

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΛΥΜΑΤΟΛΑΣΠΗΣ ΩΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΚΑΥΣΙΜΟ**Κ. Ταμπάκης¹, Α. Χριστογέρου¹, Δ. Γ. Κανελλοπούλου¹, Β. Στιβανάκης¹**¹Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η επεξεργασία και η διάθεση της λάσπης που προέρχεται από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων αποτελεί ένα περιβαλλοντικά ευαίσθητο πρόβλημα. Η αξιοποίηση της λυματολάσπης είναι μία δύσκολη διαδικασία λόγω της υψηλής υγρασίας, των επιβλαβών ουσιών που περιέχονται σε αυτή αλλά και των διακυμάνσεων που παρουσιάζει. Η λυματολάσπη είναι ένα παραπροϊόν του οποίου η παραγωγή συνεχώς αυξάνεται καθώς αυξάνει και ο πληθυσμός της γης. Στη χώρα μας η ετήσια παραγωγή ξηρής λυματολάσπης ανέρχεται σε περίπου 130,000 tn. Μία μέθοδος που προτείνεται για αξιοποίηση της ιλύος είναι η καύση της. Σήμερα το δημοφιλέστερο καύσιμο για τις βιομηχανίες παραγωγής δομικών υλικών και ενέργειας στη χώρα μας είναι ο άνθρακας, ο οποίος αφήνει ένα σημαντικό αποτύπωμα στο περιβάλλον. Άρα είναι απαραίτητο να μελετηθούν εναλλακτικές μορφές καυσίμων, ιδιαίτερα αυτές που δεν μπορούμε να εμποδίσουμε την παραγωγή τους όπως η λυματολάσπη. Η λυματολάσπη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο ή ως συν-καύσιμο μαζί με τον άνθρακα για τέτοιες βιομηχανίες ενώ ακόμα και η υπολειπόμενη τέφρα της μπορεί να αποτελέσει πρόσθετο υλικό για διάφορες άλλες χρήσεις. Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η ενεργειακή αξία της λυματολάσπης και η συμπεριφορά της ως καύσιμο. Επίσης, μελετώνται τα απαέρια που παράγονται κατά την καύση της. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε δείγματα με υγρασία και χωρίς αλλά και με προσθήκη ret-coke σε διάφορα ποσοστά. Τα αποτελέσματα της έρευνας είναι ενθαρρυντικά για χρήση της λυματολάσπης σαν βιομηχανικό καύσιμο.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λυματολάσπη αποτελεί ένα από τα βασικότερα παραπροϊόντα των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Είναι το σύνολο των κατάλοιπων που προέρχονται από την πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία ενός βιολογικού καθαρισμού. Στην Ελλάδα λειτουργούν 260 μονάδες επεξεργασίας ιλύος. Η παραγωγή της ξηρής ιλύος υπολογίζεται στα 12,6 κιλά ανά κάτοικο τον χρόνο. Αυτό από μόνο του καθιστά αναγκαίο να βρεθεί μία αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον μέθοδο αξιοποίησης της λυματολάσπης. Λόγου του ότι το προϊόν έχει υψηλό οργανικό φορτίο και οι ποσότητες που παράγονται είναι μεγάλες, προτείνεται να χρησιμοποιηθεί η λυματολάσπη ως καύσιμο. Η συνολική αξιοποίηση της στην συνέχεια απαιτεί να αξιοποιηθεί και η παραγόμενη τέφρα της που παράγεται από την καύση της.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ**1. ΥΛΙΚΑ**

Η λυματολάσπη που μελετήθηκε προέρχεται από την μονάδα επεξεργασίας λυμάτων Άργους-Ναυπλίου. Το δείγμα επιλέχθηκε σαν αντιπροσωπευτικό μιας μέσης αστικής-βιομηχανικής και αγροτικής περιοχής. Στα δείγματα που μελετήθηκαν είχε προσδιοριστεί η σύσταση της λυματολάσπης υγρής ή ξηρής και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκε και πετρελαϊκός άνθρακας (ret-coke) από την τσιμεντοβιομηχανία TITAN (Δρέπανο Αχαΐας) προκειμένου να μελετηθούν και μείγματα ret-coke και λυματολάσπης.

Οι πρώτες ύλες ξηράθηκαν σε εργαστηριακό φούρνο και παρήχθησαν προϊόντα με μηδενική τελική υγρασία. Στη συνέχεια παρασκευάστηκαν μείγματα λυματολάσπης-ret-coke σε διάφορα ποσοστά καθώς και μηδενικό δείγμα καθαρής λυματολάσπης. Μια δεύτερη σειρά μειγμάτων που

παρασκευάστηκε αποτελείται από ίδια μείγματα αλλά με υγρασία λυματολάσπης 15%. Το ποσοστό αυτό υγρασίας στην λυματολάσπη είναι παρόμοιο με το ποσοστό υγρασίας του προϊόντος που παράγεται με μηχανικές-φυσικές διεργασίες (φιλτρόπρεσσα-ξήρανση στον ήλιο)^[1, 2].

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά υγρής και ξηρής λυματολάσπης.

ΕΚΤΕΛΕΣΘΕΙΣΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ επί του υλικού ως έχει	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ επί ξηρού υλικού	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΟΛΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ	GRAVIMETRIC METHOD	13,2	-	% w/w
ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ	GRAVIMETRIC METHOD	10,0	76,0	% w/w
Φωσφόρος – P	UV/VIS	1808	13700	mg/kg
Ασβέστιο – Ca	F AAS	7022	53200	mg/kg
Μαγνήσιο – Mg	F AAS	763	5780	mg/kg
Κάλιο – K	XT-28 AAS	500	3790	mg/kg
Ολικό Άζωτο – N	Kjeldahl	7814	59200	mg/kg
Κάδμιο – Cd	XN-15 In house based in 3111 A&B	< 0,25	< 1,88	mg/kg
Χρώμιο – Cr	XN-15 In house based APHA 3113 A&B AAS	4,4	33,6	mg/kg
Χαλκός – Cu	XN-14 In house APHA 3113 A- B AAS Method	22,2	168	mg/kg
Υδράργυρος – Hg	XN-16 In house method 3112 B AAS/VGA	0,010	0,076	mg/kg
Νικέλιο – Ni	XN-15 In house based APHA 3113 A&B AAS	3,2	24,2	mg/kg
Μόλυβδος – Pb	XN-15 In house based APHA 3133 A&B AAS	8,0	60,5	mg/kg
Ψευδάργυρος – Zn	XT-22 In house method based AOAC 999.10	61,6	467	mg/kg
PCDD/PCDF and dl-PCBs (total TEQ)*	DR CALUX	0,48	3,6	pg BEQ/g
Σύνολο PCBs	GC-ECD	< 0,03	< 0,15	mg/kg
E.Coli	MT-12 ISO 16649-2:2001	6,9 · 10 ⁵	-	cfu/gr
Intestinal Enterococci	M-03 ISO 7899-2:2000	2,9 · 10 ⁵	-	cfu/gr

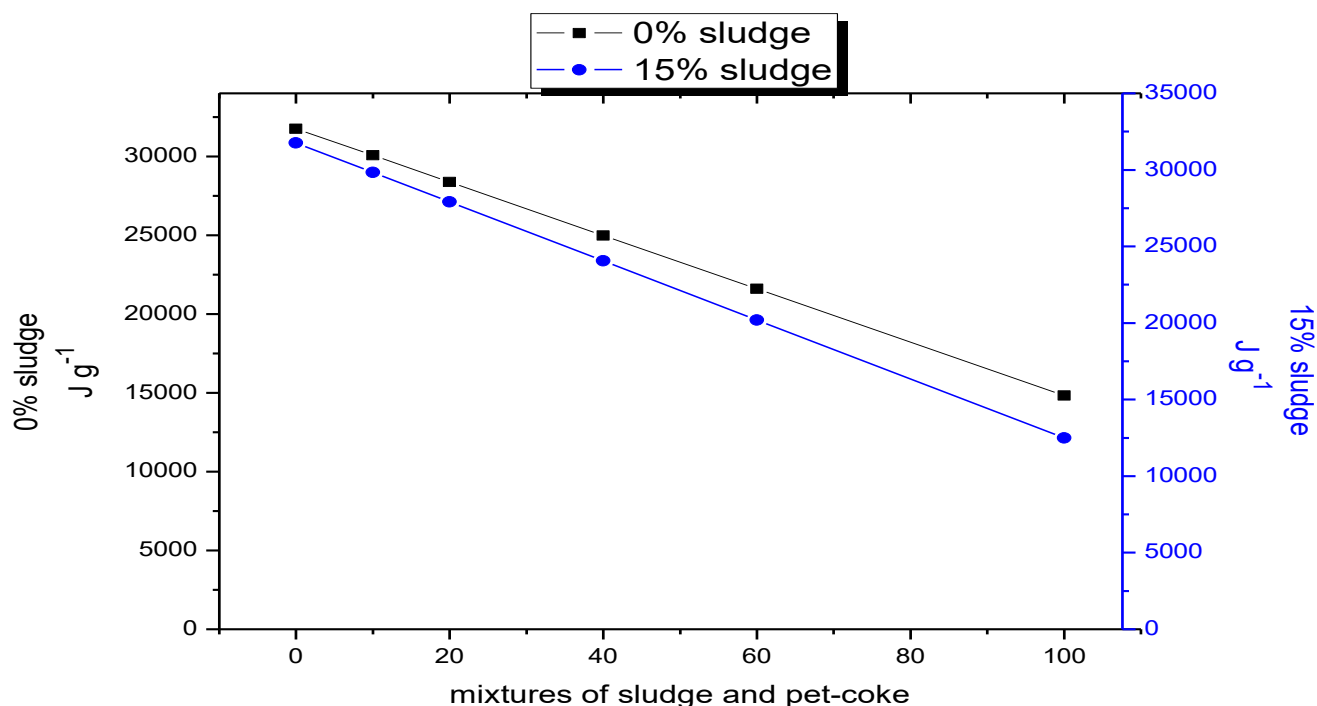
* Η ανάλυση PCDD/PCDF and dl-PCBs πραγματοποιήθηκε στο διαπιστευμένο εργαστήριο BioDetection Systems (BDS) στην Ολλανδία

2. ΜΕΘΟΔΟΙ

Προσδιορίστηκε η θερμογόνος δύναμη των δειγμάτων με θερμιδόμετρο οβίδας (IKA®-C200) σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 1716. Στη συνέχεια έγιναν πειράματα σε DSC-TG NETZSCH STA 449 με ρυθμό θέρμανσης 10 °C min⁻¹ για τα δείγματα. Επίσης χρησιμοποιήθηκε αναλυτής απαερίων TESTO 335 σε έξοδο εργαστηριακού φούρνου για προσδιορισμό της παραγωγής CO.

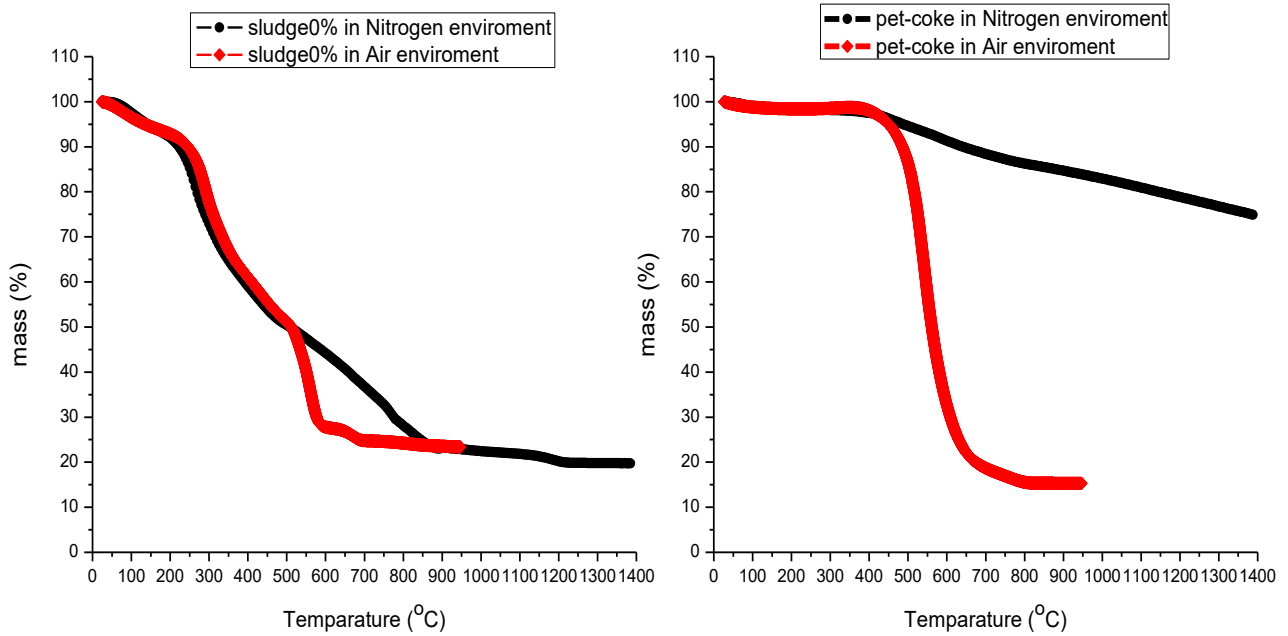
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Για τα δείγματα λυματολάσπης και pet-coke προσδιορίστηκε το θερμιδικό τους περιεχόμενο με το θερμιδόμετρο οβίδας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Όπως είναι εμφανές η σχέση είναι γραμμική^[5].

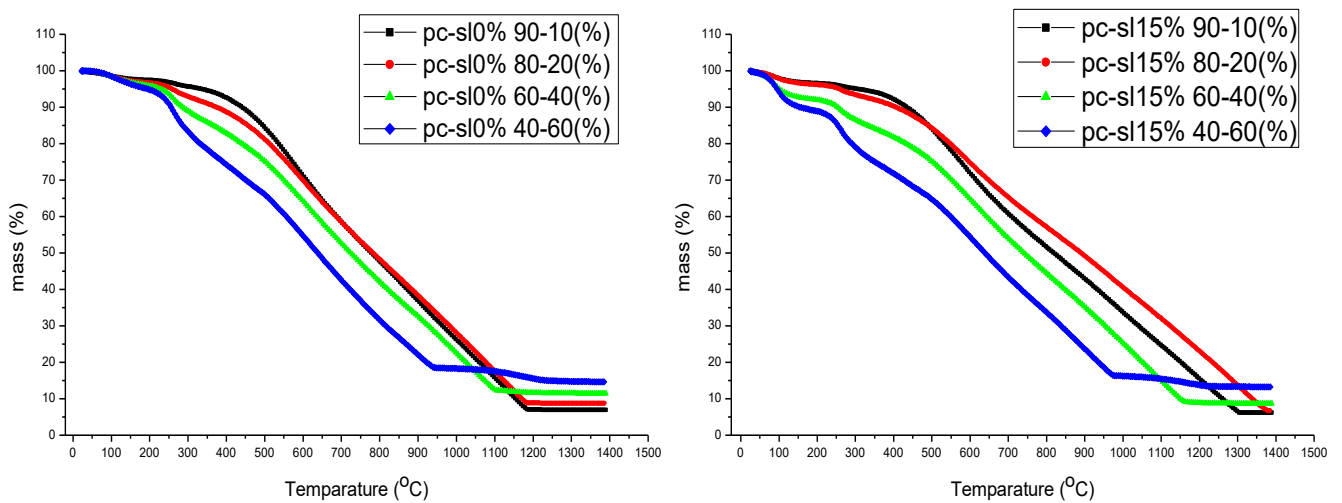


Σχήμα 1. Θερμιδική αξία μειγμάτων ξηρής και υγρής λυματολάσπης (0% sludge και 15% sludge)

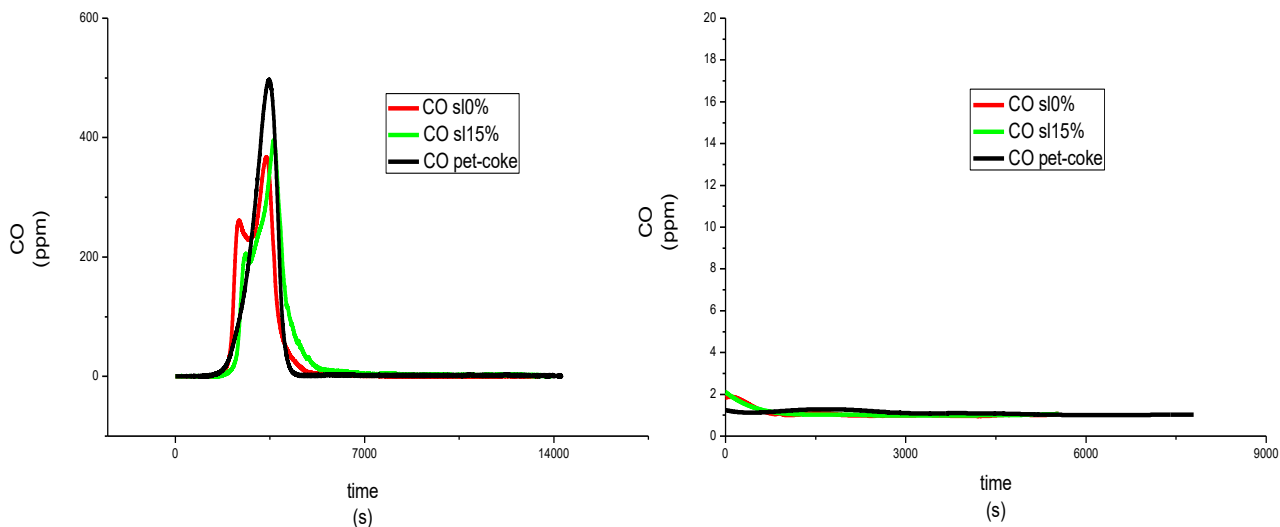
Μελετήθηκε επίσης η συμπεριφορά της ξηρής λυματολάσπης και του pet-coke σε περιβάλλον αζώτου αλλά και σε συνθήκες ατμόσφαιρας (Σχήμα 2 και Σχήμα 3). Από τα σχήματα γίνεται κατανοητό ότι η λυματολάσπη και το pet-coke παρουσιάζουν διαφορές σε περιβάλλον αζώτου. Η θέρμανση στα δύο δείγματα έγινε με ρυθμό μεταβολής $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$. Στα σχήματα 4 και 5 παρουσιάζονται οι συμπεριφορές των μειγμάτων ξηρής (0% sl) ή υγρής (15% sl) λυματολάσπης με pet-coke. Παρατηρείται ότι στα υψηλότερα ποσοστά λυματολάσπης παρουσιάζεται και μεγαλύτερη τελική υπολειμματικότητα. Τέλος τα Σχήματα 6 και 7 δείχνουν την παραγωγή CO ξηρής-υγρής λυματολάσπης και pet-coke σε συνάρτηση με το χρόνο. Το Σχήμα 6 απεικονίζει τα αποτελέσματα με ρυθμό θέρμανσης $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$, ενώ το Σχήμα 7 για απευθείας θέρμανση στους $900\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 2 και Σχήμα 3. Καμπύλες TG για ξηρή λυματολάσπη (sludge0%) και pet-coke σε περιβάλλον αέρα και αζώτου με ρυθμό θέρμανσης $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$.



Σχήμα 4 και Σχήμα 5. Καμπύλες TG για μείγματα ξηρής και υγρής λυματολάσσης με pet-coke σε περιβάλλον αέρα με ρυθμό θέρμανσης $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$.



Σχήμα 6 και Σχήμα 7. Παραγωγή CO με σταδιακή θέρμανση $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ και σε σταθερή θερμοκρασία $900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το pet-coke έχει σχεδόν διπλάσια θερμιδική αξία από τη ξηρή και υγρή λυματολάσπη (Σχήμα1) . Η λυματολάσπη παρουσιάζει ικανοποιητικό θερμιδικό περιεχόμενο (ξηρή- $14,829\text{ J gr}^{-1}$ και υγρή- $12,497\text{ J gr}^{-1}$) και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο. Επίσης, η θερμιδική αξία στα μείγματα λυματολάσπης και pet-coke ακολουθεί γραμμική σχέση. Αυτό δείχνει ότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση στα δύο συστατικά που να διαφοροποιεί το θερμιδικό περιεχόμενο με την ανάμιξη^[4]. Σε περιβάλλον αζώτου (Σχήμα 3) το pet-coke καίγεται μερικώς λόγω απουσίας οξυγόνου. Αντίθετα η λυματολάσπη φτάνει στα ίδια ποσοστά υπολειμματικότητας και στα δύο περιβάλλοντα. Αυτό δείχνει ότι η λυματολάσπη έχει υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο με το οποίο πραγματοποιείται η καύση της (Σχήμα 2). Το pet-coke παρουσιάζει απότομη μείωση του βάρους του σε θερμοκρασία περίπου $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ λόγω της καύσης του περιεχομένου άνθρακα^[4], ενώ η ξηρή λυματολάσπη παρουσιάζει σταδιακή μείωση βάρους σε ευρύ θερμοκρασιακό φάσμα λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς της σε πτητικές ουσίες^[4]. Για ποσοστά ανάμιξης ξηρής και υγρής λυματολάσπης 0-20 % (Σχήματα 4 και 5) παρουσιάζεται αρκετά παρόμοια συμπεριφορά καύσης με αυτή του pet-coke. Στην περίπτωση που τα καύσιμα εισέρχονται σε υψηλές θερμοκρασίες ($900\text{ }^{\circ}\text{C}$) δεν εμφανίζεται παραγωγή CO^[3] (Σχήμα 6 και 7). Άρα η λυματολάσπη μπορεί να θεωρηθεί καλό καύσιμο για μονάδες που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τελικά, σε μια εποχή που αναζητούνται ενεργειακές λύσεις χαμηλού κόστους η λυματολάσπη μπορεί να αποτελέσει εναλλακτικό καύσιμο είτε σε κάποια ποσοστά πρόσμιξης είτε εξ ολοκλήρου για διάφορες βιομηχανίες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Billal Ameria, Salah Haninia, Amina Benhamoub, Dihya Chibaneb. *Solar Energy* (2018) 722-732.
- [2] Syed Shatir A. Syed-Hassana, Yi Wanga, Song Hua,c,, Sheng Sua,Jun Xianga. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2017) 888-913.
- [3] Zahra Khadem Modaresia, Gholamreza Karimib, Dariush Mowlaa. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7 (2019).
- [4] Aneta Magdziarz, Małgorzata Wilk. *Energy Conversion and Management* 75 (2013) 425–430.
- [5] M. Bele´n Folgueras, Ramona M. Dí´az, Jorge Xiberta, Ismael Prieto. *Fuel* 82 (2003) 2051–2055.
- [6] Jeong Min Park, Sangin Keel, Jinhan Yun, Ji Hye Yun, and Sang-Sup Lee. *Korean J. Chem. Eng.* (2017).