

Σύγχρονες Τεχνικές Διαχείρισης Λυματολάσπης & Υγρών Αποβλήτων – Συμβολή της Υπέρυθρης και της Μικροκυματικής Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας

Ευθύμιος Κυριαννάκης

Ηλεκτρολόγος Μηχ. & Μηχ. Η/Υ (ΕΜΠ) και
Μεταπτ. Φοιτητής ΔΙΑ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

ekyrian@teemail.gr, std104285@ac.eap.gr

Κων/νος Κομνίτσας

Καθηγητής Σχολής Μηχ. Ορυκτών Πόρων,
Πολυτεχνείο Κρήτης, Επιβλέπων και Μέλος ΣΕΠ
ΔΙΑ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

komni@mred.tuc.gr

Περίληψη – Στόχος της εργασίας είναι η παρουσίαση των δυνατοτήτων εφαρμογής της Υπέρυθρης Ακτινοβολίας και της Μικροκυματικής ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας στην επεξεργασία Λυματολάσπης και γενικότερα Αστικών & Βιομηχανικών Υγρών Αποβλήτων και η ανασκόπηση των βασικών εργασιών που έχουν λάβει χώρα διεθνώς με ταυτόχρονη αποτίμηση των παρουσιαζόμενων τεχνικών και των προοπτικών τους.

Λέξεις-Κλειδιά: Αστικά & Βιομηχανικά Υγρά Απόβλητα (ΑΥΑ και ΒΥΑ), Λυματολάσπη – Ίλός, Οργανικά Απόβλητα, Μέθοδοι ξήρανσης λυματολάσπης, Επεξεργασία με Υπέρυθρη Ακτινοβολία (ΥΑ) και με Μικροκυματική Ακτινοβολία (ΜΑ), Δηλεκτρική Θέρμανση (ΔΘ) με Ραδιοσυχνότητες (ΡΣ).

Ι. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ξήρανση της λυματολάσπης ΑΥΑ – ΒΥΑ, η οποία στοχεύει στη μερική ή ολική αφαίρεση της περιεχόμενης υγρασίας της και στην υγειονομοποίησή της, με την καταστροφή (μέχρι ασφαλούς επιπέδου) του μικροβιακού της φορτίου, φαίνεται ότι μπορεί να επιτευχθεί με τη θερμική της επεξεργασία με Η/Μ ενέργεια και ειδικότερα με τη χρήση ΥΑ και ΜΑ/ΔΘ (με ΡΣ), πέραν των ευρέως χρησιμοποιούμενων μέχρι σήμερα συμβατικών τεχνολογιών θερμικής επεξεργασίας.

Ενώ η θερμική επεξεργασία με ΥΑ, ΜΑ και ΡΣ είναι διαθέσιμη για χρήση από τη βιομηχανία για περίοδο πλέον των 60 ετών, η πραγματική χρήση της είναι περιορισμένη, ενώ στη λυματολάσπη έχουν γίνει μόνο σποραδικές προσπάθειες. Ωστόσο, φαίνεται να προσφέρουν μοναδικά οφέλη και αναμένεται να συγκεντρώσουν το ενδιαφέρον της επιστημονικής / τεχνικής κοινότητας τα επόμενα έτη. Όταν εφαρμόζονται σωστά, μπορεί να προσδώσουν σημαντική βελτίωση στην κερδοφορία μιας μονάδας βιομηχανικής επεξεργασίας λυματολάσπης κατά τρόπο που δεν επιτυγχάνεται με οποιοδήποτε άλλο μέσο.

ΙΙ. ΜΕΘΟΛΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε στις ιδιαίτερες συνθήκες που ικανοποιεί η μεταφορά θερμότητας με ΥΑ και ΜΑ.

Α. Υπέρυθρη Ακτινοβολία (ΥΑ)

Είναι γνωστό ότι η ΥΑ (εύρος θεωρητικά 300GHz – 400.000GHz) έχει πλεονεκτήματα σε ότι αφορά τη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία σε σχέση με αυτήν που γίνεται με μεταφορά (συναγωγή). Οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας είναι υψηλοί διότι σημαντικά ποσά ενέργειας κατευθύνονται σχεδόν αποκλειστικά προς το υλικό οδηγώντας σε πολύ μικρότερους χρόνους επεξεργασίας, ενώ και το κόστος της πρωτογενώς χρησιμοποιούμενης ενέργειας μπορεί να είναι χαμηλό. Η διεργασία μπορεί να γίνει σε

θερμοκρασία περιβάλλοντος και ο εξοπλισμός μπορεί να είναι συμπαγής και αυτοματοποιημένος με υψηλό βαθμό ελέγχου επί των παραμέτρων της (Modest, 1993). Η ΥΑ είναι κατάλληλη για να αφυδατώνει υλικό με μεγάλη επιφάνεια έκθεσης στην ακτινοβολία. Γενικά, τα στερεά υλικά απορροφούν την ενέργεια που μεταφέρεται από την ΥΑ σε ένα λεπτό στρώμα, και το βάθος της διείσδυσης εξαρτάται από τη διαπερατότητά τους, η οποία επηρεάζεται από την περιεχόμενη υγρασία. Ως εκ τούτου, η υψηλή περιεκτικότητα σε νερό της λυματολάσπης μπορεί να απορροφήσει αποτελεσματικά την εκπεμπόμενη ενέργεια στην περιοχή των υπέρυθρων.

B. Μικροκυματική Ακτινοβολία (ΜΑ) & Διηλεκτρική Θέρμανση (ΔΘ) με Ραδιοσυχνότητες (ΡΣ)

Είναι επίσης γνωστό ότι η ΜΑ και η ΔΘ με ΡΣ, ως επίσης μη ιονίζουσες ακτινοβολίες, παρουσιάζουν συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους πλεονεκτήματα, όπως η ολική θέρμανση (ταυτόχρονα σε όλο τον όγκο του εκτεθειμένου υλικού) και η υλικο-επιλεκτική θέρμανση. Ο όρος ΔΘ μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις Η/Μ συχνότητες μέχρι και τουλάχιστον το υπέρυθρο φάσμα. Ωστόσο, είναι γενικά αποδεκτό ότι η ΔΘ γίνεται σε συχνότητες 1 – 100MHz, ενώ η θέρμανση με ΜΑ στην περιοχή 300MHz – 300GHz.

Οι δύο παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά την αποδοτικότητα της μετατροπής της ΜΑ σε θερμότητα και παίζουν σημαντικό σχεδιαστικό ρόλο είναι: η διηλεκτρική σταθερά η οποία μετρά την ικανότητα του υλικού να απορροφά το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, και ο συντελεστής διηλεκτρικών απωλειών που αντιστοιχεί στην ικανότητα των υλικών για την αποθήκευση της ακτινοβολημένης ενέργειας (μετατροπής της σε θερμότητα) (Schiffmann, 1995). Οι συγκεντρώσεις ιόντων στη λυματολάσπη και η περιεκτικότητά της σε νερό είναι καθοριστικές παράμετροι, διότι οι δύο μηχανισμοί που παίζουν ρόλο στην θέρμανση με ΜΑ είναι η ιοντική αγωγιμότητα και η περιστροφή διπόλου.

III. ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

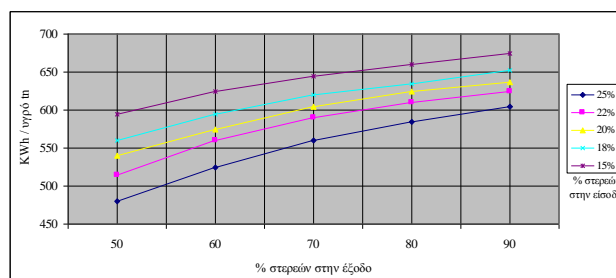
A. Ξήρανση λυματολάσπης με ΥΑ

Μια, και ίσως η πρώτη προσπάθεια ξήρανσης λυματολάσπης με ΥΑ, για την οποία έχουν δημοσιευθεί αποτελέσματα, περιγράφεται στην

τεχνική αναφορά (Electric Power Research Institute, 1997) του EPRI (Palo Alto, California). Κατά την εφαρμογή της μεθόδου ξήρανσης με ηλεκτρικό ξηραντήριο ΥΑ έγινε απομάκρυνση νερού από λυματολάσπες ΑΥΑ και ΒΥΑ. Το ξηραντήριο σχεδιάστηκε για την επεξεργασία βιοστερεών και βιομηχανικής λυματολάσπης που παρουσιάζουν περιεκτικότητα σε στερεά 14% ή και περισσότερο και είναι ικανό να επιτύχει επίπεδα ξηρότητας έως και 90% σε στερεά. Στα χαρακτηριστικά του ξηραντηρίου περιλαμβάνεται η ικανότητά του να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις Class A του κανονισμού 503 του US EPA (40 CFR part 503) για: (α) τη μείωση των παθογόνων στη λυματολάσπη, και (β) την ικανοποίηση απαίτησης 90% ξηρού σε μη σταθεροποιημένα βιοστερεά.

Το ξηραντήριο, που χρησιμοποιήθηκε στο ερευνητικό πρόγραμμα της EPRI, είχε δύο οριζόντιες ζώνες ξήρανσης τοποθετημένες η μια πάνω στην άλλη. Βιοστερεά από μηχανική συσκευή αφυδάτωσης (ταινιοφιλτρόπρεσσα) τροφοδοτήθηκαν μέσω πολλαπλής εισαγωγής στην άνω ζώνη, όπου αναδεύονται από κοχλία και μεταφέρονται εντός του ξηραντηρίου. Τα μερικώς ξηραμένα στερεά εξέρχονται από την πρωτεύουσα ζώνη ξήρανσης και εισάγονται στη δευτερεύουσα ζώνη, επίσης με τη βοήθεια κοχλία. Καθώς τα στερεά κινούνται εντός κάθε ζώνης εκτίθενται σε ΥΑ, η οποία παράγεται από υπέρυθρα θερμαντικά στοιχεία τοποθετημένα πάνω από τις κοιλότητες ατέρμονα κοχλία. Το ξηραντήριο ήταν χωρισμένο κατά μήκος σε οκτώ (8) ζώνες θέρμανσης όπου τα στοιχεία ελέγχονταν για να βελτιστοποιείται η θερμοκρασία ξήρανσης και η κατανάλωση ενέργειας.

Η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία του ξηραντήρα εξαρτάται από την ποσότητα του νερού που πρέπει να απομακρυνθεί (βλ. Σχ. 1).



Σχήμα 1: Κατανάλωση ενέργειας για διάφορες συγκεντρώσεις στερεών σε λυματολάσπη στην είσοδο και στην έξοδο ξηραντηρίου ΥΑ (Πηγή: Electric Power Research Institute, 1997)

Το επιθυμητό επίπεδο ξήρανσης εξαρτάται από τη μέθοδο της τελικής διάθεσης ή επαναχρησιμοποίησης του προϊόντος. Ο παραγόμενος ατμός αφαιρείται σε διαφορετικά σημεία στο ξηραντήριο και υποβάλλεται σε επεξεργασία για έλεγχο οσμών πριν από την διάθεσή του στην ατμόσφαιρα.

Το ξηραντήριο απέδειξε ότι είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για ξήρανση με χρήση θερμότητας με ακτινοβολία.

B. Ξήρανση λυματολάσπης με MA

Τα τελευταία έτη έχει ξεκινήσει προσπάθεια για την έρευνα στη χρήση της MA στη θερμική επεξεργασία λυματολάσπης, τόσο αυτόνομα όσο και σε υβριδικά συστήματα που ενσωματώνουν και άλλες τεχνολογίες (Menéndez et al., 2002; 2004; Beszédes et al., 2011; 2013). Το ινστιτούτο INCAR της Ισπανίας έχει προτείνει μέθοδο για επεξεργασία λυματολάσπης σε υψηλή θερμοκρασία με MA (Menéndez et al., 2005). Υπό κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας, λαμβάνουν χώρα ξήρανση, πυρόλυση και αεριοποίηση των λυμάτων, δημιουργώντας ένα αέριο με υψηλή περιεκτικότητα σε CO, H₂ και έλαιο με χαμηλή περιεκτικότητα σε πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Επιπλέον, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών (1000⁰C στην επιφάνεια του υλικού και 100⁰C υψηλότερη στο εσωτερικό του), είναι δυνατόν να ληφθεί στερεό υπόλειμμα το οποίο είναι μερικώς υαλοποιημένο και πιο ανθεκτικό σε πιθανή διαφυγή οργανικών ρύπων και βαρέων μετάλλων σε σχέση το προϊόν που λαμβάνεται με συμβατική πυρόλυση. Είναι προφανές το πλεονέκτημα της μεθόδου για βιομηχανικές λυματολάσπες με σημαντική παρουσία βαρέων μετάλλων. Λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών της θέρμανσης με MA, δηλαδή απευθείας θέρμανση στο εσωτερικό του όγκου και υψηλά ποσοστά ρυθμού αύξησης θερμοκρασίας (200⁰C/min), σχηματίζεται μεγάλη ποσότητα ατμού σε θερμοκρασίες στις οποίες λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις αεριοποίησης. Κατά συνέπεια, ξήρανση, πυρόλυση και αεριοποίηση συμβαίνουν διαδοχικά σε μια ταχεία διεργασία. Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε λυματολάσπη από ΑYA μετά από αερόβια χώνευση με 71% υγρασία. Η διεργασία διεξήχθη τόσο σε single mode όσο και σε multi-mode φούρνους. Οι φούρνοι

λειτουργούσαν σε συχνότητα 2450MHz και η ισχύς τους έφθανε έως και 2000W. Ωστόσο, όταν η θερμοκρασία έφθανε στους 1000⁰C μόνο 600W ήταν αναγκαία για να διατηρηθεί σταθερή. Το πείραμα διεξήχθη τοποθετώντας δείγμα υγρής ύλης (περίπου 15g) σε χωνευτήριο χαλαζία για 15min.

Για συγκριτικούς σκοπούς, το δείγμα λυματολάσπης υποβλήθηκε σε πυρόλυση και σε συμβατικό ηλεκτρικό κλίβανο εφοδιασμένο με παρόμοιο χωνευτήριο χαλαζία, με εφαρμογή της μέγιστης διαθέσιμης ισχύος του κλιβάνου. Η θερμοκρασία πυρόλυσης ήταν 1000⁰C και ο χρόνος παραμονής 14min.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της ξήρανσης με MA με εκείνες των συμβατικών μεθόδων με θερμό αέρα, διαπιστώθηκε ότι η χρήση MA εξοικονομεί σημαντικό χρόνο και ενέργεια. Έτσι, σε multi-mode φούρνο MA χρειάστηκαν μόλις 5min για να επιτευχθεί λιγότερο από 1% κατά βάρος περιεκτικότητα σε υγρασία, ενώ 8min απαιτήθηκαν με single mode φούρνο MA και 55min με συμβατική ξήρανση. Η μείωση του όγκου που επιτυγχάνεται κατά την διάρκεια της ξήρανσης κυμαίνεται μεταξύ 65-90%. Επίσης το στερεό υπόλειμμα που προκύπτει στο φούρνο MA έχει χαμηλότερο πορώδες, από ότι το αντίστοιχο από τον ηλεκτρικό φούρνο, και υαλώδη υφή (πολύ διαφορετική από την πορώδη υφή του στερεού που παράγεται στον ηλεκτρικό φούρνο).

C. Συνεπεξεργασία Λυματολάσπης – Άχυρων Ρυζιού με MA

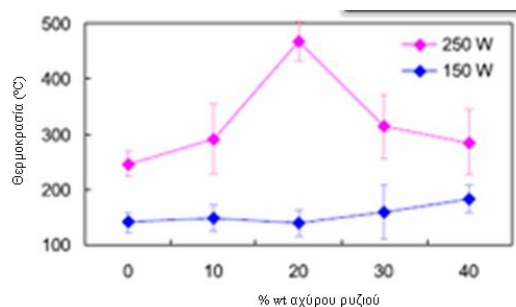
Η συνεπεξεργασία λυματολάσπης (AYA – BYA) με άλλα υλικά (συνήθως οργανικής προέλευσης, π.χ. υπολείμματα αγροτικών καλλιεργειών κ.α) έχει προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια και έχουν παραχθεί πολλές επιστημονικές δημοσιεύσεις.

Για παράδειγμα, έχει μελετηθεί η θερμική συνεπεξεργασία λυματολάσπης και άχυρου ρυζιού μέσω πυρόλυσης με MA (Huang et al., 2015). Το επίπεδο ισχύος εισόδου της MA ήταν κρίσιμη παράμετρος. Στη λυματολάσπη χωρίς προσθήκη άχυρου ρυζιού λάμβανε χώρα πυρόλυση όταν το επίπεδο ισχύος της MA ήταν 200 – 300W, ενώ σε χαμηλότερες ή υψηλότερες τιμές παρατηρήθηκε μόνο ξήρανση ή υπερθέρμανση. Η προσθήκη του άχυρου ρυζιού αύξησε την απόδοση της MA και επέτρεψε υψηλότερη μέγιστη θερμοκρασία. Η θερμική

αξία της πυρολυμένης βιομάζας αυξήθηκε με την προσθήκη άχυρου ρυζιού κατά 30 - 40 %κ.β. Μετρήθηκε μέγιστη θερμοκρασία για μίγματα που περιέχουν άχυρο ρυζιού 20 %κ.β η οποία αποδόθηκε στη συνεργατική τους δράση με τη MA. Για μίγματα που περιείχαν άχυρο ρυζιού 30 - 40 % κ.β προέκυψε στερεό υπόλειμμα περιεκτικότητας σε άνθρακα έως 33 %κ.β. Η ατομική αναλογία H/C και O/C ήταν πολύ κοντά σε εκείνες του ανθρακίτη. Ως εκ τούτου, η πυρόλυση του μίγματος παράγει υλικό με δυνατότητες συν-τροφοδότησης κάρβουνου για καύση ή ακόμα και αντικατάστασής του.

Η λυματολάσπη που χρησιμοποιήθηκε είχε υγρασία περίπου 85%, ξηράνθηκε στον αέρα για αρκετούς μήνες και στη συνέχεια σε συμβατικό φούρνο για τρεις ημέρες. Το άχυρο ρυζιού κοσκινίστηκε με πλέγμα. Και οι δύο βιομάζες χαρακτηρίζονταν από υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά. Το άχυρο ρυζιού είχε περιεκτικότητα σε πτητικά περίπου 20% υψηλότερη από την αντίστοιχη της λυματολάσπης, ενώ αντίθετα η περιεκτικότητα σε τέφρα στο άχυρο ρυζιού ήταν κατά περίπου το ίδιο ποσοστό χαμηλότερη από εκείνη της λυματολάσπης. Κατά συνέπεια, δεν είναι περίεργο ότι η θερμική αξία του άχυρου ρυζιού βρέθηκε σημαντικά υψηλότερη από εκείνη της λυματολάσπης. Έγινε χρήση single-mode φούρνου MA σε συχνότητα 2,45GHz. Η τεμαχισμένη και κοσκινισμένη βιομάζα προστέθηκε σε χωνευτήριο χαλαζία και στη συνέχεια εκτέθηκε στη MA. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του δείγματος τοποθετήθηκε θερμομέτρο υπερύθρων στην κορυφή του σωλήνα χαλαζία. Για να διατηρηθούν ανοξικές συνθήκες, διοχετεύθηκε αέριο άζωτο στο σύστημα με ρυθμό ροής 25 mL/min. Τα επίπεδα ανάκλασης της MA ελέγχονταν ώστε να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερα κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Στο προϊόν έγιναν θερμοβαρυτομετρικές αναλύσεις (TGA), και υπολογίστηκε η απώλεια βάρους και η θερμογόνο δύναμη της πυρολυμένης βιομάζας για την αξιολόγηση της απόδοσης της αντίδρασης και τον προσδιορισμό της βέλτιστης λειτουργίας του φούρνου MA. Σε γενικές γραμμές βρέθηκε ότι το μίγμα λυματολάσπης - άχυρου ρυζιού αποσυντίθεται έντονα σε θερμοκρασίες 200 - 500°C. Εξαιρετικά χαμηλά ποσοστά αποσύνθεσης παρατηρήθηκαν σε χαμηλότερες ή υψηλότερες θερμοκρασίες, επίσης, με τη συν-πυρόλυση λυματολάσπης και

άχυρου ρυζιού επιταχύνεται η απελευθέρωση πτητικών και μειώνεται ο χρόνος επεξεργασίας. Οι μέγιστες θερμοκρασίες για τη συν - πυρόλυση διαφόρων μιγμάτων λυματολάσπης - άχυρου ρυζιού απεικονίζονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Μείγιστες θερμοκρασίες συν-πυρόλυσης για μίγματα λυματολάσπης - άχυρου ρυζιού σε διάφορες % κ.β αναλογίες (για δύο επίπεδα MA ισχύος εισόδου: 150W - 250W) (Πηγή: Huang et al., 2015)

Μεγαλύτερη μέγιστη θερμοκρασία παρατηρήθηκε σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος MA τόσο για τη λυματολάσπη όσο και για το άχυρο ρυζιού. Η προσθήκη άχυρου ρυζιού στη λυματολάσπη αύξησε τη μέγιστη θερμοκρασία πυρόλυσης με MA.

Σε σύγκριση με τη συμβατική θέρμανση, η κατανάλωση ενέργειας και ο χρόνος επεξεργασίας με MA εμφανίζονται σημαντικά μειωμένοι, ενώ και η θερμογόνο δύναμη του στερεού που παράγεται από την πυρόλυση είναι σημαντικά υψηλότερη. Ως εκ τούτου, ως προς την ανάκτηση ενέργειας, η πυρόλυση με MA φαίνεται να είναι πολύ καλύτερη από τη συμβατική πυρόλυση.

D. Σύγκριση Επεξεργασίας YA - MA Λυματολάσπης Γαλακτοβιομηχανιών

Μια συγκριτική αξιολόγηση διεργασίας ξήρανσης λυματολάσπης με χρήση YA και MA παρουσιάζεται στην εργασία των Beszédés et al., 2013, η οποία επικεντρώθηκε στη λυματολάσπη γαλακτοβιομηχανιών. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ξήρανσης με YA/MA αξιολογήθηκαν, για διαφορετική ισχύ εισόδου, τόσο η ξήρανση όσο και η βιοδιασπασιμότητα του περιεχομένου οργανικού φορτίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ξήρανση με MA ήταν, με κριτήριο τον απαιτούμενο χρόνο επεξεργασίας, πιο συμφέρουσα για τη λυματολάσπη γαλακτοβιομηχανιών, από ότι η ξήρανση με YA. Η αύξηση της ισχύος εισόδου στο σύστημα MA είχε αμεσότερες επιπτώσεις στην έξοδο από ότι στο σύστημα με YA, οδηγώντας σε προϊόν με λιγότερη υγρασία. Σε

χαμηλότερη ισχύ, η διεργασία με MA χρειάζεται 30% περισσότερο χρόνο για να οδηγήσει στο ίδιο τελικό περιεχόμενο υγρασίας με την ξήρανση με YA, ενώ σε υψηλότερη ισχύ η μείωση του χρόνου ξήρανσης ήταν περίπου 70%. Λαμβάνοντας υπόψη και την αλλαγή του βαθμού βιοαποδόμησης, η διαδικασία ξήρανσης με MA παρουσιάζει πλεονεκτήματα έναντι της ξήρανσης με YA. Ο φούρνος MA για λυματολάσπη γαλακτοβιομηχανιών οδήγησε σε 13% υψηλότερη βιοαποδόμηση από εκείνη της μεθόδου YA.

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε δείγμα λυματολάσπης με περιεκτικότητα σε ξηρά ουσία $18,2 \pm 0,8$ %κ.β. Το BOD και το SCOD στο δείγμα ιλύος ήταν $23,2 \pm 1,9$ g kg⁻¹ και $193,4 \pm 2,7$ g kg⁻¹, αντίστοιχα. Τα πειράματα για τη ξήρανση με MA διεξήχθησαν στη συσκευή Labotron 500 (SAIREM, Γαλλία) με μάγνητρο σε συχνότητα λειτουργίας 2450MHz, ενώ για την ξήρανση με YA χρησιμοποιήθηκε εκπομπός Philips μέγιστης ισχύος 250W. Για τον ποσοτικό προσδιορισμό του βαθμού βιοαποδόμησης οργανικής ύλης της ιλύος, μετρήθηκε το BOD₅ στους 20°C, σύμφωνα με το πρότυπο APHA5210D που χρησιμοποιεί το σύστημα μέτρησης Lovibond BOD Oxidirect και το SCOD με φωτόμετρο Lovibond CheckDirect SCOD σύμφωνα με τυποποιημένη μέθοδο μετά από 2 ώρες χώνευσης στους 150°C.

Τα αποτελέσματα ξήρανσης με YA για τρεις διαφορετικές πυκνότητες ισχύος έδειξαν ότι οι αυξημένες τιμές έχουν επίδραση κυρίως στο ρυθμό ξήρανσης. Ο ρυθμός ξήρανσης επηρεάστηκε από την πυκνότητα ισχύος και η υψηλότερη τιμή οδήγησε σε επιτάχυνση της ξήρανσης με μειωμένο χρόνο για τη συνολική διεργασία. Το χρονικό πλεονέκτημα της διαδικασίας MA έναντι της YA για τη διάρκεια της ξήρανσης μπορεί να εξηγηθεί από τα διαφορετικά φαινόμενα θερμικής διάχυσης.

Η υψηλότερη τιμή του ρυθμού ξήρανσης μετρήθηκε 0,141 kg/(kg min) στα 2W/g στην ξήρανση με MA και 0,067 kg/(kg min) επίσης στα 2W/g στην ξήρανση με YA. Κατά την μείωση του ρυθμού ξήρανσης στην περιοχή της χαμηλής περιεκτικότητας σε υγρασία, το πλεονέκτημα της υψηλότερης πυκνότητας ισχύος εξασθενεί τόσο στην ξήρανση με MA όσο και στην ξήρανση με YA.

Εξετάστηκε επίσης η μεταβολή του βιοαποδομήσιμου κλάσματος της οργανικής

ύλης της λυματολάσπης μετά την ξήρανση. Η αύξηση της πυκνότητας ισχύος στη YA από 0,5 σε 1W/g οδήγησε σε αύξηση των τιμών BOD των αποξηραμένων δειγμάτων κατά 17%, αλλά η περαιτέρω αύξηση δεν είχε το ίδιο αποτέλεσμα.

Διαφορετικές τάσεις παρατηρήθηκαν εφαρμόζοντας τη μέθοδο MA, επειδή η αύξηση πυκνότητας ισχύος από 0,5 σε 1W/g προκάλεσε αύξηση κατά 21% στο BOD, αλλά όταν η λυματολάσπη ξηραίνεται με 2W/g παρουσιάζει χαμηλότερο BOD. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή διαλυτότητας της οργανικής ύλης κατά τη διάρκεια της διεργασίας ξήρανσης, εκτιμήθηκε η αναλογία του βιοαποδομήσιμου κλάσματος προς το συνολική οργανική ύλη και υπολογίστηκε ως ο λόγος του BOD₅ προς το SCOD. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η ξήρανση με MA παράγει προϊόν με υψηλότερη βιοδιασπασιμότητα, γεγονός που μπορεί να είναι επωφελές και να τύχει περαιτέρω αξιοποίησης.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επεξεργασία αποβλήτων με YA και MA παρουσιάζει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον. Οι σε χρήση συμβατικές θερμικές διεργασίες ιλύος έχουν ως κύριο στόχο την αφυδάτωση και είναι συνήθως σχεδιασμένες να λειτουργούν σε εύρος θερμοκρασιών 60-80°C και για χρονικό διάστημα 30-60min, ενώ τα συνδυασμένα συστήματα ξήρανσης – απολύμανσης σε θερμοκρασία 100°C για 10-40min και υπό πίεση.

Από την άλλη, η θερμική επεξεργασία με YA – MA έδειξε ότι είναι πολύ ταχεία διαδικασία, με μικρό λειτουργικό κόστος, απαιτεί μόνο μια πηγή ενέργειας (ηλεκτρισμός) και επιτυγχάνει συνεχή και ομοιόμορφη επεξεργασία. Χαρακτηρίζεται από άμεση θερμική διείδυση και έχει δυνατότητα μεταφοράς υψηλών ποσοτήτων θερμότητας. Όλη η ενέργεια εστιάζεται στο προϊόν και είναι ελάχιστη η απώλεια προς το περιβάλλον. Η ρύθμιση των διεργασιών είναι ταχεία και δεν υπάρχουν σημαντικές απαιτήσεις σε χώρους εγκατάστασης. Επιπλέον, τόσο η YA όσο και η MA είναι μη ιονίζουσες ακτινοβολίες.

Απαιτούνται περαιτέρω: Έρευνα και πειράματα θερμικής επεξεργασίας ιλύος με YA και MA σε πραγματική κλίμακα, Ανάπτυξη συστηματικού πλαισίου – μεθοδολογίας για την επιλογή και ρύθμιση των παραμέτρων των διεργασιών, Διερεύνηση δυνατοτήτων θερμικής

συνεπεξεργασίας ιλύος με άλλα απόβλητα, Αποτίμηση δυνατοτήτων χρήσης του τελικού προϊόντος (καύση για παραγωγή ενέργειας, γεωργική χρήση, αποκατάσταση εδαφών, ασφαλή διάθεση σε ΧΥΤΑ κ.λπ.).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θερμές ευχαριστίες στη Δρ Ελένη Σαζακλή για τη συμβολή της ως 2^ο μέλος της Επιτροπής Κρίσης της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, καθώς και στον κ. Bob Schiffmann (R.F. Schiffmann Associates, Inc.) για την αποστολή χρήσιμης επιστημονικής αρθρογραφίας σχετικά με τη ΜΑ και ΔΘ διαφόρων υλικών.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Beszédes S. and Keszthelyi-Szabó G. and Hodúr C. (2013). Comparison of drying characteristic and biodegradability of dairy sludge using microwave and infrared drying. *Annals of Faculty of Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering*, XI (4). pp. 297-300.
- Beszédes, S., László, Z., Horváth, Z.H., Szabó, G., Hodúr, C. (2011). Comparison of the effects of microwave irradiation with different intensities on the biodegradability of sludge from the dairy and meat-industry. *Bioresource Technology*, 102 (2), pp 814–821.
- Electric Power Research Institute (EPRI, Palo Alto, California), (1997). Electric infrared drying for Biosolids and Sludge. Municipal Water and Wastewater Program (avail. at <http://infohouse.epri.com/ref/10/09002.pdf>).
- Huang, Y.-F., Shih, C.-H., Chiueh, P.-T., Lo, S.-L. (2015). Microwave co-pyrolysis of sewage sludge and rice straw. *Energy* 87, pp. 638-644.
- Menéndez, J.A., Inguanzo, M., Pis, J.J. (2002). Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge. *Water Research* 36 (13), pp. 3261-3264.
- Menéndez J A, A Dominguez, M Inguanzo, J J Pis (2004). Microwave pyrolysis of sewage sludge: analysis of the gas fraction *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 71 (2), 657-667 JUN.
- Menéndez, J.A., Domínguez, A., Inguanzo, M., Pis, J.J. (2005). Microwave-induced drying, pyrolysis and gasification (MWDPG) of sewage sludge: Vitrification of the solid residue. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 74 (1-2), pp. 406-412
- Modest M. F. (1993). *Radiative Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill International Editions.
- Schiffmann R.F., *Microwaves: Theory and Application in Materials Processing III*, The American Ceramic Society, Westerville, Ohio (1995)