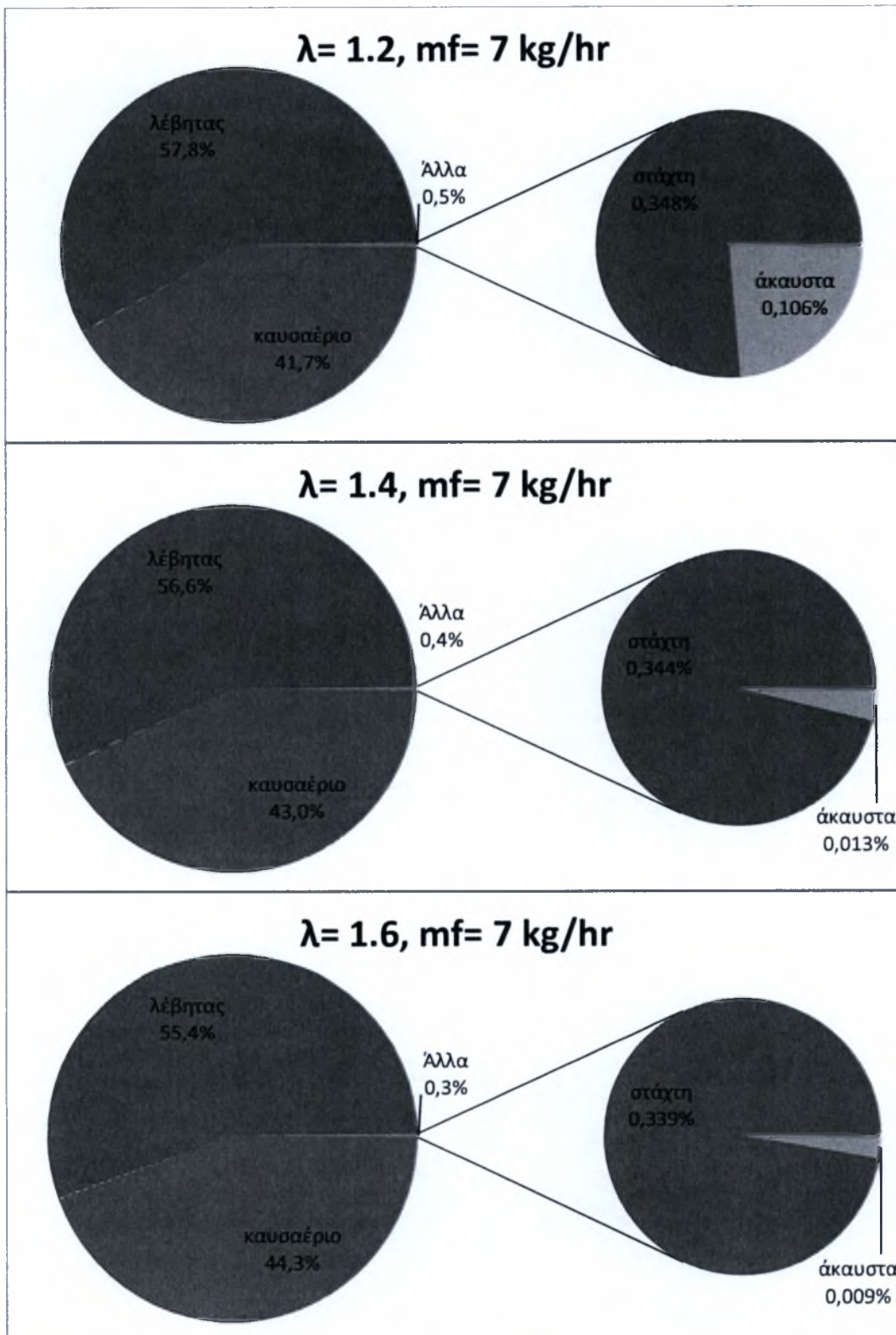


Εικόνα 39 Εκπομπές NOx για διάφορες παροχές καυσίμου

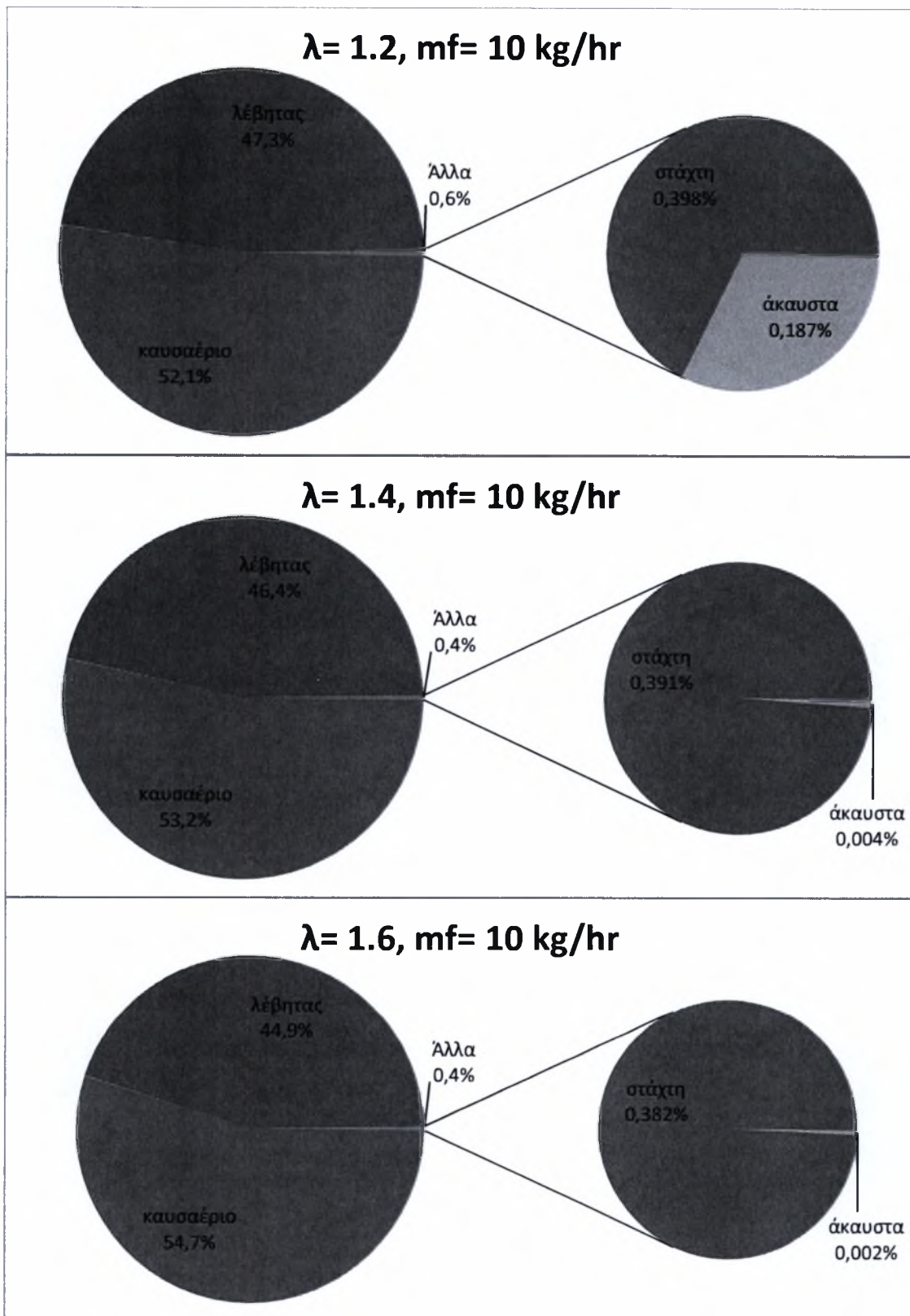
Τα ισοζύγια ενέργειας για τις προσομοιώσεις φαίνονται στις εικόνες Εικόνα 40, Εικόνα 41 και Εικόνα 42. Σε κάθε περίπτωση παρατηρείται ότι αύξηση της περίσσειας του αέρα βελτιώνει τον βαθμό απόδοσης καύσης όπως φαίνεται από την ενέργεια που αποδίδεται στις άκαυστες ενώσεις. Η ενέργεια που απομακρύνεται από τα καυσαέρια αυξάνεται με αύξηση του λόγου αέρα καυσίμου ως συνέπεια της μεγαλύτερης παροχής μάζας του καυσαερίου. Η αύξηση της ενέργειας των καυσαερίων αφαιρείται πρακτικά από την ενέργεια που αποδίδεται στον λέβητα. Τονίζεται σε αυτό το σημείο ότι οι προσομοιώσεις έγιναν με σταθερή την παροχή του προϊόντος και ίδιους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας σε κάθε περίπτωση. Επίσης δεν λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες προς το περιβάλλον. Εκτιμάται ότι σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και βάσει των δεδομένων της βιβλιογραφίας, η εικόνα των ισοζυγίων θα είναι παρόμοια με αυτή των ισοζυγίων για παροχή μάζας καυσίμου 7kg/hr όπου ένα ποσοστό γύρω στο 20% θα χάνεται σε απώλειες προς το περιβάλλον. Σε κάθε περίπτωση ο βαθμός απόδοσης καύσης κυμάνθηκε πάνω από 99% που είναι σε συμφωνία με τα δεδομένα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία.



Εικόνα 40 Ισοζύγια ενέργειας για παροχή καυσίμου 5 kg/hr και λ=1.2 -1.6

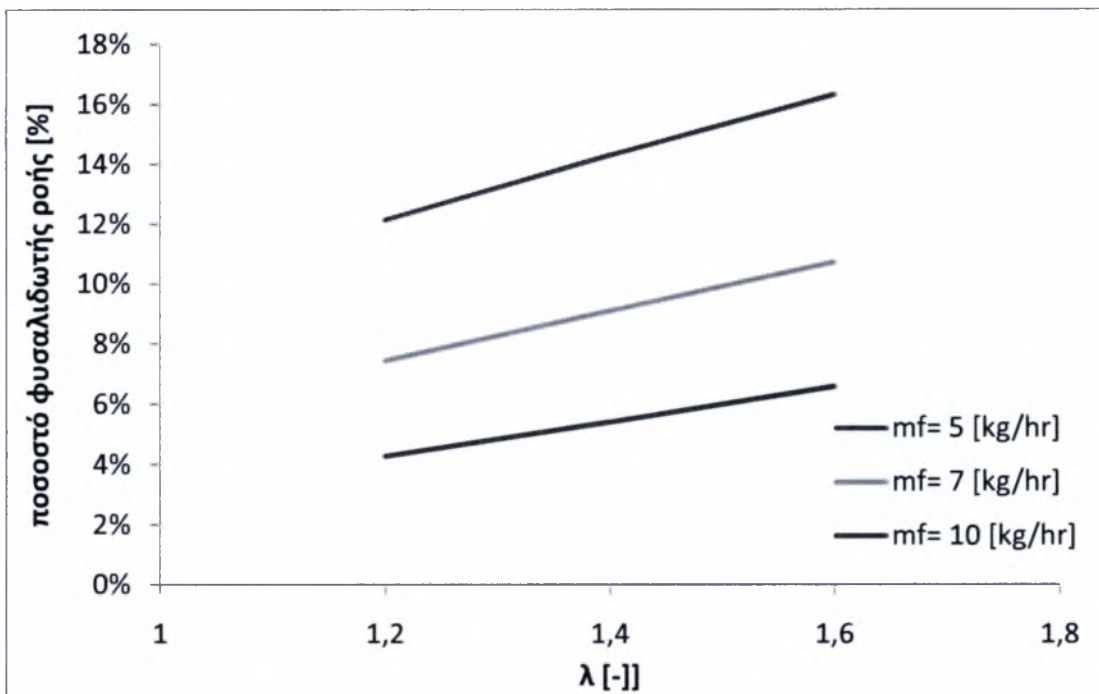


Εικόνα 41 Ισοζύγια ενέργειας για παροχή καυσίμου 7 kg/hr και λ=1.2 -1.6



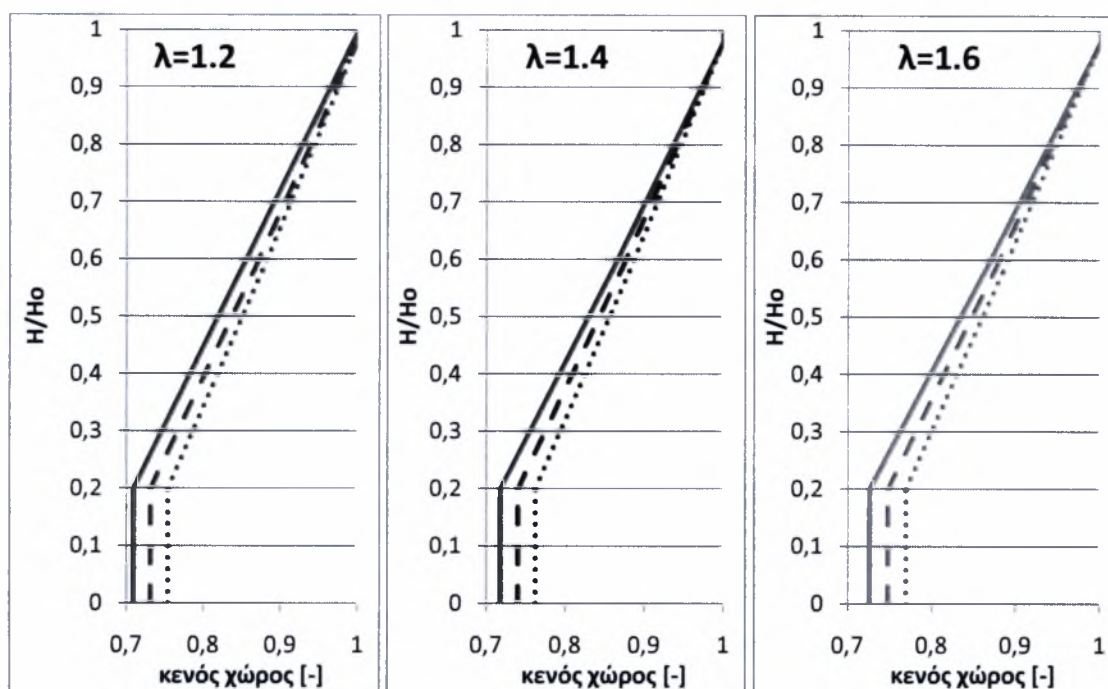
Εικόνα 42 Ισοζύγια ενέργειας για παροχή καυσίμου 10 kg/hr και λ=1.2 -1.6

Όσον αφορά τα υδροδυναμικά φαινόμενα, η Εικόνα 43 παρουσιάζει τον επιμερισμό της ροής προς την φυσαλιδωτή φάση στην πυκνή ζώνη της ρευστοποιημένης κλίνης. Προφανώς το υπόλοιπο μέρος της ροής βρίσκεται στην φάση του γαλακτώματος. Παρατηρείται σε κάθε περίπτωση ότι μικρό μέρος της ροής βρίσκεται στη φυσαλιδωτή φάση, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη μικρών φυσαλίδων. Όπως είναι αναμενόμενο με αύξηση του λόγου αέρα καύσης και αύξηση της παροχής καυσίμου αυξάνεται το ποσοστό της φυσαλιδωτής ροής ως συνέπεια της μεγαλύτερης παροχής αέρα στη διάταξη.



Εικόνα 43 Επιμερισμός ροής στην φυσαλιδωτή φάση για διάφορες παροχές καυσίμου

Η αύξηση της παροχής μάζας του αέρα καύσης ως συνέπεια του λόγου αέρα και της αυξανόμενης παροχής καυσίμου αυξάνει σε κάθε περίπτωση τον κενό χώρο σε όλο το ύψος της κλίνης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 44. Οι τιμές που προβλέπει το μοντέλο είναι τυπικές για διατάξεις ρευστοποιημένων κλινών ταχείας ανακυκλοφορίας.



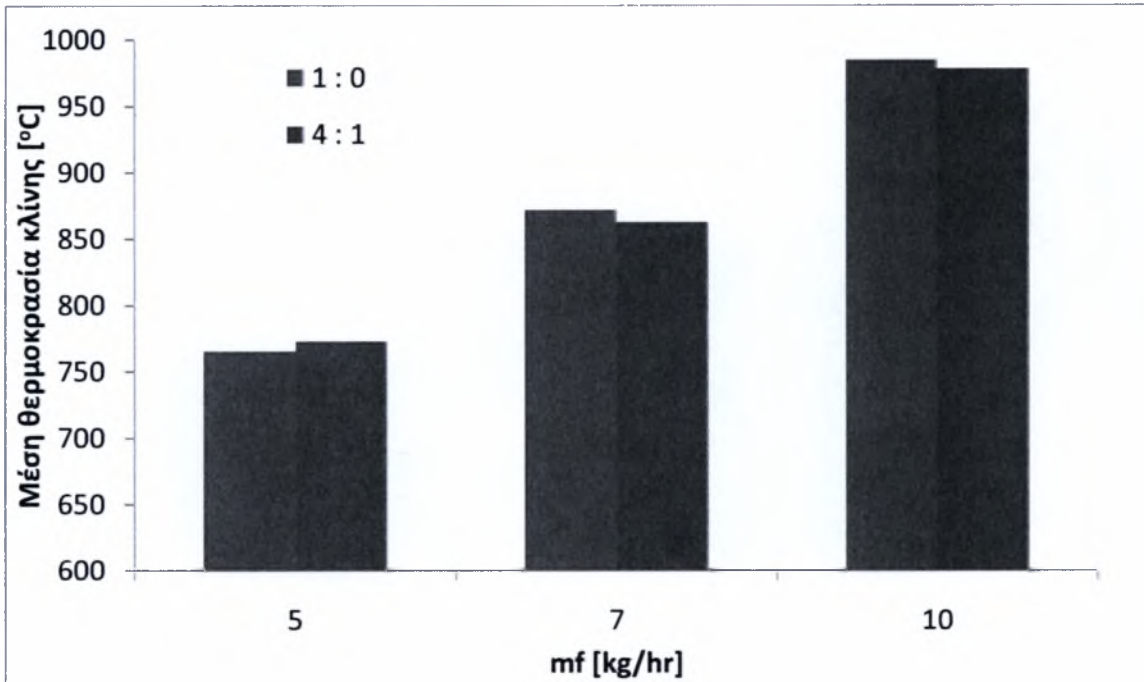
Εικόνα 44 Μεταβολή του κενού χώρου καθ' ύψος της κλίνης (solid line: $mf=5$ kg/hr, dash line: $mf=7$ kg/hr, dot line: $mf=10$ kg/hr)

5.5.2. Επίδραση του λόγου πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος αέρα καύσης

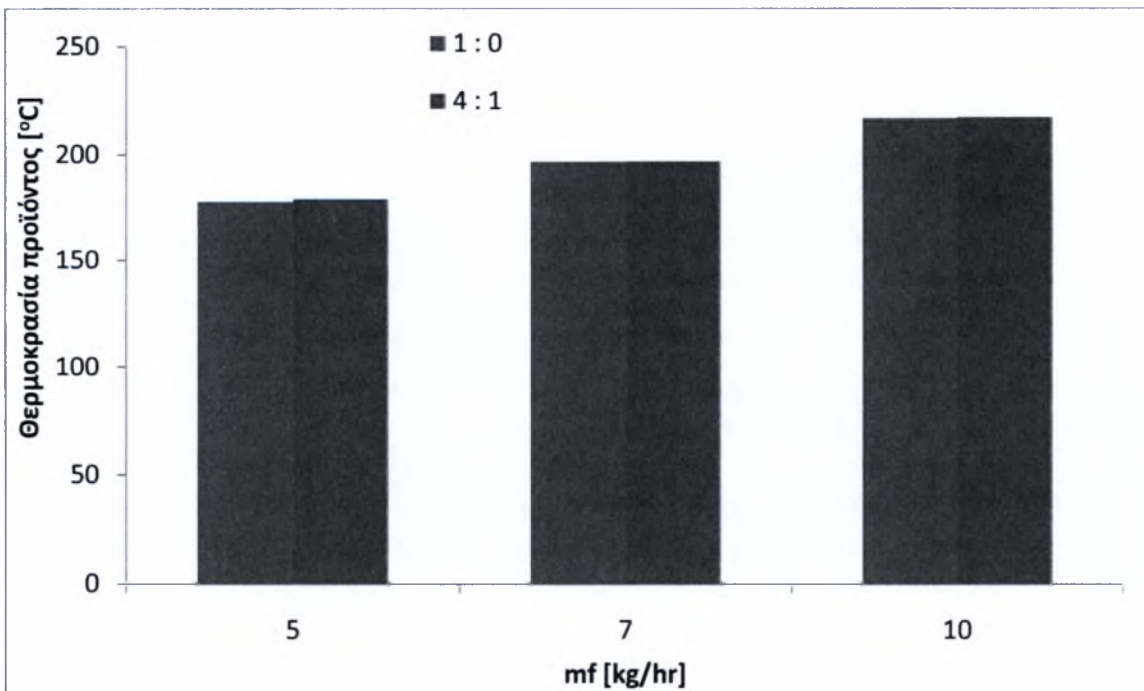
Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί η επίδραση που έχει ο τρόπος εισαγωγής του αέρα καύσης στη διάταξη. Ο αέρας καύσης εισέρχεται στη διάταξη σε δύο ύψη σε σχέση με το διανομέα. Ο πρωτεύων αέρας καύσης, που αποτελεί και την κύρια ποσότητα του αέρα καύσης βρίσκεται πολύ κοντά στο ύψος του διανομέα και παρέχει τον απαιτούμενο αέρα για καύση στην πυκνή ζώνη. Η εισαγωγή του δευτερεύοντος αέρα γίνεται σε ύψος 1m αμέσως μετά από την πυκνή ζώνη και χρησιμοποιείται για την συμπληρωματική καύση των αντιδρώντων που δεν πρόλαβαν να καούν στην 1^η ζώνη καύσης.

Η Εικόνα 45 Επίδραση του λόγου πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος αέρα καύσης στην μέση θερμοκρασία της κλίνης. Η Εικόνα 45 παρουσιάζει τη μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας της κλίνης σε σχέση με το λόγο πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος αέρα καύσης για διάφορες παροχές μάζας καυσίμου. Σε κάθε περίπτωση παρουσιάζεται μια αμελητέα μεταβολή της θερμοκρασίας της τάξης των 10 °C. Στην περίπτωση της παροχής των 5 kg/hr η μέση θερμοκρασία της κλίνης αυξάνεται για αναλογία πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος αέρα ίση με 4:1. Σε κάθε άλλη περίπτωση η θερμοκρασία μειώνεται συγκρινόμενη με την αναλογία 1:0. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να ερμηνευθεί αναφορικά με την εκλυόμενη ενέργεια στην πυκνή ζώνη, η οποία είναι καθοριστικός παράγοντας για τη μέση θερμοκρασία της κλίνης. Στην περίπτωση αναλογίας αέρα 1:0 και παροχής καυσίμου 5 kg/hr, το ποσό της ενέργειας που

εκλύεται σε σχέση με τη συνολική παροχή του αέρα στην πυκνή ζώνη έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από την πυκνή ζώνη σε σχέση με την αναλογία αέρα 4:1, συμπεριφορά που αντιστρέφεται καθώς αυξάνεται η παροχή καυσίμου.



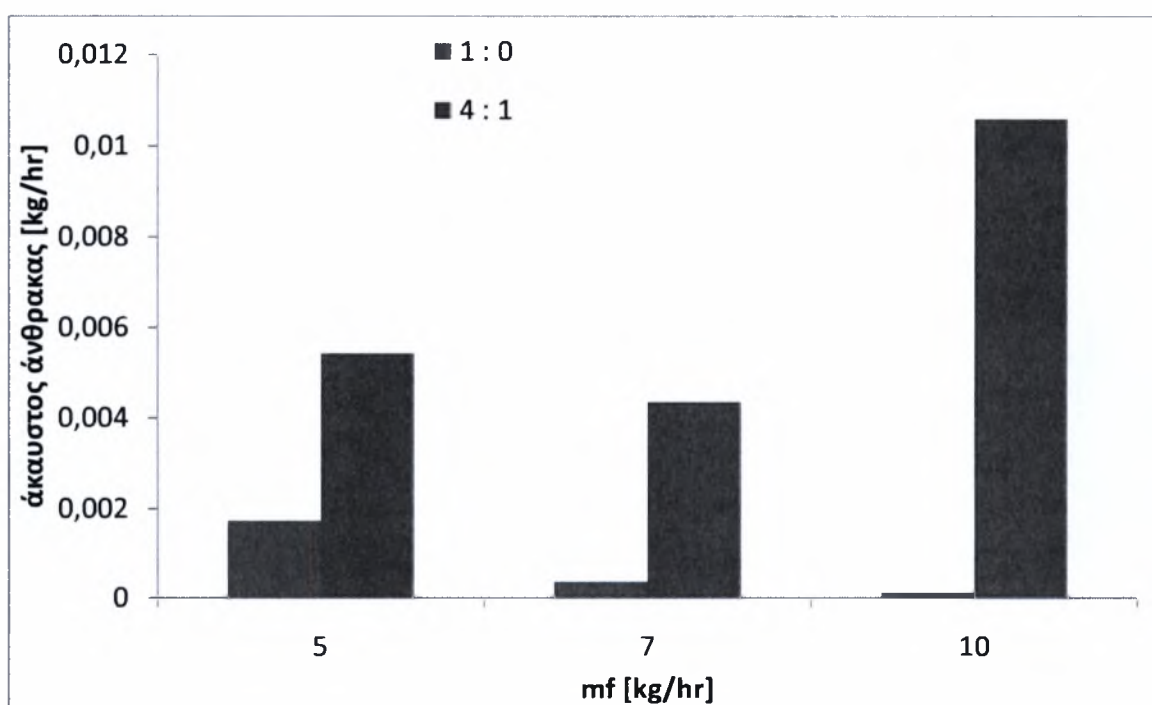
Εικόνα 45 Επίδραση του λόγου πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος αέρα καύσης στην μέση θερμοκρασία της κλίνης



Εικόνα 46 Επίδραση του λόγου πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος αέρα καύσης στην θερμοκρασία του προϊόντος

Η αναλογία εισαγωγής αέρα στην πυκνή ζώνη προς τον αέρα που εισάγεται στον ανυψωτήρα, πρακτικά δεν επιφέρει μεταβολή στην θερμοκρασία του προϊόντος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 46. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται από την μικρή διαφοροποίηση της μέσης θερμοκρασία της κλίνης σε κάθε περίπτωση σε συνδυασμό με τους υψηλούς συντελεστές μετάδοσης θερμότητας.

Η μεταβολή της αναλογίας πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος αέρα καύσης επηρεάζει σημαντικά τη μάζα του άκαυστου άνθρακα που διαφεύγει από την κλίνη όπως φαίνεται στην Εικόνα 47. Σε κάθε περίπτωση η εισαγωγή του αέρα καύσης αποκλειστικά στην πυκνή ζώνη βελτιώνει την ποιότητα της καύσης όπως φαίνεται από τις μικρότερες εκπομπές άκαυστου άνθρακα. Προφανώς η συμπεριφορά αυτή σχετίζεται με την επάρκεια του αέρα καύσης στην πυκνή ζώνη σε συνδυασμό με τον επαρκή χρόνο παραμονής στην πυκνή ζώνη. Στην περίπτωση αναλογίας αέρα 4:1 η πυκνή ζώνη δεν έχει αρκετή ποσότητα αέρα για την ολοκλήρωση της καύσης και ο άκαυστος άνθρακας που διαφεύγει στον ανυψωτήρα δεν έχει αρκετό χρόνο παραμονής για την ολοκλήρωση της καύσης του. Σημειώνεται πάντως ότι σε κάθε περίπτωση ο βαθμός απόδοσης της καύσης βρίσκεται πάνω από 99%.

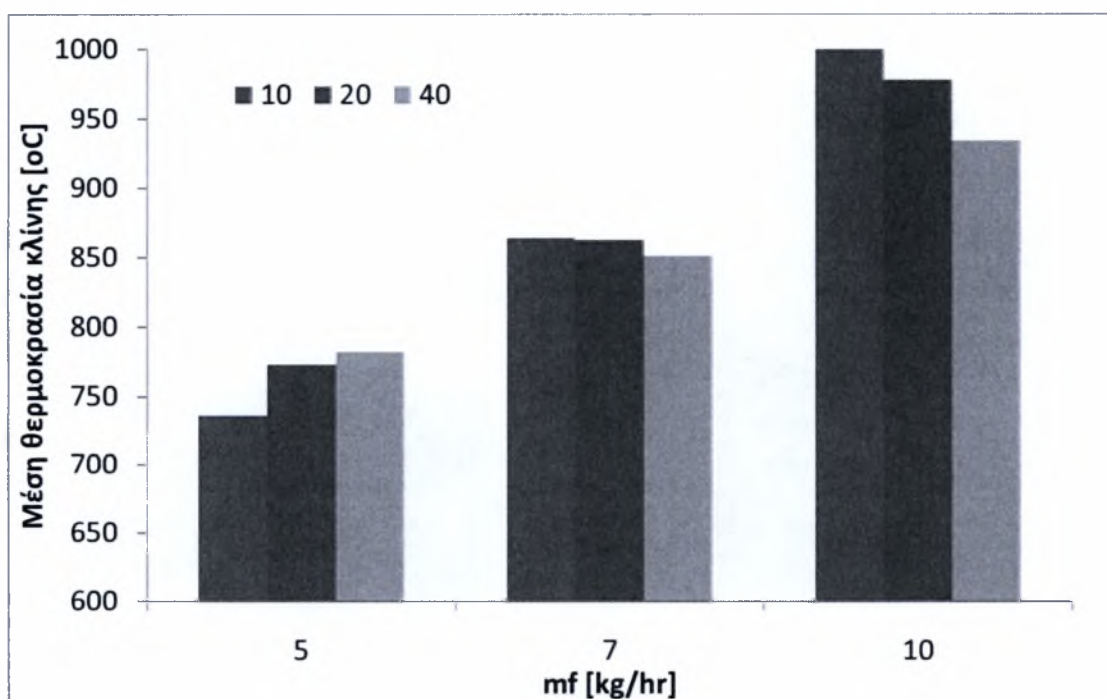


Εικόνα 47 Επίδραση του λόγου πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος αέρα καύσης στην μάζα άκαυστου άνθρακα που διαφεύγει από την κλίνη

5.5.3. Επίδραση της ανακυκλοφορίας αδρανών υλικών ρευστοποίησης

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί η επίδραση που έχει η παροχή του ρεύματος αδρανών υλικών στην λειτουργία της διάταξης. Η παροχή του ρεύματος ανακυκλοφορίας εκφράζεται στις συνήθεις μονάδες της βιβλιογραφίας αναφορικά με τη διατομή του ανυψωτήρα. Η παροχή των ανακυκλοφορούντων σωματιδίων επηρεάζει την θερμική αδράνεια της διάταξης και τα υδροδυναμικά φαινόμενα στο εσωτερικό της. Η μελέτη θα γίνει για τρεις τιμές της παροχής του ρεύματος ανακυκλοφορίας: 10, 20, 40 kg/s/m² riser.

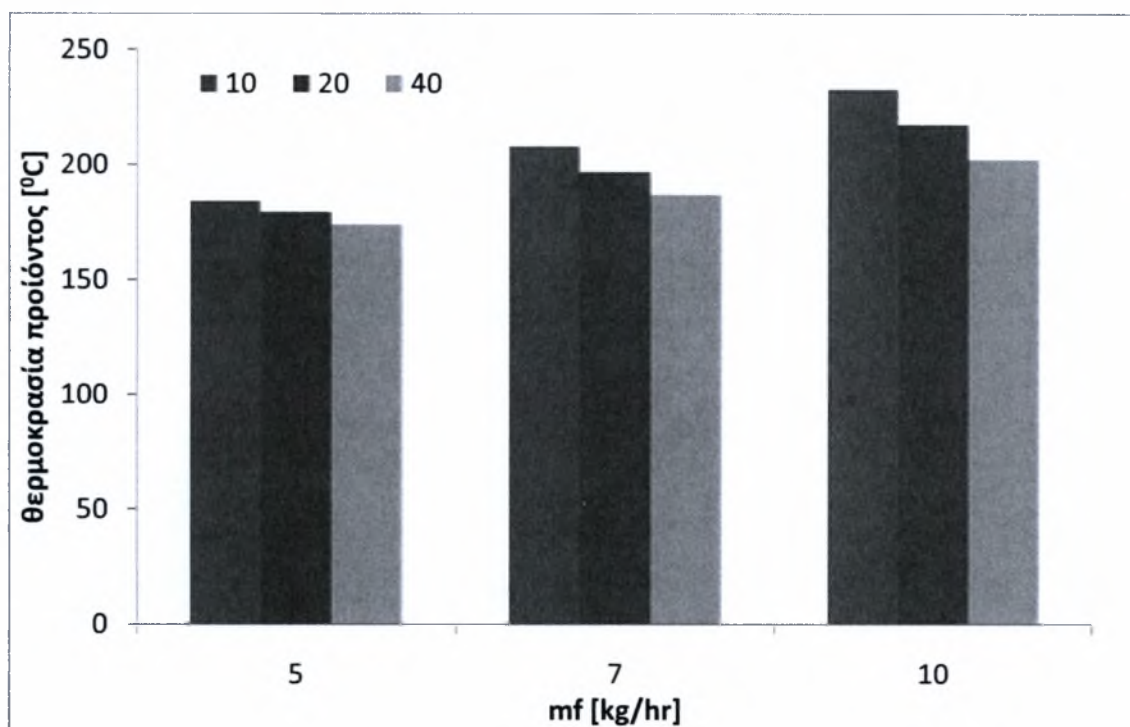
Η Εικόνα 48 παρουσιάζει την επίδραση που έχει η παροχή του ρεύματος ανακυκλοφορίας στην μέση θερμοκρασία της κλίνης. Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται η παροχή του καυσίμου αυξάνεται και η μέση θερμοκρασία της κλίνης ως αποτέλεσμα της μεγαλύτερης εκλυόμενης ενέργειας. Παράλληλα ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας της κλίνης σε σχέση με τη παροχή καυσίμου μειώνεται αυξάνοντας της παροχή του ρεύματος ανακυκλοφορίας των αδρανών υλικών. Αυτό οφείλεται προφανώς στη μεγαλύτερη θερμική μάζα, άρα και θερμική αδράνεια, της ρευστοποιημένης κλίνης που επιτυγχάνεται με αύξηση της μάζας των αδρανών υλικών ρευστοποίησης.



Εικόνα 48 Επίδραση της παροχής του ρεύματος ανακυκλοφορίας στη μέση θερμοκρασία της κλίνης για διάφορες παροχές καυσίμου

Η μέση θερμοκρασία της κλίνης αυξάνεται με αύξηση της παροχής μάζας των αδρανών σωματιδίων για χαμηλές παροχές καυσίμου, ενώ μειώνεται αύξηση της παροχής μάζας των

αδρανών σωματιδίων για υψηλές παροχές καυσίμου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 48. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις αρχικές συνθήκες του μοντέλου και στη σταθερή θερμοκρασία που θεωρείται για το ρεύμα εισόδου⁶ των αδρανών σωματιδίων. Παρατηρείται λοιπόν ότι η αύξηση της παροχής των αδρανών σωματιδίων τείνει να εξισσοροπήσει τη μέση θερμοκρασία της κλίνης στην θερμοκρασία που ορίζεται αρχικά ως θερμοκρασία εισόδου του ρεύματος των αδρανών υλικών.



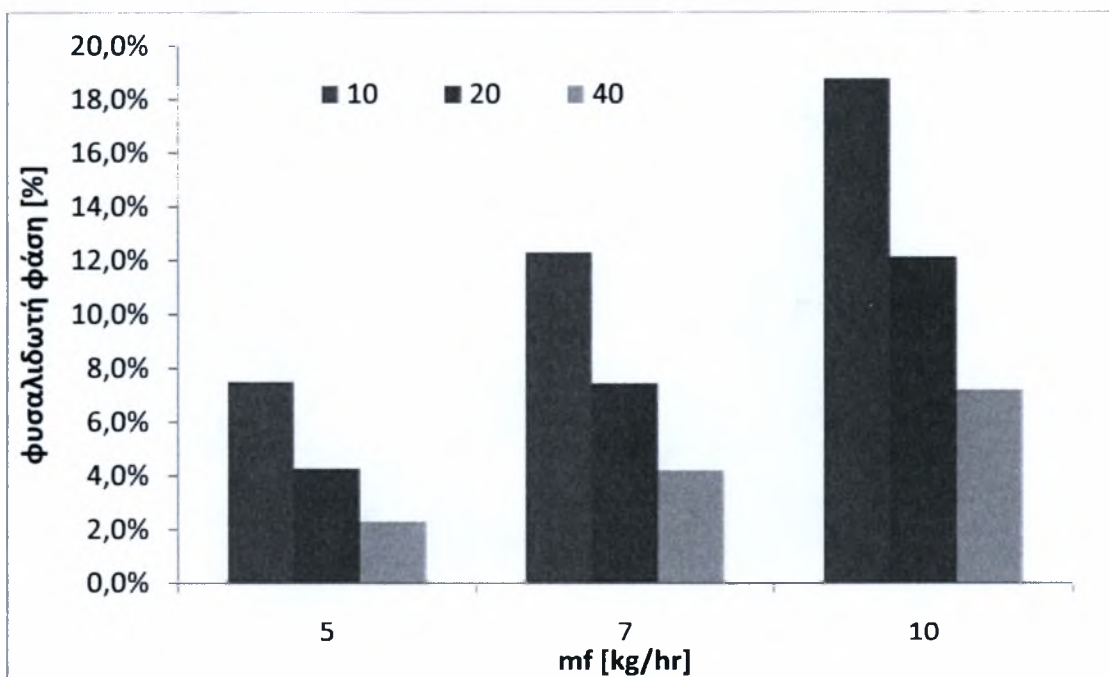
Εικόνα 49 Επίδραση της παροχής του ρεύματος ανακυκλοφορίας στη θερμοκρασία του προϊόντος για διάφορες παροχές καυσίμου

Η αύξηση της παροχής του ρεύματος ανακυκλοφορίας επιφέρει μείωση του ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας του προϊόντος με αύξηση της παροχής του καυσίμου ως αποτέλεσμα της μεγαλύτερης θερμικής μάζας της ρευστοποιημένης κλίνης. Η συμπεριφορά αυτή αποτυπώνεται στην Εικόνα 49. Η θερμοκρασία του προϊόντος μειώνεται με αύξηση της παροχής των αδρανών σωματιδίων, δεδομένου ότι απαιτούνται υψηλότερα ποσά ενέργειας για την διατήρηση της θερμοκρασίας των αδρανών υλικών. Φυσικά οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας έχουν

⁶ Το ρεύμα εισόδου των αδρανών σωματιδίων ουσιαστικά καθορίζει την παροχή των σωματιδίων μέσα στην κλίνη και είναι διαφορετικό από το ρεύμα ανακυκλοφορίας που αφορά τα στερεά σωματίδια στην έξοδο του ανυψωτήρα. Το μοντέλο θεωρεί ότι το ρεύμα ανακυκλοφορίας είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων εισόδου αδρανών υλικών και ανακύκλωσης

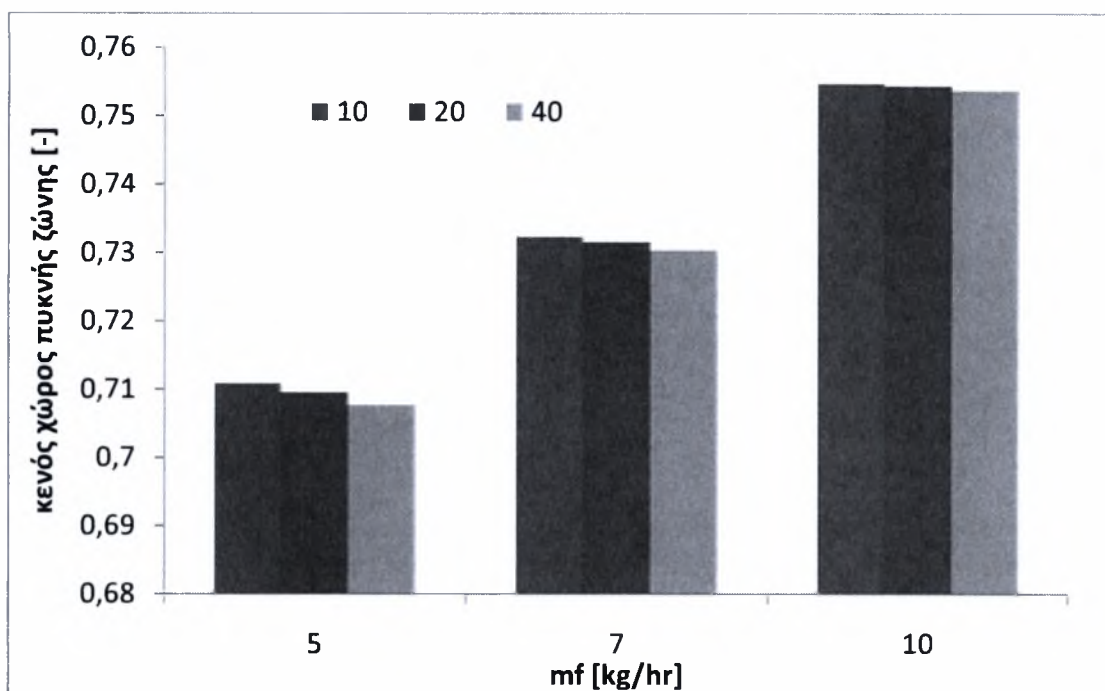
σημαντικό ρόλο σε αυτή τη συμπεριφορά, οι οποίοι όπως συζητήθηκε ήδη στις προηγούμενες ενότητες διατηρούνται σταθεροί στο μοντέλο για όλες τις περιπτώσεις.

Η επίδραση του ρεύματος ανακυκλοφορίας στα υδροδυναμικά φαινόμενα της διάταξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 50 και στην Εικόνα 51. Η αύξηση της παροχής του ρεύματος ανακυκλοφορίας των αδρανών υλικών ρευστοποίησης επιφέρει όπως είναι αναμενόμενο μείωση του ποσοστού της ροής που κατευθύνεται στη φυσαλιδωτή φάση αποτρέποντας τον σχηματισμό μεγάλων φυσαλίδων. Στην Εικόνα 50 παρατηρείται ότι η επίδραση της παροχής των στερεών σωματιδίων είναι ανεξάρτητη της παροχής καυσίμου, αφού το ποσοστό της φυσαλιδωτής φάσης μειώνεται στο 1/3 με 1/4 περίπου σε κάθε περίπτωση με αύξηση της παροχής ανακυκλοφορίας από 10 σε 40 kg/s/m² riser.



Εικόνα 50 Επίδραση της παροχής του ρεύματος ανακυκλοφορίας στο ποσοστό της φυσαλιδωτής φάσης στην πυκνή ζώνη για διάφορες παροχές καυσίμου

Το μοντέλο προβλέπει ότι η αύξηση της παροχής έχει μικρή επίδραση στον κενό χώρο της πυκνής ζώνης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 51. Αυτό απορρέει από την εμπειρική σχέση υπολογισμού του κενού χώρου η οποία βασίζεται στην ταχύτητα ελάχιστης ρευστοποίησης. Παρόλα αυτά αύξηση του ρεύματος ανακυκλοφορίας για κάθε παροχή καυσίμου επιφέρει μείωση στον κενό χώρο της πυκνής ζώνης.



Εικόνα 51 Επίδραση της παροχής του ρεύματος ανακυκλοφορίας στην τιμή του κενού χώρου στην πυκνή για διάφορες παροχές καυσίμου

5.6. Συμπεράσματα μοντελοποίησης πιλοτικής διάταξης

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση πιλοτικής διάταξης 30kW. Την στιγμή της συγγραφής της εργασίας δεν είχαν πραγματοποιηθεί πειραματικές μετρήσεις για την εύρεση κάποιων βασικών παραμέτρων λειτουργίας της συγκεκριμένης διάταξης και χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τη βιβλιογραφία. Η μοντελοποίηση που έγινε έδωσε μια εκτίμηση των χαρακτηριστικών λειτουργίας της διάταξης και μια εικόνα της ενεργειακής απόδοσής της.

Σε δεύτερη φάση μελετήθηκε η επίδραση που έχει η μεταβολή του μίγματος αέρα καυσίμου, του λόγου έγχυσης πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αέρα καύσης και της παροχής των αδρανών υλικών ρευστοποίησης. Σε κάθε περίπτωση εξετάστηκαν οι κυριότεροι παράμετροι που επηρεάζονται από αυτές τις μεταβολές. Το μοντέλο απέδωσε με σχετική ακρίβεια την επίδραση που έχουν οι συγκεκριμένες παράμετροι στα χαρακτηριστικά λειτουργίας της κλίνης. Για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν δεδομένα που προκύπτουν από πειραματικές μετρήσεις πάνω στη συγκεκριμένη διάταξη.

6. Σύνοψη της παρούσας διατριβής

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύνοψη της παρούσας εργασίας. Το κεφάλαιο δομείται σε δύο ενότητες. Στην πρώτη ενότητα γίνεται μια σύντομη συζήτηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την πιστοποίηση του μοντέλου και την μοντελοποίηση της πειραματικής διάταξης και συνοψίζονται κάποια σημεία του μοντέλου που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική επέκταση και βελτίωση του μοντέλου σε συγκεκριμένους τομείς όπως παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία.

6.1. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αποτέλεσε μια πρώτη προσέγγιση στη δημιουργία ενός μοντέλου ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας. Όπως φάνηκε από τη πιστοποίηση του μοντέλου που έγινε σε βιβλιογραφικά δεδομένα το μοντέλο έχει τη δυναμική να εξάγει καλά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας όμως πειραματικές μετρήσεις για την ρύθμιση των ρυθμιστικών του παραμέτρων. Η πληρότητα των δεδομένων και η ποιότητά τους έχουν καθοριστικό ρόλο στην ορθή ρύθμιση του μοντέλου. Η πιστοποίηση που έγινε βάσει των βιβλιογραφικών δεδομένων παρουσίασε κάποιες αποκλίσεις από τις μετρήσεις οι οποίες όμως επεξηγήθηκαν επαρκώς στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Την πιστοποίηση του μοντέλου ακολούθησε μια μελέτη των παραμέτρων λειτουργίας πιλοτικής διάταξης ονομαστικής ισχύος 30kW. Για την μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των ρυθμιστικών παραμέτρων που εξήχθησαν από την πιστοποίηση του μοντέλου. Κατά την συγγραφή της παρούσας εργασίας δεν είχαν διεξαχθεί πειραματικές μετρήσεις στην πιλοτική διάταξη. Αρχικά μελετήθηκε μια περίπτωση αναφοράς, η οποία θα χρησιμοποιηθεί σαν εφαλτήριο για την αρχική ρύθμιση της διάταξης ώστε να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις. Η περίπτωση αναφοράς περιελάμβανε προσομοίωση της διάταξης για παροχή καυσίμου 5kg/hr και λόγο αέρα καύσης 1.2. Το μοντέλο έδωσε μια πρώτη εκτίμηση των μεγεθών και της συμπεριφοράς της διάταξης τόσο σε ενεργειακό επίπεδο όσο και στο επίπεδο των υδροδυναμικών φαινομένων στο εσωτερικό της.

Ακολούθως μελετήθηκε η συμπεριφορά της διάταξης για μεταβολή του μίγματος αέρα-καυσίμου, τόσο ως προς την παροχή καυσίμου, όσο και ως προς το τον λόγο αέρα καύσης. Οι προσομοιώσεις έδειξαν την τάση που ακολουθούν οι βασικές παράμετροι λειτουργίας της διάταξης για αυτές τις μεταβολές, ενώ εξήχθησαν και τα ενεργειακά ισοζύγια σε κάθε περίπτωση. Ακολούθως μελετήθηκε η επίδραση δύο σημαντικών παραμέτρων λειτουργίας της διάταξης: του λόγου πρωτεύοντος προς δευτερεύων αέρα καύσης και της παροχής των αδρανών υλικών ρευστοποίησης. Και στις δύο περιπτώσεις μελετήθηκαν τα ιδιαίτερα μεγέθη που επηρεάζονται.

Θεωρείται πλέον ότι το μοντέλο είναι έτοιμο με μικρές αλλαγές να χρησιμοποιηθεί σε ένα εύρος διεργασιών καύσης για διαφόρους τύπους στερεών καυσίμων και υλικών ρευστοποίησης. Η ευελιξία που παρουσιάζει το συγκεκριμένο μοντέλο στον διακριτό διαχωρισμό του ρευστοδυναμικού μοντέλου και του μοντέλου χημικών αντιδράσεων θα μπορούσε να χρησιμεύσει για την μοντελοποίηση άλλων χημικών διεργασιών κάνοντας αλλαγές στα μοντέλα των χημικών αντιδράσεων. Τέτοια παραδείγματα υπάρχουν ήδη στη βιβλιογραφία [Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης].

6.2. Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση

Ένα σημαντικό κομμάτι έρευνας μπορεί να αφιερωθεί στον σχεδιασμό των συσκευών διεργασιών της διάταξης και τη βελτιστοποίηση των σχεδιαστικών παραμέτρων και των συνθηκών λειτουργίας. Οι συσκευές διεργασίας που επιδέχονται μελέτης σχεδιασμού είναι οι εναλλάκτες θερμότητας και ο κυκλώνας διαχωρισμού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 3 οι εναλλάκτες θερμότητας προσομοιώνονται με ένα σταθερό ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητα χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα γεωμετρικά τους στοιχεία. Θεωρείται επίσης δεομένη η θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού ρεύματος η οποία επιτυγχάνεται στη πιλοτική διάταξη με ρύθμιση της παροχής. Το εμπορικό πακέτο που χρησιμοποιήθηκε προσφέρει πληθώρα σχεδιαστικών παραμέτρων για διαφόρους τύπους εναλλακτών θερμότητας

Αυτή η πρώτη προσέγγιση του μοντέλου έχει τη δυνατότητα να βελτιωθεί σε αρκετά σημεία ώστε να καταφέρει να προσεγγίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις διεργασίες διαφόρων τύπων διατάξεων και χρήσης διαφόρων καυσίμων. Ο βασικός στόχος δημιουργίας ενός βασικού μοντέλου που θα λαμβάνει υπόψη τα υδροδυναμικά φαινόμενα και θα προβλέπει με σχετική ακρίβεια τις διεργασίες καύσης μέσω ημι-εμπειρικών μοντέλων εκπληρώθηκε. Βεβαίως αρκετές βελτιώσεις θα μπορούσαν να γίνουν οι οποίες όμως φεύγουν εκτός των ορίων της παρούσας εργασίας. Οι κυριότερες προσθήκες που θα μπορούσαν να γίνουν μελλοντικά για τη βελτίωση του μοντέλου συζητούνται στις παρακάτω ενότητες.

6.3. Προτάσεις για προσθήκες/βελτιώσεις του μοντέλου

Οι προτάσεις που ακολουθούν σχετικά με τη βελτίωση του μοντέλου και πιθανές προσθήκες που μπορεί να γίνουν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες.

Η πρώτη κατηγορία βελτιώσεων αφορά το μοντέλο των χημικών αντιδράσεων. Σε ό,τι αφορά τη χημεία καύσης και σχηματισμού ρύπων η βιβλιογραφία περιέχει πληθώρα σύνθετων μοντέλων που περιγράφουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις διεργασίες. Οι μηχανισμοί δέσμευσης ρύπων μπορεί να λάβουν χώρα στη διάταξη με την προσθήκη συγκεκριμένων υλικών. Φυσικά, άμεσο αποτέλεσμα της αύξησης της πολυπλοκότητας των χημικών μηχανισμών είναι η αύξηση των ρυθμιστικών παραμέτρων. Το τελευταίο συνεπάγεται και σημαντική αύξηση στη δυσκολία ρύθμισης του μοντέλου και στον αριθμό των πειραμάτων και πειραματικών δεδομένων που

απαιτούνται για τη ρύθμιση του μοντέλου. Παρακάτω επιχειρείται να δοθεί επιγραμματικά μια εικόνα των βελτιώσεων που μπορούν να γίνουν στο μοντέλο των χημικών αντιδράσεων σημειώνοντας παράλληλα κάποιες βασικές δημοσιευμένες εργασίες σε κάθε κατηγορία.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά το υδροδυναμικό μοντέλο. Βασική παραδοχή του παρόντος μοντέλου είναι η ομοιόμορφη ροή στην αξονική διεύθυνση. Τα όρια της παρούσας μεθοδολογίας μοντελοποίησης (ημι-εμπειρικές συσχετίσεις σε συνδυασμό με εμπορικό λογισμικό γενικού σχεδιασμού) θεωρείται ότι είναι ο δύο διαστάσεις. Επέκταση στις τρεις διαστάσεις εισάγοντας και συσχετίσεις τύρβης υπάρχουν στη βιβλιογραφία, χρησιμοποιώντας CFD, για την μικροσκοπική μελέτη των διεργασιών ανάμιξης και καύσης στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης. Η πιο κοντινή προσέγγιση στην τρισδιάστατη κατάσταση μπορεί να γίνει στο υπάρχον μοντέλο μόνο με κατάτμηση της κάθε ζώνης της διάταξης σε υπομοντέλα αντιδραστήρων συνδεδεμένα σε παραλληλία (για την ακτινική διεύθυνση) και σε σειρά (για την αξονική διεύθυνση).

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι κυριότερες προσθήκες/βελτιώσεις, κατά την άποψη του γράφοντα, του μοντέλου που θα πρέπει να εξεταστούν σε μια μελλοντική αναβάθμιση του μοντέλου.

6.3.1. Βελτίωση μοντέλου για την καύση της απανθρακωμένης μάζας

Τα μοντέλα καύσης στερεών σωματιδίων, τύπου *shrinking core*, μπορούν να προβλέψουν τον ρυθμό καύσης με σχετικά καλή ακρίβεια ενώ παράλληλα δίνουν και μια εκτίμηση της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων στην έξοδο. Η βιβλιογραφία περιέχει τέτοιου είδους μοντέλα σε διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας. Η σημαντικότερη δουλειά του είδους σε αντίστοιχο περιβάλλον προσομοίωσης έχει γίνει από τους Ngampradit et. al. [38] και έχει ήδη συζητηθεί στο κεφάλαιο 2.

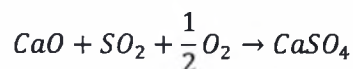
6.3.2. Βελτίωση μηχανισμού σχηματισμού NO_x

Η χημεία σχηματισμού των οξειδίων του αζώτου είναι μια πολύπλοκη διεργασία η οποία περιλαμβάνει πολλαπλά στάδια στοιχειωδών αντιδράσεων και πιθανών βημάτων στο εύρος των συνθηκών λειτουργίας των ρευστοποιημένων κλινών καύσης. Μια καλή ανασκόπηση των μηχανισμών γίνεται από τον Gungor [54], ο οποίος περιγράφει τη χημεία σχηματισμού των οξειδίων του αζώτου με 12 φαινόμενες αντιδράσεις. Στην ίδια εργασία παρατίθενται και οι τύποι υπολογισμού των ρυθμών αντιδράσεων καθώς επίσης και οι τιμές των κινητικών σταθερών κάθε αντίδρασης.

6.3.3. Προσθήκη μοντέλου δέσμευσης SO₂

Η δέσμευση των οξειδίων του θείου είναι μια διαδικασία η οποία λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης και οφείλεται στις προσροφητικές ιδιότητες των υλικών

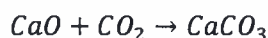
ρευστοποίησης. Η συνήθης τακτική είναι μαζί με το ρεύμα των αδρανών υλικών να εισάγεται και συγκεκριμένη ποσότητα CaO η οποία προσροφά ενώσεις του θείου βάσει της αντίδρασης



Η βιβλιογραφία παρέχει αρκετά στοιχεία για έμμεσους υπολογισμούς [26] και ημι-εμπειρικά μοντέλα υπολογισμού του ρυθμού προσρόφησης [39,51] σε διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας.

6.3.4. Προσθήκη μοντέλου δέσμευσης CO₂

Η αναγκαιότητα για μείωση των εκπομπών ρύπων του θερμοκηπίου δημιουργεί και την ανάγκη για καθαρότερες διατάξεις παραγωγής ενέργειας, όχι μόνο ως προς τους τοξικούς ρύπους CO, NO_x και SO_x αλλά και ως προς τις εκπομπές CO₂. Οι συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό της κλίνης είναι τέτοιες που επιτρέπουν τις αντιδράσεις δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα (carbonation) βάσει της αντίδρασης.



Οι Hughes et. al. [57] έδειξαν ότι μια διάταξη ρευστοποιημένης κλίνης καύσης η οποία επιτρέπει την διεργασία της ανθρακοποίησης είναι ικανή να παράγει καυσαέρια με περιεκτικότητα μόλις 2-5% mol CO₂ και σχεδόν καθαρό παραπροϊόν περιεκτικότητας 95% CO₂ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πετρελαιοβιομηχανία. Στην ίδια εργασία παρουσιάστηκε ένα μοντέλο σε αντίστοιχο υπολογιστικό περιβάλλον που περιλαμβάνει τέτοιου είδους διεργασίες.

6.3.5. Προσθήκη 2-D μοντέλου τύπου Core-Annulus

Η βιβλιογραφία παρουσιάζει πειραματικά ανομοιομορφίες στην ακτινική διεύθυνση (όχι ιδιαίτερα σημαντικές για υψηλές ταχύτητες ρευστοποίησης) και παραθέτει προσεγγίσεις υπολογισμού αυτών των ανομοιομορφιών. Η επέκταση του υδροδυναμικού μοντέλου και προς την ακτινική διεύθυνση είναι ένα βήμα που πρέπει να εξεταστεί ιδίως αν πρόκειται να επεκταθεί το μοντέλο και σε άλλες διεργασίες ρευστοποίησης. Η συνήθης τακτική είναι ο διαχωρισμός της αραιής ζώνης σε δύο περιοχές (core-annulus) υποθέτοντας διαφορετική κατανομή του κενού χώρου σε κάθε περιοχή [51].

6.3.6. Βελτίωση μοντελοποίησης ζώνης επιτάχυνσης

Η ζώνη επιτάχυνσης στον ανυψωτήρα χαρακτηρίζεται από την μεταβολή στην ακτινική διεύθυνση των συνθηκών ρευστοποίησης που επικρατούν στην πυκνή ζώνη μέχρι την σταθεροποίηση τους στη ζώνη της πλήρους ανεπτυγμένης ροής. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να προσεγγιστούν με σχετική ακρίβεια μοντελοποιώντας την μεταβατική περιοχή με περισσότερους από ένα αντιδραστήρες συνδεδεμένους σε σειρά. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται το σφάλμα στην προσέγγιση των τιμών του κενού χώρου [].

Παράρτημα Α - Εγχειρίδιο του μοντέλου

Το εγχειρίδιο χρήσης του μοντέλου αποτελεί διαβαθμισμένο έγγραφο και διατίθεται σε ξεχωριστό τεύχος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Έυρεση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

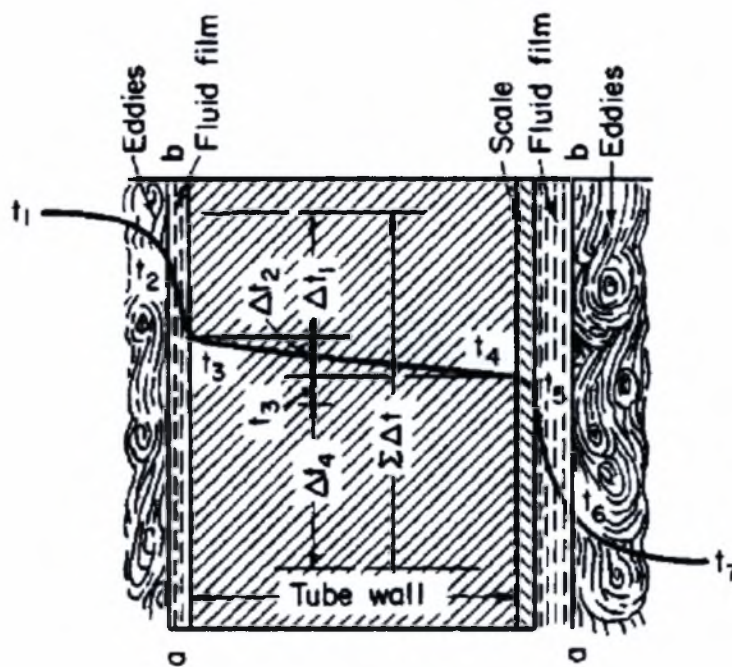


FIG. 5-6 Temperature gradients for a steady flow of heat by conduction and convection from a warmer to a colder fluid separated by a solid wall.

$$dq = \frac{t_1 - t_7}{\frac{1}{h_i dA_i} + \frac{x}{k dA_{wg}} + \frac{1}{h_d dA_d} + \frac{1}{h_o dA_o}} = U dA (t_1 - t_7)$$

$$Q = UA\Delta t_m \quad (1)$$

where

U = overall coefficient of heat transfer from fluid to fluid

A = heat transfer area of the heat exchanger associated with U

Δt_m = log mean temperature difference (LMTD)

For a heat exchanger with a constant U , the Δt_m is calculated as

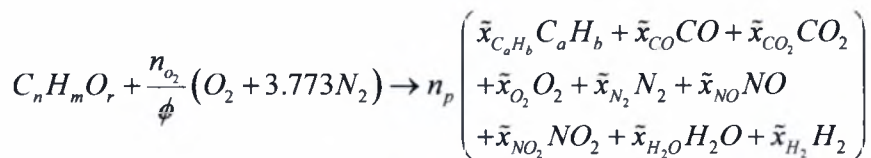
$$\Delta t_m = C \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln(T_1 - t_2)/(T_2 - t_1)} \quad (2)$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Εκτίμηση της σύστασης του καυσαερίου

Η σύσταση του καυσαερίου μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της αντίδρασης καύσης. Για τους υπολογισμούς αυτούς θεωρούμε ότι το καύσιμο αποτελείται από C, H και O

Η αντίδραση της καύσης είναι



όπου

$\phi = \frac{1}{\lambda}$ ο αντίστροφος λόγος αέρα-καυσίμου προς τον στοιχειομετρικό

n_{O_2} τα μόρια του O_2 που απαιτούνται για πλήρη καύση $(n + m/4 - r/2)$

n_p είναι τα συνολικά μόρια που παράγονται από την καύση και

\bar{x}_i είναι το μοριακό κλάσμα υγρού του στοιχείου i στο ρεύμα του καυσαερίου.

Κάνοντας τα ατομικά ισοζύγια για κάθε στοιχείο καταλήγουμε σε ένα σύστημα πέντε εξισώσεων

$$n = n_p (a\bar{x}_{CH_{b/a}} + \bar{x}_{CO} + \bar{x}_{CO_2})$$

$$m = n_p (b\bar{x}_{CH_{b/a}} + 2\bar{x}_{H_2O} + 2\bar{x}_{H_2})$$

$$r + 2n_{O_2} \lambda = n_p (\bar{x}_{CO} + 2\bar{x}_{CO_2} + \bar{x}_{NO} + 2\bar{x}_{O_2} + \bar{x}_{H_2O})$$

$$7.546n_{O_2} \lambda = n_p (2\bar{x}_{N_2} + \bar{x}_{NO})$$

Το άθροισμα των μοριακών κλασμάτων είναι

$$\bar{x}_{CH_{b/a}} + \bar{x}_{CO} + \bar{x}_{H_2} + \bar{x}_{H_2O} + \bar{x}_{N_2} + \bar{x}_{NO} + \bar{x}_{CO_2} + \bar{x}_{O_2} = 1$$

Μια επιπλέον παραδοχή γίνεται από την σταθερά ισορροπίας του υδραερίου

$$\frac{\bar{x}_{CO}\bar{x}_{H_2O}}{\bar{x}_{CO_2}\bar{x}_{H_2}} = K$$

όπου το K παίρνει τιμές μεταξύ 3.8 και 3.5.

Γνωρίζοντας τα παρακάτω δεδομένα σχεδιασμού

- σύσταση του καυσίμου
 - παροχή καυσίμου
 - παροχή αέρα καύσης
- και λαμβάνοντας τις παρακάτω τυπικές μετρήσεις για τέτοιες περιπτώσεις
- περιεκτικότητα καυσαερίου σε CO_2
 - περιεκτικότητα καυσαερίου σε CO
 - περιεκτικότητα καυσαερίου σε O_2

μπορούμε να υπολογίσουμε το λόγο αέρα (λ) και την σύσταση του καυσαερίου.

Μια πρώτη εκτίμηση της σύστασης του καυσαερίου, χωρίς τη λήψη μετρήσεων, μπορεί να γίνει κάνοντας κάποιες απλουστευτικές παραδοχές με βάση την εμπειρία από αντίστοιχες διατάξεις.

- Οι εκπομπές NO_x είναι μηδενικές
- Οι εκπομπές THC είναι κοντά στα 1000ppm
- $0.15 > x_{\text{CO}_2} > x_{\text{CO}} > x_{\text{H}_2}$

Η επίλυση του συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί αριθμητικά με χρήση του SOLVER στο MS-EXCEL.

Αντιστρόφως αν γνωρίζουμε τη σύσταση του καυσαερίου (π.χ. με μέτρηση) μπορούμε να υπολογίσουμε έμμεσα το λόγο λ .



Βιβλιογραφικές αναφορές

¹ DTI, 1999 - wikipedia

2 Natthapong Ngampradit, MODELING AND SIMULATION OF SIZE REDUCTION OF FUELS IN CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTOR BY CONSIDERING ATTRITION AND FRAGMENTATION, PHD Thesis, Chulalongkorn University, 2004

3 Wen and Yu [A.I.Ch.E.J., 610–612 (1966)]

4 Geldart, Powder Technol., 7, 285–292 (1973).]

5 Grace, Can. J. Chem. Eng., 64, 353–363 (1986);

6 Kunii, D. and Levenspiel, O. (1991) Fluidisation Engineering, 2nd ed., Butterworth-Heinemann series in Chemical Engineering.

7 Huilin, L.; Rushan, B.; Wenti, L.; Binxi, L.; and Lidan, Y. Computations of a circulating fluidized-bed boiler with wide particle size distributions. Ind, Eng. Chem. Res. 39 (2000): 3212-3220.

8 Sabbaghan, H.; Sotudeh-Gharebaagh, R.; and Mostoufi, N. Modeling the acceleration zone in the riser of circulating fluidized beds. Powder Technology 142 (2004): 129-135.

9 Jin, X., et al. Comprehensive mathematical model for coal combustion in the circulating fluidized bed combustor. Tsinghua Science and Technology 6 (2001): 319-325.

10 A. Svensson, F. Johnsson, B. Leckner, Fluid-dynamics of the bottom bed of circulating fluidized bed boilers, Proceedings of XII International Conference on Fluidized Bed Combustion, San Diego, CA, 1993, pp. 887–897.

11 J. Werther, J. Wein, Expansion behavior of gas fluidized beds in the turbulent regime, AIChE Symposium Series 301 (90) (1994) 31–44.

12 B. Leckner, M.R. Golriz, W. Zhang, B.A. Andersson, F. Johnsson, Boundary layers-first measurements in the 12 MW CFB research plant at Chalmers University, Proceedings of the 11th International Conference on Fluidized Bed Combustion, ASME, 1991, pp. 771–776.

13 D. Montat, T.D. Maggio, 1D two-phase description of the thermal hydraulic behavior of the furnace of E. Huchet 125MWe CFB boiler, Fifth International Conference on CFB, MSR6, Beijing, 1996.

14 F. Johnsson, S. Andersson and B. Leckner. Expansion of a freely bubbling fluidized bed Powder Technol 68 (1991), 117-123.

15 J. Adanez, P. Gayan, F. Gacia-Labiano, L.F. de Diego, powder Technol, 1994, 81 (3), 259

16 Patience, G. S. and Chaouki, J., Gas phase hydrodynamic in the riser of a circulating fluidized bed. Chem. Engng Sci., 1993, 48, 3 195

17 perry

18 Amir Farshi, Houman Javaherizadeh, M.A. Hamzavi –Abedi AN INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BUBBLE DIAMETER ON THE PERFORMANCE OF GAS-SOLID FLUIDIZED BED REACTOR AND TWO-PHASE MODELING OF BUBBLING FLUIDIZED BED REACTOR IN MELAMINE PRODUCTION, Petroleum & Coal 50 (1), 11-22, 2008

19 L. Huilin, Z. Guangbo, B. Rushan, C. Yongjin, D. Gidaspow, A coal combustion model for circulating fluidized bed boilers, Fuel 79 (2000) 165–172

20 Mori S, Wen CY. Estimation of bubble diameter in gaseous fluidized beds. AIChE J 1975;21:109.

21 Darton, R.C., R.D. Lanauze, J.F. Davidson and D. Harrison, 1977, Bubble growth due to coalescence in fluidized beds, Trans. Inst. Chem. Eng., 55, 274

22 J.F. Davidson, D. Harrison, fluidized Particles, Cambridge University Press, New York 1963

23 H. Cui, N. Mostoufi, J. Chaouki, Chem. Eng. J. 2000, 79, 135

24 Peeler J. P. K. & H. J. Poynton (1992), Fuel, 71, 425.

25 Stenseng, M., Lin, W., Johnsson, J. E., & Johansen, K. D. (1997). Modeling of devolatilization in CFB combustion. In F. D. S. Preto, Proceedings of the 14th international conference on fluidized bed combustion, vol. 1 (pp. 117-124). New York: ASME.

-
- 26 P. Basu Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: a review *Chemical Engineering Science* 54 (1999) 5547-5557
- 27 Agarwal, P. K. (1986). A single particle model for the evolution and combustion of coal volatiles. *Fuel*, 65, 803-810.
- 28 Stubington, J. F., & Clough, S. J. (1997). The combustion rate of volatile sin a fluidized bed combustor. In F. D. S. Preto, *Proceedings of the 14th international conference on yuidized bed combustion*, vol. 2 (pp.1111-1122). New York: ASME
- 29 Lu Huilin, Yang Lidan, Bie Rushan and Zhao Guangbo Dynamic Simulation of a Circulating Fluidized Bed Boiler of Low Circulating Ratio with Wide Particle Size Distributions *Proceedings of the 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion* May 16 – 19, 1999 Savannah, Georgia
- 30 Ross, I. B., & Davidson, J. F. (1982). Combustion of carbon particles in a fluidized bed. *Transaction of Chemical Engineering*, 60, 108-114.
- 31 Basu, P., Fraser, S.A. (1991). *Circulating Fluidized bed boilers design and operations* (Chapter 4) (pp. 95)126).
- 32 R. Sotudeh-Gharebaagh, R. Legros, J. Chaouki and J. Paris Simulation of circulating fluidized bed reactors using ASPEN PLUS *Fuel* Vol. 77, No. 4, pp. 327-337, 1998
- 33 Johnsson, J. E. (1990). Modeling of NO_x formation in a CFBC. In P. Basu, M. Horio, & M. Hasatani, *Circulating fluidized bed technology III* (pp. 405-410). Oxford: Pergamon Press
- 34 Kilpinen, P., Glarborg, P., & Hupa, M. (1992). Reburning Chemistry at fluidized bed combustion conditions * a kinetic modeling study. *Industrial Engineering & Chemistry Research*, 31, 1477-1490.
- 35 Talukdar, J., & Basu, P. (1995b). A simpli"ed model of nitric oxide emission from a circulating fluidized bed combustor. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 73, 635-643.
- 36 Brereton, C. (1997). Combustion performance. In A. Avidan, J. R. Grace, & T. Knowlton, *Circulating yuidized beds* (p. 388). London: Blackie Academic & Professional
- 37 Winter, F. (1995). Single fuel particle and NO_x/N₂O emission characteristics under circulating fluidized bed combustor conditions. Ph.D. Thesis. . Vienna, Austria: University of Technology.
- 38 Natthapong Ngampradit, Pornpote Piumsomboon, and Boonrod Sajjakulnukit Simulation of a Circulating Fluidized Bed Combustor with Shrinking Core and Emission Models, *ScienceAsia* 30 (2004): 365-374
- 39 Couturier, M. F., Sulphur dioxide removal in fluidized bed combustors. Ph.D. Dissertation, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 1986
- 40 Zevenhoven, R., Kohlmann, J., Laukkanen, T., Tuominen, M., Blomster, A.-M. "Suspension-to-wall heat transfer in CFB combustion: near-wall particle velocity and concentration measurements at low and high temperatures" *Proc. 6th Int. Conf. on CFB*, Würzburg, Germany, August 1999 (J. Werther, Ed.), Frankfurt/Main (1999) 959-965
- 41 B.J. Harris, J.F. Davidson, Modelling options for circulating fluidized beds: a core/annulus depositions model, in: A.A. Avidan (Ed.), *Circulating Fluidized Bed Technology*, vol. IV, AIChE Publications, New York, 1994
- 42 K. Smolders, J. Baeyens, Hydrodynamic modelling of the axial density profile in the riser of a low-density circulating fluidized bed, *Canadian Journal of Chemical Engineering* 79 (2001) 422-429.
- 43 M.R. Hyre, L.R. Glicksman, Axial and lateral solids distribution modeling in the upper region of circulating fluidized beds, *Powder Technology* 110 (2000) 28-109.
- 44 C.H. Ibsen, T. Solberg, B.H. Hjertager, Evaluation of a three-dimensional numerical model of a scaled circulating fluidized bed, *Industrial and Engineering Chemical Research* 40 (2001) 5081-5086.
- 45 V. Mathiesen, T. Solberg, B.H. Hjertager, Predictions of gas/particle flow with an Eulerian model including a realistic particle size distribution, *Powder Technology* 112 (2000) 34-45.
- 46 M.J. Rhodes, X.S. Wang, M. Nguyen, P. Stewart, K. Liffman, Use of discrete element method simulation in studying fluidization characteristics: influence of interparticle force, *Chemical Engineering Science* 56 (2001) 69-76.
- 47 E. Helland, R. Occelli, L. Tadrist, Numerical study of cluster formation in a gas-particle circulating fluidized bed, *Powder Technology* 110 (2000) 210-221.

-
- 48 S. Benyahia, H. Arastoopour, T.M. Knowlton, H. Massah, Simulation of particles and gas flow behavior in the riser section of a circulating fluidized bed using the kinetic theory approach for the particulate phase, *Powder Technology* 112 (2000) 24–33.
- 49 L. Huilin, D. Gidaspow, Hydrodynamics of binary fluidization in a riser: CFD simulation using two granular temperatures, *Chemical Engineering Science* 58 (2003) 3777–3792.
- 50 A. Gungor, N. Eskin, Hydrodynamic modeling of a circulating fluidized bed, *Powder Technology* 172 (2007) 1–13
- 51 J. Adanez, P. Gayan, G. Grasa, L.F. de Diego, L. Armesto, A. Cabanillas, Circulating fluidized bed combustion in the turbulent regime: modeling of carbon combustion and sulphur retention, *Fuel* 80 (2001), 1405 - 1414
- 52 Huilin, L.; Rushan, B.; Wenti, L.; Binxi, L.; and Lidan, Y. Computations of a circulating fluidized-bed boiler with wide particle size distributions. *Ind, Eng. Chem. Res.* 39 (2000): 3212-3220.
- 53 Sabbaghan, H.; Sotudeh-Gharebaagh, R.; and Mostoufi, N. Modeling the acceleration zone in the riser of circulating fluidized beds. *Powder Technology* 142 (2004): 129-135.
- 54 Afsin Gungor, Analysis of combustion efficiency in CFB coal combustors, *Fuel* 87 (2008) 1083–1095
- 55 ASPEN PLUS User Guide
- 56 Aysel T. Atimtay, Huseyin Topal, Co-combustion of olive cake with lignite coal in a circulating fluidized bed, *Fuel* 83 (2004) 859–867
- 57 R.W. Hughes et al. / *Fuel Processing Technology* 86 (2005) 1523–1531

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000102452

