

Μονάδα ψυχρού πλάσματος ημιδιαλείποντος έργου για την απορρύπανση οργανικών αποβλήτων

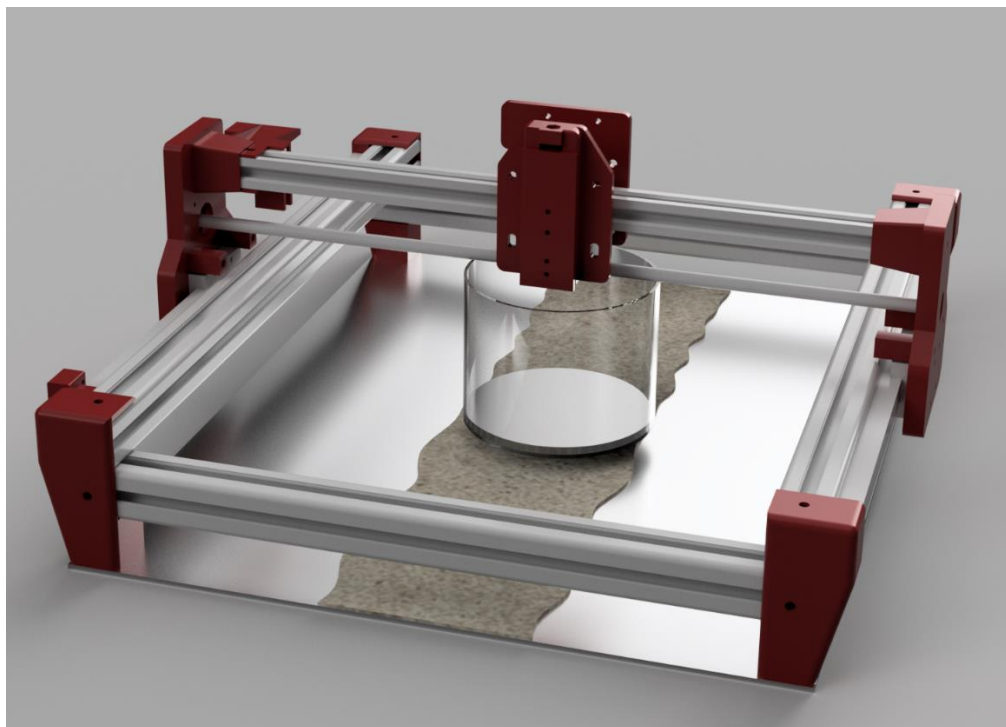
Περίληψη

Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε πρότυπος αντιδραστήρας ΨΠ ημι-συνεχούς λειτουργίας ο οποίος διατηρεί τις βασικές αρχές του αντιδραστήρα ΨΠ διαλείποντος έργου και ως εκ τούτου το πολωμένο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης (ΥΤ) είναι από ανοξείδωτο χάλυβα, το διηλεκτρικό φράγμα της εκκένωσης στο κάτω μέρος του ηλεκτροδίου υψηλής τάσης είναι κατασκευασμένο από χαλαζία. Επιπλέον, το γειωμένο ηλεκτρόδιο, πάνω στο οποίο απλώνεται ομοιόμορφα το προς αποκατάσταση ρυπασμένο έδαφος, είναι από ανοξείδωτο χάλυβα επιτρέποντας συγχρόνως τη ροή του εφαρμοζόμενου αερίου πάνω από την επιφάνεια του αποβλήτου. Το σύστημα αυτοματοποιήθηκε ώστε να επιτυγχάνεται ημι-συνεχής επεξεργασία των αποβλήτων, ενώ καθόλη τη διάρκεια της επεξεργασίας οι αισθητήρες τάσης-ρεύματος δίνουν σήμα σε περίπτωση απόκλισης από τις προκαθορισμένες τιμές ώστε να ελέγχονται και να διορθώνονται αυτόματα οι σχετικές ηλεκτρικές παράμετροι της διεργασίας (ένταση και κυματομορφή εφαρμοζόμενης τάσης, ρεύμα και ισχύς). Με τον τρόπο αυτό η επεξεργασία που πραγματοποιείται κάθε χρονική στιγμή είναι πανομοιότυπη και η παραγωγή ΨΠ ομοιόμορφη και σταθερή.

Σχεδιασμός και κατασκευή πρότυπου συστήματος

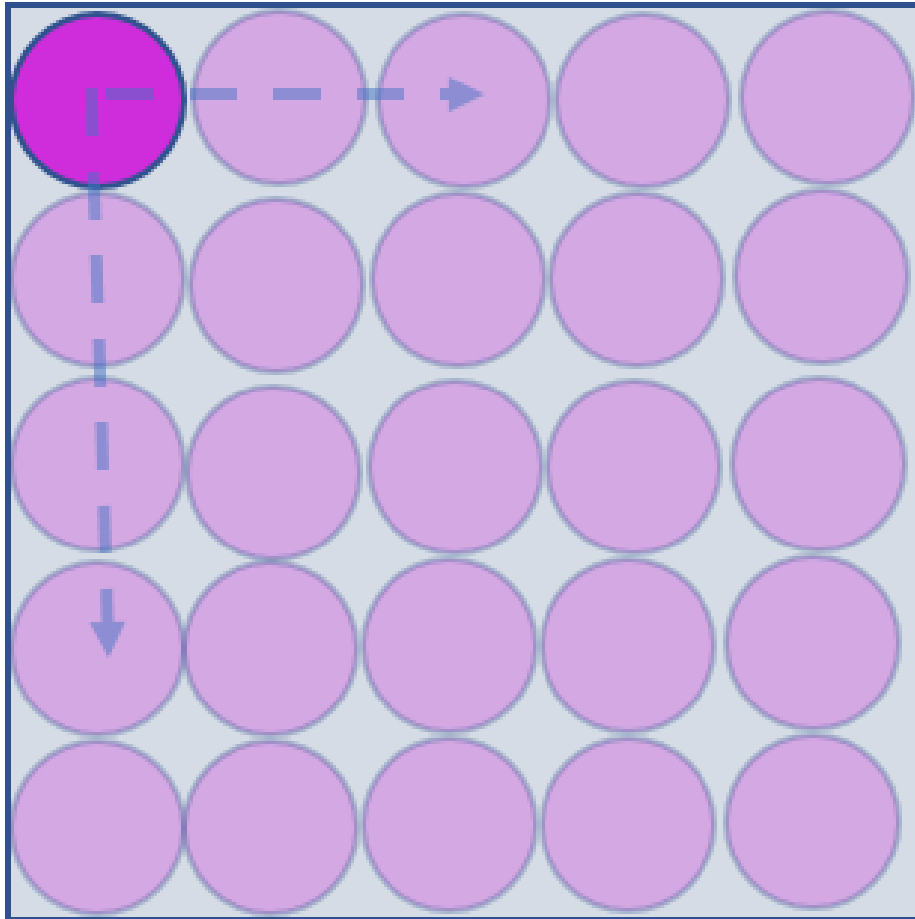
Βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα στον αντιδραστήρα ΨΠ διαλείποντος έργου (EE-1), σχεδιάστηκε εργαστηριακής-κλίμακας αντιδραστήρας ημι-συνεχούς λειτουργίας (**Σχήμα 1**). Ο εν λόγω αντιδραστήρας διατηρεί τις βασικές αρχές του αντιδραστήρα ΨΠ διαλείποντος έργου (αντιδραστήρας εκκένωσης διηλεκτρικού φράγματος DBD) και ως εκ τούτου το πολωμένο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης (ΥΤ) θα είναι από ανοξείδωτο χάλυβα, το διηλεκτρικό φράγμα της εκκένωσης στο κάτω μέρος του ηλεκτροδίου υψηλής τάσης θα είναι κατασκευασμένο από χαλαζία, ενώ το γειωμένο ηλεκτρόδιο θα είναι μια μεταλλική επιφάνεια (τράπεζα) από ανοξείδωτο χάλυβα πάνω στο οποίο θα απλώνεται ομοιόμορφα το προς επεξεργασία απόβλητο, επιτρέποντας συγχρόνως τη ροή του εφαρμοζόμενου αερίου πάνω από την επιφάνεια του αποβλήτου. Το ηλεκτρόδιο ΥΤ και το διηλεκτρικό από χαλαζία θα έχουν κυλινδρικό σχήμα, ενώ το ηλεκτρόδιο γείωσης θα είναι τετραγωνικού σχήματος και θα μπορεί να κινείται πάνω σε ράγες με τη βοήθεια μοτέρ. Με

αυτό τον τρόπο, όταν ολοκληρώνεται η επεξεργασία μιας συγκεκριμένης ποσότητας αποβλήτου, το επεξεργασμένο δείγμα θα συλλέγεται προς χημική ανάλυση.



Σχήμα 1. Απλοποιημένη σχηματική αναπαράσταση των βασικών τμημάτων του DBD αντιδραστήρα ημι-συνεχούς λειτουργίας για την επεξεργασία των αποβλήτων.

Από το **Σχήμα 2** γίνεται αντιληπτό ότι η κεφαλή πλάσματος DBD θα πρέπει να καλύψει διαδοχικά 25 θέσεις (μετακινούμενη είτε η ίδια είτε η μεταλλική τράπεζα) ώστε να πραγματοποιηθεί επεξεργασία όλης της μάζας αποβλήτου που έχει αποτεθεί ομοιόμορφα πάνω στο ηλεκτρόδιο γείωσης. Βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τον αντιδραστήρα διαλείποντος έργου, υποθέτουμε ότι η ποσότητα ρυπασμένου εδάφους (με πάχος περίπου 0.7 cm) θα πρέπει να παραμένει κάτω από τη ζώνη πλάσματος (κάτω από την κεφαλή DBD) και θα υφίσταται επεξεργασία για περίπου 2-5 λεπτά ώστε να επιτευχθεί μείωση αρχικού TOC κατά 50-60%. Ως εκ τούτου, η ικανότητα επεξεργασίας αποβλήτου στον εν λόγω αντιδραστήρα υπολογίζεται περίπου 1.5-3.8 kg/hr αν οι βασικότερες διαστάσεις του αντιδραστήρα ημι-συνεχούς λειτουργίας επιλεγούν ίσες με αυτές που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**.

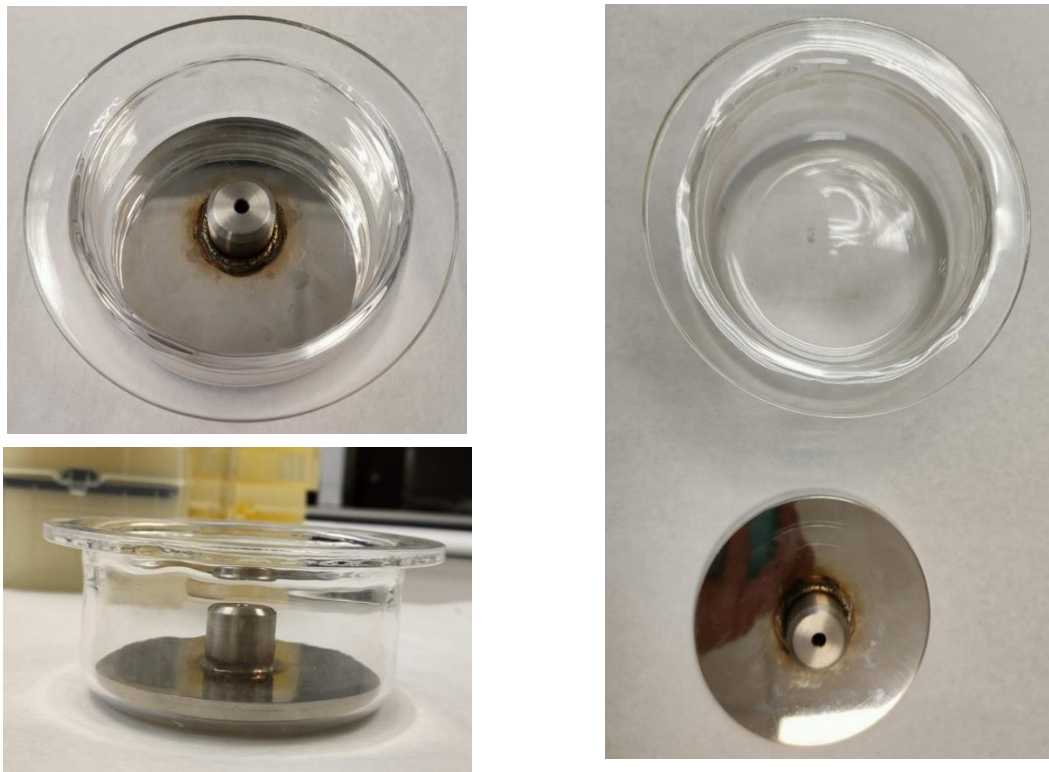


Σχήμα 2. Σχηματική αναπαράσταση της μεταλλικής επιφάνειας (ηλεκτρόδιο γείωσης) πάνω στην οποία απλώνεται το προς επεξεργασία απόβλητο και των διαδοχικών θέσεων της κεφαλής DBD.

Πίνακα 1. Διαστάσεις βασικότερων παραμέτρων λειτουργίας αντιδραστήρα ημι-συνεχούς λειτουργίας.

	Διαστάσεις
Τετράγωνη μεταλλική τράπεζα (ηλεκτρόδιο γείωσης)	55 cm X 55 cm
Διάμετρος ηλεκτροδίου υψηλής τάσης	10 cm
Εξωτερική διάμετρος διηλεκτρικού	11 cm
Πάχος πυθμένα διηλεκτρικού	2 mm
Πάχος αποβλήτου	0.7 cm
Πυκνότητα αποβλήτου	1.5 gr/cm ³
Ολική μάζα αποβλήτου στην τράπεζα	3175 gr

Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες από την κατασκευή των επιμέρους τμημάτων που συνθέτουν τον DBD αντιδραστήρα πλάσματος ημι-συνεχούς λειτουργίας καθώς και του ολοκληρωμένου συστήματος τοποθετημένου μέσα σε κέλυφος από πλεξιγκλάς που στεγανοποιούνται μεταξύ τους με διάφορα προφίλ αλουμινίου.



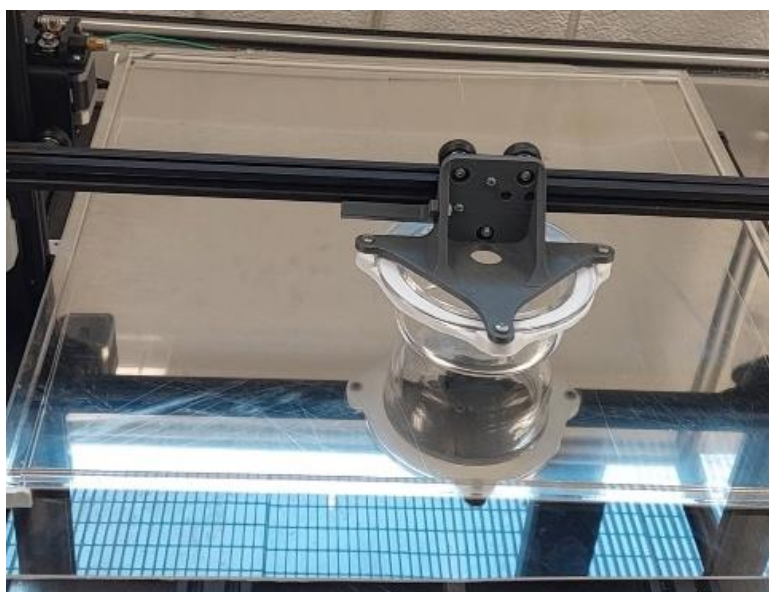
Σχήμα 3. Φωτογραφίες της κεφαλής DBD που αποτελείται από το μεταλλικό κυκλικό ηλεκτρόδιο ΥΤ που στεγάζεται μέσα στο κυλινδρικό περίβλημα από χαλαζία (το οποίο αποτελεί το διηλεκτρικό φράγμα της εκκένωσης πλάσματος).

Η κίνηση του ηλεκτροδίου της υψηλής τάσης (κεφαλής DBD) ελέγχεται από ένα τροφοδοτικό κίνησης αξόνων όπως αυτών των εκτυπωτών τρισδιάστατων αντικειμένων (**Σχήμα 4**). Το συγκεκριμένο τροφοδοτικό μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε να επιτυγχάνεται (i) μια προκαθορισμένη πορεία της κεφαλής DBD πάνω από το απόβλητο και (ii) η παραμονή της κεφαλής DBD για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα πάνω από μια συγκεκριμένη περιοχή του αποβλήτου (**Σχήμα 5**). Παρακάτω περιγράφονται λεπτομερώς οι εν λόγω αυτοματισμοί (στο

εδάφιο «Αυτοματοποίηση και πρωτόκολλο λειτουργίας συστήματος πλάσματος»).



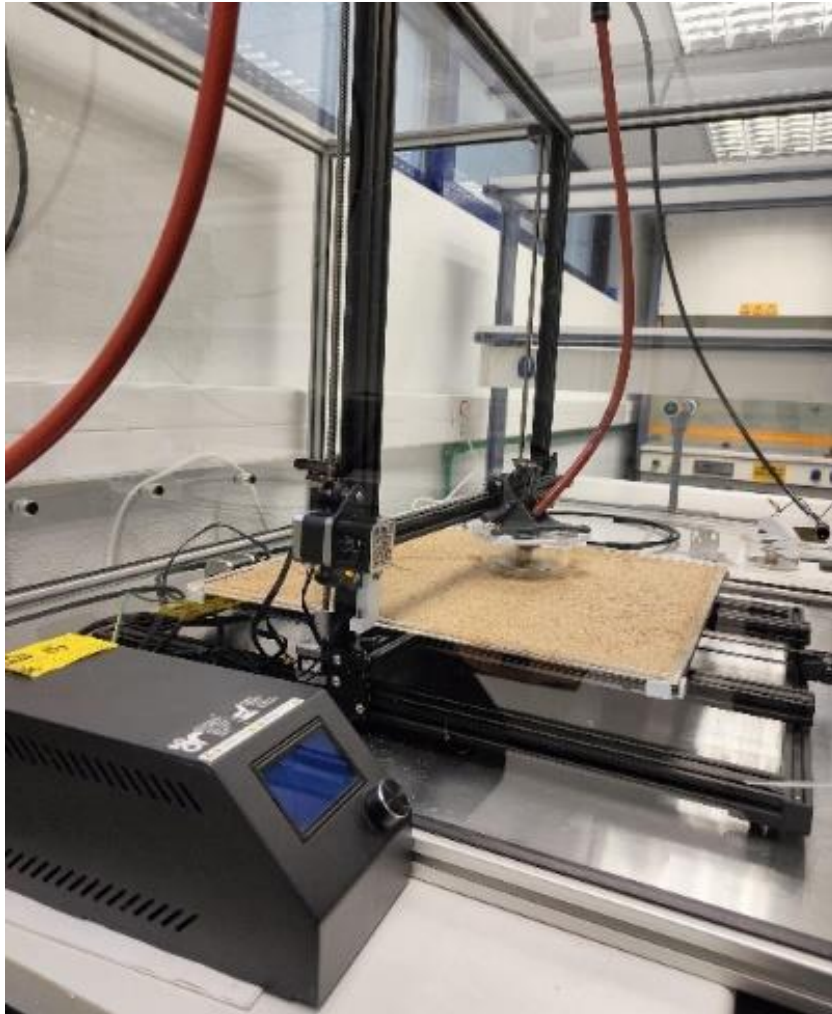
Σχήμα 4. Φωτογραφία του τροφοδοτικού που χρησιμοποιείται για την κίνηση της κεφαλής DBD και της μεταλλικής τράπεζας.



Σχήμα 5. Φωτογραφία της κεφαλής DBD και της μεταλλικής τράπεζας (ηλεκτρόδιο γείωσης).

Στη συνέχεια η κεφαλή DBD συνδέεται με το σύστημα παραγωγής υψηλής τάσης (περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια στο εδάφιο «Σύστημα τροφοδοσίας εναλλασσόμενης υψηλής τάσης») μέσω κατάλληλου καλωδίου (**Σχήμα 6** και **Σχήμα 7**). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτρονίων με πολύ υψηλή ενέργεια τα οποία ιονίζουν την ατμόσφαιρα και παράγουν ισχυρά αντιδρώντα είδη, όπως O_3 , H_2O_2 και ρίζες O^\bullet , OH^\bullet και H^\bullet .

Όλα αυτά τα σωματίδια μαζί με την υπεριώδη ακτινοβολία που παράγεται οξειδώνουν τους οργανικούς ρύπους των αποβλήτων το οποίο απλώνεται ομοιόμορφα πάνω στη μεταλλική τράπεζα (Σχήμα 6 και Σχήμα 7).



Σχήμα 6. Φωτογραφία (i) της κεφαλής DBD στην οποία έχει προσαρτηθεί το καλώδιο υψηλής τάσης προς σύνδεση με το σύστημα παραγωγής πλάσματος και (ii) της μεταλλικής τράπεζας στην οποία έχει τοποθετηθεί ομοιόμορφα έδαφος προς επεξεργασία.

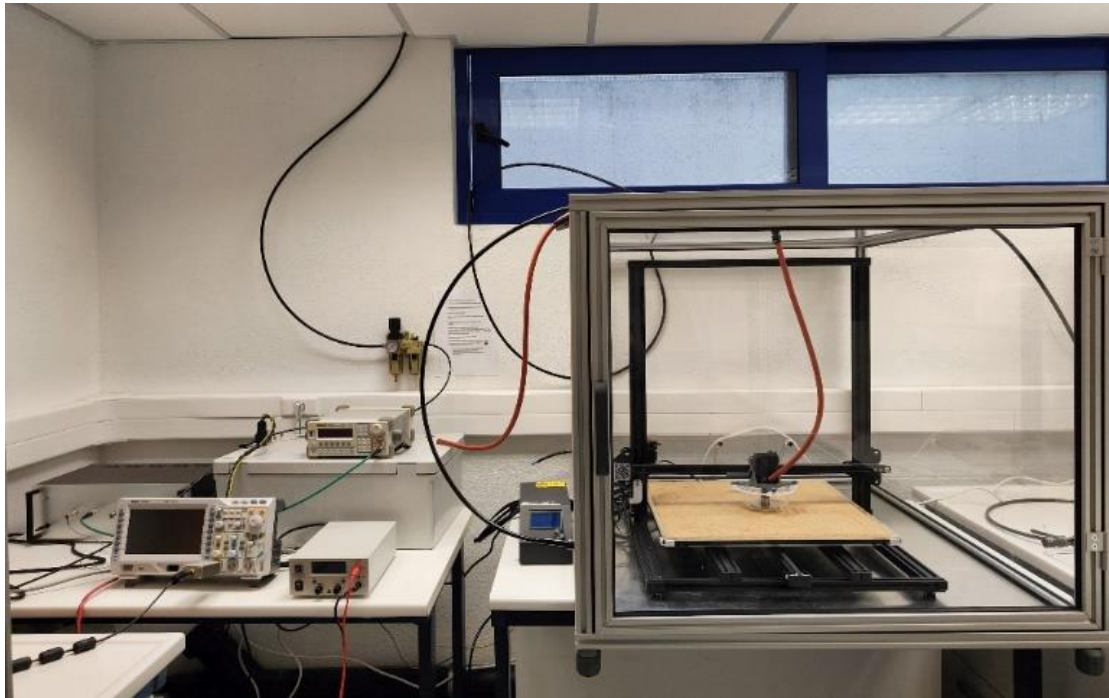


Σχήμα 7. Κάτοψη του συστήματος κεφαλής DBD-μεταλλικής τράπεζας στην οποία έχει τοποθετηθεί έδαφος προς επεξεργασία.

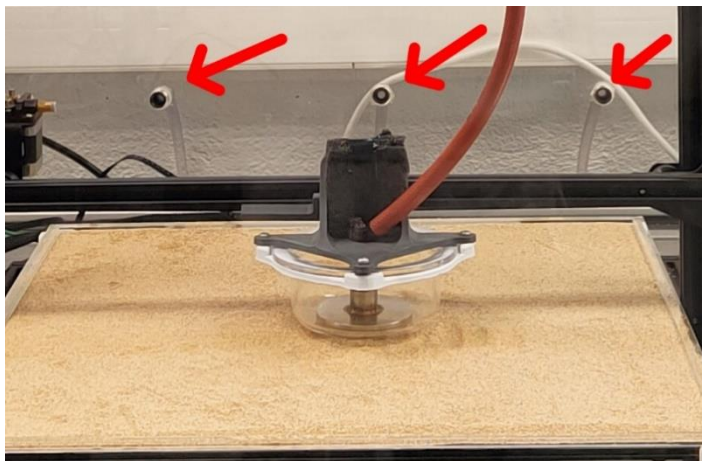
Στο **Σχήμα 8** απεικονίζεται ο DBD αντιδραστήρας πλάσματος ημι-συνεχούς λειτουργίας τοποθετημένος μέσα σε θάλαμο κατασκευασμένο από κομμάτια πλεξιγκλάς τα οποία στεγανοποιούνται μεταξύ τους με προφίλ αλουμινίου. Επιπλέον, απεικονίζεται το σύστημα παραγωγής υψηλής τάσης και παρακολούθησης πλάσματος (γεννήτρια υψηλής τάσης, αισθητήρες τάσης-ρεύματος, παλμογράφος, κλπ.) το οποίο είναι αντίστοιχο αυτού που χρησιμοποιήθηκε στην EE-1 κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων στον αντιδραστήρα ΨΠ διαλείποντος έργου.

Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του αποβλήτου διοχετεύεται στον αντιδραστήρα πλάσματος ξηρός ατμοσφαιρικός αέρας, υπό σταθερή παροχή 100 L/min, που ρυθμίζεται από έναν ελεγκτή ροής. Η επιλογή των θέσεων εισόδου / εξόδου των αερίων βασίστηκε σε προσομοιώσεις του πεδίου ροής με υπολογιστική ρευστοδυναμική (COMSOL). Τελικά βρέθηκε ότι οι βέλτιστες συνθήκες εξασφαλίζονται όταν ο αέρας εισέρχεται στον αντιδραστήρα μέσω τριών εισόδων κατανεμημένων στην πίσω πλευρά του εξωτερικού κ (Σχήμα 9) και εξέρχεται από τον αντιδραστήρα μέσω δύο εξόδων που βρίσκονται εκατέρωθεν σε προκαθορισμένα σημεία στις πλαϊνές πλευρές του θαλάμου (Σχήμα 10). Με τον τρόπο αυτό, ουδέτερα ενεργά σωματίδια πλάσματος αναγκάζονται να περάσουν πάνω από την

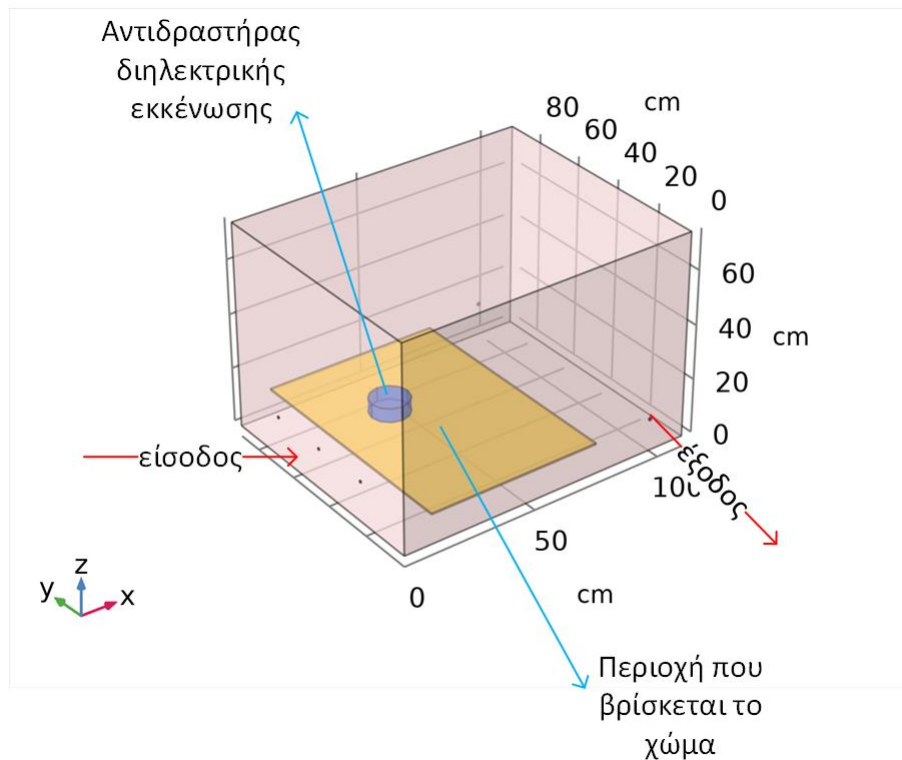
επιφάνεια του αποβλήτου ώστε να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα αλληλεπίδρασης τους με το ρύπους στη στερεά φάση.



Σχήμα 8. Φωτογραφία του συστήματος πλάσματος ημι-συνεχούς λειτουργίας και του συστήματος παραγωγής υψηλής τάσης και παρακολούθησης πλάσματος πριν την έναρξη των πειραμάτων.



Σχήμα 9. Απεικόνιση των τριών εισόδων ατμοσφαιρικού αέρα κατανεμημένων στην πίσω πλευρά του εξωτερικού θαλάμου που διοχετεύεται στον αντιδραστήρα πλάσματος.



Σχήμα 10. Απεικόνιση των τριών εισόδων και των δύο εξόδων ατμοσφαιρικού αέρα που βρίσκονται πάνω στο εξωτερικό κέλυφος που στεγάζει τον αντιδραστήρα πλάσματος ημι-συνεχούς λειτουργίας.

Αυτοματοποίηση της λειτουργίας του συστήματος

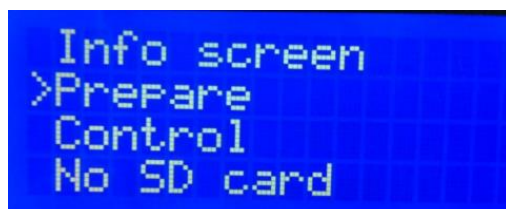
Πριν την πρώτη δοκιμή λειτουργίας του συστήματος για την επεξεργασία του αποβλήτου, πρέπει να επιτευχθεί ο κατάλληλος αυτοματισμός στις κινήσεις των μηχανικών τμημάτων του συστήματος. Πιθανά σφάλματα συναρμολόγησης ή συνδεσιμότητας μπορούν να λυθούν εύκολα με τα παρακάτω βήματα:

1. Τα μοτέρ των τριών αξόνων πρέπει να κινούνται σωστά, προς την σωστή κατεύθυνση. Προς την κατεύθυνση του τερματικού διακόπτη (limit switch) είναι η αντίθετη κατεύθυνση.
2. Ρυθμίσαμε την βίδα του τερματικού διακόπτη Z, ώστε η αρχική απόσταση έναρξης μεταξύ της κεφαλής DBD και της μεταλλικής τράπεζας να είναι η επιθυμητή (~1 cm).

Μέσα από την LCD οθόνη θα γίνει η κίνηση των αξόνων (1 και 2 όπως απεικονίζεται παρακάτω. Επιλέγουμε "AUTO HOME", και οι άξονες μεταφέρονται στο σημείο μηδέν (κάτω αριστερή γωνία της μεταλλικής τράπεζας). Μετά την ενεργοποίηση των τερματικών διακοπών και τον τερματισμό της κίνησης εξασφαλίζεται ότι όλα τα επιμέρους τμήματα έχουν τη σωστή κίνηση. Σημαντικό είναι να βεβαιωθούμε ότι ο τερματικός διακόπτης του

άξονα Z έχει εγκατασταθεί σωστά διαφορετικά η κεφαλή DBD θα χτυπήσει πάνω στη μεταλλική επιφάνεια.

1



```
Info screen
>Prepare
Control
No SD card
```

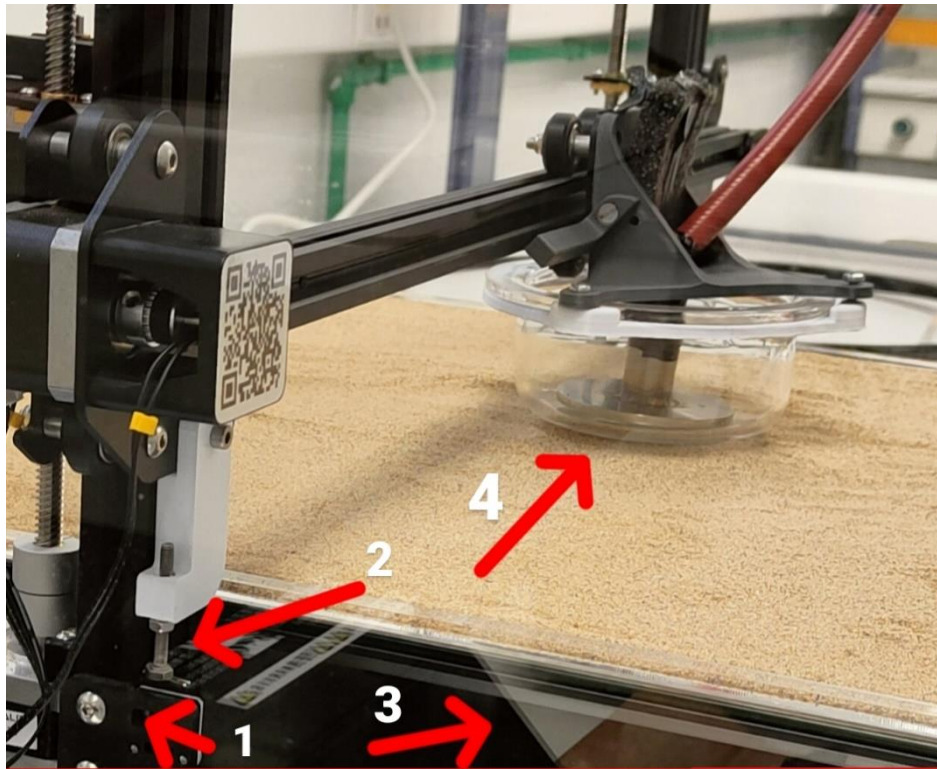
2



```
Main +
Disable steppers
>Auto home
Preheat PLA →
```

Η διαδικασία του leveling είναι πολύ σημαντική και έχει άμεση επίδραση στην πορεία της κεφαλής DBD και επομένως θα πρέπει να πραγματοποιηθεί πριν την έναρξη οποιασδήποτε άλλης διαδικασίας.

1. Ο τερματικός διακόπτης (θέση 1, **Σχήμα 11**), κρατάει τη μεταλλική τράπεζα σε μια απόσταση περίπου 1 cm από την κεφαλή DBD.
2. Επιλέγουμε AUTO HOME, ο άξονας Z κατεβαίνει, ακουμπάει ο αποστάτης (θέση 2, **Σχήμα 11**) τον τερματικό διακόπτη (θέση 1, **Σχήμα 11**) και σταματάει. Κλείνουμε το ρεύμα για το επόμενο βήμα.



Σχήμα 11. Φωτογραφία που απεικονίζονται οι θέσεις τερματικού διακόπτη (θέση 1) και αποστάτη (θέση 2).

Προγραμματισμός κώδικα αυτοματοποίησης του συστήματος

Ο κώδικας G (γνωστός και ως RS-274), ο οποίος έχει πολλές παραλλαγές, είναι το κοινό όνομα για την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη γλώσσα προγραμματισμού αριθμητικού ελέγχου (NC). Χρησιμοποιείται με τη βοήθεια υπολογιστή για τον έλεγχο αυτοματοποιημένων εργαλειομηχανών (όπως CNC και 3D εκτυπωτές). Ο κώδικας αυτός μερικές φορές ονομάζεται γλώσσα προγραμματισμού G.

Ίσως μια από τις σημαντικότερες εντολές στην οποία δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση ώστε να κινείται η κεφαλή πάνω από την τράπεζα σε συγκεκριμένο ύψος το οποίο θα επιτρέπει την ομαλή εκκένωση πλάσματος καθ' όλη την κίνηση της κεφαλής.

G90 and G91: Set to Absolute/Relative Positioning

Example: G90

All coordinates from now on are absolute relative to the origin of the machine. (This is the default.)

Example: G91

All coordinates from now on are relative to the last position.

G92: Set Position

This command can be used without any additional parameters.

Xnnn new X axis position

Ynnn new Y axis position

Znnn new Z axis position

Ennn new electrode (κεφαλή) position

Ρύθμιση θέσεων της κεφαλής και γενικά της τράπεζας συμφωνά με τις κινήσεις των αξόνων.

Example

G92 X10 E90

Allows programming of absolute zero point, by resetting the current position to the values specified. This would set the machine's X coordinate to 10, and the extrude coordinate to 90. No physical motion will occur.

A G92 without coordinates will reset all axes to zero.

M92: Set axis_steps_per_unit

Xnnn Steps per unit for the X drive

Ynnn Steps per unit for the Y drive

Znnn Steps per unit for the Z drive

Ennn Steps per unit for the electrode (κεφαλή) drive(s)

Examples

M92 X87.489 Y87.489 Z87.489

M92 E420:420

Γενικά χρησιμοποιώντας την γλώσσα προγραμματισμού των αυτοματοποιημένων μηχανών (όπως οι 3D printers) όπως ήδη περιγράφηκε, μπορεί να διαμορφωθεί μια σειρά εντολών σε

ηλεκτρονικό υπολογιστή οι οποίες καθοδηγούν το σύστημα μας ώστε να πραγματοποιείται η επιθυμητή πορεία της κεφαλής DBD.

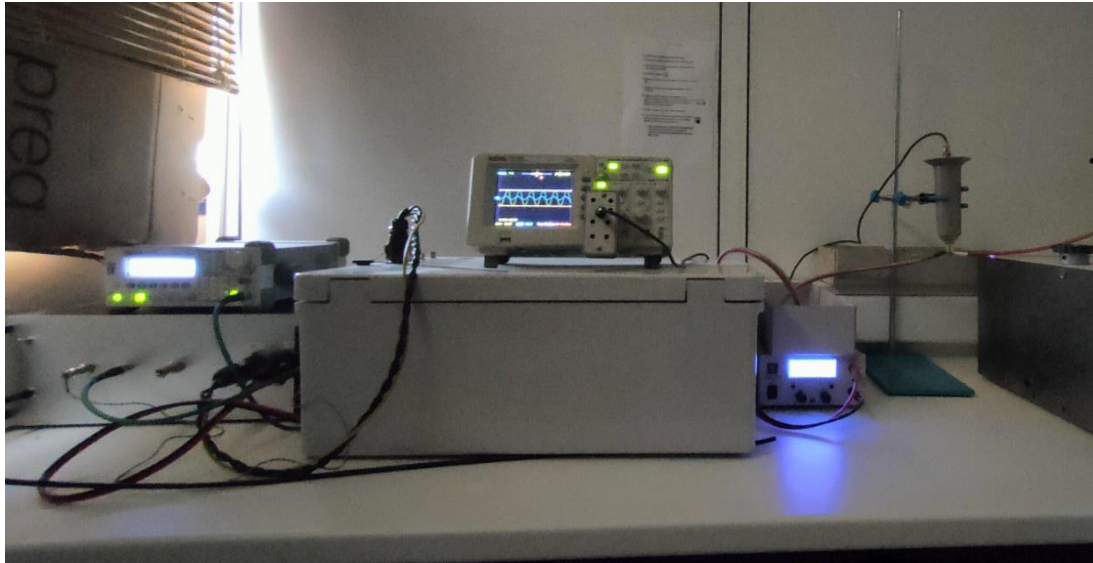
Η διαμόρφωση των εντολών πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τις βασικές αρχές των G-codes έτσι ώστε η κίνηση να γίνεται στους άξονες με συγκεκριμένη πορεία και χρονική διάρκειά πάνω από την εκάστοτε περιοχή του αποβλήτου. Η χρονική διάρκειά και πορεία καθορίστηκαν ύστερα από την παραμετρική ανάλυση στο αντιδραστήρα πλάσματος διαλείποντος έργου (EE-1).

Δοκιμές του αντιδραστήρα DBD πλάσματος ημι-συνεχούς λειτουργίας

Το απόβλητο που επιλέχθηκε για δοκιμή στην μονάδα ΨΠ ημι-συνεχούς λειτουργίας ήταν οι λάσπες που προέρχονται από τις διατρήσεις για την εξόρυξη αργού πετρελαίου (oil drilling cuttings). Περιέχουν υγρά διάτρησης με βάση το νερό και άλλα χημικά, και χρησιμοποιούνται για την ψύξη της κεφαλής του γεωτρύπανου, τον έλεγχο των υδροστατικών πιέσεων, την σταθεροποίηση των τοιχωμάτων της διάτρησης και την αιώρηση των θραυσμάτων των πετρωμάτων. Κατά περιπτώσεις μπορεί να εισάγονται στις γεωτρήσεις βαρύτης ή μπεντονίτης ως πρόσθετα αύξησης του ειδικού βάρους του πολφού. Τελικά προκύπτει μια λάσπη με τα υγρά διάτρησης, λάσπη και θραύσματα από τα περιβάλλοντα πετρώματα και ίχνη αργού πετρελαίου. Η αρχική τιμή του ολικού οργανικού άνθρακα του αποβλήτου ήταν 13.03% κ.β. ενώ η συγκέντρωση των ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH) και των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAHs) ήταν 81000 mg/kg και 10.1 mg/kg, αντίστοιχα.

Σύστημα τροφοδοσίας εναλλασσόμενης υψηλής τάσης

Αρχικά, ένα τροφοδοτικό συνεχούς τάσης (EA-PS 2042-20B POWER SUPPLY, 1CH, 42V, 20A) συνδέεται με μία γεννήτρια συχνοτήτων (Rigol DG1022, 20 MHz) ώστε να παραχθεί ημιτονοειδές σήμα πλάτους 2.5 V peak-to-peak, στα 10 kHz. Το σήμα εν συνεχεία οδηγείται σε μετασχηματιστή υψηλής τάσης (A-GBS-MINIPULS6) που μπορεί να παράγει υψηλή τάση μέχρι 60 kV peak-to-peak σε συχνότητες από 5-20 kHz (**Σχήμα 12**).

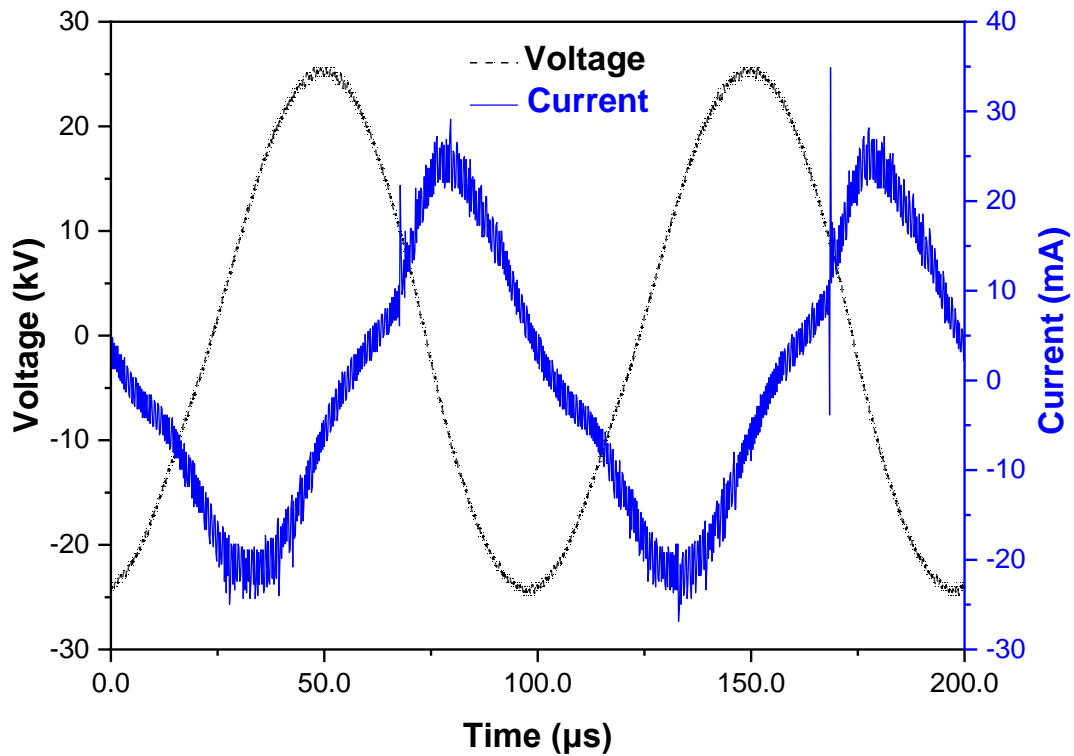


Σχήμα 12. Φωτογραφία συστήματος τροφοδοσίας εναλλασσόμενης υψηλής τάσης.

Η ισχύς που καταναλώνεται από το δίκτυο για την λειτουργία του συστήματος που παράγει την υψηλή τάση είναι ίση με το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος που καταγράφεται στο τροφοδοτικό συνεχούς τάσης ($15.7 \text{ V} \times 13.4 \text{ A} = 210 \text{ W}$). Επιπλέον, το πλάτος της εναλλασσόμενης τάσης ήταν σταθερό και ίσο με 26.0 kV και η συχνότητά της ίση με 10 kHz . Οι κυματομορφές τάσης-ρεύματος του κυκλώματος καταγράφονται με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή ρεύματος (Pearson electronics 2877, 300 Hz - 200 MHz) και καταμεριστή τάσης (Tektronix P6015, 0 - 75 MHz) και απεικονίζονται στον ψηφιακό παλμογράφο (Rigol MSO2302A, 300 MHz , 2 GSamples/s). Η ισχύς που παρέχεται μεταξύ των ηλεκτροδίων πλάσματος (ισχύς εκκένωσης, P) προσδιορίστηκε από την ολοκλήρωση της τάσης και του ρεύματος κατά τη διάρκεια 2 περιόδων ($2T$), δηλαδή

$$P = \frac{1}{2T} \int_0^{2T} V(t)I(t)dt \quad (1)$$

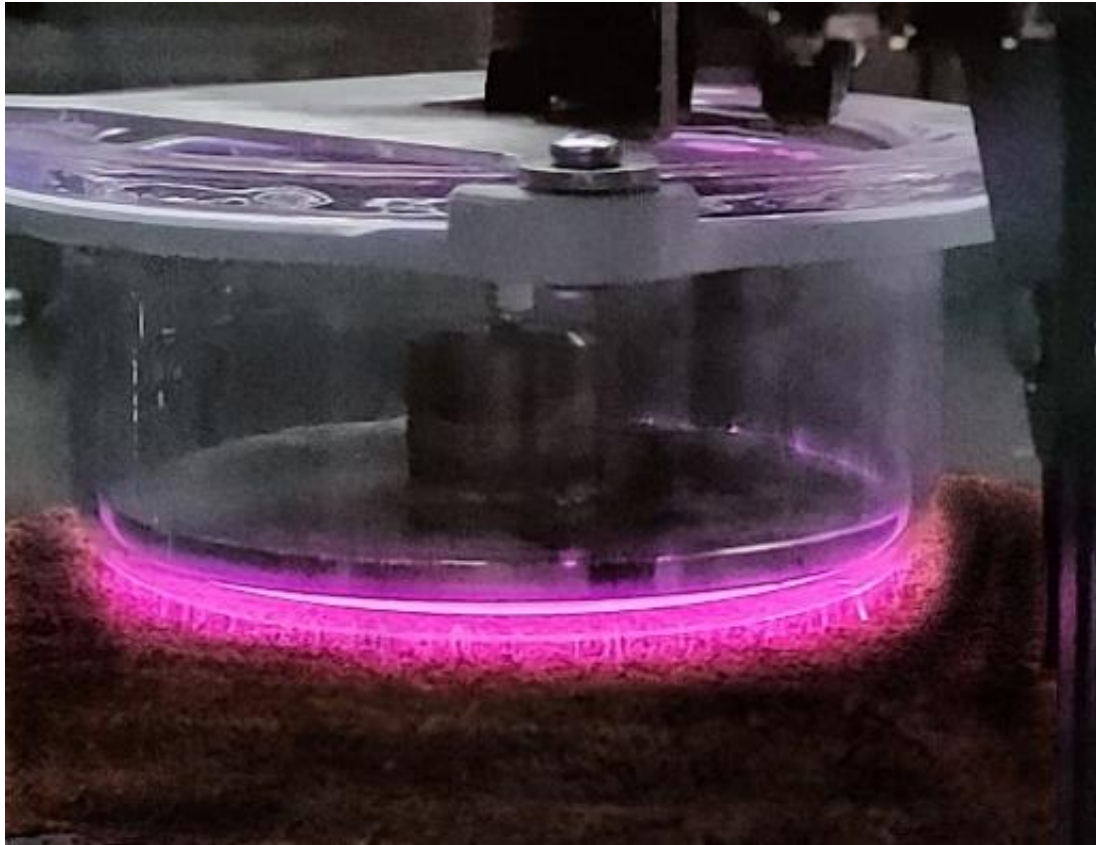
όπου $V(t)$ και $I(t)$ είναι οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος. Τυπικές κυματομορφές τάσης-ρεύματος κατά τη διάρκεια επεξεργασίας του αποβλήτου στα 26.0 kV απεικονίζονται στο **Σχήμα 13**. Η μέση καταναλισκόμενη ισχύς στον αντιδραστήρα πλάσματος σε σταθερό πλάτος τάσης 26.0 kV στα 10 kHz υπολογίστηκε ίση με 160 W .



Σχήμα 13. Κυματομορφές τάσης-ρεύματος κατά τη διάρκεια επεξεργασίας του αποβλήτου στον αντιδραστήρα DBD ημι-συνεχούς λειτουργίας χρησιμοποιώντας ημιτονοειδή υψηλή τάση.

Αποτελέσματα πειραμάτων κατά την επεξεργασία του αποβλήτου στον αντιδραστήρα πλάσματος DBD ημι-συνεχούς λειτουργίας

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα επεξεργασίας του αποβλήτου στον αντιδραστήρα πλάσματος ημι-συνεχούς λειτουργίας που παράγεται από εκκένωση διηλεκτρικού φράγματος (DBD) σε σταθερό πλάτος εναλλασσόμενης τάσης (26.0 kV), σταθερής συχνότητας ίσης με 10 kHz και σταθερής ροής αέρα ίση με 100 L/min σε συνάρτηση με τον χρόνο επεξεργασίας. Οι εκκενώσεις πλάσματος παράγονται κάτω από την κεφαλή DBD και πάνω από την επιφάνεια του αποβλήτου όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 14**.



Σχήμα 14. Φωτογραφία των εκκενώσεων πλάσματος στον αντιδραστήρα DBD κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.

Όσον αφορά την ποσότητα που απορρυπάζεται στον συγκεκριμένο DBD αντιδραστήρα πλάσματος ημι-συνεχούς λειτουργίας μπορούμε να υπολογίσουμε τα παρακάτω:

Ύψος κεφαλής από την γειωμένη μεταλλική τράπεζα **$h=1.2\text{ cm}$**

Πάχος αποβλήτου **$h=1.0\text{ cm}$**

Εμβαδόν επιφάνειας μεταλλικής τράπεζας **$A=55\text{ cm} \times 55\text{ cm} = 3025\text{ cm}^2$**

Όγκος όπου καταλαμβάνει το απόβλητο **$V= 3025 \times 1.0 = 3025\text{ cm}^3$**

Πυκνότητα στερεού **$d=1.5\text{ gr/cm}^3$**

Ολική μάζα στερεού πάνω στην τράπεζα **$m= 4538\text{ gr}$**

Για την αποκατάσταση ολόκληρης της ποσότητας αποβλήτου που έχει απλωθεί πάνω στην μεταλλική επιφάνεια, η κεφαλή DBD πρέπει να μετακινηθεί διαδοχικά σε 25 διαφορετικές θέσεις, όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 2**. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα επεξεργασίας του

αποβλήτου στον αντιδραστήρα πλάσματος σε 3 διαφορετικούς χρόνους επεξεργασίας (50, 75 και 125 min). Μετά το τέλος της επεξεργασίας, συλλέχθηκε η κατάλληλη ποσότητα αποβλήτου και πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) και ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH). Τα αποτελέσματα αναλύσεων TOC από τα πειράματα επεξεργασίας oil drilling cuttings σε διαφορετικούς χρόνους επεξεργασίας στον αντιδραστήρα πλάσματος ημι-συνεχούς λειτουργίας παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**, ενώ τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αναλύσεων ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH) στον **Πίνακα 2**. Τα ίδια αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά στο **Σχήμα 15**.

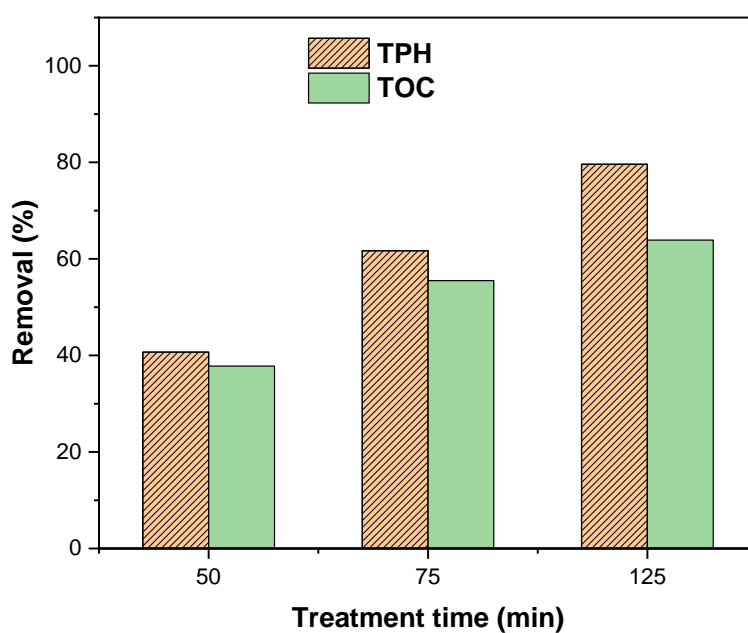
Είναι φανερό πως όσο αυξάνεται ο χρόνος επεξεργασίας πλάσματος τόσο αυξάνεται η απομάκρυνση ολικού οργανικού άνθρακα και ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων από τα oil drilling cuttings. Πιο συγκεκριμένα, το TPH μειώθηκε κατά 40.7 και 61.7% μετά από 50 και 75 λεπτά επεξεργασίας με πλάσμα, ενώ η μείωση ήταν ~80% μετά από 125 λεπτά επεξεργασίας. Ομοίως, ο ολικός οργανικός άνθρακας του αποβλήτου μειώθηκε κατά 37.8, 55.5 και 63.9% μετά από 50, 75 και 125 λεπτά επεξεργασίας με πλάσμα, αντίστοιχα.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα αναλύσεων ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) πριν και μετά την επεξεργασία με πλάσμα δειγμάτων oil drilling cuttings (V=26.0 kV, f=10 kHz, Q=100 L/min, συνολική μάζα αποβλήτου ~ 4.5 kg).

Δείγμα	Χρόνος παραμονής κεφαλής πάνω από την εκάστοτε περιοχή αποβλήτου (min)	Συνολικός χρόνος επεξεργασίας (min)	TOC (% w/w)	TOC removal (%)
Αρχικό			13.03	-
B1	2	50	8.1	37.8
B2	3	75	5.8	55.5
B3	5	125	4.7	63.9

Πίνακας 2: Αποτελέσματα αναλύσεων ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH) πριν και μετά την επεξεργασία με πλάσμα δειγμάτων oil drilling cuttings ($V=26.0$ kV, $f=10$ kHz, $Q=100$ L/min, συνολική μάζα αποβλήτου ~ 4.5 kg).

Δείγμα	Χρόνος παραμονής κεφαλής πάνω από την εκάστοτε περιοχή αποβλήτου (min)	Συνολικός χρόνος επεξεργασίας (min)	TPH (mg/kg)	TPH removal (%)
Αρχικό			81000	-
B1	2	50	48000	40.7
B2	3	75	31000	61.7
B3	5	125	16500	79.6



Σχήμα 15. Μείωση (%) των ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH) και του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) μετά από 50, 75 και 125 λεπτά επεξεργασίας των oil drilling cuttings στον DBD αντιδραστήρα πλάσματος ημι-συνεχούς λειτουργίας ($V=26.0$ kV, $f=10$ kHz, $Q=100$ L/min, συνολική μάζα αποβλήτου ~ 4.5 kg).

Προκειμένου να γίνει μια πρώτη εκτίμηση του ενεργειακού κόστους της παρούσα τεχνολογίας για την αποκατάσταση των oil drilling cuttings κάνουμε τους παρακάτω υπολογισμούς:

Ισχύς εκκένωσης, **P= 0.16 kW**

Μάζα αποβλήτου, **m= 4.5 kg**

Χρόνος επεξεργασίας, **t= 125 min= 2.083 h**

Καταναλισκόμενη ενέργεια, **E= 0.16 kWh X 2.083 h = 0.3333 kWh**

Βάσει των παραπάνω υπολογισμών, απαιτούνται **0.3333 kWh** για την επεξεργασία **4.5 kg** αποβλήτου oil drilling cuttings ώστε να επιτυγχάνεται μείωση TOC ~65% και μείωση TPH ~80%. Το ενεργειακό κόστος σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται στις **0.073 kWh/kg** ή **73.4 kWh/tn**. Κάνοντας την παραδοχή **0.1 €/kWh**, το συνολικό ενεργειακό κόστος υπολογίζεται σε **~7.3 €/tn**.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι το Ψυχρό Πλάσμα αποτελεί μια πολύ αποδοτική μέθοδο προηγμένης οξείδωσης για την επεξεργασία εδαφών ρυπασμένων με υψηλή συγκέντρωση οργανικών ρύπων, όπως τα θραύσματα γεωτρήσεων κοιτασμάτων πετρελαίου. Προφανώς για το σχεδιασμό μιας μονάδας σε μεγάλη κλίμακα θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες όπως το ενεργειακό κόστος αφυδάτωσης της λάσπης, το κόστος μεταφοράς από την πηγή στο χώρο επεξεργασίας, κ.ά, σε συνδυασμό με οικονομικούς δείκτες απόδοσης μιας επένδυσης.