



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΧΡΗΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΕ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ**



**ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΑΓΑΘΟΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:  
Ε.Γ. ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ, ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΕΜΠ

**ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015**

# Πρόλογος

Σκόνη άνθρακα είχε χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν, ως κύρια μορφή ενέργειας πολύ πριν την εμφάνιση των υγρών και αέριων καυσίμων, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή θερμότητας καθώς επίσης και για βιομηχανικούς σκοπούς. Με το πέρασμα αρκετών χρόνων η αποσύνθεση της νεκρής φυτικής ύλης κάτω από τη γη, αποτέλεσε τον λόγο της δημιουργίας της τύρφης, η οποία στη συνέχεια μετατράπηκε σε λιγνίτη, υποασφαλτούχο άνθρακα, πίσσα και τέλος σε ανθρακίτη.

Με την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης τον 18<sup>ο</sup> αιώνα, η χρήση του άνθρακα ήταν σε μέγιστο βαθμό αλλά βαθμιαία άρχισε να μειώνεται εξαιτίας, μεταξύ άλλων, της μόλυνσης του αέρα. Με το πέρασμα των χρόνων τα υγρά και αέρια καύσιμα αντικατέστησαν σε μεγάλο βαθμό τον άνθρακα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, έχοντας πλέον αυτά αποκλειστική χρήση σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (Μ.Ε.Κ). Παρόλα αυτά, στα τέλη του 1950 η Σοβιετική Ένωση άρχισε να διαμορφώνει και να αναπτύσσει νέους τρόπους για την χρήση του άνθρακα ως μίγμα στην παραγωγή ενέργειας. Την περίοδο αυτή πραγματοποιήθηκαν πολλά πειράματα και έρευνες, τα αποτελέσματα των οποίων συνέβαλαν στην επίλυση δυο σημαντικών προβλημάτων: της μεταφοράς και της καύσης του μίγματος. Κονιοποιημένος άνθρακας αναμίχθηκε με νερό για να παράγει διάλυμα άνθρακα νερού (CWS). Αποτελέσματα από διάφορα πειράματα έδειξαν ότι το μίγμα ήταν σε θέση να αντικαταστήσει το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο σε εφαρμογές σχετικές με την παραγωγή ενέργειας και θερμότητας. Τα τελευταία 30 χρόνια το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (DoE) ερεύνησε τη χρήση διαλύματος άνθρακα/νερού σε καυστήρες, αεριοστροβίλους και σε κινητήρες πετρελαίου. Η έρευνα αυτή έδειξε ότι όταν ένα μίγμα άνθρακα χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε κινητήρες πετρελαίου χαμηλών στροφών, έχει παρόμοιο βαθμό απόδοσης με έναν αεριοστροβίλο συνδυασμένου κύκλου που τροφοδοτείται με φυσικό αέριο.

Η συνεχής μείωση της διαθεσιμότητας σε ορυκτά καύσιμα και συμβατικά καύσιμα Diesel, η αύξηση της τιμής των καυσίμων, τα πολύπλοκα προβλήματα φθοράς των μηχανών από την χρήση του άνθρακα ως καύσιμο και η συνεχής

μόλυνση του περιβάλλοντος, οδήγησαν τους ερευνητές στην αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο εμφανίζεται στο προσκήνιο των συζητήσεων και των ερευνών μια νέα μορφή ενέργειας, η βιομάζα, η οποία σε σύγκριση με τα στερεά καύσιμα έχει σαφέστατα πλεονεκτήματα όσον αφορά α) τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (όσον αφορά το συνολικό «κύκλο ζωής», από την καλλιέργεια του φυτού μέχρι την καύση του βιοκαυσίμου), αλλά και β) την (σχεδόν) πλήρη απουσία τέφρας και θείου. Η άμεση χρήση ξηρής σκόνης βιομάζας ως καύσιμο σε εμβολοφόρους κινητήρες θα μπορούσε να έχει μεγάλο ενδιαφέρον εξαιτίας της μεγάλης διαθεσιμότητας της φυτικής ύλης και της ευρείας χρήσης των μηχανών εσωτερικής καύσης. Οι τεχνολογίες κονιοποίησης της βιομάζας είναι πλέον αρκετά ώριμες, και η πρώτη ύλη μπορεί να μειωθεί σε μέγεθος μικρών (μm) ή ακόμα μικρότερο. Μεταξύ των διαφόρων νέων και ανανεώσιμων καυσίμων σύμφωνα με τη σχετική έρευνα, η στερεά ακατέργαστη βιομάζα είναι σίγουρα η πιο πολλά υποσχόμενη. Δεν απαιτεί καμία ή ελάχιστη θερμοχημική ή βιολογική επεξεργασία ή αναβάθμιση, και συνήθως δεν παράγει απόβλητα, επιζήμια για το περιβάλλον.

Λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων της βιομάζας, αυτή θα αποτελέσει ένα σημαντικό μέρος της ανάλυσης της χρήσης στερεών καυσίμων σε Μ.Ε.Κ. στην παρούσα εργασία παράλληλα με την ανάλυση και την ανασκόπηση των συστημάτων και των προβλημάτων από τη χρήση στερεού άνθρακα.

# Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....</b>	<b>4</b>
<b>Κεφάλαιο 2: Ιστορική αναδρομή .....</b>	<b>7</b>
2.1: Προπολεμική περίοδος .....	8
2.2: Μεταπολεμική περίοδος.....	22
2.3: Περίοδος 1973- Σήμερα .....	25
<b>Κεφάλαιο 3: Η βιομάζα ως καύσιμο σε Μ.Ε.Κ .....</b>	<b>41</b>
3.1: Εισαγωγή.....	41
3.2: Τεχνικές αξιοποίησης της βιομάζας.....	42
3.3: Εξαεριωτές.....	53
3.4: Αναθεώρηση των προηγούμενων πειραμάτων .....	57
3.5: Συμπεράσματα .....	63
<b>Κεφάλαιο 4 : Η σύγκριση της βιομάζας με τον άνθρακα .....</b>	<b>64</b>
4.1 : Η σύγκριση της διαδικασίας της καύσης της βιομάζας με τη σκόνη άνθρακα	65
4.2 : Η προοπτική της χρήσης βιομάζας σε μορφή σκόνης σε Μ.Ε.Κ λόγω της ιδιαιτερότητας της καύσης της.....	68
<b>Κεφάλαιο 5: Τα σημαντικότερα προβλήματα και λύσεις.....</b>	<b>74</b>
5.1: Τροφοδοσία καυσίμου .....	75
5.2: Φθορά .....	80
5.3: Έλεγχος ανάφλεξης .....	81
<b>Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα και προοπτικές .....</b>	<b>84</b>
<b>Κεφάλαιο 7 : Βιβλιογραφία.....</b>	<b>86</b>

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανθρωπότητα για πολλά χρόνια χρησιμοποιούσε τα στερεά καύσιμα για την δημιουργία φωτιάς. Τα στερεά καύσιμα αποτελούνται από διάφορους τύπους οργανικής ύλης οι οποίοι προέρχονται από διάφορες πηγές, όπως οι αποσυντιθεμένοι υδρογονάνθρακες βιομηχανικής και γεωργικής προέλευσης που μέσω της διαδικασίας της καύσης συμβάλουν στην παραγωγή ενέργειας και στην παροχή θερμότητας.

Ο άνθρακας, ένα από τα στερεά καύσιμα, αποτέλεσε τον πυρήνα της βιομηχανικής επανάστασης, από την πυροδότηση κλιβάνων έως και την τροφοδοσία ατμομηχανών και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA – International Energy Agency) το 41% της ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως προέρχεται από την καύση άνθρακα.

Από την περίοδο των πρώτων δοκιμών του Rudolf Diesel (τέλη 19<sup>ου</sup> αιώνα) μέχρι σήμερα, έχουν πραγματοποιηθεί πολλές εργασίες και αρκετή έρευνα σχετικά με την χρήση κονιοποιημένου άνθρακα σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Παρόλα αυτά, καμία από αυτές τις τεχνολογίες δεν έχει φτάσει ποτέ σε επίπεδο βιομηχανικής-μαζικής παραγωγής και εφαρμογής.

Εκτός όμως από τη συνεχή βελτίωση της τεχνολογίας χρήσης καθαρού άνθρακα, άρχισε να διερευνάται και η δυνατότητα παραγωγής εναλλακτικών στερεών καυσίμων από διάφορα οργανικά απόβλητα. Αυτό το είδος στερεού καυσίμου ονομάζεται βιομάζα.

Η ενέργεια από τα στερεά οργανικά υλικά μπορεί να αποκτηθεί μέσω της διαδικασίας της άμεσης καύσης, η οποία όμως είναι ιδιαίτερα επιβλαβής για το περιβάλλον. Άλλοι τρόποι ανάκτησης ενέργειας από την βιομάζα είναι μέσω της

διαδικασίας της πυρόλυσης, της αεριοποίησης, της αναερόβιας χώνευσης και της ζύμωσης.

Η πυρόλυση είναι μια διαδικασία θερμοχημικής αποσύνθεσης του οργανικού υλικού, με μια μικρή ποσότητα ή απουσία οξυγόνου, για τη μετατροπή του στερεού υλικού απευθείας σε αέρια μορφή.

Κατά τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης η οργανική ύλη μετατρέπεται, απουσία οξυγόνου, σε αέρια ή υγρή μορφή. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται για βιομηχανικές ή οικιακές χρήσεις, για τη διαχείριση των αποβλήτων και για την παραγωγή χρήσιμου καυσίμου. Παρόμοια κατά την διαδικασία της ζύμωσης η στερεά βιομάζα μετασχηματίζεται σε χρήσιμη υγρή μορφή.

Η χρήση της σκόνης βιομάζας ως καύσιμο σε εμβολοφόρους κινητήρες θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον, διότι θα μπορούσε να συνδυάσει την ευρεία χρήση των μηχανών εσωτερικής καύσης με την μεγάλη διαθεσιμότητα και το ουδέτερο, όσο αναφορά το διοξείδιο του άνθρακα, «αποτύπωμα» των καυσίμων από βιομάζα. Επιπλέον σε σύγκριση με τον άνθρακα (**Πίνακας 1.1**), τα καύσιμα βιομάζας έχουν γενικά χαμηλότερη περιεκτικότητα σε τέφρα και θείο (και μάλιστα, η όποια τέφρα μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα με έκπλυση ύδατος), και έχουν μεγάλο πτητικό περιεχόμενο, το οποίο έχει αναφερθεί, σύμφωνα με σχετικές μελέτες, ότι προάγει την ανάφλεξη.

	Coal average (min–max)	Biomass average (min–max)
Higher heating value <sup>a</sup> (MJ/kg)	19.0 (8.8–26.7) [10]	19.1(17.3–21.2) [11]
Proximate analysis <sup>a</sup> (%wt) [12]		
Volatile matter	32.8 (12.4–51.8)	75.4 (47.8–86.3)
Fixed carbon	46.3 (20.0–71.8)	17.8 (0.5–37.9)
Ash	20.9 (5.7–52.0)	6.8 (0.1–46.3)
Ash composition (%wt of ash) [12]		
SiO <sub>2</sub>	54.1 (32.0–68.4)	29.8 (<0.1–94.5)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.2 (11.3–35.2)	5.5 (0.1–53.5)
SO <sub>3</sub>	3.5 (0.3–14.4)	3.3 (<0.1–14.7)

**Πίνακας 1.1** – Σύγκριση βασικών ιδιοτήτων άνθρακα και βιομάζας [3]

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα από τη χρήση της ξηρής σκόνης από βιομάζα, όπως η δυνατότητα παραγωγής ακόμα και από χώρες που δεν έχουν αποθέματα σε ορυκτά καύσιμα (στοιχείο που δίνει σαφές στρατηγικό πλεονέκτημα και επιτρέπει ενεργειακή ανεξαρτησία), η σχετικά εύκολη

αποθήκευση, ο (συνήθως) λιγότερο εύφλεκτος χαρακτήρας σε σύγκριση με τη βενζίνη ή το πετρέλαιο (υψηλότερο σημείο ανάφλεξης - flash point) που αυξάνει την ασφάλεια αποθήκευσης και μεταφοράς.

Η εκρηκτικότητα των κονιοποιημένων εύφλεκτων υλικών, είναι γνωστή και καλά τεκμηριωμένη. Έχουν συμβεί πολλά ατυχήματα στο παρελθόν, π.χ. στον τομέα των τροφίμων, στην επεξεργασία ή τις μεταλλευτικές βιομηχανίες εξαιτίας αυτού του γεγονότος. Βέβαια από την άλλη πλευρά, τίποτα δεν επιτρέπει την πρόβλεψη, ότι η πυροδότηση μιας μηχανής εσωτερικής καύσης με σκόνη βιομάζας είναι αδύνατη ειδικά μάλιστα όταν πρόσφατες πρόοδοι στη τεχνολογία κονιοποίησης βιομάζας επιτρέπουν πλέον την παραγωγή σωματιδίων μεγέθους μικρού (μm). Επιπλέον, έχουν γίνει πολυάριθμες έρευνες όσο αναφορά τα χαρακτηριστικά της βιομάζας και της χρήση της για ενεργειακούς σκοπούς. Ταυτόχρονα έχουν προταθεί πολλά μοντέλα σωματιδίων βιομάζας που είναι κατάλληλα για καύση, ορισμένα από τα οποία θα αναφερθούν στα επόμενα κεφάλαια.

# **2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΕ Μ.Ε.Κ.**

Οι παλαιότερες προσπάθειες για την λειτουργία εμβολοφόρων κινητήρων με χρήση στερεών καυσίμων σε μορφή σκόνης υποδιαιρούνται σε τρεις κύριες περιόδους, αρχίζοντας με τα έργα του Rudolf Diesel το 1892. Από τις πρώτες μελέτες υπό την εποπτεία του Diesel, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μηχανές εσωτερικής καύσης τροφοδοτούμενες με στερεά καύσιμα, αλλά καμία δεν έχει φτάσει σε εμπορική κλίμακα.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, το στερεό καύσιμο ήταν κονιοποιημένος ορυκτός άνθρακας, σε ξηρή μορφή ή αναμιγμένος με πετρέλαιο ή νερό, λόγω του ότι είναι ευρέως διαθέσιμος, σε αντίθεση με το αργό πετρέλαιο.

Η πρώτη περίοδος, που εντοπίζεται κυρίως στη Γερμανία με καύσιμο ξηρό άνθρακα, πρακτικά έληξε με το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, και οδήγησε σε



πολλές βελτιώσεις του αρχικού μοντέλου τροφοδοσίας μηχανών εσωτερικής καύσης, το οποίο είχε αναπτύξει ο Rudolf Diesel. Η φθορά του κινητήρα ήταν ένα σημαντικό τεχνικό εμπόδιο και φαίνεται να είχε επιλυθεί μεταξύ του 1930 και 1940.

Η δεύτερη περίοδος εντοπίζεται στις Η.Π.Α. μεταξύ του 1945 και 1973. Το σχετικό ερευνητικό έργο οδήγησε σε λειτουργία με περαιτέρω μείωση της φθοράς του κινητήρα. Το κύριο θέμα, το οποίο ήταν η σωστή τροφοδοσία του καυσίμου με τον κατάλληλο χρονισμό παρέμεινε, πάντως, σε μεγάλο βαθμό άλυτο.

Για το λόγο αυτό, άλλες μελέτες που διεξήχθησαν στις Η.Π.Α. κατά την διάρκεια της ίδιας περιόδου επικεντρώθηκαν στη χρήση μιγμάτων κονιοποιημένου άνθρακα σε συνδυασμό με πετρέλαιο ή νερό. Τέτοιοι συνδυασμοί ονομάζονται coal diesel slurries (CDS) δηλαδή διαλύματα άνθρακα-πετρελαίου και coal water slurries (CWS – διαλύματα άνθρακα-νερού). Κατά την διάρκεια των δύο προηγούμενων περιόδων, οι μελέτες ήταν επί το πλείστον πειραματικές.

Η τρίτη περίοδος εκτείνεται από το 1973 μέχρι σήμερα και περιλαμβάνει πλήρεις δοκιμές χρήσης μιγμάτων άνθρακα σε κινητήρες, καθώς και κάποιες θεωρητικές μελέτες και μοντελοποιήσεις, οι οποίες εξακολουθούν να εκτελούνται κυρίως στις Η.Π.Α., με κύρια χρηματοδότηση από το Υπουργείο Ενέργειας (DoE).

Στις επόμενες παραγράφους, περιγράφεται χρονολογικά η πορεία των σχετικών μελετών, αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και τα θέματα που ανέκυψαν καθώς και οι σχετικές λύσεις που προτάθηκαν, προερχόμενες κυρίως από την Παραπομπή [3].

### **2.1 1892-1945: Καύσιμα ξηρής σκόνης**

Ο Soehngen δημοσίευσε το 1976 μία λεπτομερή ανασκόπηση μελετών γερμανικών εταιρειών όσον αφορά τη λειτουργία των μηχανών εσωτερικής καύσης με ξηρή σκόνη άνθρακα. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν 19 κινητήρες Diesel τροφοδοτούμενοι με σκόνη άνθρακα. Όμως, καμία από αυτές τις προσπάθειες δεν έφτασε σε εμπορική κλίμακα. Σε όλες τις περιπτώσεις, η καύση του άνθρακα ήταν σχετικά αργή, ιδανική μόνον για κινητήρες Diesel χαμηλών στροφών. Έτσι όλα τα γερμανικά προγράμματα που αναπτύχθηκαν, αφορούσαν κινητήρες που είχαν σχεδιαστεί

για να λειτουργήσουν σε εύρος στροφών από 100–1000 rpm. Οι σχετικές τεχνολογικές εξελίξεις οδήγησαν σε 200 πατέντες.

Το 1940, έγινε προσπάθεια στην Ιαπωνία να λειτουργήσει με ξηρή σκόνη μία 6-κύλινδρη μηχανή ισχύος 75 ίππων στις 2000 rpm, με απώτερο σκοπό τη χρήση της στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Έρευνα υπό τον Beluson το 2006, ανασκόπησε τις διάφορες προσπάθειες κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου, με πολλά ενδιαφέροντα πρόσθετα στοιχεία, συμπεριλαμβανομένων φωτογραφιών και περιγραφή της καύσης του άνθρακα στις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα.

Για σχεδόν μισό αιώνα, το ζητούμενο ήταν το πλεονέκτημα κόστους που μπορεί να αποκτηθεί από την χρήση φθηνού άνθρακα ή άλλων στερεών καυσίμων έναντι ακριβών εισαγόμενων. Λίγα στοιχεία είναι διαθέσιμα σχετικά με την ποιότητα του άνθρακα, ωστόσο από τις πληροφορίες από τις βιομηχανικές διαδικασίες εξόρυξης κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο άνθρακας είχε 10% κατά βάρος περιεκτικότητα σε τέφρα, και σωματίδια περίπου 100 μικρών. Οι κινητήρες και οι λειτουργικές λεπτομέρειες παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.1.

**Πίνακας 2.1 – Σύνοψη έρευνας σε Μ.Ε.Κ. με καύση στερεών καυσίμων από την εποχή του R. Diesel (1892) έως τον 2<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Πόλεμο [3]**

Author/company	Date	Fuel	Engine, bore/stroke (mm), number of cylinders, displacement per cyl. (cc), design speed (rpm)	Fuel feeding mode	Mean particle size ( $\mu\text{m}$ ), composition (% wt)	Issues	Improvements	Total tests length
1892–1945 Rudolf Diesel	1892	Mineral coal dust	Diesel 4Stroke, 203/406, 1-, 13, 140, 300	Fumigation/Intake manifold	100, 10% ash	Piston blocking/particles between rings, Grankase contamination, Important piston, rings and cylinder wear	Diesel's conclusion: find a way to avoid particles in the lubrication oil.	7 min
Rudolf Pawlikowski (Kosmos Co)	1916–1928	Carbonaceous and non Carbonaceous	8 diesel engines 4stroke, 190/320 min, 500/720 max, 1-, 2-, 3-, 9070 min,	60–80 bar injection and self injection	70% < 75 6–30% ash	Piston blocking/particles between rings, Grankase contamination, Important piston, rings and cylinder wear	Dust self injection thanks to specific by-chamber + cutting edge dust valve + compressed air dust cleaning	11000 h (new rings every 1000 h)
I.-G. Farben company	1925–1929	Lignite, Bituminous Coal, Solvent Refined Coal	141,350 max, 160 to 1600 4Stroke, 260/390 min, 420/650 max, 1-, 4-, 21,000 min, 90,000 max, 215–300	60 bar injection	98% < 90	Kosmos injection system not adapted to engine operation at different speeds and loads, high wear rates, sludge formation.	Adjustable rings in the cylinder liner, new 60 bars injection system + air cleaned valve + Potl-Broche solvent coal refining method	5000 h
Schichau Werke company, Univ. Dresden	1930–1939	Lignite	2 crosshead diesel engines 4Stroke modified Kosmos, 550/650, 1-, 6-, 155,000, 218–375	Self injection in a 1% displacement by-chamber	70% < 90 6% ash	Kosmos injection system not adapted, instable inflammation due to difficult solid feeding control and no ignition control, wear and sludge still a problem	Surface hardening by using C, Mn, Ni, Cr, Si + crosshead piston design + ball valve	Claimed 6000 h
I. Bruenner Maschinenfabrik company, Univ. Dresden	1930–1945	Lignite	6 crosshead diesel engines 4Stroke 110/125 to 500/720, 1-, 2-, 3-, 6-, 1190 to 141,350, 168 to 1200	60 bar injection and self injection	95% < 60 7–21% ash	Stopped: Economically unjustified works	Prechamber 0.4–0.7% of total combustion chamber « Dresden-type » fluid dynamic flow control system (Nierger-Zimmer)	4000 h
Hanomag company	1935–1945	Lignite, SRC, Coffee	1 crosshead diesel engine 4Stroke 430/620, Kosmos licence + Schichau materials, 1-, 900/000, 220	Pre-chamber, 24 bar injection during admission phase	70% < 90 (max 250), 10% moisture, 5.3% ash, 45–50% volatiles	Premature fuel ignition, unburned particles not evacuated, dismantled during WWII	70 bar compressor injection system	700 h

### 2.1.1 Rudolf Diesel

Είναι γνωστό, ότι στα πρώτα πειράματα που πραγματοποίησε ο Diesel με βοηθούς τους Rudolf Pawlikowsky και Vogel χρησιμοποίησε ως καύσιμο ξηρή

σκόνη άνθρακα. Το 1892 σε ένα πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τον ίδιο τον Diesel με χρήση σκόνης άνθρακα, ο μετρητής πίεσης του κυλίνδρου εκσφενδονίστηκε από την πλευρά του κυλίνδρου, περνώντας ανάμεσα από τον Diesel και τον βοηθό του τον Vogel, και συνετρίβη σε ένα τοίχο. Το περιστατικό αυτό έχει αναφερθεί ότι προκάλεσε ολοκληρωτική καταστροφή του κινητήρα και σοβαρό τραυματισμό του Diesel.

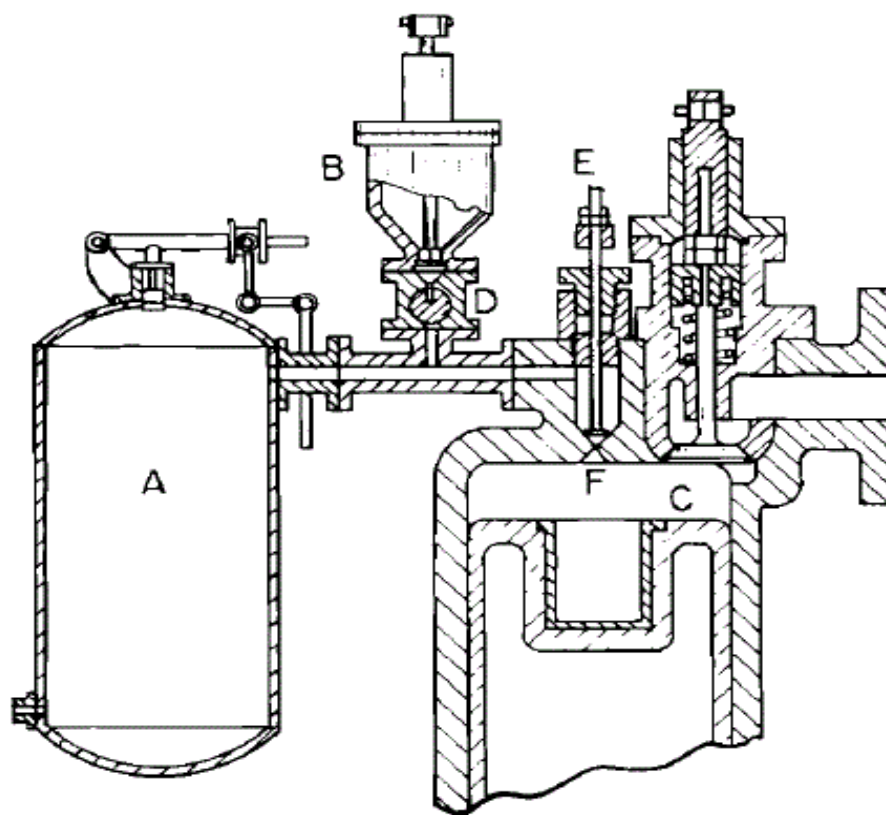
Για το τι ακριβώς συνέβη, ο ίδιος ο Diesel περιγράφει διαφορετικά το γεγονός στο βιβλίο του «The Origin of the Diesel Engine» το οποίο εκδόθηκε το 1913: 'Στις 10 Αυγούστου του 1893, 20 μέρες μετά το ξεκίνημα των πειραμάτων και με την παρουσία του φίλου μου του Vogel, πραγματοποιήθηκε η πρώτη έγχυση καυσίμου παρά την έλλειψη συμπίεσης, το οποίο ήταν πετρέλαιο. Και οι δύο περιμέναμε με αγωνία τα αποτελέσματα. Η ανάφλεξη πραγματοποιήθηκε αμέσως και παρατηρήθηκε μια εκτόξευση της πίεσης κοντά στις 80 ατμόσφαιρες. Στην πραγματικότητα η πίεση ήταν πιο υψηλή. Ο μετρητής πίεσης καταστράφηκε από την δυνατή έκρηξη και εκσφενδονίστηκε περνώντας ανάμεσα από τα κεφάλια μας. Η μηχανή δεν έπαθε απολύτως τίποτα παρά τις υψηλές πιέσεις, λόγω του ότι είχε κατασκευαστεί από πολύ ανθεκτικά υλικά.'

Από τα λόγια αυτά του Diesel φαίνεται τελικά ότι το καύσιμο σε αυτό το πείραμα ήταν το πετρέλαιο και όχι ξηρή σκόνη άνθρακα και ότι η μηχανή αποκτούσε κίνηση από μια εξωτερική πηγή ισχύος. Αυτό το πείραμα δεν αποτέλεσε τελικά τον λόγο για τον οποίο ο Diesel σταμάτησε να χρησιμοποιεί τον άνθρακα ως καύσιμο. Ούτως ή άλλως το πρόβλημα της χρήσης του άνθρακα σε μηχανές εσωτερικής καύσης δεν ήταν οι πιέσεις που αναπτύσσονταν αλλά η φθορά του κυλίνδρου και η τριβή του κινητήρα. Για τον λόγο αυτό ο Diesel στράφηκε στη χρήση καυσίμων σε υγρή μορφή.

Στο σύστημα έγχυσης άνθρακα του Diesel, Σχήμα 2.1, η ξηρή σκόνη άνθρακα ήταν αποθηκευμένη στο ρεζερβουάρ Β και μετρημένες ποσότητες αυτής απελευθερώνονταν από την περιστροφική βαλβίδα Δ, όπως συνέβαινε και στην πατέντα του Medhurst 95 χρόνια πριν. Όταν η βαλβίδα έγχυσης Γ ανασηκωνόταν, η ξηρή σκόνη άνθρακα εγχυόταν στον κύλινδρο με την βοήθεια αέρα υψηλής πίεσης που ήταν αποθηκευμένος στο δοχείο Α.

Δουλεύοντας για τον Diesel πρέπει να ήταν πάρα πολύ κουραστικό για τους Vogel και Pawlikowsky. Επίσης αρκετές φορές ο Diesel ήθελε να παρουσιάσει τις

ιδέες των συνεργατών του ως δικές του. Αυτό αποτέλεσε την αιτία ο Pawlikowsky να παραιτηθεί από το έργο το 1898.



**Σχήμα 2.1** - Το σύστημα έγχυσης ξηρής σκόνης άνθρακα του Diesel [25]

Στις 29 Αυγούστου του 1941 δημοσιεύτηκε ένα άρθρο σχετικό με τα προβλήματα που αντιμετώπισε ο Diesel χρησιμοποιώντας ως καύσιμο τον άνθρακα. Τα προβλήματα αυτά επικεντρώνονταν στην εμφανή αδυναμία του ίδιου να αποτρέψει την τέφρα που περιέχεται στον άνθρακα να προκαλεί τόσο μεγάλη φθορά στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Σημειώνεται ότι η περιεκτικότητα του πετρελαίου σε τέφρα είναι της τάξης του 1% (το ποσοστό δεν ήταν υψηλότερο της μέρες του Diesel), ένας «καλός» άνθρακας έχει περιεκτικότητα σε τέφρα κοντά στο 4%, ενώ άλλα είδη άνθρακα μπορούν να φθάσουν σε ποσοστό 10-25%. είναι συνεπώς κατανοητό το πρόβλημα που αντιμετώπιζε ο Diesel.

### **2.1.2 Rudolf Pawlikowski**

Ο Rudolf Pawlikowsky γεννήθηκε στη Δρέσδη στις 16 Ιουνίου του 1868. Το 1893 απέκτησε το δίπλωμα του Μηχανολόγου Μηχανικού στο Πολυτεχνείο της

Δρέσδης. Στα πρώτα του βήματα στο κομμάτι της έρευνας υπήρξε συνεργάτης του Rudolf Diesel σε διάφορα πειράματα στα οποία το καύσιμο ήταν κονιοποιημένος άνθρακας. Οι δυσκολίες όμως που παρατηρήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων ανάγκασαν τον Diesel να στραφεί στη χρήση υγρών καυσίμων, σε αντίθεση με τον Pawlikowsky ο οποίος επέμεινε στη χρήση στερεών καυσίμων σε μηχανές εσωτερικής καύσης.

Η προσπάθεια και η επιθυμία του Pawlikowsky για την χρήση στερεών καυσίμων βασιζόταν στην έντονη ανησυχία του ίδιου για τα περιορισμένα αποθέματα πετρελαίου της Γερμανίας. Το 1930 πολλοί ειδικοί άρχισαν να ισχυρίζονται ότι τα αποθέματα πετρελαίου θα είχαν εξαντληθεί μέσα στα επόμενα 10 με 12 χρόνια. Η Γερμανία όμως είχε τεράστια αποθέματα άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα μεταξύ του 1924 και 1933 καταγράφηκε στη Γερμανία πάνω από το 20% της παγκόσμιας παραγωγής γαιάνθρακα και πάνω από το 75% της παγκόσμιας παραγωγής μαύρου άνθρακα.

Το Φεβρουάριο του 1898 ο Pawlikowsky εργάστηκε στην εταιρεία Dessauer Maschinenfabrik και τον ίδιο χρόνο έγινε αρχιμηχανικός στην εταιρεία Gorlitz Maschinenbau AG. Σε αυτήν την εταιρεία φαίνεται να είχε ασχοληθεί με την αξιολόγηση των βιομηχανικών διεργασιών άλλων εταιρειών.

Όλες αυτές οι δραστηριότητες τον κατέστησαν οικονομικά αυτόνομο και από το 1941 αφιερώθηκε αποκλειστικά στην κατανόηση της λειτουργίας των μηχανών εσωτερικής καύσης με χρήση κονιοποιημένου άνθρακα ως καύσιμο.

Ο ίδιος μέχρι τον θάνατο του (Οκτώβριος 1947) είχε επενδύσει 2 εκατομμύρια μάρκα σε αυτό το έργο.

Το μυστικό της επιτυχίας του Pawlikowsky, εάν υπήρξε κάτι τέτοιο, φαίνεται να ήταν η αφαίρεση της τέφρας, με πρόσδοση πεπιεσμένου αέρα μέσω των στομιών εξαγωγής.

Η επικεφαλίδα του άρθρου (Σχήμα 2.2) είναι αρκετά παραπλανητική διότι αναφέρει, ότι η ίδια η μηχανή λειτουργούσε με άνθρακα για 12 χρόνια. Λαμβάνοντας υπόψη τα σοβαρά προβλήματα φθοράς και τριβής του κινητήρα από την χρήση άνθρακα κάτι τέτοιο ήταν, προφανώς, αδύνατο.

Ο Pawlikowsky πήρε τα δύο πρώτα γράμματα από το όνομα και το επίθετό του και ονόμασε τον κινητήρα RUPA. Η πρόθεση του Pawlikowsky με την δημιουργία αυτού του κινητήρα ήταν η κάλυψη του φορτίου αιχμής σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω του ότι ένας κινητήρας εσωτερικής

καύσης θα μπορούσε να σταματήσει πιο γρήγορα σε σχέση με ένα ατμοηλεκτρικό σταθμό.

## ENGINE IS RUN 12 YEARS USING PULVERIZED COAL AS ONLY FUEL

\* \* \* \*

By ISRAEL KLEIN.

Pittsburgh, Pa., Nov. 27.—Use of coal as fuel is so commonplace that it has long been taken for granted. But as a fuel for internal combustion engines it has opened the eyes even of the coal experts and engineers assembled at the Carnegie Institute of Technology here in the second international conference on bituminous coal.

Injecting coal, even finely powdered coal, in an engine has been believed impossible even by the best engineers. What about the ash accumulation in the cylinders? And the scored cylinder walls and pistons? These and other difficulties seemed to offset any possibility of running an internal combustion engine with coal.

Yet along comes Rudolph Pawlikowski from Gorlitz, Germany, and tells the engineers assembled here that he has been doing exactly this for the last 12 years. Not only that, but he has found no difficulty whatever in running the same engine for this length of time and has saved a considerable sum doing it.

Pawlikowski is known as one of the leading experts on internal combustion engines in Europe. He helped Rudolph Diesel develop his oil-burning engine while he studied the possibilities of burning coal direct as a fuel for such engines. He established a company for this purpose in 1902.

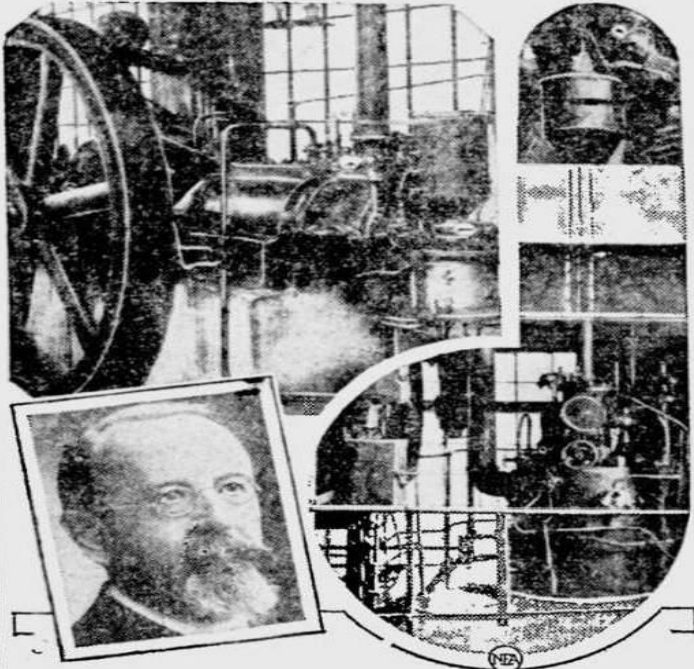
**Shows Little Wear.**

Since 1916, he has been operating a single cylinder, four-cycle engine with finely powdered coal as fuel, and the engine has been kept running these 12 years without the need of reboring its cylinder or replacing the piston. In fact, the only wear on it was about four one-hundredths of an inch at the top of the cylinder wall, not enough to cause any serious loss of power.

This engine, like the Diesel, is of the high compression type. The powdered coal is poured into a trough at the top and allowed to filter into the engine through a chute. This filtration is controlled by a governor so that only a small amount at a time comes into the combustion chamber.

There the coal is injected under a pressure of 440 pounds to the square inch. At the same time air under the same pressure is forced into the chamber and the union of these mixtures causes the combustion and power stroke of the piston.

After that comes the question



The single-cylinder internal combustion engine which burns pulverized coal is shown at upper left, with the method of supplying the fuel through a chute from above shown at right. Rudolph Pawlikowski, at lower left, is its designer.

of ejecting the ash of the burned coal. This was first done by admitting clean compressed air at 880 pounds pressure to force out the ash through the exhaust ports. Even before doing this, the compressed air filled the space between piston and cylinder so as to keep the ash out.

**Ash Is Washed Out.**

Now, however, a heavy spray of lubricating oil—more than is used generally in Diesel engines—washes out the ash, so that it does no harm to the cylinder wall or piston. The ash-filled oil is then cleared of the ash by centrifugal force and used again.

Operation of the coal engine is said to be 80 per cent cheaper than a Diesel. The Pawlikowski engine, for instance, produces one brake horsepower at a cost of a little more than a tenth of a cent. The cost with oil would be a little less than a half a cent. For a

1000 horsepower operating 3000 hours a year, the saving would be \$10,000.

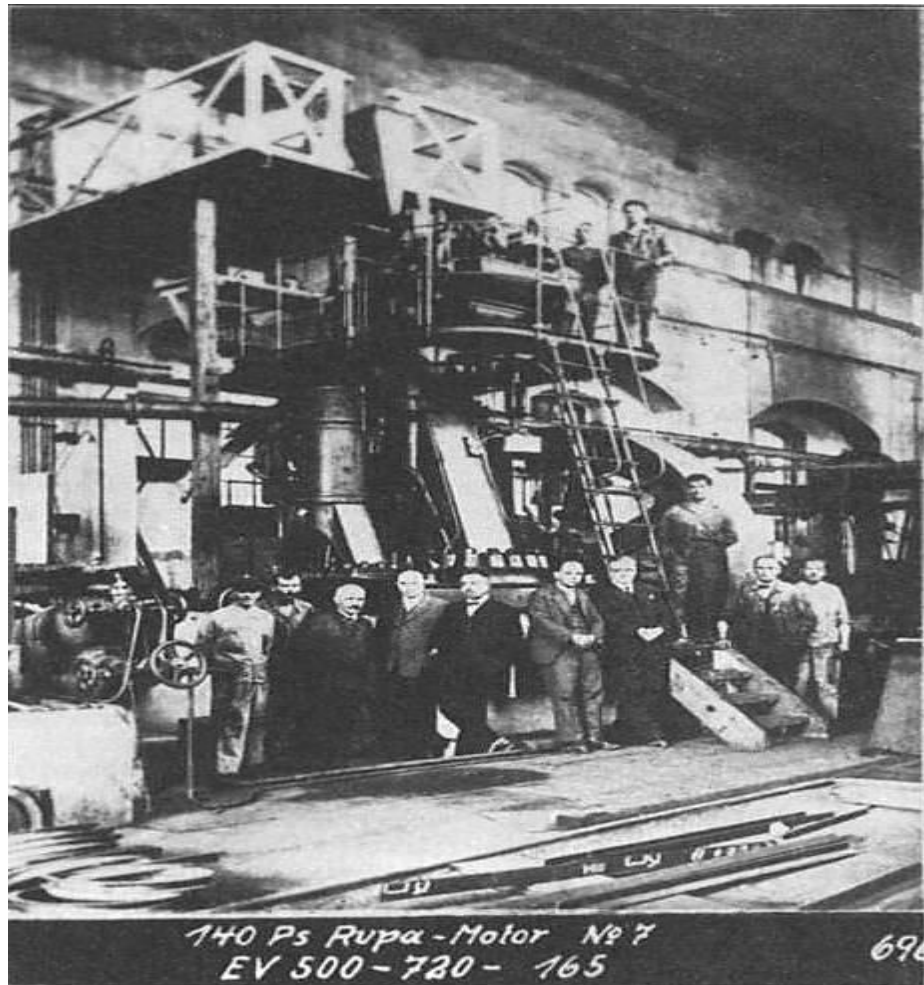
In addition, says Pawlikowski, the engine is from 30 to 35 per cent more efficient than the steam turbine.

Besides burning coal, this engine will work equally as well with turf, sawdust, charcoal, rice dust, flour and even coke as fuel.

Pulverized coal consists of particles varying in size from one one-hundredth to one one-thousandth of an inch. Yet even an average sized particle is equal to more than a quarter million oxygen molecules which are required for perfect combustion.

Intelligence tests given by psychologists have shown that Sing Sing prisoners as a group have a slightly higher rating than the "draft army" of the United States during the war.

Σχήμα 2.2 - Άρθρο εφημερίδας για τη Μ.Ε.Κ του Pawlikowsky [25]

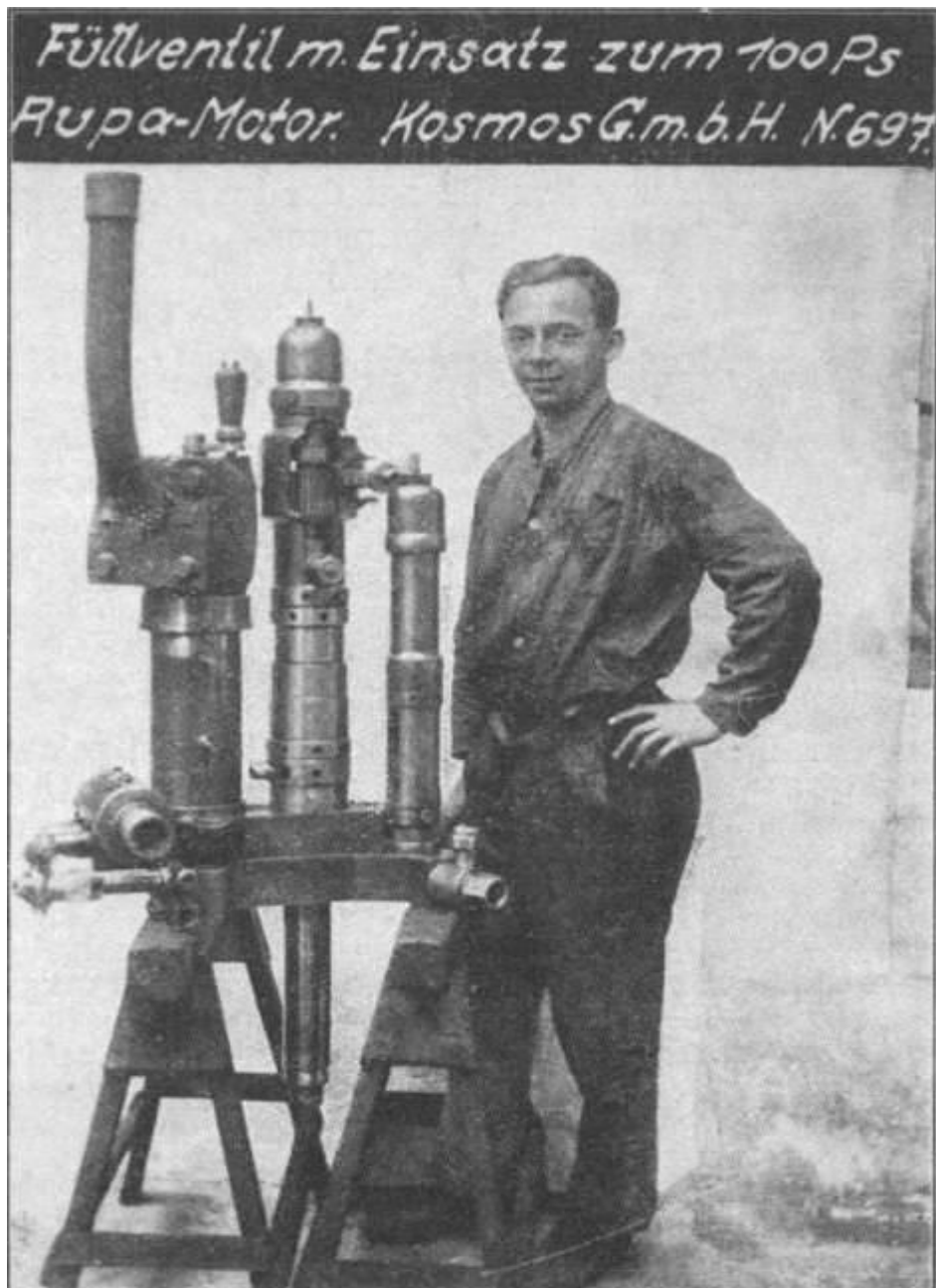


**Σχήμα 2.3** - Ο κινητήρας No 7 του Pawlikowsky το 1930 [25]

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.3, ο κινητήρας αυτός απέδιδε 140 ίππους. Επίσης η αναλογία ισχύος/βάρους δεν ήταν ιδιαίτερα εντυπωσιακή δεδομένου ότι ο κινητήρας είχε ύψος όσο ένα σπίτι, ενώ λειτουργούσε στις 166 rpm. Η διαδρομή του εμβόλου S ήταν 720 mm και η διάμετρός του  $D=500$  mm. Το γεγονός ότι αυτός ο κινητήρας ονομάστηκε Rupa No7 δείχνει ότι πρέπει να υπήρχαν αρκετά πολύπλοκα προβλήματα κατά την διαδικασία κατασκευής του.

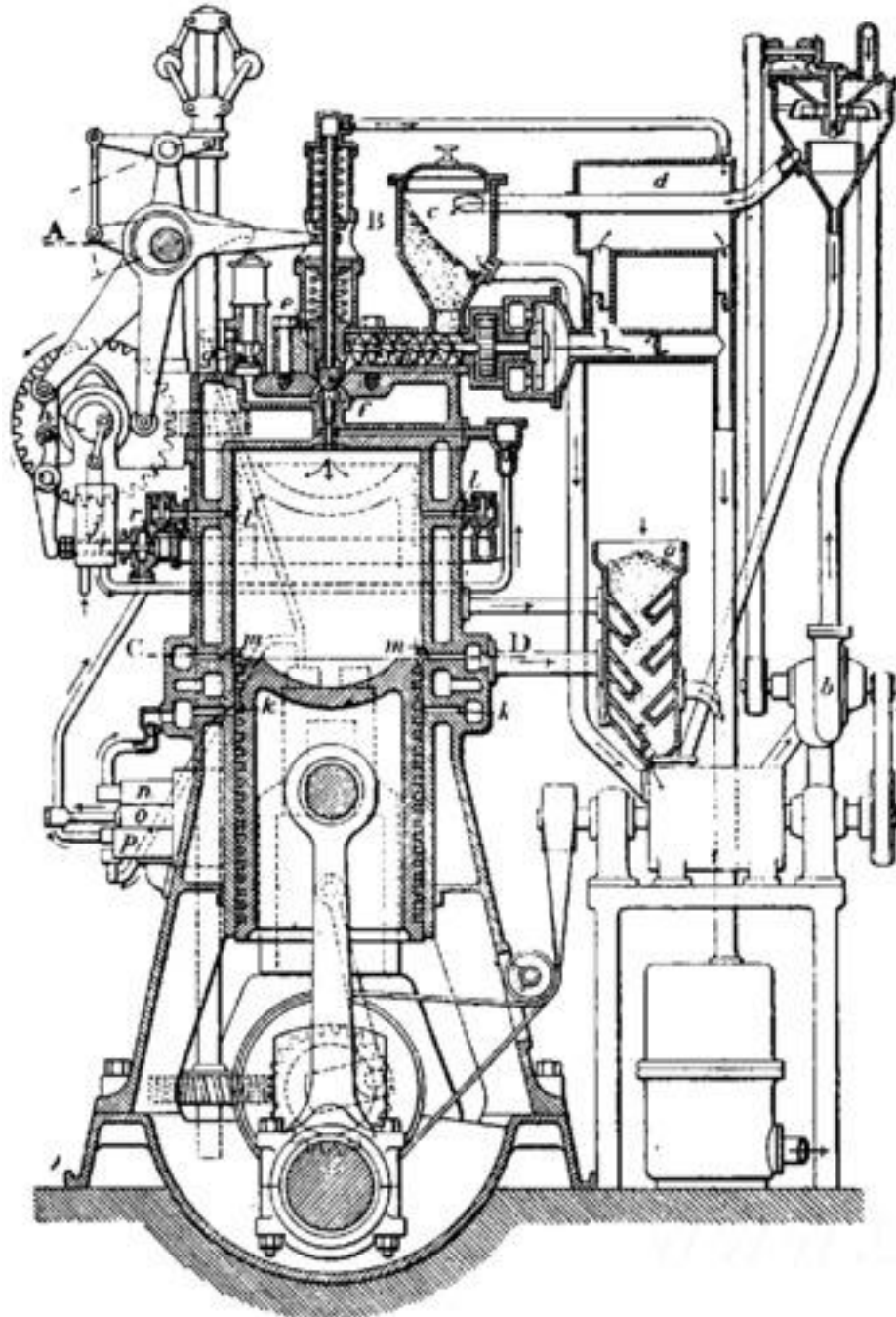
Η κατασκευή της βαλβίδας εισαγωγής του καυσίμου (Σχήμα 2.4) θεωρούνταν το πιο σημαντικό και το πιο δύσκολο κομμάτι του σχεδιασμού της μηχανής. Η λεζάντα στο πάνω μέρος της εικόνας αναφέρει ότι η βαλβίδα σχεδιάστηκε για κινητήρα που απέδιδε 100 ίππους. Άρα δεν αποτελεί κομμάτι του κινητήρα No 7, ο οποίος αποδίδει 140 ίππους.





**Σχήμα 2.4** - Η βαλβίδα εισαγωγής του καυσίμου για έναν από τους κινητήρες του Pawlikowsky [25]

Το έμβολο του κινητήρα στο Σχήμα 2.5 είχε διάμετρο 420 mm με διαδρομή κυλίνδρου 630 mm. Ο κινητήρας απέδιδε 80 ίππους στις 160 rpm. Αυτό αποδεικνύει ότι το παραπάνω σχέδιο δεν αναφέρεται ούτε στον κινητήρα Νο 7 ούτε στον κινητήρα των 100 ίππων, του οποίου η βαλβίδα εισαγωγής εικονίζεται στο Σχήμα 2.4. Η βαλβίδα έγχυσης καυσίμου στο Σχήμα 2.5 βρίσκεται στη θέση Β και τροφοδοτείται με σκόνη άνθρακα μέσω ενός Αρχιμήδειου κοχλίου.



**Σχήμα 2.5** - Το σχέδιο ενός από τους κινητήρες RUPA του Pawlikowsky [25]

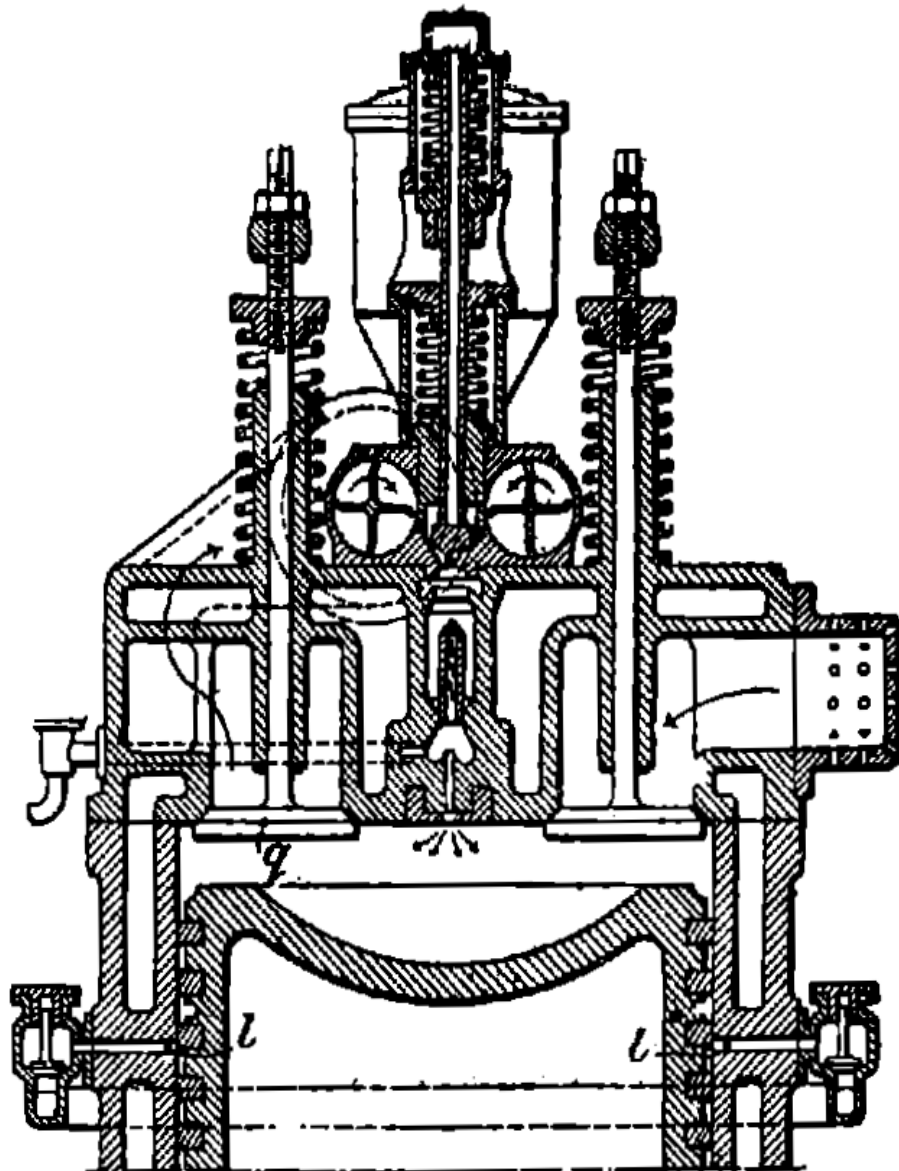
Στη θέση C υπάρχει ένα ρεζερβουάρ και από το σχέδιο φαίνεται ότι η σκόνη άνθρακα μεταφέρεται εκεί με χρήση πεπιεσμένου αέρα. Η βαλβίδα B λειτουργεί με έναν εκκεντροφόρο άξονα στα αριστερά. Ο εκκεντροφόρος άξονας αποκτά κίνηση από τη στροφαλοφόρο άτρακτο μέσω ενός κατακόρυφου άξονα και δυο ζεύγη λοξών γρاناζιών. Κάτω από τον εκκεντροφόρο άξονα υπάρχει μια μικρή αντλία με ένα σωλήνα ο οποίος οδηγεί στο κάτω μέρος της βαλβίδας B.

Αυτή η βαλβίδα προφανώς δημιουργούσε ένα ρεύμα αέρα με στόχο να επιτύχει την έγχυση της σκόνης άνθρακα. Από το σχέδιο όμως φαίνεται ότι η αντλία είναι μάλλον μικρή για αυτή την διαδικασία. Ακριβώς αριστερά της βαλβίδας Β υπάρχει ακόμα κάτι που μοιάζει και αυτό με μια μικρή αντλία, η οποία φαίνεται να κινείται από ένα έκκεντρο του εκκεντροφόρου άξονα.

Η συσκευή στα δεξιά στο Σχήμα 2.5, η οποία αποκτά κίνηση μέσω ενός ιμάντα έχει σαφώς κάτι να κάνει με την τροφοδοσία σκόνης άνθρακα, αλλά οι λεπτομέρειες λειτουργίας της δεν είναι ξεκάθαρες μέχρι και σήμερα. Τέλος, το αντικείμενο σε σχήμα χωνιού στο πάνω δεξιά κομμάτι της μηχανής φαίνεται να είναι κάποιο είδος περιστροφικού διαχωριστή, του οποίου η λειτουργία είναι προφανώς η απόρριψη ή ανακύκλωση σωματιδίων σκόνης άνθρακα τα οποία ήταν πολύ μεγάλα σε μέγεθος.

Μέχρι τώρα μπορεί να επιβεβαιωθεί ότι ο σχεδιασμός των κινητήρων του Pawlikowsky διέφερε από αυτόν του Diesel. Ο Diesel χρησιμοποιούσε πεπιεσμένο αέρα για την έγχυση σκόνης άνθρακα μέσω των βαλβίδων στον θάλαμο καύσης. Αντίθετα ο Pawlikowsky πρόσθεσε στον κινητήρα έναν (προ)θάλαμο, όπου το κονιοποιημένο καύσιμο προαναφλεγόταν. Η πίεση που αναπτυσσόταν κατά την διάρκεια αυτής της προανάφλεξης, επέτρεπε την έγχυση στον κύριο θάλαμο καύσης του υπόλοιπου άκαυστου καυσίμου σε χαμηλότερη πίεση σε σχέση με την άμεση έγχυση. Αυτός ο προθάλαμος είναι κατά πάσα πιθανότητα η ορατή δομή στο Σχήμα 2.6 ακριβώς κάτω από τους δυο κοχλίες τροφοδοσίας άνθρακα.

Ο Pawlikowski προσπάθησε επίσης να επιλύσει το ζήτημα της φθοράς με την ανάπτυξη ενός ειδικού συστήματος ρυθμιζόμενων εμβόλων με ελατήρια («δακτυλίδια»), περιορίζοντας έτσι το πέρασμα της τέφρας στον στροφαλοθάλαμο. Οι εργασίες του Pawlikowski σταμάτησαν το 1945 και οδήγησαν συνολικά σε 30 πατέντες. Ξεκινώντας το 1925, με βάση την έρευνα του Pawlikowski, τέσσερις γερμανικές εταιρείες ανέπτυξαν κινητήρες που ήταν σε θέση να λειτουργήσουν με χρήση σκόνης άνθρακα ως καύσιμο.



Σχήμα 2.6 - Η κεφαλή του κυλίνδρου ενός κινητήρα RUPA του Pawlikowsky [25]

### 2.1.3 I-G Βιομηχανία Farben

Η συγκεκριμένη γερμανική εταιρεία κατασκεύασε δυο διαφορετικούς κινητήρες μεταξύ 1925 και 1929, καθώς και τρεις μικρότερες μηχανές για έρευνα. Έχοντας υιοθετήσει το σύστημα τροφοδοσίας του Pawlikowski, η φθορά παρέμενε το κύριο ζήτημα. Κατάφεραν να περιορίσουν το ποσοστό φθοράς με την ενσωμάτωση «δακτυλιδιών» στα τοιχώματα του κυλίνδρου, έτσι ώστε να μπορούν να προσαρμόζονται συνεχώς κατά τη διάρκεια της διαδρομής του

εμβόλου. Ο καθαρισμός εσωτερικά των κυλίνδρων, οι όποιοι καλύπτονταν με άκαυστα σωματίδια, διεξήχθη με έμφυση πεπιεσμένου αέρα, νερού ή αργού πετρελαίου κατά το τέλος της φάσης της εξαγωγής των αερίων. Η δυσκολία στη σταθεροποίηση του κινητήρα, λόγω του «ανακριβούς» συστήματος τροφοδοσίας σκόνης λύθηκε με έγχυση της σκόνης μέσα στον κύλινδρο με την βοήθεια πεπιεσμένου αέρα στα 60 bar.

#### **2.1.4 Schichau Werkege**

Μεταξύ 1930 και 1939, η εταιρεία Schichau διεξήγαγε δοκιμές στον κινητήρα της «ΚΟΣΜΟΣ» που είχε αναπτυχθεί από τον Pawlikowski, και αντιμετώπισε τα ίδια προβλήματα, όπως την ασταθή τροφοδοσία του καυσίμου και την επακόλουθη ανάφλεξη. Η Schichau ήταν η πρώτη που δοκίμασε τη χρήση σκληρών κραμάτων με βάση το χάλυβα και το χρώμιο, το νικέλιο, το πυρίτιο και το μαγγάνιο, έτσι ώστε να καταφέρει να βελτιώσει την αντοχή στη φθορά. Επίσης δημιούργησαν βαλβίδα σε σχήμα σφαίρας, ειδική για τη σκόνη, ώστε να αυξηθεί η ποιότητα σφράγισης κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα. Αυτή η βαλβίδα έδειξε να είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στη φθορά. Ο κινητήρας φέρεται να είχε λειτουργήσει για 6000 ώρες. Η έρευνα στη συνέχεια σταμάτησε λόγω έλλειψης οικονομικής υποστήριξης.

#### **2.1.5 I.Bruenner Maschinenfabrik**

Η συγκεκριμένη γερμανική εταιρεία κατασκεύασε 6 κινητήρες που μπορούσαν να λειτουργήσουν με σκόνη άνθρακα, κατά τη διάρκεια της περιόδου 1930-1945. Ξεκίνησαν με ένα σύστημα ψεκασμού που ήταν βασισμένο σε αυτό του Pawlikowski, το οποίο τροποποιήθηκε αργότερα στο πανεπιστήμιο της Δρέσδης. Αυτό το νέο σύστημα ψεκασμού σκόνης άνθρακα βοήθησε στην αύξηση του ρυθμού ροής του καυσίμου, με αποτέλεσμα να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της μέγιστης ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα έως και τις 1200 rpm. Σκόπιμα χρησιμοποίησαν σωματίδια άνθρακα 60 μικρών που περιείχαν 21% κατά βάρος τέφρα, με αποτέλεσμα υψηλά ποσοστά φθοράς και μεγαλύτερη διάρκεια καύσης. Λειτούργησαν τον κινητήρα για 4000 ώρες, χάρη στη χρήση ενός ειδικού χάλυβα, σκληρούμενο με άνθρακα, μαγγάνιο, νικέλιο, χρώμιο και πυρίτιο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τα «δακτυλίδια» και για την κεφαλή του εμβόλου. Η έρευνά τους έφτασε στο τέλος της με την έναρξη του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου.[3]

### **2.1.6 Hanomag (Hannoversche Maschinenbau AG)**

Η συγκεκριμένη εταιρία ανέπτυξε έναν κινητήρα τροφοδοτούμενο με σκόνη άνθρακα μεταξύ 1935 και 1945. Πολύ λίγες πληροφορίες υπάρχουν λαμβάνοντας υπόψη ότι η μηχανή τους φέρεται να είχε λειτουργήσει για 700 ώρες. Η εταιρεία εργαζόταν πάνω σε μια τροποποίηση του συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου στον κινητήρα. Η σκόνη κατευθυνόταν σε (προ)θάλαμο (μεγέθους 0,4-0,7% του όγκου του «κυρίου» κυλίνδρου) κατά την φάση της εισαγωγής, επιτρέποντας έτσι μια χαμηλή πίεση έγχυσης (24-29 bar). Κατά τη φάση της συμπίεσης, το στερεό καύσιμο αναμιγνύονταν με αέρα με έναν αποτελεσματικό τρόπο οδηγώντας σε καλή διαδικασία ξήρανσης και έναρξης της απαερίωσης, που ακολουθείται από ανάφλεξη και καύση στον κύριο θάλαμο. Κατά τις δοκιμές τους συνάντησαν το πρόβλημα της πρόωρης ανάφλεξης και ατελούς εκκένωσης των άκαυστων σωματιδίων στο εσωτερικό του προθαλάμου και το επέλυσαν με πρόσδοση συμπιεσμένου αέρα στο τέλος της φάσης της εξαγωγής των καυσαερίων. Το συμπέρασμα ήταν ότι ο κινητήρας δεν μπορούσε να λειτουργήσει σε υψηλή ταχύτητα περιστροφής και έτσι η έρευνα εγκαταλείφθηκε. Ο κινητήρας Hanomag καταστράφηκε κατά την διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου.

### **2.1.7 Ιαπωνικές μηχανικές δοκιμές**

Μεταξύ 1940 και 1945, ιαπωνικές ερευνητικές ομάδες εργάστηκαν εκτενώς σχετικά με τη χρήση ξηρής σκόνης άνθρακα σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Παρόλα αυτά, τα πολλά και φαινομενικά ενδιαφέροντα αποτελέσματα είναι διαθέσιμα μόνο στα ιαπωνικά. Μερικά από τα συστήματα που αναφέρονται μαρτυρούν το υψηλό επίπεδο ανάπτυξης που επετεύχθη από τον Nakasaki [3,7], όπως δείχνει το Σχήμα 2.7.



**Πίνακας 2.2 – Σύνοψη χρήσης στερεών καυσίμων σε Μ.Ε.Κ. από τον 2<sup>ο</sup> παγκόσμιο πόλεμο μέχρι την πετρελαϊκή κρίση [3]**

Author/company	Date	Fuel	Engine, bore/stroke (mm), number of cylinders, displacement per cyl. (cc), design speed (rpm)	Fuel feeding mode	Mean particle size (µm), composition (%w)	Issues
1945–1973 Hanse South Carolina University	1949	Slurry Bituminous Coal 20%(diesel)	Diesel 4Stroke Hill 4R, 4-, 89/13, 38.30, 1200	Mechanical injection Bosch 124 bar	45–75 –	Unstable injection, injection nozzles seizure, lower efficiency. No wear data.
Tracy Southwest Research Institute	1957	Slurry coal 30%(diesel)	Diesel 4Stroke Caterpillar, na/na, 1-, 3400, 1000	Commercial injection system	20 –	Seizing of pump and nozzles, wear 3.5 times more than diesel.
Marshall and Shelton Virginia Polytechnic Institute	1959	Dry coal 50% w/diesel	Diesel 4Stroke Nordberg, 114/133, 1-, 1400, 1750	Coal by admission pipe, diesel fuel injection	<450 –	Constant efficiency decrease
Rich and Walker Howard University	1969	Dry coal/diesel	Diesel 4stroke Nordberg, 114/133, 1-, 1400, 1000	Coal by admission pipe, diesel fuel injection	45% < 75 –	Important wear, crankcase oil contamination, rings seizing. Efficiency drops from 18 to 13%. Crankcase oil contamination, efficiency drops from 27% (pure diesel) to 11%. wear 800 µm/h (0.16 pure diesel)

### 2.2.1 Πανεπιστήμιο Νότιας Καρολίνας

Ο Hanse ήταν ο πρώτος το 1949 που άρχισε να εργάζεται πάνω στο θέμα μετά τον πόλεμο. Δοκίμασε ένα τετράχρονο κινητήρα (μοντέλο P-4 – των 800cc) που



τροφοδοτήθηκε με μίγμα άνθρακα/πετρελαίου σε αναλογία 20%-80% κατά βάρος. Η μέση διάμετρος των σωματιδίων ήταν 45-75 μm.

Χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα έγχυσης της Bosch με πίεση έγχυσης 124 bar. Τα ζητήματα που πρόέκυψαν ήταν: συχνό μπλοκάρισμα της βελόνας έγχυσης και αστάθεια της μηχανής σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Οι δοκιμές διεξήχθησαν στις 1200 rpm, όπου και παρατηρήθηκε μια βαθμιαία μείωση ισχύος κατά την διάρκεια των τεσσάρων δοκιμών.

### **2.2.2 Southwest Research Institute**

Το 1957, οι Tracy και συνεργάτες πραγματοποίησαν μια δοκιμή διάρκειας τρεισήμισι ωρών σε 4-X μονοκύλινδρο μηχανή Caterpillar των 3400 cc, η όποια λειτούργησε στις 1000 rpm με διάλυμα CDS. Το μηχανικό σύστημα έγχυσης που χρησιμοποιήθηκε δεν είναι γνωστό. Χρησιμοποιήθηκε καύσιμο με 30% κατά βάρος άνθρακα και 70% κατά βάρος πετρέλαιο, με σωματίδια μεγέθους μικρότερων των 20 μm. Τα κύρια ζητήματα που δημιουργήθηκαν ήταν η φθορά (που στην συγκεκριμένη περίπτωση ήταν 35 φορές μεγαλύτερη από ότι στη λειτουργία με πετρέλαιο), το συχνό «πάγωμα» της λειτουργίας των εγχυτήρων και των αντλιών, καθώς και η μείωση της απόδοσης.[3]

### **2.2.3 Virginia Polytechnic Institute**

Το 1959, οι Μάρσαλ και Shelton λειτούργησαν για 45 ώρες έναν 4-X κινητήρα Diesel 1400 cc της Nordberg στις 1750 rpm. Το πετρέλαιο τροφοδοτούνταν άμεσα (direct injection), ενώ η σκόνη άνθρακα από μια τροφοδοτική βαλβίδα, η οποία είχε εγκατασταθεί στη σωλήνωση εισαγωγής. Τα ζητήματα που δημιουργήθηκαν ήταν: σημαντική φθορά, μόλυνση στον στροφαλοθάλαμο με πετρέλαιο, μπλοκάρισμα του κινητήρα λόγω των άκαυστων υπολειμμάτων, καθώς και μείωση της απόδοσης από 18% σε 13%.

### **2.2.4 Howard University**

Το 1969 οι Rich και Walker πραγματοποίησαν μια μελέτη με σκοπό να συλλέξουν κάποια στοιχεία για πιθανή χρήση ανθρακικού μίγματος σε κινητήρα ατμομηχανής. Χρησιμοποιήθηκε μια μηχανή τύπου SD45 Electro-motive. Έγινε

συλλογή τεχνικών δεδομένων κατά τη διάρκεια δοκιμών μίγματος σε 4-Χ κινητήρα Diesel 1400 cc της Nordberg στις 1000 rpm. Η μέση διάμετρος των σωματιδίων ήταν περίπου 75 μm και ο χρόνος λειτουργίας ήταν περίπου 100 ώρες. Τα ζητήματα που δημιουργήθηκαν ήταν ότι η φθορά είχε φτάσει τα 890 μm/ώρα (έναντι 0,16 για καθαρό πετρέλαιο) ενώ υπήρξε μόλυνση του πετρελαίου στον στροφαλοθάλαμο. Η θερμική απόδοση μειώθηκε από 27% για καθαρό πετρέλαιο στο 11% με το μίγμα πετρελαίου και ξηρής σκόνης άνθρακα (CDS).

### **2.3 1973-σήμερα: Χρήση μίγματος ξηρής σκόνης με νερό**

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιόδους, μετά από την πρώτη πετρελαϊκή κρίση το 1973, οι μελέτες που διεξήχθησαν αυτήν την περίοδο σχετικά με την χρήση σκόνης άνθρακα σε μηχανές εσωτερικής καύσης επικεντρώθηκαν κυρίως στη χρήση μίγματος άνθρακα-νερού.

Οι Η.Π.Α. αποφάσισαν να αναπτύξουν τεχνολογίες που βασίζονται στον άνθρακα, ο οποίος είναι ευρέως διαθέσιμος στη δική τους επικράτεια. Με βάση τα πολλά υποσχόμενα έργα των προηγούμενων χρόνων, το Υπουργείο Ενέργειας προσέφερε χρηματοδότηση για μεγάλα έργα, συμπεριλαμβανομένων των εξελίξεων του κινητήρα του άνθρακα είτε σε εργαστηριακή κλίμακα είτε σε πραγματικές συνθήκες, όπως σιδηροδρομικές εφαρμογές ή μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το 1975 στην Αγγλία, για λόγους πάλι ενεργειακής ανεξαρτησίας, ο κινητήρας LTD της Perkins βοήθησε στην εξέλιξη της χρήσης σκόνης άνθρακα σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, κυρίως σε μορφή μίγματος. Ξεκινώντας από το 1980, με σκοπό την παραγωγή ενός ανεξάρτητου από το πετρέλαιο καυσίμου, το νερό είχε γενικά προτιμηθεί έναντι του πετρελαίου ως μέσο δημιουργίας μίγματος με άνθρακα. Οι κινητήρες και οι λειτουργικές λεπτομέρειες φαίνονται στον **Πίνακας 2.3**.

**Πίνακας 2.3 – Σύνοψη χρήσης στερεών καυσίμων σε Μ.Ε.Κ. από το 1973 έως σήμερα [3]**

Author/company	Date	Fuel	Engine, bore/stroke (mm), number of cylinders, displacement per cyl. (cc), design speed (rpm)	Alimentation mode	Mean particle size (µm) composition (% <sub>wt</sub> )	Issues	Improvements	Total tests length
1973–2012								
Marshall, Walters Virginia Polytech Inst. [26]	1977	Slurry 15% SRC/diesel	Diesel 4Stroke Nordberg 114/133, 1-, 1400, 1000 to 1800	Commercial injection system Nordberg	2	Moderate wear, nozzles seizure, efficiency dropped from 21 to 17%	Use of Solvent Refined Coal to minimize engine wear.	-
SwRI [54]	1978	Tens of different slurries	Laboratory diesel engine, 4Stroke, 96.5/95.3, 1-, 770, 900	100 bar injection	-	-	Screening of slurry composition impact on emissions	-
Tataiah, Lestz SwRI [26]	1979	Slurry 10, 20 and 30% coal/diesel And coal/diesel +2.8%water	Diesel 4Stroke, Hatz E-785 prechamber, 85/110, 1-, 600, 1200 to 2400	Commercial injection system	10	Coal increased exhaust temperature, engine and injector wear and decreased efficiency, Particulates, sulphur and smoke increased in exhaust	-	35 h
Tataiah, Wood SwRI [26]	1980	Slurry coal (up to 40%)/diesel + dry coal dust	Diesel 4Stroke, Mercedes OMD14, 95/128, 4-, 900, 1000	Commercial injection system	2	Unstable injection, injection nozzles seizure, lower efficiency.	Dry dust injector	11 h
Ryan et al. SwRI / NIPER [26]	1980	10 et 20% Coke, carbon black, coal/diesel	Diesel 4Stroke Cooperative Lubricant Research (CLR), 97/95, 1-, 700, 1000 to 2000	Bosch Commercial injection system	10 (agglomerates)	Efficiency increase, excepted at high speeds	Necessity to modify the injection system	-
Dunlay et al. Thermo Electron Corp. and Sulzer [28]	1980	31.6% coal/diesel slurry and 34% coal/water slurry (SRC II)	Crosshead Diesel 2 stroke Sulzer Bros.1RSA76, 760/1550, 1-, 703000, 120	Bosch commercial injection system	2	Injector wear, thermal efficiency close to pure diesel (40.4/41.2) Late combustion of the slurry	Cold start on slurry Set up of a accumulation injector	20 h
Marshall et al. Virginia Polytech. Inst. [26]	1981	Slurry 20, 32 and 40% coal/diesel	Diesel Nordberg 4T, 114/133, 1-, 1400, 1400	Commercial injection system	2	32–88% of pure diesel efficiency, increased emissions with coal. Injection pump clogging at 40% Coal. Crankcase oil contamination	Sulphur emissions 1.5–4 times higher and NOx 5–32 times higher than with pure oil.	-
Ryan et al. SwRI [26]	1982	3 types of carbon black in slurry/diesel at 10, 15 and 20%	Diesel 4T, Cooperative Lubricant Research (CLR), 97/95, 1-, 700, 1000 to 2000	Commercial injection system	0.013 and 0.037 (agglomerates)	Slight efficiency increase with respect to pure diesel, good wear resistance	Surface hardening	-
Walenell SwRI [26]	1983	Slurry 5, 10, 20% carbon black (« modul L »)/diesel	2T-diesel for locomotive Electro Motive type 567B, 216/254, 2-, 9300, 344 to 835	Commercial injection system	10 (agglomerates)	Injector blocking, sludge formation, important wear, 10% pure diesel efficiency.	-	-

Fadley and Doup General Electric [39]	1985–1992	Engine grade coal <sup>A</sup>	GE-7FDL, 4Stroke, 229/267, 6-, 11000, 1050	400 bar slurry injection system. Use of diesel pilot injection	12 1.8 %ash, 0.6% sulphur	Best CWS combustion rate at 373K and 3.29 bar intake pressure	One cylinder in test. Use of a diaphragm to separate slurry from diesel to prevent pump seizing; abandoned for a tungsten made free piston system incorporated between pump and injector. Two of the eight cylinders hard coated	500 h	
			GE-7FDL, 4Stroke, 229/267, 6-, 11000, 1050	–	12 1.8 %ash, 0.6% sulphur				–
			Dash 8 Locomotive, 4Stroke, na/na, 12-, na, na	–	12 1.8 %ash, 0.6% sulphur				High coal volatility improved burnout rate
General Motors And SwRI [34]	1985–1988	Engine grade coal <sup>A</sup>	Locomotive, 2 stroke diesel	Shuttle piston used to inject CDS with correct timing (called AM3AC design)	12 1.8 %ash, 0.6% Sulphur	–	4 exhaust valves, quickly abandoned since based on ultra clean coal, dedared not economically viable	–	
			Cooper Bessemer JS-1, 4Stroke, 330/406, 1-, 34700, 450	AMBAC Shuttle piston injection 800 bar	12 1.8 %ash, 0.6% Sulphur	Best CWS combustion rate when preheating at 418 K	Controlled emissions (Ammonia injection, Catalytic NOx Reduction, Na sorption for SO <sub>2</sub> removal, and bag house for particulate removal) Tungsten Carbide ring and liner, 1 cyl CWS, 5 cyl diesel fuel All cylinders on CWS, Very successful-considered as the basis for Tiac demonstration project	700 h	
Arthur D. Little Cooper Bessemer AMIAC [39]	1985–1993	Engine grade coal <sup>A</sup>	Experimental LSC 1, 394/560, 6-, na, na	19 holes nozzle CWS sapphire injector	12 1.8 %ash, 0.6% Sulphur	–	–	–	
			LSC-6, 394/560, 6-, na, na	19 holes nozzle CWS sapphire injector	12 1.8 %ash, 0.6% Sulphur	–	–	–	
			LSC-20, 4Stroke, 394559, 20, 68100, 400	Shuttle piston injection 1000 bar	12 1.8 %ash, 0.6% Sulphur	–	Admission: 408 K, shuttle piston-nozzle assembly used to inject CDS with correct timing	–	
Detroit Diesel Corp. and SwRI [36]	1990–1991	Engine grade coal <sup>A</sup>	Detroit Diesel Engine series 71, 8V-149, 2 stroke, 4 exhaust valve, 146/146, 8-, 2500, 1900	Shuttle piston injection system	12 1.8 %ash, 0.6% Sulphur	–	Shuttle piston-nozzle assembly used to inject CDS with correct timing	Approx. 100 hrs	
			General Motors Electro-motive Division 2 stroke diesel 567 type engine, na/na, na-, na, 1000	–	12 1.8 %ash, 0.6% Sulphur	–	Increased compression ratio from 15:1 to 19:1 Intake temperature: the higher the better TICS chamber made of Hastelloy	–	
Adiabatic, Inc [39]	1988–1991	Bituminous coal and lignite slurries and dry coal dust	Cummins NT 855, 140/152, 1-, 2400, 2100	Dry dust first fumigated then injected through TICS	21 1.6–7% ash	–	–	–	
			Caterpillar 1/73, 130/165, 1-, 2200, 1800	Dry dust first fumigated then injected through TICS	5 0.8% Ash	–	–	Novel injector/accumulator electronically controlled	50 h
Tell and Choi Univ. Alabama [55]	1994	CWS	Yanmar diesel engine 4Stroke with prechamber na/na, 1-, na, na	–	–	Preheated intake air led to lower ignition delay, ID = +20 DV with respect to pure diesel, No ignition below 46% cal.	Modified camshaft to advance injection, air preheating, modified injector needle, cooled injector body	–	

Επίσης, ο Rentz αναφέρει ένα γερμανικό συνέδριο για το θέμα της χρήσης ξηρής σκόνης άνθρακα σε εμβολοφόρους κινητήρες, το οποίο όμως δεν

πραγματοποιήθηκε ποτέ λόγω τεχνικών προβλημάτων που πρόεκυψαν, και στο όποιο υποδηλώνει ότι οι γερμανικές προσπάθειες και τα προγράμματα συνεχίστηκαν ακόμη και μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο.

### **2.3.1 Virginia Polytecnic Institute**

Το 1977 οι Marshal και Walters εκτέλεσαν δοκιμές σε κινητήρα με μίγμα καυσίμου άνθρακα/νερού, χρησιμοποιώντας διαλύτη εξευγενισμένου άνθρακα (SRC) έτσι ώστε να επιτευχθεί πιθανή μείωση της φθοράς. Χρησιμοποίησαν τον ίδιο κινητήρα της Nordberg, όπως σε προηγούμενες μελέτες που είχε κάνει ο Marshal (1959). Η χρήση όμως του διαλύτη δεν βελτίωσε αισθητά τη φθορά, τη μόλυνση πετρελαίου στο στροφαλοθάλαμο και το πρόβλημα στο σύστημα έγχυσης.

### **2.3.2 Υπ. Ενέργειας Η.Π.Α. - Conservation and Renewable Energy Division**

Από το 1978 έως το 1982, το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. αποφάσισε να ξεκινήσει ένα ερευνητικό πρόγραμμα για την ανάπτυξη κινητήρων Diesel τροφοδοτούμενων με άνθρακα. Αυτή η προσπάθεια ξεκίνησε στο Southwest Research Institute το 1978, με σκοπό να επιλεγούν τα πιο κατάλληλα μίγματα άνθρακα, καθώς επίσης να εξετάσουν την δυνατότητα χρήσης της τεχνολογίας για εφαρμογές στις μεταφορές.

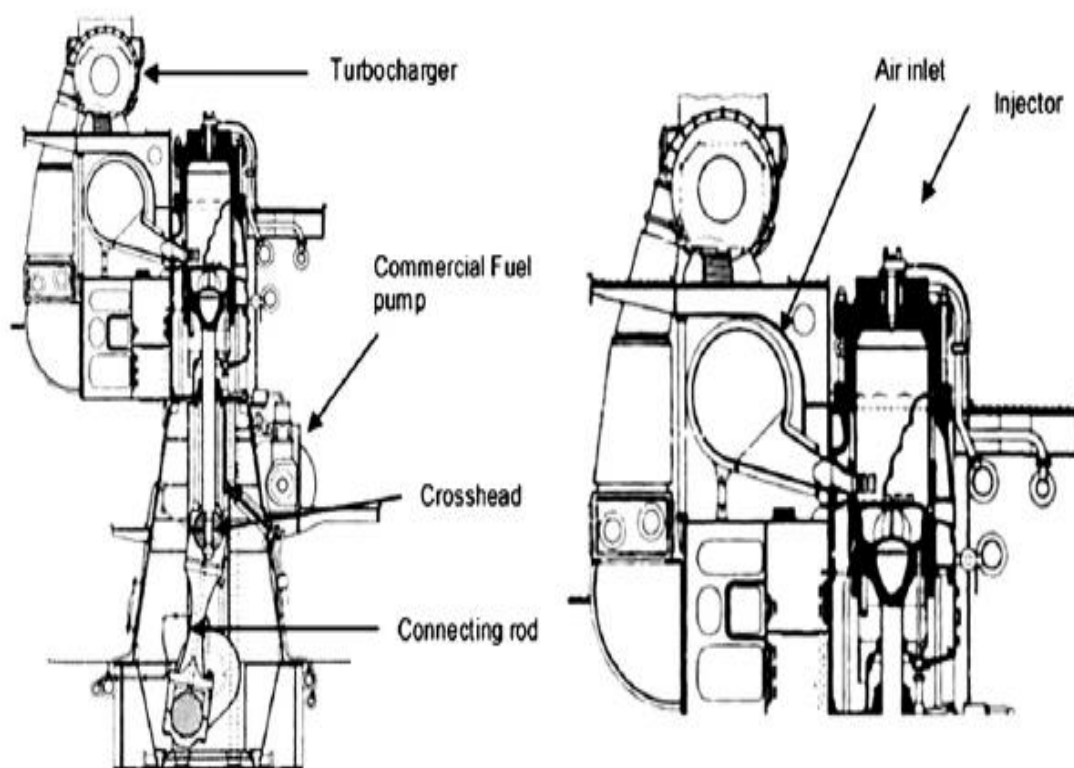
#### 2.3.2.1 Southwest Research Institute

Στο Southwest Research Institute το 1978, ο Ryan χρησιμοποίησε ένα μονοκύλινδρο κινητήρα για να ελέγξει την ικανότητα των διαφόρων καυσίμων ή κλασμάτων καυσίμων να καούν αποτελεσματικά στις συνθήκες του κινητήρα Diesel. Ο κύριος στόχος ήταν να βρεθεί μια σχέση μεταξύ της σύνθεσης των καυσίμων και των εκπομπών των καυσαερίων. Το 1979 οι Tataiah και Lentz χρησιμοποίησαν ένα μονοκύλινδρο κινητήρα Hatz, εξοπλισμένο με προθάλαμο, ο οποίος λειτουργούσε με μίγμα πετρελαίου-άνθρακα (10-90, 20-80 και 30-70% κατά βάρος), προκειμένου να εκτιμηθεί η πιθανή χρήση της τεχνολογίας στην αυτοκινητο-βιομηχανία. Τα αποτελέσματα τους χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια το 1980 από τους Tataiah και Woods σε ένα τετρακύλινδρο πετρελαιοκινητήρα Mercedes. Η απόδοση του κινητήρα ήταν μειωμένη, ιδιαίτερα όταν λειτουργούσε σε υψηλές στροφές και φορτία. Παρατήρησαν (όπως αναμενόταν άλλωστε)

υψηλότερες εκπομπές σωματιδιακών ρύπων κατά τη λειτουργία του κινητήρα με μίγμα στερεού καυσίμου, αλλά χαμηλότερα NOx από ότι με καθαρό πετρέλαιο.

### 2.3.2.2 Η Sulzer και η Thermoelectron

Μεταξύ 1978 και 1987, ένας μονοκύλινδρος 2-Χ κινητήρας τροφοδοτήθηκε με μίγμα άνθρακα/νερού στη Thermoelectron (Η.Π.Α.), προκειμένου να παράσχει τεχνικά δεδομένα για περαιτέρω μελέτες μεγάλης κλίμακας. Η εταιρεία Sulzer (Ελβετία) έκανε δοκιμές σε ένα μονοκύλινδρο κινητήρα Diesel με βάκτρο και ζύγωμα (μοντέλο IRSA76 – Σχήμα 2.8). Οι δοκιμές έγιναν σε πειραματική εγκατάσταση της Sulzer στο Winterthur, της Ελβετίας. Η Sulzer προσπάθησε επίσης να πραγματοποιήσει δοκιμές με μίγμα άνθρακα-νερού (άνθρακας 34% κατά βάρος), προκειμένου να δοκιμάσει ένα καύσιμο εντελώς ανεξάρτητο του πετρελαίου. Απεδείχθη ότι οι εκπομπές NOx ήταν μικρότερες κατά τη λειτουργία με το μίγμα άνθρακα/νερού. Κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου, αναπτύχθηκε επίσης ένα ειδικό σύστημα έγχυσης καυσίμου.



**Σχήμα 2.8** – Κινητήρας της Sulzer με βάκτρο και ζύγωμα σε χρήση με τροφοδοσία στερεού καυσίμου [18]

### **2.3.3 Υπ. Ενέργειας Η.Π.Α. - Τμήμα ορυκτών καυσίμων, Morgatown Energy Technology Center (METC)**

Μεταξύ του 1982 και 1993, στα πλαίσια της χρηματοδότησης από το τμήμα ορυκτών καυσίμων του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α., ξεκίνησαν αρκετά ερευνητικά προγράμματα με στόχο την ανάπτυξη κινητήρων Diesel τροφοδοτούμενων με άνθρακα για την χρήση τους στη συμπαραγωγή, σε βιομηχανικές εφαρμογές και στη μεταφορά. Αυτές οι ερευνητικές προσπάθειες εμπεριέχονταν στην φάση του προγράμματος Clean Coal Technology. Η περίοδος αυτή αφιερώνεται κυρίως στη χρήση μίγματος (διαλύματος) άνθρακα/νερού, λόγω του μεγάλου ενδιαφέροντος για την ανάπτυξη ενός καυσίμου που είναι σε θέση να αντικαταστήσει πλήρως το πετρέλαιο.

#### 2.3.3.1 Southwest Research Institute

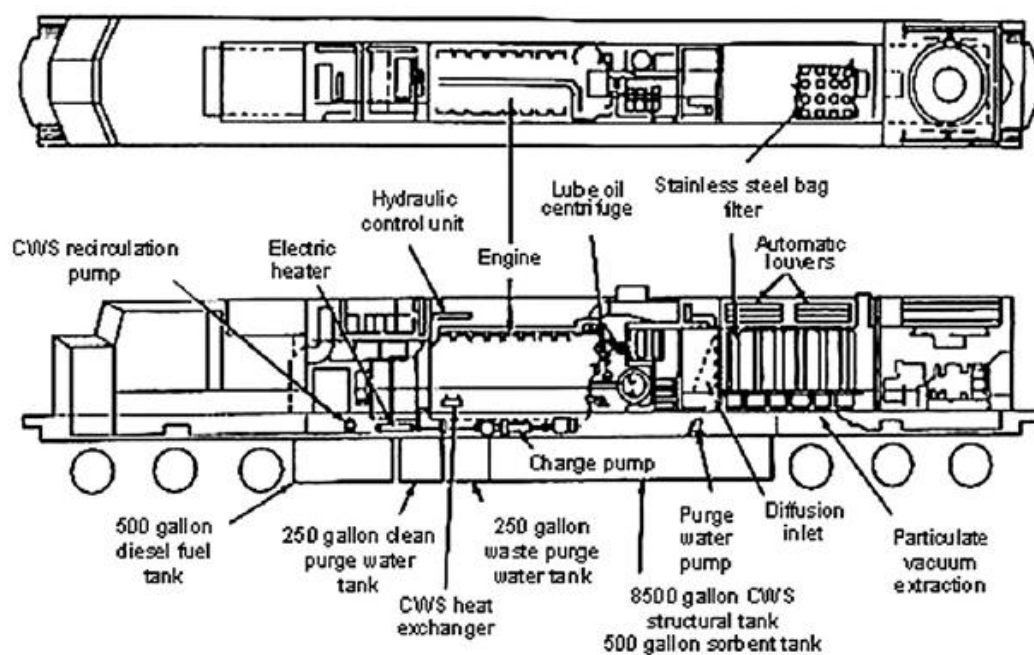
Μεταξύ του 1982 και 1993, το Southwest Research Institute πραγματοποίησε αρκετά έργα σε συνεργασία με μεγάλες εταιρείες. Τα έργα αυτά επικεντρώθηκαν στη μείωση της φθοράς, την έγχυση του μίγματος, την ανάφλεξη και την καύση. Μεταξύ του 1982 και 1984, ο Ryan και συνεργάτες συνεργάστηκαν με το NIPER (που παλαιότερα ονομαζόταν Ενεργειακό Κέντρο Τεχνολογίας της Bartlesville), με στόχο την δημιουργία μιγμάτων (διαλυμάτων) άνθρακα. Στη συνέχεια τα μίγματα αυτά εξετάστηκαν σε μονοκύλινδρους κινητήρες.

Το 1991 το Southwest Research Institute σε συνεργασία με την εταιρία Detroit Diesel, πραγματοποίησε ένα έργο που είχε ως στόχο να επαληθεύσει την δυνατότητα επίτευξης υψηλότερων στροφών στον κινητήρα με χρήση μιγμάτων άνθρακα. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε 2-Χ, 8-κύλινδρο κινητήρα Diesel. Ο κύλινδρος του κινητήρα της Detroit Diesel (μοντέλο 8V-149) τροφοδοτήθηκε με διάλυμα άνθρακα/νερού και λειτούργησε στις 1900 rpm.

Το 1983 ο Wakenell, σε συνεργασία με το Southwest Research Institute, πραγματοποίησε δοκιμές τροφοδοτώντας με μίγμα άνθρακα (παρόμοιο μίγμα με εκείνο που χρησιμοποιήθηκε από τον Ryan) ατμομηχανή (μοντέλο EMD567C). Κατά την διάρκεια του πειράματος έγιναν προσπάθειες βελτίωσης του τρόπου έγχυσης. Στα αποτελέσματα από τις δοκιμές αναφέρονται προβλήματα στο σύστημα έγχυσης, ενώ παρουσιάστηκαν άκαυστα υπολείμματα του διαλύματος και υψηλά ποσοστά φθοράς. Αυτό το πείραμα διεκόπη τελικά λόγω της υψηλής τιμής του χρησιμοποιούμενου μίγματος άνθρακα [3,8].

### 2.3.3.2 General Electric

Η εταιρεία General Electric επιλέχθηκε από το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. με σκοπό να εξετάσει την πιθανότητα της χρήσης μίγματος άνθρακα/νερού σε ατμομηχανές. Η πρώτη φάση του έργου αποτελούνταν από δοκιμές σε μικρή κλίμακα, όπως η λειτουργία ενός 2-κυλίνδρου κινητήρα της General Electric με μίγμα άνθρακα/νερού, Σχήμα 2.9. Στη συνέχεια δυο κινητήρες ίδιου τύπου (μοντέλο 7FDL-12), δοκιμάστηκαν σε δυο διαφορετικές ατμομηχανές. Συγκεκριμένα ο δεύτερος κινητήρας ήταν πλήρως εξοπλισμένος με ηλεκτρονικά υποβοηθούμενο σύστημα έγχυσης μίγματος άνθρακα/νερού τελευταίας τεχνολογίας καθώς και με συσκευές ανάλυσης καυσαερίων. Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής αποτέλεσαν το υπόβαθρο για την δημιουργία μιας συσκευής συσσωρευμένης έγχυσης [3,12].



**Σχήμα 2.9** – Η ατμομηχανή της General Electric [19]

### 2.3.3.3 Arthur D.Little and Cooper Bessemer

Το 1985, ο Arthur D.Little συνεργάστηκε με την Cooper Bessemer με στόχο να πραγματοποιήσουν μια δοκιμή 1000 ωρών, στην οποία τροφοδότησαν με διάλυμα άνθρακα/νερού έναν 6-κύλινδρο κινητήρα πετρελαίου των 1800 kW της εταιρείας Cooper Bessemer. Η ολοκλήρωση αυτού του προγράμματος είχε ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό κρίσιμων παραμέτρων, που είναι απαραίτητες



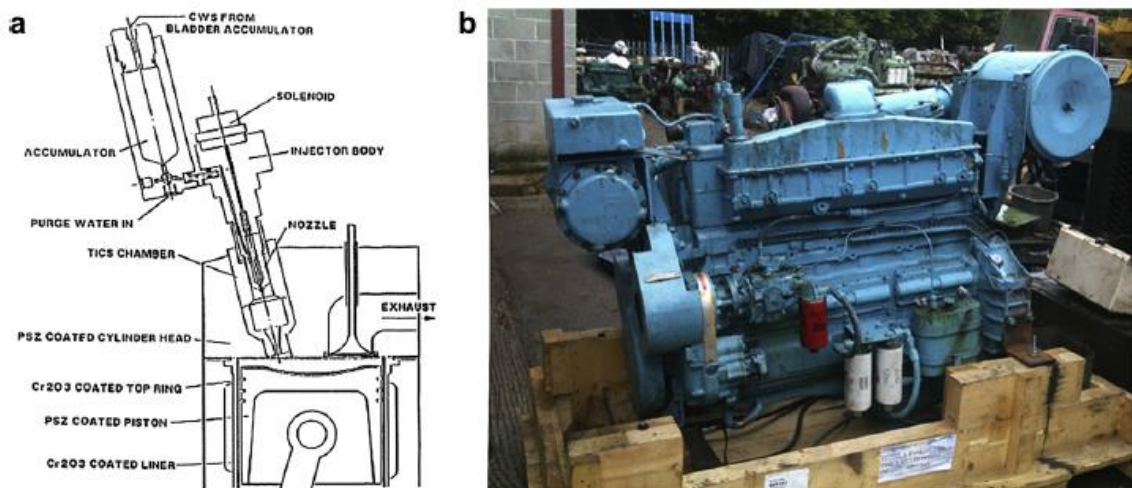
προκειμένου να στεφθεί με επιτυχία η χρήση μιγμάτων άνθρακα σε μηχανές εσωτερικής καύσης, ως ακολούθως:

- Η χρήση εμβόλου κλειστής διαδρομής με συμβατική αντλία έγχυσης και επικάλυμμα του εμβόλου από νιτρίδιο του τιτανίου.
- Βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής επικαλυμμένες με πλάσμα από καρβίδιο του βολφραμίου.
- Η εσωτερική επένδυση του εμβόλου καθώς και τα «δακτυλίδια» στο εξωτερικό του πρέπει να είναι επικαλυμμένα με καρβίδιο του βολφραμίου.
- Διήθηση του ελαίου λιπάνσεως σε μέγεθος 5  $\mu\text{m}$  για τον έλεγχο της φθοράς στο υπόλοιπο τμήμα της μηχανής.

Το παραπάνω πείραμα, με συμπίεση έως 3 bar και προθέρμανση στην είσοδο του αέρα στον κινητήρα έως και 423 K, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού καύσης των σωματιδίων, βελτιώνοντας έτσι την ταχύτητα της καύσης. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές στον 6-κύλινδρο κινητήρα της Cooper Bessemer και του Arthur D.Little θεωρήθηκαν πολύ επιτυχή [3,11].

#### 2.3.3.4 Adiabatics

Μεταξύ του 1989 και 1994 το τμήμα ορυκτών καυσίμων του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α. δημιούργησε ένα πρόγραμμα επιχορηγήσεων που στόχο είχε την ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογίας για την βελτίωση της χρήσης του άνθρακα ως καύσιμο σε Μ.Ε.Κ.. Η εταιρεία Adiabatics, τιμώμενη με 5 συνεχόμενες επιχορηγήσεις, προσπάθησε να εφαρμόσει νέες ιδέες και τεχνικές στη λειτουργία του συστήματος έγχυσης καυσίμου, το οποίο εξακολουθούσε να αποτελεί πρόβλημα, προκαλώντας υψηλά ποσοστά φθοράς. Δυο κινητήρες χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας: ένας μονοκύλινδρος κινητήρας της Caterpillar (μοντέλο-1Y73) και ένας αυτοτροφοδοτούμενος μονοκύλινδρος κινητήρας της Cummins (μοντέλο NT-855) Σχήμα 2.10.



**Σχήμα 2.10** – a) Ο μονοκύλινδρος κινητήρας της Caterpillar (μοντέλο-1Y73), b) αυτοτροφοδοτούμενος μονοκύλινδρος κινητήρας της Cummins (μοντέλο NT-855)

Μέχρι και σήμερα, παρατηρείται ότι στις τεχνολογίες άμεσης έγχυσης που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία κινητήρων πετρελαίου με στερεό καύσιμο, εμπλέκονται υψηλές πιέσεις και υψηλά ποσοστά φθοράς. Για το λόγο αυτό, οι Καππο και συνεργάτες ανέπτυξαν ένα σύστημα θερμικής καύσης (TCIS) το οποίο ήταν σε θέση να επιτύχει την ανάφλεξη του διαλύματος άνθρακα/νερού (CDS) σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής και φορτία. Χάρης σε αυτό το σύστημα, το καύσιμο θα μπορούσε πιο εύκολα να βρει τις θερμικές συνθήκες για αυτανάφλεξη, και η πίεση έγχυσης θα μπορούσε αντίστοιχα να μειωθεί.

Αυτό το σύστημα αποτέλεσε την βάση για να αναπτυχθεί ένας εγχυτήρας μίγματος άνθρακα/νερού από τους Badgley και συνεργάτες. Οι πιέσεις έγχυσης με αυτό το σύστημα μπορούσαν να μειωθούν στα 140 με 200 bar. Όπως ήταν αναμενόμενο, η φθορά του ακροφύσιου μειώθηκε. Επιπλέον, η λειτουργία του κινητήρα μπορούσε να γίνει αποκλειστικά με χρήση μίγματος άνθρακα/νερού.

Με βάση τον κινητήρα της Caterpillar, η εταιρεία Adiabatics διαμόρφωσε το 1985 έναν κινητήρα πετρελαίου ο οποίος μπορούσε να λειτουργήσει με χρήση σκόνης άνθρακα μεγέθους 5 μm. Ο κινητήρας αυτός λειτούργησε επιτυχώς για μερικά λεπτά με 100% χρήση σκόνης άνθρακα, αλλά δεν υπάρχουν διαθέσιμα αποτελέσματα δοκιμών [3,11].

### 2.3.3.5 Tiax

Από το 2002 έως το 2006, η Tiax πραγματοποίησε μια ανασκόπηση των προσπαθειών μέχρι σήμερα, της χρήσης καθαρού άνθρακα/Diesel, με κατά το ήμισυ χρηματοδότηση από το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. και με την εποπτεία από το Εθνικό Εργαστήριο Ενεργειακής Τεχνολογίας (NETL) των Η.Π.Α. Στόχος της εταιρείας ήταν να γίνει μια επίδειξη των αποτελεσμάτων που συλλέχτηκαν από τις δοκιμές της Cooper Bessemer στον 6-κύλινδρο κινητήρα της. Παρουσιάστηκαν όμως δυσκολίες στον ανεφοδιασμό με μίγμα άνθρακα/νερού του ίδιου τύπου κινητήρα με αυτόν που είχε χρησιμοποιήσει και η Cooper. Το αρχικό σχέδιο ήταν να λειτουργήσουν ένα 18-κύλινδρο κινητήρα πετρελαίου με χρήση άνθρακα/νερού στο Πανεπιστήμιο της Αλάσκας, με σκοπό την παροχή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας στην Πανεπιστημιούπολη. (Σχήμα 2.11).



**Σχήμα 2.11** – Ο 18-κύλινδρος κινητήρας πετρελαίου της Tiax στην Αλάσκα [20]

Η Tiax δεν μπόρεσε να βρει επεξεργαστή μίγματος άνθρακα στην Αλάσκα, γι' αυτό το έργο μεταφέρθηκε στην εγκατάσταση Morse στο Beloit του Ουισκόνσιν σε έναν 2-κύλινδρο κινητήρα της Fairbanks Morse (μοντέλο-PC2.6) (Σχήμα 2.12 και Πίνακας 2.4).



**Σχήμα 2.12** – Ο 2-κύλινδρος κινητήρας της Fairbanks Morse (μοντέλο-PC2.6)  
[20]

Η μηχανή λειτούργησε το 2004 για μια ώρα χωρίς σοβαρά προβλήματα. Κατά την διάρκεια των δοκιμών παρατηρήθηκαν:

- Οι ειδικοί εγχυτήρες διαλύματος άνθρακα/νερού λειτουργούσαν ικανοποιητικά.
- Το μίγμα άνθρακα/νερού καιγόταν ικανοποιητικά, χωρίς να παρατηρούνται υπολείμματα.
- Η απόδοση του κινητήρα ήταν σύμφωνη με τις αναμενόμενες προσδοκίες.
- Οι εκπομπές ρύπων ήταν αρκετά μικρές

**Πίνακα 2.4** - Οι προδιαγραφές (διάμετρος, διαδρομή, β. συμπίεσης, μέση πραγματική πίεση, ισχύς, μέγιστη πίεση καύσης, ταχύτητα περιστροφής) του 2-κύλινδρου κινητήρα δοκιμών [4]

Specification	Value
Bore	400 mm
Stroke	460 mm
Compression Ratio	11.4:1
Brake Mean Effective Pressure (BMEP)	2,220 kPa (322 psi)
Power	1,050 kW
Maximum Cylinder Firing Pressure	14.4 MPa (2,100 psi)
Operating Speed	514 RPM

Η κύρια αλλαγή που έγινε στον κινητήρα δοκιμής ήταν ο επανασχεδιασμός του συστήματος έγχυσης καυσίμου. Εγκαταστάθηκαν εγχυτήρες άμεσης έγχυσης με σκοπό να τροφοδοτήσουν με συμβατικό πετρέλαιο τον κινητήρα ώστε να εκκινηθεί, καθώς και να βοηθήσουν την καύση με το μίγμα άνθρακα/νερού.

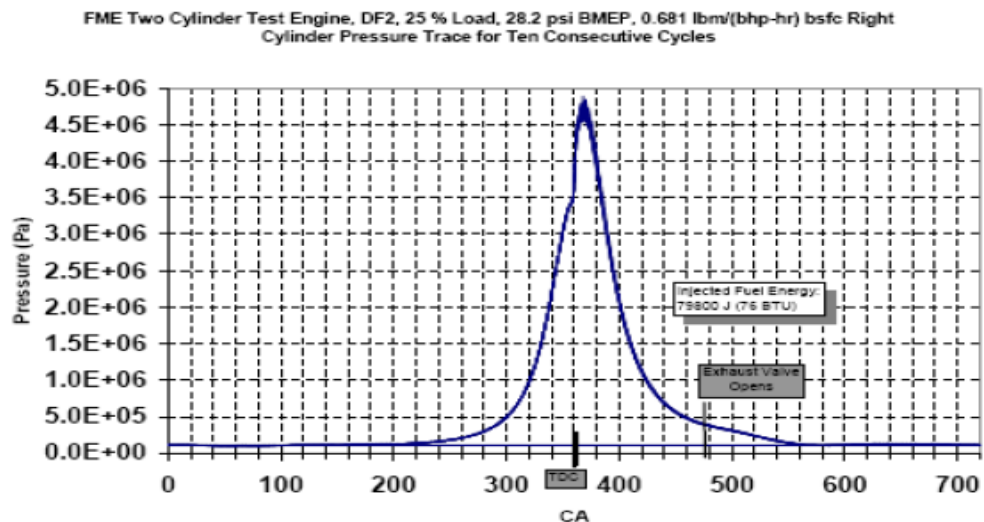
Ο έλεγχος του κινητήρα επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας ένα αυτοματοποιημένο προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή (τύπου Rockwell). Για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του κινητήρα και η ασφάλεια των χειριστών, ελεγχόντουσαν βασικές παράμετροι, όπως η θερμοκρασία των καυσαερίων, το νερό ψύξης και η θερμοκρασία του λιπαντικού, η θερμοκρασία της πολλαπλής εισαγωγής, οι στροφές του κινητήρα, η ταχύτητα του συμπιεστή και πτώση πίεσης της συσκευής συγκέντρωσης, Πίνακας 2.5. Εκτός από αυτές τις παραμέτρους, χρησιμοποιήθηκε σύστημα ανάκτησης δεδομένων υψηλής ταχύτητας, που είχε ως στόχο να παρακολουθεί και να καταγράφει την πίεση έγχυσης στους κυλίνδρους.

**Πίνακας 2.5** - Συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα με διάλυμα άνθρακα/νερού. [4]

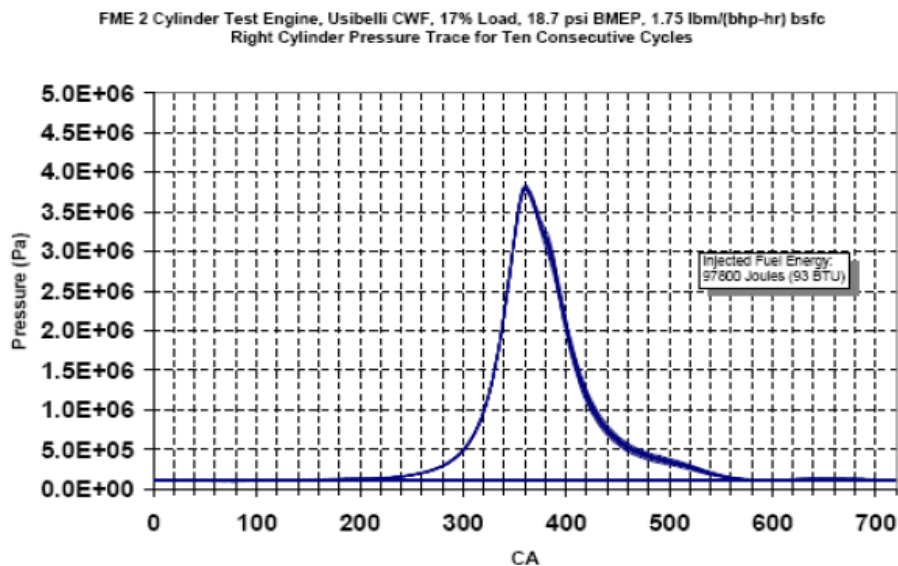
Operating Parameter	1 <sup>st</sup> Test	2 <sup>nd</sup> Test	1 <sup>st</sup> Test	2 <sup>nd</sup> Test
Fuel	Diesel	Diesel	CWF	CWF
Engine Load, %	50	25	25	17
Engine Power, bhp	503	254	254	168
Engine Speed, rpm	506	506	506	506
Pilot Fuel, %	3.6	4.7	11.6	12.4
BMEP, psi	55.8	28.2	28.2	18.7
Fuel Rate, lb/hr	227	173	629	588
Specific Fuel Consumption, Btu/bhp-hr	8,105	12,281	10,663	15,031
Fuel Conversion Efficiency, %	31	21	24	17
Air Rate, lb/hr	7,532	6,232	---	5,240
Air/Fuel Ratio, lb/lb	33.3	36	---	18.7
Fuel/Air Ratio, lb/lb	0.03	0.028	---	0.053
NO, ppm	1,100	430	150	142
CO <sub>2</sub> , %	6.4	5.1	6.3	5.9
CO, ppm	463	385	>1,000	>1,000
O <sub>2</sub> , %	11.8	13.9	13.3	13
Total Hydrocarbons (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ), ppm	406	---	---	910

Κατά τη λειτουργία του κινητήρα με μίγμα άνθρακα/νερού, η καύση ήταν αρκετά επιτυχής στους περισσότερους κύκλους δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, αλλά παρατηρήθηκε κάποια μεταβλητότητα από κύκλο σε κύκλο. Επίσης, δεν υπήρξε ένδειξη συσσώρευσης άκαυστων υπολειμμάτων άνθρακα στους κυλίνδρους ή στα τοιχώματα των εμβόλων. Παρατηρήθηκαν διαφορές στα

δυναμοδεικτικά διαγράμματα του κυλίνδρου μεταξύ της λειτουργίας με πετρέλαιο και της λειτουργίας με διάλυμα άνθρακα/νερού, η οποία φαίνεται συγκρίνοντας το Σχήμα 2.13α με το Σχήμα 2.13β.



Σχήμα 2.13α – Δυναμοδεικτικό διάγραμμα κατά τη λειτουργία με πετρέλαιο [4]



Σχήμα 2.13β – Δυναμοδεικτικό διάγραμμα κατά τη λειτουργία με μίγμα άνθρακα/νερού [4]

Τα αποτελέσματα από αυτή τη δοκιμή μπορεί να συνοψιστούν ως εξής:

- Το μίγμα εγχύθηκε, αναφλέχθηκε και κάρηκε με αρκετή επιτυχία στον κινητήρα της Fairbanks Morse. Τα κύρια συστήματα έγχυσης

λειτουργήσαν χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα, παρήχθη η αναμενόμενη (πραγματική) ισχύς, και ο διαγνωστικός έλεγχος καύσης έδειξε καλή καύση (παρότι παρατηρήθηκε κάποια διασπορά από κύκλο σε κύκλο), Πίνακας 2.6. Δεν αναφέρθηκε εμφάνιση προβλήματος κατά τη διάρκεια της μετάβασης από το καύσιμο diesel στο διάλυμα άνθρακα/νερού και ξανά στο καύσιμο diesel. Τόσο τα συστήματα άμεσης έγχυσης πετρελαίου όσο και τα κύρια συστήματα έγχυσης του μίγματος άνθρακα/νερού ήταν σε θέση να δώσουν επαναλαμβανόμενες εγχύσεις για τη δοκιμή, όπως αποδεικνύεται από το γεγονός ότι τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα "έπεσαν" το ένα πάνω στο άλλο.

- Το διαγράμματα πίεσης έγχυσης έδειξαν ότι η έγχυση του καυσίμου μέσα στον κύλινδρο ήταν επαναλαμβανόμενη και ακριβής, αν και δημιουργήθηκε η ανάγκη για ρύθμιση του κινητήρα με σκοπό την βελτίωση των επιδόσεων.
- Δεν υπήρξε ένδειξη συσσώρευσης άκαυστου άνθρακα στους κυλίνδρους [4].

**Πίνακας 2.6** - Σύνοψη των αποτελεσμάτων από την δοκιμή [4]

Variable	Diesel		CWF	
Fuel	25		17	
Load, %	25		17	
Cylinder	Left	Right	Left	Right
Average IMEP*, psi	85	88	74	83
IMEP COV, %	2	2	14	7
IMEP LNV, %	96	97	77	90

\*Indicated mean effective pressure

### **2.3.4 Το Σουηδικό Εθνικό Συμβούλιο για τη βιομηχανική και τεχνολογική ανάπτυξη**

Το 1995, ο Holmstrom και ο Olsson πραγματοποίησαν μια θεωρητική και οικονομική αξιολόγηση της πιθανής χρήσης σκόνης ξύλου της τάξης των 16 μm σε κινητήρα Volvo (μοντέλο-TWD16 20G), βασιζόμενοι στην έρευνα που είχε πραγματοποιήσει ο Abom σε ένα κινητήρα της Volvo (μοντέλο-MD1) στις αρχές της δεκαετίας του 80. Δοκιμάστηκε και τελικά χρησιμοποιήθηκε ένα ειδικό σύστημα έγχυσης σκόνης ξύλου που αναπτύχθηκε από τον Jan Abom. Οι

Holmstrom και Olsson γνωρίζοντας τις δυνατότητες της σκόνης ξύλου ως καύσιμο, μπόρεσαν να προβλέψουν μείωση της απόδοσης του κινητήρα στο 30-45%, σε σύγκριση με το καθαρό πετρέλαιο.

### **2.3.5 Τελευταίες μελέτες**

Κατά την διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, ύστερα από μια μείωση του ενδιαφέροντος στη χρήση στερεών καυσίμων είτε αυτά είναι σε ξηρή μορφή είτε είναι σε μορφή μίγματος (λόγω της στασιμότητας των τιμών του αργού πετρελαίου κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1990), πρόσφατες έρευνες φαίνεται να μαρτυρούν ένα ανανεωμένο ενδιαφέρον και μια στροφή στη χρήση στερεών καυσίμων και ιδιαίτερα διαλυμάτων του άνθρακα με νερό ή πετρέλαιο. Το 2004 ένα άρθρο αναφερόμενο στις Σουηδικές, Φινλανδικές και Δανέζικες δραστηριότητες σε μονάδες επεξεργασίας βιομάζας για ενεργειακή παραγωγή, ανέλυσε τη δραστηριότητα που πραγματοποιήθηκε με χρήση σκόνης ξύλου σε κινητήρα πετρελαίου. Το έργο σταμάτησε μετά από 284 ώρες λειτουργίας, λόγω της τήξης του κινητήρα.

Το 2008 η αυστραλιανή εταιρεία CSIRO πραγματοποίησε μια έκθεση αξιολόγησης της τεχνολογίας για την πιθανή χρήση μιγμάτων νερού/άνθρακα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εφαρμογές σε κινητήρες πετρελαίου θεωρηθήκαν μεταξύ άλλων πολύ ενδιαφέρουσες. Στα πλαίσια αυτής της έκθεσης, ο Wibberler είχε διαμορφώσει ένα κινητήρα άνθρακα (μοντέλο-DICE), άμεσης έγχυσης, χαμηλής ταχύτητας (200-600 rpm) που τροφοδοτούνταν με διάλυμα άνθρακα/νερού.

Το 2010 ο Patton και συνεργάτες πραγματοποίησαν μια τεχνοοικονομική μελέτη σχετικά με την πιθανή χρήση του ξυλάνθρακα σε αντίθεση με τον ορυκτό άνθρακα, σε μίγματα με νερό ή diesel.

Το 2011 ο Soliou και συνεργάτες, στα πλαίσια της χρηματοδότησης από το Ιαπωνικό Υπουργείο Ενέργειας, πραγματοποίησαν δοκιμές σε έναν κινητήρα της Yanmar (μοντέλο NF-19) με χρήση ξύλου από ροκανίδια κέδρου ως καύσιμο, το 25% κατά βάρος του οποίου αναμίχθηκε με πετρέλαιο. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές έδειξαν ότι ο κινητήρας τροφοδοτούμενος με το μίγμα παρουσίασε παρόμοιες επιδόσεις με αυτές της χρήσης καθαρού πετρελαίου, με πολύ μικρή διαφορά στην καθυστέρηση ανάφλεξης. Η



υψηλότερη θερμοκρασία καύσης του μίγματος, πάντως, οδήγησε σε αυξημένο σχηματισμό NO<sub>x</sub> (περίπου 30% περισσότερο) [3,14].

# 3. Η ΒΙΟΜΑΖΑ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΕ Μ.Ε.Κ

## 3.1 Εισαγωγή

Ένα μεγάλο μέρος του πληθυσμού του γης, ακόμη και στον 21<sup>ο</sup> αιώνα, εξακολουθεί να μην εξυπηρετεί τις ενεργειακές του ανάγκες σε ελάχιστο επίπεδο. Η οικονομική δομή πολλών τέτοιων χωρών τους δεν είναι αρκετά ισχυρή ώστε να εισάγουν πετρέλαιο, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, περιβαλλοντικοί προβληματισμοί για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου ανάγκασαν την επιστημονική κοινότητα και την κοινωνία να στραφούν στη χρήση μη-ορυκτών καυσίμων. Για τον λόγο αυτό, η βιομάζα άρχισε να αποτελεί μία ελπιδοφόρα μορφή ενέργειας. Οι τεχνολογίες που βασίζονται στη βιομάζα γίνονται δημοφιλείς λόγω καλύτερης φορολογικής πολιτικής ενώ επιπλέον έχουν πλεονέκτημα έναντι των άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όσον αφορά τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και του παράγοντα της διαθεσιμότητας.

Ο όρος βιομάζα χρησιμοποιείται για όλα τα βιολογικά υλικά κυρίως φυτικής και ζωικής προέλευσης που υπάρχουν στο έδαφος και στα υδάτινα περιβάλλοντα. Όσο αφορά τα παγκόσμια ζητήματα της αιφόρου ενέργειας και της μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, η βιομάζα αποτελεί

αντικείμενο αυξημένου ενδιαφέροντος διότι πληροί τις προϋποθέσεις ως καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έχοντας μικρότερο αντίκτυπο, σε σχέση με άλλα καύσιμα, απέναντι στο περιβάλλον.

Σήμερα, και σύμφωνα με την έκθεση της Παγκόσμιας Αξιολόγησης Ενέργειας, το 80% της κατανάλωσης ενέργειας στον κόσμο προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, 14% από ανανεώσιμες πηγές (εκ των οποίων η βιομάζα συνεισφέρει στο 9,5%) και το 6% από πυρηνικές πηγές ενέργειας [3,16].

## 3.2 Τεχνικές αξιοποίησης της βιομάζας:

### 3.2.1 Άμεση καύση

Η καύση χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές και είναι η πιο άμεση μέθοδος για τη μετατροπή της βιομάζας σε «χρησιμοποιήσιμη» ενέργεια. Από τότε που οι πρώτοι κάτοικοι αυτού του πλανήτη έκαιγαν ξύλο για να θερμανθούν, η άμεση καύση βιομάζας είχε αποτελέσει πηγή ενέργειας για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών μέχρι σήμερα. Η άμεση καύση είναι μια θερμοχημική διαδικασία μετατροπής, χρησιμοποιώντας κοινές πρώτες ύλες, όπως το ξύλο, γεωργικά απόβλητα και αστικά στερεά απόβλητα.

Η ενέργεια που παράγεται από την άμεση διαδικασία της καύσης είναι η θερμότητα και ο ατμός. Παρά τη φαινομενική απλότητά της, η απευθείας καύση είναι μια σύνθετη διαδικασία από τεχνολογική άποψη. Εμπλέκονται υψηλοί ρυθμοί αντίδρασης, υψηλές εκπομπές θερμότητας και πολλά σχήματα αντίδρασης. Προκειμένου να αναλυθεί η διαδικασία καύσης γίνεται, ένας διαχωρισμός μεταξύ του χώρου όπου το καύσιμο-βιομάζα καίγεται (ο «φούρνος») και του χώρου στον οποίο η θερμότητα από το καυσαέριο ανταλλάσσεται (ο εναλλάκτης θερμότητας).

Σωστά σχεδιασμένες εγκαταστάσεις καύσης βιομηχανικών αποβλήτων μπορούν να κάψουν όλους τους τύπους καύσιμης βιομάζας που αναφέρονται παραπάνω. Στη διαδικασία καύσης, σχηματίζονται πτητικοί υδρογονάνθρακες ( $C_xH_y$ ) και καίγονται σε μια θερμή ζώνη καύσης. Στο φούρνο, η βιομάζα μετατρέπεται μέσω της διαδικασίας καύσης σε θερμική ενέργεια.

Τα άμεσα συστήματα καύσης είναι είτε σταθερής είτε ρευστοποιημένης κλίνης. Τα συστήματα σταθερής κλίνης χαρακτηρίζονται κυρίως από τον τρόπο που η καύσιμη βιομάζα τροφοδοτείται ή μεταφέρεται μέσω του κλίβανου. Σε

σταθερή ή κινούμενη εσχάρα καυστήρα, ένας χειροκίνητος ή αυτόματος τροφοδότης διανέμει το καύσιμο σε μια εσχάρα, στην οποία καίγεται το καύσιμο-ο αέρας καύσης εισέρχεται από το κάτω μέρος της εσχάρας. Στον στατικό σχεδιασμό εσχάρας, οι στάχτες πέφτουν σε λάκκο. Σε αντίθεση, σε ένα κινούμενο σύστημα εσχάρας, η τέφρα πέφτει σε μια χοάνη.

Οι καυστήρες ρευστοποιημένης κλίνης (FBC) καίνε την καύσιμη βιομάζα σε μια ζεστή κλίνη, το υλικό της οποίας είναι από κοκκώδη, μη εύφλεκτα υλικά όπως άμμο και ασβεστόλιθο. Η έγχυση αέρα εντός της κλίνης δημιουργεί στροβιλισμό. Αυτή η σχεδίαση αυξάνει τη μεταφορά θερμότητας και επιτρέπει τη λειτουργία σε θερμοκρασίες κάτω των 970°C και τη μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub>.

Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα (σε σύγκριση με τα σταθερά συστήματα κλίνης) του συστήματος καύσης ρευστοποιημένης κλίνης είναι:

- Η ευελιξία στην περίπτωση αλλαγής στις ιδιότητες, στα μεγέθη και στο σχήμα της βιομάζας ως καύσιμο.
- Η «αποδοχή» σωματιδίων βιομάζας με περιεκτικότητα σε υγρασία έως και 60%.
- Η δυνατότητα να μπορεί να χειριστεί καύσιμα υψηλής τέφρας και υψηλών γεωργικών υπολειμμάτων βιομάζας (>50%).
- Η συμπαγής κατασκευή με υψηλά ποσοστά ανταλλαγής και αντίδρασης θερμότητας.
- Οι χαμηλές εκπομπές NO<sub>x</sub>.
- Η χαμηλή περίσσεια του παραγόμενου αέρα (κάτω από 1.2-1.4), με αποτέλεσμα να έχουμε χαμηλές απώλειες θερμότητας από τα καυσαέρια [6].

### 3.2.2 Αεριοποίηση βιομάζας

Η αεριοποίηση, δηλαδή η παραγωγή αέριου καυσίμου από υλικά που περιέχουν άνθρακα, είναι ήδη μια παλιά τεχνολογία. Η πρώτη εφαρμογή ήταν η λεγόμενη ξηρή απόσταξη (ή πυρόλυση-θέρμανση της πρώτης ύλης καταλήγοντας σε θερμική αποσύνθεση του καυσίμου με προϊόντα πτητικά αέρια και στερεό άνθρακα) και χρονολογείται από το 1812 (Gas Company στο Λονδίνο). Ο όρος αεριοποίηση της βιομάζας εισήχθη για πρώτη φορά κατά τη διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου λόγω της έλλειψης του πετρελαίου ως καύσιμο.

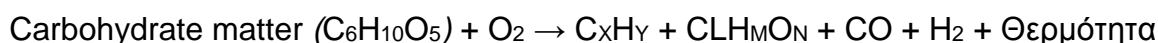
Μετά το τέλος του πολέμου, τα συστήματα αεριοποίησης υποκαταστάθηκαν με κινητήρες που λειτουργούσαν με ορυκτά υγρά καύσιμα. Δεν ήταν πριν από την ενεργειακή κρίση του 1970, όταν η αεριοποίηση επέστρεψε για τρίτη φορά στην ιστορία της.

Η αεριοποίηση μετατρέπει τη βιομάζα σε ενέργεια χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες σημαντικές πρώτες ύλες:

- ξύλο
- γεωργικά απόβλητα και
- αστικά στερεά απόβλητα.

Η αεριοποίηση είναι η θερμική διεργασία που μετατρέπει τα στερεά καύσιμα σε ένα αέριο καύσιμο μίγμα χαμηλής ή μέσης θερμογόνου ικανότητας με τη βοήθεια οξειδωτικού όπως αέρας (O<sub>2</sub>) ή υδρατμός (H<sub>2</sub>O). Η διαφορά της αεριοποίησης με αέρα και της καύσης είναι πρακτικά μόνο η διαφορά στο λόγο αέρα, που στην πρώτη περίπτωση είναι υπο-στοιχειομετρικός ( $\lambda < 1$ ) ενώ στη δεύτερη υπερ-στοιχειομετρικός ( $\lambda > 1$ ), σε σχέση με το απαιτούμενο οξυγόνο για πλήρη καύση.

Η αεριοποίηση της βιομάζας μπορεί να πραγματοποιηθεί σε αντιδραστήρες σταθερής, κινούμενης ή ρευστοποιημένης κλίνης σε θερμοκρασίες άνω 700°C. Πολλές από τις αντιδράσεις που συντελούνται κατά την αεριοποίηση είναι ενδόθερμες και η απαιτούμενη θερμική ενέργεια μπορεί να προσδοθεί άμεσα με μερική οξείδωση των αντιδρώντων συστατικών, όπως συμβαίνει αν το οξειδωτικό μέσο είναι αέρας/οξυγόνο ή έμμεσα με μεταφορά θερμότητας από εξωτερική πηγή θερμότητας αν το οξειδωτικό μέσο είναι ατμός. Στην πρώτη περίπτωση η διεργασία καλείται αυτοθερμική ενώ στη δεύτερη αλλοθερμική. Συνολικά το στερεό καύσιμο μετατρέπεται κυρίως σε σταθερά αέρια (CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, και CH<sub>4</sub>), άλλες ανόργανες ενώσεις με συγκεντρώσεις της τάξης των ppmv (H<sub>2</sub>S, COS, HCl, NH<sub>3</sub>, HCN, κτλ), ενώσεις βαρέων υδρογονανθράκων (πίσσες), ενώ απομένει κάποιο ποσοστό στερεού εξανθρακώματος και τέφρας (κυρίως μεταλλικά ανόργανα συστατικά). Το καθαρό προϊόν της αεριοποίησης του αέρα μπορεί να βρεθεί από την άθροιση των μερικών αντιδράσεων, ως εξής:



Σε μικρότερα συστήματα, η αεριοποίηση μπορεί να συνδυαστεί με οποιαδήποτε τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιεί αέριο καύσιμο. Η αποκλειστική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα μικρής κλίμακας συστήματα εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που υπάρχει ανάγκη για άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά τα συστήματα αυτά προσφέρονται και για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας με χρήση μηχανών εσωτερικής καύσεως (Μ.Ε.Κ) ενώ προτείνεται και η χρήση του αερίου σε μικροστροβίλους αερίου με ηλεκτρικές αποδόσεις 20-30% ως προς την κατώτερη θερμογόνο ικανότητα της βιομάζας. Οι μηχανές εσωτερικής καύσεως προσφέρουν υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση με μειωμένες όμως δυνατότητες συμπαραγωγής και υψηλά επίπεδα αέριων εκπομπών ρύπων.

Οι περισσότερες εφαρμογές του παραγόμενου αερίου της αεριοποίησης βιομάζας πλην της απλής καύσης του, απαιτούν καθαρό αέριο από:

- πίσσα,
- σωματίδια
- οξείδια αλκαλικών μετάλλων,
- ενώσεις αλογόνων και θείου

Η σημαντικότερη πρόσμιξη του παραγόμενου αερίου είναι οι βαρείς συμπυκνώσιμοι υδρογονάνθρακες (πίσσα), οι οποίοι είναι ένα μίγμα οξυγονούχων οργανικών ενώσεων με έντονο αρωματικό χαρακτήρα που παράγονται κυρίως ως δευτερογενή προϊόντα από τις ενώσεις που εκλύονται κατά το στάδιο της πυρόλυσης της βιομάζας. Οι ενώσεις που περνούν στην αέρια φάση είτε υπόκεινται σε περαιτέρω διάσπαση προς το σχηματισμό σταθερών αερίων είτε συμμετέχουν σε μια σειρά αντιδράσεων προς σχηματισμό πηκτών. Σύμφωνα με ένα γενικά αποδεκτό ορισμό, πίσσα είναι το σύνολο των οργανικών μορίων με μοριακά βάρη μεγαλύτερα από το βάρος του βενζολίου ( $M_{\text{βενζολίου}} = 78$ ). Η σύσταση της πίσσας είναι πολύπλοκη και εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες στις οποίες λαμβάνει χώρα η αεριοποίηση και, κυρίως, από τη θερμοκρασία και το χρόνο παραμονής στον αντιδραστήρα.

Τα προβλήματα που δημιουργεί η περιεχόμενη πίσσα εντοπίζονται κυρίως όταν συμπυκνωθεί σε ψυχρές επιφάνειες δημιουργώντας αποθέσεις και φράξιμο των σωληνώσεων, επιφανειών και συσκευών. Η μείωση της θερμοκρασίας προκαλεί το σχηματισμό αερολυμάτων πίσσας, των οποίων η απομάκρυνση είναι

επιτακτική για την ομαλή λειτουργία των μηχανών. Οι προδιαγραφές των Μ.Ε.Κ ως προς τα επιτρεπτά επίπεδα πίσσας στο αέριο είναι αρκετά ελαστικές.

Η απομάκρυνση των πίσσών από το αέριο πριν από τη χρήση του μπορεί να επιτευχθεί με:

- διατάξεις έκπλυσης αερίου,
- ηλεκτροστατικούς διαχωριστές (με ψύξη του αερίου),
- με χημική ή καταλυτική διάσπαση των πίσσών προς σχηματισμό σταθερών αερίων, τόσο μέσα στον αντιδραστήρα αεριοποίησης όσο και μετά την έξοδο του αερίου από αυτόν.

Στον ακόλουθο Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται εκτιμήσεις για τη συγκέντρωση πίσσών στο αέριο αεριοποίησης ανά είδος τελικής εφαρμογής, οι οποίες αποτελούν ενδεικτικά όρια ασφάλειας για ομαλή λειτουργία. Πρωταρχική επιδίωξη είναι η ελαχιστοποίηση της παραγωγής βαρέων υδρογονανθράκων. Η επιλογή τύπου αντιδραστήρα αεριοποίησης αποτελεί παράμετρο που επηρεάζει την ποσότητα των παραγόμενων πίσσών όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.2.

**Πίνακας 3.1** - Εκτιμώμενα όρια συγκέντρωσης πίσσών για ασφαλή λειτουργία ανά εφαρμογή [26]

Εφαρμογή / τελική χρήση	Προτεινόμενη συγκέντρωση πίσσών
Καυστήρες	Μικρές απαιτήσεις καθαριότητας
Μηχανές εσωτερικής καύσης	<100 mg/Nm <sup>3</sup>
Αεριοστρόβιλοι	<0.5 mg/Nm <sup>3</sup>
Συμπιεστές	50-500 mg/Nm <sup>3</sup>

**Πίνακας 3.2** - Συγκεντρώσεις παραγόμενων πίσσών για διάφορους τύπους αντιδραστήρων [26]

Τύπος αντιδραστήρα	Συγκέντρωση πίσσών (g/nm <sup>3</sup> )		
	Μέγιστη	Ελάχιστη	Εύρος
Καθοδικού ρεύματος	6	0.04	0.1-1.2
Ανοδικού ρεύματος	150	1	20-100
Ρευστοποιημένη κλίνη	23	<0.1	1-15
Ρευστοποιημένη κλίνη με ανακυκλοφορία	30	<1	1-15

Οι τεχνολογίες παραγωγής ισχύς από αέριο προερχόμενο από αεριοποίηση βιομάζας μπορούν να έχουν μειωμένους ρύπους εφόσον έχουν τα απαραίτητα σχετικά τεχνικά χαρακτηριστικά και είναι η λειτουργία τους ρυθμισμένη ορθά.

Η ορθή λειτουργία και οι περιβαλλοντικά αποδεκτές εκπομπές ρύπων πρέπει να είναι αντικείμενο μετρήσεων που πρέπει να πραγματοποιούνται στις μονάδες αυτές σε τακτά χρονικά διαστήματα από εξειδικευμένα εργαστήρια.

### 3.2.3 Αναερόβια χώνευση – Βιοαέριο

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, ο Alessandro Volta ανακάλυψε πρώτος το βιοαέριο το 1776 και ο Humphrey Davy ήταν ο πρώτος που ανακάλυψε την παρουσία του αερίου μεθανίου στην κοπριά το 1800. Η αναερόβια χώνευση είναι μία από τις παλαιότερες διεργασίες που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία της ιλύος, που προκύπτει από τους βιολογικούς καθαρισμούς. Συγκεκριμένα, η αναερόβια χώνευση της ιλύος που προκύπτει από την επεξεργασία των αστικών λυμάτων (χαρακτηρίζονται από την υψηλή συγκέντρωση σε στερεά), αναπτύχθηκε στα τέλη του δέκατου ένατου αιώνα στην πόλη Vesoul της Γαλλίας από τον Louis H. Mouras, ο οποίος σχεδίασε και κατασκεύασε χωνευτήρες για την επεξεργασία της ιλύος (Malina and Pohland, 1992). Αργότερα, η αναερόβια χώνευση εφαρμόστηκε και στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων κυρίως μέσου και υψηλού οργανικού φορτίου (Lawrence and McCarty, 1967).

Η αναερόβια χώνευση είναι μια βιολογική διεργασία η οποία, παράγει και αυτή ένα σύνθετο αέριο που είναι γνωστό ως βιοαέριο το οποίο, αποτελείται κυρίως από μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) και διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και είναι η συνήθως προτιμώμενη μέθοδος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων υψηλού οργανικού φορτίου, λόγω της μικρότερης παραγωγής βιομάζας συγκριτικά με την αερόβια επεξεργασία.

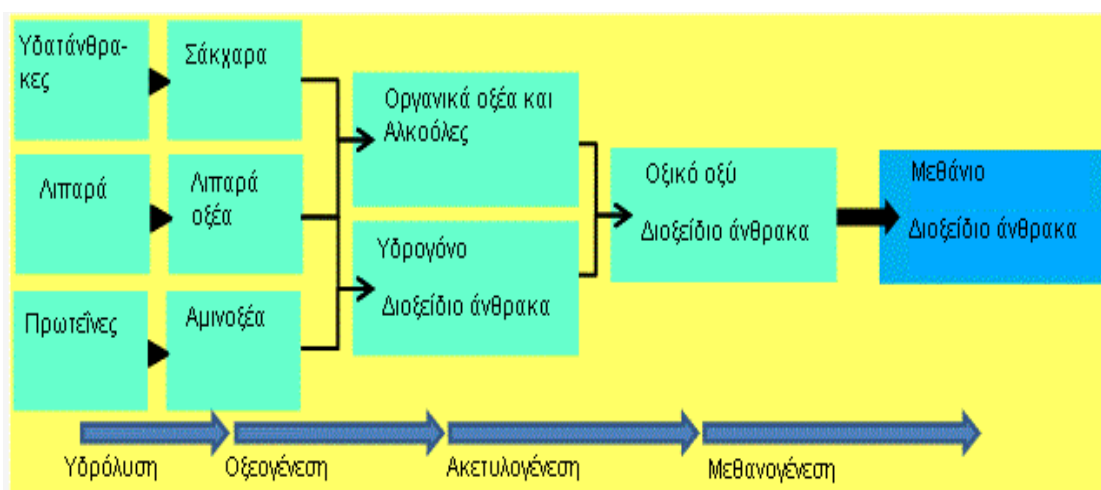
Το βιοαέριο παράγεται από τα ακόλουθα σημαντικά οργανικά απόβλητα:

- Στερεά και υγρά λιπάσματα ζώων
- Γεωργικά φυτικά απόβλητα
- Τα απόβλητα από τα γεωργικά προϊόντα της βιομηχανίας μεταποίησης
- Λείμματα



Στην εποχή μας, η αναερόβια επεξεργασία, Σχήμα 3.1, είναι μία ευρύτατα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την σταθεροποίηση της παραγόμενης λάσπης στις μονάδες βιολογικής επεξεργασίας αστικών και βιομηχανικών λυμάτων, ενώ χρησιμοποιείται ακόμη και για την επεξεργασία στερεών απορριμμάτων και άλλων υγρών αποβλήτων.

Τα τελευταία είκοσι χρόνια διεξάγεται σημαντική έρευνα για το αν η αναερόβια χώνευση είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή πολύτιμης ενέργειας από ρεύματα αποβλήτων και φυσικά υλικά ή για να μειώσει το δυναμικό της ρύπανσης ενός ρεύματος αποβλήτων. Η αναερόβια χώνευση είναι μια πολύπλοκη βιοχημική αντίδραση και διεξάγεται με έναν αριθμό βημάτων με χρήση διάφορων ειδών μικροοργανισμών που απαιτούν λίγο ή καθόλου οξυγόνο για να ζήσουν. Κατά τη διαδικασία παραγωγής του βιοαερίου, παράγεται περίπου 65% μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) και 30% διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ). Τα υπόλοιπα αέρια είναι συνήθως μικρότερες ποσότητες υδρόθειου ( $\text{H}_2\text{S}$ ), αζώτου ( $\text{N}_2$ ), υδρογόνου ( $\text{H}_2$ ), και οξυγόνου  $\text{O}_2$ . Η ποσότητα βιοαερίου που παράγεται ποικίλλει, πάντως, ανάλογα με τη θερμοκρασία των οργανικών αποβλήτων, η οποία επηρεάζει το ρυθμό της αποσύνθεσης. Αρκετοί διαφορετικοί τύποι βακτηρίων «εργάζονται» σε στάδια μαζί, για να σπάσουν σύνθετα οργανικά απόβλητα, με αποτέλεσμα την παραγωγή του βιοαερίου. Η ελεγχόμενη αναερόβια χώνευση απαιτεί έναν αεροστεγή θάλαμο, που ονομάζεται χωνευτής [6].



**Σχήμα 3.1** – Τα κύρια συστατικά των τροφίμων και οι διεργασίες μετατροπής τους κατά την αναερόβια χώνευση [6]

Η αναερόβια χώνευση είναι μια διεργασία με πολλά **πλεονεκτήματα**, κυρίως σε σχέση με την συνήθη αερόβια επεξεργασία αποβλήτων (διεργασία ενεργού ιλύος). Αυτά είναι τα εξής:

- Κατά την αναερόβια χώνευση των αποβλήτων παράγεται βιοαέριο. Το παραγόμενο βιοαέριο από τους αναερόβιους χωνευτήρες μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει ή να τύχει καθαρισμού για την απομάκρυνση του υδρόθειου ( $H_2S$ ) που πιθανόν να περιέχει, του διοξειδίου του άνθρακα ή της υγρασίας. Το μεθάνιο που παράγεται από έναν αναερόβιο χωνευτήρα μπορεί να καεί επί τόπου σε καυστήρες α) για παραγωγή θερμότητας για τη θέρμανση του χωνευτήρα και β) για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών· συνεισφέροντας έτσι σημαντικά στη μείωση του ενεργειακού κόστους, άρα και του κόστους επένδυσης, για μία ολοκληρωμένη μονάδα αναερόβιας επεξεργασίας.
- Η αναερόβια χώνευση παράγει μικρές ποσότητες λάσπης (3-20 φορές λιγότερη απ' ότι σε αερόβιες μεθόδους επεξεργασίας), γιατί ο συντελεστής απόδοσης βιομάζας των αναερόβιων βακτηρίων είναι σχετικά χαμηλός. Κάτω από αερόβιες συνθήκες, το 50% περίπου του οργανικού άνθρακα μετατρέπεται σε βιομάζα, ενώ κάτω από αναερόβιες συνθήκες μόνο το 5%. Για κάθε τόνο οργανικού υλικού που αποδομείται αναερόβια παράγονται μόνον 20-150 κιλά βιολογικής λάσπης, έναντι 400-600 κιλών που προκύπτουν κατά την αερόβια χώνευση αυτού.
- Λόγω του πολύ μικρού συντελεστή απόδοσης βιομάζας των οξικογόνων και μεθανογόνων μικροοργανισμών, οι απαιτήσεις της διεργασίας σε θρεπτικά συστατικά (άζωτο και φώσφορος) είναι πολύ μικρές, σε αντίθεση με τις αερόβιες διεργασίες επεξεργασίας αποβλήτων.
- Επιτυγχάνεται υψηλή απομάκρυνση οργανικού φορτίου (μπορεί να φτάσει και το 98%), ακόμα και σε συνθήκες υψηλής φόρτισης, ανάλογα με τον τύπο του κάθε απόβλητου και του χωνευτήρα που επιλέγεται.
- Καταναλώνεται ενέργεια μόνο για θέρμανση, ενώ τα λειτουργικά έξοδα και το κόστος κεφαλαίου για ανάπτυξη αναερόβιου συστήματος είναι συνήθως χαμηλά.
- Η διεργασία είναι κατάλληλη για ισχυρά αγροτο-βιομηχανικά απόβλητα.

- Καλά προσαρμοσμένη αναερόβια λάσπη μπορεί να παραμείνει ενεργή, χωρίς τροφοδοσία, για μεγάλο χρονικό διάστημα (άνω του έτους).
- Τα αναερόβια συστήματα, κάτω από κατάλληλες συνθήκες, μπορούν να αποδομήσουν “δύστροπες” ενώσεις, όπως χλωριωμένους υδρογονάνθρακες, ομοκυκλικές και ετεροκυκλικές αρωματικές ενώσεις, καθώς επίσης και επικίνδυνα χημικά απόβλητα, όπως νιτρογενείς αλειφατικές και αρωματικές ενώσεις.
- Οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί μπορούν να διατηρηθούν χωρίς τροφοδοσία για μεγάλες περιόδους (υπερβαίνουσες τον ένα χρόνο), χωρίς σοβαρή μείωση της ενεργότητας τους· ενώ άλλες σημαντικές ιδιότητες της αναερόβιας ιλύος παραμένουν σχεδόν ανεπηρέαστες, όπως η καθιζησιμότητα της ιλύος.

Πέρα από τα πολλά πλεονεκτήματα η αναερόβια χώνευση έχει και κάποια **μειονεκτήματα**, τα σημαντικότερα από τα οποία είναι τα εξής:

- Η εκκίνηση της αναερόβιας επεξεργασίας απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα, που μπορεί να διαρκέσει από 8 έως και 12 εβδομάδες, όταν η μικροβιακή καλλιέργεια δεν έχει εγκλιματιστεί προηγουμένως στο διαθέσιμο προς χώνευση απόβλητο. Αυτό αντιμετωπίζεται με τη λειτουργία μικρών μονάδων αναερόβιας επεξεργασίας των διαθέσιμων αποβλήτων, έτσι ώστε να υπάρχει ενεργή, προσαρμοσμένη μαγιά για την εκκίνηση άλλων νέων χωνευτήρων.
- Η διάσπαση των “δύστροπων” συστατικών παρουσιάζει πολύ μεγάλη ευαισθησία στις περιβαλλοντικές συνθήκες της αναερόβιας διεργασίας και στη σύσταση των αποδομήσιμων συστατικών.
- Η μεγάλη ευαισθησία των μεθανογόνων μικροοργανισμών σε πλήθος τοξικών ενώσεων. Τα τελευταία όμως χρόνια γίνονται προσπάθειες ανάπτυξης καταλλήλων μεθόδων και βιολογικών συστημάτων, ώστε να γίνει δυνατή η βιοαποδόμηση τοξικών ενώσεων κάτω από αναερόβιες συνθήκες.
- Απαιτούνται μεγάλοι υδραυλικοί χρόνοι παραμονής, εξαιτίας του μικρού ρυθμού ανάπτυξης των μεθανογόνων βακτηρίων.
- Η ισχυρή εξάρτηση της διεργασίας από τη θερμοκρασία.

### 3.2.4 Παραγωγή αιθανόλης

Διάφοροι τύποι βιομάζας οι οποίοι έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε άμυλο όπως το καλαμπόκι, πατάτες, παντζάρια, ζαχαροκάλαμο, σιτάρι, κριθάρι, μπορούν να μετατραπούν με τη διαδικασία της ζύμωσης σε αλκοόλη (αιθανόλη). Η ζύμωση είναι η βιοχημική διαδικασία που μετατρέπει τα σάκχαρα σε αιθανόλη (αλκοόλη). Σε αντίθεση με την παραγωγή βιοαερίου, η ζύμωση λαμβάνει χώρα με την παρουσία αέρα και είναι, ως εκ τούτου, μια διαδικασία αερόβιας χώνευσης.

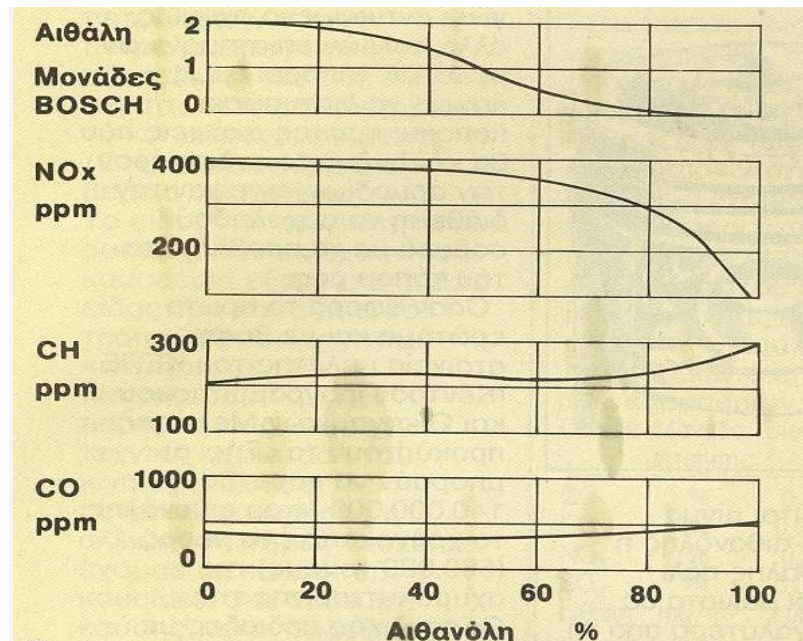
Η αιθανόλη είναι εύκολη στην μεταφορά και την αποθήκευση σε σχέση με το υδρογόνο. Η λατινική Αμερική, που κυριαρχείται από τη Βραζιλία, είναι η μεγαλύτερη περιοχή παραγωγής βίο-αιθανόλης στον κόσμο. Δεδομένου ότι η αξία της βίο-αιθανόλης αναγνωρίζεται ολοένα και περισσότερο, αρχίζουν και εισάγονται όλο και περισσότερες πολιτικές για τη στήριξη της ανάπτυξης και της εφαρμογής της ως εναλλακτικό καύσιμο με χρήση, κυρίως, σε κινητήρες Otto, Σχήμα 3.2, (π.χ. σε μίγμα με βενζίνη E85), ακόμα και ως πρόσθετο σε κινητήρες Diesel με σκοπό τη μείωση των εκπεμπόμενων σωματιδίων.



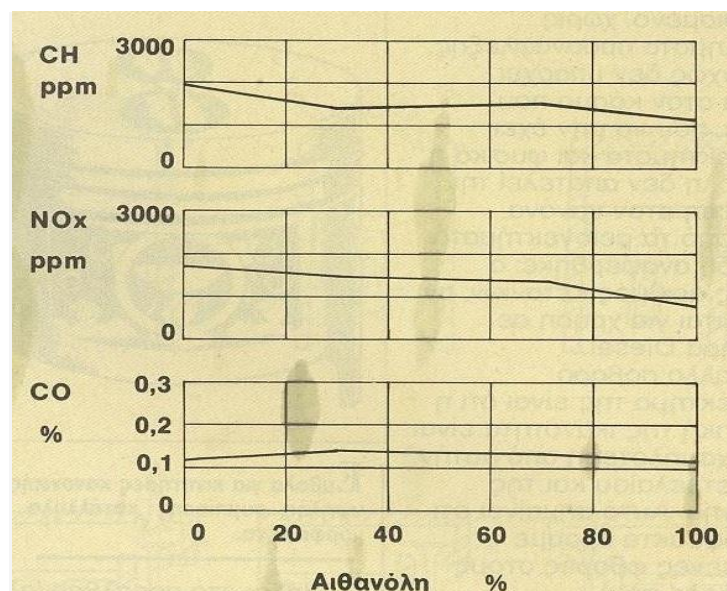
**Σχήμα 3.2** – Το μοντέλο Elba της Βραζιλιάνικης FIAT [27]

Η Βραζιλία, όπως αναφέραμε προηγουμένως, έχει μεγάλη εμπειρία στη χρησιμοποίηση της αιθανόλης σαν καύσιμο. Στην Εικόνα 3.2 το μοντέλο Elba της

Βραζιλιάνικης FIAT, «καίει» καθαρή αιθανόλη. Ο κινητήρας αποδίδει 2 HP περισσότερο από τον κοινό αντίστοιχο βενζινοκινητήρα χάρη στο υψηλότερο βαθμό συμπίεσης, ο οποίος μπορεί να επιτευχθεί λόγω του υψηλότερου αριθμού οκτανίων της αιθανόλης.



**Σχήμα 3.3** - Μεταβολή βασικών ρύπων σε πετρελαιοκινητήρα με την προσθήκη της αιθανόλης στο καύσιμο μίγμα [27]



**Σχήμα 3.4** - Μεταβολή βασικών ρύπων σε βενζινοκινητήρα με την προσθήκη της αιθανόλης στο καύσιμο μίγμα [27]

Με τη χρησιμοποίηση μίγματος αιθανόλης/πετρελαίου στους κινητήρες πετρελαίου και αιθανόλης/βενζίνης στους βενζινοκινητήρες επιτυγχάνεται η μείωση των πιο σημαντικών και βλαβερών για τον άνθρωπο ρύπων που αυτοί εκπέμπουν. Στο Σχήμα 3.3 βλέπουμε πώς μεταβάλλεται η εκπομπή βασικών ρυπαντών στους πετρελαιοκινητήρες και στο Σχήμα 3.4 στους βενζινοκινητήρες, με την προσθήκη της αιθανόλης στο καύσιμο μίγμα. Σημειώνεται ότι η αύξηση της εκπομπής υδρογονανθράκων (HC) και του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) με χρήση αλκοολών έχει πολύ μικρότερη σημασία σε σχέση με τη σημαντική μείωση της αιθάλης και των οξειδίων του αζώτου (NOx). Υπενθυμίζεται ότι τα οξείδια του αζώτου είναι 20 φορές πιο τοξικά από το μονοξείδιο του άνθρακα και σχεδόν 30 φορές πιο τοξικά από τους άκαυστους υδρογονάνθρακες. Το όφελος δηλαδή από τη μείωση της εκπομπής των NOx και της αιθάλης είναι πολύ σημαντικότερο και υπερκαλύπτει τη «ζημιά» από την αύξηση της εκπομπής των HC και CO, δίνοντας σαν αποτέλεσμα ένα σημαντικό οικολογικό όφελος.

### 3.3 Εξαεριωτές

Αεριοποίηση ονομάζεται η μερική καύση στερεών καυσίμων (βιομάζας), η οποία λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία περίπου 1000°C. Ο αντιδραστήρας ονομάζεται αεριοποιητής. Τα προϊόντα καύσης από την πλήρη καύση της βιομάζας γενικά περιέχουν άζωτο, υδρατμούς, διοξείδιο του άνθρακα και πλεόνασμα οξυγόνου. Ωστόσο στην αεριοποίηση, λόγω του ότι επικρατεί πλεόνασμα στερεών καυσίμων (ατελής καύση), τα προϊόντα της καύσης είναι εύφλεκτα αέρια όπως μονοξείδιο του άνθρακα (CO), υδρογόνο (H<sub>2</sub>) και ίχνη μεθανίου (CH<sub>4</sub>) καθώς και μη χρήσιμα προϊόντα, όπως πίσσα και σκόνη. Το κλειδί για την σχεδίαση ενός αεριοποιητή είναι να δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες ώστε (i) η βιομάζα να μετατρέπεται σε κάρβουνο και (ii) ο άνθρακας να μετατρέπεται σε CO και H<sub>2</sub> σε κατάλληλη θερμοκρασία.

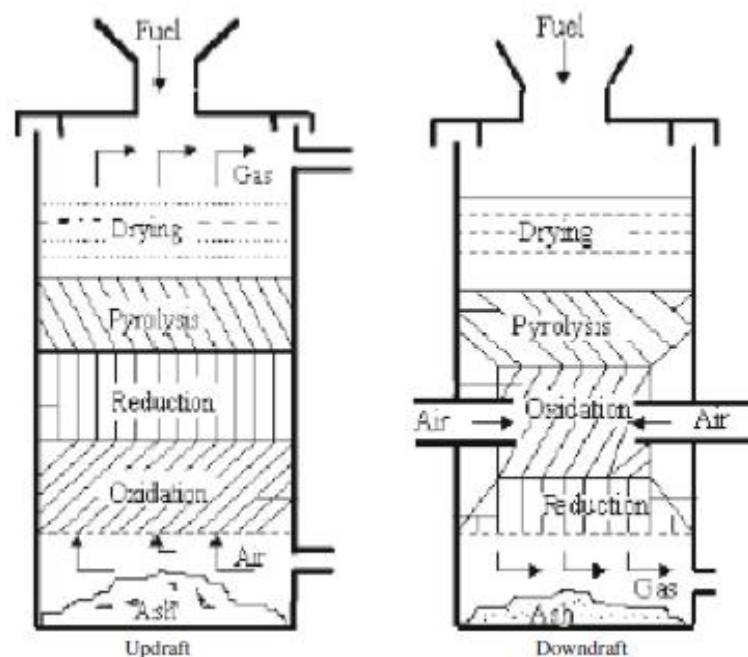
Οι αεριοποιητές χωρίζονται σε σταθερής κλίνης και ρευστοποιημένης, Πίνακας 3.3, με τον ίδιο τρόπο που ταξινομούνται και τα συστήματα σταθερής κλίνης και ρευστοποιημένης κλίνης στην τεχνολογία καύσης.

**Πίνακας 3.3-** Οι διαφορές ανάμεσα στους αεριοποιητές σταθερής και ρευστοποιημένης κλίνης [6]

Fixed bed	Fluidized bed
(-) Higher investment (about 10%), two lines	(+) Lower investment
(-) Feedstock fines must be agglomerated	(+) No problems with feedstock fines
(-) Particle size as uniform as possible	(+) Broad particle size distribution
(+) Very great particle size possible (up to 100 mm)	(-) Limited Particle size (up to 50 mm)
(+) Nearly tar free gas	(-) Tar (1 g/m <sup>3</sup> n); high tar content in the gas
(+) High carbon conversion rate (90–99%)	(-) Low carbon conversion rate (90%)
(+) Discharge of liquid slag	(-) Ash fusion by low-softening ash

(+) indicates positive aspects; (–) indicates negative aspects

Δεδομένου του ότι υπάρχει μια αλληλεπίδραση στον αεριοποιητή του αέρα ή του οξυγόνου με τη βιομάζα, οι αεριοποιητές κλίνης κατατάσσονται ανάλογα με τον τρόπο που ο αέρας ή το οξυγόνο εισάγεται σε αυτούς. Υπάρχουν δύο τύποι αεριοποιητών: καθοδικών και ανοδικών ρευμάτων. Αυτοί ονομάζονται επίσης και παράλληλης ροής και αντirroής αντίστοιχα, Σχήμα 3.5 και Πίνακας 3.4.



**Σχήμα 3.5** - Καθοδικοί και ανοδικοί αεριοποιητές. [6]

Ο ανοδικός αεριοποιητής έχει πέρασμα αέρα στο κάτω μέρος του και τα εύφλεκτα αέρια βγαίνουν από την κορυφή του. Στον αεριοποιητή καθόδου ο αέρας περνά από τους σωλήνες ή τα ακροφύσια εισαγωγής με κατεύθυνση προς τα κάτω. Με ελαφρά παραλλαγή, σχεδόν όλοι οι εξαεριστές κατατάσσονται στις παραπάνω κατηγορίες. Η τελική μορφή του καυσίμου, το μέγεθος, η

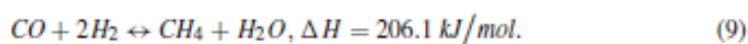
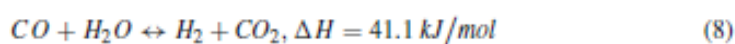
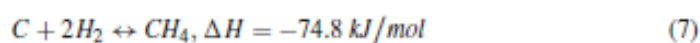
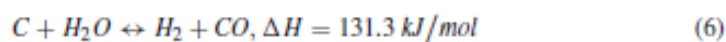
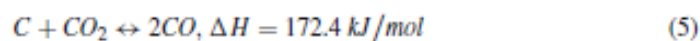
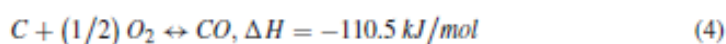
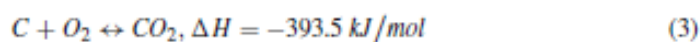
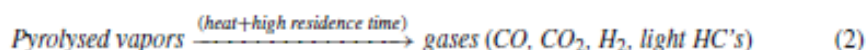
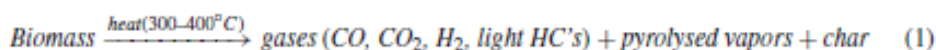
περιεκτικότητα σε υγρασία και τέφρα υπαγορεύουν την επιλογή ενός τύπου αεριοποιητή.

**Πίνακας 3.4** - Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαφόρων κατηγοριών αεριοποιητών [6]

S. No.	Gasifier type	Advantage	Disadvantages
1.	Updraft	Small pressure drop Good thermal efficiency Little tendency towards of slag formation	Great sensitivity to tar and moisture and moisture content of fuel Relatively long time required for start up of IC engine Poor reaction capability with heavy gas load
2.	Downdraft	Flexible adaptation of gas Production to load Low sensitivity to charcoal dust and tar content of fuel	Design tends to be tall Not feasible for very small particle size of fuel

### 3.3.1 Χημικές αντιδράσεις στους εξαεριωτές

Η αεριοποίηση είναι μια ιδιαίτερα πολύπλοκη χημική διαδικασία. Ο Bridgewater περιέγραψε την αεριοποίηση ως μια διαδικασία ξήρανσης και εξάτμισης της βιομάζας που ακολουθείται από πυρόλυση και τέλος από οξειδωση και αναγωγή. Ωστόσο, η συνολική διαδικασία μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά με τις αντιδράσεις που περιγράφονται παρακάτω στο Σχήμα 3.6.



**Σχήμα 3.6** - Οι Χημικές αντιδράσεις στους εξαεριωτές [6]



### 3.3.2 Χαρακτηριστικά καυσίμου αεριοποιητή

Σχεδόν κάθε καύσιμο ανθρακούχο ή βιομάζας, μπορεί να αεριοποιηθεί υπό πειραματικές ή εργαστηριακές συνθήκες.

**Ένα καύσιμο αεριοποιητή μπορεί να χαρακτηριστεί ως «καλό» ή «κακό», σύμφωνα με τις ακόλουθες παραμέτρους:**

- **Την περιεκτικότητα σε υγρασία:** Είναι επιθυμητή η χρήση καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, γιατί η απώλεια θερμότητας λόγω της πραγματοποίησης της διαδικασίας της εξάτμισης πριν από την αεριοποίηση είναι σημαντική με αποτέλεσμα, ο ισολογισμός θερμότητας της αντίδρασης της αεριοποίησης να είναι μειωμένος. Εκτός του ότι αλλοιώνεται ο ισολογισμός θερμότητας του αεριοποιητή, η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία προσθέτει επίσης φορτίο κατά την ψύξη και το φιλτράρισμα του εξοπλισμού, αυξάνοντας έτσι την πτώση πίεσης λόγω της συμπύκνωσης του υγρού. Έτσι, προκειμένου να μειωθεί η περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου απαιτείται κάποια αρχική επεξεργασία των καυσίμων. Γενικά, η επιθυμητή περιεκτικότητα σε υγρασία για το καύσιμο πρέπει να είναι μικρότερη του 20%.
- **Την τέφρα:** Η περιεκτικότητα του καυσίμου που παραμένει σε οξειδωμένη μορφή, μετά την πλήρη καύση συνήθως ονομάζεται τέφρα. Η τέφρα παρεμβαίνει ουσιαστικά στη διαδικασία αεριοποίησης με δύο τρόπους: α) ενώνεται με σκοπό να σχηματίσει σκουριά και αυτό σταματά ή αναστέλλει την καθοδική ροή της τροφοδοσίας με βιομάζα, και β) ακόμη και αν δεν ενωθεί, στεγάζει τα σημεία του καυσίμου στα οποία αρχίζει η ανάφλεξη, με αποτέλεσμα να μειώνει το βαθμό αντίδρασης του καυσίμου. Η αφαίρεση της τέφρας και της πίσσας διασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος του αεριοποιητή. Έχουν επινοηθεί διάφορα συστήματα για την αφαίρεση της τέφρας. Μόνο δύο καύσιμα έχουν ελεγχθεί διεξοδικά και έχει αποδειχθεί ότι είναι αξιόπιστα: το κάρβουνο και το ξύλο. Σε περιόδους ενεργειακής κρίσης, όπου οι περισσότερες χώρες δεν έχουν αρκετή προμήθεια ξύλου, είναι συμφέρουσα και ελκυστική η χρήση γεωργικών υπολειμμάτων. Για τον αγροτικό τομέα, αυτό είναι μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση.

- Την περιεκτικότητα σε σκόνη: Όλα τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε έναν αεριοποιητή παράγουν σκόνη. Αυτή η σκόνη είναι μια ενόχληση, δεδομένου ότι μπορεί να φράξει την Μ.Ε.Κ. Ο σχεδιασμός του αεριοποιητή πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να μην πρέπει να παράγει περισσότερο από 2-6 g/m<sup>3</sup> σκόνης. Όσο υψηλότερη είναι η σκόνη που παράγεται, τόσο περισσότερο φορτίο τίθεται στα φίλτρα, τα οποία απαιτούν συχνό καθαρισμό και αύξηση της συντήρησής τους.
- Την περιεκτικότητα σε πίσσα: Η πίσσα είναι ένα από τα πιο δυσάρεστα συστατικά του αερίου λόγω του ότι αυτή τείνει να κατακαθήσει στον εξαεριωτή και στις βαλβίδες εισαγωγής, προκαλώντας κόλλημα και γενικά προβληματική λειτουργία. Η πίσσα είναι προϊόν υψηλής μη αναστρέψιμης διαδικασίας που λαμβάνει χώρα στην ζώνη πυρόλυσης. Η φυσική ιδιότητα της πίσσας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το ρυθμό της θερμότητας, και το χρώμα της κυμαίνεται από καφέ και υδαρές (60% νερό) έως μαύρο και παχύρευστο (7% νερό). Υπάρχουν περίπου 200 χημικά συστατικά που έχουν εντοπιστεί να περιέχονται στην πίσσα μέχρι τώρα. Ένας καλά σχεδιασμένος αεριοποιητής θα πρέπει να παράγει μικρότερο από 1 g/m<sup>3</sup> πίσσας.
- Τον τύπο βιομάζας: Η στοιχειακή σύνθεση της βιομάζας έχει σημαντική επίδραση στην σύνθεση του προϊόντος αερίου. Η απελευθέρωση του αερίου κατά την διαδικασία της πυρόλυσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αναλογία άνθρακα/υδρογόνου, καθώς και την αναλογία οξυγόνου/άνθρακα, και αυξάνεται όταν αυτές οι αναλογίες αυξάνονται, ιδιαίτερα με την αύξηση της αναλογίας υδρογόνου/άνθρακα [5].

### **3.4 Ανασκόπηση των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν με χρήση της βιομάζας ως καύσιμο**

Ένας μεγάλος αριθμός ερευνών πραγματοποιήθηκε με την βιομάζα ως καύσιμο σε Μ.Ε.Κ από ερευνητές από διάφορα μέρη του κόσμου. Τα περισσότερα από αυτά τα πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί στις Η.Π.Α., την Ευρώπη, την Ινδία, τη Μαλαισία, την Κίνα και τη Γερμανία. Μια περίληψη αυτών των πειραματικών αποτελεσμάτων δίνεται παρακάτω:

Ο Vyarawalla και συνεργάτες (1984) σχεδίασαν και διαμόρφωσαν με καύσιμο τη βιομάζα, ένα σύστημα αεριοποιητή ισχύος 9 kW για εργαστηριακά πειράματα.

Ο Parikh και συνεργάτες (1989) σύγκριναν την απόδοση της άμεσης και έμμεσης έγχυσης αερίου, σε κινητήρα πετρελαίου, παραγόμενο σε καθοδικό αεριοποιητή βιομάζας.

Οι Jorapur και Rajvanshi (1997) πρότειναν την ανάπτυξη ενός συστήματος αεριοποίησης χαμηλής πυκνότητας βιομάζας για θερμική εφαρμογή. Ο αεριοποιητής μπορούσε να χειριστεί καύσιμα όπως τα φύλλα του ζαχαροκάλαμου, μίσχους bajra και ζαχαροκάλαμο βγάσσης. Από τα αποτελέσματα, απεδείχθη ότι αυτό το σύστημα αεριοποίησης μπορεί να τοποθετηθεί με επιτυχία σε υφιστάμενες πετρελαϊκές και ατμοηλεκτρικές βιομηχανίες, φούρνους/λέβητες, σε μεταλλουργικές και άλλες βιομηχανίες.

Ο Tripathi και συνεργάτες (1998) αναφέρθηκαν ειδικότερα στην διαθεσιμότητα της Ινδίας σε οκτώ επιλεγμένα γεωργικά υπολείμματα και την πιθανή χρησιμοποίησή τους στην τεχνολογία αεριοποίησης βιομάζας. Έχει σημειωθεί ότι περισσότερα από οκτώ εκατομμύρια τόνοι αυτών των υπολειμμάτων παρήχθησαν κατά το έτος αυτό με ένα πρωτογενή ενεργειακό δυναμικό περίπου  $1.200 \times 10^{15}$  J. Αυτά τα γεωργικά υπολείμματα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν επωφελώς ως πρώτη ύλη στην αεριοποίηση σταθμών βιομάζας.

Οι Martin και συνεργάτες (1997) μελέτησαν την αεριοποίηση του αλεσμένου ξύλου και ανέφεραν έναν συνδυασμένο κύκλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτός ο συνδυασμός έκανε πιο αποτελεσματική τη χρήση του αεριοποιητή, δεδομένου ότι το παραγόμενο αέριο μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, όταν οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλές, ενώ μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή καυσίμων κίνησης σε άλλες εποχές του χρόνου. Ο Martin, επίσης, σύγκρινε τον αεριοποιητή σταθερής κλίνης με τον ρευστοποιημένης κλίνης, θέτοντας ως κριτήρια την τεχνολογία, την χρήση του υλικού, την χρήση της ενέργειας, του περιβάλλοντος και της οικονομίας.

Ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα  $\lambda_a$ , διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη σύνθεση του αερίου, τη θερμογόνο αξία του, και την παραγωγή τού

προϊόντος αερίου στον καθοδικό αεριοποιητή βιομάζας. Η βέλτιστη αναλογία για την καλύτερη απόδοση του καθοδικού αεριοποιητή βιομάζας βρέθηκε στη συγκεκριμένη εργασία 0,38. Ο ρυθμός ροής του αερίου ανά μονάδα βάρους των καυσίμων συνδέθηκε γραμμικά με τον παραπάνω λόγο. Η ειδική κατανάλωση των υλικών βιομάζας (ξύλινα έπιπλα και πριονίδια) βρέθηκε να είναι της τάξης των 2 Kg/KWh, ενώ η συνολική απόδοση του ηλεκτρικού συστήματος παραγωγής ισχύος με την χρήση βιομάζας ήταν 10-11%. η αποδοτικότητα του αερίου που παράγεται έφτασε περίπου στο 80%. Ο ρυθμός τροφοδοσίας είχε επίσης επιπτώσεις στην ενεργειακή αξία, τη σύνθεση του αερίου προϊόντος και στις θερμοκρασιακές ζώνες του αεριοποιητή. Η βέλτιστη λειτουργία του αεριοποιητή βρέθηκε να είναι μεταξύ 1,44 και 1,47 Nm<sup>3</sup>/kg με αναλογίες καυσίμου /αέρα στις τιμές των 4,06 και 4,48 kg/h.

Αεριοποιητής κατασκευάστηκε στη Σρί Λάνκα για τη βιομηχανία τσαγιού. Η πειραματική δοκιμή αυτού υπό διάφορες συνθήκες, και τα δεδομένα που προέκυψαν, χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα ενός υπολογιστή που αναπτύχθηκε για να διερευνήσει την επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού και χαρακτηριστικών του αεριοποιητή στην απόδοση μετατροπής από βιομάζα σε αέριο. Το συμπέρασμα ήταν ότι ένα μέγεθος ξύλου 3-5 cm με περιεκτικότητα σε υγρασία κάτω από 15%, θα έπρεπε να χρησιμοποιείται σε αυτόν τον αεριοποιητή. Θα πρέπει επίσης να αποφεύγεται υλικό τροφοδοσίας με σταθερό περιεχόμενο άνθρακα μεγαλύτερο από 30%, και η θερμότητα των απωλειών πρέπει να είναι άνω του 15%. Για τις παραπάνω παραμέτρους, η ζώνη αεριοποίησης θα πρέπει να έχει 33 cm μήκος για να επιτευχθεί μια αποδεκτή απόδοση μετατροπής.

Οι τεχνικές επιδόσεις και η βιωσιμότητα του μεγαλύτερου αεριοποιητή στην Ινδία (500 KW) προέκυψαν αρκετά ικανοποιητικές. Το συνολικό ύψος της αποτελεσματικότητας του εν λόγω εργοστασίου ήταν περίπου 19% πριν την αντικατάσταση του πετρελαίου με βιομάζα, ενώ μετά ήταν 64%. Η συγκέντρωση των ρύπων, όπως μονοξειδίου του άνθρακα (CO), τα οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>), το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>), οι υδρογονάνθρακες (HC) και τα σωματίδια στα καυσαέρια ελέγχθηκαν σε ικανοποιητικά επίπεδα. Οι εκπομπές αυτές περιορίστηκαν με χρήση ξύλου Kikar.

Διερευνήθηκε επίσης η απόδοση των ξυλώδους συστατικών βιομάζας χρησιμοποιώντας καθοδικό (σταθερής κλίνης) αεριοποιητή στους 1173 K και σε

ατμοσφαιρική πίεση. Η απόδοση του παραπάνω καυσίμου προέκυψε από το ποσοστό της κατανάλωσης του καυσίμου, τη θερμογόνο αξία του παραγόμενου αερίου και την αποτελεσματικότητα της αεριοποίησης με διαφορετικούς ρυθμούς ροής του αερίου. Η θερμογόνο αξία του αερίου και η συγκέντρωση του CO, μαζί με την αποτελεσματικότητα αεριοποίησης, αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού ροής του αερίου. Η μέγιστη απόδοση αεριοποίησης βρέθηκε να είναι 68,31% σε μία ταχύτητα ροής αερίου 5,5 m<sup>3</sup>/h, η οποία είναι συγκρίσιμη με εκείνη του ξύλου. Σε λειτουργία με μίγμα καυσίμου (ορυκτά καύσιμα diesel με αέριο βιομάζας), η συγκέντρωση των ρύπων, όπως το μονοξειδίο του άνθρακα (CO), το διοξειδίο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), το μονοξειδίο του αζώτου (NO), το διοξειδίο του αζώτου (NO<sub>2</sub>) μειώθηκαν κατά 55%, 19,7%, 82% και 83%, αντίστοιχα, ενώ των υδρογονανθράκων (HC) αυξήθηκαν κατά 67,2%. Σε μια άλλη μεικτή λειτουργία καυσίμων πετρελαίου με αέριο βιομάζας, η συγκέντρωση ρύπων όπως HC, NO και NO<sub>2</sub> μειώθηκε κατά 48,28%, 61,57% και 80,48%, αντίστοιχα, ενώ το CO αυξήθηκε κατά 16,31%.

Αξίζει να αναφέρουμε ότι Μ.Ε.Κ έχουν επίσης λειτουργήσει με έλαιο σπόρου από καουτσούκ και με συνδυασμούς όπως πετρέλαιο και ψίχα κοκοφοίνικα, και ελαστικό περικάρπιο λαδιού και ψίχα κοκοφοίνικα· ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα μειώθηκε με τη χρήση μίγματος βιομάζας με πετρέλαιο. Επίσης σε λειτουργία μίγματος, οι εκπομπές όπως ο καπνός και τα NO<sub>x</sub> μειώθηκαν, ενώ το CO και HC αυξήθηκαν σημαντικά. Η αύξηση της περιεκτικότητας οξυγόνου στο μείγμα καυσίμου αύξησε την κατανάλωση καυσίμου στον κινητήρα. Όσο περισσότερο οξυγονωμένο καύσιμο προστίθεται στο καύσιμο, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση που επιτυγχάνεται στον καπνό και στα αιωρούμενα σωματίδια (PM), ενώ παράλληλα παρατηρείται μικρή αύξηση των NO<sub>x</sub>.

Οι επιδράσεις της ροής του αέρα και της υγρασίας, στον ρυθμό κατανάλωσης της βιομάζας και στην ποιότητα του παραγόμενου αερίου είναι επίσης σημαντική. Ο ρυθμός κατανάλωσης της βιομάζας μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία, ενώ αυξάνεται όταν υπάρχει αύξηση στην παροχή του αέρα.

Τέλος αξίζει να αναφέρουμε ότι προτάθηκε ένα μονοδιάστατο στατικό μοντέλο αεριοποίησης βιομάζας, σε ένα σταθερής κλίνης καθοδικό αεριοποιητή. Το συγκεκριμένο μοντέλο βασιζόταν στις εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της

ενέργειας και περιελάμβανε την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ στερεάς και αέριας φάσης, καθώς και τη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από τα στερεά σωματίδια. Το προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο στη μελέτη της επίδρασης παραμέτρων όπως η μέση διάμετρος των σωματιδίων της βιομάζας, η ταχύτητα ροής του αέρα, η γεωμετρία του αεριοποιητή, η σύνθεση και η θερμοκρασία εισόδου του παράγοντα αεριοποίησης και του τύπου της βιομάζας, στην αποτελεσματικότητά του αεριοποιητή. Εξετάστηκε η εύφλεκτη παραγωγή αερίου από υλικά βιομάζας όπως το κέλυφος καρύδας, κέλυφος φυσικέλαιου και φλοιού ρυζιού, πειραματικά σε 800°C χρησιμοποιώντας την τεχνική αεριοποίησης σε αεριοποιητή καθοδικού ρεύματος. Η θερμιδική αξία του κελύφους της καρύδας ήταν 23,01% υψηλότερη από το κέλυφος καρπών και 45,45% υψηλότερη από τον φλοιό ρυζιού. Η ποσότητα του υδρογόνου στο παραγόμενο αέριο από κέλυφος καρυδιού ήταν υψηλότερη από το κέλυφος καρύδας και τον φλοιό ρυζιού, αλλά το μονοξείδιο του άνθρακα ήταν 17,55% και 21,22% υψηλότερο από το κέλυφος καρπών και τον φλοιό ρυζιού αντίστοιχα, σε σύγκριση με το κέλυφος καρύδας. Επίσης, το κέλυφος καρύδας είχε 38,71% περισσότερη περιεκτικότητα σε μεθάνιο σε σύγκριση με άλλα υλικά βιομάζας, καθώς και μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άνθρακα. Με βάση τα παραπάνω το κέλυφος καρύδας βρέθηκε το καταλληλότερο καύσιμο για αεριοποιητή σε σύγκριση με τα άλλα δύο υλικά βιομάζας [3].

### **Πλεονεκτήματα:**

Πολλά πλεονεκτήματα είναι εμφανή από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας στον τομέα της χρήσης βιομάζας. Τα παρακάτω είναι μερικά από τα πλεονεκτήματα της χρήσης βιομάζας ως καύσιμο σε Μ.Ε.Κ:

- Σε χώρες που βασίζονται στη γεωργία, τα γεωργικά απόβλητα που συγκεντρώνονται και χρησιμοποιούνται βοηθούν στην μείωση των δαπανών για εισαγωγές πετρελαίου.
- Η ανάπτυξη μηχανημάτων χρήσης βιομάζας ενισχύει την εγχώρια και κυρίως την αγροτική οικονομία των χωρών βασιζόμενων στην γεωργία.
- Η βιομάζα είναι βιοδιασπώμενη και μη τοξική.
- Δεν περιέχει αρωματικούς υδρογονάνθρακες.
- Έχει έναν ικανοποιητικό αριθμό κετανίου.

- Είναι φιλική προς το περιβάλλον λόγω της απουσίας θείου.
- Δεν απαιτείται κάποια σημαντική τροποποίηση στη μηχανή για την καύση της.
- Η ασφάλεια διαχείρισης/αποθήκευσης του καυσίμου είναι βελτιωμένη σε σχέση με το πετρέλαιο (το σημείο ανάφλεξης είναι υψηλότερο από εκείνο του πετρελαίου).
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο εντός της υφιστάμενης υποδομής, (η οποία λειτουργούσε με πετρέλαιο) με μικρή ή καμία τροποποίηση στη μηχανή.

### **Προκλήσεις:**

Οι μεγάλες προκλήσεις που προκύπτουν από τη χρήση της βιομάζας ως καύσιμο Μ.Ε.Κ παρατίθεται παρακάτω:

- Η τιμή της βιομάζας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η διαθεσιμότητα, η μεταφορά και η ξήρανση.
- Η αποθήκευση της είναι δύσκολη (ιδιαίτερα για τη διατήρηση της σταθερότητας της στην μακροχρόνια αποθήκευση)
- Το σημείο ανάφλεξης σε μίγματα βιομάζας είναι αναξιόπιστο.
- Η αποδοχή της βιομάζας ως καύσιμο από τους κατασκευαστές κινητήρων είναι μια άλλη σημαντική δυσκολία.
- Η διαρκής διαθεσιμότητα ενός συγκεκριμένου τύπου βιομάζας θα πρέπει να εξασφαλίζεται πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε μεγάλη χρήση της σε Μ.Ε.Κ.

### **Τεχνικές δυσκολίες και προτεινόμενες λύσεις:**

Οι μεγάλες τεχνικές δυσκολίες που χρήζουν περαιτέρω προσοχής είναι:

- Η ανάπτυξη λιγότερων δαπανηρών ελέγχων ποιότητας.
- Πρέπει να πραγματοποιούνται δοκιμές εκπομπών ρύπων για μια ευρεία γκάμα πρώτων υλών βιομάζας.
- Πρέπει να πραγματοποιηθούν δοκιμές τροφοδοσίας με βιομάζα ως καύσιμο, σε διαφορετικούς τύπους κινητήρων με στόχο την ενίσχυση της εμπιστοσύνης των καταναλωτών και την διαβεβαίωση αυτών για την συνεχιζόμενη σταθερή απόδοση του κινητήρα και των εκπομπών ρύπων.

- Απαιτούνται μελέτες για να εντοπιστούν πιθανές αγορές, προκειμένου να εξισορροπηθεί το κόστος και η διαθεσιμότητα της βιομάζας.

### **3.5 Συμπέρασμα**

Οι ερευνητές σε διάφορες χώρες διεξήγαγαν αρκετές πειραματικές εργασίες με τη χρήση του παραγόμενου αερίου προερχόμενο από την καύση της βιομάζας. Τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών έδειξαν ότι ο βαθμός απόδοσης ήταν συγκρίσιμος με εκείνον της καύσης πετρελαίου, με μικρές μόνο σχετικά απώλειες ισχύος. Οι εκπομπές σωματιδίων βρέθηκαν επίσης μικρότερες από εκείνες του πετρελαίου. Ως εκ τούτου, τα παραγόμενα αέρια από τη βιομάζα μπορούν, καταρχήν, να θεωρηθούν ως κατάλληλα και ενδιαφέροντα υποκατάστατα καύσιμα του πετρελαίου· χρειάζεται, σε κάθε περίπτωση, συνέχεια της σχετικής έρευνας για την επίτευξη πιο σίγουρων και ασφαλών συμπερασμάτων.



# 4. Η ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι Nusselt και Wentzel πραγματοποίησαν μελέτες σχετικά με την ταχύτητα καύσης της σκόνης άνθρακα σε Μ.Ε.Κ. Το συμπέρασμα από την έρευνα τους ήταν ότι, για σχετικά χαμηλές ταχύτητες στον κινητήρα (400 rpm), η σκόνη άνθρακα μπορεί να καεί στο 84% της ταχύτητας καύσης του πετρελαίου υπό τις συνήθεις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα.

Σχετικά με τη χρήση μιγμάτων άνθρακα, οι Caton και Rosegay ανέφεραν ότι η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής που μπορεί να επιτύχει ο κινητήρας που εξέτασαν, όταν τροφοδοτείται με σωματίδια άνθρακα μεγέθους 15 μm σε διάλυμα με νερό (CWS) ήταν 1500 rpm. Αργότερα, ο Kakwani διαπίστωσε ότι μπορούσαν να επιτευχθούν και ταχύτητες περιστροφής της τάξης των 2000 rpm. Οι παραπάνω διαπιστώσεις επιβεβαιώθηκαν από δοκιμές που έγιναν από την Detroit Diesel Corporation σε συνεργασία με το Southwest Research Institute στις Η.Π.Α. σε 2-Χ κινητήρα πετρελαίου (τύπος-8v149) με διάλυμα άνθρακα/νερού στις 1900 rpm.

Το 1978 ο Saxton και συνεργάτες πραγματοποίησαν επίσης μελέτες σχετικά με τον ρυθμό καύσης των σωματιδίων του άνθρακα σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα, σωματίδια άνθρακα χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς σε ξηρή μορφή και παρείχαν ενδιαφέρουσες

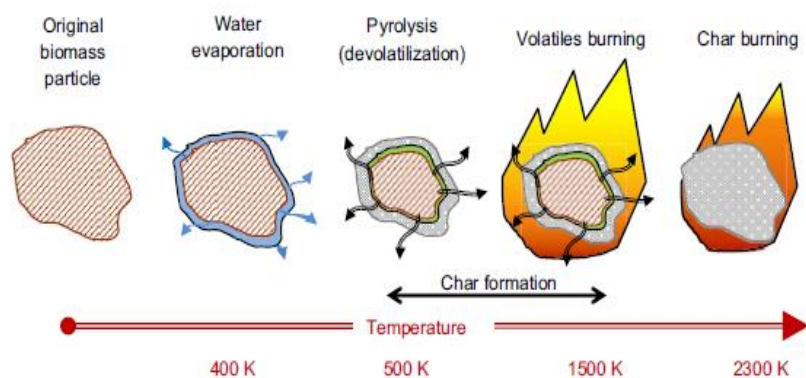
επιδόσεις στον κινητήρα. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία διαλύματα άνθρακα/νερού με 50% κατά βάρος περιεκτικότητα σε νερό, τα αποτελέσματα των επιδόσεων των οποίων οδήγησαν στην περαιτέρω ανάπτυξη και μακροχρόνια έρευνα.

#### 4.1 Σύγκριση της διαδικασίας καύσης της βιομάζας με την σκόνη άνθρακα

**Πίνακας 4.1-** Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της καύσης της βιομάζας σε σχέση με τη σκόνη άνθρακα [3]

	Coal dust	Biomass dust
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Higher heating value</li> <li>• Still available</li> <li>• Higher density</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub> neutral</li> <li>• Higher volatile content</li> <li>• Largely available</li> <li>• Available everywhere</li> <li>• Cheap harvesting</li> <li>• Both adapted to centralized and decentralized energy production</li> </ul>
Drawbacks	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fossil CO<sub>2</sub> release</li> <li>• More abrasive</li> <li>• Lower volatile content</li> <li>• Higher ash content</li> <li>• Geographically restricted → longer transport distance = higher cost</li> <li>• Expensive mining process</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lower heating value</li> <li>• Lower density → higher transport costs</li> </ul>

Η περιγραφή της καύσης της βιομάζας δεν είναι εύκολος στόχος, λόγω της μεγάλης ετερογένειας στις φυσικές και χημικές ιδιότητές της. Από την άλλη πλευρά, η καύση της σκόνης άνθρακα, έχει μελετηθεί εκτενώς. Για το λόγο αυτό, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε περισσότερο με την διαδικασία καύσης της βιομάζας, Πίνακας 4.1 και Σχήμα 4.1.



**Σχήμα 4.1-** Τα στάδια καύσης ενός σωματιδίου βιομάζας [11]

Ένα σωματίδιο βιομάζας καίγεται ακολουθώντας διαφορετικά στάδια, τα οποία παρίστανται γραφικά στο Σχήμα 4.1. Τα στάδια αυτά είναι:

- Πρόσδοση θερμότητας
- Εξάτμιση
- Πυρόλυση/Αποπτητικοποίηση
- Καύση των αέριων προϊόντων της αποπτητικοποίησης
- Καύση των υπολειμμάτων

Κάθε ένα από τα βήματα αυτά αντιπροσωπεύουν και ένα συγκεκριμένο χρόνο, ο οποίος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της βιομάζας και τις εξωτερικές παραμέτρους. Κατά συνέπεια, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα φυσικά και τα χημικά ζητήματα τα οποία προκύπτουν, δηλαδή:

- Οι αντιδράσεις υγρής και αέριας φάσης τόσο στην επιφάνεια των σωματιδίων όσο και στο εσωτερικό.
- Η διάχυση της αέριας και υγρής φάσης και η μεταφορά θερμότητας εντός του σωματιδίου.
- Η μεταφορά θερμότητας με το περιβάλλον.
- Η μεταφορά μάζας με το περιβάλλον.

Η διάρκεια κάθε βήματος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα σε νερό των σωματιδίων, το πτητικό περιεχόμενο, τη φύση και τα χαρακτηριστικά των υπολειμμάτων που προκύπτουν από την απομάκρυνση των πτητικών. Αυτά τα στάδια συνδέονται στενά μεταξύ τους και μπορούν να συμβούν ταυτόχρονα, ανάλογα με τις εξωτερικές παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά της βιομάζας.

Μετά την εξάτμιση του νερού σε θερμοκρασίες κοντά στους 550 K, πραγματοποιείται η πυρόλυση (βήμα αποπτητικοποίησης) και συνεχίζει έως τους 1300 K. Κατά την διάρκεια αυτής της φάσης, τα σωματίδια απελευθερώνουν βαρύτερες οργανικές ενώσεις, οι οποίες μπορούν να αντιδράσουν στην επιφάνεια των σωματιδίων και να παράγουν ελαφρύτερα πτητικά, τα οποία μπορούν να εξέλθουν από το σωματίδιο. Ταυτόχρονα, αρχίζει και διαμορφώνεται το στερεό καμένο υπόλειμμα που απομένει μετά την απομάκρυνση των πτητικών. Οι πτητικές ενώσεις είναι αρκετά αντιδραστικές γιατί μόλις η συγκέντρωσή τους στα όρια του σωματιδίου είναι αρκετά υψηλή και οι εξωτερικές παράμετροι πληρούν τις προϋποθέσεις αυτανάφλεξης, δημιουργείται φλόγα. Η

έναρξη της καύσης του πτητικού έχει παρατηρηθεί ότι ξεκινάει μετά το στάδιο της αποπτητικοποίησης. Το στάδιο καύσης των πτητικών, από την άλλη πλευρά, είναι γνωστό ότι είναι πολύ γρήγορο. Κατά το στάδιο της καύσης, η θερμοκρασία των σωματιδίων είναι γνωστό ότι φτάνει στους 1500 K.

Κατά την εξέταση της καύσης της βιομάζας είναι αναγκαίο να ελέγχονται συγκεκριμένα φαινόμενα όπως: η αεριοπροώθηση (jet propulsion) των σωματιδίων που οφείλεται στην πτητική απελευθέρωση, η περιστροφή των σωματιδίων, η συρρίκνωση και το διαφορετικό πορώδες κατά την διάρκεια της προθέρμανσης. Κρίσιμες παράμετροι είναι επίσης το μέγεθος των σωματιδίων, η θερμική αγωγιμότητα και η θερμοχωρητικότητα, η όποια καθορίζει την μεταφορά θερμότητας στο κέντρο του σωματιδίου, και κατά συνέπεια και τα βήματα της ξήρανσης και απομάκρυνσης των πτητικών του. Το μέγεθος της επιφάνειας της βιομάζας είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας, διότι μπορεί να αποτελέσει την αιτία για την βραδύτερη απομάκρυνση των πτητικών.

Εκτός όμως από τις μελέτες σχετικά με την καύση του άνθρακα και της βιομάζας, έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμες έρευνες σχετικά με μεικτή καύση βιομάζας και μιγμάτων άνθρακα. Τα αποτελέσματα από αυτές τις έρευνες αναφέρουν ότι τα μίγματα σωματιδίων άνθρακα τάξης μεγέθους μη αναμιγνύονται με μεγάλα σωματίδια βιομάζας μεγέθους από 10 έως 1000 χιλιοστών. Η βιβλιογραφία σχετικά με την μεικτή καύση βιομάζας και μιγμάτων άνθρακα, αναφέρει επίσης τη θετική επίδραση της βιομάζας κατά την όλη διαδικασία της μεικτής καύσης. Αξίζει να αναφέρουμε ότι πολλές μελέτες έχουν επικεντρωθεί σε αυτόν τον τομέα, αλλά αρκετή έρευνα χρειάζεται να γίνει προκειμένου να περιγράψουν αναλυτικά τα φαινόμενα που προκύπτουν κατά την μεικτή αυτή καύση.

Συνοψίζοντας όλες τις παραπάνω πληροφορίες σχετικά με την καύση της βιομάζας, και συγκρίνοντάς τις με τις πολυάριθμες μελέτες σχετικά με την καύση του άνθρακα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία ανάφλεξης των υλικών της βιομάζας είναι μικρότερη από αυτή του άνθρακα. Οι τιμές της θερμοκρασίας είναι γενικά αποδεκτές όταν η ανάφλεξη της βιομάζας φτάσει τους 473 K, ενώ του άνθρακα όταν η ανάφλεξη του φτάσει γύρω στους 573 K. Κατά συνέπεια, η απελευθέρωση των πτητικών αερίων που προκύπτουν κατά την καύση λαμβάνει χώρα στο προγενέστερο στάδιο της αποσύνθεσης των σωματιδίων της βιομάζας. Επιπλέον, η ποσότητα των πτητικών αερίων που

απομακρύνονται κατά τη διάρκεια της καύσης της βιομάζας είναι 1-7 φορές υψηλότερη σε σύγκριση με τον άνθρακα. Ακόμα, το υπόλειμμα που προκύπτει από την γρήγορη απομάκρυνση των πτητικών της βιομάζας είναι πολύ πιο αντιδραστικό, από ότι εκείνο του άνθρακα [3].

#### **4.2 Η προοπτική της χρήσης βιομάζας σε μορφή σκόνης σε Μ.Ε.Κ, λόγω της ιδιαιτερότητας της καύσης της**

Λαμβάνοντας υπόψη τα πολύ σύνθετα φαινόμενα της καύσης των σωματιδίων της βιομάζας, σε αυτήν την ενότητα θα εξετάσουμε την υπόθεση ότι λεπτή ξηρή σκόνη βιομάζας μεγέθους μικρότερου των 30 μm μπορεί να τροφοδοτήσει, με αποδοτικό τρόπο, μια μηχανή εσωτερικής καύσης.

##### **Τυπικές συνθήκες λειτουργίας κινητήρα :**

- Θερμοκρασία > 900 K
- Τυρβώδης ροή
- Ρυθμός θέρμανσης >  $10^5 \text{ K} \cdot \text{S}^{(-1)}$

##### **Κάτω από τις ανωτέρω αναγκαίες συνθήκες λειτουργίας ενός κινητήρα,**

**ένα μικρό σωματίδιο βιομάζας υπόκειται σε :**

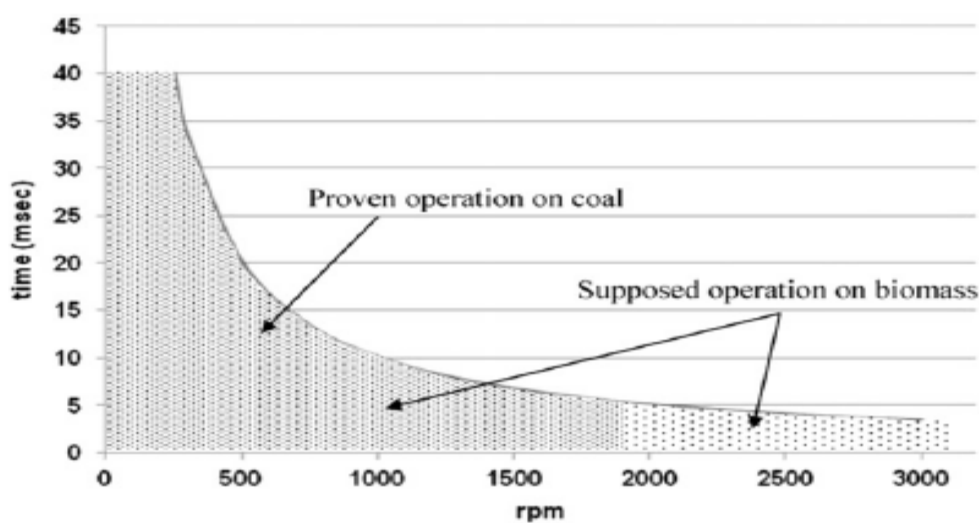
- Άμεση και σχεδόν πλήρης διαδικασία αποπτητικοποίησης.
- Η ανάφλεξη των πρώτων πτητικών ενώσεων που απελευθερώνονται, θα ξεκινήσει πριν από την πλήρη απομάκρυνση των πτητικών του σωματιδίου, επειδή η ανάμιξη του οξυγόνου με τα εύφλεκτα αέρια προϊόντα λαμβάνει χωρά πιο εύκολα όταν η ροή είναι τυρβώδης.
- Η έναρξη της καύσης προκαλεί μια γρήγορη άνοδο της θερμοκρασίας πάνω από τους 1300 K. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας επιταχύνει περαιτέρω τη διαδικασία της αποπτητικοποίησης.
- Υπό αυτές τις συνθήκες, το προκύπτον υπόλειμμα αντιπροσωπεύει μόνο ένα μικρό μέρος της αρχικής μάζας του σωματιδίου της βιομάζας, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η διάχυση τότε του οξυγόνου στο εσωτερικό του σωματιδίου θα είναι εύκολη, εξαιτίας της γνωστής υψηλής δραστηριότητας των χαρακτηριστικών της βιομάζας και της τυρβώδους ροής.

Όλα τα παραπάνω θα οδηγήσουν σε χρόνο καύσης του σωματιδίου της βιομάζας συμβατό με το χρόνο της καύσης στον κινητήρα, με αποτέλεσμα να αναμένονται, γενικά, καλές επιδόσεις. Η υπόθεση αυτή ενισχύεται από τη σχετική βιβλιογραφία σχετικά με την καύση βιομάζας. Μια περίληψη των πιο σχετικών δεδομένων βιβλιογραφίας παρατίθεται στον Πίνακα 4.2.

**Πίνακας 4.2** – Χρόνοι καύσης σωματιδίων βιομάζας σε τυπικές συνθήκες Μ.Ε.Κ

	Data type	Biomass	Particle size (microns)	Heating rate ( $K s^{-1}$ )	Final temperature (K)	Combustion time (ms)
Proust and Veyssiere [81]	Flame model and experimental, air	Wheat starch	28	$>10^5$	1000–1300	0.1–10
Levendis [76]	Drop tube furnace, experimental, 5–10%O <sub>2</sub>	Bagasse	75–90	$10^6$	1400	16
Saastamoinen [74]	Boiler, model, 10%O <sub>2</sub>	Wood	<100	$10^5$	1373	10

Σε έναν τυπικό κινητήρα πετρελαίου, μπορεί να θεωρηθεί ότι η βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται όταν η καύση πραγματοποιείται εντός 60 μοιρών γωνίας στροφάλου. Αυτή η τιμή αντιστοιχεί σε ένα δεδομένο για την καύση (μέγιστο διαθέσιμο χρονικό διάστημα για την πραγματοποίηση της καύσης) που καθορίζεται από την πραγματική ταχύτητα του κινητήρα. Η αύξηση ή η μείωση αυτού του χρονικού διαστήματος για διάφορες ταχύτητες του κινητήρα φαίνεται στο Σχήμα 4.2.



**Σχήμα 4.2-** Γραφική σχέση του χρονικού διαστήματος για την πραγματοποίηση της καύσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα [24]

Το χρονικό διάστημα αυτό υπογραμμίζει το γεγονός ότι για παράδειγμα στις 1000 rpm, ένα σωματίδιο ξύλου πρέπει να καεί σε λιγότερο από 10 ms προκειμένου να επιτευχθούν καλές επιδόσεις στον κινητήρα. Προκειμένου να γίνει κατανοητό το μέγεθος αυτού του χρονικού διαστήματος αναφέρουμε ως μέτρο σύγκρισης ότι η καθυστέρηση της ανάφλεξης έχει διάρκεια 0,6 ms και η συνολική διάρκεια καύσης είναι περίπου 8 ms [9].

Προηγούμενες έρευνες που διεξήχθησαν με άνθρακα βεβαιώνουν ότι ένας κινητήρας πετρελαίου μπορεί να λειτουργήσει σε ταχύτητα έως και 1900 rpm όταν τροφοδοτείται με μίγμα άνθρακα/νερού (CWS). Η αντίστοιχη ζώνη λειτουργίας αναφέρεται παραπάνω στο Σχήμα 4.2. Λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο που απαιτείται για την εξάτμιση του νερού (το οποίο αντιπροσωπεύει το ήμισυ του μίγματος), η ξηρή σκόνη βιομάζας είναι πολύ πιθανό να επιτρέψει πολύ υψηλότερες ταχύτητες.

Έτσι για παράδειγμα, οι Holstrom και συνεργάτες, σε μια τεχνο-οικονομική αξιολόγηση της χρήσης σκόνης βιομάζας σε Μ.Ε.Κ, αναφέρουν ότι το απαραίτητο μέγεθος του σωματιδίου βιομάζας για την πλήρη καύση του στις τυπικές συνθήκες του κινητήρα είναι 0-16 χιλιοστά.

Οι Saastamoinen και συνεργάτες αναφέρουν ότι σε ένα φούρνο συμπαρασυρόμενης ροής (λιγότερο από 10% κατ' όγκο αέρα) με ρυθμό θέρμανσης συγκρίσιμο με τις συνθήκες που επικρατούν στις Μ.Ε.Κ, στους 1373 K, ένα σωματίδιο βιομάζας 100 χιλιοστών θα καεί περίπου σε 10 ms, ενώ ένα σωματίδιο του άνθρακα 100 χιλιοστών θα χρειαστεί 100 ms μέχρι να καεί εντελώς.

Οι Bartle και συνεργάτες, σε μια προσπάθεια να περιγράψουν το σχηματισμό αιθάλης κατά την καύση συμβατικών καυσίμων, εργαζόμενοι σε πιο ήπιες συνθήκες, παρατήρησαν μια παρόμοια συμπεριφορά στην καύση με αυτήν των στερεών σωματιδίων βιομάζας. Παρατήρησαν ότι η ποσότητα πτητικών που απελευθερώνεται κατά την διάρκεια της πρόσδοσης θερμότητας στην βιομάζα (έως 90% κατά βάρος σε υψηλές θερμοκρασίες) σχηματίζει ένα αέριο «κέλυφος» γύρω από το σωματίδιο, το οποίο σχετίζεται με τη συμπεριφορά ενός σταγονιδίου υγρού καυσίμου. Αυτά τα πτητικά στη συνέχεια υποβάλλονται σε γρήγορη ομοιογενή καύση.

Ο Leventis και οι συνεργάτες του, σύγκριναν την συμπεριφορά κατά την καύση διάφορων τύπων άνθρακα (ασφαλτικά, λιγνίτη και υποασφαλτικά) με

ζαχαροκάλαμο Βαγάσσης σε κλίβανο στήλης, με την θερμοκρασία των τοιχωμάτων αυτού στους 1400 K και παρέχοντας ένα ρυθμό θέρμανσης  $10^5 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ . Σε αυτές τις συνθήκες παρατήρησαν ότι ενώ ο άνθρακας καίγεται σε χρονικό διάστημα 30 με 160 ms, τα υπολείμματα ζαχαροκάλαμου υποβάλλονται σε πλήρη καύση σε λιγότερο από 16 ms. Αυτές οι παρατηρήσεις και οι μελέτες, ενίσχυσαν την πιθανότητα χρήσης βιομάζας σε κινητήρες.

Κατά συνέπεια, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι παραπάνω μελέτες βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην κινητική πυρόλυσης. Οι χημικές όμως αντιδράσεις πυρόλυσης και η εσωτερική ή εξωτερική μεταφορά θερμότητας, δεν είναι οι μοναδικοί περιοριστικοί παράγοντες της καύσης σκόνης βιομάζας σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης.

Παρόλα αυτά, τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από τις σημαντικότερες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί κατά την καύση της βιομάζας, μπορούν ασφαλώς να συμβάλουν στην κατανόηση του φαινομένου.

Παρακάτω, έχει ανακτηθεί η βιβλιογραφία σχετικά με την καύση της βιομάζας προκειμένου να επιβεβαιωθεί σε κάθε φάση η υπόθεση μας:

1. Η επίδραση του ρυθμού θέρμανσης και η υψηλή θερμοκρασία κατά τη διαδικασία αποπτητικοποίησης της βιομάζας περιγράφεται από πολλούς συγγραφείς.

Οι Miller και Bellon ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο σχετικό με την πυρόλυση της βιομάζας στο οποίο τονίζουν ότι τα αυξημένα ποσοστά θέρμανσης και θερμοκρασίας του αντιδραστήρα, σε συνδυασμό με το μικρό μέγεθος των σωματιδίων, οδηγούν σε μειωμένη απόδοση και μειωμένο χρόνο μετατροπής της κυτταρίνης και των σωματιδίων ξύλου. Στο πείραμα τους θεωρήθηκε ως τελική θερμοκρασία του αντιδραστήρα οι 900 K και χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια διαμέτρου 5 χιλιοστών.

Το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο επιβεβαιώνεται από τον Di Blasi, ο οποίος πρότεινε ένα μοντέλο λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων της βιομάζας στο φαινόμενο της αποπτητικοποίησης (μικρό μέγεθος σωματιδίου έχει ως αποτέλεσμα μείωση της απόδοσης· τα υψηλά ποσοστά θέρμανσης είχαν ως αποτέλεσμα υψηλότερη περιεκτικότητα σε πτητικές αποδόσεις).



Οι Bharadwaj και συνεργάτες τόνισαν ότι η γρήγορη πυρόλυση σε υψηλή θερμοκρασία τείνει να αυξήσει σημαντικά τις πτητικές αποδόσεις των σωματιδίων της βιομάζας.

Οι Lu και συνεργάτες διαπίστωσαν ότι τα μικρότερα σωματίδια είναι λιγότερο ευαίσθητα σε τέτοιες θεωρίες, ενώ το σχήμα και το μέγεθος, για σωματίδια <math>< 200 \mu\text{m}</math>, είναι παράγοντες που έχουν την μικρότερη επίπτωση στον καθορισμό της πτητικής απόδοσης.

Ο αντίκτυπος της αποδοτικής ανάμιξης του οξυγόνου κατά την καύση των σωματιδίων της βιομάζας έχει μελετηθεί επίσης σε διαφορές ερευνητικές εργασίες.

Μια πρόσφατη μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Di Benedetto και συνεργάτες αναφέρει ότι σωματίδια τα όποια έχουν μέγεθος μικρότερο των 50  $\mu\text{m}$  μετατρέπονται σε πτητικά σε λιγότερο από 10 ms. Ως εκ τούτου η καύση των σωματιδίων θεωρείται ότι λαμβάνει χώρα στην αέρια φάση, που θα μπορούσε εύλογα να θεωρηθεί πολύ πιο γρήγορη.

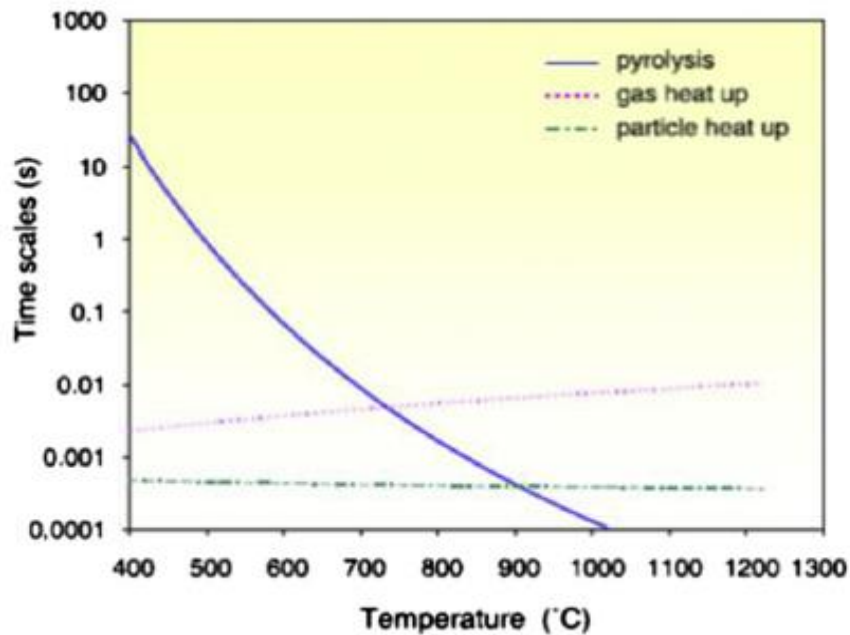
2. Αν υποθέσουμε ότι τα πτητικά που απελευθερώνονται θα καούν έχοντας κάποια καθυστέρηση ανάφλεξης, τότε η άνοδος της θερμοκρασίας λόγω αυτής της καθυστέρησης θα επιταχύνει σημαντικά τη διαδικασία της καύσης.

Οι Bailliford και συνεργάτες πρότειναν ένα μοντέλο που στηρίζεται στη ρευστοδυναμική για να περιγράψουν τις διεργασίες καύσης της βιομάζας με βάση τα χαρακτηριστικά της ροής (Reynolds), την χημική αντίδραση (Damköhler), την ταχύτητα του αερίου (Mach) και την διάχυση (Schmidt) και μέτρησαν την αποτελεσματικότητα της ανάμιξης του οξυγόνου με τα πτητικά προϊόντα της βιομάζας μέσα σε θάλαμο καύσης.

Οι Proust και Veyssiere πρότειναν ένα μοντέλο το οποίο είναι σε θέση να υπολογίσει το χρόνο καύσης ενός σωματιδίου αμύλου σε μια φλόγα σκόνης/αέρα, Σχήμα 4.3· το άμυλο σίτου είναι χημικά πολύ κοντά με την κυτταρίνη, η οποία αποτελεί το κύριο συστατικό της ξυλώδους βιομάζας. Χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη ένα μέσο μέγεθος σωματιδίου 28  $\mu\text{m}$ . Το φαινόμενο της καύσης αποτελούνταν από 2 χρονικά στάδια:

- Ο χρόνος που απαιτείται για να θερμανθεί το σωματίδιο με θερμική αγωγιμότητα από το αέριο, και

- Ο χρόνος για την πλήρη πυρόλυση των σωματιδίων.



**Σχήμα 4.3** - Χαρακτηριστικοί χρόνοι καύσης ενός σωματιδίου του αμύλου [24]

Τα σωματίδια ήταν σε θερμική ισορροπία με την αέρια φάση. Επιπλέον, φαίνεται ξεκάθαρα ότι πάνω από τους 900°C, το στάδιο της πυρόλυσης των σωματιδίων δεν είναι πια το περιοριστικό βήμα της διαδικασίας της καύσης, και ότι, συνολικά, η καύση πραγματοποιείται σε λιγότερο από 10 ms. Με την χρήση τομογραφίας, οι Proust και Veysserie ήταν σε θέση να παρατηρήσουν τα σωματίδια να χάνονται στη φλόγα μέσα στο χρονικό διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών εικόνων (λιγότερο από 4 ms).

Συμπερασματικά, όλες οι παραπάνω αναφορές τείνουν να επιβεβαιώσουν ότι η καύση της σκόνης βιομάζας θα είναι αποτελεσματική υπό τυπικές συνθήκες λειτουργίας των μηχανών εσωτερικής καύσης [3].

# **5. ΤΑ ΣΗΜΑΝΤΙ- ΚΟΤΕΡΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΟΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ**

Πολλά από τα ζητήματα που πρόεκυψαν με τη χρήση ξηρού άνθρακα σε μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν επιλυθεί στη Γερμανία πριν από το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο. Παρόλα αυτά, ορισμένα τεχνικά εμπόδια όπως η δυσκολία ελέγχου της ανάφλεξης παραμένουν άλυτα, οδηγώντας έτσι στην δυσκολία τού κινητήρα να λειτουργήσει σε διαφορετικές ταχύτητες και φορτία. Κατά συνέπεια, τα ερευνητικά προγράμματα που ακολούθησαν στις Η.Π.Α., όσον αφορά τη χρήση άνθρακα σε εμβολοφόρους κινητήρες, επικεντρώθηκαν στη χρήση μίγματος άνθρακα με πετρέλαιο ή νερό ως καύσιμο.

Κατά την διάρκεια όλων αυτών των μελετών, αντιμετώπιστηκαν από τους ερευνητές πολλά από τα προβλήματα που σχετίζονταν με τη φύση του άνθρακα, μόνου του ή σε συνδυασμό με νερό ή πετρέλαιο. Η τρέχουσα ενότητα συνοψίζει τα προβλήματα παρατηρήθηκαν καθώς και τις σχετικές λύσεις που προτάθηκαν. Ο Πίνακας 5.1 εκθέτει συνολικά την εξέλιξη των τεχνολογιών που σχετίζονται με την χρήση στερεών καυσίμων στις μηχανές εσωτερικής καύσης.

**Πίνακας 5.1 – Σύνοψη των τεχνολογιών που εφαρμόστηκαν σε Μ.Ε.Κ. [3]**

Period		1892–1945	1945–1973	1973–2011
Engine fuel		Dry coal dust	CDS	CWS
Main research areas/groups		Germany Rudolf Diesel Rudolf Pawlikowski 5 German companies Japan Kyoto University	USA South Carolina University Southwest Research Institute Virginia Polytechnic Institute Howard University	USA/Department of Energy Sulzer, Thermolectron General Motors, General Electric, Arthur D. Little, Cooper Bessemer, Adiabatic, Tlax France, Japan, Russia, Australia, Sweden, Finland, Netherlands
Major successful contributions	Fuel feeding	Screw feeding 60 bar injection	Conventional injection thanks to the use of slurry	Injection adapted to slurries
	Wear	Use of hard alloys, Crosshead engines, adjustable rings	Solvent refined coals	Further development of hard alloys
	Ignition	Pre-chamber		Thermally insulated chamber
Technology		Development and demonstration Slow to medium speed diesel engines (<800 rpm).	Development Medium speed diesel engines (<1200 rpm)	Development and demonstration High speed diesel engines (2000 rpm)
Applications		Power, electricity Automotive	Electricity	Electricity Railway transport

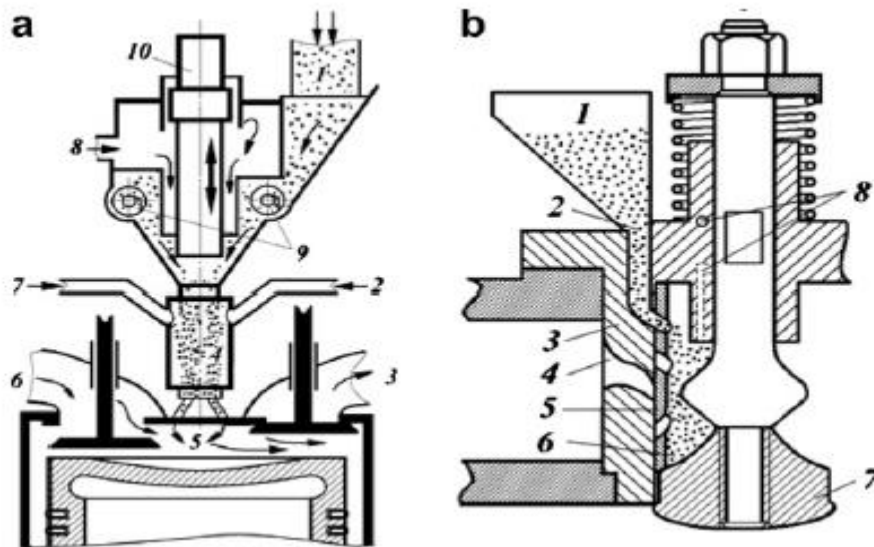
## 5.1 Τροφοδοσία καυσίμου

Είναι πραγματικά πολύ δύσκολο να τροφοδοτηθεί ένας κινητήρας με κονιοποιημένο στερεό καύσιμο, αποφεύγοντας τη συσσωμάτωση αυτού. Επιπλέον, είναι απόλυτη αναγκαιότητα η χρήση μεγέθους σωματιδίων στην κλίμακα των μικρομέτρων, προκειμένου να βελτιωθεί η ανάφλεξη.

Πιο συγκεκριμένα, η τροφοδοσία του κινητήρα με σκόνη άνθρακα μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των βαλβίδων εισαγωγής, αλλά τα σωματίδια του καυσίμου που έρχονται σε επαφή με τα εσωτερικά τοιχώματα του εμβόλου σχηματίζουν ένα είδος υπολείμματος, προκαλώντας φράξιμο στα ελατήρια του εμβόλου, αποτελώντας με τη σειρά τους αιτία για μείωση του (ενεργού) βαθμού συμπίεσης.

Οι πρώτες απόπειρες για την τροφοδοσία Μ.Ε.Κ με ξηρή σκόνη άνθρακα πραγματοποιήθηκαν στην Γερμανία, και στις όποιες έγινε χρήση ειδικών εμβόλων έγχυσης πεπιεσμένου αέρα, ενώ η έγχυση της σκόνης άνθρακα πραγματοποιείτο σε σχετικά χαμηλές πιέσεις (έως 60 bar). Δύο από τις

συσκευές που αναπτύχθηκαν στην Γερμανία για έγχυση σκόνης άνθρακα αναφέρονται λεπτομερώς στο Σχήμα 5.1. Στο Σχήμα 5.1α, στο τέλος της διαδρομής της συμπίεσης, το έμβολο (10) κινείται προς τα κάτω, απομονώνοντας το σύστημα εγχύσεως από τον κινητήρα.



**Σχήμα 5.1** - Δυο συσκευές που αναπτύχθηκαν στην Γερμανία για έγχυση σκόνης άνθρακα. α) Το σύστημα έγχυσης άνθρακα του Pawlikowski, β) άλλο Γερμανικό σύστημα έγχυσης [18]

Στη συνέχεια, ο θάλαμος ανάφλεξης (4) συμπιέζεται στα 60 bar με βοήθεια από τον αγωγό (2). Αυτόματα, το καύσιμο εισάγεται στο αγωγό (7). Το μίγμα στη συνέχεια εγχύεται εντός του κυλίνδρου μέσω των οπών (5).

Το Σχήμα 5.1b περιγράφει τα παρακάτω:

**Πρώτο στάδιο:** Λόγω βαρύτητας, τροφοδοτείται το σώμα του θαλάμου (3) με σκόνη άνθρακα μέσω του καναλιού (2). Η κοιλότητα (6) χρησιμεύει στην συσσώρευση της σκόνης που χρησιμοποιείται στην καύση.

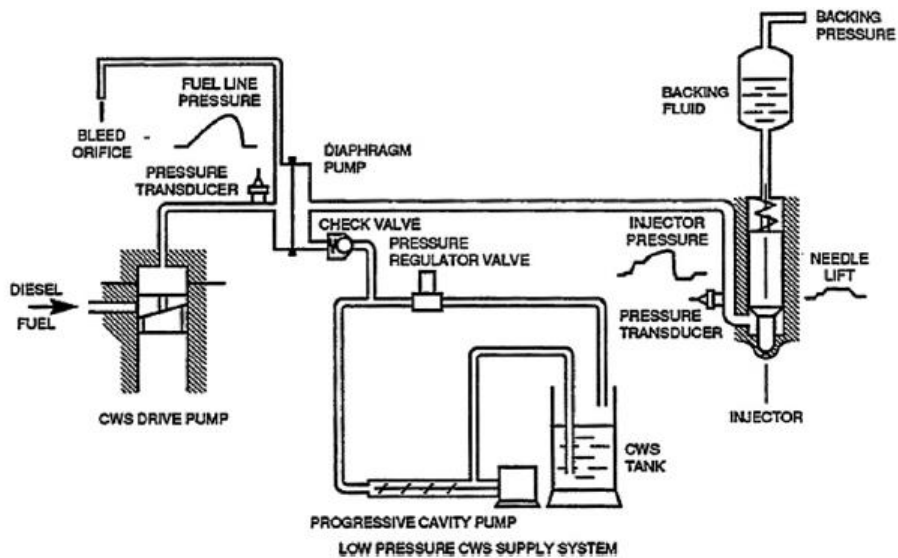
**Δεύτερο στάδιο:** (απομάκρυνση της σκόνης άνθρακα από το θάλαμο καύσης, στο τέλος της διαδρομής συμπίεσης). Κατά το άνοιγμα της βαλβίδας (7), σκόνη αρχίζει και εισρέει μέσα στο θάλαμο καύσης. Το «κομβικό» σημείο (5) κινείται προς τα κάτω, μπλοκάροντας το κανάλι (2) και το άνοιγμα του καναλιού (4), μέσω του οποίου πεπιεσμένος αέρας τροφοδοτείται στο θάλαμο (6). Η σκόνη διοχετεύεται λόγω της ροής του πεπιεσμένου αέρα μέσα στο θάλαμο καύσης,

όπου αναφλέγεται κατά την επαφή με θερμό αέρα. Πριν από το κλείσιμο της βαλβίδας, πεπιεσμένος αέρας στέλνεται μέσω του καναλιού (8) για να εξασφαλιστεί η πλήρης εκτόνωση του θαλάμου (6). Όπως όμως αναφέρθηκε από τον Soehngen, αυτές οι τεχνικές λύσεις τροφοδότησης Μ.Ε.Κ δεν απεδείχθησαν ιδιαίτερα αξιόπιστες λόγω αστάθειας στη λειτουργία τους [11,15].

Μέχρι και σήμερα, έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνολογίες έγχυσης μίγματος άνθρακα, λόγω της ικανότητας του να συμπεριφέρεται σαν υγρό, με μέγιστη στερεή αναλογία 50% κατά βάρος. Η φθορά και η καταπόνηση όμως των συστημάτων έγχυσης, οι οποίες παρατηρούνται με τη βραχυπρόθεσμη λειτουργία του κινητήρα, εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικό εμπόδιο.

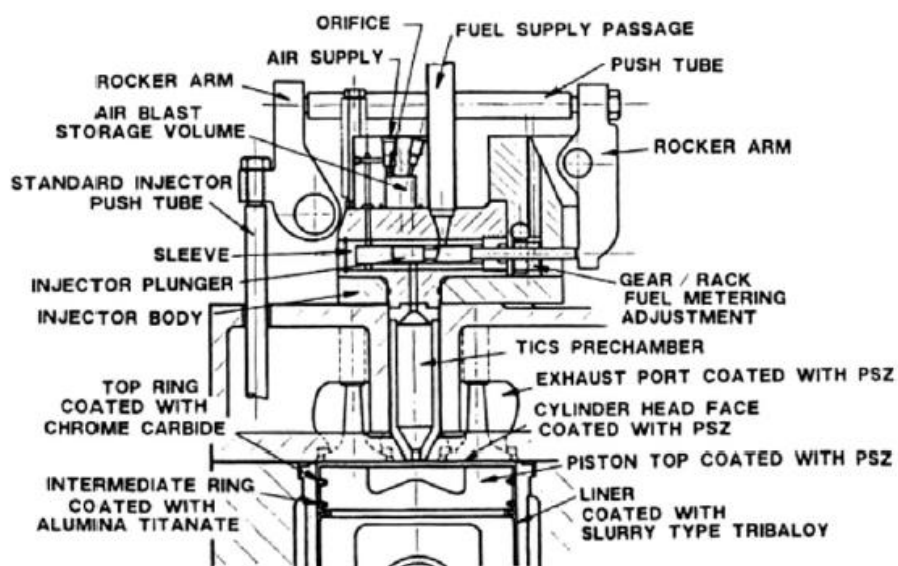
Ο τρόπος μεταφοράς της σκόνης άνθρακα μέχρι το σύστημα εισαγωγής/έγχυσης καθώς επίσης και ο έλεγχος της ποιότητας της σκόνης προκειμένου να τροφοδοτηθεί ο κινητήρας με έναν συνεχή ρυθμό αποτελούν βασικές παραμέτρους που η βελτίωση τους θα συμβάλει στην αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων.

Μια προσπάθεια πραγματοποίησης του παραπάνω στόχου αποτελεί το σύστημα έγχυσης μίγματος άνθρακα/νερού που είχε δημιουργηθεί από τους Doup και Badgley της General Electric (Σχήμα 5.2). Το κύκλωμα τροφοδοσίας αποτελείται από 2 μέρη. Ένα μέρος λειτουργεί με πετρέλαιο χρησιμοποιώντας κοινή αντλία, και το άλλο με μίγμα άνθρακα/νερού. Η υψηλή πίεση που προσδίδεται από την αντλία έχει ως αποτέλεσμα το άμεσο άνοιγμα του εγχυτήρα διαλύματος άνθρακα/νερού λόγω του κύματος πίεσης που φθάνει στο χαμηλής πίεσης κύκλωμα του μίγματος.



**Σχήμα 5.2** - Σύστημα έγχυσης μίγματος άνθρακα/νερού από την General Electric [15]

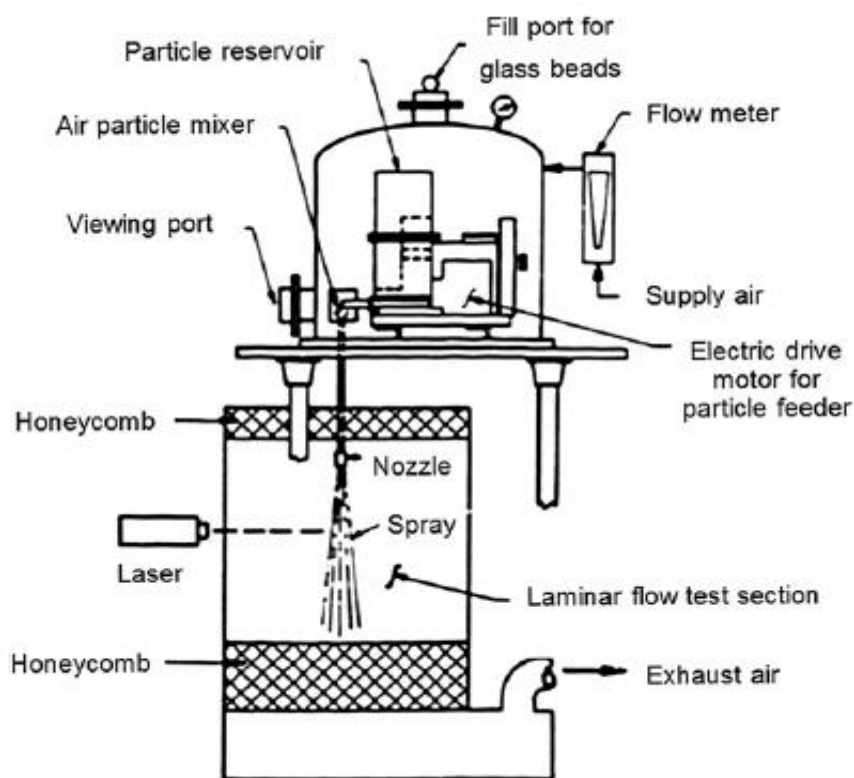
Το 1983, οι Caton και Rosegay εκτίμησαν ότι δεν είχε γίνει καμία σημαντική προσπάθεια για λειτουργία κινητήρων με σκόνη άνθρακα από το 1950. Αυτή η παρατήρηση αποτέλεσε το υπόβαθρο για να ακολουθήσουν πολλά ερευνητικά προγράμματα επιχορηγούμενα από το Υπουργείο Ενέργειας της Η.Π.Α. όπως αναλύθηκαν διεξοδικά στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Ένα από αυτά τα προγράμματα ήταν και της εταιρείας Adiabatics στο οποίο δημιουργήθηκε το σύστημα έγχυσης που εικονίζεται στο Σχήμα 5.3.



**Σχήμα 5.3** – Σύστημα έγχυσης σκόνης άνθρακα της Adiabatics [11]

Με την χρήση αυτού του συστήματος έγχυσης, ήταν σε θέση να επιτύχουν την εκκίνηση του κινητήρα με 100% ξηρή σκόνη άνθρακα ως καύσιμο και όχι αναμιγμένο με νερό ή πετρέλαιο. Οι δοκιμές του κινητήρα εγκαταλείφθηκαν μετά από δοκιμή 5 λεπτών, λόγω τεχνικής βλάβης του συστήματος τροφοδοσίας του άνθρακα. Επιπρόσθετα, η έρευνα δεν μπόρεσε να συνεχιστεί λόγω έλλειψης περαιτέρω χρηματοδότησης.

Το Southwest Research Institute πραγματοποίησε μια μελέτη σχετικά με την υδροδυναμική απόδοση των συστημάτων έγχυσης. Τα ακροφύσια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διάμετρο 3/16" και 3/8" (4,8 mm και 9,5 mm αντίστοιχα) και μήκος ίσο με 10 φορές την διάμετρο των ακροφύσιων. Το πείραμα φαίνεται στο Σχήμα 5.4.



**Σχήμα 5.4** – Το Πείραμα του Southwest Research Institute [21]

Τα τελευταία 30 χρόνια, η τεχνολογία για τη χρήση σκόνης βιομάζας, υπήρξε αντικείμενο πολλών μελετών, δεδομένου ότι ο αριθμός των βιομηχανιών που χρησιμοποιούν κονιοποιημένες πρώτες ύλες είχε αυξηθεί σημαντικά.

Οι Young και Evans επισήμαναν ότι η επιλογή της πιο κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες της σκόνης βιομάζας.



Αυτές οι ιδιότητες συνδέονται άμεσα με τα χαρακτηριστικά των επιμέρους σωματιδίων όπως το Σχήμα, το μέγεθος, η κατανομή μεγέθους καθώς και η φύση των δυνάμεων αλληλεπίδρασης μεταξύ των σωματιδίων, δηλαδή οι ηλεκτροστατικές, οι Van der Waals ή συσσωμάτωσης εξαιτίας της υγρότητας. Όλοι αυτοί οι παράγοντες καθιστούν το χειρισμό της βιομάζας τόσο πολύπλοκο, ώστε οι γενικές θεωρίες ροής δεν μπορούν να εφαρμοστούν για όλες της μορφές της. Οι Young και Evans πρότειναν τη χρήση υπερηχητικών τεχνικών δόνησης ως ένα ενδιαφέροντα τρόπο για να αυξήσουν τον έλεγχο τροφοδοσίας της σκόνης.

Η αεροδυναμική διασπορά των σωματιδίων της βιομάζας, είναι με τη σειρά της το κλειδί για την κατανόηση τόσο της πεπεισμένης μεταφοράς της όσο και της συμπεριφοράς της κατά την καύση. Ο ορισμός της διασποράς είναι η «επιθυμητή αποσύνθεση της σύστασης των σωματιδίων στα πρωτογενή συστατικά τους μέσω της εφαρμογής εξωτερικών δυνάμεων, οι οποίες ξεπερνούν τις δυνάμεις της έλξης μεταξύ των σωματιδίων». Οι Calvert και συνεργάτες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ακόμα δεν υπάρχει αρκετή κατανόηση για το πώς συνδέονται οι ιδιότητες της βιομάζας, με την αεροδυναμική απόδοση διασποράς. Συμπέραναν ωστόσο ότι παράμετροι όπως η κόκκο-μέτρηση, η σφαιρικότητα, οι αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων, ο έλεγχος της πυκνότητας και του ιξώδους του αέρα/στερεού είναι πολύ σημαντικές παράμετροι. Επιπλέον, προκειμένου να αναπτυχθεί περαιτέρω η χρήση κονιοποιημένης βιομάζας για εφαρμογές σε Μ.Ε.Κ, η εξάρτηση των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών με την θερμοκρασία και την πίεση, πρέπει να μελετηθεί ικανοποιητικά [3].

## **5.2 Φθορά**

Ο ίδιος ο άνθρακας και η τέφρα που περιέχονται στον άνθρακα, είναι γνωστό ότι φθείρουν έντονα τα κρίσιμα τμήματα των μηχανών. Τα τυπικά συστατικά της τέφρας είναι πυρίτιο (Si), Αργίλιο (Al), Κάλιο (K), Μαγνήσιο (Mg), Νάτριο (Na) και σίδηρος (Fe) στην μορφή των οξειδίων τους. Το πυρίτιο και το αργίλιο γενικά αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της τέφρας και τα σχετικά τους οξειδία είναι επίσης τα πιο λειαντικά.

Έχουν προταθεί πολλές λύσεις, είτε χρησιμοποιώντας καύσιμο σε μορφή ξηρής σκόνης είτε ως μίγμα, όπως:

- Μηχανικός επανασχεδιασμός των εμβόλων.

- Προσαρμοζόμενα ελατήρια εμβόλου, εγκατεστημένα στο τοίχωμα του κυλίνδρου.
- Αύξηση της λίπανσης.
- Χρήση πεπιεσμένου αέρα, νερού ή λαδιού για τον καθαρισμό των σωματιδίων στα τοιχώματα του κυλίνδρου κατά την διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα.
- Χρήση διαλυτή εξευγενισμένου άνθρακα προκειμένου να μειωθεί το περιεχόμενο σε τέφρα.

Οι τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα για παραγωγή λειαντικής σκόνης άνθρακα (ξηρής ή σε μορφή μίγματος), οδήγησε σε ποσοστά φθοράς παρόμοια με εκείνα που συναντάμε με χρήση καθαρού πετρελαίου. Έτσι, η μη λειαντική σκόνη άνθρακα, η οποία περιέχει επίσης λιγότερη τέφρα από τον ορυκτό άνθρακα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ευνοϊκά στη λειτουργία μηχανών εσωτερικής καύσης.

### **5.3 Έλεγχος ανάφλεξης**

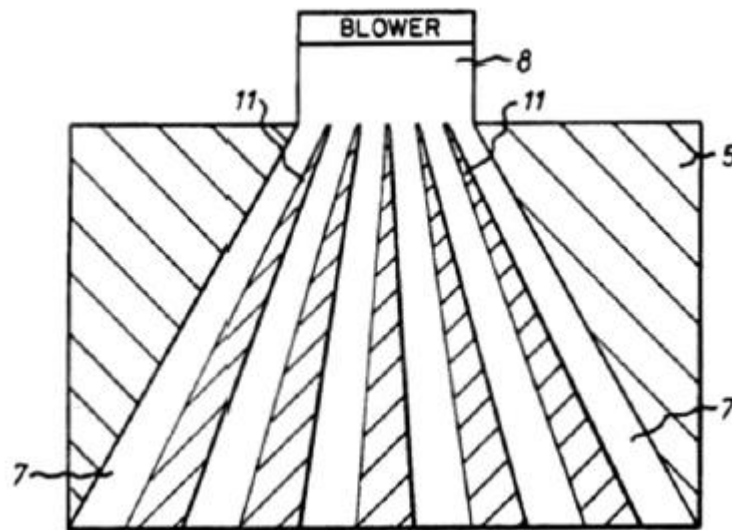
Οι τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν στο παρελθόν για την βελτίωση της ανάφλεξης κατά την χρήση ξηρής σκόνης ή μίγματος άνθρακα σε Μ.Ε.Κ οδήγησαν σε επιτυχείς προσπάθειες λειτουργίας κινητήρων. Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν εισαγωγή συμπιεσμένου αέρα ή αρχική προθέρμανση του αέρα, αύξηση του στροβιλισμού της ροής του αέρα, καθώς και χρήση της προανάφλεξης ή προ-καύσης.

Οι Choi και Bell έδειξαν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα διάλυμα άνθρακα/νερού είχε ως αποτέλεσμα να παρατηρηθεί μια μικρή καθυστέρηση της ανάφλεξης. Είναι αυτονόητο ότι με ένα τέτοιο διάλυμα υπάρχει ο κίνδυνος όλο το νερό, το οποίο μπορεί να φτάσει και το μισό του βάρους του μίγματος, να εξατμιστεί, οδηγώντας έτσι σε μεγαλύτερη καθυστέρηση της ανάφλεξης.

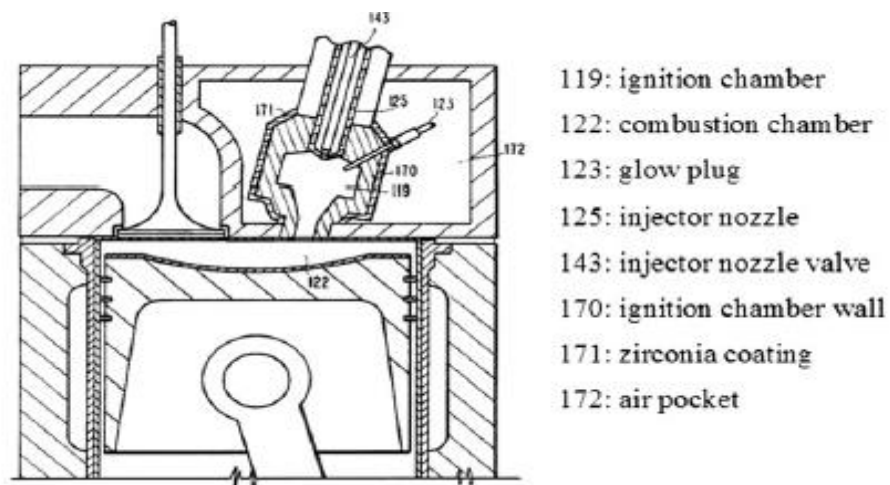
Ο αυξημένος στροβιλισμός της ροής του αέρα είναι γνωστό ότι έχει σημαντικό αντίκτυπο στο ποσοστό καύσης του εγχεόμενου καυσίμου. Ορισμένες μελέτες επιβεβαιώνουν ότι κάτω από εξαιρετικά τυρβώδεις συνθήκες, το ποσοστό καύσης της σκόνης του άνθρακα μπορεί να φτάσει στο ανάλογο ποσοστό καύσης με καθαρό πετρέλαιο.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο Pawlikowski ήταν ο πρώτος που πρότεινε ένα ξεχωριστό (προ)θάλαμο για να αυξήσει το ποσοστό ανάφλεξης της στερεάς σκόνης άνθρακα. Το σύστημα όμως ήταν αναξιόπιστο έτσι ώστε να μπορέσουμε να εξασφαλίσουμε τη σταθερή λειτουργία του κινητήρα.

Πιο πρόσφατα, συσκευή που αναπτύχθηκε από τον Abom, Σχήμα 5.5, υποτίθεται ότι ήταν σε θέση να αναφλέξει σωματίδια ξύλου εντός 0,006 ms. Η σκόνη ξύλου εγχύθηκε στα 120 bar στον θάλαμο καύσης ενός κινητήρα πετρελαίου (40 bar πίεση στο ΑΝΣ), οδηγώντας σε μια ταχύτητα του σωματιδίου περίπου 400 m/s. Για να επιτευχθεί αυτό το αποτέλεσμα, τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης διατηρήθηκαν στους 1250 K.



Σχήμα 5.5 – Η συσκευή ανάφλεξης του Abom [22]



Σχήμα 5.6 – Ο θάλαμος καύσης της Adiabatics [23]

Ο θάλαμος TCIS που αναπτύχθηκε κατά την διάρκεια δοκιμών της Adiabatics στις Η.Π.Α., Σχήμα 5.6, έδειξε επίσης πολύ καλά αποτελέσματα με χρήση ξηρής σκόνης άνθρακα ή διαλύματος άνθρακα. Αυτός ο μονωμένος θερμικά θάλαμος επέτρεψε στον κινητήρα να λειτουργήσει σε ευρύ φάσμα στροφών. Ο TCIS ήταν ένας μονωμένος προθάλαμος με τοιχώματα, τα όποια κατασκευάστηκαν από υπερκράμα που ονομάζεται Hastelloy X (Ni, Cr, Mg, Fe, Ti), και το όποιο είχε υψηλή θερμική αγωγιμότητα και ενεργούσε ως μονάδα αποθήκευσης θερμότητας. Ο στόχος είναι να επιτευχθεί μια ταχεία μεταφορά θερμότητας σε υψηλή θερμοκρασία για την ανάφλεξη του μίγματος αέρα/καυσίμου πριν από την εισαγωγή μέσα στον κύριο θάλαμο καύσης. Αυτό το σύστημα ανάφλεξης ήταν σχετικά εύκολα προσαρμόσιμο σε κινητήρα εσωτερικής καύσης ικανό να λειτουργήσει με ποικιλία καυσίμων, συμπεριλαμβανόμενου του άνθρακα.

# 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γίνεται καθημερινά ολοένα και πιο απαραίτητη στην προσπάθεια να επιτύχουμε τις απαραίτητες αλλαγές για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Τελευταία, το ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί στον εντοπισμό κατάλληλων ειδών βιομάζας, τα οποία μπορούν να παρέχουν υψηλά ποσοστά ενέργειας, με σκοπό την αντικατάσταση των συμβατικών πηγών ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.

Η υψηλή περιεκτικότητα των καυσίμων βιομάζας σε πτητικό περιεχόμενο σε συνδυασμό με τον ανανεώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον χαρακτήρα αυτών, καθιστούν τη βιομάζα καύσιμο μεγάλης σημασίας για έρευνα και μελέτη. Η καύση των λεπτόκοκκων σωματιδίων βιομάζας μπορεί να πραγματοποιηθεί με υψηλή ταχύτητα και έχει ελάχιστη ή και καμία επίπτωση στην φθορά του κινητήρα σε σύγκριση με την σκόνη άνθρακα ή μιγμάτων άνθρακα.

Η βιομάζα είναι διαθέσιμη σε όλες τις χώρες, με διαφορές μορφές και οι τεχνολογίες κονιοποίησης της έχουν φτάσει σε υψηλό επίπεδο ανάπτυξης. Η πιθανή χρήση βιομάζας στην τροφοδοσία μηχανών εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές ή νησιά ή και αγροτικές ζώνες μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμη.

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο παρελθόν έδειξε ότι και η σκόνη άνθρακα σε ξηρή μορφή ή σε μίγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε Μ.Ε.Κ. εμφανίζοντας όμως προβλήματα που σχετίζονται με τον έλεγχο της ανάφλεξης, φθορά αλλά και θέματα όσον αφορά τη τροφοδοσίας του καυσίμου.

Το πεδίο εφαρμογών είναι πολύ μεγάλο, δεδομένου ότι οι μηχανές εσωτερικής καύσης είναι πολύ διαδεδομένες παγκοσμίως και χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς. Οι τεχνολογίες που σχετίζονται με την έγχυση και τη μείωση της φθοράς είναι πολύ πιο προηγμένες από ότι αυτές κατά την διάρκεια των πρώτων γερμανικών δοκιμών πριν το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, πράγμα που σημαίνει ότι τα εναπομείναντα τεχνικά εμπόδια (π.χ. έλεγχος ανάφλεξης) θα μπορούσαν πιθανόν να επιλυθούν με λιγότερη προσπάθεια.

Το κύριο τεχνικό εμπόδιο συναντάται στην μεταφορά του καυσίμου στο θάλαμο καύσης του κινητήρα. Παραμένει πραγματικά δύσκολο να τροφοδοτήσουμε τον κινητήρα με κονιοποιημένο στερεό καύσιμο. Ένας τρόπος για να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία θα ήταν σίγουρα η ανάπτυξη ενός κατάλληλου συστήματος έγχυσης. Θα ήταν ενδιαφέρον οι προσπάθειες του παρελθόντος, οι οποίες οδήγησαν στην ανάπτυξη των συστημάτων έγχυσης άνθρακα, να εφαρμοστούν και για την βιομάζα, η οποία φαίνεται να έχει πολλά πλεονεκτήματα.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κ. Δ. Ρακόπουλος (1988), «Αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Εισαγωγή–Λειτουργία–Θερμοδυναμική», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
2. Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας (1998) «Καύση ρύπανση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
3. Potential direct use of solid biomass in Internal combustion engines.pdf
4. Tiax-coal-diesel-ppa-final-post\_070907.pdf
5. Reciprocating internal combustion engine for operation with fuel in powder form (Us4059077.pdf).
6. Biomass-based gasifiers for internal combustion engines.pdf
7. Mikumo E, Nagao H, Ohigasi S. Research on the coal powder engine e the first report: the combustion of coal powder. Transactions of the Society of Mechanical Engineers, Japan 1944;9(37):103-10.
8. Ryan III TW, Erwin J. Diesel fuel composition effects on ignition and emissions. In: SAE international fuels & lubricants meeting & exposition. SAE paper; 1993.
9. Heywood JB. Internal combustion engines fundamentals. New York: McGraw-Hill; 1988.
10. Bell SR, Choi GH. Parametric studies on a coal-fueled diesel engine. Combustion Science and Technology 1994;96:85-102.

11. Badgley PR. Novel injector techniques for coal-fueled diesel engines e final report. Adiabatics; U.S. Department of Energy-Office of Fossil Energy-Morgantown Energy Technology Center; 1992. Report number:DE-AC21-AC90MC26305
12. Caton JA, Payne SE, Terracina DP, Kihm KD. Coal-water slurry spray characteristics of an electronically-controlled accumulator fuel injection system:The internal combustion engine symposium energy-sources technology conference and exhibition. Houston, Texas, USA: GE Company; 1993.
13. Holmström H, Olsson E. Analysis of wood powder combustion in diesel engines. In: Proceedings of the 21st international congress on combustion engines; 1995
14. Khodakov GS. Coal water suspensions in power engineering. Thermal Engineering 2007;54(1):36-47.
15. DOE-GE. Coal fuelled diesel technology development; 1994. Report number: DOE/MC/23174-3666
16. Saastamoinen J, Aho M, Moilanen A, Sorensen LH, Clausen S, Berg M. Burnout of pulverized biomass particles in large scale boiler - single particle model approach. Biomass and Bioenergy 2010;34:728-36
17. Nakasaki S. On a new high speed pulverized coal engine. Transactions of the Society of Mechanical Engineers, Japan 1940;6(24):1-7
18. Belousov EV. Creation and perfecting of solid propellant reciprocating engines of internal combustion; ISBN 966-8502-30-2; 2006
19. Hsu BD, Najewicz DJ, Cook CS. Coal-fueled diesel engines for locomotive applications. In: FE fuel cells and coal-fired heat engines conference. Morgantown, West Virginia, USA: U.S. Department of Energy, Morgantown Energy Technology Center; 1993.



20. NETL. Clean coal diesel demonstration project e a DOE assessment; 2007. Report number: DOE/NETL-2007/1287
21. Dodge FT, Dodge LG, Johnson SE. Nozzle development; 1989. Report number:DOE/MC/23005-2990.
22. Abom J. Device for ignition in powder engines. US patent number 4811706 A;1986.
23. Kamo R, Kakwani RM, Valdmanis E, Woods ME. Thermal ignition combustion system. US patent number 4738227; 1988.
24. Proust C. A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dusts clouds. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2006;19:104-20.
25. [www.douglas-self.com/MUSEUM/POWER/unusuallCeng/solid/solid.htm](http://www.douglas-self.com/MUSEUM/POWER/unusuallCeng/solid/solid.htm)
26. [www.lignite.gr/events/gasification%201.0.pdf](http://www.lignite.gr/events/gasification%201.0.pdf)
27. <http://iceal.wikidot.com/aithanoli#>