

Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Ανάπτυξη ηλεκτρονικού συστήματος παρακολούθησης της
λειτουργίας Βιοαντιδραστήρων Ξερής Αναερόβιας Χώνευσης**

**Development of an electronic monitoring system for the
operation of Solid State Anaerobic Bioreactors**

ΕΚΠΟΝΗΣΗ:

ΒΙΣΚΑΔΟΥΡΑΚΗ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών (ΑΠΘ)

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΞΕΤΑΣΗΣ:

Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος

Αναπληρωτής Καθηγητής Κανέλλος Φώτιος

ΧΑΝΙΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευλικρινείς μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της εργασίας μου, Καθηγητή Σταυρακάκη Γεώργιο για την υποστήριξή του κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και την κατανόησή του στις όποιες δυσκολίες παρουσιάστηκαν. Η εποικοδομητική μας συνεργασία και η εμπύχωσή του κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών αποτέλεσε σημαντική ώθηση για την ολοκλήρωση αυτού του εγχειρήματος. Επίσης ευχαριστώ τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής και πιο συγκεκριμένα τον Καθηγητή Κουτρούλη Ευτύχιο και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Κανέλλο Φώτιο.

Οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τους συναδέλφους μου στην Ερευνητική ομάδα του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου. Συγκεκριμένα, ευχαριστώ την Δρ. Μαραγκάκη Αγγελική για τη βοήθειά της κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων στο βιοαντιδραστήρα καθώς και την ουσιαστική στήριξή της σε όλης της περίοδο διεξαγωγής της εργασίας. Επίσης ευχαριστώ τον Δρ. Δαλιακόπουλο Γιάννη για τις προτάσεις, παρατηρήσεις και υποδείξεις που έκανε στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Δ/τη του εργαστηρίου «Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής», Καθηγητή Θρασύβουλο Μανιό για την πρόταση του για συνεργασία, γεγονός που μου έδωσε το κίνητρο και το έναυσμα να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο ερευνητικό θέμα και τη δυνατότητα εκπόνησης του πειραματικού μέρους της εργασίας, χρησιμοποιώντας τις υποδομές του Εργαστηρίου.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την υπομονή και τη στήριξη τους για να συνεχίσω αυτό το ταξίδι μέχρι τον τελικό προορισμό του, παρότι πολλές ήταν οι δυσκολίες λόγω των οικογενειακών και εργασιακών υποχρεώσεων. Κλείνοντας, τις μεγαλύτερες ευχαριστίες οφείλω στον σύζυγο μου, Αδίκημενάκη Αδάμ που ήταν ακούραστος συνοδοιπόρος σε αυτή την προσπάθεια και με την ουσιαστική του συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας συνέβαλε στην καθοριστικά στην ολοκλήρωσή της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ-ΤΥΠΟΙ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ	11
2.1 Εισαγωγή	12
2.2 Μικροβιολογία της αναερόβιας επεξεργασίας	13
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση	20
2.4 Κατηγορίες αναερόβιων αντιδραστήρων	23
2.5 Συνοπτική παρουσίαση βιοαντιδραστήρα διπλωματικής εργασίας	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ.....	34
3.1 Εισαγωγή	35
3.2 Μικροελεγκτής Arduino	36
3.3 Αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και οξύτητας.....	42
3.4 Παρουσίαση δεδομένων σε οθόνη.....	55
3.5 Καταγραφή δεδομένων σε κάρτα μνήμης	58
3.6 Ασύρματη επικοινωνία και παρουσίαση δεδομένων.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	67
4.1 Υλοποίηση του συστήματος παρακολούθησης λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.....	68
4.2 Πειραματικά αποτελέσματα	73
4.3 Σύστημα ρύθμισης της οξύτητας (pH)	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΠΛΗΡΗΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΣΕ ΓΛΩΣΣΑ ARDUINO	87
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	97

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παραγωγή ενέργειας από υπολείμματα που παράγονται στις ξηρικές ή ημιξηρικές περιοχές της λεκάνης της Μεσογείου, καθώς και από υπολείμματα τροφίμων, είναι ένα σημαντικό πεδίο έρευνας με πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα. Ένας κύριος στόχος αυτού του ερευνητικού πεδίου είναι η ανάπτυξη ενός ξηρού αναερόβιου βιοαντιδραστήρα (Solid State Anaerobic Bioreactor), ο οποίος θα είναι σε θέση να διαχειρίζεται όλα τα υπολείμματα της μεσογειακής υπαίθρου (γεωργικής, κτηνοτροφικής, αγροτοβιομηχανικής και αστικής προέλευσης) με έναν αυτοματοποιημένο και βέλτιστο τρόπο, προκειμένου να παραχθεί ο μέγιστος δυνατός όγκος και η βέλτιστη σύνθεση βιοαερίου. Οι κύριες λειτουργικές παράμετροι ενός τέτοιου βιοαντιδραστήρα πρέπει να παρακολουθούνται στενά και να ελέγχονται ενεργά προκειμένου να είναι ασφαλής η λειτουργία του και να αποδίδει τη μέγιστη παραγωγή βιοαερίου.

Η ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος, βασισμένου στην πλατφόρμα Arduino, για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του αναερόβιου βιοαντιδραστήρα στερεάς κατάστασης ήταν το κύριο αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Το σύστημα που αναπτύχθηκε βασίστηκε στον μικροελεγκτή Arduino nano (ATmega328), σε συνδυασμό με διάφορους αισθητήρες κατάλληλους για την παρακολούθηση των διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο LM35DZ για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του βιοαντιδραστήρα, της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, καθώς και της θερμοκρασίας του νερού θέρμανσης του βιοαντιδραστήρα, με ακρίβεια της τάξης του 0.1 °C. Για τη μέτρηση της υγρασίας μέσα στο βιοαντιδραστήρα χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας DHT22 που παρέχει ακρίβεια μέτρησης υγρασίας $\pm 2\%$ και επικοινωνεί ψηφιακά με το Arduino. Για τη μέτρηση της οξύτητας (pH) του υλικού, μέσα στο βιοαντιδραστήρα, χρησιμοποιήθηκε ένα γυάλινο ηλεκτρόδιο μέτρησης pH, η έξοδος του οποίου ενισχύθηκε με κατάλληλο κύκλωμα ώστε να είναι μετρήσιμη από το Arduino. Χρησιμοποιώντας έτοιμα διαλύματα γνωστού pH, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση όλου του συστήματος μέτρησης της οξύτητας και προγραμματίστηκε το Arduino προκειμένου οι μετρήσεις του να αντιστοιχούν σε πραγματικές τιμές pH.

Για την άμεση απεικόνιση των δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες, αρχικά, συνδέθηκε μια μικρή οθόνη τύπου OLED, δίπλα στο βιοαντιδραστήρα, στην

οποία παρουσιάζονταν όλες οι πληροφορίες που αφορούν στη λειτουργία του. Στην οθόνη αυτή απεικονίζονταν, επίσης, μηνύματα σφάλματος, ή προειδοποίησης, σε περίπτωση που οι μετρούμενες τιμές ξεπερνούσαν προκαθορισμένα από το χρήστη όρια. Τα δεδομένα καταγράφονταν σε μια κάρτα μνήμης SD, ανά χρονικό διάστημα 30 δευτερολέπτων, ώστε να είναι εφικτή η μελλοντική ανάλυσή τους. Η συνδεσμολογία της κάρτας SD με το Arduino πραγματοποιήθηκε μέσω του πρωτοκόλλου SPI, χρησιμοποιώντας κατάλληλη πλακέτα επέκτασης.

Προκειμένου να είναι εφικτός ο έλεγχος του συστήματος από απόσταση, αναπτύχθηκε η δυνατότητα απομακρυσμένης σύνδεσης μέσω Bluetooth και η μετάδοση των δεδομένων σε φορητή συσκευή (κινητό ή tablet), χρησιμοποιώντας κατάλληλη πλακέτα αμφίδρομης επικοινωνίας Bluetooth και την πλατφόρμα Virtuino. Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η παρακολούθηση του συστήματος από απόσταση, ακόμα και έξω από το κτήριο του βιοαντιδραστήρα, ενώ η μεγάλη διάσταση της οθόνης του κινητού ή του tablet προσδίδει τη δυνατότητα καλύτερης παρουσίασης των μετρούμενων ποσοτήτων μέσω γραφικής απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκε στο περιβάλλον Virtuino μια οθόνη γραφικής απεικόνισης ώστε να φαίνονται με ευκρίνεια όλες οι μετρούμενες τιμές των αισθητήρων που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς και ο χρόνος που έχει παρέλθει από την έναρξη λήψης των μετρήσεων.

Αφού δοκιμάστηκαν όλοι οι αισθητήρες και τα επιμέρους εξαρτήματα του συστήματος σε διάτρητη πλακέτα, πραγματοποιήθηκε η κατασκευή της τελικής διάταξης και η σύνδεσή της στο βιοαντιδραστήρα. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν δυο ξεχωριστές σειρές πειραμάτων, διάρκειας 6 ημερών και περίπου ενός μηνός, αντίστοιχα. Όπως αποτυπώνεται από τις μετρήσεις, η τιμή της σχετικής υγρασίας μέσα στο βιοαντιδραστήρα ήταν σταθερή και ίση με 100%, γεγονός αναμενόμενο, μιας και το περιεχόμενο βρίσκεται σε υδαρή μορφή. Η θερμοκρασία μέσα στο βιοαντιδραστήρα ήταν σχετικά σταθερή με μικρές διακυμάνσεις της τάξης των 1-2 °C, που οφείλονταν στη διακύμανση της θερμοκρασίας του νερού θέρμανσης. Η θερμοκρασία του νερού θέρμανσης έδειξε να επηρεάζεται ανεπαίσθητα από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου, αλλά διατηρήθηκε σταθερή με μικρές διακυμάνσεις της τάξης των 2 °C. Η τιμή της οξύτητας παρουσίασε μικρή μείωση με το χρόνο και σταθεροποίηση λίγο κάτω από την ιδανική τιμή του 7, μετά από διάστημα περίπου 4 ημερών.

Επιπλέον, αναπτύχθηκε σύστημα για τον ενεργό έλεγχο της τιμής της οξύτητας μέσα στο βιοαντιδραστήρα, χρησιμοποιώντας μια περισταλτική αντλία για έγχυση μικρών

ποσοτήτων βασικού διαλύματος, ώστε να διατηρείται το επιθυμητό επίπεδο pH πολύ κοντά στην ιδανική τιμή, για επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης και μέγιστης παραγωγής βιοαερίου. Η περισταλτική αντλία τροφοδοτήθηκε από ένα ξεχωριστό τροφοδοτικό τάσης 12 V, ενώ η λειτουργία της πραγματοποιήθηκε μέσω ενός ρελέ, που ελέγχονταν από το Arduino. Για την αποτελεσματική ρύθμιση της οξύτητας στα επιθυμητά επίπεδα χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος κώδικας, ο οποίος ελέγχει την τιμή του pH κάθε 5 λεπτά και αποφασίζει εάν απαιτείται διόρθωση ώστε να προβεί σε έγχυση μιας μικρής ποσότητας ρυθμιστικού διαλύματος βάσης μέσα στο βιοαντιδραστήρα. Δοκιμάσθηκαν δυο σενάρια με διαφορετικούς ρυθμούς έγχυσης σε καθένα από αυτά, ώστε να μειωθεί η υπέρβαση στόχου (overshoot) και να επιτευχθεί αποτελεσματική ρύθμιση του pH πολύ κοντά στο 7, ακόμα και αν η αρχική του απόκλιση ήταν μεγάλη.

ABSTRACT

Energy production from residues produced in the arid or semi-arid regions of the Mediterranean basin, as well as from food residues, is a major field of research with promising results. A major objective of this research field is the development of a dry anaerobic bio-reactor (Solid State Anaerobic Bioreactor), which will be able to manage all the residues of the Mediterranean countryside (agricultural, livestock, agro-industrial and urban origin) in an automated and optimal way, in order to produce the maximum possible volume and optimal composition of biogas. The main operational parameters of such a bioreactor need to be closely monitored and actively controlled in order to be both safe and optimally tuned for maximum biogas production.

The development of an electronic circuit, based on the Arduino platform, for the monitoring and control of the anaerobic solid state bioreactor was the main subject of this master's thesis. The system developed was based on the Arduino nano (ATmega328) microcontroller, combined with various sensors suitable for monitoring the various operating parameters. More specifically, the integrated circuit LM35DZ was used to measure the temperature of the bioreactor, the ambient temperature, as well as the temperature of the heating water of the bioreactor, with an accuracy of 0.1 °C. For the measurement of humidity inside the bioreactor, the DHT22 sensor was used, which provides a humidity measurement accuracy of $\pm 2\%$ and communicates digitally with the Arduino. To measure the acidity (pH) of the material, inside the bioreactor, a glass pH electrode was used. The output of this glass electrode was amplified with a suitable circuit so that it could be read by the Arduino. Using prepared solutions of known pH, the entire acidity measurement system was calibrated and the Arduino was programmed to display the actual pH values.

For the real-time display of the data collected by the sensors, initially, a small OLED type screen was connected, in which all the information related to the bioreactor operation was presented. Error or warning messages were also displayed on this screen, in case the measured values exceeded user-defined limits. Data were recorded to an SD card at 30 second intervals to allow for further analysis. The connection of the SD card to the Arduino was made using the SPI protocol, with a suitable expansion board.

In order to be able to monitor and control the system from a distance, the possibility of remote connection via Bluetooth and the transmission of the data to a portable device

(mobile phone or tablet) was developed, using a suitable two-way Bluetooth communication board and the Virtuino platform. In this way, it became possible to monitor the system from a distance, even outside the bioreactor building, while the large screen size of the mobile phone or tablet allows for a better presentation of the measured quantities in a real-time graphic display. For the scope of this work, a graphical representation screen was designed in the Virtuino environment to clearly show all the measured values, as well as the total elapsed time of system operation.

After testing all the sensors and individual components of the system on a breadboard, the final assembly was built and attached to the bioreactor. In the present work, two separate series of experiments were carried out, lasting 6 days and approximately one month, respectively. As was observed, the value of the relative humidity inside the bioreactor was constantly equal to 100%, which was expected to happen since the bioreactor content is in aqueous form. The temperature inside the bioreactor was relatively constant with small fluctuations of the order of 1-2 °C, due to the variation of the heating water temperature. The temperature of the heating water was shown to be slightly affected by the ambient temperature, but was kept constant with small fluctuations of about 2 °C. The acidity slightly decreased with time and stabilized just below the ideal value of 7, after a time period of about 4 days.

Moreover, a system was developed to actively control the acidity inside the bioreactor, by using a peristaltic pump to inject small amounts of basic solution, in order to maintain the desired pH level very close to the ideal value, for optimal performance and maximum biogas production. The peristaltic pump was powered by a separate 12 V power supply, while its operation was controlled by a relay, controlled by the Arduino. Appropriate code was used to effectively adjust the acidity to the desired levels, which checks the pH value every 5 minutes and decides if a correction is needed. If required, it injects a small amount of base solution into the bioreactor. Two different injection rates were tested in order to reduce the overshoot and achieve effective pH regulation, very close to the optimal value of 7, even if the initial pH deviation was large.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ξηρή αναερόβια χώνευση (Solid State Anaerobic Digestion), αποτελεί μια μέθοδο ολοένα και πιο διαδεδομένη που αποσκοπεί στην ενεργειακή αξιοποίηση υπολειμμάτων και ταυτόχρονα είναι φιλική για το περιβάλλον και οικονομικά βιώσιμη. Σε σύγκριση με την υγρή αναερόβια χώνευση παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση από περιβαλλοντική και οικονομική σκοπιά για τους παρακάτω λόγους:

1. Το εξερχόμενο υλικό (χώνεμα) βρίσκεται σε μια κατάσταση πολύ ευκολότερα διαχειρίσιμη, καθώς η σχετικά μεγάλη συγκέντρωση στερεών του προσδίδει τη δυνατότητα να διατηρεί κάποια χαρακτηριστικά στερεού υπολείμματος.
2. Σε περίπτωση που τα οργανικά υπολείμματα έχουν μια σχετικά χαμηλή συγκέντρωση υγρασίας, δεν απαιτούνται σημαντικές ποσότητες νερού.
3. Μπορεί να αξιοποιήσει το σύνολο των διαθέσιμων υπολειμμάτων, χωρίς διαχωρισμό σε αστικά, αγροτικά ή αγροτοβιομηχανικά.

Για τις ξηρικές ή ημιξηρικές περιοχές της Μεσογειακής λεκάνης, υπάρχει πληθώρα υπολειμμάτων που παρουσιάζουν υψηλή συγκέντρωση στερεών, περιλαμβανομένων και των υπολειμμάτων τροφίμων, για τα οποία τόσο η κλασική υγρή αναερόβια χώνευση εμπεριέχει σοβαρούς περιορισμούς, όσο και η καύση (ή αεριοποίηση). Επομένως, η ξηρή αναερόβια χώνευση, αποτελεί την επικρατέστερη εναλλακτική με την προϋπόθεση να αναπτυχθούν συστήματα που να επιτρέπουν την μεγιστοποίηση της απόδοσης της διεργασίας. Η ανάπτυξη ενός ξηρού αναερόβιου βιοαντιδραστήρα (Solid State Anaerobic Bioreactor), καθιστά εφικτή τη διαχείριση των υπολειμμάτων της Μεσογειακής υπαίθρου (γεωργικής, κτηνοτροφικής, αγροτοβιομηχανικής και αστικής προέλευσης), με αυτοματοποιημένο και βέλτιστο τρόπο, ώστε να παράγει το μέγιστο δυνατό όγκο βιοαερίου το οποίο ταυτόχρονα θα παρουσιάζει και τη βέλτιστη δυνατή σύνθεση.

Προκειμένου να επιτευχθεί βελτιστοποίηση-αυτοματοποίηση της λειτουργίας του ξηρού αναερόβιου αντιδραστήρα, είναι κρίσιμης σημασίας η παρακολούθηση και ρύθμιση των παρακάτω παραμέτρων:

- Θερμοκρασία. Η θερμοκρασία είναι ένας από τους πιο σημαντικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη τόσο των αναερόβιων, όσο και των αερόβιων μικροοργανισμών. Η επιλογή γίνεται μεταξύ μεσόφιλης και θερμόφιλης λειτουργίας, λαμβάνοντας υπόψη και τις υπόλοιπες παραμέτρους και ειδικά τη σύνθεση των υπολειμμάτων.
- Αλκαλικότητα-pH. Οι περισσότερες διεργασίες αναερόβιας επεξεργασίας διαδραματίζονται σε σχεδόν ουδέτερο pH. Για τα βιομηχανικά και αστικά

λύματα, η αναερόβια χώνευση πραγματοποιείται σε μια περιοχή του pH από 6 έως 7, ενώ όταν η τιμή του pH είναι κάτω από 6, παρατηρείται μείωση της ποσότητας του παραγόμενου μεθανίου και προβλήματα στην κατακράτηση της βιομάζας, που καθιστούν ασταθή τη διεργασία.

- Χρόνος παραμονής. Επιλογή του βέλτιστου χρόνου παραμονής των αποβλήτων στον βιοαντιδραστήρα, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη ποσότητα παραγόμενου βιοαερίου.
- Υγρασία. Αποτελεί την ουσιαστική διαφοροποίηση της ξηρής αναερόβιας χώνευσης σε σχέση με την υγρή, καθώς η βασική απαίτηση είναι η ελάχιστη συγκέντρωση στερεών των προς επεξεργασία υπολειμμάτων να είναι 20 %.

Για τη συνεχή μέτρηση των παραπάνω παραμέτρων λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα απαιτείται η χρήση διαφόρων τύπων αισθητήρων, αλλά και συστημάτων μέτρησης και καταγραφής των μετρούμενων ποσοτήτων. Υπάρχει μια πλειάδα εμπορικών οργάνων μέτρησης της θερμοκρασίας, της υγρασίας, αλλά και της αλκαλικότητας, με προδιαγραφές που ποικίλουν, ανάλογα με την εφαρμογή, το περιβάλλον και την ακρίβεια μέτρησης.

Για την περίπτωση της μέτρησης της θερμοκρασίας, οι δύο επικρατέστεροι τύποι αισθητήρων είναι ο RTD¹ (Pt-100) και το θερμοζεύγος². Και οι δύο τύποι προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια μέτρησης (της τάξης των 0.1 °C), σταθερότητα και ανάλυση (resolution). Απαιτούν, όμως κατάλληλο κύκλωμα οδήγησης, με ηλεκτρονικά εξαρτήματα χαμηλού θορύβου, ώστε να μπορέσουν να αποδώσουν κατά το μέγιστο δυνατό τρόπο. Συγκεκριμένα το θερμοζεύγος απαιτεί ειδικά καλώδια και κατάλληλα βύσματα σύνδεσης, αλλά και μέτρηση της θερμοκρασίας αναφοράς στις επαφές που καταλήγουν τα καλώδια επάνω στην πλακέτα ηλεκτρονικών. Υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμα συστήματα μέτρησης θερμοκρασίας που μπορούν να δεχτούν είσοδο Pt-100 ή θερμοζεύγος και να απεικονίζουν τη θερμοκρασία σε οθόνη. Το κόστος συστημάτων μέτρησης μέτριας ακρίβειας είναι σχετικά χαμηλό και δεν απαιτούν βαθμονόμηση, αλλά μπορεί να αυξηθεί αρκετά για μετρητικά όργανα βιομηχανικής κλίμακας, όπως για παράδειγμα τα Eurotherm³.

Για την περίπτωση της μέτρησης της σχετικής υγρασίας μέσα στο βιοαντιδραστήρα υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμοι αισθητήρες που μπορούν να μετρούν με αρκετά καλή ακρίβεια, όπως για παράδειγμα οι αισθητήρες της σειράς SHT45 της εταιρίας Sensirion⁴. Οι αισθητήρες αυτοί παρουσιάζουν ακρίβεια μέτρησης υγρασίας 1%RH και καλύπτουν

το πλήρες εύρος τιμών, ενώ μπορούν να επικοινωνούν μέσω ψηφιακής θύρας για τη μεταφορά δεδομένων.

Για την περίπτωση της μέτρησης της αλκαλικότητας, χρησιμοποιείται ένα γυάλινο ηλεκτρόδιο, σε συνδυασμό με κατάλληλο σύστημα μέτρησης και απεικόνισης των τιμών pH. Υπάρχουν διαθέσιμες εμπορικές λύσεις για τη μέτρηση του pH μέσα σε ένα διάλυμα, μέσω εμβάπτισης του γυάλινου ηλεκτροδίου μέσα σε αυτό. Ένα τέτοιο σύστημα^{5,6}, μπορεί να μετρά στο πλήρες εύρος τιμών pH, με μεγάλη ακρίβεια, η οποία μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο με κατάλληλη βαθμονόμηση του οργάνου, χρησιμοποιώντας ρυθμιστικά διαλύματα γνωστού pH. Μειονέκτημα, όμως αποτελεί η υψηλή τιμή των συστημάτων αυτών και ειδικά των συστημάτων με βιομηχανικές προδιαγραφές.

Επιπλέον, ένα άλλο πρόβλημα που ανακύπτει με τη χρησιμοποίηση διακριτών συστημάτων μέτρησης των παραμέτρων λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα είναι η διασύνδεσή τους με ένα καταγραφικό σύστημα, ώστε να λαμβάνονται και να αποθηκεύονται οι τιμές των μετρούμενων μεγεθών για μελλοντική επεξεργασία. Ένα τέτοιο καταγραφικό σύστημα θα πρέπει να είναι συμβατό με τα επιμέρους συστήματα μέτρησης, να μπορεί να επικοινωνεί με αυτά, με αναλογικό ή ψηφιακό τρόπο και να έχει αρκετές εισόδους προκειμένου να μπορεί να καταγράψει όλες τις μετρούμενες ποσότητες.

Τέλος, στην περίπτωση που επιθυμούμε να επέμβουμε ενεργά και να προκαλούμε ρύθμιση μιας ή περισσότερων παραμέτρων απαιτείται ένα άλλο σύστημα ελέγχου, το οποίο θα πρέπει να επικοινωνεί με τα υπόλοιπα, ώστε να δέχεται τις μετρούμενες πληροφορίες και να μπορεί να αποφασίζει αν και πότε θα παρεμβαίνει. Άμεση απόρροια αυτή της επιλογής είναι το μεγάλο συνολικό κόστος και η πολυπλοκότητα του συστήματος.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε και κατασκευάστηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης και καταγραφής των παραμέτρων λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα, χρησιμοποιώντας ένα μικροελεγκτή και εμπορικά διαθέσιμους αισθητήρες, με πολύ χαμηλό κόστος και μεγάλη ευελιξία, το οποίο θα ενσωματώνει όλες τις λειτουργίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επίσης, ένα τέτοιο σύστημα θα μπορεί να παρεμβαίνει ενεργά σε περίπτωση που απαιτείται και να ρυθμίζει τις παραμέτρους λειτουργίας που επιθυμούμε. Η ολοκλήρωση όλων των εξαρτημάτων σε μία πλακέτα προσφέρει απλότητα χρήσης, μικρό κόστος και περιορισμένες διαστάσεις του τελικού προϊόντος, σε σχέση με τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα.

Έτσι, προκειμένου να παρακολουθείται η λειτουργία του βιοαντιδραστήρα σε πραγματικό χρόνο και να καταγράφονται οι παράμετροι λειτουργίας του (θερμοκρασία, υγρασία, αλκαλικότητα κ.α.) σε επεξεργάσιμο αρχείο, είναι απαραίτητη η χρήση ενός μικροελεγκτή. Ο μικροελεγκτής αυτός μπορεί να διασυνδεθεί με κατάλληλους αισθητήρες και να προγραμματιστεί ώστε να μετράει και να καταγράφει τις επιθυμητές παραμέτρους λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα, αλλά και τις εξωτερικές συνθήκες, όπως ατμοσφαιρική θερμοκρασία, θερμοκρασία του νερού θέρμανσης του βιοαντιδραστήρα και να ειδοποιεί το χρήστη σε περίπτωση που οι τιμές αποκλίνουν από τις ιδανικές και επιθυμητές τιμές. Επιπλέον, όταν οι τιμές αυτές αποκλίνουν θα μπορεί να επεμβαίνει και να προκαλεί ρύθμιση των τιμών ώστε να επανέλθουν στα επιθυμητά επίπεδα για τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος και τη μέγιστη απόδοσή του.

Ένα άλλο πλεονέκτημα της χρήσης μικροελεγκτή είναι η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου του συστήματος μέσω κινητού τηλεφώνου ή tablet. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω ασύρματης σύνδεσης Bluetooth ή Wifi, χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο module και προσαρμόζοντας το λογισμικό ώστε να δίνεται η δυνατότητα ασύρματης μετάδοσης δεδομένων στην κινητή πλατφόρμα. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να πραγματοποιεί έλεγχο του συστήματος έξω από το χώρο που αυτός βρίσκεται τοποθετημένος, ακόμα και από το γραφείο ή το σπίτι του, με δυνατότητα παρέμβασης, σε περίπτωση που αυτό απαιτηθεί.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας μικροελεγκτής που ανήκει στην οικογένεια μικροελεγκτών Arduino. Η οικογένεια αυτή παρουσιάζει ευκολία στη χρήση, υψηλή διαθεσιμότητα και πλήθος πληροφοριών που μπορούν να αναζητηθούν στο διαδίκτυο, γεγονός που την καθιστά προσιτή ως προς τη λειτουργία στους χρήστες. Επιπλέον, ο κώδικας ανήκει στην κατηγορία του ανοιχτού λογισμικού (open source), άρα καθιστά εύκολη την αναζήτηση και εύρεση πληροφοριών και παραδειγμάτων χρήσης για τους αισθητήρες και τα συνοδευτικά κυκλώματα.

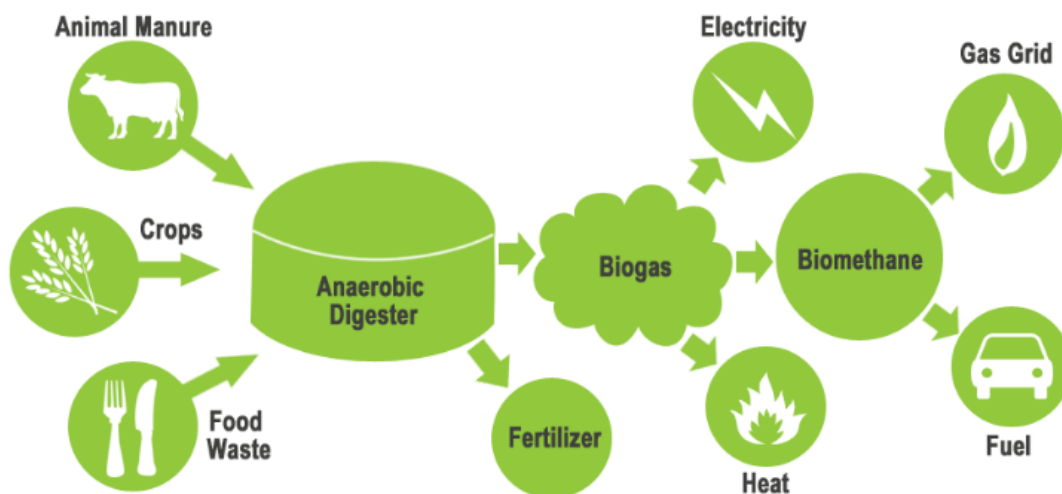
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ-ΤΥΠΟΙ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ

2.1 Εισαγωγή

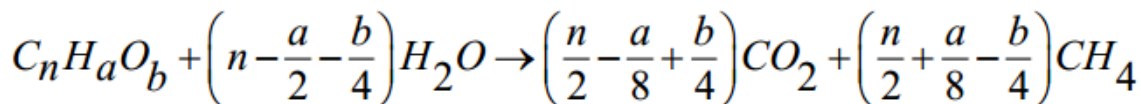
Αναερόβια χώνευση είναι η βιολογική διεργασία μετατροπής όλων των οργανικών ουσιών σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου (Εικόνα 1).

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μια από τις βασικές και πιο παραδοσιακές μεθόδους για την επεξεργασία της βιολογικής ύλης που παράγεται κατά την πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία των αστικών αποβλήτων⁷. Για την επεξεργασία στερεών απορριμμάτων και αστικών λυμάτων η αναερόβια επεξεργασία με ταυτόχρονη παραγωγή μεθανίου (CH_4) είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος σταθεροποίησης της παραγόμενης λάσπης σε μονάδες επεξεργασίας αστικών και βιομηχανικών λυμάτων⁸.



Εικόνα 1:: Σχηματική απεικόνιση αναερόβιας χώνευσης

Κατά τη διάσπαση της οργανικής ύλης που πραγματοποιείται στην αναερόβια χώνευση, οι οργανικές ενώσεις μετατρέπονται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:

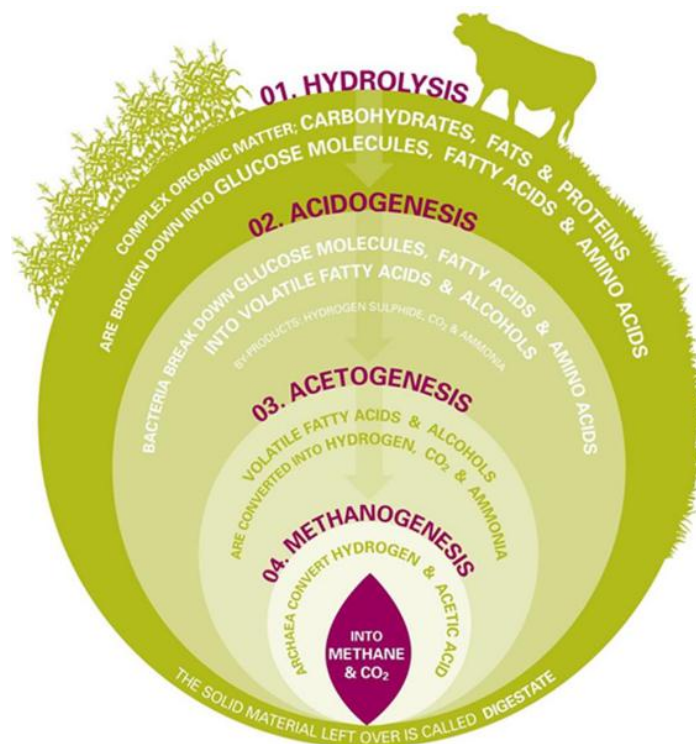


Από την παραπάνω αντίδραση προκύπτει ότι η ποσοστιαία σύσταση του βιοαερίου που παράγεται σε μεθάνιο έχει απόλυτη εξάρτηση από την οξειδωτική κατάσταση του

άνθρακα στο υπόστρωμα. Υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (1atm, 0°C), η μέγιστη θεωρητική παραγωγή σε μεθάνιο είναι ίση με 0.35 L CH₄ /g COD. Το βιοαέριο που παράγεται αποτελείται από: 55-75% κ.ο. μεθάνιο, 25-50% κ.ο. διοξείδιο του άνθρακα και 1-5% κ.ο. λοιπά αέρια (για παράδειγμα υδρόθειο ,υδρογόνο, κ.ά.).

2.2 Μικροβιολογία της αναερόβιας επεξεργασίας

Η αναερόβια βιο-αποδόμηση του σύνθετου οργανικού υλικού περιγράφεται ως μια διαδικασία πολλαπλών σταδίων που εξελίσσονται παράλληλα (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Στάδια διεργασίας αναερόβιας χώνευσης

Στο πρώτο στάδιο, σύνθετες πολυμερικές αδιάσπαστες ενώσεις, όπως για παράδειγμα οι υδατάνθρακες, τα λίπη και οι πρωτεΐνες, υδρολύονται σε διαλυτά προϊόντα μικρότερου μεγέθους με τη βοήθεια εξωκυτταρικών ενζύμων, ώστε να μπορούν να εισχωρήσουν διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης στο εσωτερικό του κυττάρου. Στη

συνέχεια, αυτές οι απλές διαλυτές ενώσεις οξειδώνονται ή ζυμώνονται με αναερόβιο τρόπο σε πτητικά λιπαρά οξέα, αλκοόλες, διοξείδιο του άνθρακα, αμμωνία και υδρογόνο. Στο επόμενο στάδιο, τα πτητικά λιπαρά οξέα μετατρέπονται σε οξικό οξύ, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Τέλος, παράγεται μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, είτε από την αναγωγή του διοξειδίου του άνθρακα από το υδρογόνο είτε από το οξικό οξύ⁹.

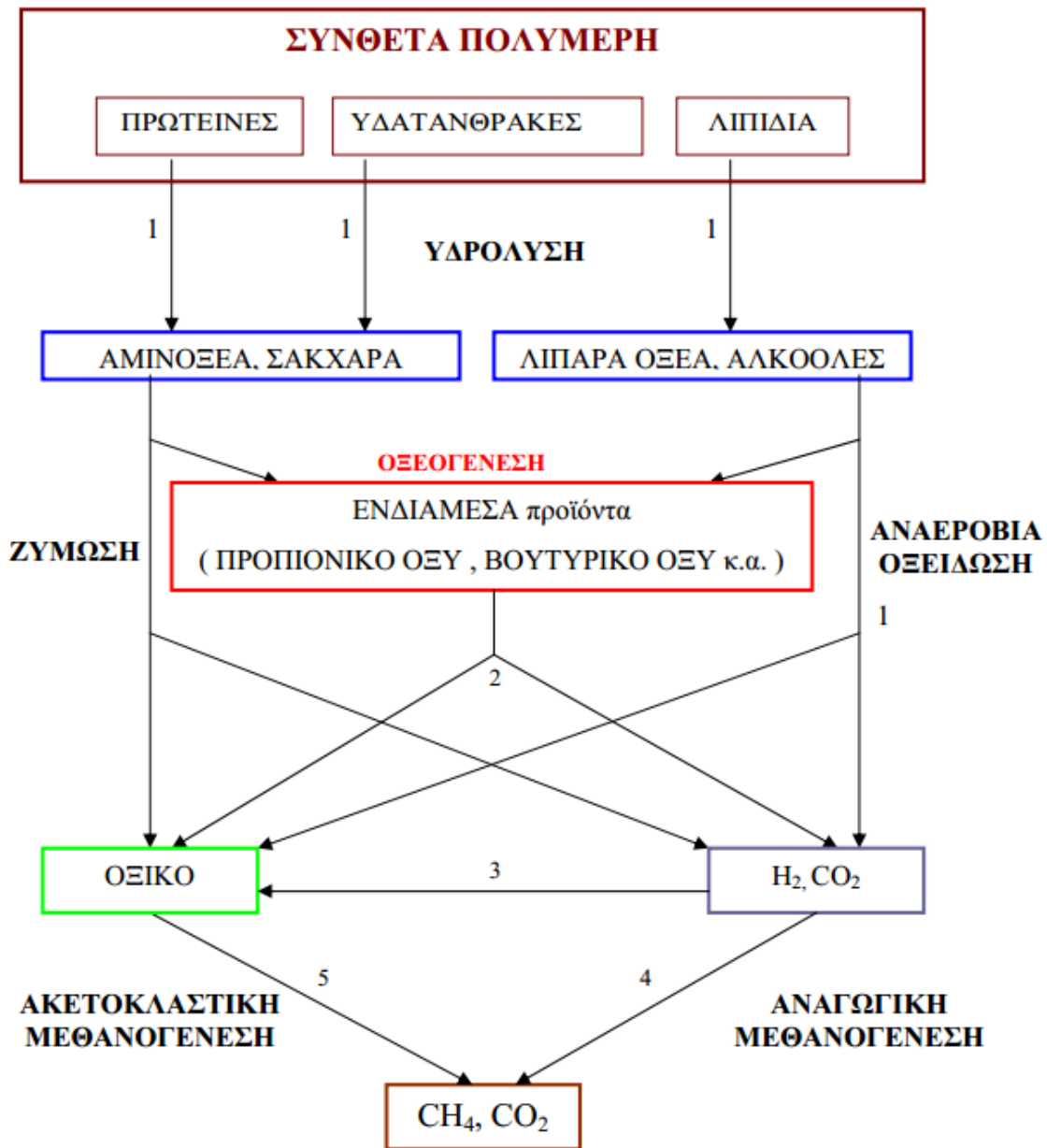
Η διαδικασία της μετατροπής του σύνθετου οργανικού υλικού σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να υποδιαιρεθεί σε επτά στάδια¹⁰ που αναφέρονται παρακάτω και απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 3.

Τα στάδια μετατροπής είναι τα παρακάτω¹¹:

1. Υδρόλυση του σύνθετου οργανικού υλικού
2. Ζύμωση των αμινοξέων και των σακχάρων
3. Αναερόβια οξείδωση των μεγάλου μήκους λιπαρών οξέων και αλκοολών
4. Αναερόβια οξείδωση των ενδιάμεσων προϊόντων
5. Παραγωγή οξικού από διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο
6. Μετατροπή του οξικού σε μεθάνιο
7. Παραγωγή μεθανίου με αναγωγή του διοξειδίου του άνθρακα από υδρογόνο

Οι κύριες ομάδες βακτηρίων που παίρνουν μέρος σε αυτές τις αντιδράσεις διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες και φαίνονται με νούμερα στην Εικόνα 3¹²:

- (1) βακτήρια ζύμωσης
- (2) οξικογόνα βακτήρια που παράγουν υδρογόνο
- (3) οξικογόνα βακτήρια που καταναλώνουν υδρογόνο
- (4) μεθανογόνα βακτήρια που ανάγουν το διοξείδιο του άνθρακα
- (5) ακετοκλαστικά μεθανογόνα βακτήρια



Εικόνα 3: Διαδικασία μετατροπής του οργανικού υλικού σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα κατά τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης

Ένα κριτήριο κατάταξης των μικροοργανισμών είναι η σχέση της κυτταρικής τους λειτουργίας με το οξυγόνο. Στον Πίνακα 1 αποτυπώνεται η κατάταξη των μικροοργανισμών ανάλογα με την ικανότητα τους να χρησιμοποιούν το οξυγόνο και τον τρόπο που πραγματοποιείται αυτή η χρήση¹³.

Μικροοργανισμοί	Ιδιότητα
1. Αερόβιοι (aerobes)	Χρησιμοποιούν μοριακό οξυγόνο
2. Προαιρετικά αναερόβιοι (facultative anaerobes)	Χρησιμοποιούν μοριακό οξυγόνο αλλά μπορούν να ζήσουν σε αναερόβιες συνθήκες με ζυμωτικό μεταβολισμό
3. Υποχρεωτικά αναερόβιοι (obligate anaerobes)	Δε χρησιμοποιούν μοριακό οξυγόνο
3α. Αδιάφοροι αναερόβιοι (indifferent anaerobes)	Μπορούν να επιβιώσουν και σε αερόβιες συνθήκες
3β. Ανθεκτικοί στον αέρα αναερόβιοι (aerotolerant anaerobes)	Έχουν όρια ανοχής στη συγκέντρωση οξυγόνου του περιβάλλοντός τους
3γ. Αυστηρά αναερόβιοι (strict anaerobes)	Πεθαίνουν ακόμα και με ίχνη ελεύθερου οξυγόνου στο περιβάλλον τους

Πίνακας 1: Κατάταξη των μικροοργανισμών με κριτήριο τη σχέση της κυτταρικής τους λειτουργίας με το οξυγόνο

Συνοπτικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι στην αναερόβια χώνευση σε πρώτο στάδιο, ένα ετερογενές σύμπλεγμα μικροοργανισμών μετατρέπει τις πρωτεΐνες, τα λίπη και τους υδατάνθρακες ως επί το πλείστον σε λιπαρά οξέα. Σε ένα δεύτερο στάδιο, τα μεθαγόνα βακτήρια, μια ομάδα αναερόβιων βακτηρίων, μετατρέπουν τα τελικά προϊόντα του μεταβολισμού των μικροοργανισμών του πρώτου σταδίου σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα¹⁴.

Στη συνέχεια, μελετώνται ξεχωριστά αυτές οι ομάδες μικροοργανισμών που συμμετέχουν στην αναερόβια επεξεργασία και παρουσιάζονται τα τέσσερα βασικά στάδια της αναερόβιας χώνευσης.

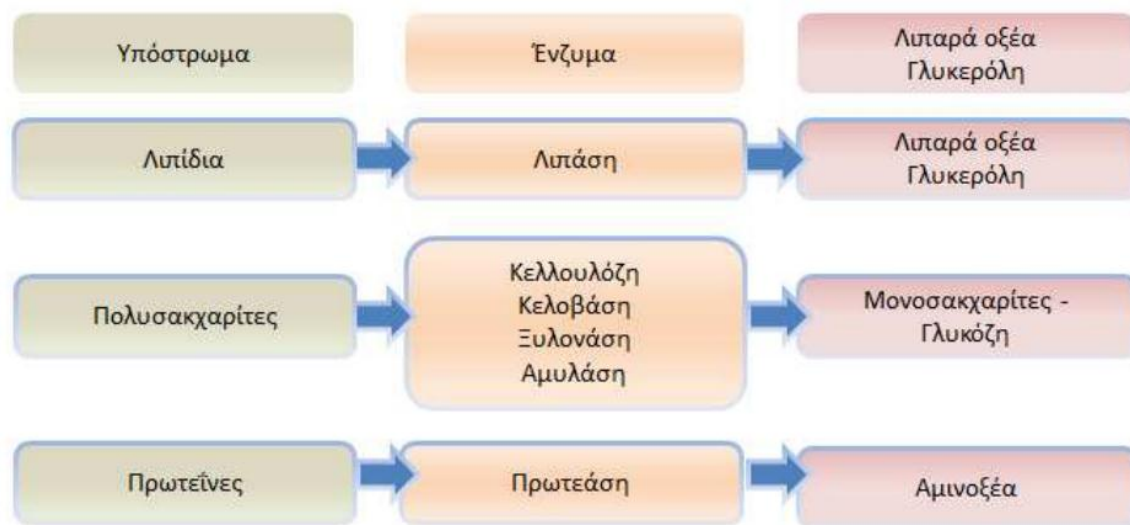
2.2.1 Υδρόλυση-Πρώτο στάδιο αναερόβιας χώνευσης

Το σημαντικότερο συστατικό στοιχείο που περιέχεται στα απόβλητα είναι οι πολυμερείς ενώσεις όπως οι πρωτεΐνες, οι υδατάνθρακες και τα λίπη. Το πρώτο στάδιο της αναερόβιας διεργασίας είναι η υδρόλυση αυτών των ενώσεων σε μικρότερα μόρια (Εικόνα 4).

Οι πρωτεΐνες υδρολύονται από τις πρωτεάσες, που είναι εξωκυτταρικά ένζυμα, σε αμινοξέα. Οι πιο διαδεδομένοι πολυσακχαρίτες που συναντώνται στα απόβλητα

διασπώνται από εξωκυτταρικά ένζυμα, τις αμυλάσες και τις κυτταρινάσες και το προϊόν που παράγεται από την υδρόλυση είναι η γλυκόζη.

Τα λιπίδια υδρολύονται σε λιπαρά οξέα μεγάλης ανθρακικής αλυσίδας από τις λιπάσες, με σημαντικά μικρότερο ρυθμό βιοαποικοδόμησης από τις πρωτεΐνες και τους υδατάνθρακες.



Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση της υδρόλυσης

2.2.2 Ζύμωση -οξεογένεση -Δεύτερο στάδιο αναερόβιας χώνευσης

Κατά το στάδιο της ζύμωσης- οξεογένεσης (Εικόνα 5) βιοαποδομείται το διαλυτό οργανικό υλικό σε πιο απλές οργανικές ενώσεις, και στο μεγαλύτερο ποσοστό του σε αλκοόλες και πτητικά λιπαρά οξέα με παράλληλη παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου. Τα οργανικά μονομερή που προκύπτουν κατά το στάδιο της υδρόλυσης χρησιμοποιούνται από τα οξεογόνα κυρίως βακτήρια για την παραγωγή αλκοολών, λιπαρών οξέων, διοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου.



Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση της ζύμωσης.

Το κύριο προϊόν της ζύμωσης των υδατανθράκων είναι το οξικό οξύ. Τα προϊόντα της οξεογένεσης σχετίζονται με τον τύπο των μικροοργανισμών καθώς επίσης και με τις συνθήκες καλλιέργειας (παράγοντες θερμοκρασίας, pH, οξειδοαναγωγικό δυναμικό). Ενώσεις όπως για παράδειγμα το προπιονικό γαλακτικό, το βουτυρικό οξύ, η αιθανόλη και ανώτερα πτητικά λιπαρά οξέα, συμβάλλουν στη συσσώρευση ηλεκτρονίων, η οποία κατ' επέκταση προκαλεί αύξηση της συγκέντρωσης του υδρογόνου στο διάλυμα από τα βακτήρια. Τα νέα προϊόντα δεν είναι άμεσα αξιοποιήσιμα από τα μεθανογόνα βακτήρια, αλλά απαιτείται ο μετασχηματισμός τους μέσω της διαδικασίας της οξικογένεσης (τρίτο στάδιο). Μερικά από τα προϊόντα της οξεογένεσης είναι η αμμωνία και το υδρόθειο, που προσδίδουν χαρακτηριστική δυσάρεστη οσμή σε αυτό το στάδιο.

2.2.3 Οξικογένεση-Τρίτο στάδιο αναερόβιας χώνευσης

Τα λιπαρά οξέα και οι αλκοόλες που παρήχθησαν κατά την οξεογένεση, μετατρέπονται από τα οξικογόνα βακτήρια σε υδρογόνο, οξικό οξύ και διοξείδιο του άνθρακα (Εικόνα 6).

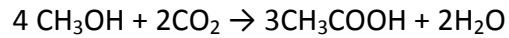
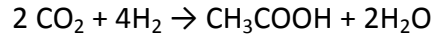


Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση της οξικογένεσης

Οι οξικογόνοι μικροοργανισμοί αδυνατούν να μετατρέψουν τα πτητικά λιπαρά οξέα σε συνθήκες υψηλής μερικής πίεσης υδρογόνου, προκαλώντας την εκτροπή της διεργασίας μετά την παραγωγή οξικού οξέος.

Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί συμμετέχουν στη διαδικασία επιτυγχάνοντας μείωση της συγκέντρωσης του υδρογόνου. Η παραγωγή του υδρογόνου αυξάνει την μερική πίεσή του και δυσχεραίνει τον μεταβολισμό των οξικογενών βακτηρίων. Κατά το στάδιο της μεθανογένεσης, πραγματοποιείται η μετατροπή του υδρογόνου σε μεθάνιο. Η οξικογένεση και η μεθανογένεση είναι αλληλένδετες και συνήθως διαδραματίζονται παράλληλα.

Το προπιονικό οξύ, το βουτυρικό οξύ και η αιθανόλη μετασχηματίζονται σε οξικό οξύ, με βάση τις παρακάτω αντιδράσεις:



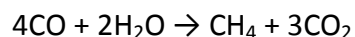
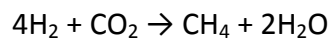
2.2.4 Μεθανογένεση-Τέταρτο στάδιο αναερόβιας χώνευσης

Στο τελευταίο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης εξελίσσεται η παραγωγή του μεθανίου, από κατανάλωση οξικού οξέος ή με τη σύνθεσή του από διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Οι μικροοργανισμοί που δραστηριοποιούνται στην μεθανογένεση είναι αναερόβιοι. Περίπου το 70% της παραγόμενης ποσότητας μεθανίου προέρχεται από το οξικό οξύ, ενώ το υπόλοιπο 30% σχηματίζεται από το υδρογόνο, το φορμικό οξύ και το διοξείδιο του άνθρακα.

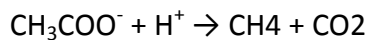
Συνοψίζοντας, η αναερόβια επεξεργασία των αποβλήτων είναι μία σημαντική βιολογική διεργασία, στην οποία οι σύνθετες οργανικές ουσίες που συναντώνται στα ζωικά και άλλα οργανικά απόβλητα, αστικής και βιομηχανικής προέλευσης, διασπώνται σε ουσίες πιο απλής μορφής. Το όφελος της διαδικασίας αυτής είναι ο περιορισμός της αρνητικής επίπτωσης των αποβλήτων στην κοινωνία με παράλληλη παραγωγή μεθανίου¹⁵.

Οι βασικές αντιδράσεις παραγωγής μεθανίου στο στάδιο της μεθανογένεσης είναι οι ακόλουθες:

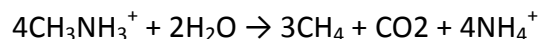
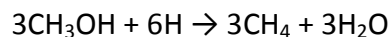
Υδρογονοτροφικές αντιδράσεις



Οξικολυτικές αντιδράσεις



Αντιδράσεις με μεθυλομάδες



2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση

Σημαντικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη της διαδικασίας παραγωγής μεθανίου κατά την αναερόβια επεξεργασία, είναι η θερμοκρασία, η αλκαλικότητα, το pH, τα θρεπτικά στοιχεία, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής, η οργανική φόρτιση και οι τοξικές ουσίες¹⁶. Η ελεγχόμενη ρύθμιση των παραγόντων αυτών είναι καθοριστικής σημασίας για την αποτελεσματικότητα της διεργασίας και αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι όταν οι τιμές τους κυμαίνονται πέρα από κάποια όρια, παρεμποδίζεται ή αναστέλλεται η ολοκλήρωση της διεργασίας. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται η επίδραση των παραγόντων που αναφέρθηκαν στη διαδικασία παραγωγής μεθανίου κατά την αναερόβια επεξεργασία.

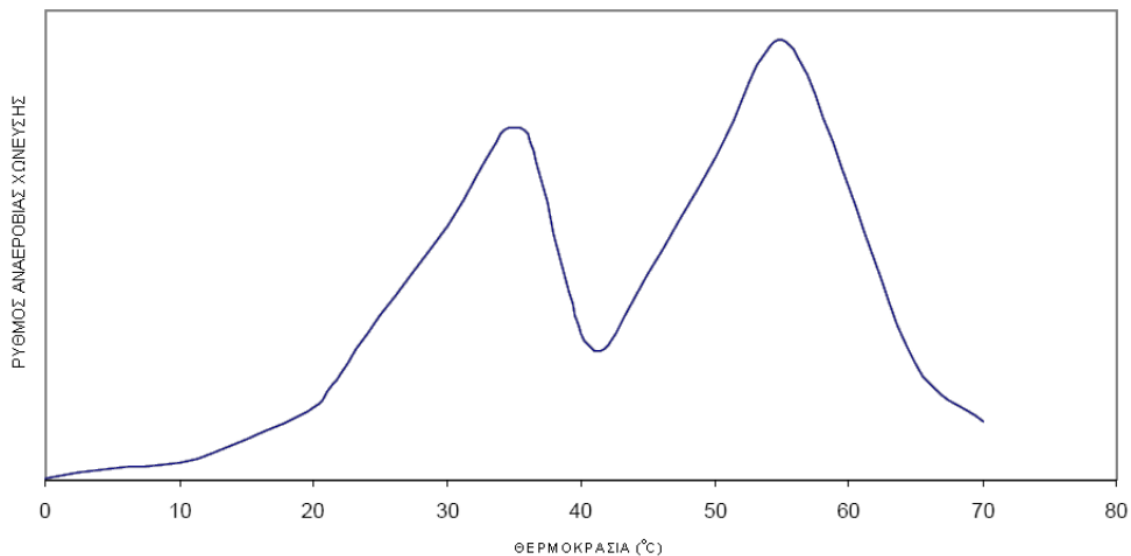
2.3.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι ένας από τους πιο σημαντικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη τόσο των αναερόβιων, όσο και των αερόβιων μικροοργανισμών¹⁷. Έχουν βρεθεί δυο βέλτιστες θερμοκρασιακές περιοχές για την λειτουργία αναερόβιων αντιδραστήρων, η μεσόφιλη (~35 °C) και η θερμόφιλη (55 °C με 60 °C), ανάμεσα στις οποίες οι ρυθμοί ανάπτυξης μειώνονται, όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 7. Η αναερόβια χώνευση μπορεί να γίνει και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, όπως για παράδειγμα 0 °C, αλλά κατά κύριο λόγο ο ρυθμός παραγωγής μεθανίου αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί αντέχουν σε ένα μεγάλο φάσμα θερμοκρασιών, οι απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας μπορεί να έχουν καταστροφικές συνέπειες για τη διεργασία της αναερόβιας επεξεργασίας.

2.3.2 pH και αλκαλικότητα

Οι περισσότερες διεργασίες αναερόβιας επεξεργασίας διαδραματίζονται σε σχεδόν ουδέτερο pH. Λόγω της συσσώρευσης όξινων ή βασικών μεταβολικών προϊόντων, όπως είναι τα λιπαρά οξέα ή η αμμωνία, παρατηρούνται διαφοροποιήσεις από αυτή την περιοχή του pH. Ένα από τα πιο συνηθισμένα προβλήματα των αναερόβιων αντιδραστήρων, είναι η αύξηση της συγκέντρωσης των λιπαρών οξέων , η οποία συμβαίνει συνήθως όταν οι οξικογόνοι ή οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί έχουν

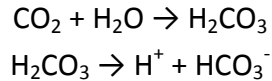
παρεμποδιστεί, με συνέπεια τα οξέα να συσσωρεύονται, αφού δεν καταναλώνονται από τους μικροοργανισμούς. Η μείωση του pH είναι μεγαλύτερη για τα μεθανογόνα βακτήρια απ' ό τι στα ζυμωτικά βακτήρια, με αποτέλεσμα ενώ η παραγωγή των οξέων από τους ζυμωτικούς μικροοργανισμούς εξελίσσεται, η μεθανογένεση έχει σταματήσει, προκαλώντας πρόβλημα οξύτητας στον αντιδραστήρα και οδηγώντας τελικά σε ανεπιτυχή ολοκλήρωση της διεργασίας.



Εικόνα 7: Διαγραμματική αναπαράσταση ρυθμού αναερόβιας χώνευσης σε σχέση με τη θερμοκρασία (°C)

Βέβαια έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει παραγωγή μεθανίου έστω και σε μικρές ποσότητες, τόσο σε όξινο όσο και σε αλκαλικό περιβάλλον, αποδεικνύοντας ότι η μεθανογένεση δεν επιτυγχάνεται μόνο στην περιοχή του ουδέτερου pH. Κατά κύριο λόγο για τα βιομηχανικά και αστικά λύματα, η αναερόβια χώνευση πραγματοποιείται σε μια περιοχή του pH από 6 έως 7, ενώ όταν η τιμή του pH είναι κάτω από 6, παρατηρείται μείωση της ποσότητας του παραγόμενου μεθανίου και προβλήματα στην κατακράτηση της βιομάζας που καθιστούν ασταθή τη διεργασία.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του pH ενός χωνευτήρα είναι η αλκαλικότητα του συστήματος και η συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων. Η αλκαλικότητα οφείλεται κυρίως στην συγκέντρωση ιόντων HCO_3^- τα οποία προέρχονται από την παραγωγή CO_2 κατά την διάσπαση των οργανικών ενώσεων, όπως αποτυπώνεται στις παρακάτω αντιδράσεις:



Η αλκαλικότητα συνιστά μέτρο της ρυθμιστικής ικανότητας των συστατικών ενός αναερόβιου αντιδραστήρα. Οι υψηλές τιμές αλκαλικότητας σηματοδοτούν ένα ασφαλές σύστημα στις διακυμάνσεις του pH, ενώ χαμηλές τιμές αλκαλικότητας υποδηλώνουν ότι μια αιφνίδια αύξηση στη συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων, μπορεί να προκαλέσει μείωση στο pH και διακοπή των βιολογικών διεργασιών.

Μια μέθοδος για να διατηρείται η τιμή του pH μέσα στα όρια της επιθυμητής περιοχής είναι η αύξηση της αλκαλικότητας του συστήματος, με την προσθήκη υλικών όπως υδροξείδιο του καλίου, νατρίου, ή του ασβεστίου (KOH, NaOH, Ca(OH)₂), όξινο ανθρακικό ή ανθρακικό κάλιο ή νάτριο (NaHCO₃, KHCO₃, Na₂CO₃) ή αμμωνία (NH₃).

2.3.3 Τα θρεπτικά συστατικά

Για να πραγματοποιηθεί η διάσπαση των οργανικών μορίων και να παραχθεί μεθάνιο χρειάζεται να υπάρχουν στον αναερόβιο αντιδραστήρα κάποια απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη και τον μεταβολισμό των μικροοργανισμών. Τα υλικά τροφοδοσίας της διεργασίας συνιστάται να συμμορφώνονται σε συγκεκριμένη αναλογία C και N, η οποία εκφράζεται με το λόγο COD:N, που πρέπει να κυμαίνεται από 400:7 μέχρι 1000:7. Επίσης για τη μεθανογένεση είναι απαραίτητα διάφορα ιχνοστοιχεία, όπως ο σίδηρος, το νικέλιο, το θείο, το κάλιο, το μαγνήσιο, το ασβέστιο, το βάριο, το βολφράμιο, ο μόλυβδος, το σελήνιο και το κοβάλτιο. Τα στοιχεία αυτά χρειάζονται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, αλλά η απουσία τους έχει αρνητική επίδραση στην εξέλιξη της μικροβιακής ανάπτυξης.

2.3.4 Τοξικές ουσίες

Οι τοξικές ουσίες που συναντώνται στα υλικά προς χώνευση προέρχονται από διάφορα συστατικά των αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων, όπως για παράδειγμα τα καθαριστικά, απορρυπαντικά, συντηρητικά τροφίμων, φάρμακα, δηλαδή ουσίες που είναι πολύ δύσκολο να διασπαστούν. Σε πολλές από αυτές τις τοξικές ουσίες δεν επιβιώνουν τα αναερόβια βακτήρια, αλλά υπάρχουν και ορισμένα είδη που μπορούν να βιοαποδομήσουν κάποιες από αυτές τις ουσίες. Οι μικροοργανισμοί που

επηρεάζονται περισσότερο από την τοξικότητα, σε σχέση με αυτούς που εμπλέκονται στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης είναι οι μεθανογόνοι.

Η βιολογική διεργασία παραγωγής μεθανίου μπορεί να ανασχεθεί από διάφορες ουσίες που είναι τοξικές για την μεθανογένεση, όπως για παράδειγμα το οξυγόνο, την αμμωνία, τα λιπαρά οξέα, τα βαρέα μέταλλα, τα θειούχα και τα θειικά ιόντα, τη φορμαλδεΰδη, και άλλες οργανικές ενώσεις. Το οξυγόνο είναι τοξικό ακόμα και σε αμελητέες ποσότητες για τα αναερόβια μεθανογόνα βακτήρια.

Η αμμωνία επίσης μπορεί να παρεμποδίσει τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης. Η τιμή της συγκέντρωσης που την καθιστά τοξική στους μικροοργανισμούς, εξαρτάται και από το pH, τον τρόπο έκθεσής της στα μεθανοβακτήρια (ελεύθερη ή ιονισμένη μορφή) και τη συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων. Η συγκέντρωση αμμωνίας από 1500 μέχρι 3000 mg/l παρεμποδίζει την παραγωγή μεθανίου ενώ όταν υπερβεί τα 3000 mg/l προκαλεί πλήρη διακοπή της διεργασίας.

Η παρουσία βαρέων μετάλλων σε μικρές συγκεντρώσεις είναι απαραίτητη για την λειτουργία πολλών βακτηρίων, αλλά όταν οι συγκεντρώσεις τους αυξηθούν, επηρεάζουν αρνητικά στην αναερόβια χώνευση. Η τοξικότητα των μετάλλων μειώνεται σύμφωνα με την παρακάτω σειρά: $\text{Ni} > \text{Ca} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Zn}$.

Τα θειούχα ανιόντα (HS^- , S_2^{2-}) είναι οι επικρατέστεροι παρεμποδιστές της αναερόβιας χώνευσης. Το υδρόθειο συγκεκριμένα είναι τοξικό για τα μεθανογόνα βακτήρια σε συγκεντρώσεις μεταξύ 200 και 1500 mg/l. Η τοξικότητα του υδρόθειου καθώς και των βαρέων μετάλλων εξαρτάται από το pH. Γενικότερα, η παρουσία διαφόρων ανθρωπογενών ενώσεων έχει αρνητικές επιπτώσεις στην εξέλιξη της αναερόβιας διεργασίας.

2.4 Κατηγορίες αναερόβιων αντιδραστήρων

Ο διαχωρισμός των αντιδραστήρων σε διάφορες κατηγορίες γίνεται σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια:

2.4.1 Είδος των φάσεων της διεργασίας

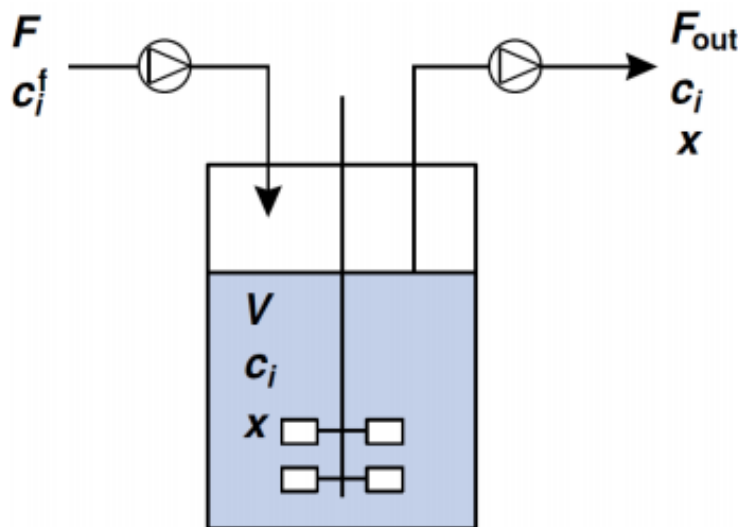
Διακρίνονται σε **μονοφασικούς** αντιδραστήρες, στους οποίους η αντίδραση πραγματοποιείται είτε σε υγρή είτε σε αέρια φάση και σε **πολυφασικούς** αντιδραστήρες, στους οποίους συναντώνται όλοι οι παρακάτω συνδυασμοί:

- υγρό και στερεό
- υγρό και αέριο
- υγρό και υγρό
- στερεό και αέριο
- υγρό, στερεό και αέριο
- διάφορα ρευστά και στερεά

2.4.2 Τρόπος-τύπος λειτουργίας αντιδραστήρα

Οι βιοαντιδραστήρες διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους.

Στην Εικόνα 8 φαίνεται το τυπικό σχήμα ισοζυγίων μάζας ενός βιοαντιδραστήρα για το υπόστρωμα, τα μεταβολικά προϊόντα και τη βιομάζα και σε κάθε κατηγορία θα παρουσιαστεί συνοπτικά η σχέση των ρυθμών ροής προϊόντων που προστίθενται και αυτών που απομακρύνονται.



Εικόνα 8: Τυπικό σχήμα ισοζυγίων μάζας ενός βιοαντιδραστήρα

Συνοπτική επεξήγηση συμβόλων :

- F (σε L/h): Ρυθμός ροής αποστειρωμένου μέσου που προστίθεται
- F_{out} (σε L/h): Ρυθμός απομάκρυνσης του χρησιμοποιημένου μέσου
- C_{if} : Συγκέντρωση της ένωσης i (συνήθως ένα υπόστρωμα) κατά την τροφοδοσία
- C_i : Συγκέντρωση της ένωσης i στον βιοαντιδραστήρα.
- V (σε L): Ενεργός όγκος αντιδραστήρα σε ιδανικές συνθήκες ανάμιξης
- X : Συγκέντρωση βιομάζας στον βιοαντιδραστήρα.

Για τους τρεις τρόπους λειτουργίας ενός αντιδραστήρα ισχύει η παρακάτω σχέση των ρυθμών ροής προϊόντων που προστίθενται και αυτών που απομακρύνονται¹⁸:

Τύπος βιοαντιδραστήρα	Σχέση $F-F_{out}$
Διαλείποντος έργου (batch reactor)	$F = F_{out} = 0$, ο όγκος είναι σταθερός
Συνεχής αντιδραστήρας (Continuous Stirred Tank Reactor)	$F = F_{out} > 0$, δηλ. ο όγκος είναι σταθερός
Ημιδιαλείποντος έργου (semi-batch reactor)	$F > 0$ και $F_{out} = 0$, δηλ. ο όγκος αυξάνεται

Η θεμελιώδης εξίσωση για το ισοζύγιο μάζας σε ένα βιοαντιδραστήρα είναι :

Ρυθμός συσσώρευσης = (ρυθμός εισροής) - (ρυθμός απορροής) + (ρυθμός δημιουργίας) - (ρυθμός κατανάλωσης)

Ο ρυθμός συσσώρευσης καθορίζει το ρυθμό μεταβολής των ενώσεων στον βιοαντιδραστήρα κατά τη διάρκεια μιας ζύμωσης.

Ρυθμός Εισροής είναι ο ρυθμός ροής των ενώσεων που μπαίνουν στον βιοαντιδραστήρα και

Ρυθμός Εκροής είναι ο ρυθμός ροής ενώσεων που βγαίνουν από τον βιοαντιδραστήρα

Για το υπόστρωμα i , το οποίο προστίθεται στον βιοαντιδραστήρα μέσω της τροφοδοσίας και καταναλώνεται από τα κύτταρα που υπάρχουν στον βιοαντιδραστήρα το ισοζύγιο μάζας είναι¹⁹:

$$\frac{d(c_{s,i}, V)}{dt} = -r_{s,i}xV + Fc_{s,i}^f - F_{out}c_{s,i}$$

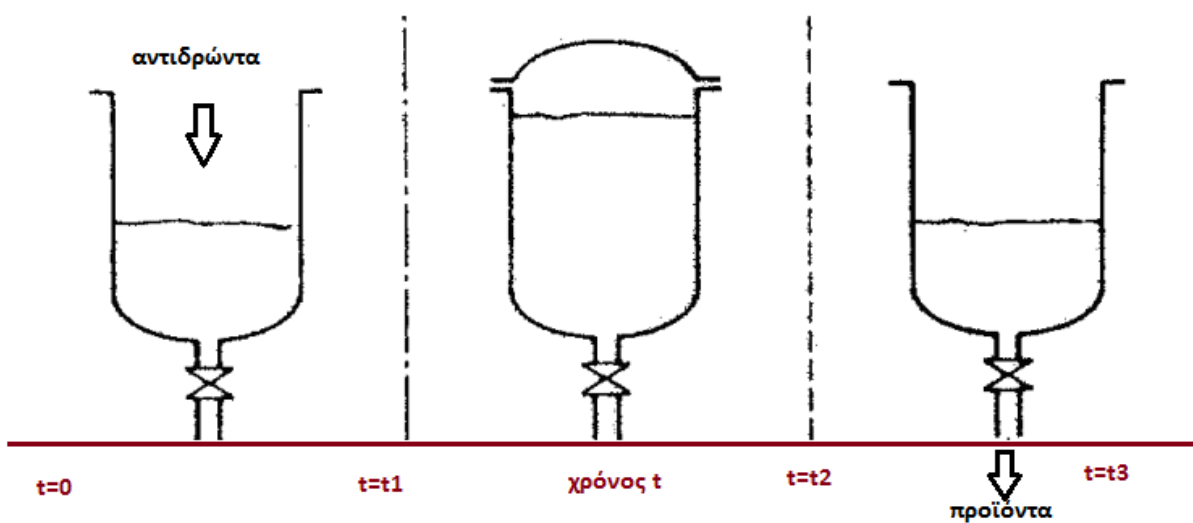
Η οποία παίρνει την ακόλουθη μορφή, διαιρώντας με τον ενεργό όγκο του βιοαντιδραστήρα:

$$\frac{d(c_{s,i}V)}{dt} = -r_{s,i}X + \frac{F c_{s,i}^f}{V} - \left(\frac{F_{out}}{V} + \frac{1}{V} \frac{dV}{dt}\right) c_{s,i}, \text{ όπου } \frac{F}{V} = D, \text{ ρυθμός αραίωσης}$$

Παρακάτω αναλύεται η διεργασία στον αντιδραστήρα διαλείποντος έργου καθώς πρόκειται για τον τύπο βιοαντιδραστήρα που μελετήθηκε στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας.

Ασυνεχής αντιδραστήρας ή αντιδραστήρας διαλείποντος έργου (batch reactor)

Σε αυτόν τον τύπο γίνεται η πλήρωση του αναδευόμενου χωνευτήρα με τα αντιδρώντα υλικά και στη συνέχεια ρυθμίζουμε τις συνθήκες της διεργασίας (πίεση, θερμοκρασία, ανάδευση, κ.α.)²⁰. Ο αντιδραστήρας παραμένει κλειστός κατά την διάρκεια της λειτουργίας του (σε μεταφορά μάζας) και η σύσταση των αντιδρώντων μεταβάλλεται με τον χρόνο, ενώ η συλλογή των προϊόντων γίνεται μετά το πέρας όλων των αντιδράσεων. Στην περίπτωση όμως της αναερόβιας διεργασίας, όπου τελικό προϊόν είναι το βιοαέριο, με το πέρασμα του χρόνου παράγεται σε μεγαλύτερες ποσότητες και απομακρύνεται συνεχώς. Όταν ολοκληρωθεί η διεργασία αυτή, αδειάζουμε τον αντιδραστήρα, γίνεται καθαρισμός και ξεκινά ένας νέος κύκλος (πλήρωση, αντίδραση, κένωση).



Εικόνα 9: Ασυνεχής αντιδραστήρας ή διαλείποντος έργου (batch reactor)

Η μείωση της συγκέντρωσης των αντιδρώντων στον ασυνεχή αντιδραστήρα παρουσιάζει εκθετική μορφή και αυξάνεται σταδιακά η συγκέντρωση των προϊόντων.

Η παραπάνω διεργασία αποτυπώνεται σχηματικά στην Εικόνα 9.

Ο ενεργός όγκος του βιοαντιδραστήρα είναι σταθερός, επομένως το ισοζύγιο που αναφέρθηκε γενικά για τους βιοαντιδραστήρες παίρνει την παρακάτω μορφή:

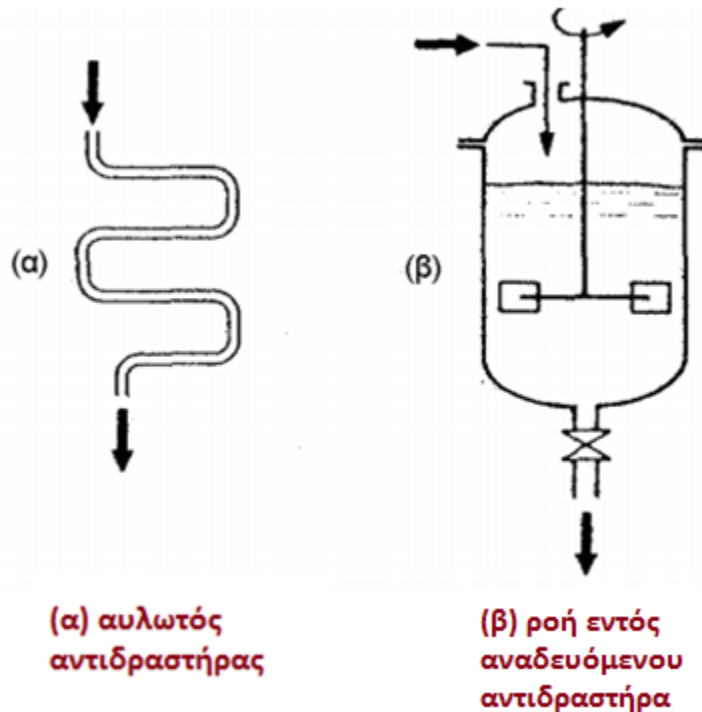
$$\frac{dV}{dt} = 0$$

$$D = \frac{F}{V} = 0$$

$$F = F_{out} = 0$$

$$\frac{d(c_{s,i}, V)}{dt} = -r_{s,i}x$$

Συνεχής αντιδραστήρας ή αντιδραστήρας συνεχούς έργου (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)



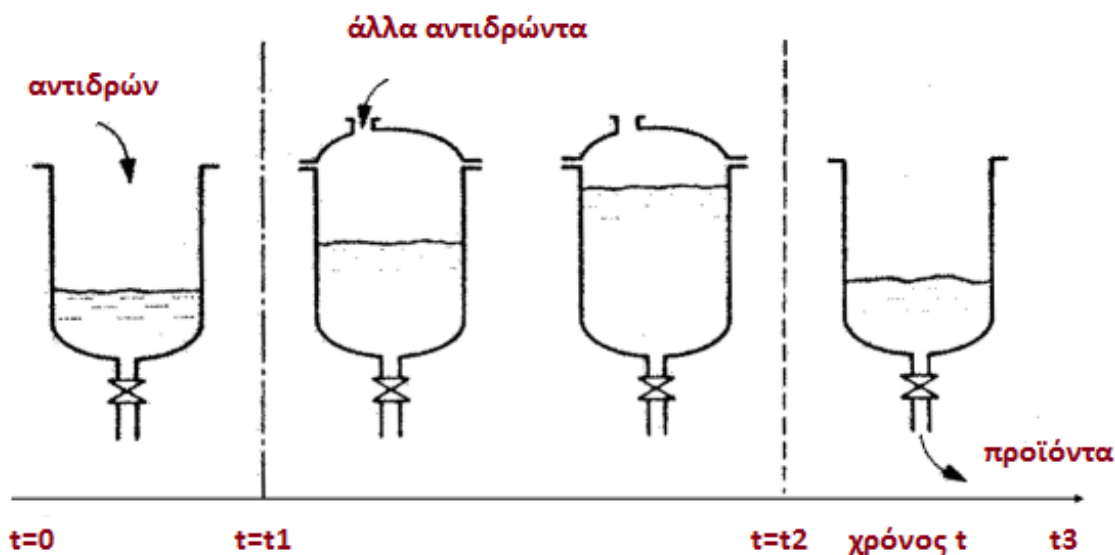
Εικόνα 10: Αντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας

Ο συνεχής αντιδραστήρας (ή αντιδραστήρας συνεχούς έργου-Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)²¹ είναι ένα ανοικτό σύστημα, στο οποίο πραγματοποιείται συνεχής εισαγωγή και εκροή των ρευστών φάσεων, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 10.

Αυτοί οι αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται για παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων προϊόντων, όπως στην επεξεργασία πετροχημικών προϊόντων.

Αντιδραστήρας ημιδιαλείποντος έργου ή ημι-συνεχής αντιδραστήρας (semi-batch reactor)

Ορισμένα από τα αντιδρώντα τοποθετούνται αρχικά μέσα στον αντιδραστήρα και παράλληλα αρχίζει η συνεχής παροχή κάποιου άλλου αντιδραστηρίου που διέρχεται μέσα από το αρχικό μίγμα κατά διάρκεια της διεργασίας. Όταν ολοκληρωθεί η αντίδραση και καταναλωθεί σχεδόν εντελώς το αρχικό μίγμα αντιδρώντων διακόπτεται η παροχή των άλλων αντιδραστηρίων και ολοκληρώνεται ο παραγωγικός κύκλος, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 11²².



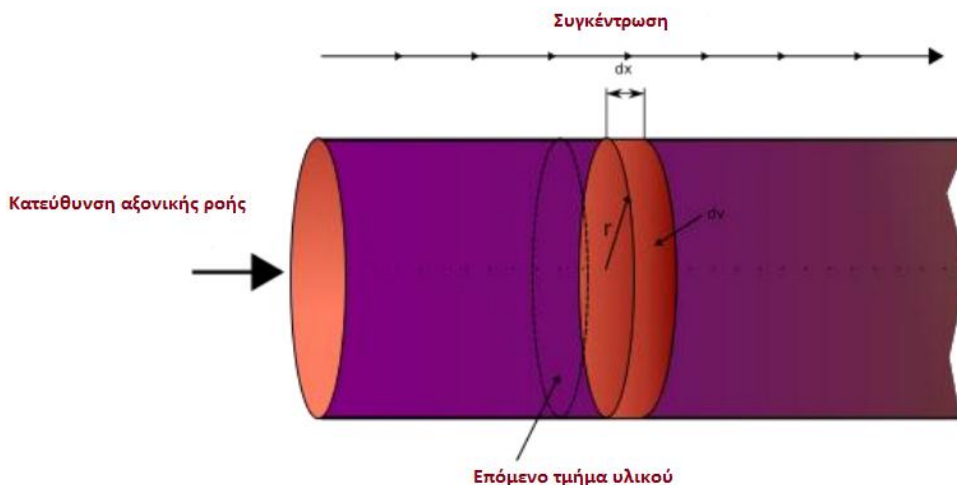
Εικόνα 11: Αντιδραστήρας ημιδιαλείποντος έργου ή ημι-συνεχής αντιδραστήρας

Το τρίτο κριτήριο με βάση το οποίο γίνεται διαχωρισμός ειδικότερα των αντιδραστήρων συνεχούς λειτουργίας είναι ο τύπος της ροής του ρευστού ή των ρευστών μέσα σε αυτούς και αναλύεται παρακάτω.

2.4.3 Τύπος ροής των ρευστών

Αντιδραστήρας εμβολικής ροής ή αυλωτός αντιδραστήρας (Plug Flow Reactors)

Στους αντιδραστήρες εμβολικής ροής ή αυλωτούς αντιδραστήρες θεωρούμε ότι το μίγμα αντιδρώντων και προϊόντων ρέει παράλληλα και η ανάμιξη των μορίων γίνεται εγκάρσια προς την κατεύθυνση της ροής. Επομένως, το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των αντιδραστήρων είναι ότι το ρευστό ρέει και οποιαδήποτε μεταβολή των ιδιοτήτων του ρευστού συμβαίνει αξονικά (κατά τη διεύθυνση της ροής, κατά μήκος του αντιδραστήρα), αλλά όχι ακτινικά (εγκάρσια προς τη ροή) (Εικόνα 12).

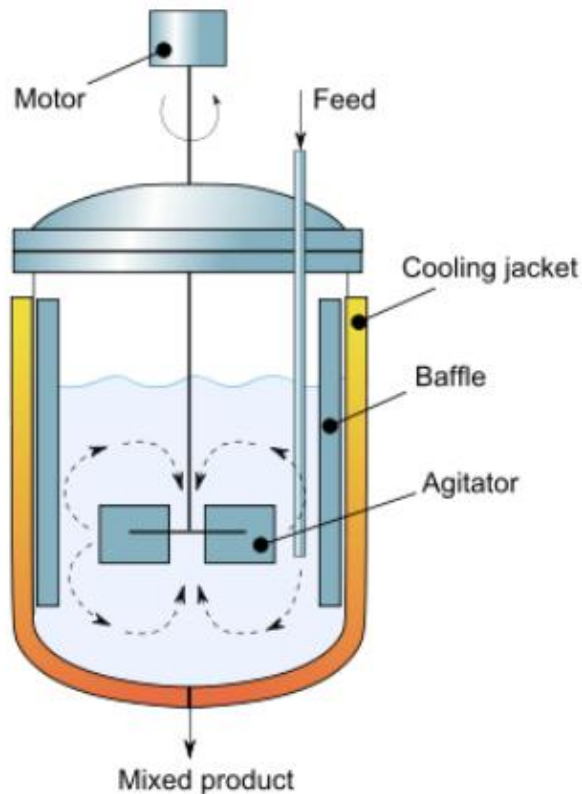


Εικόνα 12: Τυπική σχηματική αναπαράσταση αντιδραστήρων με εμβολική ροή

Αντιδραστήρας με ανάμιξη

Στους αντιδραστήρες με ανάμιξη, τα αντιδρώντα εισάγονται σε δοχείο, στο οποίο γίνεται μηχανική ή υδραυλική ανάμιξη, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται ομοιογενείς συγκεντρώσεις των συστατικών και διατήρηση της ομοιομορφίας των συνθηκών θερμοκρασίας, υποστρώματος και pH σε όλο τον όγκο του αντιδραστήρα (Εικόνα 13).

Βέβαια μέσα σε έναν αντιδραστήρα μπορεί να συνυπάρχουν φάσεις με διαφορετικές συνθήκες ανάμιξης, δηλαδή ο χωνευτήρας να είναι μερικώς αναδευόμενος και τότε τα αιωρούμενα στερεά της τροφοδοσίας μπορεί να καθιζάνουν και να συσσωρεύονται στο εσωτερικό του. Αν αυτό συμβαίνει για μεγάλες περιόδους λειτουργίας του χωνευτήρα οδηγεί στη δημιουργία νεκρών ζωνών στο εσωτερικό του και κατ' επέκταση στη μείωση της απόδοσης του.



Εικόνα 13: Τυπική σχηματική αναπαράσταση αντιδραστήρων με ανάμιξη

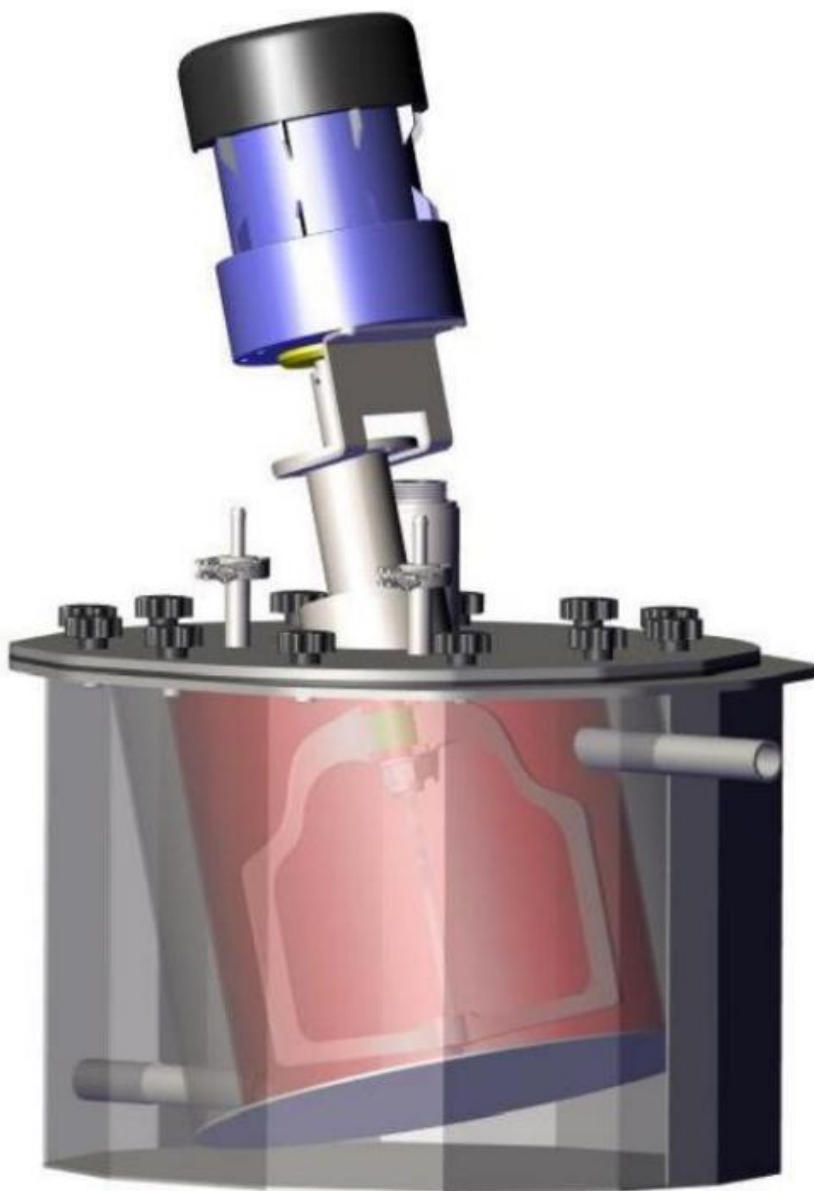
2.5 Συνοπτική παρουσίαση βιοαντιδραστήρα διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε αντιδραστήρας διαλείποντος έργου, η διάταξη του οποίου απεικονίζεται στην Εικόνα 14. Όπως βλέπουμε, ο βιοαντιδραστήρας αποτελείται από ένα κλειστό κυλινδρικό δοχείο υπό κλίση, μέσα στο οποίο τοποθετείται το προς επεξεργασία υλικό. Το δοχείο αυτό εμπεριέχεται μέσα σε ένα άλλο, μεγαλύτερων διαστάσεων δοχείο, το οποίο γεμίζει με νερό κατάλληλης θερμοκρασίας, μέσω σωληνώσεων που έχουν κολληθεί στα τοιχώματά του ώστε το εσωτερικό δοχείο να μπορεί να θερμαίνεται στην επιθυμητή θερμοκρασία μέσω ροής νερού (Εικόνα 15). Στην κορυφή του δοχείου προσαρμόζεται μεταλλικό καπάκι με λάστιχο, ώστε να επιτυγχάνεται στεγανότητα. Στο καπάκι αυτό έχουν ανοιχθεί οπές προκειμένου να εξάγεται το παραγόμενο βιοαέριο, αλλά και να είναι δυνατή η τοποθέτηση αισθητήρων για τη μέτρηση των παραμέτρων λειτουργίας, όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία του υλικού, η υγρασία, το pH, κ.α. Επίσης, στο εσωτερικό

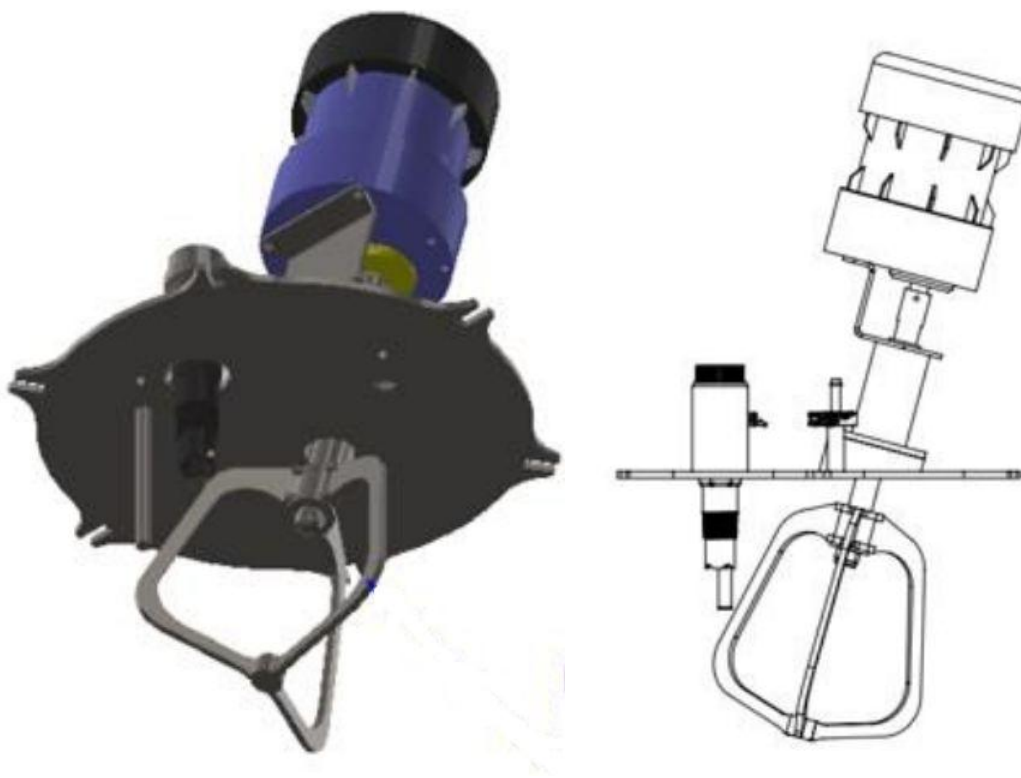
του βρίσκεται ένας εναλλάξιμος μαλακτήρας (Εικόνα 16), ο οποίος περιστρέφεται από κινητήρα προσαρμοσμένο στο καπάκι και η λειτουργία του οποίου μπορεί να ελεγχθεί από χρονοδιακόπτη, ώστε να εφαρμόζεται ανάδευση του υλικού ανά τακτά χρονικά διαστήματα και να επιτυγχάνεται ομογενοποίηση του περιεχομένου.



Εικόνα 14: Διάταξη του βιοαντιδραστήρα διαλείποντος έργου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία



Εικόνα 15: Σχέδιο του εργαστηριακού αντιδραστήρα διαλείποντος έργου με τρία σκέλη και πυθμένα υπό κλίση για καλύτερη ανάδευση.



Εικόνα 16: Σχέδιο μαλακτήρα που βρίσκεται εσωτερικά του αντιδραστήρα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ

3.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να είναι εφικτή η παρακολούθηση της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα σε πραγματικό χρόνο και η καταγραφή των κρίσιμων παραμέτρων λειτουργίας του (θερμοκρασία, υγρασία, κτλ) σε αρχείο για περαιτέρω επεξεργασία, είναι απαραίτητη η χρήση ενός μικροελεγκτή. Ο μικροελεγκτής αυτός μπορεί να διασυνδεθεί με κατάλληλους αισθητήρες και να προγραμματιστεί ώστε να μετράει και να καταγράφει τις επιθυμητές παραμέτρους του βιοαντιδραστήρα (θερμοκρασία, υγρασία, οξύτητα, κτλ.), αλλά και τις εξωτερικές συνθήκες, όπως ατμοσφαιρική θερμοκρασία, θερμοκρασία του νερού θέρμανσης του βιοαντιδραστήρα και να ειδοποιεί τον χρήστη σε περίπτωση που οι τιμές αποκλίνουν από κάποια όρια που θα μπορούν να προκαθοριστούν. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να καταγραφούν και σε αρχείο το οποίο αποθηκεύεται σε κατάλληλο μέσο (κάρτα μνήμης), προκειμένου να επεξεργαστούν στη συνέχεια σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Επιπλέον, με τη χρήση του μικροελεγκτή καθίσταται εφικτή και η αυτόματη μεταβολή των λειτουργικών παραμέτρων (για παράδειγμα η μεταβολή του pH) όταν οι μετρούμενες τιμές ξεπεράσουν προκαθορισμένα όρια. Για παράδειγμα, ελέγχεται η τιμή του pH και μόλις αυτή μειωθεί κάτω από 7 (όξινο περιβάλλον) να εγχέεται αυτόματα μια μικρή ποσότητα διαλύματος βάσης μέσα στο βιοαντιδραστήρα με σκοπό τη ρύθμιση της τιμής του pH κοντά στο 7, για βέλτιστη απόδοση και παραγωγή βιοαερίου.

Μια άλλη δυνατότητα που αναπτύχθηκε είναι αυτή της απομακρυσμένης παρακολούθησης, μέσω διασύνδεσης του μικροελεγκτή με κινητή πλατφόρμα, όπως για παράδειγμα ένα κινητό τηλέφωνο ή ένα tablet. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω ασύρματης σύνδεσης Bluetooth ή Wifi, χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο module και προσαρμόζοντας το λογισμικό ώστε να δίνεται η δυνατότητα ασύρματης μετάδοσης δεδομένων στην κινητή πλατφόρμα. Έτσι, δεν απαιτείται η παρουσία του χρήστη μέσα στο χώρο του βιοαντιδραστήρα προκειμένου να ελεγχθεί η λειτουργία του και να διαβαστούν οι παράμετροι λειτουργίας, αλλά αυτό μπορεί να γίνει και έξω από το κτήριο του αντιδραστήρα ή ακόμα και από μακριά, αν υπάρχει διασύνδεση του μικροελεγκτή με το διαδίκτυο.

Στην εργασία αυτή επιλέχθηκε η οικογένεια μικροελεγκτών που βασίζεται στο Arduino (ATmega328), καθώς και μια σειρά από αισθητήρες, που περιγράφονται στη συνέχεια. Τα βασικά κριτήρια της επιλογής της πλατφόρμας αυτής είναι η μεγάλη διαθεσιμότητα,

η χαμηλή τιμή, η απλότητα, η εύκολη ολοκλήρωση των εξαρτημάτων και των αισθητήρων στην πλατφόρμα, αλλά και η μεγάλη (και ολοένα αυξανόμενη) κοινότητα που υπάρχει στο διαδίκτυο, γεγονός που εγγυάται την παροχή πληροφοριών (datasheets, παραδείγματα χρήσης, σχεδιαγράμματα διασύνδεσης, κώδικας, κτλ.), αλλά και τη δυνατότητα χρήσης τους ελεύθερα, μιας και ανήκουν στη φιλοσοφία του ανοιχτού λογισμικού (open source).

3.2 Μικροελεγκτής Arduino

3.2.1 Η οικογένεια μικροελεγκτών Arduino

Ο μικροελεγκτής (microcontroller) είναι ένας απλοποιημένος τύπος επεξεργαστή, ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει με ελάχιστα εξωτερικά εξαρτήματα, λόγω των πολλών ενσωματωμένων υποσυστημάτων και λειτουργιών που διαθέτει. Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε όλα τα ενσωματωμένα συστήματα (embedded systems) ελέγχου χαμηλού και μεσαίου κόστους, όπως για παράδειγμα συστήματα αυτόματου ελέγχου, ηλεκτρονικά, παιχνίδια, ηλεκτρικές συσκευές κτλ.

Το Arduino είναι μία απλή πλακέτα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή (συνήθως Atmel AVR²³) και εισόδους/εξόδους, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring, που απαρτίζεται από τη γλώσσα προγραμματισμού C++ και ένα σύνολο από έτοιμες βιβλιοθήκες, υλοποιημένες επίσης στην C++. Οι περισσότερες εκδόσεις του Arduino μπορούν να αγοραστούν προ-συναρμολογημένες, αλλά τα σχεδιαγράμματα και οι πληροφορίες για το υλικό και τα εξαρτήματα είναι ελεύθερα διαθέσιμα για τους χρήστες που θέλουν να συναρμολογήσουν το Arduino μόνοι τους.








Το Arduino ξεκίνησε το 2005 στο Interaction Design Institute στην πόλη Ivrea της Ιταλίας²⁴, με στόχο να παρέχει έναν χαμηλού κόστους και εύκολο τρόπο για αρχάριους και επαγγελματίες να δημιουργήσουν συσκευές που αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους, χρησιμοποιώντας αισθητήρες και συσκευές ελέγχου, όπως για παράδειγμα ρελέ ή LEDs. Μερικά παραδείγματα τέτοιων συσκευών προοριζόμενα, αρχικά, για αρχάριους χρήστες, περιλαμβάνουν απλά ρομπότ, θερμοστάτες, εφαρμογές παιχνιδιών με φως, μικροαυτοματισμούς, ανιχνευτές κίνησης κτλ. Το όνομα Arduino προέκυψε από τον Αρντουίνο της Ιβρέας (Arduin of Ivrea), ο οποίος ήταν βασιλιάς της Ιταλίας από το 1002 έως το 1014²⁵. Η ευρεία αποδοχή της ιδέας του Arduino, καθώς και του οικοσυστήματός του, η απλότητα προγραμματισμού του, αλλά και η ανοιχτού κώδικα

λογική του, επέτρεψαν την ταχεία εξέλιξή του και τη μεγάλη επιτυχία του. Σήμερα υπάρχουν πλήθος πλακετών για ένα μεγάλο εύρος χρήσεων και η ανάπτυξή του συνεχίζεται με ταχείς ρυθμούς, καθώς η τεχνολογία των μικροεπεξεργαστών αναπτύσσεται.

Σε κάθε πλακέτα Arduino υπάρχει ένας μικροελεγκτής, καθώς και ένας μικρός αριθμός συνοδευτικών εξαρτημάτων (αντιστάσεις, δίοδοι, πυκνωτές, γραμμικός ρυθμιστής τάσης κτλ.), που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του. Οι πλακέτες κατασκευάζονται σχετικά εύκολα και με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό συνοδευτικών εξαρτημάτων προκειμένου να είναι οικονομικά προσιτές, χωρίς όμως να διακινδυνεύεται η εύρυθμη λειτουργία τους. Ο μικροελεγκτής είναι από κατασκευής προγραμματισμένος με ένα bootloader (μικρό κομμάτι κώδικα που εκτελείται αυτόματα μόλις ξεκινήσει τη λειτουργία του ο μικροελεγκτής), έτσι ώστε να μην χρειάζεται εξωτερικός προγραμματιστής και συνήθως ο προγραμματισμός του γίνεται μέσω της ενσωματωμένης θύρας usb που παρέχεται στην πλακέτα. Επειδή οι περισσότεροι μικροελεγκτές διαθέτουν ενσωματωμένη σειριακή επικοινωνία είναι απαραίτητο ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα προσαρμογής (chip) USB-to-Serial όπως το FTDI FT232²⁶, που συναντάται σε πολλές υλοποιήσεις σήμερα. Με τον τρόπο αυτό το Arduino μπορεί πολύ εύκολα να διασυνδεθεί σε οποιονδήποτε προσωπικό υπολογιστή μέσω θύρας usb και να προγραμματιστεί, χωρίς να απαιτείται η σύνδεση με πιο πολύπλοκα καλώδια. Η οικογένεια μικροελεγκτών Arduino έχει εξελιχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια και περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό από διαθέσιμες πλακέτες για πιθανές εφαρμογές. Μερικές από τις διαθέσιμες πλακέτες της «κλασσικής» οικογένειας Arduino φαίνονται στην Εικόνα 17.

Ο προγραμματισμός ενός Arduino γίνεται μέσω της εφαρμογής Arduino IDE²⁷. Το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης Arduino (IDE) είναι μια εφαρμογή πολλαπλών πλατφορμών (για Microsoft Windows, macOS και Linux) που είναι γραμμένη στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Προέρχεται από το IDE για τις γλώσσες Processing και Wiring και περιλαμβάνει ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κώδικα με λειτουργίες όπως αποκοπή και επικόλληση κειμένου, αναζήτηση και αντικατάσταση κειμένου, αυτόματη εσοχή, αντιστοίχιση αγκυλών και επισήμανση σύνταξης και παρέχει απλούς μηχανισμούς με ένα κλικ για τη μεταγλώττιση και τη μεταφόρτωση προγραμμάτων στην πλακέτα Arduino μέσω σειριακής σύνδεσης μεταφοράς δεδομένων, ή σύνδεσης usb to serial, όπως αναφέρεται πιο πάνω. Περιέχει, επίσης, μια περιοχή μηνυμάτων στο κάτω μέρος, καθώς και μια κονσόλα κειμένου, μια γραμμή εργαλείων με κουμπιά για κοινές λειτουργίες και μενού λειτουργίας. Ο πηγαίος κώδικας για το IDE κυκλοφορεί με

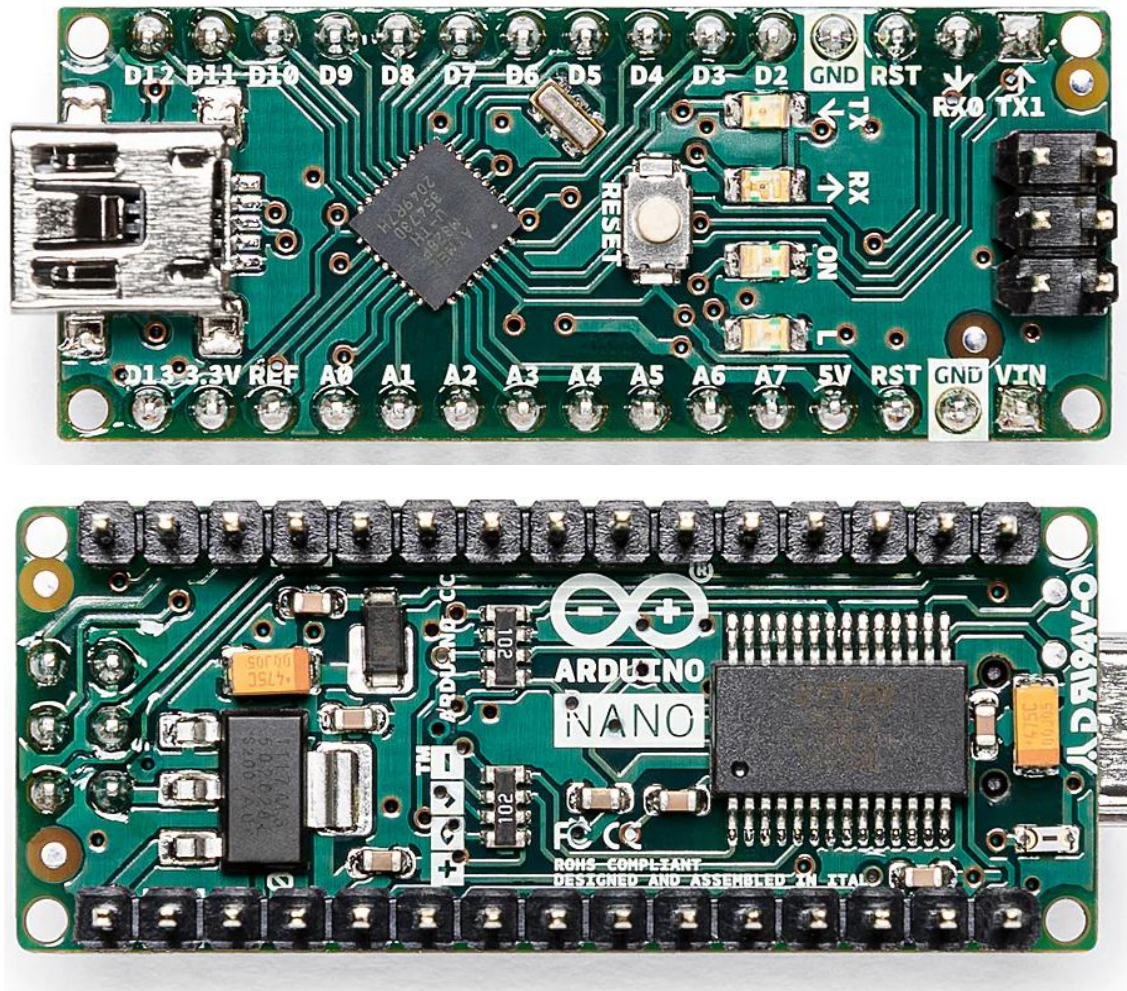
τη Γενική Δημόσια Άδεια GNU, έκδοση 2. Το Arduino IDE υποστηρίζει τις γλώσσες C και C++ χρησιμοποιώντας ειδικούς κανόνες δόμησης κώδικα. Ο κώδικας χρήστη απαιτεί μόνο δύο βασικές συναρτήσεις, μια για την εκκίνηση και την αρχικοποίηση των παραμέτρων και μια δεύτερη που αποτελεί τον κύριο βρόχο του προγράμματος, ο οποίος εκτελείται διαρκώς σε κυκλική πορεία. Το Arduino IDE χρησιμοποιεί το πρόγραμμα avrdude για να μετατρέψει τον εκτελέσιμο κώδικα σε αρχείο κειμένου σε δεκαεξαδική κωδικοποίηση, το οποίο στη συνέχεια φορτώνεται στην πλακέτα Arduino από ένα πρόγραμμα φόρτωσης στο υλικολογισμικό (firmware) της πλακέτας.

			
Arduino UNO R3	Arduino Mega 2560 Rev3	Arduino Leonardo	Arduino UNO Mini Limited Edition
			
Arduino Due	Arduino Micro	Arduino Zero	Arduino UNO WiFi Rev2

Εικόνα 17: Πλακέτες της κλασσικής οικογένειας Arduino (πηγή: <https://www.arduino.cc/en/hardware>)

3.2.2 Ο μικροελεγκτής Arduino Nano

Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε η πλακέτα Arduino nano, που βασίζεται στο μικροελεγκτή Atmel AVR ATmega328²⁸, ο οποίος είναι χρονισμένος στα 16 MHz. Η πλακέτα αυτή είναι πολύ μικρή σε μέγεθος (διαστάσεις μόλις 18X45 χιλιοστά), αλλά περιέχει όλες εκείνες τις λειτουργίες που απαιτούνται και οι οποίες διατίθενται και σε μεγαλύτερες σε μέγεθος πλακέτες. Η κάτοψή της φαίνεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18: Πλακέτα Arduino nano (άνω και κάτω όψη) (πηγή: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>)

Στο ένα άκρο της πλακέτας υπάρχει η διεπαφή mini usb, με την οποία επιτυγχάνεται η σύνδεση με υπολογιστή και ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή. Μέσω της εισόδου αυτής μπορεί, επιπλέον, να παρέχεται και τάση 5 volt, η οποία τροφοδοτεί τα κυκλώματα της πλακέτας και επομένως όσο είναι συνδεδεμένη με τον υπολογιστή μπορεί να λειτουργεί, χωρίς άλλη εξωτερική τροφοδοσία. Δεξιά της υποδοχής micro usb βρίσκεται ο μικροελεγκτής ATmega328 και μερικά συνοδευτικά εξαρτήματα, όπως κουμπί για την επανεκκίνηση (reset) της πλακέτας, ο κρύσταλλος χρονισμού (16 MHz), βοηθητικά LED με ενδείξεις για τη σειριακή επικοινωνία (Rx, Tx), ένδειξη λειτουργίας, καθώς και βοηθητικό επιπλέον LED που μπορεί να ελεγχθεί από τον χρήστη. Στην πίσω όψη της πλακέτας βρίσκεται ο γραμμικός ρυθμιστής τάσης, καθώς και το κύκλωμα USB-to-Serial FTDI FT232RL που είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία με τον υπολογιστή.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Arduino nano φαίνονται στον Πίνακα 2. Ο μικροελεγκτής περιλαμβάνει 32 KB μνήμης τύπου flash για τη μεταφόρτωση του προγράμματος χρήστη, 2 KB στατικής μνήμης τυχαίας προσπέλασης τύπου SRAM για την προσωρινή αποθήκευση των μεταβλητών του προγράμματος, καθώς και 1 KB μόνιμης, επανεγράψιμης, μνήμης τύπου EEPROM για ενδεχόμενη αποθήκευση παραμέτρων που θα διατηρούνται ακόμα και με απώλεια τάσης ή επανεκκίνηση του επεξεργαστή. Περιλαμβάνονται, επίσης 8 αναλογικές είσοδοι με ανάλυση 10 bit (1024 διαφορετικές τιμές), καθώς και 22 ψηφιακές είσοδοι/έξοδοι, εκ των οποίων οι 6 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έξοδοι τάσης με διαμόρφωση κατά πλάτος (PWM). Οι ψηφιακές είσοδοι/έξοδοι μπορούν να λειτουργήσουν σε τάση 5 volt και να δώσουν ή να δεχτούν ρεύματα έως 40 mA το πολύ. Η πλακέτα μπορεί να τροφοδοτηθεί, είτε από την είσοδο usb, με 5 volt, είτε από δύο εισόδους (Vin και GND), με τάση που μπορεί να κυμαίνεται από 7 έως 12 volts, με το κύκλωμα σταθεροποιημένης τάσης να αναλαμβάνει την τροφοδοσία του μικροελεγκτή με την τάση των 5 volt που απαιτείται. Στη συνέχεια, ένας άλλος σταθεροποιητής τάσης παράγει και την τάση των 3.3 volt που απαιτείται για τη λειτουργία ορισμένων κυκλωμάτων του μικροελεγκτή. Εσωτερικά στο μικροελεγκτή, επίσης, παράγεται και μια σταθερή τάση 1.1 volt, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως τάση αναφοράς για τις αναλογικές εισόδους, σε περίπτωση που δεν επιθυμούμε να χρησιμοποιείται η τάση των 5 volt, που είναι η τυπική τάση αναφοράς για το μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (DAC). Η κατανάλωση της πλακέτας, χωρίς συνδεδεμένες εξωτερικές συσκευές, είναι μόλις 19 mA, γεγονός που της επιτρέπει να τροφοδοτείται από οποιοδήποτε μικρό τροφοδοτικό, ακόμα και από μπαταρίες.

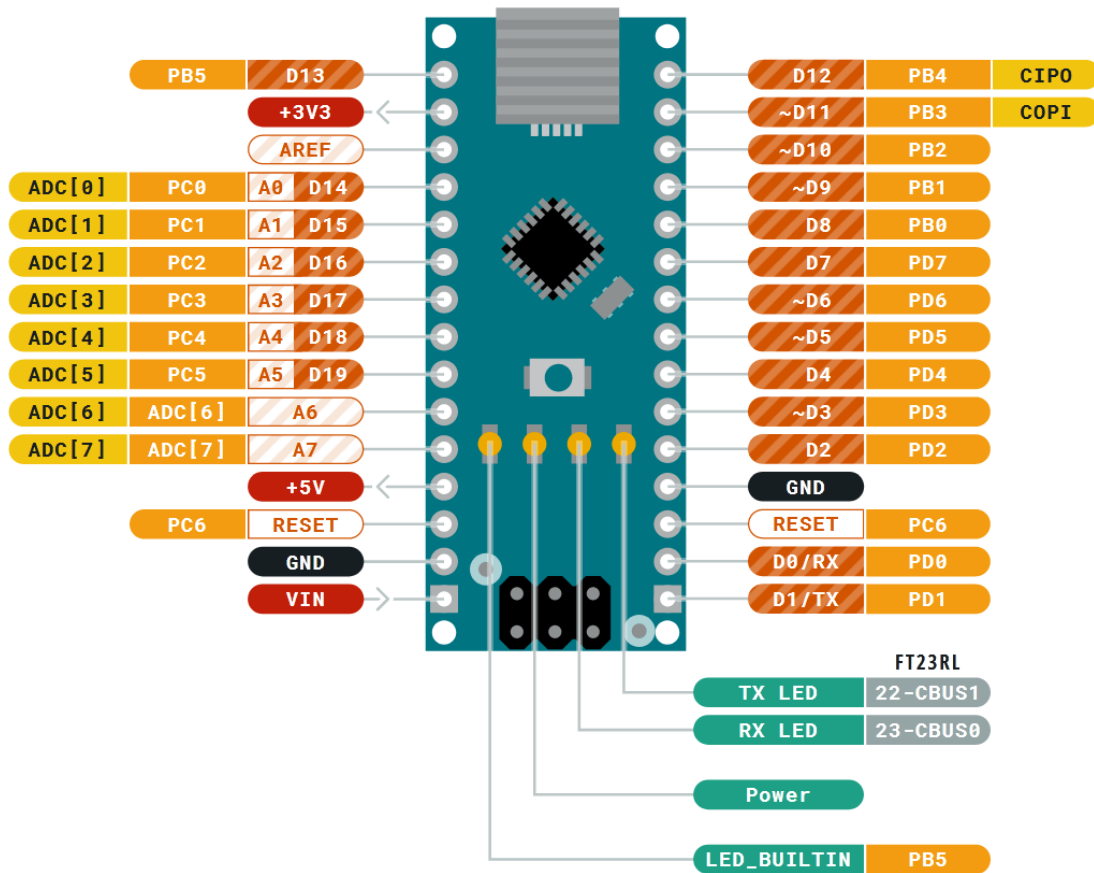
Στην Εικόνα 19 φαίνεται το αναλυτικό διάγραμμα των ακροδεκτών του Arduino nano. Παρατηρούμε ότι η πλακέτα παρέχει έναν ακροδέκτη με σταθεροποιημένη τάση 5 volt και ένα δεύτερο ακροδέκτη με τάση 3.3 volt, για την τροφοδοσία εξωτερικών συσκευών, όπως για παράδειγμα τους αισθητήρες. Υπάρχουν δύο ακροδέκτες για σειριακή επικοινωνία (Rx, Tx), καθώς και 4 ακροδέκτες (pins 10, 11, 12, 13) για τη σύνδεση συσκευών που επικοινωνούν με το πρωτόκολλο SPI, αλλά και δύο επιπλέον ακροδέκτες (pins A4, A5) για επικοινωνία συσκευών που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο I2C.

Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε το Arduino nano, καθώς και μια σειρά από αισθητήρες, τους οποίους θα αναλύσουμε, προκειμένου να μετρηθούν οι παράμετροι λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα, να απεικονιστούν σε οθόνη, να καταγραφούν σε αρχείο κτλ. Για ευκολία στη σύνδεση των διαφόρων εξαρτημάτων με το Arduino nano

χρησιμοποιήθηκε μια ειδική πλακέτα (shield) πάνω στην οποία κουμπώνει το Arduino nano και οι ακροδέκτες του οδηγούνται σε ειδικά pins, όπου μπορούμε εύκολα να συνδέσουμε και να αποσυνδέσουμε τους αισθητήρες και τις συσκευές, χωρίς να χρειάζεται κάθε φορά να κολλάμε τα καλώδια με καλάϊ. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε εύκολα να κάνουμε δοκιμές, χωρίς να χρειάζεται μόνιμη συγκόλληση των καλωδίων και έτσι επιτυγχάνουμε ευελιξία στη σχεδίαση του κυκλώματός μας.

MICROCONTROLLER	ATmega328
ARCHITECTURE	AVR
OPERATING VOLTAGE	5 V
FLASH MEMORY	32 KB of which 2 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
CLOCK SPEED	16 MHz
ANALOG IN PINS	8
EEPROM	1 KB
DC CURRENT PER I/O PINS	40 mA (I/O Pins)
INPUT VOLTAGE	7-12V
DIGITAL I/O PINS	22 (6 of which are PWM)
PWM OUTPUT	6
POWER CONSUMPTION	19 mA
PCB SIZE	18 x 45 mm
WEIGHT	7 g

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του Arduino nano (πηγή: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>)



Εικόνα 19: Σχεδιάγραμμα των ακροδεκτών του Arduino nano (πηγή: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>)

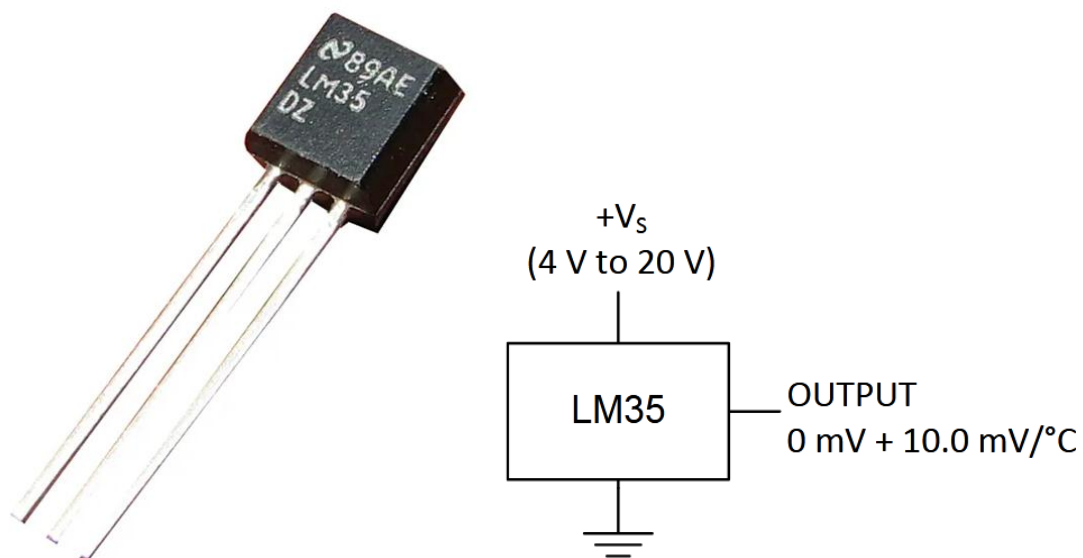
3.3 Αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και οξύτητας

3.3.1 Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας

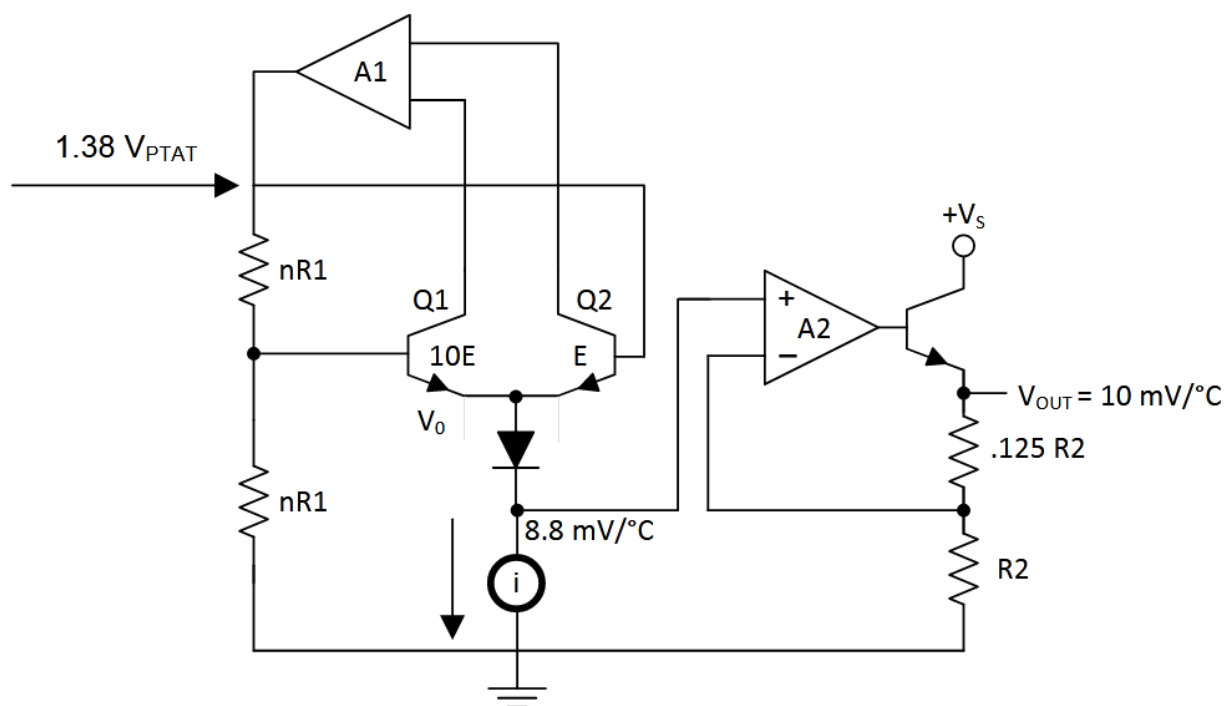
Για τη μέτρηση θερμοκρασιών με μικροελεγκτή υπάρχει σήμερα μια πλειάδα μεθόδων, καθεμία από τις οποίες παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ανάλογα την εφαρμογή²⁹. Για παράδειγμα, η μέτρηση θερμοκρασίας με θερμοζεύγος παρουσιάζει το πλεονέκτημα της μεγάλης ακρίβειας και της λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά απαιτείται ξεχωριστό κύκλωμα ενίσχυσης προκειμένου να μπορεί να διαβαστεί η πολύ μικρή τάση που παράγει το θερμοζεύγος και να μεταφραστεί σε τιμές θερμοκρασίας.

Μια δεύτερη επιλογή αποτελεί το θερμίστορ, το οποίο απαιτεί τροφοδοσία με σταθερή τάση και είναι δυνατόν να έχει καλή ακρίβεια, εάν γνωρίζει κανείς την καμπύλη βαθμονόμησής του από τον κατασκευαστή. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος χρήσης του είναι σχηματίζοντας ένα διαιρέτη τάσης με μια αντίσταση γνωστής τιμής και μετρώντας την τάση στα άκρα του θερμίστορ με το Arduino. Δυστυχώς όμως η καμπύλη απόκρισης του θερμίστορ δεν είναι γραμμική, δηλαδή η αντίστασή του δεν είναι γραμμική συνάρτηση με τη θερμοκρασία και περιγράφεται από την εξίσωση Steinhart–Hart³⁰. Ο ακριβής υπολογισμός της θερμοκρασίας με βάση την εξίσωση αυτή μπορεί να υλοποιηθεί με το Arduino, αλλά θα πρέπει να γνωρίζουμε τους τρεις συντελεστές A,B,C της εξίσωσης, οι οποίοι είναι διαφορετικοί για κάθε τύπο θερμίστορ και διαφέρουν από κατασκευαστή σε κατασκευαστή.

Προκειμένου να μπορούμε να μετρήσουμε με ακρίβεια τις θερμοκρασίες μέσα στο βιοαντιδραστήρα, αλλά και έξω από αυτόν, επιλέξαμε τη λύση του ολοκληρωμένου κυκλώματος LM35DZ³¹. Το κύκλωμα αυτό είναι ένα μικρό ολοκληρωμένο κύκλωμα τριών ακροδεκτών, του οποίου η έξοδος είναι γραμμικά ανάλογη της θερμοκρασίας και επιπλέον είναι βαθμονομημένη στην κλίμακα Κελσίου. Το κύκλωμα αυτό δεν απαιτεί επιπρόσθετα εξωτερικά εξαρτήματα για τη λειτουργία του, ούτε χρειάζεται βαθμονόμηση, αφού αυτή πραγματοποιείται στο εργοστάσιο κατασκευής, πριν ακόμη κοπεί το wafer και πακεταριστούν οι αισθητήρες. Μπορεί να μετρήσει θερμοκρασίες από $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$, με ακρίβεια μικρότερη από $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Απαιτεί τροφοδοσία που μπορεί να κυμαίνεται από 4 έως 20 Volt DC και καταναλώνει ένα πολύ μικρό ρεύμα, της τάξης των 60 μA . Στην έξοδό του παράγει μια τάση (ως προς τη γη) που είναι απολύτως ανάλογη της θερμοκρασίας σε $^{\circ}\text{C}$ και πιο συγκεκριμένα αναπτύσσει τάση $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$. Για τις τυπικές τιμές θερμοκρασίας που αναμένεται να μετρήσουμε ($20\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$), η τάση που θα δίνει το ολοκληρωμένο στην έξοδό του θα κυμαίνεται από 200 έως 500 mV και επομένως είναι εφικτό να μετρηθεί με το Arduino. Στην Εικόνα 20 φαίνεται το ολοκληρωμένο κύκλωμα σε συσκευασία (package) TO-92, που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και το σχηματικό του διάγραμμα, ενώ στην Εικόνα 21 φαίνεται αναλυτικά το κυκλωματικό του διάγραμμα, όπως απεικονίζεται από τον κατασκευαστή στο datasheet³¹.



Εικόνα 20: Το ολοκληρωμένο LM35DZ (αριστερά) και το σχηματικό του διάγραμμα (δεξιά)



Εικόνα 21: Κυκλωματικό διάγραμμα του ολοκληρωμένου LM35DZ

Συνδεσμολογία στο Arduino και μέτρηση της θερμοκρασίας

Για να συνδέσουμε το LM35DZ στο Arduino ακολουθούμε τα εξής απλά βήματα: Συνδέουμε τον ακροδέκτη τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου στην έξοδο 5 V του Arduino και τον ακροδέκτη γείωσης στον ακροδέκτη της γείωσης του Arduino. Το μεσαίο ακροδέκτη (pin) του ολοκληρωμένου, που είναι και η έξοδός του, το συνδέουμε σε μία από τις αναλογικές εισόδους, για παράδειγμα στην A0, ώστε να μπορούμε να διαβάσουμε την τάση που δίνει, ως προς την τάση αναφοράς (γη). Στη συνέχεια, με την εντολή `analogRead` του Arduino διαβάζουμε την τιμή της τάσης στον ακροδέκτη A0, ως εξής:

```
temp1 = analogRead(A0);
```

Η εντολή αυτή αποθηκεύει την τιμή που διαβάζει από την αναλογική θύρα A0 στη μεταβλητή `temp1`. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η εντολή `analogRead` επιστρέφει μια τιμή από 0 έως 1023, σε αναλογία με την τάση που διαβάζει ο `analog to digital converter (ADC)` του Arduino, ο οποίος χρησιμοποιεί ως τάση αναφοράς την τάση των 5 V της πλακέτας. Επομένως η τάση 0 V θα αντιστοιχεί στην τιμή 0, ενώ μια τάση 5 V θα αντιστοιχεί στην τιμή 1023. Έτσι, πολλαπλασιάζοντας τη μεταβλητή με 5 και διαιρώντας με το 1023 μπορούμε να μετατρέψουμε τη μετρούμενη τιμή σε Volt.

Μια δυσκολία που ανακύπτει με τη μέθοδο αυτή είναι η ακρίβεια (resolution) των μετρήσεων. Ο μετατροπέας ADC έχει περιορισμένη ακρίβεια 10 Bits και επομένως το εύρος τάσεων 0-5 V μπορεί να χωριστεί μονάχα σε 1023 τιμές, δίνοντας μια ανάλυση περίπου 4.9 mV ανά υποδιαίρεση (step) του ADC. Αυτό μπορεί να μεταφραστεί σε περίπου 0.5 °C ακρίβεια στις μετρήσεις της θερμοκρασίας. Ένα δεύτερο πρόβλημα είναι δυνατόν να ανακύψει από τη μη σταθερή τάση τροφοδοσίας των 5 V, εάν τροφοδοτήσουμε την πλακέτα από την είσοδο `usb`. Αυτό μπορεί να επηρεάσει το μετατροπέα ADC, αφού αυτή η τάση χρησιμοποιείται και σαν τάση αναφοράς του μετατροπέα. Η λύση στην περίπτωση μας είναι να χρησιμοποιήσουμε την εσωτερική τάση των 1.1 V, η οποία παράγεται μέσα στον μικροελεγκτή και είναι απόλυτα σταθερή και ανεξάρτητη από την τάση τροφοδοσίας των 5 V στην πλακέτα. Αυτό επιτυγχάνεται δίνοντας την εντολή:

```
analogReference(INTERNAL);
```

Η εντολή αυτή γράφεται στην αρχή του προγράμματος, στη ρουτίνα «`setup`» και προκαλεί την αλλαγή της τάσης αναφοράς του μετατροπέα ADC στα 1.1 V. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται τα προβλήματα που ανακύπτουν από τις μεταβολές της

τάσης τροφοδοσίας, αλλά ταυτόχρονα βελτιώνεται και η ακρίβεια των μετρήσεών μας. Πλέον η αναλογική είσοδος θα μπορεί να μετράει τάσεις που κυμαίνονται από 0 έως 1.1 V, έχοντας δηλαδή μια ακρίβεια 1.075 mV. Αυτό μπορεί να μεταφραστεί σε μια ακρίβεια μετρήσεως (resolution) θερμοκρασίας καλύτερη από 0.1 °C. Το μόνο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η αδυναμία μέτρησης τάσεων μεγαλύτερων από 1.1 V. Στην περίπτωση μας όμως αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, μιας και η μέγιστη έξοδος του ολοκληρωμένου LM35DZ θα είναι περίπου 0.5 V για τις θερμοκρασίες που αναμένεται να μετρήσουμε.

Κώδικας για τη μέτρηση θερμοκρασίας

Για να επιτύχουμε σταθερότερες μετρήσεις και να εξαλείψουμε τυχόν θόρυβο, χρησιμοποιούμε μια ρουτίνα που αθροίζει ένα προκαθορισμένο αριθμό μετρήσεων από την είσοδο του Arduino και στη συνέχεια διαιρεί με το πλήθος των μετρήσεων αυτών, βγάζοντας τον μέσο όρο. Η αλληλουχία του κώδικα φαίνεται αναλυτικά παρακάτω:

```
const int average_num = 700;

for (int i = 0; i < average_num; i++) {

temp1 = temp1 + analogRead(A0);

}

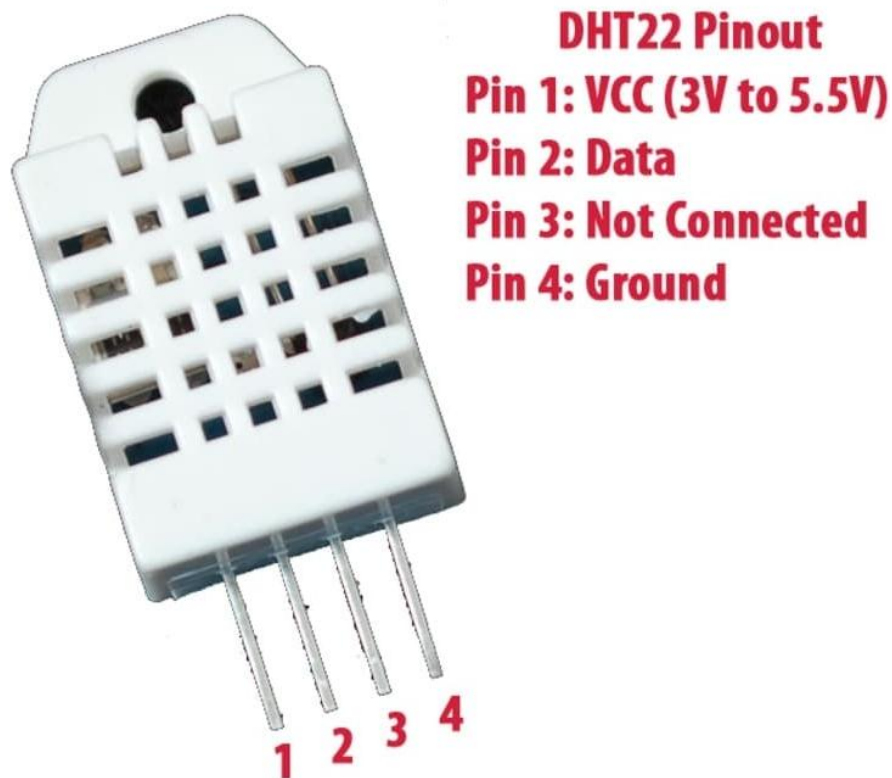
Bioreactor_temp = temp1 / average_num;

Bioreactor_temp = Bioreactor_temp*100.0*1.1/1023.0;
```

Στη σταθερά `average_num` δηλώνουμε πόσες φορές θέλουμε να γίνει η άθροιση και στη συνέχεια χρησιμοποιούμε ένα `Do loop` για να κάνουμε την άθροιση σε μια μεταβλητή (`temp1`). Μετά, διαιρούμε με τον αριθμό των μετρήσεων για να βρούμε το μέσο όρο και στη συνέχεια πολλαπλασιάζουμε με το 1.1 και διαιρούμε με το 1023 για να μετατρέψουμε τον αριθμό που διαβάσαμε σε Volt. Τέλος πολλαπλασιάζουμε το αποτέλεσμα με το 100 για να το μετατρέψουμε σε θερμοκρασία, αφού το LM35DZ βγάζει 10 mV/ °C στην έξοδο του.

3.3.2 Αισθητήρας μέτρησης υγρασίας

Για τη μέτρηση της υγρασίας μέσα στο βιοαντιδραστήρα αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας DHT22³², ο οποίος προσφέρει εύκολη ολοκλήρωση και επικοινωνία με την πλατφόρμα Arduino. Ο αισθητήρας αυτός περιλαμβάνει έναν αισθητήρα υγρασίας που μπορεί να μετράει τη σχετική υγρασία του περιβάλλοντος αέρα στο πλήρες εύρος τιμών 0-100%, καθώς και έναν αισθητήρα θερμοκρασίας. Η ακρίβεια μέτρησης υγρασίας είναι $\pm 2\%$, ενώ της θερμοκρασίας $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Η τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος μπορεί να είναι 3.3-6V DC με μέγιστη κατανάλωση ρεύματος μόλις 1.5 mA όταν πραγματοποιεί μετρήσεις. Περιλαμβάνεται, επίσης, και ένα κατάλληλο κύκλωμα που πραγματοποιεί τις μετρήσεις και είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία με το Arduino, μέσω μιας έτοιμης βιβλιοθήκης, η οποία ενσωματώνεται στον κώδικα. Όλα τα κυκλώματα αυτά περιλαμβάνονται σε ένα μικρό πλαστικό περίβλημα με 4 ακροδέκτες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 22: Αισθητήρας μέτρησης υγρασίας –θερμοκρασίας DHT22

Η σύνδεσή του με το Arduino είναι απλή και περιλαμβάνει τροφοδοσία με τάση 5 V από την πλακέτα του Arduino (αφού η κατανάλωσή του είναι πολύ μικρή), ενώ ο ακροδέκτης 2 του ολοκληρωμένου συνδέεται σε μια ψηφιακή είσοδο στο Arduino. Ο ακροδέκτης 3 του ολοκληρωμένου δε χρησιμοποιείται.

Η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα υγρασίας βασίζεται στη μεταβολή της χωρητικότητας ενός πολυμερικού πυκνωτή με την υγρασία^{29,33}. Μπορούμε να φανταστούμε τον αισθητήρα υγρασίας σαν ένα μικρό πυκνωτή ο οποίος αποτελείται από ένα υγροσκοπικό διηλεκτρικό υλικό τοποθετημένο μεταξύ ενός ζεύγους αγώγιμων ηλεκτροδίων. Οι περισσότεροι χωρητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν πλαστικό ή πολυμερές ως διηλεκτρικό υλικό, με τυπική διηλεκτρική σταθερά που κυμαίνεται από 2 έως 15. Όταν δεν υπάρχει υγρασία στον αισθητήρα, η τιμή της χωρητικότητας καθορίζεται από αυτή τη σταθερά, αλλά και από τη γεωμετρία του αισθητήρα. Η διηλεκτρική σταθερά των υδρατμών έχει τιμή περίπου 80, που είναι πολύ μεγαλύτερη από τη σταθερά του διηλεκτρικού υλικού του αισθητήρα. Επομένως, η απορρόφηση υγρασίας από τον αισθητήρα θα έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της χωρητικότητας του αισθητήρα. Χρησιμοποιώντας κατάλληλο κύκλωμα μπορούμε να μετρήσουμε τη χωρητικότητα αυτή και να την αντιστοιχίσουμε με τις τιμές της σχετικής υγρασίας στο διηλεκτρικό.

Για την τοποθέτηση του αισθητήρα μέσα στο κέλυφος του βιοαντιδραστήρα απαιτήθηκε η κατασκευή ενός προσαρμογέα ο οποίος βιδώνεται σε μια από τις οπές που υπάρχουν στο κέλυφος του αντιδραστήρα. Για την καλύτερη προσαρμογή εκτυπώθηκε σε 3D printer ένας κατάλληλος προσαρμογέας, ο οποίος είχε οπή στο εσωτερικό του, μέσα από την οποία διέρχονταν τα καλώδια επικοινωνίας του αισθητήρα με το Arduino. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε θερμοκόλλα σιλικόνης προκειμένου να σταθεροποιηθεί ο αισθητήρας και να μονωθεί κατάλληλα, ώστε να μην υπάρχουν κενά από τα οποία θα μπορούσε να διαφύγει το βιοαέριο. Ο προσαρμογέας, με τοποθετημένο τον αισθητήρα υγρασίας, φαίνεται στην Εικόνα 23.



Εικόνα 23: Προσαρμογέας εκτυπωμένος σε 3D printer για την ασφαλή τοποθέτηση του αισθητήρα υγρασίας μέσα στο βιοαντιδραστήρα

Κώδικας για τη μέτρηση υγρασίας

Αρχικά, στο ξεκίνημα του προγράμματος θα πρέπει να ενσωματωθεί η βιβλιοθήκη του DHT22, η οποία παρέχεται από τον κατασκευαστή. Αυτό γίνεται με την παρακάτω εντολή:

```
#include "DHT.h"
```

Στη συνέχεια γίνεται η δήλωση του αισθητήρα με την εντολή:

```
DHT dht(4, DHT22);
```

Όπου δηλώνεται και ότι η επικοινωνία του ολοκληρωμένου θα πραγματοποιείται από την ψηφιακή είσοδο/έξοδο με αριθμό 4 του Arduino. Στη συνέχεια, δίνεται η εντολή για την εκκίνηση του αισθητήρα:

```
dht.begin();
```

Πλέον, σε οποιοδήποτε σημείο του προγράμματος ζητηθεί η μέτρηση της υγρασίας, αυτή μπορεί να διαβαστεί και να αποθηκευτεί σε μια μεταβλητή με την παρακάτω απλή εντολή:

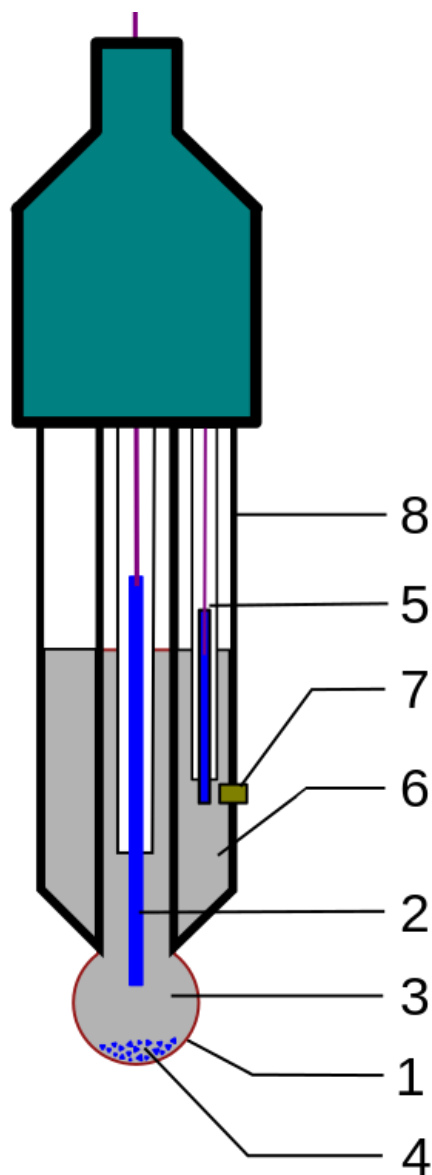
```
humidity = dht.readHumidity();
```

3.3.3 Αισθητήρας μέτρησης οξύτητας-pH

Για την ακριβή μέτρηση της οξύτητας του υλικού που βρίσκεται μέσα στον βιοαντιδραστήρα είναι απαραίτητη η χρήση ενός ηλεκτροδίου μέτρησης pH, το οποίο βυθίζεται μέσα στο υλικό. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην ποτενσιομετρική μέτρηση των ιόντων υδρογόνου μέσα σε ένα διάλυμα, με την χρήση ενός ενδεικτικού ηλεκτροδίου και ενός ηλεκτροδίου αναφοράς^{34,35,36}. Το δυναμικό του ενδεικτικού ηλεκτροδίου εξαρτάται από τη συγκέντρωση των ιόντων υδρογόνου στο διάλυμα.

Ο συνηθέστερος τύπος ηλεκτροδίου μέτρησης pH είναι το ηλεκτρόδιο υάλου (glass electrode^{37,38}). Η σχηματική αναπαράσταση ενός τέτοιου ηλεκτροδίου, καθώς και τα μέρη από τα οποία αποτελείται φαίνονται στην Εικόνα 24. Πιο αναλυτικά, το ηλεκτρόδιο αποτελείται από τα εξής μέρη:

1. Το αισθητήριο τμήμα του ηλεκτροδίου, που είναι ένας γυάλινος σωλήνας κατασκευασμένος από ένα συγκεκριμένο τύπο γυαλιού
2. Το εσωτερικό ηλεκτρόδιο, που είναι συνήθως ηλεκτρόδιο χλωριούχου αργύρου
3. Ένα εσωτερικό διάλυμα, που συνήθως είναι ένα ρυθμιστικό διάλυμα με pH=7 φτιαγμένο από 0.1 mol/L KCl
4. Μια μικρή ποσότητα AgCl που μπορεί να κατακρημνιστεί μέσα στο γυάλινο ηλεκτρόδιο όταν χρησιμοποιείται ηλεκτρόδιο χλωριούχου αργύρου
5. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Συνήθως είναι ίδιου τύπου με το εσωτερικό ηλεκτρόδιο
6. Το εσωτερικό διάλυμα αναφοράς, συνήθως 0.1 mol/L KCl
7. Μια ένωση με το υπό μελέτη διάλυμα, συνήθως κατασκευασμένη από κεραμικά ή ίνες χαλαζία.
8. Το σώμα του ηλεκτροδίου, κατασκευασμένο από μη αγώγιμο γυαλί ή πλαστικό.

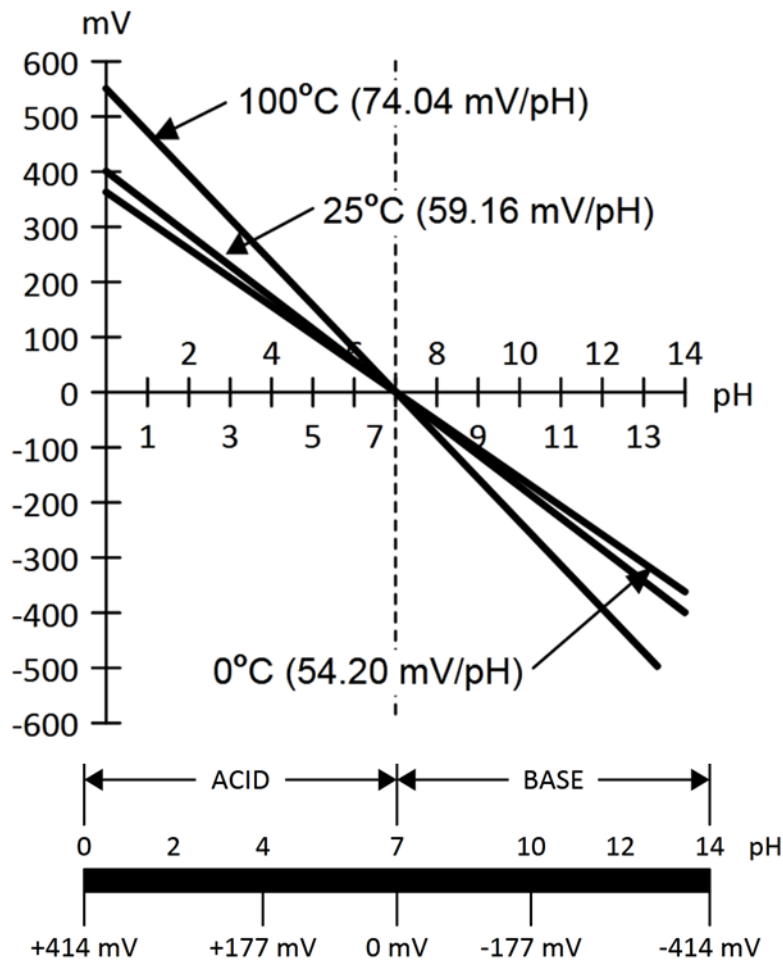


Εικόνα 24: Σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού ηλεκτροδίου υάλου (πηγή: <https://en.wikipedia.org>)

Αυτός ο σχεδιασμός ηλεκτροδίων δημιουργεί ένα περιβάλλον με συνεχή δέσμευση ιόντων H^+ στο εσωτερικό της υάλινης μεμβράνης, ενώ το εξωτερικό της εκτίθεται στο δείγμα προς μέτρηση, όπου υπάρχει μεταβλητή ποσότητα ιόντων H^+ . Η διαφορά στα ιόντα H^+ δημιουργεί ένα δυναμικό που διαβάζεται έναντι του σταθερού δυναμικού του ηλεκτροδίου αναφοράς. Για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού απαιτούνται δύο σημεία με διαφορετικές τιμές ηλεκτρικού δυναμικού. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς έχει σχεδιαστεί για να διατηρεί σταθερό ηλεκτρικό δυναμικό που είναι ανεξάρτητο από τη σύνθεση του δείγματος και τη θερμοκρασία. Αντίθετα, το επιλεκτικό ηλεκτρόδιο ιόντων

που βρίσκεται στη γυάλινη μεμβράνη παρέχει ένα ηλεκτρικό δυναμικό που εξαρτάται από τη συγκέντρωση των ιόντων υδρογόνου (H^+) στο διάλυμα του δείγματος. Επομένως, τόσο το ηλεκτρόδιο αναφοράς όσο και το ηλεκτρόδιο υδρογόνου χρειάζονται κατά τον προσδιορισμό του pH και μάλιστα η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο αυτών ηλεκτροδίων θα δίνει την τιμή του pH στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα.

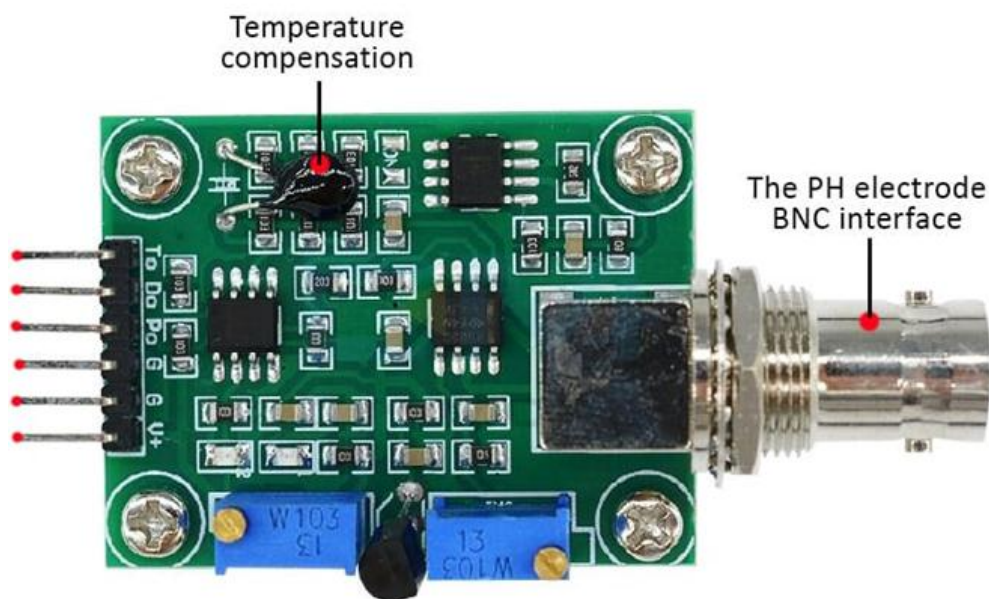
Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού στα άκρα των ηλεκτροδίων είναι γραμμικά ανάλογη με την τιμή του pH, όπως φαίνεται στην Εικόνα 25. Η κλίση της ευθείας, όμως εξαρτάται και από τη θερμοκρασία και για το λόγο αυτό συνήθως υπάρχει και ένας αισθητήρας θερμοκρασίας δίπλα στο ηλεκτρόδιο pH, ώστε να πραγματοποιείται αυτόματα η διόρθωση από το κατάλληλο κύκλωμα που διαβάζει και απεικονίζει την τιμή του pH.



Εικόνα 25: Εξάρτηση της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των ηλεκτροδίων ενός ηλεκτροδίου υάλου ως συνάρτηση της τιμής του pH (πηγή: AN-1852 Designing with pH Electrodes, Texas Instruments³⁹)

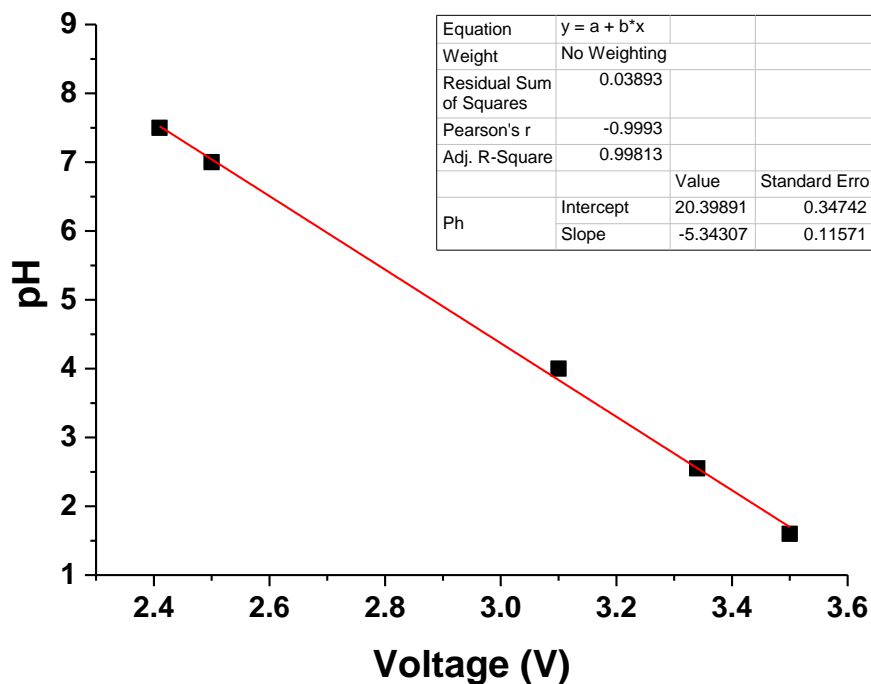
Όλα τα γυάλινα ηλεκτρόδια pH έχουν εξαιρετικά υψηλή ηλεκτρική αντίσταση που κυμαίνεται από 50 έως 500 MΩ. Επομένως, η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των ηλεκτροδίων είναι αδύνατη με τις τυπικές συσκευές μέτρησης, όπως για παράδειγμα ένα πολύμετρο, ή με το Arduino, λόγω του ότι η εσωτερική τους αντίσταση είναι κατά πολύ μικρότερη από αυτή του ηλεκτροδίου. Έτσι, απαιτείται μια συσκευή μέτρησης υψηλής σύνθετης αντίστασης εισόδου, όπως για παράδειγμα ένας μετρητής pH, ή ένα ειδικό βολτόμετρο υψηλής αντίστασης εισόδου που ονομάζεται ηλεκτρόμετρο. Εναλλακτικά, η διαφορά δυναμικού του ηλεκτροδίου μπορεί να ενισχυθεί από ένα κύκλωμα τελεστικών ενισχυτών με πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου, ώστε να είναι δυνατή η μέτρησή του από ένα κοινό βολτόμετρο ή από το Arduino.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε ένα εμπορικά διαθέσιμο κύκλωμα (πλακέτα) που διαθέτει μια είσοδο πολύ μεγάλης αντίστασης, μέσω τελεστικού ενισχυτή και μπορεί να διαβάσει τον αισθητήρα pH. Το κύκλωμα αυτό, με την εμπορική ονομασία PH-4502C, φαίνεται στην Εικόνα 26. Στην είσοδό του έχει βύσμα τύπου BNC, στο οποίο μπορεί να συνδεθεί το αντίστοιχο βύσμα του αισθητήρα, ενώ στην έξοδό του μπορούμε να πάρουμε μια τάση από 0 έως 5 V, ανάλογα με την τιμή του pH. Την τάση αυτή μπορούμε να τη διαβάσουμε με το Arduino, μέσω μιας αναλογικής του εισόδου. Επειδή όμως η τάση αναφοράς του αναλογικού μετατροπέα σε ψηφιακό έχει οριστεί στα 1.1 V, είναι απαραίτητος ο υποβιβασμός της τάσης του κυκλώματος κατά 5 φορές, κάτι που γίνεται εύκολα με ένα διαιρέτη τάσης με λόγο 1:5.



Εικόνα 26: Βοηθητική πλακέτα μεγάλης εσωτερικής αντίστασης, για ηλεκτρόδιο pH.

Προκειμένου να γνωρίζουμε την εξάρτηση της μετρούμενης τάσης στην έξοδο του κυκλώματος αυτού είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση του κυκλώματος. Αρχικά, με ένα καλώδιο βραχυκυκλώνουμε την είσοδο του κυκλώματος, γεγονός το οποίο θα αντιστοιχεί σε μια τιμή pH ίση με 7. Τότε περιστρέφουμε το μπλε ποτενσιόμετρο που βρίσκεται δίπλα στο βύσμα BNC ώστε η τάση εξόδου του κυκλώματος να είναι ακριβώς 2.5 V. Έτσι η τάση εξόδου των 2.5 V (μέσο του εύρους τάσεων εξόδου) θα αντιστοιχεί σε τιμή pH ίση με 7 (δηλαδή στο μέσο του εύρους τιμών pH). Στη συνέχεια εμβαπτίζουμε το ηλεκτρόδιο σε διάφορα γνωστά διαλύματα και καταγράφουμε τις τάσεις που μετράμε στην έξοδο του κυκλώματος με ένα βολτόμετρο. Από το διάγραμμα των τιμών του pH σαν συνάρτηση της μετρούμενης τάσης προκύπτει η εξίσωση βαθμονόμησης που θα χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις (Εικόνα 27).



Εικόνα 27: Διάγραμμα βαθμονόμησης του αισθητήρα μέτρησης pH

Κώδικας για τη μέτρηση οξύτητας

Η έξοδος του κυκλώματος ενίσχυσης σήματος συνδέεται στην αναλογική είσοδο A4 του Arduino και έτσι μπορούμε να μετρήσουμε την απόλυτη τιμή της τάσης της, αφού τόσο η πλακέτα, όσο και το Arduino έχουν κοινή γείωση. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνει ένα do loop για την εξομάλυνση των μετρήσεων, καθώς και τον

υπολογισμό της μετρούμενης τάσης. Στην περίπτωση αυτή πολλαπλασιάζουμε την υπολογιζόμενη τάση με τον αριθμό 4.91 που είναι η ακριβής τιμή για το διαιρέτη τάσης που προαναφέρθηκε. Στη συνέχεια, υπολογίζεται το pH, με βάση τη συνάρτηση βαθμονόμησης που υπολογίστηκε από το γράφημα στην Εικόνα 27. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται παρακάτω:

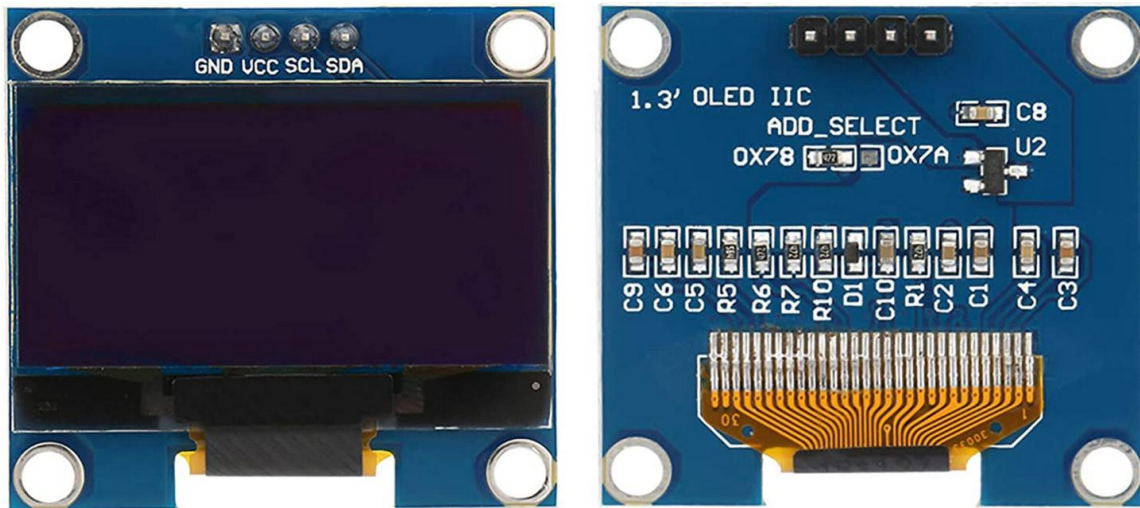
```
for (int i = 0; i < average_num; i++) {  
  
temp3 = temp3 + analogRead(A4);  
  
}  
  
pH_Voltage = temp3 / average_num;  
  
pH_Voltage = pH_Voltage*4.91*1.1/1023.0;  
  
pH = 20.4-5.34*pH_Voltage;
```

3.4 Παρουσίαση δεδομένων σε οθόνη

Προκειμένου να μπορούν να παρουσιαστούν τα δεδομένα που συλλέγονται από τους διάφορους αισθητήρες, είναι απαραίτητη μια μικρή οθόνη, που θα μπορεί να τοποθετηθεί δίπλα στο βιοαντιδραστήρα και στην οποία θα φαίνονται όλες οι πληροφορίες που αφορούν στη λειτουργία του. Στην οθόνη αυτή θα μπορούν, επίσης, να εμφανιστούν κάποια μηνύματα σφάλματος, ή προειδοποίησης, σε περίπτωση που οι μετρούμενες τιμές ξεπερνούν τα προκαθορισμένα όρια από το χρήστη.

Οι περισσότερες οθόνες που χρησιμοποιούνται ευρέως από το οικοσύστημα του Arduino είναι μικρής ανάλυσης και απαιτούν πολλά καλώδια για τη σύνδεσή τους με την πλακέτα του Arduino. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε μια οθόνη τύπου OLED, με διαγώνιο 1.3 ίντσες. Η οθόνη αυτή είναι μονόχρωμη και έχει ανάλυση 128x64 pixels, που είναι αρκετά ικανοποιητική για την προβολή των απαραίτητων μετρήσεων που λαμβάνονται. Επιπλέον, η συνδεσιμότητα της με το Arduino πραγματοποιείται μέσω του πρωτοκόλλου I2C^{40,41}, το οποίο απαιτεί μονάχα δυο καλώδια για τη μεταφορά δεδομένων και άλλα δυο καλώδια για την τροφοδοσία, η οποία μπορεί να είναι είτε 3.3V, είτε 5V. Η οθόνη OLED μπορεί να λειτουργεί χωρίς την ύπαρξη οπίσθιου

φωτισμού (backlight), περιορίζοντας, έτσι, την κατανάλωσή της σε μόλις 0.06W, γεγονός που της επιτρέπει να τροφοδοτηθεί από το Arduino, για να μην αυξηθεί η πολυπλοκότητα της διάταξης. Η οθόνη βρίσκεται αναρτημένη σε μικρή πλακέτα, μαζί με τα συνοδευτικά της εξαρτήματα και είναι έτοιμη για σύνδεση, χωρίς να απαιτούνται πρόσθετα ολοκληρωμένα κυκλώματα για την οδήγησή της. Οι δύο όψεις της πλακέτας με την οθόνη OLED φαίνονται στην Εικόνα 28.



Εικόνα 28: Εμπρός και πίσω άποψη μιας ολοκληρωμένης οθόνης OLED με διαγώνιο 1.3 ίντσες και πρωτόκολλο επικοινωνίας I2C

Για τη σύνδεση της οθόνης με το Arduino χρησιμοποιούμε τους ακροδέκτες A4 και A5, που είναι υπεύθυνοι για την επικοινωνία με το πρωτόκολλο I2C. Στη συνέχεια, συμπεριλαμβάνουμε στον κώδικα τις ακόλουθες βιβλιοθήκες, καθώς και τις εντολές για την ενεργοποίηση της οθόνης:

```
#include <Adafruit_GFX.h>
```

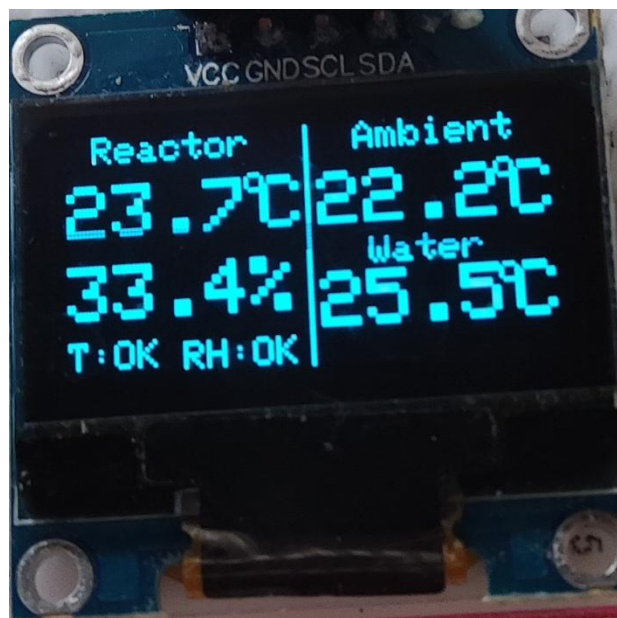
```
#include <Adafruit_SSD1306.h>
```

```
Adafruit_SSD1306 display(128, 64, &Wire, -1);
```

```
display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
```

Αφού η οθόνη ενεργοποιηθεί, μπορούμε με τις κατάλληλες εντολές να σχεδιάσουμε γραμμές, τετράγωνα, να επιλέξουμε μέγεθος γραμματοσειράς και να τυπώσουμε κείμενο. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χωρίστηκε η οθόνη σε δυο τμήματα, όπου παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας και της υγρασίας για το

βιοαντιδραστήρα (αριστερά) και οι αντίστοιχες τιμές για τον περιβάλλοντα χώρο (δεξιά). Στο κάτω μέρος της οθόνης φαίνονται πληροφορίες σφάλματος για τις μετρούμενες τιμές, όπως για παράδειγμα οι φράσεις «T: OK» αν οι θερμοκρασία είναι στο εύρος των αποδεκτών ορίων, ενώ «T: low» ή «T: High» αν η θερμοκρασία είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από τα όρια που έχουν προκαθοριστεί. Ένα στιγμιότυπο της οθόνης, με το γραφικό περιβάλλον φαίνεται στην Εικόνα 29. Θα πρέπει να τονιστεί εδώ ότι οι εικονιζόμενες τιμές δεν αντιστοιχούν σε πραγματικές συνθήκες, αλλά είναι δοκιμαστικές μετρήσεις.

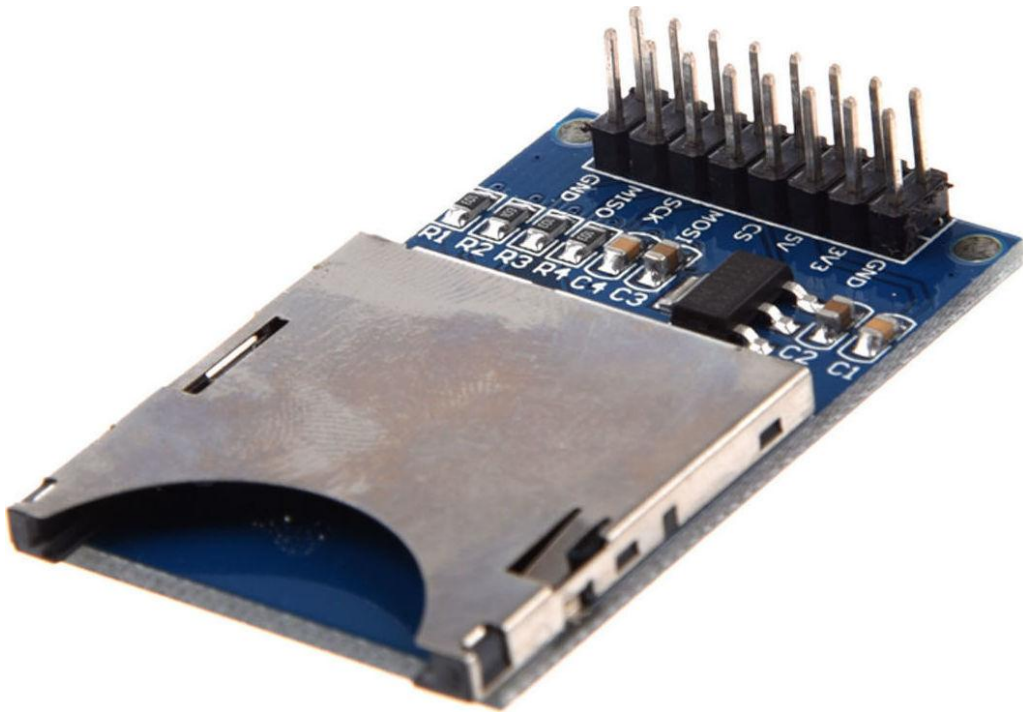


Εικόνα 29: Στιγμιότυπο της οθόνης OLED όπου απεικονίζονται οι μετρούμενες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας για το βιοαντιδραστήρα και τον περιβάλλοντα χώρο, αντίστοιχα. Οι εικονιζόμενες τιμές δεν αντιστοιχούν σε πραγματικές συνθήκες.

Η παρουσία της οθόνης δίπλα στο βιοαντιδραστήρα παρέχει ένα άμεσο και εύκολο τρόπο να γνωρίζουμε τις παραμέτρους λειτουργίας του, αφού με μια ματιά φαίνονται οι μετρούμενες τιμές, αλλά και τα τυχόν μηνύματα που αφορούν σε απόκλιση των μετρούμενων τιμών από τα όρια λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Έτσι, ο χρήστης είναι σε θέση να γνωρίζει άμεσα αν οι παράμετροι λειτουργίας είναι μέσα στα προκαθορισμένα πλαίσια και αν αποκλίνουν να εκτελέσει την απαραίτητη ρυθμιστική ενέργεια.

3.5 Καταγραφή δεδομένων σε κάρτα μνήμης

Μια πολύ σημαντική δυνατότητα είναι η καταγραφή των μετρούμενων τιμών σε αρχείο, ώστε να μπορούν στη συνέχεια να επεξεργαστούν και να αναλυθούν σε προσωπικό υπολογιστή, παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες για τη λειτουργία και την απόδοση του βιοαντιδραστήρα. Προκειμένου να αποθηκευτούν οι μετρούμενες τιμές με το Arduino είναι απαραίτητη η διασύνδεσή του με μια κατάλληλη πλακέτα που περιλαμβάνει μια υποδοχή κάρτας μνήμης τύπου SD⁴² (Secure Digital). Η κάρτα αυτή είναι εύκολα προσβάσιμη στο εμπόριο και η χαμηλή της τιμή επιτρέπει την χρήση της σε μια πλειάδα εφαρμογών. Η πλακέτα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία φαίνεται στην Εικόνα 30.



Εικόνα 30: Πλακέτα που περιλαμβάνει υποδοχή κάρτας μνήμης τύπου SD και κατάλληλους ακροδέκτες για σύνδεση με το Arduino

Η συνδεσμολογία της κάρτας με το Arduino γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου SPI⁴³ (Serial Peripheral Interface), χρησιμοποιώντας τους ακροδέκτες 4, 11,12,13 στο Arduino nano. Στη συνέχεια, εισάγουμε τη βιβλιοθήκη SD.h που συμπεριλαμβάνεται στις εσωτερικές βιβλιοθήκες του Arduino και ορίζουμε ένα όνομα αρχείου. Εάν το όνομα αυτό δεν υπάρχει στην κάρτα, τότε δημιουργείται αυτόματα. Έπειτα στην αρχή του κώδικα

γράφουμε μια φορά στο αρχείο μας τις επικεφαλίδες που αφορούν τις μετρήσεις, όπως για παράδειγμα στον κώδικα που ακολουθεί:

```
myFile = SD.open("Data.txt", FILE_WRITE);    //Write the names once

if (myFile) {

    myFile.println("Time, Reactor Temperature, Reactor pH, Water Temperature,
Ambient Temperature");

    myFile.close();

}
```

Είναι σημαντικό και επιθυμητό να καταγράφονται οι μετρήσεις ανά χρονικά διαστήματα που μπορούν να οριστούν από το χρήστη και όχι κάθε φορά που θα εκτελείται ο κώδικας. Για το σκοπό αυτό πρέπει να οριστεί μια συνάρτηση που ελέγχει εάν έχει παρέλθει το χρονικό αυτό διάστημα και τότε μόνο να καταγράφει τις τιμές στο αρχείο. Σε διαφορετική περίπτωση θα καταγράφονται πάρα πολλές τιμές και το αρχείο θα αποκτήσει σύντομα μεγάλο μέγεθος, καθιστώντας δύσκολη τη διαχείρισή του. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των δεδομένων στην κάρτα μνήμης κάθε 30 δευτερόλεπτα φαίνεται παρακάτω:

```
if(millis()-elapsed_time > 30000) {        // Write to file every 30 sec

    elapsed_time = millis();

    myFile = SD.open("Data.txt", FILE_WRITE);

    if (myFile) {

        myFile.print(elapsed_hours);

        myFile.print(" ,");

        myFile.print(Bioreactor_temp);

        myFile.print(" ,");
```



```

myFile.print(pH);

myFile.print(" ,");

myFile.print(Water_temp);

myFile.print(" ,");

myFile.println(Ambient_temp);

Filesize = myFile.size()/1000.0;

myFile.close();

}

else {

    Serial.println("error opening File"); // if the file didn't open, print an error

}

```

Η πρώτη γραμμή του κώδικα ελέγχει εάν έχει παρέλθει χρονικό διάστημα 30 δευτερολέπτων (30000 milliseconds). Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας προσωρινής μεταβλητής (elapsed_time), την οποία αρχικοποιούμε στην αρχή του προγράμματος με τον τρέχοντα χρόνο. Η συνάρτηση millis() του Arduino παρέχει τον τρέχοντα χρόνο (σε milliseconds) από την αρχή λειτουργίας του μικροεπεξεργαστή μέχρι τη στιγμή που καλείται η συνάρτηση. Έτσι η αφαίρεση millis()-elapsed_time αποτελεί το χρόνο που έχει παρέλθει από τη στιγμή που ορίσαμε τη μεταβλητή elapsed_time. Όταν αυτός ξεπεράσει τα 30 sec, τότε καλούμε μια σειρά από εντολές που αποθηκεύουν τις μετρούμενες τιμές στην κάρτα μνήμης και θέτουν τη μεταβλητή elapsed_time ίση με τον τρέχοντα χρόνο, ώστε να ξεκινήσει ένα νέο χρονικό διάστημα των 30 sec. Τέλος, μετράμε και το μέγεθος του αρχείου, ώστε αν υπάρχει πρόβλημα αποθήκευσης των δεδομένων στο αρχείο, να τυπώνεται ένα μήνυμα σφάλματος στη σειριακή θύρα.

3.6 Ασύρματη επικοινωνία και παρουσίαση δεδομένων

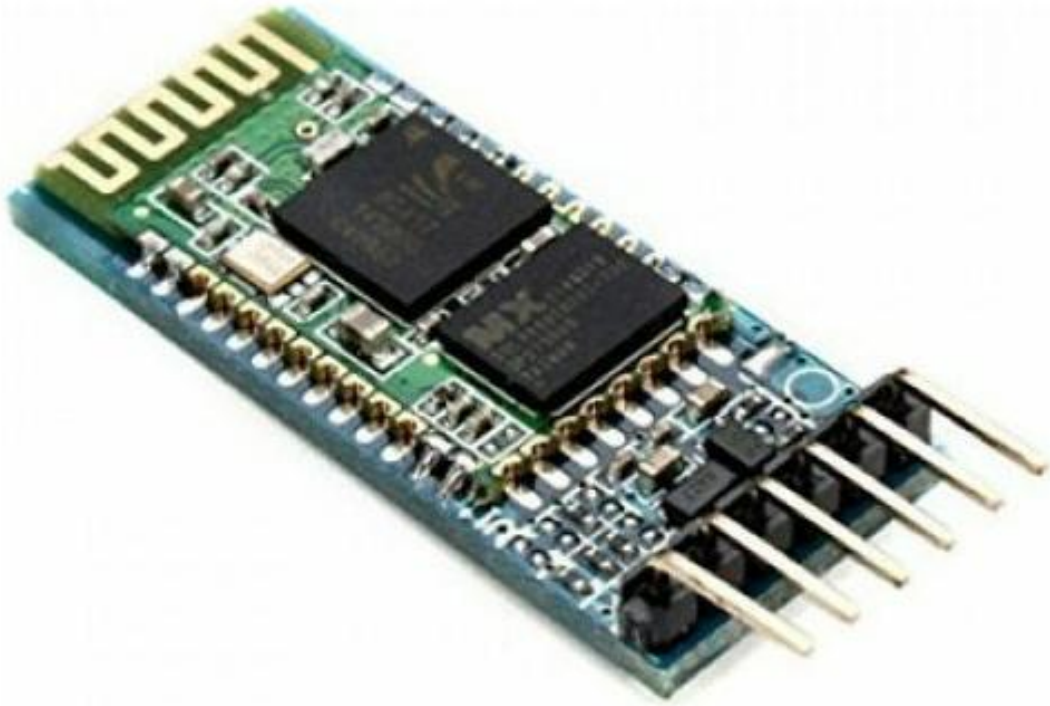
3.6.1 Απομακρυσμένη σύνδεση με το Arduino μέσω Bluetooth

Η παρουσίαση των δεδομένων στην οθόνη OLED είναι πολύ σημαντική, όπως αναφέρθηκε, αλλά παρουσιάζει δύο σημαντικά μειονεκτήματα. Πρώτον, το μέγεθος της οθόνης είναι σχετικά μικρό για παρουσίαση πολλών παραμέτρων λειτουργίας. Η χρήση μικρής γραμματοσειράς, για να χωρέσει όλη η πληροφορία στην οθόνη, καθιστά την ανάγνωσή της δύσκολη, ειδικά από μεγάλες αποστάσεις. Επιπλέον, δεν είναι τεχνικά εφικτό να χωρέσουν πολλές πληροφορίες στην οθόνη λόγω του μικρού της μεγέθους και της περιορισμένης ανάλυσης. Το δεύτερο μειονέκτημα έγκειται στο γεγονός ότι ο χρήστης πρέπει να βρεθεί δίπλα ακριβώς στο βιοαντιδραστήρα προκειμένου να ελέγξει τη λειτουργία του και να διαβάσει τις παραμέτρους από την οθόνη.

Τα δύο αυτά μειονεκτήματα είναι δυνατό να εξαλειφθούν χρησιμοποιώντας μια απομακρυσμένη σύνδεση με το Arduino και διαβάζοντας τα δεδομένα από την οθόνη του κινητού, ή από ένα tablet. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό βήμα στην εξέλιξη του συστήματός μας, μιας και προσδίδει σχεδόν απεριόριστο χώρο για την παρουσίαση των μετρήσεων στο χρήστη, ταυτόχρονα με τη δυνατότητα της απομακρυσμένης ανάγνωσης των μετρήσεων. Έτσι, ο χρήστης δεν απαιτείται να εισέλθει στο χώρο όπου βρίσκεται ο βιοαντιδραστήρας, αλλά μπορεί να ελέγξει την καλή λειτουργία του ακόμα και έξω από το κτήριο.

Η επίτευξη απομακρυσμένης σύνδεσης με το Arduino μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω διαδικτύου (wifi), είτε μέσω σύνδεσης Bluetooth, χρησιμοποιώντας το κατάλληλο module για τις συνδέσεις αυτές. Στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκε η απομακρυσμένη διασύνδεση μέσω πρωτοκόλλου Bluetooth⁴⁴, το οποίο υλοποιείται εύκολα μέσω μιας κατάλληλης πλακέτας που αναλαμβάνει την αμφίδρομη επικοινωνία με κινητές συσκευές. Η πλακέτα αυτή, που φαίνεται στην Εικόνα 31 έχει πολύ μικρές διαστάσεις (4.4 cm x 1.6 cm) και απαιτεί τροφοδοσία με τάση 5V. Περιλαμβάνει ενσωματωμένη κεραία, καθώς και πρωτόκολλο σειριακής επικοινωνίας, με την οποία επιτυγχάνεται η συνδεσιμότητα με το Arduino. Έτσι, η σύνδεσή της είναι πολύ εύκολη, αφού απαιτεί μονάχα 4 καλώδια (2 για την τροφοδοσία και 2 για τη σειριακή σύνδεση). Η θεωρητική της εμβέλεια εκτείνεται στα 30 μέτρα, αλλά στην πράξη αυτή θα εξαρτάται από τυχόν εμπόδια και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Μέσω της σειριακής θύρας μπορούμε να στείλουμε μηνύματα χαρακτήρων στο Arduino, αλλά και να διαβάσουμε μεταβλητές, πίνακες κτλ. Η κατασκευή όμως ενός γραφικού περιβάλλοντος σε περιβάλλον Android είναι δύσκολη και ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Για το λόγο αυτό αναζητήθηκε μια έτοιμη πλατφόρμα, η οποία μπορεί να εκμεταλλευτεί την ασύρματη επικοινωνία με το Arduino και παρέχει απομακρυσμένο έλεγχο.



Εικόνα 31: Πλακέτα επικοινωνίας με Bluetooth, HC-06. Η πλακέτα περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα, καθώς και κεραία.

3.6.2 Η πλατφόρμα Virtuino

Το Virtuino είναι μια πλατφόρμα που αναπτύχθηκε από τον Ηλία Λάμπρου⁴⁵ με σκοπό να παρέχει ένα ολοκληρωμένο εργαλείο με το οποίο μπορούν όλοι οι χρήστες να δημιουργήσουν το δικό τους, εξατομικευμένο περιβάλλον σε κινητές συσκευές και μέσω αυτού να πραγματοποιήσουν απομακρυσμένες συνδέσεις και έλεγχο διασυνδεδεμένων συσκευών με την πλατφόρμα. Η νέα του έκδοση εκτελείται σε όλα σχεδόν τα διαθέσιμα λειτουργικά συστήματα και σε κινητές συσκευές μπορεί να

ληφθεί από το Playstore (για συσκευές Android) ή το App store (για συσκευές Apple). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση για συσκευές Android, κατόπιν λήψης και σχετικής άδειας από το δημιουργό.

Η λειτουργία του βασίζεται σε ένα έτοιμο κομμάτι κώδικα το οποίο ο χρήστης αντιγράφει μέσα στο πρόγραμμά του και στη συνέχεια μέσω αυτού μπορεί να αποκτήσει τον πλήρη απομακρυσμένο έλεγχο της συσκευής. Στην αρχή του προγράμματος προστίθενται οι ακόλουθες εντολές:

```
#include "VirtuinoCM.h"
```

```
VirtuinoCM virtuino;
```

```
#define V_memory_count 20
```

```
float V[V_memory_count];
```

Αφού ενσωματωθούν οι σχετικές βιβλιοθήκες για την επικοινωνία, δημιουργείται ένας πίνακας V με πλήθος 20 καταχωρήσεων (μπορεί να αλλάξει σε όποια τιμή επιθυμούμε, ανάλογα με τη διαθέσιμη μνήμη). Στη συνέχεια, εκτελείται το πρόγραμμα του χρήστη, όπου μπορούν να ενσωματωθούν όλες οι εντολές κώδικα που επιθυμεί για να παραμετροποιήσει το σύστημά του. Ο χρήστης αποθηκεύει στις θέσεις του πίνακα V όσες τιμές μεταβλητών επιθυμεί να είναι διαθέσιμες από την απομακρυσμένη κινητή συσκευή με μια απλή εντολή ανάθεσης, όπως για παράδειγμα την παρακάτω:

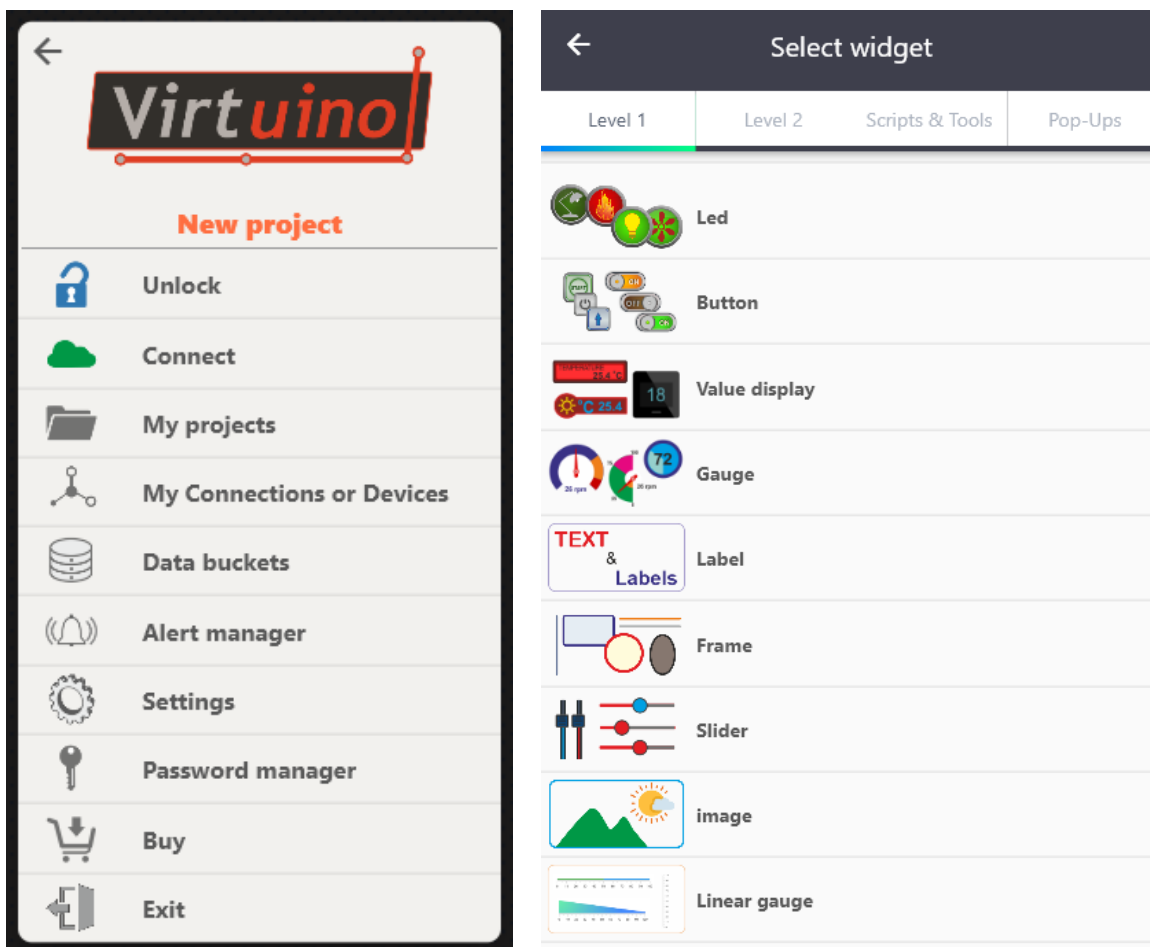
```
V[0] = Bioreactor_temp;
```

Με την εντολή αυτή αποθηκεύεται η μετρούμενη θερμοκρασία του βιοαντιδραστήρα στη θέση 0 του πίνακα V. Στο τέλος του κώδικα χρήστη προστίθεται το κομμάτι κώδικα που αναλαμβάνει την επικοινωνία με το Arduino μέσω της σύνδεσης Bluetooth (ή wifi). Με τον κώδικα αυτό (που φαίνεται στο παράρτημα) μπορούν να διαβαστούν όλες οι τιμές του πίνακα V και να παρουσιαστούν στην οθόνη της κινητής συσκευής, αλλά και να ελεγχθούν απευθείας όλες οι αναλογικές και ψηφιακές θύρες του Arduino. Έτσι για παράδειγμα, μπορεί να ανάψει ένα LED ή να δοθεί εντολή εκκίνησης ενός κινητήρα μέσω ρελέ με πάτημα ενός μόνο πλήκτρου από το κινητό.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι θέσεις αποθήκευσης του πίνακα V (το μέγεθος του οποίου μπορεί να καθοριστεί στο πρόγραμμα, καταλαμβάνοντας, φυσικά, και την αντίστοιχη ποσότητα μνήμης), για την καταγραφή και την αποστολή των μετρήσεων των αισθητήρων που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Περισσότερες

λεπτομέρειες για την αντιστοιχία των θέσεων του πίνακα με τις μετρούμενες τιμές φαίνονται στο παράρτημα.

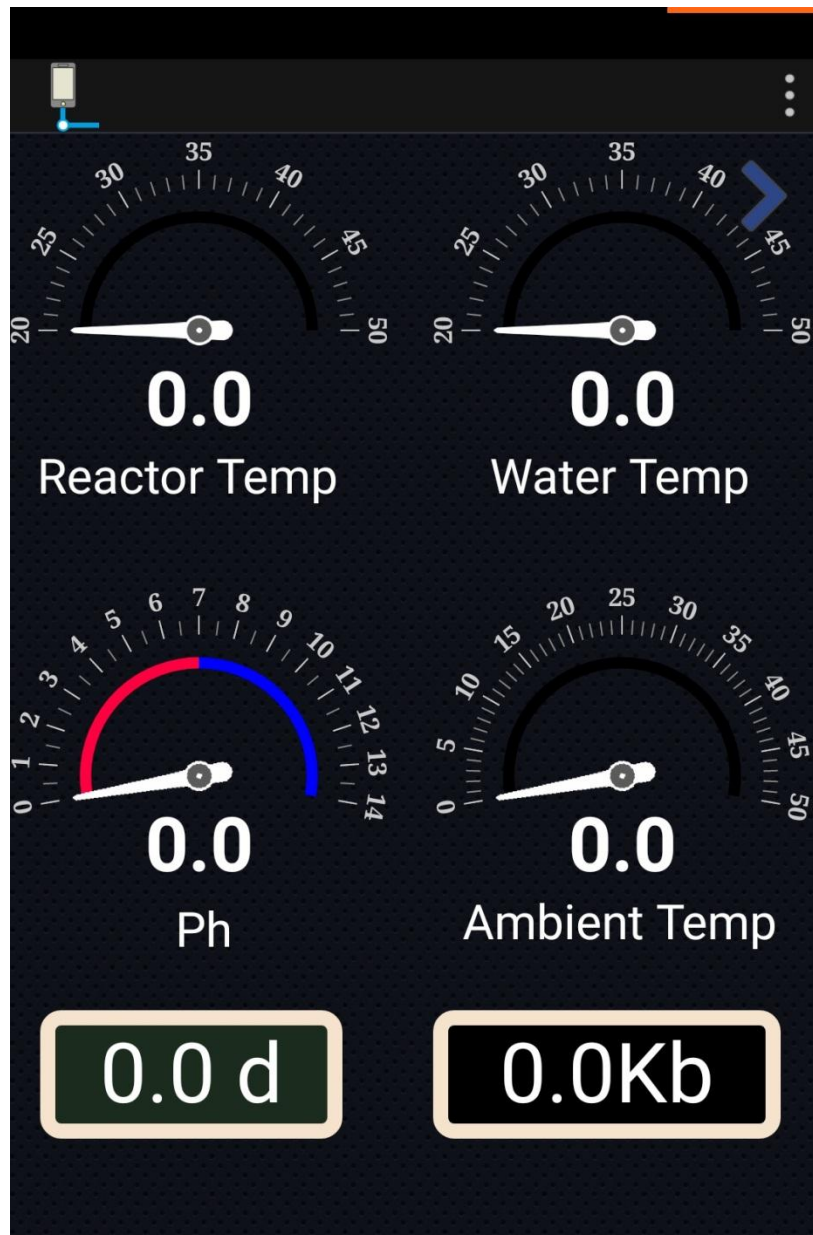
Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της πλατφόρμας Virtuino είναι το γραφικό της περιβάλλον. Αφού ο χρήστης εγκαταστήσει την εφαρμογή και επιλέξει τη σωστή πλακέτα Bluetooth, την οποία έχει συνδέσει με το Arduino, βρίσκεται σε ένα γραφικό περιβάλλον όπου μπορεί να δημιουργήσει την προσωπική του εφαρμογή μέσω της οποίας θα παρουσιάζονται τα δεδομένα στην οθόνη, αλλά και θα ελέγχονται οι επιμέρους συσκευές. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μέσω μενού μεταξύ ενός πλήθους αναλογικών και ψηφιακών οργάνων ενδείξεων, πλαισίων κειμένου, κουμπιών ελέγχου των εξόδων του Arduino, αυτοματισμών, αλλά και μαθηματικών πράξεων και μετασχηματισμών. Η μορφή του κυρίως μενού, αλλά και του μενού των γραφικών ένθετων (widgets) φαίνεται στην Εικόνα 32.



Εικόνα 32: Κυρίως μενού και μενού γραφικών ένθετων της πλατφόρμας Virtuino

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκε ένα περιβάλλον που παρέχει δυνατότητα ευκρινούς παρουσίασης των μετρούμενων τιμών των αισθητήρων που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Στην Εικόνα 33 φαίνεται το γραφικό περιβάλλον που σχεδιάστηκε καθώς και όλες οι ενδείξεις των αισθητήρων. Επάνω αριστερά τοποθετήθηκε η ένδειξη της θερμοκρασίας μέσα στο βιοαντιδραστήρα, ενώ κάτω αριστερά η μετρούμενη τιμή της οξύτητας. Για την οξύτητα χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικά χρώματα στην ένδειξη ώστε να γίνεται προφανής αποτύπωση αν μέσα στον βιοαντιδραστήρα επικρατούν όξινες ή βασικές συνθήκες. Επάνω δεξιά εμφανίζεται η θερμοκρασία του νερού θέρμανσης του βιοαντιδραστήρα, ενώ κάτω δεξιά απεικονίζεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η σχετική υγρασία δεν εμφανίζεται λόγω του ότι οι μετρούμενες τιμές μέσα στο βιοαντιδραστήρα ήταν συνεχώς στο 100%.

Επιπλέον, στο κάτω μέρος της οθόνης επιλέχθηκε να εμφανίζονται μέσα σε δύο πλαίσια, ο χρόνος που έχει παρέλθει (αρχής γενομένης από τη στιγμή που τροφοδοτήθηκε με τάση), καθώς και το μέγεθος του αρχείου καταγραφής (δεξιά). Η απεικόνιση του μεγέθους του αρχείου καταγραφής έχει διπλή χρησιμότητα: Αφενός, γνωρίζουμε εάν το μέγεθος δεν υπερβαίνει τα όρια χωρητικότητας της κάρτας μνήμης (για την περίπτωση που κάνουμε μακροχρόνια καταγραφή δεδομένων) και αφετέρου παρατηρώντας τις ενδείξεις να αυξάνουν βεβαιωνόμαστε για την καλή λειτουργία της κάρτας μνήμης και τη σωστή καταγραφή των δεδομένων. Αυτό θα ήταν δύσκολο να επιτευχθεί με διαφορετικό τρόπο, όπως για παράδειγμα με την ανάγνωση του αρχείου από το Arduino, μιας και μετά από μερικές ημέρες καταγραφής, το αρχείο μπορεί να φτάσει αρκετά Mbytes. Έτσι μια εντολή ανάγνωσης του αρχείου και αποστολής των δεδομένων μπορεί να πάρει αρκετό χρόνο, μπλοκάροντας τις υπόλοιπες λειτουργίες του κυκλώματος και τον έλεγχο του βιοαντιδραστήρα έως ότου ολοκληρωθεί η διαδικασία. Παρατηρώντας, όμως, απλά το μέγεθος του αρχείου καταγραφής έχουμε μια ένδειξη της καλής λειτουργίας του κυκλώματος, εφόσον το μέγεθός του αυξάνει με τον αναμενόμενο ρυθμό.



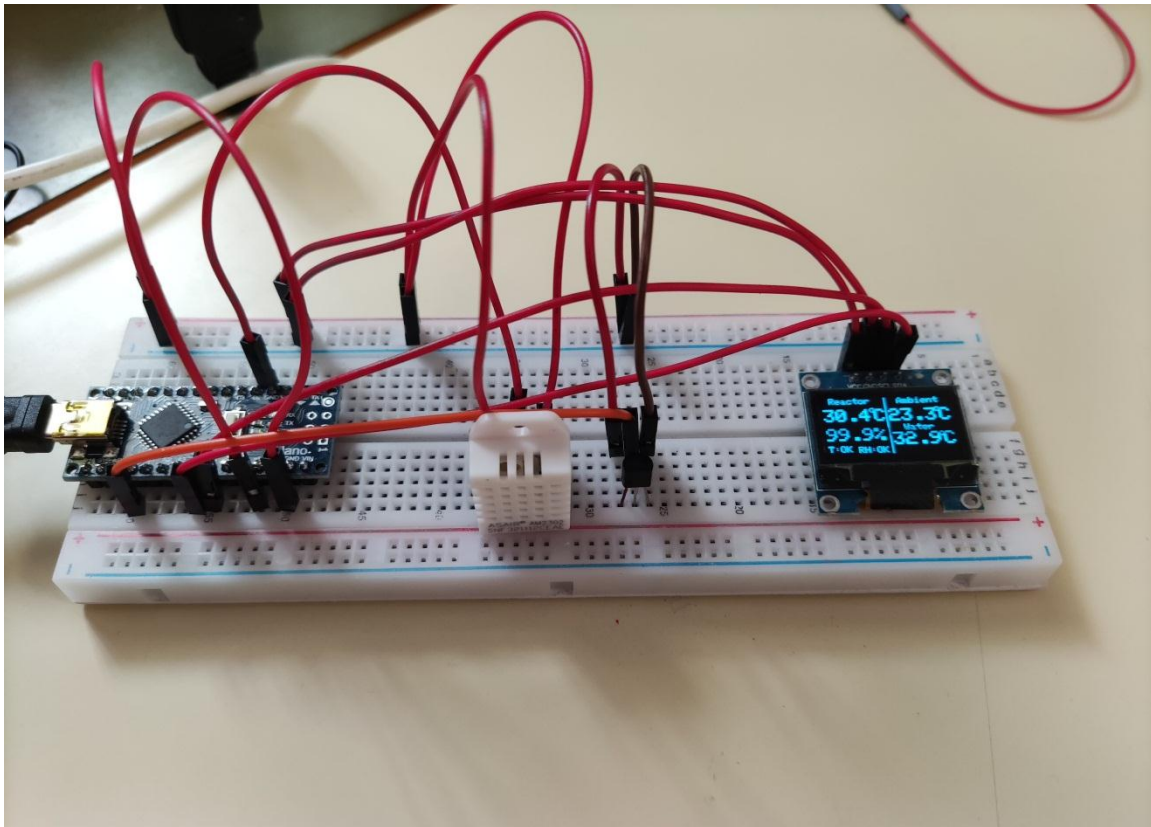
Εικόνα 33: Περιβάλλον απεικόνισης πληροφοριών της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα, που κατασκευάστηκε με το Virtuino

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

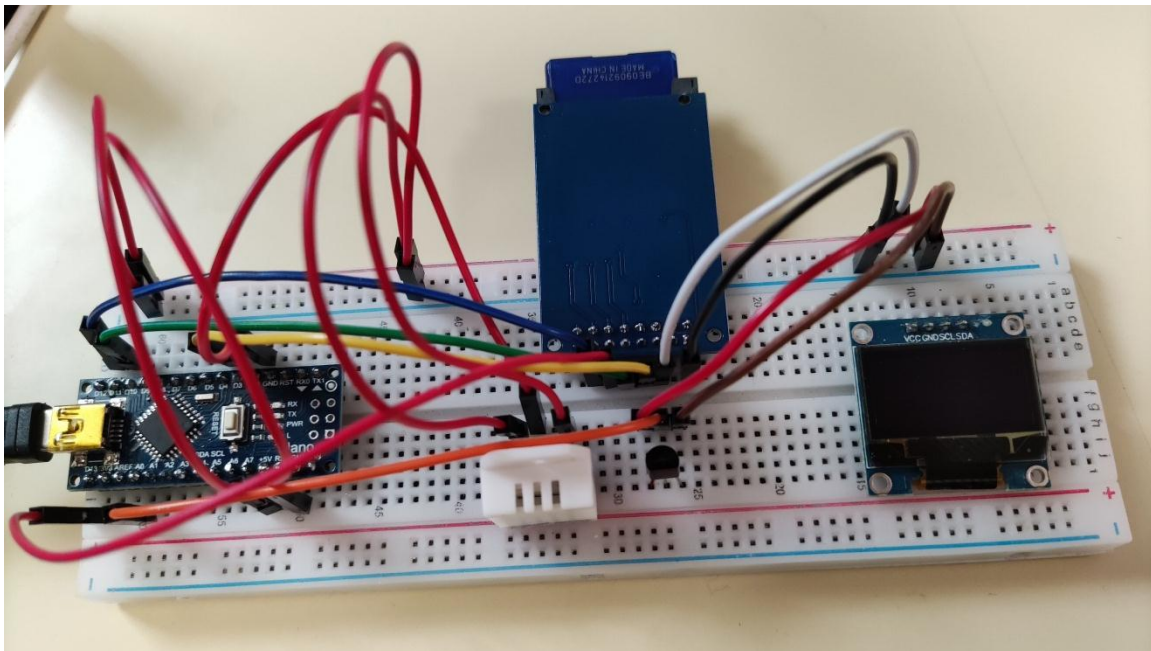
4.1 Υλοποίηση του συστήματος παρακολούθησης λειτουργιάς του βιοαντιδραστήρα

Για την επίτευξη των στόχων της παρούσας εργασίας τα επιμέρους τμήματα των αισθητήρων που την απαρτίζουν συνδέθηκαν ξεχωριστά πάνω σε διάτρητη πλακέτα (breadboard) και δοκιμάστηκαν, εκτελώντας τον αντίστοιχο κώδικα σε γλώσσα Arduino, ώστε να διαπιστωθεί η καλή λειτουργία τους. Αυτό είναι απαραίτητο, για κάθε αισθητήρα ξεχωριστά, ώστε να διαπιστώνεται η καλή λειτουργία του και να λύνονται τυχόν προβλήματα που προκύπτουν, πριν συνδεθεί στο πλήρες κύκλωμα. Σε διαφορετική περίπτωση ενδέχεται να υπάρξουν ταυτόχρονα πολλά και αλληλένδετα προβλήματα, τα οποία θα είναι δύσκολο να επιλυθούν, αφού δε θα γνωρίζουμε ποιος αισθητήρας δε λειτουργεί σωστά και αν αυτό οφείλεται αποκλειστικά και μόνο σε δυσλειτουργία του ή σε λάθος στον κώδικα ή και σε προβλήματα στη συνύπαρξη με τους υπόλοιπους αισθητήρες. Για το λόγο αυτό η εκσφαλμάτωση θα πρέπει να λαμβάνει χώρα ξεχωριστά για καθένα από τα επιμέρους τμήματα του συστήματος.



Εικόνα 34: Δοκιμή λειτουργίας αισθητήρων πάνω σε διάτρητη πλακέτα (breadboard)

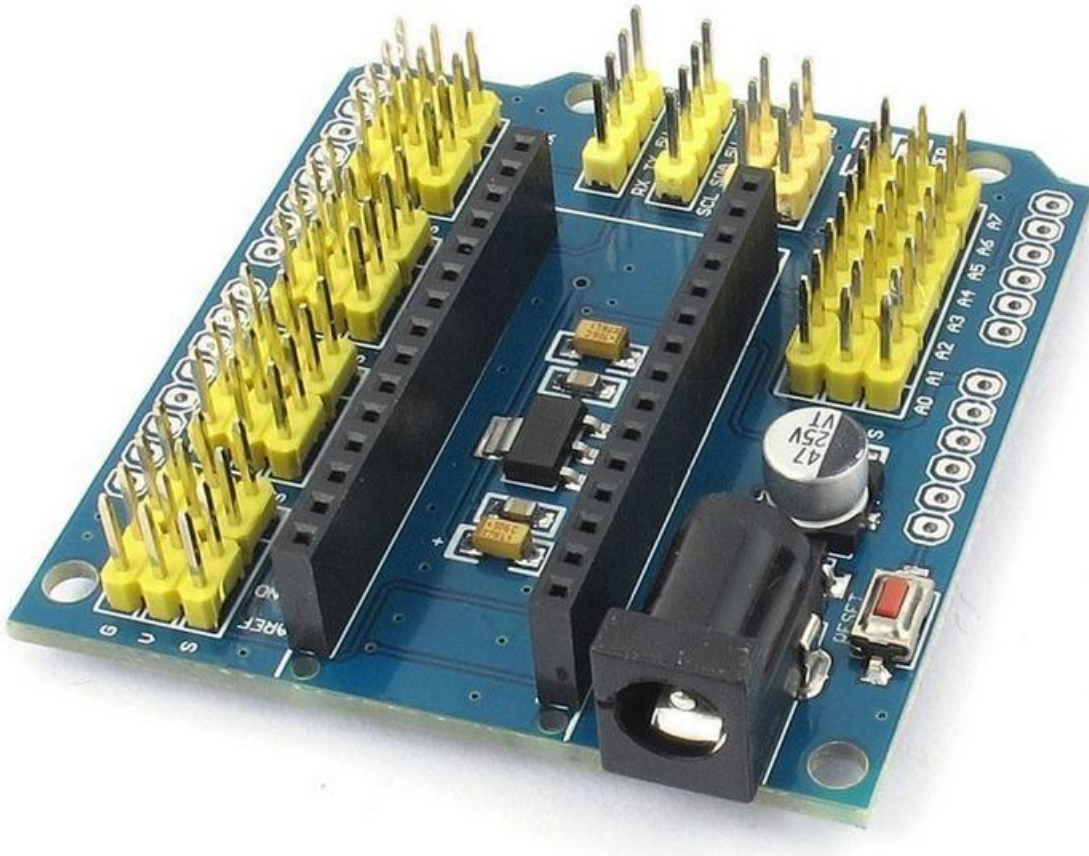
Στην Εικόνα 34 φαίνεται μια δοκιμή πάνω σε διάτρητη πλακέτα, στην οποία έχουν συνδεθεί τμηματικά οι αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας και έχουν δοκιμαστεί καθένας ξεχωριστά. Στην πλακέτα αυτή μπορούμε να συνδέσουμε εύκολα με καλώδια τους αισθητήρες στους ακροδέκτες του Arduino και να δοκιμάσουμε την λειτουργία τους. Έτσι, εδώ δοκιμάστηκε η καλή λειτουργία του αισθητήρα θερμοκρασίας και στη συνέχεια η λειτουργία του αισθητήρα υγρασίας, καθώς και η ταυτόχρονη συνύπαρξή τους. Στη συνέχεια συνδέθηκε και δοκιμάστηκε η οθόνη OLED και συντάχθηκε ο κώδικας για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στην οθόνη. Στη συνέχεια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 35, συνδέθηκε η κάρτα μνήμης στο κύκλωμα και δοκιμάστηκε η λειτουργία της. Επιπλέον, συντάχθηκε ο κατάλληλος κώδικας που αποθηκεύει τα δεδομένα ανά τακτά χρονικά διαστήματα σε αρχείο.



Εικόνα 35: Δοκιμή λειτουργίας κάρτας μνήμης για την αποθήκευση των μετρήσεων

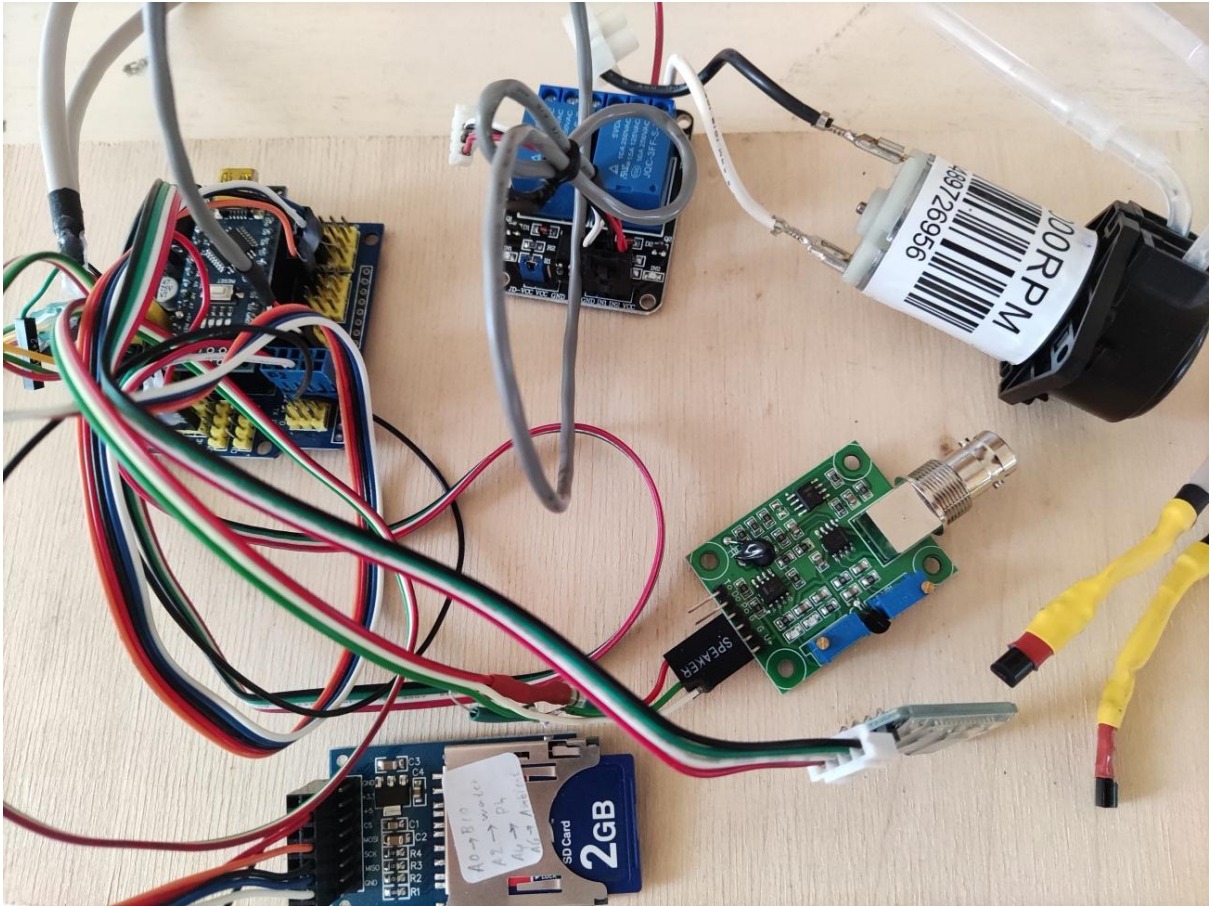
Στη συνέχεια και αφού δοκιμάστηκαν όλοι οι αισθητήρες και τα επιμέρους εξαρτήματα του συστήματος αποφασίστηκε η κατασκευή της τελικής διάταξης. Για να επιτευχθεί εύκολη συνδεσιμότητα και δυνατότητα εύκολης μεταβολής των αισθητήρων και των συνδέσεών τους αποφασίστηκε η χρήση μιας πλακέτας επέκτασης (breakout board) για το Arduino nano εξασφαλίζοντας την εύκολη σύνδεση των αισθητήρων, χωρίς να απαιτηθεί η μόνιμη κόλληση τους πάνω στο κύκλωμα. Η πλακέτα που

χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην Εικόνα 36. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτούνται κολλήσεις και έτσι μπορούν να συνδεθούν και να αποσυνδεθούν οι διάφοροι αισθητήρες κατά βούληση. Η προσθήκη νέων αισθητήρων είναι εύκολη, καθώς και η αντικατάσταση των υφιστάμενων αν παρουσιάσουν κάποιο πρόβλημα. Το Arduino nano κουμπώνει πάνω στις δύο κεντρικές υποδοχές και οι έξοδοί του οδηγούνται σε μια σειρά από ακροδέκτες τύπου Dupont 2.54mm⁴⁶, που είναι εύκολα προσβάσιμοι στο εμπόριο. Επιπλέον, κάθε υποδοχή συμπεριλαμβάνει τροφοδοσία με τάση 5V, καθώς και γείωση.



Εικόνα 36: Πλακέτα επέκτασης για το Arduino nano

Στην Εικόνα 37 φαίνεται η ολοκληρωμένη διάταξη του συστήματος παρακολούθησης της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα, καθώς και οι συνδέσεις των επιμέρους εξαρτημάτων στην κεντρική πλακέτα. Οι συνδέσεις πραγματοποιήθηκαν με καλώδια ακροδεκτών τύπου Dupont, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Επιπλέον, συνδέθηκε και ένα ρελέ για τον έλεγχο της περισταλτικής αντλίας, η οποία τροφοδοτήθηκε από ένα ξεχωριστό τροφοδοτικό σταθερής τάσης 12 V.



Εικόνα 37: Ολοκληρωμένη διάταξη του συστήματος παρακολούθησης της λειτουργίας του βίο-αντιδραστήρα

Στη συνέχεια, η διάταξη μεταφέρθηκε στο βιοαντιδραστήρα και πραγματοποιήθηκε η τοποθέτηση των αισθητήρων στις διάφορες υποδοχές που υπήρχαν (Εικόνα 38). Η τροφοδοσία του κυκλώματος έγινε με ένα μικρό τροφοδοτικό σταθερής τάσης 5 V DC, το οποίο συνδέθηκε στην πλακέτα του Arduino και μέσω αυτής τροφοδοτήθηκαν και όλα τα συνοδευτικά εξαρτήματα, πλην της περισταλτικής αντλίας, που απαιτεί τάση 12 V. Κατόπιν, ο βιοαντιδραστήρας γέμισε με υλικό, σφραγίστηκε και ξεκίνησε η καταγραφή των δεδομένων και η λειτουργία του συστήματος.

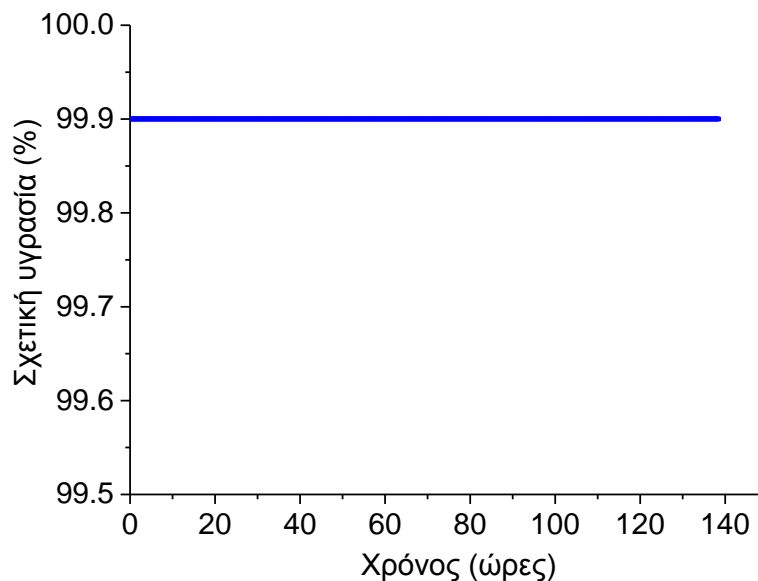


Εικόνα 38: Τοποθέτηση των αισθητήρων στο βιοαντιδραστήρα

4.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Αφού έγινε η πλήρωση του βιοαντιδραστήρα και σφραγίστηκε, παρακολουθήθηκε η λειτουργία του για μια περίοδο 6 ημερών και καταγράφηκαν οι μετρήσεις των παραμέτρων λειτουργίας του για το διάστημα αυτό στην κάρτα μνήμης. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αντιγράφηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω ανάλυση.

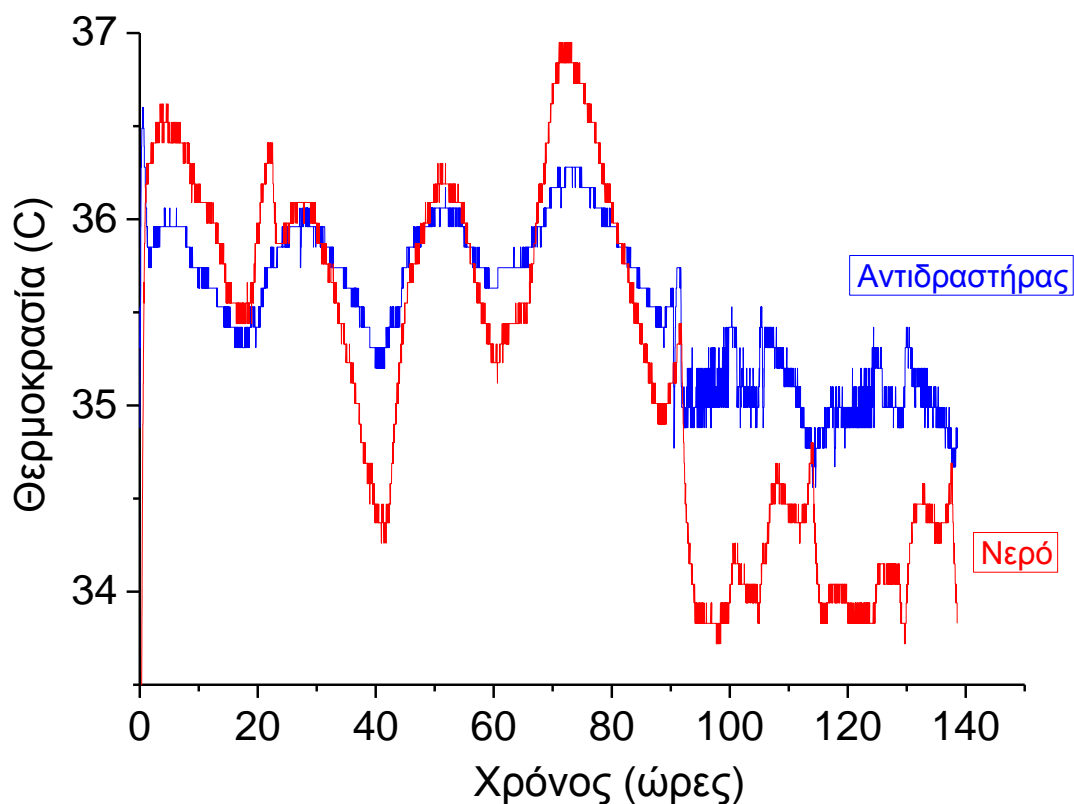
Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 39 φαίνεται το γράφημα της μετρούμενης τιμής της σχετικής υγρασίας για το διάστημα των 6 ημερών. Παρατηρούμε ότι η σχετική υγρασία ήταν σταθερή και ίση με 99.9%, δηλαδή στη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το υλικό μέσα στο βιοαντιδραστήρα βρίσκεται σε υδαρή μορφή και επομένως η σχετική υγρασία του θα φτάνει στη μέγιστη τιμή, δηλαδή το περιβάλλον θα είναι κορεσμένο από υδρατμούς. Αυτό είναι κάτι αναμενόμενο και απολύτως λογικό, αλλά αποδείχτηκε και πειραματικά με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματά βρίσκονται σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία⁴⁷.



Εικόνα 39: Διάγραμμα της μετρούμενης σχετικής υγρασίας μέσα στο βιοαντιδραστήρα σαν συνάρτηση του χρόνου για χρονικό διάστημα 6 ημερών.

Στην Εικόνα 40 φαίνεται το διάγραμμα της μετρούμενης θερμοκρασίας μέσα στο βιοαντιδραστήρα, για χρονικό διάστημα 6 ημερών, καθώς και η θερμοκρασία του νερού θέρμανσης του βιοαντιδραστήρα. Παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασία μέσα στο

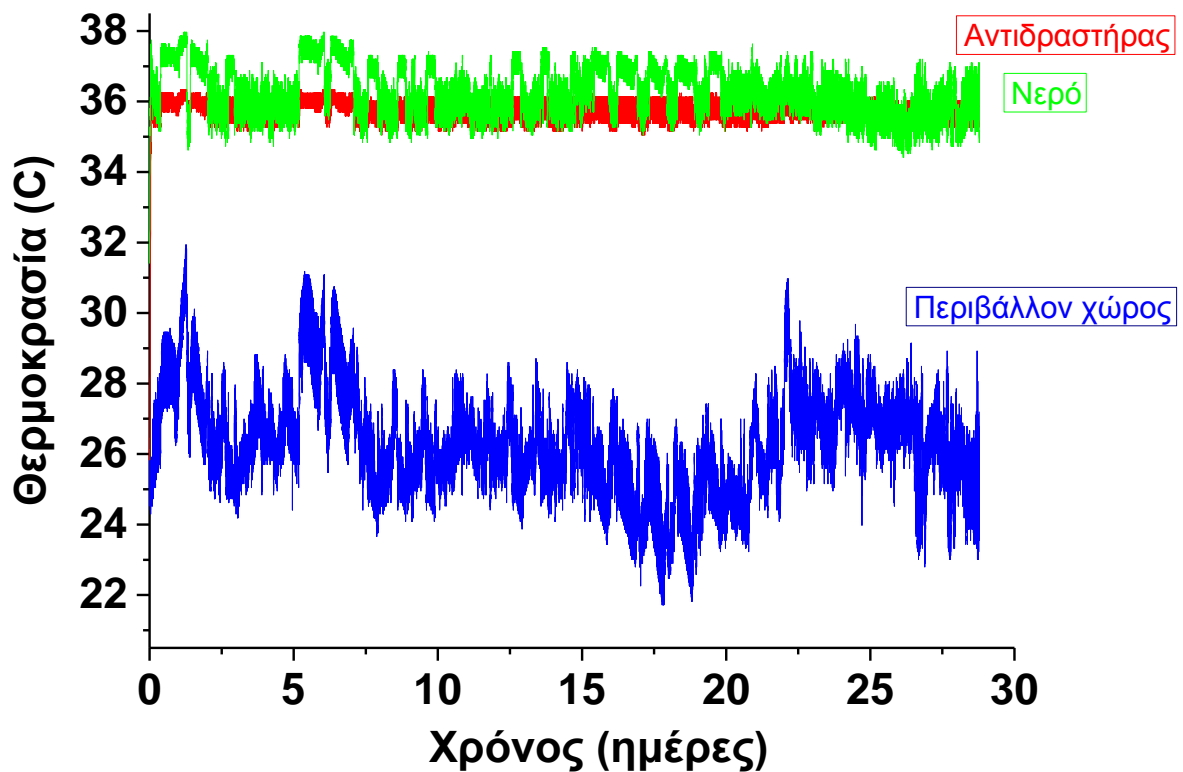
βιοαντιδραστήρα ήταν σχετικά σταθερή με μικρές διακυμάνσεις της τάξης των 2 °C. Η διακύμανση της θερμοκρασίας του βιοαντιδραστήρα δείχνει να ακολουθεί τη διακύμανση της θερμοκρασίας του νερού θέρμανσης, κάτι που είναι αναμενόμενο, μιας και ο σκοπός του νερού θέρμανσης είναι να κρατάει τη θερμοκρασία μέσα στο βιοαντιδραστήρα σε σταθερά επίπεδα και συνεπώς η όποια διακύμανσή του θα ανακλάται στη θερμοκρασία του βιοαντιδραστήρα. Η περιοδική αυτή διακύμανση της θερμοκρασίας του νερού θέρμανσης πιθανόν οφείλεται στην εναλλαγή ημέρας-νύκτας, μιας και έχει περίοδο περίπου 24 ώρες.



Εικόνα 40: Διάγραμμα της μετρούμενης θερμοκρασίας μέσα στο βιοαντιδραστήρα, καθώς και της θερμοκρασίας του νερού, σαν συνάρτηση του χρόνου, για χρονικό διάστημα 6 ημερών.

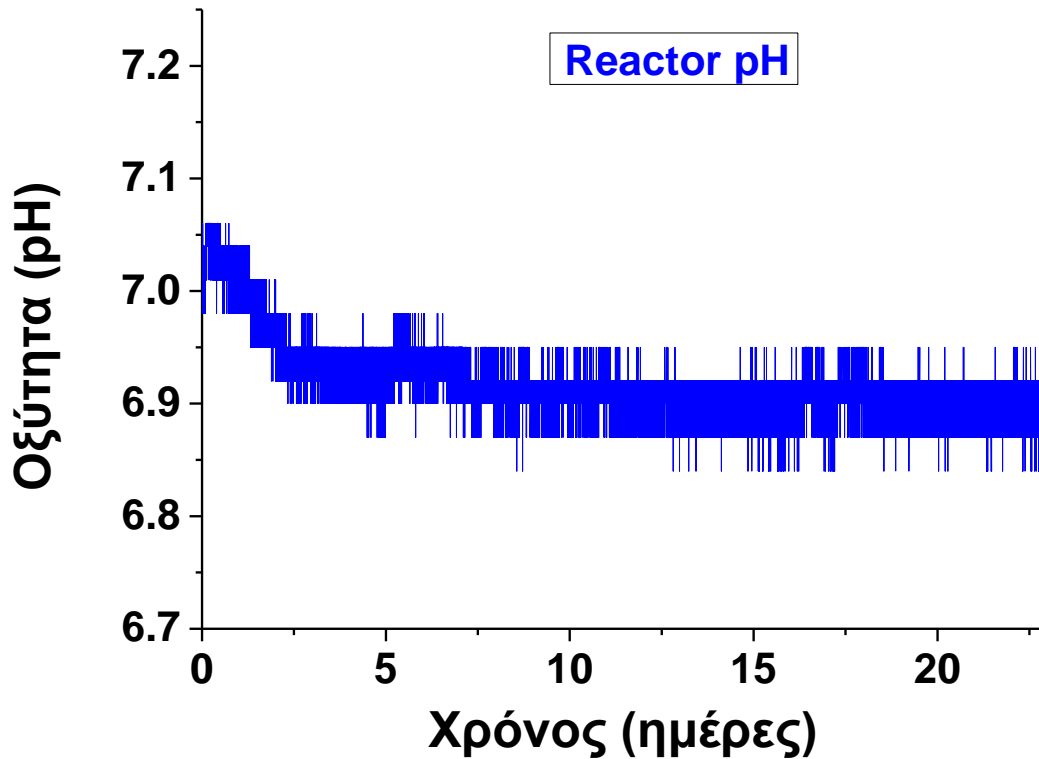
Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μια δεύτερη σειρά πειραμάτων με σκοπό να δοκιμασθούν όλοι οι αισθητήρες που προαναφέρθηκαν. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι αφαιρέθηκε ο αισθητήρας της υγρασίας, μιας και η τιμή του παρέμενε προσκολλημένη στη μέγιστη τιμή και επομένως δεν είχε πλέον νόημα η μέτρησή της.

Στην Εικόνα 41 φαίνεται το διάγραμμα της μετρούμενης θερμοκρασίας μέσα στο βιοαντιδραστήρα, της θερμοκρασίας του νερού θέρμανσης, καθώς και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου για χρονικό διάστημα 29 ημερών, από τη στιγμή της επανατροφοδότησης του με υλικά. Παρατηρήθηκε μια μικρότερη διακύμανση της θερμοκρασίας του βιοαντιδραστήρα (λιγότερο από 1 °C), η οποία και πάλι σχετίζονταν με τη θερμοκρασία του νερού θέρμανσης, αλλά αυτή τη φορά οι διακυμάνσεις ήταν μικρότερες λόγω καλύτερης ρύθμισης του θερμαντικού στοιχείου. Η θερμοκρασία του νερού θέρμανσης έδειξε να επηρεάζεται αμυδρά από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου, αλλά οι διακυμάνσεις διατηρήθηκαν σε μικρά, αποδεκτά όρια, της τάξης των 2 °C. Έτσι, θεωρούμε ότι ο βιοαντιδραστήρας λειτουργεί πολύ κοντά στη βέλτιστη θερμοκρασία του και αυτή διατηρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, που στην συγκεκριμένη περίπτωση διήρκεσαν ένα ολόκληρο μήνα.



Εικόνα 41: Διάγραμμα της μετρούμενης θερμοκρασίας μέσα στο βιοαντιδραστήρα, της θερμοκρασίας του νερού θέρμανσης, καθώς και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου σαν συνάρτηση του χρόνου, για χρονικό διάστημα 29 ημερών.

Στην Εικόνα 42 παρουσιάζεται το διάγραμμα της μετρούμενης οξύτητας (pH) μέσα στο βιοαντιδραστήρα, ως συνάρτηση του χρόνου, για χρονικό διάστημα 22 ημερών. Λόγω δυσλειτουργίας του μετρητικού της οξύτητας, οι μετρήσεις δε μπόρεσαν να συνεχιστούν μέχρι τις 29 ημέρες και κατά συνέπεια δεν παρουσιάζονται για το διάστημα αυτό. Παρατηρήθηκε μείωση της τιμής του pH και σταθεροποίησή της λίγο πιο κάτω από το 7. Θα πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι σε βιομηχανικού τύπου βιοαντιδραστήρα, όπου αναμένεται διαφορετική, μη ιδανική σύσταση υλικών, οι διακυμάνσεις στην τιμή του pH αναμένεται να είναι αρκετά υψηλότερες και κατά συνέπεια απαιτείται ένα αυτόματο κύκλωμα που θα επιχειρεί διόρθωση της τιμής του pH κοντά στην ιδανική, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα και η μέγιστη απόδοσή του.



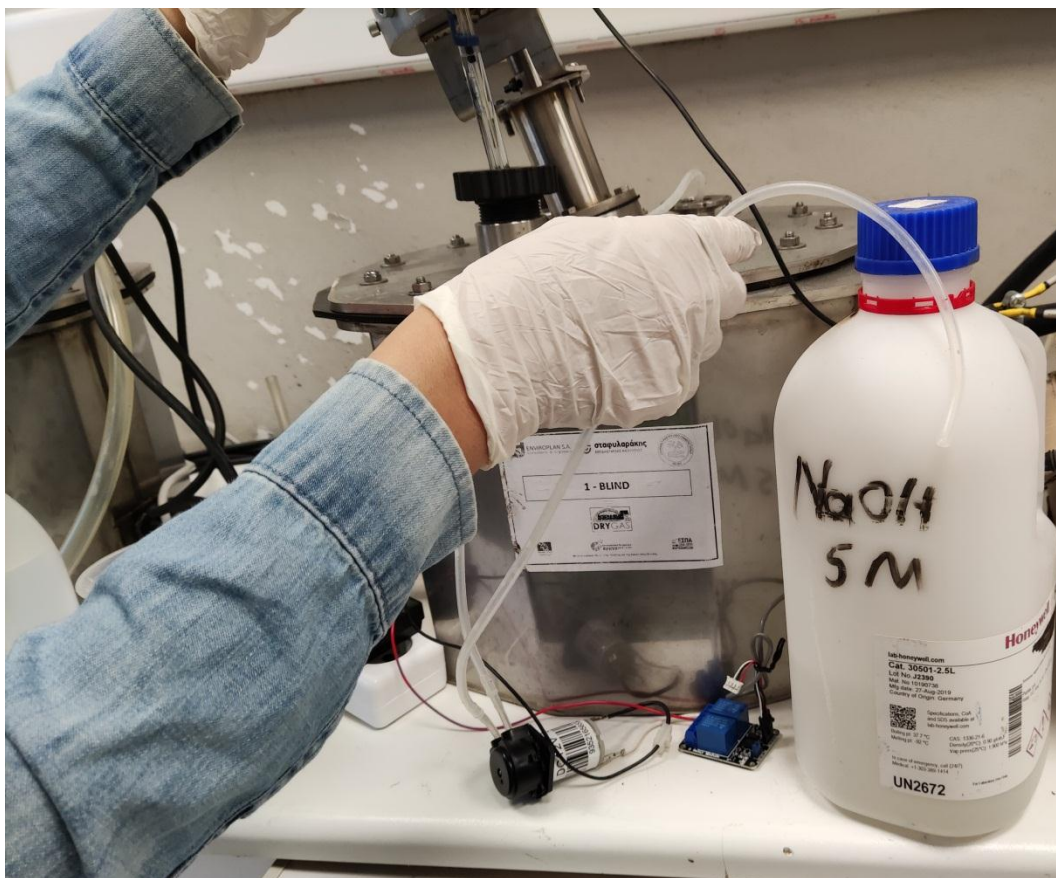
Εικόνα 42: Διάγραμμα της μετρούμενης τιμής οξύτητας μέσα στο βιοαντιδραστήρα σαν συνάρτηση του χρόνου.

4.3 Σύστημα ρύθμισης της οξύτητας (pH)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα, με μεγάλη ποικιλία υλικών στο εσωτερικό του, αναμένεται να υπάρχει σημαντική απόκλιση της οξύτητας από την ιδανική τιμή για τη βέλτιστη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα. Αυτό καθιστά απαραίτητη την κατασκευή ενός κατάλληλου συστήματος, με το οποίο θα επιχειρείται ενεργός ρύθμιση της τιμής της οξύτητας, χρησιμοποιώντας ένα διάλυμα βάσης, ώστε κάθε φορά που αυτή αποκλίνει από την ιδανική τιμή της, να πραγματοποιείται διόρθωση προς την ιδανική τιμή.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε μια μικρή περισταλτική αντλία, η οποία λειτουργεί με τάση 12 V, μέσω ενός ξεχωριστού τροφοδοτικού. Η είσοδος της αντλίας τοποθετήθηκε μέσα σε ένα ειδικό δοχείο, το οποίο περιείχε διάλυμα NaOH, ρυθμισμένο έτσι ώστε να παρουσιάζει μια τιμή pH ίση με 9. Η έξοδος της αντλίας συνδέθηκε στο βιοαντιδραστήρα έτσι ώστε κάθε φορά που αυτή λειτουργεί να εγχέει μια μικρή ποσότητα διαλύματος μέσα στο βιοαντιδραστήρα. Η λειτουργία της αντλίας ελέγχονταν μέσω ενός ρελέ (σύνδεση σε σειρά), το οποίο μπορεί εύκολα να ελεγχθεί από το Arduino, μέσω μιας από τις ψηφιακές εισόδους/εξόδους. Θα πρέπει να τονιστεί εδώ ότι το ρεύμα που απαιτείται για τον έλεγχο του ρελέ είναι πολύ μικρό, μιας και χρησιμοποιούνται οπτικοί απομονωτές⁴⁸ (optocouplers) στην είσοδό του και έτσι είναι δυνατός ο έλεγχός του μέσω του Arduino. Η τοποθέτηση του συστήματος στο βιοαντιδραστήρα φαίνεται στην Εικόνα 43.

Για την αποτελεσματική ρύθμιση της οξύτητας στα επιθυμητά επίπεδα χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος κώδικας, ο οποίος ελέγχει την τιμή του pH κάθε 5 λεπτά και αποφασίζει εάν θα χρειαστεί διόρθωση. Ο χρόνος των 5 λεπτών είναι απαραίτητος προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι θα υπάρχει ικανό χρονικό διάστημα μεταξύ των πιθανών εγχύσεων ώστε να διαχυθεί το ρυθμιστικό διάλυμα μέσα στο βιοαντιδραστήρα, να μεταβληθεί η τιμή της οξύτητας και να μετρηθεί από το πεχάμετρο. Σε κάθε περίπτωση η ρύθμιση της οξύτητας δεν απαιτείται να πραγματοποιηθεί πολύ γρήγορα, μιας και η τιμή του pH δε μεταβάλλεται γρήγορα με το χρόνο. Έτσι, κρίνεται προτιμότερο να γίνει μια αργή ρύθμιση σε χρονικά διαστήματα των 5 λεπτών, ώστε να προλαβαίνει το σύστημα να ισορροπεί.



Εικόνα 43: Τοποθέτηση του συστήματος ρύθμισης της οξύτητας στο βιοαντιδραστήρα

Παρακάτω ακολουθεί ο κώδικας Arduino που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της περισταλτικής αντλίας:

```
if(millis()-elapsed_time_pump > 300000) {    // Check pH values every 5 min

    elapsed_time_pump = millis();

    if(pH < 6.95) {

        digitalWrite(4, LOW); // start the pump

        vDelay(3000);        // Run the pump for 3 seconds

        digitalWrite(4, HIGH); // stop the pump

        pump_status = 1;
```

```

}

else {

    pump_status = 0;

}

}

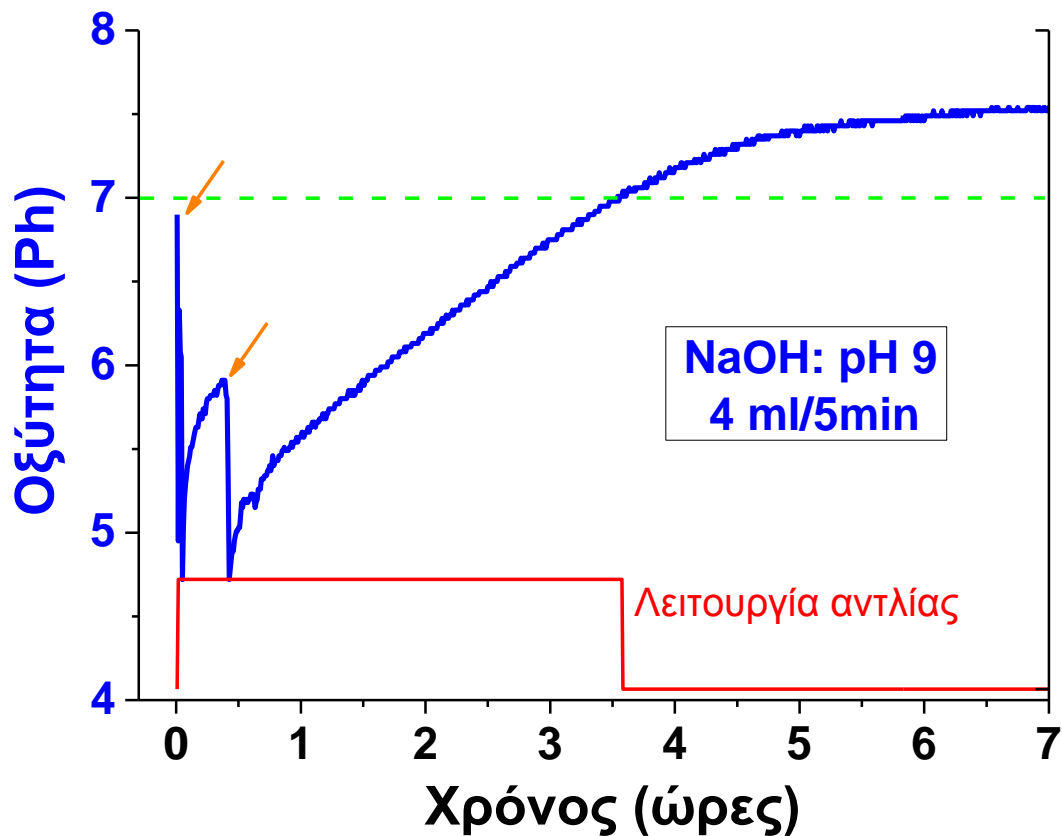
```

Όπως παρατηρούμε, ο κώδικας ελέγχει εάν έχει παρέλθει διάστημα 5 λεπτών και τότε κάνει έλεγχο εάν η τιμή του pH βρίσκεται κάτω από το επιτρεπτό όριο. Εάν διαπιστώσει ότι αυτό αληθεύει, τότε κλείνει τις επαφές του ρελέ, περιμένει 3 δευτερόλεπτα (ή περισσότερο εάν αυτό είναι επιθυμητό) και ανοίγει τις επαφές. Ο λόγος που χρησιμοποιείται η συνάρτηση vDelay, αντί της Delay είναι ότι για το χρονικό διάστημα των 3 δευτερολέπτων θέλουμε να συνεχίσει να εκτελείται στο παρασκήνιο η επικοινωνία με το Virtuino και όχι να παύσει προσωρινά. Έτσι, ενώ περιμένουμε να παρέλθει το χρονικό διάστημα των 3 δευτερολέπτων η επικοινωνία με το κινητό (ή tablet) συνεχίζει απρόσκοπτα. Επιπλέον, καταγράφεται η τιμή της μεταβλητής pump_status στο αρχείο καταγραφής ώστε να γνωρίζουμε πότε λειτούργησε η αντλία, καθώς και πόσες φορές.

Για τον καλύτερο έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος δοκιμάσθηκαν δυο διαφορετικοί χρόνοι λειτουργίας της περισταλτικής αντλίας, διατηρώντας σταθερή την τιμή pH του ρυθμιστικού διαλύματος, στην τιμή 9. Οι χρόνοι λειτουργίας της αντλίας βαθμονομήθηκαν με δοκιμαστικό σωλήνα και αντιστοιχούσαν σε ποσότητα διαλύματος NaOH ίση με 4ml/5min και 2 ml/5min, δηλαδή έγχυση ρυθμιστικού διαλύματος 4 ml ή 2 ml ανά χρόνο 5 λεπτών. Επειδή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι τιμές του pH δεν αποκλίνουν πολύ από την τιμή 7, κρίθηκε σκόπιμο να μεταβληθεί εσκεμμένα το pH μέσα στον αντιδραστήρα, ώστε να φανεί καλύτερα εάν το σύστημά μας είναι ικανό να πετύχει διόρθωση της οξύτητας, ακόμα και αν αυτή αποκλίνει αρκετά από την ιδανική της τιμή. Έτσι, προστέθηκε υλικό στο βιοαντιδραστήρα, το οποίο παρουσίαζε οξύτητα με τιμή pH αρκετά χαμηλότερη της ιδανικής, ώστε το συνολικό διάλυμα να αποκτήσει μια τιμή pH κοντά στο 5.

Στην Εικόνα 44 φαίνεται το γράφημα της οξύτητας για την περίπτωση έγχυσης NaOH ίσης με 4 ml/5min. Αρχικά, η τιμή της οξύτητας βρισκόταν πολύ κοντά στο 7 και με την προσθήκη του όξινου διαλύματος H₂SO₄ 7% μεταβλήθηκε πολύ γρήγορα σε μια τιμή

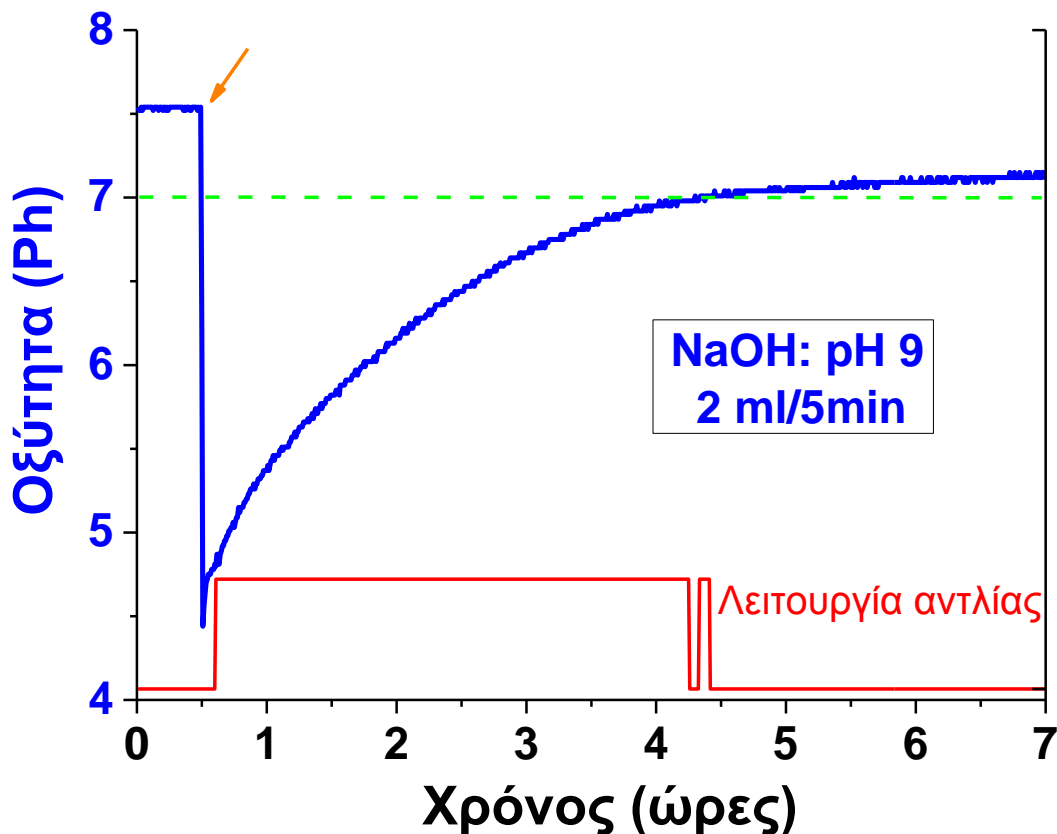
λίγο πιο κάτω από 5. Παρατηρήσαμε ότι δόθηκε εντολή από το μικροελεγκτή για τη λειτουργία της περισταλτικής αντλίας (κόκκινη γραμμή στο κάτω μέρος του διαγράμματος) μέσα στο χρονικό διάστημα των 5 λεπτών που είχε οριστεί. Στη συνέχεια, η τιμή της οξύτητας άρχισε να μεταβάλλεται προς μεγαλύτερες τιμές pH και σε χρόνο περίπου 24 λεπτών προστέθηκε επιπλέον όξινο διάλυμα στο βιοαντιδραστήρα, χαμηλώνοντας εκ νέου την τιμή της οξύτητας κάτω από το 5. Το σύστημα λειτούργησε για χρονικό διάστημα περίπου 3.5 ωρών και κατόρθωσε να επαναφέρει την τιμή του pH πάνω από το 7. Όμως, λόγω του ότι οι τιμές του pH αντιστοιχούν σε λογαριθμική κλίμακα της συγκέντρωσης των ιόντων σε ένα διάλυμα, η έγχυση ακόμα και πολύ μικρής επιπλέον ποσότητας βάσης στο βιοαντιδραστήρα οδηγεί σε υπερβολική αντίδραση της ρύθμισης της οξύτητας σε επίπεδα άνω του 7. Έτσι, το σύστημά μας παρουσίασε τάση υπέρβασης του στόχου (overshoot), ανεβάζοντας την τελική τιμή της οξύτητας στο 7.5 αντί του 7 που θα έπρεπε ιδανικά.



Εικόνα 44: Ρύθμιση οξύτητας στο βιοαντιδραστήρα, χρησιμοποιώντας διάλυμα NaOH και εγχεόμενη ποσότητα ίση με 4 ml/5min. Τα πορτοκαλί βελόνες αποτυπώνουν τις χρονικές στιγμές της προσθήκης όξινου υλικού στο βιοαντιδραστήρα. Στο κάτω μέρος του γραφήματος αποτυπώνεται και η διάρκεια λειτουργίας της περισταλτικής αντλίας.

Για να επιτευχθεί καλύτερη ρύθμιση της τιμής της οξύτητας, μειώθηκε η ποσότητα έγχυσης στο μισό, δηλαδή σε μια ποσότητα εγχέομενου διαλύματος βάσης ίση με 2 ml ανά φορά, δηλαδή ανά χρόνο 5 λεπτών. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε μικρότερο βήμα διόρθωσης της τιμής της οξύτητας και αναμένουμε να παρουσιαστεί μικρότερη τάση υπέρβασης της ιδανικής τιμής της.

Στην Εικόνα 45 φαίνεται το γράφημα της οξύτητας για την περίπτωση έγχυσης NaOH ίσης με 2 ml/5min. Αρχικά, η τιμή της οξύτητας βρισκόταν λίγο πάνω από το 7 (λόγω των προηγούμενων πειραμάτων) και με την προσθήκη του όξινου διαλύματος μεταβλήθηκε πολύ γρήγορα σε μια τιμή κοντά στο 4.5. Στη συνέχεια, η λειτουργία της αντλίας ξεκίνησε μέσα στο προκαθορισμένο διάστημα των 5 λεπτών και η τιμή της οξύτητας αυξήθηκε προοδευτικά σε χρονικό διάστημα περίπου 4.5 ωρών μέχρι την ιδανική τιμή του 7. Στην περίπτωση αυτή η υπέρβαση του στόχου ήταν πολύ μικρότερη και ξεπέρασε την ιδανική τιμή κατά μόλις 0.1 μονάδες, οπότε πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ότι επετεύχθη ο στόχος της ρύθμισης στην ιδανική τιμή.



Εικόνα 45: Ρύθμιση οξύτητας στο βιοαντιδραστήρα, χρησιμοποιώντας διάλυμα NaOH και εγχέομενη ποσότητα ίση με 2 ml/5min. Το πορτοκαλί βελάκι αποτυπώνει τη χρονική στιγμή της προσθήκης όξινου υλικού στο βιοαντιδραστήρα. Στο κάτω μέρος του γραφήματος αποτυπώνεται και η διάρκεια λειτουργίας της περισταλτικής αντλίας.

Όπως παρατηρήσαμε και στα δύο πειράματα ρύθμισης της οξύτητας, απαιτήθηκε αρκετός χρόνος, της τάξης των 4 ωρών προκειμένου να ρυθμιστεί πλήρως η τιμή της οξύτητας μέσα στον βιοαντιδραστήρα. Ο χρόνος αυτός είναι σχετικά μεγάλος, αλλά όχι σε τέτοια επίπεδα που να επηρεάζει τη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα και την παραγωγή βιοαερίου. Επίσης, σε πραγματικές συνθήκες ο χρόνος αυτός θα είναι μικρότερος, μιας και τυχόν προσθήκες υλικού στο βιοαντιδραστήρα θα παρουσιάζουν τιμές οξύτητας που θα πλησιάζουν το 6, ή και λίγο μικρότερες, αλλά όχι κάτω από το 5 που εμείς προσομοιώσαμε στα πειράματά μας. Έτσι, ο πραγματικός χρόνος που θα απαιτηθεί για τη διόρθωση της οξύτητας θα είναι πολύ μικρότερος. Φυσικά, ο χρόνος που απαιτείται για τη διόρθωση της οξύτητας θα μπορούσε να μειωθεί αυξάνοντας την εγχεόμενη ποσότητα βάσης, αλλά τότε δε θα ήταν εφικτό να επιτευχθεί καλή διόρθωση και θα προέκυπταν έντονα φαινόμενα υπέρβασης του στόχου (overshoot).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παραγωγή ενέργειας από υπολείμματα που παράγονται στη λεκάνη της Μεσογείου, καθώς και από υπολείμματα τροφίμων είναι ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας και ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια. Η κατασκευή ενός ξηρού αναερόβιου βιοαντιδραστήρα (Solid State Anaerobic Bioreactor), ο οποίος θα είναι σε θέση να διαχειρίζεται όλα τα υπολείμματα με έναν αυτοματοποιημένο και βέλτιστο τρόπο, αποτελεί το στόχο της ερευνητικής προσπάθειας, προκειμένου να παραχθεί ο μέγιστος δυνατός όγκος και η βέλτιστη σύνθεση βιοαερίου. Οι κύριες λειτουργικές παράμετροι ενός τέτοιου βιοαντιδραστήρα πρέπει να παρακολουθούνται στενά και να ελέγχονται ενεργά προκειμένου να είναι ασφαλής η λειτουργία του και να αποδίδει τη μέγιστη παραγωγή βιοαερίου. Η ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος, βασισμένου στην πλατφόρμα Arduino, για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του αναερόβιου βιοαντιδραστήρα στερεάς κατάστασης είναι το κύριο αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Το σύστημα που αναπτύχθηκε βασίστηκε στον μικροελεγκτή Arduino nano (ATmega328), σε συνδυασμό με διάφορους αισθητήρες κατάλληλους για την παρακολούθηση των παραμέτρων λειτουργίας, αλλά και την ενεργό ρύθμιση της τιμής της οξύτητας στα επιθυμητά επίπεδα.

Στα πλαίσια της εργασίας, κατασκευάστηκε ένα σύστημα παρακολούθησης και καταγραφής των βασικών παραμέτρων λειτουργίας ενός βιοαντιδραστήρα. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκαν και καταγράφηκαν, η θερμοκρασία του υλικού μέσα στο βιοαντιδραστήρα, η θερμοκρασία του νερού θέρμανσης, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου, η σχετική υγρασία μέσα στο βιοαντιδραστήρα, καθώς και η οξύτητα (pH). Αναπτύχθηκε, επίσης, η δυνατότητα παρακολούθησης των μετρήσεων από απόσταση, μέσω ασύρματης σύνδεσης Bluetooth από κινητό ή tablet.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε κορεσμό της σχετικής υγρασίας, σε τιμές που ήταν σταθερές στο 100% καθόλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, λόγω της υδαρούς μορφής του υλικού μέσα στο βιοαντιδραστήρα, που προκαλεί κορεσμό της υγρασίας. Η θερμοκρασία μέσα στο βιοαντιδραστήρα ήταν σχετικά σταθερή με μικρές διακυμάνσεις της τάξης των 1-2 °C, που οφείλονταν στη διακύμανση της θερμοκρασίας του νερού θέρμανσης. Η θερμοκρασία του νερού θέρμανσης έδειξε να επηρεάζεται ελαφρώς από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου, αλλά διατηρήθηκε σταθερή με μικρές διακυμάνσεις της τάξης των 2 °C, που οφείλονται κατά κύριο λόγο στην αδυναμία του συστήματος θέρμανσης να επιτύχει απόλυτη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας. Η τιμή της οξύτητας παρουσίασε μικρή μείωση με το χρόνο και σταθεροποίηση λίγο κάτω από την ιδανική τιμή του 7, μετά από διάστημα περίπου 4 ημερών.

Επιπλέον, αναπτύχθηκε σύστημα για τον ενεργό έλεγχο της τιμής της οξύτητας μέσα στο βιοαντιδραστήρα, χρησιμοποιώντας μια περισταλτική αντλία για έγχυση μικρών ποσοτήτων βασικού διαλύματος, ώστε να διατηρείται το επιθυμητό επίπεδο pH πολύ κοντά στην ιδανική τιμή, για βέλτιστη απόδοση και μέγιστη παραγωγή βιοαερίου. Με κατάλληλες δοκιμές βρέθηκε ο βέλτιστος ρυθμός έγχυσης ώστε να μειωθεί η υπέρβαση στόχου (overshoot) και να επιτευχθεί αποτελεσματική ρύθμιση του pH πολύ κοντά στο 7, ακόμα και αν η αρχική του απόκλιση ήταν μεγάλη.

Η σχεδόν απόλυτη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του βιοαντιδραστήρα στην ιδανική τιμή για βέλτιστη λειτουργία είναι εφικτή μέσω της σταθεροποίησης της θερμοκρασίας του νερού θέρμανσης και θα μπορούσε να αποτελέσει συνέχεια της παρούσας εργασίας. Λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του νερού η θερμική του αδράνεια αναμένεται να είναι μεγάλη και επομένως η χρονική απόκριση σε μεταβολές θερμοκρασίας είναι αργή. Προκειμένου να είναι εφικτή η απόλυτη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας απαιτείται ο έλεγχος της θερμαντικής αντίστασης με ένα ελεγκτή pid (pid controller). Με προσεκτική ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας του ώστε να ανταποκρίνεται στις ιδιαιτερότητες του συστήματος, μπορεί να επιτευχθεί υψηλή σταθερότητα στη θερμοκρασία του νερού θέρμανσης, που εκτιμάται ότι μπορεί να είναι περίπου 0.2 °C. Με τον τρόπο αυτό θα επιτυγχάνεται απόλυτα σταθερή θερμοκρασία μέσα στο βιοαντιδραστήρα και βελτιστοποίηση της απόδοσής του.

Όπως παρατηρήθηκε και στα δύο πειράματα ρύθμισης της οξύτητας, απαιτήθηκε αρκετός χρόνος, της τάξης των 4 ωρών προκειμένου να ρυθμιστεί πλήρως η τιμή της οξύτητας μέσα στο βιοαντιδραστήρα. Ο χρόνος αυτός είναι σχετικά μεγάλος και θα μπορούσε να μειωθεί αυξάνοντας την εγχέομενη ποσότητα βάσης, αλλά τότε δε θα μπορούσαμε να επιτύχουμε καλή διόρθωση και θα είχαμε έντονα φαινόμενα υπέρβασης του στόχου (overshoot). Μια άλλη λύση για την επίτευξη γρήγορης διόρθωσης της οξύτητας, αλλά και ταυτόχρονα επίτευξη μεγάλης ακρίβειας και μικρής υπέρβασης στόχου θα μπορούσε να είναι ένας βελτιωμένος αλγόριθμος, σύμφωνα με τον οποίο η εγχέομενη ποσότητα δε θα είναι σταθερή, αλλά θα εξαρτάται από την απόκλιση που παρουσιάζει η μετρούμενη τιμή οξύτητας από την ιδανική της τιμή. Έτσι για παράδειγμα, η εγχέομενη ποσότητα βάσης θα μπορούσε να καθορίζεται από τη διαφορά της μετρούμενης τιμής οξύτητας από την τιμή 7 (δηλαδή 7 μείον το μετρούμενο pH) επί ένα συντελεστή βαρύτητας A που θα καθορίζει τη βαρύτητα της διόρθωσης. Μια καλή αρχική τιμή για το συντελεστή αυτό θα μπορούσε να είναι κάπου μεταξύ 2 και 5 και στη συνέχεια, με πειράματα να γίνει ο ακριβής προσδιορισμός της βέλτιστης τιμής του για το συγκεκριμένο βιοαντιδραστήρα και τις τιμές pH του

ρυθμιστικού διαλύματος. Έτσι η εγχεόμενη ποσότητα θα είναι μεγαλύτερη, αρχικά, ενώ θα μειώνεται προοδευτικά όσο η μετρούμενη τιμή οξύτητας πλησιάζει στην ιδανική της τιμή. Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσαμε να επιτύχουμε γρήγορη αντίδραση στα αρχικά στάδια, αλλά και δυνατότητα μικρορύθμισης όσο η τιμή της οξύτητας βρίσκεται κοντά στο 7. Στην παρούσα εργασία, δυστυχώς, δεν κατέστη δυνατό να δοκιμαστεί ο βελτιωμένος αυτός αλγόριθμος, λόγω μη δυνατότητας πρόσβασης στο βιοαντιδραστήρα και προσθήκης νέου υλικού, κατά το τελευταίο στάδιο της εργασίας. Θα μπορούσε να αποτελέσει, όμως αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκαν στο διεθνές συνέδριο RETASTE 2022⁴⁹ με τίτλο: «Development of an Arduino-based electronic monitoring system for the operation of Solid State Anaerobic Bioreactors».

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΛΗΡΗΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΣΕ ΓΛΩΣΣΑ ARDUINO

```

// ARDUINO CODE

#include <SoftwareSerial.h>

#include <SPI.h>

#include <SD.h>


// Declaration of SD card

File myFile;


// Declaration of Virtuino serial communication

SoftwareSerial espSerial = SoftwareSerial(2,3);    // arduino RX pin=2  arduino TX pin=3
connect the arduino RX pin to esp8266 module TX pin - connect the arduino TX pin to
esp8266 module RX pin


//-----VirtuinoCM Library and settings -----

#include "VirtuinoCM.h"

VirtuinoCM virtuino;

#define V_memory_count 6           // the size of V memory. You can change it to a
number <=255)

float V[V_memory_count];          // This array is synchronized with Virtuino V memory.
You can change the type to int, long etc.

boolean debug = true;              // Serial interface ON/OFF


//===== Variable Declarations =====

unsigned long temp1=0, temp2=0, temp3=0, temp4=0, elapsed_time = millis(),
elapsed_time_pump = millis();

```

```

float elapsed_hours=0, Bioreactor_temp=0, Water_temp=0, Ambient_temp=0,
pH_Voltage=0, pH=0, Filesize=0;

const int average_num = 700;          // Times to average

byte pump_status=0;

//===================================================== setup =====

void setup() {

    if (debug) {
        Serial.begin(9600);
        while (!Serial) continue;
    }

    espSerial.begin(9600);
    espSerial.setTimeout(50);

    Serial.print("Initializing SD card...");

    if (!SD.begin(10)) {
        Serial.println("initialization failed!");

        while (1);
    }

    Serial.println("initialization done.");

    pinMode(4, OUTPUT);                // Pin for pump (using a relay)

```

```

digitalWrite(4, HIGH);          // pump relay off

analogReference(INTERNAL);      // Set Analog Reference to 1.1 Volt

myFile = SD.open("Data.txt", FILE_WRITE);  //Write the labels once
if (myFile) {
    myFile.println("Time, Reactor Temperature, Reactor pH, Water Temperature,
Ambient Temperature, Pump");
    myFile.close();
}

virtuino.begin(onReceived,onRequested,50);  //Start Virtuino. Set the buffer to 256.
With this buffer Virtuino can control about 28 pins (1 command = 9bytes)

}

//===== Loop =====
void loop() {

    virtuinoRun();  // Necessary function to communicate with Virtuino. Client handler.

//===== MAIN CODE =====

temp1 = 0;

```

```

temp2 = 0;

temp3 = 0;

temp4 = 0;


int dummy = analogRead(A0); // Dummy Read

for (int i = 0; i < average_num; i++) {           //Do loop for smoothing!

temp1 = temp1 + analogRead(A0);                   //Temperature Sensor No1: Bioreactor
}

Bioreactor_temp = temp1 / average_num;

Bioreactor_temp= Bioreactor_temp*100.0*1.1/1023.0; // Real temperature in C

V[0] = Bioreactor_temp;                           // Bioreactor Temperature for Virtuino


dummy = analogRead(A2); // Dummy Read

for (int i = 0; i < average_num; i++) {           //Do loop for smoothing!

temp2 = temp2 + analogRead(A2);                   //Temperature Sensor No2: Water
temperature
}

Water_temp = temp2 / average_num;

Water_temp= Water_temp*100.0*1.1/1023.0;          // Real temperature in C

V[2] = Water_temp;                                // Water temperature for Virtuino


//                                READ                                pH                                routines
+++++

dummy = analogRead(A4); // Dummy Read

```



```

for (int i = 0; i < average_num; i++) {          //Do loop for smoothing!

Temp3 = temp3 + analogRead(A4);          //Temperature Sensor No2: Water temperature
}

pH_Voltage = temp3 / average_num;

pH_Voltage = pH_Voltage*4.91*1.1/1023.0;      // multiply by 4,91 due to ~1/5 voltage
divider

pH = 20.4-5.34*pH_Voltage;

V[1] = pH;                                // pH for Virtuino


dummy = analogRead(A6); // Dummy Read

for (int i = 0; i < average_num; i++) {          //Do loop for smoothing!

Temp4 = temp4 + analogRead(A6);              //Temperature Sensor No2: Water
temperature
}

Ambient_temp = temp4 / average_num;

Ambient_temp= Ambient_temp*100.0*1.1/1023.0;    // Real temperature in C

V[3] = Ambient_temp;                          // Ambient temperature for Virtuino


V[4] = millis()/86400000;                      // Total elapsed time in days

V[5] = Filesize;                              // Logging file size in Kb


elapsed_hours = millis() / 3600000;


//-----SD DATA LOGGING-----

```

```

if(millis()-elapsed_time > 30000) {      // Write to file every 30 sec

    elapsed_time = millis();

    myFile = SD.open("Data.txt", FILE_WRITE);

    if (myFile) {

        myFile.print(elapsed_hours);

        myFile.print(" ,");

        myFile.print(Bioreactor_temp);

        myFile.print(" ,");

        myFile.print(pH);

        myFile.print(" ,");

        myFile.print(Water_temp);

        myFile.print(" ,");

        myFile.print(Ambient_temp);

        myFile.print(" ,");

        myFile.println(pump_status);

        Filesize = myFile.size()/1000.0;      // Logging file size in Kb

        myFile.close();

    }

    else {

        // if the file didn't open, print an error:

        Serial.println("error opening File");

    }

}

```

```
//-----Peristaltic pump code-----
```

```
if(millis()-elapsed_time_pump > 300000) {    // Check pH values every 5 min
```

```
    elapsed_time_pump = millis();
```

```
if(pH < 6.95) {
```

```
    digitalWrite(4, LOW);    // start the pump
```

```
    vDelay(3000);           // Run the pump for 3 seconds
```

```
    digitalWrite(4, HIGH); // stop the pump
```

```
    pump_status = 1;
```

```
}
```

```
else {
```

```
    pump_status = 0;
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

```
//===== MAIN CODE END =====
```

```
//===== VIRTUINO CODE =====
```

```
onCommandReceived
```

```
/* This function is called every time Virtuino app sends a request to server to change a  
Pin value
```

```
* The 'variableType' can be a character like V, T, O V=Virtual pin T=Text Pin O=PWM  
Pin
```

```

* The 'variableIndex' is the pin number index of Virtuino app

* The 'valueAsText' is the value that has sent from the app */

void onReceived(char variableType, uint8_t variableIndex, String valueAsText){

    if (variableType=='V'){

        float value = valueAsText.toFloat();           // convert the value to float. The
valueAsText have to be numerical

        if (variableIndex<V_memory_count) V[variableIndex]=value;           // copy the
received value to 95irtuin V memory array

    }

}

//=====

/* This function is called every time Virtuino app requests to read a pin value*/

String onRequested(char variableType, uint8_t variableIndex){

    if (variableType=='V') {

        if (variableIndex<V_memory_count) return String(V[variableIndex]); // return the
value of the 95irtuin V memory array

    }

    return "";

}

//===== virtuinoRun =====

void virtuinoRun(){

    while (espSerial.available()) {

```

```

char tempChar=espSerial.read();

if (tempChar==CM_START_CHAR) {          // a new command is starting...

    96irtuino.readBuffer=CM_START_CHAR;    // copy the new command to the
96irtuino.readBuffer

    96irtuino.readBuffer+=espSerial.readStringUntil(CM_END_CHAR);

    96irtuino.readBuffer+=CM_END_CHAR;

    if (debug) Serial.println("\nCommand= "+96irtuino.readBuffer);

    String* response= 96irtuino.getResponse(); // get the text that has to be sent
to Virtuino as reply. The library will check the inputBuffer and it will create the response
text

    if (debug) Serial.println("Response : "+*response);

    espSerial.print(*response);

    break;

}

}

}

//===== vDelay =====

void    vDelay(int    delayInMillis){long    t=millis()+delayInMillis;while    (millis())<t)
virtuinoRun();}

// END

```

Αναφορές

- ¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Resistance_thermometer
- ² <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple>
- ³ <https://www.eurotherm.com/eurotherm-products/temperature-controllers/>
- ⁴ <https://sensirion.com/products/catalog/SHT45-AD1F/>
- ⁵ <https://www.omega.com/en-us/resources/ph-meter>
- ⁶ <https://www.hannainstruments.co.uk/controllers-monitors-ph-multiparameter/2288-hi-8711-ph-analogue-controller>
- ⁷ S. Chozhavendhan, G. Karthigadevi, B. Bharathiraja, R. Praveen Kumar, Lata Deso Abo, S. Venkatesa Prabhu, Ramalingam Balachandar, Mani Jayakumar, Environmental Research, Volume 216, Part 2, 2023, 114526
- ⁸ Nigel G. H. Guilford, HyunWoo Peter Lee, Kärt Kanger, Torsten Meyer, and Elizabeth A. Edwards Environmental Science & Technology 2019 53 (21), 12677-12687
- ⁹ Διδακτορική διατριβή Αγγελική Μαραγκάκη, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, 2018
- ¹⁰ Gerardi, M. H. (2003). The microbiology of anaerobic digesters. John Wiley & Sons, Inc. Publication.
- ¹¹ A. Ajayi-Banji, S. Rahman, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 167, October 2022, 112756
- ¹² Anderson, K., Sallis, P., Uyanik, S. (2003). "Handbook of Water and Wastewater Microbiology" (D. M. κ. N. Horan, ed.), Academic Press, Elsevier
- ¹³ Ahring, K. B., Sandberg, M., Angelidaki, I. (1995). Applied Microbiology & Biotechnology 43, pp. 559-565.
- ¹⁴ Bermudez, J. J., Canovas, M., Manjon, A., Howell, J.A., Iborra, J. L. (1988). Biochemical Education 16, pp. 82.
- ¹⁵ Fountoulakis, M. S., Drakopoulou, S., Terzakis, S., Georgaki, E., Manios, T. (2008), Biomass Bioenergy 32, pp. 155–161.
- ¹⁶ Champagne, C. Li, P., Anderson, B. C. (2015), Renewable Energy 83, pp. 474-482.
- ¹⁷ Ahring, B. K., Angelidaki, I. (1997), Proceedings of the 8th international Conference on anaerobic digestion, 25-29 May 1997, Sendai, Japan 1, pp. 40-50.
- ¹⁸ «Εισαγωγή στη βιοχημική μηχανική», Λυμπεράτος Γεράσιμος, Παύλου Σταύρος, εκδόσεις Τζιόλα, 2010
- ¹⁹ «Μηχανική βιοδιεργασιών Βασικές Έννοιες», Michael L. Shuler, Fikret Kargi, 2005, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, ISBN: 960-254-653-0
- ²⁰ The Sequencing Batch Reactor as a Powerful Tool for the Study of Slowly Growing Anaerobic Ammonium-oxidizing Microorganisms - Springer. N.p., 01 Nov. 1998. Web. 26 Feb. 2014
- ²¹ A.UppalW.H.Ray, Chemical Engineering Science, Vol. 29, Issue 4, April 1974, p.p. 967-985
- ²² JinzhongZhangRobinSmith, Chemical Engineering Science vol. 59, Issue 2, January 2004, p.p. 459-478
- ²³ <https://www.microchip.com/en-us/products/microcontrollers-and-microprocessors/8-bit-mcus/avr-mcus>
- ²⁴ David Kushner (2011-10-26), "The Making of Arduino". IEEE Spectrum
- ²⁵ Justin Lahart (27 November 2009). "Taking an Open-Source Approach to Hardware". The Wall Street Journal. Retrieved 2014-09-07.
- ²⁶ <https://ftdichip.com/products/ft232rl/>
- ²⁷ <https://www.arduino.cc/en/software>
- ²⁸ <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega328>
- ²⁹ Jacob Fraden, "Handbook of Modern Sensors, Physics, Designs, and Applications", Springer Cham, ISBN 978-3-319-19302-1
- ³⁰ John S. Steinhart, Stanley R. Hart, «Calibration curves for thermistors», Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts, Volume 15, Issue 4, August 1968, Pages 497–503, ISSN 0011-7471, doi:10.1016/0011-7471(68)90057-0
- ³¹ <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>

-
- ³² <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>
- ³³ Lee, Chia-Yen; Lee, Gwo-Bin, Sensor Letters, Volume 3, Numbers 1-4, January 2005, pp. 1-15(15)
- ³⁴ <https://atlas-scientific.com/blog/how-does-a-ph-probe-work/>
- ³⁵ <https://apureinstrument.com/blogs/what-is-ph-probe-and-how-it-works/>
- ³⁶ <https://www.ysi.com/ysi-blog/water-blogged-blog/2019/02/anatomy-of-ph-electrodes>
- ³⁷ Bates, Roger G. (1954). "Chapter 10, Glass electrodes". Determination of pH. New York: Wiley
- ³⁸ MacInnes, D. A., and L. G. Longworth, Transactions of The Electrochemical Society 71.1 (1937): 73-91
- ³⁹ <https://www.ti.com/lit/an/snoa529a/snoa529a.pdf?ts=1672651826737>
- ⁴⁰ <https://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>
- ⁴¹ https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf?ts=1672631704115&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- ⁴² <https://www.sdcard.org/>
- ⁴³ Usach, Miguel. AN-1248 Application Note: SPI Interface. Analog Devices, Inc., September 2015
- ⁴⁴ <https://www.bluetooth.com/>
- ⁴⁵ <https://virtuino.com/>
- ⁴⁶ <https://www.dupont.com/electronic-materials/connectors.html>
- ⁴⁷ I V Volkov et al 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 577 012018
- ⁴⁸ <https://en.wikipedia.org/wiki/Opto-isolator>
- ⁴⁹ <https://retaste.gr/retaste-2022-past-event/>