



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΟΡΓΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αξιοποίηση αντιδραστήρα πλάσματος για τη μελέτη αποδόμησης
υγρών ή υδατοδιαλυτών ρύπων

Δασκαλάκης Ιωάννης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Χρήστος Αργυρούσης, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΟΡΓΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αξιοποίηση αντιδραστήρα πλάσματος για τη μελέτη αποδόμησης
υγρών ή υδατοδιαλυτών ρύπων**

Δασκαλάκης Ιωάννης
ΑΜ: 05116112

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Χρήστος Αργυρούσης, Καθηγητής, Σχολής Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Αστέριος Μπακόλας, Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Φώτιος Τσόπελας, Επίκουρος Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2024

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Ανόργανων Υλικών (LIMT) της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χρήστο Αργυρούση, καθηγητή της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ο οποίος μου ανέθεσε το συγκεκριμένο ερευνητικό θέμα και ως επιβλέπων καθηγητής μου προσέφερε τις πολύτιμες γνώσεις του και την αμέριστη συμπαράστασή του ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Επίσης, επιθυμώ να ευχαριστήσω τον Μετα-Διδακτορικό ερευνητή κ. Παύλο Πανδή για την πολύ σημαντική βοήθεια που μου παρείχε από την πρώτη στιγμή που βρέθηκα στο εργαστήριο, καθώς με βοήθησε όχι μόνο να εξοικειωθώ με τα απαραίτητα όργανα για την εργασία, αλλά συγχρόνως με καθοδηγούσε διαρκώς στη σωστή διενέργεια των πειραμάτων και με την άρτια επιστημονική του κατάρτιση με βοήθησε να καλύψω και το θεωρητικό υπόβαθρο αυτών των πειραμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφια Διδάκτορα στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Ανόργανων Υλικών, κ. Ειρήνη Κανέλλου, της οποίας η βοήθεια ήταν διαρκής, καθολική και ως εκ τούτου πάρα πολύ σημαντική, καθιστώντας την αναντικατάστατο συνεργάτη και σύμβουλο.

Περιεχόμενα

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	7
1. Εισαγωγή.....	7
2. Υγροί Ρύποι	8
2.1 Χρώμα	8
2.2 Αζωχρώματα	9
2.3 Αζωχρώματα και περιβάλλον	9
3. Πλάσμα	11
3.1 Δημιουργία Πλάσματος	11
3.2 Ηλεκτρική Εκκένωση.....	12
3.3 Είδη Πλάσματος.....	12
3.4 Εφαρμογές του πλάσματος	13
4. Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων	14
4.1 Προηγμένες Μέθοδοι Οξειδωσης (Advanced Oxidation Processes- AOPs)	14
4.2 Αποδόμηση Υγρών Ρύπων Με Χρήση Πλάσματος.....	15
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	18
1. Αντιδραστήρια.....	18
2. Πειραματική Διαδικασία - Όργανα	19
3. Παρασκευή Διαλυμάτων	27
4. Αντίδραση.....	28
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	30
Α. Μπλε του μεθυλενίου (Methylene Blue).....	30
Β. Κόκκινο της βυρσοδεψίας (Dermacid Red)	34
Γ. Κόκκινο της υφαντουργίας (BWS Red).....	39
ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	43
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	46

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δοκιμάστηκε η αξιοποίηση αντιδραστήρα πλάσματος με σκοπό να εξεταστεί η αποτελεσματικότητά του στην αποδόμηση οργανικών ρύπων σε βιομηχανικά αζωχρώματα. Η αποδόμηση των συγκεκριμένων αποβλήτων συνδέεται άμεσα με τον αποχρωματισμό τους κατά την επεξεργασία τους.

Η μελέτη αφορά τρία χρώματα, το μπλε του μεθυλενίου (methylene blue), το κόκκινο της βυρσοδεψίας (dermacid red) και το κόκκινο της υφαντουργίας (bws red). Η πολυπλοκότητα στη δομή των αζωχρωμάτων έχει ως συνέπεια να ληφθούν διαφορετικά ποσοστά αποδόμησης οργανικού ρύπου για το κάθε χρώμα προς ανάλυση. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε διαφορετικές συνθήκες τάσης και συχνότητας, ενώ έγιναν δύο σειρές αντιδράσεων για το μπλε του μεθυλενίου και από τρεις για το κόκκινο της βυρσοδεψίας και το κόκκινο της υφαντουργίας.

Όσον αφορά τον αποχρωματισμό για το μπλε του μεθυλενίου επιτεύχθηκε για τάση $V=14.90\text{kV}$ και συχνότητα $f=3.63\text{kHz}$, μετά από τη δεύτερη αντίδραση το υψηλότερο ποσοστό αποδόμησης, το οποίο είναι ίσο με 69.5%.

Το υψηλότερο ποσοστό αποχρωματισμού για το κόκκινο της βυρσοδεψίας επιτεύχθηκε για τάση $V=20.00\text{kV}$ και συχνότητα $f=7\text{kHz}$ μετά από την τρίτη αντίδραση και είναι ίσο με 71.05%.

Τέλος, το υψηλότερο ποσοστό αποχρωματισμού για το κόκκινο της υφαντουργίας επιτεύχθηκε για τάση $V=19.91\text{kV}$ και συχνότητα $f=7\text{kHz}$ μετά από την τρίτη αντίδραση και είναι ίσο με 63.27%.

Λέξεις – Κλειδιά: Οργανικοί Ρύποι, Αζώχρωμα, Αντιδραστήρας πλάσματος, Αποδόμηση

ABSTRACT

The present thesis examines the utilization of a plasma reactor with the aim of evaluating its effectiveness in the degradation of organic pollutants in industrial azo dyes. The degradation of these specific wastes is directly related to their decolorization during their processing.

The study involves three colors: methylene blue, dermacid red, and bws red. The complexity in the structure of azo dyes results in different degradation rates of organic pollutants for each color under analysis. Experiments were conducted under different voltage and frequency conditions, with two reaction series for methylene blue and three for dermacid red and bws red.

Regarding decolorization for methylene blue, it was achieved at voltage $V=14.90\text{kV}$ and frequency $f=3.63\text{kHz}$, after the second reaction, the highest degradation rate of 69.5%.

The highest decolorization rate for dermacid red was achieved at voltage $V=20.00\text{kV}$ and frequency $f=7\text{kHz}$, after the third reaction, with a rate of 71.05%.

Finally, the highest decolorization rate for bws red was achieved at voltage $V=19.91\text{kV}$ and frequency $f=7\text{kHz}$, after the third reaction, with a rate of 63.27%.

Keywords: Organic Pollutants, Azo Dyes, Plasma Reactor, Degradation

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Εισαγωγή

Οι οργανικοί ρύποι αποτελούν σημαντικό πρόβλημα για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Αυτοί οι ρύποι προέρχονται από διάφορες πηγές, όπως βιομηχανικές δραστηριότητες, αγροτικές δραστηριότητες, καύση καυσίμων, και από τα αστικά λύματα. Ειδικότερα, οι ρύποι από τη βιομηχανία των χρωμάτων αποτελούν σημαντικές πηγές μόλυνσης αφού χρησιμοποιούνται σε αρκετούς βιομηχανικούς κλάδους όπως είναι τα τρόφιμα, τα φάρμακα και η κλωστοϋφαντουργεία [1]. Η σημασία του περιορισμού των οργανικών ρύπων είναι κρίσιμη για πολλούς λόγους. Ο αποχρωματισμός αυτών των οργανικών ρύπων αποτελεί ένα απαραίτητο βήμα προκειμένου να επιτευχθεί η αποτελεσματική επεξεργασία των υδάτων που περιέχουν αυτούς τους ρύπους. Αυτός είναι ο λόγος που αναζητούνται αποτελεσματικές και αποδοτικές μέθοδοι για τον όσο το δυνατό καλύτερο περιορισμό των υγρών ή υδατοδιαλυτών ρύπων. Ρύποι που προέρχονται από μονάδες παραγωγής αζωχρωμάτων ή από μονάδες βαφής με αζωχρώματα είναι η κατηγορία η οποία μελετάται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Η συνηθέστερη διαδικασία για τον αποχρωματισμό των υγρών ρύπων βασίζεται στη φωτοκατάλυση, όπου χρησιμοποιώντας φωτοκαταλυτικές ουσίες, υπό την επίδραση του ηλιακού φωτός, προκαλούνται χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στην αποδόμηση των ρύπων [2].

Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση αντιδραστήρων πλάσματος αναδεικνύεται ως μια ελπιδοφόρα εναλλακτική για τον αποχρωματισμό των ρυπαντικών υγρών. Η χρήση πλάσματος ως αντιδραστήρα παρουσιάζει μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την αποτελεσματική αφαίρεση χρωστικών και ρυπαντικών ουσιών από υγρά απόβλητα.

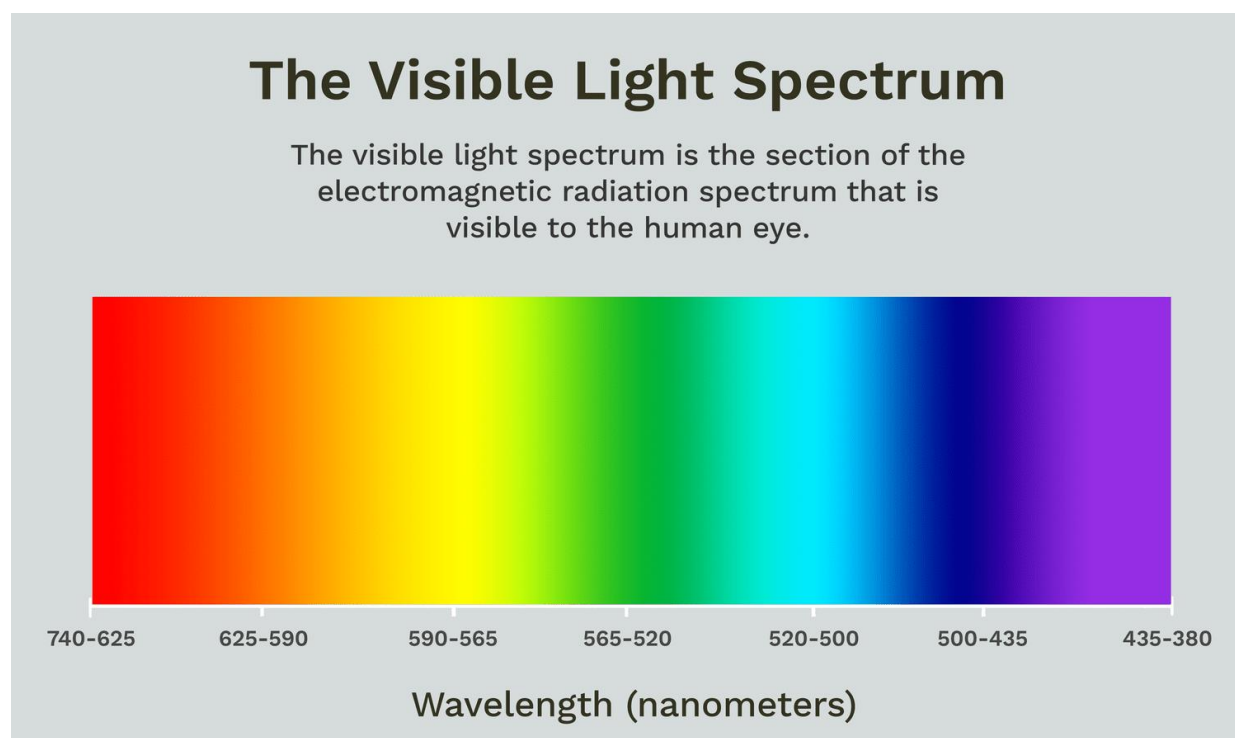
Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη μελέτη και αξιολόγηση της δυνατότητας χρήσης αντιδραστήρα πλάσματος για τον αποχρωματισμό ρυπαντικών υγρών. Οι αντιδραστήρες πλάσματος παρέχουν ένα περιβάλλον υψηλής ενέργειας με τη χρήση ηλεκτρικού πεδίου και αερίου, το οποίο επιτρέπει την αποτελεσματική αποσύνθεση των οργανικών ρύπων σε υγρά μέσα. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους αποχρωματισμού, όπως τη χημική οξείδωση ή τη βιολογική επεξεργασία, καθώς είναι αποτελεσματική, γρήγορη και λιγότερο επιβλαβής για το περιβάλλον. Αναλύονται οι βασικές αρχές της τεχνολογίας πλάσματος και εξετάζονται οι προηγμένες μέθοδοι και διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τη διάσπαση και απομάκρυνση των οργανικών ρύπων από τα υγρά απόβλητα. Επιπλέον, παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα και αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αποχρωματισμού με χρήση πλάσματος.

Μέσω της παρούσας εργασίας, επιδιώκεται να δοθεί έμφαση στη σημασία της τεχνολογικής καινοτομίας στον τομέα του περιβάλλοντος και να προωθηθεί η ανάπτυξη βιώσιμων τεχνολογιών που θα συμβάλλουν στην προστασία και την αειφορία του περιβάλλοντος και της κοινωνίας.

2. Υγροί Ρύποι

2.1 Χρώμα

Όλες οι ενώσεις, οι οποίες απορροφούν ακτινοβολία στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, δηλαδή 380nm – 750nm ονομάζονται χρώματα ή χρωστικές [3].



Εικόνα 1. Φάσμα ορατού φωτός [3]

Τα μόρια των χρωστικών διαθέτουν τόσο χρωμοφόρα ομάδα όσο και αυξόχρωμη ομάδα, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με ένα σύστημα συζυγιακών διπλών δεσμών, (δομές αρωματικών δακτυλίων και ετεροκυκλικών δακτυλίων) [4].

Οι χρωμοφόρες ομάδες είναι ομάδες-δέκτες ηλεκτρονίων, οι οποίες απορροφούν επιλεκτικά ακτινοβολία μήκους κύματος στην ορατή και εγγύς-υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, ενώ οι αυξόχρωμες ομάδες δεν σχετίζονται με το χρώμα της ουσίας αλλά επηρεάζουν την απόχρωσή του (επηρεάζοντας το φάσμα της χρωμοφόρας ομάδας με την οποία συνδέονται) [5].

2.2 Αζωχρώματα

Τα αζωχρώματα αποτελούν το μεγαλύτερο όγκο παραγωγής χρωστικών σήμερα, και η σημασία τους ενδέχεται να αυξηθεί στο μέλλον. Τα αζωχρώματα είναι μια κατηγορία οργανικών ενώσεων, τα οποία έχουν έντονο χρωματισμό, που όταν μειώνεται αποτελεί ορατό δείκτη της αποσύνθεσης τους [6]. Το χρώμα τους σχετίζεται με την παρουσία ατόμων αζώτου και την αλληλεπίδραση τους με άνθρακες από τις αρωματικές αλυσίδες.

Έχουν σημαντικό ρόλο στην αγορά, λόγω της χρήσης τους ως χρωστικές και στις εκτυπώσεις [7],[8].

Αυτά τα χρώματα συνθέτονται από μια απλή μέθοδο διαζωτοποίησης και σύζευξης. Για να επιτευχθούν τα επιθυμητά χρωματικά χαρακτηριστικά, όπως η απόδοση και το μέγεθος των σωματιδίων χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Τα αζωχρώματα είναι τα πιο χρησιμοποιημένα χρώματα και αποτελούν πάνω από 60% του συνολικού όγκου των χρωστικών, ενώ περίπου το 70% όλων των χρωστικών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία είναι αζωχρώματα. Τα αζωχρώματα είναι τα πιο σημαντικά συνθετικά χρωστικά, καθώς έχουν ευρεία χρήση στην υφαντουργία, την εκτύπωση, την κατασκευή χαρτιού κ.ά. Αυτές οι ενώσεις χαρακτηρίζονται από τη λειτουργική ομάδα (-N=N-), που ενώνει δύο συμμετρικά και/ή ασύμμετρα ταυτόσημα με αρωματικές ρίζες [9]. Τα περισσότερα αζωχρώματα συνθέτονται μέσω της διαζωτοποίησης ενός αρωματικού πρωτοτύπου αμινίου, ακολουθούμενης από σύζευξη με ένα ή περισσότερα ηλεκτρονιόφιλα σωματίδια, όπως αμίνο και υδρόξυ, ενώ υπάρχουν και άλλες μέθοδοι σύνθεσης αζωχρωμάτων.

Η αζο-ομάδα μπορεί να σχηματίσει δεσμούς με κυκλικά μόρια όπως τα βενζόλια, ναφθαλίνια, αρωματικές ενώσεις. Από αυτούς τους δεσμούς εξαρτάται το χρώμα, οι διάφορες αποχρώσεις και ένταση.

Κατά κανόνα, η χημική δομή ενός αζωχρώματος περιλαμβάνει έναν σκελετό, τις ομάδες αυχοχρωμίας, τις χρωμοφόρες ομάδες και τις ομάδες διαλυσιμότητας. Το χρώμα των αζωχρωμάτων επηρεάζεται από τους δεσμούς, μαζί με τις σχετιζόμενες χρωμοφόρες και αυχοχρωμικές ομάδες [10].

2.3 Αζωχρώματα και περιβάλλον

Τα αζωχρώματα μπορούν να μεταφερθούν στο περιβάλλον με διάφορους τρόπους, με κυριότερους τους εξής:

1)**Βιομηχανικά Απόβλητα:** Η κυριότερη πηγή μεταφοράς των αζωχρωμάτων στο περιβάλλον είναι μέσω των βιομηχανικών αποβλήτων. Κατά τη διαδικασία παραγωγής, ενδέχεται να παράγονται απόβλητα που περιέχουν αζωχρώματα και να εκτοξεύονται στο περιβάλλον μέσω απορρίψεων ή ατυχημάτων.

2)**Εκπομπές Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης:** Κατά τη χρήση αζωχρωμάτων σε διάφορες βιομηχανίες, μπορεί να παρουσιαστεί αποστράγγιση ατμοσφαιρικών εκπομπών κατά την κατανάλωση ή κατά τη διάσπαση των υλικών που περιέχουν αζωχρώματα.

3) Εκπομπές από Υδάτινα Συστήματα: Κατά τη διαδικασία βαφής ή άλλης επεξεργασίας που εμπλέκει τη χρήση αζωχρωμάτων, τα υδάτινα απόβλητα μπορεί να περιέχουν αζωχρώματα που εκτοξεύονται στα ύδατα.

4) Διάσπαση Υλικών: Κατά τη διάσπαση των αζωχρωμάτων, είτε από φυσικούς παράγοντες όπως ο ήλιος και ο αέρας, είτε από χημικές διεργασίες, τα αζωχρώματα μπορούν να απελευθερωθούν και να εισέλθουν στο περιβάλλον [11].

Οι ανωτέρω πρακτικές μπορούν να οδηγήσουν σε εκτεταμένη παρουσία των ουσιών αυτών σε διάφορα περιβαλλοντικά μέσα, με δυνητικά αρνητικές επιπτώσεις για το περιβάλλον, τους ζωικούς και φυτικούς οργανισμούς [10],[12].

Αναλυτικότερα, τα αζωχρώματα έχουν τις παρακάτω επιπτώσεις στο περιβάλλον:

Υδάτινη Ρύπανση: Κατά τη διαδικασία παραγωγής και χρήσης τους, τα αζωχρώματα μπορεί να εισέρχονται στα ύδατα μέσω βιομηχανικών αποβλήτων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υδάτινη ρύπανση, μολύνοντας θάλασσες, ποτάμια, λίμνες και επηρεάζοντας την υγεία των οργανισμών που ζουν εκεί.

Δυσμενείς Επιδράσεις στα Οικοσυστήματα: Ορισμένα αζωχρώματα μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα. Ενδέχεται να επηρεάσουν τα φυτά, τα ζώα και τα εδάφη στα οποία εκτίθενται.

Δημιουργία Επικίνδυνων Παραπροϊόντων: Κατά τη διαδικασία αποδόμησης των αζωχρωμάτων, ενδέχεται να παράγονται παραπροϊόντα που μπορούν να είναι επιβλαβή για το περιβάλλον και την υγεία.

Αντίκτυπος στην Ανθρώπινη Υγεία: Ορισμένα αζωχρώματα έχουν συνδεθεί με ανθρώπινες υγειονομικές ανησυχίες, κυρίως όταν εκτίθενται σε υψηλές συγκεντρώσεις. Ενδέχεται να είναι καρκινογόνα ή να επηρεάζουν τον ανθρώπινο οργανισμό με άλλους τρόπους [11].

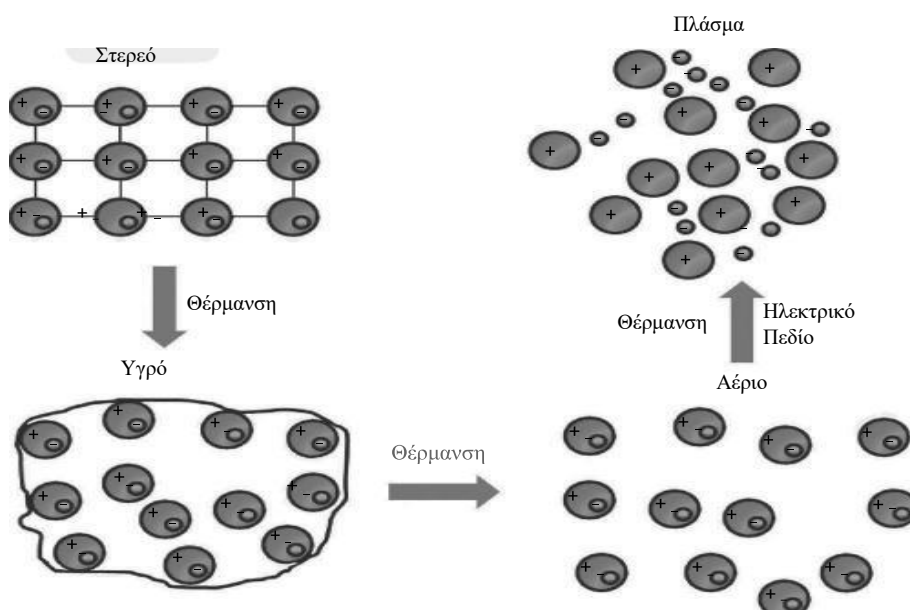
3. Πλάσμα

Το πλάσμα απαρτίζει περισσότερο από το 99% της ορατής ύλης στο σύμπαν. Αποτελείται από θετικά ιόντα, ηλεκτρόνια ή αρνητικά ιόντα και ουδέτερα σωματίδια. Το πλάσμα θεωρείται ως η τέταρτη κατάσταση της ύλης.

Στα συνηθισμένα αέρια, λόγω της ουδετερότητάς τους, δεν υπάρχουν ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις και στο μέτρο που η δύναμη της βαρύτητας είναι αμελητέα, η κίνηση των σωματιδίων προκαλείται μόνο από τις συγκρούσεις μεταξύ τους. Αντίθετα, στο πλάσμα, η κίνηση των σωματιδίων δημιουργεί ηλεκτρικά πεδία και ρεύματα, τα οποία, αντίστοιχα, δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Στο πλάσμα, οι μεγάλης εμβέλειας δυνάμεις Coulomb καθορίζουν την κίνηση των σωματιδίων, ενώ στα συνηθισμένα αέρια, τα μόρια αντιδρούν κυρίως μεταξύ τους μέσω δυνάμεων μικρής εμβέλειας [13].

3.1 Δημιουργία Πλάσματος

Όταν ένα στερεό (η πρώτη κατάσταση της ύλης) θερμαίνεται, τα σωματίδια σε αυτό λαμβάνουν αρκετή ενέργεια για να χαλαρώσει η δομή τους και έτσι λιώνουν για να σχηματίσουν ένα υγρό (η δεύτερη κατάσταση της ύλης). Αφού λάβουν αρκετή ενέργεια, τα σωματίδια σε ένα υγρό ελευθερώνονται από αυτό και εξατμίζονται σε αέριο (η τρίτη κατάσταση της ύλης) [14]. Στη συνέχεια, όταν δίνεται μια σημαντική ποσότητα ενέργειας στο αέριο μέσω μηχανισμών όπως η ηλεκτρική εκκένωση, τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται από άτομα ή μόρια όχι μόνο επιτρέπουν στα ιόντα να κινούνται πιο ελεύθερα, αλλά παράγουν και περισσότερα ηλεκτρόνια και ιόντα μέσω συγκρούσεων μετά την ταχεία επιτάχυνσή τους σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Τελικά, ο αυξημένος αριθμός ηλεκτρονίων και ιόντων αλλάζει την ηλεκτρική ιδιότητα του αερίου, που γίνεται ιονισμένο αέριο ή πλάσμα [11].



Εικόνα 2. Μετατροπή των καταστάσεων της ύλης με χρήση θερμότητας [13].

3.2 Ηλεκτρική Εκκένωση

Η ηλεκτρική εκκένωση είναι η διαδικασία κατά την οποία ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται μέσα από ένα αέριο με τη χρήση ηλεκτρικού πεδίου. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η εφαρμοζόμενη τάση μεταξύ δύο ηλεκτροδίων σε ένα αέριο επιτρέπει στα φορτία να ρέουν μεταξύ τους, δημιουργώντας ένα πλάσμα. Ανάλογα με το ρεύμα που μπορεί να διατηρηθεί και την τάση που εφαρμόζεται στο κενό των ηλεκτροδίων μπορούν να υπάρξουν διάφορα είδη εκκενώσεων.

Αυτή η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε χημικές αντιδράσεις ή να παράγει νέα φορτισμένα σωματίδια.

Η ηλεκτρική εκκένωση χρησιμοποιείται σε πολλές τεχνολογικές και επιστημονικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των αερίων φωτισμού, των λέιζερ, και των πλάσματος ανάδυσης [15].

3.3 Είδη Πλάσματος

Το πλάσμα μπορεί να χωριστεί σε κατηγορίες ανάλογα με τη θερμοκρασία και την πυκνότητα των ηλεκτρονίων. Οι βασικότερες κατηγορίες είναι οι εξής:

1) Πλάσμα υψηλής θερμοκρασίας

Όλα τα ηλεκτρόνια και βαριά σωματίδια βρίσκονται σε θερμική ισορροπία, αφού έχουν ίδια θερμοκρασία, η οποία μπορεί να φτάσει έως και 10^8 K.

2) Θερμικό πλάσμα

Σε αυτή την περίπτωση δεν βρίσκονται όλες οι περιοχές σε πλήρη θερμική ισορροπία παρά μόνο μερικές κι έτσι το θερμικό πλάσμα βρίσκεται σε οιονει ισορροπία. Παρατηρείται σε κεραυνούς και φτάνει μέχρι και $2 \cdot 10^4$ K.

3) Μη θερμικό πλάσμα

Τα σωματίδια δεν βρίσκονται σε θερμική ισορροπία. Η θερμοκρασία των ηλεκτρονίων είναι πολύ υψηλότερη από των βαριών σωματιδίων και ο βαθμός ιονισμού των σωματιδίων είναι ασθενής. Η θερμοκρασία του έχει τιμές από 300K έως 1000K [16].

Το κύριο πρόβλημα των μη θερμικών πλάσμάτων είναι η ανάγκη σταθεροποίησής τους και ο έλεγχός τους. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα πλάσματα που βρίσκονται εντός υγρών ή έρχονται σε επαφή με υγρά, και αποτελεί θέμα διαρκούς έρευνας. Η αιτία είναι ότι τα πλάσματα στα υγρά είναι περίπλοκα σε σχέση με τα αντίστοιχα στη φάση του αερίου. Δεν βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας και παράγονται κυρίως τόσο στη φάση του αερίου όσο και στη φάση του υγρού.

3.4 Εφαρμογές του πλάσματος

Το πλάσμα έχει πολλές ενδιαφέρουσες και χρήσιμες εφαρμογές σε διάφορους τομείς [16]. Ορισμένες από τις χρήσεις του πλάσματος περιλαμβάνουν:

Τεχνολογία Πλάσματος: Το πλάσμα χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, όπως οι πηγές φωτός πλάσματος, οι πηγές ενέργειας πλάσματος και οι πύλες πλάσματος.

Τεχνολογία Τεχνικής Καθαρισμού: Στον τομέα της τεχνικής καθαρισμού, το πλάσμα χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό επιφανειών και απολύμανση.

Ιατρικές Εφαρμογές: Σε ιατρικές εφαρμογές, το πλάσμα χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό εργαλείων και εξοπλισμού, καθώς και για την αποστείρωση.

Υλικά και Κατασκευές: Στην κατασκευή υλικών, το πλάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών των υλικών, όπως η πρόσφυση χρωμάτων σε επιφάνειες.

Προηγμένες Τεχνολογίες Καύσης: Στον τομέα της παραγωγής ενέργειας, το πλάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προηγμένες μεθόδους καύσης, όπως η πυρηνική σύντηξη.

Στρώματα Επίστρωσης: Σε εφαρμογές κατά την επίστρωση υλικών, το πλάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία λεπτών και ομοιόμορφων στρωμάτων.

Αυτές είναι μόνο λίγες από τις πολλές χρήσεις του πλάσματος, καθώς η τεχνολογία σχετικά με το πλάσμα εξελίσσεται συνεχώς και ανοίγει νέους ορίζοντες [17].

4. Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων

Έχουν αναπτυχθεί και υλοποιηθεί παγκοσμίως φυσικές, χημικές και βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων για την απομάκρυνση των χρωστικών από αυτά [18]. Οι φυσικές μέθοδοι απομακρύνουν το χρώμα σε ικανοποιητικό βαθμό, αλλά έχουν συνήθως υψηλό λειτουργικό κόστος. Μερικές από αυτές είναι η κροκίδωση, η προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα και η διήθηση με μεμβράνες. Οι βιολογικές μέθοδοι έχουν αρκετά χαμηλό κόστος, ενώ είναι και φιλικές προς το περιβάλλον, ωστόσο έχουν χαμηλό βαθμό αποτελεσματικότητας, αφού τα χρώματα είναι ανθεκτικά [19].

4.1 Προηγμένες Μέθοδοι Οξειδωσης (Advanced Oxidation Processes- AOPs)

Οι μέθοδοι οξειδωσης σε υδατινή φάση, που βασίζονται στην μεσολάβηση ισχυρά οξειδωτικών ειδών που οδηγούν στην καταστροφή του εκάστοτε ρύπου είναι οι προηγμένες διεργασίες οξειδωσης [20]. Αναπτύχθηκαν προκειμένου να αντιμετωπιστεί με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα το πρόβλημα των οργανικών ρύπων και η ανθεκτικότητά τους [21]. Οι προηγμένες μέθοδοι επεξεργασίας μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες τις ομογενείς και τις ετερογενείς διεργασίες [2].

Οι πιο συνηθισμένες διεργασίες οξειδωσης είναι [22] :

- Οζονισμός (O_3 , O_3/UV , O_3/H_2O_2)
- Ετερογενής φωτοκατάλυση (TiO_2/UV)
- Αντιδραστήριο Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2)
- Photo Fenton ($UV/Fe^{2+}/H_2O_2$),
- Ηλεκτροχημική οξείδωση,
- Οξείδωση σε υψηλές συνθήκες πίεσης (P) και θερμοκρασίας (T)
- Χρήση υπερήχων

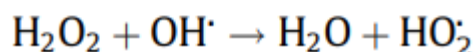
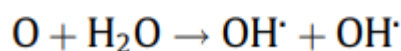
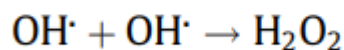
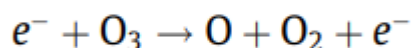
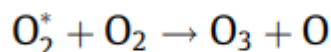
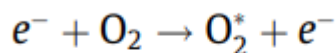
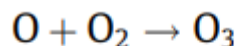
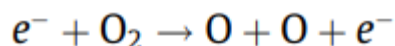
4.2 Αποδόμηση Υγρών Ρύπων Με Χρήση Πλάσματος

Οι εκφορτώσεις από το πλάσμα στα υγρά παράγουν έντονη υπεριώδη ακτινοβολία, κύματα κρούσης και ενεργές ρίζες (OH, οξυγόνο, υδρογόνο κ.λπ.), τα οποία είναι αποτελεσματικά για την αντιμετώπιση πολλών βιολογικών και χημικών ουσιών [23]. Αυτό καθιστά τα υγρά πλάσματα ιδιαίτερα κατάλληλα για σκοπούς απολύμανσης και αποστείρωσης [24].

Ο μηχανισμός διάσπασης στα υγρά είναι πιο περίπλοκος από ό,τι στα στερεά και τα αέρια. Τα υγρά είναι πολύ πυκνότερα σε σύγκριση με τα αέρια και τα μόρια τους δεν έχουν τη σταθερότητα όπως των περισσότερων στερεών. Επιπλέον, η καθαρότητα του υγρού, όπως οι διαλυμένες αέριες ουσίες που δημιουργούν φυσαλίδες στο υγρό, παίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία διάσπασης [25]. Η ηλεκτρική διάσπαση επιτυγχάνεται τη στιγμή που αγώγιμο πλάσμα σχηματίζεται με το ηλεκτρικό πεδίο των δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων μέσα στο υγρό. Αυτό οδηγεί στον σχηματισμό ενός σπινθήρα ή τόξου. Παρατηρείται πάντα μια καθυστέρηση μεταξύ της εφαρμογής της υψηλής τάσης και της διάσπασης. Αυτή η καθυστέρηση αποτελείται από τρία διαδοχικά στάδια: τη φάση έναρξης ή έναρξη του streamer (κύμα ιονισμού), τη φάση εξάπλωσης του streamer και τη φάση του σπινθήρα και του τόξου [26].

Κατά το κύμα ιονισμού παράγονται δραστικές ρίζες (OH \cdot , HO $_2\cdot$ και O \cdot), οι οποίες είναι ικανές να αποδημήσουν ανθεκτικούς ρύπους εξαιτίας της υψηλής οξειδωτικής τους ικανότητας και της μη επιλεκτικής τους δραστηριότητας. Κατά την αντίδραση του πλάσματος, μπορεί να σχηματιστεί μεγάλη ποσότητα μονατομικού οξυγόνου (O) μέσω της διάσπασης του οξυγόνου (O $_2$) από την πρόσπτωση ηλεκτρονίων, προκαλώντας μια μεγαλύτερη παραγωγή όζοντος (O $_3$) [27]. Το H $_2$ O $_2$ μπορεί επίσης να παραχθεί με τη διάσπαση του H $_2$ O από την επίδραση του πλάσματος μετά από μια σειρά αντιδράσεων. Παράλληλα, το παραγόμενο O $_3$ και το H $_2$ O $_2$ αποσυντίθενται από κάποια ηλεκτρόνια και ρίζες και καταναλώνονται για την οργανική αποσύνθεση. Έτσι, η δημιουργία και η κατανάλωση του όζοντος και του υπεροξειδίου του υδρογόνου εμφανίζονται ταυτόχρονα [28].

Σχετικοί αντιδράσεις παραγωγής του O $_3$ και του H $_2$ O $_2$ με τη χρήση πλάσματος είναι οι εξής [29].

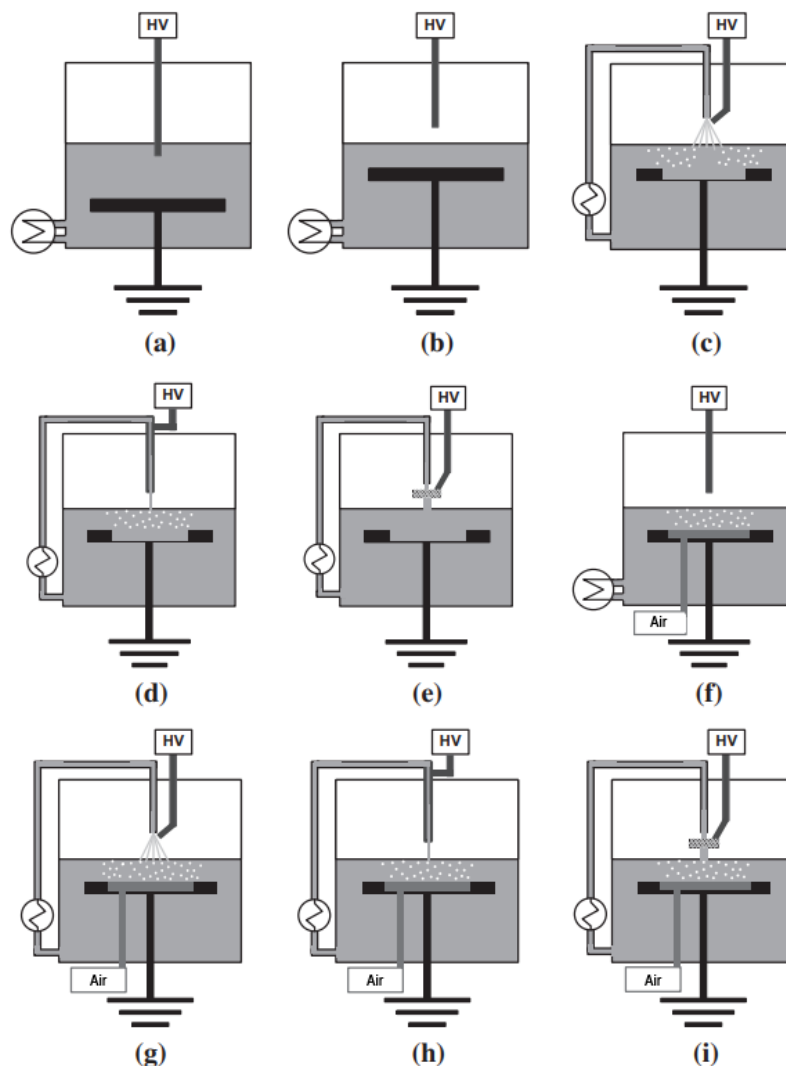


Οι εκφορτίσεις στα υγρά μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες [\[25\]](#) :

- (i) εκφορτίσεις στην άμεση φάση του υγρού,
- (ii) εκφορτίσεις στη φάση του αερίου με ένα ή περισσότερα υγρά ηλεκτρόδια,
- (iii) εκφορτίσεις σε φυσαλίδες σε υγρά.

Η πρώτη κατηγορία είναι εκφόρτιση απευθείας στο υγρό, η οποία ονομάζεται άμεση ροή ρευμάτων ή εκφορτώσεις κορώνας (για τη μη θερμική περίπτωση) ή η εκφόρτιση θαλάσσιου τόξου που χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση (για τη θερμική περίπτωση) [\[26\]](#).

Αναλυτικότερα, υπάρχουν αρκετοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει η εκφόρτιση στην περιοχή του πλάσματος για διάφορα είδη αντιδραστήρων.



Εικόνα 3. Είδη αντιδραστήρων πλάσματος [30]

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούνται οι εξής αντιδραστήρες [30]:

- a) Σημείο – μεταλλική πλάκα με εκφόρτιση στο υγρό
- b) Σημείο – μεταλλική πλάκα με εκφόρτιση στο αέριο
- c) Τυρβώδης ροή μέσω ακροφυσίου (jet)
- d) Στρωτή ροή μέσω ακροφυσίου (jet)
- e) Ηλεκτρόδιο άνθρακα υψηλής τάσης (RVC HV)
- f) Σημείο – μεταλλική πλάκα με εκφόρτιση στο αέριο με φυσαλίδες
- g) Τυρβώδης ροή με φυσαλίδες μέσω ακροφυσίου
- h) Στρωτή ροή με φυσαλίδες μέσω ακροφυσίου
- i) Ηλεκτρόδιο άνθρακα υψηλής τάσης (RVC HV) με φυσαλίδες.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Αντιδραστήρια

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξετάστηκε η αποδόμηση τριών οργανικών ρύπων που προέρχονται από τη βιομηχανία της βυρσοδεψίας και της υφαντουργίας. Η διαδικασία εκτελέστηκε υπό συγκεκριμένες συνθήκες χρόνου, θερμοκρασίας, συγκέντρωσης και pH.

Επιλέχθηκαν τρία διαφορετικά χρώματα για την επεξεργασία, συγκεκριμένα το μπλε του μεθυλενίου (Methylene Blue), το κόκκινο της βυρσοδεψίας (Dermacid Red), και το κόκκινο της υφαντουργίας (BWS Red). Για κάθε χρώμα, επαναλαμβάνεται η ίδια σειρά πειραμάτων προκειμένου να ληφθούν αποτελέσματα, τα οποία θα είναι συγκρίσιμα. Η ανάλυση της αποδόμησης των υγρών ρύπων πραγματοποιήθηκε μέσω της παρακολούθησης των κορυφών απορρόφησης στο ορατό φάσμα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν:

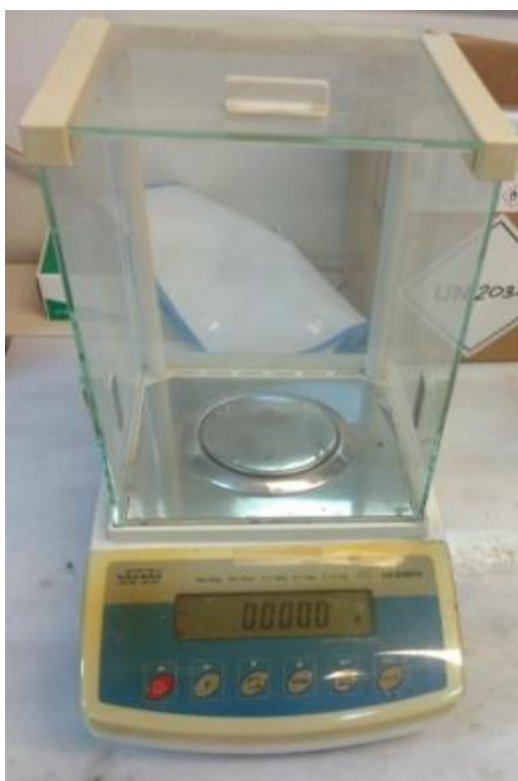
Πίνακας 1

ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΙΑ	ΜΟΡΙΑΚΟΣ ΤΥΠΟΣ
Μπλε Αζώχρωμα του Μεθυλενίου	$C_{16}H_{18}N_3Cl$
Κόκκινο Αζώχρωμα της Βυρσοδεψίας	$C_{22}H_{20}N_4NaSO_{11}$
Κόκκινο Αζώχρωμα της Υφαντουργίας	Πρόκειται για μίγμα αζωχρωμάτων και για το λόγο αυτό δεν είναι δυνατό να αναφερθεί ο χημικός τύπος.
Αιθανόλη	CH_3CH_2OH
Ακετόνη	CH_3COCH_3
Απιονισμένο Νερό	H_2O

2. Πειραματική Διαδικασία - Όργανα

- Αναλυτικός Ζυγός

Έχει ακρίβεια 0.07 mg. Χρησιμοποιήθηκε για τη ζύγιση των τριών χρωστικών ουσιών που επιλέχθηκαν για την Παρασκευή των αντίστοιχων διαλυμάτων.



Εικόνα 4. Αναλυτικός Ζυγός

- Φιάλη *Duran* με βιδωτό καπάκι

Χρησιμοποιήθηκε για την τοποθέτηση των αντιδρώντων προκειμένου να μην περνάει αέρας έτσι ώστε να υπάρχει σταθερή ροή κατά την αντίδραση.



Εικόνα 5. Φιάλη *Duran* 100mL

- **Αεροσυμπιεστής (Air Compressor)**

Χρησιμοποιήθηκε για την παροχή αέρα στον αντιδραστήρα σε σταθερή πίεση.



Εικόνα 6. Αεροσυμπιεστής

- Ρυθμιστής πίεσης Αεροσυμπιεστή

Χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της πίεσης.



Εικόνα 7. Ρυθμιστής πίεσης

- Φασματοφωτόμετρο (UV – Vis) : U-5100 HITACHI

Μέσω του φασματοφωτόμετρου υπολογίζεται ο αποχρωματισμός των δειγμάτων. Ρυθμίζεται για μήκη κύματος από 350nm – 800nm.



Εικόνα 8. Φασματοφωτόμετρο

- Τροφοδοτικό πάγκου

Έχει δύο κανάλια στα οποία ρυθμίζονται η τάση $V(V)$, η ένταση ρεύματος $I(A)$, η συχνότητα $f(kHz)$ και αναγράφεται η ισχύς του οργάνου $P(W)$.



Εικόνα 9. Τροφοδοτικό πάγκου

- *Ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου*

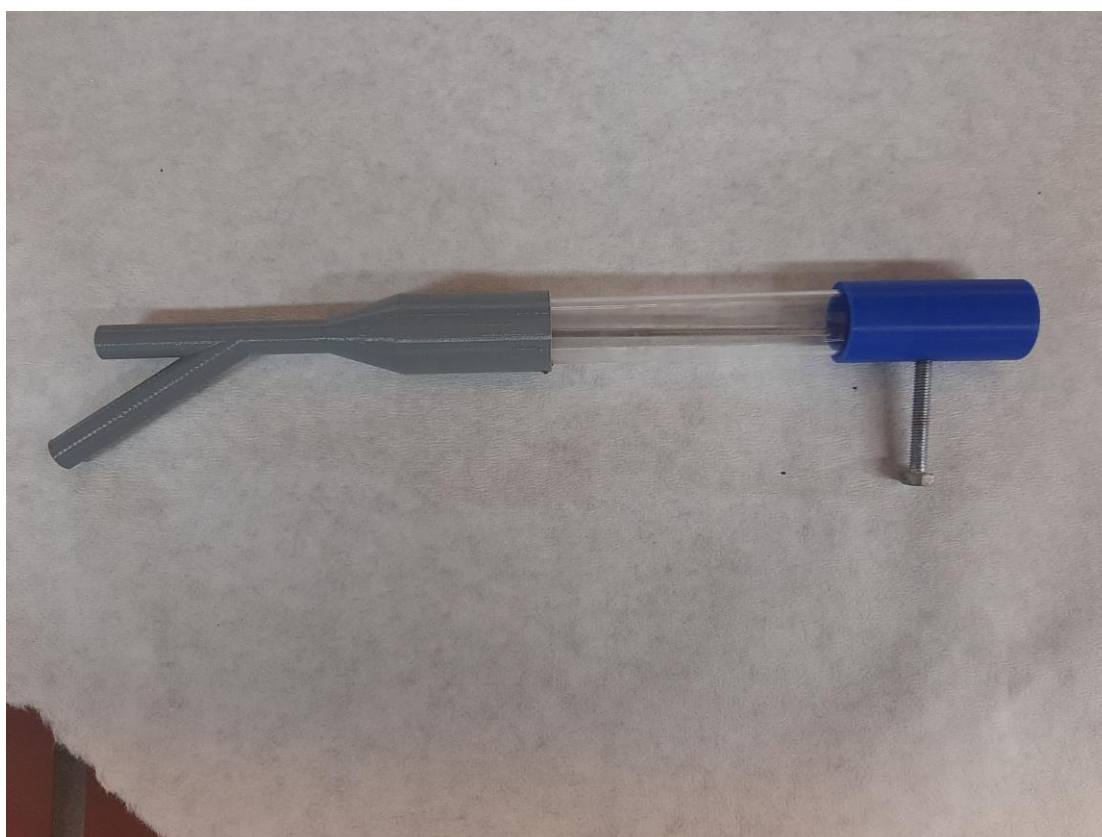
Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από το τροφοδοτικό στον αντιδραστήρα μέσω των καλωδίων. Τα καλώδια συνδέονται με τον αντιδραστήρα μέσω των ηλεκτροδίων. Το κόκκινο ηλεκτρόδιο είναι ο θετικός πόλος ενώ το μαύρο ηλεκτρόδιο είναι ο αρνητικός πόλος.



Εικόνα 10. Ηλεκτρόδια

- **Αντιδραστήρας πλάσματος**

Αποτελείται από το γυάλινο κυλινδρικό μέρος, όπου περνάει το υπό αντίδραση διάλυμα, μέσα στο οποίο δημιουργείται το πλάσμα. Στην είσοδο υπάρχει το πλαστικό μέρος όπου από τη κάτω είσοδο εισέρχεται το αρχικό δείγμα και από τη πάνω, ρέει ο αέρας. Στην έξοδο του αντιδραστήρα έχουμε το πλαστικό μέρος στο οποίο υπάρχει κοχλίας πάνω στον οποίο συνδέεται το θετικό ηλεκτρόδιο. Στον κοχλία στηρίζεται η μεταλλική ράβδος, η οποία βρίσκεται μέσα στον αντιδραστήρα, όπως φαίνεται και στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 11. Κυλινδρικός αντιδραστήρας

3. Παρασκευή Διαλυμάτων

Κατά την πειραματική διαδικασία παρασκευάζονται τα τρία διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της δράσης του αντιδραστήρα πλάσματος.

1) Μπλε του μεθυλενίου (METHYLENE BLUE)

Αρχικά, με τη βοήθεια του ζυγού ζυγίστηκαν 17.1mg σκόνης από τη χρωστική. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε σε καθαρή και αποστειρωμένη φιάλη μαζί με 250mL απιονισμένου νερού και αναδεύεται. Ακολουθεί αραίωση με απιονισμένο νερό, έτσι ώστε ο τελικός όγκος του διαλύματος να είναι 2,5L. Με αυτόν τον τρόπο, η τελική συγκέντρωση του διαλύματος του μπλε του μεθυλενίου, που χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό των πειραμάτων, είναι $C = 2.1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$. Η συγκεκριμένη συγκέντρωση επιλέχθηκε, καθώς βρίσκεται σε περιοχή που είναι μετρήσιμη από το φασματοφωτόμετρο. Τελικά, το διάλυμα καλύπτεται από αλουμινόχαρτο και τοποθετείται σε σκιερό μέρος μέχρι να χρησιμοποιηθεί.

2) Κόκκινο της βυρσοδεψίας (Dermacid Red)

Ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία. Προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα τελικά αποτελέσματα επιλέχθηκε να είναι αντίστοιχες οι αρχικές ποσότητες των διαλυμάτων. Για το λόγο αυτό, τοποθετήθηκαν 3.4mg της χρωστικής μαζί με 500mL απιονισμένου νερού σε ογκομετρική φιάλη.

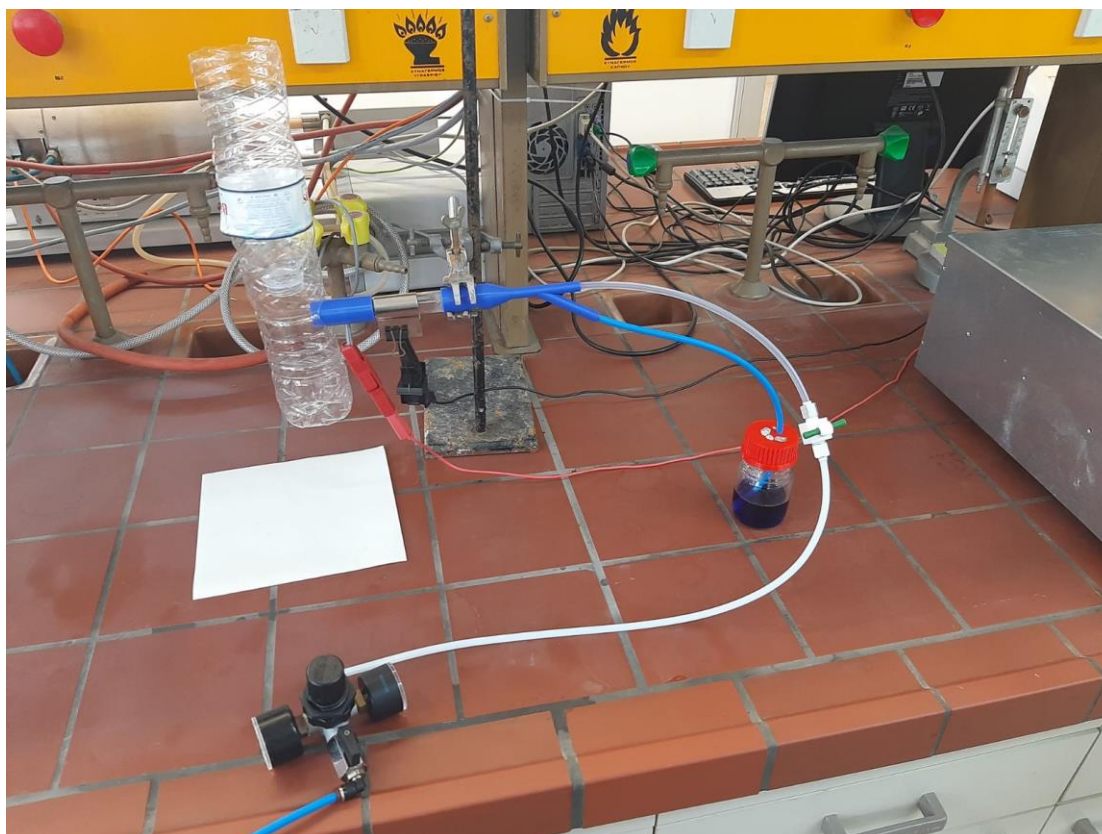
3) Κόκκινο της υφαντουργίας (BWS Red)

Ομοίως, ζυγίστηκαν 3.5mg σκόνης της χρωστικής και τοποθετήθηκαν μαζί με 500mL απιονισμένου νερού σε καθαρή ογκομετρική φιάλη.

4. Αντίδραση

Αρχικά, λαμβάνεται ποσότητα όγκου 50 mL από το εκάστοτε διάλυμα και τοποθετείται σε ποτήρι ζέσεως. Σωλήνας συνδέει την είσοδο του αντιδραστήρα με το ποτήρι ζέσεως. Ακριβώς από πάνω υπάρχει ένας ακόμα σωλήνας που συνδέει τη δεύτερη υποδοχή του αντιδραστήρα με τον αεροσυμπιεστή. Με τη βοήθεια μιας βάνας ρυθμίζεται, τόσο το πότε θα περάσει αέρας στον αντιδραστήρα, όσο και η πίεση που θα έχει. Ύστερα από δοκιμές, επιλέχθηκε η πίεση να είναι 1bar. Το γυάλινο μέρος του αντιδραστήρα καλύπτεται από ένα φύλλο αλουμινίου και η άκρη του συνδέεται με το αρνητικό ηλεκτρόδιο (μαύρο) στην κάθοδο, ενώ το θετικό(κόκκινο) συνδέεται με τη βίδα, που βρίσκεται στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα, στην άνοδο. Στην έξοδο έχει τοποθετηθεί δοχείο, όπου παραλαμβάνεται το προϊόν της αντίδρασης. Το υγρό ξεκινάει να περνάει στον αντιδραστήρα, μόλις ανοίγει η βάνα, με το χρόνο αντίδρασης να είναι στα 20 δευτερόλεπτα.

Παρακάτω φαίνεται η συνολική διάταξη του πειράματος :



Εικόνα 12. Διάταξη αντιδραστήρα πλάσματος

Για τη μέτρηση του φάσματος της απορρόφησης συλλέγεται δείγμα 2.5mL και μεταφέρεται σε ειδική κυψελίδα. Η κυψελίδα τοποθετείται στο φασματοφωτόμετρο και πραγματοποιείται η μέτρηση. Έχει οριστεί η περιοχή μέτρησης του φάσματος για μήκη κύματος στα 400-800 nm. Η ταχύτητα σάρωσης είναι 200 nm/min και το βήμα σάρωσης 1nm. Το εύρος του φάσματος απορρόφησης είναι στην περιοχή του ορατού φωτός, δηλαδή τα 400-800 nm. Η φασματοφωτομετρία υπεριώδους ορατού αποτελεί μια κατάλληλη μέθοδο για γρήγορο και αποτελεσματικό προσδιορισμό των αζωχρωμάτων, εξαιτίας της ιδιότητας των χρωμάτων να απορροφούν στην υπεριώδη περιοχή λόγω των βενζολικών δακτυλίων, αλλά και στην ορατή περιοχή λόγω της χρωμοφόρου ομάδας (-N=N-).

Ο βαθμός αποδόμησης του υγρού ρύπου υπολογίζεται βάση της χαρακτηριστικής κορυφής της μέγιστης απορρόφησης, η οποία για κάθε χρωστική είναι ξεχωριστή κι έχει μετρηθεί πριν υποστεί την επεξεργασία. Το μέγεθος της μείωσης, αυτής της κορυφής, μετά από την αντίδραση είναι που μας δείχνει το βαθμό του αποχρωματισμού. Η σχέση, που δίνει το ποσοστό αποχρωματισμού είναι:

$$\text{Αποδόμηση (\%)} = \left(1 - \frac{\text{Abs}}{\text{Abs}_0}\right) \cdot 100 \quad [31]$$

Όπου Abs είναι η μέγιστη απορρόφηση των δειγμάτων και Abs₀ είναι η μέγιστη απορρόφηση του αρχικού δείγματος (blind sample)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

A. Μπλε του μεθυλενίου (Methylene Blue)

Για τα πειράματα με το μπλε του μεθυλενίου παρασκευάστηκε διάλυμα συγκέντρωσης $C = 6.4\text{mg/L}$.

Σε όλα τα πειράματα επιλέχθηκε σταθερή πίεση ίση με 1bar.

Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων. Στην πρώτη τοποθετήθηκε στον αντιδραστήρα το αρχικό διάλυμα και πραγματοποιήθηκε η αντίδραση με βάση τις παραμέτρους που θα αναφερθούν παρακάτω. Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων στον αντιδραστήρα τοποθετήθηκε το διάλυμα που είχε ληφθεί μετά από την αντίδραση, με σκοπό να αντιδράσει για δεύτερη φορά κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

Κατά την πρώτη αντίδραση ο όγκος του αντιδρώντος ήταν 50mL και ο χρόνος της αντίδρασης στα 20sec. Στη δεύτερη αντίδραση ο όγκος ήταν 35mL και ο χρόνος αντίδρασης 15sec.

Συνολικά για το μπλε του μεθυλενίου πραγματοποιήθηκαν δεκαέξι (16) πειράματα.

Επιλέχθηκε σταθερή τιμή έντασης στα 2 A. Οι παράμετροι που επιλέχθηκε να μελετηθούν ως προς το πως επηρεάζουν τον αποχρωματισμό ανάλογα με τη μεταβολή τους είναι η συχνότητα (f) και η τάση (kV).

Για τη συχνότητα επιλέχθηκαν δύο τιμές για τις οποίες έγιναν ακριβώς οι ίδιες μετρήσεις με τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές.

Οι τιμές της συχνότητας είναι 3.63kHz και 7kHz.

Για συχνότητα $f = 3,63\text{ kHz}$, έχουμε τις παρακάτω τιμές :

Πίνακας 2

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 1			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.90	0.38	4.99	0.21
9.99	1.31	9.99	0.38
14.87	1.99	15.00	0.55
19.60	2.01	19.62	2.00

Πίνακας 3

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 2			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.23	4.99	0.18
9.99	1.26	9.99	0.38
14.90	1.91	15.00	0.57
19.99	2.00	19.97	1.01

Για συχνότητα $f = 7$ kHz, έχουμε τις παρακάτω τιμές :

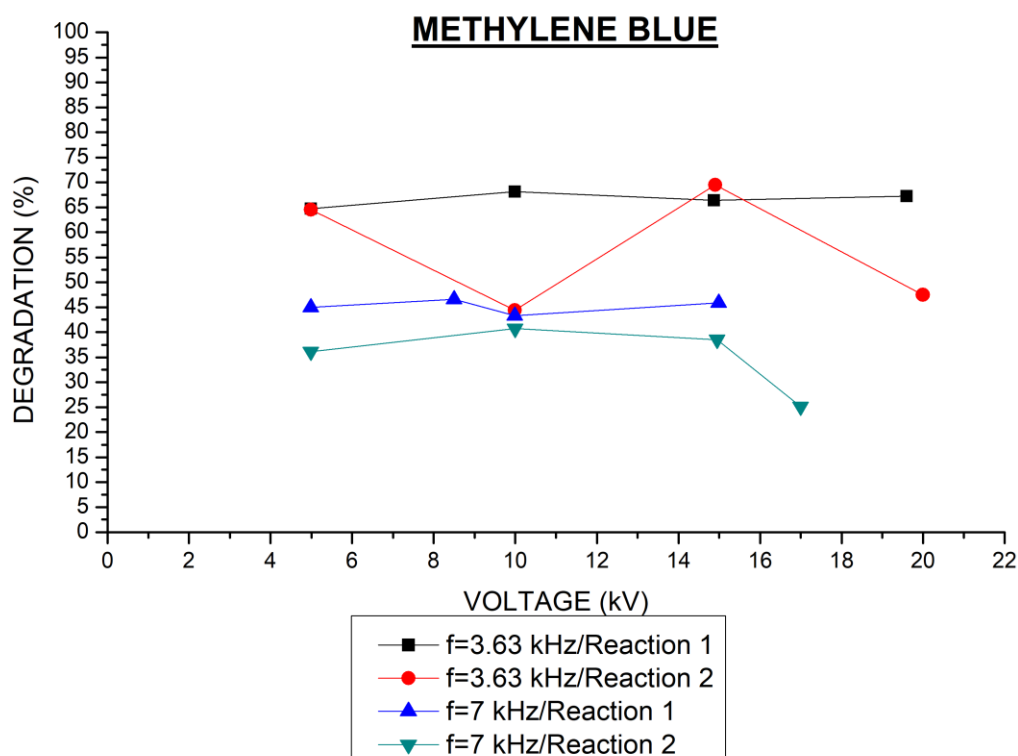
Πίνακας 4

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 1			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.77	4.99	0.45
9.99	1.32	9.99	1.27
14.99	1.10	15.00	1.20
8.50	2.01	17.20	2.05

Πίνακας 5

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 2			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.59	4.99	0.54
10.00	1.28	9.99	1.02
14.95	1.50	14.95	1.90
17.00	2.00	16.10	2.00

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα για το Methylene Blue :



Διάγραμμα 1: Αποδόμηση (%) – Τάση (kV)

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1 η συχνότητα που ευνοεί τον αποχρωματισμό του μπλε του μεθυλενίου είναι η $f=3.63\text{kHz}$.

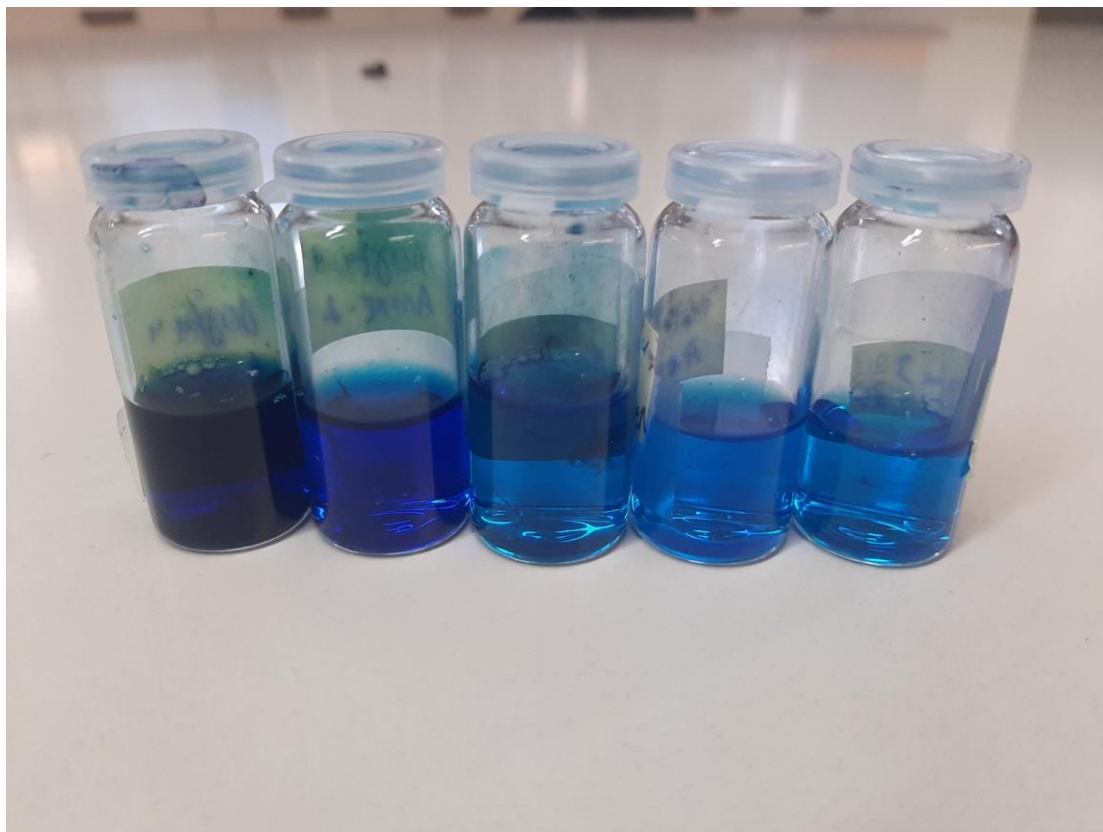
Παρατηρείται, επίσης, ότι η δεύτερη αντίδραση δεν έχει αντίστοιχη αποτελεσματικότητα με την πρώτη, δηλαδή ο αποχρωματισμός που επιτυγχάνεται μέσω της πρώτης αντίδρασης είναι φανερά σημαντικότερος, καθώς μετά τη δεύτερη αντίδραση η αύξηση του ποσοστού αποδόμησης είναι αρκετά χαμηλή, καθιστώντας την επανάληψη του πειράματος ασύμφορη και αναποτελεσματική και για τις δύο συχνότητες που επιλέχθηκαν.

Ακόμη, όσον αφορά την τάση εντοπίζεται ότι η αύξηση της από 5kV σε 10kV και 15kV φέρει και μία αύξηση του ποσοστού αποδόμησης. Ωστόσο, αν συνεχιστεί αυτή η αύξηση στα 20kV τότε το ποσοστό δεν συνεχίζει να έχει ανοδική πορεία.

Τέλος, το υψηλότερο ποσοστό αποχρωματισμού για το μπλε του μεθυλενίου επιτεύχθηκε για $V=14.90\text{kV}$ και $f=3.63\text{kHz}$, μετά από τη δεύτερη αντίδραση και είναι ίσο με 69.5%.

Παρακάτω φαίνεται ο αποχρωματισμός του μπλε του μεθυλενίου για τις διάφορες τιμές τάσης και συχνότητας με ποσοστά αποδόμησης:

- 25.1%
- 36.1%
- 45.0%
- 64.5%
- 67.2%



Εικόνα 13. Δείγματα από το μπλε του μεθυλενίου

B. Κόκκινο της βυρσοδεψίας (Dermacid Red)

Για τα πειράματα με το κόκκινο της βυρσοδεψίας παρασκευάστηκε διάλυμα συγκέντρωσης $C = 6.8 \text{ mg/L}$.

Σε όλα τα πειράματα επιλέχθηκε σταθερή πίεση ίση με 1bar.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές πειραμάτων. Στην πρώτη τοποθετήθηκε στον αντιδραστήρα το αρχικό διάλυμα και πραγματοποιήθηκε η αντίδραση με βάση τις παραμέτρους που θα αναφερθούν παρακάτω. Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων στον αντιδραστήρα τοποθετήθηκε το διάλυμα που είχε ληφθεί μετά από την αντίδραση, με σκοπό να αντιδράσει για δεύτερη φορά κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Στην τρίτη χρησιμοποιήθηκε το δείγμα που είχε αντιδράσει ήδη δύο φορές.

Κατά την πρώτη αντίδραση ο όγκος του αντιδρώντος ήταν 50mL και ο χρόνος της αντίδρασης στα 20sec. Στη δεύτερη αντίδραση ο όγκος ήταν 35mL και ο χρόνος αντίδρασης 15sec. Στην τρίτη αντίδραση ο όγκος ήταν 15mL και ο χρόνος αντίδρασης 10sec.

Συνολικά για το κόκκινο της βυρσοδεψίας πραγματοποιήθηκαν δεκαέξι (16) πειράματα.

Επιλέχθηκε σταθερή τιμή έντασης στα 2 A. Οι παράμετροι που επιλέχθηκε να μελετηθούν ως προς το πως επηρεάζουν τον αποχρωματισμό ανάλογα με τη μεταβολή τους είναι η συχνότητα (f) και η τάση (kV).

Για τη συχνότητα επιλέχθηκαν δύο τιμές για τις οποίες έγιναν ακριβώς οι ίδιες μετρήσεις με τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές.

Οι τιμές της συχνότητας είναι 3.63kHz και 7kHz.

Για συχνότητα $f = 3,63 \text{ kHz}$, έχουμε τις παρακάτω τιμές :

Πίνακας 6

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 1			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.18	4.99	0.45
9.99	0.63	9.99	1.30
12.70	2.01	13.40	2.01
13.66	2.00	14.88	2.20

Πίνακας 7

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 2			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.48	4.99	0.44
9.99	0.24	9.99	1.20
13.40	2.00	13.40	2.01
13.33	2.00	14.88	2.20

Πίνακας 8

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 3			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.41	4.99	0.17
10.00	1.10	10.00	0.80
14.50	2.01	19.95	2.01
14.93	1.99	15.00	0.30

Για συχνότητα $f = 7$ kHz, έχουμε τις παρακάτω τιμές :

Πίνακας 9

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 1			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.65	4.99	0.56
9.99	1.36	9.99	1.31
14.95	1.30	14.95	1.50
19.90	1.80	19.90	1.82

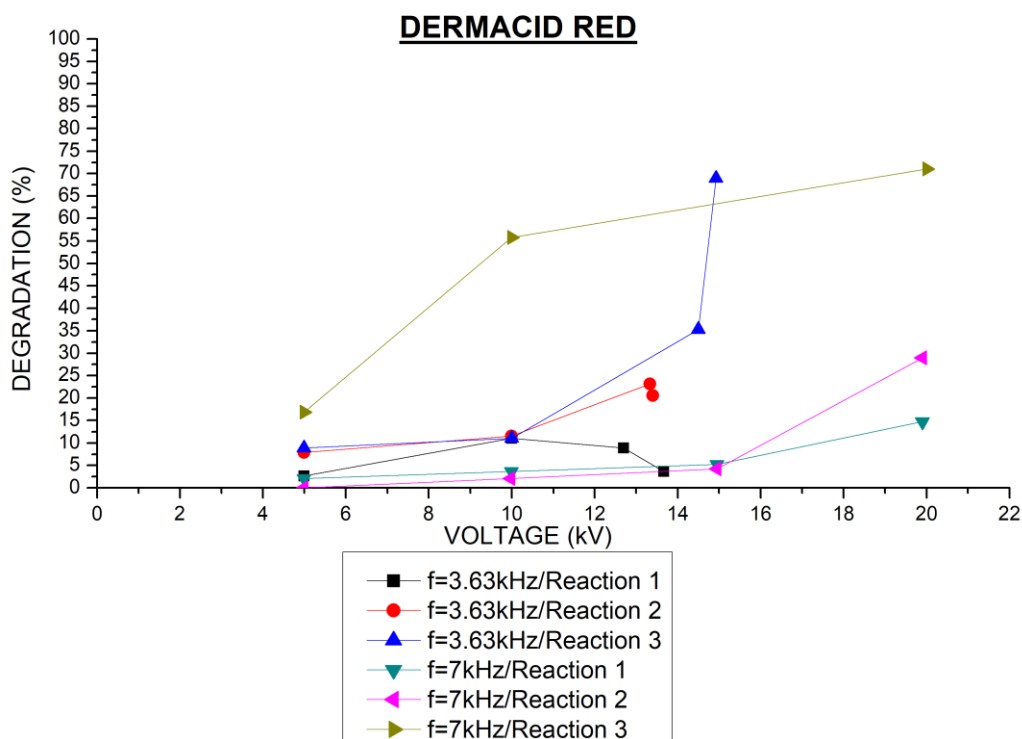
Πίνακας 10

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 2			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.69	4.99	0.60
9.98	1.36	9.99	1.15
14.95	1.50	14.98	1.60
19.90	1.83	19.90	1.60

Πίνακας 11

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 3			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.60	4.99	0.40
9.99	1.20	9.99	0.91
14.95	1.40	15.00	1.12
20.00	1.70	19.95	1.46

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα για το Dermacid Red :



Διάγραμμα 2: Αποδόμηση (%) – Τάση (kV)

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2 παρατηρείται ότι ο αποχρωματισμός του κόκκινου της βυρσοδεψίας δε μεταβάλλεται σημαντικά από την αλλαγή της συχνότητας αφού, τόσο για $f=3.63\text{kHz}$ όσο και για $f=7\text{kHz}$ τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν σημαντικά.

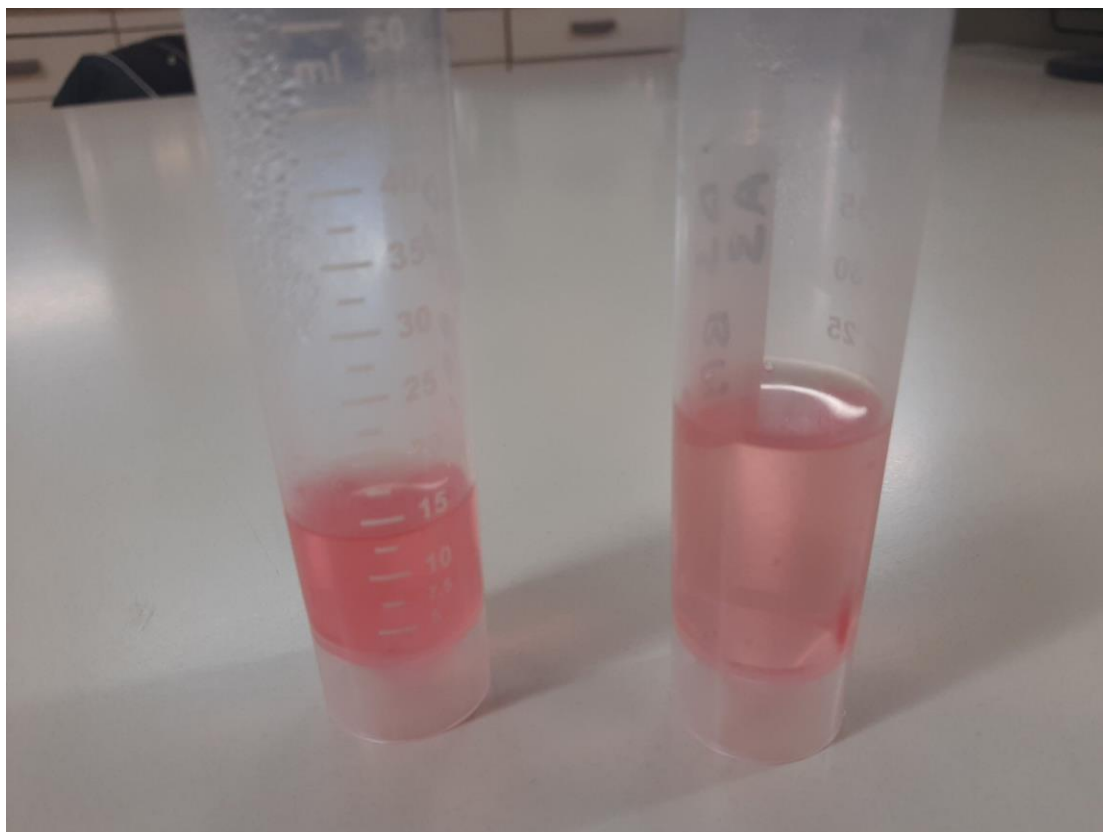
Επιπλέον, εντοπίζουμε το γεγονός ότι η επανάληψη της αντίδρασης έχει πολύ θετικά αποτελέσματα. Η σημαντική αύξηση του ποσοστού αποδόμησης εμφανίζεται μετά από την τρίτη αντίδραση και για τις δύο συχνότητες, ενώ έχουμε αρκετά καλύτερα αποτελέσματα και μετά την δεύτερη αντίδραση για τα πειράματα που έγιναν σε συχνότητα $f=3.63\text{kHz}$.

Ακόμη, όσον αφορά την τάση βλέπουμε ότι η αύξηση της φέρνει αύξηση και στο ποσοστό αποδόμησης, με τα υψηλότερα ποσοστά αποχρωματισμού να είναι αυτά που έγιναν σε τάση 20kV και είχαν αντιδράσει τρεις φορές.

Τέλος, το υψηλότερο ποσοστό αποχρωματισμού για το κόκκινο της βυρσοδεψίας επιτεύχθηκε για $V=20.00\text{kV}$ και $f=7\text{kHz}$ μετά από την τρίτη αντίδραση και είναι ίσο με 71.05% .

Παρακάτω φαίνεται ο αποχρωματισμός του κόκκινου της βυρσοδεψίας για τις διάφορες τιμές τάσης και συχνότητας με ποσοστά αποδόμησης:

- 11.57%
- 55.79%



Εικόνα 14. Δείγματα από το κόκκινο της βυρσοδεψίας

Γ. Κόκκινο της υφαντουργίας (BWS Red)

Για τα πειράματα με το κόκκινο της υφαντουργίας παρασκευάστηκε διάλυμα συγκέντρωσης $C = 6.8 \text{ mg/L}$.

Σε όλα τα πειράματα επιλέχθηκε σταθερή πίεση ίση με 1bar.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές πειραμάτων, όπως ακριβώς και για το κόκκινο της βυρσοδεψίας. Οι συνθήκες και οι παράμετροι ήταν επίσης οι ίδιες.

Για συχνότητα $f = 3,63 \text{ kHz}$, έχουμε τις παρακάτω τιμές :

Πίνακας 12

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 1			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.42	4.99	0.30
9.98	1.25	9.99	1.02
13.70	2.01	14.56	2.00
14.90	1.36	14.90	2.12

Πίνακας 13

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 2			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.45	4.99	0.34
10.00	1.16	9.99	0.40
13.60	2.00	15.29	2.00
14.90	2.30	15.00	1.10

Πίνακας 14

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 3			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.31	4.99	0.15
9.99	0.82	9.99	0.44
14.33	2.00	18.41	2.00
14.94	1.68	14.95	0.37

Για συχνότητα $f \equiv 7$ kHz, έχουμε τις παρακάτω τιμές :

Πίνακας 15

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 1			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.71	4.99	0.44
9.99	1.33	9.99	1.17
14.95	1.40	14.95	1.42
19.90	1.70	19.90	1.60

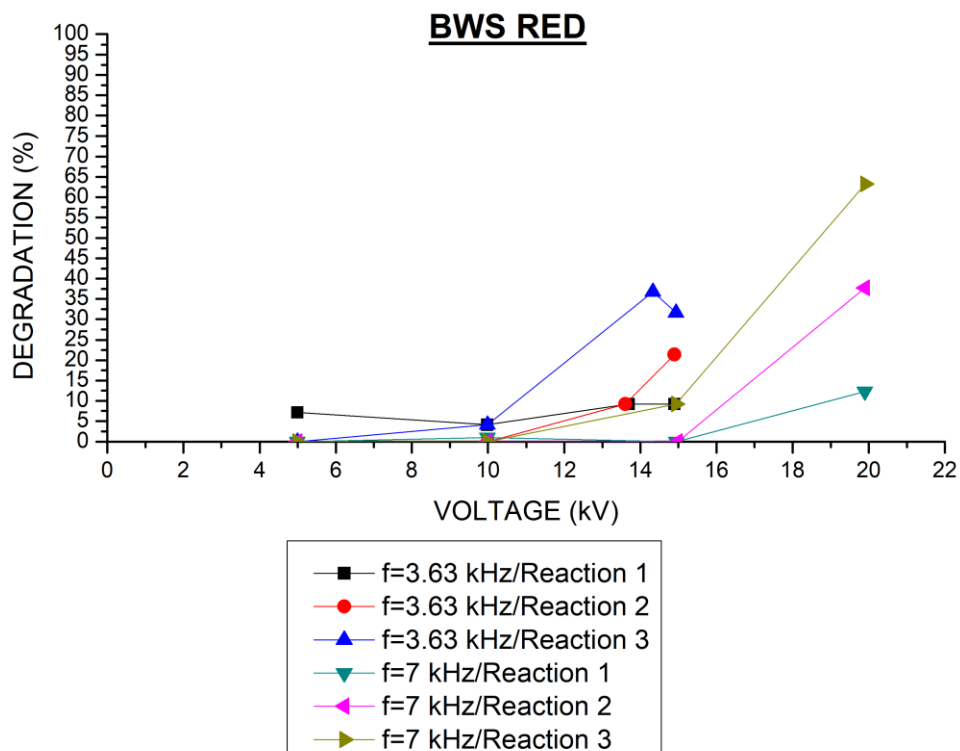
Πίνακας 16

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 2			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.70	4.99	0.50
9.98	1.30	9.99	1.00
14.98	1.18	14.96	1.40
19.90	1.65	19.93	1.50

Πίνακας 17

ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ 3			
ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ		ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	
ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΑΣΗ (kV)	ΕΝΤΑΣΗ (A)
4.99	0.65	4.99	0.65
9.98	1.21	9.99	1.22
14.94	0.88	14.96	0.88
19.91	1.76	19.91	1.50

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα για το BWS Red :



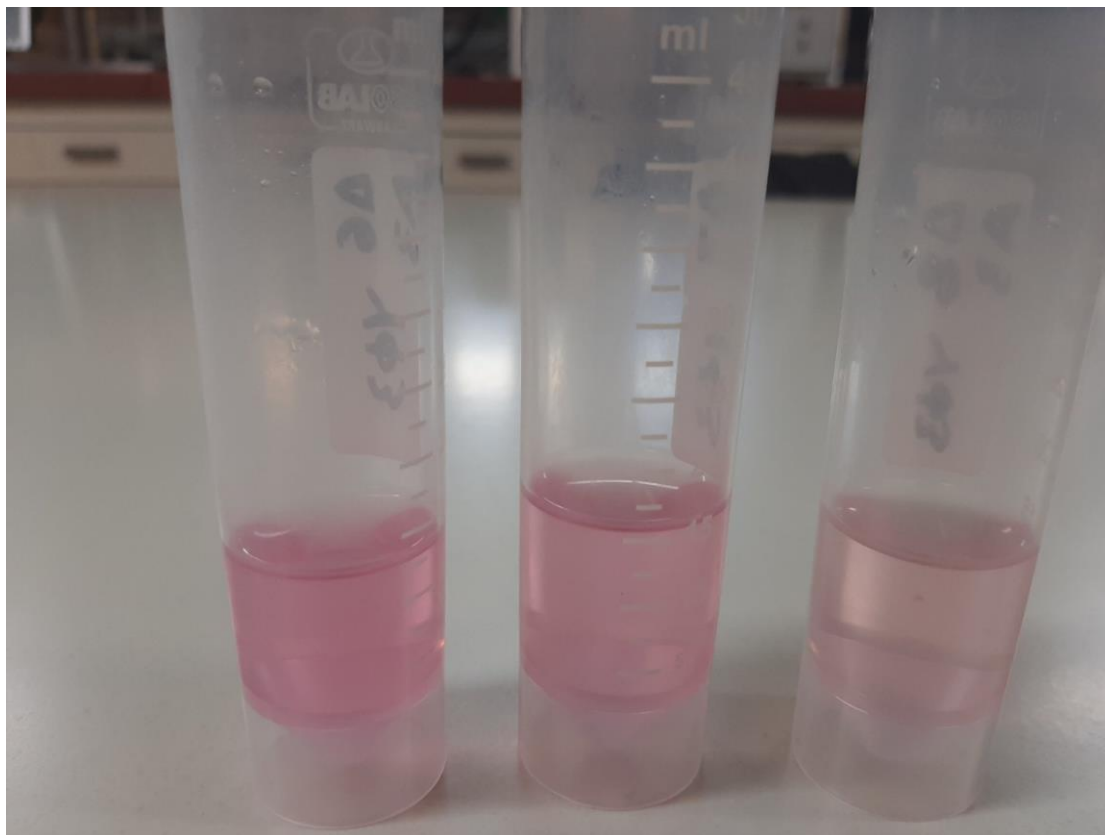
Διάγραμμα 3: Αποδόμηση (%) – Τάση (kV)

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα 3, η συχνότητα που ευνοεί τον αποχρωματισμό του συγκεκριμένου αζωχρώματος είναι η $f=7\text{kHz}$. Εντοπίζεται ότι η επανάληψη της αντίδρασης έχει ως συνέπεια την αύξηση του ποσοστού αποδόμησης. Ειδικότερα, για $f=7\text{kHz}$ έχουμε υψηλότερο ποσοστό μετά από τη δεύτερη αντίδραση, ενώ υπάρχει ακόμα μεγαλύτερη αύξηση μετά από την τρίτη αντίδραση. Για $f=3.63\text{kHz}$ μετά τη δεύτερη αντίδραση υπάρχει αύξηση μόνο για τάση $V=20\text{kV}$, ενώ στις άλλες περιπτώσεις βλέπουμε ότι υπάρχει πολύ χαμηλό ή και μηδενικό ποσοστό αποχρωματισμού. Φαίνεται, ότι δεν επιτυγχάνεται αποχρωματισμός στο κόκκινο της βυρσοδεψίας για τάση $V=5\text{kV}$ και $V=10\text{kV}$, ενώ η αύξηση της σε $V=15\text{kV}$ και $V=20\text{kV}$ φέρει αποτελέσματα, ειδικά μετά από την τρίτη αντίδραση.

Τέλος, το υψηλότερο ποσοστό αποχρωματισμού για το κόκκινο της υφαντουργίας επιτεύχθηκε για $V=19.91\text{kV}$ και $f=7\text{kHz}$ μετά από την τρίτη αντίδραση και είναι ίσο με 63.27%.

Παρακάτω φαίνεται ο αποχρωματισμός του κόκκινου της υφαντουργίας για τις διάφορες τιμές τάσης και συχνότητας με ποσοστά αποδόμησης:

- 21.4%
- 37.8%
- 63.3%



Εικόνα 14. Δείγματα από το κόκκινο της υφαντουργίας

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Οι οργανικοί ρύποι αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα για το περιβάλλον. Τα αζωχρώματα, που χρησιμοποιούνται από τις βιομηχανίες, είναι ένα μέρος αυτού του προβλήματος, όποτε η αποδόμηση τους αποτελεί ένα καίριο ζήτημα. Οι Προηγμένες Μέθοδοι Οξειδωσης έχουν δώσει λύσεις, αλλά καθίσταται δύσκολη η αντιμετώπιση στα αζωχρώματα λόγω της πολυπλοκότητάς τους. Στη συγκεκριμένη μελέτη διαπιστώθηκε ότι ο αποχρωματισμός με τη χρήση πλάσματος μπορεί να αποτελέσει μία επιπλέον επιλογή στη διαδικασία αποδόμησης.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για κάθε αζώχρωμα υπάρχει διαφορετική συμπεριφορά. Οι συνθήκες ήταν πανομοιότυπες σε όλες τις σειρές πειραμάτων, όμως στα τελικά αποτελέσματα δεν εντοπίζεται συνάφεια. Οι λόγοι που δεν εντοπίζεται μία κοινή συμπεριφορά στον αποχρωματισμό των χρωμάτων είναι αρκετοί. Αρχικά, οι συνθήκες παραγωγής του πλάσματος που μεταβάλλονται στα πειράματα είναι η τάση και η συχνότητα. Η συχνότητα επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά του πλάσματος στον αντιδραστήρα καθώς έχει σχέση με τον ιονισμό, τη θέρμανση των ηλεκτρονίων, τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο πλάσμα.

Επίσης, η τάση που εφαρμόζεται στο πλάσμα έχει επιρροή στον ιονισμό, τις χημικές αντιδράσεις, αλλά και στην ομοιομορφία του πλάσματος, την πυκνότητα του και τη διανομή της ενέργειας των ηλεκτρονίων εντός του πλάσματος. Ένας επιπλέον λόγος, για τον οποίο ο αποχρωματισμός των αζωχρωμάτων έχει διαφορετικά αποτελέσματα, είναι ο χημικός τύπος κάθε ένωσης ο οποίος είναι ξεχωριστός.

Στο μπλε του μεθυλενίου ο αποχρωματισμός οφείλεται στο σχηματισμό του όζοντος (O_3) και του υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2). Στο διάγραμμα 1 φαίνεται ότι για συχνότητα ίση με $f = 3,63$ kHz επιτυγχάνουμε μεγαλύτερες τιμές αποδόμησης σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές αποδόμησης για συχνότητα ίση με $f = 7$ kHz. Αυτό εξηγείται επειδή αυτή η συχνότητα ευνοεί τις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στο πλάσμα και έχουν ως συνέπεια τον καλύτερο αποχρωματισμό. Ακόμα, παρατηρείται και στις δύο συχνότητες, ότι το πρώτο πείραμα αποχρωματισμού έχει μια γραμμικότητα όσον αφορά τις τιμές της αποδόμησης. Αντίθετα, ο δεύτερος αποχρωματισμός παρουσιάζει μία μη γραμμική σχέση για την αποδόμηση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο χρόνος αντίδρασης του πρώτου πειράματος είναι μεγαλύτερος από αυτόν του δεύτερου. Επιπλέον, παρατηρείται ότι το ποσοστό της αποδόμησης μειώνεται με την αύξηση της τάσης. Η αύξηση της τάσης οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ενέργειας στο σύστημα. Από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι μπορεί να επιτευχθεί μέγιστη παραγόμενη ενέργεια αλλά όχι ταυτόχρονα και με μέγιστο ποσοστό αποδόμησης.

Συμπερασματικά, ο αποχρωματισμός του μπλε του μεθυλενίου με τη χρήση

αντιδραστήρα πλάσματος, αξίζει να μελετηθεί αφού έχει ικανοποιητικά ποσοστά αποδόμησης σε σύγκριση με την αποδόμηση που επιτυγχάνεται με προηγμένες μεθόδους οξείδωσης.

Στο κόκκινο της βυρσοδεψίας, η παραγωγή δραστικών ριζών $\text{OH}\cdot$ και η διάσπαση του διπλού δεσμού $-\text{N}=\text{N}-$ και του απλού δεσμού $-\text{N}-\text{N}-$, είναι η αιτία του αποχρωματισμού. Στο διάγραμμα 2 φαίνεται ότι για χαμηλές τιμές τάσεων δεν υπάρχει αποχρωματισμός ή είναι σε μικρό ποσοστό. Αυτό οφείλεται στα χαμηλά επίπεδα της παραγόμενης ενέργειας. Παρατηρείται, ακόμα, ότι τα ποσοστά αποχρωματισμού μετά από τη τρίτη σειρά αντιδράσεων είναι σημαντικά υψηλότερα συγκριτικά με αυτά των δύο πρώτων αντιδράσεων. Λόγω της πολυπλοκότητας της δομής του συγκεκριμένου αζωχρώματος, χρειάζεται μεγάλη ενέργεια για τη διάσπαση των χρωμοφόρων ομάδων.

Από βιβλιογραφία, για το κόκκινο της βυρσοδεψίας τα ποσοστά αποδόμησης του, με προηγμένες μεθόδους οξείδωσης, είναι σημαντικά υψηλότερα συγκριτικά με αυτά που προκύπτουν με τη χρήση αντιδραστήρα πλάσματος. Όσον αφορά το κόκκινο της υφαντουργίας φαίνεται ότι για χαμηλές τάσεις δεν επιτυγχάνεται ικανοποιητική αποδόμηση όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3. Χρειάζεται μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας, για αυτό το λόγο για τιμές τάσης από 15kV-20kV, παρατηρείται αποχρωματισμός. Αυτή είναι η αιτία, για την οποία επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα για συχνότητα $f=7\text{kHz}$ συγκριτικά με συχνότητα $f=3.63\text{kHz}$. Τα ποσοστά αποδόμησης του συγκεκριμένου αζωχρώματος με τη χρήση πλάσματος είναι χαμηλότερα συγκριτικά με αυτά μέσω των προηγμένων μεθόδων οξείδωσης.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε και στα τα τρία αζωχρώματα ότι η επανάληψη των πειραμάτων μπορεί να έχει θετικές συνέπειες, καθώς επιτεύχθηκε μεγαλύτερος αποχρωματισμός μετά από τις δεύτερες και τρίτες αντιδράσεις.

Προκειμένου να υπάρχουν πιο σαφή και καθαρά συμπεράσματα για την αποδοτικότητα της χρήσης αντιδραστήρα πλάσματος για την αποδόμηση υγρών ρύπων είναι απαραίτητο να μελετηθεί ο μηχανισμός οξείδωσης τους. Επίσης, είναι αναγκαία η ανάλυση των τελικών δειγμάτων προκειμένου να εξακριβωθεί η ύπαρξη ή όχι παραπροϊόντων τα οποία μπορεί να εμποδίζουν στη σωστή μέτρηση μέσω των χαρακτηριστικών κορυφών που μετρήθηκαν από το φασματοφωτόμετρο.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η χρήση αντιδραστήρα πλάσματος είναι μία σημαντική, εναλλακτική μέθοδος για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Προκειμένου, να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα είναι απαραίτητο, να μελετηθούν αναλυτικότερα οι εξής παράγοντες:

- Οι διάφορες συνθήκες του πλάσματος όπως η τάση και η ισχύς του.
- Η ταχύτητα της αντίδρασης.
- Τα είδη των αντιδραστήρων πλάσματος.
- Η περαιτέρω ποσοτική και ποιοτική ανάλυση των προϊόντων

Συμπερασματικά, ο περιορισμός των υδάτινων αποβλήτων με τη χρήση πλάσματος αποτελεί μία ελπιδοφόρα και καινοτόμα μέθοδος καθώς έχει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως είναι το χαμηλό κόστος και η εξοικονόμηση χρόνου σε σχέση με άλλες μεθόδους .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] [Giwa A.R.A, Bello I.A, Olabintan A.B, Bello O.S, Saleh T.A. Kinetic and thermodynamic studies of fenton oxidative decolorization of methylene blue. *Heliyon*, 2020, 6, 105367. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04454>](#)
- [2] [Tahreen A, Jami M.S, Ali F. "Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review." *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 37, 101440. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101440>](#)
- [3] [Benkhaya S, M'rabet S, El Harfi A. "Classifications, properties, recent synthesis and applications of azo dyes." *Heliyon*, 2020, 115, 107891. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03271>](#)
- [4] [Mcyotto F, Wei Q, Macharia D.K, Huang M, Shen C, Chow C.W.K. "Effect of dye structure on color removal efficiency by coagulation." *Chemical Engineering Journal*, 2021, 405, 126674. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126674>](#)
- [5] [Natarajan S, Bajaj H.S, Tayade R.J. "Recent advances based on the synergetic effect of adsorption." *ScienceDirect*, 2017, 65, 201-222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2017.03.011>](#)
- [6] [Maroudas A, Pandis P.K, Chatzopoulou A, και Sourkouni G, Argiris C Davellas L-R. «Synergetic decolorization of azo dyes using ultrasounds, photocatalysis and photo-fenton reaction.» *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 71, 105367. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105367>](#)
- [7] [Rawat D, Sharma R.S, Karmakar S, Arora L.S, Mishra V. "Ecotoxic potential of a presumably non-toxic azo dye." *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 148, 528-537. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.049>](#)
- [8] [Matyszczak G, Sędkowska A, Kus S. "Comparative degradation of Metanil Yellow in the electro-Fenton process with different catalysts: A simplified kinetic model study." *Dyes and Pigments*, 2020, 174, 108076. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2019.108076>](#)
- [9] [Liu H, Li G, Qu J, Liu H. "Degradation of azo dye Acid Orange 7 in water by Fe0/granular." *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 144, 180-186. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.10.009>](#)
- [10] [Selvaraj V, Swarna Karthika T, Mansiya C, Alagar M. "An over review on recently developed techniques, mechanisms and intermediate involved in the advanced azo dye degradation for industrial applications." *Journal of Molecular Structure*, 2020, 1224, 129195. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129195>](#)
- [11] [Natarajan S, Bajaj H.C, Tayade R.J. "Recent advances based on the synergetic effect of adsorption for removal of dyes from waste water using photocatalytic process." *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 65, 201-222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2017.03.011>](#)
- [12] [Foster E.J. "Plasma-based water purification: Challenges and prospects for the future." *Physics of Plasmas*, 2017, 24, 055501. <https://doi.org/10.1063/1.4977921>](#)
- [13] [Chu P.K, Lu X. "Introduction." *Low Temperature Plasma Technology Methods and Applications*, 2014, 4-5. ISBN:978-1-4665-0990-0](#)
- [14] [Gibbon P. «Introduction to Plasma Physics.» *Proceeding of the CAS - CERN*, 2014, 001, 0007–8328.](#)

- <http://dx.doi.org/10.5170/CERN-2016-001.51>
- [15] [Bada Jeffrey. "Encyclopedia of Astrobiology." 2011,481. ISBN: 978-3-642-11274-4](#)
- [16] [Kumar A, Skoro N, Gernjak W, Puac N. "Cold atmospheric plasma technology for removal of organic micropollutants from wastewater — a review." *The European Physical Journal D*, 2021, 75, 283. <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-021-00283-5>](#)
- [17] [Chu P.K, Lu X. «Environmental Applications of Plasmas.» *Low Temperature Plasma Technology Methods and Applications*, 2014, 350-359. ISBN:978-1-4665-0990-0](#)
- [18] [Raji M, Mirbagheri S.A, Ye F, Dutta J. "Nano zero-valent iron on activated carbon cloth support as Fenton-like catalyst for efficient color and COD removal from melanoidin wastewater." *Chemosphere*, 2021, 263, 127945. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127945>](#)
- [19] [Vanraes P, Nikiforov A.Y, Leys C. "Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition." In *Plasma Science and Technology - Progress in Physical States and Chemical Reactions*, 2016, 15. <http://dx.doi.org/10.5772/61830>](#)
- [20] [Turkten N, Cinar Z. "Photocatalytic decolorization of azo dyes on TiO₂: Prediction of mechanism via conceptual DFT." *Catalysis Today*, 2017, 287, 169-175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2017.01.019>](#)
- [21] [Cyganowski P, Caban M, Khan M.A, Marzec M.M, Zak A, Pohl P, Jamroz P, Bernasik A, Dzimitrowicz A. "The Use of Cold Atmospheric Pressure Plasma for the Synthesis of Saccharide-Stabilized Re Nanostructures Enabling Effective Deactivation of Nitro-Based Antimicrobial Agents." *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2022, 43, 199-224. <https://doi.org/10.1007/s11090-022-10285-9>](#)
- [22] [Poza-Nogueiras V, Rosales E, Pazos M, Sanroman M.A. "Current advances and trends in electro-Fenton process using heterogeneous catalysts - A review." *Chemosphere*, 2018, 201, 399-416. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.002>](#)
- [23] [Hijosa-Valsero M, Molina R, Schikora H, Michael Müller M, Bayona J.M. "Removal of priority pollutants from water by means of dielectric barrier discharge atmospheric plasma." *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 262, 664-673. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.09.022>](#)
- [24] [Tampieri F, Giardina A, Bosi F.J, Pavanello A, Marotta E, Zaniol B, Neretti G, Paradisi C. "Removal of persistent organic pollutants from water using a newly developed atmospheric plasma reactor." 2017, 101002, 201700207. <https://doi.org/10.1002/ppap.201700207>](#)
- [25] [Malik M.A. "Water Purification by Plasmas: Which Reactors." *Springer Science+Business Media*, 2009, 30, 21-31. <https://doi.org/10.1007/s11090-009-9202-2>](#)
- [26] [Bruggeman P, Leys C. "Non-thermal plasmas in and in contact." *JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS*, 2009, 42, 053001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/5/053001>](#)
- [27] [Jiang B, Zheng J, Qiu S, Wu M, Zhang Q, Yan Z, Xue Q. "Review on electrical discharge plasma technology for wastewater." *Chemical Engineering Journal*, 2014, 236, 348-368.](#)

- [28] <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>
[Stratton G.R, Bellona C.L, Dai F, Holsen T.M, Mededovic S, Thagard M.](#) "Plasma-based water treatment: Conception and application of a new general principle for reactor design." *Chemical Engineering Journal*, **2015**, 273, 543-550.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.059>
- [29] <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.059>
[Jiang B, Zheng J, Liu Q, Wu M.](#) "Degradation of azo dye using non-thermal plasma advanced oxidation process in a circulatory airtight reactor system." *Chemical Engineering Journal*, **2012**, 204-206, 32-39.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2012.07.088>
- [30] <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04215>
[Stratton G.R, Dai F, Bellona C.L, Holsen T.M, Dickenson E.R.V, Thagard S.M.](#) Plasma-Based Water Treatment: Efficient Transformation of Perfluoroalkyl Substances in Prepared Solutions and Contaminated Groundwater. *Environmental Science & Technology*, **2017**, 51, 1643-1648.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04215>
- [31] <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2012.11.116>
[Manoj Kumar Reddy P, Raju B.R, Karuppiah J, Reddy E.L, Subrahmanyam C.](#) "Degradation and mineralization of methylene blue by dielectric barrier." *Chemical Engineering Journal*, **2013**, 217, 41-47.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2012.11.116>