ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων
Τομέας Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Κατασκευή και λειτουργία πιλοτικής μονάδας ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία για αεριοποίηση RDF»

Της Φοιτήτριας

Νικολακοπούλου Μαρίας

Επιβλέπων

Καρέλλας Σωτήριος, Επίκουρος Καθηγητής,
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα εικόνων 2
Περιεχόμενα διαγραμμάτων 5
Περιεχόμενα πινάκων 6
Σύνοψη 9
Abstract 10
Ευχαριστίες 11
1 Εισαγωγή 12
1.1 Εναλλακτικά καύσιμα 13
1.2 Βιομάζα 14
1.2.1 Είδη βιομάζας 14
1.2.2 Ενεργειακή αξιοποίηση βιομάζας 16
1.3 Αστικά στερεά απόβλητα 17
1.3.1 Υπολειμματικά καύσιμα από απορρίμματα (RDF) 20
1.3.2 Στερεά ανακτηθέντα καύσιμα (SRF) 21
1.4 Διεργασίες αξιοποίησης Αστικών Στερεών Αποβλήτων 22
1.4.1 Χημικές διεργασίες 22
1.4.2 Βιοχημικές διεργασίες 22
1.4.3 Θερμοχημικές διεργασίες 23
1.5 Αντιδραστήρες αεριοποίησης 27
1.5.1 Αεριοποιητές σταθερής κλίνης (Fixed Bed Gasifiers) 27
1.5.2 Αεριοποιητές εξαναγκασμένης ροής – συμπαρασυρμού (Entrained Flow Beds) . 27
1.5.3 Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης (Fluidized Bed Gasifiers) 28
1.6 Αντιμετώπιση προβλημάτων 33
1.6.1 Δοκιμές επεξεργασίας αστικών σύμμεικτων απορριμμάτων 33
1.6.2 Κυριότερα προβλήματα κατά την αεριοποίηση σε ρευστοποιημένες κλίνες 42
2 Πειραματική εγκατάσταση 52
2.1 Περιγραφή της μονάδας και εγχειρίδιο της εγκατάστασης 52
2.1.1 Σύστημα τροφοδοσίας 53
2.1.2 Κύρια διάταξη αεριοποιητή 58
2.1.3 Σύστημα καθαρισμού και ψύξης syngas 62
2.1.4 Θάλαμος καύσης 63
2.2 Δοκιμές για τον έλεγχο στεγανότητας της εγκατάστασης 65
2.2.1 Αποτελέσματα δοκιμών διαρροών 65
2.3 Εγκατάσταση ηλεκτρικών αντιστάσεων και μόνωσης 68
2.3.1 Τοποθέτηση αντιστάσεων 68

2.3.2 Θέρμανση αντιστάσεων ... 70
2.3.3 Τοποθέτηση μόνωσης ... 71
2.4 Εγκατάσταση μετρητικών στοιχείων θερμοκρασίας και πίεσης και οργάνων ελέγχου ... 73
2.5 Γραμμή δειγματοληψίας ... 76
2.6 Φωτογραφικό υλικό ... 83
3 Πειραματικές δοκιμές ... 90
3.1 Δοκιμή για τον έλεγχο ρευστοποίησης με ανακυκλοφορία μόνο με αδρανές υλικό (Cold Test) ... 98
3.2 Δοκιμή αεριοποίησης με πελλετοποιημένο ξύλο (Willow Gasification) ... 105
3.3 Ισοζύγιο ενέργειας και μάζας ... 114
3.3.1 Ισοζύγιο μάζας ... 114
3.3.2 Ισοζύγιο ενέργειας ... 123
3.4 Εκκίνηση της μονάδας ... 128
3.4.1 Σενάριο 1 ... 128
3.4.2 Σενάριο 2 ... 130
3.5 Ανάλυση ορθής λειτουργίας ηλεκτρικών αντιστάσεων ... 133
4 Προετοιμασία καυσίμου ... 138
4.1 Διαδικασίες ανάλυσης καυσίμου ... 138
4.1.1 Στοιχειακή ανάλυση καυσίμου (Ultimate Analysis) ... 138
4.1.2 Άμεση ανάλυση καυσίμου (Proximate Analysis) ... 139
4.1.3 Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα καυσίμου (LHV) ... 140
4.2 Ανάλυση δείγματος χαρτιού & πλαστικού ... 141
4.2.1 Δείγμα χαρτιού ... 141
4.2.2 Δείγμα πλαστικού ... 141
5 Συμπεράσματα ... 143
6 Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες ... 146
7 Βιβλιογραφία ... 147
8 Παράρτημα ... 151

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1. Χαρακτηριστική εικόνα σωρού αστικών αποβλήτων (αριστερά) και δέματα χαρτιού που προέκυψε από διαλογή (δεξιά), (W.A.T.T. A.E., Κέντρο Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών ΚΔΑΥ Κρωπίας). ... 18
Εικόνα 2. Διάδρομοι (φιλμ) που οδηγούν τα αστικά απόβλητα στους χώρους μηχανικής επεξεργασίας (W.A.T.T. A.E., Κέντρο Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών ΚΔΑΥ Κρωπίας). ... 21
Εικόνα 3. Πειραματική διάταξη αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας, όπως αυτός κατασκευάστηκε από τη W.A.T.T. A.E. και πριν τις εργασίες ολοκλήρωσης της κατασκευής (Κέντρο Διαλογής & Ανάκτησης Υλικών Κρωπίας). ... 31
Εικόνα 4. Συντακτικοί τύποι των PCDD/F, Ενιαίος Φορέας Ελέγχου Τροφίμων – ΕΦΕΤ [61] 49

Εικόνα 5. Διάταξη αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας..... 52
Εικόνα 6. Σιλό προσωρινής αποθήκευσης (αριστερά). Τομή του τρισδιάστατου σκαριφήματος, στην οποία διαφαίνεται η στρεφόμενη ράβδος και το διάκενο από το οποίο το καύσιμο τροφοδοτείται στον κοχλία (δεξιά). Μηχανολογικό σχέδιο παρατίθεται στο Παράρτημα. [**Εικόνα 60**] 54
Εικόνα 7. Χοάνη τροφοδοσίας με βάνα χειρός. 54
Εικόνα 8. Κοχλίας τροφοδοσίας. Μηχανολογικό σχέδιο παρατίθεται στο Παράρτημα. [**Εικόνα 62**] 54
Εικόνα 9. Διαμόρφωση τηλεσκοπικού σωλήνα (ολισθαίνουσας βαλβίδας) εσωτερικά (αριστερά) και εξωτερικά (δεξιά). Μηχανολογικό σχέδιο παρατίθεται στο Παράρτημα. [... 55
Εικόνα 10. Εξωτερικό περίβλημα περιστροφικής (ροταρικής) βαλβίδας (αριστερά). Εσωτερική διαμόρφωση μηχανισμού περιστροφικής βαλβίδας (δεξιά). 56
Εικόνα 11. Κοχλίας εκφόρτισης και είσοδος του καυσίμου στον ανοδικό αγωγό (αριστερά). Σύστημα ανάρτησης (γρύλος) (δεξιά). 57
Εικόνα 12. Κύρια διάταξη αεριοποιητή. 58
Εικόνα 13. Διασκορπιστής αέρα στη βάση του ανοδικού αγωγού (αριστερά). Μηχανολογικό σχέδιο παρατίθεται στο Παράρτημα. [**Εικόνα 64**] Βάνα για την εισαγωγή του αδρανούς υλικού στην κορυφή του ανοδικού αγωγού (δεξιά). 59
Εικόνα 14. Τετραγωνική σωλήνωση σύνδεσης του ανοδικού αγωγού με τον πρώτο κυκλώνα (αριστερά). Πρώτος κυκλώνας (δεξιά). Μηχανολογικό σχέδιο και των δυο παρατίθεται στο Παράρτημα. [**Εικόνα 65**, **Εικόνα 66**] 60
Εικόνα 15. Καθοδικός αγωγός (downcomer) (αριστερά) και βαλβίδα τύπου L (L – Valve) (δεξιά). Μηχανολογικό σχέδιο και των δυο παρατίθεται στο Παράρτημα. [**Εικόνα 67**, **Εικόνα 68**] 61
Εικόνα 16. *Διαστολικός σύνδεσμος με πουκάμισο. Μηχανολογικό σχέδιο παρατίθεται στο Παράρτημα. [**Εικόνα 69**]* 61
Εικόνα 17. Βαλβίδα τύπου L και συνδετική σωλήνωση με τον ανοδικό αγωγό. 62
Εικόνα 18. Εναλλάκτης θερμότητας. Αναπαρίστανται οι μαστοί τοποθέτησης μεταδοτών πίεσης και θερμοστοιχείων (αριστερά). Δεύτερος κυκλώνας κατακράτησης σωματιδίων και αποσπώμενο δοχείο (δεξιά). Μηχανολογικό σχέδιο παρατίθεται στο Παράρτημα. [**Εικόνα 70**, **Εικόνα 71**] 63
Εικόνα 19. Εσωτερική και εξωτερική διαμόρφωση θαλάμου καύσης (αριστερά και κέντρο) και καμινάδα απόρριψης καυσαερίων στο περιβάλλον (δεξιά). 64
Εικόνα 20. Καταγραφή των προβληματικών περιοχών στην κύρια διάταξη του αεριοποιητή κατά τις δοκιμές διαρροών. 66
Εικόνα 21. Σκαρίφημα της πειραματικής εγκατάστασης και περιγραφή των θέσεων των διαφόρων αντιστάσεων. 68
Εικόνα 22. Λύσιμο των δύο φλαντζών που συνδέουν τον ανοδικό αγωγό με το μανδύα του κοχλία τροφοδοσίας και τη βαλβίδα τύπου L..... 70
Εικόνα 23. Ενδεικτική εικόνα των αποστάσεων της βαλβίδας τύπου L (αριστερά) και του κοχλία (δεξιά) από τις φλάντζες, μεταξύ των Μετρήσεων 1 & 2 [Πίνακας 6]. 71
Εικόνα 24. Μέτρηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της δοκιμής (αριστερά). Πυρωμένο τμήμα της σωλήνωσης μεταξύ δυο διαδοχικών αντιστάσεων, σε θερμοκρασίες άνω των 450°C (δεξιά)..... 71
Εικόνα 25. Συνολική εικόνα της μονάδας μετά την ολοκλήρωση της θερμομόνωσης..... 72
Εικόνα 26. Θέσεις μετρητικών στοιχείων θερμοκρασίας (T) και πίεσης (P). 73
Εικόνα 27. Θερμοστοιχεία NICR NI Type mantel. 74
Εικόνα 28. Θερμοζεύγος καλωδίου NiCr - Ni (K) Type, εγκατεστημένο στη μονάδα..... 75

Εικόνα 29. Μεταδότης σχετικής πίεσης JUMO dTRANS p30 (αριστερά). Μεταδότης πίεσης διαφράγματος WIKA S – 11 (δεξιά)..... 76
Εικόνα 30. Μανδύας M&C PSP4000-H κεραμικού φίλτρου M&C S-2K..... 76
Εικόνα 31. Μεταλλική πλυντρίδα ισοπροπανόλης. 77
Εικόνα 32. Φίλτρο Balston Parker..... 78
Εικόνα 33. Σκαριφηματική απεικόνιση στήλης αφύγρανσης (αριστερά). Silica Gel στο εσωτερικό της στήλης αφύγρανσης (δεξιά)..... 78
Εικόνα 34. Αντλία κενού LABOPORT..... 79
Εικόνα 35. Μετρητής παροχής KYTOLA..... 80
Εικόνα 36. Micro - GC CP 4900, Varian..... 80
Εικόνα 37. Πρώτο σημείο τοποθέτησης διαστολικού συνδέσμου (κάτω μέρος κυκλώνα) (αριστερά). Δεύτερο σημείο τοποθέτησης διαστολικού συνδέσμου (άνωθεν της φλάντζας της βαλβίδας τύπου L (κέντρο). Διαδικασία τοποθέτησης των διαστολικών συνδέσμων μετά την αφαίρεση του τμήματος της σωλήνωσης (δεξιά). 83
Εικόνα 38. Εισαγωγή πρωτεύοντος αέρα ρευστοποίησης στο διασκορπιστή αέρα στη βάση του ανοδικού αγωγού..... 83
Εικόνα 39. Σημεία εισαγωγής αζώτου στον κοχλία τροφοδοσίας (αριστερά) και στην L – Valve (δεξιά)..... 84
Εικόνα 40. Σύστημα τροφοδοσίας υγραερίου (LPG) στον καυστήρα. 84
Εικόνα 41. Συμπιεστής αέρα που οδηγείται στη μονάδα (δεξιά).Αεροφυλάκιο αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (κέντρο) και αφυγραντής (δεξιά). 84
Εικόνα 42. Στεγανή προσαρμογή στη βάση του δοχείου τροφοδοσίας του ολιβίνη. 85
Εικόνα 43. Άνω και κάτω σημείο του rubber που μεσολαβεί του κοχλία τροφοδοσίας και της πρώτης ροταρικής βαλβίδας..... 85
Εικόνα 44. Συνδετικό τμήμα μεταξύ της δεύτερης περιστροφικής βαλβίδας και του κοχλία εκφόρτισης..... 85
Εικόνα 45. Στεγανή προσαρμογή στη βάση του δοχείου τροφοδοσίας του καυσίμου (αριστερά). Φλάντζα περιβλήματος κοχλία τροφοδοσίας και ρουλεμάν (δεξιά)..... 85
Εικόνα 46. Κάτω τμήμα βιομηχανικού λάστιχου (rubber), που μεσολαβεί του κοχλία τροφοδοσίας και της πρώτης περιστροφικής βαλβίδας (αριστερά). Διαρροή γύρω από την ολισθαίνουσα βαλβίδα που αντικατέστησε το βιομηχανικό λάστιχο (δεξιά)..... 86
Εικόνα 47. Άνω και κάτω φλάντζα στεγανοποίησης της διάταξης μεταξύ δεύτερης ροταρικής βαλβίδας και κοχλία εκφόρτισης. 86
Εικόνα 48. Κολλήσεις κατά μήκος του κοχλία εκφόρτισης. 86
Εικόνα 49. Κολλήσεις του ακροφυσίου που έπεται της L – Valve (αριστερά). Κολλήσεις στη διαμόρφωση της σωλήνωσης στην ένωση της L – Valve (δεξιά). 87
Εικόνα 50. Ηλεκτρική αντίσταση εσωτερικής Ø114.3, εξωτερικής Ø132, μήκους 245 mm σε τομή (αριστερά). Η αντίσταση τοποθετημένη στον ανοδικό αγωγό (δεξιά)..... 87
Εικόνα 51. Ηλεκτρική αντίσταση εσωτερικής Ø114.3, εξωτερικής Ø132, μήκους 190 mm σε τομή (αριστερά). Η αντίσταση τοποθετημένη στον ανοδικό αγωγό (δεξιά)..... 87
Εικόνα 52. Ηλεκτρική αντίσταση εσωτερικής διαμέτρου Ø114,3, εξωτερικής Ø132 και μήκους 300 mm (αριστερά). Η αντίσταση τοποθετημένη στο άνω τμήμα του ανοδικού αγωγού (δεξιά)..... 88
Εικόνα 53. Ηλεκτρική αντίσταση εσωτερικής διαμέτρου Ø219, εξωτερικής Ø237 και μήκους 300 mm (αριστερά). Η αντίσταση τοποθετημένη στο κυλινδρικό τμήμα του κυκλώνα (δεξιά). 88
Εικόνα 54. Ηλεκτρική αντίσταση εσωτερικής Ø114.3, εξωτερικής Ø132, μήκους 70 mm (αριστερά). Η αντίσταση τοποθετημένη στη βάση του ανοδικού αγωγού (δεξιά)..... 88

Εικόνα 55. Η μορφή του εναλλάκτη (αριστερά) και του καθοδικού αγωγού (δεξιά) μετά την επένδυση με κεραμοβάμβακα. 89
Εικόνα 56. Εναλλάκτης (αριστερά) και βαλβίδα τύπου L (δεξιά) με φύλλα πετροβάμβακα IZOCAM. 89
Εικόνα 57. Αρχική διάταξη σύνδεσης μετρητών πίεσης (αριστερά). Διάταξη που την αντικατέστησε (δεξιά). 89
Εικόνα 58. Μεταβολές πίεσης σε αντιδραστήρα που παρατηρείται ανακυκλοφορία. [70] 102
Εικόνα 59. Διαφυγή ποσότητας ολιβίνη από την καμινάδα που έπεται του θαλάμου καύσης. 105
Εικόνα 60. Σκαρίφημα διατομής της εγκατάστασης, από το εσωτερικό της κλίνης ως την εξωτερική επιφάνεια μόνωσης. 133
Εικόνα 61. Μηχανολογικό σχέδιο τροφοδοτικού δοχείου. 151
Εικόνα 62. Μηχανολογικό σχέδιο ολισθαίνουσας βαλβίδας. 152
Εικόνα 63. Μηχανολογικό σχέδιο κοχλία τροφοδοσίας. 153
Εικόνα 64. *Μηχανολογικό σχέδιο ανοδικού αγωγού.* 154
Εικόνα 65. Μηχανολογικό σχέδιο διασκορπιστή αέρα. 155
Εικόνα 66. Μηχανολογικό σχέδιο τετραγωνικής σωλήνωσης σύνδεσης του ανοδικού αγωγού με τον πρώτο κυκλώνα. 156
Εικόνα 67. Μηχανολογικό σχέδιο πρώτου κυκλώνα. 157
Εικόνα 68. Μηχανολογικό σχέδιο καθοδικού αγωγού. 158
Εικόνα 69. Μηχανολογικό σχέδιο βαλβίδας τύπου L. 159
Εικόνα 70. Μηχανολογικό σχέδιο διαστολικών συνδέσμων. 160
Εικόνα 71.Μηχανολογικό σχέδιο εναλλάκτη. 161
Εικόνα 72. Μηχανολογικό σχέδιο δεύτερου κυκλώνα. 162

Περιεχόμενα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Εκατομμύρια τόνοι εκπεμπόμενου CO_2 ανά τομέα δραστηριότητας σε παγκόσμιο επίπεδο, κατά το έτος 2011. 12
Διάγραμμα 2. Ποσοστιαίες εκπομπές CO_2 ανά ευρωπαϊκή χώρα την τελευταία δεκαετία.. 13
Διάγραμμα 3. Κατανομή ενέργειας & ενεργειακών πηγών κατά τα έτη 1990 ως και 2006.. 13
Διάγραμμα 4. Συνοπτική Παρουσίαση κατηγοριών Βιομάζας. [6] 15
Διάγραμμα 5. Είδη βιομάζας, συνηθέστερα απαντώμενα και αξιοποιήσιμα στην Ελλάδα. [8] 16
Διάγραμμα 6. Κατά κεφαλήν ποσότητα αποβλήτων -μεταλλικών και μη- των χωρών της ΕΕ. 17
Διάγραμμα 7. Συνοπτική Κατηγοριοποίηση Ειδικών Αποβλήτων. 19
Διάγραμμα 8. Ιεράρχηση Βιοχημικών Διεργασιών. 23
Διάγραμμα 9. Συνοπτική παρουσίαση των μελετών που πραγματοποιήθηκαν τα τελευταία χρόνια. 41
Διάγραμμα 10. Συμπεριφορά συγκέντρωσης πισσών συναρτήσει του καυσίμου και των συνθηκών της διεργασίας. 44
Διάγραμμα 11. Χρόνος απορρευστοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας και των προστιθέμενων αλκαλίων ή αλκαλικών ενώσεων σε αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη αεριοποίησης πρότυπου μείγματος αποβλήτων. 48
Διάγραμμα 12. Διάγραμμα ροής γραμμής δειγματοληψίας αερίου. 82
Διάγραμμα 13. Υπολογισμός της τελικής ταχύτητας συναρτήσει το αριθμού Re και του συντελεστή οπισθέλκουσας. [35] 93
Διάγραμμα 14. Καμπύλη Κατανομής Μεγέθους Σωματιδίων ολιβίνη πριν το κοσκίνισμα. . 99

Διάγραμμα 15. Θερμοκρασιακά προφίλ κατά μήκος του ανοδικού αγωγού..... 100
Διάγραμμα 16. Καθ' ύψος διάγραμμα των θερμοκρασιών σε ανοδικό και καθοδικό αγωγό κατά τα δυο χρονικά διαστήματα ισορροπίας. 101
Διάγραμμα 17. Καθ' ύψος διάγραμμα των πιέσεων σε ανοδικό και καθοδικό αγωγό κατά τα δυο χρονικά διαστήματα ισορροπίας. 102
Διάγραμμα 18. Καμπύλη Κατανομής Μεγέθους Σωματιδίων Ολιβίνη μετά τη χρήση του. 104
Διάγραμμα 19. Μέση παροχή καυσίμου κατά τη λειτουργία του κοχλία τροφοδοσίας στα 11 Hz. 108
Διάγραμμα 20. Μέση παροχή καυσίμου κατά τη λειτουργία του κοχλία τροφοδοσίας στα 30 Hz. 109
Διάγραμμα 21. Προσέγγιση γραμμής λειτουργίας κοχλία εκφόρτισης..... 109
Διάγραμμα 22. Καθ' ύψος διάγραμμα των θερμοκρασιών σε ανοδικό και καθοδικό αγωγό κατά την τροφοδοσία. 110
Διάγραμμα 23. Καθ' ύψος διάγραμμα των πιέσεων σε ανοδικό και καθοδικό αγωγό κατά την τροφοδοσία. 111
Διάγραμμα 24. Διακύμανση της πτώσης πίεσης στη βάση του ανοδικού αγωγού σε μικρό χρονικό διάστημα πριν και μετά την τροφοδοσία του καυσίμου. 112
Διάγραμμα 25. Σύγκριση κατανομών μεγέθους σωματιδίων ολιβίνη πριν και μετά την αεριοποίηση. 113
Διάγραμμα 26. Διάγραμμα Sankey ροών μάζας. 119
Διάγραμμα 27. Διάγραμμα ροής μάζας στον αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία. 122
Διάγραμμα 28. Διάγραμμα Sankey ροών ισχύος. 125
Διάγραμμα 29. Διάγραμμα Sankey ενέργειας καυσίμου. 126
Διάγραμμα 30. Διάγραμμα ροής ενέργειας στον αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία. 127
Διάγραμμα 31. Κατανομή προσδιδόμενων ποσών ισχύος κατά την προθέρμανση της μονάδας..... 130
Διάγραμμα 32. Κατανομή προσδιδόμενων ποσών ισχύος κατά την προθέρμανση της μονάδας..... 132
Διάγραμμα 33. Θερμοκρασιακές μεταβολές των Ζωνών 1 και 4. 136
Διάγραμμα 34. Θερμοκρασιακές μεταβολές της ζώνης 4 μεταξύ εσωτερικού της σωλήνωσης και πρώτης στρώσης κεραμικής μόνωσης αντιστάσεων..... 137

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1. Οι συνηθέστερες ομογενείς και ετερογενείς αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεργασία της αεριοποίησης. 25
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά τηλεσκοπικού σωλήνα (ολισθαίνουσας βαλβίδας). 55
Πίνακας 3. Χαρακτηριστικές διαστάσεις περιστροφικών βαλβίδων. 56
Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά κοχλιών εγκατάστασης. 56
Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά κυκλώνων εγκατάστασης. 63
Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά ηλεκτρικών αντιστάσεων..... 69
Πίνακας 7. Άνω θερμοκρασιακά επίπεδα κλίνης βάσει των ζωνών ηλεκτρικών αντιστάσεων. 69
Πίνακας 8. Μεταβολές θερμοκρασίας και μήκους κατά τη θέρμανση των ηλεκτρικών αντιστάσεων. 70
Πίνακας 9. Ονομασία των μετρητών πίεσης και απόστασή τους από τη βάση του ανοδικού αγωγού. 74

Πίνακας 10. Ονομασία των θερμοστοιχείων και απόστασή τους από τη βάση του ανοδικού αγωγού. 74
Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά αντλίας κενού LABOPORT. 79
Πίνακας 12. Χαρακτηριστικά στηλών ανάλυσης αερίου σύνθεσης. 81
Πίνακας 13. Κύρια χαρακτηριστικά της επαφής σωματιδίων και αερίου μέσου στους συνηθέστερους τύπους ρευστοποιημένης κλίνης. [35] 95
Πίνακας 14. Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών ομάδων κατά Geldart. [35] 97
Πίνακας 15. Κατανομή μεγέθους σωματιδίων ακοσκίνιστου ολιβίνη πριν την εισαγωγή του στην κλίνη. 98
Πίνακας 16. Μεταβολή κλάσματος κενού ε καθ' ύψος του ανοδικού αγωγού κατά το Χρονικό διάστημα 1. 103
Πίνακας 17. Μεταβολή κλάσματος κενού ε καθ' ύψος του ανοδικού αγωγού κατά το Χρονικό διάστημα 2. 103
Πίνακας 18. Κατανομή μεγέθους σωματιδίων ολιβίνη μετά τη χρήση του. 104
Πίνακας 19. Ανάλυση πελλετοποιημένου ξύλου (willow). 106
Πίνακας 20. Προσδιορισμός της ιδανικής ποσότητας καυσίμου. 106
Πίνακας 21. Κατανομή Μεγέθους Σωματιδίων ολιβίνη μετά το κοσκίνισμα. 107
Πίνακας 22. Κοχλίες και περιστροφικές βαλβίδες που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία. 108
Πίνακας 23. Σύσταση RDF. [72] 114
Πίνακας 24. Χαρακτηριστικά εισαγόμενου στον αεριοποιητή RDF. 114
Πίνακας 25. Χαρακτηριστικά εισόδου αέρα στον αεριοποιητή (κατ' όγκο σύσταση). 115
Πίνακας 26. Απαιτούμενη παροχή αέρα στον αεριοποιητή. 115
Πίνακας 27. Σύσταση αερίου σύνθεσης. [72]. 116
Πίνακας 28. Συνδετικό συστατικό (N_2). 116
Πίνακας 29. Χαρακτηριστικά αερίου σύνθεσης. 117
Πίνακας 30. Ισοζύγιο και μετατροπή άνθρακα. 118
Πίνακας 31. Πίσσες και εξανθράκωμα. 119
Πίνακας 32. Ισοζύγιο μάζας στον αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία. 119
Πίνακας 33. Χαρακτηριστικά υγραερίου. 120
Πίνακας 34. Ισοζύγιο άνθρακα στο υγραέριο. 120
Πίνακας 35. Σύσταση μείγματος αερίων προς καύση. 120
Πίνακας 36. Απαιτούμενη παροχή αέρα στο θάλαμο καύσης. 121
Πίνακας 37. Χαρακτηριστικά καυσαερίου. 121
Πίνακας 38. Προσδιδόμενη ενέργεια στον αεριοποιητή. 123
Πίνακας 39. Απορροφώμενη ενέργεια από τον ολιβίνη. 124
Πίνακας 40. Ενέργεια αερίου σύνθεσης. 124
Πίνακας 41. Ενέργεια απορριπτόμενη μέσω των πισσών και του εξανθρακώματος. 124
Πίνακας 42. Συγκεντρωτικό ισοζύγιο ενέργειας στον αεριοποιητή. 125
Πίνακας 43. Ισοζύγιο ενέργειας καυσίμου. 125
Πίνακας 44. Προσδιδόμενα και απορροφώμενα ποσά ισχύος κατά την προετοιμασία της μονάδας. 129
Πίνακας 45. Ωφέλιμη ισχύς και απώλειες κατά την προετοιμασία της μονάδας. 130
Πίνακας 46. Προσδιδόμενα και απορροφώμενα ποσά ισχύος κατά την προετοιμασία της μονάδας. 131
Πίνακας 47. Ωφέλιμη ισχύς και απώλειες κατά την προετοιμασία της μονάδας. 131

Πίνακας 48. Μεταβολή θερμοκρασιών λόγω διεπαφής των υλικών κατά την προθέρμανση της μονάδας. 134
Πίνακας 49. Μεταβολή θερμοκρασιών λόγω διεπαφής των υλικών κατά την τροφοδοσία του καυσίμου. 135
Πίνακας 50. Αποτελέσματα αναλύσεων δείγματος χαρτιού. 141
Πίνακας 51. Αποτελέσματα αναλύσεων δείγματος πλαστικού. 142

Σύνοψη

Ο ρυθμός παραγωγής απορριμμάτων ετησίως παρατηρείται να είναι ολοένα και αυξανόμενος, τόσο σε εθνική όσο και σε ευρωπαϊκή και παγκόσμια κλίμακα. Η απαίτηση διαχείρισης αυτού του προβλήματος, σε συνδυασμό με τη ραγδαία αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνολογιών προς την ενεργειακή αξιοποίηση των απορριμμάτων. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την ***κατασκευή και τη λειτουργία πιλοτικής μονάδας ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία για πειραματική διερεύνηση της αεριοποίησης υπολειμματικών καυσίμων από απορρίμματα (RDF).***

Αρχικά, παρατίθεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετική με το αντικείμενο της παρούσας πειραματικής διπλωματικής εργασίας, η οποία επικεντρώνεται στα προβλήματα τα εμφανιζόμενα κατά την αεριοποίηση RDF σε ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ερευνητικό υλικό που στοχεύει τον περιορισμό των συγκεντρώσεων των πισσών στο παραγόμενο αέριο σύνθεσης, του σχηματισμού συσσωματωμάτων με αποτέλεσμα τη βίαιη απώλεια ρευστοποίησης και του σχηματισμού διοξινών και φουρανίων. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται όλες οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στην πιλοτική εγκατάσταση για την ολοκλήρωση της κατασκευής της, καθώς και οι εργασίες βελτιστοποίησής της, μετά την πρόβλεψη λειτουργικών προβλημάτων, αλλά και την αντιμετώπισή τους κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών. Επιπλέον, περιγράφεται αναλυτικά η εγκατάσταση όλων των οργάνων ελέγχου και δειγματοληψίας της πειραματικής διαδικασίας και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές. Σχεδιάστηκαν τα ισοζύγια ενέργειας και μάζας στον αεριοποιητή και έγινε αξιολόγηση της ορθής λειτουργίας των ηλεκτρικών αντιστάσεων. Τέλος, παρουσιάζονται τα είδη αναλύσεων στις οποίες υποβάλλονται τα καύσιμα, και συγκεκριμένα το πρότυπο μίγμα χαρτιού – πλαστικού και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές.

Όλες οι κατασκευές και οι διεξαχθείσες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στην εγκατάσταση αεριοποίησης ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία, στις εγκαταστάσεις της W.A.T.T. A.E., στο χώρο του Κέντρου Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών (ΚΔΑΥ) Κρωπίας και εντάσσεται στο πρόγραμμα LIFE09 ENERGY WASTE της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Abstract

The waste generation rate per year has been increasingly growing, both nationally and in European and global scale. The demand of the management of this problem, combined with the rapid increase in energy requirements led to the development of technologies for energy recovery of waste. The present thesis contains the construction and trial operations of a Circulating Fluidized Bed (CFB) pilot plant for experimental investigation of gasification of Refuse Derived Fuel (RDF).

At first, a brief literature survey related to the subject of this experimental thesis is given. This survey focuses on problems occurring during RDF gasification in a CFB. Specifically, the research material that is presented aims to limit the concentrations of tar in the produced syngas, the formation of agglomerates resulting in defluidization and the formation of dioxins and furans. Subsequently, all the work done on the pilot plant is presented, including the completion of construction and the optimization work needed, after the prediction of some operational problems and the need to deal with them in order to carry out the trials. Furthermore, the installation of all monitoring and sampling instruments of the experimental procedure is described and the results obtained from it are presented. A design of the energy and mass balance of the gasifier and an assessment of the proper functioning of the electrical resistances is presented. Finally, the types of analysis in which fuels undergo – specifically the paper and plastic mixture –, the sampling procedure and the results of the analysis are presented.

All the constructions and the performed experimental trials were carried out in a Circulating Fluidized Bed (CFB) gasification plant, in W.A.T.T. S.A.'s Materials Recovery Facility (MRF) located in Koropi, Attiki, Greece and falls within the European Union program called LIFE09 ENERGY WASTE.

Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ολοκληρώνεται ο κύκλος των προπτυχιακών σπουδών μου.

Μετά από σχεδόν ένα χρόνο ενασχόλησης, θα ήθελα να αποδώσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον κύριο επίκουρο καθηγητή Καρέλλα Σωτήριο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και τη δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ με μια πειραματική διπλωματική εργασία. Η ενασχόλησή μου με την πειραματική εγκατάσταση και η αντιμετώπιση των προβλημάτων που προέκυψαν κατά την κατασκευή και τη λειτουργία της, με εφοδίασαν με εμπειρία και γνώσεις που σπάνια κατακτώνται σε προπτυχιακό επίπεδο.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες ΕΜΠ κ. Βουνάτσο Παναγιώτη και κ. Χριστοδούλου Χρήστο για την άψογη συνεργασία, την άριστη καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου παρείχαν όλο αυτό το διάστημα, αλλά και το Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ) για τη φιλοξενία που μου παρείχε, δουλεύοντας στους χώρους των εγκαταστάσεών του.

Επιπλέον, θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω τους εργαζομένους του Κέντρου Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών (ΚΔΑΥ) Κρωπίας και την W.A.T.T. A.E., για την άψογη συνεργασία όλο αυτό το διάστημα.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω το παρόν κείμενο στην οικογένειά μου, η οποία με στήριξε καθ’ όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας και μου επέτρεψε να ασχοληθώ απερίσπαστη με τη διεκπεραίωσή της.

Σημείωση

Όλα τα τρισδιάστατα σκαριφήματα και μηχανολογικά σχέδια που συμπεριλαμβάνονται στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκαν σε Solidworks 2013 και αποτελούν προσωπική εργασία της συγγραφέως.

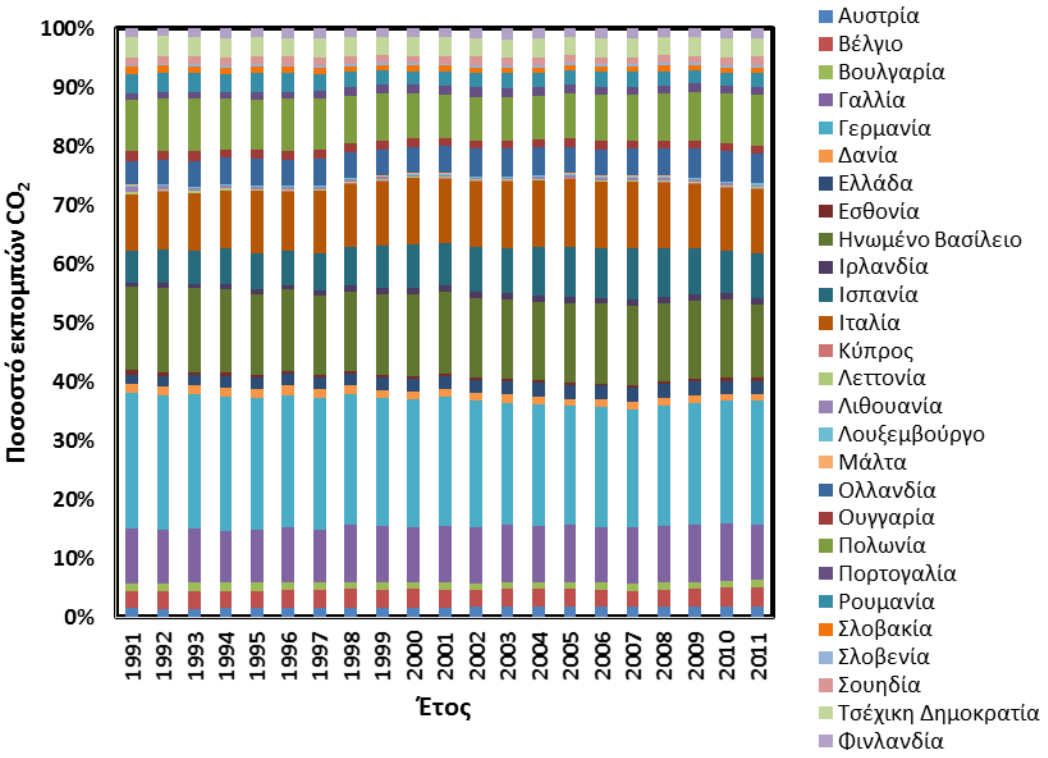
1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, παρατηρείται συνεχής αύξηση της καταναλισκόμενης ενέργειας σε όλους τους τομείς της παγκόσμιας οικονομίας. Ο ρυθμός εξόρυξης των ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, άνθρακας, φυσικό αέριο) έχει γίνει ταχύτατος και πραγματοποιείται όλο και πιο έντονα κατασπατάλησή τους. Αυτοί είναι και οι λόγοι που επικρατεί έντονη ανησυχία περί του κινδύνου εξάντλησης των πηγών τους. Η παγκόσμια ενεργειακή κοινότητα έχει στραφεί στην αναζήτηση ενεργειακών πηγών. Απώτερος στόχος αυτής της κίνησης είναι η διερεύνηση τρόπων πλήρους ή μερικής υποκατάστασής τους.

Ένας επιπλέον λόγος που συνέβαλε στην ανάγκη υποκατάστασης των ορυκτών καυσίμων και της εύρεσης περισσότερο «οικολογικών λύσεων», είναι το μείζον πρόβλημα της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Τα φαινόμενα κλιματικής αλλαγής και ατμοσφαιρικής ρύπανσης που συνεχώς εντείνονται, επιβάλλουν τη μείωση εκπομπών ει δυνατόν περισσότερο και με κάθε δυνατό τρόπο. Στο παρακάτω διάγραμμα διακρίνονται οι εκπεμπόμενοι τόνοι διοξειδίου του άνθρακα ανά τομέα δραστηριότητας παγκοσμίως, το 2011. [1]

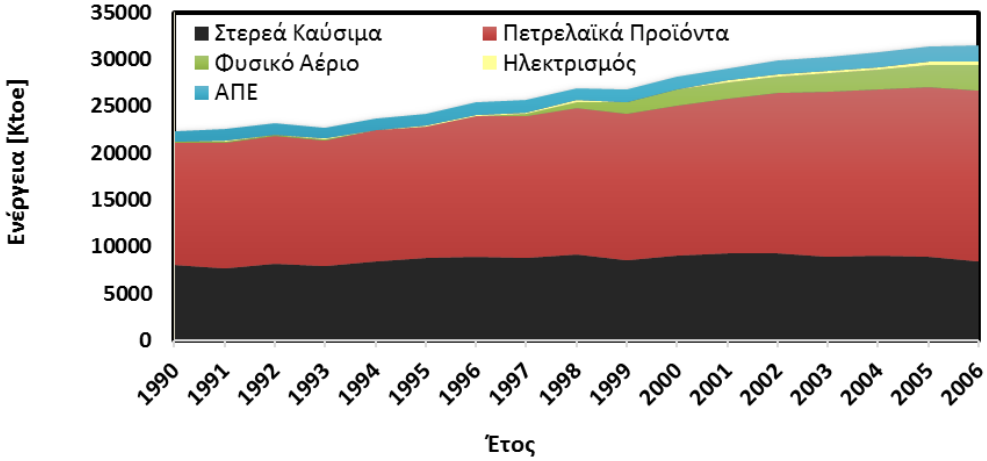
Διάγραμμα 1. *Εκατομμύρια τόνοι εκπεμπόμενου CO_2 ανά τομέα δραστηριότητας σε παγκόσμιο επίπεδο, κατά το έτος 2011.*

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το παρακάτω διάγραμμα εκπομπών CO_2 ανά τις χώρες της Ευρώπης την τελευταία εικοσαετία. Καμία ραγδαία μείωση των εκπομπών δεν έχει σημειωθεί σε καμία χώρα, ούτε και σε συλλογικό επίπεδο, παρά τις προσπάθειες που έχουν καταβληθεί προς αυτή την κατεύθυνση. Έτσι, γίνεται παραπάνω από εμφανής η ανάγκη ανάπτυξης νέων τεχνολογιών, πέραν των ήδη δοκιμασμένων, και η χρήση εναλλακτικών καυσίμων προς αντικατάσταση των συμβατικών στην παραγωγή ενέργειας. [1]



Διάγραμμα 2. *Ποσοστιαίες εκπομπές CO_2 ανά ευρωπαϊκή χώρα την τελευταία δεκαετία.*

Για να δοθεί μια γενική εικόνα της ενεργειακής κατάστασης στη χώρα μας σε βάθος χρόνων, παρατίθεται το κάτωθι διάγραμμα, το οποίο απεικονίζει τα συνολικά διατιθέμενα ποσά ενέργειας (σε μονάδες χιλιάδων ισοδύναμων τόνων πετρελαίου Ktoe), σε αντιστοιχία με την ενεργειακή πηγή από την οποία προκύπτουν, κατά τα έτη 1990 ως και 2006. [2]



Διάγραμμα 3. *Κατανομή ενέργειας & ενεργειακών πηγών κατά τα έτη 1990 ως και 2006.*

1.1 Εναλλακτικά καύσιμα

Η αύξηση των συνολικά παραγόμενων ποσών ενέργειας είναι εμφανής, παρ' όλα αυτά η ανάγκη για αγορά και εισαγωγή ενέργειας από άλλες οικονομίες για την κάλυψη των υφιστάμενων ενεργειακών απαιτήσεων παραμένει και ολοένα αυξάνεται. Προκειμένου να περιοριστεί, λοιπόν, η ανάγκη αυτή, χωρίς όμως να ακολουθηθεί ο δρόμος της παραγωγής

της ενέργειας από συμβατικά καύσιμα, τα βλέμματα στρέφονται στην ενεργειακή ***αξιοποίηση εναλλακτικών καυσίμων***.

Μιλώντας για εναλλακτικά καύσιμα, γνωστά και ως μη συμβατικά ή προηγμένα καύσιμα, γίνεται αναφορά σε οποιοδήποτε υλικό ή ουσία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμη ύλη. Το χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τα «εναλλακτικά» καύσιμα από τα λοιπά «συμβατικά» είναι το ότι τα πρώτα δε μπορούν να ενταχθούν στην κατηγορία των γνωστών συμβατικών καυσίμων, εφόσον δεν προέρχονται από το πετρέλαιο. Κάποια από αυτά παράγονται στην εγχώρια αγορά, μειώνοντας την εξάρτηση από το εισαγόμενο πετρέλαιο, ενώ κάποια άλλα προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές και στην πλειονότητά τους προκαλούν μικρότερη ρύπανση από τα συμβατικά καύσιμα. [3]

Στα εναλλακτικά καύσιμα συμπεριλαμβάνονται αέρια καύσιμα, όπως το υδρογόνο, το φυσικό αέριο και το προπάνιο, αλκοόλες όπως η μεθανόλη, η αιθανόλη και η βουτανόλη, φυτικά έλαια και έλαια αποβλήτων και η χημικά αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια σε μπαταρίες ή κυψέλες καυσίμου. Επιπλέον, σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται και στερεά καύσιμα όπως η βιομάζα, τα επεξεργασμένα αστικά απορρίμματα και γενικά οτιδήποτε προκύπτει ως προϊόν της πυρόλυσης (βιοκάρβουνο, βιοκαύσιμο, βιοέλαια και λοιπά).

Τα παραπάνω καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φορείς ενέργειας σε συστήματα ειδικά για την καύση αυτών των καυσίμων ή σε μεικτά συστήματα με άλλα καύσιμα, συμπεριλαμβανομένων βενζίνης και ντίζελ. Παραδείγματα τέτοιων μηχανών είναι τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα ή τα οχήματα ευέλικτων καυσίμων. Υπάρχουν οχήματα και μηχανές σχεδιασμένες εξ αρχής για χρήση εναλλακτικών καυσίμων, και άλλα που μετατρέπονται κατά περίπτωση για χρήση των εν λόγω καυσίμων, τροποποιώντας τον έλεγχο της μηχανής και το σύστημα τροφοδοσίας σε σχέση με τον αρχικό σχεδιασμό. [4]

1.2 Βιομάζα

Σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία 2003/30/ΕΚ, βιομάζα ονομάζεται το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και καταλοίπων από γεωργικές (συμπεριλαμβανομένων φυτικών και ζωικών ουσιών), δασοκομικές και συναφείς βιομηχανικές δραστηριότητες. Επιπλέον, βιομάζα θεωρείται και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων. [5]

1.2.1 Είδη βιομάζας

Η βιομάζα υπόκειται σε πολλές διαφορετικές κατηγοριοποιήσεις, με κυριότερες αυτή που διαμορφώνεται σύμφωνα με τον τρόπο συλλογής και το είδος της και αυτή που βασίζεται στο χρόνο καλλιέργειάς της. Αυτή η κατηγοριοποίηση υφίσταται λόγω της ποικιλίας των ειδών της, της μεγάλης διακύμανσης του χρόνου καλλιέργειάς της και των διαφορετικών τρόπων συλλογής της.

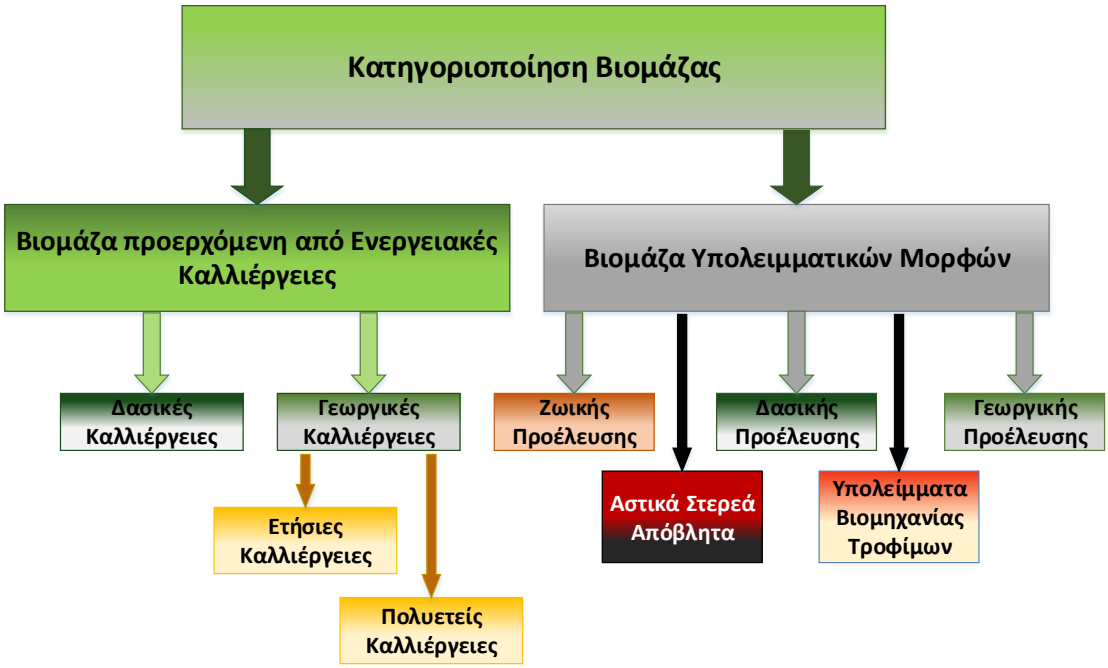
Με βάση το είδος της και τον τρόπο συλλογής της βιομάζας, τα είδη της ομαδοποιούνται σε δύο ευρύτερες κατηγορίες, αυτήν της *βιομάζας υπολειμματικών μορφών* και αυτήν της *βιομάζας προκύπτουσας από ενεργειακές καλλιέργειες.*

Η βιομάζα που προκύπτει από ενεργειακές καλλιέργειες, μπορεί να διακριθεί σε δυο μεγάλες κατηγορίες, αυτή των *δασικών ενεργειακών καλλιεργειών* [ψευδακακία (Robinia pseudoacacia L.) και ευκάλυπτος (Eucalyptus globulus Labill., Eucalyptus camaldulensis Dehnh.)] και αυτή των *γεωργικών ενεργειακών καλλιεργειών*. Η δεύτερη κατηγορία με τη σειρά της περιλαμβάνει τις *ετήσιες* και τις *πολυετείς καλλιέργειες*, συμπεριλαμβάνοντας ενεργειακά φυτά και κατηγοριοποιώντας τα ως ακολούθως:

- ***Ετήσιες Καλλιέργειες:*** Γλυκό και κυτταρινούχο σόργο (Sorghum bicolor L.), Κενάφ (Hibiscus cannabinus L.) και Ελαιοκράμβη (Brassica napus, Brassica carinata).
- ***Πολυετείς καλλιέργειες:*** Καλάμι (Arundo donax L.), Μίσχανθος (Miscanthus x giganteus), Αγριαγκινάρα (Cynara cardunculus L.), Switchgrass (Panicum virgatum L.).

Αντίστοιχα, στην κατηγορία της βιομάζας υπολειμματικών μορφών εντάσσονται οι παρακάτω υποκατηγορίες βιομάζας:

- ***Βιομάζα δασικής προέλευσης:*** Περιλαμβάνει τη δασική ξυλεία, τα υπολείμματα καλλιέργειας των δασών, τα υπολείμματα επεξεργασίας ξύλου, καθώς και τα προϊόντα καθαρισμού των δασών για πυροπροστασία.
- ***Βιομάζα γεωργικής προέλευσης:*** Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται τα κατάλοιπα και τα υποπροϊόντα των γεωργικών καλλιεργειών, όπως τα άχυρα και τα στελέχη βαμβακιάς και αραβοσίτου. Επιπροσθέτως, βιομάζα γεωργικής προέλευσης θεωρείται και οποιοδήποτε υποπροϊόν προκύπτει από την επεξεργασία και τη μεταποίηση των παραπάνω υπολειμμάτων.
- ***Βιομάζα ζωικής προέλευσης:*** Περιλαμβάνει το σύνολο των αποβλήτων που προκύπτουν από κτηνοτροφικές μονάδες και σφαγεία.
- ***Βιομάζα προερχόμενη από τη βιομηχανία τροφίμων:*** Εδώ εντάσσονται απόβλητα όπως το τυρόγαλο, τα υγρά απόβλητα ελαιουργείων (κατσίγαρος), αλλά και τα απόβλητα χυμοποιείων, ζυθοποιείων και βιομηχανιών επεξεργασίας φρούτων και λαχανικών.
- ***Αστικά στερεά απόβλητα:*** Το βιογενές κλάσμα του συνόλου των αστικών απορριμάτων και λυμάτων, αφού πρώτα τεθούν σε ειδική επεξεργασία. [6]

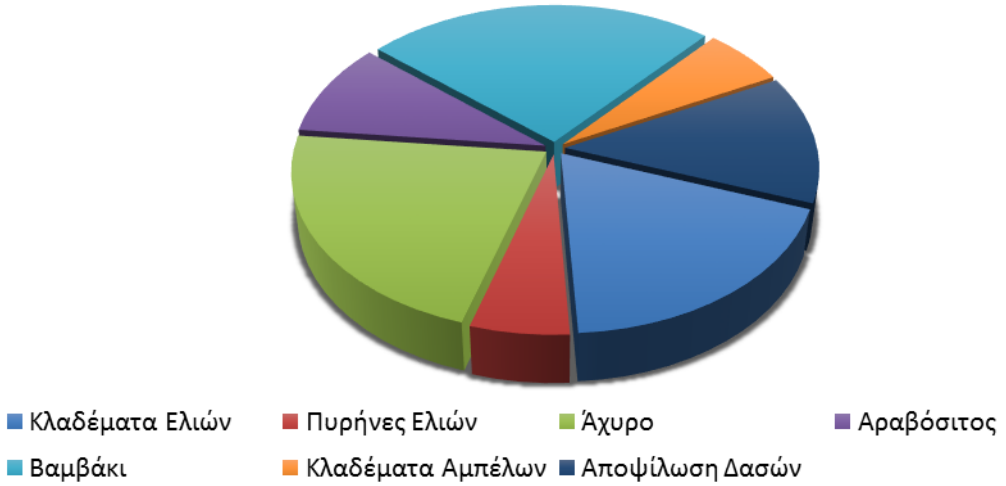


Διάγραμμα 4. *Συνοπτική Παρουσίαση κατηγοριών Βιομάζας. [6]*

1.2.2 Ενεργειακή αξιοποίηση βιομάζας

Η ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας είναι ευρέως διαδεδομένη από αρχαιοτάτων χρόνων, κυρίως για την ικανοποίηση των αναγκών θέρμανσης, μέσω της καύσης ξύλων, φυτικών υπολειμμάτων (άχυρα, πριονίδια, άχρηστους καρπούς ή κουκούτσια) και ζωικών αποβλήτων (κοπριά, λίπος ζώων, άχρηστα αλιεύματα). [5]

Η καύση της βιομάζας προς την ενεργειακή εκμετάλλευσή της έχει μηδενικό ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), καθώς θεωρείται ότι οι εκπεμπόμενες ποσότητες CO_2 κατά την καύση είναι ακριβώς ίσες με αυτές που επαναδεσμεύονται από τα φυτά για το σχηματισμό της. Εύκολα, λοιπόν, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η βιομάζα εντάσσεται στην κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αφού μπορεί να θεωρηθεί ότι σε ένα μικρό σχετικά χρονικό διάστημα οδηγεί σε μηδενικές εκπομπές CO_2. [7]



Διάγραμμα 5. *Είδη βιομάζας, συνηθέστερα απαντώμενα και αξιοποιήσιμα στην Ελλάδα. [8]*

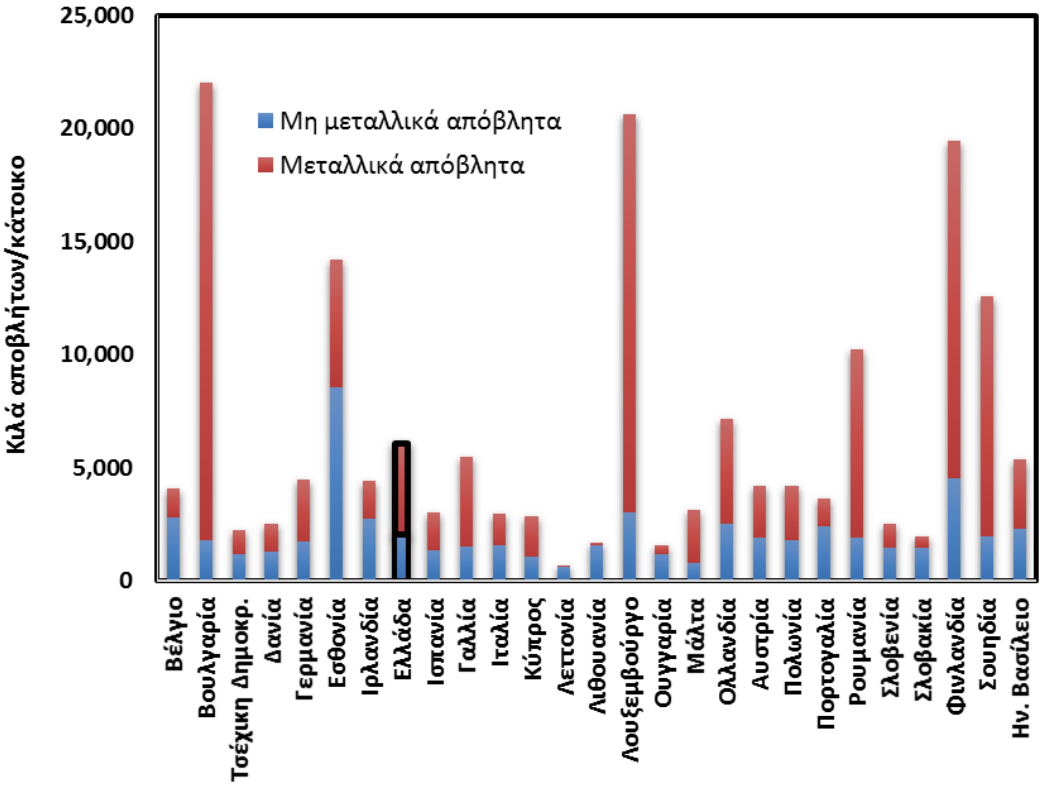
Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η χαρακτηριστική ευελιξία της, καθώς μπορεί να μετατραπεί σε στερεό, υγρό ή αέριο φορέα ενέργειας, και να αντικαταστήσει το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο στις ήδη υφιστάμενες μονάδες. Συν τοις άλλοις, η χρήση της βιομάζας δε συμβάλλει στο φαινόμενο της όξινης βροχής, καθώς η περιεκτικότητά της σε θείο είναι σχεδόν μηδενική. Από πλευράς σωματιδίων, υποστηρίζεται ότι ένας σύγχρονος καυστήρας λέβητα βιομάζας (pellets) επιβαρύνει την ατμόσφαιρα με περίπου τριάντα φορές λιγότερα σωματίδια από ένα παραδοσιακό τζάκι. [9]

Ωστόσο, η χρήση της βιομάζας παρατηρείται να εμφανίζει κάποια σημαντικά μειονεκτήματα που δυσχεραίνουν την ενεργειακή αξιοποίησή της, με κυριότερα το μεγάλο όγκο και την υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία. Επιπροσθέτως, η εποχιακή παραγωγή της δεν επιτρέπει τη συνεχή τροφοδοσία των μονάδων επεξεργασίας, ενώ απόρροια των παραπάνω είναι και η δυσκολία στη συλλογή, την επεξεργασία και την αποθήκευσή της.
Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι η βιομάζα δε μπορεί να θεωρηθεί πηγή συνεχούς παραγωγής ενέργειας, ούτε να αξιοποιηθεί ως πηγή ενέργειας σε μονάδες βάσης. Αυτή η αδυναμία προκύπτει από το ρίσκο της ασυνέχειας παραγωγής και τροφοδοσίας της. Αυτό είναι και το χαρακτηριστικό που αποτελεί το κοινό στοιχείο της με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, λόγου χάρη την ηλιακή και την αιολική. [10]

1.3 Αστικά στερεά απόβλητα

Κάνοντας λόγο για βιομάζα, αναφερθήκαμε στην κατηγορία υπολειμματικών μορφών βιομάζας, και συγκεκριμένα στα *αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ)* ως μια εκ των υποκατηγοριών τους. Τα αστικά στερεά απόβλητα, όπως επιγραμματικά παρατίθεται και παραπάνω, αποτελούνται από το βιογενές κλάσμα των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων και λυμάτων.

Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθεί η κατηγορία των αστικών στερεών αποβλήτων, παρουσιάζοντας και μια αναλυτική κατηγοριοποίησή τους, βάσει της προέλευσης, της σύστασης και των δυνατών τρόπων αξιοποίησής τους. Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα των κατά κεφαλήν κιλών αποβλήτων στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 27 κατά το έτος 2010, με μια ενδεικτική κατηγοριοποίηση σε μεταλλικά και μη. [11]



Διάγραμμα 6. *Κατά κεφαλήν ποσότητα αποβλήτων -μεταλλικών και μη- των χωρών της ΕΕ.*

Ως *αστικά στερεά απόβλητα - ΑΣΑ (Municipal Solid Waste, MSW)* ορίζεται το σύνολο των αντικειμένων και των ουσιών, κυρίως σε στερεή ή ημιστερεή φυσική κατάσταση, που δεν προσδίδουν ιδιαίτερη αξία ή χρησιμότητα στον κάτοχό τους, ο οποίος με τη σειρά του περνά στην απόρριψή τους. [12, 13] Αναλυτικότερα, τα ΑΣΑ μπορούν να διακριθούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες: τα ***αστικά απόβλητα*** και τα ***ειδικά απόβλητα***.

Στην ευρύτερη κατηγορία των αστικών αποβλήτων εντάσσονται τα οικιακά και άλλα απόβλητα, όπως αυτά που προέρχονται από εμπορικές και συναφείς δραστηριότητες, νοσοκομειακά απορρίμματα καθώς και από δημόσιες υπηρεσίες (σχολεία, κυβερνητικά κτίρια). Συνάμα στα αστικά απορρίμματα συγκαταλέγονται παλιές οικιακές συσκευές και έπιπλα, υπολείμματα από κηπευτικές δραστηριότητες (φύλλα, κλαδιά).

Εικόνα 1. *Χαρακτηριστική εικόνα σωρού αστικών αποβλήτων (αριστερά) και δέματα χαρτιού που προέκυψε από διαλογή (δεξιά), (W.A.T.T. A.E., Κέντρο Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών ΚΔΑΥ Κρωπίας).*

Μια πιο συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση των αστικών αποβλήτων παρουσιάζεται επιγραμματικά παρακάτω:

- ***Ζυμώσιμα***, στα οποία συμπεριλαμβάνονται τα υπολείμματα κουζίνας και κήπου.
- ***Χαρτιά και χαρτόνια*** προερχόμενα από υλικό συσκευασίας και γραφική ύλη.
- ***Μέταλλα***, σιδηρούχα και μη.
- ***Γυαλί***.
- ***Πλαστικό***. Χαρακτηριστικό γνώρισμα της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι η έντονη ανομοιογένεια, λόγω της μεγάλης ποικιλίας πολυμερών.
- ***Λοιπά καύσιμα***, στα οποία εντάσσονται το δέρμα, το ξύλο, το λάστιχο και τα υφάσματα.
- ***Αδρανή***, τα οποία συγκεντρώνουν το σύνολο των χημικών ανενεργών υλικών που καταλήγουν στα οικιακά απορρίμματα (χώμα, πέτρες κλπ.), αλλά και το σύνολο των ακίνδυνων αποβλήτων, που δεν υφίστανται σχεδόν καμία φυσική, χημική ή βιολογική μετατροπή.
- ***Λοιπά***, στα οποία εντάσσονται όσα απόβλητα δεν μπορούν να κατανεμηθούν σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες. [13]

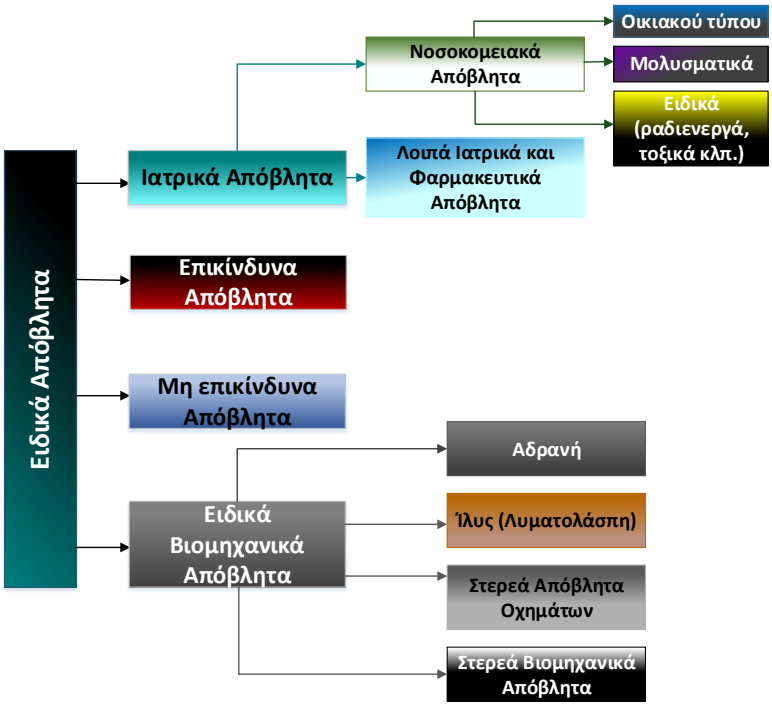
Ως προς τα ειδικά απόβλητα, μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής επιμέρους κατηγορίες:

- ***Επικίνδυνα απόβλητα***. Όλα τα απόβλητα, τα οποία μεμονωμένα ή σε συνδυασμό με άλλα, και λόγω της ποιότητας, της σύστασης και των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους, μπορούν να οδηγήσουν σε προβληματικές, μη φυσιολογικές συνέπειες, όπως οι ασθένειες και η καταστροφή της χλωρίδας και της πανίδας.
- ***Μη επικίνδυνα απόβλητα***. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται όσα ειδικά απόβλητα δεν έχουν επιζήμιες συνέπειες για τον άνθρωπο ή το περιβάλλον.
- ***Ιατρικά απόβλητα***. Ως ιατρικά απόβλητα χαρακτηρίζονται όλα τα απόβλητα τα προερχόμενα από τη φαρμακοβιομηχανία και την περίθαλψη ασθενών. Προφανώς, ένα μεγάλο κλάσμα αυτών των αποβλήτων είναι επικίνδυνα, τοξικά και μολυσματικά. Τα υπόλοιπα, ακίνδυνα απόβλητα, χωρίζονται στις εξής υποκατηγορίες:

- ***Νοσοκομειακά απόβλητα***, τα οποία ανάλογα με τη σύστασή τους διακρίνονται σε τρεις επιμέρους ομάδες:
    - ***Απόβλητα οικιακού τύπου***, στα οποία ανήκουν όλα τα απόβλητα τα προερχόμενα από τα μαγειρεία, τα εστιατόρια και τις καφετέριες, τα γύψινα εκμαγεία και τα απορρίμματα των γραφείων.
    - ***Ειδικά απόβλητα***, εκείνα δηλαδή τα οποία περιέχουν ραδιενεργές και τοξικές ουσίες. Τα χαρακτηριστικά αυτά κρίνουν απαραίτητη την εισαγωγή τους στο νομαρχιακό σχεδιασμό για τη διαχείριση στερεών αποβλήτων, ώστε να καταλήξουν σε συν-επεξεργασία με τα άλλα επικίνδυνα βιομηχανικά απόβλητα.
    - ***Μολυσματικά απόβλητα***, δηλαδή λοιμώδεις ή δυνητικά λοιμώδεις ουσίες, απόβλητα χειρουργείων και μικροβιολογικών εργαστηρίων.
- ***Λοιπά*** ιατρικά και φαρμακευτικά απόβλητα.

▪ ***Ειδικά βιομηχανικά στερεά απόβλητα***, τα οποία ανάλογα με τη φύση τους διακρίνονται με τη σειρά τους στις κατηγορίες που ακολουθούν:

- ***Αδρανή απόβλητα κατασκευαστικών δραστηριοτήτων***, το σύνολο δηλαδή των αποβλήτων που προκύπτουν από ανεγέρσεις, κατεδαφίσεις οικοδομών και εκσκαφές. Περιλαμβάνουν αδρανή, ογκώδη υλικά, όπως χώμα, άμμος, χαλίκι, σκυρόδεμα και τούβλα, αλλά και υπολείμματα υλικών όπως ξύλο, χαρτί, μέταλλα, γυαλί, πλαστικά και ύφασμα.
- ***Στερεά απόβλητα οχημάτων***, στα οποία περιλαμβάνονται τα ελαστικά επίσωτρα (σαμπρέλες), οι μεταχειρισμένοι, φθαρμένοι καταλύτες, αλλά και τα αποσυρόμενα αυτοκίνητα.
- ***Ιλύς*** (λυματολάσπη), το σημαντικότερο παραπροϊόν, προκύπτον από την επεξεργασία καθαρισμού των αποβλήτων. Πρόκειται για ένα παχύρευστο μείγμα, με σύσταση σε στερεές ουσίες πολλαπλάσια των αστικών λυμάτων και σημαντικό ποσοστό υγρασίας.
- ***Στερεά βιομηχανικά απόβλητα***, δηλαδή τα πάσης φύσεως απόβλητα που παράγονται από τις βιομηχανικές δραστηριότητες μιας περιοχής. [13, 14]



Διάγραμμα 7. *Συνοπτική Κατηγοριοποίηση Ειδικών Αποβλήτων.*

1.3.1 Υπολειμματικά καύσιμα από απορρίμματα (RDF)

Ως αποτέλεσμα της προσπάθειας βελτιστοποίησης της ποιότητας των αστικών στερεών αποβλήτων με σκοπό την καλύτερη δυνατή αξιοποίησή τους ως πηγή ενέργειας, προκύπτει μια νέα μορφή του εν λόγω καυσίμου. Η νέα αυτή μορφή καυσίμου είναι σαφώς αναβαθμισμένη συγκριτικά με το πρωτογενές υλικό και καλείται «υπολειμματικό καύσιμο από απορρίμματα».

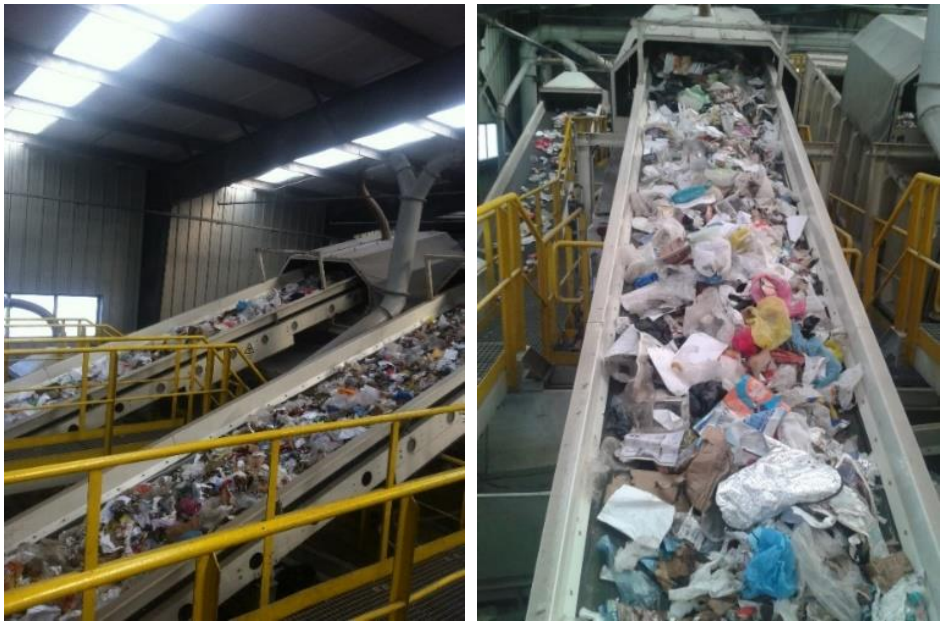
«Υπολειμματικό καύσιμο από απορρίμματα» (Refuse Derived Fuel, RDF) θεωρείται το στερεό καύσιμο που προκύπτει από τη μηχανική ή/και τη βιολογική επεξεργασία των ***«αστικών στερεών αποβλήτων» (Municipal Solid Waste, MSW)*** [15], με σκοπό την ομογενοποίησή του και την αναβάθμιση της ποιότητάς του. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, ιδιότητες και σύσταση και μπορεί να διακινηθεί ως καύσιμο προοριζόμενο για την παραγωγή ενέργειας σε μονάδες συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, αντικαθιστά ποσοστό του συμβατικού καυσίμου (άνθρακα ή λιγνίτη) σε μονάδες παραγωγής ενέργειας, αξιοποιείται μεμονωμένα σε μονάδες αποκλειστικής αξιοποίησης RDF, αλλά και σε τσιμεντοβιομηχανίες και μονάδες συναποτέφρωσης. [16, 17]

Στο μεγαλύτερο ποσοστό του, το RDF αποτελείται από πλαστικά και βιοαποικοδομήσιμα απορρίμματα, καθώς προέρχεται από απόβλητα νοικοκυριών, βιομηχανίας και εμπορίου. Το χαρακτηριστικό αυτό το κατατάσσει στην κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και συγκεκριμένα στην υποκατηγορία της βιοενέργειας, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας. [15] Έχει σχετικά υψηλή θερμογόνο ικανότητα, αφού το ποσοστό του σε εύφλεκτα υλικά είναι σημαντικά αυξημένο συγκριτικά με το αντίστοιχο των αστικών σύμμεικτων απορριμμάτων, γεγονός που αποτελεί έναν από τους απώτερους στόχους της βιολογικής και μηχανικής επεξεργασίας του. Γενικά, οι μονάδες ανάκτησης υλικών και παραγωγής ανακτηθέντων καυσίμων από αστικά απορρίμματα διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Μονάδες διαχωρισμού ρευμάτων υλικών με *μηχανική διεργασία*.
- Μονάδες μηχανικής – βιολογικής σταθεροποίησης με *βιολογική ξήρανση*.
- Μονάδες μηχανικής – φυσικής σταθεροποίησης με *θερμική ξήρανση*.
- Μονάδες μηχανικής (και βιολογικής) επεξεργασίας πριν από τη θερμική επεξεργασία. [15]

Οι μέθοδοι μηχανικής επεξεργασίας που εφαρμόζονται στις μονάδες παραγωγής ανακτηθέντων καυσίμων είναι κατά κύριο λόγο οι ακόλουθες:

- ***Χειροδιαλογή.***
- ***Κοσκίνισμα και τεμαχισμός*** για την πρόσδοση του επιθυμητού μεγέθους.
- ***Διαχωρισμός σιδηρούχων και μη μετάλλων*** με μαγνήτες και διαχωριστές δινορευμάτων αντίστοιχα.
- ***Διαχωρισμός με συμβατικές μηχανικές μεθόδους*** (αεροδιαχωρισμός, φυγοκεντρικός διαχωρισμός, βαλλιστικός διαχωρισμός).
- ***Διαχωρισμός με καινοτόμες οπτικές μεθόδους*** (φασματοσκοπία υπερύθρου, Near Infrared NIR).
- ***Θερμική ξήρανση***. [15]



Εικόνα 2. *Διάδρομοι (φιλμ) που οδηγούν τα αστικά απόβλητα στους χώρους μηχανικής επεξεργασίας (W.A.T.T. A.E., Κέντρο Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών ΚΔΑΥ Κρωπίας).*

Μιλώντας για ***μηχανική διεργασία*** των αστικών απορριμμάτων, γίνεται αναφορά στη διαλογή και το διαχωρισμό των καυσίμων υλικών από τα άκαυστα, διακρίνοντας δύο μεγάλες κατηγορίες διαδικασιών διαλογής, τη θετική και την αρνητική:

- Κατά την εφαρμογή ***θετικών μεθόδων διαλογής***, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην υψηλότερη ποιότητα του διαλεγόμενου μείγματος, με την ποσότητα του ανακτηθέντος υλικού να μην αποτελεί παράγοντα προβληματισμού. Κυριότεροι παράμετροι ποιότητας θεωρούνται η θερμογόνος ικανότητα, αλλά και η συγκέντρωση σε χλώριο και βαρέα μέταλλα, με στόχο τη μεγιστοποίηση της πρώτης, ταυτόχρονα με την ελαχιστοποίηση των τελευταίων.
- Στην ***αρνητική μέθοδο διαλογής***, πρωτεύων στόχος είναι η μεγιστοποίηση της ποσότητας ανακτηθέντος υλικού στο ρεύμα εξόδου, αφού επί της ουσίας μόνο μέλημα της μεθόδου αυτής είναι να απορριφθούν μόνο τα άχρηστα και επιβλαβή υλικά. Προφανώς, το προκύπτον ρεύμα είναι υποδεέστερο ποιοτικά από αυτό της προηγούμενης μεθόδου.

Στην περίπτωση της υποβολής του ανακτηθέντος καυσίμου σε συνδυασμό μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας, στην εγκατάσταση προστίθενται ειδικές διατάξεις, όπως για παράδειγμα βιόφιλτρα, βιολογικά κουτιά, συστήματα καθαρισμού αέρα και βιολογικής ξήρανσης. [15]

1.3.2 Στερεά ανακτηθέντα καύσιμα (SRF)

Υπό την προϋπόθεση ότι τα παραπάνω υπολειμματικά καύσιμα από απορρίμματα (RDF) πληρούν συγκεκριμένες οικονομικές, τεχνολογικές και περιβαλλοντικές προδιαγραφές που επιβάλλονται από το ***πρότυπο CEN/TC 343***, χαρακτηρίζονται ως ***«στερεά ανακτηθέντα καύσιμα» (Solid Recovered Fuels, SRF).*** Η τυποποίηση του SRF πρέπει σε κανονική βάση να προκύπτει από τα δεδομένα ενός έτους παραγωγής, εκτός από την περίπτωση της δοκιμαστικής περιόδου, οπότε το χρονικό διάστημα μπορεί να είναι και μικρότερο. Για μια περίοδο δώδεκα μηνών συνεχούς παραγωγής, με σταθερές συνθήκες παραγωγής (ιδιότητες εισερχόμενων υλικών, συνθήκες επεξεργασίας) και με εφαρμογή συστήματος διαχείρισης

ποιότητας, είναι δυνατό να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά του καυσίμου και να κατηγοριοποιηθούν.

Η τυποποίηση των στερεών ανακτηθέντων καυσίμων πραγματοποιείται μέσω του διαχωρισμού τους σε κατηγορίες, ανάλογα με τις χαρακτηριστικές τους ιδιότητες, βάσει των ακόλουθων παραμέτρων:

- ***Οικονομική παράμετρος***, προσδιοριζόμενη από την κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου (Net or Low Heating Value).
- ***Τεχνολογική παράμετρος***, με βάση την περιεκτικότητα του καυσίμου σε χλώριο (Cl).
- ***Περιβαλλοντική παράμετρος***, με βάση την περιεκτικότητα του καυσίμου σε υδράργυρο (Hg). [15]

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι, πλην των άλλων μεθόδων ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας και του συνόλου των αστικών απορριμμάτων που θα αναλυθούν εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο, περεταίρω επεξεργασία τους οδηγεί στην παραγωγή δεύτερης γενιάς (προηγμένων) βιοκαυσίμων. Λόγω του οργανικού τους κλάσματος, θεωρούνται εν μέρει ανανεώσιμα καύσιμα καθώς έχουν μειωμένο αποτύπωμα CO_2 στο περιβάλλον και αποτελούν πολύ συμφέρουσα λύση για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών, ακολουθώντας οικολογικές οδούς.

1.4 Διεργασίες αξιοποίησης Αστικών Στερεών Αποβλήτων

Τα αστικά στερεά απόβλητα δύνανται να αξιοποιηθούν σε τρεις κυρίως γενικές κατηγορίες διεργασιών. Η πρώτη αφορά τις μεθόδους χημικής επεξεργασίας όπως η χημική οξείδωση – αναγωγή. Η δεύτερη περιλαμβάνει τις μεθόδους βιολογικής – βιοχημικής επεξεργασίας, όπως η κομποστοποίηση και η αναερόβια χώνευση. Τέλος, η τρίτη απαρτίζεται από τις μεθόδους θερμοχημικής αξιοποίησης, στις οποίες θα επικεντρωθεί η παρούσα εργασία.

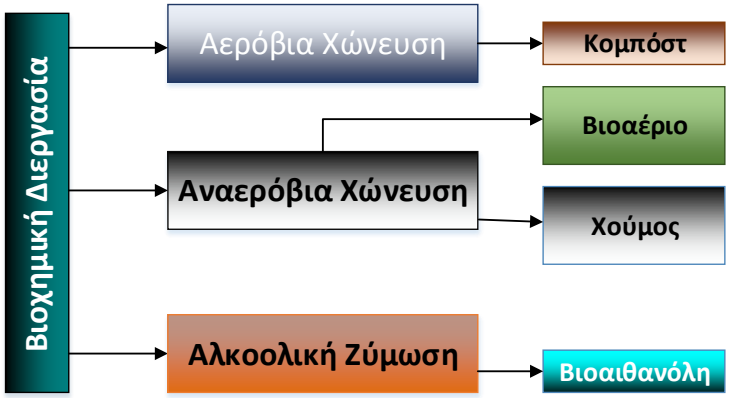
1.4.1 Χημικές διεργασίες

Μιλώντας για ***«χημικές διεργασίες»***, γίνεται αναφορά στις μεθόδους επεξεργασίας εκείνες, κατά τις οποίες προστίθενται κατάλληλες χημικές ουσίες στο απόβλητο, με σκοπό να δράσουν ως καταλύτες, προωθώντας μια σειρά αντιδράσεων που οδηγούν στη μεταβολή της σύστασής του. Με το πέρας μιας τέτοιας διεργασίας, τα επικίνδυνα συστατικά του αποβλήτου έχουν μετατραπεί σε λιγότερο επικίνδυνα ή μη επικίνδυνα ή τους έχει προσδοθεί άλλη μορφή, δεχόμενη περεταίρω επεξεργασία. Κάποιες από τις σημαντικότερες μεθόδους χημικής επεξεργασίας αστικών αποβλήτων είναι η χημική οξείδωση – αναγωγή, η χημική εξουδετέρωση, η υδρόλυση και η ηλεκτρόλυση και ηλεκτροχημική καταστροφή. [14]

1.4.2 Βιοχημικές διεργασίες

Βιοχημικές ονομάζονται οι μέθοδοι επεξεργασίας των αποβλήτων, κατά τις οποίες το οργανικό τους κλάσμα αποδομείται από μικροοργανισμούς, με παράλληλη αξιοποίηση από αυτούς της εσωτερικής ενέργειας των προς βιοαποδόμηση ενώσεων. Για την εφαρμογή οποιασδήποτε βιοχημικής διεργασίας απαιτείται το κατάλληλο μικροβιακό υπόστρωμα για τις προς αποδόμηση ουσίες, καθώς και η ανάπτυξη κατάλληλου περιβάλλοντος, παρέχοντας τα κατάλληλα θρεπτικά συστατικά, το κατάλληλο pH και το απαιτούμενο επίπεδο θερμοκρασίας για τη διεξαγωγή των αντιδράσεων. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κάθε διεργασίας, οι βιοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας αστικών αποβλήτων χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες, την αλκοολική ζύμωση, την αερόβια και την αναερόβια χώνευση. Συνοπτικά, στο διάγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι βιοχημικές διεργασίες για μετατροπή της

βιομάζας σε βιοκαύσιμα, προφανώς εφαρμοζόμενες και στην περίπτωση των αστικών απορριμμάτων.



Διάγραμμα 8. *Ιεράρχηση Βιοχημικών Διεργασιών.*

1.4.3 Θερμοχημικές διεργασίες

Οι ***θερμοχημικές*** διεργασίες αξιοποίησης αστικών απορριμμάτων διακρίνονται σε τρεις βασικές ευρύτερες κατηγορίες διεργασιών, με βάση τον τύπο της επεξεργασίας στην οποία υποβάλλονται τα απόβλητα.

Οι θερμοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας απορριμμάτων διακρίνονται από το χαρακτηριστικό των υψηλών θερμοκρασιών, της τάξης των εκατοντάδων βαθμών κελσίου. Λόγω αυτού, είναι προφανές ότι η ταχύτητα των διεργασιών αυτών είναι μεγάλη, ακόμα και χωρίς την παρουσία καταλυτών. Επίσης, το υψηλό επίπεδο της θερμοκρασίας καθιστά αυτού του τύπου τις μεθόδους τις πλέον κατάλληλες για την επεξεργασία αστικών απορριμμάτων, καθώς επιδέχονται επεξεργασία υλικά ανθεκτικά στη βιοαποδόμηση, έντονα πτητικές ουσίες, και γενικότερα ουσίες οι οποίες δεν είναι δυνατόν να υποστούν άλλου είδους επεξεργασία. Ο απώτερος σκοπός των θερμοχημικών διεργασιών είναι η παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, καυσίμων και χημικών ουσιών. [10]

Οι κυριότερες εκ των θερμοχημικών διεργασιών είναι ***η καύση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση.*** Ακολουθεί μια συνοπτική ανάλυση των διεργασιών της καύσης και της πυρόλυσης, καθώς και μια πιο εκτενής αναφορά στη διεργασία της αεριοποίησης, λόγω της εφαρμογής της στη μονάδα διεξαγωγής των πειραματικών δοκιμών που παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο.

1.4.3.1 Πυρόλυση

Ως ***πυρόλυση*** αναφέρεται η θερμική διάσπαση οργανικών ουσιών, μέσω θέρμανσης, απουσία οξυγόνου και άλλων οξειδωτικών μέσων, εκτός πιθανόν από ατμό. Η απουσία οξειδωτικού μέσου είναι και η κύρια διαφορά της πυρόλυσης από την καύση, με την τελευταία να πραγματοποιείται σε στοιχειομετρικές, ακόμα και υπερστοιχειομετρικές συνθήκες. Στην περίπτωση παρουσίας οξειδωτικών, η ποσότητά τους είναι ιδιαιτέρως μικρή, ώστε να μην παρατηρείται αεριοποίηση σε μεγάλη κλίμακα.

Μπορούμε να διακρίνουμε τρία είδη πυρόλυσης, κρίνοντας από τις θερμοκρασίες στις οποίες πραγματοποιούνται:

- ***Ήπια πυρόλυση (Mild Pyrolysis or Torrefaction).*** Πραγματοποιείται συνήθως σε θερμοκρασίες μεταξύ 230 και 300°C, με σκοπό την παραγωγή υψηλής ποιότητας βιοκαυσίμων (high-grade biofuels). Το τελικό προϊόν είναι ένα σταθερό, ομογενές

βιοκαύσιμο, με ιδιαίτερα υψηλή θερμογόνο ικανότητα συγκριτικά με την χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη. [18]

- ***Αργή πυρόλυση (Slow Pyrolysis).*** Όπως προκύπτει και από την ονομασία της, η αργή πυρόλυση απαιτεί ώρες, άλλες φορές ίσως και μέρες, για την ολοκλήρωσή της. Κατά τη διάρκειά της, στον αντιδραστήρα επικρατούν σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, περί τους 400°C, και το κύριο προϊόν της διεργασίας είναι το βιοκάρβουνο (biochar). [19, 20]
- ***Γρήγορη πυρόλυση (Fast Pyrolysis).*** Στην περίπτωση αυτή, η οργανική πρώτη ύλη θερμαίνεται ακαριαία σε εύρος θερμοκρασιών 450 - 600°C, με αποτέλεσμα την παραγωγή αερίου σύνθεσης (syngas), βιοελαίου (bio-oil) και κάρβουνου. Η διάρκεια της είναι της τάξης των λίγων δευτερολέπτων και αποτελεί τη συνηθέστερη μορφή πυρόλυσης. [20, 21]

1.4.3.2 Αεριοποίηση

Η ***αεριοποίηση*** είναι η θερμική διεργασία, η οποία σκοπό έχει τη μετατροπή ενός στερεού ή υγρού καυσίμου σε αέριο φορέα ενέργειας. Αυτή η μετατροπή επιτυγχάνεται μέσω χρήσης κατάλληλων διατάξεων και προσθήκης αερίου οξειδωτικού μέσου σε υποστοιχειομετρικές συνθήκες. Ως μέσο οξείδωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ***αέρας ή καθαρό οξυγόνο (άμεση ή αυτόθερμη αεριοποίηση) ή ατμός (έμμεση ή αλλόθερμη αεριοποίηση).*** Αποτελεί το τρίτο στάδιο, μετά την ξήρανση και την πυρόλυση, της θερμοχημικής μετατροπής ενός στερεού καυσίμου, και προηγείται του τέταρτου, που είναι η καύση.

$$\Xi\acute{\eta}\rho\alpha\nu\sigma\eta \rightarrow \Pi\upsilon\rho\acute{o}\lambda\upsilon\sigma\eta \rightarrow A\epsilon\rho\iota o\pi o\acute{\iota}\eta\sigma\eta \rightarrow K\alpha\acute{\upsilon}\sigma\eta$$

Κατά τη θερμοχημική μετατροπή, η χημική δομή του καυσίμου τροφοδοσίας μεταβάλλεται, λόγω των ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Το αέριο καύσιμο, το λεγόμενο ***αέριο σύνθεσης (syngas),*** προκύπτει από μια σειρά ομογενών και ετερογενών αντιδράσεων. Αποτελείται από $CO_2, CO, H_2, CH_4, H_2O$, ελάχιστες ποσότητες υψηλότερων υδρογονανθράκων, αδρανή αέρια τυχόν εμπεριεχόμενα στο μέσο αεριοποίησης (N_2) και διάφορους ρυπαντές, όπως υπολείμματα εξανθρακώματος, πίσσες τέφρα και αλκαλικές ενώσεις εμπεριεχόμενες στην τελευταία. [22]

Κατά τη διεργασία της αεριοποίησης, λαμβάνει χώρα μεγάλος αριθμός ετερογενών και ομογενών αντιδράσεων. Ομογενείς καλούνται αυτές που πραγματοποιούνται μεταξύ μορίων ευρισκομένων στην ίδια φάση, ενώ ετερογενείς εκείνες που συμβαίνουν μεταξύ μορίων διαφορετικής φάσης (για παράδειγμα μεταξύ στερεών και αερίων). Οι κυριότερες από αυτές τις αντιδράσεις φαίνονται στον κάτωθι πίνακα [14, 23, 24]:

Πίνακας 1. *Οι συνηθέστερες ομογενείς και ετερογενείς αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεργασία της αεριοποίησης.*

Ομογενείς Αντιδράσεις		
$\boldsymbol{CO_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2_{(g)}} \rightarrow CO_{2_{(g)}}}$	Οξείδωση του Μονοξειδίου του Άνθρακα	Εξώθερμη
$\boldsymbol{H_{2_{(g)}} + \frac{1}{2}O_{2_{(g)}} \rightarrow H_2O_{(g)}}$	Οξείδωση του Υδρογόνου	Εξώθερμη
$\boldsymbol{CH_{4_{(g)}} + 2O_{2_{(g)}} \rightarrow CO_{2_{(g)}} + 2H_2O_{(g)}}$	Οξείδωση του Μεθανίου	Εξώθερμη
$\boldsymbol{CO_{(g)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{2_{(g)}} + H_{2_{(g)}}}$	Αντίδραση Μετατόπισης (Water-Gas Shift Reaction)	Εξώθερμη
$\boldsymbol{CH_{4_{(g)}} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{(g)} + 3H_{2_{(g)}}}$	Αντίδραση Αναμόρφωσης (Methane Formation)	Ενδόθερμη
Ετερογενείς Αντιδράσεις		
$\boldsymbol{C_{(s)} + O_{2_{(g)}} \rightarrow CO_{2_{(g)}}}$	Οξείδωση του Άνθρακα	Εξώθερμη
$\boldsymbol{C_{(s)} + \frac{1}{2}O_{2_{(g)}} \rightarrow CO_{(g)}}$	Μερική Οξείδωση του Άνθρακα	Εξώθερμη
$\boldsymbol{C_{(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{(g)} + H_{2_{(g)}}}$	Ετερογενής Αντίδραση Νερού-Αερίου	Ενδόθερμη
$\boldsymbol{C_{(s)} + CO_2 \rightarrow 2CO_{(g)}}$	Αντίδραση Boudouard	Ενδόθερμη
$\boldsymbol{C_{(s)} + 2H_{2_{(g)}} \rightarrow CH_{4_{(g)}}}$	Υδρογόνο–Αεριοποίηση (Hydrogasification)	Εξώθερμη

Πολλοί είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη σύνθεση του παραγόμενου αερίου καυσίμου από αεριοποίηση. Κάποιοι από αυτούς αναφέρονται παρακάτω:

- Η φύση και το σχήμα του στερεού καυσίμου (διαστάσεις, ειδική επιφάνεια των σωματιδίων του καυσίμου, υγρασία, χημική σύνθεση).
- Η φύση και η ποσότητα του μέσου αεριοποίησης (αέρας, οξυγόνο, υδρατμός, μείγμα αυτών).
- Ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα αεριοποίησης (βαθμός ανάμειξης του καυσίμου με το μέσο αεριοποίησης, χρόνος παραμονής του καυσίμου και του παραγόμενου αερίου στον αντιδραστήρα).
- Η θερμοκρασία της αεριοποίησης.
- Η παρουσία ή μη καταλυτών.
- Η επικρατούσα πίεση στον αντιδραστήρα. [25]

Χρησιμοποιώντας οξυγόνο αντί για αέρα στη θέση του οξειδωτικού μέσου, αυξάνεται ραγδαία η θερμογόνος ικανότητα του παραγόμενου αερίου σύνθεσης, αλλά όχι τόσο ώστε να συγκριθεί με την αντίστοιχη θερμογόνο ικανότητα του προκύπτοντος αερίου από αλλόθερμη αεριοποίηση.

Το αέριο σύνθεσης που προκύπτει από την αεριοποίηση αστικών απορριμμάτων, μετά τον επαρκή καθαρισμό του, δύναται να αξιοποιηθεί ως καύσιμο σε αεριοστρόβιλους, σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης και σε μονάδες συμπαραγωγής ενέργειας με αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης (περί του 50%).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης του αερίου σύνθεσης συγκριτικά με την απευθείας καύση του αρχικού στερεού καυσίμου έγκειται στο γεγονός ότι το παραγόμενο αέριο, αφού πρώτα καθαριστεί από τα σωματίδια, τις πίσσες κα., μπορεί να αξιοποιηθεί για περεταίρω χρήση. Η χρήση αυτή δύναται να είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη βοήθεια μηχανών εσωτερικής καύσης, με αποδόσεις καλύτερες από αυτές που απαντώνται κατά την καύση των στερεών, είτε η παραγωγή διάφορων βιοκαυσίμων (υγρών ή αερίων) δεύτερης γενιάς.

Η αεριοποίηση, όπως και οι υπόλοιπες τεχνολογίες μετατροπής των στερεών καυσίμων, εκτός από πλεονεκτήματα, έχουν και μειονεκτήματα. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που εμφανίζονται κατά την αεριοποίηση των αστικών αποβλήτων (και γενικότερα της βιομάζας) είναι τα ***υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων των πισσών*** στο παραγόμενο αέριο. Το ζήτημα αυτό είναι και ένας από τους λόγους, για τους οποίους δεν κατέστη ακόμα δυνατή η ευρεία χρήση της διεργασίας σε μεγάλη βιομηχανική κλίμακα. Το πρόβλημα αυτό θα αποτελέσει ένα από τα αντικείμενα μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ένα ακόμα εξίσου σημαντικό πρόβλημα, το οποίο συναντάμε κατά την αεριοποίηση αστικών απορριμμάτων είναι η ***παραγωγή διοξινών και φουρανίων.*** Η επίλυση αυτού του προβλήματος μπορεί να επέλθει διεξάγοντας την αεριοποίηση σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες ($> 1000°C$) και συγχρόνως αυξάνοντας το χρόνο παραμονής του αερίου εντός του αντιδραστήρα.

Όταν η διεργασία της αεριοποίησης λαμβάνει χώρα σε αντιδραστήρες ρευστοποιημένων κλινών, εμφανίζεται το ***πρόβλημα του σχηματισμού συσσωματωμάτων***, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε απώλεια ρευστοποίησης. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τέφρα των αστικών απορριμμάτων (όπως και όλων των ειδών βιομάζας) είναι πλούσια σε αλκάλια. Το σημείο τήξης των συγκεκριμένων ενώσεων, όταν αντιδράσουν με αδρανές υλικό πλούσιο σε πυρίτιο, σημειώνει ραγδαία πτώση. [23]

1.4.3.3 Καύση

Καύση ονομάζεται η εξώθερμη αντίδραση οξείδωσης μεταξύ ενός τουλάχιστον καυσίμου και ενός τουλάχιστον οξειδωτικού μέσου, κατά τη διάρκεια της οποίας απελευθερώνονται ταχέως μεγάλα ποσά θερμότητας. Στο παρελθόν, ως καύση οριζόταν κάθε αντίδραση με το οξυγόνο (O_2), με παράλληλη έκλυση φωτός και θερμότητας. Σήμερα είναι ευρέως αποδεκτό ότι και άλλες ουσίες πέραν του οξυγόνου, όπως το όζον (O_3), το φθόριο (F_2) και το χλώριο (Cl_2) μπορούν να προκαλέσουν καύση. Παρ' όλα αυτά, όταν γίνεται λόγος για καύση, χωρίς περεταίρω διευκρινιστικές πληροφορίες, υπονοείται ότι το οξειδωτικό μέσο είναι αέρας ή οξυγόνο, όπως και στην πλειονότητα των περιπτώσεων που θα αναλυθούν στην παρούσα εργασία. Εκτός από ενέργεια και φλόγα, κατά την καύση εκλύεται αέριο, το λεγόμενο καυσαέριο ή απαέριο, που στο μεγαλύτερο μέρος του αποτελείται από χημικούς συνδυασμούς του καυσίμου και του οξειδωτικού μέσου [26]. Έτσι, το απαέριο αποτελείται κυρίως από διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και υδρατμό (H_2O), στην περίπτωση που μιλάμε για πλήρη καύση. Στις περιπτώσεις ατελούς καύσης, ένα ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα υποκαθίσταται από μονοξείδιο (CO).

Η καύση αποτελεί τη συνηθέστερη μέθοδο αξιοποίησης της βιομάζας, και γενικότερα των υδρογονανθράκων, δεδομένου ότι οι άνθρωποι την χρησιμοποίησαν για θέρμανση και μαγείρεμα της τροφής τους από αρχαιοτάτων χρόνων. Μέσω αυτής, η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε θερμική, η οποία είτε αξιοποιείται ως έχει, είτε μετατρέπεται μέσω θερμικών μηχανών σε μηχανική και από εκεί σε ηλεκτρική. [27] [28]

Λόγω της εκτεταμένης χρήσης της, η καύση βρίσκεται σε πλεονεκτική θέση απέναντι σε άλλες μεθόδους επεξεργασίας απορριμμάτων, καθώς η μετατροπή των ήδη υφιστάμενων μονάδων ώστε να δεχτούν απορρίμματα ως καύσιμη ύλη είναι σχετικά εύκολη και σίγουρα πιο οικονομική από την ανέγερση ειδικής μονάδας επεξεργασίας τους. Παρά τα οφέλη, όμως, και την εύκολη εφαρμογή της, η καύση διακρίνεται και από κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Τα κύρια από αυτά είναι τα προβλήματα που προκύπτουν από την καύση καυσίμων με μεγάλο ποσοστό υγρασίας, ο σχηματισμός συσσωματωμάτων (agglomeration), λόγω του υψηλού ποσοστού αλκαλίων στα απορρίμματα, αλλά και οι δυσκολίες που

προκύπτουν από τη συνεχή τροφοδοσία και τη διαχείριση υψηλής πυκνότητας RDF στις υφιστάμενες μονάδες παραγωγής ενέργειας.

1.5 Αντιδραστήρες αεριοποίησης

Η αεριοποίηση οποιουδήποτε στερεού καυσίμου, εν προκειμένω RDF, πραγματοποιείται σε ειδικές διατάξεις, τους λεγόμενους αεριοποιητές. Ανάλογα με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και τον τρόπο λειτουργίας τους, όπως το είδος της κλίνης και τα σημεία εισόδου του μέσου αεριοποίησης, διακρίνονται οι κάτωθι βασικοί τύποι αεριοποιητών:

1.5.1 Αεριοποιητές σταθερής κλίνης (Fixed Bed Gasifiers)

Στους αεριοποιητές σταθερής κλίνης, η πρώτη ύλη τροφοδοτείται στον αντιδραστήρα από την κορυφή και κινείται προς τα κάτω με τη συμβολή της βαρύτητας. Ανάλογα με τον τρόπο που το μέσο αεριοποίησης (αέρας, καθαρό οξυγόνο, ατμός) εισάγεται στον αντιδραστήρα, τα συστήματα σταθερής κλίνης διακρίνονται σε δυο υποκατηγορίες, τους ***αντιδραστήρες ομορροής (Co-current or Downdraft Fixed Beds)*** και τους ***αντιδραστήρες αντιρροής (Counter-current or Updraft Fixed Beds).*** [22]

Στους ***αντιδραστήρες ομορροής***, το μέσο αεριοποίησης έχει την ίδια κατεύθυνση ροής, όπως και η εισερχόμενη προς αεριοποίηση πρώτη ύλη. Το παραγόμενο αέριο διατηρεί μια καθοδική ροή και εξέρχεται από το κάτω μέρος του αντιδραστήρα. [22] Το παραγόμενο σε έναν αεριοποιητή ομορροής αέριο συναντά τη ζώνη καύσης μετά τη ζώνη πυρόλυσης, με αποτέλεσμα οι περιεχόμενες σε αυτό πίσσες να καίγονται και η τελική του περιεκτικότητα σε αυτές να είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Ο σχεδιασμός αυτής της κατηγορίας αντιδραστήρων δεν επιτρέπει ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του μέσου αεριοποίησης και του αεριοποιούμενου υλικού, γεγονός που οδηγεί σε πολύ υψηλής θερμοκρασίας syngas, της τάξης των 800°C. [22, 29]

Οι ***αντιδραστήρες αντιρροής*** είναι οι πλέον απλοί κατασκευαστικά και χρονολογικά παλαιότεροι. Σε ένα τυπικό αντιδραστήρα τέτοιου τύπου, το καύσιμο εισέρχεται από την κορυφή, από την οποία εξέρχεται και το παραγόμενο αέριο σύνθεσης. Το μέσο αεριοποίησης προθερμαίνεται ελαφρώς πριν την είσοδό του στον αντιδραστήρα, μέσω των εσχαρίων κοντά στη ζώνη καύσης. [30] Η πρώτη ύλη, η οποία εισέρχεται από την κορυφή της διάταξης, συναντά το θερμό syngas κατά την έξοδό του, γεγονός που συμβάλλει στην μερική ξήρανσή της. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί και το κύριο πλεονέκτημα αυτού του είδους των αντιδραστήρων, αφού στην ουσία δεν υπάρχει περιορισμός στο ανώτατο ποσοστό υγρασίας της πρώτης ύλης για ικανοποιητική λειτουργία της εγκατάστασης. Άλλο ένα όφελος της συγκεκριμένης διάταξης είναι η ψύξη του παραγόμενου αερίου σύνθεσης μέσω της αντίθετης κατεύθυνσης ροής με το καύσιμο. [22, 24] Βασικό, όμως, μειονέκτημα, αποτελεί το μεγάλο ποσοστό πισσών που εμπεριέχονται στο προκύπτον syngas, λόγω της συνάντησής του με τη ζώνη πυρόλυσης του αεριοποιητή πριν την έξοδό του. Στην περίπτωση, βέβαια, που το παραγόμενο αέριο προορίζεται για απευθείας παραγωγή θερμότητας, το παραπάνω πρόβλημα αποδεικνύεται ήσσονος σημασίας, καθώς οι εμπεριεχόμενες στο αέριο πίσσες καίγονται μαζί με αυτό. [22, 29]

1.5.2 Αεριοποιητές εξαναγκασμένης ροής – συμπαρασυρμού (Entrained Flow Beds)

Οι αεριοποιητές συμπαρασυρμού (εξαναγκασμένης ροής) προτιμώνται σε ολοκληρωμένα συστήματα αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου (IGCC). Λειτουργούν σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες, άνω των 1200°C και πολύ υψηλές πιέσεις, της τάξης των 20 ως 70 Bar. [24] Στη συνηθέστερη περίπτωση τέτοιου τύπου αντιδραστήρα, το μέσο

αεριοποίησης (συνήθως οξυγόνο) και το προς αεριοποίηση υλικό εισέρχονται από την κορυφή της διάταξης. Οι εν λόγω αντιδραστήρες απαιτούν τροφοδοσία πρώτης ύλης πολύ λεπτής κοκκομετρίας, ώστε να είναι πιο εύκολο να παρασυρθεί από το μέσο αεριοποίησης, δημιουργώντας ένα πυκνό σύννεφο μέσα στον αντιδραστήρα. Λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά τη διεργασία, παρατηρείται εντυπωσιακά *υψηλή μετατροπή του άνθρακα (Carbon Conversion Efficiency)*[1], ενώ το παραγόμενο αέριο έχει πολύ μικρή περιεκτικότητα σε πίσσες και υδρογονάνθρακες, ενώ οι προσμείξεις, όπως το υδρόθειο (H_2S) και τα σωματίδια, είναι σχεδόν αμελητέες. [22, 31, 32]

Παρά τα πολλά τους λειτουργικά πλεονεκτήματα, αυτού του είδους οι αεριοποιητές διακρίνονται από μεγάλες κατασκευαστικές απαιτήσεις και πολύπλοκα συστήματα ελέγχου, γεγονός που τους καθιστά οικονομικά συμφέροντες μόνο σε μονάδες βιομηχανικής κλίμακας, παραγωγής θερμικής ενέργειας άνω των 100 MW_{th}. [22]

1.5.3 Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης (Fluidized Bed Gasifiers)

Ρευστοποίηση καλείται η διαδικασία, κατά την οποία ένα στρώμα σωματιδίων συμπεριφέρεται ως ρευστό υψηλού ιξώδους, με τη βοήθεια της ανοδικής ροής ρεύματος αέρα. [33]

Οι αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης είναι τυπικοί θάλαμοι ορθογωνικής ή κυλινδρικής διατομής, των οποίων η αρχή λειτουργίας βασίζεται στη χρήση ενός αδρανούς πληρωτικού υλικού για την διεκπεραίωση της διεργασίας. Συνήθως, το ρόλο του αδρανούς υλικού σε τέτοιου τύπου αντιδραστήρες καλείται να παίξει η πυριτική άμμος, ο ολιβίνης, ο δολομίτης ή η αλουμίνα. Το υλικό αυτό αναμειγνύεται με τα σωματίδια του καυσίμου και το μείγμα ομοιογενοποιείται μέσω της ροής του μέσου αεριοποίησης διαμέσω των στερεών σωματιδίων, σε υποστοιχειομετρικές συνθήκες. Το μέσο αεριοποίησης (συνήθως αέρας ή καθαρό οξυγόνο) εισάγεται στην κλίνη μέσω αγωγού κοντά στον πυθμένα της κλίνης. Από παρεμφερές ύψος εισάγεται στην κλίνη και το καύσιμο με τη βοήθεια κοχλιών τροφοδοσίας. Κατά την εισαγωγή του, το καύσιμο έρχεται αμέσως σε επαφή με τα σωματίδια του αδρανούς υλικού και, σχηματίζοντας ένα ομοιογενές μείγμα με αυτά, αποκτά την επικρατούσα στην κλίνη θερμοκρασία και υπόκειται ραγδαία ξήρανση και πυρόλυση. Περεταίρω αντιδράσεις πραγματοποιούνται κατά την πορεία του παραγόμενου αερίου στον ανοδικό αγωγό (riser), μέχρι την τελική παραγωγή του αερίου σύνθεσης (syngas) και του εξανθρακώματος (char) στον πυθμένα του αντιδραστήρα.

Οι συνήθεις θερμοκρασίες λειτουργίας των αντιδραστήρων ρευστοποιημένων κλινών κυμαίνονται στους 700 ως $1000°C$, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτούμενες συνθήκες για τα στάδια της ξήρανσης και της πυρόλυσης, να αποφεύγονται φαινόμενα διάβρωσης της διάταξης, αλλά και να προλαμβάνεται η συσσωμάτωση της τέφρας. [24]

Τα ρευστοποιημένης κλίνης συστήματα δείχνουν καταλληλότερα για μεγαλύτερης ισχύος συστήματα παραγωγής ενέργειας, της τάξης των $100\ MWth$, σε αντίθεση με τα συστήματα σταθερής κλίνης, που ενδείκνυνται για συστήματα μέσης και χαμηλής παραγωγής ισχύος.

Οι αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης, βάσει της ταχύτητας του εισερχόμενου μέσου αεριοποίησης, διακρίνονται σε δυο υποκατηγορίες: τους ***αεριοποιητές αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης (Bubbling Fluidized Bed Gasifiers)*** και τους ***αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας (Circulating Fluidized Bed Gasifiers)***, τα χαρακτηριστικά των οποίων αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω.

---

[1] $Carbon\ Conversion\ Efficiency = \frac{m_{C,syngas}}{m_{C,fuel}}$

1.5.3.1 Αεριοποιητές αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης (Bubbling Fluidized Bed Gasifiers)

Οι ***αεριοποιητές αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης (BFB)*** λειτουργούν στο εύρος ταχυτήτων μέσου αεριοποίησης μεταξύ της ελάχιστης και της τελικής ταχύτητας ρευστοποίησης. Σε αυτού του είδους τις κλίνες κάνουν την εμφάνισή τους φυσαλίδες σε όλο τον όγκο της κλίνης, χωρίς όμως οι κόκκοι αδρανούς υλικού και τα σωματίδια του καυσίμου να παρασύρονται εκτός της κλίνης από το εκάστοτε μέσο αεριοποίησης. [29]

Σε αναβράζουσες ρευστοποιημένες κλίνες δεν μπορεί να επιτευχθεί πλήρης μετατροπή του εξανθρακώματος, χαρακτηριστικό που καθιστά τις εγκαταστάσεις αυτές υποδεέστερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες ανακυκλοφορίας. Λόγω της άμεσης ανάμειξης των πλήρως και μερικώς αεριοποιημένων σωματιδίων καυσίμου, κάποια σωματίδια τυγχάνει να διαφύγουν της κλίνης πριν την πλήρη αεριοποίησή τους, παρασυρόμενα από το παραγόμενο αέριο σύνθεσης. Επιπλέον, ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων εντός της κλίνης δεν είναι ο επαρκής για την πλήρη μετατροπή του εξανθρακώματος, με αποτέλεσμα να μειώνεται ραγδαία η μετατροπή άνθρακα (Carbon Conversion Efficiency). Στα μειονεκτήματα αυτού του τύπου των αντιδραστήρων εντάσσεται και ο αργός ρυθμός διάχυσης του αέρα ή του οξυγόνου, με αποτέλεσμα να υποβοηθάται η αντίδραση της καύσης στη φάση των φυσαλίδων, μειώνοντας το βαθμό απόδοσης της αεριοποίησης.

Από την άλλη, επιτυγχάνεται πολύ μεγάλη ομοιομορφία θερμοκρασιών, λόγω της πλήρους ανάμειξης αδρανούς υλικού, καυσίμου και μέσου αεριοποίησης. [24] Οι θερμοκρασίες αυτές είναι ομοιόμορφες μεν, πολύ χαμηλές δε, αποτελώντας το λόγο της αδυναμίας των αντιδράσεων αεριοποίησης να φτάσουν σε χημική ισορροπία, οδηγώντας σε αυξημένα ποσοστά υδρογονανθράκων (ως επί το πλείστον πισσών και μεθανίου) στο παραγόμενο υλικό. [34]

1.5.3.2 Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας (Circulating Fluidized Bed Gasifiers)

Η ειδοποιός διαφορά ανάμεσα στους αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας (CFB) και τους αντίστοιχους αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης (BFB) είναι η ιδιαιτέρως αυξημένη ταχύτητα εισόδου του αέρα στους πρώτους, σημαντικά μεγαλύτερη από την τελική ταχύτητα για ρευστοποίηση. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την πολύ μικρή κοκκομετρία του αδρανούς υλικού, οδηγεί το τελευταίο σε παρασυρμό εκτός της κλίνης, μαζί με άκαυστα σωματίδια καυσίμου. [29]

Σε κάθε σύστημα ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας μπορούμε να διακρίνουμε συνοπτικά τις παρακάτω διατάξεις:

- ***Ανοδικός αγωγός (Riser):*** Είναι η σωλήνωση στην οποία πραγματοποιείται η κυρίως διεργασία της αεριοποίησης και χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλο λόγο μήκους – διαμέτρου. Ο πρωτεύων αέρας εισάγεται από την πυθμένα του ανοδικού αγωγού μέσω διασκορπιστή, ενώ η έγχυση του δευτερεύοντος αέρα γίνεται λίγο ψηλότερα, για την ολοκλήρωση της διεργασίας. [35] Τα ρευστοποιημένα σωματίδια κατανέμονται σε όλο τον όγκο του αγωγού, εξασφαλίζοντας έτσι στο παραγόμενο αέριο σύνθεσης, αλλά και στα λεπτόκοκκα σωματίδια, επαρκή χρόνο παραμονής στον αντιδραστήρα. Ανάλογα με το είδος του καυσίμου και την εφαρμογή, οι τυπικές απαντώμενες θερμοκρασίες σε έναν ανοδικό αγωγό κυμαίνονται μεταξύ 700 και $1000°C$. Λόγω των μεγάλων ταχυτήτων ρευστοποίησης, μη αμελητέο είναι το ποσοστό των σωματιδίων που διαφεύγουν του ανοδικού αγωγού και επιστρέφουν στη βάση του μέσω των κάτωθι διατάξεων ανακυκλοφορίας:

- ***Διαχωριστής στερεών – αερίων (Κυκλώνας):*** Το θερμό αέριο σύνθεσης, μετά τον ανοδικό αγωγό οδηγείται σε μια διάταξη διαχωρισμού στερεών – αερίων (συνηθέστερα κυκλώνα). Στη διάταξη αυτή δεσμεύεται η πλειονότητα των διαφυγόντων στερεών σωματιδίων καυσίμου και αδρανούς υλικού, τα οποία τελικά οδηγούνται στον καθοδικό αγωγό. Η συλλογή των στερεών αυτών σωματιδίων επιτρέπει την καλύτερη εκμετάλλευση του μη αντιδρώντος καυσίμου, αφού μέσω της ανακυκλοφορίας επιτυγχάνεται πολύ ικανοποιητικό ποσοστό μετατροπής άνθρακα. Πολλές είναι οι περιπτώσεις όπου ο κυκλώνας θερμαίνεται, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα συμπύκνωσης των υδρατμών και των πισσών που φέρει το μείγμα αερίου σύνθεσης και μέσου αεριοποίησης. Ο πυθμένας του κυκλώνα επικοινωνεί με τον καθοδικό αγωγό, με σκοπό την οδήγηση των σωματιδίων καυσίμου και αδρανούς υλικού ξανά στην κλίνη.
- ***Καθοδικός αγωγός (Downcomer):*** Ο ρόλος του καθοδικού αγωγού είναι να αποτελέσει τη συνδετική διάταξη μεταξύ του κυκλώνα και της συσκευής ανακυκλοφορίας στερεών σωματιδίων. Δεν απαιτούνται ειδικές επικρατούσες συνθήκες μέσα στον αγωγό, καθώς όπως προαναφέρθηκε, δεν πραγματοποιείται καμία διεργασία διαμέσω του, παρά μόνο η οδήγηση του μείγματος στερεών στη συσκευή ανακυκλοφορίας και μετέπειτα πίσω στην κλίνη. [31]
- ***Συσκευή ανακυκλοφορίας στερεών σωματιδίων:*** Οι δύο συνηθέστεροι τύποι είναι:
  - ***Βαλβίδα τύπου L (L-Valve):*** Η εν λόγω διάταξη χρησιμοποιείται ευρέως σε αντιδραστήρες αεριοποίησης ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας και όχι τόσο συχνά στους αντίστοιχους λέβητες. Θεωρείται ως η πιο απλή διάταξη, αποτελούμενη από έναν κυλινδρικό σωλήνα σχήματος L, που ενώνει τους δυο εκατέρωθεν αγωγούς (ανοδικό και καθοδικό). Το κατακόρυφο τμήμα της L-Valve συνδέεται με το κάτω μέρος του κυκλώνα ή, γενικά, με τη διαδρομή των στερεών σωματιδίων οποιασδήποτε διατιθέμενης διάταξης διαχωρισμού στερεών – αερίων, ενώ το οριζόντιο τμήμα της με την κλίνη (με συνδετική σωλήνωση στο κάτω μέρος του ανοδικού αγωγού). Προκειμένου να επιτευχθεί η αραίωση του μείγματος σωματιδίων και η τροφοδοσία του στην κατάλληλη κατάσταση ρευστοποίησης στην κλίνη, μικρή ποσότητα αέρα εγχέεται στο κάτω μέρος του κατακόρυφου τμήματος της L-Valve. Σε μεγάλες εμπορικές μονάδες, ίσως είναι απαραίτητη η τροφοδοσία αέρα περιμετρικά του κάτω μέρους του κατακόρυφου τμήματος, αλλά και κατά μήκος του οριζοντίου, για την επίτευξη της ομαλής ροής των στερεών. Η ροή των στερεών σωματιδίων επιτυγχάνεται μόνο πάνω από μια οριακή τιμή του ποσοστού τροφοδοτούμενου αέρα, χαρακτηριστικό που οι L-Valves έχουν από κοινού με τις Loop Seals.
  - ***Loop Seal:*** Είναι η κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούμενη διάταξη σε αντιδραστήρες αεριοποίησης ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας. Μια συνήθης διάταξη αυτού του είδους αποτελείται από δύο κυρίως τμήματα, το θάλαμο τροφοδοσίας (supply chamber) και το θάλαμο ανακύκλωσης/επανακυκλοφορίας (recycle chamber). Ο θάλαμος τροφοδοσίας αναλαμβάνει να τροφοδοτήσει με τα στερεά σωματίδια το θάλαμο ανακύκλωσης, ο οποίος με τη σειρά του μεταφέρει τα σωματίδια στον ανοδικό αγωγό, μέσω μιας σωλήνωσης ανακύκλωσης (recycle pipe). Ανάμεσα στους δυο αυτούς θαλάμους υπάρχει ένα φράγμα, το οποίο υπερχειλίζει και τα σωματίδια, λόγω βαρύτητας, οδηγούνται στη σωλήνωση

ανακύκλωσης ή απευθείας στην κλίνη. Ο ρόλος του θαλάμου ανακύκλωσης είναι να οδηγήσει τα στερεά σωματίδια σε κατάσταση ρευστοποίησης, για να τους επιτραπεί η ανοδική κίνηση που θα έκανε ένα υγρό ρεύμα. [35]

Εικόνα 3. *Πειραματική διάταξη αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας, όπως αυτός κατασκευάστηκε από τη W.A.T.T. A.E. και πριν τις εργασίες ολοκλήρωσης της κατασκευής (Κέντρο Διαλογής & Ανάκτησης Υλικών Κρωπίας).*

Συγκρίνοντας τώρα τις δύο παραπάνω διατάξεις αεριοποίησης, προκύπτουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα των αεριοποιητών ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας, έναντι αυτών αναβράζουσας κλίνης:

1. Οι αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας εκμεταλλεύονται πλήρως το ύψος των σωληνώσεων για διεπαφή μεταξύ στερεών σωματιδίων (καυσίμου και αδρανούς υλικού) και αερίου (αερίου σύνθεσης και μέσου αεριοποίησης), αφού δεν υπάρχει διακριτό όριο του ύψους της κλίνης και του χώρου που καταλαμβάνει αποκλειστικά και μόνο αέριο. Επιτυγχάνεται ***υψηλή αναμιξιμότητα*** μεταξύ των στερεών σωματιδίων και του μέσου αεριοποίησης, λόγω των υψηλών ταχυτήτων που επικρατούν κατά τη διεργασία. Το χαρακτηριστικό αυτό οδηγεί σε άριστη μετάδοση θερμότητας και – ως ένα βαθμό – αποτρέπει τη δημιουργία «θερμών περιοχών» (hot spots). [36]
2. Επιτρέπεται η ***τροφοδοσία σωματιδίων μεγαλύτερου εύρους κοκκομετρίας***, χωρίς το ρίσκο της απώλειάς τους λόγω παρασυρμού. Τα λεπτά σωματίδια που διαφεύγουν της κλίνης, επιστρέφουν σε αυτή μέσω του κυκλώνα, ενώ τα μεγαλύτερα παραμένουν στο μείγμα στερεού αερίου έως ότου συρρικνωθούν και ακολουθήσουν και αυτά αντίστοιχη διαδρομή με τα πιο λεπτόκοκκα.
3. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες διεργασίας επιτρέπουν την επίτευξη χημικής ισορροπίας κατά τη διεξαγωγή των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν μέρος κατά την αεριοποίηση. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ένα ***παραγόμενο αέριο ιδιαιτέρως καθαρό από πίσσες*** και βαρύτερους υδρογονάνθρακες, συγκριτικά με τις αναβράζουσες κλίνες και τους αντιδραστήρες πυρόλυσης. [37]
4. Μέσω της ανακυκλοφορίας επιτυγχάνεται υψηλότερος χρόνος παραμονής των σωματιδίων καυσίμου εντός της διεργασίας. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε υψηλότερη ποσοστιαία μετατροπή του άνθρακα, άρα σε ***υψηλότερο βαθμό απόδοσης*** της αεριοποίησης. Ο υψηλός αυτός χρόνος παραμονής εντός της κλίνης είναι ο κύριος λόγος που οι ρευστοποιημένες κλίνες ανακυκλοφορίας θεωρούνται ιδανικές για την επεξεργασία βιομάζας και γενικότερα καυσίμων με υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά. [31]
5. Λόγω των μεγάλων ταχυτήτων ($4 - 7\ m/s$) συγκριτικά με τις αντίστοιχες σε αναβράζουσες κλίνες ($1 - 1.5\ m/s$), για δεδομένο όγκο κλίνης και καύσιμο, ένας αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας αποδίδει αισθητά υψηλότερη θερμική ισχύ – σχεδόν πέντε φορές την ισχύ του αντιδραστήρα αναβράζουσας κλίνης. [35]

1.6 Αντιμετώπιση προβλημάτων

1.6.1 Δοκιμές επεξεργασίας αστικών σύμμεικτων απορριμμάτων

Ένας από τους στόχους της παρούσας εργασίας είναι ο σχολιασμός, η ανάλυση και τελικά η εύρεση και πρόταση - όπου αυτό καθίσταται δυνατόν - μεθόδων αντιμετώπισης των κύριων προβλημάτων που ανακύπτουν στις μονάδες επεξεργασίας απορριμμάτων.

Τα κυριότερα προβλήματα που ανακύπτουν σε μια πιλοτική ή βιομηχανική μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων είναι:

1. ***Ο σχηματισμός πισσών (tars)*** κατά την αεριοποίηση σε ρευστοποιημένες κλίνες,
2. ***Η βίαιη απώλεια της ρευστοποίησης (defluidization)***, λόγω της δημιουργίας συσσωματωμάτων ***(agglomeration)*** εντός της κλίνης,
3. ***Οι εκπομπές διοξινών και φουρανίων(PCDD/F),*** λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του καυσίμου σε χλώριο.

Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση, όπου αναλύθηκαν, συγκρίθηκαν και σχολιάσθηκαν οι δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί και δημοσιευθεί σε πρόσφατη βιβλιογραφία. Επιπλέον, παρουσιάστηκε το επίκεντρο της κάθε μελέτης και η επίδραση των μεταβολών των διαφόρων παραγόντων στην άμβλυνση ή την όξυνση των προβλημάτων αυτών.

Συγκεκριμένα, οι ***Ruokojarvi et al., 2001*** [38], επιχείρησαν να μειώσουν τις παραγόμενες εκπομπές ***διοξινών και φουρανίων (PCDD/F)*** από την επεξεργασία πελλετών RDF σε πιλοτική μονάδα αποτέφρωσης, με την ***προσθήκη ουρίας***[2] στην καύσιμη ύλη. Πιο αναλυτικά, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές με τρία διαφορετικά ποσοστά ουρίας ($0.1, 0.5$ και 1.0%) στο τροφοδοτούμενο καύσιμο, ώστε να προσδιοριστεί η επίδρασή της στην αναστολή των αντιδράσεων σχηματισμού διοξινών και φουρανίων.

Μέσα από αυτή τη μελέτη επιβεβαιώθηκε ότι αυξάνοντας το ποσοστό της ουρίας, μειώνονται ραγδαία οι συγκεντρώσεις PCDD/F στο καυσαέριο, αλλά και στην ιπτάμενη τέφρα. Όσο μεγαλύτερο το ποσοστό της ουρίας στις πελλέτες RDF, τόσο μεγαλύτερη και πιο αισθητή η μείωση των εκπομπών PCDD/F, έχοντας μάλιστα τον ίδιο αντίκτυπο στις εκπομπές χλωροφαινολών. Τονίζεται, επίσης, ότι η ουρία δεν είναι η μόνη που δρα ανασταλτικά στο σχηματισμό διοξινών και φουρανίων. Τον ίδιο ρόλο μπορούν να επιτελέσουν και τα προϊόντα αποσύνθεσής της, δρώντας ανασταλτικά στις αντιδράσεις σχηματισμού των εν λόγω αρωματικών και πολυχλωριωμένων επιβλαβών ενώσεων, στο στάδιο πριν το σχηματισμό των χλωροφαινολών.

Οι ***Samaras et al., 2001*** [39] αποτέφρωσαν RDF, προερχόμενο από επεξεργασμένα αστικά απορρίμματα MSW, σε μονάδα εργαστηριακής κλίμακας οριζοντίου τύπου. Στα πλαίσια της εργασίας τους έγιναν δοκιμές μείωσης των εκπομπών διοξινών και φουρανίων μέσω της προσθήκης ουρίας στο χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Η προστιθέμενη ουρία άλλοτε είχε τη μορφή σκόνης και άλλοτε τη μορφή υδατικού διαλύματος. Μελετήθηκε η επίδραση της διαφορετικής φάσης της ουρίας στην αναστολή των αντιδράσεων σχηματισμού τους.

Τελικά, όπως και στη μελέτη των ***Ruokojarvi et al., 2001***, η προσθήκη ουρίας στο καύσιμο πριν τη διεργασία της καύσης φαίνεται έντονα αποτελεσματική στον περιορισμό της συγκέντρωσης των PCDD/F στο παραγόμενο καυσαέριο. Επιπροσθέτως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η μορφή της προστιθέμενης ουρίας δεν επιτελεί κανέναν ουσιώδη ρόλο στην αποφυγή του σχηματισμού διοξινών και φουρανίων, ενώ η διεξαγωγή της διεργασίας παρουσία ή όχι ποσοστού ουρίας δείχνει να μην επηρεάζει της συγκεντρώσεις των αντίστοιχων ισομερών.

---

[2] Οργανική ένωση με χημικό τύπο $CO(NH_2)_2$, με ικανότητα αντίδρασης με το χλώριο και δέσμευσής του.

Οι ***Cioni et al.,2001*** [40] πραγματοποίησαν αεριοποίηση RDF με αέρα σε ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας, με υλικό κλίνης άμμο ή/και δολομίτη. Προέβησαν σε πειραματικές δοκιμές με δυο διαφορετικής σύστασης RDF,

- προερχόμενο από MSW σε μορφή πελλετών και
- προερχόμενο από χαρτοπολτό και βιομηχανικά πλαστικά κατάλοιπα σε μορφή πελλετών και χνουδιού (fluff).

Η μελέτη τους επικεντρώθηκε στη σύσταση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης (syngas), των πισσών, της τέφρας και τις μεταβολές των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών ανάλογα με τη σύσταση του καυσίμου. Το παραγόμενο ακατέργαστο αέριο σύνθεσης καίγεται σε λέβητα για την παραγωγή ατμού, ο οποίος τελικά θα οδηγηθεί σε στρόβιλο ατμού συμπύκνωσης.

Βρέθηκε ότι το παραγόμενο αέριο σύνθεσης εμπεριέχει μεγάλα ποσοστά πισσών και σωματιδίων εξανθρακώματος, στα οποία οφείλει ως και πάνω από το ήμισυ της θερμογόνου ικανότητάς του. Μικρά είναι τα ποσοστά υδροχλωρίου (HCl) και υδρόθειου (H_2S) που μετρήθηκαν στην τέφρα πυθμένα μετά το πέρας της αεριοποίησης. Από την άλλη, μόνο $20-30\%$ των αλκαλικών μετάλλων απορρίπτονται από τον αεριοποιητή και τον κυκλώνα, γεγονός που δυσχεραίνει τη διεργασία της αεριοποίησης, καθώς το syngas εμπεριέχει ποσότητες αλκαλίων, ικανές να προκαλέσουν φαινόμενα ρύπανσης και επικαθήσεων στο θάλαμο καύσης και τις σωληνώσεις. Τα βαρέα μέταλλα υψηλής πτητικότητας, όπως Hg, Cd και Pb εμπεριέχονται κατά 100% στο παραγόμενο syngas.

Την αεριοποίηση RDF με ατμό μελέτησαν οι ***Dalai et al., 2009*** [41]. Χρησιμοποίησαν αντιδραστήρα σταθερής κλίνης και δυο διαφορετικής σύστασης RDF και ανέλυσαν την επίδραση της θερμοκρασίας αεριοποίησης, του λόγου ατμού/RDF και της σύστασης του καυσίμου στις προκύπτουσες συγκεντρώσεις H_2 και CO, την τελική παροχή αερίου σύνθεσης, αλλά και στη θερμογόνο του ικανότητα.

Προσεγγιστική και στοιχειακή ανάλυση του καυσίμου καταλήγουν σε κοινά συμπεράσματα, ότι το υπό επεξεργασία καύσιμο αποτελείται σχεδόν ολοκληρωτικά από υδρογονάνθρακες. Μέσω της θερμικής διάσπασης του RDF, επιβεβαιώνεται η περιεκτικότητά του σε κυτταρίνη, ημικυτταρίνη, πλαστικά και ένα ποσοστό ανοργάνων. Η διεξαχθείσα σειρά πειραμάτων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της θερμοκρασίας της διεργασίας αυξάνει τα ποσοστά H_2 και CO στο παραγόμενο αέριο σύνθεσης, ενώ δεν έχει την ίδια ωφέλιμη επίδραση στη θερμογόνο ικανότητα, η οποία μειώνεται αισθητά με κάθε αύξηση της θερμοκρασίας. Προφανώς, στην αύξηση των ποσοστών H_2 και CO πρωταρχικό ρόλο παίζει και η χρήση καυσίμου πλούσιου σε άνθρακα και υδρογόνο. Η ταχύτητα του παρεχόμενου ατμού δε δείχνει να επηρεάζει αισθητά την παραγωγή αερίου, ούτε τη σύστασή του.

Σημαντική επιρροή στην παραγωγή αερίου σύνθεσης δείχνει να έχει ο λόγος ατμού/RDF, ο οποίος μάλιστα βελτιστοποιεί την παραγωγή όταν πάρει την τιμή 2, παράλληλα με θερμοκρασία διεργασίας τους $725°C$. Ως προς το εξανθράκωμα, η στοιχειακή ανάλυση υποδεικνύει μεγαλύτερα ποσοστά άνθρακα στο δείγμα εξανθρακώματος που λαμβάνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες και υψηλότερο λόγο ατμού/RDF.

Η πρόσφατη μελέτη των ***Zhou et al., 2014*** [42] αναπτύσσει τη διερεύνηση αεριοποίησης αστικών απορριμμάτων με ατμό σε αεριοποιητή σταθερής κλίνης, με την προσθήκη οξειδίου του ασβεστίου (CaO) στον αντιδραστήρα. Αναλύθηκε η επίδραση του CaO στα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και στα χαρακτηριστικά απομάκρυνσης των πτητικών από το εισαγόμενο καύσιμο. Επιπλέον, μελετήθηκε η ικανότητα του CaO να προσροφήσει το CO_2 ***(ασβεστοποίηση)***, η αεριοποίηση του εξανθρακώματος υπό την παρουσία ατμού και η σύσταση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης. Τέλος, αναλύθηκε ο ρόλος των παραγόντων που επηρεάζουν την προαναφερθείσα σύσταση, δηλαδή οι

μεταβολές του λόγου ατμού/RDF, του ποσοστού του προστιθέμενου CaO και της θερμοκρασίας.

Μέσα από την εν λόγω μελέτη, εξήχθησαν τα κάτωθι συμπεράσματα:

1. Το εμπεριεχόμενο στο καύσιμο πλαστικό συρρικνώνεται αισθητά κατά την αποσύνθεσή του στις υψηλές θερμοκρασίες. Το προστιθέμενο CaO βελτιώνει αισθητά την ποιότητα της ανάμειξης του μείγματος.
2. Η ικανότητα του CaO για προσρόφηση του CO_2 φαίνεται ικανοποιητική, οδηγώντας σε syngas υψηλής περιεκτικότητας σε υδρογόνο, συνεχώς αυξανόμενης με την αύξηση του λόγου CaO/καυσίμου.
3. Οι θερμοκρασίες αποσύνθεσης των $Ca(OH)_2$ και $CaCO_3$ ποικίλουν αισθητά σε περιβάλλον ατμού, εν αντιθέσει με την αντίστοιχη περίπτωση χρήσης αδρανούς αερίου ως μέσου αεριοποίησης. Οι θερμοκρασίες αυτές κρίνονται, παράλληλα, σημαντικές για τις αντιδράσεις προσρόφησης CO_2 και ασβεστοποίησης.
4. Η καταλυτική επίδραση του CaO στον υψηλότερο ρυθμό παραγωγής syngas συγκριτικά με τη θερμική πυρόλυση πολυολεφίνων επιβεβαιώνεται υπό συνθήκες ιδιαίτερα υψηλής θερμοκρασίας και επιμήκυνση του χρόνου παραμονής στον αντιδραστήρα.
5. Μετά την κοινή πυρόλυση καυσίμου και CaO επιτυγχάνεται καλύτερη διασπορά του ασβεστίου και κινητικότητα του εξανθρακώματος. Η μοριακή αναλογία $H2/(2CO_2 + CO)$ στο στάδιο της αεριοποίησης του εξανθρακώματος αυξάνεται με την προσθήκη CaO, γεγονός που μπορεί εξηγηθεί μέσω της ύπαρξης εναπομείναντων υδρογονανθράκων στην επιφάνεια των ατόμων ασβεστίου.

Οι ***Borgianni et al., 2002*** [43], ανέμειξαν το RDF με PVC, με σκοπό την αποφυγή του σχηματισμού συσσωματωμάτων και επικαθήσεων στην κλίνη, φαινόμενα που αποτελούν ανεπιθύμητη συνέπεια της αεριοποίησης «καθαρού» RDF. Προέβησαν σε αεριοποίηση του μείγματος, χρησιμοποιώντας ως οξειδωτικό μέσο μείγμα οξυγόνου και ατμού. Η πειραματική εγκατάσταση απαρτιζόταν από δύο βαθμίδες, πραγματοποιώντας στην πρώτη το κύριο τμήμα της αεριοποίησης και στη δεύτερη το δευτερεύον, με τη συμμετοχή αλουμίνας. Τα αποτελέσματα της αεριοποίησης του μείγματος συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα της αεριοποίησης RDF, ώστε να προσδιοριστούν οι μεταβολές των συγκεντρώσεων των μη αντιδρώντων υλικών σε κάθε μεταβολή της παροχής του μείγματος οξυγόνου-ατμού και της θερμοκρασίας της πρώτης βαθμίδας. Τέλος, πραγματοποιήθηκε δοκιμή αεριοποίησης RDF-PVC με προσθήκη Na_2CO_3, CaO ή $Ca(OH)_2$ στο μείγμα, με σκοπό να αξιολογηθεί η επίδρασή τους στο ποσοστό μετατροπής άνθρακα και στην αναστολή σχηματισμού χλωριούχων και θειούχων ενώσεων.

Παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη Na_2CO_3, εν αντιθέσει με τις άλλες δυο ενώσεις ασβεστίου που υπόκεινται δοκιμής, είναι αποτελεσματική στην εξάλειψη χλωρίου, εμπεριεχόμενου σε μείγμα RDF και PVC, στις περιπτώσεις που η περιεκτικότητα σε PVC ξεπερνά το 20%. Επίσης, η προσθήκη Na_2CO_3 και η αύξηση της θερμοκρασίας της πρώτης βαθμίδας μειώνουν αισθητά την ποσότητα του άκαυστου εξανθρακώματος, ενώ παράλληλα η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας της δεύτερης βαθμίδας στους 1000°C αρκεί για την αποφυγή της συμπύκνωσης των πισσών, συμπεράσματα τα οποία επιβεβαιώνονται και μέσω θερμοδυναμικής προσομοίωσης. Εφόσον, αναλύοντας το αέριο σύνθεσης, καταγράφεται περιεκτικότητα σε ρυπογόνους ενώσεις (θειούχες και χλωριούχες) χαμηλότερη από το όριο που ορίζει ο εγχώριος Ιταλικός νόμος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή θέρμανσης.

Προκειμένου να αναλυθεί η συμπεριφορά της μεικτής καύσης RDF - πριονιδιού και η σύσταση των ρυπαντών που εκπέμπονται από αυτήν, οι ***Duan et al., 2013*** [44], πραγματοποίησαν σειρά πειραμάτων καύσης του παραπάνω μείγματος σε πιλοτική μονάδα

στροβιλίζουσας ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας (Vortexing Fluidized Bed). Συγκεκριμένα σε αυτή τη μελέτη αναλύθηκαν παράγοντες όπως η θερμοκρασία της κλίνης, ο λόγος περίσσειας οξυγόνου και η στοιχειομετρική αναλογία οξυγόνου εντός της κλίνης και η επιρροή τους στις εκπομπές ρυπαντών.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, λόγω της διαφορετικής δομής και κοκκομετρίας των σωματιδίων, διαφορετικές είναι και οι περιοχές καύσης τους: τα σωματίδια του πριονιδιού υπόκεινται σε πρωτεύουσα καύση στη «ζώνη εκτόξευσης» (splashing zone), ενώ τα σωματίδια του RDF στη «ζώνη κλίνης» (bed zone). Τα θερμοκρασιακά επίπεδα κατά την καύση RDF είναι χαμηλότερα και η κατανομή της θερμοκρασίας εντός της κλίνης πιο ομοιόμορφη, συγκριτικά με την καύση πριονιδιού. Κατά την καύση και των δυο καυσίμων, το ποσοστό του παραγόμενου CO μειώνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας κλίνης, του λόγου περίσσειας οξυγόνου και της στοιχειομετρικής αναλογίας οξυγόνου εντός της κλίνης. Σε αντίθεση με το RDF, το πριονίδι αδυνατεί να ικανοποιήσει τους νομοθετικούς περιορισμούς ως προς τα όρια εκπομπών CO, ενώ εφαρμόζεται και καύση με ανακυκλοφορία του καυσαερίου, με σκοπό τη μείωση των NO_x. Τα τελευταία, βέβαια, δείχνουν να πληρούν και με τα δύο υλικά τις νομοθετικές προϋποθέσεις.

Σε αντίθεση με τις παραπάνω πειραματικές διαδικασίες, οι ***Galvagno et al., 2009*** [45], δεν προχώρησαν σε μεικτή αεριοποίηση, αλλά συνέκριναν την αεριοποίηση του RDF με ατμό σε αντιδραστήρα περιστροφικού κλιβάνου, με τις αντίστοιχες των ελαστικών αυτοκινήτου και των υπολειμμάτων ξύλου λεύκας, προσθέτοντας στον αντιδραστήρα ανακρυσταλλωμένη αλουμίνα (Al_2O_3). Η σύγκριση επικεντρώθηκε στο ποσοστό πτητικών που ανιχνεύθηκε κατά την πυρόλυση, στο ποσοστό του σταθερού άνθρακα στο εξανθράκωμα μετά το πέρας της αντίδρασης και στη σύσταση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης.
Οι συνθήκες αεριοποίησης διατηρήθηκαν ακριβώς ίδιες και για τα τρία υπό εξέταση υλικά, ώστε να μπορέσει να γίνει ακριβής σύγκριση των αποτελεσμάτων. Φαίνεται τελικά ότι η παραγωγή και η σύσταση των παραγώγων εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από το είδος του υπό επεξεργασία καυσίμου, ενώ η ποσότητα παραγόμενου αερίου σύνθεσης είναι συγκρίσιμη για όλα τα είδη καυσίμου.

Τα χαρακτηριστικά του εξανθρακώματος που προκύπτει από τα ελαστικά αυτοκινήτου και το ξύλο λεύκας οδηγούν στη σκέψη χρήσης τους ως ακατέργαστα υλικά σε μεταγενέστερες διεργασίες. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται παραγωγή αερίου σύνθεσης με ικανοποιητικά ποσοστά υδρογόνου, αλλά και καλής ποιότητας εξανθράκωμα. Από την άλλη, στο εξανθράκωμα το προερχόμενο από RDF ανιχνεύθηκε πολύ υψηλό ποσοστό τέφρας, γεγονός που οδήγησε στην εφαρμογή των κατάλληλων συνθηκών για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής syngas.

Ως προς την τελική σύσταση του αερίου σύνθεσης, τα ελαστικά εμφανίζουν πολύ υψηλά ποσοστά σε H_2 και υδρογονάνθρακες και αμελητέα ποσοστά οξυγόνου, μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα. Την ακριβώς αντίθετη εικόνα παρουσιάζει το αέριο σύνθεσης από ξύλο λεύκας, εμφανίζοντας τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις οξυγονούχων ενώσεων από όλες τις περιπτώσεις. Κατά την αεριοποίηση RDF όλα τα συστατικά του αερίου σύνθεσης εμφανίζουν ενδιάμεσες τιμές. Η θερμογόνος ικανότητα των παραγόμενων αερίων από όλα τα καύσιμα είναι σχετικά χαμηλή. Το αέριο σύνθεσης που παράγεται από ελαστικά είναι και το μοναδικό που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί ως πηγή ενέργειας.

Οι ***Chiemchaisri et al., 2010*** [46] προχώρησαν σε μελέτη της αεριοποίησης με αέρα σε πλαστικό, ανακτηθέντος από χωματερές (πλαστικό RDF), σε αντιδραστήρα σταθερής κλίνης με καθοδική ροή. Το καύσιμο χρησιμοποιήθηκε σε μορφή πελλετών. Η ανάλυση επικεντρώθηκε στην επίδραση των ετών εναπόθεσης του καυσίμου στη χωματερή στη

σύστασή του. Επιπλέον, μελετήθηκε η συμπεριφορά του παραγόμενου αερίου σύνθεσης ως προς τη σύσταση, τη θερμογόνο ικανότητα και το ρυθμό παραγωγής σε κάθε μεταβολή της σύστασης των πελλετών καυσίμου και της παροχής αέρα.

Ένα από τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την εν λόγω μελέτη είναι η μείωση του ποσοστού πλαστικών στα απορρίμματα, αναλογικά με το χρόνο εναπόθεσής τους, χωρίς όμως να είναι ξεκάθαρη η γενικότερη σύνδεση των ετών εναπόθεσης με τη σύσταση του καυσίμου. Το παραγόμενο αέριο εμπεριέχει ως επί το πλείστον CO_2 και CO και σε εμφανώς μικρότερες ποσότητες CH_4 και H_2. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της παροχής του αέρα οδηγεί σε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας εντός του αεριοποιητή περί τους $100°\ C$, σε μια μικρή αύξηση της θερμογόνου ικανότητας, καθώς και σε αύξηση της περιεκτικότητας του αερίου σε CO και CH_4. Επιπλέον, ο ρυθμός παραγωγής αερίου σύνθεσης και ο ψυχρός βαθμός απόδοσης [3] σχεδόν διπλασιάζονται.

Όλα τα δείγματα καυσίμου αποδείχθηκαν κατάλληλα για ενεργειακή αξιοποίηση σύμφωνα με τα χημικά χαρακτηριστικά τους και εφόσον το ποσοστό χλωρίου και θείου είναι ελεγχόμενο και δεν ξεπερνά τα επιβεβλημένα ευρωπαϊκά όρια.

Χρησιμοποιώντας όμοιου τύπου αντιδραστήρα, οι ***He et al., 2009*** [47] μελέτησαν το ρόλο του ατμού ως οξειδωτικό μέσο κατά την αεριοποίηση αστικών σύμμεικτων απορριμμάτων, καθώς και την καταλυτική συμβολή του δολομίτη ως αδρανές υλικό στη σύσταση του προκύπτοντος αερίου σύνθεσης.

Η έκβαση των πειραματικών δοκιμών κατέδειξε τον πυρωμένο δολομίτη ως ενεργό καταλύτη κατά την αεριοποίηση με ατμό, ενώ ο ρόλος του ατμού ήταν να προωθήσει την παραγωγή H_2 και να βελτιώσει το ποσοστό μετατροπής άνθρακα. Εξετάζοντας την επιρροή της θερμοκρασίας στο παραγόμενο αέριο σύνθεσης, παρατηρήθηκε ότι κάθε αύξησή της οδηγεί σε αύξηση του ποσοστού υδρογόνου και μείωση του ποσοστού CO στο αέριο σύνθεσης, μείωση των πισσών και του εξανθρακώματος. Λόγω της αύξησης του H_2, θα περιμέναμε η θερμογόνος ικανότητα να αυξάνεται. Αντ' αυτού παρατηρείται μια μικρή μείωσή της, καθώς ταυτόχρονα με την αύξηση του H_2, μειώνονται αισθητά τα ποσοστά CO και CH_4 στο παραγόμενο αέριο. Ο πυρωμένος δολομίτης είχε εξαιρετική καταλυτική συμπεριφορά, μειώνοντας αισθητά τα ποσοστά παραγωγής πισσών και επιτυγχάνοντας την εξάλειψή τους συγκεκριμένα σε θερμοκρασίες 850 - 950°C. Όσον αφορά το εξανθράκωμα άνω των 950°C, στο μεγαλύτερο μέρος του αποτελείται από τέφρα, ενώ αμελητέα είναι τα ποσοστά υδρογόνου, αζώτου και θείου, οπότε και μπορεί να θεωρηθεί ως αμιγώς αδρανές υλικό. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η παραγωγή αερίου σύνθεσης πλουσίου σε υδρογόνο είναι εύκολα επιτεύξιμη μέσω της αεριοποίησης MSW με ατμό και της προσθήκης δολομίτη σε ρόλο καταλύτη.

Τα άνωθι συμπεράσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της καταλυτικής πυρόλυσης, καταδεικνύοντας την πλεονεκτική θέση της διεργασίας της αεριοποίησης με ατμό ως προς την παραγωγή τέφρας και πισσών, που σχεδόν εξαλείφθηκε. Τονίζεται, βέβαια, ότι προτιμάται η εφαρμογή της πυρόλυσης, όταν είναι επιθυμητή η παραγωγή syngas με υψηλή θερμογόνο ικανότητα.

Παρακολουθώντας τη συμπεριφορά των ΑΣΑ στις διάφορες διεργασίες και στην προσπάθεια περιορισμού του σχηματισμού διοξινών και φουρανίων, οι ***H. Zhang et al., 2008*** [48] πραγματοποίησαν αποτέφρωση ΑΣΑ σε αποτεφρωτήρα παλινδρομικής εσχάρας δυο βαθμίδων. Σε μια σειρά πειραμάτων, μελετήθηκε ο ρόλος της θερμοκρασίας και του

[3] Cold Gas Efficiency % $= \frac{LHV_{syngas}}{LHV_{RDF}}$

επιπέδου του εγχεόμενου οξυγόνου στην παραγωγή PCDD/F, καθώς και ο ανασχηματισμός τους κατά τη διέλευσή τους από τα συστήματα καθαρισμού.[4]

Παρατηρείται ότι οι συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας και αυξημένης παροχής οξυγόνου δεν ευνοούν τη μείωση του σχηματισμού PCDD/F, αντιθέτως οδηγούν σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Περνώντας το καυσαέριο από την ημίσκληρη πλυντρίδα και τον κυκλώνα, η συγκέντρωση των χαμηλότερων χλωριωμένων διοξινών και φουρανίων τυγχάνει αισθητής αύξησης, γεγονός που δεν παρατηρείται κατά τη διέλευση του καυσαερίου από τα σακκόφιλτρα. Το τελικό συμπέρασμα αυτής της μελέτης είναι η ανάγκη της διατήρησης της θερμοκρασίας στα συστήματα καθαρισμού του αερίου σε επίπεδα περί των 200°, ώστε να αποφεύγεται ο ανεπιθύμητος σχηματισμός PCDD/F λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών.

Προκειμένου να βρεθεί κάποια λύση στο πρόβλημα σχηματισμού πισσών, οι ***Pinto et al., 2009*** [49] επιχείρησαν τη μείωσή τους μέσω μεικτής αεριοποίησης απορριμμάτων με άνθρακα σε πιλοτική μονάδα, με την προσθήκη καταλυτών. Συγκεκριμένα, η εγκατάσταση αποτελούνταν από τη ρευστοποιημένη κλίνη με πυριτική άμμο και από δυο βαθμίδες αντιδραστήρα σταθερής κλίνης, με δολομίτη και νικελιούχους ενώσεις στο ρόλο των καταλυτών.

Στην εν λόγω διάταξη επιβεβαιώθηκε ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση ενός καυσίμου με άλλο, χωρίς να απαιτούνται αλλαγές στα τμήματα διεξαγωγής της διεργασίας. Η υπεροχή του ποσοστού του άνθρακα συγκριτικά με τα απόβλητα καθιστά πιο εύκολη την ολοκλήρωση της διεργασίας και τον έλεγχό της, καθώς ο άνθρακας προσφέρει στο σύστημα σταθερότητα κατά την αεριοποίηση. Επίσης, το μεγαλύτερο ποσοστό άνθρακα στο μείγμα οδηγεί σε μικρότερα ποσοστά πισσών και υδρογονανθράκων στο τελικό αέριο σύνθεσης. Σαφής μέσα από τα αποτελέσματα έγινε και η εξάρτηση της σύστασης του παραγόμενου καυσίμου από το είδος και την ποιότητα του άνθρακα και των αποβλήτων. Τα υψηλά ποσοστά των πισσών που προκύπτουν υποδεικνύουν ότι επιβάλλεται καταλυτικός καθαρισμός του αερίου. Παρατηρήθηκε επίσης αλλαγή στη σύσταση του αερίου μετά από κάθε αντιδραστήρα πυρόλυσης των πισσών και συγκεκριμένα αύξηση των H_2 και CO_2 και ταυτόχρονη μείωση του CO. Τα υψηλότερα ποσοστά υδρογόνου και τα χαμηλότερα ποσοστά υδρογονανθράκων ανιχνεύθηκαν μετά τον αντιδραστήρα που εμπεριέχει Ni ως καταλύτη. Το ποσοστό των πισσών φαίνεται να μειώνεται μετά από κάθε καταλυτικό αντιδραστήρα. Τέλος, σημειώνεται ότι ο αντιδραστήρας δολομίτη μπορεί να παραλειφθεί, όταν η περιεκτικότητα του αερίου σε θείο και αλογόνα είναι αρκετά χαμηλή, ώστε να μην επηρεάζει τη δραστηριότητα και τη διάρκεια ζωής των άλλων καταλυτών που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό των πισσών.

Η μείωση των παραγόμενων πισσών από την επεξεργασία αποβλήτων ήταν το θέμα που απασχόλησε και τους ***Cho et al., 2013*** [50], οι οποίοι όμως εφάρμοσαν αεριοποίηση μεικτών πλαστικών απορριμμάτων (Mixed Plastic Waste) σε ρευστοποιημένη κλίνη δύο βαθμίδων. Το αδρανές υλικό της πρώτης βαθμίδας ήταν ο ολιβίνης, ενώ στη δεύτερη έγινε προσθήκη ενεργού άνθρακα, με σκοπό την προώθηση της πυρόλυσης των πισσών. Αντικείμενα της εν λόγω μελέτης ήταν η επίδραση της προσθήκης ενεργού άνθρακα και της προστιθέμενης ποσότητάς του στις τελικές καταμετρούμενες συγκεντρώσεις πισσών. Επιπροσθέτως, μελετήθηκε ο ρόλος των αυξομειώσεων του λόγου αέρα/καυσίμου στη σύσταση του τελικού αερίου σύνθεσης, τη θερμογόνο ικανότητά του και τη συγκέντρωση των πισσών στο τελικό προϊόν.

---

[4] Ο ανασχηματισμός ευνοείται λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στο σύστημα καθαρισμού του αερίου.

Ως προς τις πίσσες, παρατηρήθηκε ότι μπορεί να σημειωθεί απομάκρυνσή τους ως και 98%. Κατά τη διεργασία με την προσθήκη ενεργού άνθρακα παράγεται αέριο σύνθεσης πλούσιο σε H_2, όμως η παράταση της διεργασίας οδηγεί σε απενεργοποίηση του άνθρακα. Η χρήση αγκιστροειδούς διασκορπιστή αέρα (Hook-Type distributor), ατμού και συρμάτινου καλαθιού (wire mesh basket) για την τροφοδοσία του ενεργού άνθρακα, συνέβαλαν δραστικά στη μείωση σχηματισμού κωκ στο διασκορπιστή, αλλά και στην απομάκρυνση όσου τελικά κατάφερε να σχηματιστεί. Το εμπεριεχόμενο χλώριο στο καύσιμο τροφοδοσίας ανιχνεύθηκε στο εξανθράκωμα και στο υγρό συμπύκνωμα και μπόρεσε να απομονωθεί σχετικά εύκολα από το παραγόμενο αέριο σύνθεσης. Εν κατακλείδι, ο συνδυασμός ολιβίνη και ενεργού άνθρακα σε διβάθμια ρευστοποιημένη κλίνη δύναται να εξασφαλίσει παραγωγή syngas ιδιαιτέρως καθαρού από πίσσες και χλώριο.

Το ρόλο του πληρωτικού υλικού και του λόγου αέρα/καυσίμου στην αποφυγή σχηματισμού πισσών και στη σύσταση του παραγόμενου αερίου ανέλυσαν οι ***Arena et al., 2010*** [51], αεριοποιώντας με αέρα καύσιμο προερχόμενο από απορρίμματα (Waste Derived Fuel) σε αντιδραστήρα αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης. Έγιναν δοκιμές με πέντε διαφορετικής σύστασης καύσιμα, ολιβίνη, δολομίτη και χαλαζιακή άμμο στη θέση του αδρανούς υλικού και με μεταβαλλόμενες τιμές του λόγου αέρα/καυσίμου.

Ένα από τα κύρια οφέλη αυτής της μελέτης ήταν προσδιορισμός ενός φυσικού υλικού, του ολιβίνη, ως βέλτιστο αδρανές υλικό της κλίνης, με καταλυτική δράση στις αντιδράσεις πυρόλυσης των πισσών. Μέσω της χρήσης ολιβίνη, η συγκέντρωση των πισσών στο τελικό προϊόν μειώνεται δραστικά, ακόμα και σε μη ανιχνεύσιμα επίπεδα, με ταυτόχρονη αύξηση του H_2 και μείωση του CO στο αέριο σύνθεσης. Στα πλεονεκτήματα χρήσης ολιβίνη συγκαταλέγεται η χαμηλή τιμή του, όπως επίσης και η αντοχή του στη φθορά εντός της κλίνης (attrition).

Οι ***Lin et al., 2009*** [52] διεξήγαγαν σειρά πειραμάτων με σκοπό την παράταση του χρόνου εμφάνισης της βίαιης απώλειας ρευστοποίησης, κατά την αποτέφρωση εικονικού καυσίμου σε αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη, με πυριτική άμμο ως αδρανές υλικό. Για το λόγο αυτό, προστέθηκαν στο μείγμα αλκάλια και αλκαλικές γαίες στη μορφή νιτρικών ενώσεων. Μετά την προσθήκη, παρατηρήθηκε αύξηση του χρόνου απορρευστοποίησης και αναστολή της δημιουργίας συσσωματωμάτων με κάθε αύξηση των συγκεντρώσεων μαγνησίου και ασβεστίου στο μείγμα.

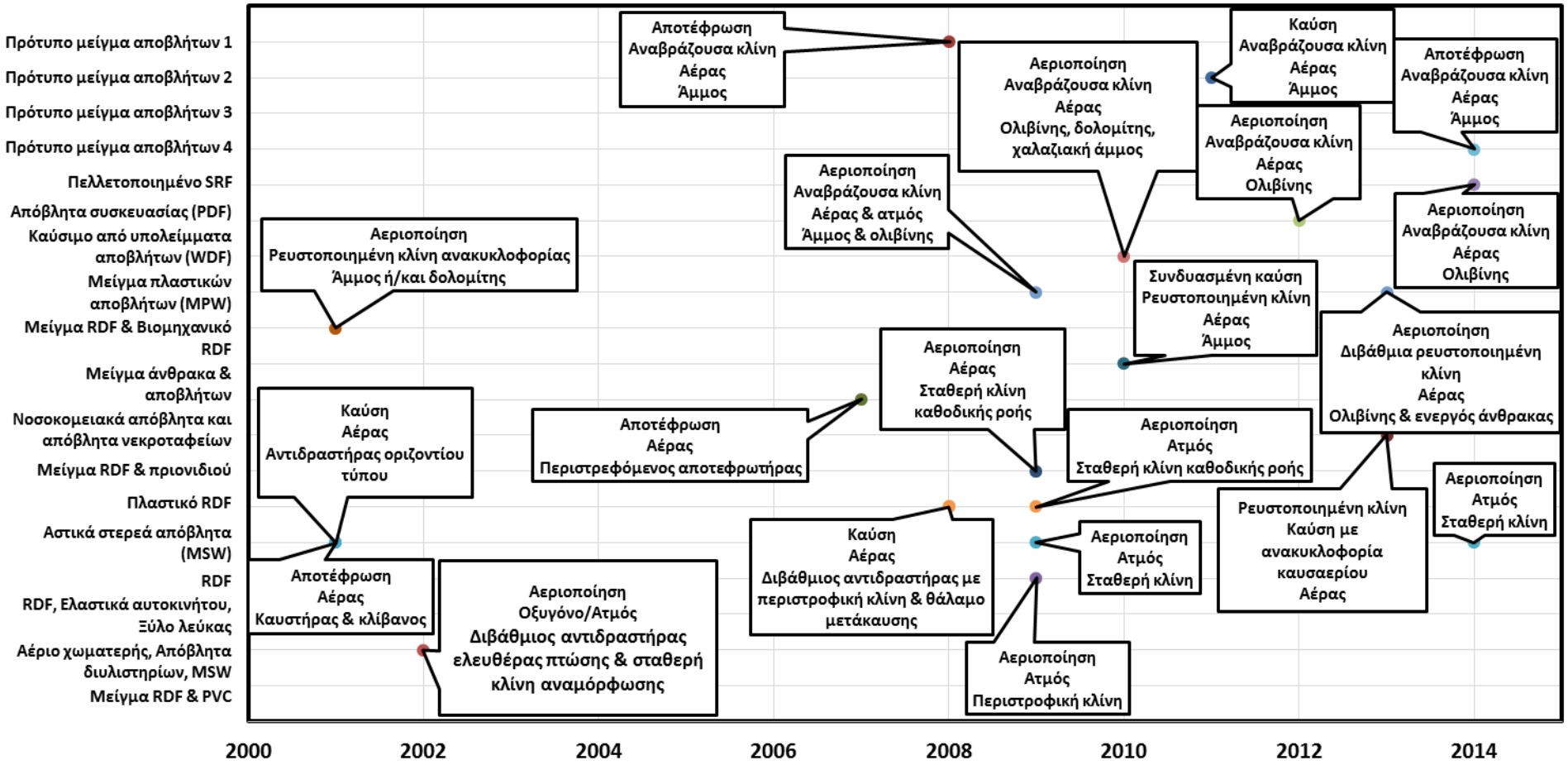
Μέσω των αποτελεσμάτων, αποδείχθηκε ότι ο χρόνος απορρευστοποίησης μειώνεται δραστικά με κάθε αύξηση της συγκέντρωσης νατρίου στο μείγμα, ενώ αντίθετη επίδραση στο χρόνο απορρευστοποίησης έχει η προσθήκη Mg και Ca. Με κάθε αύξηση, λοιπόν, του λόγου Na/Mg ή Na/Ca, μειώνεται σταδιακά ο χρόνος απορρευστοποίησης, χωρίς όμως η επίδρασή τους να φαίνεται ιδιαιτέρως σημαντική στην επιμήκυνση της διεργασίας. Αντιθέτως, ανέλπιστα θετική επίδραση στην αύξηση του χρόνου της διεργασίας δείχνει να έχει η μείωση της θερμοκρασίας, αφού σε υψηλές θερμοκρασίες, της τάξης των $900°C$, δείχνει να απενεργοποιείται η ανασταλτική δράση των προστιθέμενων μετάλλων. Επομένως, όταν γίνεται χρήση Mg και Ca για την αποφυγή φαινομένων βίαιης απώλειας ρευστοποίησης και δημιουργίας συσσωματωμάτων, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν πλην των συγκεντρώσεών τους, η συγκέντρωση Na στο μείγμα, καθώς και το επίπεδο της θερμοκρασίας.

Σε επόμενη σειρά πειραμάτων, οι ***Kuo et al., 2011*** [53] μελέτησαν επιπλέον την επίδραση της προσθήκης αλουμίνας στα παραπάνω φαινόμενα, καταλήγοντας στο

συμπέρασμα ότι η παρουσία της έχει την πλέον ανασταλτική δράση, συγκριτικά με τις ενώσεις μαγνησίου και ασβεστίου.

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, αύξηση στο ποσοστό του νατρίου στο μείγμα, οδηγεί σε σχηματισμό ενώσεων χαμηλού σημείου τήξης εντός της κλίνης, με αποτέλεσμα να μειώνεται ραγδαία ο χρόνος ομαλής λειτουργίας. Συγκρίνοντας το χρόνο απορρευστοποίησης κατά την αεριοποίηση με αέρα και κατά την αποτέφρωση, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι οι εύτηκτες ενώσεις, λχ. Na_2O, δείχνουν να σχηματίζονται πιο εύκολα κατά τη δεύτερη διεργασία. Επιπροσθέτως, ο χρόνος απορρευστοποίησης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και της ποσότητας αδρανούς υλικού στην κλίνη, ενώ ο λόγος αέρα/καυσίμου δε φαίνεται να έχει καμία σημαντική επίδραση στη διάρκεια της διεργασίας. Τελικά, η προσθήκη αλουμίνας (Al_2O_3) αποδεικνύεται καθοριστική για την επιμήκυνση του χρόνου ομαλής δραστηριότητας εντός της κλίνης. Ευνοϊκότερα ήταν τα αποτελέσματα μετά την προσθήκη αλουμίνας σε σχέση με την προσθήκη οξειδίου του ασβεστίου (CaO) αντίστοιχα, λόγω της ικανότητας του Al να δεσμεύει το Na σε ενώσεις με υψηλά σημεία τήξης, κάτι που δεν παρατηρείται ως ιδιότητα του Ca.

Οι παραπάνω πειραματικές μελέτες παρουσιάζονται συνοπτικά στο κάτωθι διάγραμμα:



Διάγραμμα 9. *Συνοπτική παρουσίαση των μελετών που πραγματοποιήθηκαν τα τελευταία χρόνια.*

1.6.2 Κυριότερα προβλήματα κατά την αεριοποίηση σε ρευστοποιημένες κλίνες

1.6.2.1 Δημιουργία πισσών

Ως ***πίσσες (tars)*** αναφέρεται το σκουρόχρωμο, παχύρευστο, κολλώδες μείγμα, που κάνει την εμφάνισή του εξαιτίας της μερικής οξείδωσης οργανικών ενώσεων. Αποτελούνται από ένα σύνθετο μείγμα -οξυγονούχων και μη- οργανικών ενώσεων, που παράγεται μέσω της πυρόλυσης οργανικών ουσιών. Εμφανίζονται είτε ως εξατμιζόμενο υλικό, είτε ως ανθεκτικά αερολύματα (aerosols) και συμπυκνώνονται με την πτώση της θερμοκρασίας. Σε θερμοκρασίες υψηλότερες των $400° C$, οι πίσσες μπορούν να υποβληθούν σε περεταίρω αντιδράσεις αφυδάτωσης προς το σχηματισμό κάρβουνου και κοκ, ο οποίος δυσχεραίνει περισσότερο το ήδη υπάρχον πρόβλημα, ενώ η συμπύκνωσή τους εντός του αεριοποιητή είναι υπεύθυνη για τη ρύπανση και την έμφραξη των σωληνώσεων και του λοιπού εξοπλισμού. [54]

Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση για την αντιμετώπιση -ει δυνατόν και την εξάλειψη- της δημιουργίας πισσών, έχουν πραγματοποιηθεί εκτεταμένες μελέτες. Οι εν λόγω μελέτες επικεντρώνονται στην ανάλυση συμπεριφοράς των συγκεντρώσεων των πισσών ως συνάρτηση των πειραματικών συνθηκών, του πληρωτικού υλικού τις κλίνης, της σύστασης του καυσίμου ή ακόμα του είδους του οξειδωτικού μέσου.

Πιο συγκεκριμένα, οι ***Cioni et al., 2001*** [40], εκτός των άλλων, μελέτησαν τα επίπεδα συγκεντρώσεων πισσών, αλλά και τη σύστασή τους κατά την αεριοποίηση δυο διαφορετικής σύστασης RDF σε ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας, με άμμο στη θέση του αδρανούς υλικού. Στην πρώτη περίπτωση, με RDF προερχόμενο από αστικά σύμμεικτα απορρίμματα σε μορφή πελλετών στη θέση του καυσίμου, η συγκέντρωση των πισσών διατηρήθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα. Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε RDF αποτελούμενο από χαρτοπολτό και βιομηχανικά πλαστικά υπολείμματα (Industrial RDF), σε μορφή πελλετών και χνουδιού (pellet and fluff form). Αυτή τη φορά, η συγκέντρωση των πισσών έδειξε αυξητική τάση, συγκεκριμένα σχεδόν δεκαπλασιάστηκε. Η συμπεριφορά αυτή αποδόθηκε στην αισθητά χαμηλότερη θερμοκρασία εντός της κλίνης, η οποία ευνόησε το σχηματισμό των πισσών, και όχι στη μορφή του καυσίμου.

Στην επίδραση του λόγου αέρα/καυσίμου και του πληρωτικού υλικού στη μείωση των συγκεντρώσεων των σχηματιζόμενων πισσών επικεντρώθηκαν οι ***Arena et al., 2010*** [51], μέσω της αεριοποίησης καυσίμου προερχόμενου από απορρίμματα WDF (Waste Derived Fuel) σε πιλοτική μονάδα αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με χαλαζιακή άμμο, ολιβίνη και δολομίτη ως αδρανή υλικά, οι οποίες κατέστησαν την άμμο το πλέον ακατάλληλο υλικό για την εν λόγω διεργασία. Μέσω των παραπάνω δοκιμών, υποδεικνύεται ως συμφέρουσα λύση η χρήση ολιβίνη, λόγω της ιδιαίτερα ικανοποιητικής καταλυτικής του δράσης, του χαμηλού του κόστους και της ανθεκτικότητας των σωματιδίων του σε φθορά εντός της κλίνης. Ως προς το λόγο αέρα/καυσίμου, ο ρόλος του φαίνεται πιο δραστικός από αυτόν του αδρανούς υλικού. Με κάθε αύξησή του επιτυγχάνεται μείωση του σχηματισμού πισσών, ιδιαιτέρως πιο αισθητή συγκριτικά με την αντίστοιχη που προκαλεί η παρουσία ολιβίνη.

Την καταλυτική επίδραση του λόγου αέρα/καυσίμου στην εξάλειψη σχηματισμού πισσών επιβεβαίωσαν οι ***Di Gregorio et al.,2012*** [55] αεριοποιώντας καύσιμο προερχόμενο από συσκευασίες PDF (Packaging Derived Fuel) σε πιλοτική μονάδα αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης, με ολιβίνη στη θέση του αδρανούς υλικού. Ταυτόχρονα με την αύξηση του λόγου αέρα/καυσίμου, αυξάνεται και η θερμοκρασία εντός της κλίνης, έχοντας

ως αποτέλεσμα την αναστολή των αντιδράσεων σχηματισμού πισσών και την αποφυγή συμπύκνωσης όσων κατάφεραν να σχηματιστούν.

Την προσθήκη ενεργού άνθρακα στη δεύτερη βαθμίδα του αεριοποιητή επιχείρησαν οι ***Cho et al., 2013*** [50], με σκοπό τον εκμηδενισμό σχηματισμού των πισσών, σε μονάδα αεριοποίησης ρευστοποιημένης κλίνης δυο βαθμίδων. Ως αδρανές υλικό χρησιμοποιήθηκε ο ολιβίνης και ως καύσιμο μεικτά πλαστικά απορρίμματα (Mixed Plastic Waste). Μετά την προσθήκη του ενεργού άνθρακα, ο σχηματισμός των πισσών οριακά εξαλείφθηκε εντελώς, ιδιαιτέρως όσο αυξανόταν η ποσότητά του. Προσοχή απαιτεί, όμως, η εκτενής λειτουργία της μονάδας, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε απενεργοποίηση του άνθρακα. Τέλος, ιδιαιτέρως ευεργετικό ρόλο έδειξε να έχει η έγχυση ατμού στον αντιδραστήρα, του οποίου συνδυαστική χρήση με τον ενεργό άνθρακα εκμηδένισε τις συγκεντρώσεις των πισσών στο παραγόμενο αέριο.

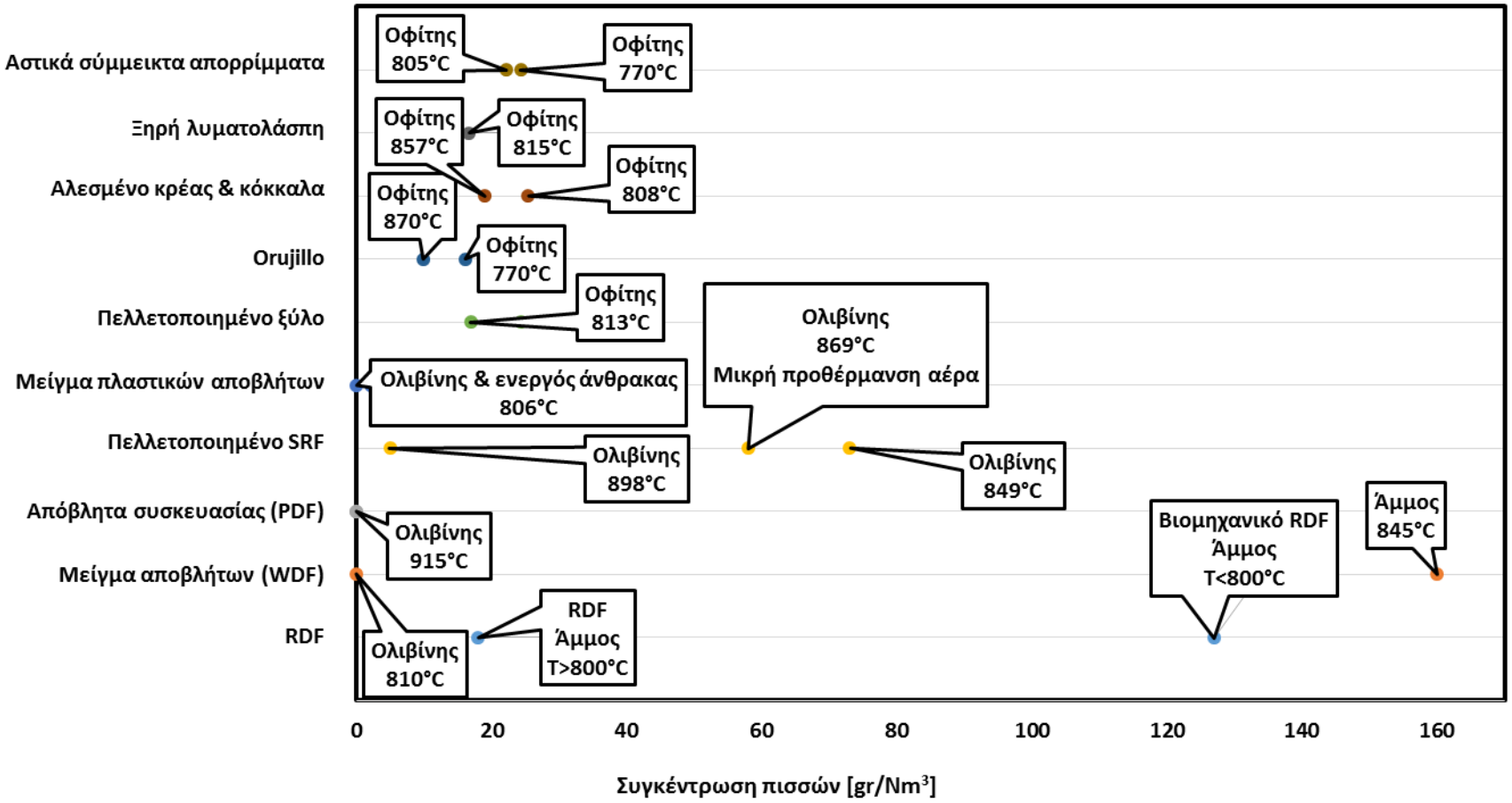
Στην πειραματική δοκιμή τους σε πιλοτική μονάδα αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης, οι ***Arena et al., 2014*** [56] ανέλυσαν την επίδραση του λόγου αέρα/καυσίμου, καθώς και της θερμοκρασίας προθέρμανσης του αέρα στις τελικές εμφανιζόμενες συγκεντρώσεις πισσών στο παραγόμενο αέριο. Κατά την αεριοποίηση, λοιπόν, SRF (Solid Recovered Fuel), με ολιβίνη ως αδρανές υλικό, παρατηρήθηκε ότι κάθε αύξηση του λόγου αέρα/καυσίμου οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας της κλίνης, γεγονός που υποβοηθά τη μείωση της τελικής συγκέντρωσης των παραγόμενων πισσών. Μόνος ανασταλτικός παράγοντας για τη μέγιστη δυνατή μείωσή τους δείχνει να είναι η ελλιπής προθέρμανση του αέρα που χρησιμοποιείται ως οξειδωτικό μέσο. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η υψηλή θερμοκρασία προθέρμανσης του αέρα αποτελεί παράγοντα πρωτεύουσας σημασίας, αφού όταν φτάνει στα μέγιστα επίπεδά της ελαχιστοποιείται ο σχηματισμός των πισσών, χωρίς απαραίτητα να εφαρμοστεί ο μέγιστος λόγος αέρα/καυσίμου.

Πλην των υπολοίπων παρατηρήσεών τους, οι ***Campoy et al., 2014*** [57] εστίασαν την προσοχή τους στην ευαισθησία της μεταβολής των συγκεντρώσεων των πισσών σε κάθε αυξομείωση της θερμοκρασίας και της παροχής καυσίμου, κατά την αεριοποίηση σε πιλοτική μονάδα ρευστοποιημένης κλίνης τεσσάρων διαφορετικών καυσίμων, με οφίτη[5] ως αδρανές υλικό. Εν συνεχεία, συνέκριναν τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα της αεριοποίησης πελλετών ξύλου. Όπως είχε ήδη παρατηρηθεί και σε προηγούμενες μελέτες, κάθε αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε ραγδαία μείωση των συγκεντρώσεων των πισσών. Και στη συγκεκριμένη εφαρμογή, η αύξηση της θερμοκρασίας της κλίνης προκαλείται από τη μείωση της παροχής καυσίμου, με πρακτικά σταθερή παροχή αέρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά το πέρας όλων των δοκιμών, οι πελλέτες ξύλου έδειξαν να είναι το υλικό με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις πισσών, γεγονός που ενδέχεται να αποδίδεται και στις χαμηλές θερμοκρασίες αεριοποίησης που εφαρμόστηκαν.

Το διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζει συνοπτικά όλα τα παραπάνω. Ένα συμπέρασμα που εύκολα μπορεί να προκύψει παρατηρώντας το κάτωθι διάγραμμα είναι ότι η αυξημένη επικρατούσα θερμοκρασία είναι ο παράγοντας που επιδρά ευεργετικά στη μείωση των συγκεντρώσεων των πισσών, ανεξαρτήτως καυσίμου. Επιπλέον, πλην της άμμου και του ολιβίνη, η χρήση οφίτη στη θέση του αδρανούς υλικού αποδεικνύεται συμφέρουσα, αφού η συγκέντρωση των πισσών δεν ξεπερνά τα 20 gr/Nm^3, ανεξαρτήτως θερμοκρασίας και καυσίμου.

---

[5] Ορυκτό, ένυδρο πυριτικό μαγνήσιο [$Mg_3Si_2O_7(H_2O)_2$].



Διάγραμμα 10. *Συμπεριφορά συγκέντρωσης πισσών συναρτήσει του καυσίμου και των συνθηκών της διεργασίας.*

1.6.2.2 Σχηματισμός συσσωματωμάτων και βίαιη απώλεια ρευστοποίησης

Ένα εκ των κυριότερων προβλημάτων που απαντώνται κατά τη λειτουργία αντιδραστήρων ρευστοποιημένης κλίνης είναι η βίαιη απώλεια ρευστοποίησης της κλίνης, λόγω της δημιουργίας συσσωματωμάτων μεταξύ των σωματιδίων του καυσίμου και του αδρανούς υλικού.

Στην πλειοψηφία τους, τα καύσιμα εμπεριέχουν σεβαστό ποσοστό αλκαλικών αλάτων. Κατά την επαφή των τελευταίων με το πυρίτιο της άμμου[6] που χρησιμοποιείται ως αδρανές υλικό της κλίνης, μετά από κατάλληλες αντιδράσεις, σχηματίζονται μίγματα ευτηκτικών ενώσεων. Μια από τις πλέον χαρακτηριστικές περιπτώσεις σχηματισμού των εν λόγω ενώσεων είναι η παρακάτω:

$$2SiO_2 + Na_2CO_3 \rightarrow 2Na_2O \cdot 2SiO_2 + CO_2$$

Μετά το σχηματισμό των ενώσεων αυτών οδηγούμαστε σε ενώσεις με κολλώδη επιφάνεια σωματιδίων και σημείο τήξης της τάξης των $800°$, με αποτέλεσμα τη διαταραχή της διαδικασίας της ρευστοποίησης και τη δημιουργία τοπικών «θερμών σημείων» (hot spots). Αυτά με τη σειρά τους οδηγούν στο σχηματισμό συσσωματωμάτων και τελικά στην απώλεια της ρευστοποίησης. [35]

Οι δημοσιεύσεις που μελετήθηκαν κατά τη διεξαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας επικεντρώνονται στη δημιουργία συσσωματωμάτων κατά την αεριοποίηση και την αποτέφρωση σε μονάδες ρευστοποιημένης κλίνης.

Οι ***Lin et al., 2009*** [52], η μελέτη των οποίων αναλύθηκε εκτενέστερα σε προηγούμενο κεφάλαιο, διεξήγαγαν σειρά πειραμάτων με σκοπό την παράταση του χρόνου εμφάνισης της βίαιης απώλειας ρευστοποίησης, κατά την αποτέφρωση σε αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη, με πυριτική άμμο ως αδρανές υλικό. Στην προαναφερθείσα μελέτη αναλύθηκε η επίδραση της προσθήκης αλκαλίων και της μεταβολής της θερμοκρασίας στο χρόνο ομαλής λειτουργίας της κλίνης μέχρι τη βίαιη απώλεια ρευστοποίησης. Έπειτα, προχώρησαν σε επόμενη πειραματική διαδικασία [58], μελετώντας αυτή τη φορά το ρόλο της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων (Particle Size Distribution) στο σχηματισμό συσσωματωμάτων και κατ' επέκταση στην απώλεια ρευστοποίησης, κατά την καύση πρότυπου καυσίμου σε ρευστοποιημένη κλίνη. Εκτός από τις τέσσερις εξεταζόμενες κατανομές μεγέθους σωματιδίων, εξετάστηκαν η ταχύτητα του αερίου, οι θερμοκρασίες στις οποίες έγινε η διεργασία, η συγκέντρωση Na και η προσθήκη Ca (μεταλλικό διάλυμα σε απεσταγμένο νερό).

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν δεν έδειξαν να αποκλίνουν από τα αντίστοιχα της προηγούμενης μελέτης. Κάθε αύξηση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης του Na στο μείγμα οδηγούσε πιο σύντομα σε απώλεια της ρευστοποίησης, με την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων της άμμου της κλίνης να μην έχει καμία επιρροή στο φαινόμενο αυτό. Επιπροσθέτως, αύξηση του χρόνου ομαλής λειτουργίας της κλίνης παρατηρήθηκε με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα εντός της κλίνης, και πάλι ανεξάρτητα από το μέγεθος των σωματιδίων αδρανούς υλικού. Τελικά, οι υπεύθυνοι της μελέτης αυτής αποφάνθηκαν ότι προφανώς και η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων επιδρά στο χρόνο απώλειας ρευστοποίησης, με τα πιο λεπτόκοκκα υλικά να οδηγούν σε μεγαλύτερους χρόνους ομαλής λειτουργίας της εγκατάστασης. Η επίδρασή τους όμως αυτή θεωρείται αμελητέα όταν η

[6] Εμφανίζεται συνήθως ως οξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και έχει ιδιαίτερα υψηλό σημείο τήξης, περί τους 1450°C.

διεργασία πραγματοποιείται σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας, φτωχής ανάμειξης και υψηλού ποσοστού Na στο υπό επεξεργασία μείγμα.

Όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι ***Kuo et al., 2011*** [53] μελέτησαν επιπλέον την επίδραση της προσθήκης αλουμίνας (Al_2O_3) στα παραπάνω φαινόμενα. Τελικά αποφάνθηκαν ότι η παρουσία της έχει την πλέον ανασταλτική δράση, συγκριτικά με τις ενώσεις μαγνησίου και ασβεστίου, λόγω της ικανότητας του Al να αντιδρά με το Na, σχηματίζοντας ενώσεις με υψηλά σημεία τήξης, κάτι που δεν παρατηρείται ως ιδιότητα του Ca.

Αργότερα, οι ***Zhong et al., 2013*** [59], επικεντρώθηκαν στη μελέτη της επίδρασης των οξειδίων του μαγνησίου και του ασβεστίου στον έλεγχο της απορρευστοποίησης και της δημιουργίας συσσωματωμάτων κατά τη χρήση σωματιδίων τριοξειδίου του σιδήρου (Fe_2O_3) ως αδρανές υλικό σε διάταξη αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης.

Το συμπέρασμα αυτής της μελέτης ήταν κυρίως η ευεργετική επίδραση της προσθήκης μαγνησίου και ασβεστίου στο μείγμα. Όσο μεγαλύτερες ήταν οι προστιθέμενες ποσότητες, τόσο μεγαλύτερο ήταν το ποσοστό των επικαλυπτόμενων σωματιδίων Fe_2O_3 από σωματίδια Mg και Ca, αποδίδοντας όλο και μεγαλύτερη αύξηση του χρόνου της ομαλής λειτουργίας της εγκατάστασης. Στα επιφανειακά στρώματα του πληρωτικού υλικού ανιχνεύθηκαν μόρια $MgO{\cdot}FeO$ και $CaO{\cdot}FeO$, τα οποία προκύπτουν από τις αναμενόμενες αντιδράσεις μεταξύ Mg/Ca και Fe_2O_3/FeO. Παρ' όλα αυτά, η δράση των οξειδίων έδειξε να μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, που από μόνη της ευνοεί τις συσσωματώσεις. Για βέλτιστα αποτελέσματα πρέπει τα οξείδια να χρησιμοποιηθούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες κλίνης, καθώς με αυτό τον τρόπο μεγιστοποιούνται οι παρατηρούμενοι χρόνοι απορρευστοποίησης. Τελικά, η επίδραση των μεταβολών της θερμοκρασίας στο χρόνο απορρευστοποίησης είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των οξειδίων.

Η πιο πρόσφατη μελέτη, αυτή των ***Liu et al., 2014*** [60], εμβαθύνει στο ρόλο της προσθήκης CaO και $CaCO_3$ στην αναστολή του σχηματισμού συσσωματωμάτων και την παράταση του χρόνου απώλειας ρευστοποίησης. Επιπλέον, στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάζεται η προσρόφηση μολύβδου (Pb) και καδμίου (Cd), κατά την καύση αποβλήτων σε ρευστοποιημένη κλίνη. Σημειώνεται ότι η τροφοδοσία καυσίμου στην κλίνη γίνεται από την κορυφή της σωλήνωσης *(top feeder).*

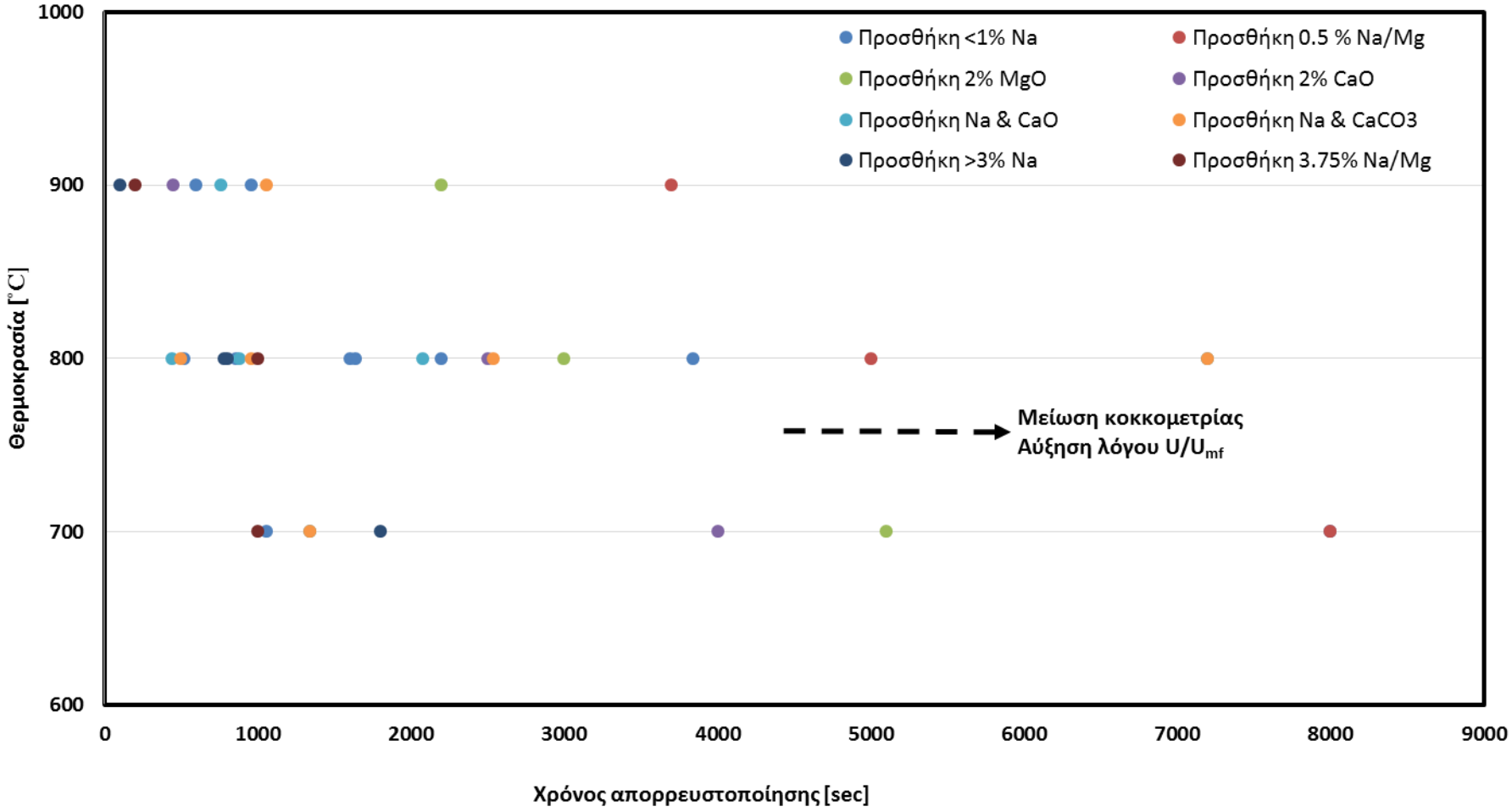
Προκειμένου να αναλυθεί η ευεργετική επίδραση των ασβεστούχων ενώσεων στο μείγμα, εξετάστηκαν και άλλοι παράγοντες που δύνανται να επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία της κλίνης, όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα του αέρα και το μέγεθος των σωματιδίων του αδρανούς υλικού. Επίσης, επιχειρήθηκε η προσθήκη ποσότητας νατρίου στο εικονικό καύσιμο, προκειμένου να αναλυθεί και η δική του επιρροή.

Τελικά, η προσθήκη νατρίου δεν επηρεάζει σε αξιοσημείωτο ποσοστό τη συγκέντρωση των εκπεμπόμενων ποσοτήτων Pb και Cd. Η παρατήρηση αυτή υποδεικνύει ότι ο σχηματισμός συσσωματωμάτων από μόνος του δεν σχετίζεται σε καμία περίπτωση με τις εκπομπές βαρέων μετάλλων στην ατμόσφαιρα, μέχρις ότου προκαλέσουν απώλεια ρευστοποίησης, με την εμφάνιση της οποίας παρατηρείται ραγδαία αύξηση των εκπομπών αυτών. Με την προσθήκη των ασβεστούχων ενώσεων στο μείγμα, μειώνονται αισθητά οι συγκεντρώσεις των εκπομπών σε βαρέα μέταλλα συγκριτικά με αυτές που προσμετρώνται μόνο παρουσία νατρίου. Βέλτιστα αποτελέσματα καταγράφονται στην περίπτωση της προσθήκης $CaCO_3$, κυρίως ως προς την παράταση της στιγμής εμφάνισης απορρευστοποίησης. Ως προς το ρόλο της θερμοκρασίας στο χρόνο απορρευστοποίησης,

παρατηρήθηκε αύξηση στα ποσοστά κολλωδών ενώσεων με κάθε αύξησή της και κατ' επέκταση επιτάχυνση της διακοπής της διεργασίας. Αντίθετα, όμως, θετική επίδραση είχε η μεταβολή αυτή της θερμοκρασίας στην εκπομπή βαρέων μετάλλων στην ατμόσφαιρα. Εξετάζοντας το ρόλο του εισερχόμενου αέρα, δεν εξήχθη κανένα διαφορετικό συμπέρασμα απ' ότι σε όλες τις προηγούμενες μελέτες, παρά μόνον παρατηρήθηκε η αναμενόμενη αύξηση του χρόνου ομαλής λειτουργίας με κάθε αύξηση της ταχύτητας αυτής. Τέλος, επίσης αναμενόμενα αποτελέσματα προέκυψαν ως προς το ρόλο του μεγέθους των σωματιδίων του υλικού της κλίνης, με εμφάνιση ταχύτερης απορρευστοποίησης στα πιο χονδρόκοκκα υλικά, με ταυτόχρονη μη ικανοποιητική προσρόφηση βαρέων μετάλλων, λόγω μη επαρκούς εμβαδού επιφανείας.

Για όλες τις παραπάνω μελέτες έγινε χρήση αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης, προς αεριοποίηση πρότυπου μείγματος αποβλήτων. Συλλέγοντας όσα προηγήθηκαν σε ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα, μπορούν να προκύψουν συνοπτικά τα εξής:

- Οι θερμοκρασιακές μεταβολές επιδρούν αντιστρόφως ανάλογα στο χρονικό διάστημα έως ότου παρατηρηθεί απώλεια ρευστοποίησης.
- Η αύξηση του λόγου ταχυτήτων U/U_{mf} μπορεί να παρατείνει σημαντικά τη λειτουργία της κλίνης πριν την απώλεια ρευστοποίησης.
- Η μείωση της κοκκομετρίας του αδρανούς υλικού επιδρά επίσης ευεργετικά στη διεργασία, αυξάνοντας το χρόνο ομαλής λειτουργίας της κλίνης, δείχνοντας μεγαλύτερη επιρροή από αυτή του λόγου ταχυτήτων.
- Η αύξηση των συγκεντρώσεων Na στα πρότυπα μείγματα, είτε ως μόνο συμμετέχον αλκάλιο, είτε εις βάρος των συγκεντρώσεων άλλων αλκαλίων και αλκαλικών ενώσεων, έχει ανεπιθύμητα αποτελέσματα, προκαλώντας ταχεία απορρευστοποίηση.

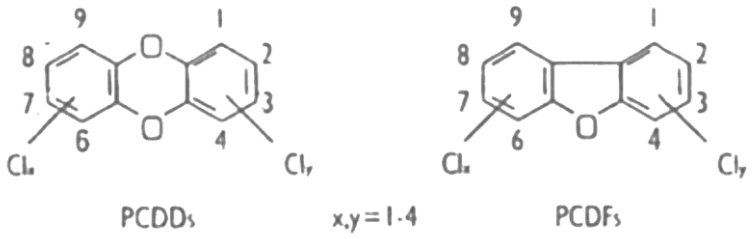


Διάγραμμα 11. *Χρόνος απορρευστοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας και των προστιθέμενων αλκαλίων ή αλκαλικών ενώσεων σε αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη αεριοποίησης πρότυπου μείγματος αποβλήτων.*

1.6.2.3 Σχηματισμός διοξινών και φουρανίων

Ένα ακόμα μείζον πρόβλημα που προκύπτει από την επεξεργασία Αστικών Σύμμεικτων Απορριμμάτων και θα αναλυθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι ο σχηματισμός χημικών ρυπαντών, στην πλειοψηφία τους τοξικών και επιβλαβών για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Από το σύνολο των προαναφερθέντων ρυπαντών, παρακάτω θα αναλυθεί ο τρόπος σχηματισμού των ***διοξινών (PCDD)*** και των ***φουρανίων (PCDF)***, καθώς και οι πιθανές μέθοδοι αναστολής του σχηματισμού αυτού.

Διοξίνες (dioxins) και φουράνια (furans) είναι οι επικρατούσες ονομασίες των πολυχλωριωμένων διβενζο-p-διοξινών (PCDD) και πολυχλωριωμένων διβενζοφουρανίων (PCDF), αντίστοιχα. Τα παραπάνω απαρτίζουν μια οικογένεια οργανικών αρωματικών ενώσεων, οι οποίες είναι άχρωμες και άοσμες και περιέχουν στο μόριο τους άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο και χλώριο, διαφέρουν δε η μια από την άλλη από τη θέση και τον αριθμό των χλωρίων τα οποία περιέχουν υποκατεστημένα στο μόριο τους. [61] Μπορούν να σχηματιστούν κατά την διάρκεια οποιασδήποτε θερμικής διεργασίας παρουσία χλωρίου, είτε κατά τη διάρκεια βιομηχανικών δραστηριοτήτων, όπως η καύση της βιομάζας ή η λεύκανση χαρτιού με χλώριο, είτε λόγω τυχούσας ηφαιστειακής δραστηριότητας ή δασικής πυρκαγιάς. [62]



Εικόνα 4. *Συντακτικοί τύποι των PCDD/F, Ενιαίος Φορέας Ελέγχου Τροφίμων – ΕΦΕΤ [61]*

Κατά τη διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας, μελετήθηκαν οι κάτωθι δημοσιευμένες εργασίες, οι οποίες μέσω πειραματικών διεργασιών αποσκοπούν στη μείωση των εκπομπών διοξινών και φουρανίων [7] και, ει δυνατόν, στην εξάλειψή τους.

Οι ***Ruokojarvi et al., 2001 [38]***, η μελέτη των οποίων έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας, επιχείρησαν την εξάλειψη των εκπομπών διοξινών και φουρανίων από την αποτέφρωση RDF, μέσω της προσθήκης ουρίας στο μείγμα καυσίμου. Το κύριο συμπέρασμα της εν λόγω μελέτης, που αποτελούσε τον αρχικό στόχο του πειράματος, είναι η καταλυτική αναστολή των αντιδράσεων σχηματισμού διοξινών και φουρανίων μέσω της αύξησης του ποσοστού ουρίας στο μείγμα. Ένα επιπλέον σημαντικό συμπέρασμα που απορρέει από αυτή την εργασία είναι ότι τα προϊόντα αποσύνθεσης της ουρίας έχουν την ίδια ευεργετική επίδραση στην αναστολή σχηματισμού των εν λόγω αρωματικών ενώσεων με την ίδια την ουρία, οπότε πλήθος αζωτούχων ενώσεων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως αναστολείς για αυτό το σκοπό.

Την ίδια μέθοδο ακολούθησαν και οι ***Samaras et al., 2001 [39],*** οι οποίοι προσέθεσαν ουρία στο υπό μελέτη καύσιμο, αυτή τη φορά σε μορφή σκόνης και σε μορφή υδατικού διαλύματος (η πειραματική διαδικασία και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν αναλύονται και

[7] Σύνολο εκπομπών στη στερεή και την αέρια φάση.

σε προηγούμενο κεφάλαιο). Πέραν των άλλων, σχετικά αναμενόμενων συμπερασμάτων, εξήχθη το απροσδόκητο συμπέρασμα ότι η μορφή της προστιθέμενης ουρίας δεν παίζει κανένα απολύτως ρόλο στη δέσμευση των διοξινών και των φουρανίων, οπότε σε γενικές γραμμές τα εξαγόμενα αποτελέσματα συνέπεσαν στην πλειοψηφία τους με εκείνα των Ruokojarvi et al., 2001.

Οι ***Mininni et al., 2007*** [63], διεξήγαγαν εκτενή μελέτη με σκοπό τον υπολογισμό των εκπομπών διοξινών (PCDD), φουρανίων (PCDF) και πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAH) από αποτέφρωση νοσοκομειακών αποβλήτων και αποβλήτων νεκροταφείων. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε σε μονάδα πλήρους κλίμακας. Συν τοις άλλοις, ελέγχθηκε η υπόθεση για επανασχηματισμό των υπό μελέτη αρωματικών ενώσεων κατά τη διέλευσή τους από τον εναλλάκτη θερμότητας. Λήφθηκαν δείγματα αερίου σύνθεσης από διάφορα μέρη της εγκατάστασης (πριν τον καθαρισμό και στο θάλαμο μετάκαυσης), δείγματα σκωρίας από το θάλαμο καύσης και ιπτάμενη τέφρα από τα σακκόφιλτρα. Από την άνωθι μελέτη εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Δεν επιτεύχθηκε ποτέ πλήρης καταστροφή των διοξινών και των φουρανίων στο θάλαμο μετάκαυσης, όπως επίσης δεν ικανοποιήθηκαν ποτέ τα όρια εκπομπών για κανένα από τα δύο καύσιμα, παρά τις πολύ υψηλές επικρατούσες θερμοκρασίες ($> 1100°C$). Αποδείχθηκε, τελικά, ότι οι συγκεντρώσεις στο θάλαμο δε σχετίζονται άμεσα ούτε με τη θερμοκρασία ούτε με τη συγκέντρωση οξυγόνου.
- Οι συγκεντρώσεις PCDD/F και PAH μετά τον εναλλάκτη θερμότητας (σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ $250 - 300°C$) ήταν πολύ μικρότερες από αυτές που μετρήθηκαν στο θάλαμο μετάκαυσης. Το αποτέλεσμα αυτό χαρακτηρίστηκε απροσδόκητο, καθώς οι επικρατούσες συνθήκες στον εναλλάκτη θερμότητας ευνοούν τις αντιδράσεις σχηματισμού των συγκεκριμένων ρυπαντών.
- Ενώ οι συγκεντρώσεις των ανεπιθύμητων τοξικών ενώσεων μειώθηκαν μετά τη μονάδα επεξεργασίας του αερίου, όπως ήταν αναμενόμενο, δεν παρατηρείται φυσιολογική συμπεριφορά για το CO. Οι υψηλές συγκεντρώσεις του υποδεικνύουν ότι οι συνθήκες καύσης δεν ήταν σωστά βελτιστοποιημένες, ειδικά όταν επρόκειτο για την επεξεργασία των νοσοκομειακών αποβλήτων.
- Στην πλειοψηφία των δειγμάτων ιπτάμενης τέφρας που λήφθηκαν, οι συγκεντρώσεις PCDD/F ήταν υψηλότερες από το όριο των 10 μg ITEQ/kg, το οποίο είναι το μέγιστο για να επιτραπεί η απόρριψή τους σε χώρους υγειονομικής ταφής επικίνδυνων αποβλήτων. Σημειώνεται ότι η ιπτάμενη τέφρα των νοσοκομειακών αποβλήτων κατέληξε σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις PCDD/F από ότι τα απόβλητα νεκροταφείου.
- Τέλος, παρατηρείται ότι και τα δύο είδη καυσίμου κατά την αποτέφρωσή τους αποδίδουν αισθητά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις φουρανίων συγκριτικά με αυτές των διοξινών.

Οι ***H. Zhang et al., 2008*** [48] μελέτησαν την επίδραση της μεταβολής των συνθηκών λειτουργίας στις εκπομπές διοξινών και φουρανίων (PCDD/F) σε μονάδα αποτέφρωσης πλήρους κλίμακας, χρησιμοποιώντας αποτεφρωτή δυο βαθμίδων με παλινδρομική εσχάρα. Κατά τη συγκεκριμένη μελέτη διεξήχθη αξιολόγηση της επίδρασης του ελέγχου της θερμοκρασίας και του επιπέδου O_2 στο σχηματισμό PCDD/F. Πραγματοποιήθηκαν 6 δοκιμές, στις οποίες η αποτελεσματικότητα της καύσης του MSW ξεπέρασε το $99{,}9\%$.

Η συνολική συγκέντρωση τετρα- και οκτα- χλωροδιβενζο-p-διοξινών που μετρήθηκε στην έξοδο του λέβητα, έδειξε μια τάση αύξησης καθώς αυξανόταν η θερμοκρασία εξόδου

του λέβητα. Περνώντας το αέριο από την ημίσκληρη πλυντρίδα (semi-dry scrubber) και τον κυκλωνικό διαχωριστή, οι συγκεντρώσεις των χαμηλότερων χλωριωμένων διοξινών και φουρανίων αυξήθηκαν αισθητά (ειδικά για το τετρα- χλωρο- διβενζο- φουράνιο TCDF). Εν αντιθέσει με τα προηγούμενα, κανένας ιδιαίτερα σημαντικός σχηματισμός τετρα- σε οκτα-CDD/F δεν παρατηρείται στην περιοχή του σακκόφιλτρου. Αναλύοντας την επίδραση της παροχής O_2 στις συγκεντρώσεις PCDD/F, αύξηση του ποσοστού του οξυγόνου μπορεί να οδηγήσει σε ραγδαία αύξηση των συγκεντρώσεων των υπό μελέτη ρυπαντών. Επομένως, εφόσον εξασφαλίζεται επαρκής ποσότητα οξυγόνου για την καύση, θα πρέπει να αποφεύγεται η περεταίρω αύξησή της.

Απόρροια της παραπάνω πειραματικής μελέτης είναι η παρατήρηση ότι, προκειμένου να αποφευχθεί ο σχηματισμός PCDD/F σε χαμηλές θερμοκρασίες, όλα τα συστήματα ελέγχου της αέριας ρύπανσης θα πρέπει να λειτουργούν κάτω από τους 200, ακόμα και $180°C$.

Τη λύση της σύγκαυσης (co-combustion) επιχείρησαν οι ***Lee et al., 2008*** [64], προκειμένου να εφαρμοστεί θερμική επεξεργασία αστικών σύμμεικτων απορριμμάτων (ΑΣΑ) στην τσιμεντοβιομηχανία και να μειωθούν οι εκπομπές PCDD/F. Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε πιλοτική μονάδα καύσης, ικανής να διαχειριστεί περίπου 40 τόνους ΑΣΑ ημερησίως. Τα ΑΣΑ εισήχθησαν σε περιστροφικό κλίβανο σε θερμοκρασία $850°C$ και τότε το ρεύμα θερμού αερίου πέρασε σε θάλαμο δευτερογενούς καύσης, όπου η θερμοκρασία του αυξήθηκε στους $1200°C$.

Παρατηρήθηκε, τελικά, ότι οι εκπομπές διοξινών και φουρανίων στην ατμόσφαιρα κυμαίνονται κατά μέσο όρο στα επίπεδα των $0.001\ ng\ I-TEQ/m_N^3$, αναλογούν δηλαδή κατά μέσο όρο στο 1% της επιτρεπόμενης από τον Κινεζικό νόμο εκπεμπόμενης ποσότητας, που απορρέει από τις βέλτιστες μονάδες αποτέφρωσης MSW.

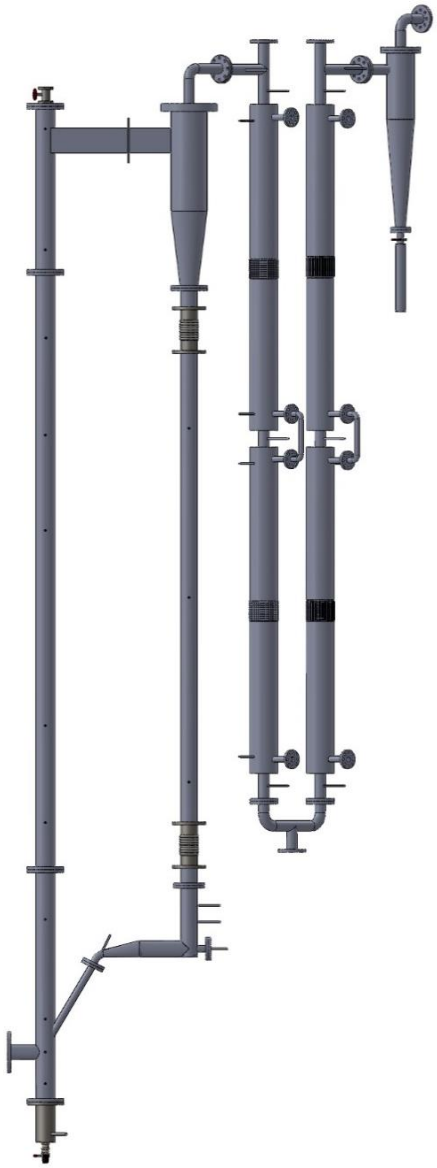
Στις μελέτες που αναλύονται ακριβώς παραπάνω μελετάται ο σχηματισμός διοξινών και φουρανίων (PCDD/F) κατά τη διεξαγωγή κυρίως καύσης και αποτέφρωσης. Οι διατάξεις στις οποίες πραγματοποιήθηκε η διεργασία, όπως και οι συνθήκες διεξαγωγής των δοκιμών, ποικίλουν. Τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα κάτωθι:

- Η χημική ένωση της ουρίας ($CO(NH_2)_2$) παρουσιάζει σημαντική ανασταλτική δράση στο σχηματισμό των διοξινών και των φουρανίων. Την ικανότητα της ουρίας για μείωση των συγκεντρώσεων των εν λόγω ενώσεων δείχνει να μην επηρεάζει η κατάστασή της, αποδίδοντας εξίσου ωφέλιμα αποτελέσματα στην υγρή και την αέρια φάση.
- Το είδος του καυσίμου έχει μεγαλύτερη επίδραση στα επίπεδα των συγκεντρώσεων των διοξινών και των φουρανίων στο παραγόμενο απαέριο, συγκριτικά με τη θερμοκρασία στο θάλαμο καύσης. Προκύπτει, λοιπόν, ότι στις περιπτώσεις καυσίμων πλούσιων σε χλώριο τα αυξημένα επίπεδα διοξινών και φουρανίων κρίνονται αναπόφευκτα, ακόμα και στην υψηλότερη δυνατή επικρατούσα θερμοκρασία και με μέγιστο χρόνο παραμονής εντός του αντιδραστήρα.
- Η συγκέντρωση του οξυγόνου κατά τη διεξαγωγή της διεργασίας θα πρέπει να περιορίζεται στις απαιτούμενες τιμές. Κάθε αύξησή της αυξάνει ραγδαία τις συγκεντρώσεις των εν λόγω ενώσεων.
- Μέσω ακαριαίας ψύξης του αερίου κάτω των $200°C$ στη γραμμή καθαρισμού μπορεί να αποφευχθεί η θερμοκρασιακή περιοχή που ευνοεί την ετερογενή σύνθεσή τους.

2 Πειραματική εγκατάσταση

2.1 Περιγραφή της μονάδας και εγχειρίδιο της εγκατάστασης

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη του αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας, που χρησιμοποιείται για τη θερμοχημική μετατροπή του RDF. Η διάταξη είναι ωριαίας δυναμικότητας $30\ kg$, παραγόμενης θερμικής ισχύος $108\ kW_{th}$. Διαχωρίζεται σε τέσσερις διακριτές περιοχές, όπως αναλύεται παρακάτω. Ο συγκεκριμένος διαχωρισμός γίνεται βάσει της φάσης και του είδους του υλικού που η κάθε περιοχή καλείται να διαχειριστεί. Πιο συγκεκριμένα, παρακάτω αναλύονται οι περιοχές της διάταξης, σύμφωνα με το αν το διερχόμενο υλικό είναι στερεό ή αέριο, πριν την επεξεργασία του ή καθαρό από προσμίξεις, θερμό ή ψυχρό κοκ., αλλά και με κριτήριο τη διεργασία που πραγματοποιείται στο κάθε τμήμα. Ακολουθεί το τρισδιάστατο σχέδιο της εγκατάστασης αεριοποίησης, το οποίο τμηματοποιείται και αναλύεται εκτενέστερα στις επόμενες παραγράφους.



Εικόνα 5. *Διάταξη αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας.*

Παρακάτω παρατίθεται η περιγραφή της πειραματικής διάταξης στα εξής τμήματα:

- ***Σύστημα τροφοδοσίας και προσωρινής αποθήκευσης:*** Αναφέρεται στην περιοχή της εγκατάστασης, στην οποία πραγματοποιείται ο ανεφοδιασμός με στερεό καύσιμο RDF, καθώς και η τροφοδοσία της μονάδας με καύσιμο. Κάτωθι αναλύεται εκτενώς όλο το σύστημα και συγχρόνως παρατίθενται όλες οι μετατροπές που έλαβαν χώρα.
- ***Κύρια διάταξη αεριοποιητή:*** Περιγράφεται η περιοχή στην οποία διεξάγεται η θερμοχημική διεργασία της αεριοποίησης. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών, οι εργασίες μετατροπής και βελτιστοποίησης της μονάδας και οι λόγοι που αυτές πραγματοποιήθηκαν σε σύγκριση με τον αρχικό σχεδιασμό.
- ***Σύστημα καθαρισμού και ψύξης syngas:*** Αναλύονται οι διατάξεις καθαρισμού (κυκλώνας) και ψύξης (εναλλάκτης θερμότητας) αφού το αέριο σύνθεσης εξέλθει από τον αντιδραστήρα, και πριν αυτό οδηγηθεί στην περιοχή αξιοποίησής του.
- ***Περιοχή αξιοποίησης αερίου σύνθεσης:*** Περιλαμβάνει οποιοδήποτε σύστημα οδηγεί σε αξιοποίηση του παραγόμενου αερίου (θάλαμος καύσης) ή σε εκμετάλλευσή του προς παραγωγή ενέργειας (ΜΕΚ, αεριοστρόβιλος, μονάδα συμπαραγωγής ενέργειας κλπ.). Στην παρούσα εγκατάσταση, το αέριο σύνθεσης οδηγείται σε ένα τυπικό θάλαμο καύσης.

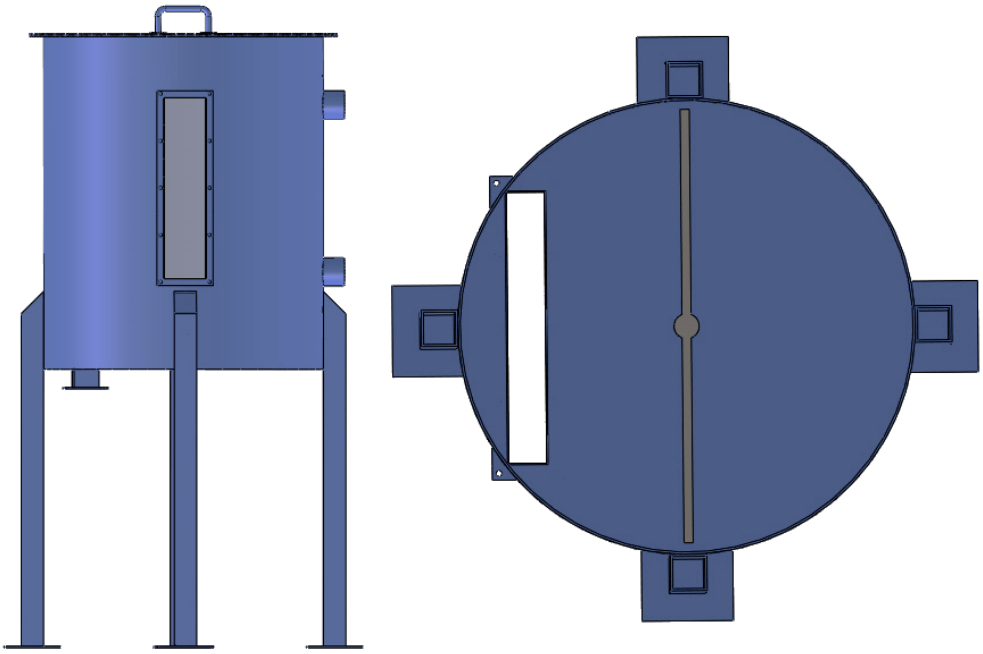
2.1.1 Σύστημα τροφοδοσίας

Το σύστημα τροφοδοσίας περιλαμβάνει ένα μεγάλο κυλινδρικό σιλό για την αποθήκευση της καύσιμης ύλης, καθώς και δύο περιστροφικές βαλβίδες και δύο κοχλίες (έναν τροφοδοσίας καυσίμου και έναν εκφόρτισης). Στις επόμενες παραγράφους όλη η διάταξη περιγράφεται αναλυτικά.

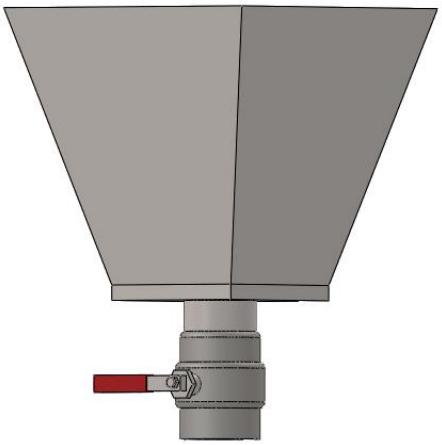
Η αποθήκευση του καυσίμου γίνεται σε ένα ***κυλινδρικό σιλό προσωρινής αποθήκευσης (bunker)*** εσωτερικής διαμέτρου $D = 990\,mm$ και ύψους $h = 1195\,mm$. Ο συνολικός όγκος του δοχείου επαρκεί για συνεχή τροφοδοσία καυσίμου δώδεκα ωρών στο μέγιστο των λειτουργικών δυνατοτήτων του αεριοποιητή. Αρχικά, ο μόνος τρόπος πλήρωσης του σιλό με καύσιμο ήταν το άνοιγμα του άνω τμήματος και η επαναστεγανοποίησή του αμέσως μετά. Επειδή ο τρόπος αυτός ανεφοδιασμού κρίθηκε ιδιαιτέρως μη πρακτικός, και για να εξασφαλιστεί παράλληλα η στεγανότητα του δοχείου αποθήκευσης, κατασκευάσθηκε ***χοάνη τροφοδοσίας με βάνα χειρός*** διαμέτρου $D = 3$”.

Η επιλογή διαμέτρου της βάνας έγινε με κριτήριο το είδος του τροφοδοτούμενου καυσίμου. Μικρότερη διάμετρος θα καθιστούσε δυσκολότερη την εισαγωγή του καυσίμου στο δοχείο τροφοδοσίας, εφόσον γίνεται λόγος για ***μείγμα τεμαχισμένου χαρτιού και πλαστικού (fluff)***. Η μορφή του καυσίμου, η ανομοιομορφία κοκκομετρίας του και η υγρασία του απαίτησαν μεγάλη διάμετρο βάνας εισαγωγής, προς αποφυγήν φραγής της και διευκόλυνση της διαδικασίας τροφοδοσίας.

Τρισδιάστατα σκαριφήματα του δοχείου και της χοάνης παρατίθενται ακριβώς παρακάτω:



Εικόνα 6. *Σιλό προσωρινής αποθήκευσης (αριστερά). Τομή του τρισδιάστατου σκαριφήματος, στην οποία διαφαίνεται η στρεφόμενη ράβδος και το διάκενο από το οποίο το καύσιμο τροφοδοτείται στον κοχλία (δεξιά). Μηχανολογικό σχέδιο παρατίθεται στο Παράρτημα. [**Εικόνα 61**]*



Εικόνα 7. *Χοάνη τροφοδοσίας με βάνα χειρός.*

Το σιλό εδράζεται σε τέσσερις ***δυναμοκυψέλες***, ώστε να παρέχεται ανά πάσα στιγμή η δυνατότητα ελέγχου της παροχής του καυσίμου και του αποθέματος καυσίμου εντός του σιλό, μέσω της μετατροπής της ένδειξης βάρους σε ηλεκτρικό σήμα. Στον πυθμένα του διαθέτει ***μηχανισμό στρεφόμενης ράβδου***, ώστε το καύσιμο να προωθείται στον ***κοχλία τροφοδοσίας,*** σταθερού βήματος, σταθερής διαμέτρου άξονα και σταθερού πλάτους πτερυγίων**.** Ακολουθεί το τρισδιάστατο σκαρίφημα του κοχλία τροφοδοσίας.

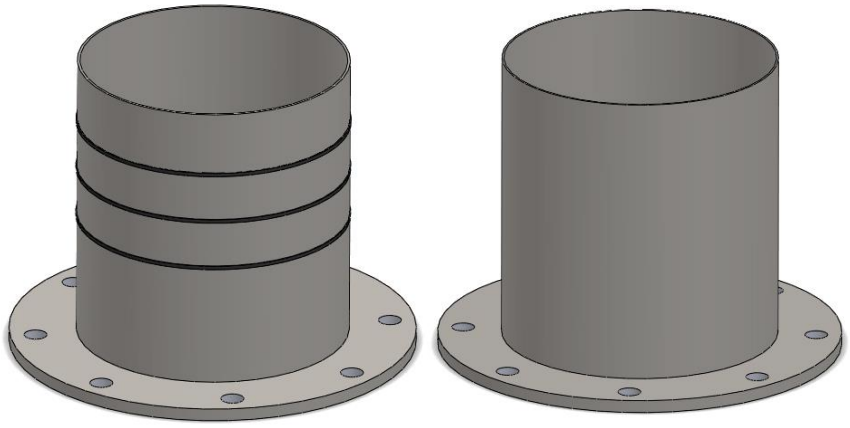
Εικόνα 8. *Κοχλίας τροφοδοσίας. Μηχανολογικό σχέδιο παρατίθεται στο Παράρτημα. [**Εικόνα 63**]*

Στον ανωτέρω κοχλία τροφοδοσίας δίνει κίνηση ένας κινητήρας $1\ Hp$. Μεταξύ του κινητήρα και του κοχλία μεσολαβεί ένας ***μειωτήρας στροφών*** λόγου $1:100$. Ο κοχλίας κινείται σε μεταβλητές στροφές, ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε δοκιμής. Οι στροφές, λοιπόν, με τις οποίες κινείται ο κοχλίας εξαρτώνται από τις στροφές κίνησης του μειωτήρα, οι οποίες με τη σειρά τους ρυθμίζονται μέσω ***χειροκίνητου ρυθμιστή στροφών (manual inverter).***

Μετά τον κοχλία τροφοδοσίας, το καύσιμο περνά από έναν ανοξείδωτο ***τηλεσκοπικό σωλήνα (ολισθαίνουσα βαλβίδα)*** τριών δακτυλίων (o – rings), με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 2. *Χαρακτηριστικά τηλεσκοπικού σωλήνα (ολισθαίνουσας βαλβίδας).*

	Διαστάσεις (mm)
Εξωτερική διάμετρος Φλάντζας	320
Πάχος Φλάντζας	10
Εξωτερική Διάμετρος Ολισθαίνουσας	219.1
Εσωτερική Διάμετρος Ολισθαίνουσας	214.6
Πάχος δακτυλίων	3
Απόσταση μεταξύ των δακτυλίων	40



Εικόνα 9*. Διαμόρφωση τηλεσκοπικού σωλήνα (ολισθαίνουσας βαλβίδας) εσωτερικά (αριστερά) και εξωτερικά (δεξιά). Μηχανολογικό σχέδιο παρατίθεται στο Παράρτημα. [*
Εικόνα 62*]*

Αρχικά, αντί της ολισθαίνουσας βαλβίδας, στη μονάδα υπήρχε βιομηχανικό λάστιχο (rubber), το οποίο όμως έπασχε από πλευράς στεγανοποίησης, όπως παρουσιάζεται αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο [2.2]. Επίσης, αδυνατούσε να παραλάβει τις συστολοδιαστολές που προκαλούσαν οι μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές στον ανοδικό αγωγό. Η λύση της ολισθαίνουσας βαλβίδας, λοιπόν, κρίθηκε αναγκαία για την επίλυση δύο καίριων προβλημάτων:

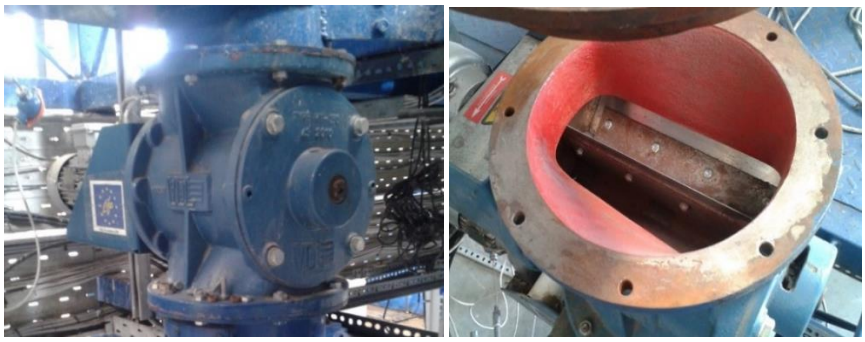
- της πλήρους στεγανοποίησης του τμήματος τροφοδοσίας, μετά την παρατήρηση της ανεπάρκειας του βιομηχανικού rubber,
- της απορρόφησης των διαστολών τάξης $8.5\,cm$, μετά τη θέρμανση του αντιδραστήρα.

Ακολουθούν δυο ***περιστροφικές βαλβίδες (rotary valves)*** VDL HT-250, οι οποίες λειτουργούν με τη βοήθεια γεννητριών NORD DRIVESYSTEMS ισχύος $0.37\ kW$, σταθερών

στροφών και ελέγχουν/ρυθμίζουν την παροχή του καυσίμου, ενώ συνάμα διασφαλίζουν την αποφυγή επιστροφής του αερίου σύνθεσης προς το τμήμα τροφοδοσίας στερεού καυσίμου. Επιπλέον, ο ρόλος των δύο αυτών περιστροφικών βαλβίδων είναι η διατήρηση της διαφοράς πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου και η όσο το δυνατόν καλύτερη απομόνωση του αντιδραστήρα από το εξωτερικό περιβάλλον. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι κύριες διαστάσεις των βαλβίδων αυτών:

Πίνακας 3. *Χαρακτηριστικές διαστάσεις περιστροφικών βαλβίδων.*

Αριθμός πτερυγίων	6
Μήκος πτερυγίων	200 mm
Πάχος πτερυγίων	3 mm
Ακτίνα πτερυγίων	69 mm
Διάμετρος άξονα στήριξης πτερυγίων	22 mm
Διάμετρος εξωτερικού περιβλήματος	168.3 mm
Διαστάσεις διόδου καυσίμου από τον κοχλία τροφοδοσίας προς την περιστροφική βαλβίδα	$150 \times 88.9\ mm^2$



Εικόνα 10. *Εξωτερικό περίβλημα περιστροφικής (ροταρικής) βαλβίδας (αριστερά). Εσωτερική διαμόρφωση μηχανισμού περιστροφικής βαλβίδας (δεξιά).*

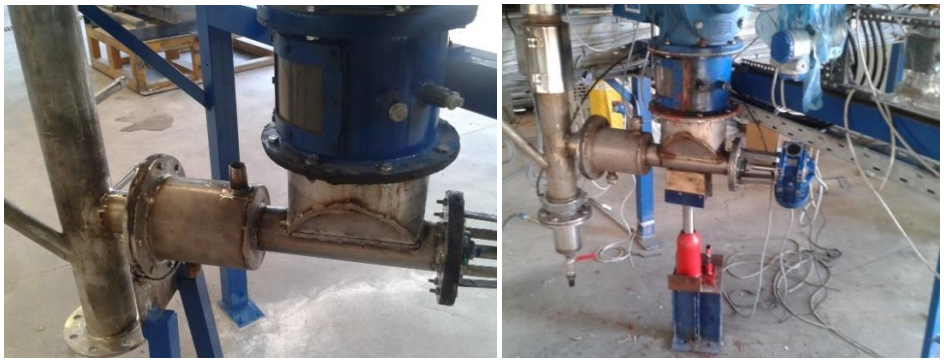
Κάτω από τις δυο αυτές βαλβίδες βρίσκεται ο ***κοχλίας εκφόρτισης***. Ο κοχλίας, όπως και στην περίπτωση του κοχλία τροφοδοσίας, έχει σταθερό βήμα, σταθερή διάμετρο άξονα και σταθερό πλάτος πτερυγίων, ενώ παραλαμβάνει κίνηση από ένα κινητήρα ισχύος $1\ Hp$. Οι στροφές του ρυθμίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως και του κοχλία τροφοδοσίας, με μόνη διαφορά το λόγο μείωσης στροφών του μειωτήρα του, που αυτή τη φορά είναι $1 : 60$. Ο κοχλίας ψύχεται μέσω μανδύα, στον οποίο τροφοδοτείται νερό θερμοκρασίας περιβάλλοντος και είναι αυτός που οδηγεί τελικά το καύσιμο στην είσοδο του ανοδικού αγωγού. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των δυο εγκατεστημένων κοχλιών στην εγκατάσταση.

Πίνακας 4. *Χαρακτηριστικά κοχλιών εγκατάστασης.*

Κοχλίας	Μήκος (mm)	Διάμετρος (mm)	Πάχος Πτερυγίου (mm)	Βήμα (mm)
Τροφοδοσίας	1442	72.4	2.13	74
Εκφόρτισης	655	79.2	2.7	84.2

Αρχικά, η παραπάνω κατακόρυφη διάταξη κοχλιών – περιστροφικών βαλβίδων – τηλεσκοπικού σωλήνα ήταν στηριγμένη στο ικρίωμα που πλαισιώνει τη μονάδα. Αυτή η στήριξη όμως κρίθηκε επίφοβη, καθώς οι πακτώσεις δεν έδιναν ελευθερία κινήσεων στην

εγκατάσταση για τις περιπτώσεις επιμήκυνσης των σωληνώσεων λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας. Για να διασφαλιστεί, λοιπόν, η απορρόφηση όλων των συστολοδιαστολών της εγκατάστασης και προκειμένου να εξαντληθούν οι πιθανότητες αστοχίας, κρίθηκε αναγκαία η τοποθέτηση ***συστήματος ανάρτησης (γρύλου)*** κάτω από τον κοχλία εκφόρτισης. Επιπλέον, η τοποθέτηση του προαναφερθέντος συστήματος προσφέρει στήριξη στον κοχλία εκφόρτισης, ώστε να περιορίζονται τα φορτία που παραλαμβάνει η φλάντζα σύνδεσης και – κατ' επέκταση – ο ανοδικός αγωγός. Κατ' αυτόν τον τρόπο και με χειροκίνητες μεταβολές, η διάταξη κοχλιών – περιστροφικών βαλβίδων θα μετακινείται σύμφωνα με τις ανάγκες, ώστε να μην ασκούνται ανεπιθύμητες φορτίσεις στον ανοδικό αγωγό.

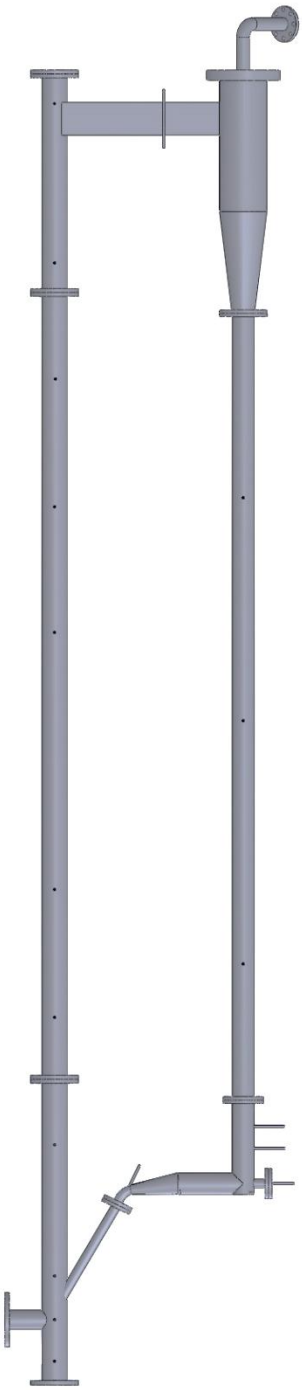


Εικόνα 11. *Κοχλίας εκφόρτισης και είσοδος του καυσίμου στον ανοδικό αγωγό (αριστερά). Σύστημα ανάρτησης (γρύλος) (δεξιά).*

2.1.2 Κύρια διάταξη αεριοποιητή

Η κύρια διάταξη του αεριοποιητή αφορά την περιοχή στην οποία πραγματοποιείται η διεξαγωγή της θερμοχημικής διεργασίας της αεριοποίησης, από την είσοδο του στερεού καυσίμου στον ανοδικό αγωγό, μέχρι την πλήρη μετατροπή του σε αέριο σύνθεσης.

Το ***τμήμα ανόδου (riser)*** αποτελεί το κύριο μέρος του αντιδραστήρα, αφού στο εσωτερικό του λαμβάνει χώρα η διεργασία της αεριοποίησης σε συνθήκες ρευστοποίησης. Αποτελείται από κυλινδρικό σωλήνα, κατασκευασμένο από ***πυράντοχο χάλυβα τύπου 310*** και έχει εξωτερική διάμετρο $D = 114.3\, mm$, συνολικό ύψος $h = 5.998\, m$ και πάχος τοιχώματος $d = 4\, mm$. Το μηχανολογικό σχέδιο του ανοδικού αγωγού παρατίθεται στο παράρτημα. [***Εικόνα 64***]

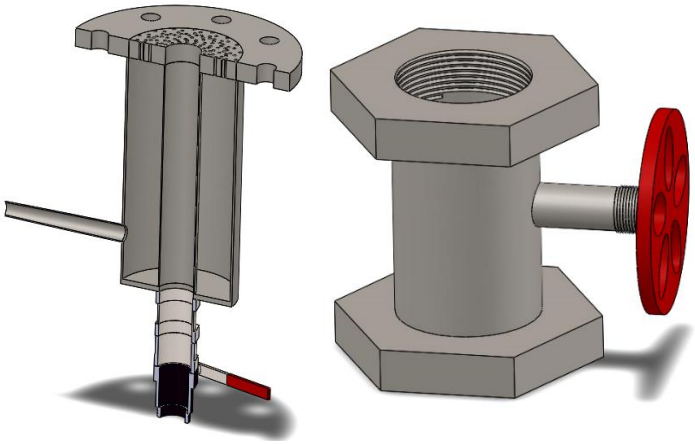


Εικόνα 12. *Κύρια διάταξη αεριοποιητή.*

Το ρεύμα αέρα εισέρχεται στη μονάδα μόνο από τη βάση του ανοδικού αγωγού μέσω ***διασκορπιστή αέρα (air distributor)***, αντιδιαμετρικά του σημείου εισόδου της καύσιμης ύλης. Κατά την είσοδο του αέρα, ρυθμίζεται η πίεσή του, ώστε στην εγκατάσταση να επικρατούν ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η ρύθμιση πίεσης και παροχής επιτυγχάνεται μέσω ***παροχομέτρων (Mass Flow Controllers)***. Στην εγκατάσταση χρησιμοποιούνται συνολικά δύο παροχόμετρα άνω ορίου $1000\ lt/min$ (M&W Instruments Mass Stream 6300) για τη ρύθμιση της παροχής του αέρα και ένα άνω ορίου $100\ lt/min$ (AALBORG GMF 47) για τη ρύθμιση της παροχής του αζώτου. Τα παροχόμετρα αέρα απαιτούν χειροκίνητη ρύθμιση, ενώ το παροχόμετρο αζώτου ρυθμίζεται μέσω του συστήματος απομακρυσμένου ελέγχου.

Το πρώτο παροχόμετρο ελέγχει την εισερχόμενη ροή αέρα στο κάτω μέρος του ανοδικού αγωγού, στον διασκορπιστή αέρα, η ροή του οποίου δημιουργεί και τη ρευστοποίηση. Το δεύτερο, αντίστοιχα, ελέγχει τη ροή αέρα στο πάνω μέρος του κελύφους του κοχλία εκφόρτισης, ώστε να ψύχει τον κοχλία και παράλληλα να αποτρέπει την εισχώρηση σωματιδίων αδρανούς υλικού εντός του αγωγού του κοχλία.[8] Το παροχόμετρο αζώτου βρίσκεται αμέσως μετά τη βαλβίδα τύπου L και ελέγχει τις παρεχόμενες ποσότητες αζώτου, ώστε να υποβοηθάται η ανακυκλοφορία του αερίου σύνθεσης και των σωματιδίων και να επιτυγχάνονται οι επιθυμητές συνθήκες ρευστοποίησης. [**Εικόνα 38**, **Εικόνα 39**]

Στο πάνω μέρος του ανοδικού αγωγού υφίσταται ***τυφλή φλάντζα***. Αρχικά, η εισαγωγή του αδρανούς υλικού στην εγκατάσταση πραγματοποιούνταν αφαιρώντας τη φλάντζα αυτή και επαναστεγανοποιώντας. Προς αποφυγή αυτής της χρονοβόρας διαδικασίας, άνωθεν της φλάντζας τοποθετήθηκε ***βάνα χειρός για τροφοδοσία***, λύση που προσέδωσε ευκολία στη διαδικασία και πλήρη στεγανοποίηση στην περιοχή.

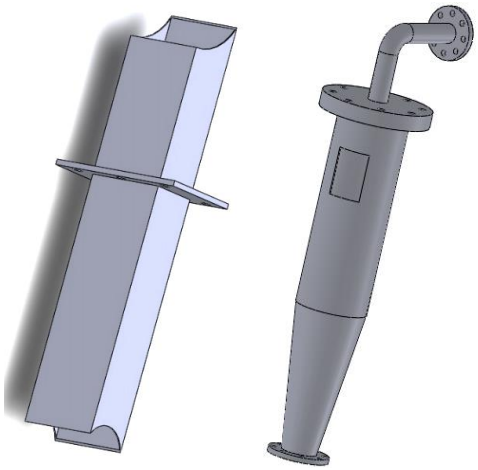


Εικόνα 13. *Διασκορπιστής αέρα στη βάση του ανοδικού αγωγού (αριστερά). Μηχανολογικό σχέδιο παρατίθεται στο Παράρτημα. [**Εικόνα 65**] Βάνα για την εισαγωγή του αδρανούς υλικού στην κορυφή του ανοδικού αγωγού (δεξιά).*

Το μείγμα αερίων – στερεών σωματιδίων που διαφεύγει του ανοδικού αγωγού, οδηγείται μέσω τετραγωνικής σωλήνωσης στον ***πρώτο κυκλώνα*** της εγκατάστασης. Ο πρώτος κατά σειρά κυκλώνας αναλαμβάνει να διαχωρίσει την πλειονότητα των σωματιδίων από το διερχόμενο ρεύμα αερίων και να τα οδηγήσει πίσω στην καθοδικό αγωγό, προκειμένου να επιτευχθεί η ανακυκλοφορία. Περιμετρικά του κυλινδρικού τμήματος του

[8] Η παροχή αέρα στο κέλυφος του κοχλία εκφόρτισης κρίθηκε αναγκαία μετά από παρατήρηση ανεπιθύμητων φαινομένων κατά τις πειραματικές δοκιμές, όπως αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο [σελ. 79].

κυκλώνα έχει τοποθετηθεί ηλεκτρική αντίσταση, οι διαστάσεις και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της οποίας αναφέρονται σε επόμενο κεφάλαιο. [2.3.1]



Εικόνα 14. *Τετραγωνική σωλήνωση σύνδεσης του ανοδικού αγωγού με τον πρώτο κυκλώνα (αριστερά). Πρώτος κυκλώνας (δεξιά). Μηχανολογικό σχέδιο και των δυο παρατίθεται στο Παράρτημα. [**Εικόνα 66**, **Εικόνα 67**]*

Ο πρώτος κυκλώνας της εγκατάστασης είναι αυτός που αναλαμβάνει να κατακρατήσει τα πιο μεγάλης κοκκομετρίας σωματίδια, προκειμένου να επιτευχθούν οι δυο παρακάτω στόχοι:

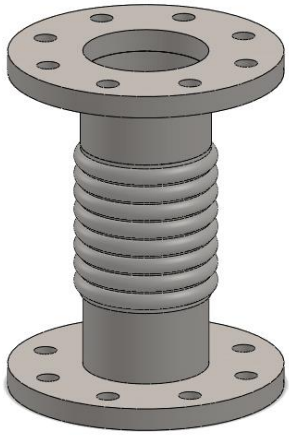
- Η αποφυγή της δημιουργίας συσσωματωμάτων από την τήξη της τέφρας στο πιο «ψυχρό» τμήμα της εγκατάστασης, πέραν του κυκλωνικού διαχωριστή.
- Η επιστροφή στον ***καθοδικό αγωγό (downcomer tube)*** και εν συνεχεία η ανακυκλοφορία στον ανοδικό της μάζας αδρανούς υλικού, αλλά και τη ποσότητα καυσίμου που έχει διαφύγει πριν προλάβει να αντιδράσει πλήρως.

Συγκεκριμένα, ο πρώτος κυκλώνας κατακρατά τα σωματίδια διαμέτρου $d \geq 100\ \mu m$ με βαθμό απόδοσης $99.2\ \%$, ενώ η απόδοσή του πέφτει κάτω από το 50% όταν κληθεί να διαχειριστεί σωματίδια μικρότερα των $40\ \mu m$ $[d_{50}]$.

Ο καθοδικός αγωγός συνδέεται με φλάντζα στο κάτω μέρος του πρώτου κυκλώνα. Έχει μήκος $3.568\ m$ και εξωτερική διάμετρο $100\ mm$ και αποτελεί το συνδετικό τμήμα μεταξύ του κυκλώνα και της ***βαλβίδας τύπου L (L - valve)***. Η βαλβίδα τύπου L είναι η διάταξη που αναλαμβάνει να ολοκληρώσει την ανακυκλοφορία των σωματιδίων μη αντιδρώντος καυσίμου και αδρανούς υλικού και να τα οδηγήσει πίσω στον ανοδικό αγωγό. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μεγάλης μείωσης της διαμέτρου της οριζόντιας σωλήνωσης, η οποία συνεπάγεται την αύξηση της ταχύτητας του ρευστού, αντίστοιχα. Ακολουθούν τα τρισδιάστατα σχέδια του καθοδικού αγωγού και της βαλβίδας τύπου L.

Εικόνα 15. *Καθοδικός αγωγός (downcomer) (αριστερά) και βαλβίδα τύπου L (L – Valve) (δεξιά). Μηχανολογικό σχέδιο και των δυο παρατίθεται στο Παράρτημα. [**Εικόνα 68**, **Εικόνα 69**]*

Η αρχική διάταξη δεν περιλάμβανε δικλείδες ασφαλείας για απορρόφηση των επιμηκύνσεων λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας κατά μήκος του καθοδικού αγωγού. Προς αποφυγήν ανεπιθύμητων φαινομένων οφειλόμενων στις θερμοκρασιακές μεταβολές, τοποθετήθηκαν στον αγωγό ***δυο διαστολικοί σύνδεσμοι,*** με δυνατότητα να απορροφήσουν περί τα $2\ cm$ διαστολών ο καθένας. Οι διαστολικοί σύνδεσμοι που χρησιμοποιούνται στην παρούσα πειραματική εγκατάσταση αεριοποίησης είναι αξονικοί, με κολλητές άνω και κάτω φλάντζες (τύπος FS). Ρόλος τους είναι, επίσης, να προστατεύσουν τη σωλήνωση από κραδασμούς και ατέλειες κατασκευής, αλλά και να συμβάλλουν στη μείωση του θορύβου.

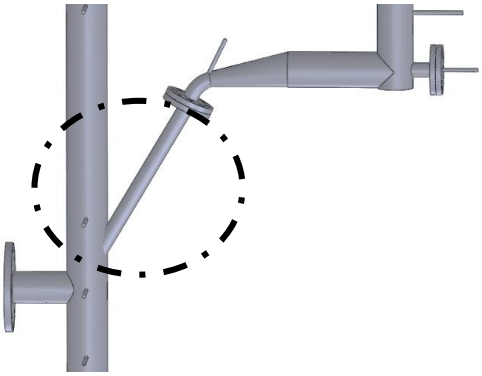


Εικόνα 16. *Διαστολικός σύνδεσμος με πουκάμισο. Μηχανολογικό σχέδιο παρατίθεται στο Παράρτημα. [**Εικόνα 70**]*

Πραγματοποιήθηκαν τομές στη σωλήνωση, με σκοπό στις συγκεκριμένες θέσεις η απλή σωλήνωση να αντικατασταθεί με τους άνωθι διαστολικούς συνδέσμους. Το πρώτο σημείο τομής εντοπίζεται $10\ cm$ κάτω από τη φλάντζα σύνδεσης του κυκλώνα με τον καθοδικό αγωγό και το δεύτερο $10\ cm$ πάνω από την φλάντζα σύνδεσης του καθοδικού αγωγού με τη βαλβίδα τύπου L. [**Εικόνα 37**]

Της βαλβίδας τύπου L έπεται μια ***συνδετική σωλήνωση***, με κλίση τέτοια ώστε να συνδέεται με τον ανοδικό αγωγό σε ύψος αντίστοιχο με αυτό της εισόδου του στερεού καυσίμου. Η κλίση αυτή της σωλήνωσης, σε συνδυασμό με την ιδιαίτερα μικρή διάμετρό της,

αποτελεί άλλη μια δικλείδα ασφαλείας προς επίτευξη της ανακυκλοφορίας, ως είναι επιθυμητό.



Εικόνα 17. *Βαλβίδα τύπου L και συνδετική σωλήνωση με τον ανοδικό αγωγό.*

Κατά μήκος της εγκατάστασης είναι τοποθετημένοι ***μετρητές πίεσης***, με δυνατότητα καταγραφής της πίεσης της διεργασίας, αλλά και ***θερμοστοιχεία*** για τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Επίσης, καθ' όλο το μήκος του ανοδικού τμήματος είναι τοποθετημένες ηλεκτρικές αντιστάσεις, των οποίων η διαδικασία τοποθέτησης, οι διαστάσεις και τα λοιπά λειτουργικά χαρακτηριστικά αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο. [2.3.1]

2.1.3 Σύστημα καθαρισμού και ψύξης syngas

Το αέριο σύνθεσης, μετά τον πρώτο κυκλώνα, οδηγείται στον ***εναλλάκτη θερμότητας σχήματος U (U-Shape Heat Exchanger)***. Εντός του εναλλάκτη κυκλοφορεί αέρας θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε αντιρροή με το παραγόμενο αέριο σύνθεσης. Καθ' όλο το μήκος του εναλλάκτη βρίσκονται εγκατεστημένοι μετρητές πίεσης και θερμοστοιχεία, ώστε να ελέγχεται η επικρατούσα πίεση και θερμοκρασία του ψυχόμενου αερίου, αλλά και του ψυκτικού μέσου. Κατά τη διαδρομή που ακολουθεί εντός του εναλλάκτη, το αέριο ψύχεται, ώστε να καθαριστεί έπειτα από τις προσμίξεις πισσών και ευτηκτικών ενώσεων.

Στην έξοδο του εναλλάκτη βρίσκεται ένας δεύτερος κυκλώνας της εγκατάστασης, σκοπός του οποίου είναι να κατακρατήσει τα λεπτόκοκκα σωματίδια που δεν κατάφερε να διαχωρίσει ο πρώτος από το αέριο σύνθεσης. Αναλυτικότερα, ο δεύτερος κυκλώνας κατακρατά τα σωματίδια διαμέτρου $d \geq 70\ \mu m$ με βαθμό απόδοσης $98\ \%$, ενώ η απόδοσή του πέφτει κάτω από το 50% όταν κληθεί να διαχειριστεί σωματίδια μικρότερα των $10\ \mu m$ $[d_{50}]$.

Για τη συγκέντρωση των προσμίξεων του αερίου σύνθεσης και τον καθαρισμό του κυκλώνα με μεγαλύτερη ευχέρεια, κατασκευάστηκε αποσπώμενο δοχείο με βάνα χειρός, όπως φαίνεται στο σκαρίφημα που παρατίθεται παρακάτω.

Εικόνα 18. *Εναλλάκτης θερμότητας. Αναπαρίστανται οι μαστοί τοποθέτησης μεταδοτών πίεσης και θερμοστοιχείων (αριστερά). Δεύτερος κυκλώνας κατακράτησης σωματιδίων και αποσπώμενο δοχείο (δεξιά). Μηχανολογικό σχέδιο παρατίθεται στο Παράρτημα. [**Εικόνα 71, Εικόνα 72**]*

Στον πίνακα που ακολουθεί αναγράφονται οι χαρακτηριστικές διαστάσεις των δυο κυκλωνικών διαχωριστών που είναι εγκατεστημένη στον αντιδραστήρα αεριοποίησης.

Πίνακας 5. *Χαρακτηριστικά κυκλώνων εγκατάστασης.*

	Διάμετρος (mm)		**Μήκος (mm)**		**Κατακρατούμενες Διάμετροι Σωματιδίων (μm)**	
	Άνω	Κάτω	Κυλινδρικού τμήματος	Κωνικού τμήματος	d	d_{50}
1ος Κυκλώνας	219	60	600	450	100	40
2ος Κυκλώνας	168.3	60	400	650	70	10

2.1.4 Θάλαμος καύσης

Μέσω κατάλληλης σωλήνωσης, το syngas που εξέρχεται από το δεύτερο κυκλώνα οδηγείται στο θάλαμο καύσης. Ο θάλαμος καύσης έχει ύψος $1.6\,m$, εσωτερική διάμετρο $0.6\,m$ και εξωτερική (προστατευτικού περιβλήματος) $1\,m$. Τα καυσαέρια από το θάλαμο καύσης απορρίπτονται στο περιβάλλον μέσω καμινάδας ύψους $3\,m$ και διαμέτρου $168.3\,mm$.

Εικόνα 19. *Εσωτερική και εξωτερική διαμόρφωση θαλάμου καύσης (αριστερά και κέντρο) και καμινάδα απόρριψης καυσαερίων στο περιβάλλον (δεξιά).*

Προκειμένου να επιτευχθεί η ανάφλεξη του αερίου σύνθεσης και η καταστροφή του στον ανωτέρω θάλαμο καύσης, στη βάση του θαλάμου εγκαταστάθηκε ***καυστήρας υγραερίου (LPG) Riello Gulliver BS1 911 T1***. Μέσω της εγκατάστασης του εν λόγω καυστήρα εξασφαλίζεται η ύπαρξη φλόγας, η έναυση του υγραερίου και εν συνεχεία η καύση του αερίου σύνθεσης. Παραπλεύρως, υπάρχει σύστημα τροφοδοσίας του καυστήρα αποτελούμενο από δυο φιάλες υγραερίου, για ταυτόχρονη εισαγωγή υγραερίου και από τις δυο στον τελευταίο. Για την αποφυγή τυχόν λάθος διαδρομών του καυσίμου και επιστροφής του στη δεύτερη φιάλη κατά την έξοδό του από την πρώτη, το σύστημα διαθέτει ανεπίστροφες βαλβίδες. [**Εικόνα 40**]

2.2 Δοκιμές για τον έλεγχο στεγανότητας της εγκατάστασης

Προκειμένου να διαπιστωθούν ελαττώματα στεγανοποίησης στην εγκατάσταση αεριοποίησης, πραγματοποιήθηκε ικανός αριθμός ***δοκιμών διαρροών (leak tests)***. Οι δοκιμές αυτές έγιναν μέσω διοχέτευσης αέρα στην εγκατάσταση. Εν συνεχεία, ψεκασμό διαλύματος σαπουνιού σε όλες τις ραφές (συγκολλήσεις) και στις ενώσεις των φλαντζών, αλλά και σε οποιοδήποτε σημείο δυνητικά μπορεί αν εμφανίσει διαρροή είτε λόγω διαστολών, είτε λόγω θερμικών και μηχανικών καταπονήσεων. Οι διαρροές διαπιστώθηκαν με την παρατήρηση δημιουργίας φυσαλίδων μετά από ψεκασμό των προβληματικών περιοχών με το διάλυμα σαπουνιού.

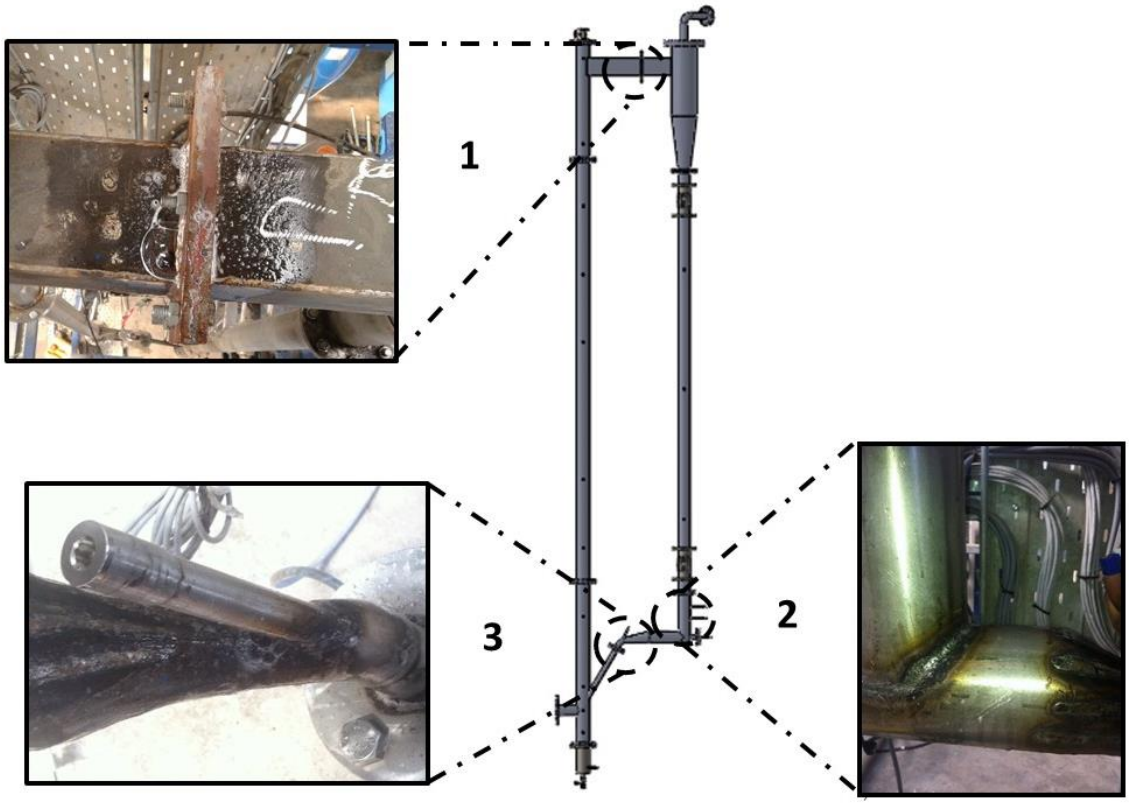
Τέθηκε σε λειτουργία ο ***συμπιεστής αέρα*** της εγκατάστασης. Ο εν λόγω αεροσυμπιεστής έχει δυνατότητα συμπίεσης του αέρα ως και τα $8\ Bar$. Πριν ανοίξει η βάνα τροφοδοσίας αέρα στην εγκατάσταση, συνίσταται ο διερχόμενος αέρας από τον αεροσυμπιεστή να έχει συμπιεστεί επαρκώς, φτάνοντας σε επίπεδα άνω των $7\ Bar$. Όσο η εγκατάσταση βρίσκεται σε λειτουργία, η πίεση του αέρα στον αεροσυμπιεστή κυμαίνεται στη μέγιστη επιτρεπτή περιοχή λειτουργίας, μεταξύ 7.1 και $8\ Bar$. Μετά τον αεροσυμπιεστή, ο αέρας οδηγείται στο ***αεροφυλάκιο*** και στη συνέχεια στον ***αφυγραντή***. Ο αφυγραντής είναι η διάταξη που αναλαμβάνει να ρυθμίσει την υγρασία του αέρα στα επιθυμητά επίπεδα και να τον οδηγήσει με τη σειρά του στα ***παροχόμετρα αέρα***, πριν την είσοδό του στον αντιδραστήρα. Υπάρχει δυνατότητα παράκαμψης του αφυγραντή, αν οι συνθήκες του πειράματος δεν απαιτούν αφύγρανση του αέρα, μέσω παρακαμπτήριας βάνας. [**Εικόνα 41**]

2.2.1 Αποτελέσματα δοκιμών διαρροών

Οι διαρροές στα σημεία που είχαν υποστεί συγκόλληση με ηλεκτρόδιο ψευδαργύρου ήταν αναμενόμενες. Συνήθως, σε εγκαταστάσεις αποτελούμενες από ανοξείδωτο χάλυβα τέτοιου τύπου προτιμάται συγκόλληση τόξου βολφραμίου με αδρανές αέριο (Tungsten inert gas TIG). Αυτού του τύπου η συγκόλληση παράγει ραφές με χαμηλό πορώδες και λεία επιφάνεια. Επιπλέον, η συγκόλληση TIG κρίνεται κατάλληλη για λεπτά φύλλα μετάλλων, όπως στην προκειμένη περίπτωση, λόγω της ελάχιστης προσαγόμενης ποσότητας θερμότητας στα συγκολλούμενα τμήματα. Συνεπώς, στα προβληματικά τμήματα που απαιτήθηκε ξανά συγκόλληση, πραγματοποιήθηκε με αυτή τη μέθοδο για βελτιωμένο αποτέλεσμα.

Όπως παρίσταται σκαριφηματικά παρακάτω, και με παράθεση αντίστοιχου φωτογραφικού υλικού, οι προβληματικές περιοχές του κύριου μέρους του αεριοποιητή εντοπίζονται σε τρία διακριτά σημεία.

1. Στη ***φλάντζα*** της τετραγωνικής σωλήνωσης σύνδεσης του ανοδικού αγωγού με τον πρώτο κυκλώνα.
2. Στις ***γωνιακές κολλήσεις*** που έχουν πραγματοποιηθεί για την κατασκευή της βαλβίδας τύπου L.
3. Στις ***κολλήσεις του ακροφυσίου*** εισόδου του μετρητή πίεσης P13, που έπεται της βαλβίδας τύπου L.



Εικόνα 20. *Καταγραφή των προβληματικών περιοχών στην κύρια διάταξη του αεριοποιητή κατά τις δοκιμές διαρροών.*

Πλην της κύριας διάταξης του αεριοποιητή, όμως, προβληματικές περιοχές εντοπίζονται και στο τμήμα της τροφοδοσίας του καυσίμου. Έντονη διαρροή αέρα παρατηρήθηκε στη στεγανή προσαρμογή την τοποθετημένη στο πέρας του κελύφους του κοχλία τροφοδοσίας, ως στήριξη της χοάνης τροφοδοσίας ολιβίνη, που είχε κατασκευαστεί για ταυτόχρονη τροφοδοσία καυσίμου και αδρανούς υλικού. [**Εικόνα 42**] Επιπλέον, προβλήματα εμφάνισε το βιομηχανικό λάστιχο (rubber), το οποίο είχε επιλεχθεί ως συνδετική διάταξη μεταξύ του κοχλία τροφοδοσίας και της πρώτης περιστροφικής βαλβίδας, σε βαθμό που κρίθηκε αδύνατη η επιδιόρθωσή του και απαιτήθηκε η αντικατάστασή του. [**Εικόνα 43**]. Τέλος, ακριβώς πριν η καύσιμη ύλη οδηγηθεί στον κοχλία εκφόρτισης, διέρχεται από μια συνδετική διάταξη που έπεται της δεύτερης περιστροφικής βαλβίδας. Εκεί ακριβώς είναι που εντοπίζονται και τα τελευταία προβλήματα διαρροής κατά την πρώτη δοκιμή ελέγχου στεγανότητας. [**Εικόνα 44**]

Αντίστοιχη διαδικασία με αυτήν της πρώτης δοκιμής, η οποία αναλύεται παραπάνω, ακολουθήθηκε και κατά τη δεύτερη. Αυτή τη φορά δεν καταγράφηκε προβληματική συμπεριφορά στην τετραγωνική σωλήνωση σύνδεσης του ανοδικού αγωγού με τον πρώτο κυκλώνα [Σημείο Διαρροής 1 κατά την προηγούμενη δοκιμή], παρατηρήθηκαν όμως προβλήματα που δεν κατάφεραν να διορθωθούν μετά την πρώτη δοκιμή, και άλλα που μέχρι πρότινος δεν είχαν εντοπιστεί. Συγκεκριμένα καταγράφηκαν διαρροές:

- Στη ***στεγανή προσαρμογή*** άνωθεν του κελύφους του κοχλία τροφοδοσίας, στο σημείο που υπάρχει η χοάνη τροφοδοσίας ολιβίνη.
- Στη ***φλάντζα*** που στεγανοποιεί το κέλυφος του τελευταίου και στην περιοχή γύρω από το ρουλεμάν του κοχλία. [**Εικόνα 45**]

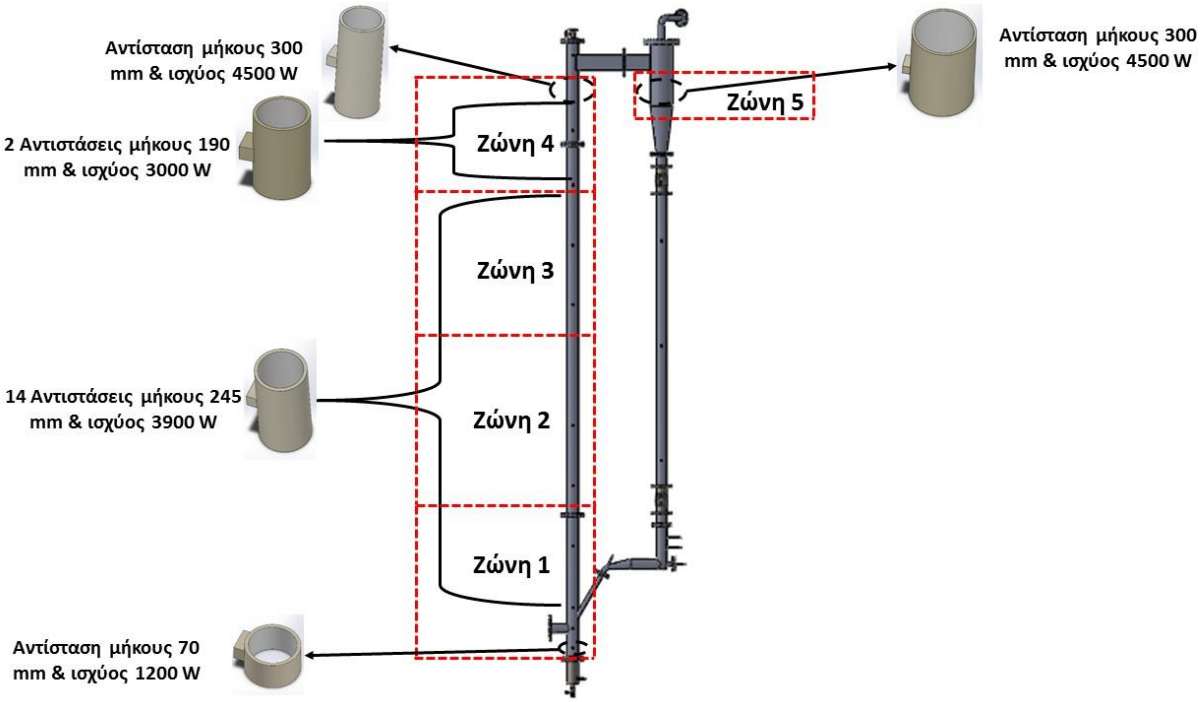
- Στο ***βιομηχανικό λάστιχο*** μεταξύ του κοχλία τροφοδοσίας και της πρώτης περιστροφικής βαλβίδας, παρόλο που αυτό αντικαταστάθηκε μετά την πρώτη δοκιμή.[9] [**Εικόνα 46**]
- Στην άνω και κάτω φλάντζα της ***συνδετικής διάταξης***, μεταξύ της δεύτερης περιστροφικής βαλβίδας και του κοχλία εκφόρτισης. [**Εικόνα 47**]
- Στις κολλήσεις κατά μήκους του κελύφους του κοχλία εκφόρτισης. [**Εικόνα 48**]
- Στην ***ευρύτερη περιοχή της βαλβίδας τύπου L***, συμπεριλαμβανομένων κολλήσεων που πραγματοποιήθηκαν προς διαμόρφωση της σωλήνωσης, αλλά και των αντίστοιχων στο ακροφύσιο εισόδου του μετρητή πίεσης P13. [**Εικόνα 49**]

[9] Η εν λόγω διαρροή συνέχισε να υπάρχει ακόμα και μετά την αντικατάσταση που βιομηχανικού λάστιχου από την ολισθαίνουσα βαλβίδα, οπότε και τελικά επιδιορθώθηκε.

2.3 Εγκατάσταση ηλεκτρικών αντιστάσεων και μόνωσης

2.3.1 Τοποθέτηση αντιστάσεων

Προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές θερμοκρασίες για τη διεξαγωγή της διεργασίας της αεριοποίησης, πραγματοποιήθηκε τοποθέτηση ηλεκτρικών αντιστάσεων με περίβλημα αλουμινίου καθ' όλο το μήκος του ανοδικού αγωγού, καθώς επίσης και στο κυλινδρικό τμήμα του πρώτου κυκλώνα. Οι εν λόγω αντιστάσεις έχουν κυλινδρικό σχήμα, ώστε να εφαρμόζουν πλήρως στο εξωτερικό των σωληνώσεων και του κυκλώνα, έχοντας εσωτερική διάμετρο ίση με την εξωτερική διάμετρο του ανοδικού αγωγού ($114.3\ mm$) και του κυκλώνα ($219\ mm$) αντίστοιχα. Η οριακή θερμοκρασία, την οποία μπορούν να αγγίξουν οι ηλεκτρικές αντιστάσεις σε πλήρη λειτουργία, είναι οι $900°C$.



Εικόνα 21. *Σκαρίφημα της πειραματικής εγκατάστασης και περιγραφή των θέσεων των διαφόρων αντιστάσεων.*

Οι ηλεκτρικές αντιστάσεις εγκαταστάθηκαν στον αεριοποιητή ομαδοποιημένες, συγκροτώντας ***πέντε ζώνες***. Ο λόγος αυτής της ομαδοποίησης ήταν καθαρά πρακτικής φύσεως, ώστε η ρύθμιση των θερμοκρασιακών επιπέδων να γίνεται κατά περιοχή, ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες της κάθε ζώνης στις διάφορες φάσης της διεργασίας. Η ομαδοποίηση έγινε ως εξής:

- ***Ζώνη 1:*** Τέσσερις (4) ηλεκτρικές αντιστάσεις εσωτερικής διαμέτρου Ø114.3, εξωτερικής Ø132 και μήκους $245\ mm$ και μια (1) ηλεκτρική αντίσταση εσωτερικής διαμέτρου Ø114.3, εξωτερικής Ø132 και μήκους $70\ mm$.
- ***Ζώνη 2:*** Πέντε (5) ηλεκτρικές αντιστάσεις εσωτερικής διαμέτρου Ø114.3, εξωτερικής Ø132 και μήκους $245\ mm$.
- ***Ζώνη 3:*** Τέσσερις (4) ηλεκτρικές αντιστάσεις εσωτερικής διαμέτρου Ø114.3, εξωτερικής Ø132 και μήκους $245\ mm$.
- ***Ζώνη 4:*** Μια (1) ηλεκτρική αντίσταση εσωτερικής διαμέτρου Ø114.3, εξωτερικής Ø132 και μήκους $245\ mm$, δυο (2) ηλεκτρικές αντιστάσεις εσωτερικής

διαμέτρου Ø114.3, εξωτερικής Ø132 και μήκους 190 mm και μια (1) ηλεκτρική αντίσταση εσωτερικής διαμέτρου Ø114.3, εξωτερικής Ø132 και μήκους 300 mm.

- ***Ζώνη 5:*** Η Ηλεκτρική αντίσταση κυκλώνα εσωτερικής διαμέτρου Ø219, εξωτερικής Ø237 και μήκους 300 mm.

Η συνολική ισχύς των εγκατεστημένων αντιστάσεων φτάνει τα 70.8 kW όταν όλες τους λειτουργούν στο 100% των δυνατοτήτων τους.

Πίνακας 6. *Χαρακτηριστικά ηλεκτρικών αντιστάσεων.*

Διαστάσεις αντίστασης (mm)	Ποσότητα	Τάση (V)	Ισχύς (W)
Ø114.3 × 245	14	400	3900
Ø114.3 × 190	2	400	3000
Ø114.3 × 300	1	400	4500
Ø219 × 300	1	400	4500
Ø114.3 × 70	1	230	1200

Στον πίνακα που έπεται υπολογίζονται τα άνω θερμοκρασιακά όρια που δύναται να φτάσει κάθε περιοχή του εσωτερικού της κλίνης, με τη βοήθεια της κάτωθι σχέσης:

$$Q_{resist} = \frac{k \times A \times (T_{resist} - T_{bed})}{\Delta x}$$

όπου:

- Q_{resist} η προσφερόμενη από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις ισχύς στον αντιδραστήρα $[W]$.[10]
- k η θερμική αγωγιμότητα των ηλεκτρικών αντιστάσεων και συγκεκριμένα της χρωμονικελίνης. $k_{NiCr} = 11.3\ \frac{W}{m \times K}$.
- A το συνολικό εμβαδό των συρμάτων χρωμονικελίνης εντός των ηλεκτρικών αντιστάσεων $[m^2]$.
- T_{resist} η οριακή θερμοκρασία λειτουργίας των ηλεκτρικών αντιστάσεων [900°C].
- Δx το πάχος του σύρματος χρωμονικελίνης και, τέλος,
- T_{bed} η υψηλότερη θερμοκρασία που δύναται να φτάσει η κλίνη σύμφωνα με τα παραπάνω.

Πίνακας 7. *Άνω θερμοκρασιακά επίπεδα κλίνης βάσει των ζωνών ηλεκτρικών αντιστάσεων.*

	Ζώνες αντιστάσεων				
	1	2	3	4	5
Ονομαστική ισχύς Q_{resist} ***[W]***	16800	19500	15600	14400	3500
Μέγιστη θερμοκρασία κλίνης T_{bed} ***[°C]***	832.753	821.945	837.556	842.359	885.99

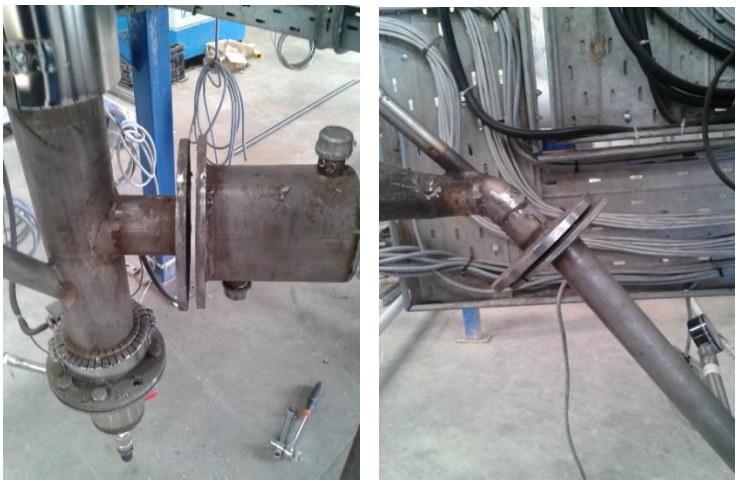
Φωτογραφικό υλικό των εν λόγω αντιστάσεων παρατίθεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο. [**Εικόνα 50** - **Εικόνα 54**]

[10] Ως Q_{resist} στους υπολογισμούς λαμβάνεται το 90% της ονομαστικής ισχύος κάθε ζώνης, συνυπολογίζοντας έτσι το σύνολο των θερμικών απωλειών.

2.3.2 Θέρμανση αντιστάσεων

Αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εγκατάστασης των ηλεκτρικών αντιστάσεων, πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική θέρμανσή τους, προκειμένου να διαπιστωθεί η εύρυθμη λειτουργία τους. Επιπλέον, η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε με σκοπό να υπολογιστούν οι ακριβείς διαστολές που προκαλούνται στον ανοδικό αγωγό με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο στρεβλώσεων της σωλήνωσης του ανοδικού αγωγού, λύθηκαν οι αρθρώσεις της με το μανδύα του κοχλία τροφοδοσίας και τη βαλβίδα τύπου L.

Αρχικά, καταγράφηκαν θερμοκρασία περιβάλλοντος $32\,°C$ και απόσταση του ανοδικού αγωγού από το έδαφος $20.6\ cm$.

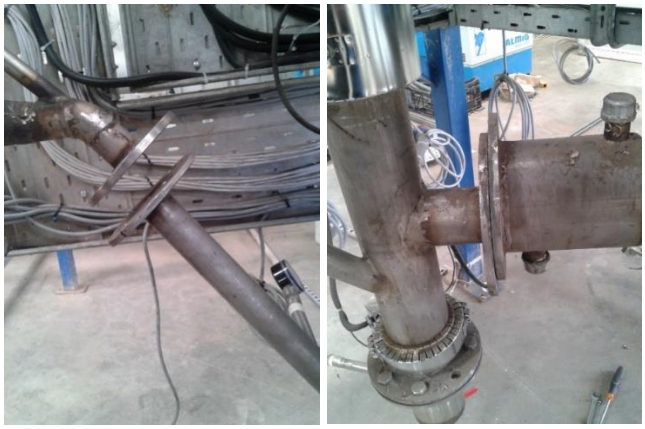


Εικόνα 22. *Λύσιμο των δύο φλαντζών που συνδέουν τον ανοδικό αγωγό με το μανδύα του κοχλία τροφοδοσίας και τη βαλβίδα τύπου L.*

Στον πίνακα που ακολουθεί καταγράφονται οι μετρήσεις της θερμοκρασίας, των επιμηκύνσεων της σωλήνωσης και των αποστάσεων που παρατηρούνται μεταξύ αυτής και του εδάφους, συγκριτικά με τις αντίστοιχες σε ψυχρές συνθήκες.

Πίνακας 8. *Μεταβολές θερμοκρασίας και μήκους κατά τη θέρμανση των ηλεκτρικών αντιστάσεων.*

Στάδιο Δοκιμής	Ώρα	Χρόνος Θέρμανσης (min)	Θερμοκρασία (°C)	Επιμήκυνση (cm)	Απόσταση από το έδαφος (cm)
Έναρξη δοκιμής	15:04	0	32	0	20,6
Μέτρηση 1	15:09	5	126	2,6	18,0
Μέτρηση 2	15:12	8	220		
Μέτρηση 3	15:14	10	250	5,1	15,0
Μέτρηση 4	15:16	12	325	5,8	14,8
Μέτρηση 5	15:19	15	390	7,2	13,4
Μέτρηση 6	15:22	18	420		
Λήξη Δοκιμής	15:25	21	480 – 500	8,1	12,5
Επιπλέον Μέτρηση	15:35			5,1	15,5
Τελευταία Μέτρηση	18:30			0	20,6



Εικόνα 23. *Ενδεικτική εικόνα των αποστάσεων της βαλβίδας τύπου L (αριστερά) και του κοχλία (δεξιά) από τις φλάντζες, μεταξύ των Μετρήσεων 1 & 2 [Πίνακας 6].*

Εικόνα 24. *Μέτρηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της δοκιμής (αριστερά). Πυρωμένο τμήμα της σωλήνωσης μεταξύ δυο διαδοχικών αντιστάσεων, σε θερμοκρασίες άνω των 450°C (δεξιά).*

Σύμφωνα με τα παραπάνω καταγεγραμμένα δεδομένα, η μέγιστη επιμήκυνση που ενδέχεται να υποστεί ο ανοδικός αγωγός κατά τη θέρμανσή του στους $500°C$ είναι $8.1\ cm$. Παρατηρείται, λοιπόν, μια ευθέως ανάλογη σχέση μεταξύ της αύξησης της θερμοκρασίας και των καταγραφόμενων επιμηκύνσεων του ανοδικού αγωγού. Εφόσον η εγκατάσταση προορίζεται για λειτουργία σε θερμοκρασιακά επίπεδα της τάξης των $800°C$, προβλέπεται ακόμα μεγαλύτερη μεταβολή του μήκους του ανοδικού αγωγού. Αυτός είναι και ο λόγος που επιτάσσει την προσθήκη ασφαλιστικών διατάξεων, όπως αυτές παρουσιάζονται σε προηγούμενο κεφάλαιο, προς απορρόφηση των διαστολών. [2.1]

2.3.3 Τοποθέτηση μόνωσης

Προκειμένου να αποφευχθούν οι διαρροές θερμότητας προς το περιβάλλον και να επιτευχθεί όσο το δυνατόν η λειτουργία της μονάδας σε συνθήκες που προσεγγίζουν τα αδιαβατικά τοιχώματα, όλες οι σωληνώσεις του αεριοποιητή καλύφθηκαν με τους παρακάτω μανδύες μονωτικών υλικών:

- Η πρώτη στρώση, με την οποία επικαλύφθηκε κάθε θερμή σωλήνωση, αποτελείται από κεραμοβάμβακα πάχους $50\ mm$, ύψους $61\ cm$ και πυκνότητας $128\ kg/m^3$. Ο εν λόγω κεραμοβάμβακας ενδείκνυται για μόνωση επιφανειών που αγγίζουν θερμοκρασίες της τάξης των $1260°C$. [**Εικόνα 55**] [65] Συγκεκριμένα στον ανοδικό

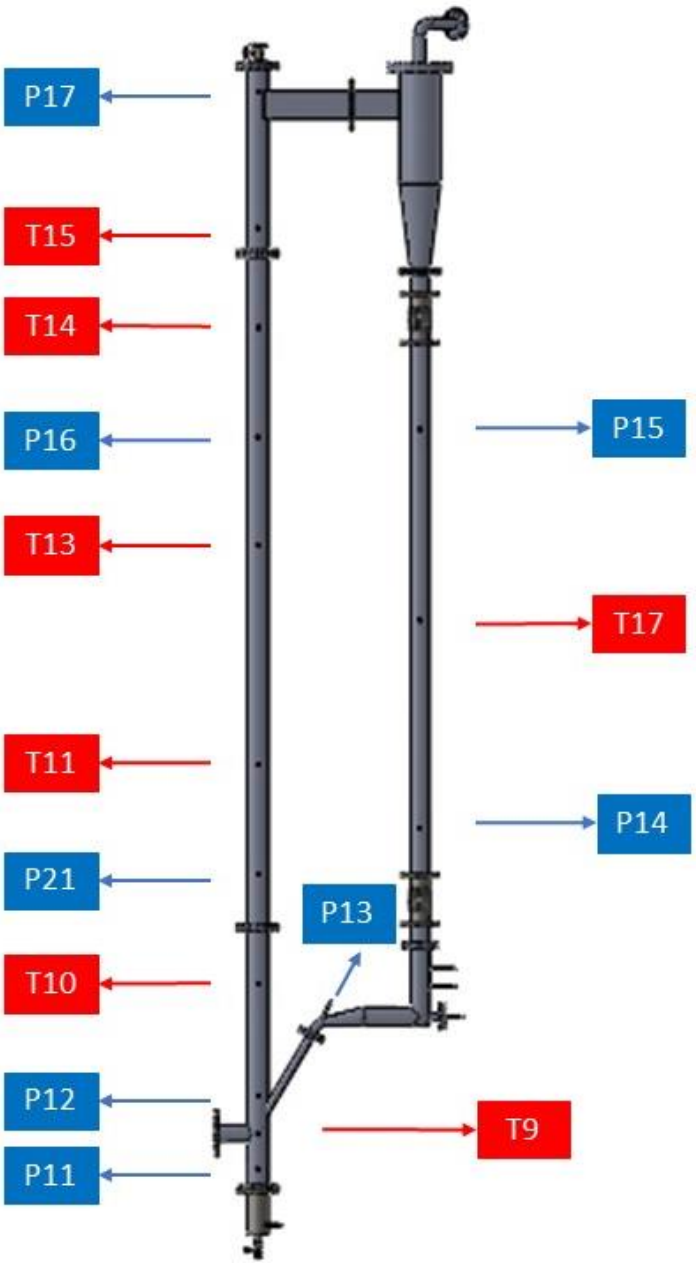
αγωγό, στον οποίο αναπτύσσονται και οι υψηλότερες θερμοκρασίες, τοποθετήθηκαν δύο στρώσεις του ανωτέρω μανδύα κεραμοβάμβακα.

- Πάνω από τον μανδύα κεραμοβάμβακα, σε όλο το μήκος των σωληνώσεων της πιλοτικής μονάδας, προστέθηκε μια στρώση μονωτικού πετροβάμβακα IZOCAM με επένδυση προκατασκευασμένων φύλλων αλουμινίου, πάχους $50\ mm$, ύψους $1.2\ m$ και πυκνότητας $100\ kg/m^3$. Οι ενδεικνυόμενες θερμοκρασίες για χρήση του παραπάνω μονωτικού υλικού δεν ξεπερνούν τους $600°C$. [**Εικόνα 56**] [65]

Εικόνα 25. *Συνολική εικόνα της μονάδας μετά την ολοκλήρωση της θερμομόνωσης.*

2.4 Εγκατάσταση μετρητικών στοιχείων θερμοκρασίας και πίεσης και οργάνων ελέγχου

Σε διάφορες θέσεις της πειραματικής εγκατάστασης βρίσκονται συνδεδεμένα μετρητικά στοιχεία θερμοκρασίας (Τ) και πίεσης (Ρ). Πιο αναλυτικά, καθ' όλο το μήκος του ανοδικού αγωγού, της καθοδικής σωλήνωσης, της βαλβίδας τύπου L, του εναλλάκτη θερμότητας, αλλά και της σωλήνωσης που οδηγεί το αέριο σύνθεσης στο θάλαμο καύσης είναι τοποθετημένα θερμοστοιχεία και μετρητές πίεσης[11], για τον έλεγχο της ορθής διεξαγωγής της διεργασίας και την ανίχνευση προβλημάτων και αστοχιών. Ακολουθεί το σκαρίφημα με τις ακριβείς θέσεις των στοιχείων αυτών και αντίστοιχος πίνακας με τις αποστάσεις από τη βάση του ανοδικού αγωγού που αυτά είναι τοποθετημένα:



Εικόνα 26. *Θέσεις μετρητικών στοιχείων θερμοκρασίας (Τ) και πίεσης (Ρ).*

[11] Μετρητές σχετικής πίεσης και διαφράγματος.

Πίνακας 9. *Ονομασία των μετρητών πίεσης και απόστασή τους από τη βάση του ανοδικού αγωγού.*

Μετρητής Πίεσης	Περιοχή	Ύψος από τη βάση του ανοδικού αγωγού (m)
P11	Ανοδικός αγωγός	0.088
P12	Ανοδικός αγωγός	0.478
P21	Ανοδικός αγωγός	1.683 [12]
P16	Ανοδικός αγωγός	4
P17	Ανοδικός αγωγός	5.9
P13	Βαλβίδα τύπου L	0.784
P14	Καθοδικός αγωγός	1.879 / 1.058 [13]
P15	Καθοδικός αγωγός	4.009 / 3.189 [13]

Πίνακας 10. *Ονομασία των θερμοστοιχείων και απόστασή τους από τη βάση του ανοδικού αγωγού.*

Θερμοστοιχείο	Περιοχή	Ύψος από τη βάση του ανοδικού αγωγού (m)
T9	Ανοδικός αγωγός	0.278
T10	Ανοδικός αγωγός	1.078
T11	Ανοδικός αγωγός	2.2464
T17	Καθοδικός αγωγός	2.989 / 2.164 [13]
T13	Ανοδικός αγωγός	3.4224
T14	Ανοδικός αγωγός	4.5824
T15	Ανοδικός αγωγός	5.1184

Συγκεκριμένα, σε όλη την πιλοτική διάταξη τοποθετήθηκαν:

- ***Δώδεκα (12) θερμοστοιχεία NiCr - Ni Type mantel,*** CLASS 1, μήκους βυθίσεως $300\ mm$, διαμέτρου Ø $3\ mm$, σπειρώματος σύνδεσης 1/8 BSP, κατασκευασμένα από INCONELL 600 και περιοχή λειτουργίας $0 - 900°C$. Επιπλέον, τα παραπάνω θερμοστοιχεία φέρουν ενσωματωμένο μεταδότη $4 - 20\ mA$ τύπου INOR APAQ – HCF.

Εικόνα 27. *Θερμοστοιχεία NICR NI Type mantel.*

[12] Ο μετρητής P21 αναφέρεται για λόγους πληρότητας, παρ' όλο που δεν επετεύχθη η ορθή λειτουργία του και η καταγραφή μετρήσεων.
[13] Μέτρηση από τη βάση της L – Valve.

Τα παραπάνω θερμοστοιχεία συμβολίζονται στο σκαρίφημα της μονάδας με (T) και δίπλα του έναν αριθμό, διαφορετικό για κάθε θερμοστοιχείο. Ο αριθμός αυτός αντιστοιχεί στη θέση του κάθε θερμοστοιχείου στον πίνακα ελέγχου.

- ***Πέντε (5) θερμοζεύγη καλωδίου NiCr – Ni (K) Type,*** 2 αγωγών, ελληνικής συναρμολόγησης, μήκος ανοξείδωτου εύκαμπτου αισθητηρίου $300\,mm$ και πάχος $3\,mm$. Η περιοχή λειτουργίας τους είναι $0 - 1000°C$. Τοποθετήθηκε ένα θερμοζεύγος όπως τα παραπάνω σε κάθε ζώνη αντιστάσεων. [2.3.1]

Εικόνα 28. *Θερμοζεύγος καλωδίου NiCr - Ni (K) Type, εγκατεστημένο στη μονάδα.*

Σημειώνεται ότι τα παραπάνω θερμοζεύγη δεν έχουν παρασταθεί στο σκαρίφημα της μονάδας, αφού είναι εφαπτόμενα στο εξωτερικό τοίχωμα των σωληνώσεων και στο εσωτερικό των ηλεκτρικών αντιστάσεων.

- ***Δύο (2) μεταδότες σχετικής πίεσης JUMO dTRANS p30***, περιοχής μέτρησης $-1 - 0.6\,Bar$ (σχετική πίεση), έξοδο $4 - 20\,mA$, με δυνατότητα σύνδεσης μέσω ακροφυσίου ανοξείδωτου χάλυβα ακτίνας $^1/_2\,''$.
- ***Δέκα (10) μεταδότες πίεσης διαφράγματος WIKA S – 11,*** περιοχή μέτρησης $0 - 2{,}5\,Bar$ (απόλυτη πίεση), αναλογική έξοδο $4 - 20\,mA$, με δυνατότητα σύνδεσης μέσω ακροφυσίου ανοξείδωτου χάλυβα ακτίνας $^1/_2\,''$.

Οι μετρητές πίεσης, αντίστοιχα με τα θερμοστοιχεία, συμβολίζονται στο σκαρίφημα της μονάδας με (P) και δίπλα του έναν αριθμό, που αντιστοιχεί στη θέση του καθενός στον πίνακα ελέγχου. Σημειώνεται ότι η αρχική διάταξη σύνδεσης των μετρητών πίεσης στους μαστούς τους τοποθετημένους κατά μήκος των αγωγών περιλάμβανε σωληνώσεις διαμέτρου $^1/_2\,''$ σε διάταξη L στο επιθυμητό σημείο της σωλήνωσης και μακρύ λάστιχο, του οποίου η μια άκρη εφάρμοζε στην εν λόγω σωλήνωση και η άλλη στο ακροφύσιο του μετρητή. Η ανωτέρω διάταξη κρίθηκε αποτυχημένη ύστερα από μια δοκιμή μόνο με αδρανές υλικό, καθώς οι απώλειες πίεσης κατά μήκος της οδηγούσαν σε μηδενικές ενδείξεις στο καταγραφικό σύστημα. Τελικά, αντικαταστάθηκε από άλλη, μικρότερου μήκους και αισθητά μικρότερης διαμέτρου ($^1/_8\,''$), ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες και να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στις καταγραφόμενες τιμές. [**Εικόνα 57**]

Εικόνα 29. *Μεταδότης σχετικής πίεσης JUMO dTRANS p30 (αριστερά).*
Μεταδότης πίεσης διαφράγματος WIKA S – 11 (δεξιά).

2.5 Γραμμή δειγματοληψίας

Για τη δειγματοληψία απαιτείται προεπεξεργασία του αερίου με τον καθαρισμό του από τα σωματίδια, απομάκρυνση των πισσών και της υγρασίας. Ο καθαρισμός από το σωματιδιακό φορτίο πρέπει να γίνει με θερμοκρασία μεγαλύτερη αυτής της συμπύκνωσης των υδρατμών, καθώς σε αντίθετη περίπτωση υφίστανται επικαθίσεις και φραγμοί. Η ανάγκη αυτή καθιστά απαραίτητη τη θέρμανση του φίλτρου κατακράτησης των σωματιδίων σε θερμοκρασίες της τάξης των $180 - 200$ °C.

Θερμαινόμενη γραμμή (Heated Line)

Αρχικά, μετά την έξοδό του από τον αντιδραστήρα, το παραγόμενο αέριο οδηγείται σε μια ***ηλεκτρική θερμαινόμενη γραμμή*** μήκους $L = 350\,mm$, διαμέτρου $D = 6\,mm$, κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα. Ο κύριος σκοπός της ύπαρξης ηλεκτρικής θερμαινόμενης γραμμής είναι η αποφυγή συμπύκνωσης των υδρατμών και των λοιπών ευτηκτικών ενώσεων. Ο θερμαινόμενος πυρήνας είναι μονωμένος με επαρκείς στρώσεις πλεκτών νημάτων οξειδωμένων ινών πολυακρυλονιτριλίου, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης και αγωγής του ηλεκτρικού ρεύματος. Η δέσμη προστατεύεται επιπλέον από μια στρώση υαλοβάμβακα με περίβλημα σιλικόνης.

Κεραμικό φίλτρο (Ceramic Filter)

Εικόνα 30*. Μανδύας M&C PSP4000-H κεραμικού φίλτρου M&C S-2K.*

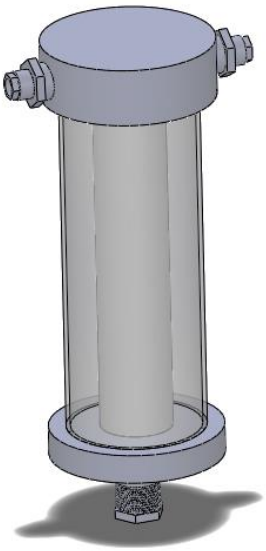
Στη συνέχεια της θερμαινόμενης γραμμής βρίσκεται ένα ***κεραμικό φίλτρο M&C S-2K***, με δυνατότητα κατακράτησης σωματιδίων $\geq 2\,\mu m$. Το φίλτρο αυτό βρίσκεται εντός ***θερμαινόμενου μανδύα M&C (PSP4000-H)***. Το εν λόγω κεραμικό φίλτρο τοποθετείται στα πρώτα στάδια της γραμμής δειγματοληψίας. Η θέση εγκατάστασής του επιλέγεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να συλλέξει τα σωματίδια που φέρει το αέριο, τα οποία έχουν μικρότερη διάμετρο από αυτήν που οριακά δύναται να κατακρατήσει ο δεύτερος κυκλώνας της εγκατάστασης. Έτσι, προκύπτει ένα δείγμα αερίου ελεύθερο σωματιδίων, ικανό να οδηγηθεί στα επόμενα στάδια καθαρισμού, χωρίς να προκαλέσει επιπλοκές στην υπόλοιπη διάταξη. Αποτελείται κυρίως από λεπτές αργιλοπυριτικές κεραμικές ίνες, χαρακτηριστικό που το καθιστά εξαιρετικά πυρίμαχο και ανθεκτικό σε διαβρωτικά αέρια. Επιπλέον, αποτελεί ιδανικό μέσο φιλτραρίσματος, λόγω της λεπτής πλέξης των ινών, που έχει ως αποτέλεσμα μεγάλο εμβαδό συναλλασσόμενης επιφανείας με το αέριο.

Πλυντρίδα ισοπροπανόλης (Isopropanol Impinger)

Εικόνα 31. *Μεταλλική πλυντρίδα ισοπροπανόλης.*

Μετά το ανωτέρω κεραμικό φίλτρο, το αέριο οδηγείται σε μια ***μεταλλική πλυντρίδα***, στην οποία έχει εισαχθεί ***διάλυμα ισοπροπανόλης*** (C_3H_8O) 99%. Προτιμήθηκε η χρήση της μεταλλικής πλυντρίδας και όχι εκείνης από γυαλί, λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής της. Η ισοπροπανόλη επιτελεί το ρόλο του διαλύτη πισσών, κατακρατώντας τις τελευταίες για περεταίρω μελέτη και αφαιρώντας τις από το προς μελέτη αέριο. Οι πίσσες υγροποιούνται μόλις έρθουν σε επαφή με το διάλυμα ισοπροπανόλης.

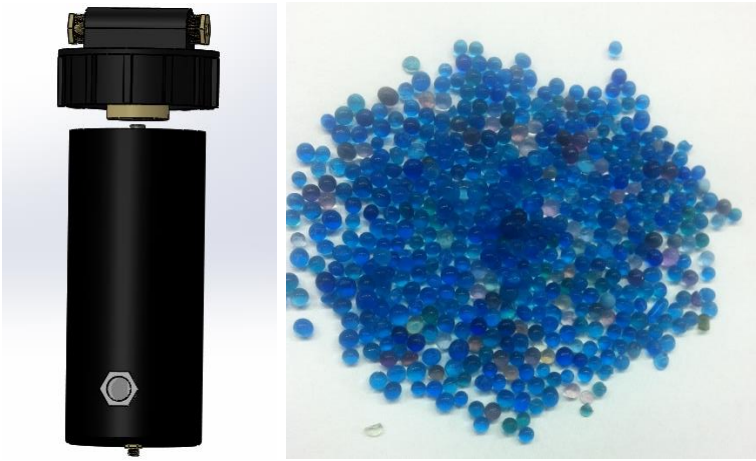
Φίλτρο μικροϊνών (Microfibre Filter)



Εικόνα 32. *Φίλτρο Balston Parker.*

Με σκοπό να διασφαλιστεί η ορθή λειτουργία του αναλυτή και να αποφευχθεί η είσοδος επιβλαβών στερεών και υγρών προσμίξεων σε αυτόν, το αέριο οδηγείται σε ένα φίλτρο κατακράτησης των παραπάνω και καθαρισμού του προς ανάλυση αερίου. Συγκεκριμένα, μετά την πλυντρίδα, τοποθετείται ένα ***φίλτρο μικροϊνών Balston Parker 100-25-BXE2411***, με κεφαλή και εσωτερικά μέρη κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα 316SS και γυάλινο πυρίμαχο δοχείο, με πλαστικό περίβλημα για προστασία από θραύση. Το εσωτερικό μέρος του, που αντικαθίσταται ύστερα από ικανό αριθμό ωρών χρήσης, είναι κατασκευασμένο από μικροΐνες, με στόχο τη δέσμευση των σταγονιδίων και την απομάκρυνσή τους από το αέριο. Το εν λόγω φίλτρο λειτουργεί σε άνω θερμοκρασιακό όριο τους $150°C$ και παρέχει απόδοση φιλτραρίσματος στο υπό καθαρισμό αέριο της τάξης του 99.99%, ακόμα και σε σωματίδια μεγέθους $0.01\ \mu m$. Τελικά, το μέρος των πισσών που δεν κατάφερε να κατακρατηθεί από την πλυντρίδα ισοπροπανόλης, συγκεντρώνεται σε αυτή τη διάταξη και το αέριο, απαλλαγμένο πια από πίσσες, οδηγείται στη στήλη αφύγρανσης.

Στήλη αφύγρανσης (Silica Gel Column)



Εικόνα 33. *Σκαριφηματική απεικόνιση στήλης αφύγρανσης (αριστερά). Silica Gel στο εσωτερικό της στήλης αφύγρανσης (δεξιά).*

Λόγω της απαίτησης τροφοδοσίας πλήρως ξηρού αερίου στο χρωματογράφο, πριν το αέριο εισαχθεί σε αυτόν, στη γραμμή δειγματοληψίας υπάρχει μια ***στήλη αφύγρανσης με αφυγραντικό μέσο σφαιρίδια πυριτίου*** (silica gel). Η εν λόγω στήλη αποτελεί μια δικλείδα ασφαλείας, ώστε το τελικό προς ανάλυση αέριο που θα προκύψει να είναι εντελώς ξηρό. Τα σφαιρίδια πυριτίου έχουν ένα βαθύ μπλε χρώμα όντας ξηρές, ενώ αποκτούν ρόδινη όψη όταν απορροφήσουν την υγρασία του δείγματος. Τότε είναι που απαιτείται και η αναγέννηση του υλικού, μέσω της θέρμανσής του στους $120\ ^{\circ}C$ περίπου.

Αντλία κενού (Vacuum Pump)

Εικόνα 34. *Αντλία κενού LABOPORT.*

Μετά τη στήλη αφύγρανσης που περιγράφεται παραπάνω, στην δειγματοληπτική γραμμή έχει τοποθετηθεί αντλία κενού. Ο ρόλος της αντλίας αυτής είναι να μεταφέρει και να συμπιέζει το διερχόμενο αέριο χωρίς να το μολύνει με τυχόν προσμίξεις. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της εν λόγω γραμμής δειγματοληψίας έγινε χρήση ***αντλίας κενού LABOPORT N86 KT.18*** με τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Πίνακας 11. *Χαρακτηριστικά αντλίας κενού LABOPORT.*

Τεχνικό χαρακτηριστικό	**N86 KT.18**
Παροχή (l/min)[14]	5.5
Απόλυτο κενό (mbar)[15]	160
Πίεση λειτουργίας (bar g)	2.5
Οριακές θερμοκρασίες λειτουργίας (˚C)	+5…+40
Ισχύς (W)	60

[14] Σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης.
[15] Απόλυτη πίεση.

Μετρητής παροχής (Flowmeter)

Εικόνα 35. *Μετρητής παροχής KYTOLA.*

Μετά την αντλία κενού έχει τοποθετηθεί ένας ***μετρητής παροχής KYTOLA EK-2KR***, ώστε καθ' όλη τη διάρκεια της δειγματοληψίας να υπάρχει σαφής εικόνα της διερχόμενης παροχής που εξέρχεται από την αντλία και καταλήγει στον αναλυτή αερίων. Πιο συγκεκριμένα, ο εν λόγω μετρητής παροχής μπορεί να διαχειριστεί μέγιστη παροχή της τάξης των $0.8\ Nl/min$, ενώ για τη λειτουργία του απαιτεί ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία 20 βαθμών Κελσίου.

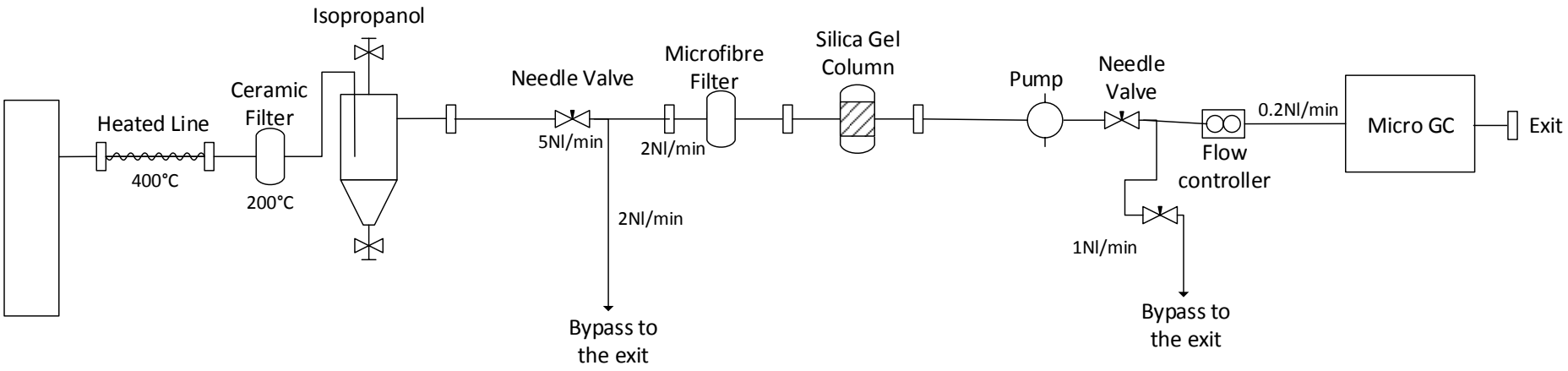
Αναλυτής αερίων Micro-GC

Εικόνα 36. *Micro - GC CP 4900, Varian.*

Μετά την έξοδό του από τη στήλη αφύγρανσης, το αέριο οδηγείται μέσω needle valve σε έναν ***αναλυτή αερίων Micro – GC CP 4900 της εταιρίας Varian***, με σκοπό την ακριβή του ανάλυση. Αναλυτικότερα, ο Micro – GC CP 4900 είναι εξοπλισμένος με δύο στήλες ανάλυσης, καθεμία από τις οποίες λειτουργεί με διαφορετικό αέριο φορέα (gas carrier). Κάθε στήλη είναι αρμόδια για την ανίχνευση συγκεκριμένων αερίων, ώστε να προσδιοριστεί επακριβώς η σύσταση του υπό έλεγχο αερίου. Πριν τη χρήση της συσκευής για πρώτη φορά, έχει πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση, για την όσο το δυνατόν πιο ακριβή καταγραφή της σύστασης του δείγματος αερίου.

Πίνακας 12. *Χαρακτηριστικά στηλών ανάλυσης αερίου σύνθεσης.*

Στήλη	**Αέριος Φορέας**	**Ανιχνευόμενα Αέρια**	**Θερμοκρασιακά όρια λειτουργίας**
Molsieve 5Å PLOT	Αργό (Ar)	CO, N_2, CH_4, H_2	180˚C
HayeSep A	Ήλιο (He)	CO_2	160˚C



Διάγραμμα 12. *Διάγραμμα ροής γραμμής δειγματοληψίας αερίου.*

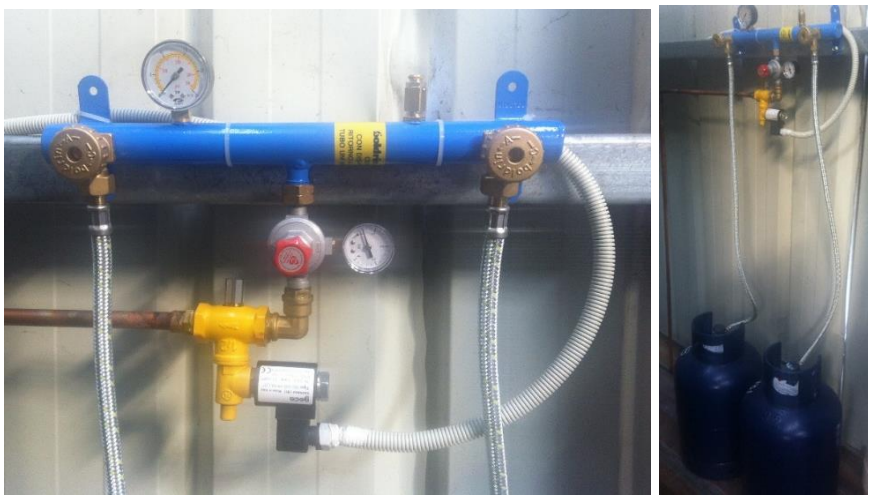
2.6 Φωτογραφικό υλικό

Ακολουθεί φωτογραφικό υλικό τμημάτων του αντιδραστήρα και των βελτιωτικών αλλαγών που πραγματοποιήθηκαν για την εύρυθμη διεξαγωγή των δοκιμών. Επιπλέον, παρατίθενται φωτογραφίες των διατάξεων που απαιτούνται για τη διεξαγωγή των δοκιμών. Καθ' όλο το μήκος του ανωτέρω κειμένου υπάρχουν παραπομπές στα παρακάτω.

Εικόνα 37. *Πρώτο σημείο τοποθέτησης διαστολικού συνδέσμου (κάτω μέρος κυκλώνα) (αριστερά). Δεύτερο σημείο τοποθέτησης διαστολικού συνδέσμου (άνωθεν της φλάντζας της βαλβίδας τύπου L (κέντρο). Διαδικασία τοποθέτησης των διαστολικών συνδέσμων μετά την αφαίρεση του τμήματος της σωλήνωσης (δεξιά).*

Εικόνα 38. *Εισαγωγή πρωτεύοντος αέρα ρευστοποίησης στο διασκορπιστή αέρα στη βάση του ανοδικού αγωγού.*

Εικόνα 39. *Σημεία εισαγωγής αζώτου στον κοχλία τροφοδοσίας (αριστερά) και στην L – Valve (δεξιά).*



Εικόνα 40. *Σύστημα τροφοδοσίας υγραερίου (LPG) στον καυστήρα.*

Εικόνα 41. *Συμπιεστής αέρα που οδηγείται στη μονάδα (δεξιά).Αεροφυλάκιο αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (κέντρο) και αφυγραντής (δεξιά).*

Εικόνα 42. *Στεγανή προσαρμογή στη βάση του δοχείου τροφοδοσίας του ολιβίνη.*

Εικόνα 43. *Άνω και κάτω σημείο του rubber που μεσολαβεί του κοχλία τροφοδοσίας και της πρώτης ροταρικής βαλβίδας.*

Εικόνα 44. *Συνδετικό τμήμα μεταξύ της δεύτερης περιστροφικής βαλβίδας και του κοχλία εκφόρτισης.*

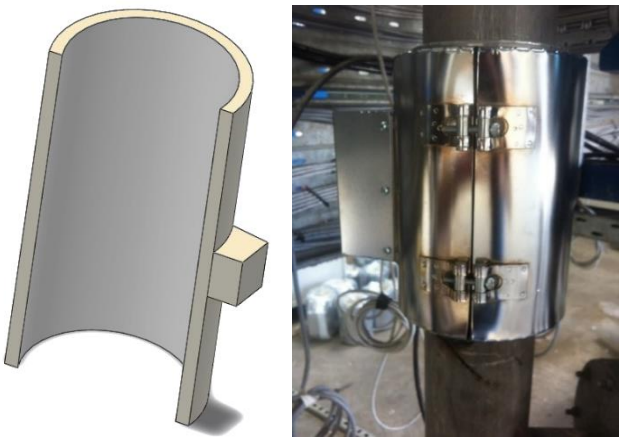
Εικόνα 45. *Στεγανή προσαρμογή στη βάση του δοχείου τροφοδοσίας του καυσίμου (αριστερά). Φλάντζα περιβλήματος κοχλία τροφοδοσίας και ρουλεμάν (δεξιά).*

Εικόνα 46. *Κάτω τμήμα βιομηχανικού λάστιχου (rubber), που μεσολαβεί του κοχλία τροφοδοσίας και της πρώτης περιστροφικής βαλβίδας (αριστερά). Διαρροή γύρω από την ολισθαίνουσα βαλβίδα που αντικατέστησε το βιομηχανικό λάστιχο (δεξιά).*

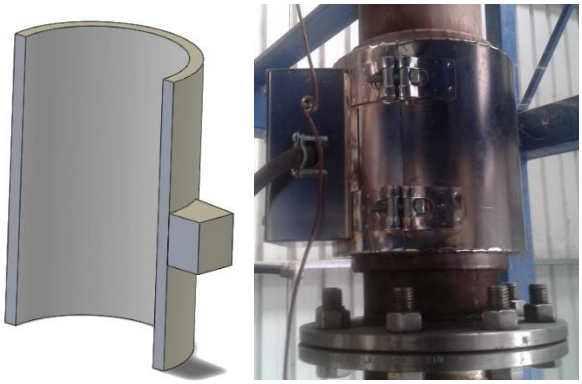
Εικόνα 47. *Άνω και κάτω φλάντζα στεγανοποίησης της διάταξης μεταξύ δεύτερης ροταρικής βαλβίδας και κοχλία εκφόρτισης.*

Εικόνα 48. *Κολλήσεις κατά μήκος του κοχλία εκφόρτισης.*

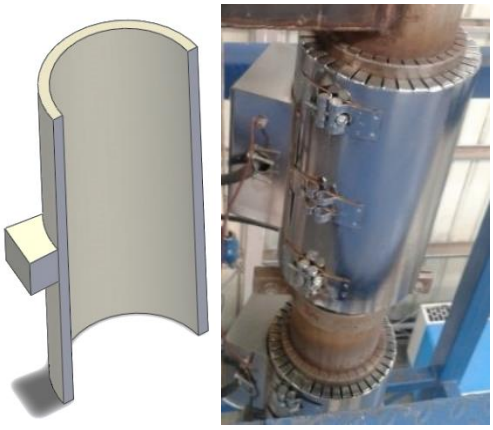
Εικόνα 49. *Κολλήσεις του ακροφυσίου που έπεται της L – Valve (αριστερά). Κολλήσεις στη διαμόρφωση της σωλήνωσης στην ένωση της L – Valve (δεξιά).*



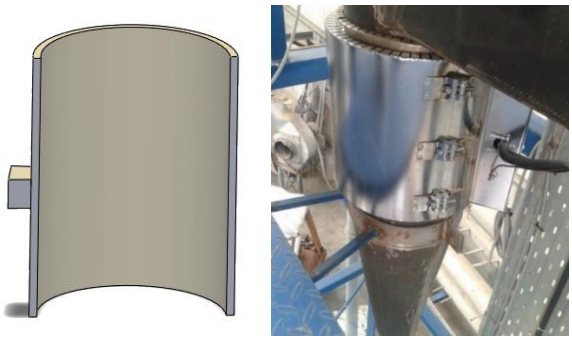
Εικόνα 50. *Ηλεκτρική αντίσταση εσωτερικής Ø114.3, εξωτερικής Ø132, μήκους 245 mm σε τομή (αριστερά). Η αντίσταση τοποθετημένη στον ανοδικό αγωγό (δεξιά).*



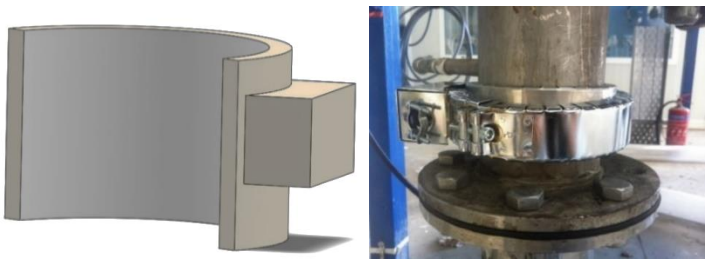
Εικόνα 51. *Ηλεκτρική αντίσταση εσωτερικής Ø114.3, εξωτερικής Ø132, μήκους 190 mm σε τομή (αριστερά). Η αντίσταση τοποθετημένη στον ανοδικό αγωγό (δεξιά).*



Εικόνα 52. *Ηλεκτρική αντίσταση εσωτερικής διαμέτρου Ø114,3, εξωτερικής Ø132 και μήκους 300 mm (αριστερά). Η αντίσταση τοποθετημένη στο άνω τμήμα του ανοδικού αγωγού (δεξιά).*



Εικόνα 53. *Ηλεκτρική αντίσταση εσωτερικής διαμέτρου Ø219, εξωτερικής Ø237 και μήκους 300 mm (αριστερά). Η αντίσταση τοποθετημένη στο κυλινδρικό τμήμα του κυκλώνα (δεξιά).*



Εικόνα 54. *Ηλεκτρική αντίσταση εσωτερικής Ø114.3, εξωτερικής Ø132, μήκους 70 mm (αριστερά). Η αντίσταση τοποθετημένη στη βάση του ανοδικού αγωγού (δεξιά).*

Εικόνα 55. *Η μορφή του εναλλάκτη (αριστερά) και του καθοδικού αγωγού (δεξιά) μετά την επένδυση με κεραμοβάμβακα.*

Εικόνα 56. *Εναλλάκτης (αριστερά) και βαλβίδα τύπου L (δεξιά) με φύλλα πετροβάμβακα IZOCAM.*

Εικόνα 57. *Αρχική διάταξη σύνδεσης μετρητών πίεσης (αριστερά). Διάταξη που την αντικατέστησε (δεξιά).*

3 Πειραματικές δοκιμές

Με στόχο την κατανόηση της διαδικασίας της ρευστοποίησης εντός της κλίνης, μελετήθηκαν και παρουσιάζονται παρακάτω οι μέθοδοι υπολογισμού των σωματιδιακών ταχυτήτων, από την έναρξη της ρευστοποίησης μέχρι τη διαμόρφωση της τελικής ταχύτητας των ρευστοποιημένων πια σωματιδίων.

Αρχικά, αναλύθηκαν οι δυνάμεις που επιδρούν σε ένα και μοναδικό σφαιρικό σωματίδιο, όταν αυτό βρεθεί εντός του ανοδικού αγωγού ρευστοποιημένης κλίνης με αέρα: [35]

Βαρύτητα: $F_g = m\ g$

Άνωση: $F_b = \rho_g\ g\ V = \frac{\rho_g\ g\ m}{\rho_\sigma}$

Οπισθέλκουσα: $F_D = C_D\ \frac{\rho_g\ {u_z}^2}{2}\ A$

όπου:

- m η μάζα του σωματιδίου (kg)
- g η βαρυτική επιτάχυνση $g = 9.81\ m/s^2$,
- ρ_g η πυκνότητα του αέρα $(\frac{kg}{m^3})$,
- ρ_σ η πυκνότητα του σωματιδίου $(\frac{kg}{m^3})$,
- C_Dο συντελεστής οπισθέλκουσας,
- u_z^2 η σχετική ταχύτητα σωματιδίου – αέρα και
- A η μετωπική επιφάνεια του σωματιδίου(m^2).

Με την θεώρηση ότι η θερμοκρασία και η πίεση του αέρα, επομένως και η πυκνότητά του, παραμένουν αμετάβλητες, εύκολα προκύπτει ότι η δύναμη της βαρύτητας και η άνωση διατηρούνται σταθερές. Αντιθέτως, η οπισθέλκουσα δύναμη μεταβάλλεται ανάλογα με τη σχετική ταχύτητα σωματιδίου – αέρα.

Ως προς την πυκνότητα του αέρα ρ_g γίνεται η παραδοχή ότι ο τροφοδοτούμενος αέρας έχει θερμοκρασία $25°C$, οπότε η πυκνότητά του είναι $\rho_g = 1.184\frac{kg}{m^3}$ και οι αρχικοί υπολογισμοί θα γίνουν με αυτή την τιμή. Αντίστοιχα επιλέγεται και η τιμή του δυναμικού ιξώδους μ που θα χρησιμοποιηθεί στους αρχικούς υπολογισμούς. Επιλέχθηκε η τιμή που παίρνει το δυναμικό ιξώδες στους $25°C$, ίσο με $1.861598 \cdot 10^{-5}\ \frac{kg}{m \cdot s}$.

Επομένως, η αριθμητική τιμή της σχετικής ταχύτητας u_z^2 είναι αυτή που καθορίζει τον προσανατολισμό της συνιστάμενης δύναμης που ασκείται τελικά στο σωματίδιο, καθώς και αν αυτό θα κινηθεί προς την κορυφή ή τον πυθμένα του αντιδραστήρα.

Σφαιρικότητα Σωματιδίων (Particle Sphericity) – φ

Η σφαιρικότητα φ των σωματιδίων αποτελεί απαραίτητο μέγεθος για τη μελέτη της κοκκώδους ροής και υπολογίζεται ως εξής:

$$\varphi = \left(\frac{Επιφάνεια\ Σφαίρας}{Επιφάνεια\ Σωματιδίου}\right)_{ίδιου\ όγκου\ V}$$

και, προφανώς, ισχύει γενικά $0 < \varphi < 1$, ενώ στην ιδανική περίπτωση που τα σωματίδια είναι σφαιρικά το φ γίνεται ίσο με τη μονάδα. [66]

Στην περίπτωση των παρόντων πειραματικών δοκιμών, κάνοντας χρήση *ολιβίνη (olivine)* στη θέση του αδρανούς υλικού, όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται με τη σφαιρικότητα φ να παίρνει την τιμή 0.85.

Κλάσμα Κενού (Void Fraction) - ε

«Κλάσμα όγκου» ή «κλάσμα κενού» καλείται το κενό που υπάρχει ανάμεσα στα σωματίδια (συναντάται και με το δείκτη ε_m ως πορώδες του υλικού και αναφέρεται σε σταθερή κλίνη).

Η τιμή του κλάσματος κενού ε μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά ή να υπολογιστεί μέσα από την κάτωθι σχέση: [67]

$$\varepsilon = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{V_s}{V}$$

όπου V_s είναι ο όγκος των στερεών που περιλαμβάνονται στο συνολικό όγκο V. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να υπολογιστεί το κλάσμα κενού ε διαιρώντας τον όγκο του αέρα εντός του αντιδραστήρα με το συνολικό όγκο V.

Στην υπό μελέτη πειραματική εγκατάσταση, προκειμένου να υπολογιστούν τα απαραίτητα μεγέθη (ταχύτητα έναρξης ρευστοποίησης, ύψος αδρανούς υλικού στον ανοδικό και τον καθοδικό αγωγό, παροχή όγκου αέρα), η τιμή κλάσματος κενού λαμβάνεται ίση με $\varepsilon_{mf} = 0.55$.

Φαινόμενη ή Επιφανειακή Ταχύτητα (superficial velocity) u_0

Η φαινόμενη ή επιφανειακή ταχύτητα u_0 είναι καθαρά λογιστικό μέγεθος και ορίζεται ως η ταχύτητα που θα είχε ο αέρας σε έναν όγκο που δεν εμπεριέχει καθόλου σωματίδια. Για μια συγκεκριμένη παροχή όγκου $\dot{V}$ σε μια επιφάνεια A, η επιφανειακή ταχύτητα υπολογίζεται από τη σχέση: [35]

$$u_0 = \frac{\dot{V}}{A}$$

Μέση ή Πραγματική Ταχύτητα (Average Velocity) u

Εφόσον πλέον είναι γνωστός ο τρόπος υπολογισμού του κλάσματος κενού ε, μπορεί να υπολογιστεί η μέση ταχύτητα ροής διαμέσου στρώματος σωματιδίων ως

$$u = \frac{\dot{V}}{\varepsilon\, A}$$

η οποία προκύπτει μεγαλύτερη από την φαινόμενη ταχύτητα, εφόσον είναι γνωστό ότι το ε παίρνει τιμές μικρότερες της μονάδας. [35]

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (fluidization minimum velocity) u_{mf}

Εναλλακτικά ονομάζεται και ταχύτητα έναρξης ρευστοποίησης, αφού εμφανίζεται παράλληλα με το σχηματισμό της πρώτης φυσαλίδας στην κλίνη. Θέτοντας $Re_{\sigma,mf} = \frac{d_\sigma u_{mf} \rho_g}{\mu}$ η εξίσωση του Ergun γίνεται: [35]

$$\frac{1.75}{{\varepsilon_{mf}}^3\, \varphi} \left(\frac{d_\sigma\, u_{mf} \rho_g}{\mu}\right)^2 + \frac{150\,(1 - \varepsilon_{mf})}{{\varepsilon_{mf}}^3\, \varphi^2} \left(\frac{d_\sigma\, u_{mf} \rho_g}{\mu}\right) = \frac{{d_\sigma}^3\, \rho_g\, (\rho_\sigma - \rho_g) g}{\mu^2}$$

Αντικαθιστώντας τώρα παντού την έκφραση του αριθμού Re, προκύπτει

$$\frac{1.75}{{\varepsilon_{mf}}^3\,\varphi}\left(Re_{\sigma,mf}\right)^2+\frac{150\left(1-\varepsilon_{mf}\right)}{{\varepsilon_{mf}}^3\,\varphi^2}\,Re_{\sigma,mf}=Ar$$

όπου Ar ο αριθμός Αρχιμήδη $Ar=\frac{{d_\sigma}^3\,\rho_g\,(\rho_\sigma-\rho_g)g}{\mu^2}$. [35]

Εύκολα διαφαίνεται ότι η τελευταία εξίσωση είναι ένα απλό πολυώνυμο 2ου βαθμού με άγνωστο το $Re_{\sigma,mf}$, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$Re_{\sigma,mf}=[{C_1}^2+C_2Ar]^{0.5}-C_1,$$

όπου $C_1=27.2$ και $C_2=0.0408$, εμπειρικές σταθερές, οι τιμές των οποίων λαμβάνονται από πειραματικές δοκιμές (Grace, 1982). [35] Επομένως, η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης u_{mf} υπολογίζεται επιστρέφοντας στην εξίσωση που συνδέει την τελευταία με τον αριθμό $Re_{\sigma,mf}$.

Ελάχιστη ταχύτητα εμφάνισης φυσαλίδων (minimum bubbling velocity) u_{mb}

Ως «ελάχιστη ταχύτητα εμφάνισης φυσαλίδων» ορίζεται η ταχύτητα εκείνη του ρευστού κατά την οποία εμφανίζεται η πρώτη φυσαλίδα στο μείγμα. [66] Η u_{mb} έχει νόημα σε περιπτώσεις που γίνεται χρήση πληρωτικού υλικού ομάδας A (τα χαρακτηριστικά των ομάδων αναλύονται στον Πίνακα 11), στις οποίες η εμφάνιση φυσαλίδων δε γίνεται ταυτόχρονα με την εμφάνιση της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης u_{mf}. Προκειμένου να υπολογιστεί η u_{mb}, οι Abrahamsen & Geldart ανέπτυξαν το παρακάτω μοντέλο: [35]

$$u_{mb}=2.07\,e^{(0.716\,F)d_\sigma\frac{{\rho_g}^{0.06}}{\mu^{0.347}}}$$

όπου F το κλάσμα μάζας των σωματιδίων του μείγματος με διάμετρο κάτω των 45 μm, d_σ η μέση διάμετρος των σωματιδίων σε m και μ το δυναμικό ιξώδες σε kg/m·s.

Συντελεστής Οπισθέλκουσας C_D

Βάσει των παραπάνω, και έχοντας υπολογίσει τον αριθμό Re (όπως ορίστηκε παραπάνω και με u_t στη θέση της u_{mf}), μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής οπισθέλκουσας C_D από τη σχέση

$$C_D=\frac{24}{Re}(1+8.1716\times e^{-4.0655\varphi}\times Re\times e^{0.0964+0.5565\varphi})+73.69\times\frac{e^{-5.0748\varphi}\times Re}{Re+5.378\times e^{6.2122\varphi}}$$

Τελική Ταχύτητα (terminal velocity) u_t

Τη στιγμή κατά την οποία η προαναφερθείσα συνισταμένη των ασκούμενων δυνάμεων γίνει μηδενική, η ταχύτητα του αέρα έχει πάρει την οριακή της τιμή u_t, η οποία ονομάζεται και *τελική ταχύτητα του σωματιδίου*.

$$F_g-F_b-F_D=0\Rightarrow$$

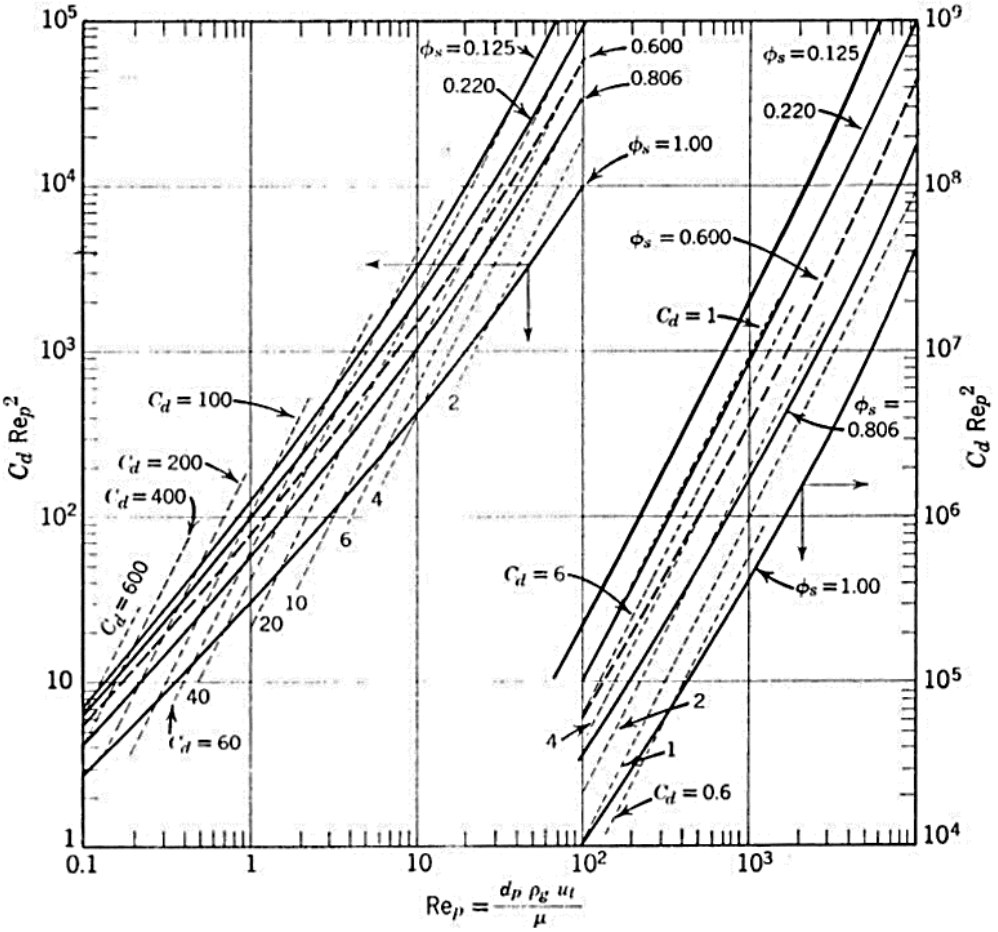
$$m_\sigma\, g - \frac{\rho_g\, g\, m_\sigma}{\rho_\sigma} - C_D\, \frac{\rho_g\, (u - u_s)^2 \pi}{8}\, d_\sigma^2 = 0$$

όπου $u - u_s = u_t$.

Μετά από αντικατάσταση της μάζας και του εμβαδού του σωματιδίου συναρτήσει της διαμέτρου του, προκύπτει τελικά η παρακάτω σχέση για την τελική ταχύτητα u_t: [35]

$$\begin{cases} V = \dfrac{4}{3}\,\pi\, \dfrac{{d_\sigma}^3}{8} \\ A = 4\,\pi\, \dfrac{{d_\sigma}^2}{4} \end{cases} \quad \Rightarrow \quad u_t = \sqrt{\frac{4\, g\, (\rho_\sigma - \rho_g)\, d_\sigma}{3\, C_D\, \rho_g}}$$

Ακριβώς αυτή τη στιγμή παρατηρείται αιώρηση των σωματιδίων εντός της κλίνης σε σταθερή θέση, σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα. Η u_t απαντάται κυρίως ως *τελική ταχύτητα αέρα*, αφού, όπως προαναφέρθηκε το σωματίδιο θεωρείται ακίνητο.



Διάγραμμα 13. *Υπολογισμός της τελικής ταχύτητας συναρτήσει το αριθμού Re και του συντελεστή οπισθέλκουσας. [35]*

Διαφορά πίεσης (πτώση πίεσης) κατά Ergun

Προκειμένου να υπολογιστεί η διαφορά (πτώση) πίεσης ανά μονάδα μήκους του ανοδικού αγωγού του αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας, χρησιμοποιήθηκε η σχέση του Sabri Ergun. [35]

$$\frac{\Delta P}{L} = 150\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\frac{\mu U}{(\varphi d_p)^2} + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}\frac{\rho_g U^2}{\varphi d_p}$$

όπου:

- ΔP η πτώση της πίεσης (Pa) (παίρνει πάντα θετικές τιμές),
- L το μήκος του ανοδικού αγωγού (m),
- ε το κλάσμα κενού,
- φ η σφαιρικότητα των σωματιδίων,
- ρ_g η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3),
- U η επιφανειακή ταχύτητα (m/s),
- μ το δυναμικό ιξώδες $(kg/m \cdot s)$,
- d_σ η μέση διάμετρος των σωματιδίων (m).

Με στόχο τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης στην καθοδική σωλήνωση και του ελάχιστου μήκους της που καλύπτεται με αδρανές υλικό, πραγματοποιήθηκαν οι εξής υπολογισμοί:

- Αρχικά, έγινε υπόθεση της μάζας του αδρανούς υλικού σε ανοδικό και καθοδικό αγωγό, θεωρώντας ισομερή κατανομή της μάζας στις δυο προαναφερθείσες σωληνώσεις, ώστε να υπολογιστεί η πτώση πίεσης ΔP σε κάθε τμήμα της εγκατάστασης, αντίστοιχα.

  Χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τύποι:

  - Για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης στον ανοδικό αγωγό: $\Delta P_{riser} = \frac{\frac{m}{2}\times g}{A_{riser}}$.
  - Για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης στον καθοδικό αγωγό: $\Delta P_{down} = \frac{\frac{m}{2}\times g}{A_{down}}$
  - Υποτέθηκε πτώση πίεσης στον κυκλώνα $\Delta P_{cycl} = 800\ Pa$.
  - Για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης στο οριζόντιο τμήμα, αθροίζονται ο πτώσεις πίεσης σε όλα τα υπόλοιπα τμήματα: $\Delta P_h = \Delta P_{riser} + \Delta P_{down} + \Delta P_{cycl}$.

- Τελικά, υπολογίζεται το ελάχιστο μήκος καλυπτόμενο από αδρανές υλικό στον καθοδικό αγωγό, εφαρμόζοντας την παρακάτω εξίσωση:

$$L_{min} = \frac{\Delta P_{riser} + \Delta P_{cycl} + \Delta P_h}{\frac{\Delta P_{down}}{L_{down}}}$$

όπου οι πτώσεις πίεσης είναι αυτές που υπολογίζονται παραπάνω και $L_{down} = \frac{\frac{m}{2}}{\varepsilon_{mf}\times\rho_\sigma\times A_{down}}$, το μήκος του καθοδικού αγωγού το καλυπτόμενο από τη μάζα αδρανούς υλικού που υποτέθηκε κάθε φορά.

Σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, είναι εφικτό να υπολογιστεί η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης u_{mf} και η τελική ταχύτητα u_t των σωματιδίων, καθώς και οι αντίστοιχες παροχές αέρα, σε κάθε υπό δοκιμή θερμοκρασία.

Πίνακας 13. *Κύρια χαρακτηριστικά της επαφής σωματιδίων και αερίου μέσου στους συνηθέστερους τύπους ρευστοποιημένης κλίνης. [35]*

Κύρια Χαρακτηριστικά	Αναβράζουσα Κλίνη	Κλίνη Ανακυκλοφορίας
Μέση διάμετρος σωματιδίων (mm)	0,03 – 3	0,05 – 5
Επιφανειακή ταχύτητα αερίου (m/s)	0,5 – 2,5	4 – 6
Τυπική τιμή U/U_t	0,3	2
Κίνηση αερίου	Ανοδική	Ανοδική
Αναμειξιμότητα αερίου	Μείγμα δύο φάσεων	Διασκορπιστήρας ροής
Κίνηση σωματιδίων	Ανοδική και καθοδική	Κυρίως ανοδική
Αναμειξιμότητα σωματιδίων	Συνήθως σχεδόν τέλεια	Σχεδόν τέλεια
Κλάσμα κενού	0,5 – 0,85	0,85 – 0,99
Διακύμανση Θερμοκρασίας	Πολύ μικρή	Μικρή
Μετάδοση θερμότητας μεταξύ κλίνης και επιφανείας ($W/K \cdot m^2$)	200 – 550	100 – 200

Στον άνωθι πίνακα γίνεται λόγος για τη «μέση διάμετρο» σωματιδίων του αδρανούς υλικού εντός της κλίνης. Προκειμένου να υπάρξει ένας σαφής διαχωρισμός των εν λόγω υλικών και του πεδίου που το κάθε ένα βρίσκει εφαρμογή, αλλά και της συμπεριφοράς τους ως προς το είδος της ρευστοποίησης, ο D. Geldart [68] δοκίμασε να διαμορφώσει ένα πρότυπο κατηγοριοποίησης των σωματιδίων. Χώρισε, λοιπόν, τα σωματίδια σε τέσσερις ομάδες, ανάλογα με την πυκνότητά τους και τη μέση διάμετρό τους.

Ομάδα C

Σε αυτή την ομάδα ανήκουν τα υλικά με την μικρότερη μέση διάμετρο όλων, της τάξης των 0 – 30 μm. Συνηθέστερα παραδείγματα υλικών είναι το αλεύρι και το τσιμέντο. Λόγω της πολύ λεπτής κοκκομετρίας των σωματιδίων αυτής της ομάδας και των διασωματιδιακών δυνάμεων που ασκούνται, απαντώνται δυσκολίες κατά τη ρευστοποίηση, καθώς επίσης παρατηρείται εμφάνιση καναλιών διαμέσω του πληρωτικού υλικού. Επίσης, συνήθως τα σωματίδια αυτά είναι μαλακά και έχουν ακανόνιστο σχήμα και επιφάνειες υψηλού ιξώδους. Λόγω των παραπάνω δυσχερειών, στην πλειονότητα των περιπτώσεων χρήσης υλικού ομάδας C, η αεριοποίηση γίνεται με κορεσμένο σε υγρασία αέρα, με σκοπό την αποφυγή σχηματισμού συσσωματωμάτων. Κατ' αυτό τον τρόπο, τα μόρια του νερού προσροφώνται στην επιφάνεια των σωματιδίων, μειώνοντας αισθητά τις σωματιδιακές δυνάμεις van der Waals.

Ομάδα A

Τα υλικά αυτής της κατηγορίας έχουν πολύ μικρή μέση διάμετρο σωματιδίων (30 – 100 μm). Τα εν λόγω σωματίδια κάνουν την κλίνη να αναπτύσσεται αισθητά πριν την εμφάνιση φυσαλίδων, λόγω της μικρής τους συνεκτικότητας, με αποτέλεσμα η πρώτη να

κατακάθεται αργά, ακόμα και μετά τη διακοπή παροχής αέρα. Σε κλίνες πληρωτικού υλικού ομάδας A παρατηρείται επίσης έντονη επανάδευση του αερίου στη φάση του γαλακτώματος. Όταν επιθυμείται η μείωση του μεγέθους των φυσαλίδων, εφαρμόζεται ευρύτερη κατανομή μεγέθους σωματιδίων ή εναλλακτικά γίνεται χρήση σωματιδίων μειωμένης διαμέτρου. Τυπική εφαρμογή των εν λόγω σωματιδίων είναι οι FCC καταλύτες. Γενικά, τα σωματίδια της ομάδας A απαντώνται πολύ συχνά ως πληρωτικά υλικά σε αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας.

Ομάδα B

Η μέση διάμετρος των σωματιδίων της εν λόγω ομάδας κυμαίνεται μεταξύ 100 και 500 μm, με τυπικό παράδειγμα υλικού αυτό της άμμου. Συνήθως η εμφάνιση των πρώτων φυσαλίδων συμπίπτει με τη διαμόρφωση της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης u_{mf} και, σε αντίθεση με τα υλικά που ανήκουν στην ομάδα A, η διόγκωση της κλίνης δεν είναι τόσο ραγδαία ούτε τέτοιου μεγέθους και η συρρίκνωσή της γίνεται άμεσα μετά τη διακοπή της παροχής του αερίου μέσου. Τα υλικά της ομάδας B διακρίνονται από πολύ καλή ρευστοποίηση, εφόσον οι διασωματιδιακές δυνάμεις είναι αμελητέες, καθώς και από μικρή σχετικά ανακυκλοφορία των σωματιδίων. Παρατηρείται, επίσης, εμφάνιση φυσαλίδων μεγάλης διαμέτρου, ανεξάρτητης από τη μέση διάμετρο των σωματιδίων και του εύρους της κατανομής μεγέθους τους.

Ομάδα D

Τέλος, στην ομάδα D ανήκουν τα σωματίδια με τη μεγαλύτερη μέση διάμετρο, άνω των 500 μm. Οι φυσαλίδες που σχηματίζονται γρήγορα συγχωνεύονται μεταξύ τους και σχηματίζουν νέες, πολύ μεγαλύτερης διαμέτρου. Οι εν λόγω φυσαλίδες ακολουθούν ανοδική πορεία με πολύ πιο αργούς ρυθμούς από εκείνους του υπολοίπου αερίου που ρέει διαμέσω του γαλακτώματος. Η αναμειξιμότητα των σωματιδίων είναι φτωχή, παρόλο που η ταχύτητα του αερίου στην πυκνή φάση είναι σχετικά υψηλή. Ενδέχεται η ροή να γίνει τυρβώδης, προκαλώντας φθορά των σωματιδίων. Από την άλλη, το πλεονέκτημα αυτής της ομάδας είναι ότι ακόμα και τα κολλώδη υλικά μπορούν να ρευστοποιηθούν, χάρη στην ορμή και τις μικρές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των σωματιδίων, αποφεύγοντας το σχηματισμό συσσωματωμάτων. Τυπικά παραδείγματα υλικών που εντάσσονται στην ομάδα D είναι οι κόκκοι καφέ και το σιτάρι. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, χρησιμοποιεί κανείς υλικά αυτής της ομάδας για την πλήρωση αντιδραστήρων αναβράζουσας - και συνηθέστερα αναβλύζουσας- ρευστοποιημένης κλίνης. [35, 68, 69]

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας των χαρακτηριστικών των αδρανών υλικών βάσει της κατηγοριοποίησης κατά Geldart.

Πίνακας 14. *Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών ομάδων κατά Geldart. [35]*

Ομάδα	C	A	B	D
Μέγεθος σωματιδίων για ρ_σ = 2500 kg/m^3	< 30 μm	30 – 100 μm	100 – 500 μm	> 500 μm
Σχηματισμός αυλακώσεων (channeling)	Έντονος	Μικρός	Αμελητέος	Αμελητέος
Ανάβλυση (spoutability)	Καμία	Καμία	Σε αβαθείς κλίνες	Εύκολη
Διαστολή	Χαμηλή	Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια
Ελάχιστη ταχύτητα εμφάνισης φυσαλίδων u_{mb}	Απουσία φυσαλίδων	> u_{mf}	= u_{mf}	= u_{mf}
Σχήμα φυσαλίδας	-	Επίπεδη βάση - σφαιρικό κέλυφος	Σφαιρικό με μικρές οδοντώσεις	Σφαιρικό
Αναμειξιμότητα σωματιδίων	Πολύ χαμηλή	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή
Επανάμειξη αερίων	Πολύ υψηλή	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή
Επίπεδο κραδασμών	Επίπεδοι κραδασμοί	Αξονοσυμμετρικό	Κυρίως αξονοσυμμετρικό	Κυρίως στα τοιχώματα
Επίδραση μεγέθους σωματιδίων στην υδροδυναμική	Άγνωστη	Σημαντική	Ελάχιστη	Άγνωστη

3.1 Δοκιμή για τον έλεγχο ρευστοποίησης με ανακυκλοφορία μόνο με αδρανές υλικό (Cold Test)

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η δοκιμή ρευστοποίησης με ανακυκλοφορία μόνο με αδρανές υλικό, υπήρξε προεργασία του τελευταίου. Στη συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε ολιβίνης (olivine) ως αδρανές υλικό και στον Πίνακα 15 παρουσιάζεται η σωματιδιακή κατανομή του.

Πίνακας 15. *Κατανομή μεγέθους σωματιδίων ακοσκίνιστου ολιβίνη πριν την εισαγωγή του στην κλίνη.*

	Μάζα Κενών Κόσκινων (gr)	**Μάζα Κόσκινων μετά το κοσκίνισμα (gr)**	**Διαφορά Μάζας = Μάζα ολιβίνη (gr)**
Βάση	342.1	342.1	0.0
>45 μm	246.1	246.2	0.1
>100 μm	373.8	419.3	45.5
>250 μm	268.8	294.6	25.8
>355 μm	404.6	431.5	26.9
>500 μm	419.1	420.8	1.7
ΣΥΝΟΛΟ			**100**

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση της κατανομής μεγέθους σωματιδίων είναι η ακόλουθη:

- Λήφθηκε δείγμα 100 gr ολιβίνη.
- Ζυγίστηκαν όλα τα κόσκινα, όντας κενά, αφού πρώτα είχαν καθαριστεί.
- Τα κόσκινα τοποθετήθηκαν με την παρακάτω σειρά από την κορυφή προς τη βάση του ταράκτρου κοσκινίσματος:
  - Κόσκινο 500 μm,
  - Κόσκινο 355 μm,
  - Κόσκινο 250 μm,
  - Κόσκινο 100 μm,
  - Κόσκινο 45 μm,
  - Βάση.
- Τα 100 gr ολιβίνη τοποθετήθηκαν στο κόσκινο των 500 μm στην κορυφή.
- Το τάρακτρο τέθηκε σε λειτουργία για χρονικό διάστημα τεσσάρων (4) λεπτών.
- Ζυγίστηκαν ξανά ένα – ένα τα κόσκινα για τον προσδιορισμό της μάζας ολιβίνη που τελικά συγκεντρώθηκε στο καθένα.

Μετά τον προσδιορισμό της κατανομής των σωματιδίων, ο ολιβίνης εισήχθη στον αντιδραστήρα. Στη μονάδα τοποθετήθηκαν 27 κιλά με την παραπάνω κοκκομετρία και πυκνότητας $\rho_s = 3200\ kg/m^3$, από την κορυφή του ανοδικού αγωγού, μέσω σφαιρικής βαλβίδας. [**Εικόνα 13**] Ο προσδιορισμός της απαιτούμενης ποσότητας ολιβίνη έγινε βάσει του υπολογισμού του απαιτούμενου ύψους της κλίνης, ώστε να επιτυγχάνεται η ανακυκλοφορία.

$$L_{riser} = \frac{m_{olivine}}{\varepsilon \times \rho_p \times A_{riser}}$$

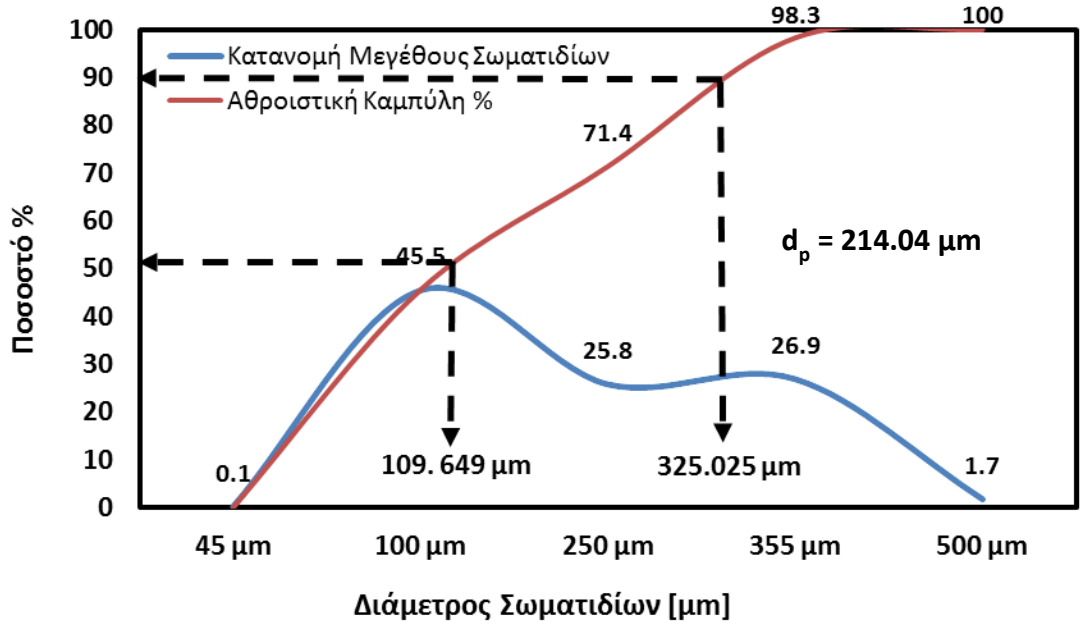
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η κατανομή μεγέθους σωματιδίων του ολιβίνη πριν τη διαδικασία κοσκινίσματος. Σημειώνεται ότι στον οριζόντιο άξονα, στον οποίο παρίσταται η διάμετρος των σωματιδίων, τα αναγραφόμενα ποσοστά μάζας αντιστοιχούν στην περιοχή μεταξύ των δυο αναγραφόμενων διαμέτρων. Για παράδειγμα,

$$100\ \mu m\ < m_{olivine}\% = 25.8\% m_{olivine} < 250\ \mu m$$

για την καμπύλη κατανομής μεγέθους σωματιδίων και

$$0\ \mu m < m_{olivine}\% = 71.4\% m_{olivine} < 250\ \mu m$$

για την αθροιστική καμπύλη. Τα παραπάνω ισχύουν και για όλα τα επόμενα διαγράμματα κατανομής μεγέθους σωματιδίων.



Διάγραμμα 14. *Καμπύλη Κατανομής Μεγέθους Σωματιδίων ολιβίνη πριν το κοσκίνισμα.*

Το αρχικό ύψος του αδρανούς υλικού στον ανοδικό αγωγό, και με κλάσμα κενού ε κοντά στην τιμή 0.6, υπολογίζεται με τη βοήθεια του κάτωθι τύπου:

$$L_{riser} = \frac{m}{\rho_s \times A_{riser} \times \varepsilon}$$

Οπότε, υπολογίζεται το ύψος που καταλαμβάνει ο ολιβίνης στον ανοδικό αγωγό $L_{riser} = 1.9\ m$. Αναμένεται στην περιοχή της αναβράζουσας ρευστοποίησης μόνο στους μετρητές πίεσης P11 και P12 να υπάρχουν ενδείξεις μεγαλύτερες του μηδενός. Αντιθέτως, οι μετρητές πίεσης που είναι τοποθετημένοι πιο ψηλά κατά μήκος του ανοδικού αγωγού προβλέπεται να καταγράφουν τιμές όπου η διαφορά τους θα τείνει στο μηδέν.

Κατά την έναρξη της δοκιμής, εισήχθησαν στην εγκατάσταση $30\ Nl/min$ από την είσοδο αέρα στη βάση του ανοδικού αγωγού. Η παρούσα παροχή, όταν εισέλθει στην κλίνη, ρευστοποιεί τον ολιβίνη με τιμή επιφανειακής ταχύτητας πολύ κοντά σε αυτή της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης. Ως αποτέλεσμα της ρευστοποίησης, παρατηρήθηκαν οι πρώτες

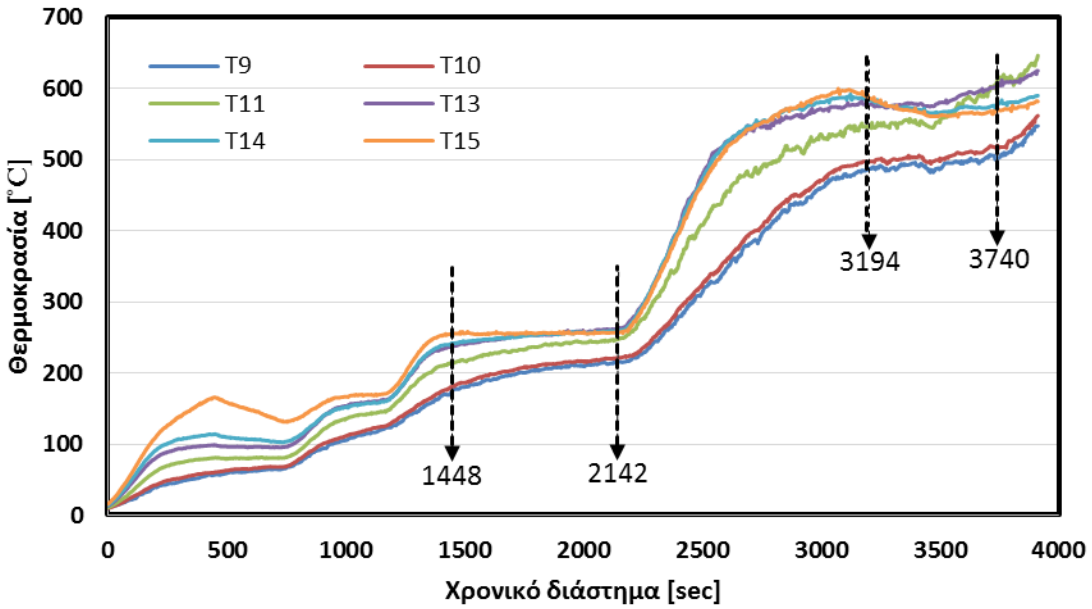
ενδείξεις στους μετρητές πίεσης P11 και P12, τοποθετημένους σε αποστάσεις από τη βάση του ανοδικού αγωγού $0.088\ m$ και $0.478\ m$, αντίστοιχα.

Η πτώση πίεσης που παρατηρήθηκε λίγα εκατοστά πάνω από το διασκορπιστή δεν συνέπιπτε με αυτή που υπολογίστηκε για μάζα αδρανούς 27 κιλών. Αυτό μπορεί να αποδοθεί είτε σε συμπαρασυρμό μέρους του υλικού εκτός του ανοδικού αγωγού προς τον καθοδικό, είτε στην είσοδο μέρους του ολιβίνη εντός του οριζοντίου αγωγού στον οποίο βρίσκεται ο κοχλίας εκφόρτισης ή και τα δύο συγχρόνως. Δεδομένου ότι η ταχύτητα του μέσου ήταν ακόμη σε χαμηλά επίπεδα, άρα πολύ μακριά από την οριακή ταχύτητα σωματιδίου, συνέβαινε μόνο το δεύτερο. Το πρόβλημα επιλύθηκε με την εισαγωγή μικρής παροχής αέρα από τον οριζόντιο αγωγό. Τα δύο ρεύματα αέρα (οριζόντιος και ανοδικός) αυξάνουν περαιτέρω την επιφανειακή ταχύτητα του ρευστού ως συνέπεια της αύξησης της παροχής του αέρα.

Εν συνεχεία επιχειρήθηκε να αυξηθεί η παροχή του αέρα τόσο ώστε να έχει το ρευστό επιφανειακή ταχύτητα ίση με την οριακή ($U_t = 0.7513\ m/s$ και $Q_t = 339.2\ Nl/m$) Σε αυτό το σημείο παρατηρήθηκε αισθητή πτώση της καταγραφόμενης πίεσης στους μετρητές P11 και P12, με ταυτόχρονη αύξηση των ενδείξεων σε όλους τους υπόλοιπους μετρητές κατά μήκος του ανοδικού και του καθοδικού αγωγού, αλλά και της βαλβίδας τύπου L. Το παραπάνω φαινόμενο επιβεβαιώνει την επίτευξη παρασυρμού σωματιδίων εκτός της κλίνης, αλλά όχι ακόμη την εμφάνιση *ανακυκλοφορίας (circulating fluidized bed)*. Αυξάνοντας τις παροχές πάνω από αυτά τα επίπεδα, η κλίνη οδηγείται σε κατάσταση *ταραχώδους ρευστοποίησης (turbulent – fast fluidization)*.

Μετά την παρατήρηση της ανακυκλοφορίας, εφαρμόστηκαν επιπλέον μεταβολές παροχών, με ταυτόχρονες σταδιακές αυξήσεις της θερμοκρασίας, μέχρι τελικής ρύθμισης της θερμοκρασίας των Ζωνών 1 έως 5 στους 750˚C.

Το Διάγραμμα 15 απεικονίζει το προφίλ των θερμοκρασιών από έξι διαφορετικά θερμοστοιχεία κατά μήκος του ανοδικού αγωγού. Όλη η πειραματική δοκιμή διήρκεσε σχεδόν δύο ώρες, όμως η ανάλυση των πιέσεων και των θερμοκρασιών αφορά μόνο δύο μικρά διαστήματα κατά τα οποία η θερμοκρασία ήταν σταθερή (Διαστήματα ισορροπίας - Steady states).



Διάγραμμα 15. *Θερμοκρασιακά προφίλ κατά μήκος του ανοδικού αγωγού.*

Μετά τον προσδιορισμό των χρονικών διαστημάτων ισορροπίας, ακολούθησε ο υπολογισμός των μέσων τιμών όλων των μετρούμενων θερμοκρασιών και πιέσεων. Σύμφωνα με αυτές καταστρώθηκαν τα προφίλ θερμοκρασιών και πιέσεων.

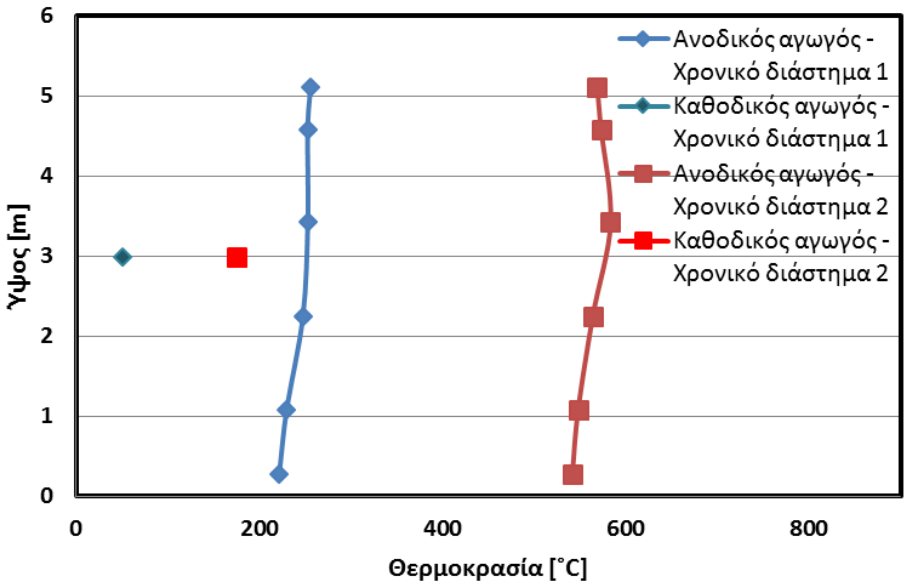
Στο Διάγραμμα 16, και ειδικότερα στην περίπτωση του δεύτερου χρονικού διαστήματος, καταγράφεται εμφανώς αυξημένη θερμοκρασία στον καθοδικό αγωγό συγκριτικά με την αντίστοιχη του πρώτου. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην ανακυκλοφορία του θερμού αδρανούς υλικού. Απομένει το φαινόμενο της ανακυκλοφορίας να επιβεβαιωθεί και από την αντίστοιχη καταγραφή πιέσεων κατά μήκος του αεριοποιητή, όπως αναλύεται παρακάτω.

Πλην της γραφικής αναπαράστασης των πιέσεων κατά μήκος όλου του αντιδραστήρα, στο Διάγραμμα 17 που παρατίθεται παρακάτω, σημειώνεται ο λόγος των ταχυτήτων U/U_t σε κάθε προς μελέτη χρονικό διάστημα, υπολογιζόμενος κάνοντας χρήση της καταστατικής εξίσωσης ιδανικών αερίων:

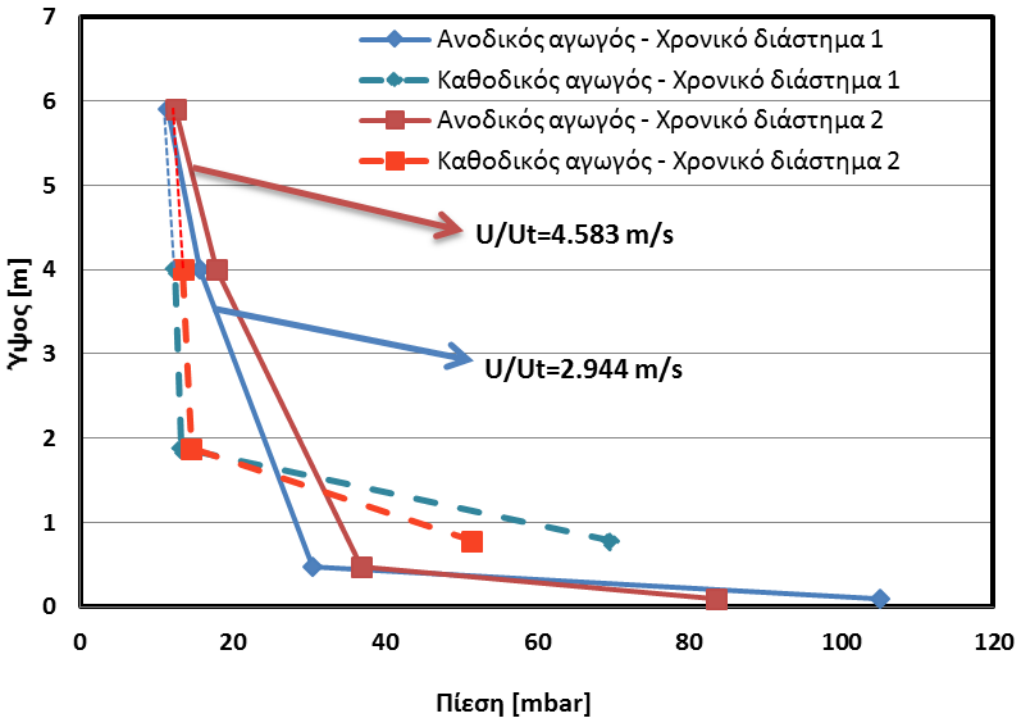
$$P \times V = n \times R \times T \Rightarrow$$
$$P \times U \times A_{riser} = n \times R \times T \Rightarrow$$
$$U = \frac{n \times R \times T}{P \times A_{riser}}$$

όπου

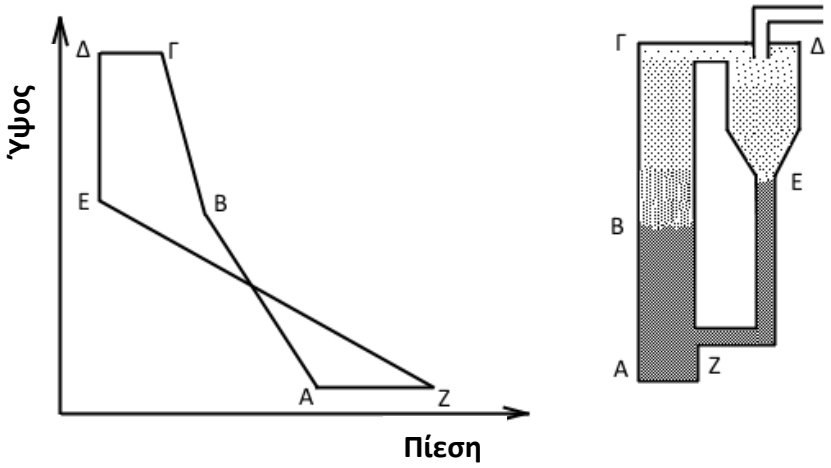
- n η μέση τιμή της συνολικής παροχής κατά τη διάρκεια του εκάστοτε χρονικού διαστήματος (mol/s),
- R η παγκόσμια σταθερά των αερίων ($R = 8.314 \frac{m^3 \times Pa}{mol \times K}$),
- T η μέση θερμοκρασία κατά τα μελετώμενα διαστήματα (K),
- P η μέση τιμή της διαφοράς πίεσης που καταγράφεται κατά τη διάρκεια των χρονικών διαστημάτων, προσθέτοντας στην τιμή αυτή $1\,atm$, εφόσον η δοκιμή διεξάγεται σε ατμοσφαιρική πίεση, δηλαδή $P = \Delta P + 101325\,Pa$ και
- A_{riser} το εμβαδό διατομής του ανοδικού αγωγού (m^2) και τέλος
- U η ταχύτητα που αναπτύσσει ο αέρας εντός του αντιδραστήρα.



Διάγραμμα 16. *Καθ' ύψος διάγραμμα των θερμοκρασιών σε ανοδικό και καθοδικό αγωγό κατά τα δυο χρονικά διαστήματα ισορροπίας.*



Διάγραμμα 17. *Καθ' ύψος διάγραμμα των πιέσεων σε ανοδικό και καθοδικό αγωγό κατά τα δυο χρονικά διαστήματα ισορροπίας.*



Εικόνα 58. *Μεταβολές πίεσης σε αντιδραστήρα που παρατηρείται ανακυκλοφορία. [70]*

Συγκρίνοντας το παραπάνω διάγραμμα με τα αναμενόμενα από τη θεωρία [**Εικόνα 58**], η πειραματική δοκιμή δείχνει να έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα, εφόσον τα προφίλ των πιέσεων κατά μήκος του αντιδραστήρα συμπίπτουν με τα θεωρητικά στη φάση της ανακυκλοφορίας. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι αμφότερες οι ενδείξεις θερμοκρασιών και πιέσεων επιβεβαιώνουν την ανακυκλοφορία του αδρανούς υλικού εντός της κλίνης.

Ως προς τις τιμές του κλάσματος U/U_t και στις δύο περιπτώσεις, παρατηρούνται τα εξής:

- Κατά το χρονικό διάστημα 1, το κλάσμα U/U_t λαμβάνει μια μέση τιμή αρκούντως μεγαλύτερη της αναμενόμενης για ρευστοποίηση με ανακυκλοφορία, οπότε

αποτελεί έναν επιπλέον επιβεβαιωτικό δείκτη της επίτευξης του φαινομένου ανακυκλοφορίας.

- Κατά το χρονικό διάστημα 2, η μέση τιμή του κλάσματος αυξάνεται ραγδαία, γεγονός που με τη σειρά του επιβεβαιώνει τη μετάβαση της κλίνης *σε ταραχώδη ρευστοποιημένη κατάσταση*, λόγω της μεγάλης αύξησης της θερμοκρασίας συγκριτικά με την πρώτη περίπτωση.

Επιπλέον, και για τα δύο χρονικά διαστήματα έγινε υπολογισμός του κλάσματος κενού ε, στις περιοχές καθ' ύψος του ανοδικού αγωγού, μεταξύ δυο διαδοχικών μετρητών πίεσης, ακολουθώντας τη σχέση

$$\frac{\Delta P}{L} = \rho_s \times \varepsilon \times g$$

Πίνακας 16. *Μεταβολή κλάσματος κενού ε καθ' ύψος του ανοδικού αγωγού κατά το Χρονικό διάστημα 1.*

Περιοχές	Μετρητές Πίεσης	ΔP (Pa)	Ύψη	ΔL (m)	ε
1	P11-P12	7457.497	(L12-L11)	0.39	**0.609129352**
2	P12-P16	1477.2	(L16-L12)	3.522	**0.013360754**
3	P16-P17	422.76	(L17-L16)	1.9	**0.007087961**

Πίνακας 17. *Μεταβολή κλάσματος κενού ε καθ' ύψος του ανοδικού αγωγού κατά το Χρονικό διάστημα 2.*

Περιοχές	Μετρητές Πίεσης	ΔP (Pa)	Ύψη	ΔL (m)	ε
1	P11-P12	4669.249	(L12-L11)	0.39	**0.381384846**
2	P12-P16	1897.848	(L16-L12)	3.522	**0.017165367**
3	P16-P17	540.952	(L17-L16)	1.9	**0.009069558**

Τα αποτελέσματα των δυο παραπάνω πινάκων επιβεβαιώνουν την επίτευξη των στόχων της δοκιμής ως εξής:

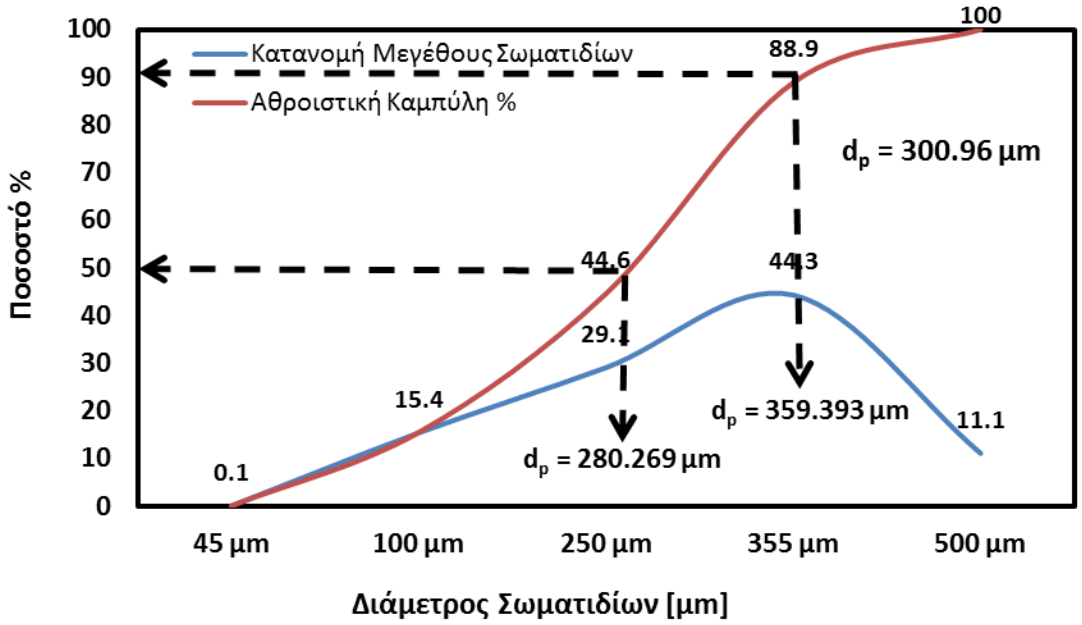
Κατά το Χρονικό διάστημα 1: Η θερμοκρασία και η παροχή είναι οι δυο παράγοντες που καθορίζουν τα επίπεδα της ταχύτητας εντός του αεριοποιητή. Κατά το χρονικό διάστημα 1 και εφόσον ακόμα η δοκιμή είναι σε αρχικά στάδια, και οι δυο αυτοί παράγοντες διατηρούνται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Επομένως η κλίνη παρουσιάζει πιο πυκνή εικόνα (*dense bed*) και αναμένεται κοντά στη βάση του ανοδικού αγωγού να εμφανίζεται ε πολύ κοντά στην τιμή που το τελευταίο παίρνει στην κατάσταση ηρεμίας. Όλα τα παραπάνω επιβεβαιώνονται πλήρως από τα αριθμητικά δεδομένα του Πίνακα 16.

Κατά το Χρονικό διάστημα 2: Τα αυξημένα επίπεδα της θερμοκρασίας και της παροχής καθ' ύψος του riser αντικατοπτρίζονται στην εμφανή μείωση της τιμής του κλάσματος κενού ε κοντά στη βάση του ανοδικού αγωγού. Παράλληλα, παρατηρείται μια στοιχειώδης αύξηση των τιμών του ε στις πιο πάνω μετρητικές περιοχές σε σύγκριση με τις αντίστοιχες του χρονικού διαστήματος 1. Η αύξηση αυτή αποδίδεται στην ταραχώδη κίνηση του υλικού εντός του ανοδικού αγωγού και στην ανακυκλοφορία μεγαλύτερης ποσότητάς του.

Μετά το τέλος της δοκιμής, ακολούθησε εξαγωγή όλου του υλικού από τη μονάδα και τηρήθηκε ξανά η παραπάνω διαδικασία για τον υπολογισμό της κατανομής μεγέθους σωματιδίων του ολιβίνη, όπως φαίνεται στον πίνακα και το διάγραμμα που ακολουθούν:

Πίνακας 18. *Κατανομή μεγέθους σωματιδίων ολιβίνη μετά τη χρήση του.*

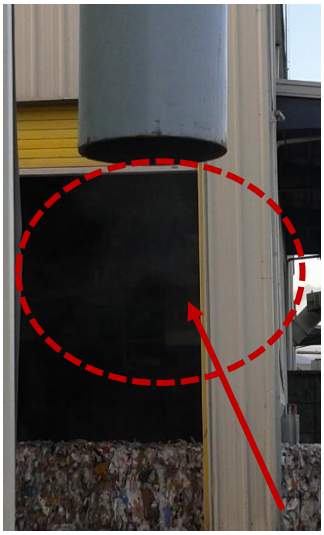
	Μάζα Κενών Κόσκινων (gr)	Μάζα Κόσκινων μετά το κοσκίνισμα (gr)	Διαφορά Μάζας = Μάζα ολιβίνη (gr)
Βάση	342.1	342.1	0.0
>45 μm	246.1	246.2	0.1
>100 μm	373.8	389.2	15.4
>250 μm	268.6	297.7	29.1
>355 μm	404.4	448.7	44.3
>500 μm	419.1	430.2	11.1
ΣΥΝΟΛΟ			**100**



Διάγραμμα 18. *Καμπύλη Κατανομής Μεγέθους Σωματιδίων Ολιβίνη μετά τη χρήση του.*

Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο κατανομών, πριν και μετά τη δοκιμή. Μέσω της σύγκρισης αυτής γίνεται εμφανής μια καθόλου αμελητέα αύξηση της μέσης διαμέτρου του ολιβίνη. Παρατηρώντας τις δύο κατανομές μεγέθους σωματιδίων, εύκολα διακρίνεται η μείωση της μάζας των σωματιδίων ολιβίνη με διάμετρο μικρότερη των $100\ \mu m$ κατά 30 ποσοστιαίες μονάδες μετά τη δοκιμή.

Το γεγονός αυτό αποδίδεται σε διαφυγή του κλάσματος μάζας του ολιβίνη με διάμετρο μικρότερη των $80\ \mu m$ στην περιοχή της εγκατάστασης μετά τον κυκλώνα ως και την καμινάδα εξόδου των καυσαερίων, καθώς ο κυκλώνας δεν έχει τη δυνατότητα συγκράτησης τόσο λεπτόκοκκου υλικού. Η παρατήρηση αυτή αποδείχθηκε και πρακτικά με την εξαγωγή του αδρανούς υλικού από την κλίνη μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής. Από τα εισαχθέντα 27 κιλά ολιβίνη, εξήχθησαν μόνο τα 20. Με οδηγό τις δύο κατανομές μεγέθους σωματιδίων, αποδεικνύεται εύκολα ότι η υπολειπόμενη μάζα του ολιβίνη είχε διάμετρο μικρότερη των $100\ \mu m$, οπότε και κατάφερε να διαφύγει του τελευταίου κυκλώνα.



Εικόνα 59. *Διαφυγή ποσότητας ολιβίνη από την καμινάδα που έπεται του θαλάμου καύσης.*

3.2 Δοκιμή αεριοποίησης με πελλετοποιημένο ξύλο (Willow Gasification)

Για να εκτελεστεί επιτυχώς η *δοκιμή αεριοποίησης πελλετοποιημένου ξύλου (willow)*, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί με βάση τη σύσταση του εν λόγω καυσίμου και την παρεχόμενη ποσότητά του. Οι υπολογισμοί συνδυάστηκαν με εκείνους που έγιναν στην προηγούμενη δοκιμή μόνο με αδρανές υλικό για τον προσδιορισμό της επιφανειακής και τελικής ταχύτητας του ρευστού. Αντίστοιχα, προσδιορίστηκε και η απαιτούμενη παροχή αέρα στην κλίνη, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω.

Για να προσεγγιστεί η ιδανική παροχή καυσίμου, και συγκεκριμένα πελλετοποιημένου ξύλου, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Υπολογίστηκε η αναγκαία παροχή αέρα για πολλές διαφορετικές ποσότητες καυσίμου. Η παροχή αέρα συναρτήσει της παροχής καυσίμου θα υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση: [71]

$$V_{air} = \left(\frac{C_{a.r.}}{12} + \frac{H_{a.r.}}{4} + \frac{N_{a.r.}}{28} + \frac{S_{a.r.}}{32} - \frac{O_{a.r.}}{32}\right) \cdot m_{fuel} \cdot \frac{100}{21} \cdot \frac{22400}{60} Nl/min$$

όπου η σύσταση του καυσίμου «ως έχει» - «as received» υπολογίζεται σύμφωνα με τα κάτωθι:

$$C_{a.r.} = C \cdot \left(\frac{100 - w\%}{100}\right)$$
$$H_{a.r.} = H \cdot \left(\frac{100 - w\%}{100}\right)$$
$$N_{a.r.} = N \cdot \left(\frac{100 - w\%}{100}\right)$$
$$S_{a.r.} = S \cdot \left(\frac{100 - w\%}{100}\right)$$
$$O_{a.r.} = O \cdot \left(\frac{100 - w\%}{100}\right)$$

Η σύσταση του πελλετοποιημένου ξύλου φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 19. *Ανάλυση πελλετοποιημένου ξύλου (willow).*

Ανάλυση Καυσίμου	
Στοιχειακή Ανάλυση	**wt.% d.b.**
C	52.42
H	6.15
N	0.21
O	39.854
S	0.016
Υγρασία	**wt.%, a.r.**
	8.57
Προσεγγιστική Ανάλυση	**wt.%, d.b.**
Τέφρα	1.35
Πτητικά	83.68
Σταθερός άνθρακας	14.97
Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα	
[kJ/kg]	19121.67

Το γινόμενο της παροχής που υπολογίστηκε με την επιθυμητή τιμή του λόγου καυσίμου αέρα λ είναι η τιμή της απαραίτητης παροχής αέρα για αεριοποίηση [71]

$$V_{gasif.air} = \lambda \cdot V_{air}.$$

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι υπολογισμοί με διαφορετικές ποσότητες καυσίμου και $\lambda \cong 0.3$.

Πίνακας 20. *Προσδιορισμός της ιδανικής ποσότητας καυσίμου.*

Παροχή τροφοδοτούμενου πελλετοποιημένου ξύλου m_{fuel}[kg/h]	**Απαιτούμενη παροχή αέρα $V_{gasif.air}$[Nl/min]**
1	22.76
2	45.53
3	68.29
4	91.06
5	113.8
5.5	125.2
6	136.6
7	159.4
8	182.1

- Προετοιμάζεται το αδρανές υλικό που θα εισαχθεί στον αντιδραστήρα, κοσκινίζοντας τη συνολική διατιθέμενη μάζα και κρατώντας τελικά το υλικό με την επιθυμητή κοκκομετρία, μάζας $27\,kg$. Η κοκκομετρία του χρησιμοποιούμενου αδρανούς υλικού επιλέγεται βάσει των δυνατοτήτων των εγκατεστημένων στη διάταξη κυκλώνων. [**Πίνακας 5**] Στην εν λόγω εφαρμογή, γίνεται χρήση ολιβίνη με διάμετρο σωματιδίων $250\,\mu m < d_p < 500\,\mu m$. Από τη μάζα του ήδη κοσκινισμένου ολιβίνη, λαμβάνεται δείγμα $100\,gr$, στο οποίο πραγματοποιείται κατανομή μεγέθους σωματιδίων, όπως αυτή παρουσιάζεται εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 21. *Κατανομή Μεγέθους Σωματιδίων ολιβίνη μετά το κοσκίνισμα.*

	Μάζα Κενών Κόσκινων (gr)	**Μάζα Κόσκινων μετά το κοσκίνισμα (gr)**	**Διαφορά Μάζας = Μάζα άμμου (gr)**
Βάση	342	342	0
>45 μm	245.7	245.8	0.1
>100 μm	373.5	377.8	4.3
>250 μm	262.5	306.1	43.6
>355 μm	402.8	453.7	50.9
>500 μm	417.8	418.9	0.1
ΣΥΝΟΛΟ			**100**

- Υπολογίζεται η απαιτούμενη παροχή αέρα για ρευστοποιημένη κλίνη με ανακυκλοφορία στους $750^{\circ}C$, με βάση την παραπάνω κατανομή μεγέθους σωματιδίων, ίση με $172.2\ Nl/min$.

Η πρώτη δοκιμή πραγματοποιήθηκε κυρίως για παρατήρηση της συμπεριφοράς του $5.5\ kg$ καυσίμου/ώρα, Στην περίπτωση αυτή, η απαιτούμενη παροχή αέρα υπολογίζεται οριακά μικρότερη της υπολογιζόμενης παροχής για ρευστοποίηση. Επιλέγεται τελικά να τροφοδοτηθούν στην εγκατάσταση περί τα $120\ Nl/min$ αέρα, τα οποία θα αυξηθούν κατά την τροφοδοσία του καυσίμου κατά $20-30\ Nl/min$, καθώς η εν λόγω δοκιμή επικεντρώνεται περισσότερο στο να παρατηρηθούν ενδείξεις που επιβεβαιώνουν την πραγματοποίηση αεριοποίησης, και όχι τόσο την ύπαρξη ανακυκλοφορίας. Η κλίνη λοιπόν διατηρείται σε κατάσταση *αναβράζουσα (bubbling)* κατά την προετοιμασία της και μεταβαίνει σε κατάσταση *ταραχώδη αναβράζουσα (turbulent fluidized bed)* μετά την τροφοδοσία του καυσίμου, όπως θα αποδειχθεί παρακάτω μέσω της ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

Σημειώνεται ότι, με την έναρξη της ρευστοποίησης και της αύξησης της θερμοκρασίας εντός της κλίνης κατά την πάροδο χρόνου μετά την τροφοδοσία του καυσίμου δε γίνεται λόγος πια για κυκλοφορία καθαρού ατμοσφαιρικού αέρα V_{air}, αλλά και προσμίξεων αερίων που προκύπτουν από την αεριοποίηση του καυσίμου (V_{CO}, V_{CO_2}, V_{CH_4}, V_{H_2} κοκ.). Εκτιμάται λοιπόν μια αύξηση της παροχής του μίγματος αερίων, λόγω της αύξησης των γραμμομορίων του με βάση την καταστατική εξίσωση ιδανικών αερίων

$$P \cdot V_{tot} = n \cdot R \cdot T$$

όπου:

- P η μέση καταγραφόμενη πίεση κατά μήκος του ανοδικού αγωγού (Pa)
- V_{tot} η συνολική παροχή όγκου αερίων στον αντιδραστήρα (m^3/s) με $V_{tot} = U \times A_{riser}$, όπου U η ταχύτητα του ρευστού (m/s^2)[16] και A_{riser} το εμβαδό διατομής του ανοδικού αγωγού (m^2).
- n η παροχή αερίων (mol/s)[17]
- R η παγκόσμια σταθερά των αερίων ($R = 8.314\,\frac{m^3 \times Pa}{mol \times K}$)

[16] Αφορά την ταχύτητα του αέρα κατά το διάστημα της προετοιμασίας της μονάδας και την ταχύτητα του μίγματος αερίων κατά την τροφοδοσία του καυσίμου.

[17] Αφορά την παροχή αέρα κατά το διάστημα της προετοιμασίας της μονάδας και την παροχή του αερίου σύνθεσης κατά την τροφοδοσία του καυσίμου.

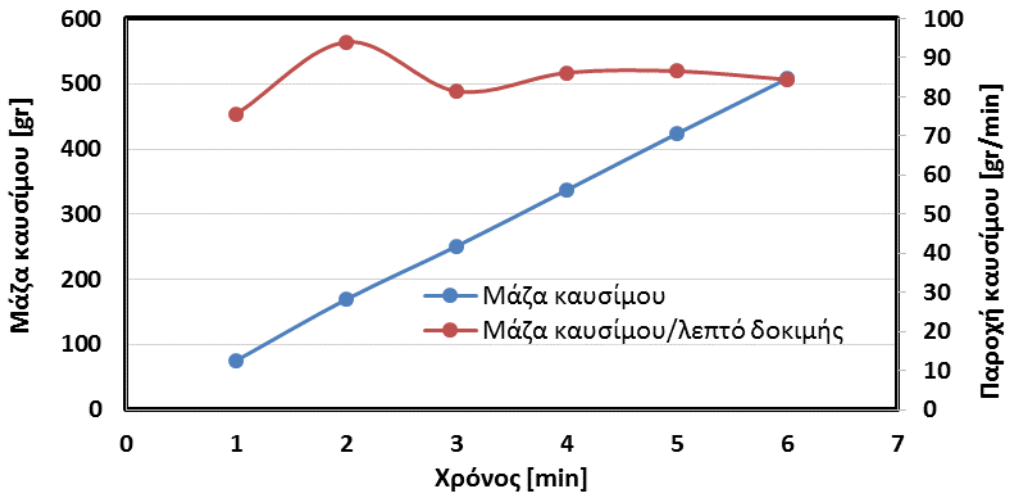
- T η μέση καταγραφόμενη θερμοκρασία καθ' ύψος του ανοδικού αγωγού.

Προκειμένου να εισάγεται στην εγκατάσταση η επιθυμητή παροχή καυσίμου, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του κοχλία τροφοδοσίας, ρυθμίζοντας κάθε φορά τη συχνότητά του στα επιθυμητά Hz. Πιο αναλυτικά, δίνοντας κίνηση ταυτόχρονα στους δυο κοχλίες, τις δυο περιστροφικές βαλβίδες και το περιστρεφόμενο δάπεδο του τροφοδοτικού δοχείου, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διάρκειας έξι λεπτών, οι οποίες συμπεριλάμβαναν ζυγίσεις στο καύσιμο που τροφοδοτούνταν στην εγκατάσταση ανά ένα λεπτό. Η συχνότητα $[Hz]$ του κάθε στοιχείου και οι μεταβολές που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

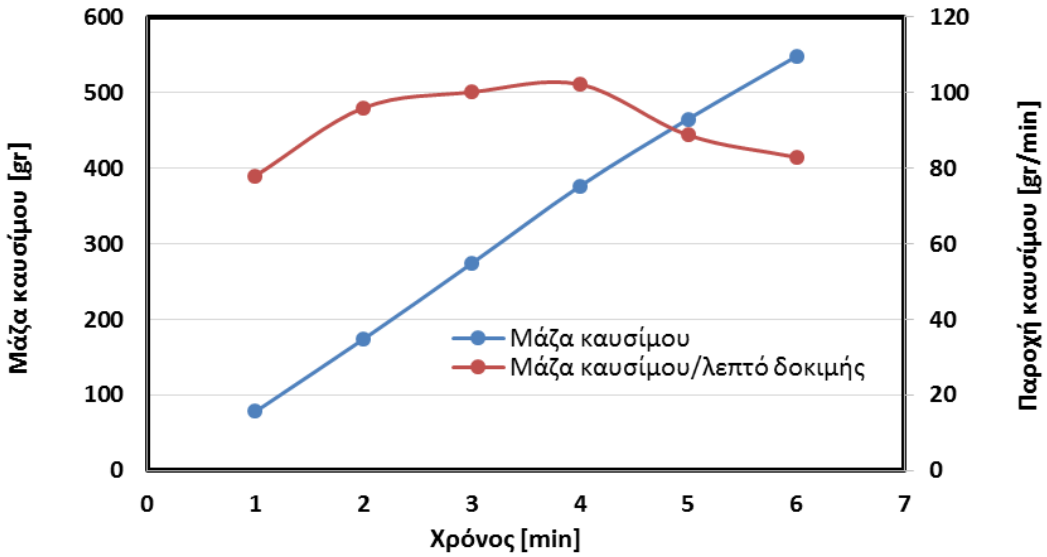
Πίνακας 22. *Κοχλίες και περιστροφικές βαλβίδες που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία.*

Στοιχείο και Ονομασία του στον Πίνακα Ελέγχου	**Συχνότητα (Hz)**	
Κοχλίας τροφοδοσίας [C9]	11	30
Άνω περιστροφική βαλβίδα [C8]	10	
Κάτω περιστροφική βαλβίδα [C7]	30	
Κοχλίας εκφόρτισης [C6]	4	

Ακριβώς παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες της μέσης παροχής καυσίμου ανά λεπτό, αλλά και οι συγκεντρωτικές καμπύλες που προέκυψαν μετά την εξάλεπτη δοκιμή, για συχνότητα του κοχλία τροφοδοσίας 11 και 30 Hz.

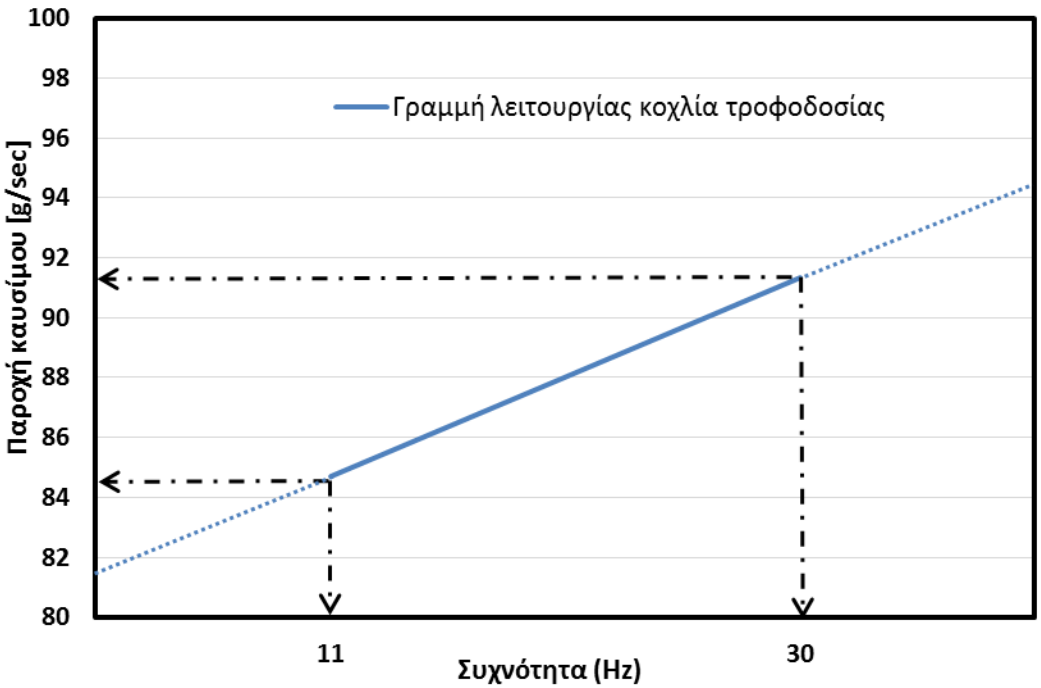


Διάγραμμα 19. *Μέση παροχή καυσίμου κατά τη λειτουργία του κοχλία τροφοδοσίας στα 11 Hz.*



Διάγραμμα 20. *Μέση παροχή καυσίμου κατά τη λειτουργία του κοχλία τροφοδοσίας στα 30 Hz.*

Τελικά, σχεδιάστηκε η ευθεία λειτουργίας που προκύπτει από τις δυο διαφορετικές συχνότητες, με τις οποίες τέθηκε σε λειτουργία ο κοχλίας τροφοδοσίας, και τη μέση τιμή της παροχής καυσίμου ανά λεπτό, σε κάθε περίπτωση, θεωρώντας γραμμική μεταβολή.



Διάγραμμα 21. *Προσέγγιση γραμμής λειτουργίας κοχλία εκφόρτισης.*

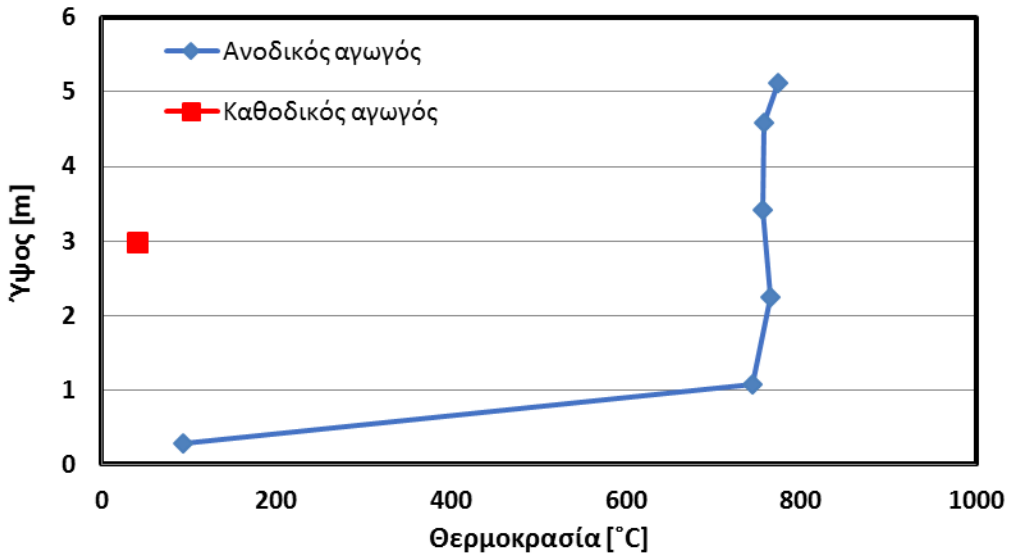
Εφόσον πλέον αποφασίστηκε ο ρυθμός τροφοδοσίας του καυσίμου περί τα $5.5\ kg/h$, προετοιμάστηκε η μονάδα για τη δοκιμή. Αρχικά, τοποθετήθηκε στη μονάδα ο ολιβίνης, συνολικής μάζας 27 κιλών, ως εξής: 17 κιλά στον ανοδικό και τα λοιπά 10 στον καθοδικό αγωγό, μέσω των αντίστοιχων σφαιρικών βαλβίδων (ball valves). Εν συνεχεία, ρυθμίστηκαν οι παροχές αέρα και τροφοδοτήθηκαν $80\ Nl/min$ στον ανοδικό αγωγό και άλλα $40\ Nl/min$ στον αγωγό του κοχλία εκφόρτισης και άρχισε η σταδιακή θέρμανση της εγκατάστασης. Ακριβώς πριν την τροφοδοσία του καυσίμου παρατηρήθηκαν ανεπιθύμητα

υψηλές ενδείξεις πτώσης πίεσης στους μετρητές πίεσης τους τοποθετημένους στη βάση του ανοδικού αγωγού. Εξήχθη έτσι το συμπέρασμα ότι η μάζα αδρανούς υλικού που είχε τοποθετηθεί αρχικά στον ανοδικό αγωγό είναι περισσότερη από την προβλεπόμενη για σχηματισμό αναβράζουσας κλίνης και ο μεγάλος λόγος ύψος κλίνης/διάμετρο προκαλούσε ανεπιθύμητα φαινόμενα (slugging) και αποφασίστηκε να αφαιρεθούν 4 κιλά αδρανούς υλικού.

Όταν όλες οι ζώνες αντιστάσεων είχαν φτάσει σε θερμοκρασιακά επίπεδα περί τους $750^{\circ}C$, άρχισε η τροφοδοσία του καυσίμου στη μονάδα.

Καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφηκαν οι ενδείξεις θερμοκρασιών, πιέσεων και παροχών αέρα στη μονάδα. Κατά την επεξεργασία των εν λόγω ενδείξεων λήφθηκε ως χρονικό διάστημα μελέτης η περιοχή μετρήσεων εκείνη, κατά την οποία πελλετοποιημένο ξύλο τροφοδοτούνταν στην εγκατάσταση, από την έναρξη ως και τη λήξη της τροφοδοσίας. Μετά τον καθορισμό, λοιπόν, της υπό επεξεργασία περιοχής υπολογίστηκε η μέση θερμοκρασιακή ένδειξη κάθε θερμοστοιχείου κατά μήκος του ανοδικού και του καθοδικού αγωγού και καταστρώθηκε το παρακάτω διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει του ύψους από τη βάση του ανοδικού αγωγού.

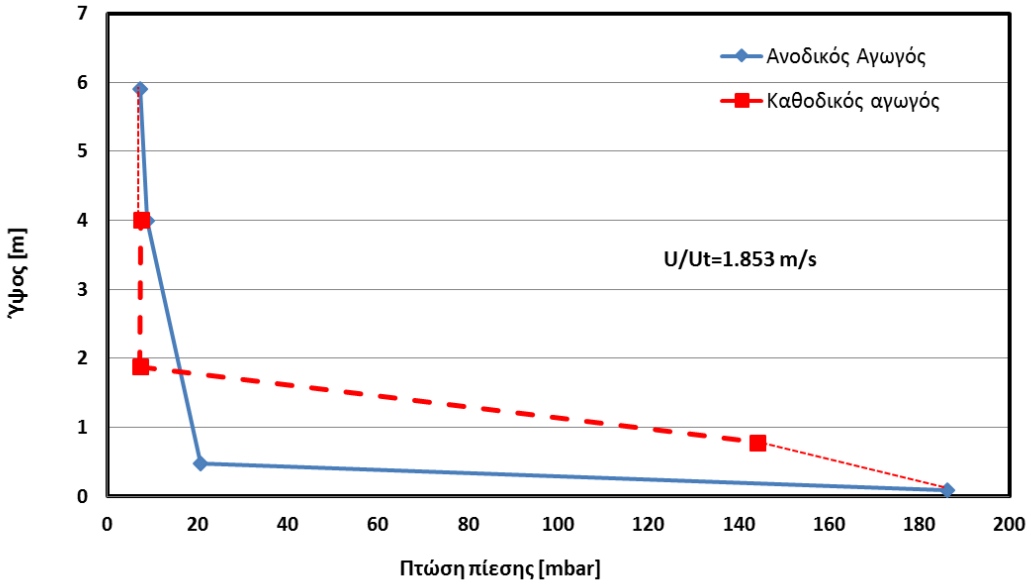
Παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες καθ' ύψος του ανοδικού αγωγού παρουσιάζουν κοντινές και συγκρίσιμες τιμές, εξαιρουμένου του θερμοστοιχείου στη βάση του, του οποίου η θερμοκρασία διατηρείται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην ψύξη της περιοχής αυτής, λόγω συνεχούς παροχής αέρα θερμοκρασίας περιβάλλοντος.



Διάγραμμα 22. *Καθ' ύψος διάγραμμα των θερμοκρασιών σε ανοδικό και καθοδικό αγωγό κατά την τροφοδοσία.*

Επιπροσθέτως, αναμενόμενη συμπεριφορά παρουσιάζει το θερμοστοιχείο κάτω ακριβώς από τον κυκλώνα, το οποίο δείχνει να έχει σχετικά μικρή μεταβολή συγκριτικά με την αρχική θερμοκρασία. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κλίνη δεν επέρχεται σε κατάσταση *γρήγορης ανακυκλοφορίας (fast fluidization)*, λόγω της χαμηλότερης από την απαιτούμενη παροχής αέρα. Μετά την παροχή του καυσίμου η κλίνη μετατρέπεται από *αναβράζουσα (bubbling) σε ταραχώδη αναβράζουσα (turbulent),* δείχνοντας κάποιες στιγμιαίες ιδιαιτέρως έντονες αυξήσεις θερμοκρασιών (peaks) στο θερμοστοιχείο T17, στην περιοχή του καθοδικού αγωγού. Το τελευταίο γεγονός είναι μια επιπλέον ένδειξη που με τη σειρά της επιβεβαιώνει την ύπαρξη *ταραχώδους αναβράζουσας ρευστοποίησης*.

Η μετάβαση της κλίνης σε κατάσταση ταραχώδους ρευστοποίησης επιβεβαιώνεται και μέσω του προφίλ των πιέσεων που ακολουθεί, κατά το χρονικό διάστημα της τροφοδοσίας του καυσίμου. Συγκεκριμένα, το προφίλ των πιέσεων του καθοδικού αγωγού είναι αυτό που επιβεβαιώνει την ύπαρξη ταραχώδους ρευστοποίησης, καθώς σε άλλη περίπτωση (πχ. αναβράζουσα κλίνη) οι καταγραφόμενες τιμές της πτώσης πίεσης θα ήταν αμελητέες.

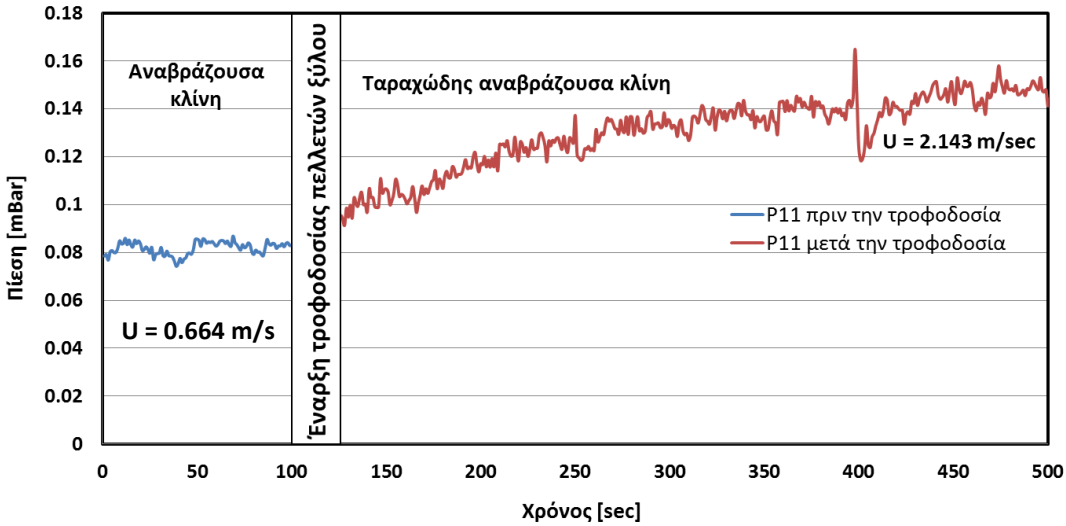


Διάγραμμα 23. *Καθ' ύψος διάγραμμα των πιέσεων σε ανοδικό και καθοδικό αγωγό κατά την τροφοδοσία.*

Επιπλέον, ο λόγος της μέσης επιφανειακής ταχύτητα του ρευστού προς την τελική ταχύτητα ρευστοποίησης, που σημειώνεται και στο παραπάνω διάγραμμα, είναι ένας ακόμα επιβεβαιωτικός παράγοντας για την ύπαρξη ταραχώδους ρευστοποίησης, αλλά όχι γρήγορης ανακυκλοφορίας.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το παρακάτω διάγραμμα, στο οποίο διαφαίνεται η διακύμανση της πτώσης πίεσης μέσω της ένδειξης του μετρητή P11, τοποθετημένου στη βάση του ανοδικού αγωγού, σε χρονικό διάστημα δύο λεπτών πριν την τροφοδοσία του πελλετοποιημένου καυσίμου, συγκρινόμενη με την αντίστοιχη πέντε λεπτά μετά. Πιο συγκεκριμένα, πριν την τροφοδοσία του καυσίμου, η πτώση πίεσης παρουσιάζει πολύ μικρές διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τιμή, η οποία αγγίζει την τιμή των $80\ mbar$, ενώ δεν παρατηρείται καμία ανοδική τάση. Επίσης, η ταχύτητα του ρευστού υπό σταθερή παροχή αέρα της τάξης των $120\ Nl/min$ διαμορφώνεται στα επίπεδα των $0.664\ m/sec$.

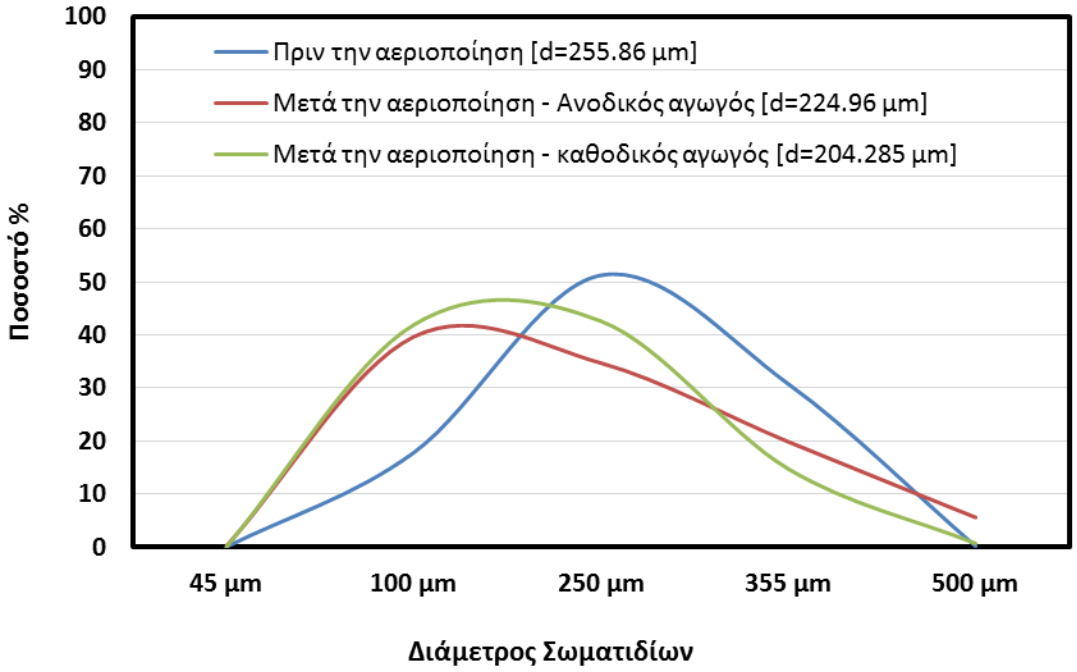
Εμφανώς διαφορετική συμπεριφορά παρουσιάζει το προφίλ της πτώσης πίεσης στη βάση του ανοδικού αγωγού αμέσως μετά την έναρξη της τροφοδοσίας του καυσίμου. Οι μεγαλύτερες ***διακυμάνσεις της πτώσης πίεσης (pressure drop fluctuation)*** είναι εκείνες που οδηγούν με βεβαιότητα στο συμπέρασμα ότι η κλίνη μεταβαίνει από κατάσταση αναβράζουσας ρευστοποίησης σε κατάσταση ταραχώδους αναβράζουσας ρευστοποίησης, σε συνδυασμό με τα peaks θερμοκρασίας στον καθοδικό αγωγό, που ήδη αναφέρθηκαν και παραπάνω.



Διάγραμμα 24. *Διακύμανση της πτώσης πίεσης στη βάση του ανοδικού αγωγού σε μικρό χρονικό διάστημα πριν και μετά την τροφοδοσία του καυσίμου.*

Πλην των μεγαλύτερων διακυμάνσεων, στο παραπάνω διάγραμμα διαφαίνεται μια αυξητική τάση της πτώσης πίεσης στο μετρητή P11, φτάνοντας σε εμφανώς αυξημένη μέση τιμή, που αγγίζει την τιμή των $140\ mbar$. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στη συσσώρευση υλικού στα χαμηλά επίπεδα της κλίνης αμέσως μετά την έναρξη της τροφοδοσίας, σε συνδυασμό με την αύξηση της ταχύτητας του. Αμέσως μετά την έναρξη της τροφοδοσίας του καυσίμου και υπό σταθερή παροχή αέρα, η μέση επιφανειακή ταχύτητα του ρευστού υπολογίζεται $U = 2.143\ m/sec$. Αυτή η καθόλου αμελητέα αύξηση της ταχύτητας, συγκριτικά με την προηγούμενη κατάσταση, αποδίδεται στην αύξηση του όγκου των αερίων εντός του αντιδραστήρα. Έτσι γίνεται εμφανής η πραγματοποίηση αεριοποίησης του πελλετοποιημένου καυσίμου και της ύπαρξης προσμίξεων – συστατικών του syngas στη σταθερή παρεχόμενη ποσότητα αέρα (V_{CO}, V_{CO_2}, V_{CH_4}, V_{H_2} κοκ.). Με την πάροδο του χρόνου, και με περεταίρω αυξήσεις της παροχής εισερχόμενου αέρα και αζώτου, η ταχύτητα του αερίου αγγίζει τα $3.166\ m/s$, οπότε η κλίνη πλέον διέρχεται σε κατάσταση ανακυκλοφορίας.

Μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής, η εγκατάσταση αφέθηκε να ψυχθεί φυσικά και εν συνεχεία εκκενώθηκε και καθαρίστηκε ο αντιδραστήρας. Ως ήταν αναμενόμενο, το εξαγόμενο υλικό αποτελούνταν στο κύριο μέρος του από ολιβίνη, περιέχοντας όμως προσμίξεις εξανθρακώματος, τέφρας και άκαυστου πελλετοποιημένου ξύλου. Μετά την εξαγωγή όλου το υλικού από τη μονάδα, πραγματοποιήθηκε Κατανομή Μεγέθους Σωματιδίων σε ξεχωριστά δείγματα που λήφθηκαν από τον ανοδικό και τον καθοδικό αγωγό και τα αποτελέσματα αναλύονται παρακάτω.



Διάγραμμα 25. *Σύγκριση κατανομών μεγέθους σωματιδίων ολιβίνη πριν και μετά την αεριοποίηση.*

Όπως φαίνεται μέσω της σύγκρισης των παραπάνω σωματιδιακών κατανομών, το δείγμα που λήφθηκε από τον ανοδικό αγωγό έχει μεγαλύτερη μέση διάμετρο σωματιδίων από το αντίστοιχο που λήφθηκε από τον καθοδικό, αλλά μικρότερη από την αντίστοιχη του ολιβίνη πριν την εισαγωγή του στην εγκατάσταση.

Συγκεκριμένα, εμφανίζεται ιδιαίτερα αυξημένο το ποσοστό σωματιδίων μεγέθους άνω των $500\ \mu m$ στο δείγμα από τον ανοδικό αγωγό. Αρχικά γίνεται η υπόθεση ότι το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο υπό εξέταση δείγμα εμπεριεχόταν ποσότητα εξανθρακώματος και τμήματα άκαυστων πελλετών ξύλου, σε ικανό ποσοστό ώστε να προκαλέσουν τέτοια μεταβολή στη σωματιδιακή κατανομή. Προκειμένου να αποκλειστεί η περίπτωση σχηματισμού συσσωματωμάτων αδρανούς υλικού, πισσών και εξανθρακώματος κατά τη διεργασία *(sintering)*, αφαιρέθηκε το σύνολο των άκαυστων πελλετών από το δείγμα αδρανούς υλικού. Πραγματοποιήθηκε ξανά σωματιδιακή κατανομή και η μέση διάμετρος των σωματιδίων του ολιβίνη αυτή τη φορά σχεδόν συνέπεσε με την τιμή της τελευταίας στο δείγμα που λαμβάνεται από τον καθοδικό αγωγό ($d_p = 208.64\ \mu m$).

Συγκρίνοντας τώρα την εικόνα των κατανομών σωματιδίων του ολιβίνη πριν και μετά την αεριοποίηση, ανεξαρτήτως περιοχής δειγματοληψίας, παρατηρούμε μια όχι αμελητέα μείωση της μέσης διαμέτρου των σωματιδίων μετά τη διεργασία. Το φαινόμενο της μείωσης της μέσης διαμέτρου των σωματιδίων σε σχέση με την αρχική κατάσταση του υλικού αποδίδεται στη ραγδαία αύξηση των παροχών αέρα κατά την έναρξη της δοκιμής. Παρ' όλο που τα παροχόμετρα αέρα (MFCs) ρυθμίζονται στα επιθυμητά επίπεδα τροφοδοσίας αέρα, φτάνουν στιγμιαία σε τιμή υπερπολλαπλάσια της επιθυμητής και ύστερα ισορροπούν στην τιμή που έχει απαιτηθεί. Στο χρονικό αυτό διάστημα, ικανή ποσότητα αδρανούς υλικού διαφεύγει από τον αντιδραστήρα, λόγω των ιδιαίτερα υψηλών ταχυτήτων που αναπτύσσονται εντός της κλίνης.

3.3 Ισοζύγιο ενέργειας και μάζας

3.3.1 Ισοζύγιο μάζας

Σε αυτό το σημείο καταστρώνεται μια απλοποιημένη μορφή του *ισοζυγίου μάζας (mass balance)* του αεριοποιητή που μελετάται στην παρούσα εργασία. Πιο αναλυτικά, θα καταστρωθούν οι ισολογισμοί μάζας για όλο τον αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας, ώστε να υπολογιστεί τελικά το ***ποσοστό μετατροπής άνθρακα (Carbon Conversion Efficiency – CCE%)*** και η ***ψυχρή χημική απόδοση του αερίου (Cold Gas Efficiency – CGE%).*** Οι $CCE\%$ και $CGE\%$ θεωρούνται δύο από τους πιο αξιόπιστους δείκτες αξιολόγησης της απόδοσης της διεργασίας της αεριοποίησης.

Πίνακας 23. *Σύσταση RDF. [72]*

Προσεγγιστική ανάλυση (ως έχει)	
Υγρασία	26.8
Πτητικές ουσίες	64.9
Σταθερός άνθρακας	2.4
Τέφρα	5.9
Στοιχειακή ανάλυση (% επί ξηρού)	
C	45.77
H	5.96
N	1.16
O	38.56
S	0.05
Cl	0.43

Η θερμική ισχύς του καυσίμου μπορεί να υπολογιστεί αν είναι γνωστή η παροχή μάζας του καυσίμου στον αεριοποιητή και η κατώτερη θερμογόνος ικανότητά του. Με στόχο να υπάρξει παραλληλισμός της υπολογιστικής αυτής προσέγγισης του ισοζυγίου μάζας στη διάταξη και των ρεαλιστικών πειραματικών αποτελεσμάτων του κεφαλαίου που προηγείται [σελ. 105], λαμβάνεται ως παροχή καυσίμου αυτή των $5.5\ kg/h$ και ως εισαγόμενη ποσότητα ολιβίνη αυτή των $23\ kg$. Η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου και η ισχύς του υπολογίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις: [73]

$$LHV_{fuel} = HHV_{fuel} - 2.441 \times (8.936 \times \frac{H_2\%}{100}) \times 1000$$

$$P_{fuel} = \frac{m_{fuel} \times LHV_{fuel}}{3600}$$

Πίνακας 24. *Χαρακτηριστικά εισαγόμενου στον αεριοποιητή RDF.*

Παροχή μάζας καυσίμου m_{fuel}	5.5 kg/h
Ανώτερη Θερμογόνος Ικανότητα HHV_{fuel}	19281.8 kJ/kg [17]
Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα LHV_{fuel}	17981.759 kJ/kg [18]
Θερμική Ισχύς P_{fuel}	20.109 kW

Το μέσο αεριοποίησης – στην περίπτωση που περιγράφεται ο αέρας – εισάγεται στον αντιδραστήρα έχοντας τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

[18] Επί ξηρού.

Πίνακας 25. *Χαρακτηριστικά εισόδου αέρα στον αεριοποιητή (κατ' όγκο σύσταση).*

Σύσταση αέρα	Τιμή
N_2	78.9 %
O_2	21 %
H_2O	0.1 %
Θερμοκρασία εισόδου T_o	10 ˚C
Πυκνότητα αέρα ρ_{air}	1.25 kg/m^3
Πίεση διεργασίας P	1.15 Bar

Εν συνεχεία, υπολογίστηκε ο στοιχειομετρικός λόγος αέρα – καυσίμου και η απαιτούμενη παροχή αέρα για αεριοποίηση, εφαρμόζοντας τις παρακάτω σχέσεις [71] και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον κάτωθι πίνακα.

$$\mu_{LOT} = \sum \mu_{LOT_i} \times X_i$$

όπου μ_{LOT_i} η απαιτούμενη ποσότητα αέρα για την καύση του κάθε στοιχείου στο αρχικό καύσιμο και X_i το ποσοστό του κάθε στοιχείου αντίστοιχα.

$$ER_{gasif} = \mu_{LOT} \times \lambda$$

Πίνακας 26. *Απαιτούμενη παροχή αέρα στον αεριοποιητή.*

λ	0.31
Στοιχειομετρικός λόγος αέρα – καυσίμου μ_{LOT}	4.045 $kg_{air,st}/kg_{fuel}$
Λόγος αέρα – καυσίμου για αεριοποίηση ER_{gasif}	1.254 kg_{air}/kg_{fuel}
Παροχή μάζας αέρα $m_{air,\ gasif}$	6.896 kg/h
Παροχή όγκου αέρα $V_{air,gasif}$	5.514 Nm^3/h

Ξεκινώντας με την υπόθεση ότι πραγματοποιείται αεριοποίηση σε τυπικής σύστασης RDF, όπως αυτή παρουσιάζεται παραπάνω [Πίνακας 23], το αέριο προϊόν που θα προκύψει (syngas) αποτελείται από:

- Καύσιμα συστατικά (CO, H_2 και CH_4).
- Αδρανή συστατικά (N_2, CO_2 και H_2O).
- Παραπροϊόντα (πίσσες, H_2S, HCl, NH_3, αέρια αλκάλια), σε πολύ μικρότερες συγκεντρώσεις από τα αδρανή και τα καύσιμα συστατικά.

Πίνακας 27. *Σύσταση αερίου σύνθεσης. [72]*

Σύσταση αερίου σύνθεσης	Ποσοστό % (επί ξηρού)	LHV_i (kJ/kg) (επί ξηρού)
H_2O	0	0
CO_2	13.58	0
CO	19.36	2359.99
H_2	25.5	2656.32
N_2	37.99	0
CH_4	3	1036.82
H_2S	0.56	0
Ar	0.0044	0
HCl	0.0011	0
	ΣΥΝΟΛΟ	**6053.13**

Στο μεγαλύτερο μέρος του το παραγόμενο αέριο αποτελείται από N_2 (37.99%). Το γεγονός αυτό οφείλεται στη χρήση αέρα (και όχι καθαρού οξυγόνου) στο ρόλο του μέσου αεριοποίησης. Εφόσον το άζωτο θεωρείται το συνδετικό συστατικό της διεργασίας, υπολογίζεται μέσω αυτού ο ρυθμός παραγωγής του αερίου σύνθεσης σύμφωνα με τα παρακάτω: [35]

Είσοδος αζώτου: $n_{N_2,in} = n_{N_2,fuel} + n_{N_2,air}$

Ρυθμός παραγωγής αερίου: $n_{syngas\ (N)} = \frac{n_{N_{2,in}}}{Y_{N_2}}$

Πίνακας 28. *Συνδετικό συστατικό (N_2).*

Ισοζύγιο Αζώτου	
Είσοδος αζώτου λόγω του μέσου αεριοποίησης $n_{N2.air}$	0.0419 mol_{N2}/sec
Είσοδος αζώτου εμπεριεχόμενου στο RDF $n_{N2,\ fuel}$	0.0009 mol_{N2}/sec
Είσοδος συνολικής ποσότητας αζώτου $n_{N2,in}$	0.0428 mol_{N2}/sec
Άζωτο στο αέριο σύνθεσης Y_{N2}	0.3799 mol_{N2}/sec
Ρυθμός παραγωγής αερίου $n_{syngas\ (N)}$	0.1319 mol_{syngas}/sec

Εφόσον είναι γνωστός πια ο ρυθμός παραγωγής αερίου σύνθεσης και η σύστασή του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση προς υπολογισμό της παροχής του.

$$m_{syngas} = n_{syngas\ (N)} \times \sum X_i\% \times MB_i$$

όπου $Xi\%$ η σύσταση του αερίου σύνθεσης.

Επιπλέον, υπολογίζεται η θερμική ισχύς του αερίου, βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$P_{syngas} = \frac{m_{syngas} \times LHV_{syngas}}{3600}$$

Προκειμένου να υπολογιστεί η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του αερίου, έγινε χρήση στοιχείων από τη βιβλιογραφία. [74]

Πίνακας 29. *Χαρακτηριστικά αερίου σύνθεσης.*

Μοριακό Βάρος MB_{syngas}	23.215 kg/kmol
Πυκνότητα ρ_{syngas}	0.966 kg/Nm^3
Παροχή μάζας m_{syngas}	5.112 kg/h [19]
Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα LHV_{syngas}	6053.131 kJ/kg
Θερμική ισχύς P_{syngas}	15.862 kW

Σε αυτό το σημείο είναι δυνατός ο υπολογισμός του ***ψυχρού βαθμού απόδοσης της αεριοποίησης (Cold Gas Efficiency)***, ως ο πιο κοινός τρόπος εκτίμησης της απόδοσης αεριοποίησης στερεών καυσίμων:

$$CGE = \frac{P_{syngas}}{P_{fuel}} = 78.878\ \%$$

Προς επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων για το ποσοστό μετατροπής άνθρακα, πραγματοποιήθηκε σύγκρισή τους με αντίστοιχες μελέτες:

- Οι ***Chiemchaisri et al., 2009*** [46] πραγματοποίησαν αεριοποίηση πελλετοποιημένου πλαστικού RDF σε μονάδα μικρής κλίμακας και ο ψυχρός βαθμός απόδοσης της αεριοποίησης έφτασε το 77%.
- Οι ***Arena et al., 2010*** [51] αεριοποίησαν πολυαιθυλένιο από αστικά σύμμεικτα απορρίμματα σε αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη, με ολιβίνη στη θέση του αδρανούς υλικού. Σε θερμοκρασία αεριοποίησης 780°C και λόγο αέρα καυσίμου $\lambda = 0.25$ αντιστοιχεί $CGE = 84\%$.
- Τέλος, οι ***Nilsson et al., 2012*** [75] αεριοποίησαν αστικά σύμμεικτα απορρίμματα, παρουσία ή μη ατμού. Στην περίπτωση της απουσίας ατμού, και με $\lambda = 0.24$, το ποσοστό $CGE = 77\%$ προσεγγίζει ικανοποιητικά την παρούσα μελέτη.

Χαρακτηριστικό μέγεθος για την ποιότητα και την απόδοση της διαδικασίας της αεριοποίησης, πέραν του ψυχρού βαθμού απόδοσης, είναι και το ποσοστό άνθρακα που έχει μεταβεί σε αέρια φάση. Πιο αναλυτικά, παρακάτω παρουσιάζονται τα γραμμομόρια άνθρακα ανά κιλό παραγόμενου αερίου στις χημικές ενώσεις που απαρτίζουν το αέριο σύνθεσης, καθώς και ο συνολικός άνθρακας σε αέρια φάση. Τελικά, είναι εφικτό να υπολογιστεί ***το ποσοστό μετατροπής άνθρακα (Carbon Conversion Efficiency %)*** σύμφωνα με τα ακόλουθα:

moles άνθρακα σε κάθε συστατικό *i* του syngas: $n_{C,i} = n_{syngas\ (N)} \times X_i\%$

Μάζα άνθρακα στο παραγόμενο syngas: $m_{c,syngas} = n_{c,total} \times MB_C$

Παροχή άνθρακα στο παραγόμενο syngas: $\dot{m}_{C,syngas} = m_{c,syngas} \times m_{syngas}$

Παροχή άνθρακα στο αρχικό στερεό καύσιμο: $\dot{m}_{C,fuel} = m_{c,fuel} \times m_{fuel}$

Ποσοστό μετατροπής άνθρακα: $CCE\ \% = \frac{\dot{m}_{c,syngas}}{\dot{m}_{C,fuel}}$

[19] Επί ξηρού, απαλλαγμένο από το άζωτο.

Πίνακας 30. *Ισοζύγιο και μετατροπή άνθρακα.*

Ισοζύγιο άνθρακα	
mole C στο CO $n_{C,CO}$	0.0255 $kmol_{C,CO}/kg_{syngas}$
mole C στο CO_2 $n_{C,CO2}$	0.0179 $kmol_{C,CO2}/kg_{syngas}$
mole C στο CH_4 $n_{C,CH4}$	0.0039 $kmol_{C,CH4}/kg_{syngas}$
Συνολικός άνθρακας C $n_{C,syngas}$	0.0474 $kmol_{C,total}/kg_{syngas}$
Μάζα άνθρακα στο παραγόμενο syngas $m_{C,syngas}$	0.569 kg_C/kg_{syngas}
Παροχή άνθρακα στο παραγόμενο syngas $\dot{m}_{C,syngas}$	2.048 $kg_{C,syngas}/h$
Παροχή άνθρακα στο αρχικό στερεό καύσιμο $\dot{m}_{C,fuel}$	2.517 $kg_{C,fuel}/h$
Ποσοστό μετατροπής άνθρακα *CCE%*	**81.36 %**

Αντίστοιχη διαδικασία με την ανωτέρω έχει ακολουθηθεί σε δημοσιεύσεις που επιβεβαιώνουν την εγκυρότητα των παραπάνω αποτελεσμάτων. Αναλυτικότερα:

- Οι ***Arena et al., 2009*** [51], στη μελέτη που αναφέρεται ακριβώς παραπάνω, κατέληξαν σε τελικό ποσοστό μετατροπής άνθρακα για $\lambda = 0.25$ και θερμοκρασία κατά την αεριοποίηση $780°C$ της τάξης του 82%.
- Αντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα των ***Di Gregorio et al., 2012*** [55], οι οποίοι αεριοποίησαν πλαστικό ανακτηθέν καύσιμο (Plastic Derived Fuel) σε ρευστοποιημένη κλίνη. Εδώ, η αυξημένη τιμή $CCE = 88.6\,\%$ συγκριτικά με την παρούσα δείχνει να οφείλεται αποκλειστικά στην ιδιαιτέρως αυξημένη θερμοκρασία ($879°C$), αφού ο λόγος αέρα καυσίμου κυμαίνεται σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα ($\lambda = 0.24$).
- Οι ***Campoy et al., 2014*** [57], εφαρμόζοντας επίσης αεριοποίηση κομποστοποιημένων αστικών σύμμεικτων απορριμμάτων σε ρευστοποιημένη κλίνη, κατέληξαν σε $CCE = 88.9\,\%$. Η αυξημένη τιμή του συγκριτικά με τη μελέτη της παρούσας εργασίας αποδίδεται στα υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας αεριοποίησης ($800°C$) και λ (0.42).

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα είναι ότι, εφόσον το $81.36\,\%$ του εισερχόμενου άνθρακα εμπεριέχεται σε αέρια συστατικά του αερίου σύνθεσης, το υπόλοιπο $\sim 19\,\%$ βρίσκεται εντός του εξανθρακώματος, των πισσών και των λοιπών υδρογονανθράκων, τα ποσοστά των οποίων δεν καταμετρήθηκαν στο τελικό αέριο.

Σε αυτό το σημείο, για τον υπολογισμό της ποσότητας των πισσών και του εξανθρακώματος, λήφθηκαν υπόψιν στοιχεία από τη βιβλιογραφία. [76] Εφόσον το καύσιμο στην εν λόγω μελέτη προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τη σύσταση του RDF που παρουσιάζεται στον Πίνακα 23, επιτρέπεται να ληφθεί η συγκέντρωση των πισσών $d_{tars} = 11\ gr/Nm^3$, χωρίς τον κίνδυνο μεγάλου σφάλματος στους τελικούς υπολογισμούς. Τώρα είναι εφικτός και ο υπολογισμός του εξανθρακώματος μέσω των παρακάτω σχέσεων, αφού το τελευταίο μαζί με τις πίσσες απαρτίζουν το σύνολο του μη αντιδρώντος άνθρακα.

$$m_{char\&tars} = m_{C,fuel} \times \frac{100 - CCE\%}{100}$$

$$m_{tars} = d_{tars} \times V_{syngas}$$

Πίνακας 31. *Πίσσες και εξανθράκωμα.*

Συνολική παραγόμενη ποσότητα πισσών και εξανθρακώματος $m_{char\&tars}$	469.23 gr/h
Συγκέντρωση πισσών στο αέριο σύνθεσης d_{tars}	11 gr_{tars}/Nm_{syngas}^3
Παραγόμενη ποσότητα πισσών m_{tars}	107.47 gr_{tars}/h
Παραγόμενη ποσότητα εξανθρακώματος m_{char}	361.759 gr_{char}/h

Προς απλοποίηση της διαδικασίας των υπολογισμών, γίνεται δεκτό ότι το σύνολο της παραγόμενης ποσότητας εξανθρακώματος εξάγεται από τον πυθμένα του ανοδικού αγωγού. Αυτή η παραδοχή δεν προκαλεί σημαντικό σφάλμα στα τελικά αποτελέσματα, καθώς το εξανθράκωμα αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος του από μεγάλα σωματίδια, τα οποία αδυνατεί να συμπαρασύρει το παραγόμενο αέριο εκτός του αεριοποιητή.

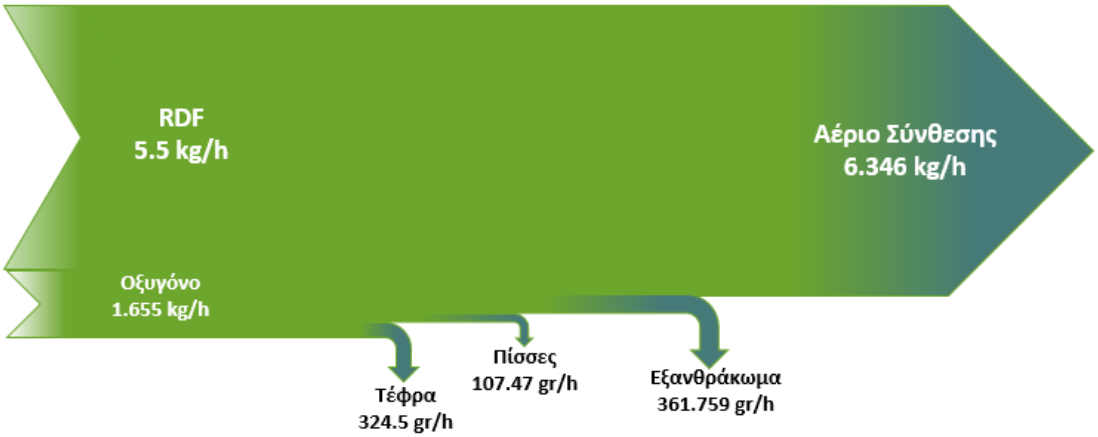
Επιπλέον, ακόμα και αν γίνει δεκτό ότι ένα πολύ μικρό ποσοστό σωματιδίων διαφεύγει εκτός του αντιδραστήρα, ακόμα μικρότερο είναι το ποσοστό αυτό με διάμετρο μικρότερη των $100\ \mu m$, που είναι και η ικανότητα κατακράτησης σωματιδίων στον πρώτο κυκλώνα. Προκύπτει, λοιπόν, ότι η διαφυγείσα ποσότητα εξανθρακώματος σε περιοχές πέραν της κύριας διάταξης αεριοποίησης είναι αμελητέα.

Όλα τα απαιτούμενα μεγέθη για τον υπολογισμό του ισοζυγίου μάζας έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά παραπάνω και το εν λόγω ισοζύγιο φαίνεται στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 32. *Ισοζύγιο μάζας στον αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία.*

Εισερχόμενες ροές μάζας		**Εξερχόμενες ροές μάζας**	
Καύσιμο m_{RDF}	76.873%	***Αέριο σύνθεσης*** m_{syngas}	88.692%
		Εξανθράκωμα m_{char}	5.056%
		Τέφρα πυθμένα m_{bedash}	3.628%
Οξυγόνο	23.127%	***Ιπτάμενη τέφρα*** m_{flyash}	0.907%
		Πίσσες m_{tars}	1.502%
Σύνολο	***100%***	***Σύνολο***	***99.786%***

Η πολύ μικρή απόκλιση των συνολικά εξερχόμενων ροών σε σχέση με την αρχική εισαγόμενη ποσότητα καυσίμου αποδίδεται στο συνολικό σφάλμα στο οποίο οδηγούν οι παραδοχές που έγιναν καθ' όλη την υπολογιστική διαδικασία.



Διάγραμμα 26. *Διάγραμμα Sankey ροών μάζας.*

Αφού το αέριο σύνθεσης καθαριστεί από τις επιβλαβείς προσμίξεις οδηγείται στο θάλαμο καύσης, στον οποίο και καταστρέφεται. Προκειμένου να επιτευχθεί η έναυση, χρησιμοποιείται ο καυστήρας ***Riello Gulliver BS1 T1 911***, ο οποίος κάνει χρήση υγραερίου των παρακάτω χαρακτηριστικών:

Πίνακας 33. *Χαρακτηριστικά υγραερίου.*

Ελάχιστη θερμική ισχύς καυστήρα P_{LPG}	16 kW [20]
Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα LHV_{LPG}	45800 kJ/kg_{LPG}
Απαιτούμενη παροχή μάζας m_{LPG}	1.258 kg_{LPG}/h

Για το υγραέριο, αναφέρεται ότι γίνεται χρήση μίγματος σύστασης 60% σε προπάνιο (C_3H_8) και 40% σε βουτάνιο (C_4H_{10}). [77] Όπως και στην περίπτωση του αερίου σύνθεσης, υπολογίζεται το ισοζύγιο άνθρακα στο καύσιμο:

Πίνακας 34. *Ισοζύγιο άνθρακα στο υγραέριο.*

Ισοζύγιο Άνθρακα	
mole C στο C_3H_8 $n_{C,C3H8}$	0.0136 $kmole_{C,C3H8}$/kg_{LPG}
mole C στο C_4H_{10} $n_{C,C4H10}$	0.0069 $kmole_{C,C4H10}$/kg_{LPG}
Συνολικός άνθρακας C $n_{C,LPG}$	0.0205 $kmole_{C,tot}$/kg_{LPG}
Μάζα άνθρακα $m_{C,LPG}$	0.246 kg_C/kg_{LPG}
Παροχή άνθρακα $\dot{m}_{C,LPG}$	0.309 $kg_{C,LPG}$/h

Προτού εισαχθεί το υγραέριο στον καυστήρα πραγματοποιείται εκτόνωσή του σε συνθήκες περιβάλλοντος, οπότε το καύσιμο περνά στην αέρια φάση. Θεωρώντας τώρα το μείγμα καυσίμων ως ένα ενιαίο αέριο καύσιμο, υπολογίζεται η παροχή μάζας του (kg/h) καθώς και η σύστασή του, όπως παρατίθεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 35. *Σύσταση μείγματος αερίων προς καύση.*

Σύσταση μείγματος αερίων (επί ξηρού)	**Ποσοστό %**
CO	17.837
H_2	23.494
CH_4	2.764
C_3H_8	4.729
C_4H_{10}	3.147
CO_2	12.512
N_2	35.002
H_2S	0.516
Ar	0.004
HCl	0.001

Με βάση τη σύσταση του καυσίμου και το δεδομένο ότι γίνεται εισαγωγή αέρα στον καυστήρα μόνο για την έναυση του υγραερίου, υπολογίζεται ο λόγος αέρα – καυσίμου, ο απαιτούμενος αέρας για στοιχειομετρική καύση του υγραερίου καθώς και ο απαιτούμενος αέρας για την προκειμένη περίπτωση καύσης ($\lambda = 1.2$).

$$\mu_{LOT} = \sum X_i \times \mu_{LOT,i}$$

[20] Ο καυστήρας καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του ρυθμίζεται να αποδίδει την ελάχιστη δυνατή θερμική ισχύ.

$$ER_{comb} = \mu_{LOT} \times \lambda$$

όπου Xi τα ποσοστά προπανίου και βουτανίου στο μείγμα και $\mu_{LOT,i}$ ο απαιτούμενος αέρας για καύση της κάθε ένωσης του μείγματος.

Πίνακας 36. *Απαιτούμενη παροχή αέρα στο θάλαμο καύσης.*

λ	1.2
Στοιχειομετρικός λόγος αέρα – καυσίμου μ_{LOT}	3.327 $kg_{air,st}/kg_{fuel}$
Λόγος αέρα – καυσίμου για καύση ER_{comb}	3.993 kg_{air}/kg_{fuel}
Παροχή μείγματος αερίων m_{fuel}	6.37 kg_{fuel}/h
Παροχή αέρα V_{air}	29.346 Nm^3/h

Εφόσον πλέον είναι γνωστή η παροχή αέρα, εύκολα υπολογίζεται προσεγγιστικά η παροχή καυσαερίων

$$V_{exhaust} = V_{air} + V_{syngas} + V_{LPG}$$

και εν συνεχεία η παροχή διοξειδίου του άνθρακα λόγω της καύσης του μείγματος.[21] Χρησιμοποιείται η σχέση

$$V_{CO_2} = \mu_{CO_2} \times V_{exhaust}$$

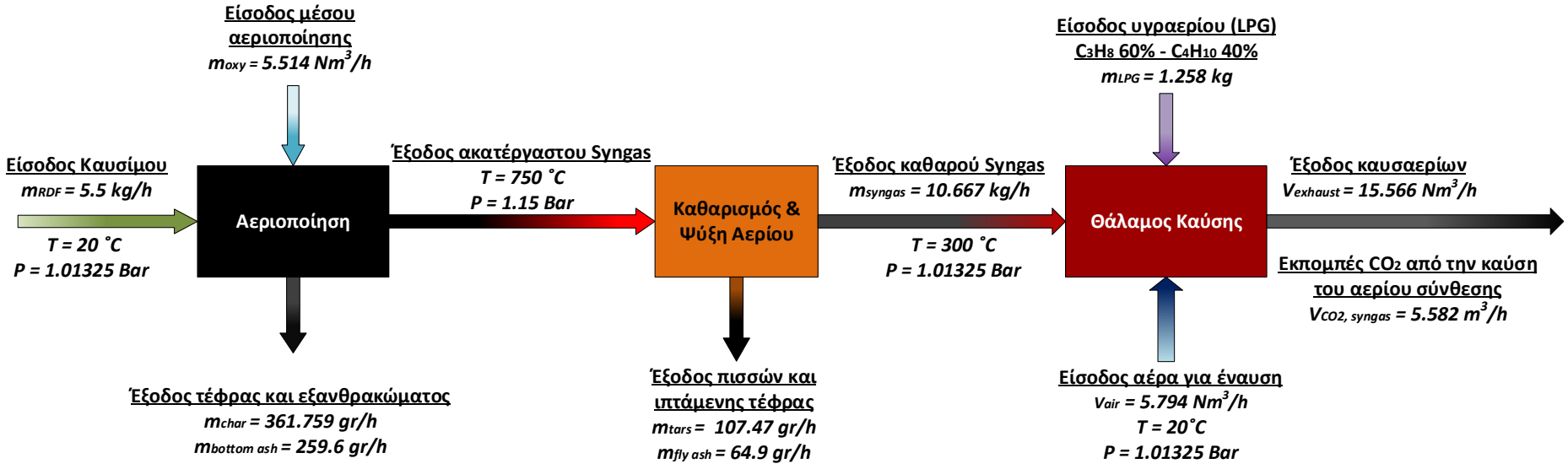
όπου $\mu_{CO_2} = \sum X_i \times \mu_{CO_2,i}$.

Πίνακας 37. *Χαρακτηριστικά καυσαερίου.*

Παροχή όγκου καυσαερίων $V_{exhaust}$	15.566 m^3/h[22]
Παροχή CO_2 στο καυσαέριο V_{CO2}	14.827 m^3/h
Παροχή CO_2 από την καύση του αερίου σύνθεσης $V_{CO2,\ syngas}$	5.582 m^3/h

[21] Γίνεται η υπόθεση της περίπτωσης πλήρους καύσης για το μείγμα αερίων.

[22] Τα καυσαέρια υπολογίζονται με την παραδοχή ότι η ποσότητα αέρα που εισάγεται στον καυστήρα είναι μόνον αυτή που απαιτείται για την καύση του υγραερίου.



Διάγραμμα 27. *Διάγραμμα ροής μάζας στον αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία.*

3.3.2 Ισοζύγιο ενέργειας

Αντίστοιχη διαδικασία με αυτή για τον υπολογισμό του ισοζυγίου μάζας θα ακολουθηθεί και για την παρουσίαση του *ενεργειακού ισοζυγίου (energy balance)* της εγκατάστασης. Παρακάτω παρουσιάζονται οι εισροές και οι εκροές ενεργειακών ποσών στον αεριοποιητή και στα άλλα μέρη της διάταξης αεριοποίησης.

Αρχικά, υπολογίζονται τα ποσά ενέργειας που προσδίδονται στον αεριοποιητή μέσω των ηλεκτρικών αντιστάσεων που είναι εγκατεστημένες καθ' όλο το μήκος του ανοδικού αγωγού και του πρώτου κυκλώνα. Προς εκτίμηση των συνολικών ενεργειακών ποσών που απαιτούνται για τη θέρμανση των αντιστάσεων κατά τη διάρκεια της τροφοδοσίας του καυσίμου, λαμβάνεται η μέση τιμή της καταγεγραμμένης από το σύστημα ισχύος των πέντε ζωνών (Q_{resist}).

Έπειτα, με βάση τις αναφερόμενες σε προηγούμενο κεφάλαιο παροχή και σύσταση καυσίμου, υπολογίζεται η θερμική ενέργεια που το τελευταίο προσδίδει στο σύστημα κατά το χρονικό διάστημα της τροφοδοσίας του.

$$Q_{tot,in} = Q_{resist} + Q_{RDF}$$

Πίνακας 38. *Προσδιδόμενη ενέργεια στον αεριοποιητή.*

	MJ/h	**kW**
Ενέργεια από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις $\boldsymbol{Q_{resist}}$	60.514	16.809
Ενέργεια από το καύσιμο $\boldsymbol{Q_{RDF}}$	72.395	20.109
Συνολική εισερχόμενη ενέργεια στον αντιδραστήρα $\boldsymbol{Q_{tot,In}}$	**132.908**	**36.918**

Ένα μη αμελητέο ποσό ενέργειας απορροφάται από το αδρανές υλικό εντός της εγκατάστασης καθ' όλη τη διάρκεια της διεξαγωγής της δοκιμής. Ένα μέρος του αξιοποιείται διατηρώντας όλα τα σημεία του αεριοποιητή σε παρεμφερή θερμοκρασία, αποφεύγοντας τα θερμά σημεία *(hot spots)*. Ένα άλλο μέρος αυτής της ενέργειας χάνεται στον περιβάλλοντα χώρο του αντιδραστήρα, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του ανοδικού και του καθοδικού αγωγού και της ύπαρξης φαινομένων συναγωγής. [78] Λαμβάνεται η περίπτωση όπου η κλίνη έχει επέλθει σε κατάσταση ταραχώδους αναβράζουσας ρευστοποίησης, όπως στην περίπτωση της αεριοποίησης πελλετοποιημένου ξύλου. [σελ. 105] Έτσι, δεν παρατηρείται γρήγορη ανακυκλοφορία, αλλά ο ολιβίνης διέρχεται από τον ανοδικό στον καθοδικό αγωγό, οπότε ως απορροφώμενη ισχύς από τον ολιβίνη υπολογίζεται η παρακάτω:

$$Q_{olivine} = m_{olivine} \times Cp_{olivine} \times (T_{riser} - T_{downcomer})$$

όπου T_{riser} η μέση θερμοκρασία του ανοδικού αγωγού κατά την τροφοδοσία του πελλετοποιημένου ξύλου και $T_{downcomer}$ η αντίστοιχη θερμοκρασία του καθοδικού αγωγού.

Πίνακας 39. *Απορροφώμενη ενέργεια από τον ολιβίνη.*

Μάζα ολιβίνη $m_{olivine}$	23 kg
Ειδική θερμοχωρητικότητα ολιβίνη $Cp_{olivine}$	1.088 kJ/kg·K [78]
Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ανοδικού και καθοδικού αγωγού $T_{riser} - T_{downcomer}$	740 ˚C
Απορροφώμενη ενέργεια από τον ολιβίνη $Q_{olivine}$	**19.115 MJ/h / 5.309 kW**

Το αέριο σύνθεσης που προκύπτει από την αεριοποίηση του RDF, του οποίου η σύσταση παρατίθεται σε προηγούμενο κεφάλαιο, περικλύει ενέργεια υπολογιζόμενη ως εξής:

$$Q_{syngas} = P_{syngas} + m_{syngas} \times Cp_{syngas} \times \Delta T_{gasif}$$

Η παραπάνω σχέση υποδηλώνει ότι, πέραν της χημικής ενέργειάς του, το αέριο σύνθεσης εμπεριέχει μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας, λόγω των ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται κατά τη διεργασία.

Πίνακας 40. *Ενέργεια αερίου σύνθεσης.*

Παροχή αερίου σύνθεσης m_{syngas}	10.667 kg/h[23]
Ειδική θερμοχωρητικότητα αερίου σύνθεσης στους 750 ˚C Cp_{syngas}	4.279 kJ/kg·K
Ισχύς αερίου σύνθεσης P_{syngas}	15.862 kW
Ενέργεια παραγόμενου αερίου σύνθεσης Q_{syngas}	**90.879 MJ/h /25.244 kW**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μεγαλύτερο μέρος του άνθρακα του αρχικού καυσίμου προς αεριοποίηση (81.36 %) εμπεριέχεται στα συστατικά του παραγόμενου αερίου σύνθεσης. Το ποσοστό του άνθρακα που υπολείπεται θεωρείται εναπομείναν στις παραγόμενες πίσσες και στο εξανθράκωμα. Λαμβάνοντας τα απαραίτητα στοιχεία από σχετική βιβλιογραφία [79], υπολογίζονται τα ποσά ενέργειας που εμπεριέχονται στο σύνολο του εξανθρακώματος και των πισσών.

$$Q_{char} = m_{char} \times LHV_{char}$$
$$Q_{tars} = m_{tars} \times LHV_{tars}$$

Πίνακας 41. *Ενέργεια απορριπτόμενη μέσω των πισσών και του εξανθρακώματος.*

Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα εξανθρακώματος LHV_{char}	32.808 MJ/kg$_{char}$ [24]
Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα πισσών LHV_{tars}	40.235 MJ/kg$_{tars}$ [25]
Ενέργεια απορριπτόμενου εξανθρακώματος Q_{char}	**8.308 MJ/h / 2.308 kW**
Ενέργεια κατακρατώμενων στον κυκλώνα πισσών Q_{tars}	**4.324 MJ/h / 1.201 kW**

[23] Υγρό αέριο σύνθεσης, συμπεριλαμβανομένου το αζώτου.

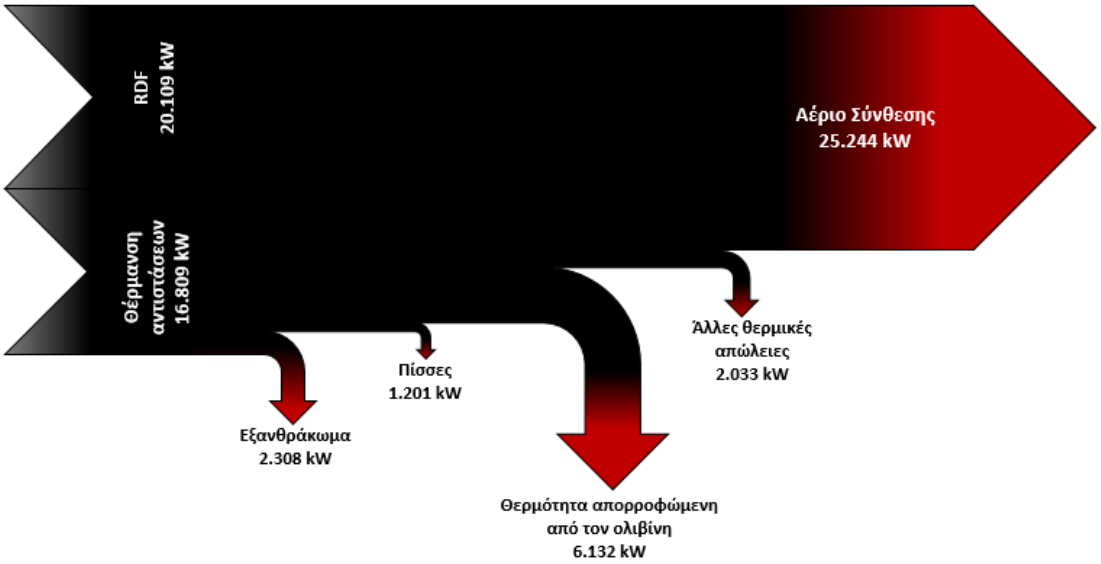
[24] Ως LHV_{char} λαμβάνεται η θερμογόνος ικανότητα του άνθρακα και το εξανθρακωμα θεωρείται ότι αποτελείται κατά 70% από σταθερό άνθρακα.

[25] Ως LHV_{tars} λαμβάνεται η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του ναφθαλενίου, αφού είναι η κυρίαρχη ένωση στο σύνολο της μάζας των πισσών.

Έχοντας υπολογίσει όλα τα παραπάνω, επιχειρείται να καταστρωθεί ένα το ενεργειακό ισοζύγιο του αεριοποιητή, όπως φαίνεται στο συγκεντρωτικό πίνακα και στο διάγραμμα που ακολουθούν.

Πίνακας 42. *Συγκεντρωτικό ισοζύγιο ενέργειας στον αεριοποιητή.*

Εισερχόμενα ποσά ενέργειας		Εξερχόμενα ποσά ενέργειας	
		Q_{syngas}	68.378%
Q_{resist}	45.53%	$Q_{olivine}$	16.61%
Q_{RDF}	54.47%	Q_{char}	6.251%
		Q_{tars}	3.253%
Σύνολο	**100%**	***Σύνολο***	**94.493%**



Διάγραμμα 28. *Διάγραμμα Sankey ροών ισχύος.*

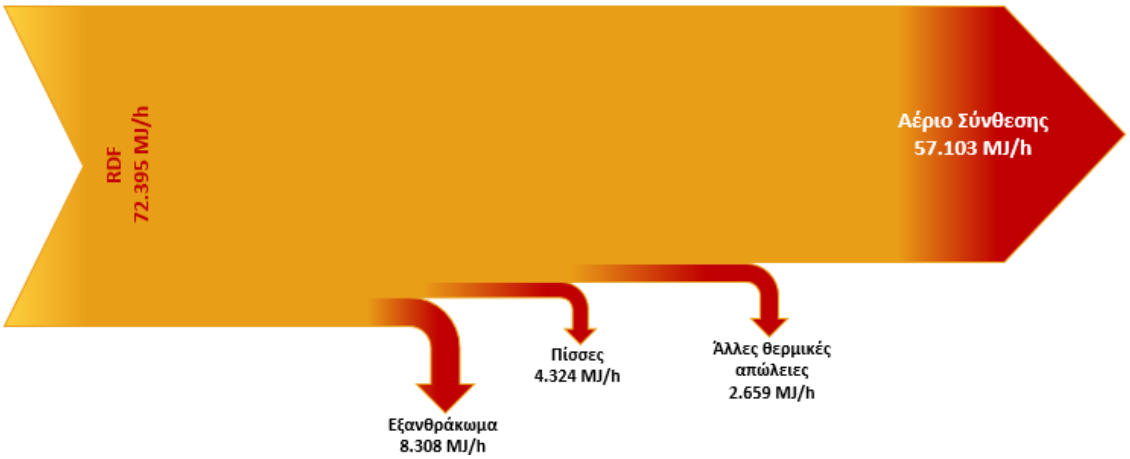
Παρατηρείται μια μη αμελητέα ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των εισερχόμενων και των εξερχόμενων ποσών ενέργειας (5%). Η διαφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί στις βιβλιογραφικές προσεγγίσεις που έχουν πραγματοποιηθεί χάριν των υπολογισμών, αλλά και σε παράπλευρες απώλειες που δεν συνυπολογίστηκαν κατά την κατάστρωση του εν λόγω ισοζυγίου.

Αν, τώρα, το ισοζύγιο ενέργειας επικεντρωθεί στη μετατροπή ενέργειας του RDF σε ενέργεια του αερίου σύνθεσης, πισσών και εξανθρακώματος, χωρίς να συμπεριληφθεί η εκλυόμενη από τις αντιστάσεις θερμότητα, προκύπτουν τα εξής:

Πίνακας 43. *Ισοζύγιο ενέργειας καυσίμου.*

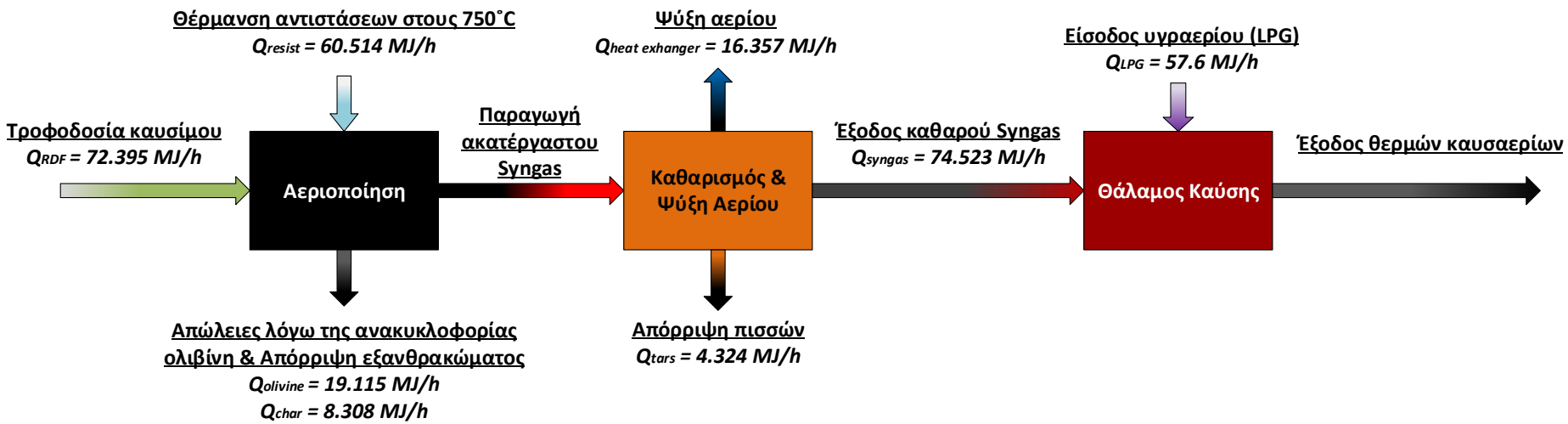
Εισερχόμενα ποσά ενέργειας		Εξερχόμενα ποσά ενέργειας	
		Q_{syngas}	78.878 %
Q_{RDF}	100 %	Q_{char}	11.476 %
		Q_{tars}	5.973 %
		Σύνολο	**96.327 %**

Αντίστοιχα, σχεδιάζεται το διάγραμμα Sankey και παρατίθεται παρακάτω:



Διάγραμμα 29. *Διάγραμμα Sankey ενέργειας καυσίμου.*

Το προκύπτον σφάλμα ($< 4\%$) αποδίδεται στις βιβλιογραφικές παραδοχές κατά τους διενεργηθέντες υπολογισμούς για την πληρότητα του ισοζυγίου.



Διάγραμμα 30. *Διάγραμμα ροής ενέργειας στον αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία.*

3.4 Εκκίνηση της μονάδας

Οι αναλύσεις ισοζυγίων μάζας και ενέργειας που προηγήθηκαν αφορούν τη συμπεριφορά της πιλοτικής μονάδας κατά το χρονικό διάστημα της τροφοδοσίας του καυσίμου, υπό σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και παροχής μέσου αεριοποίησης. Ενδιαφέρον έχει να ασχοληθεί κανείς και με τη διαδικασία προετοιμασίας της μονάδας έως ότου φτάσει σε αυτό το στάδιο. Τα στοιχεία που ανακύπτουν από αυτή την ανάλυση δίνουν μια εικόνα των διακυμάνσεων της απαιτούμενης χρονικής διάρκειας προετοιμασίας, αλλά και της ενέργειας που δεσμεύει το μέσο αεριοποίησης.

Παρακάτω παρουσιάζονται δυο διαφορετικά σενάρια προετοιμασίας της μονάδας, όπως αυτά εκτελέστηκαν στην πιλοτική εγκατάσταση αεριοποίησης σε ρευστοποιημένη κλίνη με ανακυκλοφορία. Και στα δύο σενάρια στην εγκατάσταση έχουν εκχυθεί 27 κιλά ολιβίνη πριν από οποιαδήποτε θέρμανση και τροφοδοσία αέρα. Επιπλέον, και στις δύο περιπτώσεις παρατηρήθηκε προβληματική συμπεριφορά της τέταρτης καθ' ύψος ζώνης αντιστάσεων, της οποίας η θέρμανση δεν ήταν δυνατό να διακοπεί, ανεξαρτήτως μεταβολής του εκάστοτε ρυθμιζόμενου ποσοστού θέρμανσης μέσω του προγράμματος απομακρυσμένου ελέγχου. Το γεγονός αυτό απαιτούσε την απενεργοποίηση της ζώνης από τον κεντρικό ηλεκτρολογικό πίνακα, όποτε κρινόταν ότι έχει υπερθερμανθεί συγκριτικά με τις λοιπές τέσσερις.

3.4.1 Σενάριο 1

Στο σενάριο αυτό στην εγκατάσταση τροφοδοτείται υψηλή παροχή αέρα από την έναρξη κιόλας της δοκιμής. Συγκεκριμένα, κατά την έναρξη στον αντιδραστήρα εισέρχεται ποσότητα αέρα της τάξεως των $290\ Nl/min$, η οποία μέχρι το πέρας της προετοιμασίας έχει φτάσει τα $760\ Nl/min$. Όλες οι ζώνες αντιστάσεων κατά το πρώτο διάστημα θερμαίνονται στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους. Εν συνεχεία, η λειτουργία των τεσσάρων ζωνών καθ' ύψος του ανοδικού αγωγού ρυθμίζεται σύμφωνα με τις ανάγκες θέρμανσης. Κατά το ήμισυ της χρονικής διάρκειας η πέμπτη ζώνη, που περιλαμβάνει μόνο την ηλεκτρική αντίσταση γύρω από τον κυκλώνα, απενεργοποιείται. Για τον προσδιορισμό των καταναλισκόμενων ποσών ενέργειας για τη θέρμανση των αντιστάσεων, λαμβάνεται η μέση καταγεγραμμένη τιμή από το σύστημα και υπολογίζεται ότι όλες οι ζώνες αντιστάσεων λειτουργούν κατά μέσο όρο στο ήμισυ των δυνατοτήτων τους.

Από την καταγραφή των στοιχείων της δοκιμής, μέσω του διατιθέμενου συστήματος, υπάρχει πλήρης εικόνα των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας σε όλα τα τμήματα της κύριας διάταξης αεριοποίησης. Θεωρείται, έτσι, ότι η απορροφώμενη από τον αέρα ισχύς είναι η υπολογιζόμενη παρακάτω, με T_{in} τη θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον ανοδικό αγωγό και $T15$ τη θερμοκρασία εξόδου του, αφού το $T15$ είναι το θερμοστοιχείο που είναι εγκατεστημένο στην κορυφή του ανοδικού αγωγού και συγκεκριμένα σε ύψος $5.118\ m$. Παρόλο που στην παρούσα περίπτωση παρατηρείται το φαινόμενο της ανακυκλοφορίας του αδρανούς υλικού [σελ. 98], μπορεί να γίνει με ασφάλεια η παραδοχή ότι η μετρούμενη θερμοκρασία από το θερμοστοιχείο $T15$ είναι η θερμοκρασία του αέρα, εφόσον η υπολογιζόμενη τιμή του κλάσματος κενού ε στην ίδια περιοχή κυμαίνεται σε ιδιαιτέρως χαμηλά επίπεδα ($\cong 0.009$). [**Πίνακας 17**]

$$Q_{air} = m_{air} \times Cp_{air} \times (T15 - T_{in})$$

Η ειδική θερμοχωρητικότητα Cp_{air} υπολογίζεται κάνοντας χρήση της παρακάτω σχέσης: [80]

$$Cp_{air} = a + b \times T + c \times T^2 + d \times T^3$$

όπου:

- Θερμοκρασία $T = \frac{T_{in}+T_{15}}{2}$ [°C]
- Συντελεστές $a = 28.11\ \frac{J}{mol \times K}$, $b = 1.97 \times 10^{-3}\ \frac{J}{mol \times K^2}$, $c = 4.8 \times 10^{-6}\ \frac{J}{mol \times K^3}$ και $d = -1.97 \times 10^{-9}\ \frac{J}{mol \times K^4}$.

Κατά τα παραπάνω είναι γνωστή η απορροφώμενη ενέργεια από τον διερχόμενο από τον αντιδραστήρα αέρα κάθε στιγμή της προετοιμασίας.

Εκτός από τον εξερχόμενο αέρα, σημαντικά ποσά της προσδιδόμενης ενέργειας στον αντιδραστήρα απορροφώνται από τον ολιβίνη, καθώς επίσης και από τα τοιχώματα του ανοδικού αγωγού. Τα τοιχώματα είναι μονωμένα με δυο στρώσεις κεραμοβάμβακα και άλλη μια πετροβάμβακα συνολικού πάχους $150\,mm$, γεγονός όμως που επιτρέπει μια μη αμελητέα εκροή ενέργειας προς τον περιβάλλοντα χώρο. Όλα τα παραπάνω υπολογίζονται μέσω των κάτωθι σχέσεων και παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

$$Q_{olivine} = \frac{m_{olivine} \times Cp_{olivine} \times \Delta T}{\Delta t_{start\ up}}$$

όπου $m_{olivine}$ η μάζα του ολιβίνη στον ανοδικό αγωγό, $Cp_{olivine}$ η ειδική θερμοχωρητικότητά του, $\Delta T = T15 - T_{in}$ και $\Delta t_{start\ up}$ η χρονική διάρκεια της δοκιμής. Αντίστοιχα, για το χάλυβα:

$$Q_{steel} = \frac{m_{steel} \times Cp_{steel} \times \Delta T}{\Delta t_{start\ up}}$$

και για τις μονωτικές επιφάνειες:

$$Q_{blanket} = h \times A_{blanket} \times \Delta T$$

όπου h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ($\frac{W}{m^2 °C}$), $A_{blanket}$ το συνολικό εμβαδό των μονωτικών στρώσεων (m^2) και ΔT η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εξωτερικής μονωτικής επιφάνειας και του περιβάλλοντος (°C).

Πίνακας 44. *Προσδιδόμενα και απορροφώμενα ποσά ισχύος κατά την προετοιμασία της μονάδας.*

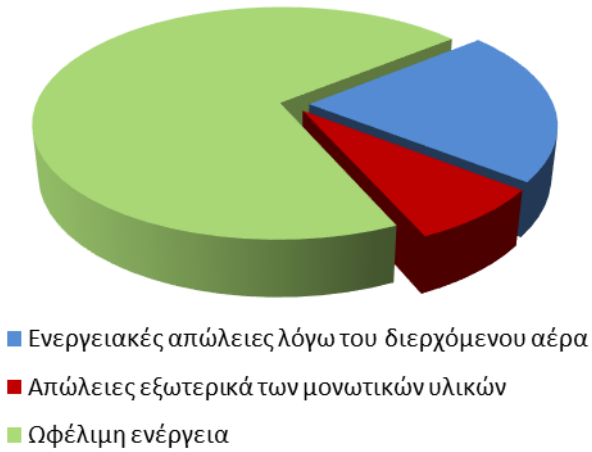
Κατάσταση Κλίνης	Ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας
Χρονική διάρκεια $\Delta t_{start\ up}$	1h 25 min
Θερμοκρασία εισόδου αέρα T_{in}	9 °C
Επιθυμητή επικρατούσα θερμοκρασία στην κλίνη T_{gasif}	550 – 600 °C
Παροχή αέρα m_{air}	290 – 760 Nl/min
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h	5 – 10 W/m^2°C
Εμβαδό συναλλασσόμενης επιφανείας $A_{blanket}$	5.587 m^2
Θερμοκρασία εξωτερικής μονωτικής επιφανείας T_{out}	60 °C
Προσδιδόμενη ισχύς από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις Q_{resist}	**36.794 kW**
Απορροφώμενη ισχύς από τον αέρα Q_{air}	**7.869 kW**
Απορροφώμενη ισχύς από τον ολιβίνη $Q_{olivine}$	**3.44 kW**
Απορροφώμενη ισχύς από τα τοιχώματα Q_{steel}	**3.78 kW**
Απώλειες ισχύος στην εξωτερική επιφάνεια του μονωτικού υλικού $Q_{blanket}$	**1.425 – 2.849 kW**

Για την πραγματοποίηση μιας αρχικής εκτίμησης, πλην του εξερχόμενου αέρα από τη μονάδα και τις απώλειες θερμότητας εξωτερικά των στρώσεων κεραμοβάμβακα και πετροβάμβακα, θεωρείται ότι το σύνολο της προσδιδόμενης ισχύος από τις αντιστάσεις τυγχάνει πλήρους εκμετάλλευσης κατά τη διεργασία.

Συγκρίνοντας τώρα τα προσδιδόμενα ποσά ισχύος μέσω των ηλεκτρικών αντιστάσεων και τις συνολικές απώλειες προκύπτουν τα εξής:

Πίνακας 45. *Ωφέλιμη ισχύς και απώλειες κατά την προετοιμασία της μονάδας.*

Εισερχόμενα ποσά ενέργειας		**Απώλειες ενέργειας**	
Q_{resist}	100 %	Q_{air}	21.388 %
		$Q_{blanket}$	3.872 % – 7.744 %
Συνολική ωφέλιμη ενέργεια		**70.868 % - 74.74 %**	



Διάγραμμα 31. *Κατανομή προσδιδόμενων ποσών ισχύος κατά την προθέρμανση της μονάδας.*

Συνοψίζοντας, στην περίπτωση που αναλύεται παραπάνω, στην εγκατάσταση τροφοδοτείται αέρας ιδιαίτερα υψηλής παροχής, ταυτόχρονα με υψηλά ποσοστά λειτουργίας των ηλεκτρικών αντιστάσεων καθ' όλη τη διάρκεια. Τα μεγάλα αυτά ποσά προσδιδόμενης ενέργειας έχουν ως αποτέλεσμα το σχετικά μικρό χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ολοκλήρωση της προθέρμανσης και τη μετάβαση στο στάδιο της τροφοδοσίας του καυσίμου στην εγκατάσταση. Με τους παραπάνω πρόχειρους υπολογισμούς, αποδεικνύεται τελικά ότι ένα ιδιαίτερα ικανοποιητικό ποσοστό της ισχύος αξιοποιείται τελικά για την εύρυθμη διεξαγωγή της προθέρμανσης της εγκατάστασης.

3.4.2 Σενάριο 2

Στην περίπτωση αυτή στην εγκατάσταση εισήχθη αισθητά μικρότερη παροχή αέρα και οι ηλεκτρικές αντιστάσεις λειτούργησαν σε πολύ χαμηλότερα ποσοστά από ό,τι στο προηγούμενο σενάριο, ώστε να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της μεταβολής των θερμικών απωλειών συναρτήσει αυτών των παραγόντων. Πιο αναλυτικά, καθ' όλη τη χρονική διάρκεια της προετοιμασίας της εγκατάστασης ως την τροφοδοσία του καυσίμου, η παροχή αέρα παρέμεινε σταθερή και ίση με $120\ Nl/min$. Τα ποσοστά εκμετάλλευσης ισχύος των τεσσάρων ζωνών αντιστάσεων ρυθμίστηκαν και πάλι σύμφωνα με τις ανάγκες, με λειτουργία στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους κατά την έναρξη και μείωσή τους με την πάροδο του χρόνου. Περίπου στο ήμισυ της διάρκειας της προετοιμασίας, οι ηλεκτρικές αντιστάσεις λειτούργησαν στο 10% των δυνατοτήτων τους.

Κατ' αντιστοιχία με το Σενάριο 1, υπολογίζονται οι εισροές και οι εκροές ενέργειας στην εγκατάσταση κατά το χρονικό διάστημα της προετοιμασίας και παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί. Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της απορροφώμενης από τον αέρα ισχύος γίνεται με ασφάλεια η παραδοχή ότι το θερμοστοιχείο $T15$ καταγράφει αποκλειστικά τη θερμοκρασία του διερχόμενου αέρα, εφόσον η κλίνη παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια της προετοιμασίας σε ταραχώδη αναβράζουσα κατάσταση και ο ολιβίνης είναι συγκεντρωμένος σε χαμηλότερες περιοχές της, με πολύ μικρές ποσότητες σωματιδίων να τίθενται σε ανακυκλοφορία. [σελ. 105]

Πίνακας 46. *Προσδιδόμενα και απορροφώμενα ποσά ισχύος κατά την προετοιμασία της μονάδας.*

Κατάσταση Κλίνης	Ταραχώδης ναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη
Χρονική διάρκεια $\Delta t_{start\ up}$	2h 3 min
Θερμοκρασία εισόδου αέρα T_{in}	9 ˚C
Επιθυμητή επικρατούσα θερμοκρασία στην κλίνη T_{gasif}	550 – 600 ˚C
Παροχή αέρα m_{air}	120 Nl/min
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h	5 – 10 W/m^{2}˚C
Εμβαδό συναλλασσόμενης επιφανείας $A_{blanket}$	5.587 m^2
Θερμοκρασία εξωτερικής μονωτικής επιφανείας T_{out}	60 ˚C
Προσδιδόμενη ισχύς από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις Q_{resist}	**10.701 kW**
Απορροφώμενη ισχύς από τον αέρα Q_{air}	**2.253 kW**
Απορροφώμενη ισχύς από τον ολιβίνη $Q_{olivine}$	**2.382 kW**
Απορροφώμενη ισχύς από τα τοιχώματα Q_{steel}	**2.617 kW**
Απώλειες ισχύος στην εξωτερική επιφάνεια του μονωτικού υλικού $Q_{blanket}$	**1.425 – 2.849 kW**

Με μια πρώτη ματιά, φαίνεται ότι η προσδιδόμενη ισχύς από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις είναι αισθητά μικρότερη, γεγονός που αποδίδεται στα πολύ χαμηλά ποσοστά λειτουργίας τους. Ιδιαιτέρως μικρότερη συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση εμφανίζεται και η απορροφώμενη ισχύς από το διερχόμενο αέρα, εφόσον η παροχή του κινείται σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα. Οι απώλειες μέσω των μονωτικών στρώσεων υπολογίζονται κατά τον ίδιο τρόπο με το Σενάριο 1, οπότε και προκύπτουν οι ίδιες κατ' απόλυτη τιμή. Στον παρακάτω πίνακα και στο διάγραμμα που έπεται παρουσιάζονται τα ποσοστά της ωφέλιμης ισχύος και των απωλειών στη μελετώμενη περίπτωση.

Πίνακας 47. *Ωφέλιμη ισχύς και απώλειες κατά την προετοιμασία της μονάδας.*

Εισερχόμενα ποσά ενέργειας		**Απώλειες ενέργειας**	
Q_{resist}	100 %	Q_{air}	21.057 %
		$Q_{blanket}$	13.313 % – 26.627 %
Συνολική ωφέλιμη ενέργεια		**52.316 % - 65.289 %**	

Διάγραμμα 32. *Κατανομή προσδιδόμενων ποσών ισχύος κατά την προθέρμανση της μονάδας.*

Ενώ ποσοστιαία οι απώλειες ισχύος λόγω του διερχόμενου αέρα παραμένουν στα ίδια επίπεδα, οι αντίστοιχες μέσω των μονωτικών στρωμάτων αυξάνονται, λόγω της διατήρησης της απόλυτης τιμής τους, παράλληλα με την ιδιαίτερα μειωμένη προσδιδόμενη ισχύ από τις αντιστάσεις. Τελικά, σύμφωνα με τα παραπάνω, διαφαίνεται ότι η παροχή αέρα δεν επηρεάζει καθόλου τα ωφέλιμα ποσά ισχύος. Το σημείο στο οποίο πρέπει να δίνεται προσοχή σε τέτοιου τύπου εγκαταστάσεις, λοιπόν, είναι ο χειρισμός και η λειτουργία των ζωνών αντιστάσεων. Η διαφορετική ρύθμιση των ηλεκτρικών αντιστάσεων μεταξύ των δύο σεναρίων που αναλύονται παραπάνω, κάνει σαφές ότι η λειτουργία των τελευταίων σε πολύ χαμηλά ποσοστά μειώνει αισθητά την ποσοστιαία ωφέλιμη ισχύ και αυξάνει ανεπιθύμητα το χρονικό διάστημα προθέρμανσης.

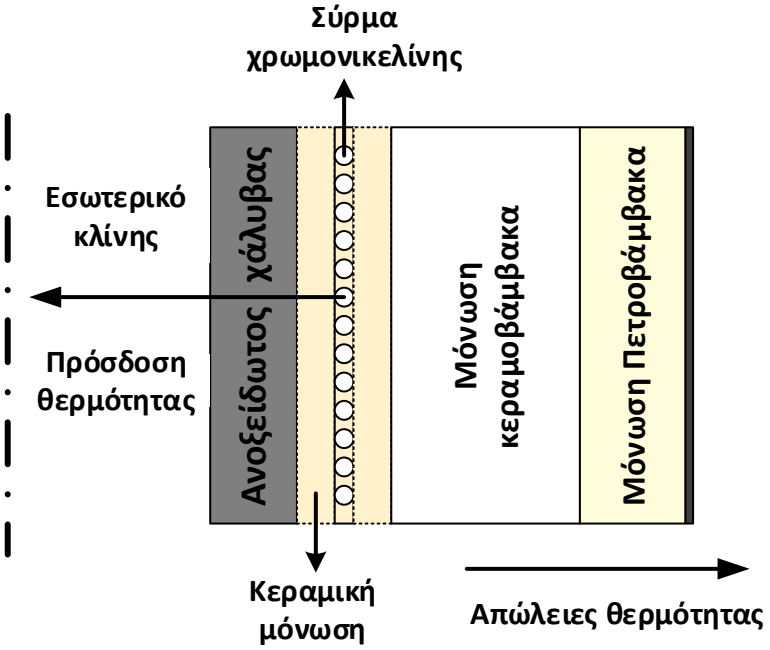
3.5 Ανάλυση ορθής λειτουργίας ηλεκτρικών αντιστάσεων

Συν όλων των παραπάνω, ιδιαιτέρως σημαντική είναι η διασφάλιση της ορθής λειτουργίας των ηλεκτρικών αντιστάσεων, ώστε να μην συμβαίνει κατασπατάληση ισχύος. Πέραν δηλαδή των αναπόφευκτων απωλειών, για τις οποίες γίνεται λόγος στην προηγούμενη παράγραφο, θα πρέπει οι αντιστάσεις να ρυθμίζονται κατά τέτοιο τρόπο καθ' όλη τη διάρκεια της προετοιμασίας αλλά και της κύριας διεργασίας, ώστε να εκλύουν θερμότητα προς τον αντιδραστήρα και όχι να απάγουν. Σε αυτή την ανάλυση επικεντρώνεται και η μελέτη που ακολουθεί, ως συνέχεια της ανάλυσης της πειραματικής διαδικασίας αεριοποίησης πελλετοποιημένου ξύλου που έχει παρουσιαστεί παραπάνω. [σελ. 105]

Πραγματοποιήθηκε, λοιπόν, ανάλυση των μεταβολών της θερμοκρασίας, από το εσωτερικό του ανοδικού αγωγού ως και την εξωτερική επιφάνεια του μονωτικού μανδύα πετροβάμβακα. Όπως φαίνεται στο σκαρίφημα που ακολουθεί [**Εικόνα 60**] και θα αναλυθεί εκτενώς παρακάτω, το προφανές ζητούμενο είναι οι ηλεκτρικές αντιστάσεις να προσδίδουν θερμότητα στον ανοδικό αγωγό και όχι να απάγουν από αυτόν. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την καταγραφή της πειραματικής δοκιμής όμως οδηγούν σε διαφορετικά συμπεράσματα.

Αναλυτικά, υπολογίστηκε η μέση θερμοκρασία κάθε ζώνης αντιστάσεων και κάθε ακτινικής περιοχής, ανάλογα με το υλικό για το οποίο γίνεται λόγος. Η μελέτη χωρίστηκε σε δυο διακριτά χρονικά επίπεδα, σε αυτό της προθέρμανσης της διάταξης και σε εκείνο της τροφοδοσίας του καυσίμου.

Κατά το πρώτο διάστημα λήφθηκαν υπόψιν μόνο τα τελευταία 30' της προθέρμανσης, για όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της τελικής θερμοκρασίας της εγκατάστασης πριν την τροφοδοσία του καυσίμου. Κατά το διάστημα τροφοδοσίας του καυσίμου από την άλλη, στη διάταξη θεωρείται ότι έχει επέλθει θερμοκρασιακή ισορροπία, οπότε κατά τη δεύτερη περίπτωση ως διάρκεια λαμβάνεται όλο το χρονικό διάστημα τροφοδοσίας.



Εικόνα 60. *Σκαρίφημα διατομής της εγκατάστασης, από το εσωτερικό της κλίνης ως την εξωτερική επιφάνεια μόνωσης.*

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακές μεταβολές που παρατηρούνται, από το εσωτερικό της κλίνης ως και τον περιβάλλοντα χώρο του αντιδραστήρα.

Πίνακας 48. *Μεταβολή θερμοκρασιών λόγω διεπαφής των υλικών κατά την προθέρμανση της μονάδας.*

Ακτίνα (mm)[26]	**Περιοχή**	**Ζώνη 1 (˚C)**	**Ζώνη 2 (˚C)**	**Ζώνη 3 (˚C)**	**Ζώνη 4 (˚C)**
0	Εσωτερικά του αγωγού	517.8	498.902	580.649	572.692
4	Εξωτερικά του αγωγού	409.483	527.706	478.763	582.201
11.5	Πρώτη στρώση κεραμικής μόνωσης	409.483	527.706	478.763	582.201
12.5	Σύρμα χρωμονικελίνης	427.067	543.299	487.474	585.179
20	Δεύτερη στρώση κεραμικής μόνωσης	444.651	558.894	496.184	588.158
120	Μόνωση μανδύα κεραμοβάμβακα	225.083	274.113	247.199	286.673
170	Μόνωση μανδύα πετροβάμβακα	60	60	60	60

Εστιάζοντας στις καταγεγραμμένες τιμές της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του αγωγού και συγκρίνοντάς τις με τις αντίστοιχες στο εξωτερικό τοίχωμα της σωλήνωσης, ανακύπτει το συμπέρασμα ότι η λειτουργία των ζωνών των ηλεκτρικών αντιστάσεων δεν είναι η πρέπουσα σε όλες τις περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, στις ζώνες 1 και 3 η εσωτερική θερμοκρασία του αγωγού είναι εμφανώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στην εξωτερική επιφάνειά του. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πρόσδοση ενεργειακών ποσών από την κλίνη προς τις ηλεκτρικές αντιστάσεις και την κατασπατάληση ηλεκτρικής ισχύος χωρίς ενεργειακό όφελος από τα πρώτα κιόλας $30'$ της προθέρμανσης. Για την περιοχή της πρώτης ζώνης γίνεται η εικασία ότι η υψηλότερη θερμοκρασία εντός της κλίνης οφείλεται στον θερμό ολιβίνη, ο οποίος φτάνει σε ύψος $1.1\ m$ σε αναβράζουσα κατάσταση κλίνης. [σελ. 105] Ο ολιβίνης φαίνεται να έχει δεσμεύσει ενέργεια στα σωματίδιά του και να την εκλύει στο μέσο ρευστοποίησης που εισέρχεται στην κλίνη. Όταν και αυτό κορεστεί, τα πλεονάζοντα ποσά ενέργειας απάγονται από το τοίχωμα της σωλήνωσης και εν συνεχεία από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Για την τρίτη ζώνη δεν υπάρχει τέτοιου τύπου αιτιολόγηση του φαινομένου, παρά μόνο μπορεί να ειπωθεί ότι τα ποσοστά λειτουργίας των αντιστάσεων στο εν λόγω ύψος δεν ήταν επαρκή για την πρέπουσα θέρμανση της περιοχής. Αυτή η κατασπατάληση ενέργειας δύναται να αποφευχθεί μέσω της λειτουργίας των ζωνών αντιστάσεων σε υψηλότερα ποσοστά από αυτά της παρούσας δοκιμής και για συντομότερο χρονικό διάστημα. Έτσι θα επιτευχθεί βέλτιστη αξιοποίηση της προσδιδόμενης ισχύος, παράλληλα με την ταχύτερη προθέρμανση της εγκατάστασης.

[26] Θεωρώντας R = 0 mm το εσωτερικό τοίχωμα της σωλήνωσης.

Αντίστοιχη μελέτη με την παραπάνω πραγματοποιήθηκε και για το διάστημα τροφοδοσίας του καυσίμου στον αντιδραστήρα, ενώ η πρώτη ζώνη αντιστάσεων λειτουργούσε στο 50% της ονομαστικής ισχύος της καθ' όλη τη διάρκεια και οι λοιπές τρεις ζώνες θερμαίνονταν στοιχειωδώς, σε ποσοστά λειτουργίας της τάξης του 5%. Σε αυτή την περίπτωση το φαινόμενο έδειξε να επεκτείνεται σε όλο το μήκος του ανοδικού αγωγού, και πάλι πιο αισθητά στην περιοχή της πρώτης ζώνης, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 49. *Μεταβολή θερμοκρασιών λόγω διεπαφής των υλικών κατά την τροφοδοσία του καυσίμου.*

Ακτίνα (mm)	Περιοχή	Ζώνη 1 (˚C)	Ζώνη 2 (˚C)	Ζώνη 3 (˚C)	Ζώνη 4 (˚C)
0	Εσωτερικά του αγωγού	742.51	738.421	764.478	753.376
4	Εξωτερικά του αγωγού	656.905	710.93	752.728	746.548
11.5	Πρώτη στρώση κεραμικής μόνωσης	773.96	771.092	813.625	762.618
12.5	Σύρμα χρωμονικελίνης	807.984	788.579	831.326	767.288
20	Δεύτερη στρώση κεραμικής μόνωσης	925.039	848.742	892.223	783.358
120	Μόνωση μανδύα κεραμοβάμβακα	431.254	398.509	417.17	370.448
170	Μόνωση μανδύα πετροβάμβακα	60	60	60	60

Για την περιοχή της πρώτης ζώνης αντιστάσεων ισχύει ό,τι και παραπάνω.

Με την είσοδο του καυσίμου στην κλίνη, το ύψος της τελευταίας αυξάνεται και παρατηρείται κατάσταση αναβράζουσας ρευστοποίησης. Η μετάβαση αυτή από αναβράζουσα κατάσταση (bubbling) σε ταραχώδη αναβράζουσα (turbulent) μπορεί να αιτιολογήσει πλήρως και τη συμπεριφορά της δεύτερης ζώνης.

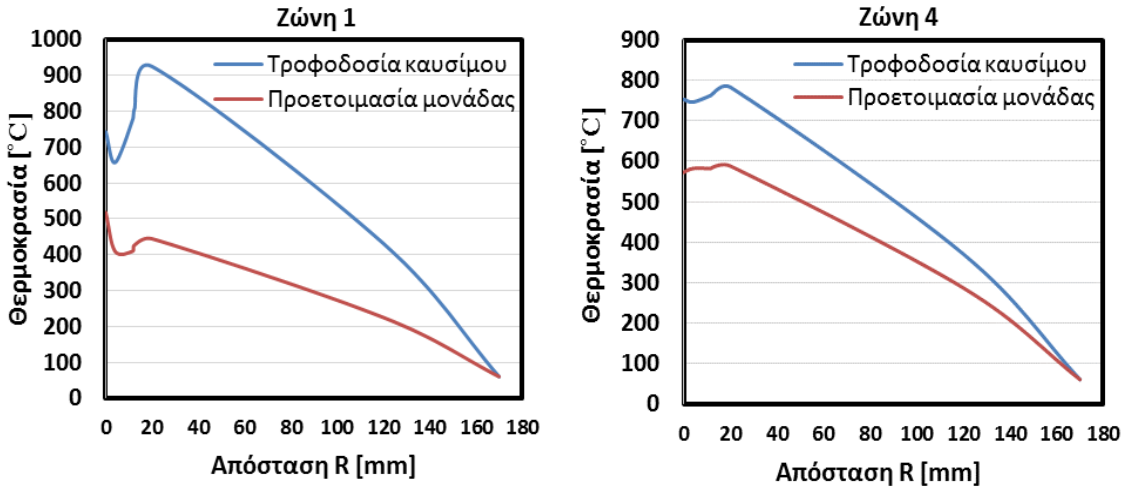
Σε αντίθεση με την περίπτωση του διαστήματος προθέρμανσης, κατά το οποίο δεν υπάρχει σαφής αιτιολόγηση που να προκύπτει από τη διεργασία για την ανεπιθύμητη διαφορά θερμοκρασίας στην τρίτη ζώνη, στην περίπτωση του διαστήματος τροφοδοσίας υπάρχει η δυνατότητα δύο εύλογων υποθέσεων:

- Σημαντικές είναι οι πιθανότητες το ύψος της κλίνης να φτάνει σε τέτοια επίπεδα, ώστε η αυξημένη ένδειξη του θερμοστοιχείου να προκύπτει και πάλι από το μείγμα σωματιδίων καυσίμου – αδρανούς υλικού. Η υπόθεση αυτή μπορεί να ελεγχθεί μέσω της εκτίμησης του κλάσματος κενού ε στην περιοχή της τρίτης ζώνης. Η πολύ μικρή τιμή του κλάσματος κενού ($\varepsilon = 0.01$) εν τέλει δεν επιτρέπει αυτή την υπόθεση για την ερμηνεία του φαινομένου.
- Το ύψος της εν λόγω περιοχής ενδείκνυται για συντέλεση πλήθους εξώθερμων αντιδράσεων απαντώμενων κατά την αεριοποίηση (οξείδωση του μονοξειδίου του άνθρακα, μεθανοποίηση, αντίδραση μετατόπισης). [24] Μέσω αυτού θα μπορούσε

να δοθεί μια εξήγηση για την ιδιαίτερα αυξημένη θερμοκρασία εντός του αεριοποιήτη.

Τέλος, ως προς την τελευταία καθ' ύψος ζώνη αντιστάσεων, η συμπεριφορά της θερμοκρασίας αιτιολογείται αποκλειστικά μέσω της συντέλεσης εξώθερμων αντιδράσεων στο εσωτερικό του αγωγού. Τα ποσά ενέργειας που εκλύονται μέσω των αντιδράσεων αεριοποίησης και παραγωγής αερίου σύνθεσης δύνανται να προκαλέσουν την καταμετρούμενη διαφορά θερμοκρασίας, οπότε και το αποτέλεσμα δε θεωρείται πέραν των προσδοκώμενων.

Ακολουθούν τα διαγράμματα των θερμοκρασιακών μεταβολών κατά μήκος των διαφορετικών υλικών στις ζώνες 1 και 4, όπου εμφανίζονται οι πιο έντονες διακυμάνσεις.

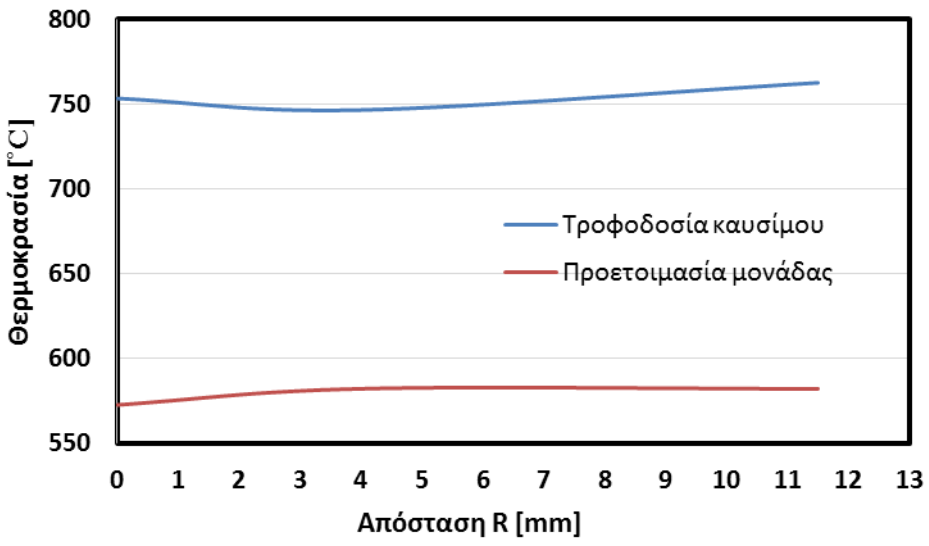


Διάγραμμα 33. *Θερμοκρασιακές μεταβολές των Ζωνών 1 και 4.*

Στο διάγραμμα που αφορά τη ζώνη 1 είναι εμφανής η διαφορά θερμοκρασίας από το εσωτερικό του ανοδικού αγωγού, ως το εξωτερικό του και την πρώτη στρώση κεραμικής μόνωσης της ηλεκτρικής αντίστασης κατά την προετοιμασία της μονάδας. Ακόμα πιο έντονη γίνεται η εν λόγω παρατήρηση κατά την τροφοδοσία του καυσίμου.

Εν αντιθέσει με τη ζώνη 1, στη ζώνη 4 κατά την προετοιμασία της εγκατάστασης οι θερμοκρασίες από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του ανοδικού αγωγού και την περιοχή των αντιστάσεων παρουσιάζουν αυξητική τάση. Η εικόνα αυτή ανατρέπεται κατ την τροφοδοσία του καυσίμου, για λόγους που αναλύθηκαν παραπάνω.

Προκειμένου να γίνει πιο ευδιάκριτο το φαινόμενο στην τέταρτη ζώνη αντιστάσεων, ακολουθεί το διάγραμμα των θερμοκρασιών συναρτήσει της ακτινικής απόστασης από το εσωτερικό του αγωγού ως και την πρώτη στρώση της κεραμικής μόνωσης των αντιστάσεων. Είναι εμφανής η κοιλότητα της καμπύλης κατά την προετοιμασία της μονάδας, γεγονός που δείχνει την αυξητική τάση της θερμοκρασίας. Αντίστοιχα, μπορεί εύκολα να διακριθεί η κυρτότητα της καμπύλης κατά την τροφοδοσία του καυσίμου, λόγω της ελάττωσης της θερμοκρασίας από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του αγωγού.



Διάγραμμα 34. *Θερμοκρασιακές μεταβολές της ζώνης 4 μεταξύ εσωτερικού της σωλήνωσης και πρώτης στρώσης κεραμικής μόνωσης αντιστάσεων.*

4 Προετοιμασία καυσίμου

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι αναλύσεις που πραγματοποιούνται σε όλες τις κατηγορίες καυσίμων, και εν προκειμένω στην περίπτωση των υπολειμματικών καυσίμων από απορρίμματα (RDF) στις εγκαταστάσεις ανάκτησης υλικών της W.A.T.T. A.E., Κέντρο Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών ΚΔΑΥ, το οποίο βρίσκεται στην Κρωπία Αττικής.

Το εν λόγω εργοστάσιο έχει δυνατότητα επεξεργασίας $20\,\tau\acute{o}\nu\omega\nu/\acute{\omega}\rho\alpha$, εκ των οποίων η πλειονότητα αποτελείται από στερεά απόβλητα συσκευασίας και εμπορικών – βιομηχανικών αποβλήτων. Στις προαναφερθείσες εγκαταστάσεις γίνεται ανάκτηση υλικών, όπως χαρτί, πλαστικό, χαρτόνι, γυαλί, ενώ ταυτόχρονα παράγεται RDF, με μέσο ρυθμό παραγωγής περί τους $4\,\tau\acute{o}\nu o\upsilon\varsigma/\acute{\omega}\rho\alpha$.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή της παρούσας εργασίας, προκειμένου να επιτευχθεί υψηλού επιπέδου ανάκτηση υλικών, κρίνεται σκόπιμο να χρησιμοποιούνται σύγχρονες τεχνολογίες, όπως οπτικοί, μαγνητικοί και βαλλιστικοί διαχωριστές, τεχνολογίες που διατίθενται και στις εγκαταστάσεις της W.A.T.T. A.E.. Συγκεκριμένα, η ανάκτηση των ανακυκλώσιμων υλικών γίνεται με έξι (6) οπτικούς διαχωριστές, ενώ γίνεται και έλεγχος της ποιότητας μέσω ανθρωπίνου δυναμικού.

4.1 Διαδικασίες ανάλυσης καυσίμου

Προκειμένου να γνωρίζουμε τα απαραίτητα για το καύσιμο που τελικά θα εισαγάγουμε στον αντιδραστήρα, επιβάλλεται να πραγματοποιηθούν συγκεκριμένες αναλύσεις της ποιότητας, των επιμέρους συστατικών και προσμίξεών του, σύμφωνα με αντίστοιχα πρότυπα, όπως αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω.

4.1.1 Στοιχειακή ανάλυση καυσίμου (Ultimate Analysis)

Μια εκ των πρώτων αναλύσεων που πραγματοποιούνται σε ένα δείγμα καυσίμου είναι η στοιχειακή ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα, το δείγμα καυσίμου υποβάλλεται σε ανάλυση, ώστε να προσδιοριστεί το ποσοστό του άνθρακα (C), του υδρογόνου (H), του αζώτου (N) και του οξυγόνου (O) και μέσω αυτών να γίνουν οι πρώτες υποθέσεις για τη συμπεριφορά του καυσίμου, τις αντιδράσεις που θα λάβουν χώρα κατά τη διεργασία και ως εκ τούτου το είδος και την ποσότητα των εκπεμπόμενων αερίων.

Μιλώντας για τον ***άνθρακα (C)***, αποτελεί την πλειονότητα της επί τοις % σύστασης του RDF (όπως και όλων των βιομαζικών καυσίμων). Είναι το στοιχείο το οποίο κατ' εξοχήν συνεισφέρει στην αύξηση της θερμογόνου ικανότητας του καυσίμου και μετατρέπεται σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO) ή διοξείδιο (CO_2) όταν υποβληθεί στις συνήθεις θερμοχημικές διεργασίες της πυρόλυσης, της καύσης και της αεριοποίησης.

Ως προς το ποσοστό του ***υδρογόνου (H)***, είναι και αυτό από τα κύρια μετρούμενα συστατικά του καυσίμου, γνωρίζοντας την υψηλή περιεκτικότητά του κυρίως στα πολυμερή. Το ποσοστό του μετρούμενου υδρογόνου στο καύσιμο επηρεάζει επίσης τον υπολογισμό της κατωτέρου θερμογόνου ικανότητας από την πειραματικά μετρούμενη ανώτερη θερμογόνο ικανότητα. Το υδρογόνο κατά τη διεργασία μετατρέπεται σε H_2O, ή ακόμα συμμετέχει στην αντίδραση «water – gas shift» ($CO + H_2O \Leftrightarrow CO_2 + H_2$).

Το ***άζωτο (N)*** αποτελεί αξιοσέβαστο ποσοστό του καυσίμου, φτάνοντας πολλές φορές σε αρκετές ποσοστιαίες μονάδες, γεγονός που συνεισφέρει σημαντικά στην ευκολία βιοαποικοδόμησης σε βιοχημικές διεργασίες. Στην περίπτωσή μας, όμως, το υψηλό ποσοστό του καυσίμου σε άζωτο, σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται εντός της κλίνης, οδηγούν σε υψηλή παραγωγή NO_x, γεγονός που απαιτεί ειδική

μεταχείρηση του προκύπτοντος αερίου. Σημειώνεται ότι η συνεισφορά του αζώτου στη θερμογόνο ικανότητα είναι μηδενική.

Το ***οξυγόνο (O)*** είναι ένα από τα κύρια στοιχεία σε κάθε βιομαζικό καύσιμο. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του οξυγόνου στο καύσιμο, τόσο μειώνεται ο απαιτούμενος για την εκάστοτε διεργασία αέρας. Το οξυγόνο βρίσκεται στα προϊόντα της διεργασίας δεσμευμένο στα μόρια του CO_2 και του H_2O. Σημειώνεται ότι η σύσταση του καυσίμου σε οξυγόνο εκτιμάται με την αφαίρεση από το 100% όλων των άλλων συστάσεων και της περιεκτικότητας σε τέφρα του ξηρού καυσίμου.

Ταυτόχρονα, υπολογίζεται το ποσοστό του θείου (S), του χλωρίου (Cl) και του φθορίου (F). Η βαρύτητα αυτών των πληροφοριών έγκειται κυρίως στην πρόληψη και την αντιμετώπιση των όποιων δυσμενών φαινομένων προκαλούνται λόγω των παραπάνω.

Συγκεκριμένα, το ***θείο (S)*** περιλαμβάνεται στην πλειονότητα των οργανικών δομών και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει σε αρκετά υψηλά επίπεδα. Ενώ στο ξύλο τα επίπεδα του θείου κυμαίνονται περί του 0%, σε κλάσματα αποβλήτων έχουν παρατηρηθεί τιμές ως και 1%. Κατά τις θερμοχημικές διεργασίες, το θείο οξειδώνεται, έχοντας μια πολύ μικρή συνεισφορά στην τελική θερμογόνο ικανότητα. Ωστόσο, στη βέλτιστη των περιπτώσεων επιζητάμε καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, λόγω των οξειδίων του θείου (SO_x), τα οποία με το σχηματισμό τους προκαλούν διάβρωση των επιφανειών της εγκατάστασης, ενώ αποτελούν ιδιαίτερα επιβλαβείς εκπομπές, λαμβάνοντας υπόψιν τον περιβαλλοντικό παράγοντα.

Το ***χλώριο (Cl)*** είναι το στοιχείο που επί της ουσίας διαφοροποιεί την φυτική από την απορριπτόμενη βιομάζα. Στα κλάσματα αποβλήτων, με τα οποία ασχολείται η παρούσα εργασία, το ποσοστό χλωρίου εξαρτάται από το ποσοστό πλαστικού (PVC) που εμπεριέχεται στο οργανικό κλάσμα. Κατά τη διεργασία, το χλώριο μετατρέπεται πλήρως σε αέρια φάση και σχηματίζει υδροχλώριο (HCl) και χλωριούχα αλκάλια. Τα προβλήματα που σχετίζονται με το χλώριο αφορούν κυρίως θέματα εκπομπής διοξινών, ο σχηματισμός και η αντιμετώπιση των οποίων αναλύεται σε προγενέστερο κεφάλαιο. [σελ. 49] Επιπλέον, το χλώριο είναι υπεύθυνο για ποικίλα προβλήματα λειτουργίας και διάβρωσης, χωρίς όμως η μεμονωμένη παρουσία του χωρίς την ύπαρξη αλκαλίων στο καύσιμο να θεωρείται επιβλαβής.

4.1.2 Άμεση ανάλυση καυσίμου (Proximate Analysis)

Μέσω της προσεγγιστικής ανάλυσης του καυσίμου υπολογίζονται τα ποσοστά τέφρας, υγρασίας και πτητικών ουσιών που εμπεριέχονται στο υπό επεξεργασία καύσιμο. Όπως αναλύεται παρακάτω, ο προσδιορισμός των μεγεθών αυτών κρίνεται σημαντικός, κυρίως λόγω των προβλημάτων που μπορούν να προκαλέσουν την εκάστοτε εγκατάσταση.

4.1.2.1 Τέφρα

Το ποσοστό της τέφρας στην επί τοις % σύσταση του καυσίμου υπολογίζεται μέσω της προσεγγιστικής ανάλυσης του καυσίμου. Ο λόγος που θεωρείται αναγκαίος ο προσδιορισμός των ποσών της τέφρας στο υπό επεξεργασία καύσιμο είναι κυρίως οι επιζήμιες συμπεριφορές που θα μπορούσε να έχει αυτή στον αντιδραστήρα και οι αναγκαίες διατάξεις που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τον καθαρισμό του αερίου με σκοπό την αποφυγή τους. Η τέφρα είναι το συστατικό του καυσίμου που θεωρείται υπεύθυνο για το σχηματισμό επικαθήσεων, ιδιαιτέρως στην πλευρά που έρχεται σε άμεση επαφή με το παραγόμενο αέριο. Οι εν λόγω επικαθίσεις οδηγούν τις θερμοκρασίες εξόδου του αερίου σε πολύ υψηλότερα επίπεδα από τα υπολογιζόμενα. Αυτό συμβαίνει λόγω της μείωσης της μετάδοσης θερμότητας μεταξύ του αερίου και του περιβάλλοντα χώρου γύρω από τη

σωλήνωση, μέσω της οποίας το τελευταίο οδηγείται εκτός του αντιδραστήρα. Με την πάροδο του χρόνου η κατάσταση γίνεται δυσμενέστερη, καθώς η επικαθήμενη τέφρα τείνει να συσσωρεύεται και να φράσσει μερικώς τους αγωγούς διέλευσης του αερίου. Γενικότερα, οι επικαθίσεις μειώνουν το βαθμό απόδοσης της κατά περίπτωση εγκατάστασης και να αυξάνουν τα λειτουργικά κόστη και τα κόστη συντήρησης της μονάδας. Οι δημιουργούμενες επικαθίσεις από τέφρα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, υπό τους αγγλικούς όρους «slagging» και «fouling». Η διάκριση μεταξύ τους γίνεται κυρίως λόγω των διαφορετικών περιοχών στις οποίες σχηματίζονται, καθώς για slagging μιλάμε στις πολύ θερμές περιοχές της εγκατάστασης, ενώ για fouling στις περιοχές που λαμβάνει χώρα συναλλαγή θερμότητας, όπως οι εναλλάκτες.

4.1.2.2 Υγρασία

Η υγρασία είναι ένα ακόμα χαρακτηριστικό του καυσίμου που προσδιορίζεται μέσω της προσεγγιστικής ανάλυσης. Ο προσδιορισμός της υγρασίας θεωρείται υψίστης σημασίας, καθώς μπορεί να προκαλέσει επισκωριάσεις και – πιο μακροχρόνια – μεγάλη φθορά σε καίρια μέρη της εγκατάστασης. Οι επικείμενες λόγω υγρασίας φθορές εμφανίζονται κυρίως σε περιοχές της εγκατάστασης που δεν επιδέχονται θέρμανση, όπως το δοχείο αποθήκευσης του καυσίμου ή οι ατέρμονες κοχλίες που συμβάλλουν στην τροφοδοσία του καυσίμου στον αντιδραστήρα. Καύσιμα με υψηλά ποσοστά υγρασίας αυξάνουν τα λειτουργικά κόστη και τα κόστη συντήρησης μιας εγκατάστασης. Επίσης, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της υγρασίας στο καύσιμο, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση στη θερμική ισχύ που προσδίδουν. Ένα άλλο μείζον πρόβλημα που προκύπτει κατά την αποθήκευση καυσίμου με υψηλά ποσοστά υγρασίας είναι η αναερόβια χώνευση που πραγματοποιείται εντός του δοχείου προσωρινής αποθήκευσης του καυσίμου, κατάσταση που μπορεί να επιδεινωθεί με την πάροδο μεγάλου χρονικού διαστήματος.

4.1.2.3 Πτητικά

Στην κατηγορία των πτητικών οργανικών χημικών ενώσεων εντάσσονται όλες οι ενώσεις άνθρακα που συμμετέχουν σε ατμοσφαιρικές φωτοχημικές αντιδράσεις, με εξαίρεση το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα, το ανθρακικό οξύ, τα μεταλλικά καρβίδια και τα ανθρακικά άλατα. [7] Τα περισσότερα είδη βιομάζας εμφανίζουν υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά. Στα βιομαζικά απόβλητα, ανάλογα με το κλάσμα, η περιεκτικότητα σε πτητικά μπορεί να φτάσει μέχρι και το 90% daf[27].

4.1.3 Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα καυσίμου (LHV)

Γενικά, η θερμογόνος ικανότητα είναι το μέτρο της ικανότητας παραγωγής θερμικής ενέργειας από το εκάστοτε καύσιμο κατά τη χρήση του στην επιθυμητή διεργασία. Είναι η θερμική ενέργεια που εκλύεται κατά την θερμοχημική διεργασία ενός κιλού στερεού ή υγρού καυσίμου ή ενός κυβικού μέτρου αερίου καυσίμου, ευρισκόμενο σε κανονικές συνθήκες. Η διαφοροποίηση της ανωτέρας από την κατώτερη θερμογόνο ικανότητα έγκειται στην ύπαρξη νερού σε αέρια κατάσταση (υδρατμοί) στα προϊόντα της διεργασίας. Αυτό αιτιολογείται μέσω της απορρόφησης ενέργειας από το νερό, που κατά συνέπεια μειώνει τη συνολική θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου. [81] Η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα αποτελεί το σημαντικότερο ***οικονομικό δείκτη*** κατά τον χαρακτηρισμό ενός καυσίμου, καθώς

[27] Χωρίς υγρασία και τέφρα.

προσδιορίζει τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την απευθείας αξιοποίηση ή την πώληση της θερμικής ενέργειας που απορρέει από την επεξεργασία του.

4.2 Ανάλυση δείγματος χαρτιού & πλαστικού

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε ανάλυση δειγμάτων χαρτιού και πλαστικού, μετά τη διαλογή τους στο Κέντρο Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών Κρωπίας. Σκοπός αυτής της ανάλυσης ήταν ο σχηματισμός πρότυπων μιγμάτων, τα οποία τελικά θα τροφοδοτηθούν στη μονάδα αεριοποίησης.

Η συγκέντρωση των δειγμάτων προς επεξεργασία και ανάλυση πραγματοποιήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια τριών συνεχών ημερών παραγωγής, από όλες τις γραμμές παραγωγής του εργοστασίου. Συγκεντρώθηκαν περίπου 200 κιλά από το κάθε υλικό. Στη συνέχεια, η συνολική μάζα των δειγμάτων τεμαχίστηκε στον διατιθέμενο τεμαχιστή των εγκαταστάσεων του εργοστασίου. Τέλος, προκειμένου να ληφθούν τα προς ανάλυση δείγματα χαρτιού και πλαστικού, και επιδιώκοντας να είναι επαρκώς αντιπροσωπευτικά, λήφθηκαν επιμέρους δείγματα από τυχαία σημεία των αποθηκευτικών σάκων, τα οποία τελικά απάρτιζαν το τελικό δείγμα.

4.2.1 Δείγμα χαρτιού

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το χαρτί είναι το συστατικό εκείνο που αυξάνει το βιογενές κλάσμα ενός καυσίμου. Το υπόλειμμα τέφρας, όμως, που αφήνει πίσω του δεν καθιστά ενδεικτική λύση την ποσοστιαία αύξησή του στα πρότυπα μίγματα χαρτιού – πλαστικού. Στο προς ανάλυση δείγμα πραγματοποιήθηκε στοιχειακή και άμεση ανάλυση και προσδιορισμός της θερμογόνου δύναμης και τα αποτελέσματα αυτών παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 50. *Αποτελέσματα αναλύσεων δείγματος χαρτιού.*

Ανάλυση Δείγματος Χαρτιού	
Στοιχειακή Ανάλυση	**wt.% d.b.**
C	39.91
H	5.85
N	0.11
O	52.87
S	0.02
Cl	1.24
Υγρασία	**wt.%, a.r.**
	6.04
Προσεγγιστική Ανάλυση	**wt.%, d.b.**
Τέφρα	15.0241
Πτητικά	83.64
Σταθερός άνθρακας	1.3359
Θερμογόνος Ικανότητα	**[kJ/kg] d.b.**
Ανώτερη	14243.577
Κατώτερη	12977.154

4.2.2 Δείγμα πλαστικού

Το πλαστικό είναι το συστατικό των υπολειμματικών καυσίμων από απορρίμματα που θεωρείται αρμόδιο για την κατακόρυφη αύξηση της κατωτέρας θερμογόνου ικανότητας. Συνάμα, εμφανίζει πολύ μικρότερα ποσοστά τέφρας συγκριτικά με το χαρτί, στο οποίο

γίνεται αναφορά ακριβώς παραπάνω. Λόγω της αποφυγής ένταξης PVC στα πρότυπα δείγματα, δεν αναμένονται υψηλά ποσοστά χλωρίου στη σύστασή του. Σε αυτά τα χαρακτηριστικά επικεντρώνεται και η ανάλυση του δείγματος πλαστικού που θα χρησιμοποιηθεί στις πειραματικές δοκιμές αεριοποίησης και παρουσιάζεται παρακάτω:

Πίνακας 51. *Αποτελέσματα αναλύσεων δείγματος πλαστικού.*

Ανάλυση Δείγματος Πλαστικό	
Στοιχειακή Ανάλυση	**wt.% d.b.**
C	75.7
H	13.54
N	0.34
O	9.875
S	0.03
Cl	0.515
Υγρασία	**wt.%, a.r.**
	4.44
Προσεγγιστική Ανάλυση	**wt.%, d.b.**
Τέφρα	7.3028
Πτητικά	91.63
Σταθερός άνθρακας	1.0672
Θερμογόνος Ικανότητα	**[kJ/kg] d.b.**
Ανώτερη	36790.271
Κατώτερη	33852.581

Συγκρίνοντας τις παραπάνω αναλύσεις, εξάγεται το συμπέρασμα ότι όλα τα χαρακτηριστικά του πλαστικού, πλην του ποσοστού του σε οξυγόνο, το καθιστούν ανώτερο καύσιμο συγκριτικά με το χαρτί. Η θερμογόνος ικανότητά του, που αγγίζει υπερδιπλάσια ποσοστά από αυτήν του χαρτιού, καθώς και τα μειωμένα ποσοστά του σε υγρασία και τέφρα, δείχνουν ότι υπερτερεί στην πλειονότητα των συνιστωσών της διεργασίας. Ο μόνος παράγοντας, στον οποίο το δείγμα χαρτιού είναι ανώτερο του αντίστοιχου δείγματος πλαστικού, είναι το αυξημένο ποσοστό του οξυγόνου, απαιτώντας έτσι μικρότερη ποσότητα παρεχόμενου αέρα κατά τη διεργασία.

5 Συμπεράσματα

Το προς μελέτη θέμα της διπλωματικής αυτής εργασίας ήταν η ***κατασκευή και η λειτουργία πιλοτικής μονάδας ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία για την αεριοποίηση υπολειμματικού καυσίμου από απορρίμματα (RDF)***. Ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας κατασκευάστηκε από τη ***WATT A.E.*** και εδράζεται ***στο Κέντρο Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών (ΚΔΑΥ) Κρωπίας***.

Πριν από οποιαδήποτε πειραματική δοκιμή, διεξήχθη εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση προς κατανόηση των κύριων και πιο συχνών ανεπιθύμητων φαινομένων που ενδέχεται να προκύψουν κατά τη διεργασία. Η βιβλιογραφική αυτή έρευνα επικεντρώθηκε στα επίπεδα των πισσών (tars), καθώς και στο σχηματισμό διοξινών και φουρανίων (PCDD/F) στο παραγόμενο αέριο σύνθεσης και, τέλος, στο σχηματισμό συσσωματωμάτων (agglomerates) εντός της κλίνης, που δύνανται να προκαλέσουν βίαιη απώλεια της ρευστοποίησης (defluidization).

Ως προς τα επίπεδα ***συγκεντρώσεων των πισσών***, πολλές πειραματικές μελέτες επικεντρώνονται στην επίδραση των πειραματικών συνθηκών στη μείωση, ή ακόμα και την εξάλειψή τους. Τα αυξημένα επίπεδα θερμοκρασιών κατά τη διεργασία, ανεξάρτητα από το καύσιμο που τίθεται υπό επεξεργασία, οδηγούν τις πίσσες σε περεταίρω αντιδράσεις αφυδάτωσης, μετατρέποντας μέρος τους σε κάρβουνο και μειώνοντας έτσι την τελική συγκέντρωσή τους. Ένας επιπλέον τρόπος περιορισμού τους είναι η χρήση οφίτη στη θέση του αδρανούς υλικού, που δείχνει να έχει μεγαλύτερη επιρροή από τη θερμοκρασία στις συγκεντρώσεις, ανεξαρτήτως των επιπέδων της τελευταίας. Το γεγονός ότι το είδος του αδρανούς υλικού μπορεί να συμβάλλει στην επίλυση του παραπάνω προβλήματος, χωρίς την ανάγκη της υπέρμετρης αύξησης της θερμοκρασίας κρίνεται ιδιαιτέρως θετικό, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες είναι υπεύθυνες για άλλα συχνά εμφανιζόμενα προβλήματα, όπως η ***βίαιη απώλεια ρευστοποίησης***.

Μέσω της υψηλής επικρατούσας θερμοκρασίας, υποβοηθάται ο μηχανισμός αντίδρασης των αλκαλικών ενώσεων της τέφρας του καυσίμου με το πυρίτιο του αδρανούς υλικού, σχηματίζοντας ευτηκτικές ενώσεις. Στα σημεία επικαθίσεων των εν λόγω ενώσεων εμφανίζονται ιδιαιτέρως υψηλές θερμοκρασίες (hot spots), που με τη σειρά τους ευνοούν τη δημιουργία συσσωματωμάτων μεταξύ των σωματιδίων του καυσίμου και του αδρανούς υλικού και οδηγούν τελικά σε απορρευστοποίηση. Εξίσου επιβλαβής για την ομαλή λειτουργία της κλίνης είναι η υψηλή συγκέντρωση νατρίου στην τέφρα του καυσίμου, με αποτέλεσμα να προκαλείται σε αρκετά σύντομο χρονικό διάστημα απώλεια ρευστοποίησης συγκριτικά με άλλα αλκάλια και αλκαλικές ενώσεις, τα οποία υφίστανται ως ανόργανα στην τέφρα. Αντιθέτως, θετικά επιδρά η λεπτή κοκκομετρία του πληρωτικού μέσου στη μείωση των πιθανοτήτων πρόκλησης βίαιης απώλειας ρευστοποίησης. Η επίδραση της διαμέτρου των σωματιδίων του αδρανούς υλικού είναι άκρως σημαντικότερη από την επιφανειακή ταχύτητα του μέσου ρευστοποίησης για την αποφυγή της απορρευστοποίησης.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν περιορισμένες αναφορές σχετικά με τα επίπεδα ***σχηματισμού διοξινών και φουρανίων*** κατά τη θερμοχημική διεργασία της αεριοποίησης των αστικών απορριμμάτων. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν αναφέρονται σε δοκιμές καύσης και αποτέφρωσης, δίνοντας μια γενική αίσθηση της συμπεριφοράς των εν λόγω ενώσεων κατά την υποβολή των συγκεκριμένων καυσίμων σε θερμοχημικές διεργασίες. Πειραματικά αποδεικνύεται ότι η ποιότητα του καυσίμου έχει μεγαλύτερη επίδραση στις τελικές εκπομπές από την επικρατούσα θερμοκρασία στο θάλαμο καύσης και τον χρόνο παραμονής. Συνίσταται, επίσης, να αποφεύγεται η παροχή οξυγόνου πάνω από τα επιθυμητά επίπεδα, καθώς μέσω αυτού αυξάνεται ραγδαία ο ρυθμός σχηματισμού. Στις

περιπτώσεις, όμως, που δεν υπάρχει η ευχέρεια επιλογής καυσίμου φτωχού σε χλώριο, ή ακόμα περιορισμού του παρεχόμενου οξυγόνου, η προσθήκη ουρίας στο μείγμα καυσίμου – αδρανούς υλικού αναστέλλει επαρκώς το σχηματισμό των διοξινών και των φουρανίων. Τέλος, ενδείκνυται η ακαριαία ψύξη του αερίου στο τμήμα καθαρισμού του, προς παράκαμψη της περιοχής επανασχηματισμού τους.

Μετά την περαίωση της ανωτέρω βιβλιογραφικής ανασκόπησης και πριν τη διεξαγωγή των δοκιμών, πραγματοποιήθηκαν ***βελτιωτικές εργασίες*** στην ήδη υπάρχουσα κατασκευή. Οι εργασίες στο τμήμα τροφοδοσίας και την κύρια διάταξη του αεριοποιητή ήταν εστιασμένες στην εύκολη τροφοδοσία του καυσίμου και του αδρανούς υλικού. Αυτό επετεύχθη προσθέτοντας βάνες χειρός στην κορυφή του σιλό τροφοδοσίας και στην κορυφή του ανοδικού αγωγού, αντίστοιχα, επιτυγχάνοντας έτσι εξοικονόμηση χρόνου και κόπου, ταυτόχρονα με βελτιστοποίηση της στεγανοποίησης. Στο τμήμα καθαρισμού, για τους ίδιους λόγους, προστέθηκε αποσπώμενη διάταξη συλλογής των προσμίξεων του αερίου. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε η τοποθέτηση των μαστών, στους οποίους αμέσως μετά εισήχθησαν τα μετρητικά στοιχεία πίεσης και θερμοκρασίας. Σε αυτή τη φάση πραγματοποιήθηκε σειρά δοκιμών διαρροής, ώστε να διασφαλιστεί η πλήρης στεγανότητα της εγκατάστασης. Με την ολοκλήρωσή τους έγινε η εγκατάσταση των ηλεκτρικών αντιστάσεων και διενεργήθηκε δοκιμή προκαταρτικής θέρμανσης, υπολογίζοντας τις συνολικές επιμηκύνσεις των σωληνώσεων, ώστε τελικά να προστεθούν οι κατάλληλες διατάξεις απορρόφησής τους. Τέλος, η διάταξη καλύφθηκε με κατάλληλες στρώσεις μονωτικών υλικών και διεξήχθησαν προκαταρτικές δοκιμές.

Η πρώτη από τις διενεργηθείσες δοκιμές αφορούσε τη ρευστοποίηση με ανακυκλοφορία αδρανούς υλικού και η δεύτερη την αεριοποίηση πελλετοποιημένου ξύλου σε αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη. Ένα από τα πρώτα συμπεράσματα που εξάγεται από τις δυο προαναφερθείσες δοκιμές είναι η ανάγκη κοσκινίσματος του χρησιμοποιούμενου αδρανούς υλικού. Παρόλο που οι κυκλώνες της εγκατάστασης είναι σχεδιασμένοι για την κατακράτηση και των λεπτόκοκκων υλικών, στην πραγματικότητα αυτό δεν είναι τόσο εύκολο να επιτευχθεί. Η χρήση ακοσκίνιστου αδρανούς υλικού εγκυμονεί τον κίνδυνο διαφυγής μη αμελητέας ποσότητάς του εκτός του αντιδραστήρα, η οποία σε συνδυασμό με το αερόλυμα των πισσών και άλλων προσμίξεων του αερίου σύνθεσης, μπορεί να οδηγήσει σε επικαθήσεις και φραγή των σωληνώσεων. Το φαινόμενο διαφυγής του αδρανούς υλικού παρατηρήθηκε κατά τη δοκιμή ρευστοποίησης με ανακυκλοφορία ολιβίνη. Έπειτα από την παρατήρηση αυτή, αποφασίστηκε να γίνεται χρήση αδρανούς υλικού σωματιδιακής διαμέτρου $100\ \mu m \leq d_p \leq 500\ \mu m$, δηλαδή μείγματος με ελάχιστη διάμετρο σωματιδίων μεγαλύτερη από την ικανότητα κατακράτησης των κυκλώνων.

Κατά τη ***δοκιμή ρευστοποίησης με ανακυκλοφορία μόνο με αδρανές υλικό***, παρατηρήθηκε ότι οι ενδείξεις των μετρητών πίεσης στην περιοχή της βάσης του ανοδικού αγωγού δεν ήταν οι αναμενόμενες από τη θεωρία, αλλά αισθητά χαμηλότερες. Το φαινόμενο αυτό αποδόθηκε στην είσοδο ποσότητας αδρανούς υλικού στον αγωγό του κοχλία εκφόρτισης. Προκειμένου λοιπόν να μην παρακωλύεται η διαδικασία τροφοδοσίας καυσίμου στη μονάδα και να πραγματοποιείται πλήρης εκμετάλλευση του αδρανούς υλικού εντός της κλίνης, κρίθηκε απαραίτητη η παροχή μικρής ποσότητας αέρα στον αγωγό του κοχλία εκφόρτισης. Μετέπειτα, και μέσω της ανάλυσης των καταγεγραμμένων από το σύστημα τιμών θερμοκρασίας και πίεσης, επιβεβαιώθηκε το φαινόμενο της ανακυκλοφορίας, ως ήταν επιθυμητό.

Μια σημαντική παρατήρηση κατά την ***αεριοποίηση πελλετοποιημένου ξύλου*** ήταν η μετάβαση της κλίνης από αναβράζουσα σε ταραχώδη αναβράζουσα, υπό την ίδια ποσότητα παρεχόμενου αέρα. Το φαινόμενο αυτό γίνεται σαφές μέσω των εντονότερων διακυμάνσεων

των ενδείξεων των μετρητών πίεσης, αλλά και από τις στιγμιαίες έντονες αυξήσεις της θερμοκρασίας που καταγράφηκαν από το θερμοστοιχείο του καθοδικού αγωγού. Τα παραπάνω αποδίδονται στη συσσώρευση υλικού στα χαμηλά επίπεδα της κλίνης, ταυτόχρονα με την αύξηση της παροχής μείγματος αέρα και αερίων παραγόμενων από την αεριοποίηση.

Έπειτα, καταστρώθηκε το ***ισοζύγιο μάζας και ενέργειας***, κάνοντας χρήση σύστασης εισαγόμενου καυσίμου και προκύπτοντος αερίου σύνθεσης από τη βιβλιογραφία, συμπεριλαμβάνοντας επίσης βιβλιογραφικές παραδοχές, όπου αυτό κρίθηκε απαραίτητο. Τα τελικά αποτελέσματα ποσοστού μετατροπής άνθρακα (Carbon Conversion Efficiency) και ψυχρού βαθμού απόδοσης (Cold Gas Efficiency) αξιολογήθηκαν και επιβεβαιώθηκαν μέσω αντίστοιχων δημοσιεύσεων.

Βάσει των άνωθεν πειραματικών αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε ***αξιολόγηση των ενεργειακών καταναλώσεων και των απωλειών*** κατά την εκκίνηση της μονάδας, σε διαφορετικές συνθήκες παροχής αέρα και λειτουργίας των ηλεκτρικών αντιστάσεων. Μέσω αυτής, συμπεραίνεται ότι οι ενεργειακές απώλειες δεν εξαρτώνται από την παροχή του μέσου αεριοποίησης, αλλά εξ' ολοκλήρου από τα προσδιδόμενα ποσά ενέργειας, η μείωση των οποίων επιφέρει επίσης μεγάλη μείωση των ωφέλιμων ενεργειακών ποσοτήτων.

Ως συνέχεια της παραπάνω αξιολόγησης, πραγματοποιήθηκε ***ανάλυση της ορθής λειτουργίας των ηλεκτρικών αντιστάσεων***, κατά τη διάρκεια της εκκίνησης της εγκατάστασης για την αεριοποίηση του πελλετοποιημένου ξύλου, αλλά και κατά την τροφοδοσία του. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω αυτής δεν ήταν τα επιθυμητά, καθώς οι ηλεκτρικές αντιστάσεις δείχνουν να απάγουν θερμότητα από την κλίνη και όχι να εκλύουν προς αυτήν σε μεγάλα χρονικά διαστήματα, ακόμα και κατά την εκκίνηση της μονάδας. Τελικά, προς αποφυγήν των παραπάνω, ενδείκνυται η λειτουργία των ηλεκτρικών αντιστάσεων σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος, προς βέλτιστη αξιοποίηση της τελευταίας και συντομότερου χρονικού διαστήματος προθέρμανσης.

6 Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες

Προτείνεται η ενασχόληση με σειρά πειραματικών δοκιμών αεριοποίησης RDF διαφορετικής σύστασης και μορφής (πελλετοποιημένο ή τεμαχισμένο) στην πιλοτική μονάδα της WATT Α.Ε. και η περεταίρω βελτιστοποίηση της μονάδας σύμφωνα με τα προβλήματα που ίσως προκύψουν.

Παρόλο που η εγκατάσταση της γραμμής δειγματοληψίας πραγματοποιήθηκε, όπως περιγράφεται σε αντίστοιχο κεφάλαιο, η αδυναμία διεξαγωγής πειραματικών δοκιμών αεριοποίησης RDF δεν επέτρεψε την ανάλυση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης. Άρα, ένα άλλο ζήτημα που δεν αποτέλεσε αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας, αλλά θα μπορούσε κάλλιστα να συνδυαστεί με τις δοκιμές αεριοποίησης βιομάζας, είναι η ανάλυση του προκύπτοντος αερίου σύνθεσης μέσω χρωματογραφίας αερίων, εν προκειμένω μέσω χρήσης του διατιθέμενου Micro-GC CP 4900.

Τέλος, προτείνεται, η αξιοποίηση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης σε μικρού μεγέθους αεριοστρόβιλο ή εμβολοφόρου ΜΕΚ, ταυτόχρονα με την εκτίμηση του βαθμού απόδοσης της ανωτέρω διάταξης.

7 Βιβλιογραφία

1. *CO2 Emissions from Fuel Combustion*. 2013, International Energy Agency.
2. *Το Ελληνικό Ενεργειακό Σύστημα*. 2009, Ελληνική Δημοκρατία, Υπουργείο Ανάπτυξης.
3. *Energy Efficiency and Renewable Energy*. U.S. Department of Energy.
4. E.P.A. *U.S. Environmental Protection Agency*. Available from: http://www.epa.gov/otaq/fuels/alternative-renewablefuels/.
5. ΣΒΙΒΕ. *Σύνδεσμος Καυσίμων και Βιομάζας Ελλάδος*. Available from: http://www.sbibe.gr/nomothesia.html

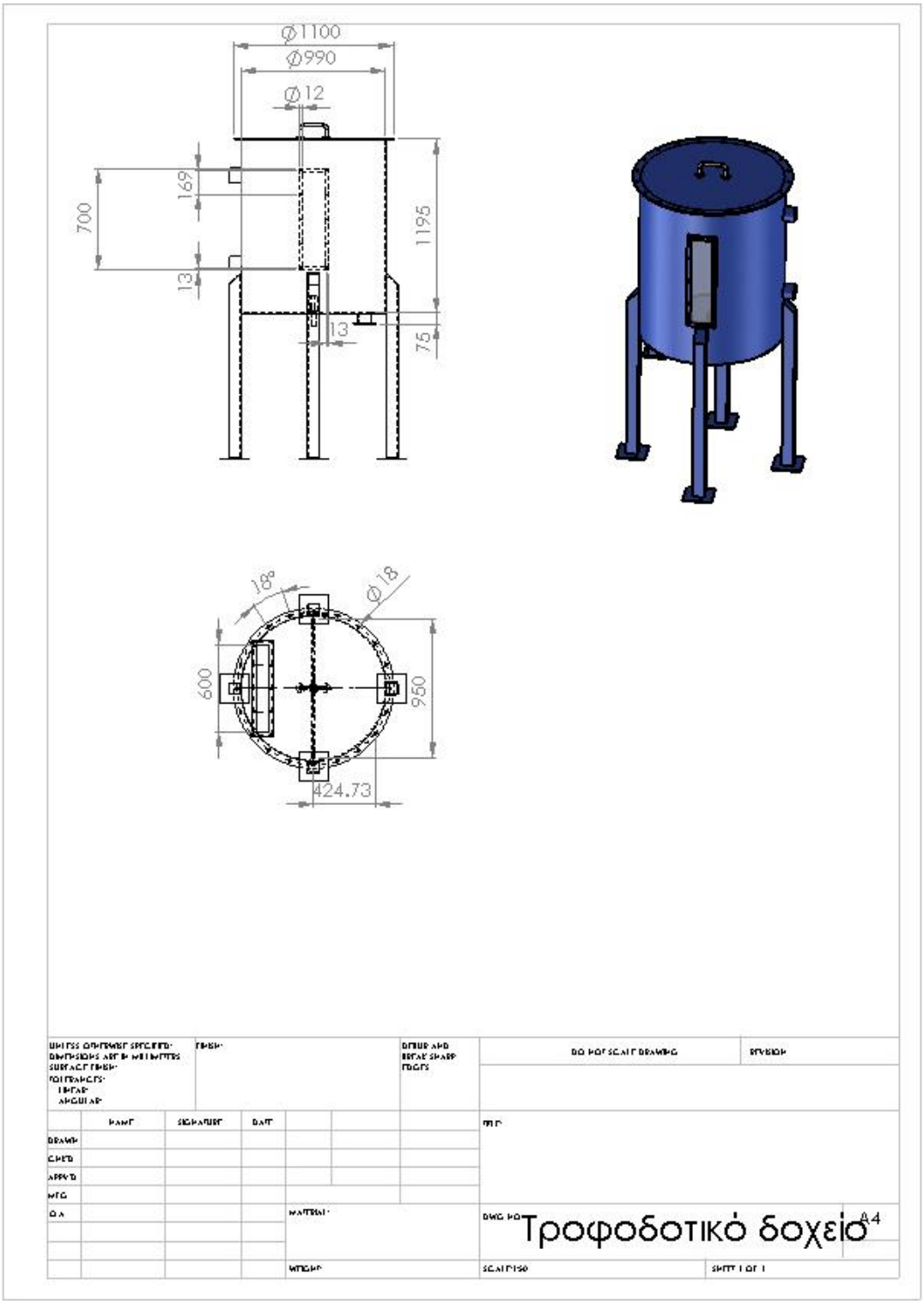
   http://www.sbibe.gr/documents/nomothesia/koinotikes%20odigies/200330.pdf.
6. ΚΑΠΕ. *Ενεργειακές Καλλιέργειες*. Available from: http://www.cres.gr/services/istos.chtm?prnbr=24819&locale=el.
7. Κακαράς, Ε. and Σ. Καρέλλας, *Αντιρρυπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών*. 2013, Τσότρας Αν. Αθανάσιος. p. 337 - 347.
8. Χρήστου, Μ., *Ενέργεια από Βιομάζα στην Ελλάδα: Παρούσα κατάσταση και προοπτικές*. 2007, ΚΑΠΕ (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας): Άλιμος. p. 36.
9. Ψωμάς, Σ. *Greenpeace*. 2007; Available from: http://www.greenpeace.org/greece/Global/greece/report/2007/10/Suggested_biomass_standards_Oct07.pdf.
10. ; Available from: http://landwaterwind.blogspot.gr/2010/12/blog-post_4320.html.
11. Eurostat, *Waste Statistics*. 2010.
12. Fischer, C.C., Matthew, *Household and municipal waste: Comparability of data in EEA member countries*. 2000. p. 5.
13. Παναγιωτακόπουλος, Δ., *Βιώσιμη Διαχείρηση Αστικών Στερεών Αποβλήτων*. 2002, Θεσσαλονίκη: Ζυγός.
14. ΕΕΔΣΑ. *Ελληνική Εταιρία Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων*. Available from: http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=44.
15. Κακαράς, Ε. and Σ. Καρέλλας, *Αντιρρυπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών*. 2013, Τσότρας Αν. Αθανάσιος. p. 435 - 456.
16. LINDNER. *Recyclingtech*. Available from: http://www.l-rt.com/en/applications/alternative-fuels/alternative-fuels.html.
17. *Services and Products*. Available from: http://www.sita.co.uk/services-and-products/our-products/rdf-srf.
18. *What is Torrefaction*. Available from: http://www.topellenergy.com/technology/what-is-torrefaction/.
19. Milne, T.A., *Pyrolysis - The Thermal Behavior of Biomass bellow 600°C.* Biomass Gasification, 1979. **2**: p. 95 - 132.
20. *Powering Clean Energy Future*. Available from: http://www.bioenergyconsult.com/tag/slow-pyrolysis/.
21. Venderbosch, R.H.P., W., *Fast pyrolysis technology development.* Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2010. **4**(2): p. 178 - 208.
22. *Environmentally Friendly and Profitable Energy*. Available from: http://www.biomassenergy.gr/articles/technology/gasification/12-biomass-gasification.
23. Christodoulou, C., et al., *Circulating fluidized bed gasification tests of seed cakes residues after oil extraction and comparison with wood.* Fuel, 2014. **132**(0): p. 71-81.
24. Basu, P., *Chapter 5 - Gasification Theory and Modeling of Gasifiers*, in *Biomass Gasification and Pyrolysis*, P. Basu, Editor. 2010, Academic Press: Boston. p. 117-165.
25. Κακαράς, Ε. and Σ. Καρέλλας, *Αντιρρυπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών*. 2013, Τσότρας Αν. Αθανάσιος. p. 481 - 488.

26. NASA. *Combustion*. Available from: https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/combst1.html.
27. Basu, P., *Chapter 1 - Introduction*, in *Biomass Gasification and Pyrolysis*, P. Basu, Editor. 2010, Academic Press: Boston. p. 1-25.
28. Ragland, K.W. and K.M. Bryden, *Combustion Engineering*. Second ed. 2011: CRC Press. 550.
29. Κακαράς, Ε. and Σ. Καρέλλας, *Αντιρρυπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών*. 2013, Τσότρας Αν. Αθανάσιος. p. 469 - 475.
30. *Wood gas as engine fuel*. Available from: http://www.fao.org/docrep/t0512e/t0512e0a.htm.
31. Basu, P., *Chapter 6 - Design of Biomass Gasifiers*, in *Biomass Gasification and Pyrolysis*, P. Basu, Editor. 2010, Academic Press: Boston. p. 167-228.
32. *Entrained Flow Gasifiers*. Available from: http://www.undeerc.org/equipment/Gasification-and-Gas-Cleanup-Systems/Entrained-Flow-Gasifier.aspx.
33. Mel, P., *Gas Fluidization*. Vol. 69. 1990: J.M. Beeckmans.
34. Siedlecki, M.D.J., Wiebren; Verkooijen, Adrian H.M., *Fluidized Bed Gasification as a Mature And Reliable Technology for the Production of Bio-Syngas and Applied in the Production of Liquid Transportation Fuels—A Review.* Energies, 2011. **4**(3): p. 389-434.
35. Basu, P., *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. 2006: CRC Press. 496.
36. Grace, J.R.L., Chwen J., *Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification*, ed. F. Scala. 2013.
37. Lappas, A.A., et al., *Biomass pyrolysis in a circulating fluid bed reactor for the production of fuels and chemicals.* Fuel, 2002. **81**(16): p. 2087-2095.
38. Ruokojärvi, P., et al., *PCDD/F reduction in incinerator flue gas by adding urea to RDF feedstock.* Chemosphere, 2001. **43**(2): p. 199-205.
39. Samaras, P., et al., *PCDD/F inhibition by prior addition of urea to the solid fuel in laboratory experiments and results statistical evaluation.* Chemosphere, 2001. **42**(5–7): p. 737-743.
40. Cioni, M.L.M., C.; Riccardi, J., *RDF Gasification in a Circulating Fluidized Bed Gasifier: Characterization of Syngas and Ashes.* 2001.
41. Dalai, A.K., et al., *Gasification of refuse derived fuel in a fixed bed reactor for syngas production.* Waste Management, 2009. **29**(1): p. 252-258.
42. Zhou, C., et al., *Effect of calcium oxide on high-temperature steam gasification of municipal solid waste.* Fuel, 2014. **122**(0): p. 36-46.
43. Borgianni, C., et al., *Gasification process of wastes containing PVC.* Fuel, 2002. **81**(14): p. 1827-1833.
44. Duan, F., et al., *Combustion behavior and pollutant emission characteristics of RDF (refuse derived fuel) and sawdust in a vortexing fluidized bed combustor.* Energy, 2013. **57**(0): p. 421-426.
45. Galvagno, S., et al., *Steam gasification of tyre waste, poplar, and refuse-derived fuel: A comparative analysis.* Waste Management, 2009. **29**(2): p. 678-689.
46. Chiemchaisri, C., B. Charnnok, and C. Visvanathan, *Recovery of plastic wastes from dumpsite as refuse-derived fuel and its utilization in small gasification system.* Bioresource Technology, 2010. **101**(5): p. 1522-1527.
47. He, M., et al., *Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of municipal solid waste (MSW): Influence of catalyst and temperature on yield and product composition.* International Journal of Hydrogen Energy, 2009. **34**(1): p. 195-203.
48. Zhang, H.-J., et al., *Influence of variation in the operating conditions on PCDD/F distribution in a full-scale MSW incinerator.* Chemosphere, 2008. **70**(4): p. 721-730.

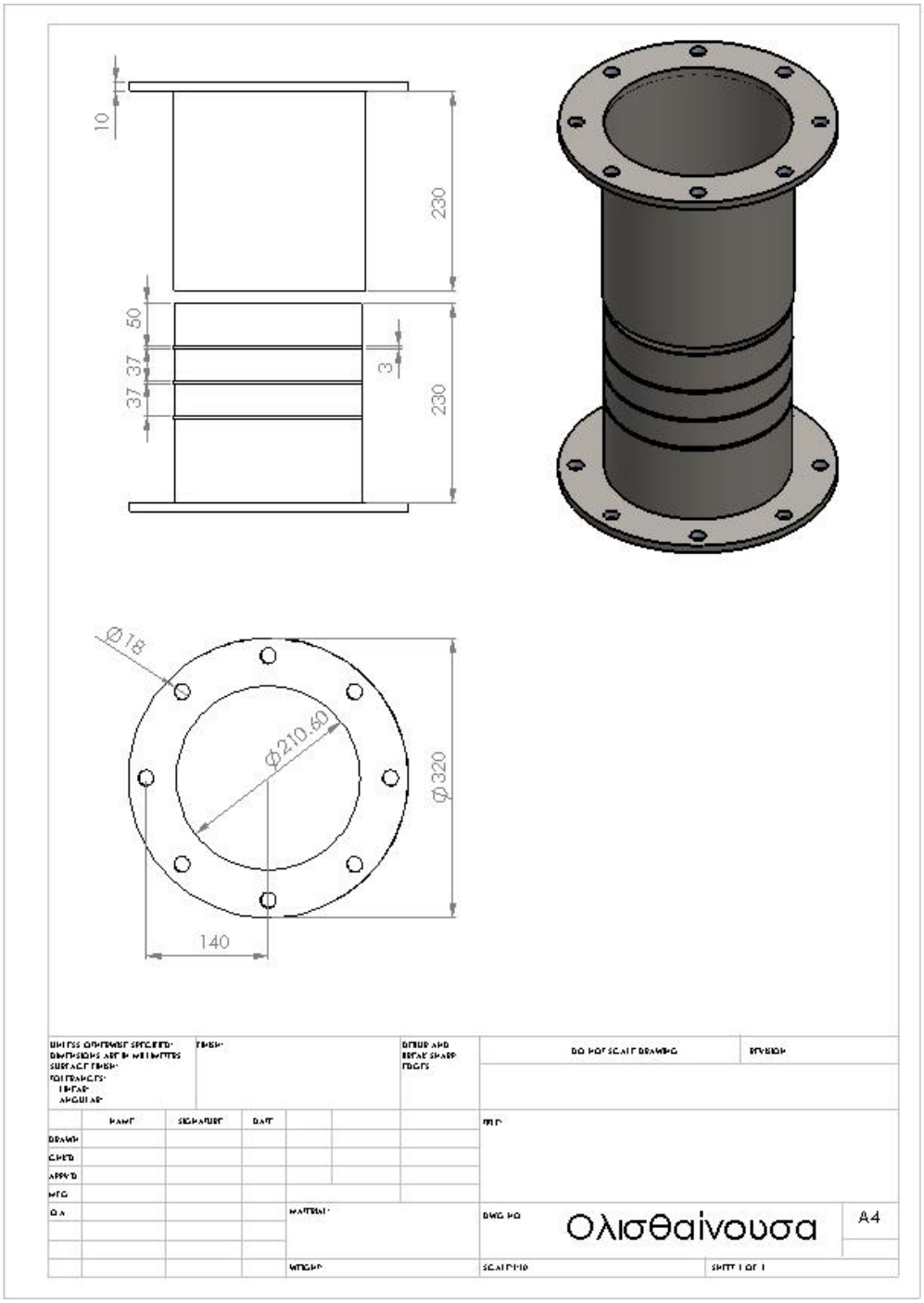
49. Pinto, F., et al., *Co-gasification of coal and wastes in a pilot-scale installation 1: Effect of catalysts in syngas treatment to achieve tar abatement.* Fuel, 2009. **88**(12): p. 2392-2402.
50. Cho, M.-H., T.-Y. Mun, and J.-S. Kim, *Production of low-tar producer gas from air gasification of mixed plastic waste in a two-stage gasifier using olivine combined with activated carbon.* Energy, 2013. **58**(0): p. 688-694.
51. Arena, U., L. Zaccariello, and M.L. Mastellone, *Fluidized bed gasification of waste derived fuels.* 2010.
52. Lin, C.-L., et al., *Inhibition and promotion: The effect of earth alkali metals and operating temperature on particle agglomeration/defluidization during incineration in fluidized bed.* Powder Technology, 2009. **189**(1): p. 57-63.
53. Kuo, J.-H., C.-L. Lin, and M.-Y. Wey, *Effect of alkali concentrations and operating conditions on agglomeration/defluidization behavior during fluidized bed air gasification.* Powder Technology, 2011. **214**(3): p. 443-446.
54. Christodoulou, C., et al., *Comparing calcined and un-treated olivine as bed materials for tar reduction in fluidized bed gasification.* Fuel Processing Technology, 2014. **124**(0): p. 275-285.
55. Di Gregorio, F. and L. Zaccariello, *Fluidized bed gasification of a packaging derived fuel: energetic, environmental and economic performances comparison for waste-to-energy plants.* Energy, 2012. **42**(1): p. 331-341.
56. Arena, U. and F. Di Gregorio, *Gasification of a solid recovered fuel in a pilot scale fluidized bed reactor.* Fuel, 2014. **117, Part A**(0): p. 528-536.
57. Campoy, M., et al., *Gasification of wastes in a pilot fluidized bed gasifier.* Fuel Processing Technology, 2014. **121**(0): p. 63-69.
58. Lin, C.-L., T.-H. Peng, and W.-J. Wang, *Effect of particle size distribution on agglomeration/defluidization during fluidized bed combustion.* Powder Technology, 2011. **207**(1–3): p. 290-295.
59. Zhong, Y., et al., *Prevention of agglomeration/defluidization in fluidized bed reduction of Fe2O3 by CO: The role of magnesium and calcium oxide.* Powder Technology, 2013. **241**(0): p. 142-148.
60. Liu, Z.-S., T.-H. Peng, and C.-L. Lin, *Impact of CaO and CaCO3 addition on agglomeration/defluidization and heavy metal emission during waste combustion in fluidized-bed.* Fuel Processing Technology, 2014. **118**(0): p. 171-179.
61. ΕΦΕΤ. Available from: http://www.efet.gr/.
62. Tiernan, T.O.T., M.L.; Garrett, J.H.; VanNess, G.F.; Solch, J.G.; Wagel, D.J.; Ferguson, G.L.; Schecter, A., *Sources and fate of polychlorinated dibenzodioxins, dibenzofurans and related compounds in human environments.* 1985(Environmental Health Perspect.): p. 145 - 158.
63. Mininni, G., et al., *Dioxins, furans and polycyclic aromatic hydrocarbons emissions from a hospital and cemetery waste incinerator.* Atmospheric Environment, 2007. **41**(38): p. 8527-8536.
64. Lee, V.K.C., W.-H. Cheung, and G. McKay, *PCDD/PCDF reduction by the co-combustion process.* Chemosphere, 2008. **70**(4): p. 682-688.
65. *ISOLTEC, Τεχνική & Βιομηχανική Εταιρεία Μονώσεων Βιομηχανίας - Ναυτιλίας*. 19/12/2013, ISOLTEC.
66. Geldart, D., *Gas fluidization Technology*. 1996: Wiley - Interscience.
67. Manurung, R., et al., *Valorisation of Jatropha curcas L. plant parts: Nut shell conversion to fast pyrolysis oil.* Food and Bioproducts Processing, 2009. **87**(3): p. 187-196.
68. Geldart, D., *Types of Gas Fluidization*. Vol. 7. 1973.
69. Ruud van Ommen, J.E., Naoko, *Fluidization: Particle Technology.* 2010.

70. Portis, E.A., Alberto; Longo, Angela Maria Grazia; Mauro, Rosario; Mauromicale, Giovanni; Lanteri, Sergio, *Potentiality of Cynara cardunculus L. as energy crop.* Biotechnology, 2010. **150**: p. 165 - 166.
71. Καρέλλας, Σ., et al., *Ασκήσεις - Θέματα ατμοπαραγωγών και θερμικών εγκαταστάσεων*. 2007: Εκδόσεις Συμεών.
72. Vounatsos, P., et al., *Characterisation and classification of Solid Recovered Fuels (SRF) and model development of a novel thermal utilization concept through airgasification* 2012.
73. Milne, T.A., A.H. Brennan, and G. B.H., *Sourcebook of methods of analysis for biomass and biomass conversion processes*. 1990: Elsevier Applied Science.
74. Waldheim, L. and T. Nilsson, *Heating Value of gases from biomass gasification*, in *Thermal Gasification of Biomass*. 2001, IEA.
75. Nilsson, S., et al., *Gasification of biomass and waste in a staged fluidized bed gasifier: Modeling and comparison with one-stage units.* Fuel, 2012. **97**(0): p. 730-740.
76. Dunnu, G., et al., *The solid recovered fuel Stabilat®: Characteristics and fluidised bed gasification tests.* Fuel, 2012. **93**(0): p. 273-283.
77. Hashim, N., *The study of combustion characteristics for different compositions of LPG*, in *Faculty of Chemical and Natural Resources Engineering*. 2008, Malaysia Pahang.
78. Redeker, I.H., *Calcining of olivine foundry sand in fluosolid and tube-type furnaces*. 1971, Minerals Research Laboratory. p. 5.
79. Bulmau, C., et al., *Pyrolysis parameters influencing the bio-char generation from wooden biomass.* 2010. **72**(1).
80. Asano, K., *Mass Transfer: From Fndamentals to Modenr Industrial Applications*. 2006.
81. Φούντη, Μ., *Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης*. 2005, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών.
82. Gulyurtlu, I., et al., *9 - Pollutant emissions and their control in fluidised bed combustion and gasification*, in *Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification*, F. Scala, Editor. 2013, Woodhead Publishing. p. 435-480.

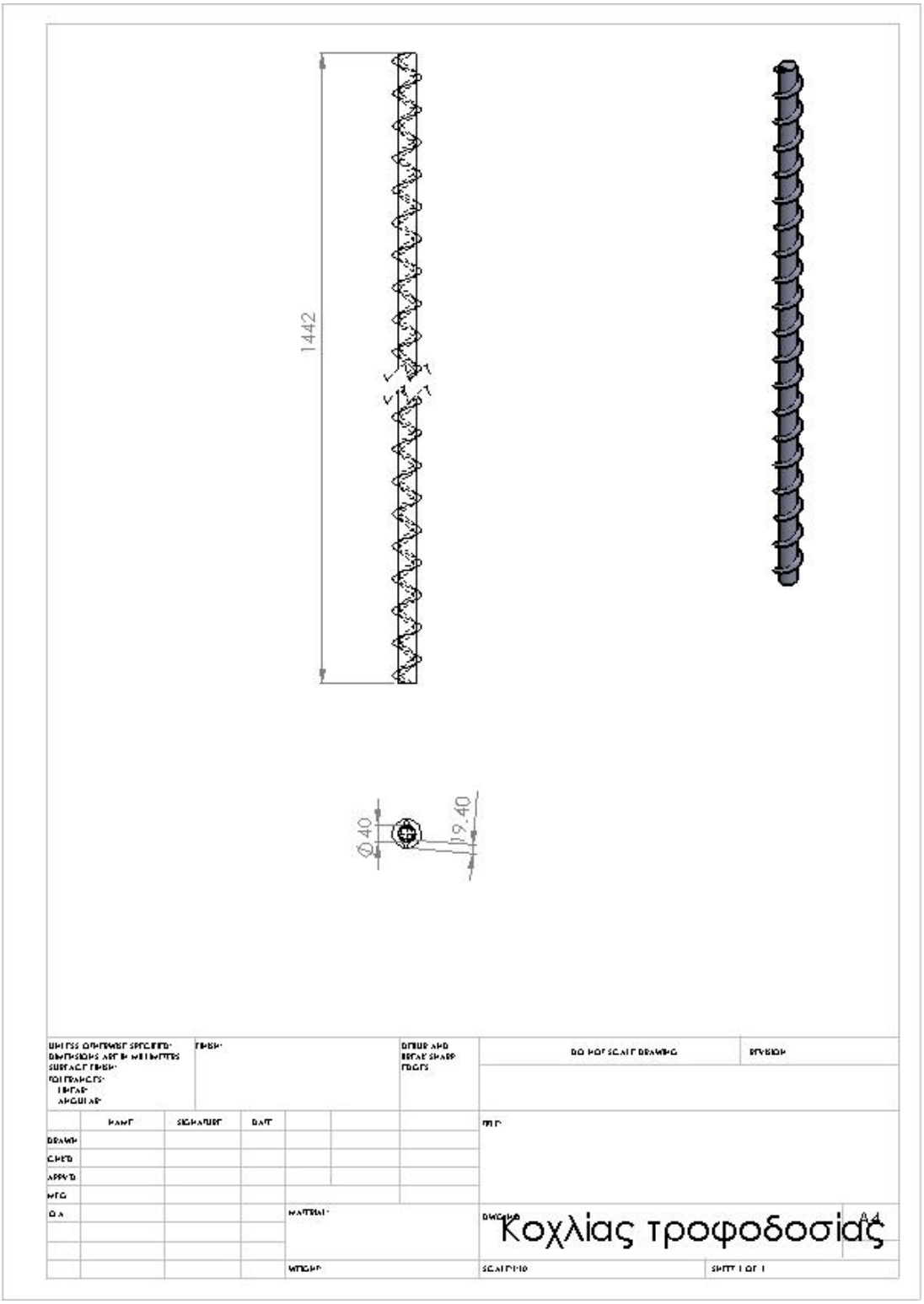
8 Παράρτημα



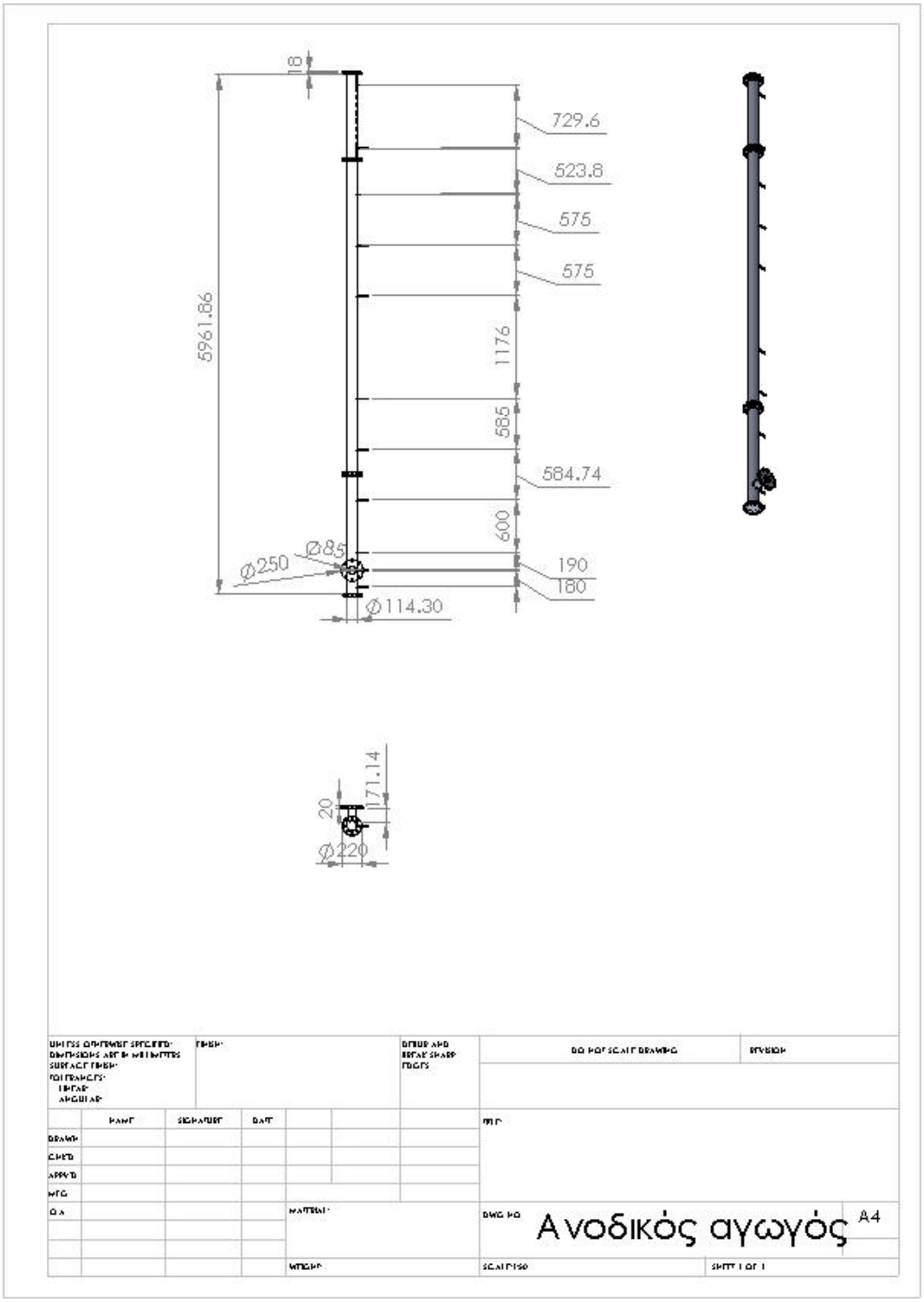
Εικόνα 61. *Μηχανολογικό σχέδιο τροφοδοτικού δοχείου.*



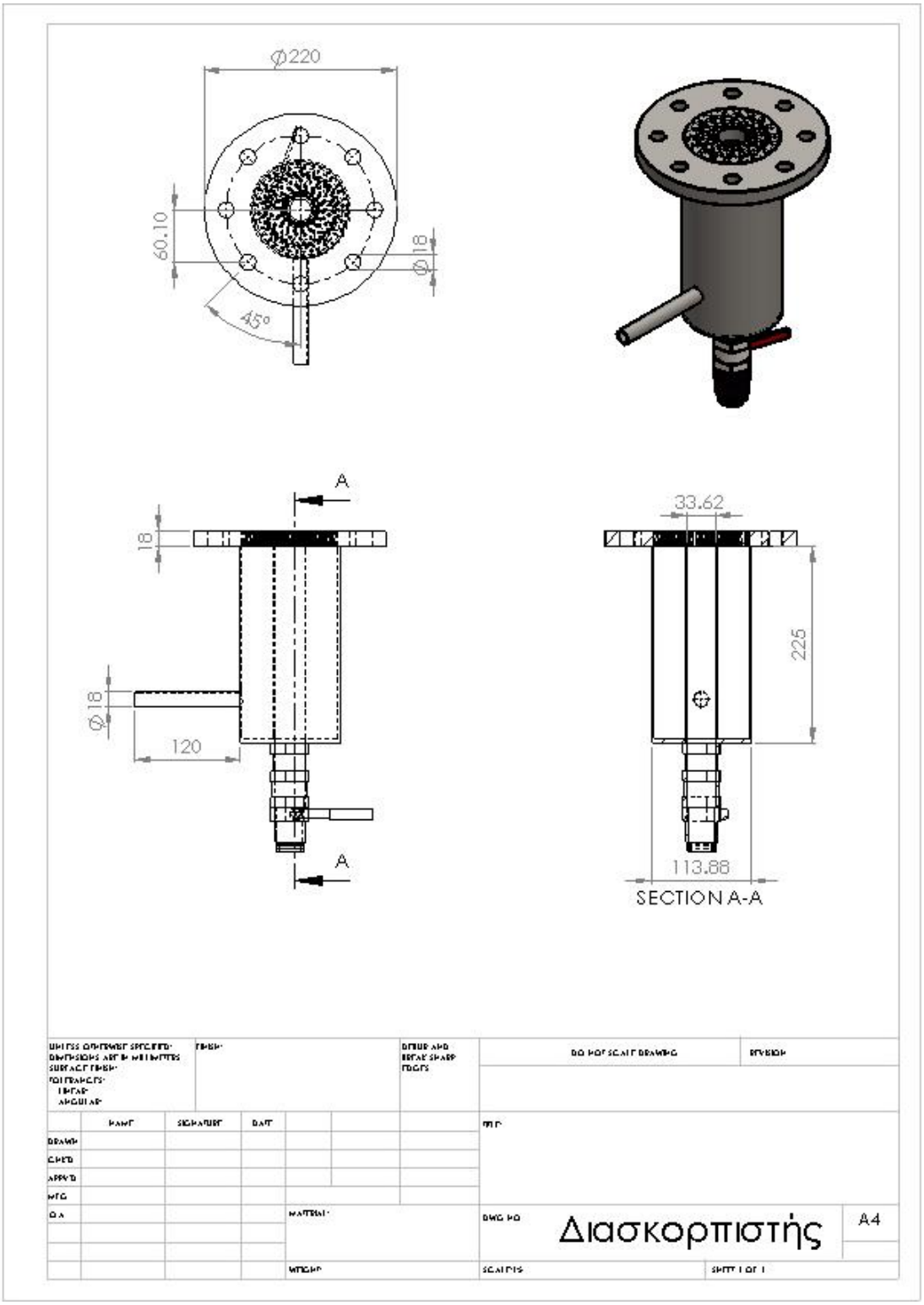
Εικόνα 62. *Μηχανολογικό σχέδιο ολισθαίνουσας βαλβίδας.*



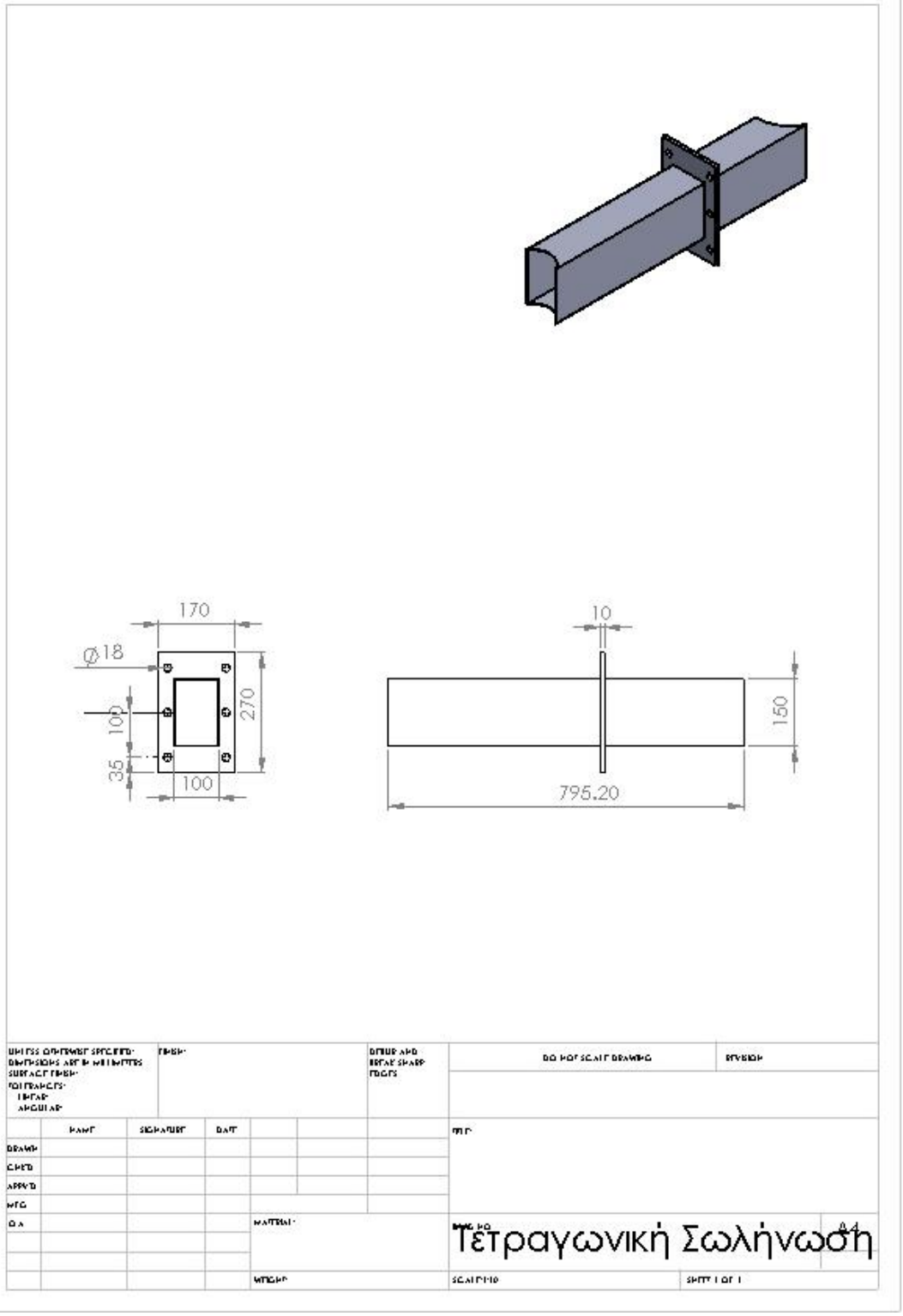
Εικόνα 63. *Μηχανολογικό σχέδιο κοχλία τροφοδοσίας.*



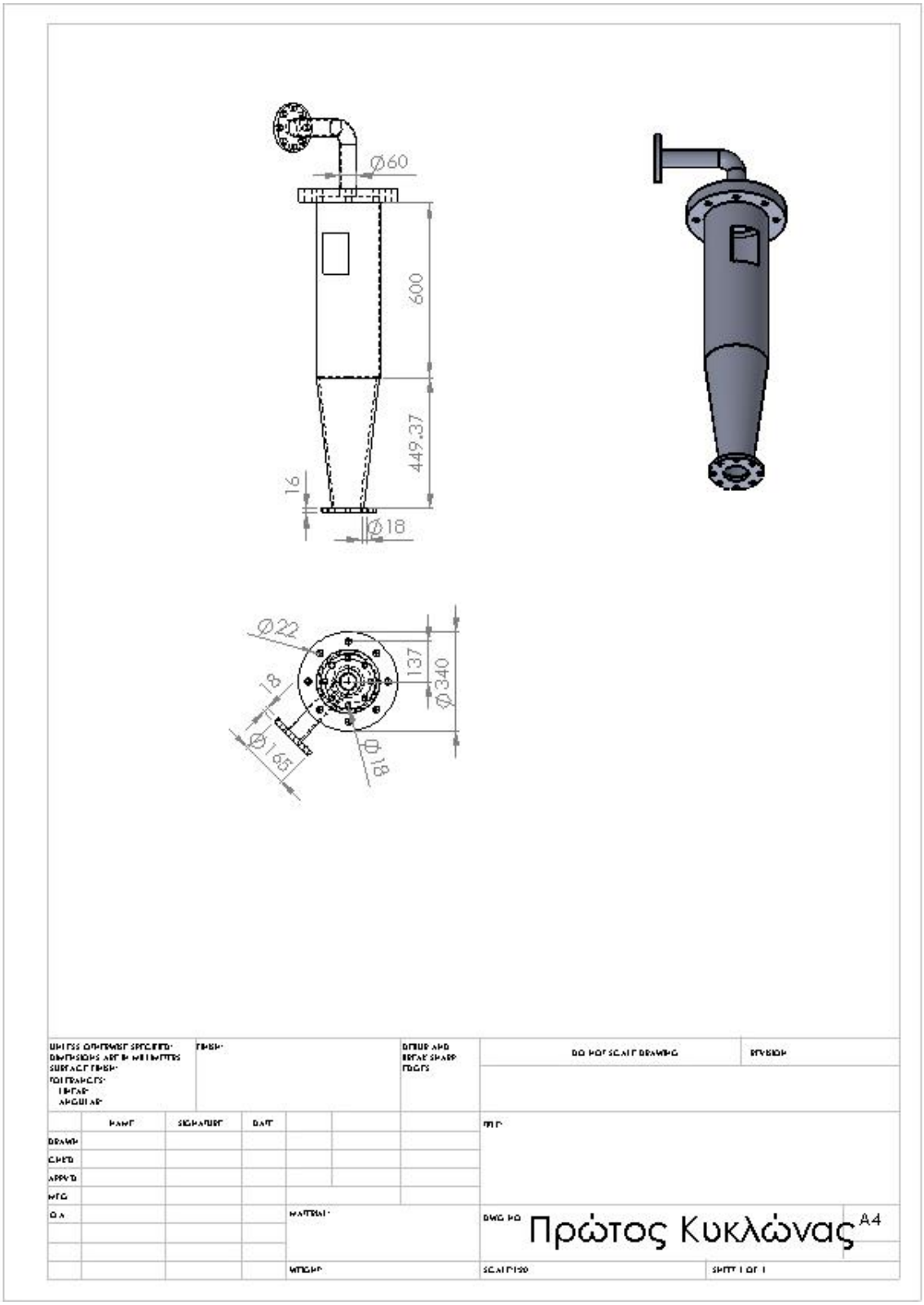
Εικόνα 64. *Μηχανολογικό σχέδιο ανοδικού αγωγού.*



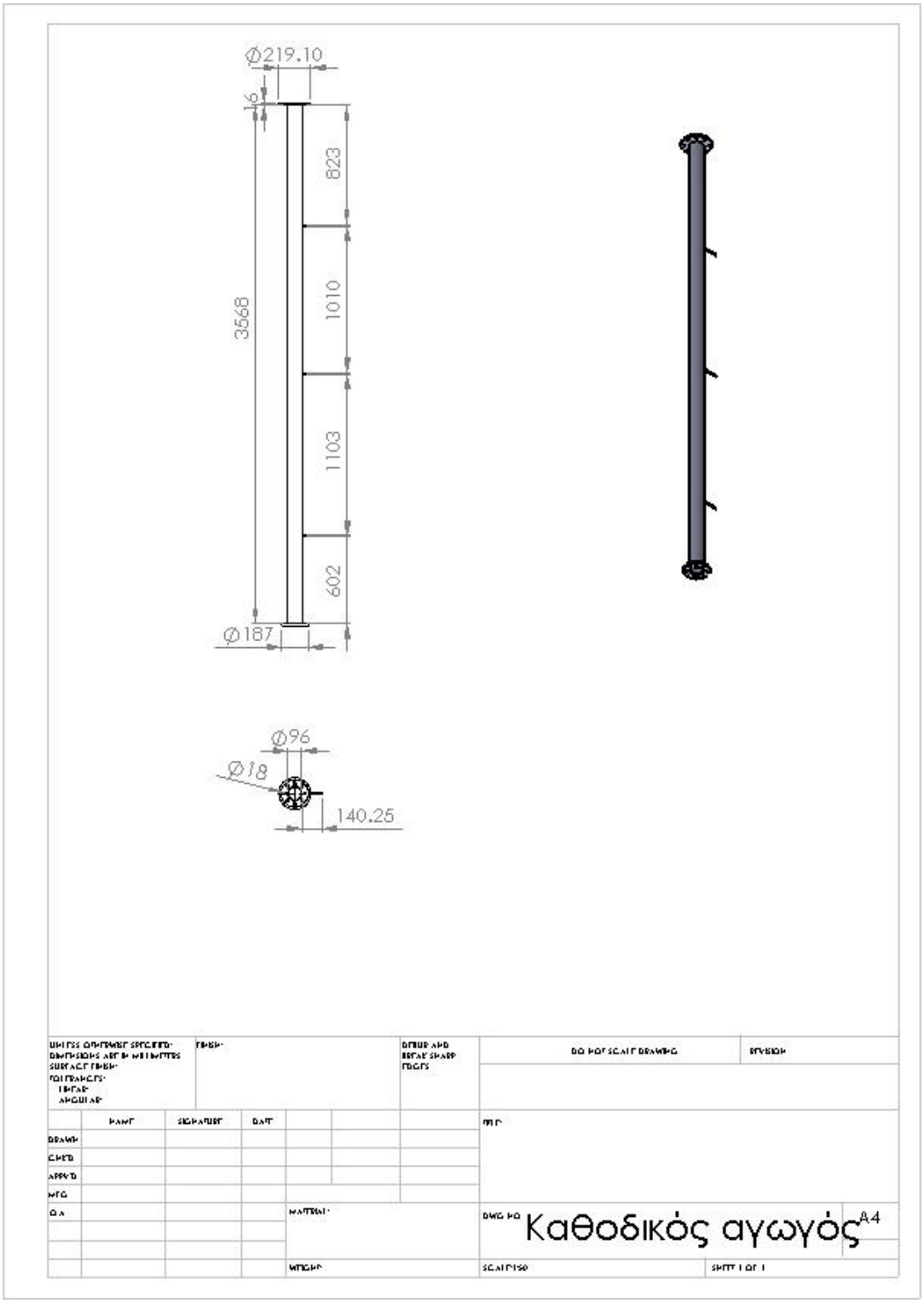
Εικόνα 65. *Μηχανολογικό σχέδιο διασκορπιστή αέρα.*



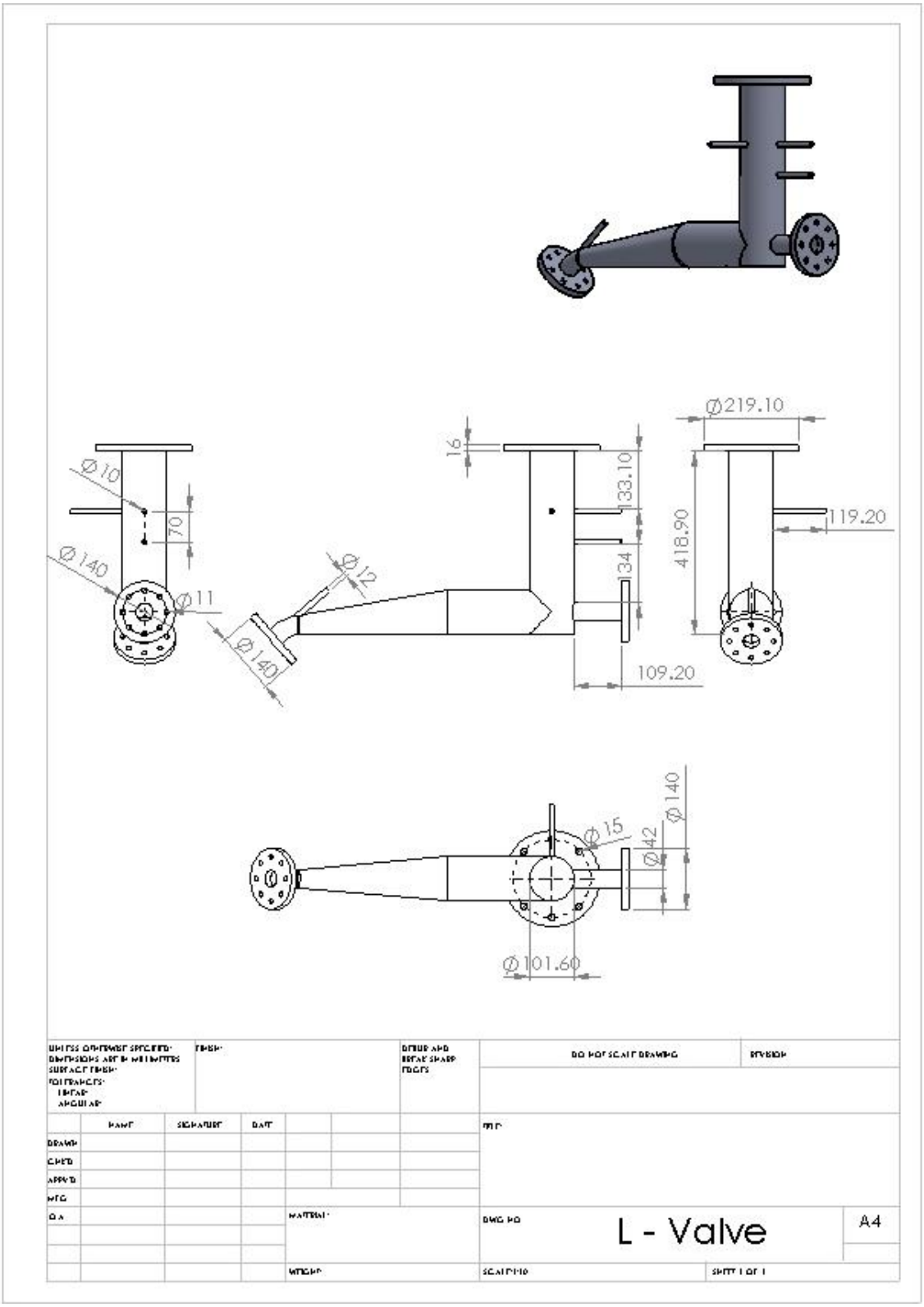
Εικόνα 66. *Μηχανολογικό σχέδιο τετραγωνικής σωλήνωσης σύνδεσης του ανοδικού αγωγού με τον πρώτο κυκλώνα.*



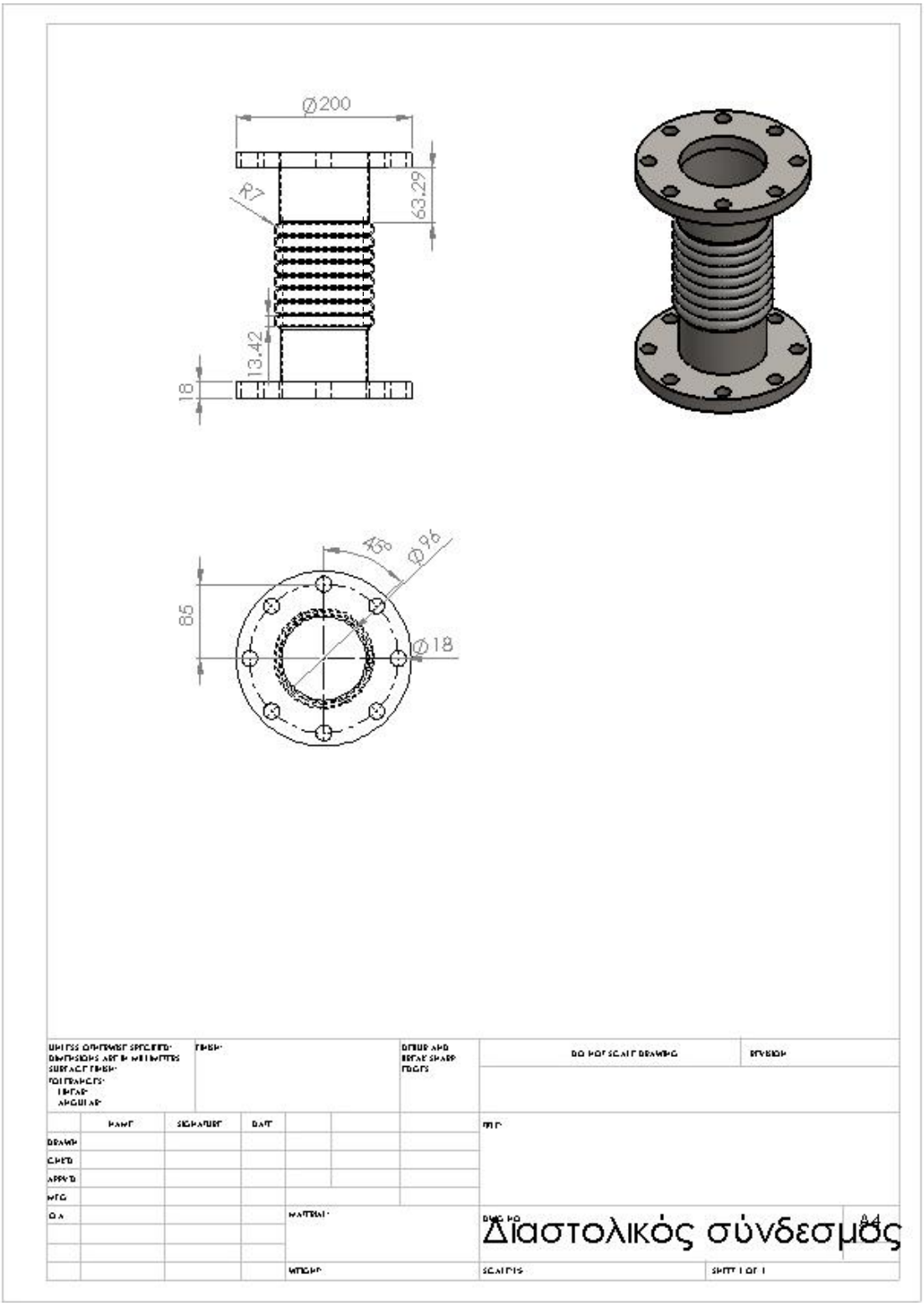
Εικόνα 67. *Μηχανολογικό σχέδιο πρώτου κυκλώνα.*



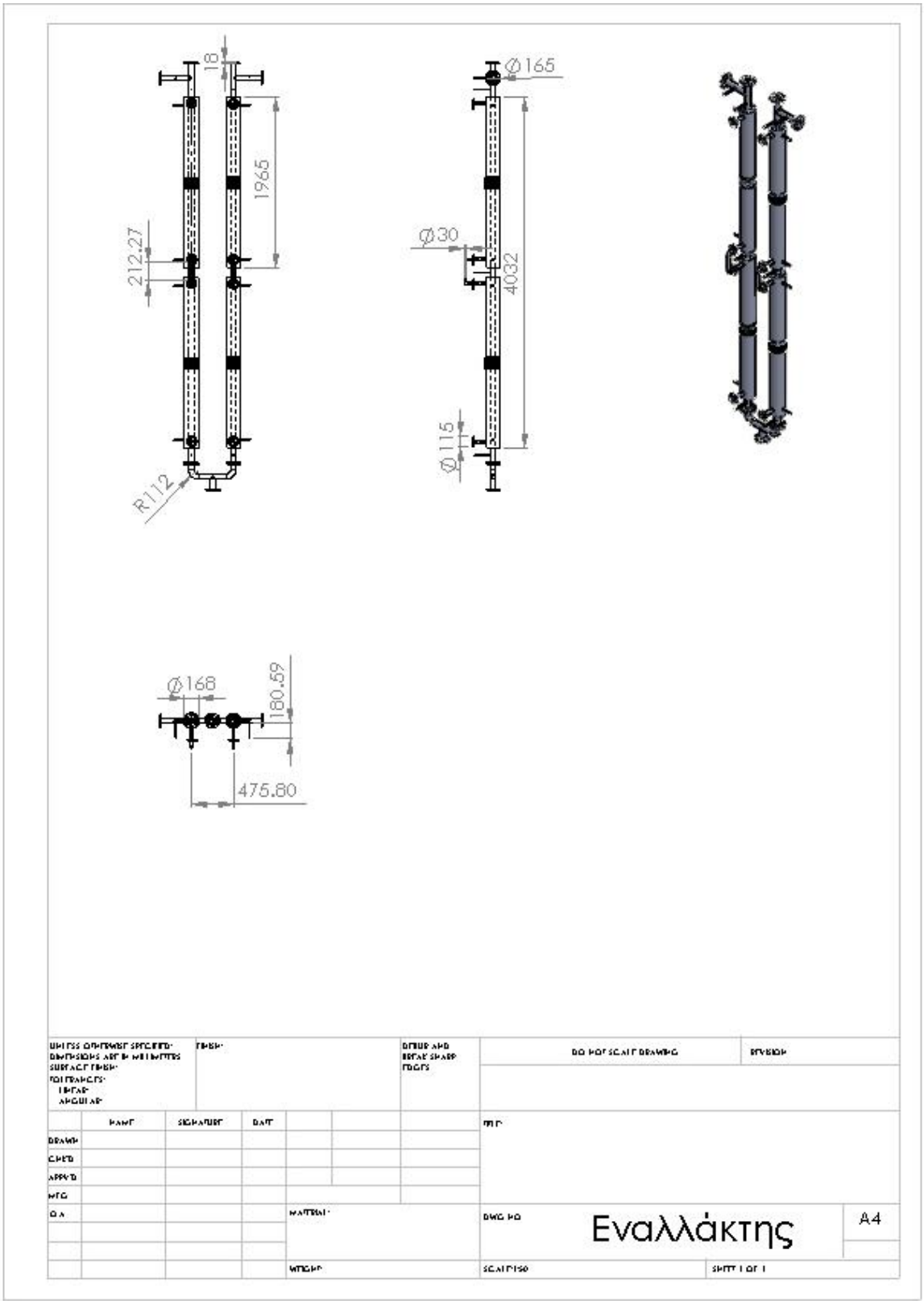
Εικόνα 68. *Μηχανολογικό σχέδιο καθοδικού αγωγού.*



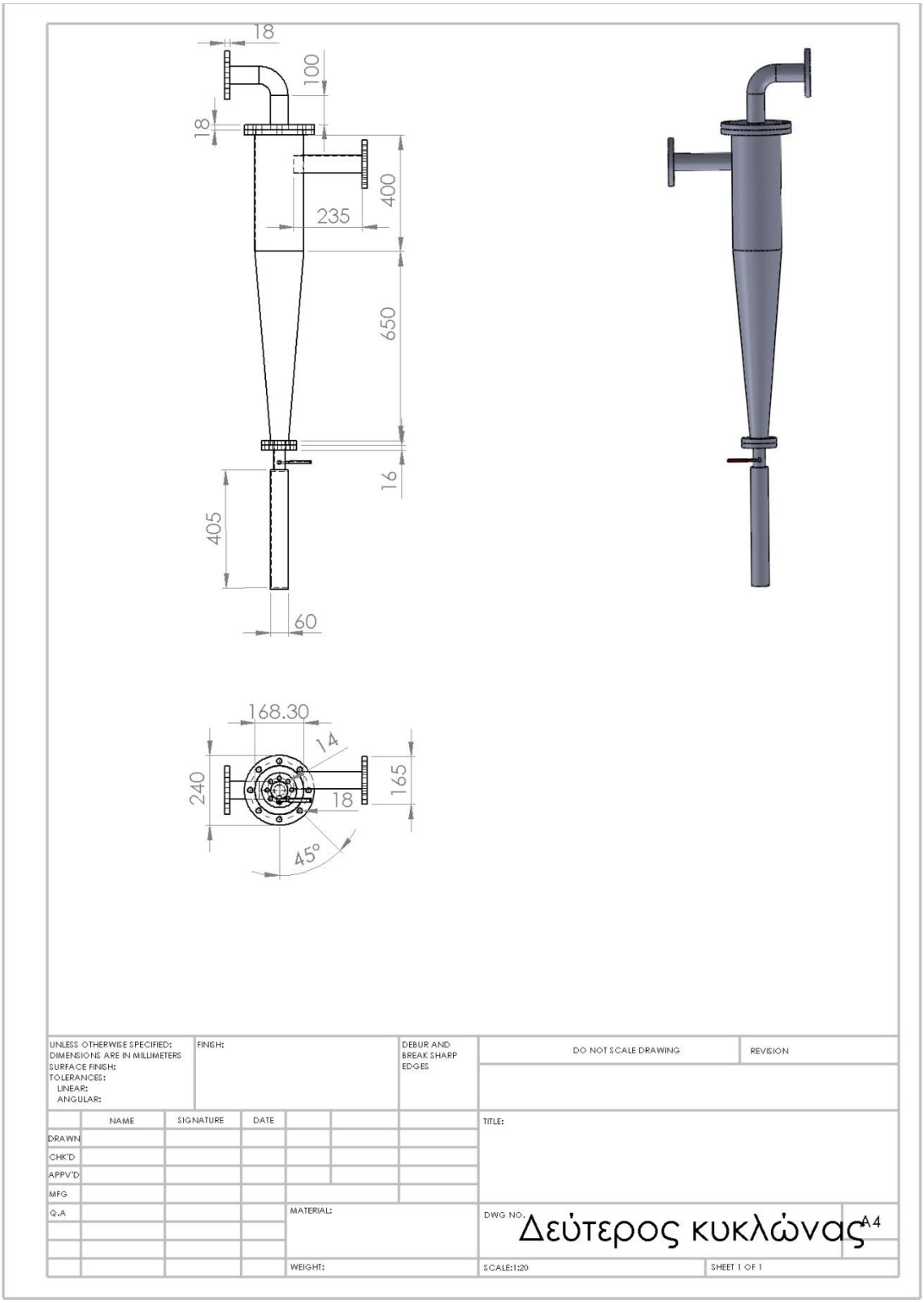
Εικόνα 69. *Μηχανολογικό σχέδιο βαλβίδας τύπου L.*



Εικόνα 70. *Μηχανολογικό σχέδιο διαστολικών συνδέσμων.*



Εικόνα 71.*Μηχανολογικό σχέδιο εναλλάκτη.*



Εικόνα 72. *Μηχανολογικό σχέδιο δεύτερου κυκλώνα.*