



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

ΜΠ 438

Επεξεργασία και Διαχείριση Τοξικών και Επικινδύνων Αποβλήτων

Επ. Καθηγητής Απόστολος Γιαννής

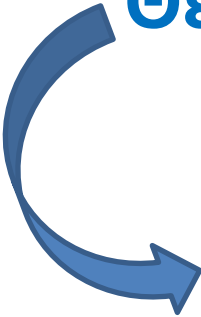
E-mail: agiannis@chenveng.tuc.gr

Κεφάλαιο 4

Θερμικές Μέθοδοι Επεξεργασίας Επικινδύνων Αποβλήτων

Ορισμοί

Θερμική επεξεργασία

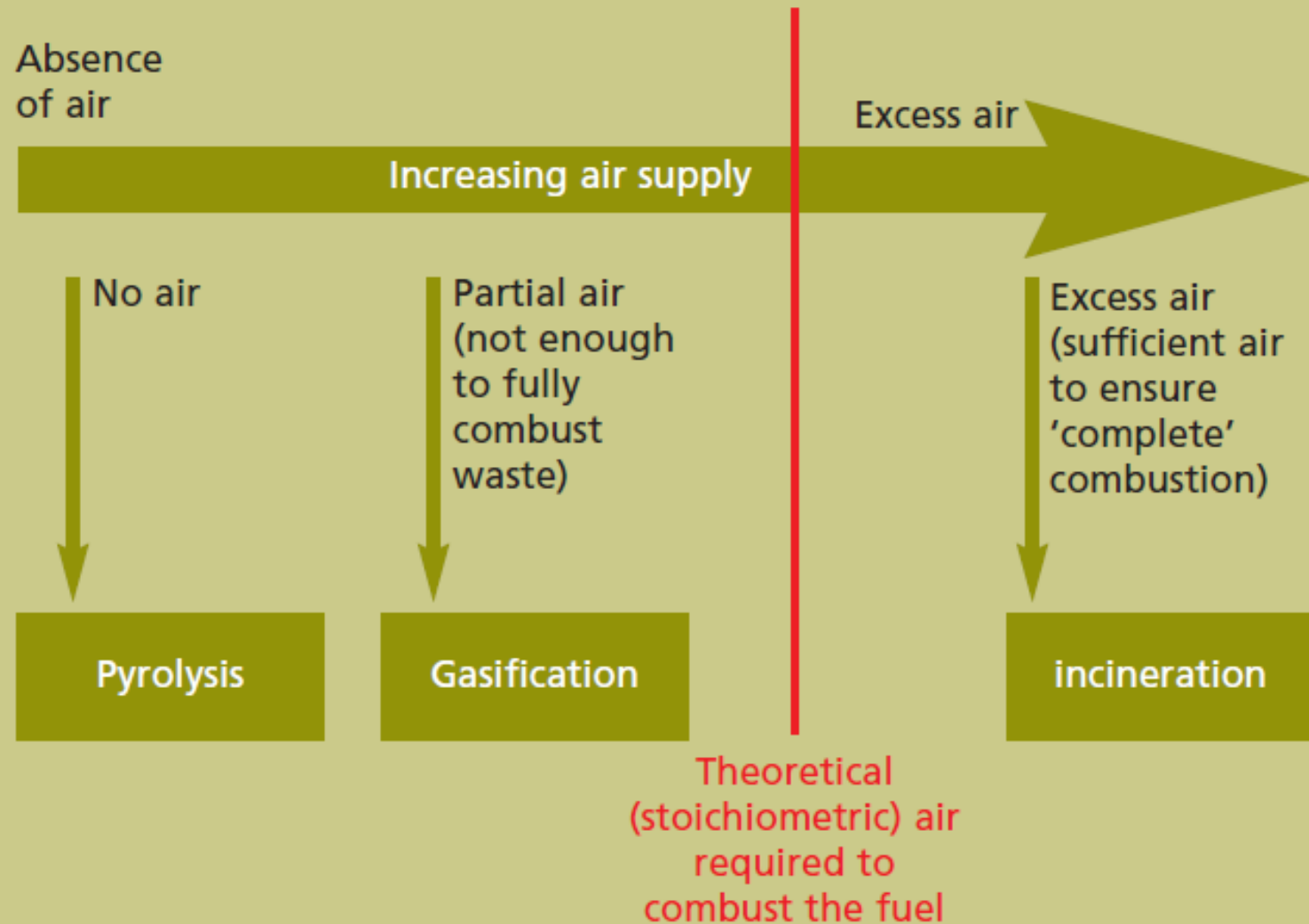


καταστροφή των επικινδύνων αποβλήτων με
θερμική αποδόμηση

Οι μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας περιλαμβάνουν:

- **Αποτέφρωση** – πλήρης καύση παρουσία περίσσειας οξυγόνου
- **Αεριοποίηση** – ατελής καύση με έλλειψη επάρκειας οξυγόνου
- **Πυρόλυση** – θερμική αποδόμηση υπό συνθήκες πλήρους έλλειψης οξυγόνου

Ποσότητα αέρα (οξυγόνου)



Εφαρμογή θερμικής επεξεργασίας ΕΑ

- Κατάλληλη για οργανικές ουσίες
- Δεν ενδείκνυται για επεξεργασία ΕΑ με υψηλή περιεκτικότητα σε τοξικά μέταλλα και αλογόνα (π.χ. αρσενικό, υδράργυρο, φθόριο, βρώμιο, μόλυβδο, κα.)
- Εγκαταστάσεις θερμικής επεξεργασίας:
 - Απαιτούν υψηλό κόστος εγκατάστασης
 - Το προσωπικό οφείλει να είναι ιδιαίτερα εξειδικευμένο και εκπαιδευμένο
 - Υψηλότατο επίπεδο τεχνικών προδιαγραφών (λειτουργίας και κανόνων ασφάλειας)
 - Μέτριο με υψηλό κόστος λειτουργίας

Επιλογή μεθόδου θερμικής επεξεργασίας ΕΑ

Πρέπει να αξιολογηθούν οι παρακάτω παράμετροι:

- Η ποσότητα και η ομοιογένεια των αποβλήτων
- Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά τους (π.χ. μέγεθος σωματιδίων, υγρασία, ειδικό βάρος και επιφάνεια, ιξώδες, σημείο ανάφλεξης, θερμογόνο δύναμη, περιεκτικότητα σε πτητικά, ποιοτική σύσταση, κλπ.)
- Οι δυνατότητες και ιδιαιτερότητες ως προς την τροφοδοσία και ανάμειξή τους σε ένα σύστημα θερμικής επεξεργασίας
- Τα μέτρα πρόληψης και ελέγχου των παραγόμενων ατμαερίων

Αποτέφρωση των ΕΑ

- 3 Ts κανόνες:
 - Time (Χρόνος – επαρκής για πλήρη καύση/ αδρανοποίηση – μερικά δευτερόλεπτα έως ώρες)
 - Temperature (Θερμοκρασία – τουλάχιστον 850 °C)
 - Turbulence (Ανάμιξη ΕΑ και αέρα / οξυγόνου)
- Διαφορετικοί τύποι αποβλήτων έχουν διαφορετική θερμογόνο δύναμη

Παραδείγματα θερμογόνου δύναμης

Απόβλητα από επιχειρήσεις καθαρισμού	10 – 30 MJ/kg
Βιομηχανική λάσπη	1 – 10 MJ/kg
Βαφές και βερνίκια	> 20 MJ/kg
Χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες	5 – 20 MJ/kg
Για σύγκριση, MSW	~ 10 MJ/kg

Waste	Heating value [MJ/kg]
Kerosene	44
Waste oil	14 - 42
Tar or Asphalt	36
Linoleum scrap	25.6
Wood waste	16.2
Coffee grounds	23.3
Animal fats	39.5
Hospital waste	15.0

Αποτέφρωση

○ Απαιτεί:

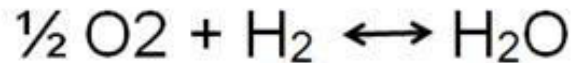
- Τροφοδοσία περίσσειας αέρα
- Μηχανική ανάδευση των αποβλήτων
- Ομοιόμορφη κατανομή και καλή ανάμιξη των αποβλήτων με αέρα
- Θερμοκρασία μεγαλύτερη των 850 °C
- Εάν τα απόβλητα περιέχουν χλώριο πάνω από 1%, τότε η θερμοκρασία πρέπει να είναι άνω των 1,100 °C (χρόνος παραμονής > 2 sec)

Αποτέφρωση

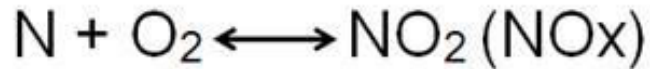
Combustion (Oxidation) Reactions



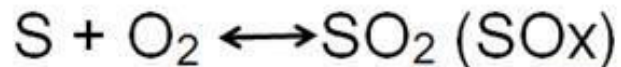
Oxidation of carbon



Oxidation of hydrogen

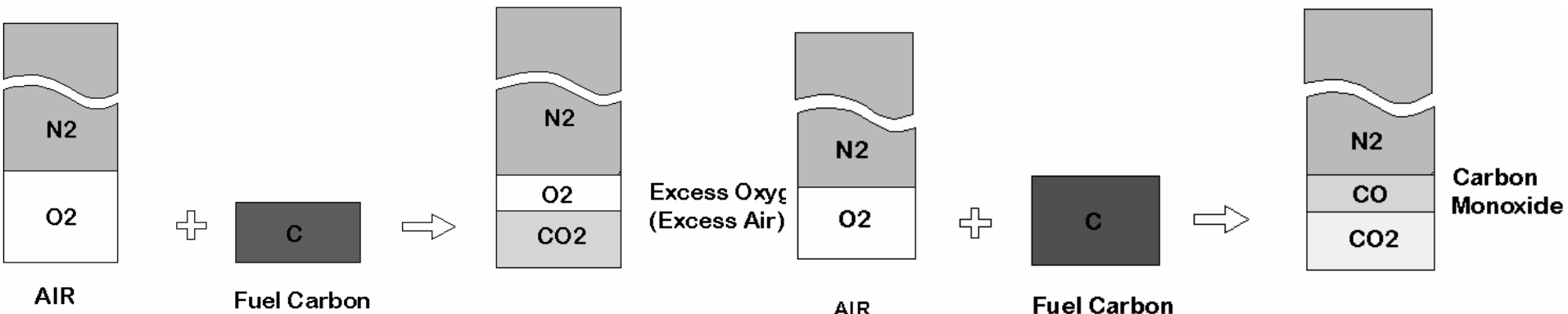
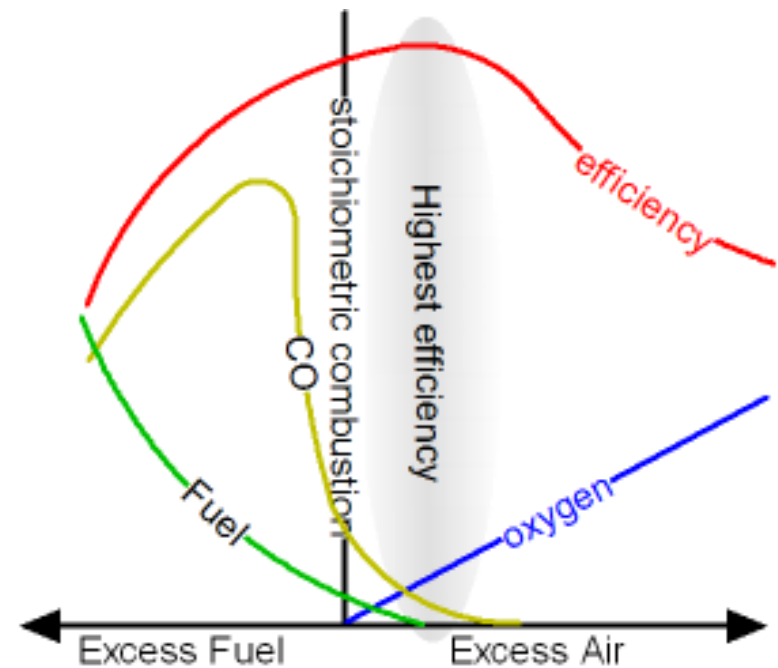
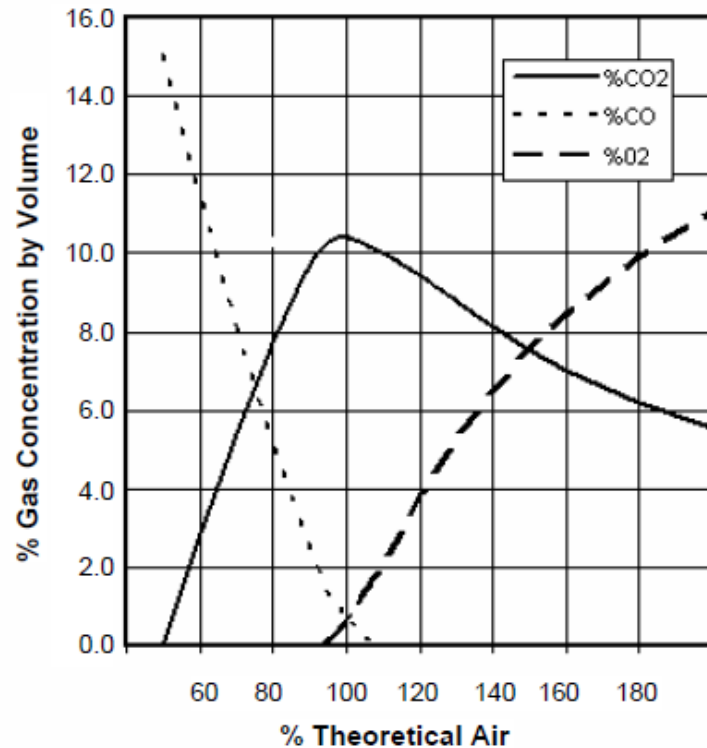


Oxidation of Nitrogen



Oxidation of Sulfur

Αποτέφρωση



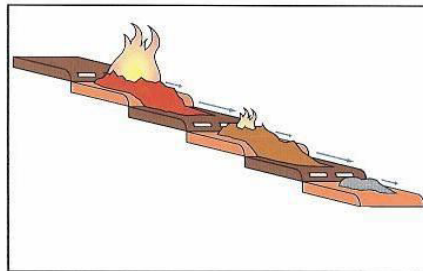
ΕΑ που περιέχουν θείο, αλογόνα, άζωτο και ανόργανα

- ✓ Αποτέφρωση ΕΑ αποβλήτων με θείο παράγουν SO_2
- ✓ Αποτέφρωση ΕΑ αποβλήτων που περιέχουν αλογόνα (Cl, F & Br) παράγουν όξινα αέρια (HCl , HF και HBr) μέσω αντιδράσεων αποτέφρωσης
- ✓ Οι αζωτούχες ενώσεις στο καύσιμο παρουσιάζουν μια περιπλοκότητα επειδή σχηματίζουν NO_x κατά την αποτέφρωση
- ✓ NO_2 δεν εμφανίζεται στα απαέρια σε θερμοκρασία πάνω από 1200°C
- ✓ NO είναι το κυρίαρχο NO_x στα απαέρια

Τεχνολογίες αποτέφρωσης

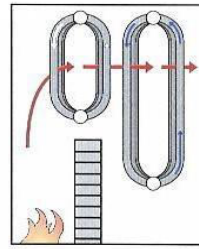
- Ρευστοποιημένη κλίνη (fluidized bed): τα απόβλητα τροφοδοτούνται σε ένα στρώμα άμμου που βρίσκεται σε αιώρηση
 - Χρησιμοποιείται για απόβλητα με παρόμοιο μέγεθος και πυκνότητα
- Κινούμενες εσχάρες (moving grates): τα απόβλητα τροφοδοτούνται πάνω σε εσχάρες οι οποίες ανακινούν το απόβλητο ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής αερισμός
 - Χρησιμοποιείται για στερεά απόβλητα π.χ. ΑΣΑ, όχι υγρά ή λάσπες
- Περιστρεφόμενος κλίβανος (rotary kiln): τα απόβλητα τοποθετούνται σε ένα αργά περιστρεφόμενο κύλινδρο
 - Κατάλληλο για στερεά, λάσπες και υγρά απόβλητα
 - Οι περιστρεφόμενοι κύλινδροι αποτελούν το 75% των μονάδων αποτέφρωσης για ΕΑ

Κινούμενες εσχάρες



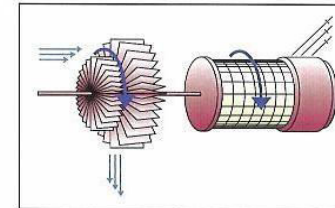
COMBUSTION GRATE

Inclined reciprocating grate systems move the burning waste at specific rates through the furnace, ensuring complete combustion and maximum energy recovery.



BOILER

Combustion gases from the burning waste move through a sophisticated refuse boiler designed to circulate purified water, extract the combustion heat, and convert it to superheated steam for electricity production.

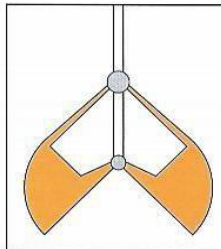


TURBINE-GENERATOR

High-speed precision turbine blades, driven by the high-pressure steam from the boiler, drive a generator to produce electricity. Water condensed after this process is recirculated to the boiler system.

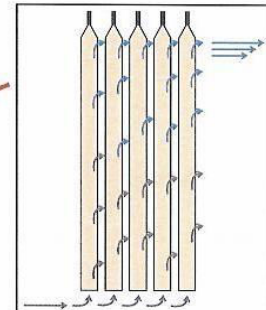
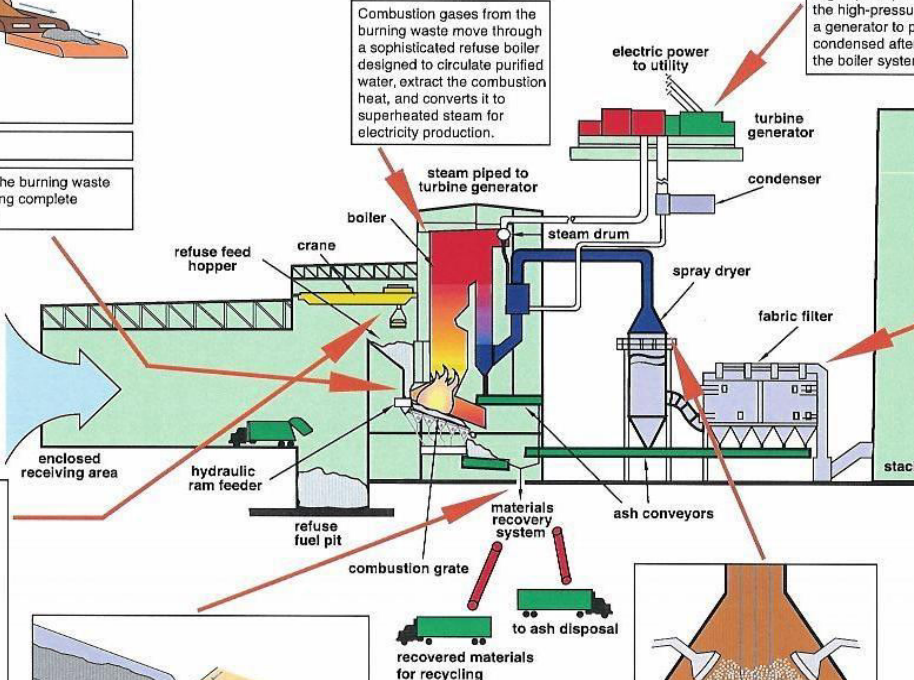
NEGATIVE AIR PRESURE

The plant's combustion air is drawn from the enclosed receiving area and refuse fuel pit, maintaining a negative air pressure that controls the release of dust and odors.



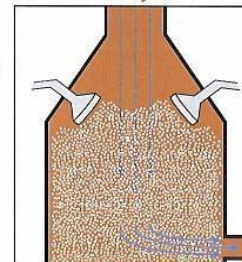
CRANE

Hydraulic refuse cranes mix and load the incoming waste, depositing it into hoppers that feed the plant combustion systems.



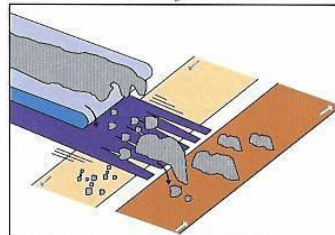
FABRIC FILTER (BAGHOUSE)

Hundreds of Teflon® fabric tubes filter more than 99.9% of the particulate material from the combustion flue gases. The filtered ash is recovered and safely disposed.



SPRAY DRYER (SCRUBBER)

A precise mixture of lime and water is sprayed into the combustion exhaust gases to remove acid gases, heavy metals, and trace organic emissions.



MATERIALS RECOVERY

The inert combustion ash residue is size and magnetically separated after combustion, enabling efficient metal recovery for recycling.

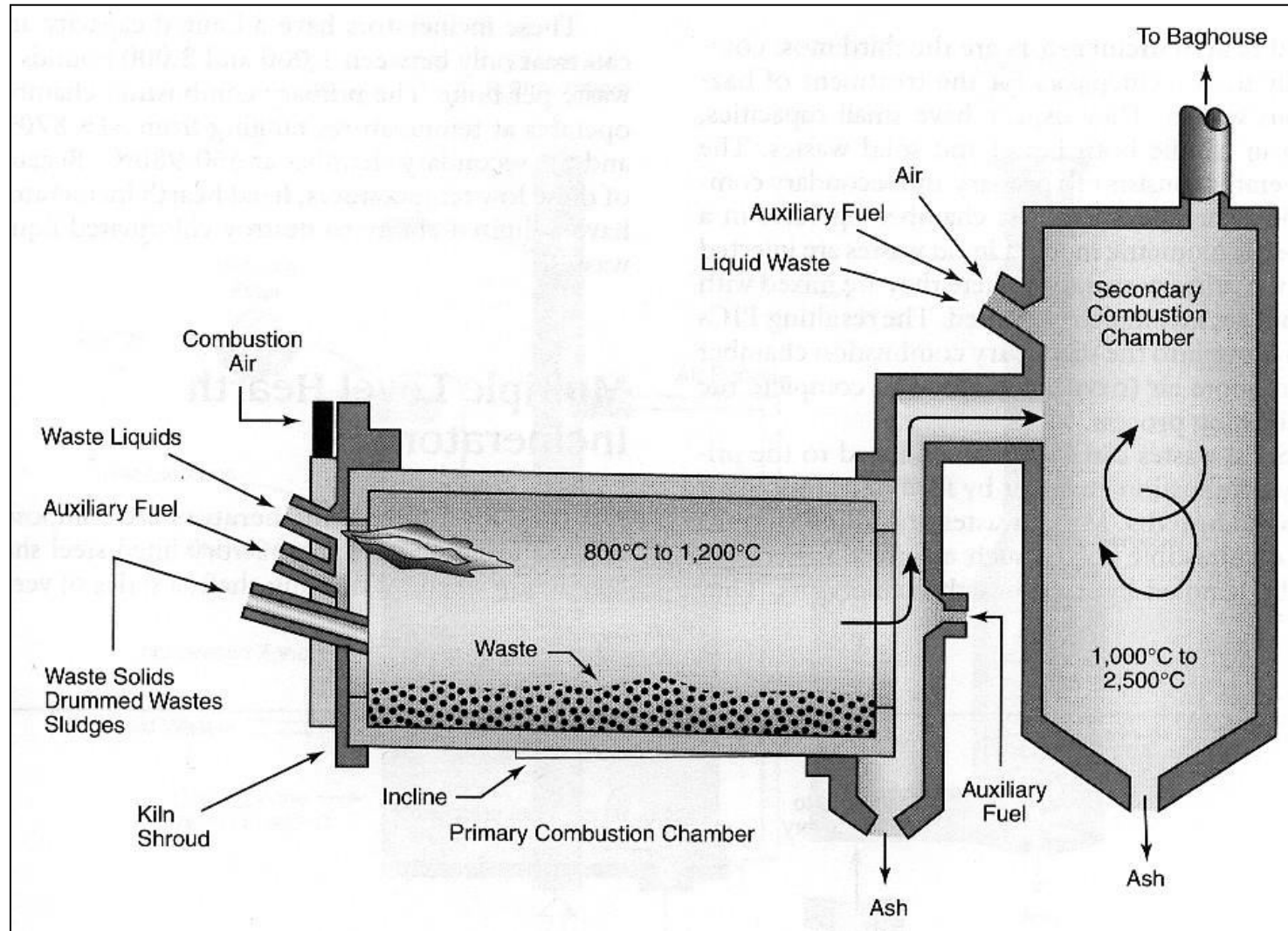
1 ton of municipal solid waste:
 * produces 625 kilowatt-hours of electricity,
 * is equivalent to 1.6 barrels (67 gallons of oil)



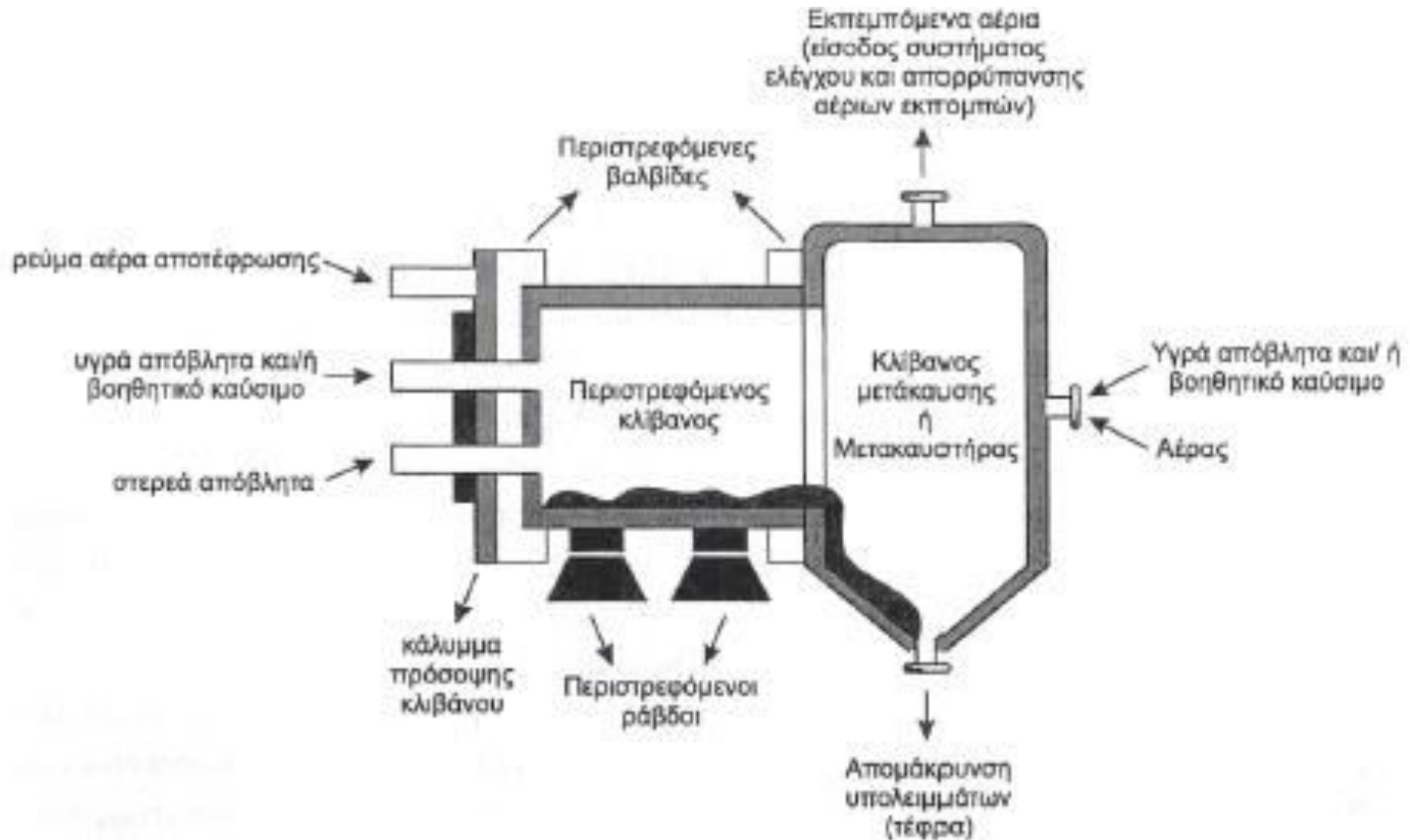
Wheelabrator Technologies Inc.

A Waste Management Company

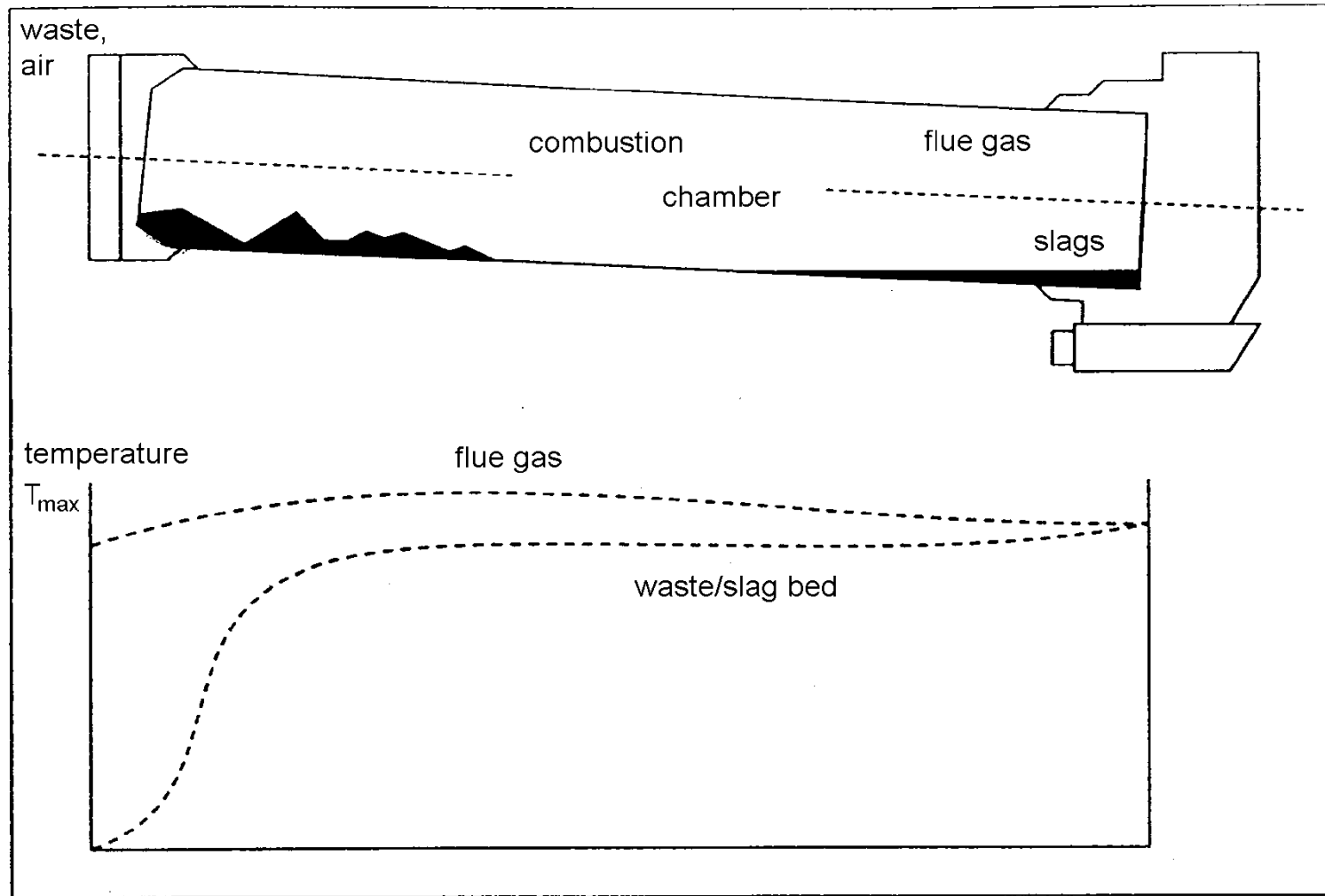
Περιστρεφόμενος κλίβανος



Περιστρεφόμενος κλίβανος



Θερμοκρασία περιστρεφόμενου κλίβανου

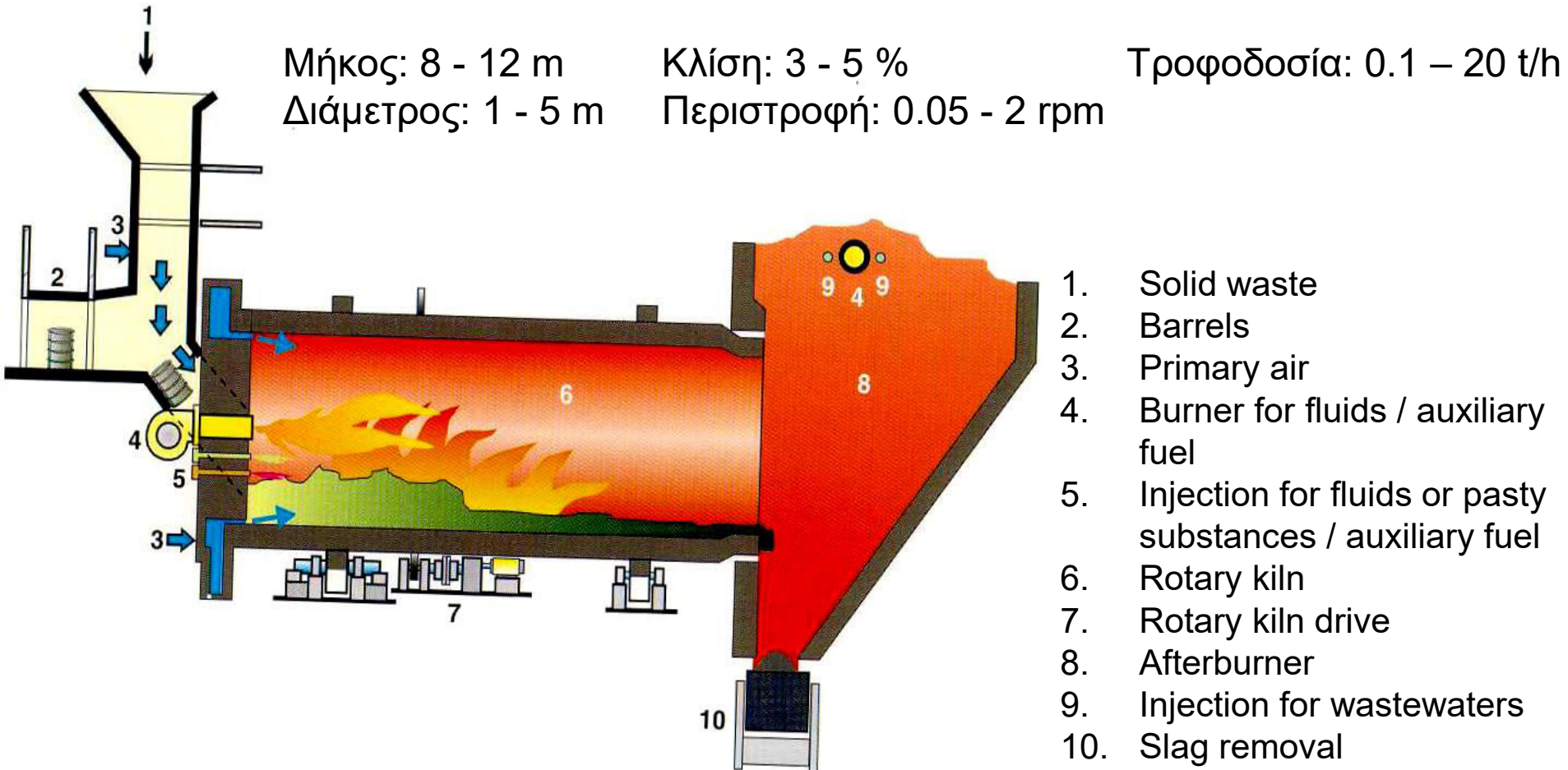


Δευτερογενής θάλαμος καύσης

Secondary combustion chamber (SCC)

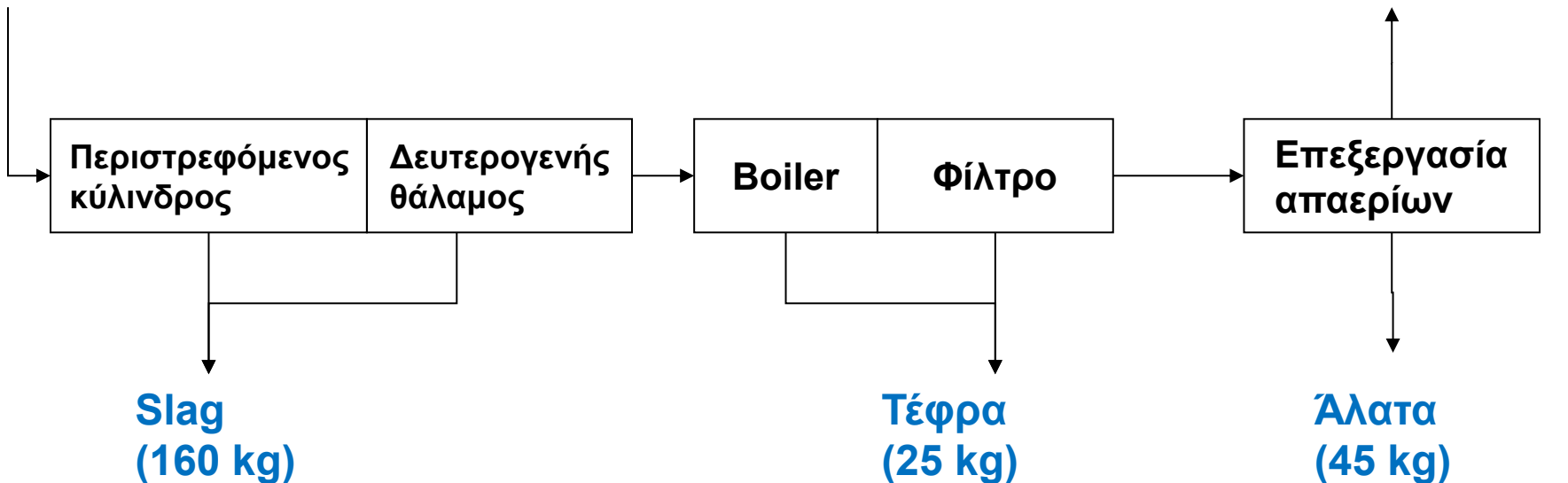
- ✓ Ο δευτερογενής θάλαμος καύσης είναι απαραίτητος, γιατί ο πρωτογενής θάλαμος δεν παρέχει αρκετό χρόνο, ανάμιξη ή θερμοκρασία για πλήρη αποδόμηση (καταστροφή) των οργανικών ουσιών των ΕΑ στα επιθυμητά επίπεδα
- ✓ Η κυριότερη λειτουργία του πρωτογενούς θαλάμου είναι η αεριοποίηση των οργανικών ουσιών των ΕΑ
- ✓ Ο σκοπός του δευτερογενούς θαλάμου είναι η θέρμανση των πτητικών οργανικών ενώσεων (αεριοποιημένων) σε θερμοκρασία που οξειδώνονται πλήρως
- ✓ Η διαδικασία οξείδωσης συμβαίνει σε θερμοκρασία μεταξύ 980-1200 °C

Περιστρεφόμενος κλίβανος (διάγραμμα)

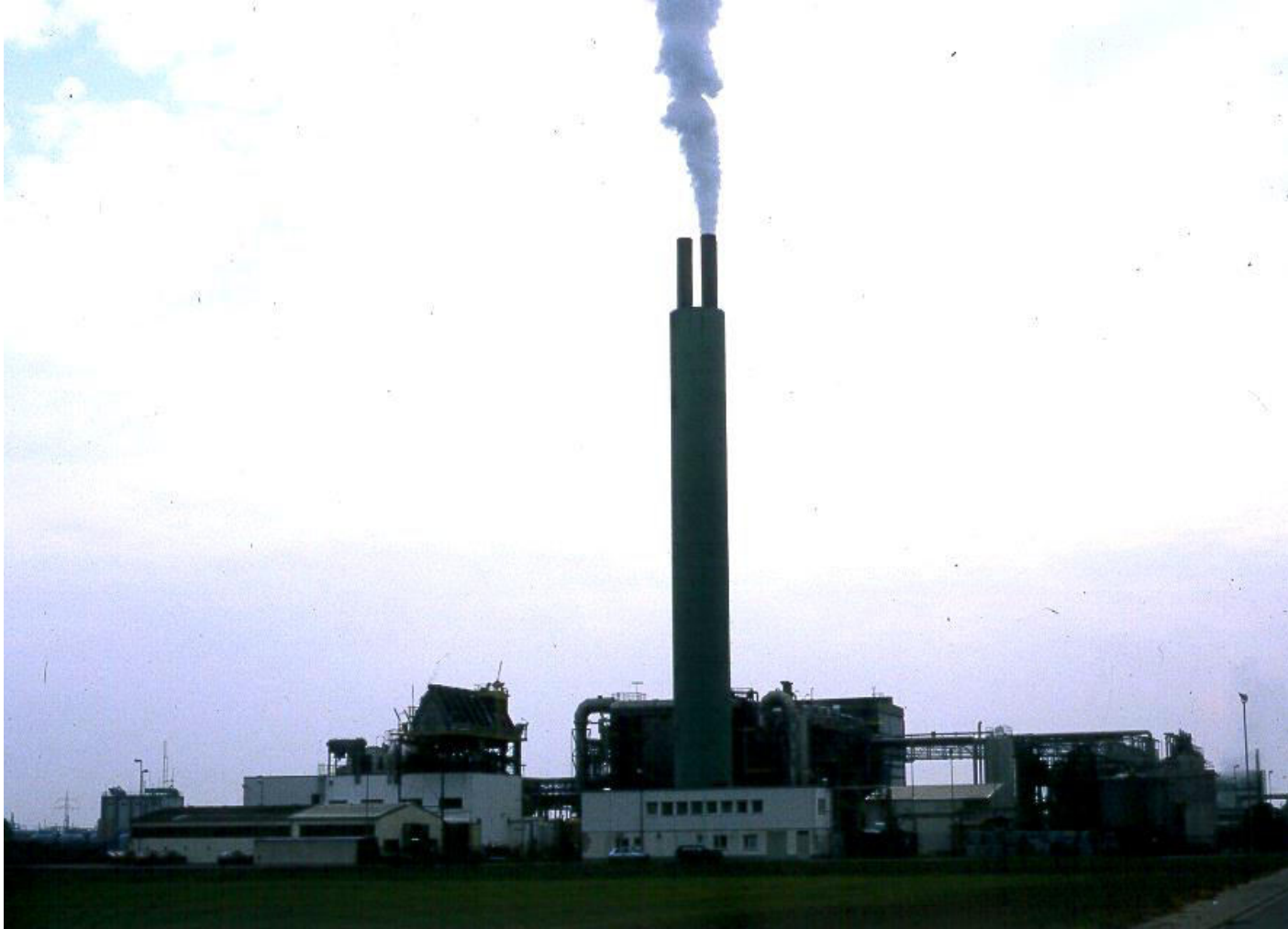


Ισοζύγιο μάζας για Μονάδα αποτέφρωσης ΕΑ

Επικίνδυνα
απόβλητα
(1000 kg)

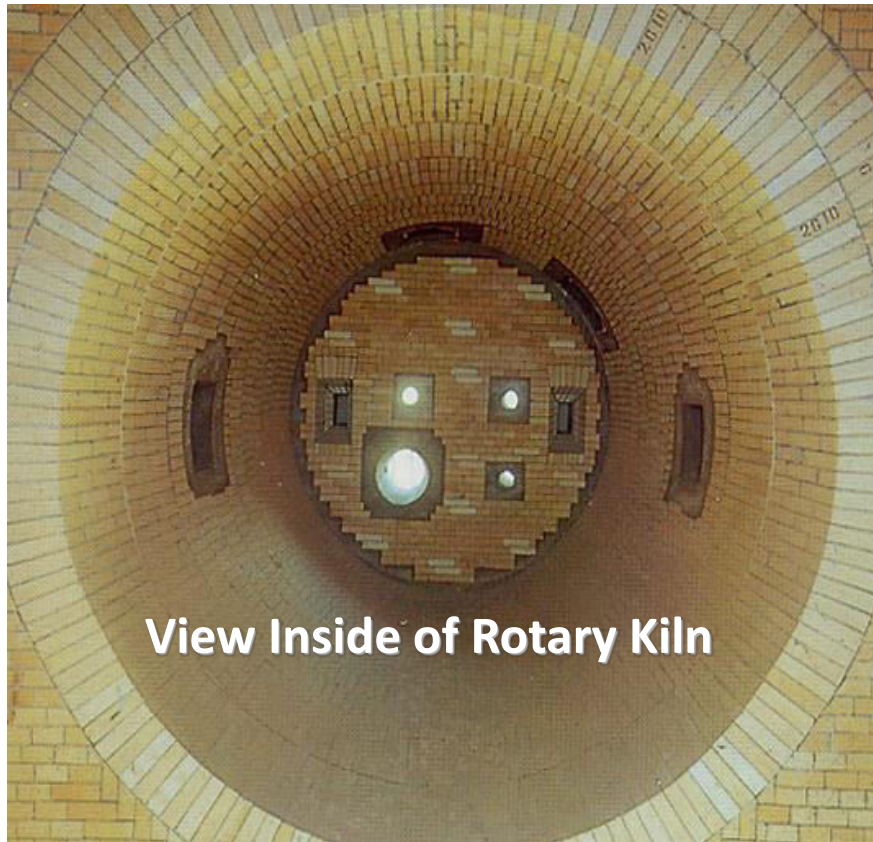


Μονάδα αποτέφρωσης ΕΑ



Hessische Industriemüll GmbH, Germany

Περιστρεφόμενος κλίβανος σε Μονάδα αποτέφρωσης ΕΑ



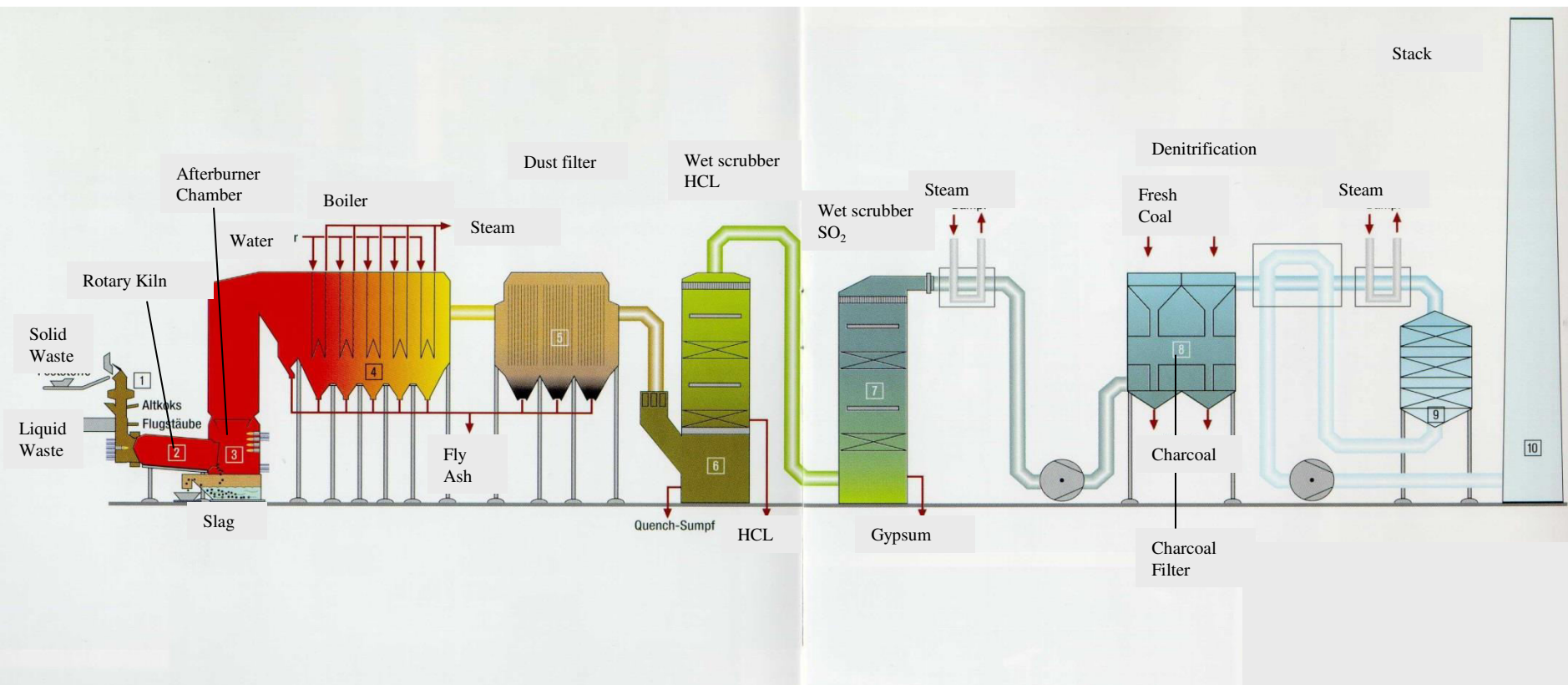
Hessische Industriemüll GmbH, Germany

Μονάδα αποτέφρωσης ΕΑ AVG-Hamburg



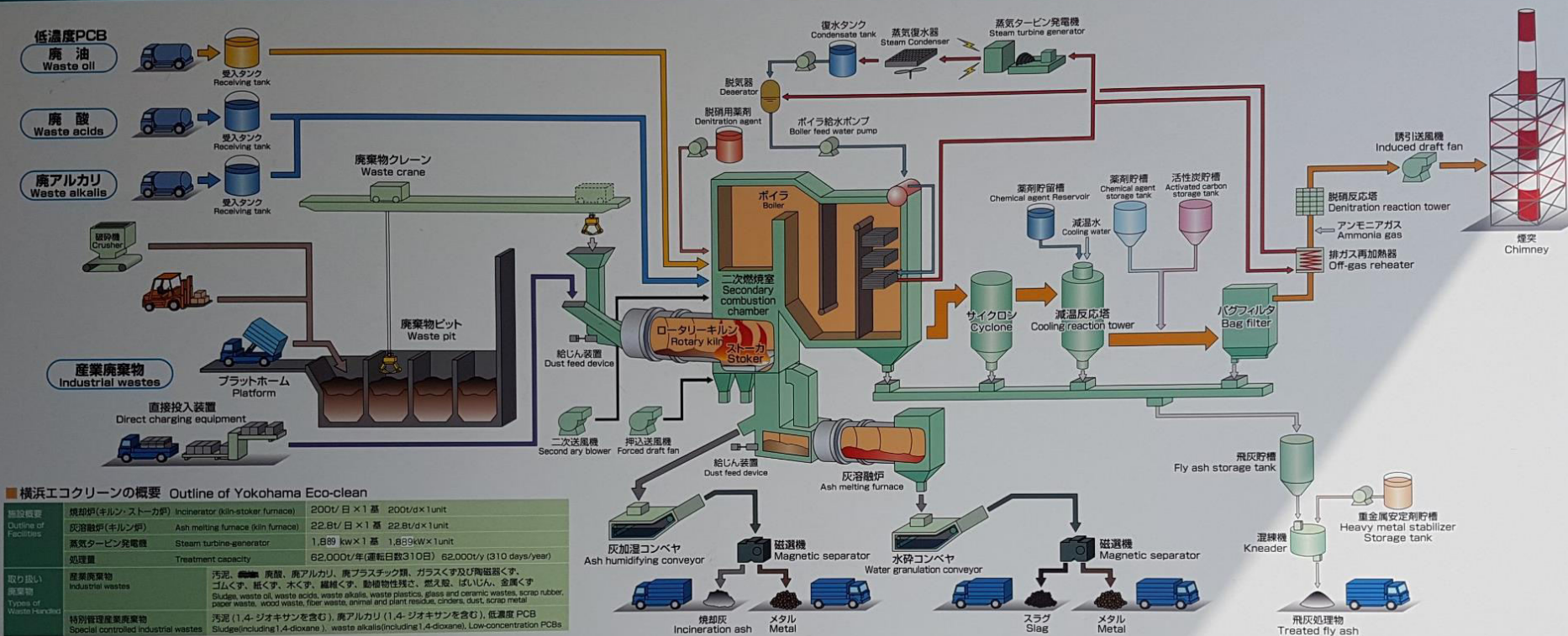
AVG, Hamburg

Διάγραμμα ροής για Μονάδα αποτέφρωσης ΕΑ

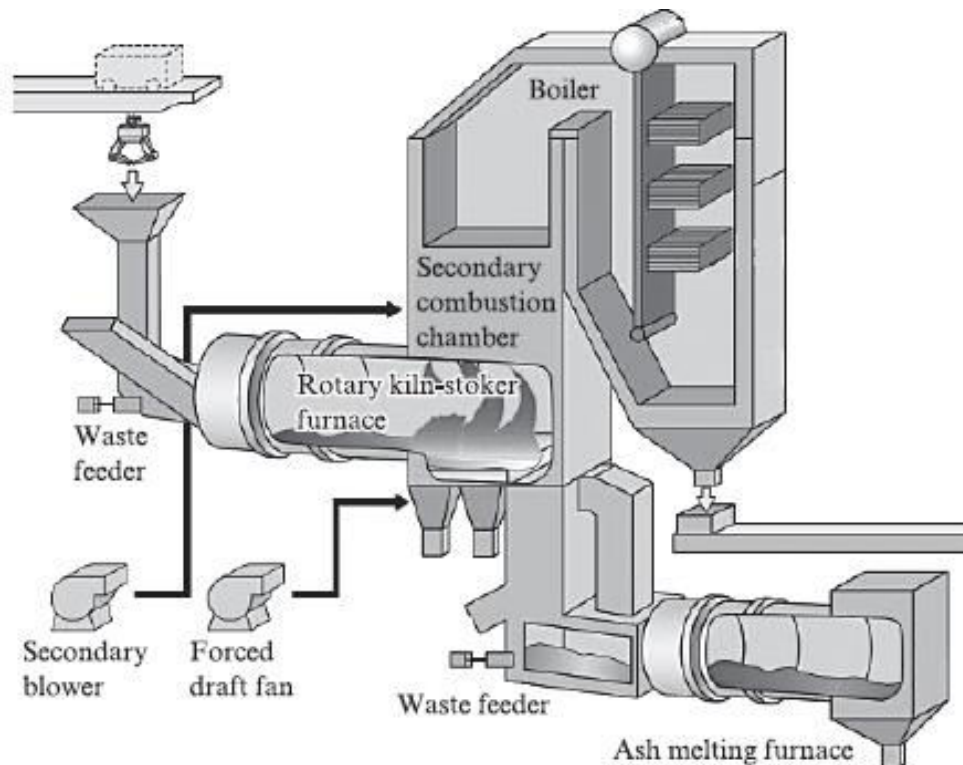


AVG, Hamburg

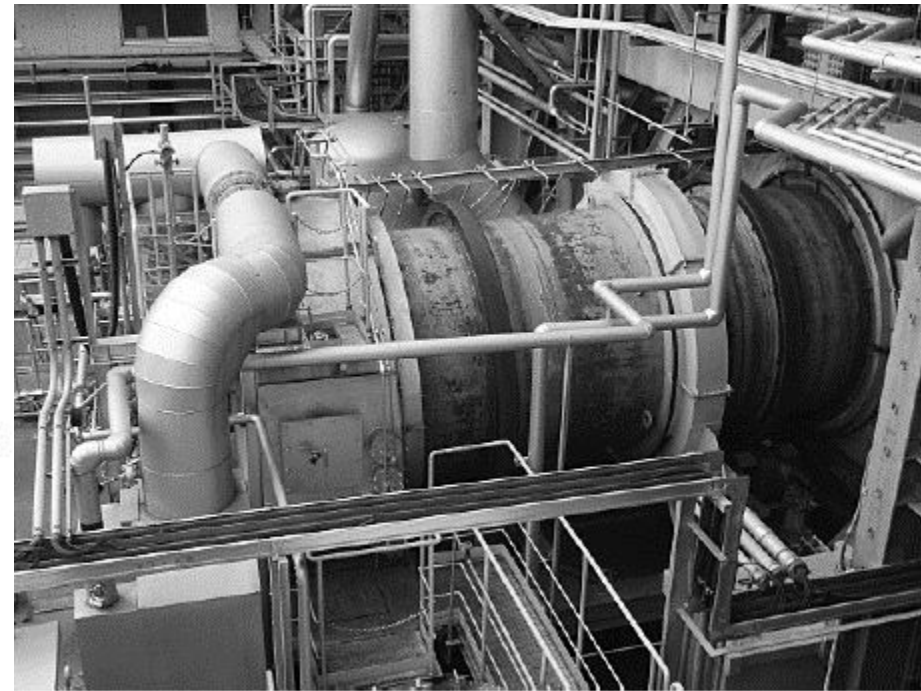
横浜エコクリーン処理フロー Yokohama Eco Clean Processing Flow



Yokohama Eco-Clean Factory (JFE)



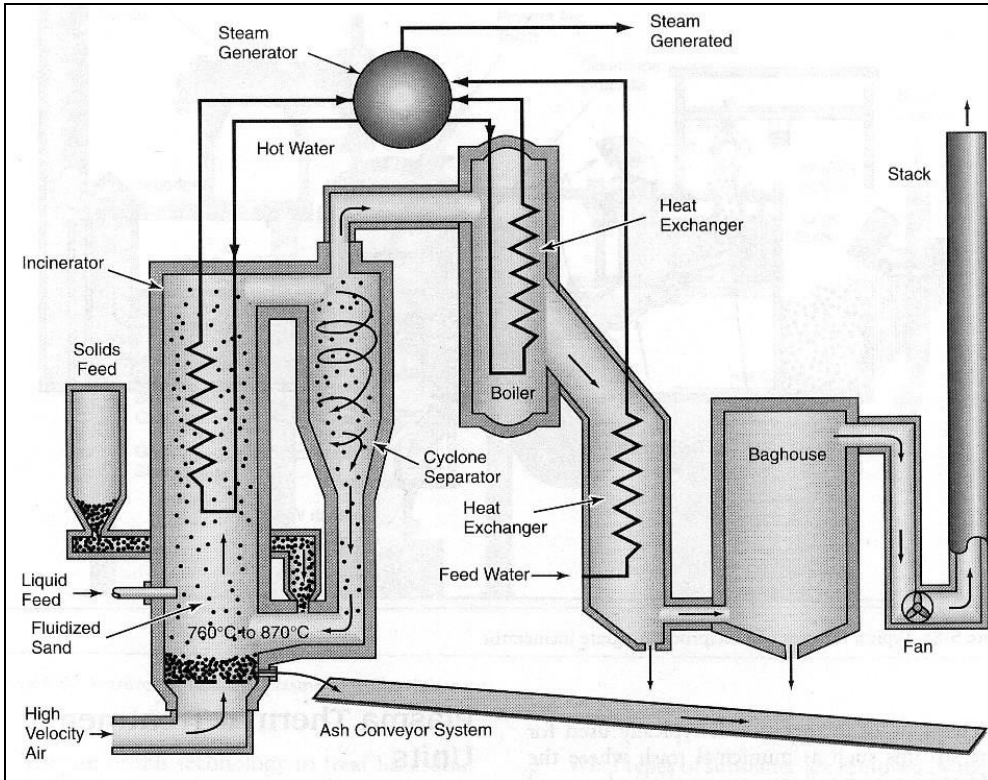
Schematic illustration of incineration facility



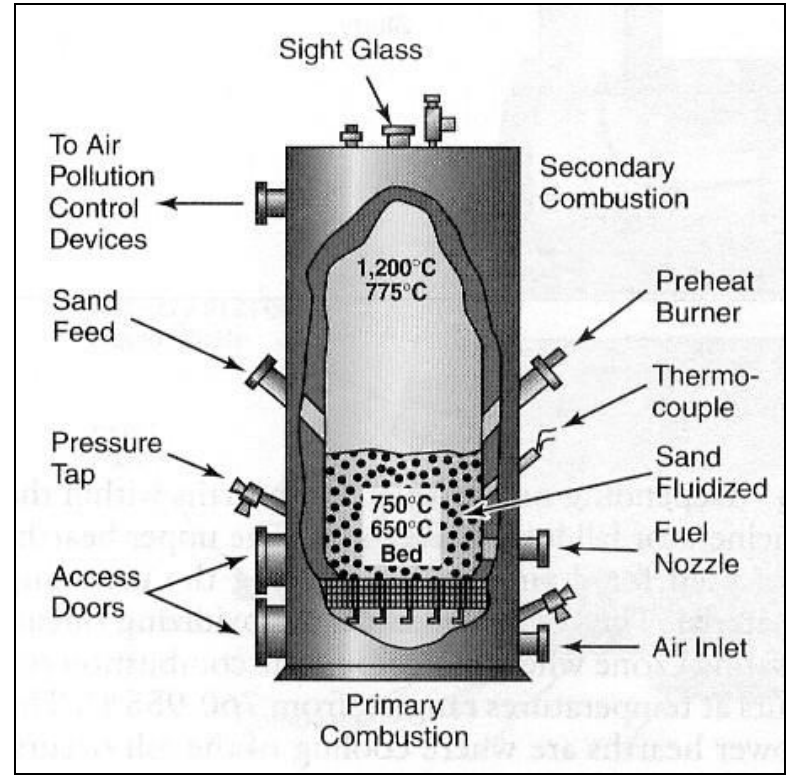
Aspect of ash melting kiln



Αποτεφρωτήρας Ρευστοποιημένης κλίνης



Circulating fluidised bed



Bubbling fluidised bed

Ανάκτηση ενέργειας

- ✓ Η αποτέφρωση αποβλήτων παράγει θερμότητα
 - Η καύση αποβλήτων με χαμηλή θερμογόνο δύναμη ίσως απαιτεί επιπλέον (βοηθητικό) καύσιμο
- ✓ Η ανάκτηση ενέργειας γίνεται μέσω της παραγωγής ατμού (ηλεκτρισμός)
- ✓ Δυνατότητες πώλησης θερμότητας σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις
- ✓ Πώληση της πλεονάζουσας ενέργειας βελτιώνει τα οικονομικά της μονάδας αποτέφρωσης

Παραπροϊόντα της αποτέφρωσης

- Στερεά
- Υγρά
- Αέρια

Αποτελούνται από:

- ✓ Ανακτημένα υλικά όπως μέταλλα
- ✓ Απαέρια
- ✓ Τέφρα (και slag)
- ✓ Υπολείμματα από την επεξεργασία των απαερίων
– APC residues
- ✓ Υγρά απόβλητα

Στερεά υπολείμματα

- Αποτελούνται από:
 - Τέφρα βάσης ή slag
 - Ιπτάμενη τέφρα (ESP)
 - Υπολείμματα από τον καθαρισμό των απαερίων – APC residues
- Η νομοθεσία για την επεξεργασία και τη διάθεση των στερεών υπολειμμάτων διαφέρει μεταξύ των κρατών
- Η τέφρα βάσης μπορεί να διατεθεί σε ΧΥΤΑ ή να χρησιμοποιηθεί ως υλικό αντικατάστασης (πχ. κατασκευή δρόμων)

Slag

(από περιστρεφόμενο κλίβανο)



Hessische Industriemüll GmbH, Germany

Απαέρια (flue gas)

- Η ποσότητα και το είδος των αέριων ρύπων εξαρτάται:
 - Ρύποι στα απόβλητα
 - Τεχνολογία
 - Αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας
- Περίπου $6-7 \text{ Nm}^3$ απαερίων ανά kg αποβλήτου
- Επεξεργασία:
 - Τέφρα – ηλεκτροστατικά φίλτρα
 - Βαρέα μέταλλα – απομακρύνονται με τα σωματίδια
 - Χλώριο – scrubber με lime
 - Θείο – scrubber
 - Διοξίνες – έλεγχος καύσης, ενεργός άνθρακας



Διοξίνες / Φουράνια

- Περίπου 200 χλωριωμένες οργανικές ενώσεις, εκ των οποίων κάποιες είναι πολύ τοξικές
- Ευρεία διασπορά στο περιβάλλον
- Κάποιες παρευρίσκονται στα επικίνδυνα απόβλητα που πάνε προς αποτέφρωση
- Κάποιες δημιουργούνται κατά τη διάρκεια ψύξης των ατμαερίων (λόγω υψηλής συγκέντρωσης Cl)
- Οι 3Ts κανόνες βοηθούν να καταστρέψουν τις ενώσεις κατά τη διάρκεια της αποτέφρωσης και να μειώσουν την επαναδημιουργία τους
- Χρήση ενεργού άνθρακα για επεξεργασία των ατμαερίων
- Τα όρια εκπομπής είναι υπερβολικά χαμηλά

Εκπομπές αερίων

- Έλεγχος αερίων σε περιστρεφόμενο κλίβανο
- Συνεχής έλεγχος σε:
HCl, CO, dust, SO₂, HF, TOC, NO_x, O₂
- Μηνιαίες μετρήσεις σε:
βαρέα μέταλλα (Hg, Cd, As, Cr, Cu, Pb, etc.)
- Δύο φορές το χρόνο:
PCDD/PCDF
- ΕΠΙΣΗΣ έλεγχος σε: υγρά απόβλητα και στερεά υπολείμματα

Αποτελεσματικότητα αποδόμησης

Destruction and removal efficiency

Ο αποτεφρωτήρας πρέπει να επιτυγχάνει **99.99%** DRE των επίμονων οργανικών ενώσεων – Persistent Organic Pollutants (POPs).

- DRE ορίζεται:

$$DRE = \frac{W_{in} - W_{out}}{W_{in}} \cdot 100\%$$

where:

- DRE = Destruction and Removal Efficiency (%)
- W_{in} = Mass feed rate of a particular POP (kg/hr)
- W_{out} = Mass emission rate of the POP (kg/hr)

Κανονισμοί αποτέφρωσης

■ HCl

- Όξινο αέριο, δημιουργείται όταν αποτεφρώνονται χλωριωμένες οργανικές ενώσεις
- Ένας αποτεφρωτήρας επικινδύνων αποβλήτων δεν πρέπει να εκπέμπει περισσότερο από **1.8 kg/h HCl**

➤ Σωματιδιακή ύλη

- Αποτελείται από σωματίδια (στερεά ή υγρά, οργανικά ή ανόργανα), τα οποία συµμεταφέρονται μαζί με τα απαέρια της καύσης
- Ένας αποτεφρωτήρας επικινδύνων αποβλήτων δεν πρέπει να εκπέμπει περισσότερο από **180 mg/dscm** (milligrams per dry standard cubic meter).

$$P_c = P_m \times \left(\frac{14}{21 - Y} \right)$$

where

- P_c is the corrected concentration of particulate matter
- P_m the measured concentration of particulate matter
- Y the oxygen concentration in stack gas

Κόστος

- ✓ Σχετίζεται με το μέρος και τη χώρα (σχετικοί παράγοντες)
- ✓ Υψηλό επίπεδο σχεδιασμού και ελέγχου = υψηλό κόστος κατασκευής
- ✓ Κόστος ελέγχου και περιορισμού απαερίων = 30-40% συνολικού κόστους λειτουργίας
- ✓ Κόστος επεξεργασίας ανά τόνο (EUR/ton) παρόμοιο με άλλες τεχνολογίες
- ✓ Οικονομία (περιορισμός) κόστους λόγω μείωσης όγκου, βάρους και επικινδυνότητας αποβλήτων για τελική διάθεση
- ✓ Η ανάκτηση και πώληση ενέργειας/θερμότητας από την επεξεργασία βελτιώνει τα οικονομικά της μονάδας

Κόστη

Country	Gate Fees in EUR/ton	
	MSW	Hazardous Waste
Belgium	56-130	100-1500
Denmark	40-70	100-1500
France	50-120	100-1500
Germany	100-350	50-1500
Italy	40-80	100-1000
Netherlands	90-180	50-5000
Sweden	20-50	Not available
United Kingdom	20-40	Not available

Πυρόλυση

- Πυρόλυση = θερμική αποδόμηση που λαμβάνει χώρα απουσία οξυγόνου
- Προϊόντα πυρόλυσης:
 - ✓ Εύφλεκτα αέρια
 - ✓ Μίγματα ελαίων
- Πλεονεκτήματα:
 - ✓ Χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας
 - ✓ Χαμηλές εκπομπές ατμοσφαιρικών ρυπαντών
 - ✓ Τα παραπροϊόντα είναι εύφλεκτα

Εφαρμογή της πυρόλυσης

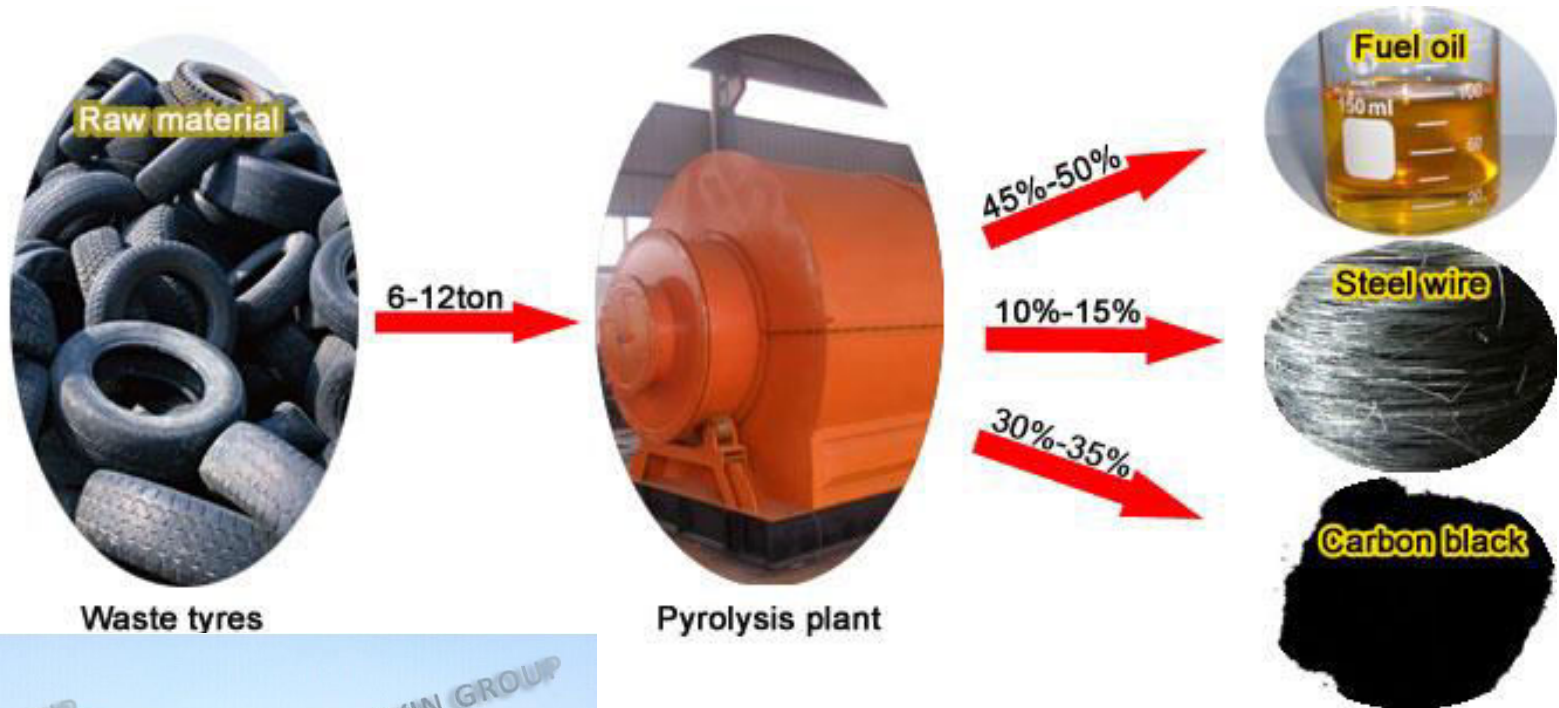
Για ροές αποβλήτων
όπως:

- Λάστιχα αυτοκίνητων
- Πλαστικά

Για επεξεργασία
ρυπασμένων εδαφών



Waste Tires and Plastics To Fuel Oil Plant



Waste tyres



Pyrolysis plant



Fuel oil



Steel wire



Carbon black





Oil Based Drilling Mud



Truck Delivery



Catalytic Pyrolysis



Shale Sand



Fuel Oil



Flammable Gas



Refractory Brick



Oil to Heat the Reactor



Gas to Heat the Reactor



Build Houses



EU Emission Standard Discharge

Αεριοποίηση

- Αεριοποίηση = ατελής καύση με έλλειψη επάρκειας οξυγόνου
- Επιτυγχάνει αποτελεσματική αποδόμηση επικινδύνων αποβλήτων σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με την αποτέφρωση
- Η θερμική αποδόμηση επιτυγχάνεται με συνδυασμό οξείδωσης (σε υψηλή θερμοκρασία) ακολουθούμενη από αναγωγή (σε υψηλή θερμοκρασία)
- Προϊόντα:
 - ✓ Εύφλεκτα αέρια π.χ. υδρογόνο, CO (syngas)
 - ✓ Στερεό εξανθράκωμα (char)

Τελικές απόψεις

- ❑ Η μείωση αποβλήτων από τους παραγωγούς πρέπει πάντα να είναι προτεραιότητα
- ❑ Πρέπει να ληφθούν υπόψη τα υπολείμματα από τις διαδικασίες επεξεργασίας και η διάθεσή τους
- ❑ Η θερμική επεξεργασία είναι η καλύτερη διαθέσιμη τεχνολογία για μερικά οργανικά επικίνδυνα απόβλητα
- ❑ Συχνά υπάρχει αντίθεση κοινού και περιβαλλοντικών οργανώσεων, βασισμένων στις εκπομπές διοξινών

Questions & Answers

