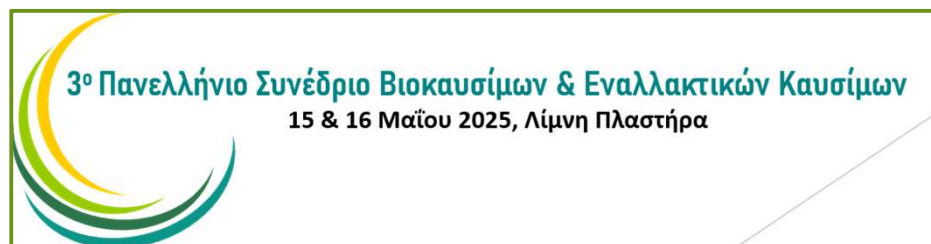


Θερμοχημική Ανακύκλωση Πλαστικών ως Πηγή Υδρογονανθράκων με Δυνητική Χρήση ως Βιοκαύσιμα. Μπορεί να Θεωρηθεί ως Βιώσιμη Λύση?

Δημήτρης Σ. Αχιλιάς
Καθηγητής



Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Πολυμερών και Χρωμάτων
Τμήμα Χημείας
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Βιοκαυσίμων & Εναλλακτικών Καυσίμων
15 & 16 Μαΐου 2025, Λίμνη Πλαστήρα



Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Πολυμερών και Χρωμάτων

Τμήμα Χημείας, ΑΠΘ

Έρευνα στη χημική ανακύκλωση πολυμερών

- ▶ Χημική ανακύκλωση του PET με διάφορες τεχνικές (υδρόλυση, μεθανόλυση, γλυκόλυση, κλπ.)
- ▶ Χημική ανακύκλωση PLA, PC, PS, PMMA, κ.α.
- ▶ Σε συνεργασία με το Εργαστήριο Περιβαλλοντικών Καυσίμων και υδρογονανθράκων του ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ
 - ▶ Θερμοχημική ανακύκλωση με πυρόλυση πολυολεφινών (LDPE, HDPE, PP)
 - ▶ Θερμοχημική ανακύκλωση με πυρόλυση βιομηχανικών πολυμερών HIPS, ABS, PC και μιγμάτων τους.
- ▶ Χρήση εναλλακτικών μεθόδων θέρμανσης κατά τη χημική ανακύκλωση των πολυμερών, όπως η χρήση μικροκυμματικής ακτινοβολίας
- ▶ Ανακύκλωση με χρήση διαλυτών



Διάρθρωση Παρουσίασης

- ▶ Α. Γενικά στοιχεία για πλαστικά και πολυμερή
- ▶ Β. Ανακύκλωση Πλαστικών
- ▶ Γ. Πυρόλυση Πλαστικών για παραγωγή Υδρογονανθράκων

Γενικά στοιχεία για πλαστικά και πολυμερή

Α' ΜΕΡΟΣ



Πλαστικό - πολυμερές



Πρόσθετα:

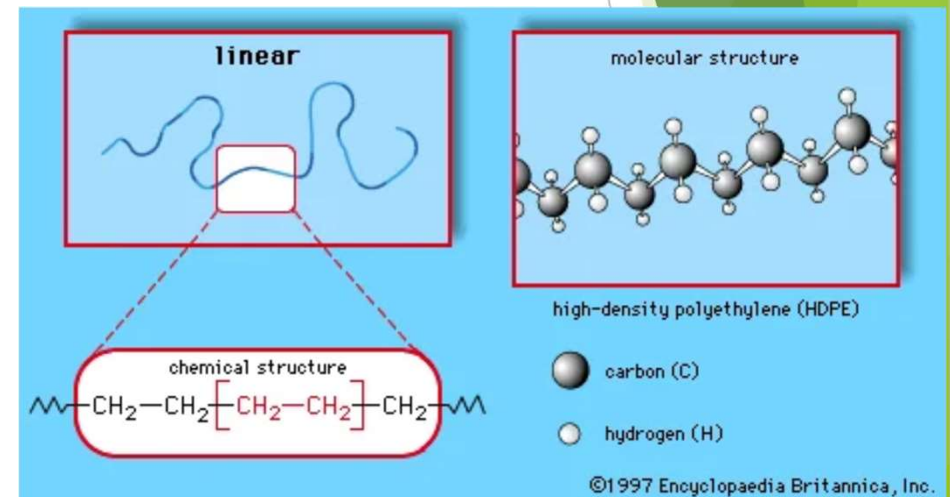
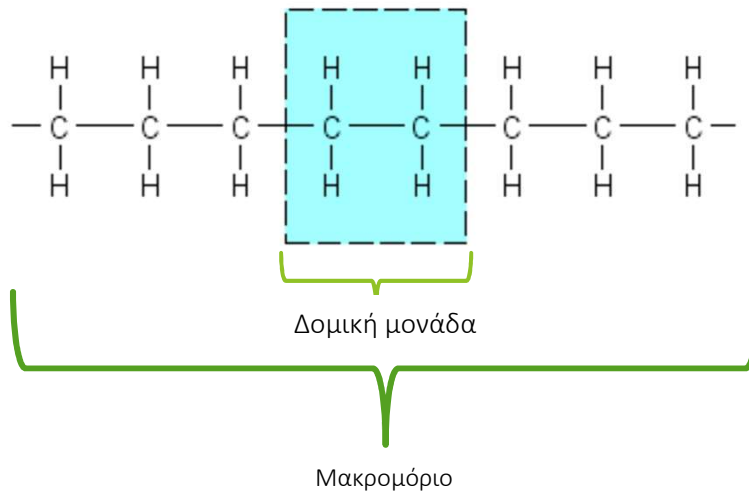
- Ενισχυτικά αντοχής
- Σταθεροποιητές UV ακτινοβολίας
- Επιβραδυντές καύσης
- Αντιοξειδωτικοί παράγοντες
- Πλαστικοποιητές
- Χρωστικές

- ▶ Η λέξη 'πλαστικό' δηλώνει το πεδίο εφαρμογής.
- ▶ Πολυμερές είναι μία μακρομοριακή χημική ένωση. Αποτελεί το κύριο συστατικό των πλαστικών.
- ▶ Όλα τα πλαστικά αποτελούνται από πολυμερή (μακρομοριακές ενώσεις).
- ▶ Ενώ όλα τα πολυμερή δεν είναι απαραίτητα πλαστικά. Άλλα πεδία εφαρμογής τους είναι
 - ίνες,
 - ελαστομερή,
 - επιχρίσματα,
 - κόλλες

Δομή πολυμερούς

Πολυμερές: πολυαιθυλένιο

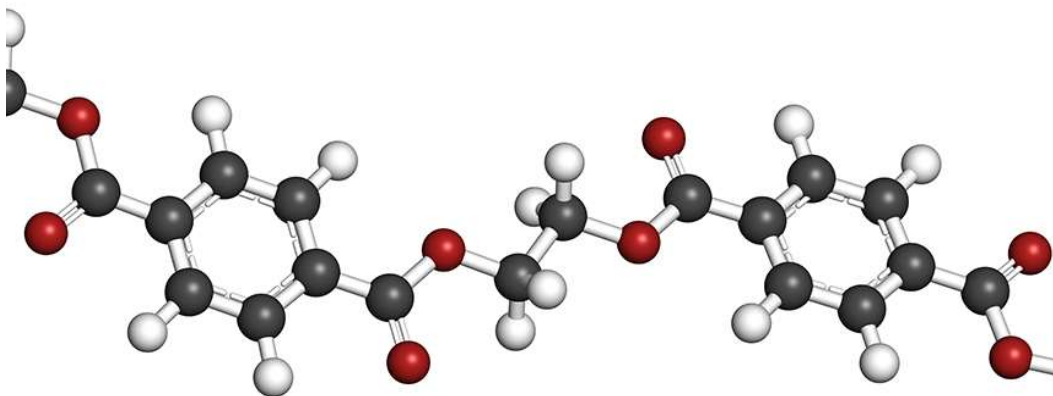
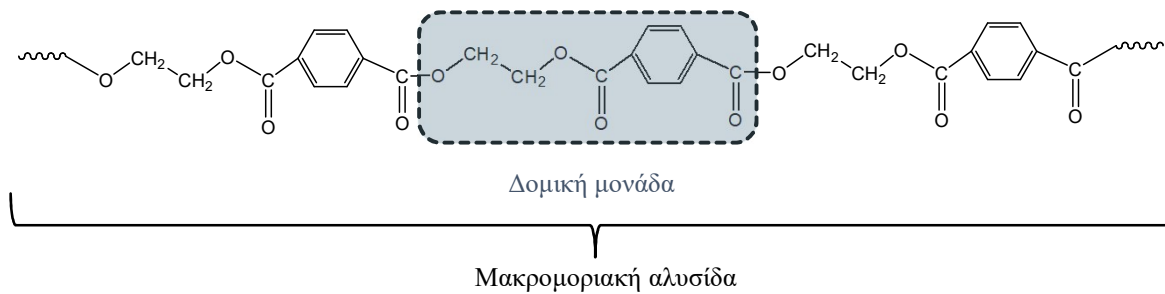
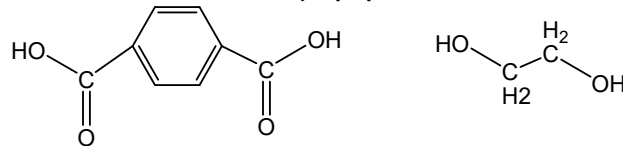
Μονομερές: Αιθυλένιο $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$



...και πιο πολύπλοκες δομές

Πολυμερές: πολυ(τερεφθαλικός αιθυλενεστέρας), PET

Μονομερή

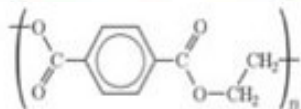


Κύριοι τύποι πολυμερών

Key:  Mass-produced |  Percentage recycled

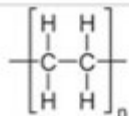
Poly(ethylene terephthalate)

4.5 billion kg | 19.5%



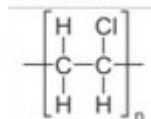
High-density polyethylene

5.5 billion kg | 10.3%



Poly(vinyl chloride)

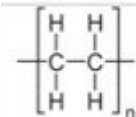
0.9 billion kg | 0.0%



Plastic piping,
vinyl flooring,
cabling insulation,
roof sheeting

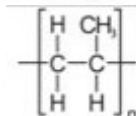
Low-density polyethylene

7.4 billion kg | 5.3%



Polypropylene

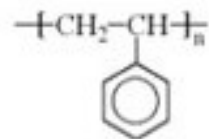
7.2 billion kg | 0.6%



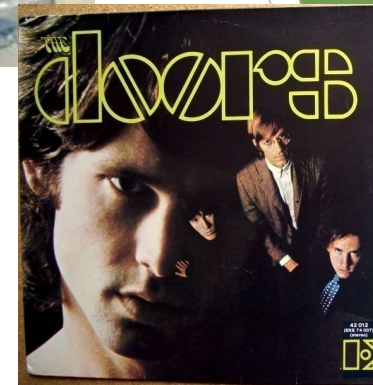
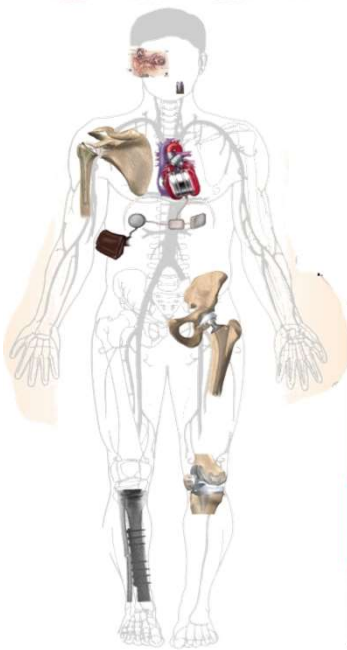
Bottle lids, food
tubs, furniture,
houseware,
medical, rope,
automobile parts

Polystyrene

2.2 billion kg | 0.9%



Εφαρμογές πολυμερών



Πλαστικά Απορρίμματα



Αναγκαιότητα ανακύκλωσης πλαστικών

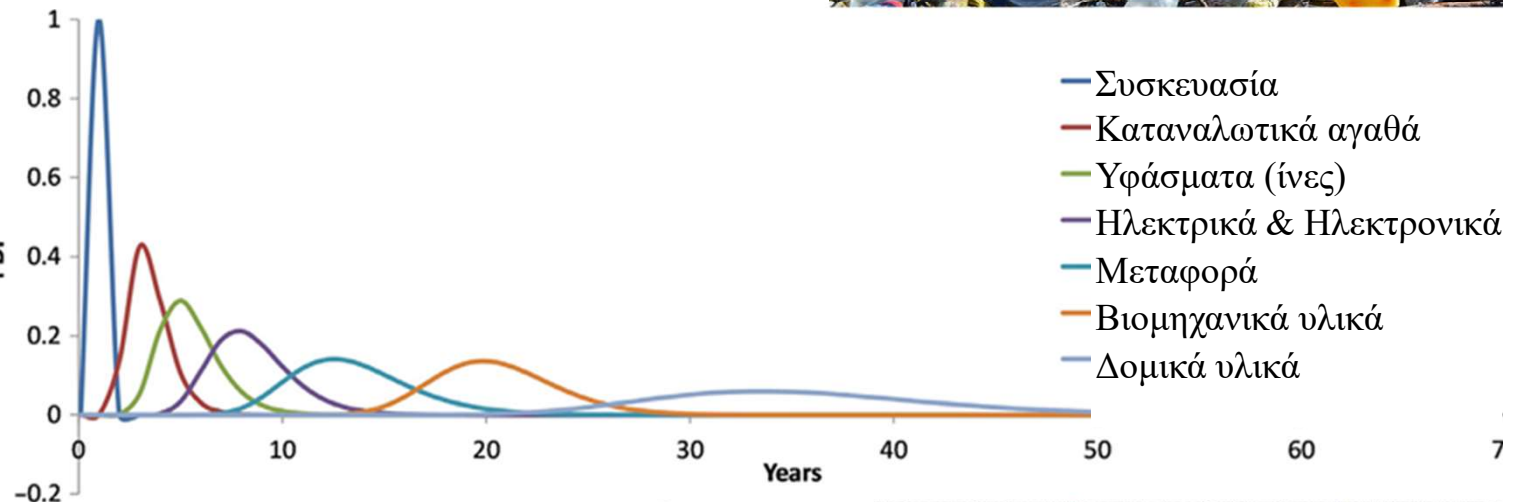
Σημαντική αύξηση της κατανάλωσης πλαστικών οδήγησε σε σημαντικές ποσότητες απορριπτόμενων πλαστικών.

(περίπου 9 εκατομμύρια τόνοι πλαστικών απορριμμάτων καταλήγουν στις θάλασσες κάθε χρόνο).

Κύριες αιτίες

- Μικρή διάρκεια ζωής (περίπου 40% έχουν ζωή < 1 μήνα)
- Χαμηλός ρυθμός βιοαποικοδόμησης

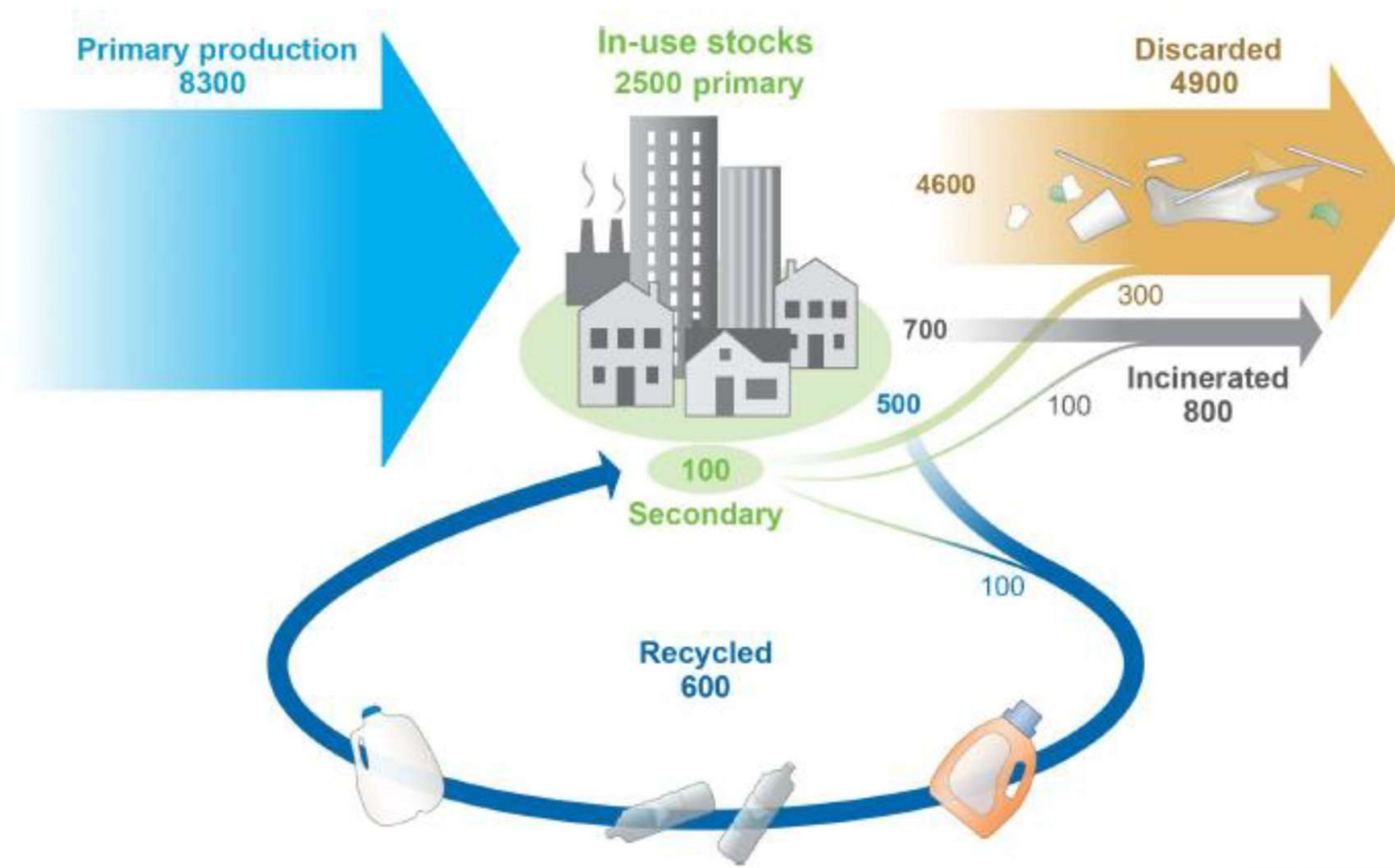
Ο χρόνος που απαιτείται για να αποικοδομηθεί το πολυμερές είναι τεράστιο, μερικά παραδείγματα της μεγάλης ποσότητας περιβάλλοντος (Η πυρηνική ενέργεια και 1200 χρόνια



Ποσότητες πλαστικών αθροιστικά από το 1950
έως το 2015.

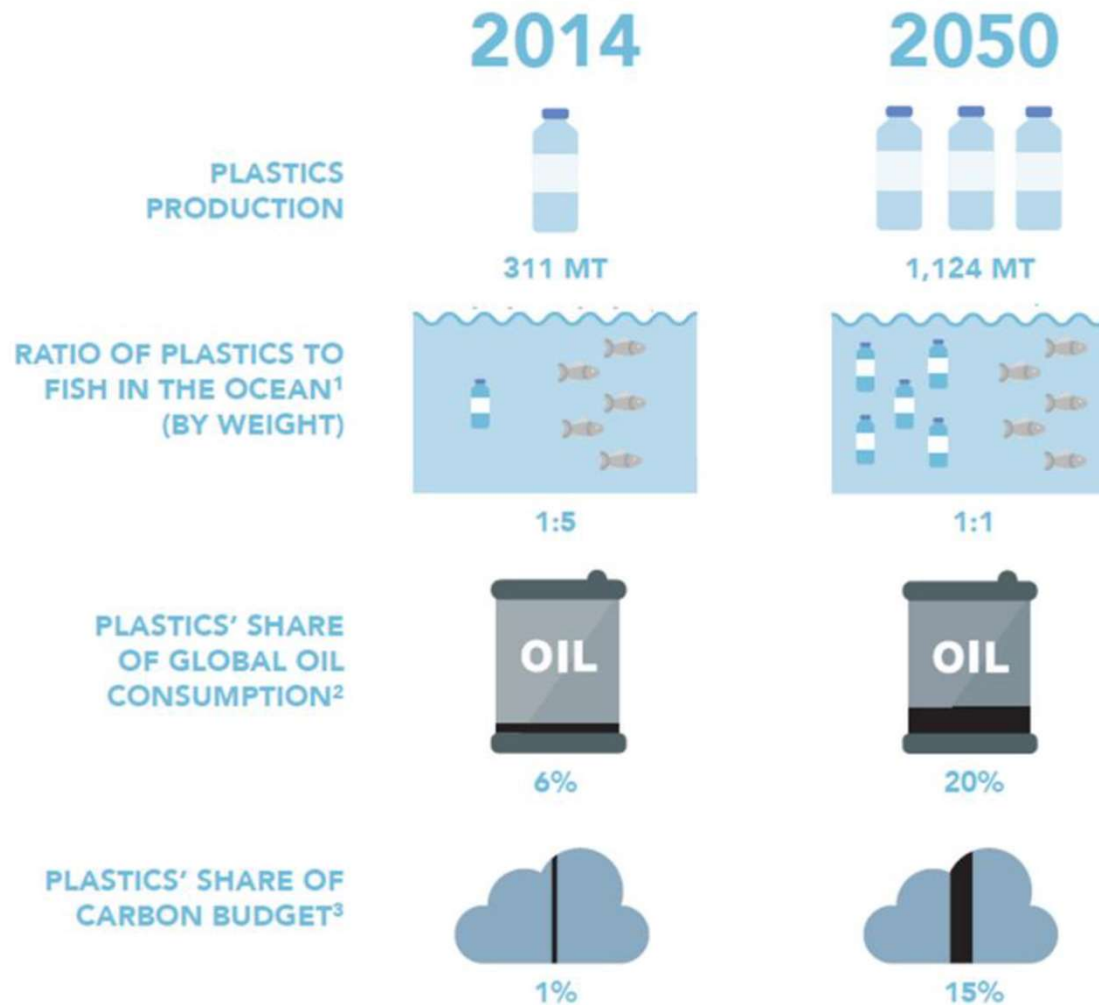
Οι τιμές είναι σε εκατομ. μετρικούς τόνους.

(R. Geyer, J.R. Jambeck, K.L. Law, *Production, use, and fate of all plastics ever made Sci. Adv.*, 3 (2017), Article e1700782)



Εκτίμηση για το μέλλον

World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company, *The New Plastics Economy - Rethinking the future of plastics,*



¹ Fish stocks are assumed to be constant (conservative assumption)

² Total oil consumption expected to grow slower (0.5% p.a.) than plastics production (3.8% until 2030 then 3.5% to 2050)

³ Carbon from plastics includes energy used in production and carbon released through incineration and/or energy recovery after-use. The latter is based on 14% incinerated and/or energy recovery in 2014 and 20% in 2050. Carbon budget based on 2 degrees scenario

Ποια είναι η λύση?

The Pendulum Theory



Huge amounts of plastic waste



Plastic waste recycling

Ανακύκλωση πλαστικών

Β' Μέρος

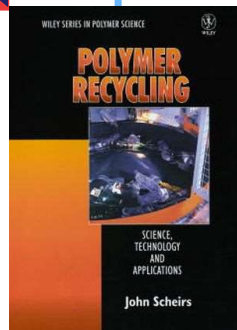
Σύντομη ανασκόπηση της ανακύκλωσης πολυμερών

Mechanical recycling



70s – 80s

90s



Chemical recycling

Biodegradable Polymers
Vs
Chemical recycling



00s

New Terms
Upcycling
Downcycling

Feedstock recycling

10s

Microbial/enzymatic
degradation for recycling

20s

Polymer recycling in
the circular economy



beyond

Σημεία κλειδιά στην ανακύκλωση των πλαστικών



- Τα τρία σημεία κλειδιά στην ανακύκλωση των πλαστικών είναι:
- Σταθερή τροφοδοσία πρώτης ύλης, γεγονός που σημαίνει σημαντική **συλλογή** και ικανοποιητική **διαλογή**.
- Επιλογή μιας διεργασίας ανακύκλωσης που να έχει κάποιο **οικονομικό όφελος** και να είναι **φιλική προς το περιβάλλον**,
- Τελικές **εφαρμογές για τα ανακυκλωμένα προϊόντα**, που σημαίνει ανταγωνιστικές τιμές και εμπιστοσύνη στη χρήση των ανακυκλωμένων προϊόντων από τους καταναλωτές ή παραγωγή πολύτιμων δευτερογενών χημικών - καυσίμων.

Προβλήματα που δυσχεραίνουν την ανακύκλωση των πλαστικών

Α. Τεχνικά θέματα

- Διαφορετικοί τύποι πολυμερών με σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες (για παράδειγμα το PP έχει θερμοκρασία τήξης περίπου 160 °C, ενώ το PET στους 260 °C, ίδιο πολυμερές με διαφορετικό MB).
- Ύπαρξη μιγμάτων πολυμερών/ πολυστρωματικών προϊόντων, συμπολυμερών, σύνθετων/ νανοσύνθετων.
- Πρόσθετα (π.χ. αντιοξειδωτικά, πληρωτικά, πιγμέντα, επιβραδυντές καύσης, σταθεροποιητές θερμότητας και UV ακτινοβολίας, κλπ.)
- Επιμολύνσεις από μη-πολυμερικά υλικά (χαρτί, αλουμίνιο, υπολείμματα τροφών, κ.α.).

Προβλήματα που δυσχεραίνουν την ανακύκλωση των πλαστικών

B. Οικονομικές Προκλήσεις

- ▶ Υψηλό Κόστος Επεξεργασίας
 - ▶ Η διαλογή, ο καθαρισμός και η επεξεργασία των πλαστικών αποβλήτων απαιτούν σημαντικές επενδύσεις σε τεχνολογία, υποδομές και εργασία. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι φθηνότερο να παράγονται νέα πλαστικά από πετρέλαιο παρά να ανακυκλώνονται τα παλιά.
- ▶ Ζήτηση Αγοράς για Ανακυκλωμένα Πλαστικά
 - ▶ Τα ανακυκλωμένα πλαστικά συχνά δυσκολεύονται να ανταγωνιστούν τα παρθένα πλαστικά λόγω χαμηλότερης ποιότητας, χρωματικών διακυμάνσεων και ασυνεπειών στις ιδιότητες των υλικών. Οι βιομηχανίες προτιμούν τα παρθένα πλαστικά επειδή προσφέρουν καλύτερη ανθεκτικότητα και απόδοση.
- ▶ Χαμηλά Ποσοστά Ανακύκλωσης
 - ▶ Παρά τις προσπάθειες για αύξηση της ανακύκλωσης πλαστικών, τα ποσοστά ανακύκλωσης παγκοσμίως παραμένουν χαμηλά. Για παράδειγμα, σε πολλές χώρες, λιγότερο από το 10% των πλαστικών αποβλήτων ανακυκλώνεται, ενώ τα υπόλοιπα απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής, καίγονται ή ανεξέλεγκτα στο περιβάλλον.

Προβλήματα που δυσχεραίνουν την ανακύκλωση των πλαστικών

Γ. Περιβαλλοντικές Προκλήσεις

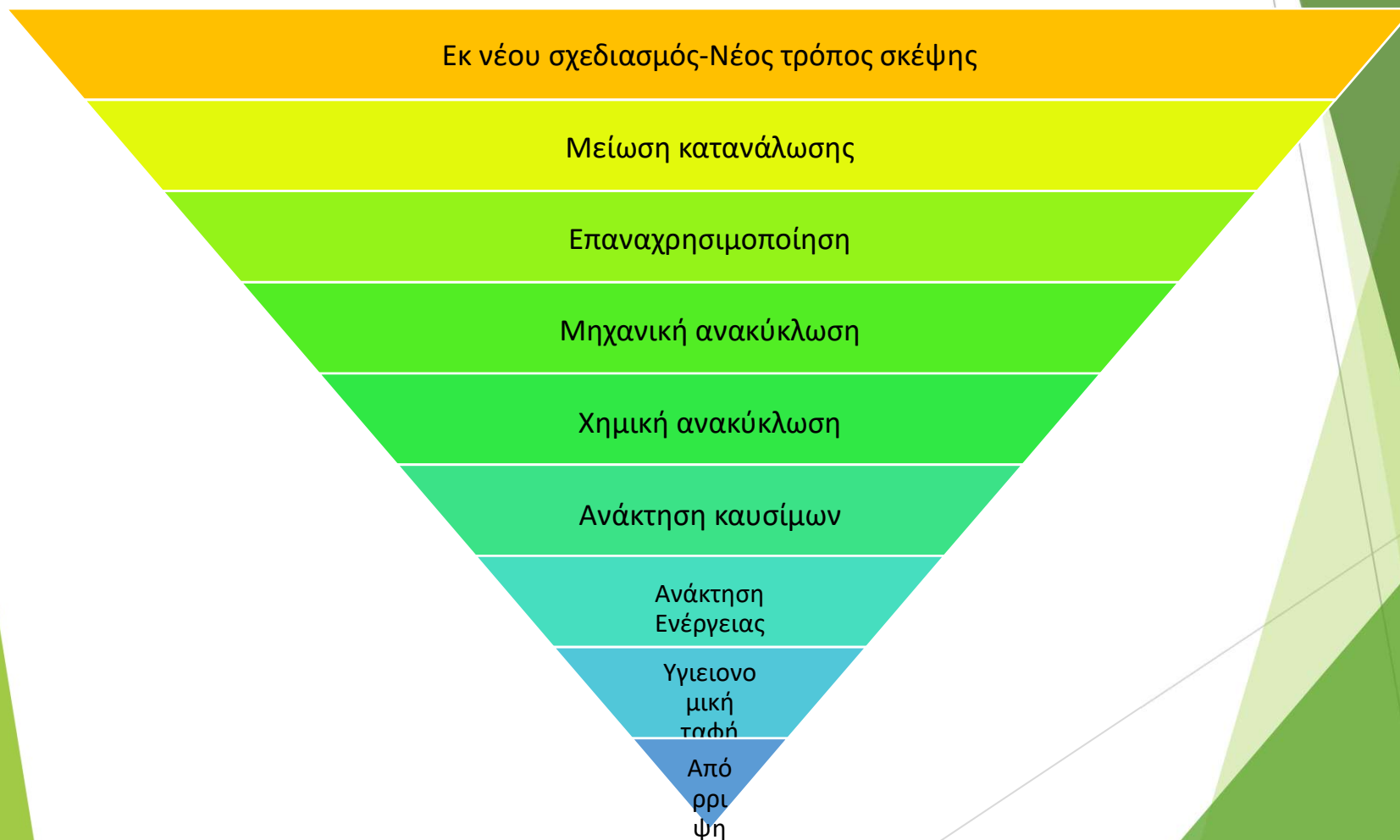
- ▶ **Ρύπανση από Μικροπλαστικά**
 - ▶ Οι διαδικασίες ανακύκλωσης πλαστικών, ιδίως η μηχανική ανακύκλωση, μπορούν να οδηγήσουν στην παραγωγή μικροπλαστικών - μικροσκοπικών πλαστικών σωματιδίων που μολύνουν τους υδάτινους αποδέκτες, το έδαφος, ακόμη και τον αέρα.
- ▶ **Κατανάλωση Ενέργειας και Εκπομπές**
 - ▶ Ορισμένες μέθοδοι ανακύκλωσης, όπως η χημική ανακύκλωση (αεριοποίηση, υδρογόνωση), απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες και κατανάλωση ενέργειας, οδηγώντας σε σημαντικές εκπομπές άνθρακα. Αυτό μειώνει τα περιβαλλοντικά οφέλη της ανακύκλωσης.
- ▶ **Διαρροή στο Περιβάλλον**
 - ▶ Ακόμα και όταν τα πλαστικά συλλέγονται για ανακύκλωση, η ακατάλληλη διαχείριση και μεταφορά αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει σε διαρροή πλαστικών στο φυσικό περιβάλλον, ειδικά σε χώρες με αδύναμες υποδομές ανακύκλωσης

Προβλήματα που δυσχεραίνουν την ανακύκλωση των πλαστικών

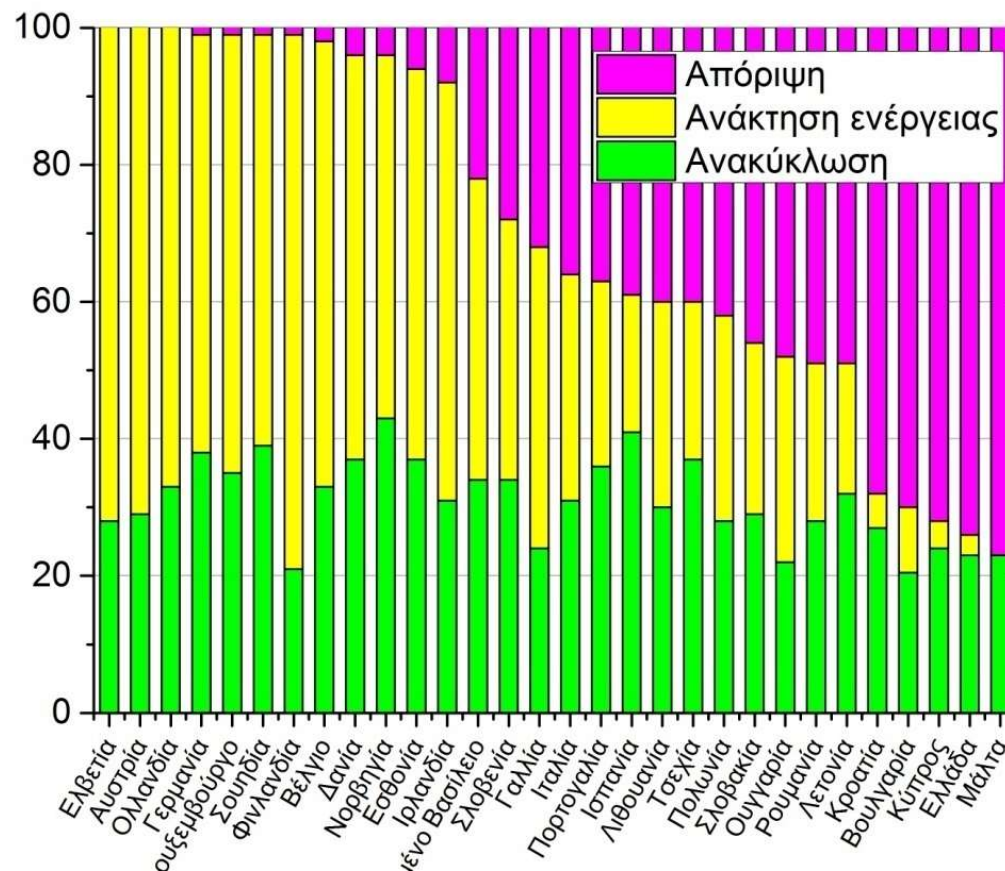
Δ. Κοινωνικές Προκλήσεις

- ▶ Α. Έλλειψη Δημόσιας Ευαισθητοποίησης και Συμμετοχής
 - ▶ Πολλοί καταναλωτές δεν ακολουθούν τις σωστές πρακτικές ανακύκλωσης, με αποτέλεσμα τη μόλυνση των ανακυκλώσιμων υλικών. Για παράδειγμα, η ανάμειξη απορριμμάτων τροφίμων, πλαστικών και μη ανακυκλώσιμων υλικών δυσχεραίνει την αποτελεσματική επεξεργασία των αποβλήτων.
- ▶ Β. Ασυνεπείς Πολιτικές Ανακύκλωσης
 - ▶ Διαφορετικές χώρες, ακόμη και πόλεις, έχουν διαφορετικούς κανόνες ανακύκλωσης, δημιουργώντας σύγχυση στους καταναλωτές και τις επιχειρήσεις. Ορισμένα πλαστικά που είναι ανακυκλώσιμα σε μια περιοχή ενδέχεται να μην γίνονται δεκτά σε μια άλλη.
- ▶ Γ. Παράνομη Απόρριψη και Άτυπη Ανακύκλωση
 - ▶ Σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, τα πλαστικά απόβλητα διαχειρίζονται από άτυπους τομείς ανακύκλωσης, όπου οι εργαζόμενοι διαλογούν και επεξεργάζονται πλαστικά υπό κακές συνθήκες εργασίας. Επιπλέον, η παράνομη απόρριψη και καύση πλαστικών αποβλήτων συμβάλλει σε σοβαρούς περιβαλλοντικούς και υγειονομικούς κινδύνους.

Ιεραρχική ταξινόμηση στη διαχείριση των απορριμμάτων (πηγή WFD, European Parliament, 2008)



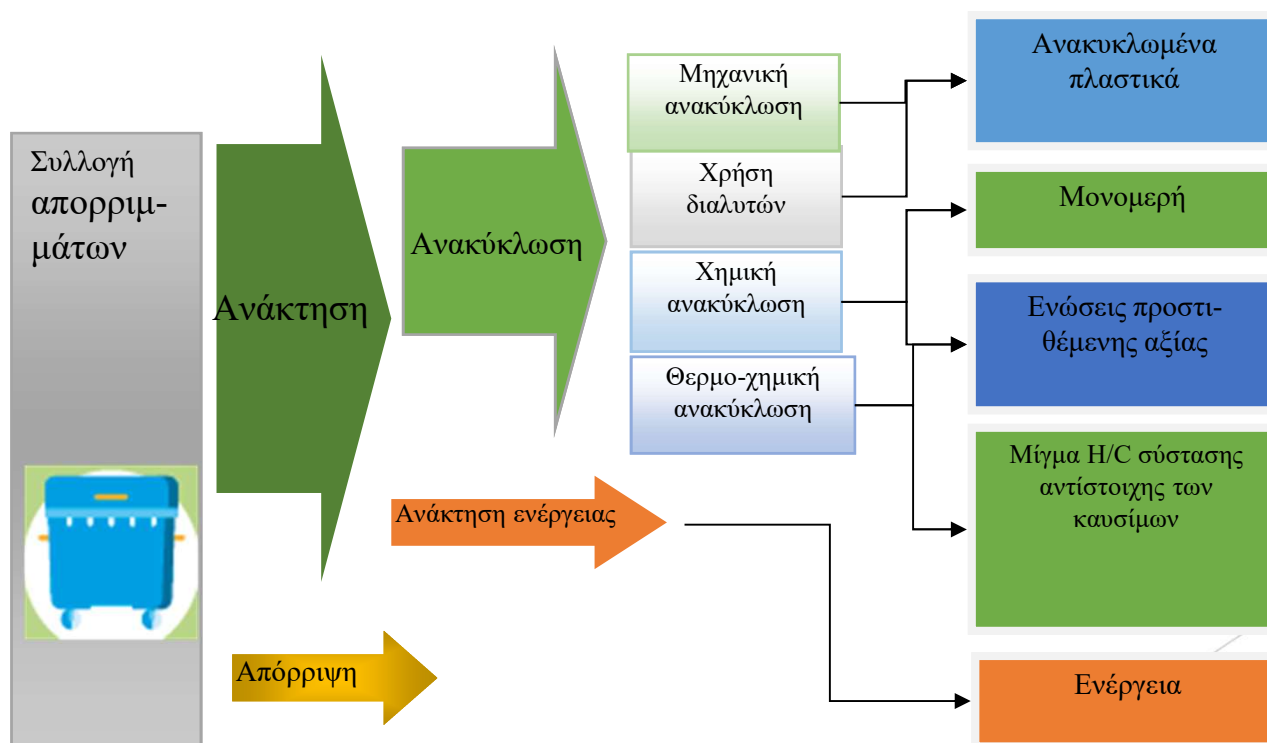
Διαχείριση πλαστικών απορριμμάτων όσον αφορά το ποσοστό ανακύκλωσης, ανάκτησης ενέργειας ή υγειονομικής ταφής στις χώρες της Ευρωπαϊκής ένωσης το 2018 (Δεδομένα από Plastics Europe, 2020)



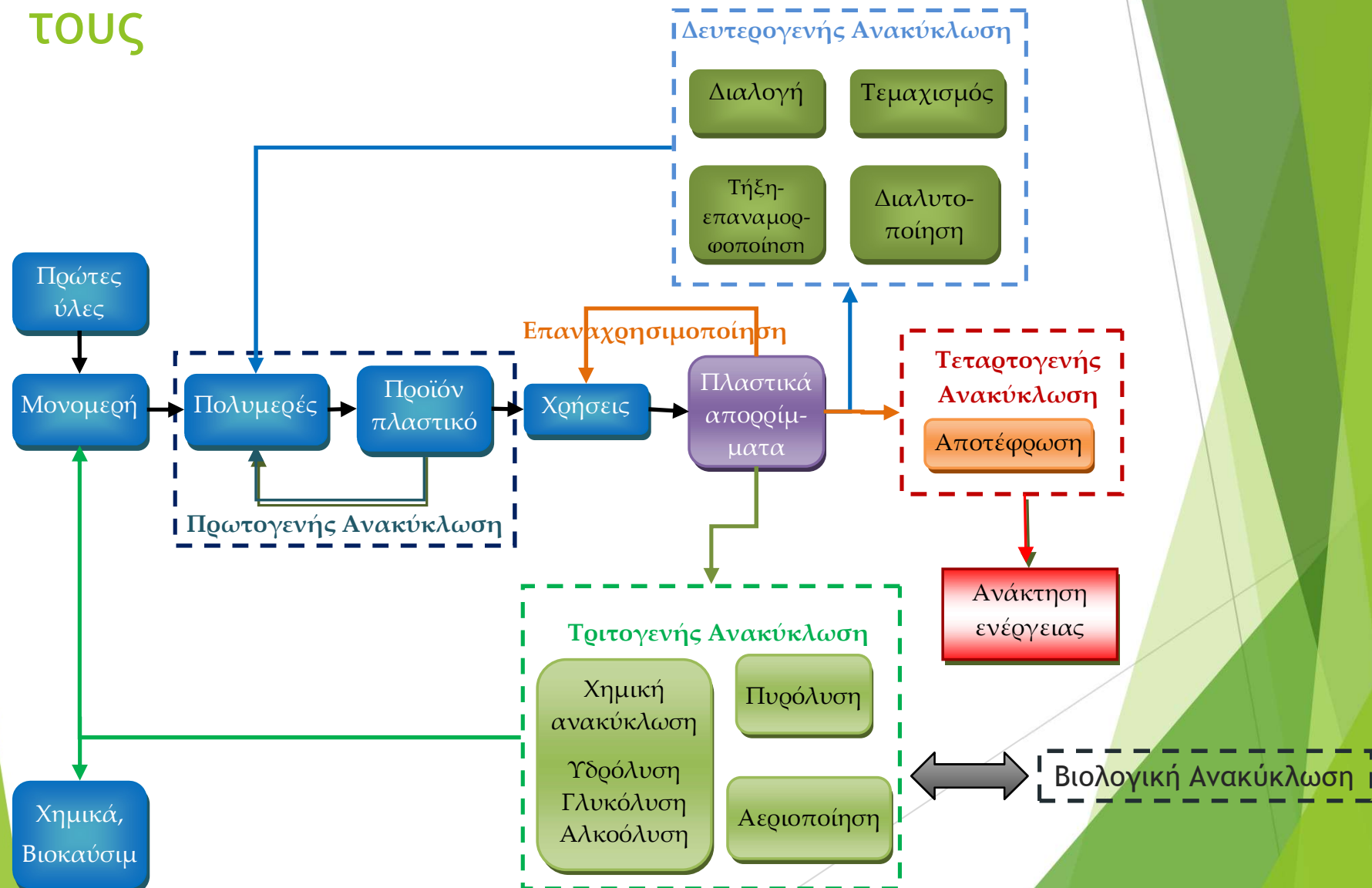
Παρούσα κατάσταση (PlasticsEurope, 2020)

- ▶ Το 2020, από τα πλαστικά απορρίμματα συσκευασίας που συλλέχθηκαν (17.8 million tones), το 42% ανακυκλώθηκε, το 39.5% χρησιμοποιήθηκε για ανάκτηση ενέργειας και το 18.5 % κατέληξε σε χώρους υγειονομικής ή μη-ταφής.
- ▶ Ο μεγαλύτερος όγκος των απορριμμάτων ανακυκλώθηκε με μηχανικό/φυσικό τρόπο και μόνο ένα μικρό μέρος ανακυκλώθηκε με διεργασίες χημικής ανακύκλωσης (λιγότερο από 0.1 million tones).
- ▶ Για να επιτευχθούν οι στόχοι της κυκλικής οικονομίας στην ανακύκλωση των πλαστικών το ποσό που απορρίπτεται ή καταλήγει σε χώρους υγειονομικής ταφής θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ή καλύτερα να μηδενισθεί. Επομένως το ποσοστό της ανακύκλωσης με διάφορους τρόπους θα πρέπει να αυξηθεί σημαντικά.

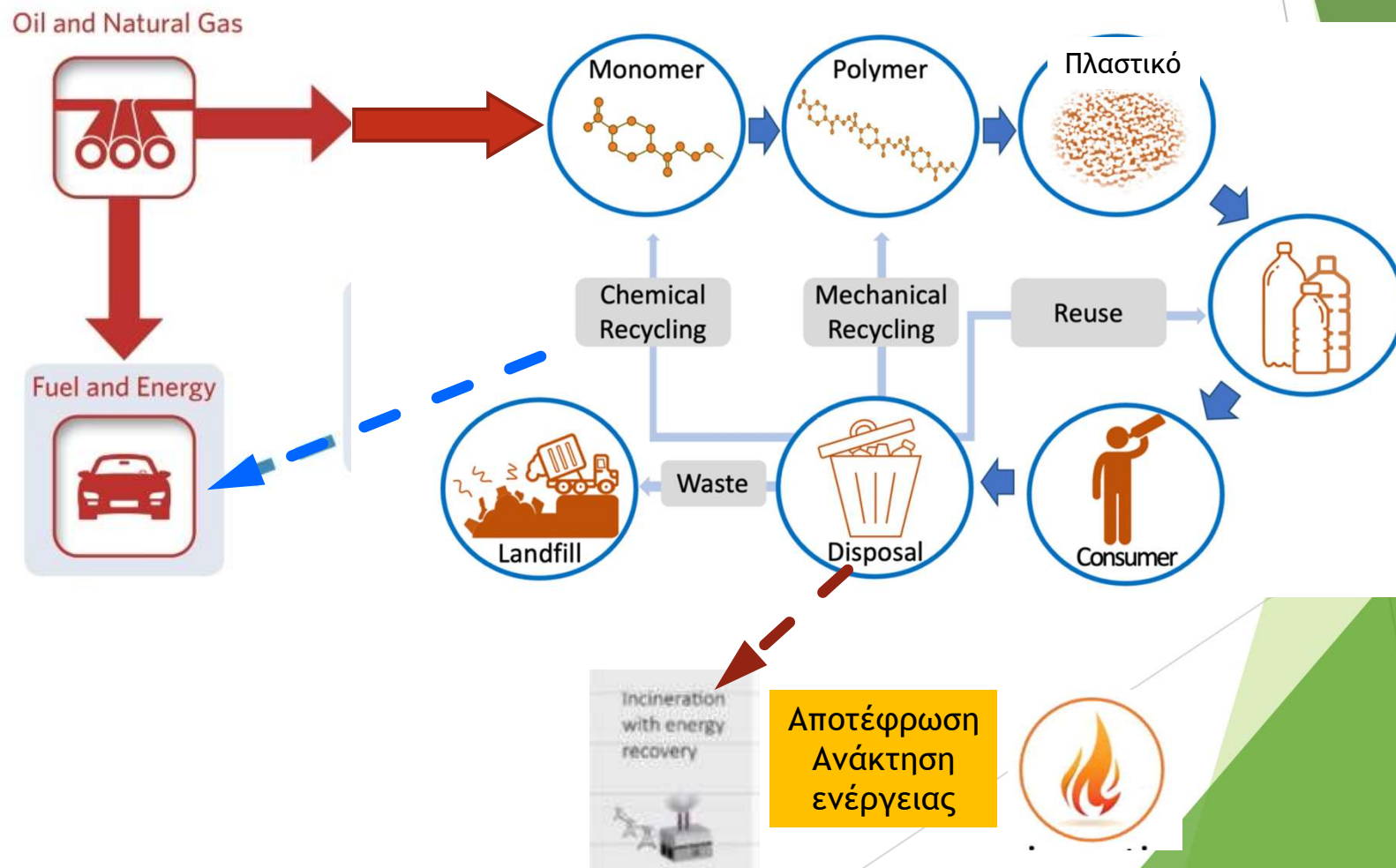
Τεχνικές που εφαρμόζονται στην ανακύκλωση των πολυμερών και προϊόντα που παράγονται



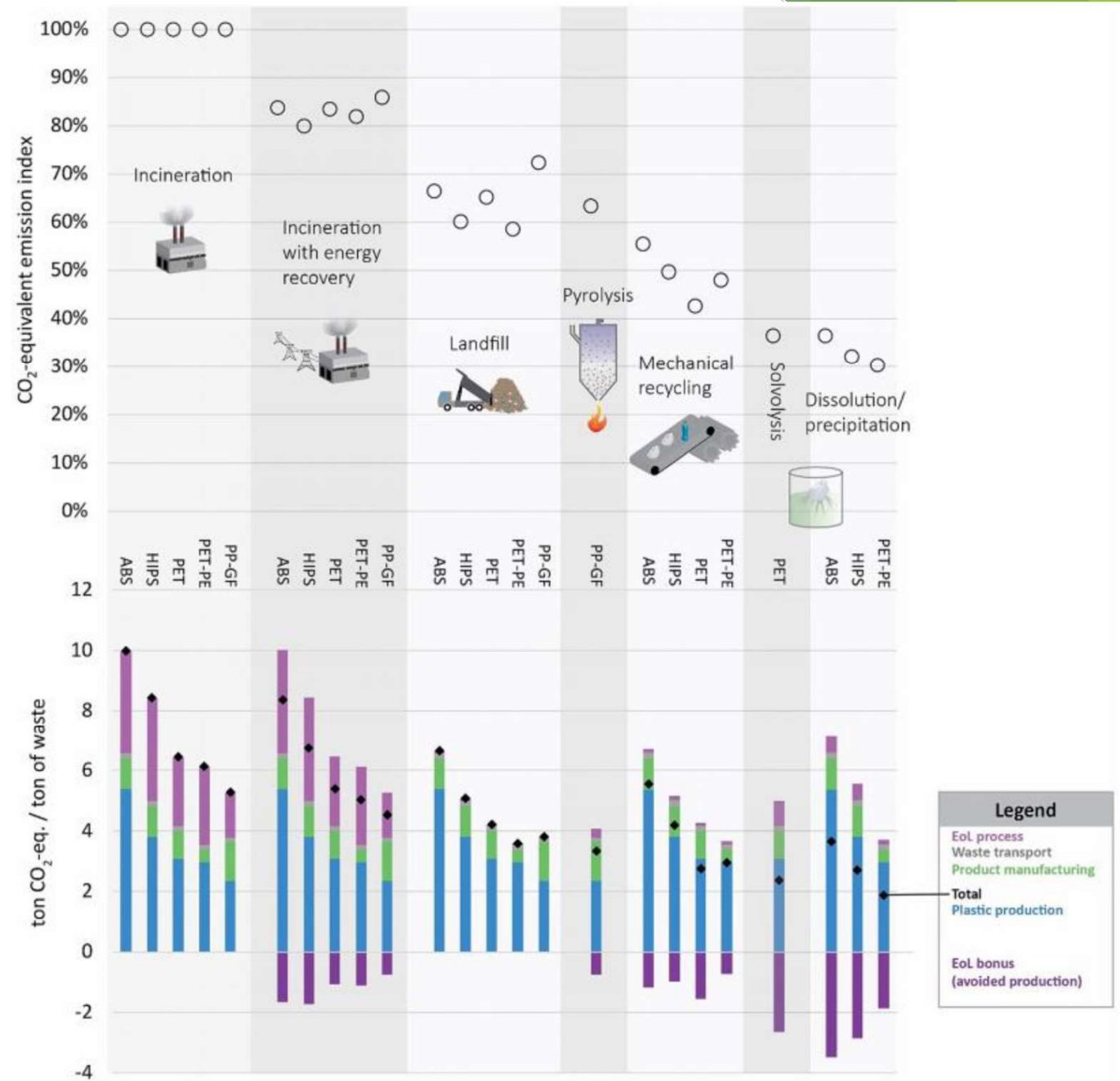
Μέθοδοι ανακύκλωσης πλαστικών απορριμμάτων και χρήση των προϊόντων τους



Μέθοδοι ανακύκλωσης πλαστικών απορριμμάτων και χρήση των προϊόντων τους

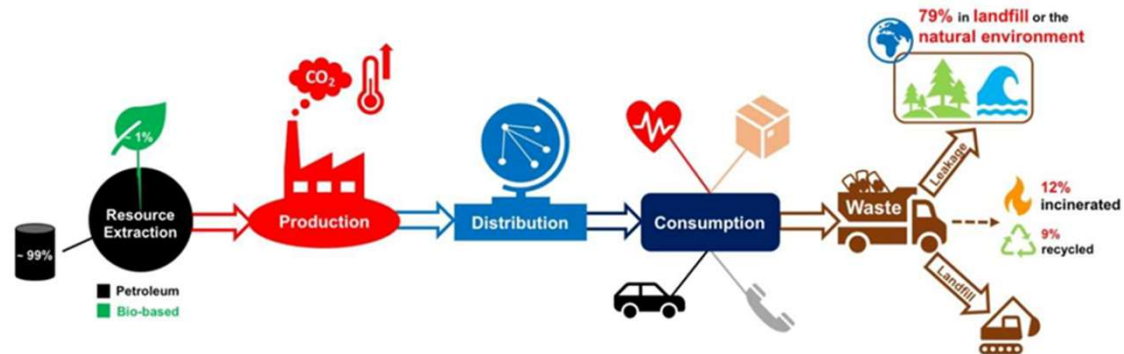


Εκπομπές CO_2
από τις
διάφορες
μεθόδους
διαχείρισης
των πλαστικών
απορριμμάτων.
(Vollmer et
al., 2020)

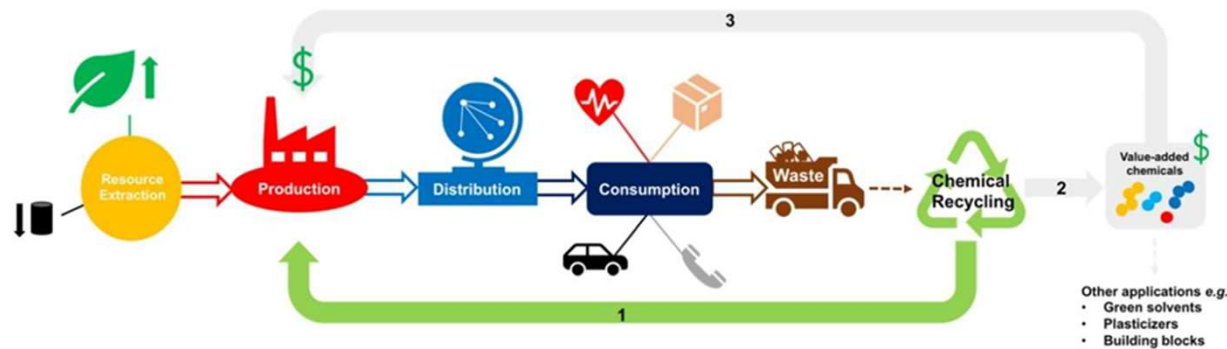


Γραμμική και Κυκλική οικονομία στην ανακύκλωση πλαστικών

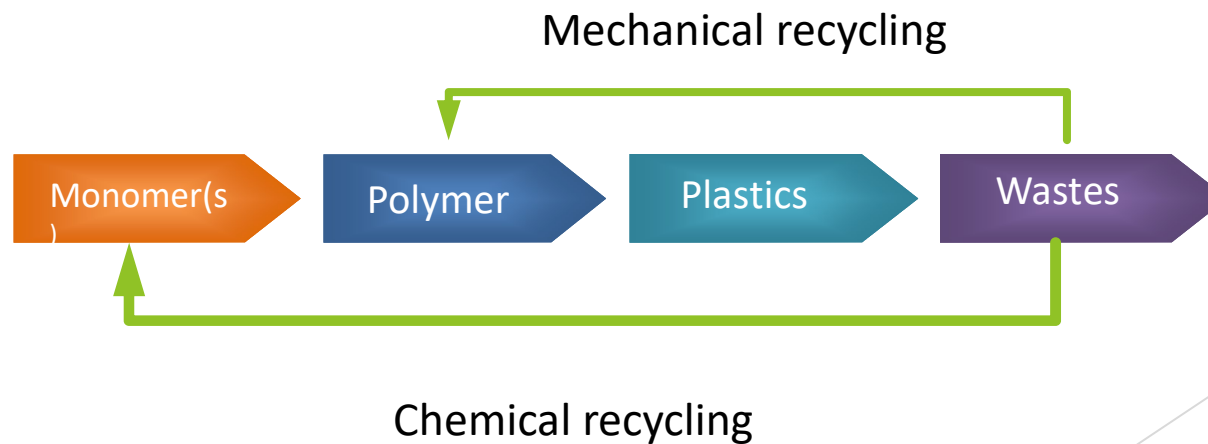
Γραμμική οικονομία



Γραμμική και Κυκλική οικονομία στην ανακύκλωση πλαστικών



Κυκλική οικονομία



Η έννοια της χημικής ανακύκλωσης

- ▶ Η οδηγία πλαίσιο της ΕΕ για τα απόβλητα (2008/98/ΕΚ) αναφέρεται στην χημική ανακύκλωση ως κάθε διαδικασία ανάκτησης με την οποία τα απόβλητα επανεπεξεργάζονται σε προϊόντα, υλικά ή ενώσεις, στην οποία όμως δεν συμπεριλαμβάνεται η ανάκτηση ενέργειας ή η επανεπεξεργασία σε υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα.
- ▶ Ωστόσο, ο όρος χημική ανακύκλωση στην ακαδημαϊκή βιβλιογραφία καλύπτει διάφορες μεθόδους αποικοδόμησης των πλαστικών απορριμμάτων στα συστατικά τους (π.χ. μονομερή, ολιγομερή), καθώς και σε προϊόντα δευτερογενούς προστιθέμενης αξίας (π.χ. φαινόλες) ή άλλες ουσίες, όπως υγρούς, στερεούς ή αέριους υδρογονάνθρακες, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και ως καύσιμα.
- ▶ Έτσι, εφόσον τα προϊόντα της χημικής ανακύκλωσης των πλαστικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή καυσίμων, όσον αφορά τον ορισμό του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου (2008) για την «ανακύκλωση», οι τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης μπορούν μόνο εν μέρει να ταξινομηθούν ως ανακύκλωση. Ομοίως, οι εκθέσεις διαφόρων μη κερδοσκοπικών οργανώσεων υπογραμμίζουν ότι τα συστήματα μετατροπής των αποβλήτων σε καύσιμα μέσω της χημικής ανακύκλωσης δεν μπορούν να θεωρηθούν ως δραστηριότητες ανακύκλωσης.
- ▶ Επιπλέον, ο ρόλος της χημικής ανακύκλωσης πλαστικών στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας δεν είναι σαφής. Εφόσον με τη χημική ανακύκλωση των πλαστικών μπορούν να παραχθούν πρώτες ύλες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την επαναπαραγωγή των πλαστικών τότε αυτή θεωρείται ότι είναι συμβατή με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Εντούτοις, στην περίπτωση τεχνολογιών ανακύκλωσης που οδηγούν σε προϊόντα που δυνητικά μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα δεν είναι συμβατή.

Χημική ανακύκλωση πολυμερών

- ▶ Γενικά, η αποικοδόμηση των πολυμερών στα μονομερή τους αναφέρεται ως αποπολυμερισμός. Στις ερευνητικές δημοσιεύσεις χρησιμοποιούνται δύο όροι: η «*χημική ανακύκλωση*» (chemical recycling) και η «*ανακύκλωση πρώτων υλών*» (feedstock recycling) μερικές φορές συνώνυμα και μερικές όχι.
- ▶ Η χημική ανακύκλωση περιγράφει μια διαδικασία κατά την οποία τα πλαστικά απόβλητα διασπώνται σε ολιγομερή ή μονομερή ή άλλες ενώσεις μέσω **αλλαγών στη χημική δομή των πολυμερών**, που προκαλούνται από χημικές αντιδράσεις, συνήθως με τη βοήθεια θερμότητας και καταλυτών. Η χημική ανακύκλωση δίνει τη δυνατότητα στα πλαστικά να ανακυκλώνονται ξανά και ξανά, δεδομένου του ότι νέα πολυμερή μπορούν να παραχθούν κάθε φορά μετά από κάθε αποπολυμερισμό.
- ▶ Πρέπει να τονιστεί εδώ ότι η **μέθοδος της διαλυτοποίησης/επανακαταβύθισης** ή ανακύκλωση με χρήση διαλυτών συνήθως περιλαμβάνεται στις μεθόδους χημικής ανακύκλωσης. Ωστόσο, αυτό δεν είναι σωστό αφού στις μεθόδους ανακύκλωσης με διαλύτες, η χημική δομή του πολυμερούς δεν επηρεάζεται και οι διαλύτες χρησιμοποιούνται μόνο για τον διαχωρισμό των πολυμερών, όπως είναι ως μακρομοριακές ενώσεις

Χημική ανακύκλωση πολυμερών

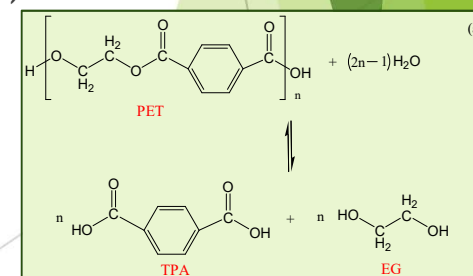
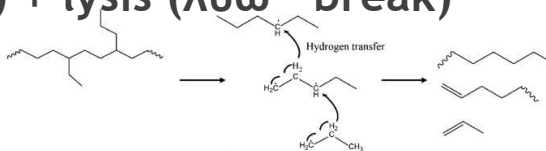
- ▶ Δύο μέθοδοι ταξινομούνται στις μεθόδους χημικής ανακύκλωσης πλαστικών με βάση τη διεργασία και τον τύπο των χρησιμοποιούμενων και παραγόμενων ενώσεων: η «Χημική ανακύκλωση» και η «Θερμοχημική ανακύκλωση».
- ▶ Στην πρώτη κατηγορία, εμπίπτει η «**χημειόλυση**» (chemolysis), όπου χρησιμοποιούνται χημικά αντιδραστήρια με στόχο τη διάσπαση των πολυμερών σε μονομερή ή/και ολιγομερή. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι χημικού αποπολυμερισμού ανάλογα με τον τύπο του χημικού αντιδρώντος: π.χ. γλυκόλυση, υδρόλυση, αλκοόλυση. Με τη διαδικασία αυτή μπορούν να παραχθούν μονομερή τα οποία αφού καθαριστούν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή νέων πολυμερών υψηλής ποιότητας. Επομένως, η χημειόλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές όπου απαιτούνται πολυμερή υψηλής καθαρότητας για εφαρμογές π.χ. στη συσκευασία τροφίμων. Το μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε πολυμερή με συγκεκριμένες χαρακτηριστικές ομάδες στο μακρομόριο τους. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν τα πολυμερή συμπύκνωσης, όπως οι πολυεστέρες (π.χ. PET), τα πολυαμίδια (π.χ. Nylon), οι πολυουρεθάνες, κ.α.
- ▶ Στη **θερμοχημική ανακύκλωση**, τα πλαστικά απορρίμματα θερμαίνονται είτε απουσία οξυγόνου (πυρόλυση, καταλυτική πυρόλυση) είτε με περιορισμένο οξυγόνο (αεριοποίηση). Η πυρόλυση πραγματοποιείται σε μέτριες έως υψηλές θερμοκρασίες και καταλήγει συνήθως σε υδρογονάνθρακες με μεγάλο εύρος ατόμων άνθρακα και σύστασης αντίστοιχης συμβατικών υγρών καυσίμων, καθώς και στην παραγωγή μονομερών, ή άλλων πολύτιμων χημικών ενώσεων. Η αεριοποίηση των πλαστικών απορριμμάτων οδηγεί σε μείγμα υδρογονανθράκων, αλλά κυρίως στην παραγωγή του αερίου σύνθεσης (CO και H₂), το οποίο χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου και άλλων πολύτιμων χημικών. Οι θερμοχημικές μέθοδοι ανακύκλωσης χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανακύκλωση πλαστικών προερχόμενα από πολυμερή που παράγονται από αλυσιδωτό πολυμερισμό, όπως οι πολυολεφίνες (LDPE, HDPE, PP), τα PS, PMMA, κ.α.

Terminology in chemical recycling

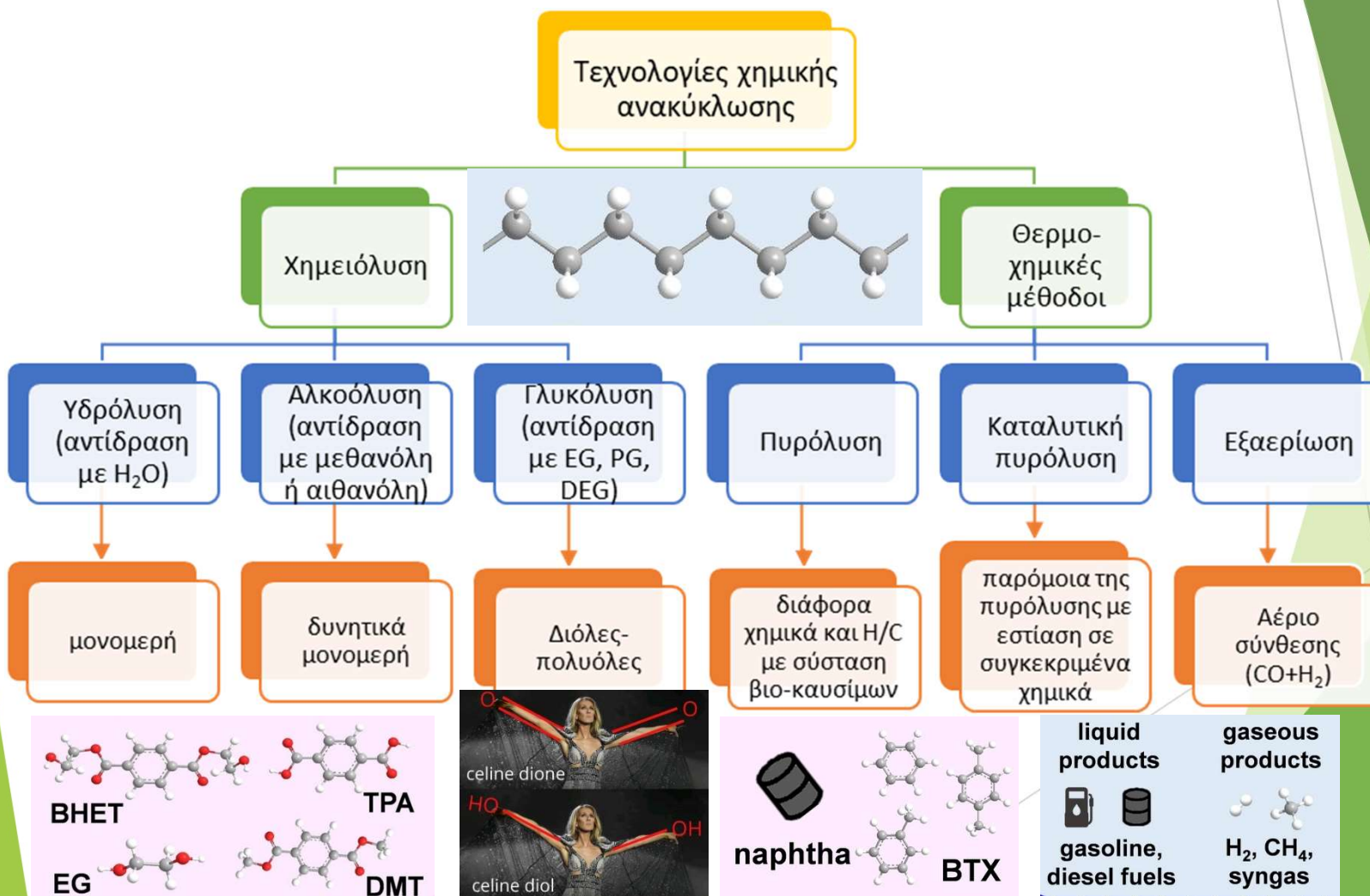
- ▶ The lack of clarity in chemical recycling terminology leads to confusing conclusions on the potential role of chemical recycling in the circular economy
- ▶ Re-cycling ---cycle --- κύκλος 
- ▶ Chemical recycling 'conversion to monomer or production of new raw materials by changing the chemical structure of plastics waste through cracking, gasification or depolymerization, excluding energy recovery and incineration' (ISO 15270: 2008)
- ▶ Chemolysis (also known as *solvolysis*, chemical depolymerisation) 'involves treating the classified polymeric wastes with solvents and reagents (or catalysts) to depolymerize the polymer to low molecular weight chemicals and oligomers' (Zhou et al, 2016)
- ▶ Chemolysis --- chem (χημικά-chemical)+lysis
- ▶ Solvolysis --- solvent + lysis ???

dissolves, does not break bonds

Pyrolysis --- pyr (φωτιά - fire) + lysis (λύω - break)

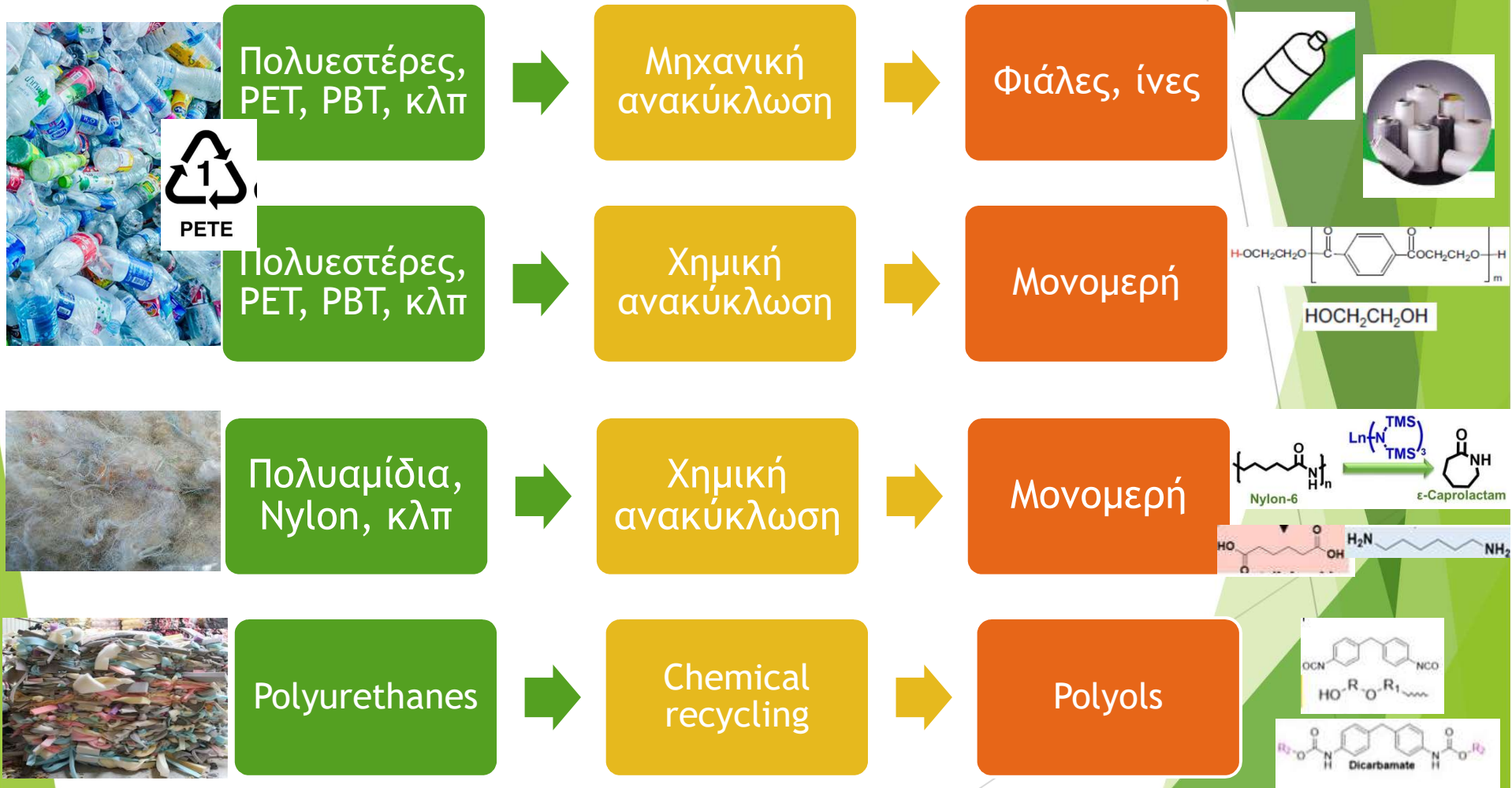


Τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης πολυμερών



Ανακύκλωση διαφόρων τύπων πολυμερών

Πολυμερή συμπύκνωσης

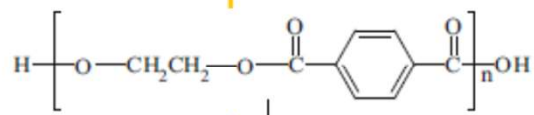


Ανακύκλωση διαφόρων τύπων πολυμερών

Πολυμερή προσθήκης



Τεχνικές
αποπολυμερισμού του
πολυ(τερεφθαλικού
αιθυλενεστέρα), PET



Υδρόλυση

σε αλκαλικές, όξινες ή
ουδέτερες συνθήκες

Αλκοόλυση

(με μεθανόλη ή
αιθανόλη)

Γλυκόλυση

(με αιθυλενογλυκόλη,
διαιθυλενογλυκόλη,
προπυλενογλυκόλη,
κλπ)

Αμμινόλυση

(αμίνες όπως η
αιθανολαμίνη)

Αντιδραστήρια

Νερό, H₂O

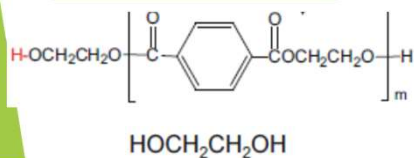
Μεθανόλη, CH₃OH

Αιθυλενογλυκόλη,
HOCH₂CH₂OH

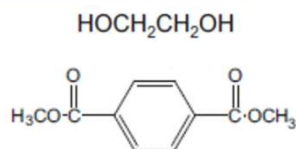
Αιθανολαμίνη,
HOCH₂CH₂NH₂

Προϊόντα

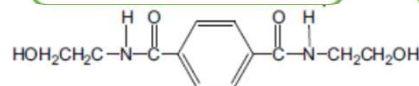
Μονομερή
Τερεφθαλικό οξύ και
αιθυλενογλυκόλη



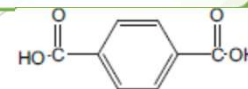
Μονομερή
Τερεφθαλικός
διμεθυλεστέρας και
αιθυλενογλυκόλη



Διόλες, Διο-
υδροξυαιθυλο-
τερεφθαλικός εστέρας



Πολύτιμα προϊόντα, Διο-
υδροξυαιθυλο-
τερεφθαλαμίδιο

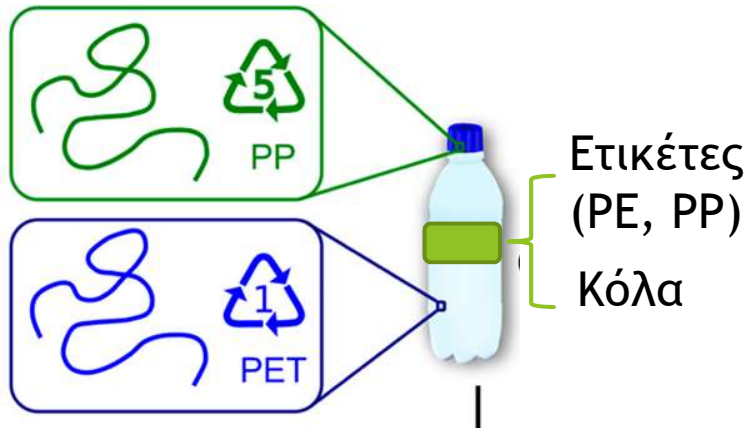


Παραδείγματα ανακύκλωσης

Ανακύκλωση φιαλών από PET

Συνήθης πρακτική

Συστατικά στα δοχεία από PET



PET Recycling Flow Chart

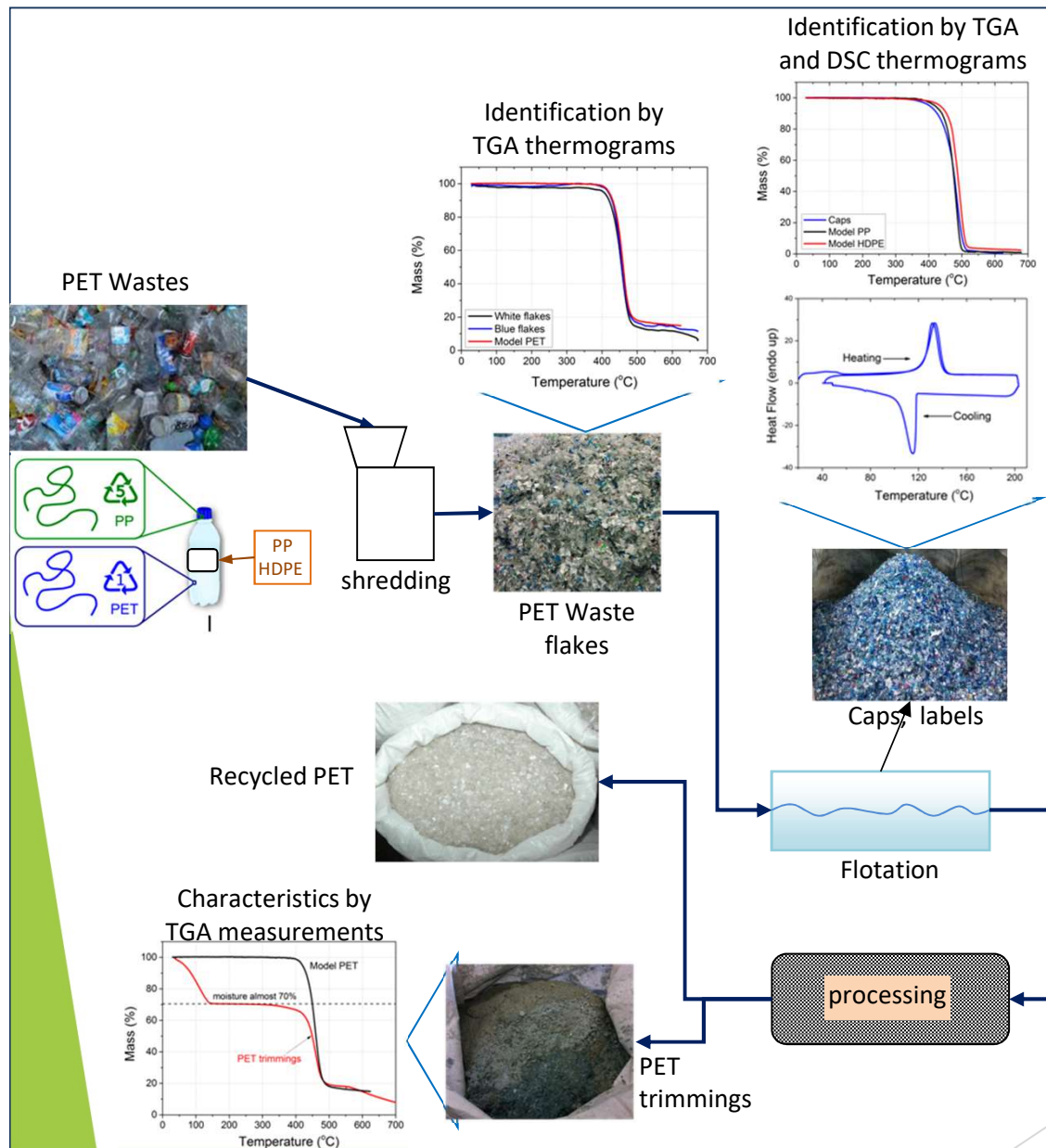


Ετικέτες, καπάκια (PE, PP)

PET flakes



Υπολείμματα (τρίμμα, κλπ)



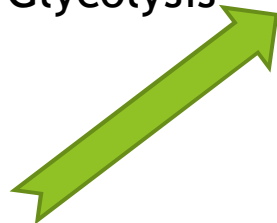
- During separation by flotation PHB or PLA are in the bottom stream with PET since they have similar densities > 1

Γλυκόλυση απορριμμάτων πολυεστέρων

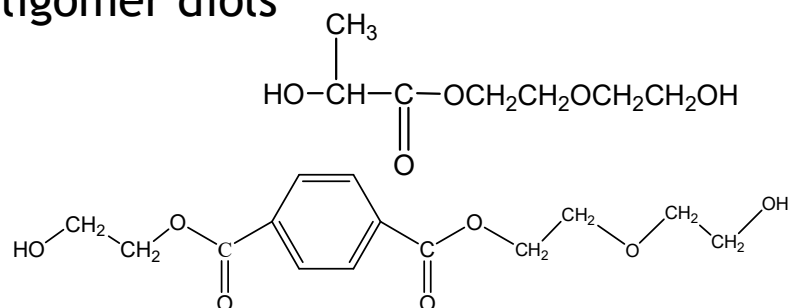
Waste
PET (and) PLA



Glycolysis



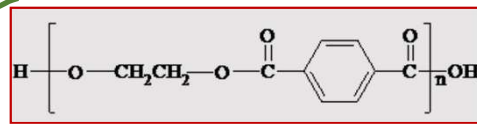
Oligomer diols



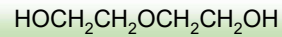
Unsaturated Polyester resins
Alkyd resins



protective coatings with
good weathering
properties and important
ingredients in many
synthetic paints

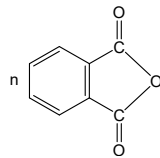
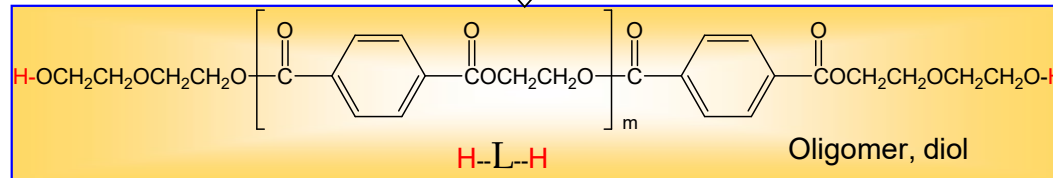


PET

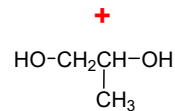


+ Diethylene glycol, DEG

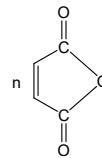
Glycolysis



fumar anhydride

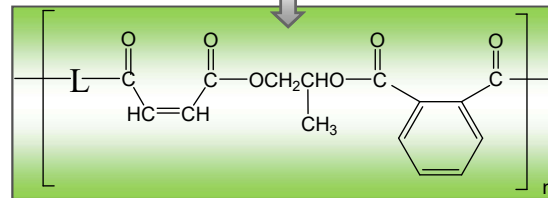


isopropylene glycol

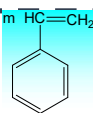


maleic anhydride

Synthesis of
Unsaturated
Polyester
Resins

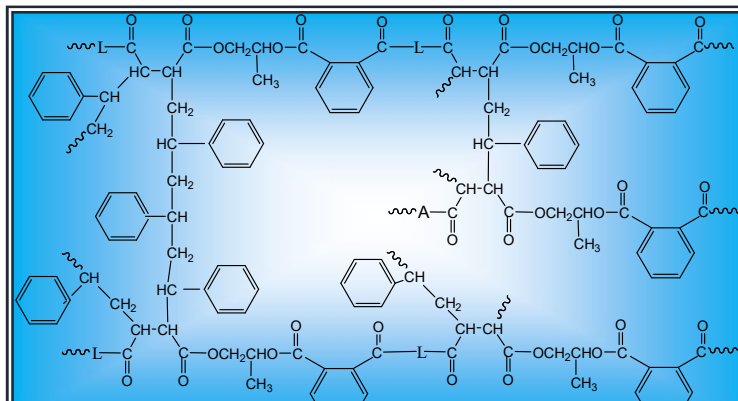


Styrene

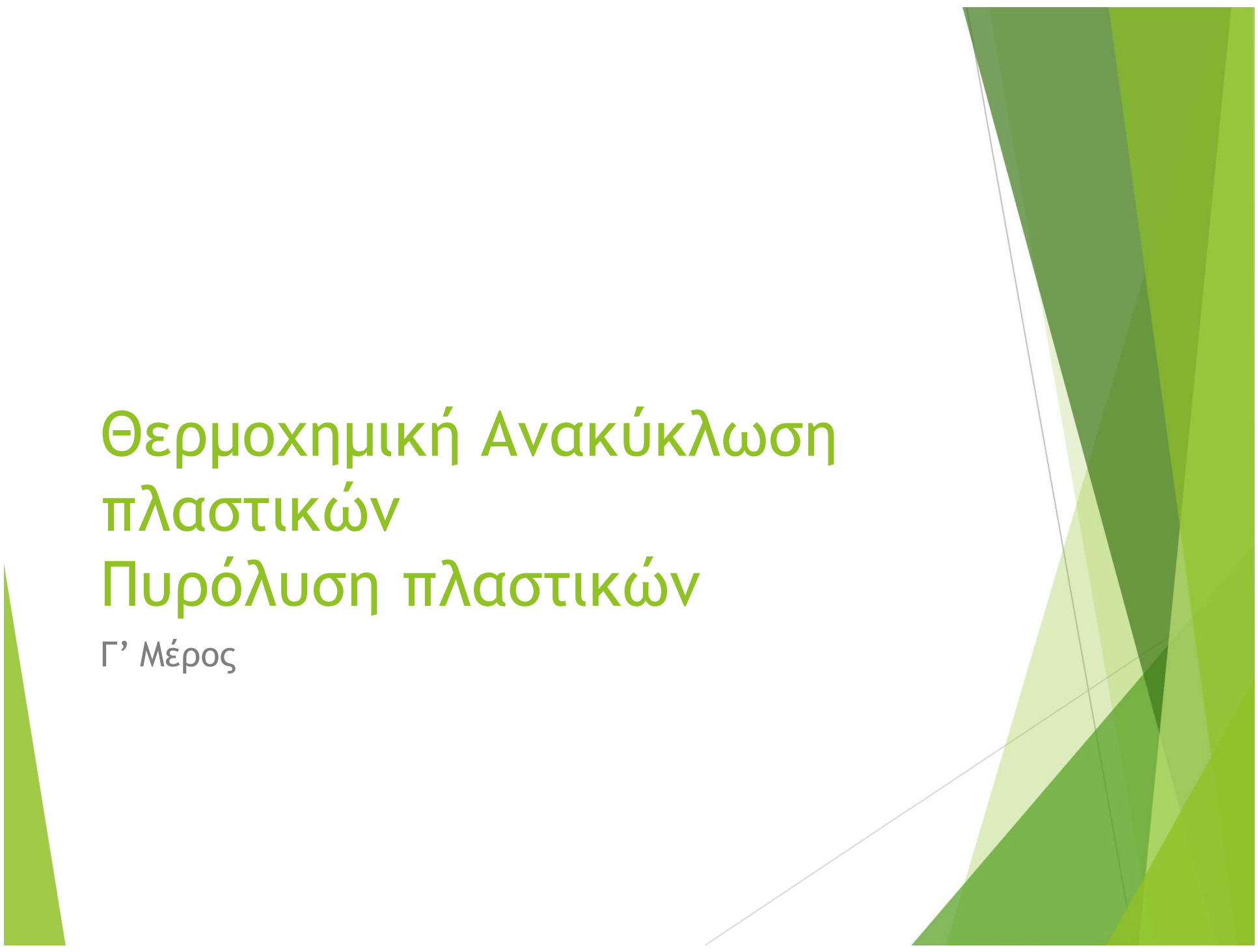


+ radical initiator

Curing for the
production of
Alkyd Resins



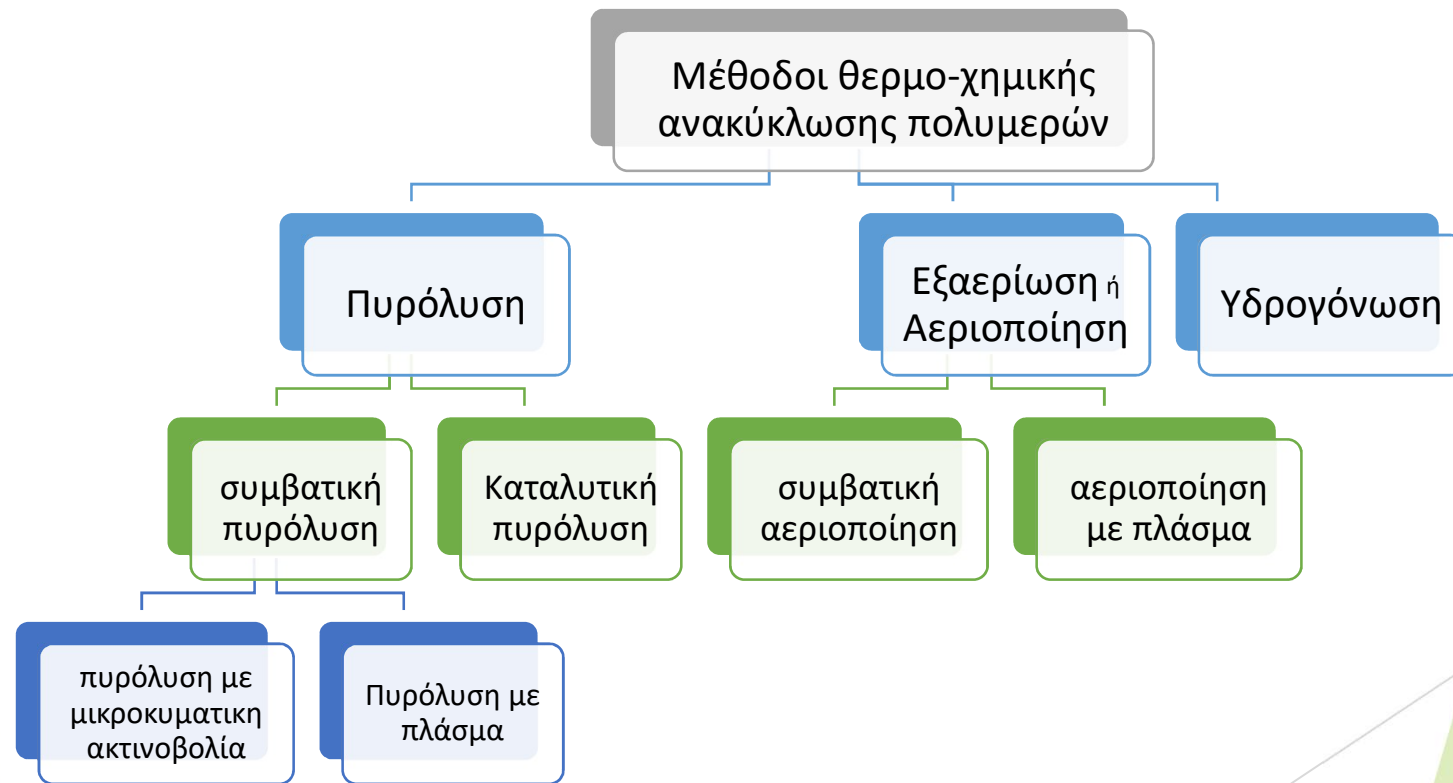
Σύνθεση
Αλκυδικών
ρητινών από
απορρίμματα
PET με
γλυκόλυση

The slide features abstract green geometric shapes. On the left, a small green triangle points upwards. On the right, a large, complex shape composed of several overlapping translucent green triangles and quadrilaterals is positioned. A thin white line extends from the bottom left towards the right, passing through the green shapes.

Θερμοχημική Ανακύκλωση πλαστικών Πυρόλυση πλαστικών

Γ' Μέρος

Μέθοδοι Θερμο-χημικής Ανακύκλωσης Πολυμερών



Υδρογόνωση

- ▶ Η υδρογόνωση είναι μια χημική διαδικασία με την οποία τα πλαστικά διασπώνται σε χρήσιμους υδρογονάνθρακες αντιδρώντας με υδρογόνο υπό υψηλές θερμοκρασίες 300-500° C και υψηλές πιέσεις, συχνά παρουσία καταλύτη.
- ▶ Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για τη μετατροπή των πλαστικών αποβλήτων σε πολύτιμα καύσιμα, όπως ντίζελ, βενζίνη και άλλες πετροχημικές πρώτες ύλες.
- ▶ Καταλύτες όπως το νικέλιο, το παλλάδιο ή οι ζεόλιθοι χρησιμοποιούνται συνήθως για να διευκολύνουν τη διάσπαση των δεσμών των πολυμερών και τον κορεσμό των αλυσίδων υδρογονανθράκων.
- ▶ Ως πρώτη ύλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν μικτά και μολυσμένα πλαστικά απόβλητα.
- ▶ Ωστόσο, η διαδικασία είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα λόγω του ότι απαιτεί υψηλή ενεργειακή κατανάλωση λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων, ακριβούς καταλύτες και παροχή υδρογόνου.

Αεριοποίηση

- ▶ Η αεριοποίηση είναι μια διαδικασία που μετατρέπει τα πλαστικά σε αέριο σύνθεσης (syn gas) με μερική οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 800° C).
- ▶ Το αέριο σύνθεσης είναι ένα μείγμα CO, H₂ και CO₂, το οποίο μπορεί να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία για την παραγωγή καυσίμων (όπως μεθανόλη ή συνθετικό φυσικό αέριο) ή χημικών ουσιών.
- ▶ Η αεριοποίηση θεωρείται μια αποτελεσματική διαδικασία ανακύκλωσης, επειδή επιτρέπει μεγαλύτερο βαθμό ευελιξίας όσον αφορά τις πρώτες ύλες και τους τύπους των προϊόντων.
- ▶ Η αεριοποίηση είναι εξαιρετικά ευέλικτη, αλλά απαιτεί προηγμένη τεχνολογία για τη διαχείριση των ακαθαρσιών. Η αεριοποίηση έχει ήδη εφαρμοστεί σε πολλά πλαστικά και σε κλίμακα πιλοτικής μονάδας.

Μέθοδοι θερμοχημικής ανακύκλωσης πολυμερών με την εμπορική ωριμότητα και τον τύπο των πολυμερών που μπορούν να διαχειριστούν

Technology	Scale of operation	Input materials	Source
Πυρόλυση (συμβατική πυρόλυση, θερμική πυρόλυση)	Εμπορικά εκμεταλλεύσιμη	HDPE, LDPE, PP, PMMA, PS, HIPS, ABS, PU, μίγμα PE/PP/PS, σύνθετα ενισχυμένα με ίνες, πολυστρωματικές πλαστικές συσκευασίες	Datta & Kopczynska, 2016; Lopez et al., 2017; Ragaert et al., 2017; Solis & Silveira, 2020; Vollmer et al., 2020
Καταλυτική πυρόλυση	Εμπορικά εκμεταλλεύσιμη	HDPE, LDPE, PP, PS	Datta & Kopczynska, 2016; Lopez et al., 2017; Ragaert et al., 2017; Solis & Silveira, 2020; Vollmer et al., 2020
Συμβατική αεριοποίηση	Εμπορικά εκμεταλλεύσιμη	Όλοι οι τύποι των πλαστικών και μίγματα πλαστικών	Datta & Kopczynska, 2016; Ragaert et al., 2017; Solis & Silveira, 2020
Υδρογονο-διάσπαση	Εμπορικά εκμεταλλεύσιμη	Όλοι οι τύποι των πλαστικών και μίγματα πλαστικών	Datta & Kopczynska, 2016; Ragaert et al., 2017; Vollmer et al., 2020

Examples of commercial plants along with inputs, yields and maximum capacities

Technology	Provider	Inputs	Yields	Capacity	Source
Pyrolysis	Royco Beijing	PE, PP, PS, waste oils	87% oil, 10% gas, 3% solid residue	6 kilotons/year	Ragaert et al., 2017; Solis & Silveira; 2020
	Mogami-Kiko Japan	PP, PE	79% oil, 12% gas	1 kiloton/year	Ragaert et al., 2017; Solis & Silveira; 2020
Catalytic cracking	Zadgaonkar, India	PE, PP, PS, PVC, PET	75% oil, 20% gas, 5% coke	12 kilotons/year	Solis & Silveira; 2020
	Thermofuel/Cynar	PE, PP, PS	Oil, gas, coke	6 kilotons/year	Solis & Silveira; 2020
Gasification	Enerkem	PW	38 million litres of methanol, ethanol and ethylene	100 kilotons/year	Solis & Silveira; 2020
Chemolysis	Ionika Technologies	PET	BHET (an intermediate in PET production)	10 kilotons/year	Vollmer et al., 2020

Πυρόλυση

- ▶ Η πυρόλυση αποτελεί σήμερα την πλέον υποσχόμενη μέθοδο από τις τεχνικές χημικής ανακύκλωσης των πολυμερών.
- ▶ Ως πυρόλυση ορίζεται η θερμική αποικοδόμηση ενός υλικού (πολυμερούς) σε μέτριες θερμοκρασίες (300-700°C, ανάλογα με τον τύπο της πρώτης ύλης και του αντιδραστήρα) σε αδρανές περιβάλλον, απουσία οξυγόνου.
- ▶ Στη διαδικασία της πυρόλυσης, η θερμική αποικοδόμηση των μακρομοριακών αλυσίδων μπορεί να επιτευχθεί παρουσία καταλύτη (καταλυτική πυρόλυση) ή χωρίς (θερμική ή συμβατική πυρόλυση).
- ▶ Έχουν αναπτυχθεί διαφορετικοί τύποι πυρόλυσης που διαφέρουν ως προς το χρόνο αντίδρασης και ορίζονται ως γρήγορη, ενδιάμεση, αργή και πυρόλυση κενού.
- ▶ Στη διαδικασία της πυρόλυσης, οι μακρομοριακές αλυσίδες των οργανικών πολυμερών αποικοδομούνται σε μικρότερα και λιγότερο πολύπλοκα μόρια με έλεγχο της ροής θερμότητας και της πίεσης της διεργασίας.
- ▶ Τα προϊόντα της πυρόλυσης των πλαστικών είναι:
 - ▶ υγρά (συμπυκνώσιμοι ατμοί ή υγρό έλαιο),
 - ▶ στερεά (char, εξανθράκωμα) και
 - ▶ αέρια (μη συμπυκνώσιμοι ατμοί).
- ▶ Οι σχετικές αποδόσεις αυτών των προϊόντων καθορίζονται από τις συνθήκες της διεργασίας καθώς και από τον τύπο και τη σύνθεση της πρώτης ύλης (μίγμα πλαστικών).

Θερμο-χημική ανακύκλωση πολυμερών

Πυρόλυση

- Θέρμανση απουσία οξυγόνου
- Παραγωγή μονομερών ή άλλων σημαντικών χημικών
- Παραγωγή υγρού (κυρίως) αλλά και αερίου κλάσματος με σύσταση αντίστοιχη των κοινών καυσίμων
- Χρήση ή όχι καταλύτη

Πυρόλυση

Ανάκτηση
μονομερούς/ών

PMMA, PS

Ανάκτηση
υδρογονανθράκων
με σύσταση
αντίστοιχη των
υγρών καυσίμων

LDPE, HDPE,
PP

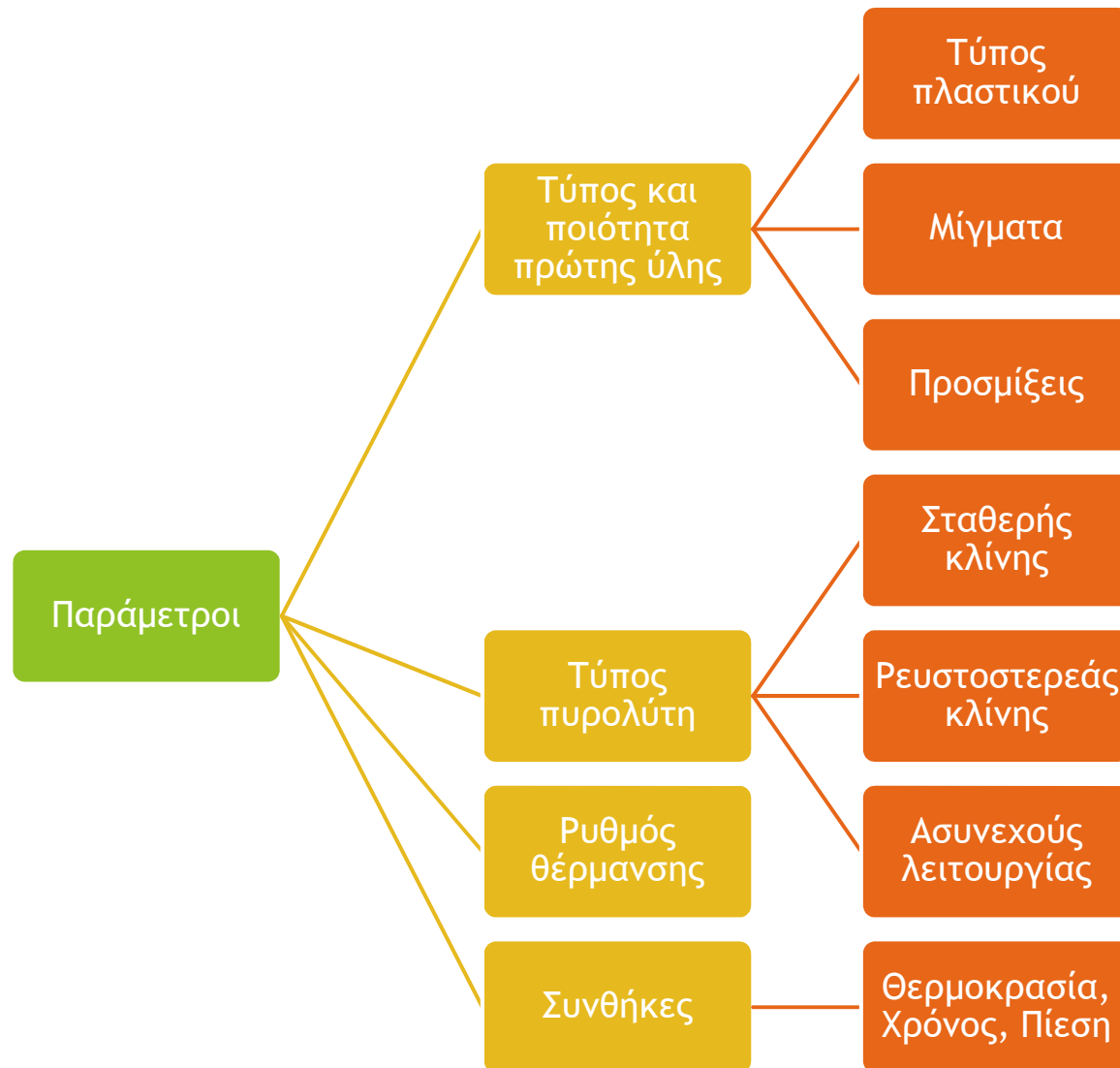
Ανάκτηση
δευτερογενών
πολύτιμων
προϊόντων

PC

Ανάκτηση μονομερούς κατά την πυρόλυση διαφόρων πολυμερών

Πολυμερές	Μηχανισμός διάσπασης	Απόδοση σε μονομερές (% κ.β)
Πολυ(μεθακρυλικός μεθυλεστέρας)	Σχάση ακραίων τμημάτων της μακρομοριακής αλυσίδας	91-98
Πολυτετραφθοροαιθυλένιο	Σχάση ακραίων τμημάτων της μακρομοριακής αλυσίδας	95
Πολυαιθυλοστυρένιο	Σχάση ακραίων τμημάτων της μακρομοριακής αλυσίδας	82-94
Πολυστυρένιο	Σχάση ακραίων τμημάτων της μακρομοριακής αλυσίδας και τυχαία σχάση της αλυσίδας	52-65
Πολυισοβουτυλένιο	Σχάση ακραίων τμημάτων της μακρομοριακής αλυσίδας και τυχαία σχάση της αλυσίδας	18-25
Πολυαιθυλένιο	Τυχαία σχάση της αλυσίδας	0.03
Πολυπροπυλένιο	Τυχαία σχάση της αλυσίδας	0-17
Πολυβουταδιένιο	Τυχαία σχάση της αλυσίδας	1

Παράμετροι που επηρεάζουν τη διεργασία πυρόλυσης



Χαρακτηρισμός του τύπου της πυρόλυσης ανάλογα με το ρυθμό θέρμανσης

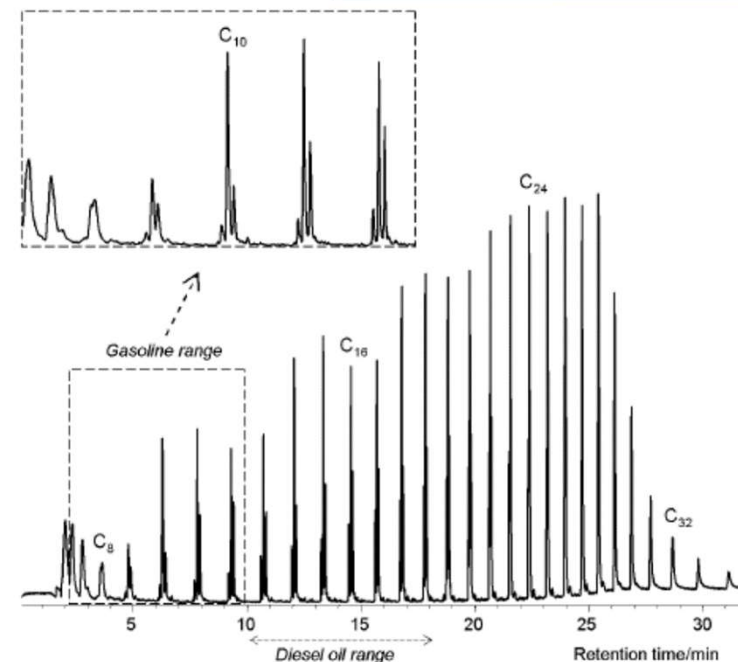
Τύπος πυρόλυσης	Ρυθμός θέρμανσης	Χρόνος παραμονής	Θερμοκρασία (°C)	Πίεση	Υγρασία	Μέγεθος τροφοδοσίας	Προϊόντα
Αργή πυρόλυση	10-100 °C/min	10-60 min	450-600	Ατμοσφαιρική/κενό	< 15%	< 200 μμ	Αέριο, έλαιο, εξανθράκωμα
Ταχεία πυρόλυση	Μέχρι 1000 °C/s	0.5-5 s	550-650	Ατμοσφαιρική	< 10%	< 1 μμ	Αέριο, έλαιο, (εξανθράκωμα)
Υπερ-ταχεία (flash) πυρόλυση	Μέχρι 10000 °C/s	< 1 s	450-900	Ατμοσφαιρική	< 10%	< 1 μμ	Αέριο, έλαιο, (εξανθράκωμα)

Χαρακτηριστικά ανάλογα με την ταχύτητα πυρόλυσης

- ▶ Η αργή πυρόλυση πραγματοποιείται συνήθως σε διεργασία ασυνεχούς λειτουργίας, κατά την οποία όλο το πλαστικό τροφοδοτείται στον αντιδραστήρα πριν θερμανθεί από τη θερμοκρασία δωματίου με ρυθμό 10-100 K/min σε σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας, μέχρι να πυρολυθεί όλο το υλικό. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται βιομηχανικά καθώς δεν είναι δυνατό να επιτευχθούν γρήγοροι ρυθμοί θέρμανσης κατά την πυρόλυση σε μεγάλη κλίμακα.
- ▶ Η γρήγορη και η υπερ-ταχεία πυρόλυση μιγμάτων πλαστικών ευνοεί την παραγωγή αέριων προϊόντων, ενώ σχηματίζει πολύ λίγο υγρό προϊόν ή εξανθράκωμα. Αυτό οφείλεται στην ταχεία αποσύνθεση των πολυμερών, η οποία προκαλεί τη διάσπασή τους σε ενώσεις με μικρό μήκος της αλυσίδας του άνθρακα όπως το μεθάνιο, το αιθάνιο και το προπάνιο

Πυρόλυση πολυμερών με στόχο την παραγωγή υγρών καυσίμων

Προϊόντα πυρόλυσης του πολυαιθυλενίου



- ▶ Η πυρόλυση του πολυαιθυλενίου προχωρά με μέγιστο ρυθμό σε θερμοκρασία μεταξύ 420 - 500°C, οδηγώντας στη δημιουργία σειράς υδρογονανθράκων ευθείας αλυσίδας. Η απόδοση των αερίων υδρογονανθράκων και του στερεού υπολείμματος συνήθως παραμένει χαμηλή σε σύγκριση με το υγρό κλάσμα.
- ▶ Στο έλαιο πυρόλυσης σε κάθε ένωση με συγκεκριμένο αριθμό ατόμων C αντιστοιχεί 1-αλκένιο και δύο μικρότερες κορυφές που αντιστοιχούν σε α, ω-αλκαδιένιο και η-αλκάνιο.
- ▶ Στη θερμική διάσπαση του PE δεν αναμένονται διακλαδισμένοι υδρογονάνθρακες, γι' αυτό και ο αριθμός οκτανίου της βενζίνης που προέρχεται από πυρόλυση πολυαιθυλενίου αναμένεται να είναι χαμηλός (για LDPE αναφέρθηκε τιμή RON 20).

Scheirs, J. and W. Kaminsky, Eds.
Feedstock Recycling
and Pyrolysis of waste
plastics: Converting
Waste Plastics into
Diesel and Other
Fuels. 2006)

Πυρόλυση πολυμερών με στόχο την παραγωγή υγρών καυσίμων

Προϊόντα πυρόλυσης του πολυπροπυλενίου

- ▶ Το πολυπροπυλένιο αποσυντίθεται μεταξύ 400 - 470°C. Τα πιο σημαντικά προϊόντα που λαμβάνονται από την πυρόλυση είναι το τριμερές, τα τετραμερή και τα πενταμερή του προπενίου, που βράζουν στην περιοχή της βενζίνης.
- ▶ Σε σύγκριση με το PE, το PP παράγει λιγότερο υπόλειμμα κωκ και περισσότερα υγρά προϊόντα, αλλά με υψηλότερη περιεκτικότητα σε «ελαφριά προϊόντα».
- ▶ Η ισοαλκανοϊκή δομή του PP διατηρείται στα προϊόντα θερμικής αποσύνθεσης, επομένως ο αριθμός οκτανίου του ελαίου πυρόλυσης είναι τυπικά υψηλός.
- ▶ Γενικά στις ίδιες συνθήκες μεγαλύτερη διάσπαση παρουσιάζεται στο PP ακολουθούμενο από το LDPE και τέλος το HDPE.
- ▶ Γενικά, η θερμική διάσπαση των πολυολεφινών διευκολύνεται από υλικά με μικρότερη κρυσταλλικότητα ή μεγαλύτερο βαθμό διακλάδωσης.

Ένα καλό παράδειγμα ανακύκλωσης

πλαστικών. Ανακύκλωση Plexiglas®

(πολυ(μεθακρυλικού μεθυλεστέρα), PMMA

European Union's Horizon 2020 research and innovation program



Απορρίμματα

Υλικά διακόσμησης Δομικά Υλικά



Επιπλα



Οθόνες



Διαφημίσεις

Πινακίδες



Φανάρια αυτοκινήτων



Χημική Ανακύκλωση
Με Πυρόλυση

Μονομερές



Περιβαλλοντικό όφελος



www.mmatwo.eu

Calculator

Calculate the **environmental impacts** of MMAtwo technology and value chain to **recycle Plexiglass (PMMA)** and the environmental benefits compared to other technologies.

[Learn more about the study](#)

Quantity (between 1 and 1'000'000 kg)

1000

kg

753

kg

PMMA scraps to recycle

r-MMA to purchase

r-MMA purity

99,8%



Market/Region

Europe

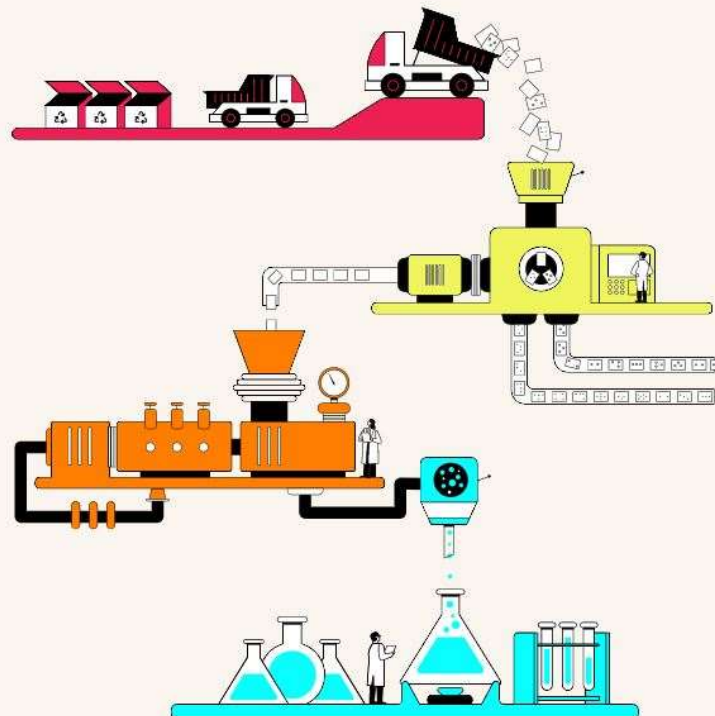
Asia

Quality of scraps

80/20 mix grade (EU baseline mix: 80% Cast & 20% Extrusion)



Climate change



Environmental impacts comparison

MMAtwo

Virgin C4

purity of r-MMA

99.8%

99.9%

climate change

0.66
kg CO₂-eq

4.48
kg CO₂-eq

water use

0.05
m³ depriv.

19.6
m³ depriv.

resource use, fossil

4.43
MJ

81.2
MJ

Environmental benefits of MMAtwo vs. Virgin C4



-86%
climate change



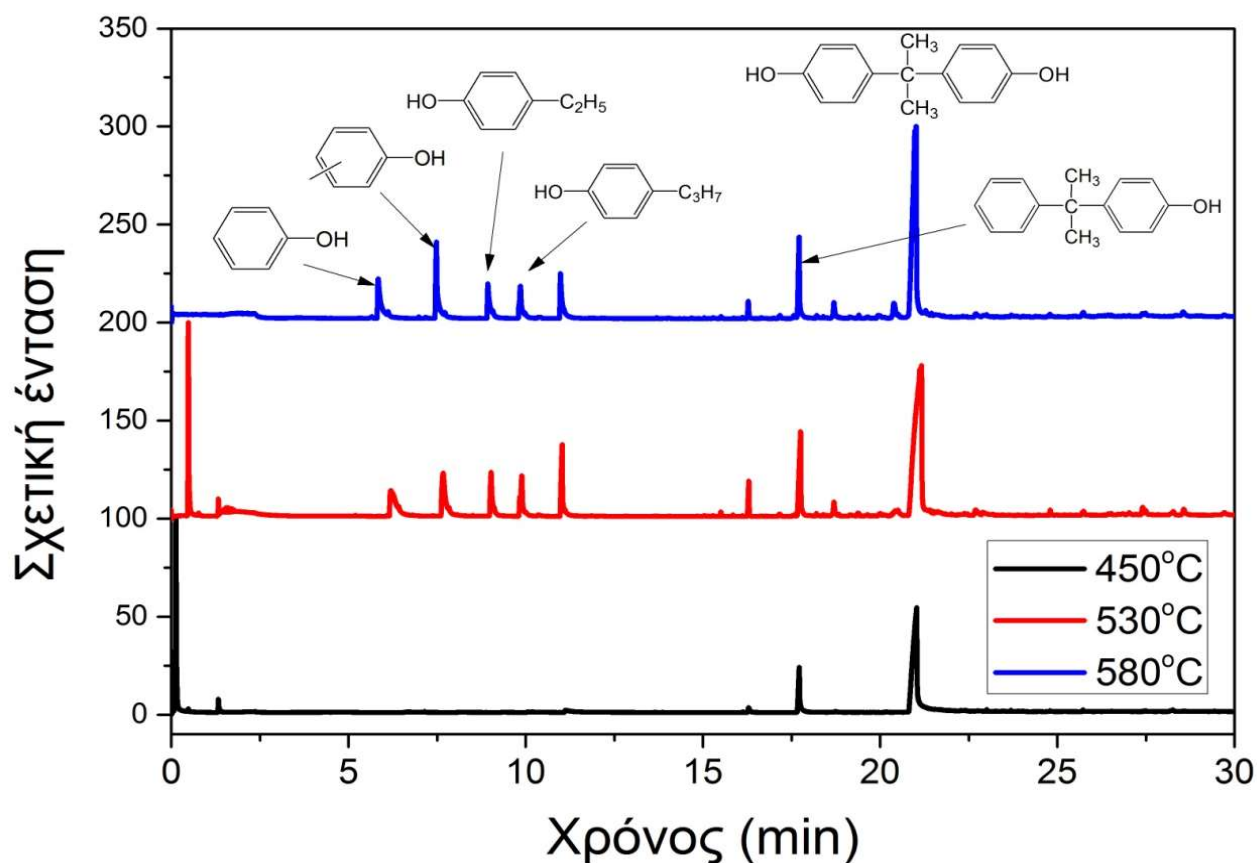
-100%
water use



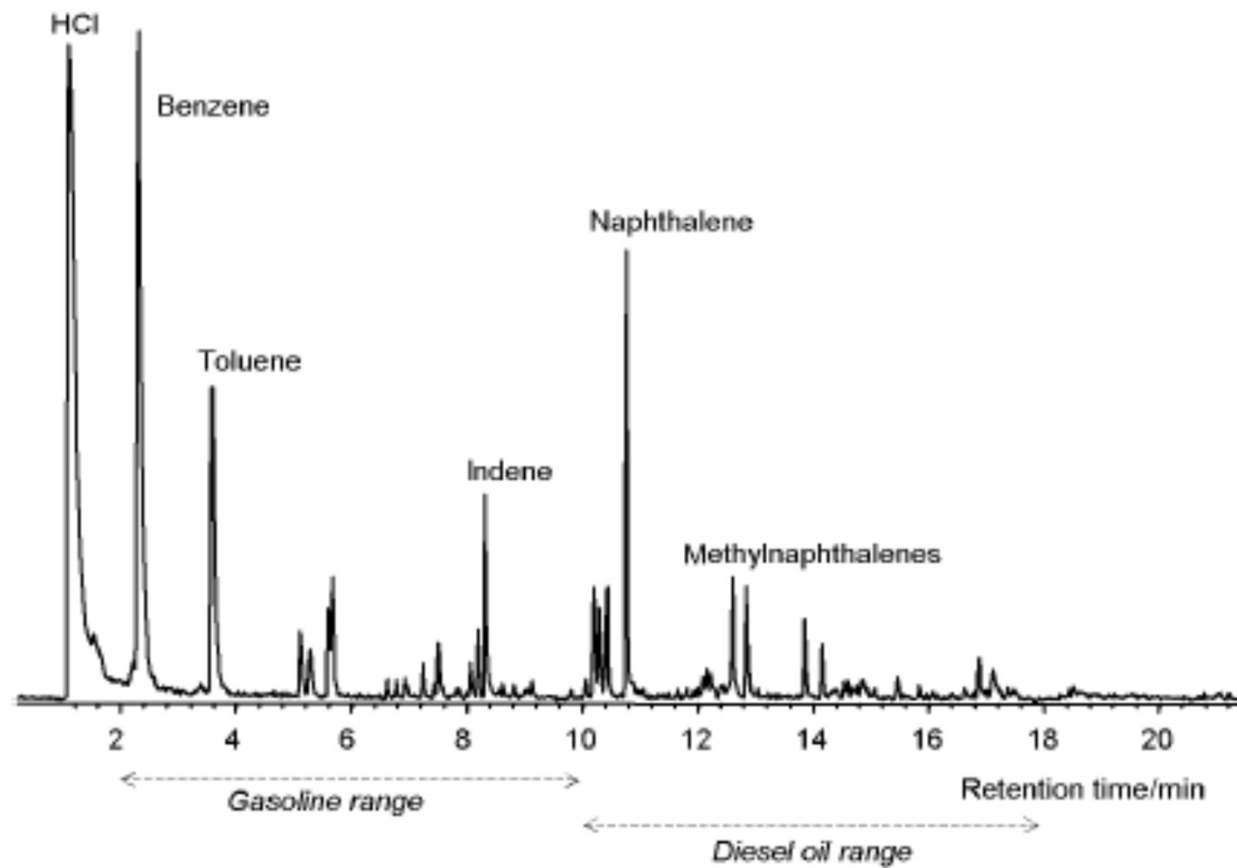
-95%
resource use, fossil

Πυρόλυση με στόχο την παραγωγή δευτερογενών πολύτιμων προϊόντων

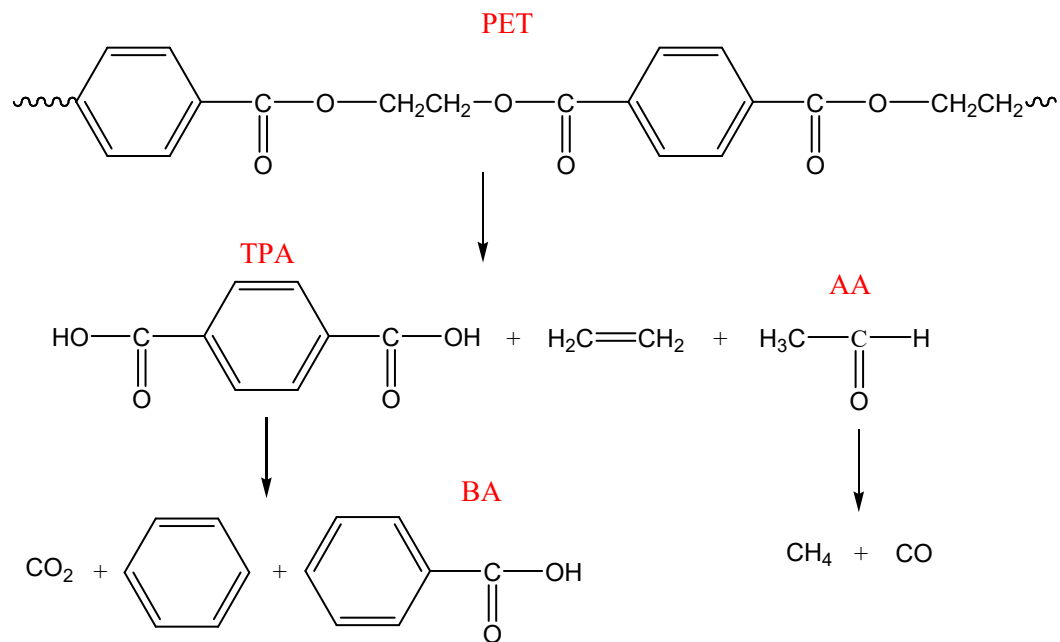
Πυρόλυση του πολυ(ανθρακικού εστέρα), πολυκαρβονικού, PC



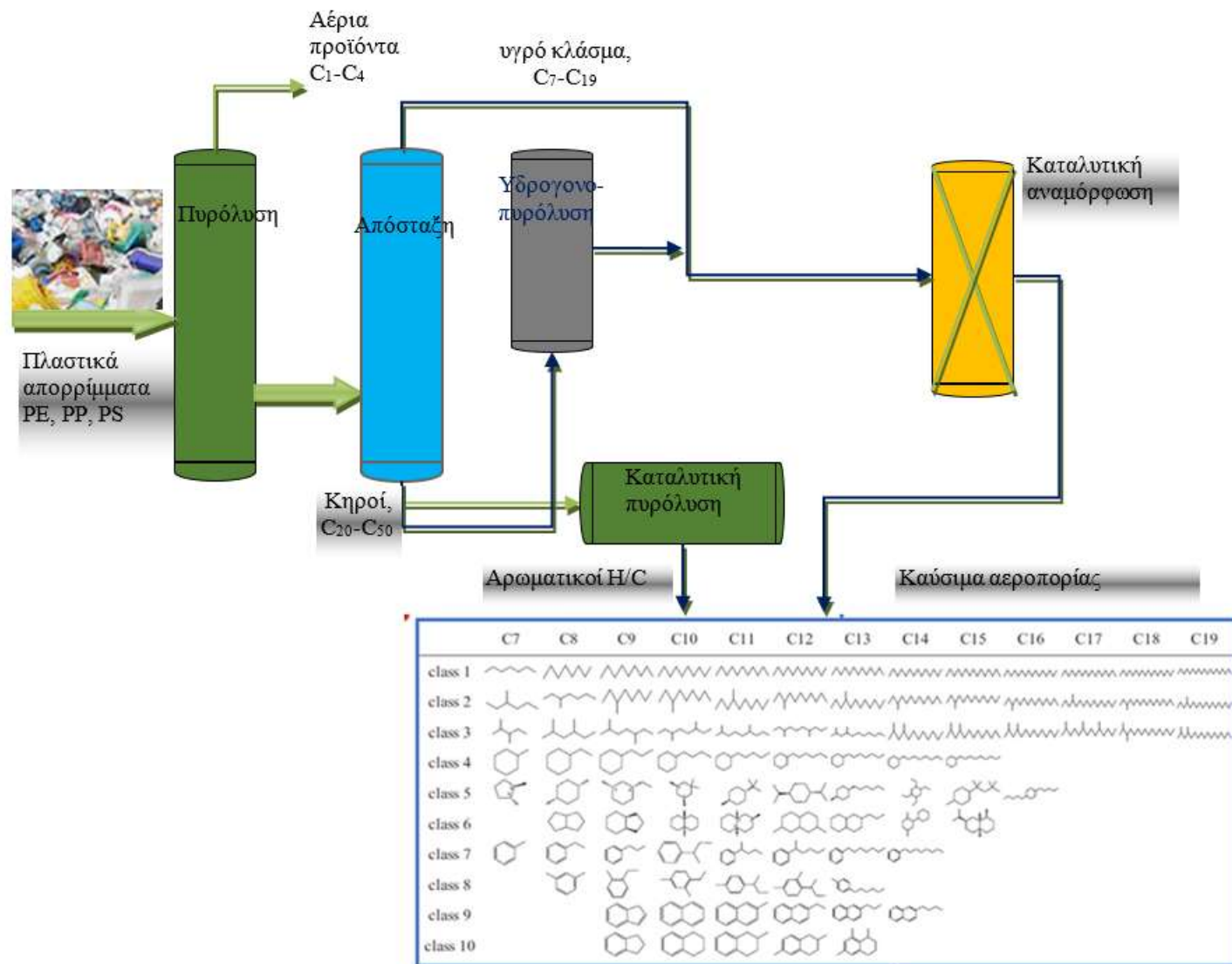
Προϊόντα πυρόλυσης PVC



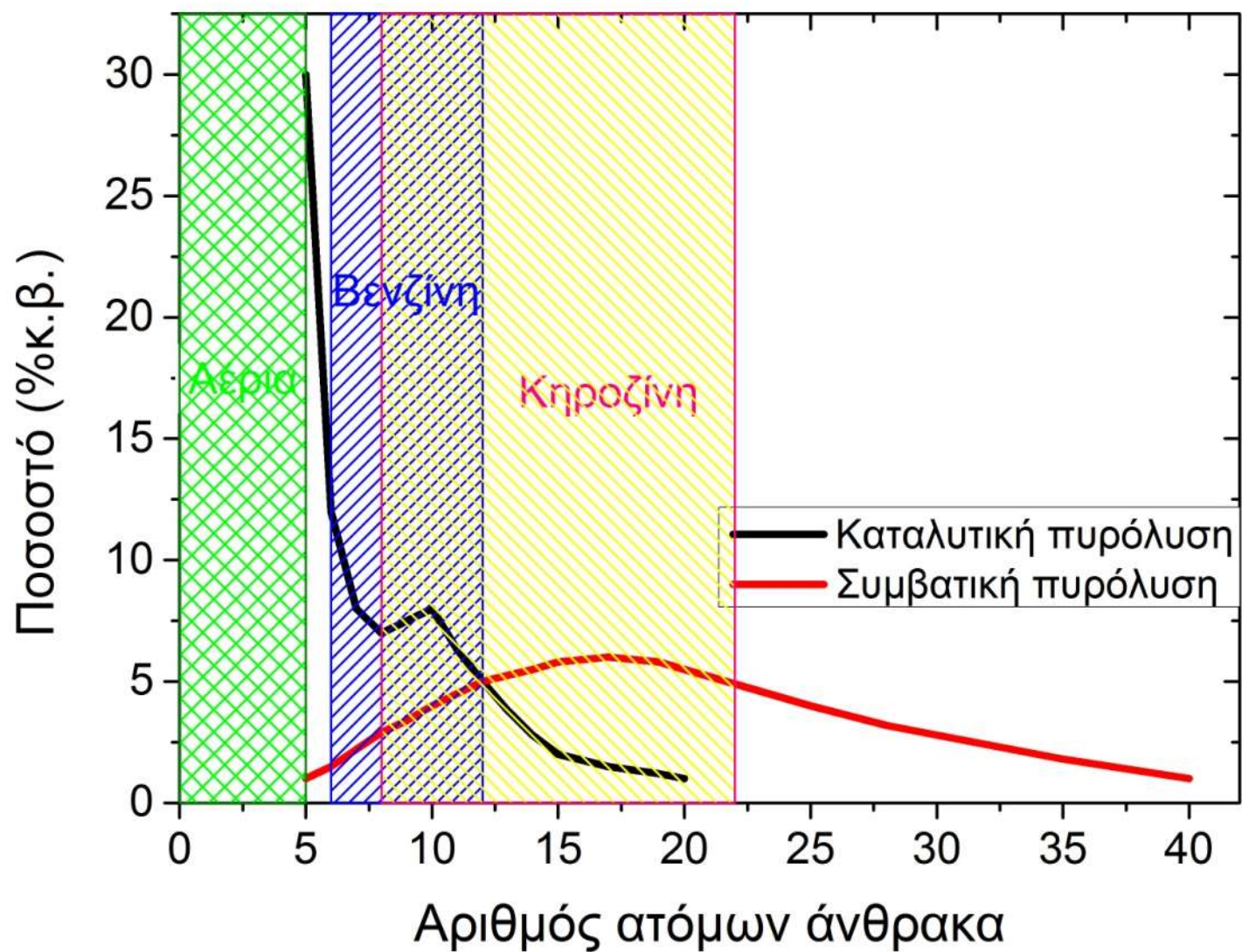
Προϊόντα πυρόλυσης του PET



Παραγωγή καυσίμων αεροπορίας από την
 πυρόλυση πλαστικών απορριμμάτων PE, PP και PS
 (προσαρμογή από Dogu et al., 2021).



Καταλυτική ή συμβατική πυρόλυση



Συστήματα καταλυτών

- ▶ Ομογενείς καταλύτες
 - ▶ κλασικά οξέα κατά Lewis όπως το AlCl_3 ,
 - ▶ τήγματα τετραχλωροαργιλικών μετάλλων και
 - ▶ πιο πρόσφατα, τα νέα καταλυτικά συστήματα που βασίζονται σε οργανικά ιοντικά υγρά.
- ▶ Ετερογενείς καταλύτες
 - ▶ Συμβατικά όξινα στερεά που χρησιμοποιούνται στην καταλυτική πυρόλυση υδρογονανθράκων: ζεόλιθοι, πυρίτιο-αλουμίνα, αλουμίνες, φρέσκοι και χρησιμοποιημένοι καταλύτες FCC.
 - ▶ μεσοδομημένοι καταλύτες: MCM-41, FSM-16, Al-SBA-15;
 - ▶ πηλοί αλουμινίου
 - ▶ νανοκρυσταλλικοί ζεόλιθοι (n-HZSM-5);
 - ▶ υπερόξινα στερεά ($\text{ZrO}_2/\text{SO}_4^{2-}$);
 - ▶ γαλλοπυριτικά άλατα;
 - ▶ μέταλλα σε υπόστρωμα άνθρακα.
 - ▶ βασικά οξειδία (BaO , K_2O , κ.λπ.), κυρίως για πυρόλυση πολυστυρενίου.

Πυρόλυση - Μηχανική ανακύκλωση

- ▶ Με ανάλυση κύκλου ζωής, LCA συγκρίνοντας την πυρόλυση με τη μηχανική ανακύκλωση και την ανάκτηση ενέργειας βρέθηκε ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις εμφανίζονται υψηλότερες στην πυρόλυση λόγω της μεγαλύτερης ενεργειακής κατανάλωσης. Ωστόσο, η πυρόλυση έχει το πλεονέκτημα της αύξησης στην αποτελεσματικότερη μετατροπή του άνθρακα [Jeswani et al., 2021].
- ▶ Η περιβαλλοντική επίδραση εξαρτάται όμως σημαντικά από την ποιότητα και τη σύσταση των πλαστικών απορριμμάτων. Για αυτό και προτείνεται ότι η πυρόλυση θα μπορούσε να εφαρμοσθεί όχι ανταγωνιστικά αλλά συμπληρωματικά με κάποια τεχνική μηχανικής ανακύκλωσης.
- ▶ Επίσης, βρέθηκε ότι για να είναι αποτελεσματική μια τεχνική θα πρέπει να συνοδεύεται από κατάλληλη προ-κατεργασία της πρώτης ύλης.
- ▶ Για παράδειγμα η μηχανική ανακύκλωση απαιτεί σίγουρα διαλογή και απομάκρυνση προσθέτων, ενώ η εξαερίωση την απομάκρυνση πλαστικών όπως το PVC, PET και το PS [Schwarz et al., 2021]

Επίλογος



Σύγχρονες προκλήσεις στην πυρόλυση πλαστικών

- ▶ Χρήση συγκεκριμένων καταλυτών για την παραγωγή στοχευμένων προϊόντων.
- ▶ Χρήση πλαστικών έπειτα από διαλογή για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων προσμίξεων και την παραγωγή συγκεκριμένων χημικών προϊόντων.
- ▶ Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε παρόμοιες τάξεις πολυμερών, π.χ. στυρενικά (PS, HIPS, ABS) ή πολυолеφίνες (LDPE, HDPE, PP).
- ▶ Απομάκρυνση ετερο-ατόμων (π.χ. Cl από PVC, Br από επιβραδυντές φλόγας, BFRs, N από τα πολυαμίδια) πριν την πυρόλυση.
- ▶ Χρήση λιγότερο ενεργοβόρων διεργασιών παροχής ενέργειας όπως η μικροκυματική ακτινοβολία.

Σύγχρονες προκλήσεις στην ανακύκλωση πλαστικών

- ▶ Ανακύκλωση μιγμάτων διαφορετικών πολυμερών/συμπολυμερών, μιγμάτων συμβατικών και βιοπροερχόμενων πολυμερών
- ▶ Ανακύκλωση πολυστρωματικής συσκευασίας(film)
- ▶ Απομάκρυνση δυνητικά επικίνδυνων προσθέτων πριν την ανακύκλωση με προκατεργασία (π.χ. Βρωμιούχες ενώσεις σε WEEE)
- ▶ Απομάκρυνση μελανιού, οσμών, κλπ.
- ▶ Απομάκρυνση υπολειμμάτων καταλυτών
- ▶ Χρήση περιβαλλοντικά φιλικών διεργασιών (ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας και μη-τοξικών διαλυτών).
- ▶ Επιδείξεις πιλοτικής κλίμακας για την επιβεβαίωση της τεχνολογικής και οικονομικής σκοπιμότητας

Λύσεις για τις προκλήσεις της ανακύκλωσης πλαστικών για την παραγωγή βιοκαυσίμων

1. **Βελτιωμένη/ικανοποιητική Τεχνολογία Διαλογής** - Η Τεχνητή Νοημοσύνη και τα ρομποτικά συστήματα μπορούν να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα της διαλογής.
2. Βελτίωση της ποιότητας της τροφοδοσίας πλαστικών απορριμμάτων μέσω ικανοποιητικών τεχνικών **προκατεργασίας και απομάκρυνσης επικίνδυνων προσθέτων/επιμολυντών**.
3. Ανάπτυξη Προηγμένων Μεθόδων Ανακύκλωσης - **Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, χρήση ειδικών καταλυτών**.
4. Σύνθεση ανακυκλώσιμων πολυμερών- Ανάπτυξη μεθόδων παραγωγής πολυμερών **με ενσωματωμένο μηχανισμό ενεργοποίησης κατά την ανακύκλωση του**.
5. Κυβερνητικές Πολιτικές και Κίνητρα - Κατάλληλη **Νομοθεσία**, Αυστηρότεροι κανονισμοί, εκτεταμένη ευθύνη του παραγωγού και οικονομικά κίνητρα μπορούν να προωθήσουν την ανακύκλωση.
6. **Εκπαίδευση και Συμμετοχή των Καταναλωτών** - Η ευαισθητοποίηση σχετικά με τον σωστό διαχωρισμό των αποβλήτων μπορεί να μειώσει τη μόλυνση και να βελτιώσει τα ποσοστά ανακύκλωσης.



Ευχαριστώ τους διοργανωτές
του Συνεδρίου και ιδιαίτερα τον
Δρ. Άγγελο Λάππα για την
τιμητική Πρόσκληση και όλους
εσάς για την προσοχή σας



*Thank
you*



Early publications Polymer recycling

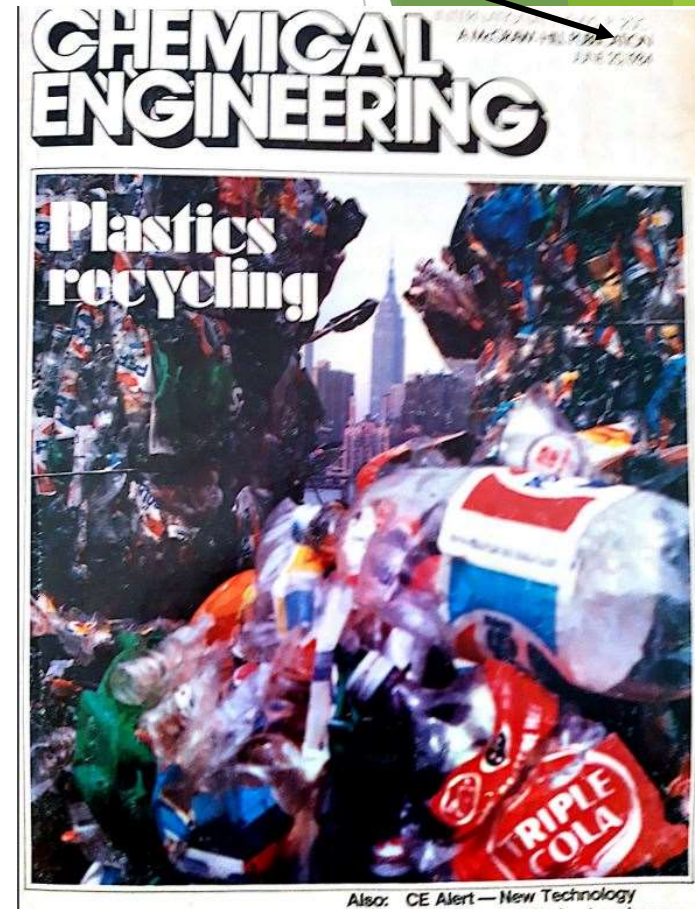
June 25, 1984

Paul, D.R., Vinson, C.E., Locke, C.E. The potential for reuse of plastics recovered from solid wastes (1972) Polymer Engineering & Science, 12 (3), pp. 157-166.

Mack, W.A. RECYCLING PLASTICS: THE PROBLEMS AND POTENTIAL SOLUTIONS. (1972) ASTM Special Technical Publication, (STP 533), pp. 3-16.

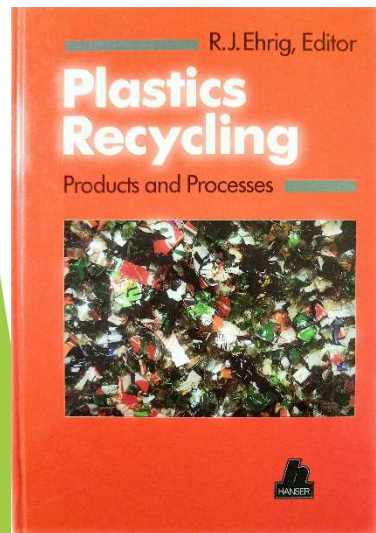
Seymour, Raymond B. Polymer Wastes - Plastics Disposal or Recycling. (1974) Plastvarlden, (6), .

Zoller, P. Principles of thermoplastic wastes recycling (1974) KUNSTSTOFFE PLAST., 21 (10), pp. 23-26.

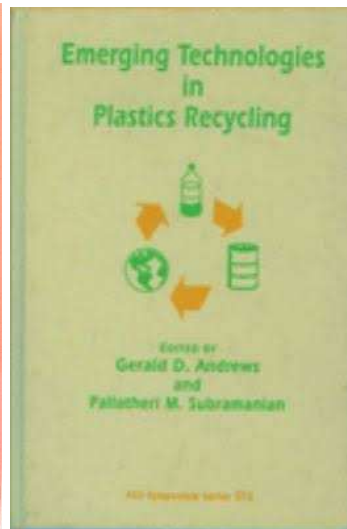


Mainly recycling of PET

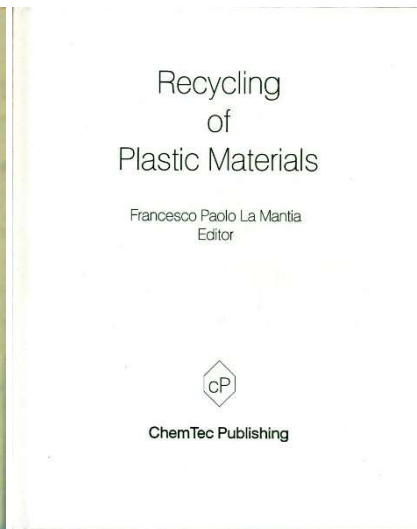
Early books in Polymer/Plastic Recycling



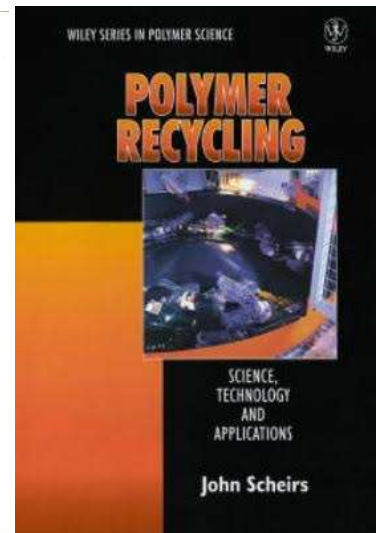
1992



1992



1993



1998



1999

New terms

Commonly, recycled materials are thought to be materials with poor properties (physical, aesthetic, and ... smelling) with respect to those of the virgin materials:

recycling = downcycling.

Of course, we are referring to mechanical recycling, i.e. the one that allows reusing the material directly in application similar to those of virgin polymers

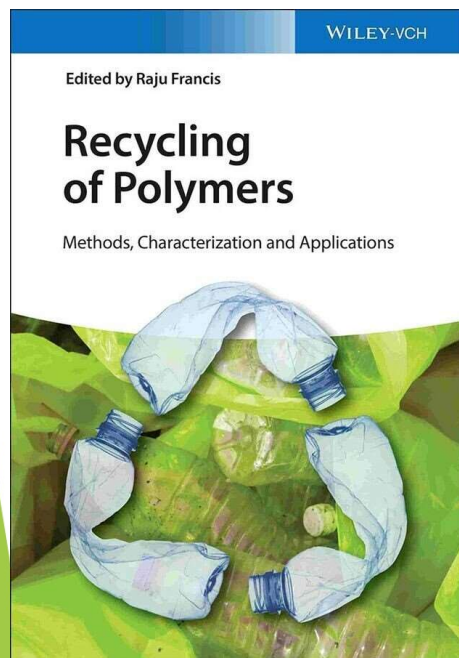
If the properties of post-consumer plastics are preserved or even improved:

recycling = upcycling.

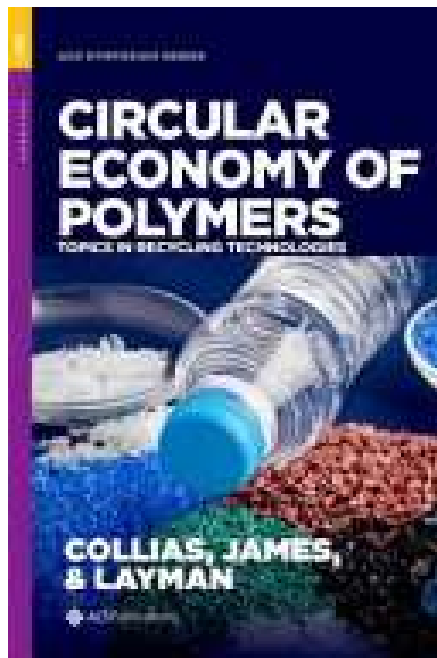
La Mantia, F.P. Polymer mechanical recycling: Downcycling or upcycling? (2004) Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology, 20 (1), pp. 11-24. Cited 28 times.



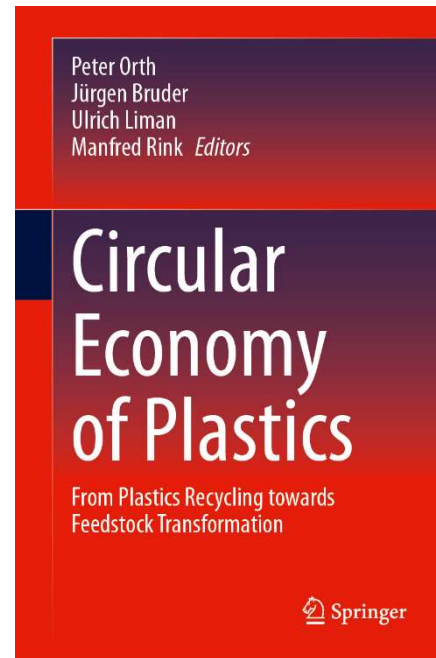
Πρόσφατα βιβλία σε ανακύκλωση πλαστικών



2016



2022



2025



2023

Βιολογική ανακύκλωση

- ▶ Τα τελευταία χρόνια, η βιολογική ανακύκλωση έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στο πλαίσιο της τριτογενούς ανακύκλωσης.
- ▶ Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιεί μικροοργανισμούς και ένζυμα για την αποσύνθεση των πλαστικών σε μονομερή και άλλα πολύτιμα συστατικά.
- ▶ Διάφοροι μικροοργανισμοί έχουν επιδείξει την ικανότητα να αποικοδομούν τα πλαστικά, συμπεριλαμβανομένων βακτηρίων, όπως το *Ideonella sakaiensis* για την αποικοδόμηση του PET, ή μυκήτων όπως το *Pleurotus ostreatus* για την αποικοδόμηση του πολυαιθυλενίου.
- ▶ Αρκετά ένζυμα έχουν επίσης αναγνωριστεί ως κρίσιμα για την αποικοδόμηση των πλαστικών, συμπεριλαμβανομένων των PETασών που ανακαλύφθηκαν στο *Ideonella sakaiensis*, οι οποίες είναι ικανές να αποικοδομούν το PET στα μονομερή του ή των λακκασών και των υπεροξειδασών που παράγονται από μύκητες και βοηθούν στην αποικοδόμηση του PE και του PS.
- ▶ Τα πλεονεκτήματα της βιολογικής ανακύκλωσης πλαστικών περιλαμβάνουν την οικολογική φιλικότητα και τη βιωσιμότητα (δεν απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες ή τοξικές χημικές ουσίες), την ικανότητα επεξεργασίας μικτών και μολυσμένων πλαστικών και την αναβάθμιση κατά την ανακύκλωση.
- ▶ Ωστόσο, αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις, όπως οι αργοί ρυθμοί αποικοδόμησης (π.χ. για PE και PP), η ανάγκη βελτιστοποίησης των ενζύμων και η απαίτηση συγκεκριμένων περιβαλλοντικών συνθηκών/παραγόντων όπως η θερμοκρασία, το pH, η διαθεσιμότητα οξυγόνου και η σύσταση των πλαστικών.