



3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Βιοκαυσίμων & Εναλλακτικών Καυσίμων

15 & 16 Μαΐου 2025, Λίμνη Πλαστήρα

Ενεργειακή Αξιοποίηση Πλαστικών Απορριμμάτων μέσω Αεριοποίησης προς Παραγωγή Αερίου Σύνθεσης

Α. Φηύγα¹, Σ. Στεφανίδης¹, Γ. Τσιώνη¹, Σ. Κελασίδης¹, Γ. Ε. Μαρνέλλος², Α. Λάμπας¹

¹Εργαστήριο Περιβαλλοντικών Καυσίμων & Υδρογονανθράκων, ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

²Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

Δομή Παρουσίασης

1. Εισαγωγή

- Διαχείριση Πλαστικών Αποβλήτων
- Αεριοποίηση Πλαστικών Απορριμμάτων
- Ερευνητικοί Στόχοι

2. Πειραματική Διαδικασία

- Τροφοδοσία
- Καταλύτες
- Πειραματική Διάταξη – BIOCDU

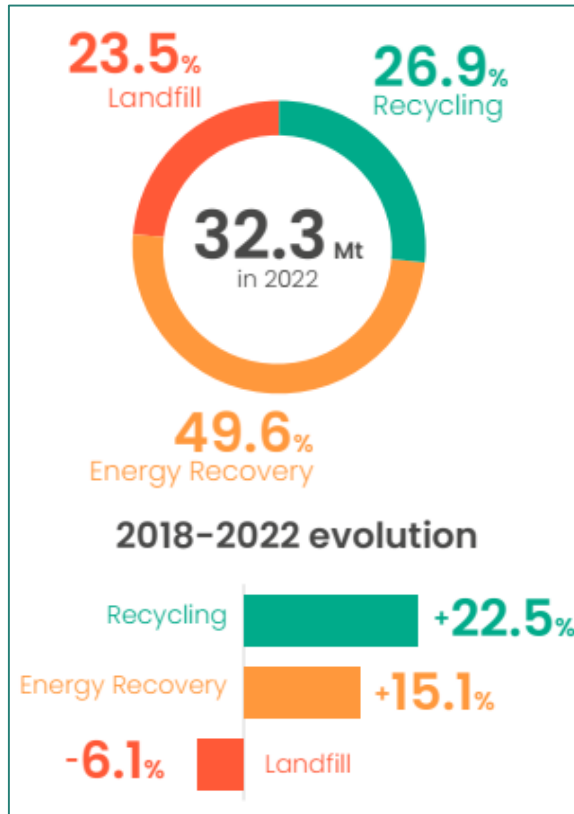
3. Αποτελέσματα και Συζήτηση

- Επίδραση Ατμού
- Συσχέτιση λόγου Ατμού προς Πλαστικό (S/P) στην απόδοση προϊόντων
- Επίδραση Χρόνου Παραμονής
- Επίδραση παρουσίας καταλύτη

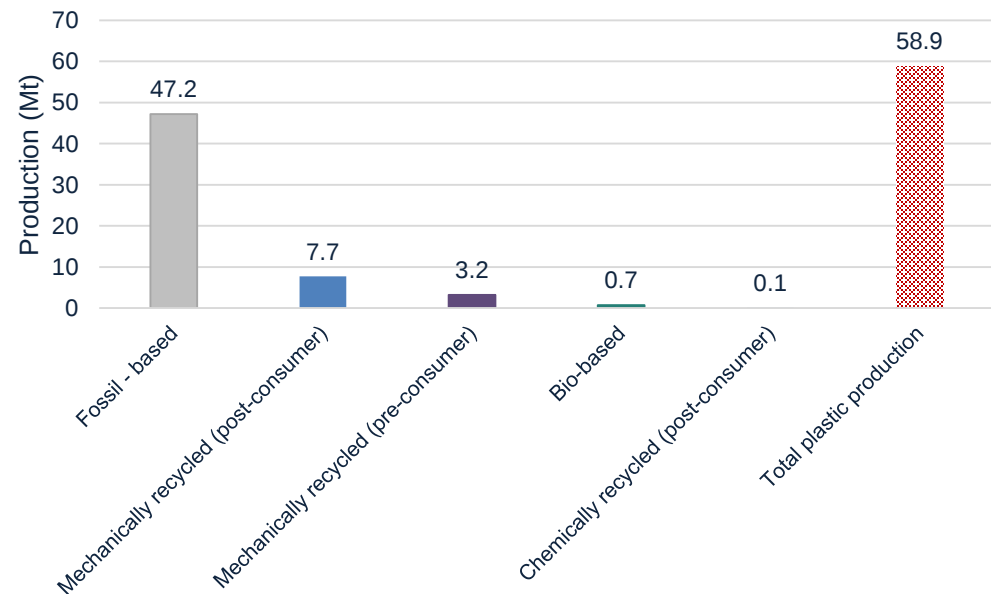
4. Συμπεράσματα & Μελλοντική Εργασία

- Γενικά Συμπεράσματα
- Μελλοντικά Βήματα

1.1 Διαχείριση Πλαστικών Αποβλήτων - Ευρώπη



- Συνολική παραγωγή πλαστικών: > 58.9 Mtn
- ~0.1 Mtn υπόκεινται σε χημική ανακύκλωση
- Πλαστικά απόβλητα (post-consumer plastics waste): > 32.3 Mtn.
- Ανακυκλώνεται ~26.9%
- Συνήθως καταλήγουν σε ΧΥΤΑ, καύση ή στο περιβάλλον.

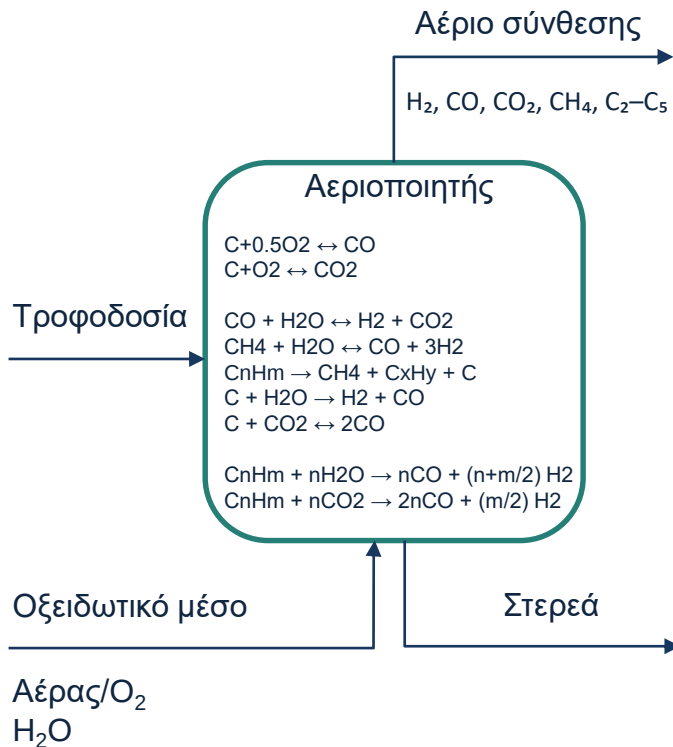


Source: PlasticsEurope, 2022 (EU27+3)

1.2 Αεριοποίησηση Πλαστικών Απορριμμάτων

Βασικά Χαρακτηριστικά

- Η αεριοποίηση, ως μέθοδος ανάκτησης ενέργειας από πλαστικά απόβλητα, μπορεί να **επεξεργαστεί πλαστικά διαφορετικής σύνθεσης ή μιγμάτων**, και να παράγει αέριο σύνθεσης (Syngas).
- Τυπικά συστατικά αερίου σύνθεσης: **H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂-C₅**
- Η σύσταση εξαρτάται από: **Οξειδωτικό μέσο, Θερμοκρασία, S/P, Χρόνος παραμονής**



Προσμίξεις στο Αέριο Σύνθεσης

- Αιωρούμενα σωματίδια (ανόργανα, άνθρακας)
- Αλκαλικές ενώσεις, HCl, H₂S, COS, NH₃, HCN, NO_x
- Διοξίνες, φουράνια, πίσσες (tars)
- Οι προσμίξεις επηρεάζουν τις τελικές εφαρμογές του αερίου σύνθεσης, όπως: Fischer-Tropsch αντιδραστήρες, Κινητήρες Εσωτερικής Καύσης (ICE), Κυψέλες Καυσίμου Στερεών Οξειδίων (SOFCs)

Χημικές Αντιδράσεις

- Πολύπλοκο μίγμα παράλληλων αντιδράσεων

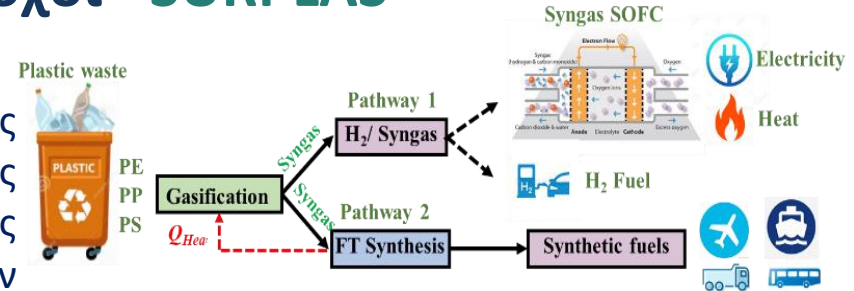
Βασικές χημικές αντιδράσεις:

- Boudouard
- Καύση
- WGS
- Μεθανίωση
- Ατμο-αναμόρφωση
- Ξηρή αναμόρφωση

Η σύσταση του αερίου σύνθεσης και των ακαθαρσιών εξαρτάται από τις συνθήκες αεριοποίησης και τη σύσταση των πλαστικών αποβλήτων

1.3 Ερευνητικοί Στόχοι - SURPLAS

Το έργο **SURPLAS** στοχεύει στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης λύσης ενεργειακής αξιοποίησης πλαστικών απορριμμάτων μέσω της θερμοχημικής μετατροπής τους προς παραγωγή υγρών συνθετικών καυσίμων και H_2 .



Το όραμα του SURPLAS και οι πιθανές εφαρμογές.

- Αεριοποίηση πλαστικών αποβλήτων για την παραγωγή αερίου σύνθεσης, με υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο, επιθυμητή αναλογία H_2/CO , και χαμηλό σχηματισμό πίσσας.
- Μετατροπή των μειγμάτων αερίου σύνθεσης, που προέρχονται από την αεριοποίηση, για παραγωγή συνθετικών υγρών καυσίμων Fischer-Tropsch (FT).
- Αξιολόγηση ενεργειακής και οικονομικής βιωσιμότητας της ολοκληρωμένης διεργασίας.

Στόχοι μελέτης

- Η επίδραση των υδρατμών (H_2O) στις αποδόσεις των προϊόντων αεριοποίησης απορριμμάτων πολυαιθυλενίου, καθώς και στη σύσταση του αερίου σύνθεσης.
- Βελτιστοποίηση των συνθηκών αεριοποίησης, όπως ο λόγος ατμού προς πλαστικό (S/P).
- Επίδραση παρουσίας καταλυτών Ni και Cu υποστηριγμένων σε $\theta-Al_2O_3$.

2.1 - Τροφοδοσία

Απόβλητο πολυαιθυλενίου

Προήλθε από την εταιρεία διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων Καρατσιάλη Αφοί και Σία ΟΕ



Τροφοδοσία	Waste PE
Υγρασία (% κ.β.)	0.05
Στοιχειακή Ανάλυση (% κ.β.)	
Άνθρακας	84.37
Υδρογόνο	13.24
Άζωτο	0.15
Θείο	0.03
Τέφρα	1.21
Άγνωστα στοιχεία	1.00

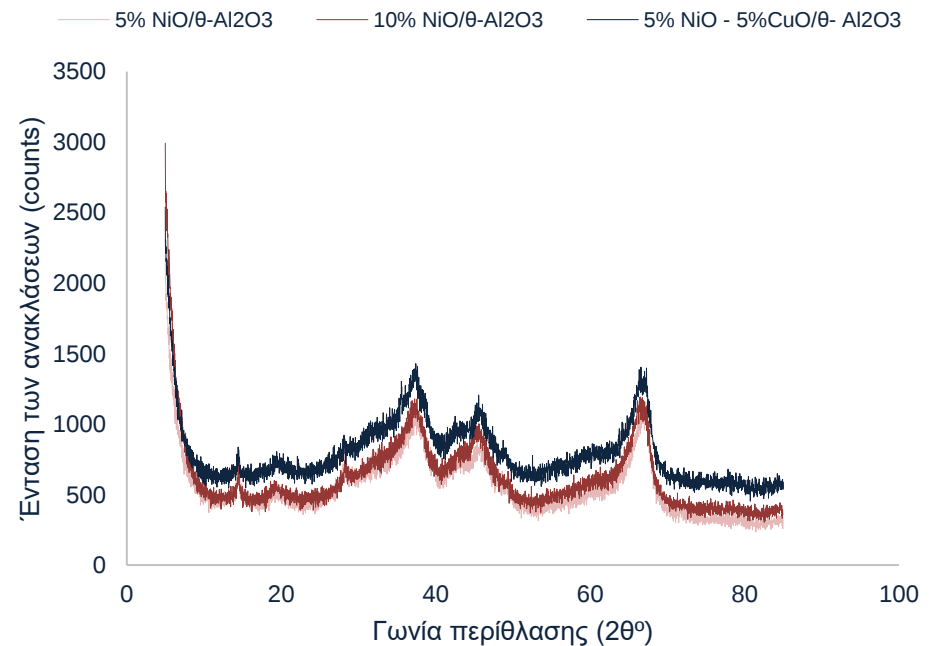
Συγκέντρωση (ppm)

Zn	V	S	Ni	Cr	Ca	Fe	Co	Mn	K	P	Cl	Cu
28.77	<0.60	272	<0.08	1244	3170	449	3.02	4.45	98.52	183	165	2.87

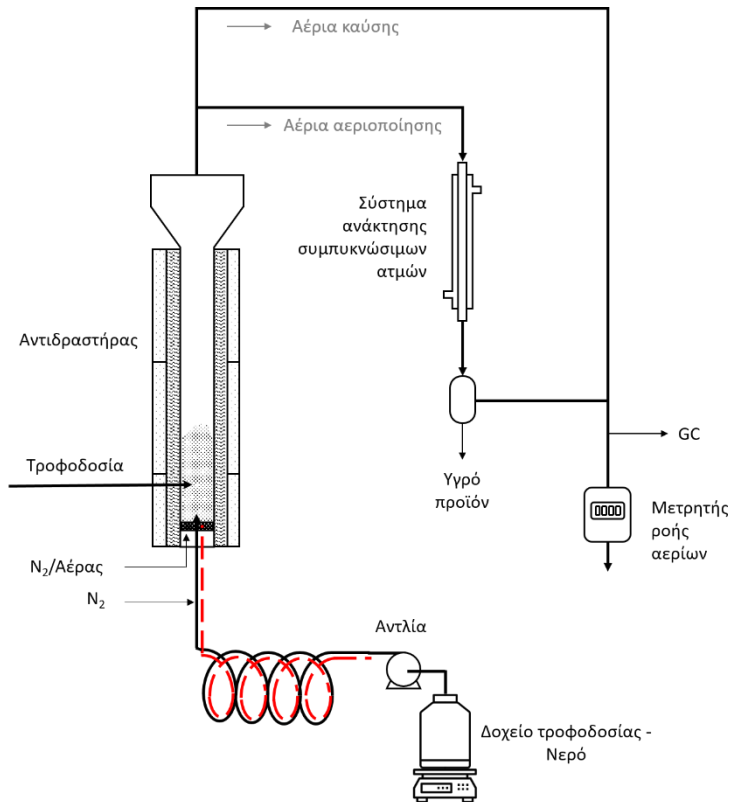
2.2 - Καταλύτες

	Καταλύτες	Ειδική Επιφάνεια BET (m ² /g)	Όγκος Πόρων (cm ³ /g)	Μέσο Μέγεθος Πόρων (Å)	Ni (%)	Al (%)	Cu (%)	Zn (%)	Co (%)	Mo (%)
1	5% NiO/θ-Al ₂ O ₃	251.35	0.43	69.00	4.34	46.79	0	0	0	0
2	10% NiO/θ-Al ₂ O ₃	222.99	0.41	74.42	7.68	44.00	0	0	0	0
3	5%NiO – 5%CuO/θ- Al₂O₃	210.65	0.42	80.27	4.04	45.65	4.46	0	0	0

- ICP & XRD αναλύσεις των **εμπορικών καταλυτών** οξειδίων Ni και Cu υποστηριγμένων σε θ-Al₂O₃.
- Η ανάλυση ICP έδειξε **περιεκτικότητα σε Ni** ίση με **4,34 και 7,68 %κ.β.**, αντίστοιχα.
- Στην περίπτωση του διμεταλλικού καταλύτη, η περιεκτικότητα σε **Ni και Cu είναι 4,04 και 4.46 %κ.β.**, αντίστοιχα.
- Η ανάλυση XRD έδειξε την παρουσία νικελίου σε μορφή οξειδίου (NiO).
- Παρόλο που χαρακτηριστικές κορυφές του Cu δεν εντοπίζονται στο XRD, η παρουσία του επιβεβαιώνεται μέσω της ανάλυσης ICP.



2.3 Πειραματική Διάταξη - BIOCDU



Σχηματική απεικόνιση πειραματικού συστήματος συνεχούς (BIOCDU) λειτουργίας

Πειραματικές συνθήκες

N_2 : 2.7 lt/min

Τροφοδοσία Πλαστικού: 0.80 g/min

Θερμοκρασία = 850 °C

Τροφοδοσία Ατμού: 0.80, 1.75, 3.20 g/min

Μεθοδολογία

Υπολογισμός πίσσας:

$$\text{Πίσσα (\%κ.β., σε ξηρή βάση)} = \frac{\text{Συμπυκνώσιμοι ατμοί} + (C_5 + C_6)}{\text{τροφοδοσία} + \text{καταναλωση υδρατμών}^1}$$

Υπολογισμός Αέριων:

$$\text{Αέρια (\%κ.β., σε ξηρή βάση)} = \frac{CO + H_2 + CO_2 + CH_4 + C_2 + C_3 + C_4}{\text{τροφοδοσία} + \text{καταναλωση υδρατμών}^1}$$

Υπολογισμός Στερεών:

$$\text{Στερεά (\%κ.β., σε ξηρή βάση)} = \frac{\text{Στερεα}^2}{\text{τροφοδοσία} + \text{καταναλωση υδρατμών}^1}$$

¹ Η κατανάλωση υδρατμών υπολογίζεται από την περιεκτικότητα του οξυγόνου στην σύσταση των αερίων.

¹ Η ποσότητα των στερεών υπολογίζεται από την περιεκτικότητα των CO και CO₂ στα καυσαέρια κατά τη διάρκεια της καύσης.

3.1 Επίδραση Ατμού

Πειραματικές συνθήκες

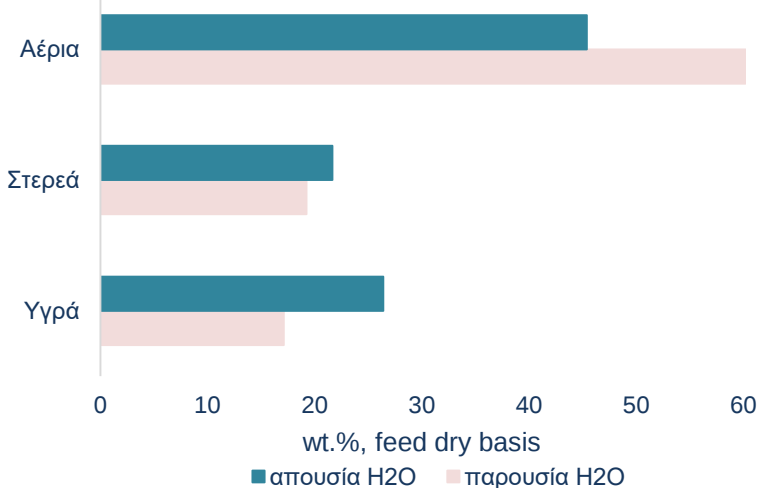
N₂: 2.7 lt/min

Τροφοδοσία πλαστικού: 0.80 g/min

Τροφοδοσία ατμού: 0.80 g/min

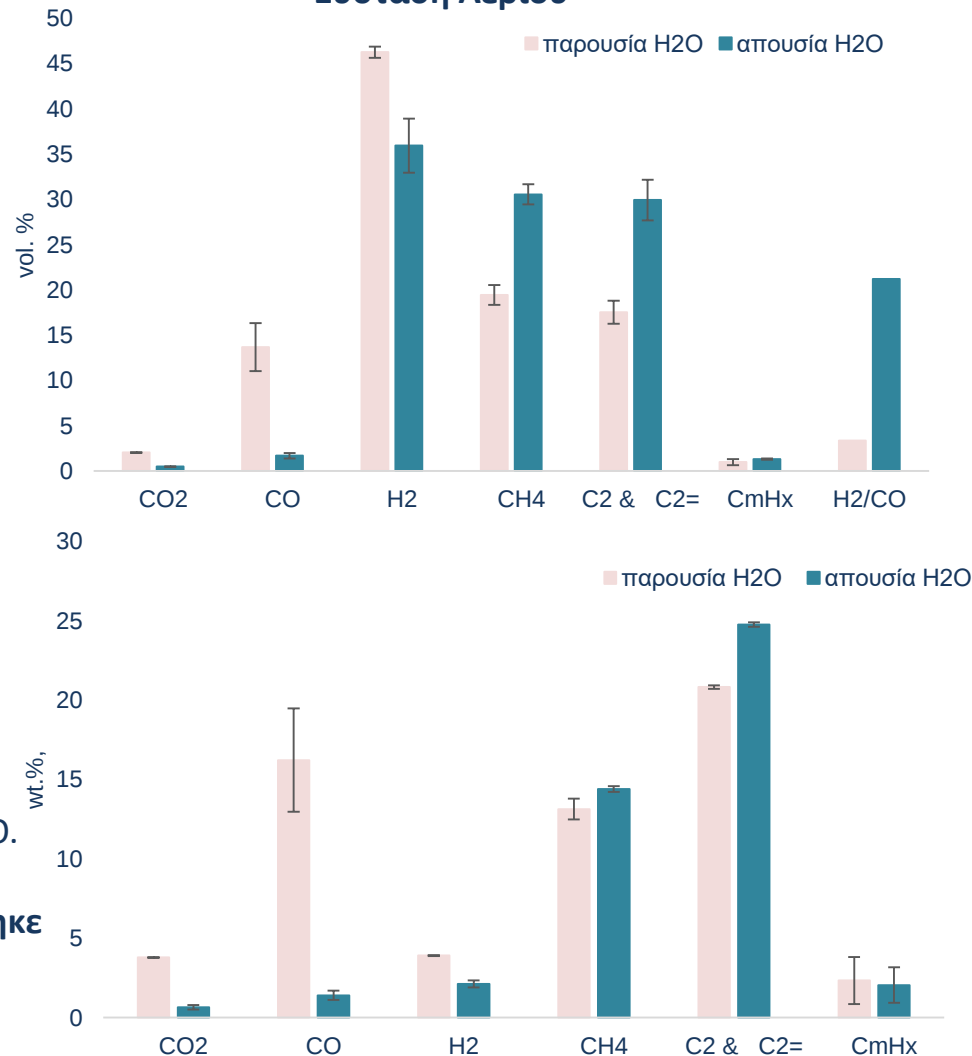
Θερμοκρασία= 850 °C

Επίδραση ατμού στις αποδόσεις των προϊόντων



- Μείωση πρισμών από 26.4 σε 17.1 %κ.β., παρουσία H₂O.
- Αύξηση αερίων από 45.38 σε 60.22 %κ.β., παρουσία H₂O.
- Η παραγωγή ελαφρύτερων αερίων (CO, H₂, CO₂) αυξήθηκε κυρίως λόγω των αντιδράσεων αναμόρφωσης και WGS, ενώ η μείωση CH₄ και C₂ οφείλετε πιθανώς λόγω των αντιδράσεων αναμόρφωσης και πυρόλυσης.

Σύσταση Αερίου



3.2 Συσχέτιση λόγου Ατμού προς Πλαστικό (S/P) στην απόδοση

Πειραματικές συνθήκες

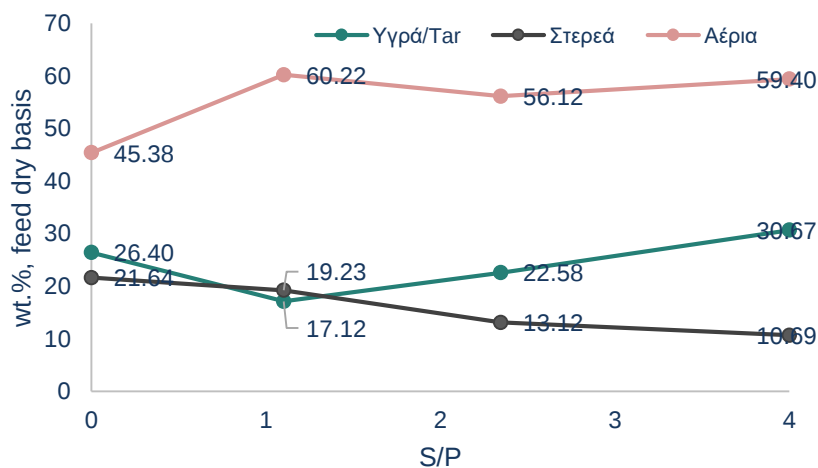
N_2 : 2.7 lt/min

Τροφοδοσία πλαστικού: 0.80 g/min

Τροφοδοσία ατμού: 0.80, 1.75, 3.20 g/min

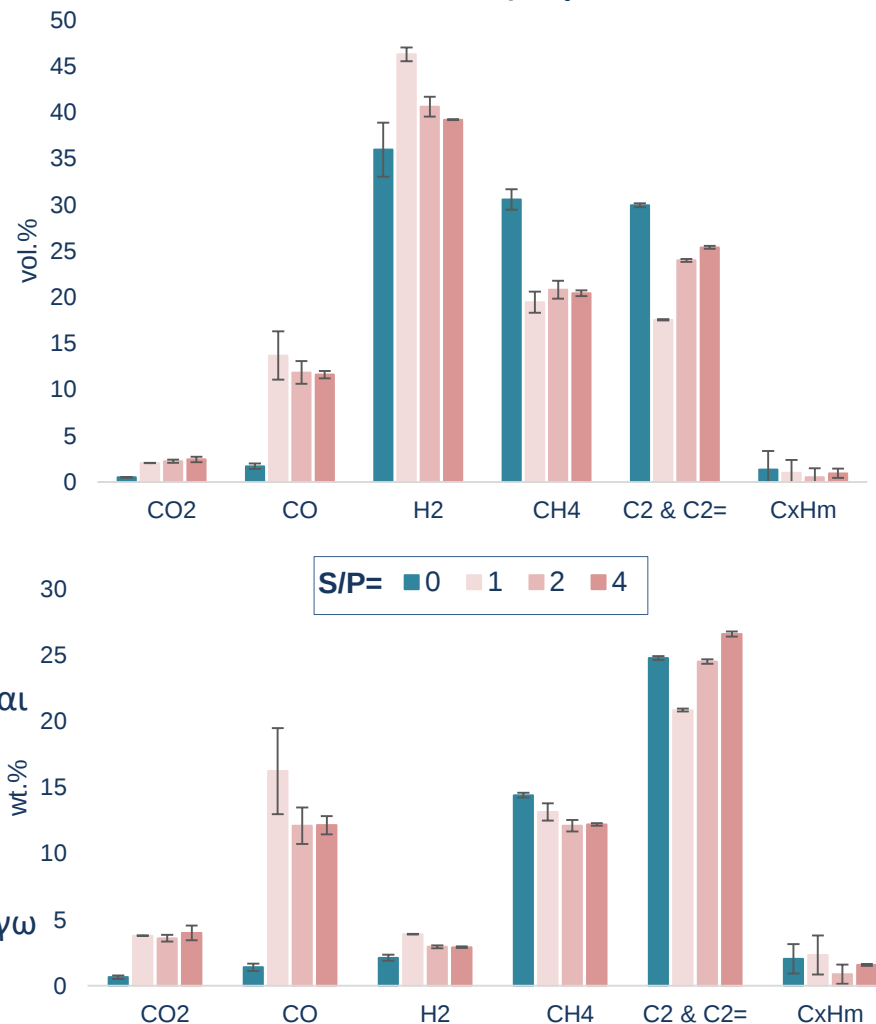
Θερμοκρασία= 850 °C

Επίδραση S/P στις αποδόσεις των προϊόντων



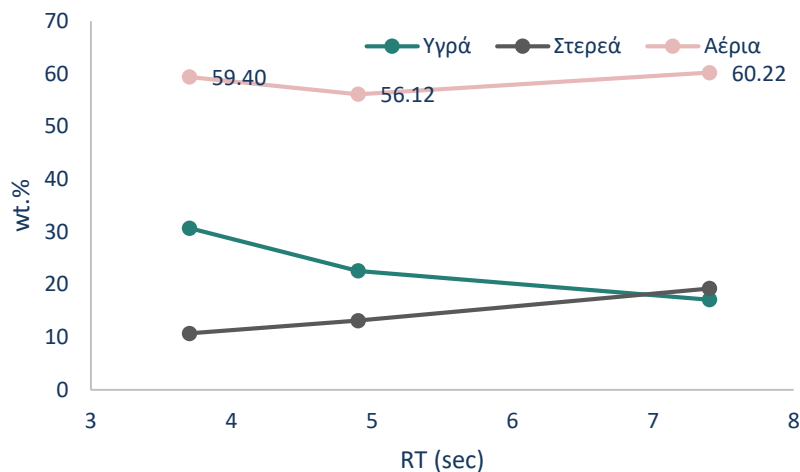
- Αύξηση των πιεσών από 17,1 σε 30,7 %κ.β., παρατηρείται με την αύξηση του λόγου S/P.
- Παρόμοιες τάσεις παρατηρούνται και στη σύσταση του αερίου σύνθεσης, με μείωση των ποσοστών CO και H_2 .
- Περαιτέρω **αύξηση του λόγου S/P** φάνηκε να έχει το αντίθετο από το αναμενόμενο αποτέλεσμα, πιθανώς λόγω της μείωσης του χρόνου παραμονής.

Σύσταση Αερίου



3.3 Επίρροή του Χρόνου Παραμονής

Επίδραση χρόνου παραμονής στις αποδόσεις των προϊόντων, παρουσία ατμού



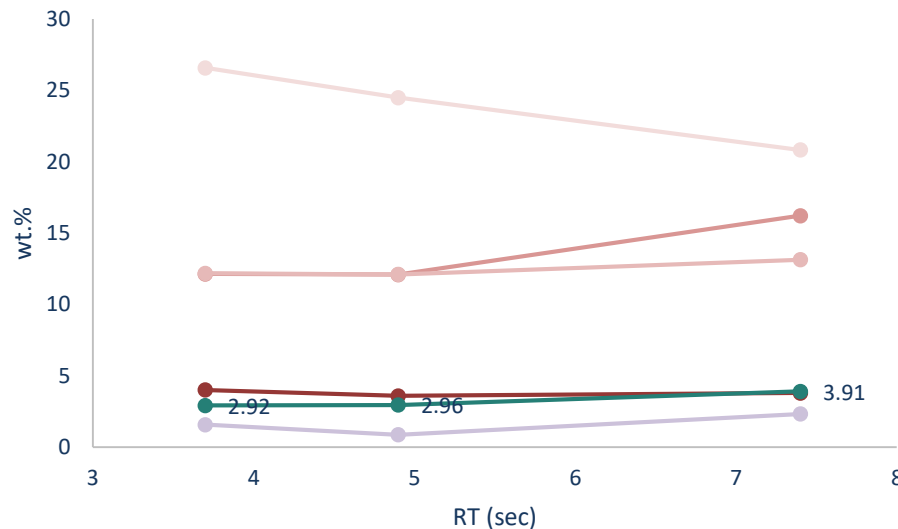
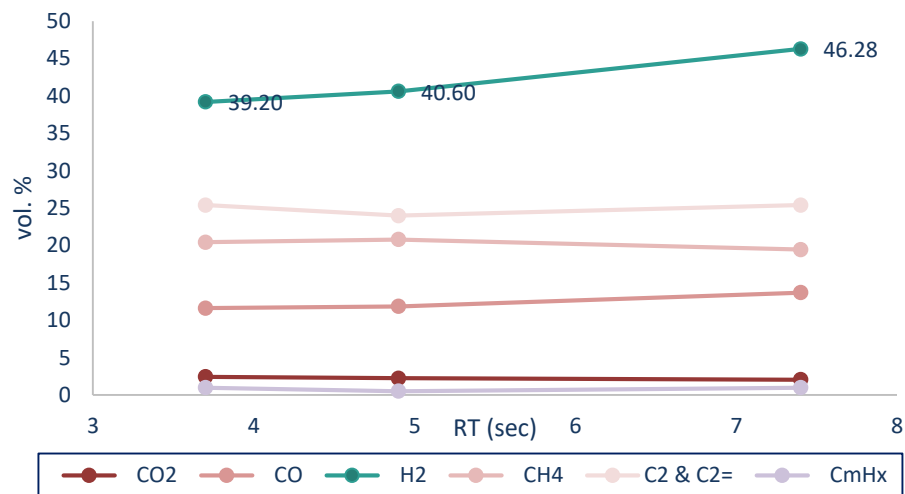
S/P = 1, RT (sec) = 7.4

S/P = 2, RT (sec) = 4.9

S/P = 4, RT (sec) = 3.7

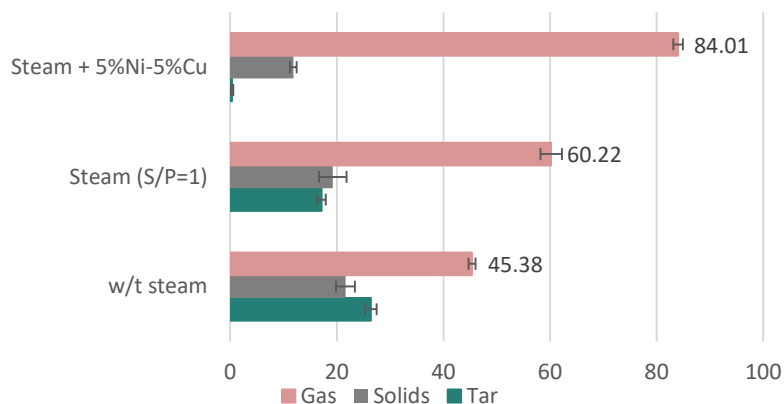
- Αύξηση του H_2 από 46,3 σε 39,2 %κ.ο., με την αύξηση του χρόνου παραμονής.
- Μείωση πισσών από 30.7 σε 17.12 %κ.β., με την αύξηση του χρόνου παραμονής.

Σύσταση Αερίου

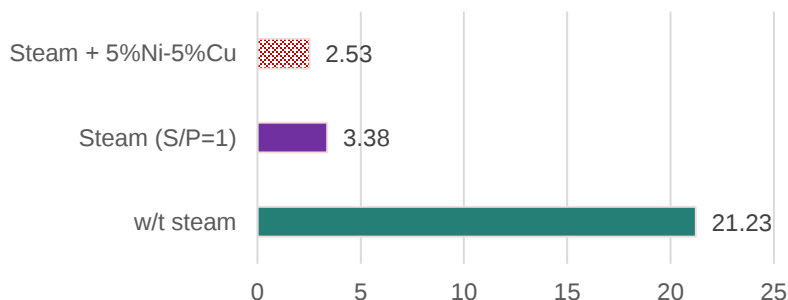


3.4 Επίδραση παρουσίας καταλύτη (5%NiO – 5%CuO/θ- Al₂O₃)

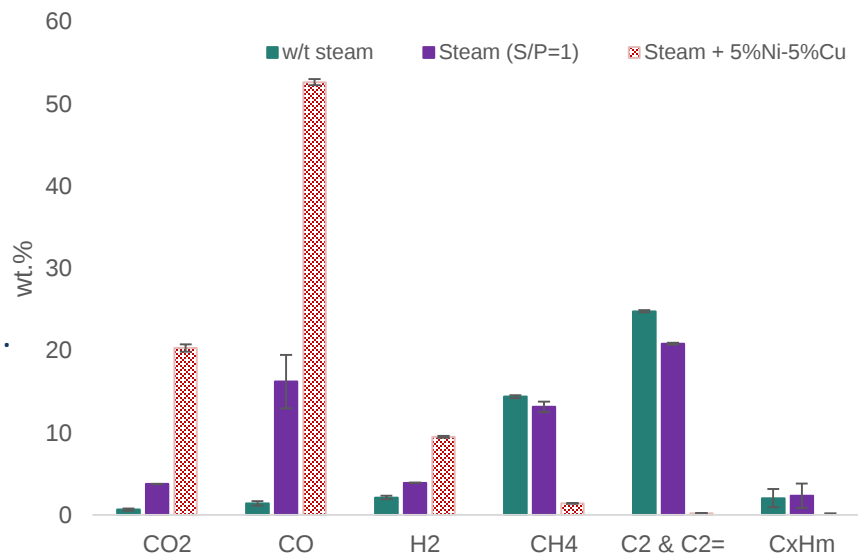
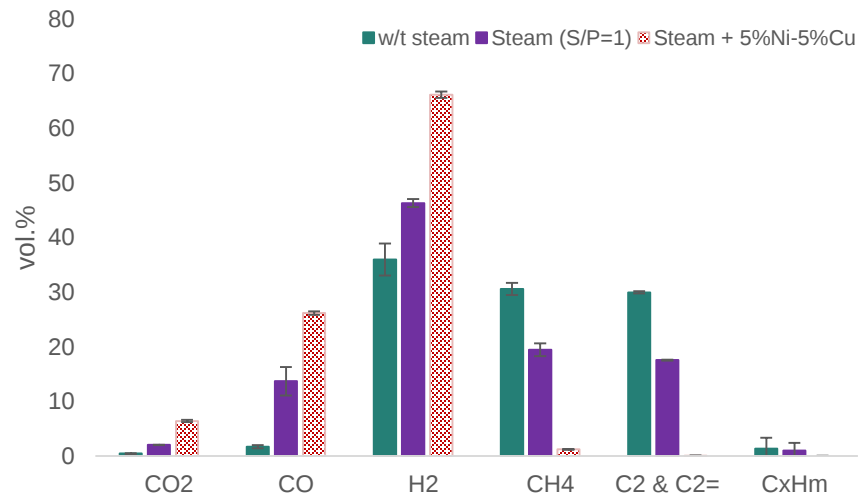
Αποδόσεις προϊόντων



Επίδραση καταλύτη στον λόγο H₂/CO



Σύσταση Αερίου



- Αύξηση αερίων από 60,2 σε 84,0 %κ.β. παρουσία καταλύτη.
- Ο καταλύτης 5% NiO – 5% CuO/θ-Al₂O₃ επηρέασε σημαντικά τη σύσταση του παραγόμενου αερίου.
- Ο λόγο H₂/CO μειώθηκε από 21,2 σε 3,4 και 2,5 με την προσθήκη ατμού και την παρουσία καταλύτη, αντίστοιχα.

4.1 Γενικά Συμπεράσματα

- Με την **εισαγωγή ατμού ($S/P = 1$)**, η συγκέντρωση H_2 αυξήθηκε από 36,0 σε 46,3 %κ.ο., σε σύγκριση με τα πειράματα απουσία ατμού ($S/P = 0$).
- Με περαιτέρω **αύξηση του λόγου S/P** η περιεκτικότητα σε υδρογόνο μειώθηκε, πιθανώς λόγω της μείωσης του χρόνου παραμονής.
- Ο διμεταλλικός καταλύτης **5% NiO – 5% CuO/ θ -Al₂O₃** επηρέασε σημαντικά τη σύσταση του παραγόμενου αερίου. Η συγκέντρωση του H_2 αυξήθηκε από 36,0 σε 66,1 %κ.ο., σε σύγκριση με τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν παρουσία και απουσία ατμού.
- Η απόδοση σε πίσσες μειώθηκε σημαντικά, από 17,1 % ($S/P = 1$) σε μόλις 0,3 %κ.β., με τη χρήση του διμεταλλικού καταλύτη.
- Ο λόγος **H_2/CO** μειώθηκε από 21,2 σε 3,4 και 2,5 με την προσθήκη ατμού και την παρουσία καταλύτη, αντίστοιχα.

4.2 Μελλοντικά Βήματα

- Διεξαγωγή πειραμάτων παρουσία καταλυτών Ni υπό βέλτιστες συνθήκες αεριοποίησης.
- Διερεύνηση της διάρκειας ζωής και της αναγέννησης των καταλυτών.
- Συσχέτιση του λόγου ατμού/πλαστικού (S/P) με την καταλυτική απόδοση.
- Αξιολόγηση καταλυτών αντίδρασης μετατόπισης υδραερίου (WGS) με σκοπό τη βελτίωση της παραγωγής υδρογόνου και διαμόρφωσης του λόγου H_2/CO .

Ευχαριστούμε για την προσοχή σας!



Ερωτήσεις ?



Δρ. Άντζελα Φηύγα (a.fivga@certh.gr)
Καθηγητής Γεώργιος Μαρνέλλος (gmarnellos@cheng.auth.gr)

Το έργο SURPLAS έχει λάβει χρηματοδότηση από το πρόγραμμα έρευνας και καινοτομίας Horizon 2020 της ΕΕ, στο πλαίσιο της συμφωνίας χρηματοδότησης Marie Skłodowska-Curie (101068372).