



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

ΜΠ 338

Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ): Διαχείριση και Σχεδιασμός Συστημάτων

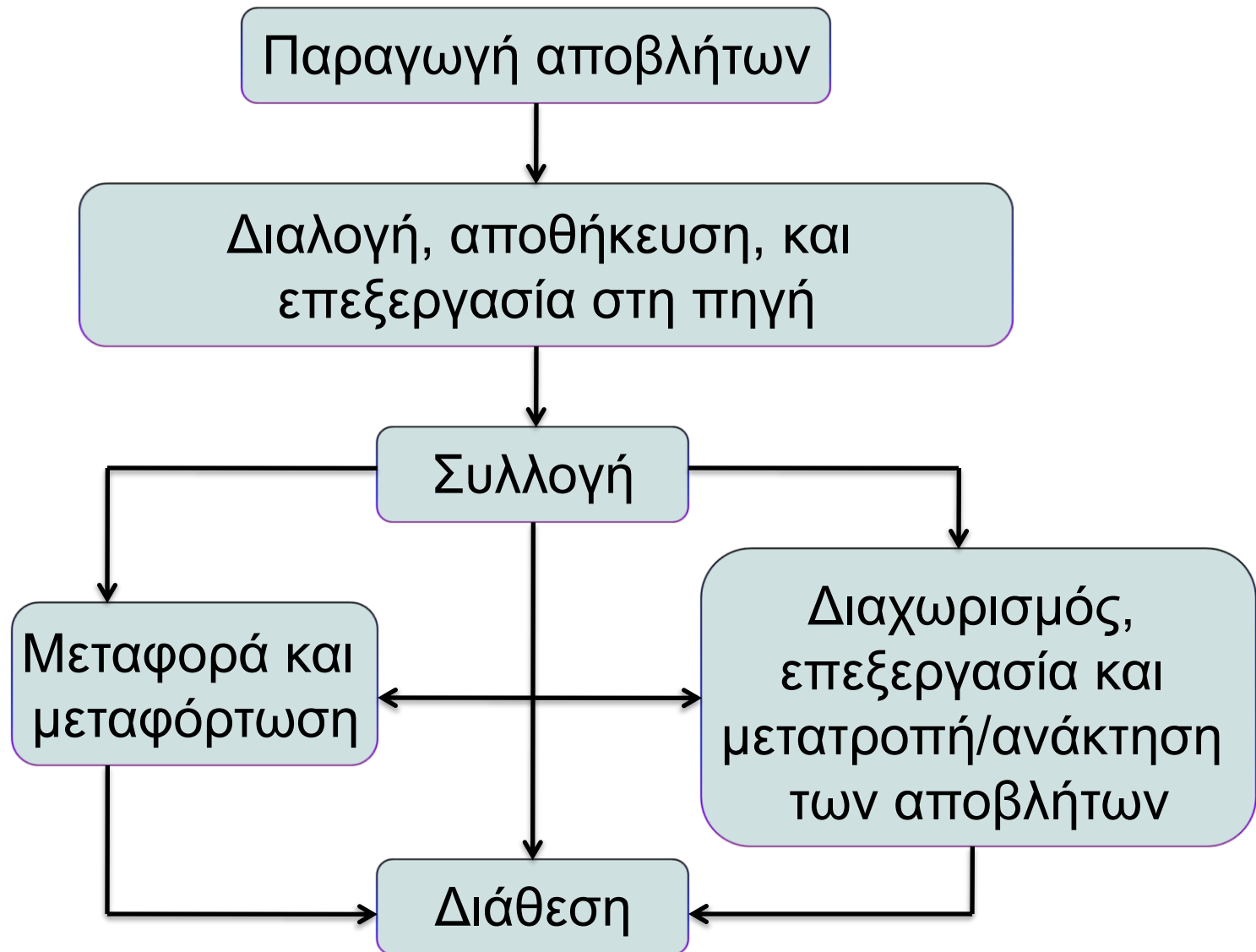
Αναπλ. Καθηγητής Απόστολος Γιαννής

E-mail: agiannis@tuc.gr

Κεφάλαιο 7

Θερμικές Μέθοδοι Επεξεργασίας

Ολοκληρωμένο Σύστημα Διαχείρισης Αποβλήτων



Θερμικές μέθοδοι

Τεχνολογία	Τύπος επεξεργασίας	Βιομάζα	Προϊόντα
Αποτέφρωση	Θερμοχημική	Ξύλα, αγροβιομηχανικά απόβλητα, ΑΣΑ, ειδικά απόβλητα	Θερμότητα Ατμός Ηλεκτρισμός
Αεριοποίηση	Θερμοχημική	Ξύλα, αγροβιομηχανικά απόβλητα, ΑΣΑ	Χαμηλής και μεσαίας θερμογόνου δύναμης αέριο (syngas)
Πυρόλυση	Θερμοχημική	Ξύλα, αγροβιομηχανικά απόβλητα, ΑΣΑ	Πετρελαιοειδή Εξανθράκωμα
Υδροθερμική	Υδροθερμοχημική	Υδαρή αγροβιομηχανικά απόβλητα, ενεργός ιλύς	Βιοεξανθράκωμα, πετρελαιοειδή, αέριο

Παραγωγή ενέργειας από απόβλητα

Waste-to-Energy (WtE)

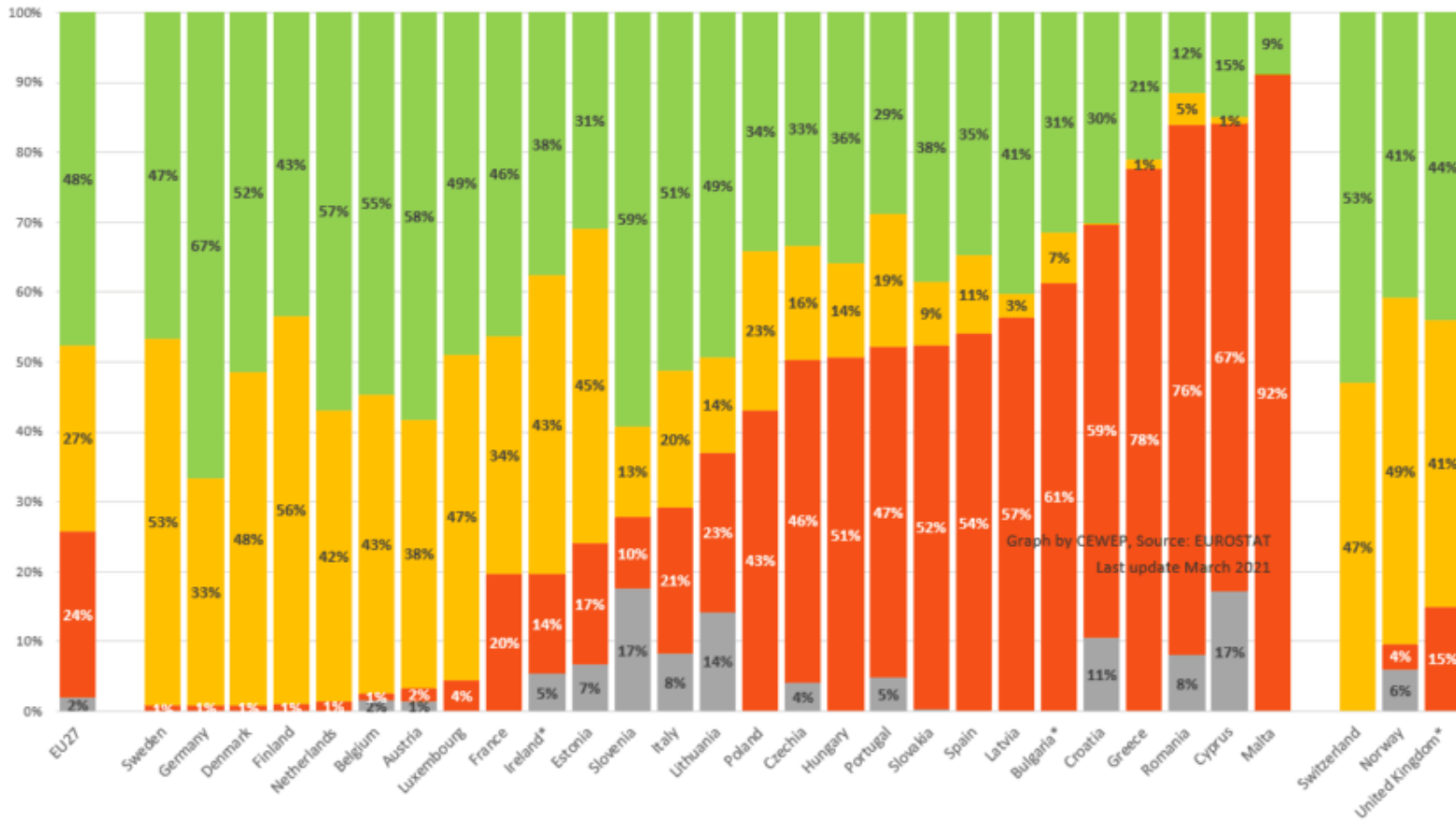
- Παγκόσμια παραγωγή ΑΣΑ = 2.01 billion tonnes/yr, και αναμένεται να διπλασιαστεί μέχρι το 2050 (με τις υπάρχουσες συνθήκες)
- 221 M tonnes/yr ΑΣΑ αποτεφρώνονται (αναμένονται να φτάσουν τους 300 M tonnes/yr τα επόμενα 5 χρόνια)
- Θερμική επεξεργασία – WtE: δυτική Ευρώπη (B, D, G, F, N, S), US, Ασία (S. Korea, Japan, China)
- Συν-παραγωγή θερμικής ενέργειας και ηλεκτρισμού
- Παραγωγή λιγότερων αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με ΧΥΤΑ

Επεξεργασία αποβλήτων στην ΕΕ (2019)



Municipal waste treatment in 2019

EU 27 + Switzerland, Norway and the UK



- Landfill
- Waste-to-Energy
- Recycling + Composting
- Missing data



Graph by CEWEP, Source: EUROSTAT
Last update March 2021

Percentages are calculated based on the municipal waste reported as generated in the country

*: 2018 data (last available)

● Potential Plants

Existing Plants

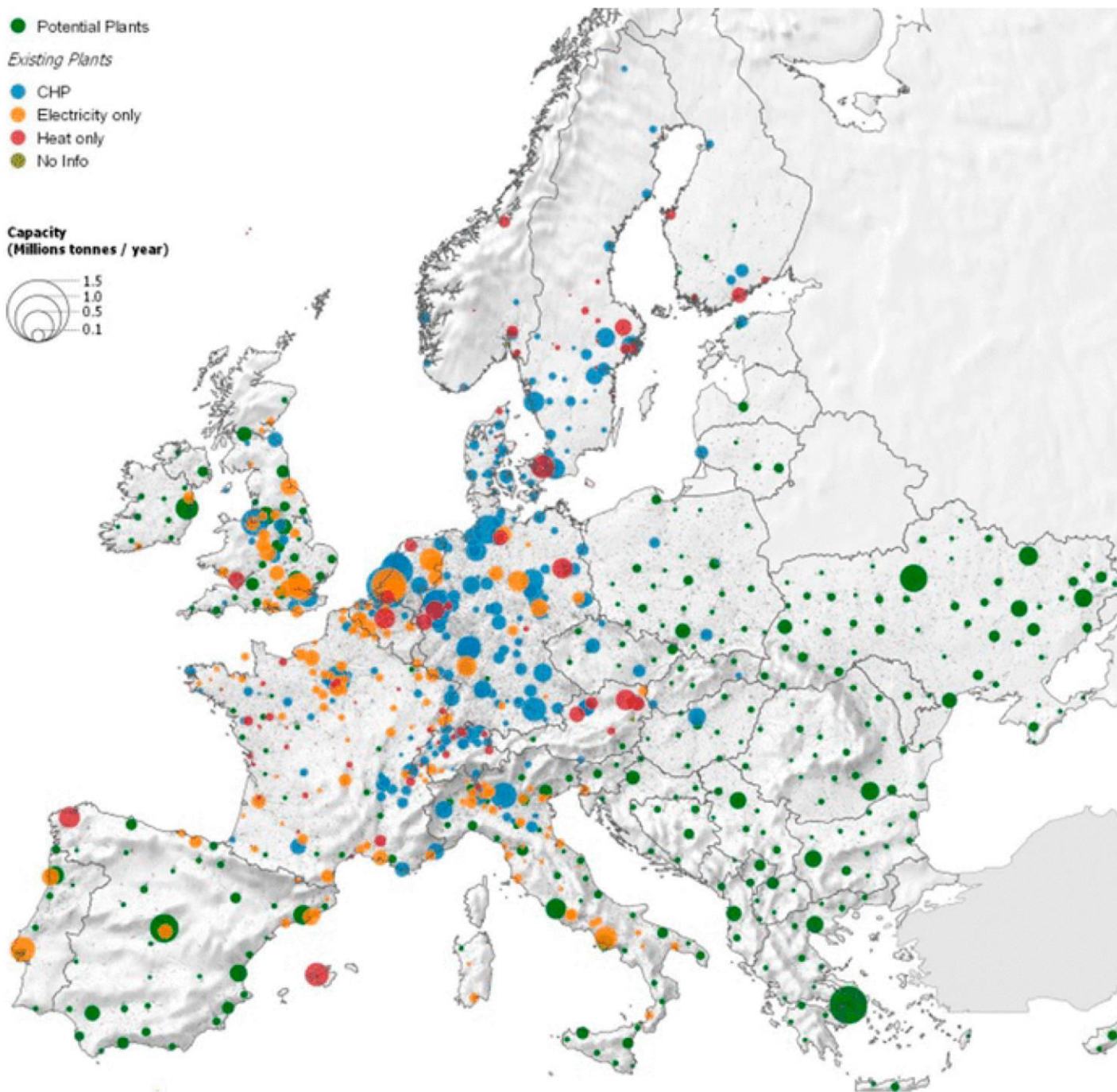
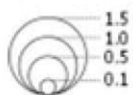
● CHP

● Electricity only

● Heat only

● No Info

Capacity
(Millions tonnes / year)



Κόστος μονάδων WtE

Table 2. Construction of incineration plants

Name of incineration plant	Year	Construction cost	Capacity (tonnes/d)
Ulu Pandan Incineration Plant	1979/2009	S\$ 130 million	1,100
Tuas Incineration Plant	1986	S\$ 200 million	1,700
Senoko Incineration Plant	1992	S\$ 560 million	2,400
Tuas South Incineration Plant	2000	S\$ 900 million	3,000
Keppel Seghters Tuas Plant	2009	?	800 - 850

???????

????

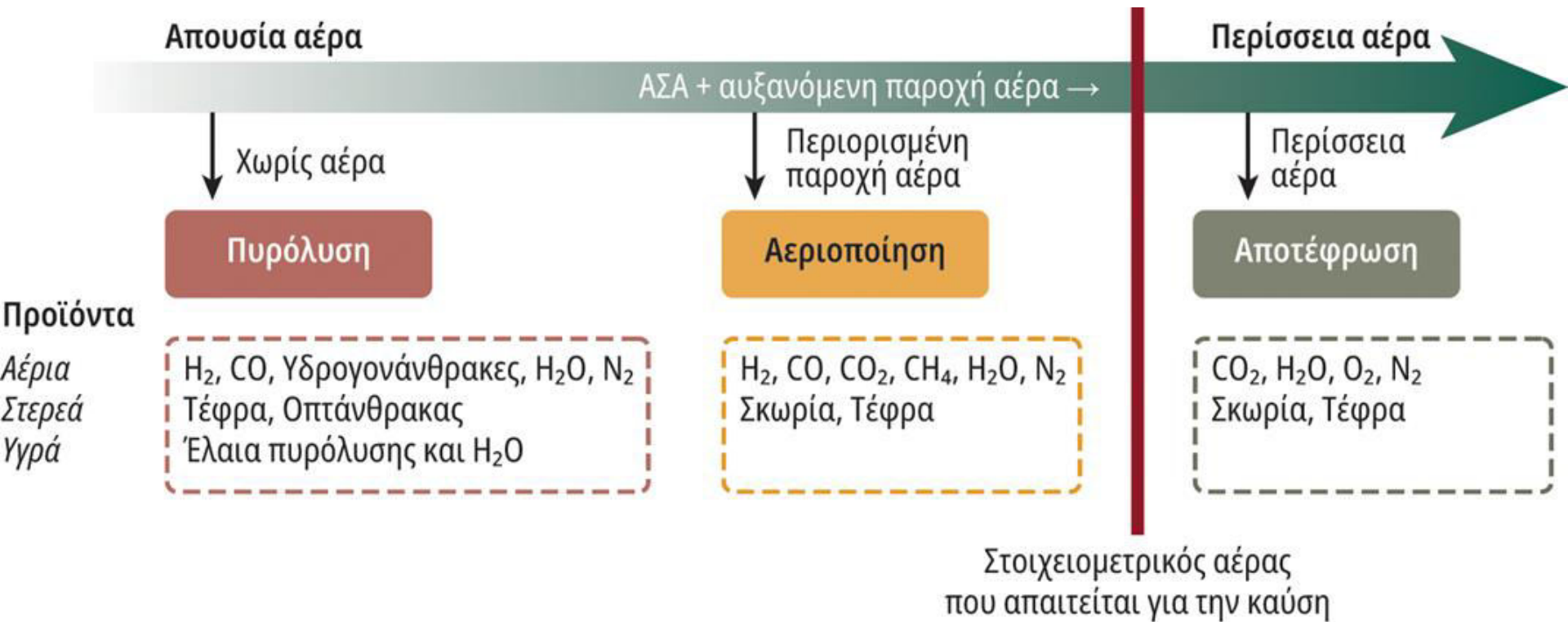
????

????

Ορισμοί στις θερμικές διεργασίες

- Αποτέφρωση/καύση (incineration/combustion)
- Στοιχειομετρική ποσότητα αέρα καύσης
- Εξώθερμες/ενδόθερμες αντιδράσεις
- Πυρόλυση (Pyrolysis)
- Αεριοποίηση (Gasification)
- Υδροθερμική (Hydrothermal)

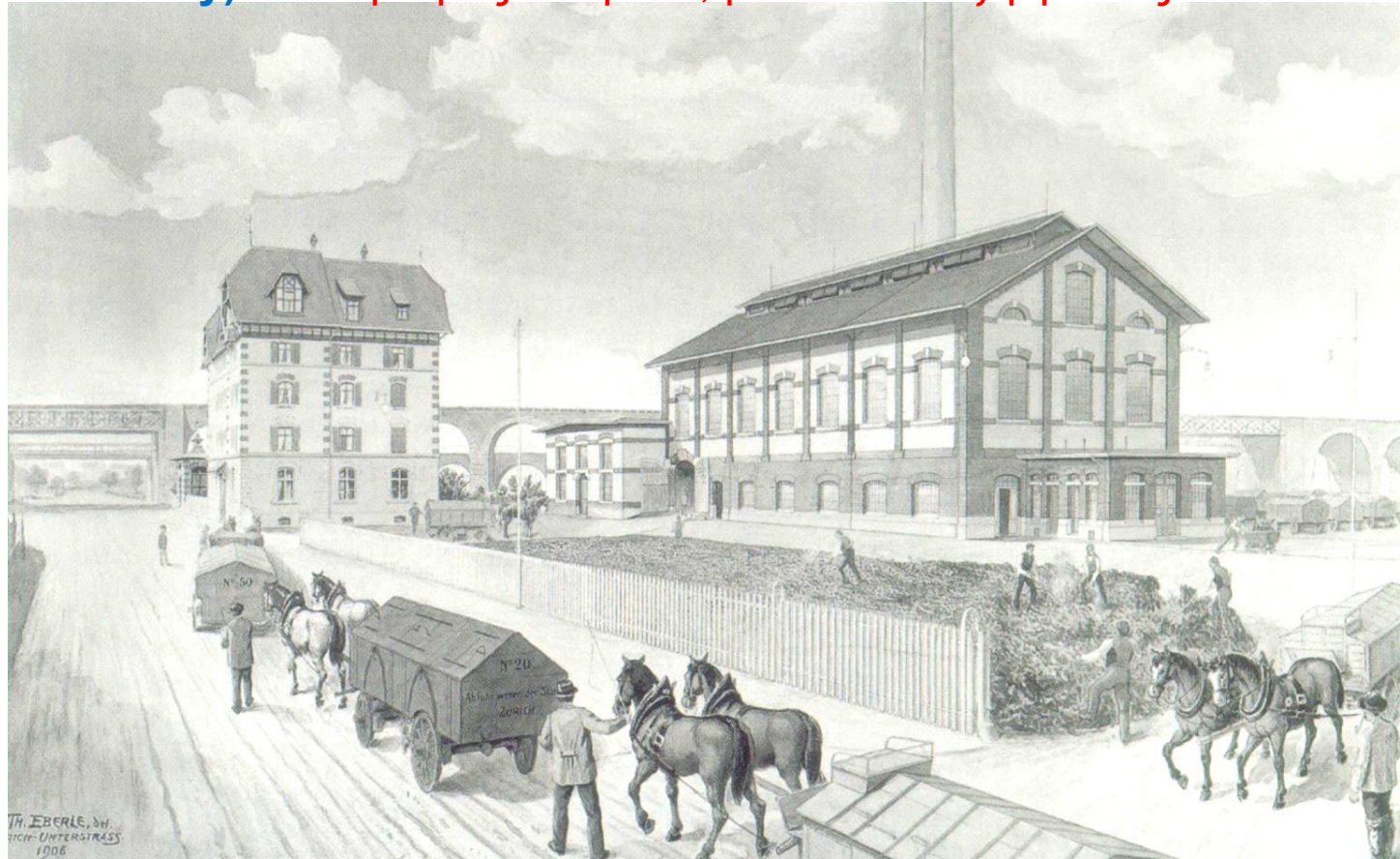
Ποσότητα αέρα (οξυγόνου) στις θερμικές διεργασίες



Αποτέφρωση

Ιστορία της αποτέφρωσης

- Τέλη 19^{ου} αιώνα: πρώτοι θάλαμοι αποτέφρωσης
- Πρώτη γενιά αποτεφρωτήρων (1950-1965): καθαρή αποτέφρωση
- Δεύτερη γενιά (1965-1975): κατακρημνιστές τέφρας, ανάκτηση ενέργειας
- Τρίτη γενιά (1975-1990): βελτιωμένα συστήματα καθαρισμού απερίων, ανάκτηση ενέργειας
- Τέταρτη γενιά (1990-today): καθαρισμός απερίων, μονάδα επεξεργασίας υπολειμμάτων



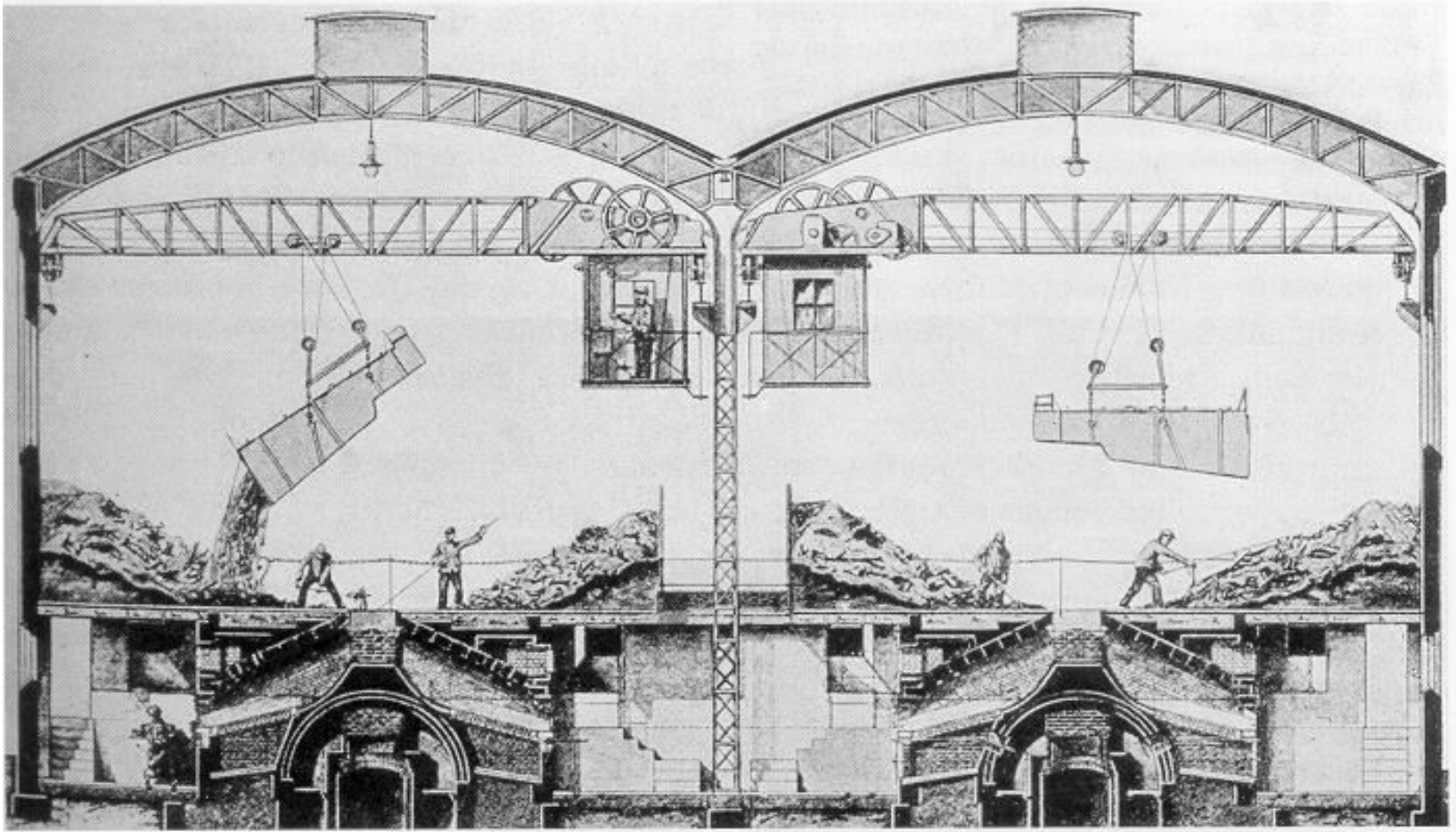
Μονάδα αποτέφρωσης Bullerdeich (1896 – 1924)

Πρώτη μονάδα αποτέφρωσης
στην Ευρώπη λόγω επιδημία
χολέρας



Stadtreinigung Hamburg, 1896

Θάλαμοι αποτέφρωσης της Bullerdeich



Stadtreinigung Hamburg, 1896

Μονάδα αποτέφρωσης RuhrstraÙe (1913 - 1961)



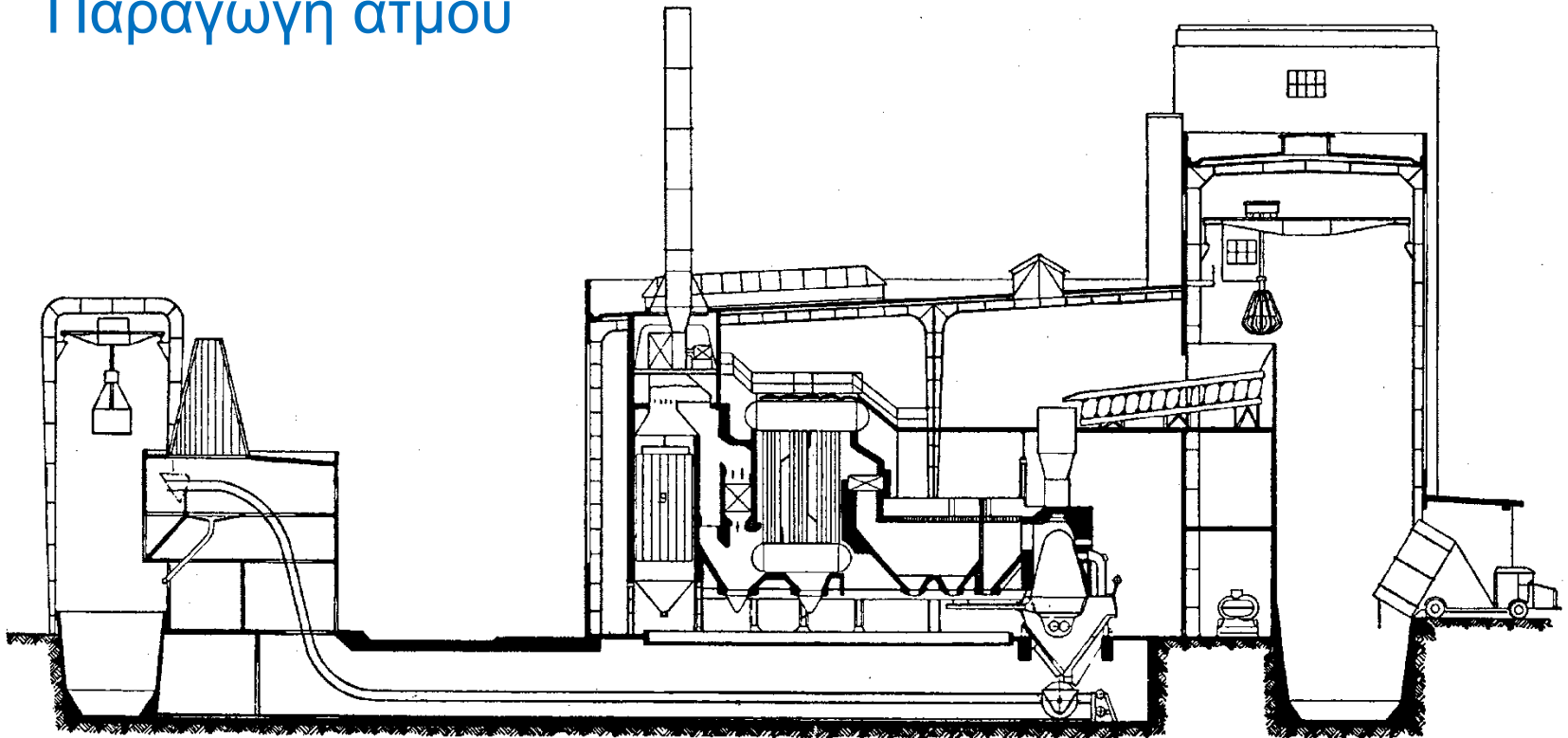
Σύστημα συλλογής τέφρας

Διάθεση απορριμμάτων



Μονάδα αποτέφρωσης Borsigstraße (1931 - 1994)

- Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές τέφρας (ηλεκτρόφιλτρα)
- Κινούμενες εσχάρες αποτέφρωσης
- Παραγωγή ατμού



Μονάδα αποτέφρωσης Stellinger Moor (since 1973)

- Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές
- Παραγωγή ενέργειας
- Επεξεργασία απαερίων



Στόχοι αποτέφρωσης

- Ελάττωση όγκου → Εξοικονόμηση χώρου ΧΥΤΑ
- Αδρανοποίηση συστατικών των επικινδύνων αποβλήτων
- Καταστροφή ρύπων και μικροβίων → Έλεγχος εκπομπών
- Ανάκτηση ενέργειας → Διατήρηση πηγών ενέργειας
- Χρησιμοποίηση υπολειμμάτων ως δευτερογενή υλικά → Διατήρηση πρωτογενών υλικών

Τι είναι η αποτέφρωση;

Οξείδωση:

Αντίδραση των χημικών στοιχείων με μοριακό οξυγόνο

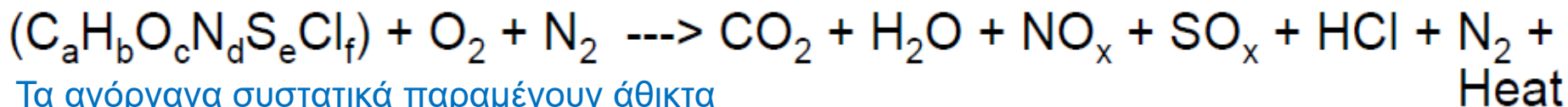
Κυριότερα στοιχεία στο καύσιμο/απόβλητο (C-H-O-N-S):

άνθρακας (C), υδρογόνο (H), οξυγόνο (O), άζωτο (N),
θείο (S)

Πλήρης καύση:

Οξείδωση των στοιχείων στον υψηλότερο βαθμό
οξείδωσης

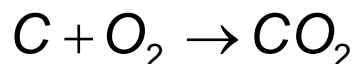
πχ. CO_2 , H_2O , SO_2



Χημικές αντιδράσεις κατά τη διάρκεια της καύσης

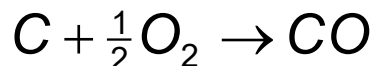
Άνθρακας (C)

Πλήρης καύση

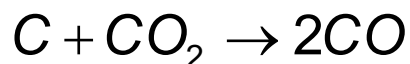


$$\Delta H = -394 \text{ J / mol}$$

Ατελής καύση σε συνθήκες έλλειψης οξυγόνου



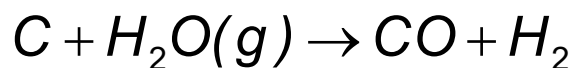
$$\Delta H = -221 \text{ J / mol}$$



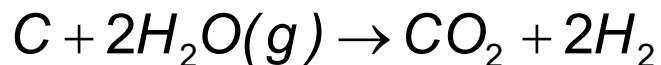
$$\Delta H = +173 \text{ J / mol}$$

Χημικές αντιδράσεις κατά τη διάρκεια της καύσης

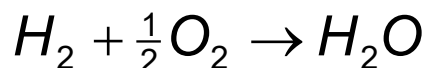
Υδρογόνο (H₂)



$$\Delta H = +131 \text{ J / mol}$$

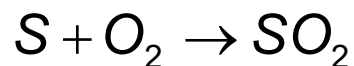


$$\Delta H = +90 \text{ J / mol}$$



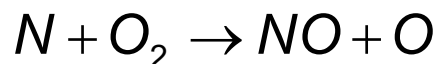
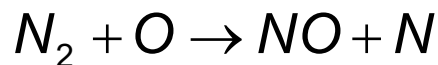
$$\Delta H = -240 \text{ J / mol}$$

Θείο (S)



$$\Delta H = -297 \text{ J / mol}$$

Άζωτο (N₂)



Απαιτούμενη στοιχειομετρικά ποσότητα αέρα

- Πλήρεις αντιδράσεις
 - $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$
 - $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
 - $\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$
- O_2 στον αέρα: 23.15% (κ.β); 21% (κ.ο)
- 11.52 air kg/kg C
- 34.56 air kg/kg H
- 4.31 air kg/kg S

Καύση με περίσσεια αέρα

- Εξασφαλίζει τη πλήρη καύση
- Προωθεί την ανάμιξη
- Αυξάνει την ποσότητα ατμαερίων
- Μειώνει τη θερμοκρασία
- Έλεγχος οσμών στα απαέρια
 - $< 788\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Έλεγχος διοξινών/φουρανίων
 - $> 982\text{ }^{\circ}\text{C}$

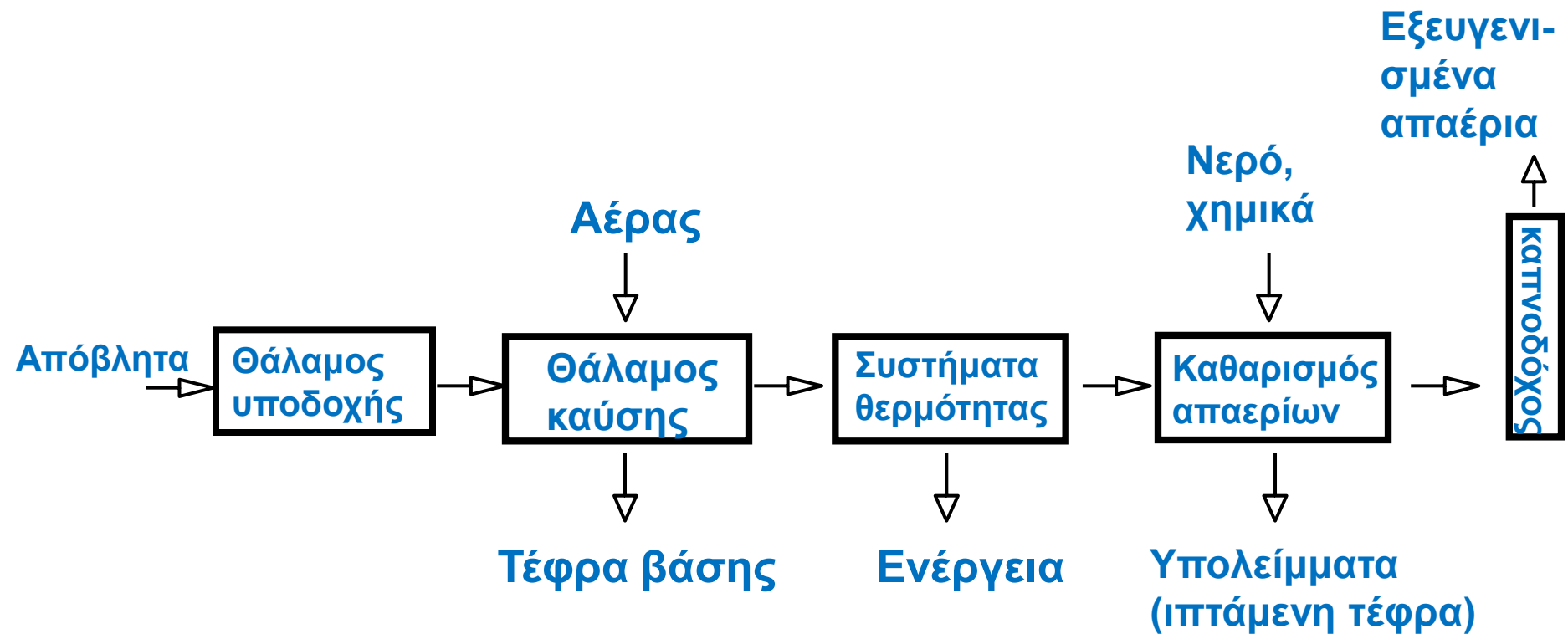
Προϋποθέσεις για την αποτέφρωση των αποβλήτων

- Ευφλεκτότητα των αποβλήτων
 - Θερμογόνος δύναμη $> 7000 \text{ kJ/kg}$
- Επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας ανάφλεξης
- Επαρκής ποσότητα καύσιμου (αποβλήτο) και οξειδωτικού μέσου (οξυγόνο) στο θάλαμο καύσης
- Κατάλληλη ανάμιξη καύσιμου και οξυγόνου
- Συνεχής απομάκρυνση των αερίων και υπολειμμάτων καύσης

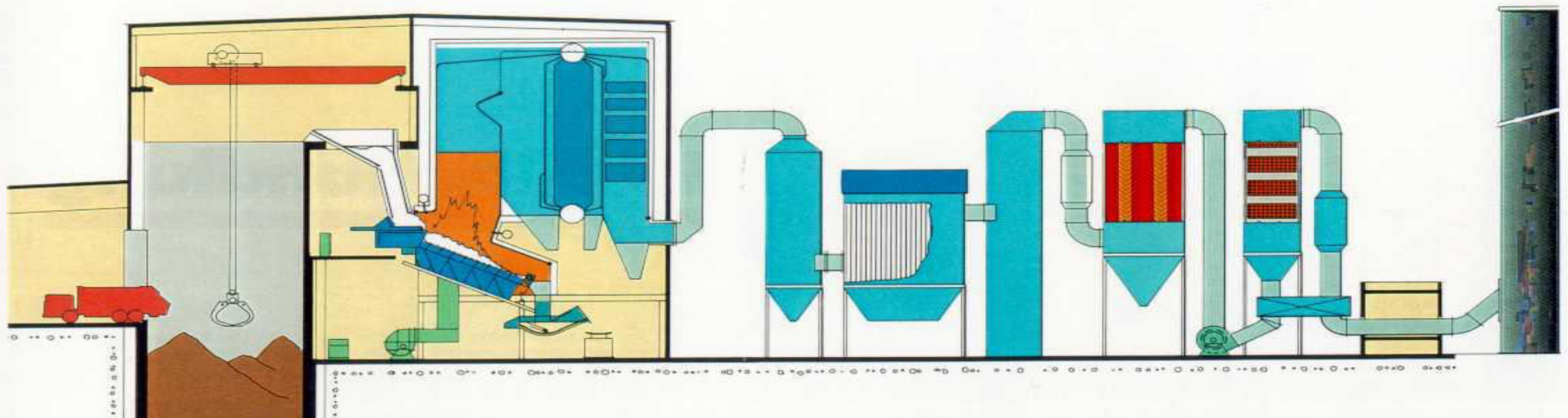
Αποτέφρωση αποβλήτων - Μειονεκτήματα

- Υψηλό κόστος κατασκευής μονάδας αποτέφρωσης
- Εξειδικευμένο προσωπικό (ιδιαίτερα για τη λειτουργία του boiler)
- Μερικά υλικά (απόβλητα) δεν είναι καύσιμα
- Μερικά υλικά απαιτούν επιπλέον καύσιμο (πετρέλαιο)
- Διαφωνία πολιτών
 - Λόγω ρίσκου κατασκευής και λειτουργίας
 - Μείωση της αξίας της γης
 - Αδυναμία της πολιτείας να επιβληθεί

Πρότυπο Σχέδιο Μονάδας Αποτέφρωσης



Διάγραμμα ενός συμβατικού αποτεφρωτήρα ΑΣΑ



Θάλαμος
αποθήκευσης
Αρπάγη

Θάλαμος καύσης
Κινούμενες εσχάρες
Απομάκρυνση τέφρας

Ηλεκτρόφιλτρα

Υγρή-ξηρή
επεξεργασία
απαερίων
(πλυντρίδες)

Ενεργός
άνθρακας
(διοξίνες,
φουράνια)

καπνοδόχος

Θερμικές Διεργασίες στο Θάλαμο Καύσης

1. Ξήρανση (Drying)

Απομάκρυνση υγρασίας και πτητικών συστατικών σε θερμοκρασίες πάνω των 100 °C

2. Πυρόλυση (Degassing)

Αποσύνθεση οργανικής ύλης (σε πτητικές ενώσεις) απουσία οξειδωτικού μέσου (πχ οξυγόνου) (~ 250 °C)

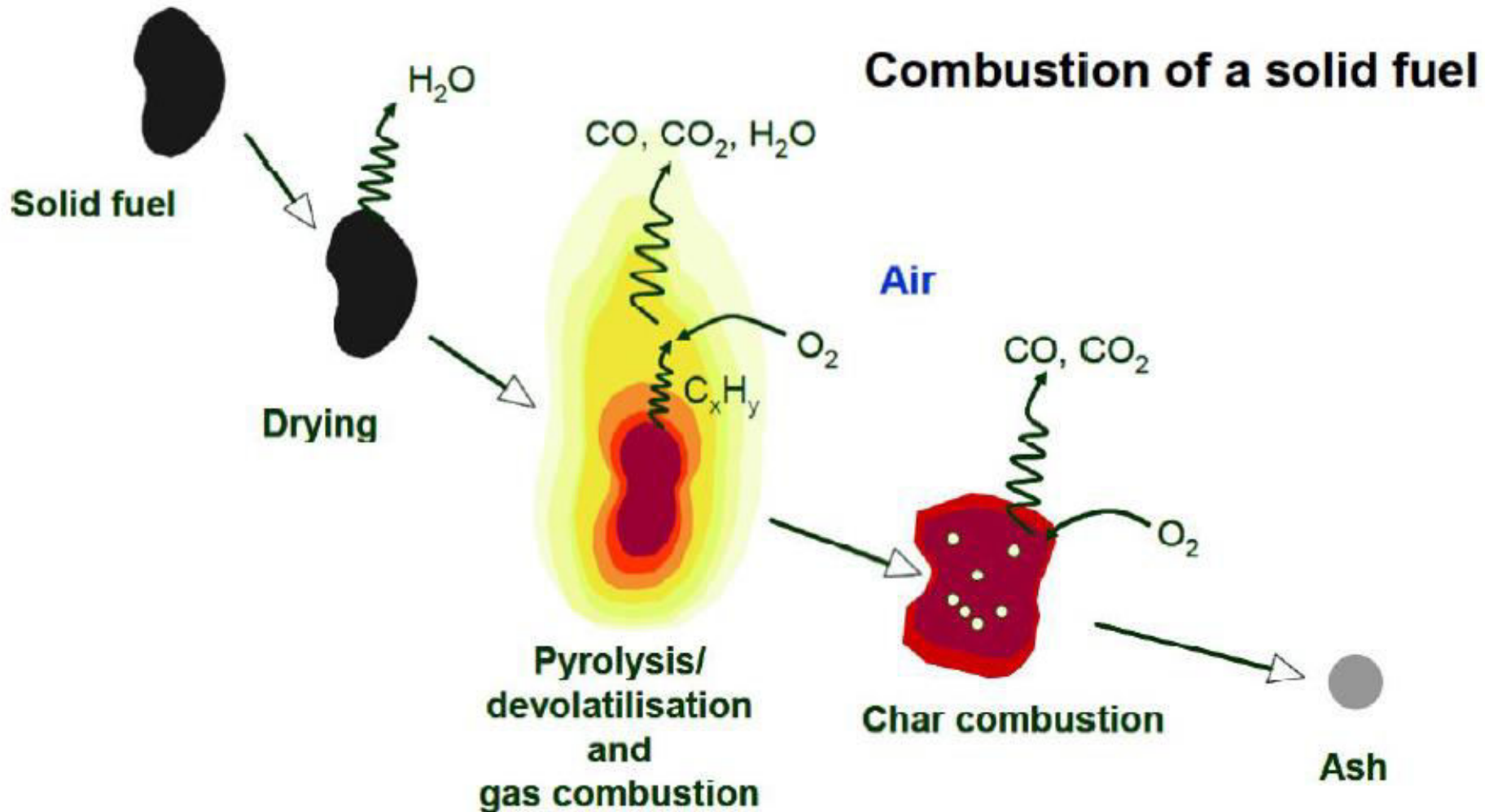
3. Αεριοποίηση (Gasification)

Συνεχής αποσύνθεση των οργανικών ενώσεων σε αέρια προϊόντα. Οξυγόνο και ατμός προάγουν τη διαδικασία οξείδωσης (> 500 °C)

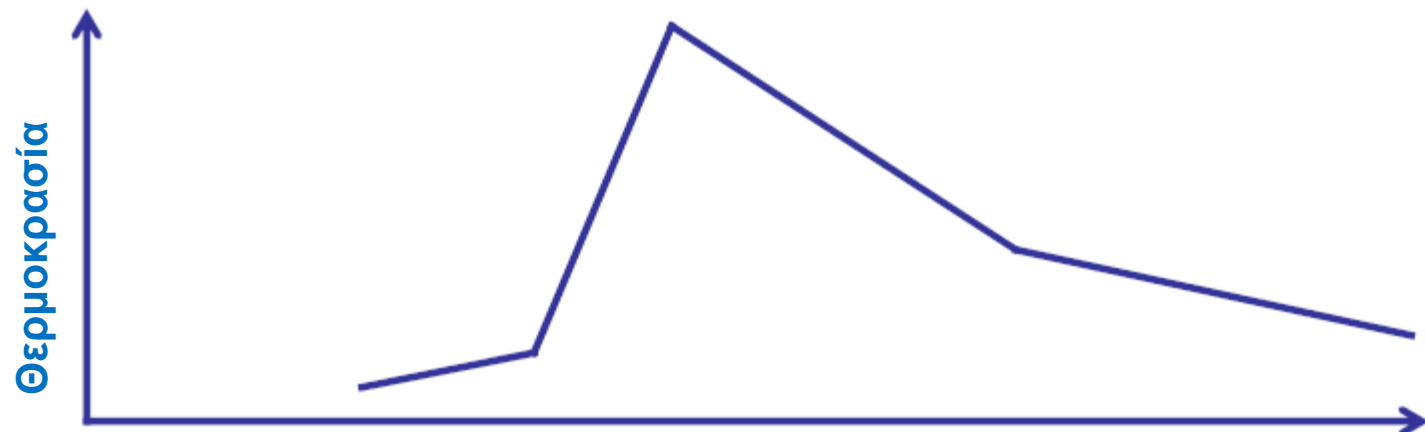
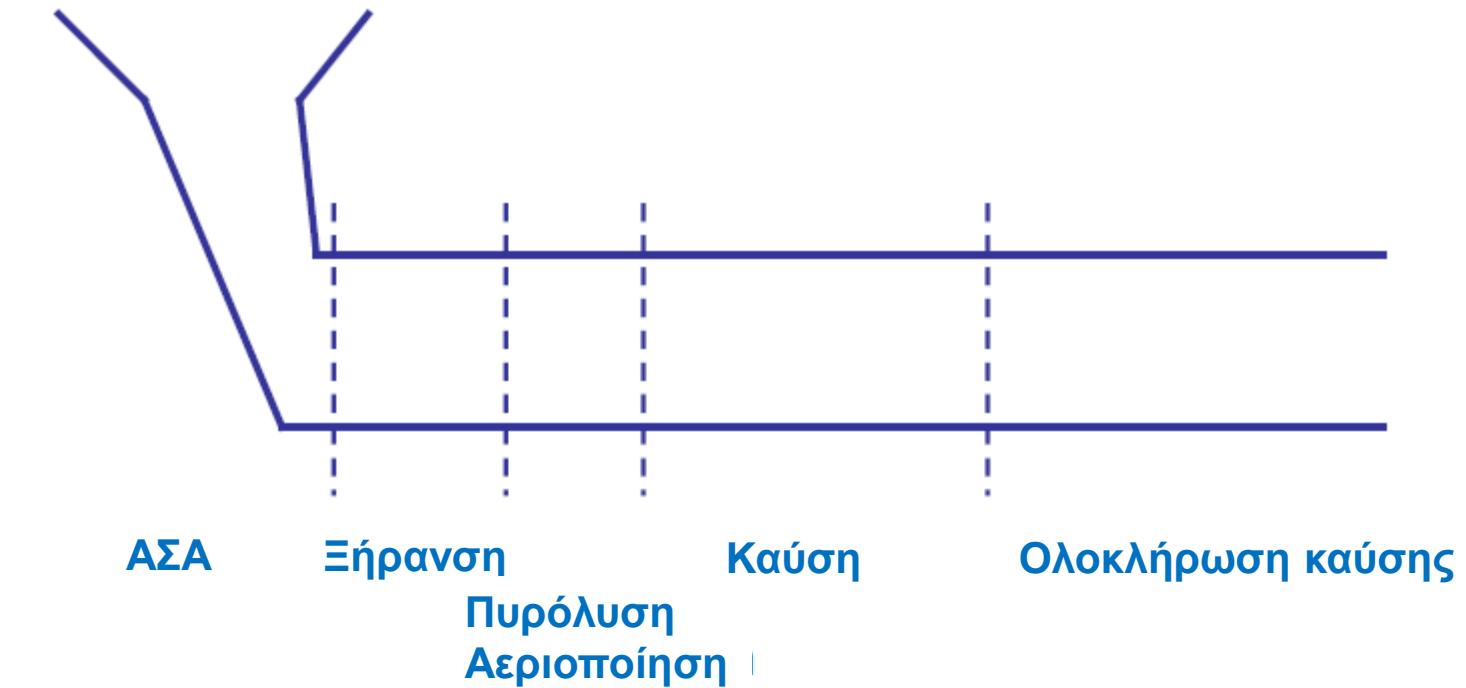
4. Καύση (Combustion)

Πλήρης οξείδωση των ατμαερίων (> 800 °C)

Απεικόνιση θερμικών διεργασιών



Θερμικές Διεργασίες στο Θάλαμο Καύσης



Σχεδιασμός θαλάμου καύσης

Παράγοντες:

Εσχαρές

- Το σύστημα εσχαρών που επιλέγεται
- Διαστάσεις των εσχαρών (min. μήκος 4 m, καλύτερα > 6 m)

Απόβλητα

- Ποσότητα αποβλήτων
- Σύσταση αποβλήτων και δομή (Θερμογόνος δύναμη)

Αέρας

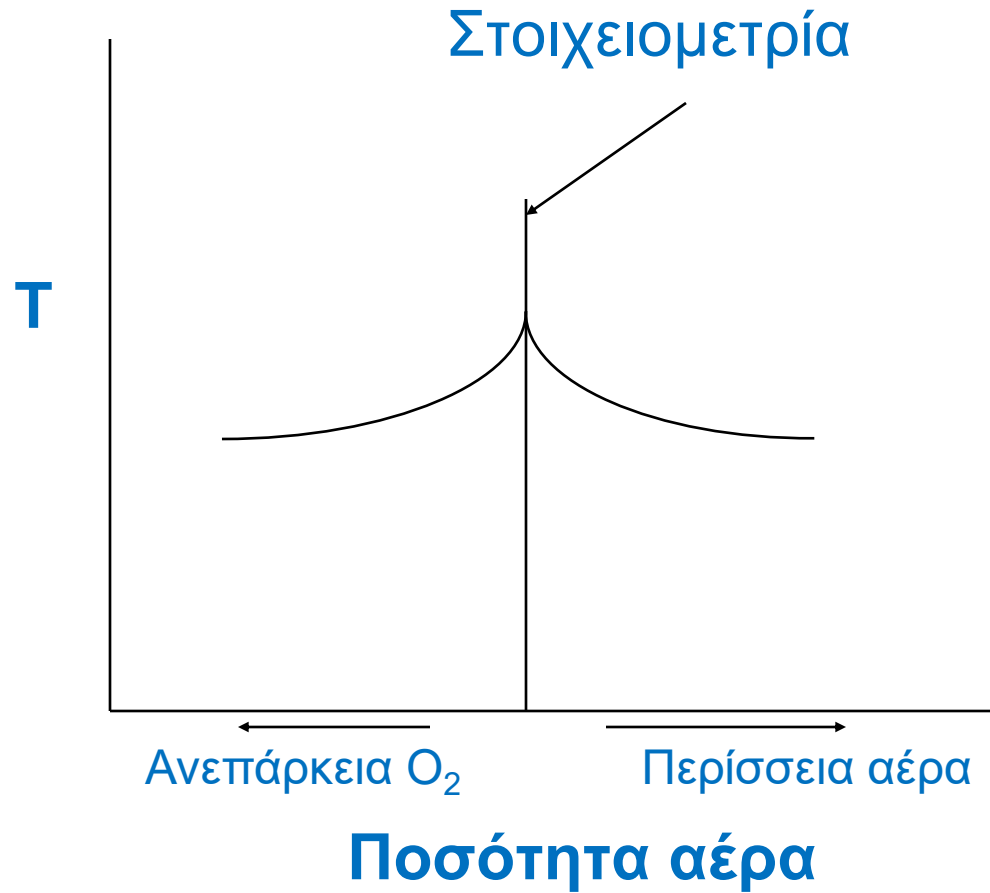
- Ποσότητα παροχής αέρα (περίπου 4.5 – 5 φορές της ροής αποβλήτων)
- Θερμοκρασία αέρα



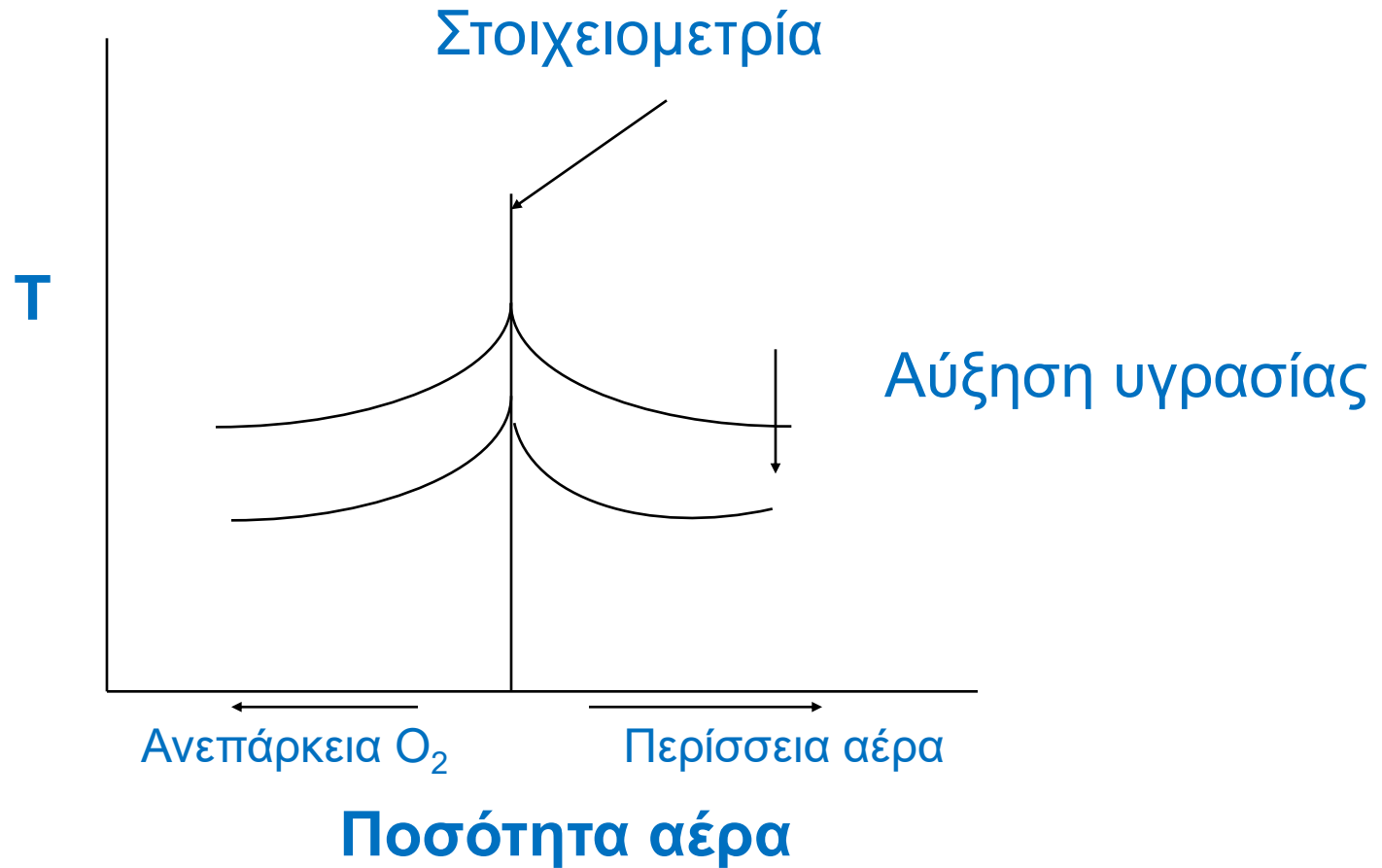
Ο κανόνας των 3Ts

- Τα 3Ts (time, temperature, turbulence) στους θερμικούς αντιδραστήρες
- Time (χρόνος παραμονής): δευτερόλεπτα για αέρια, λεπτά έως ώρες για στερεά
- Temperature (θερμοκρασία): 1000 °C (> 1000 °C για επικίνδυνα απόβλητα)
- Turbulence (ανάμιξη): τα στερεά αναμιγνύονται ικανοποιητικά σε ρευστοποιημένες κλίνες; αποφυγή ζωνών χαμηλής ανάμιξης

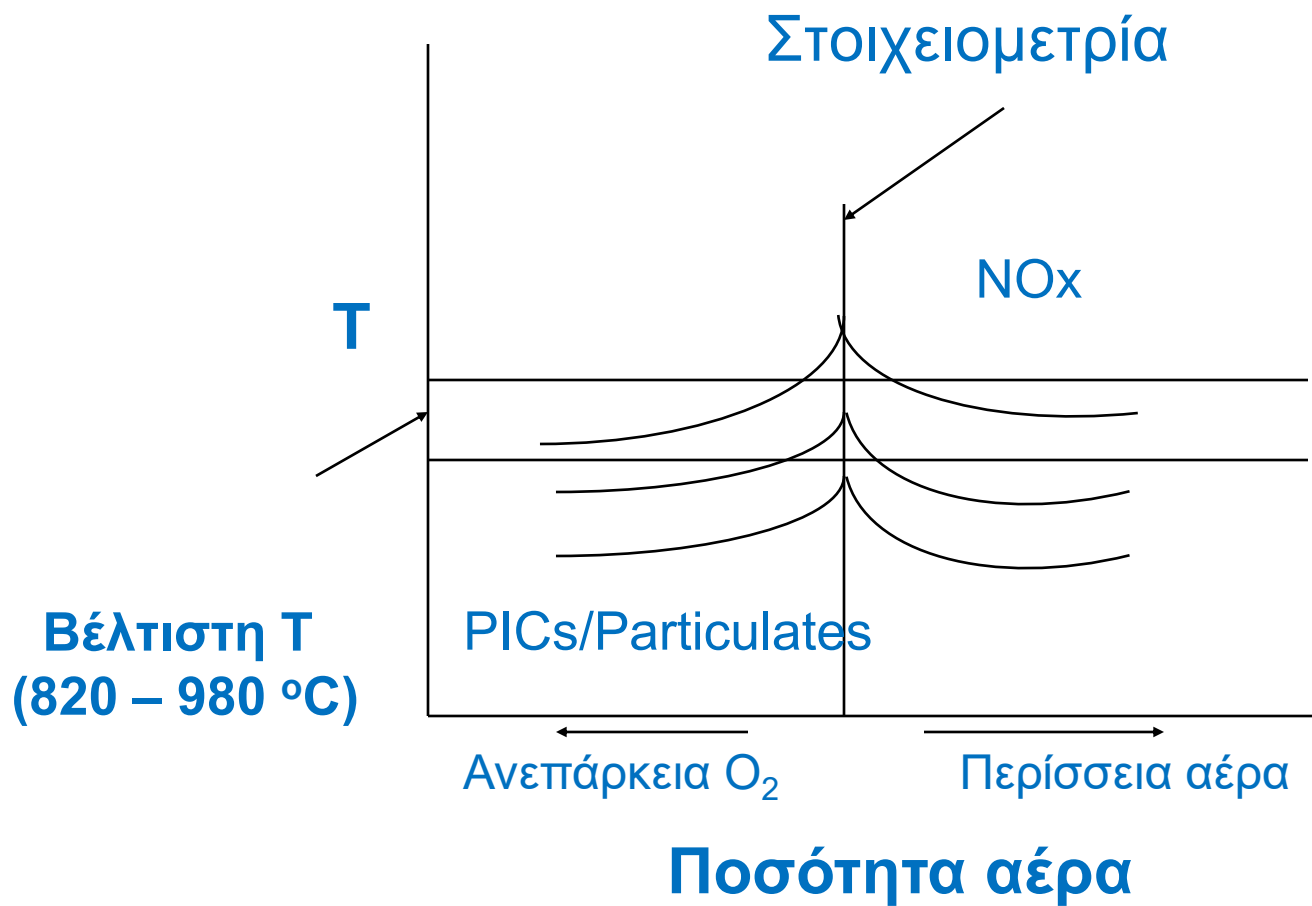
Ο ρόλος του αέρα



Ο ρόλος του αέρα



Ο ρόλος του αέρα



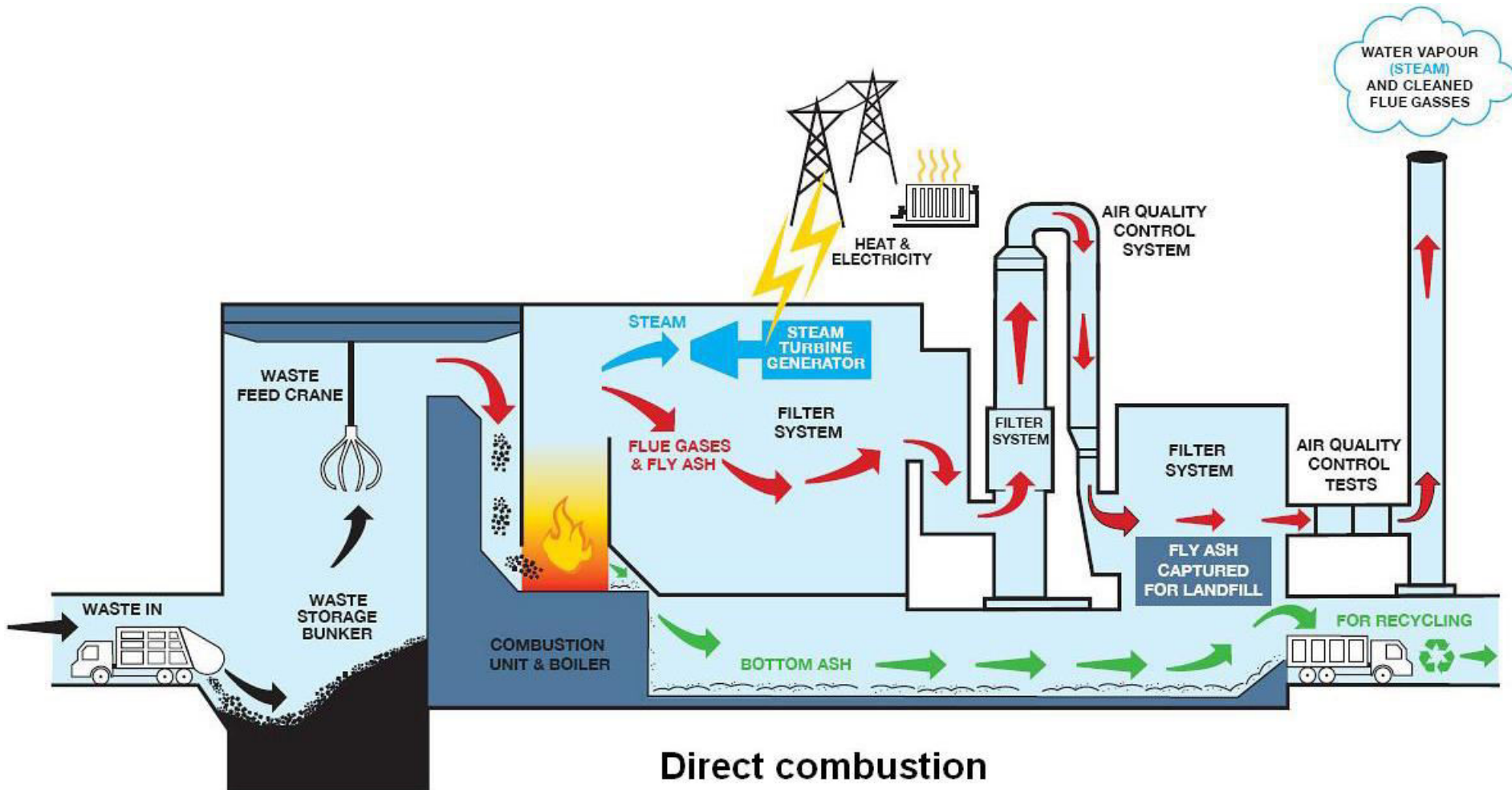
Συχνοί τύποι μονάδων καύσης

Είδος αποβλήτου	Τύπος μονάδας
ΑΣΑ	Κινούμενες εσχάρες
Επικίνδυνα απόβλητα	Περιστρεφόμενος κλίβανος
Ενεργός ιλύς, RDF	Ρευστοποιημένη κλίνης

Τύποι συστημάτων αποτέφρωσης

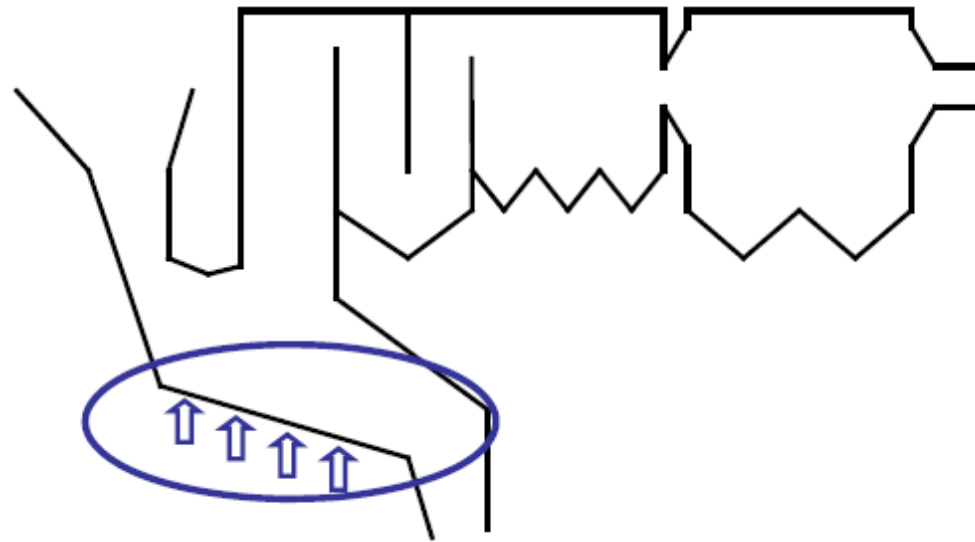
- Σύστημα αποτέφρωσης Mass-fired (Mass-burn)
 - Σύμμεικτα ΑΣΑ
 - Δέχεται ακόμα και επικίνδυνα
 - Σύστημα εσχαρών
- Σύστημα αποτέφρωσης RDF-fired
 - Κινούμενες εσχάρες ή ρευστοποιημένης κλίνης
 - Μικρότερο μέγεθος (λόγω υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης του RDF)
 - Ευκολότερος έλεγχος λόγω ομοιογένειας υλικού
 - Απομάκρυνση μετάλλων και άλλων υλικών κατά τη παρασκευή του RDF

Σύστημα αποτέφρωσης Mass-fired



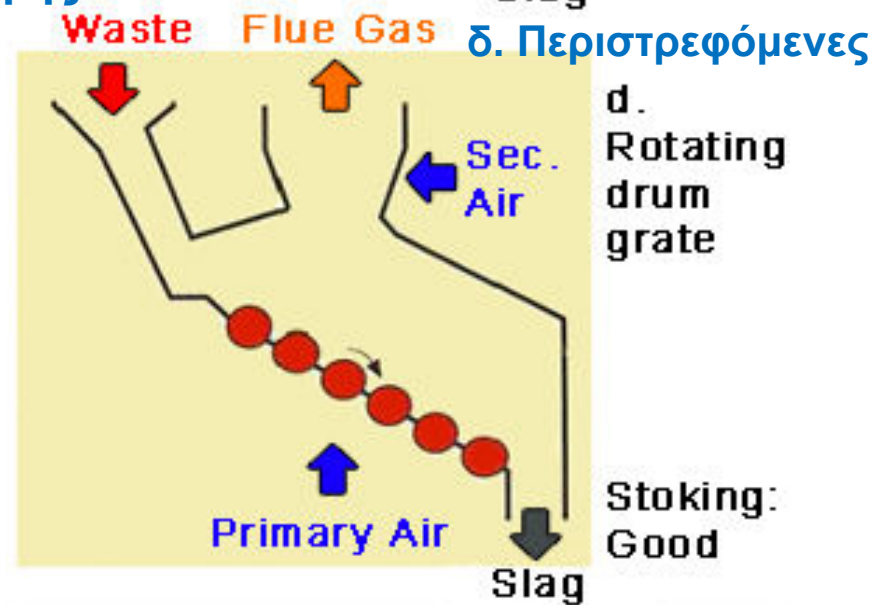
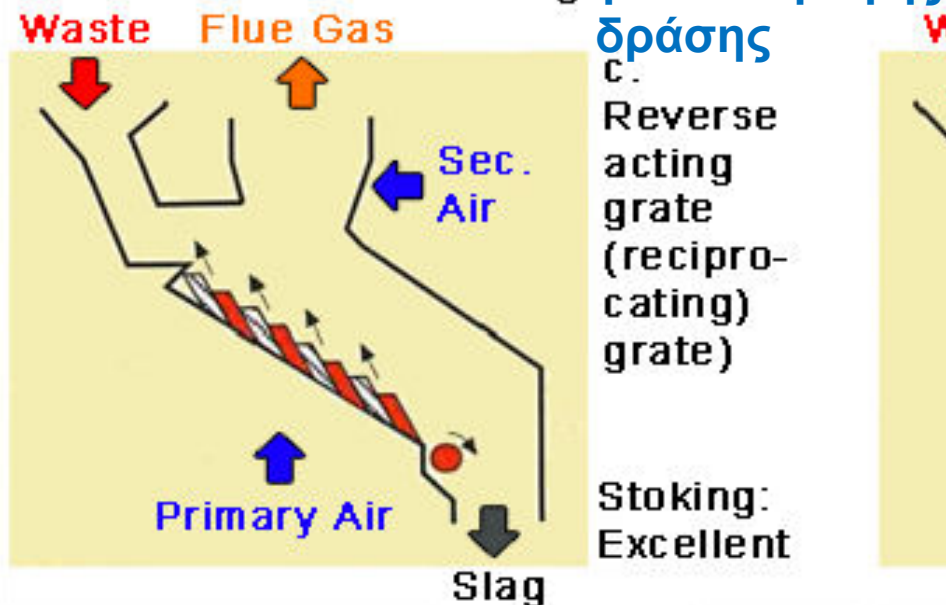
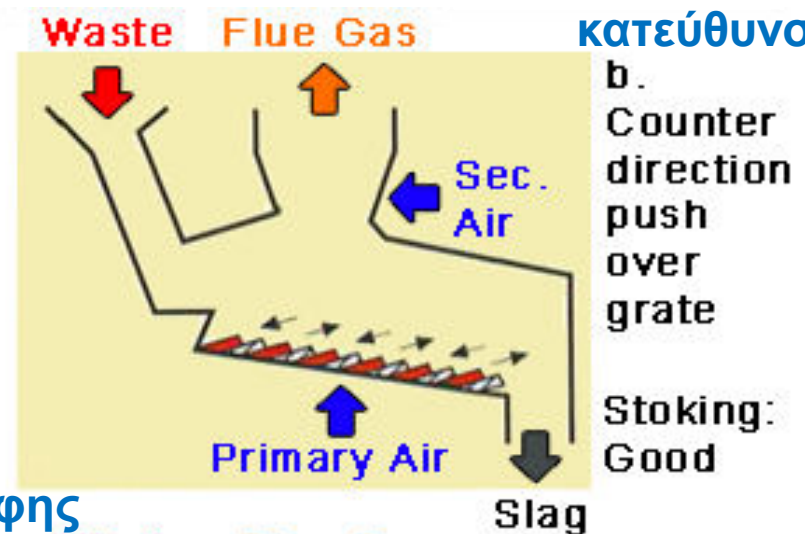
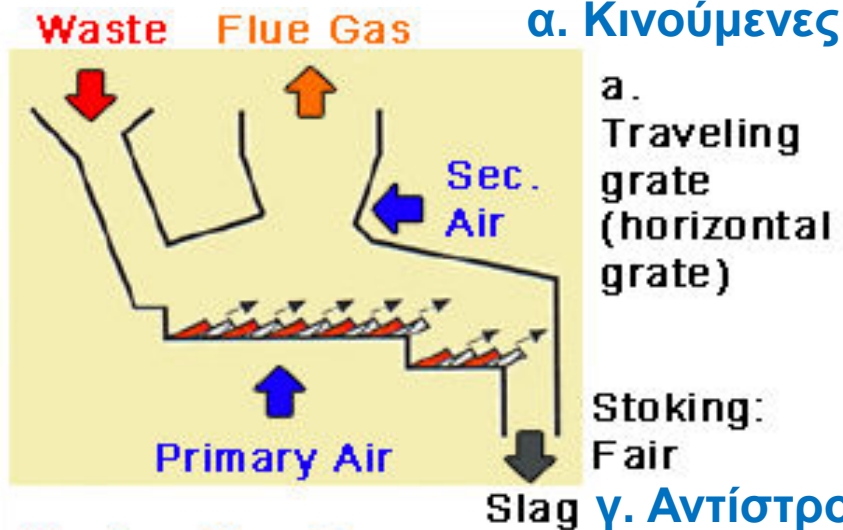
Σύστημα εσχάρων

- Για τη μεταφορά, μίξη και στρωματοποίηση του αποβλήτου
- Παροχή και διανομή αέρα αποτεφρωτήρα
- Προηγμένος έλεγχος, feedback loops, κλπ.
- Σημαντικό για εκπομπές, υπολείμματα, συντήρηση

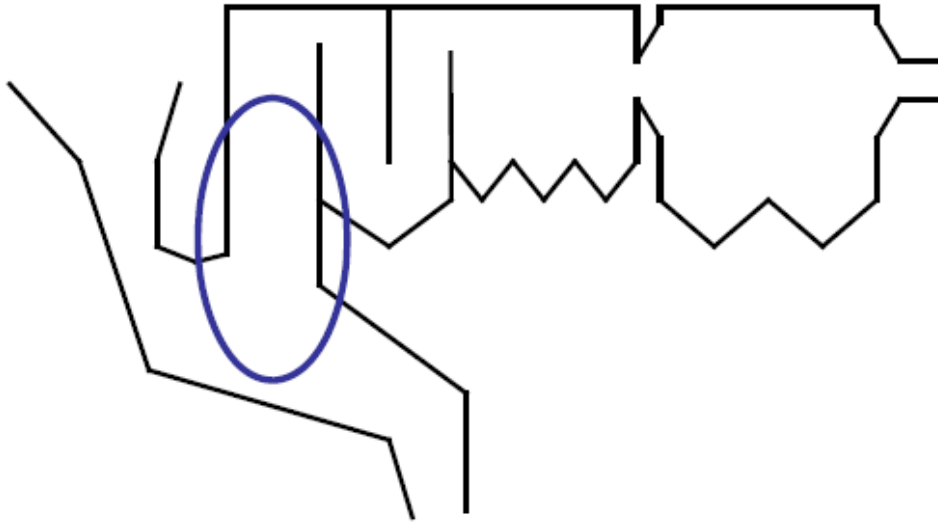


Τύποι εσχαρών

β. Αντίθετης κατεύθυνσης



Φούρνος/ δευτερογενής θάλαμος καύσης

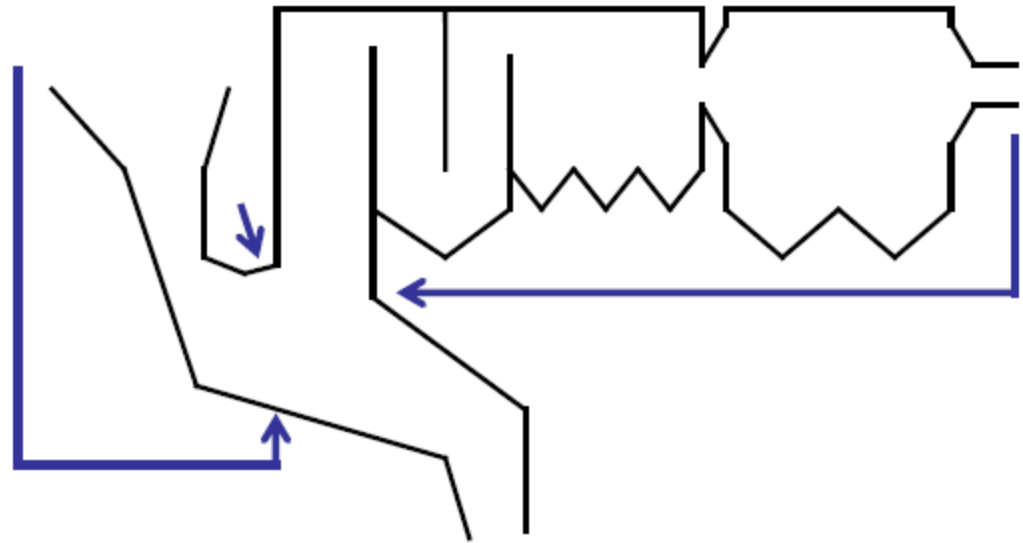


- Ικανοποιητικός χρόνος παραμονής (2 sec στους 850 °C)
- Ταχύτητα απαερίων: < 3.5-4 m/sec
- Αντιδράσεις καύσης αερίων
- Ανάμιξη (Turbulence)
- Θερμοκρασία φούρνου: 1000 – 1200 °C

- Υλικά (κεραμικά, μίγματα μετάλλων, σωλήνες με νερό)
- Υψηλό ρίσκο διάβρωσης
- CFD (computational fluid dynamics) μοντέλα για καλύτερη κατανομή θερμοκρασίας και χρόνων παραμονής

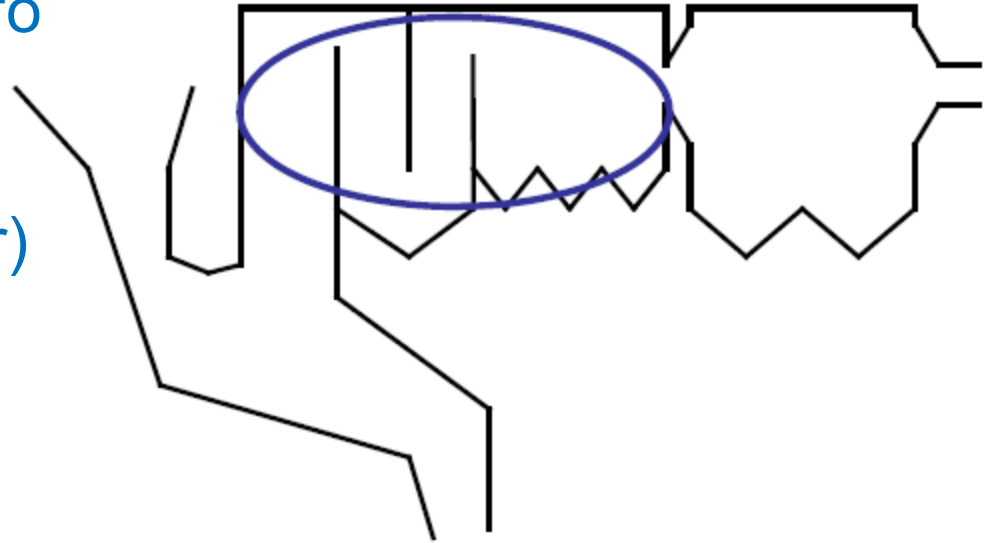
Αέρας καύσης

- ✓ Ανακύκλωση απαερίων (υψηλότερη απόδοση, λιγότερα απαέρια, μείωση εκπομπών)
- ✓ Κύρια/ δευτερογενής εισροή αέρα (συνθήκες χαμηλής πίεσης στο θάλαμο αποθήκευσης ΑΣΑ)
- ✓ Συμπληρωματικό καύσιμο (διατήρηση πάνω των 850 °C)



Ανάκτηση ενέργειας / boiler

- Μεταφορά της ενέργειας από τα απόβλητα στο νερό
- Τρεις τύποι boiler:
 - Ζεστού νερού (hot-water)
 - Χαμηλής πίεσης ατμού (low pressure steam)
 - Υψηλής πίεσης ατμού (high pressure steam)

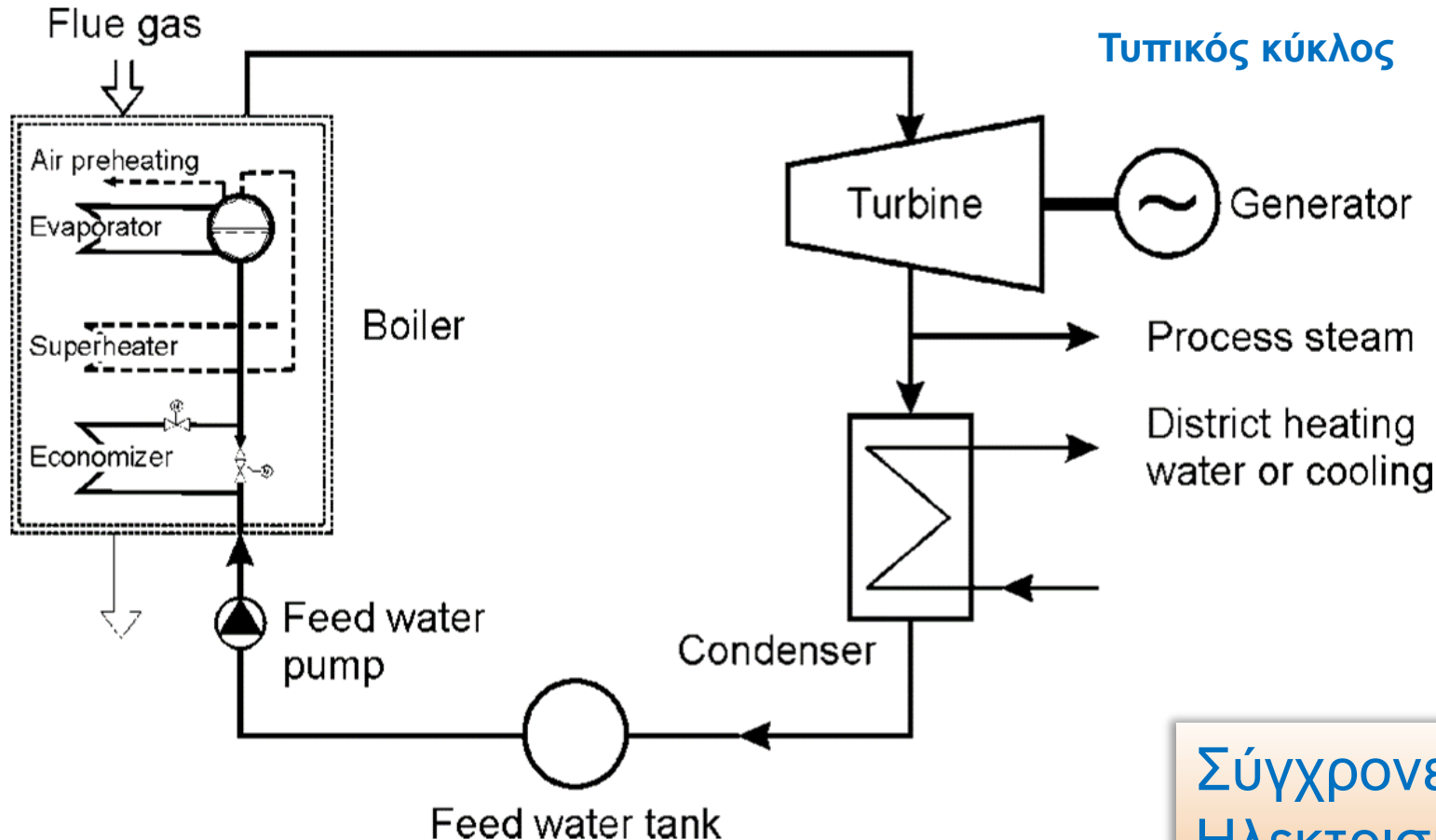


Ενεργειακά προϊόντα :

- ☐ Ζεστό νερό για θέρμανση (110-160 °C)
- ☐ Ατμός για βιομηχανίες (120-250 °C, 20 bar)
- ☐ Ηλεκτρισμός (400 °C, 40 bar)

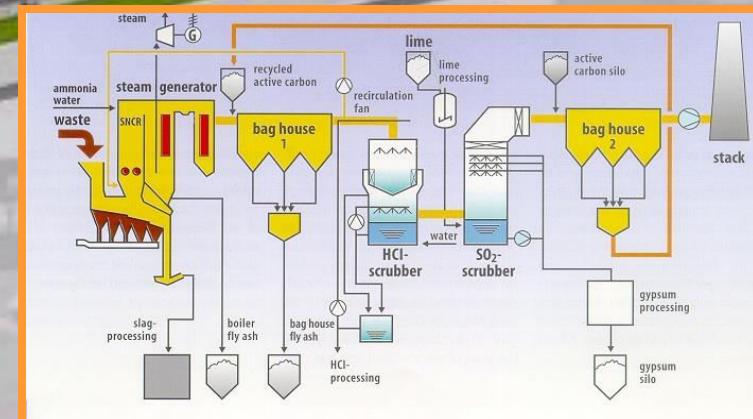
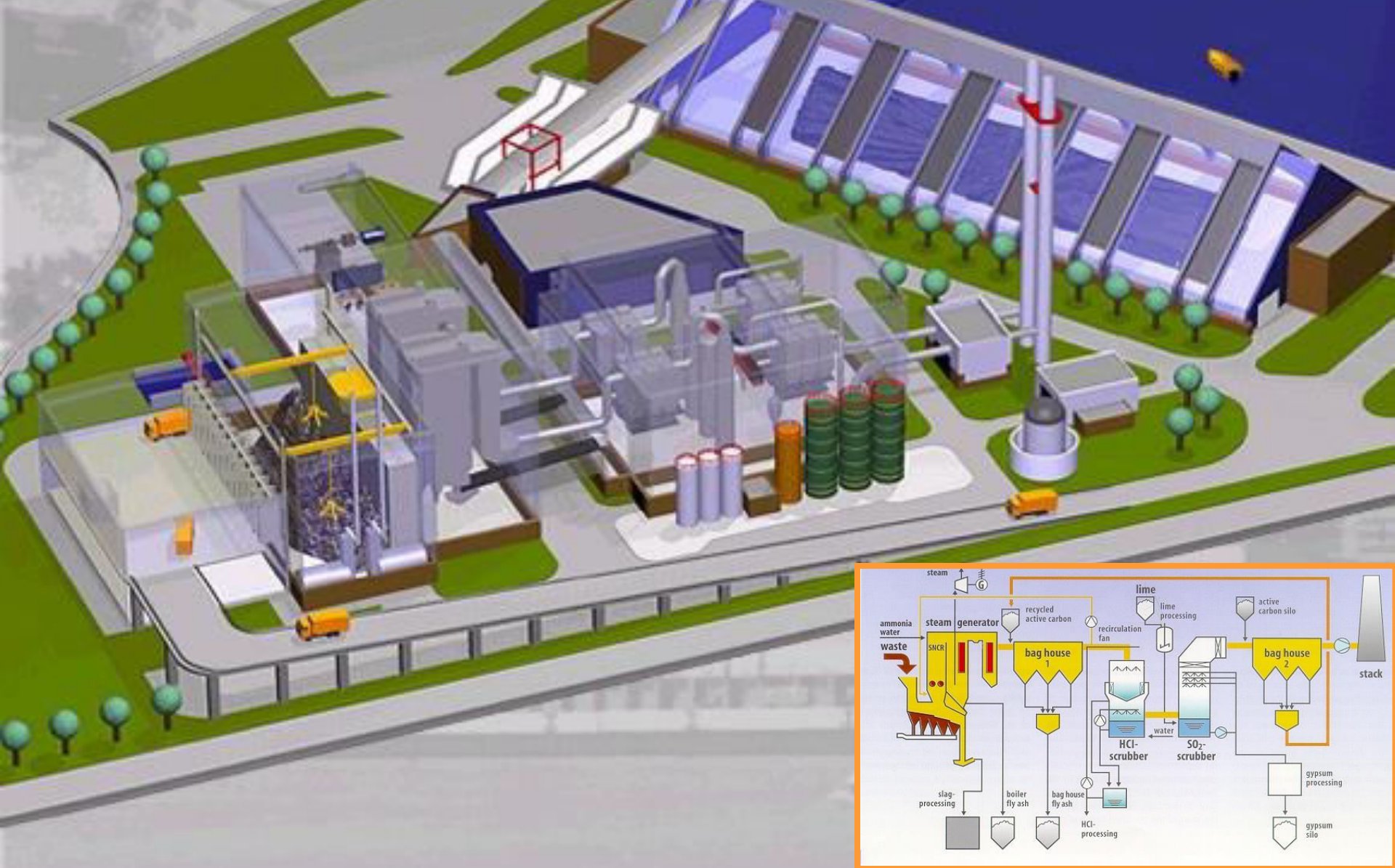
Ενεργειακή απόδοση

Τυπικός κύκλος

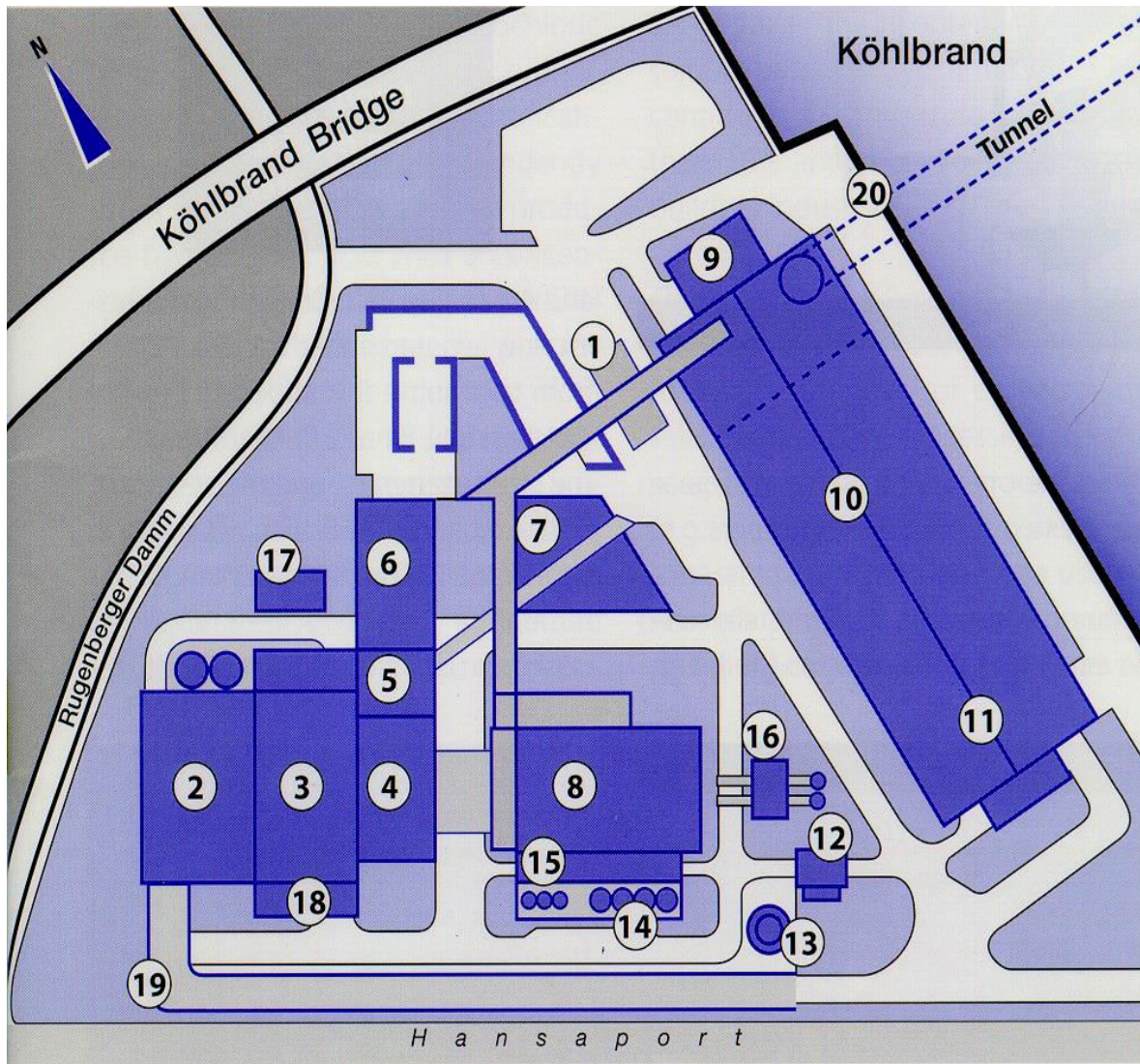


Σύγχρονες μονάδες:
Ηλεκτρισμός: 24%
Θέρμανση: 63%

Waste to Energy Plant „Rugenberger Damm“ (since 1998)



Infrastructure of Incineration Plant Rugenberger Damm



- 1 scale, safety guard
- 2 delivery hall, store room
- 3 waste bunker
- 4 steam generator
- 5 control room, fire control center
- 6 steam turbine
- 7 office building, information center
- 8 flue gas cleaning
- 9 cleaning of cooling water, pumps
- 10 slag storage
- 11 slag shipping
- 12 delivery of diesel oil, ammoniacal water
- 13 tank for diesel oil
- 14 storage of ammoniacal water und hydrochloric acid
- 15 shipping bay
- 16 emission measurements, laboratory
- 17 process water basin
- 18 auxiliary steam generators
- 19 natural gas pressure reduction
- 20 tunnel with steam pipe

Waste Recovery Plant „Rugenberger Damm“, Hamburg



Operator	MVR Müllverwertung Rugenberger Damm GmbH & Co. KG
Operating time	Since 1999
Waste Capacity	2 time 21,5 Tn/h
Flow rate per year	320.000 Tn/a
Caloric value of waste	14.000 kJ/kg waste
Thermal activity	115 MW at $H_u = 8.000$ kJ/kg waste
Steam condition	425°C / 43 bar
Steam amount	2 time 68 Mg steam per h
Energy utilisation	Power-Thermal coupling / 80 MW thermal and 27 MW elektrical
Flue gas purification equipment	SNCR / fabric-debuster / 2stage Wetsorption / Flugstromreaktor
Waste for utilisation	Ashes, HCl, cement dust

Brescia (Italy)



Brescia (Italy)



Vienna (Austria)



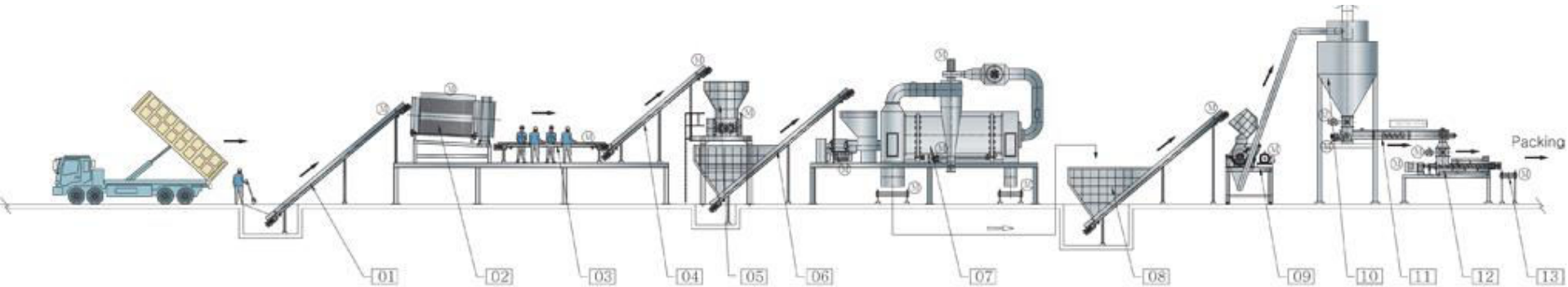
Amsterdam (The Netherlands)



Refuse Derived Fuel (RDF)

- Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με αποτεφρωτήρες ρευστοποιημένης κλίνης (fluidised bed)
- Καλύτερη χρήση του καύσιμου
- Αυξημένη ενεργειακή απόδοση
- Απαιτείται διαχωρισμός και μείωση μεγέθους των αποβλήτων
- Χρειάζεται μεγαλύτερη επιφάνεια χώρου

Refuse Derived Fuel (RDF)



01.Slope conveyor

02.Magnetic tumbler

03.Manual sorting line

04.Crusher input conveyor

05.Crusher

06.Hopper and dry separator input conveyor

07.Drier and specific weight separator

08.Crusher supply hopper

09.Crusher

10.Applier input hopper

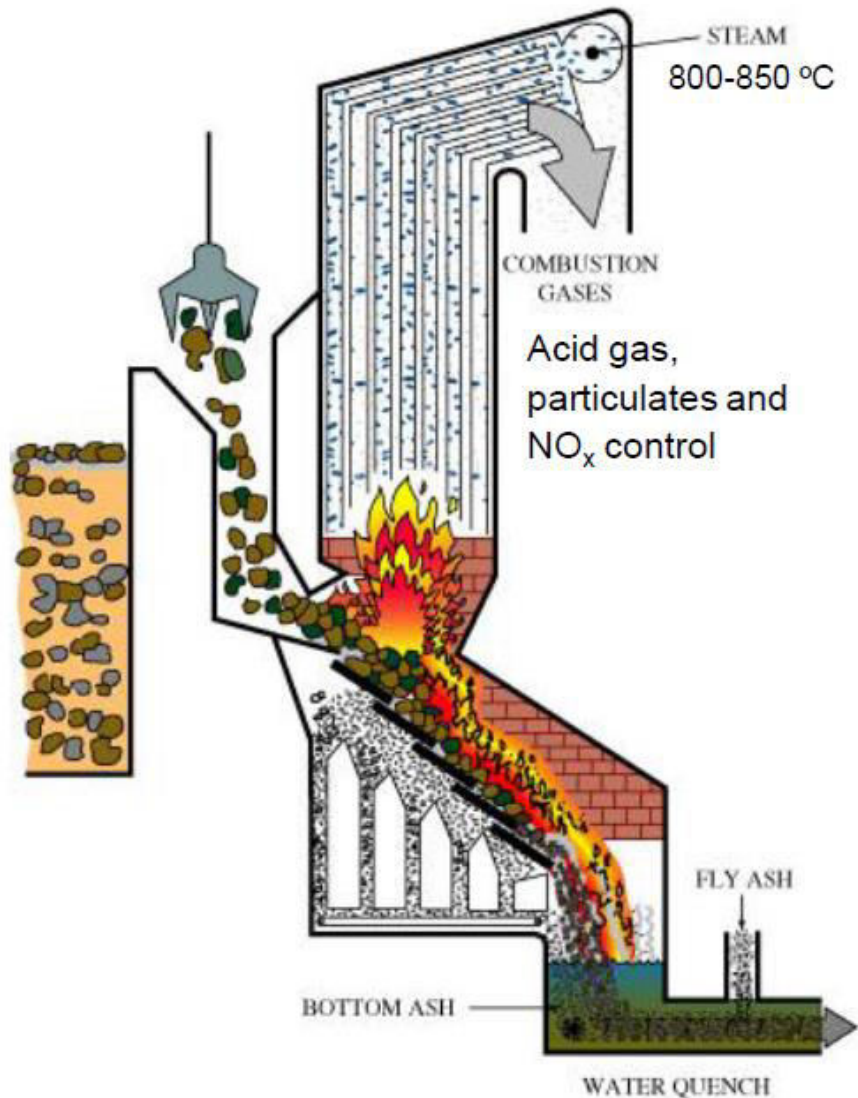
11. Conveyor

12. Press

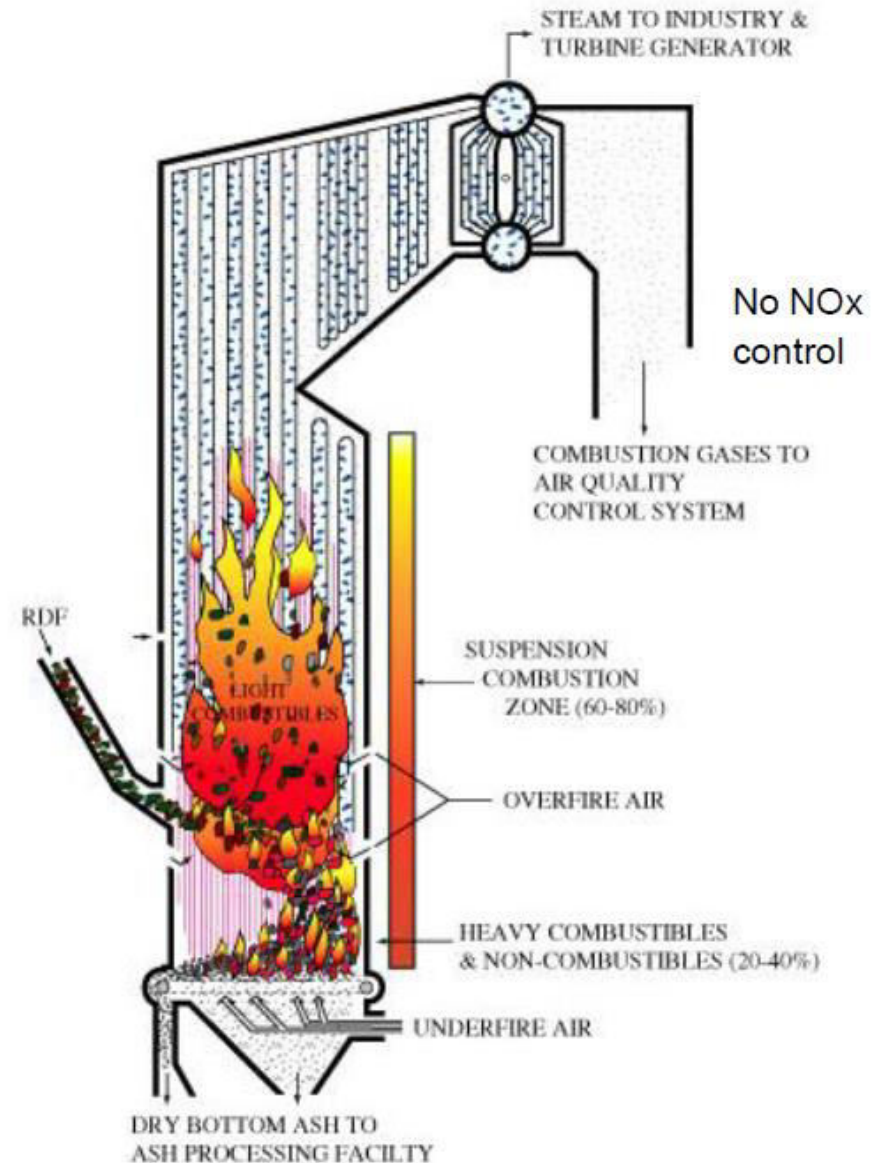
13.Packaging

Σύγκριση συστημάτων καύσης

Mass-fired combustion



RDF-fired boiler



Αποτεφρωτήρας ρευστοποιημένης κλίνης

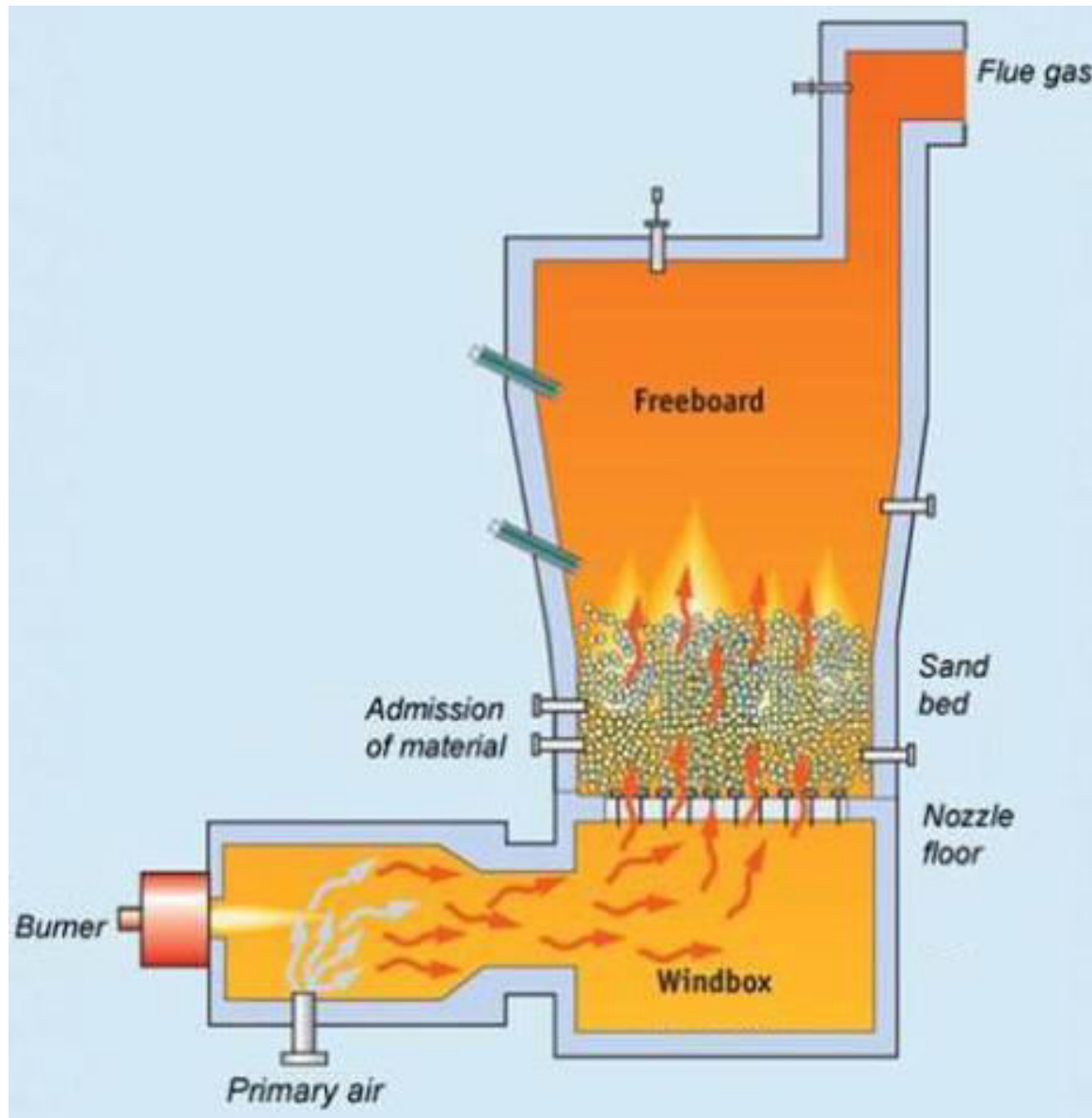
Fluidized Bed Combustion (FBC)

- FBC είναι ένα εναλλακτικό σύστημα αποτέφρωσης (κυρίως για ομογενοποιημένα απόβλητα).
- Αποτελείται από ένα κατακόρυφο κύλινδρο με ένα στρώμα άμμου, ένα δίσκο συγκράτησης (πλάκα ισοκατανομής) και στόμια (nozzles) εισροής αέρα.
- Όταν ο αέρας εισέρχεται από τα στόμια, το στρώμα άμμου ομοιάζει με ρευστοποιημένη ύλη και διπλασιάζεται σε όγκο.
- Στην αρχή λειτουργίας, συμπληρωματικό καύσιμο (φυσικό αέριο ή πετρέλαιο) χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει τη θερμοκρασία στο στρώμα άμμου (800-950 °C).

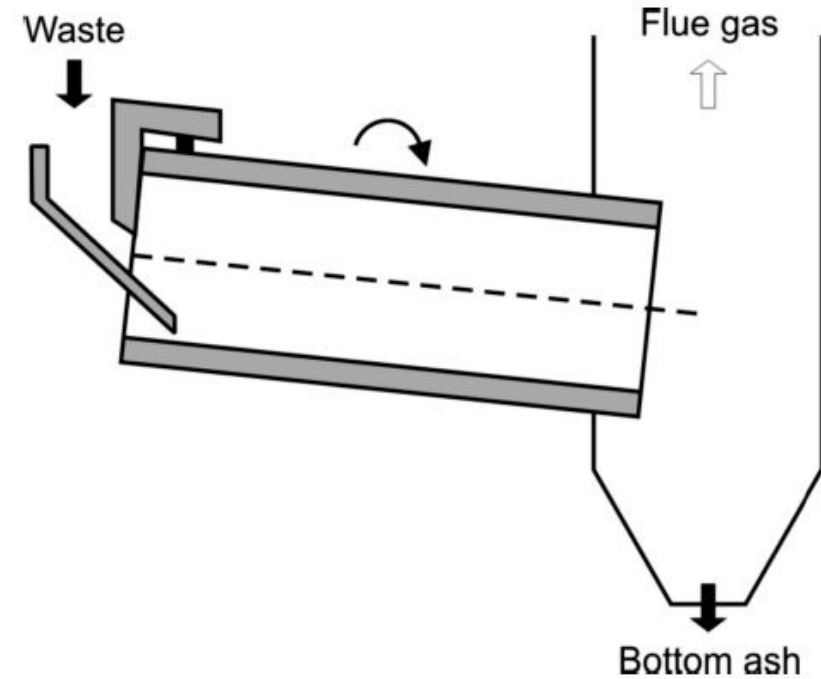
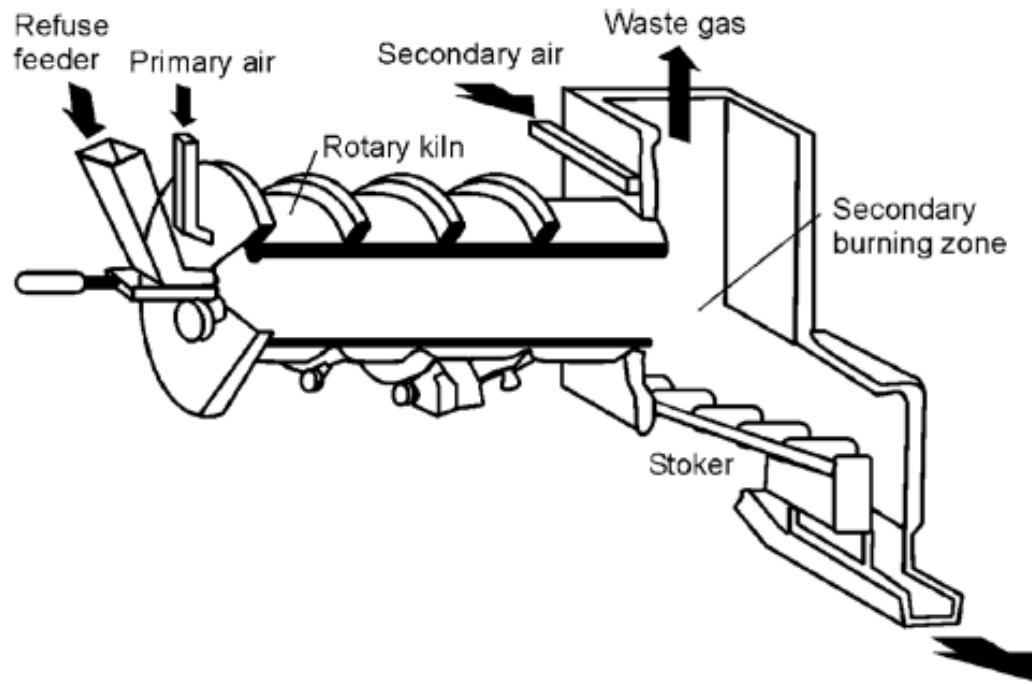
Αποτεφρωτήρας ρευστοποιημένης κλίνης

- Σχεδόν ισόθερμος αντιδραστήρας
- Καλή ανάμιξη στερεού-αέρα
- Τέλεια μεταφορά θερμότητας
- Υψηλός χρόνος παραμονής για στερεά
- 1,500 tonnes/d

Τυπικό σύστημα ρευστοποιημένης κλίνης



Περιστρεφόμενος κλίβανος

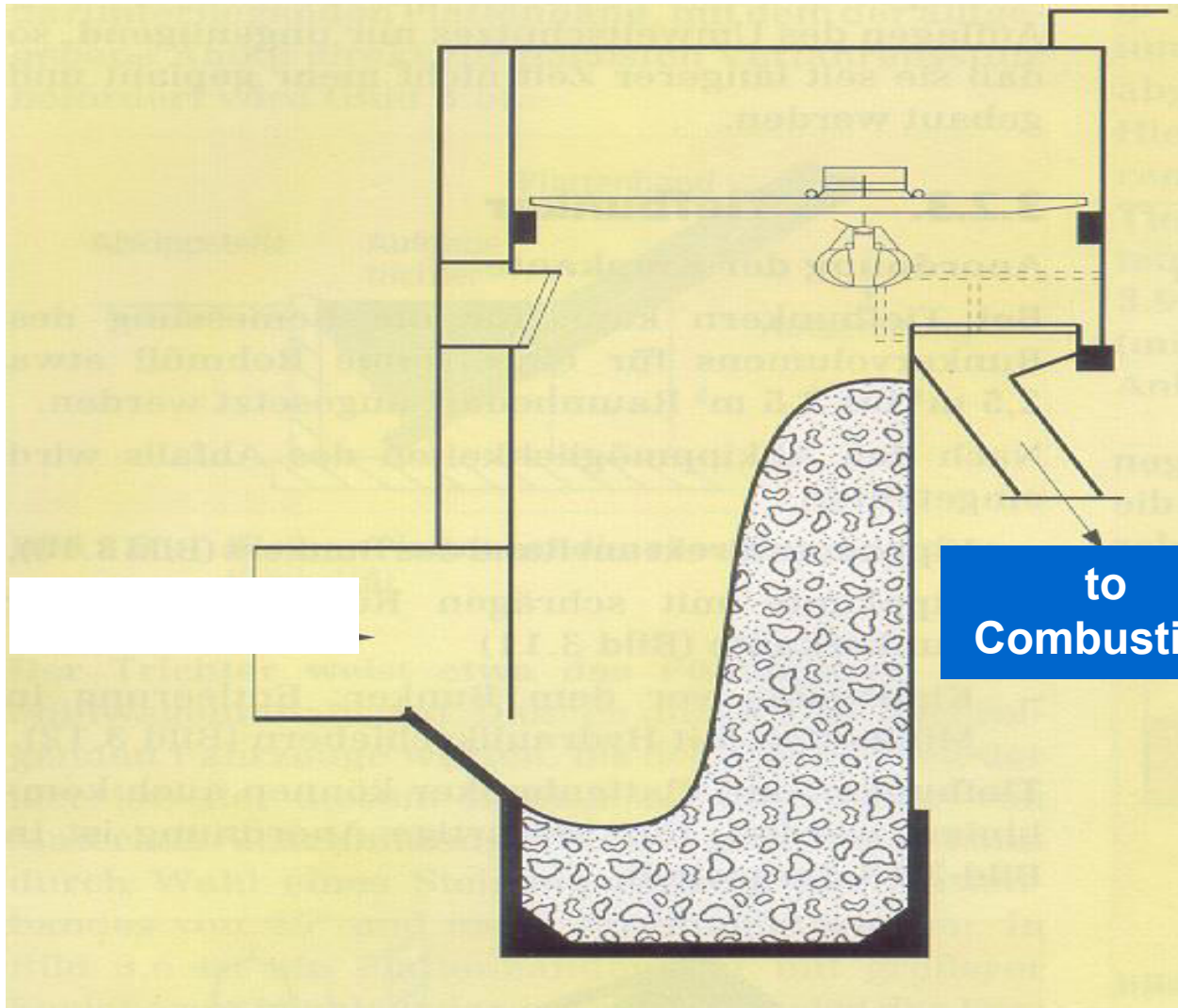


Μονάδα αποτέφρωσης

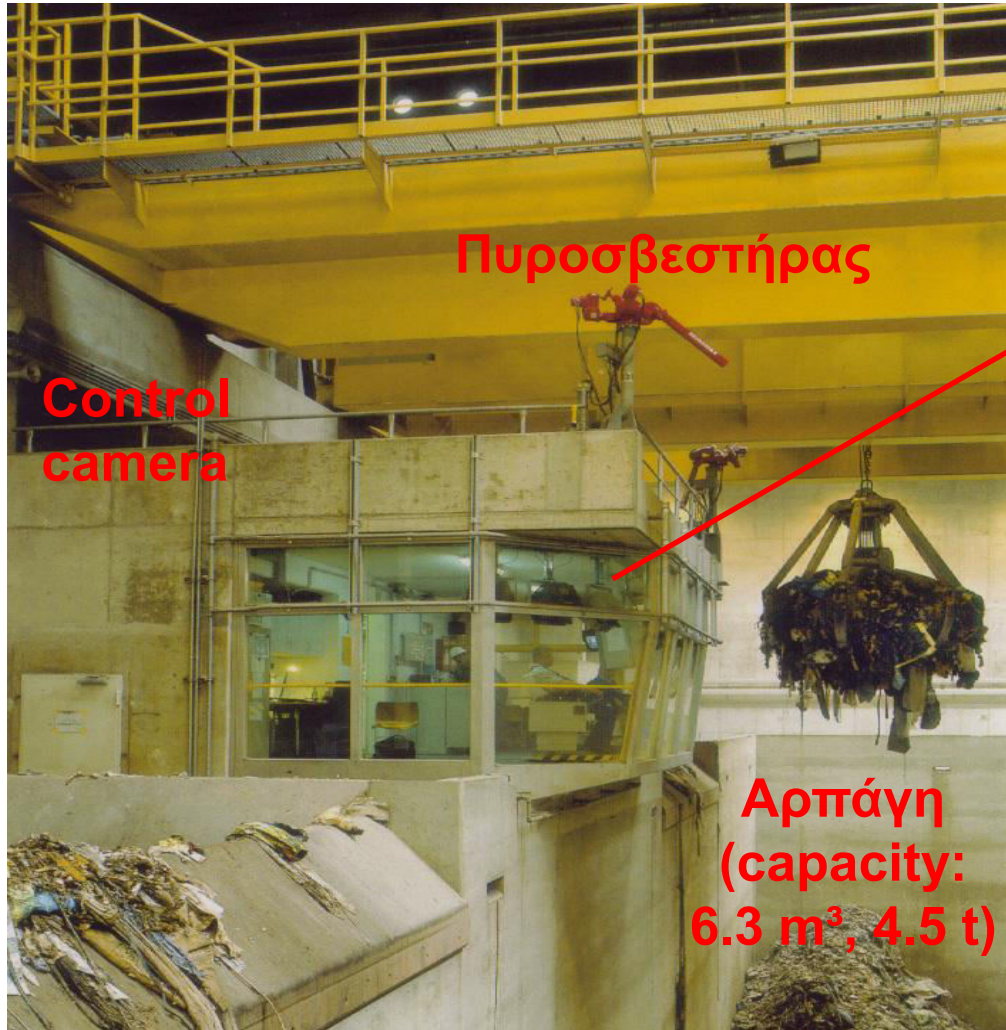
Χώρος υποδοχής



Χώρος αποθήκευσης χωρίς μεσαίο τοίχιο

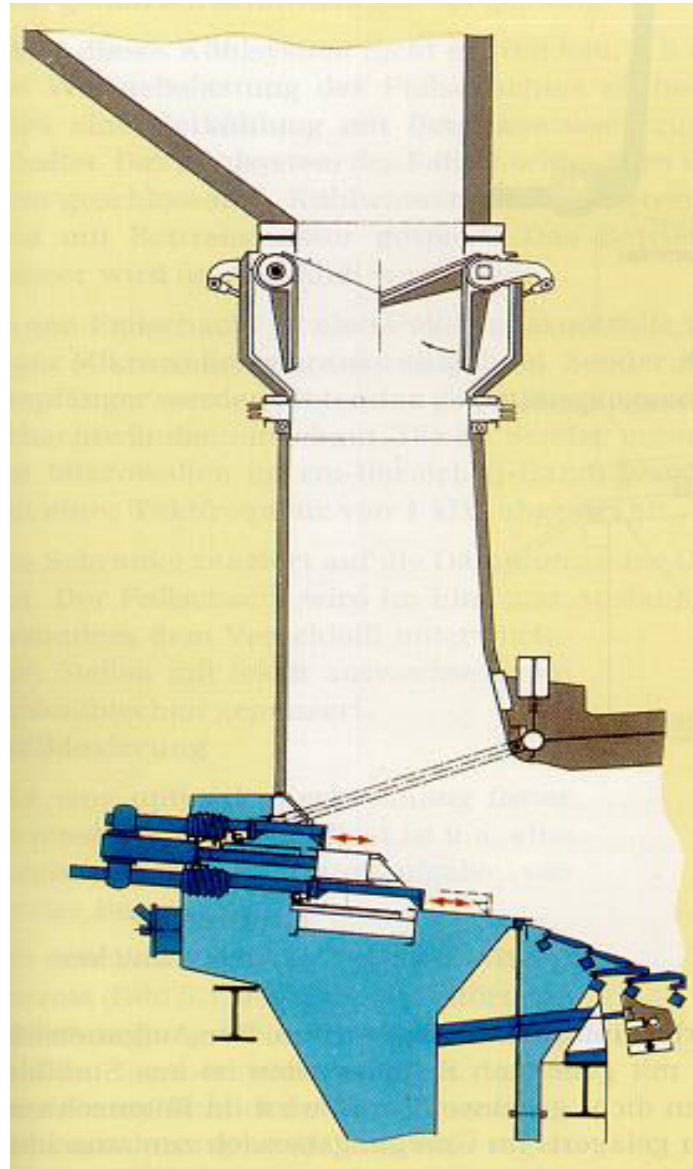


Χώρος αποθήκευσης και ελέγχου

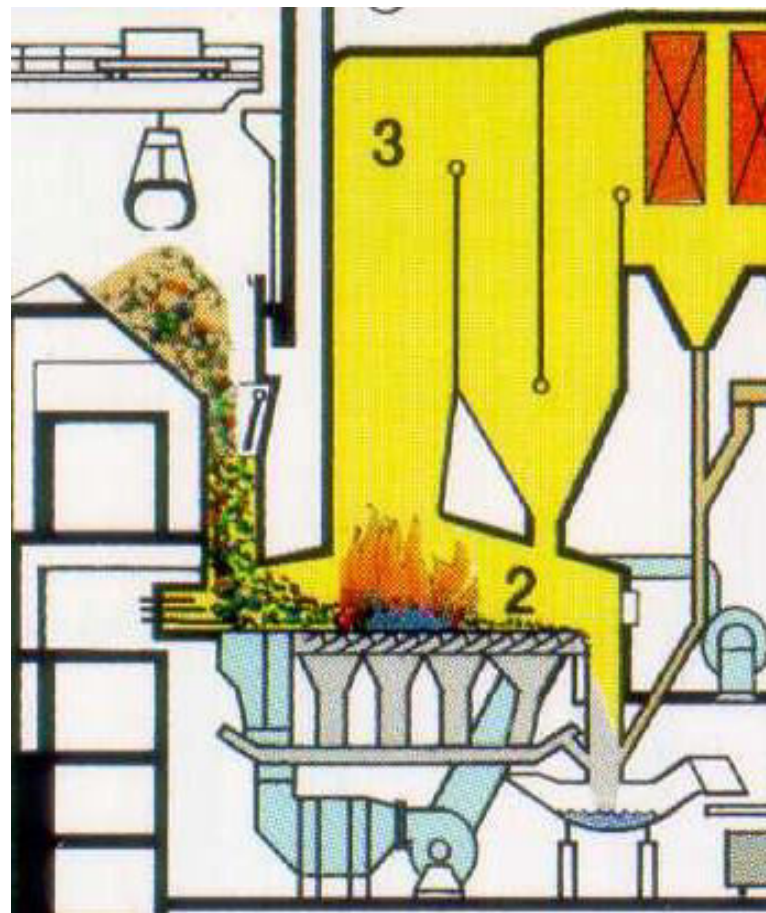


- Διατήρηση αποβλήτων για τροφοδοσία αποτεφρωτήρα (24 hours/day)
- Συνήθως αποθηκεύονται για 7 ημέρες

Τροφοδοσία σε σχήμα χωνιού με μηχανισμό κλεισίματος



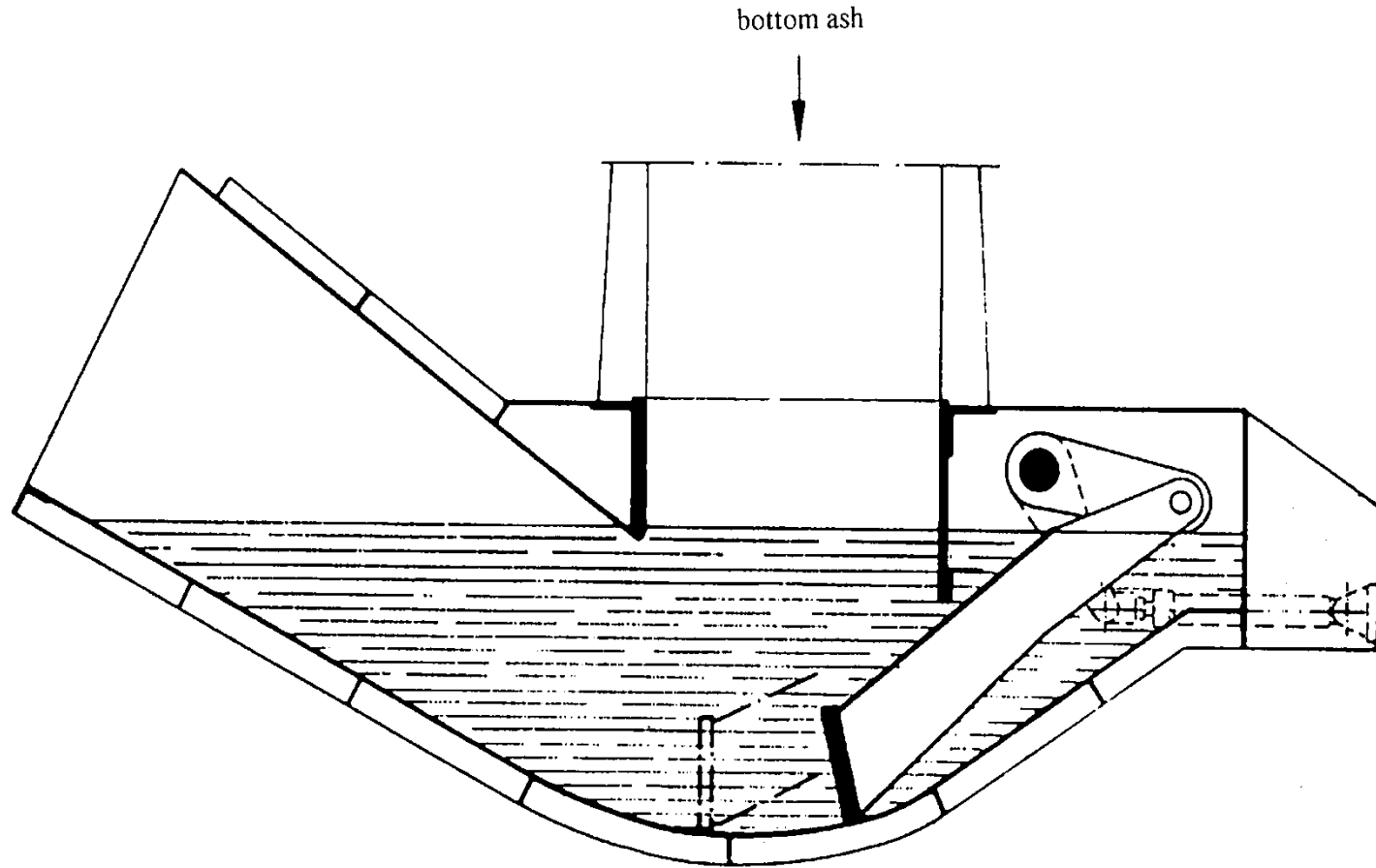
Σύστημα κινούμενων εσχαρών και σωλήνες με νερό



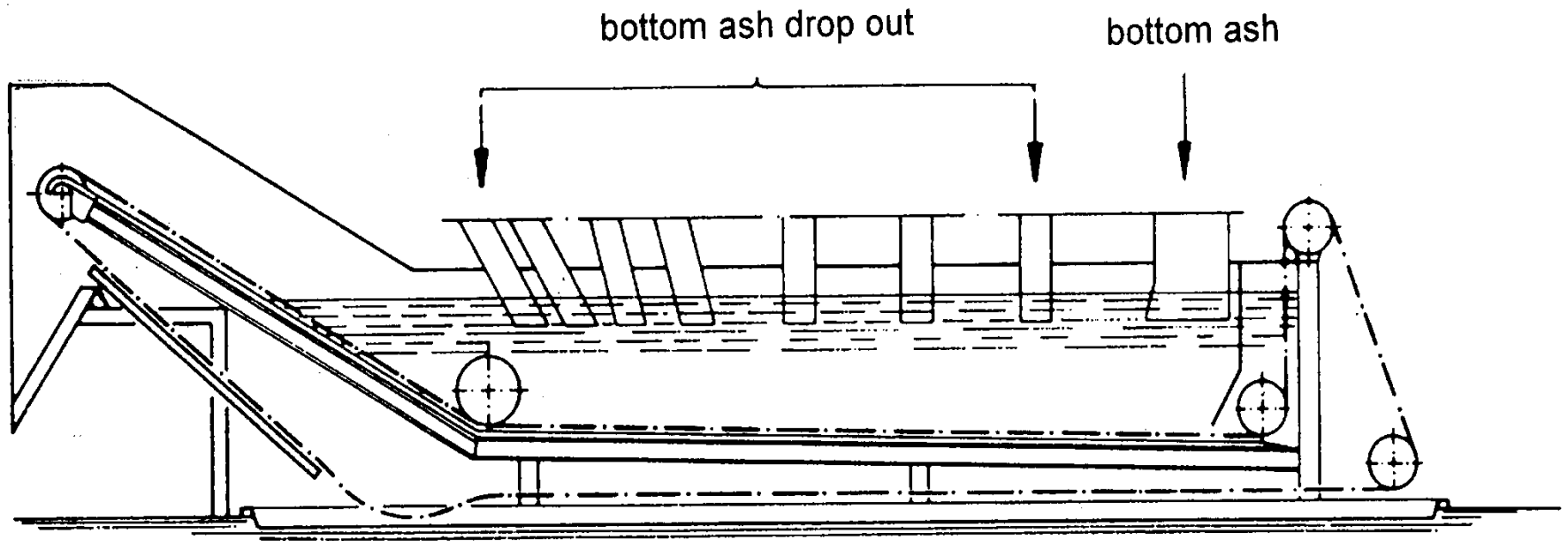
Θάλαμος Καύσης



Απομάκρυνση τέφρα βάσης με μηχανισμό (γουδί)



Απομάκρυνση τέφρα βάσης με μηχανισμό (ιμάντας)



Κεντρική αίθουσα ελέγχου



Συστήματα ανάκτησης θερμότητας

- Η ενέργεια μπορεί να ανακτηθεί από τα θερμά απαιρία που δημιουργούνται από την καύση ΑΣΑ και RDF με:
 - Συστοιχία σωλήνων νερού (Waterwall)
 - Boilers (λέβητες)
- Δημιουργείται ζεστό νερό ή/και ατμός.
- Ο ατμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για θέρμανση όσο και για παραγωγή ενέργειας
- Όταν χρησιμοποιούνται συστήματα ανάκτησης θερμότητας, 50-100% περίσσεια αέρα είναι αρκετή (μείωση όγκου συστημάτων καθαρισμού αεαερίων)

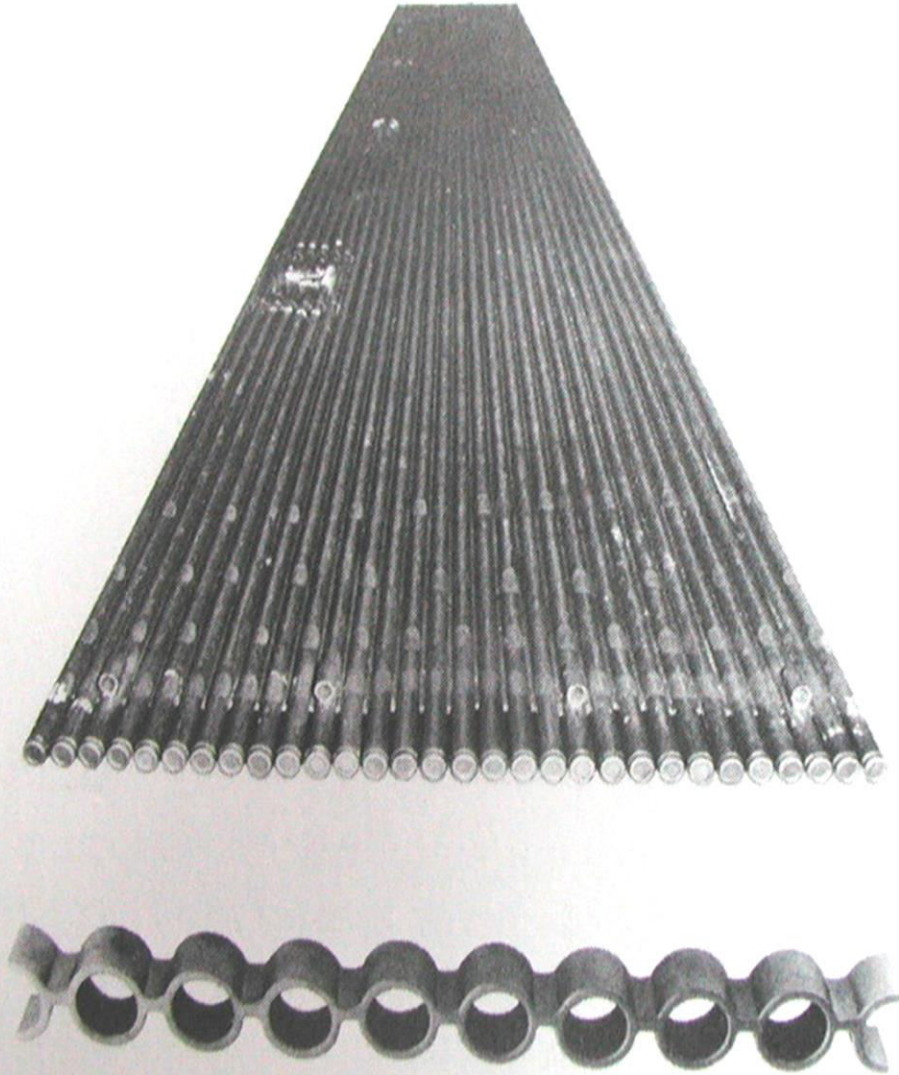
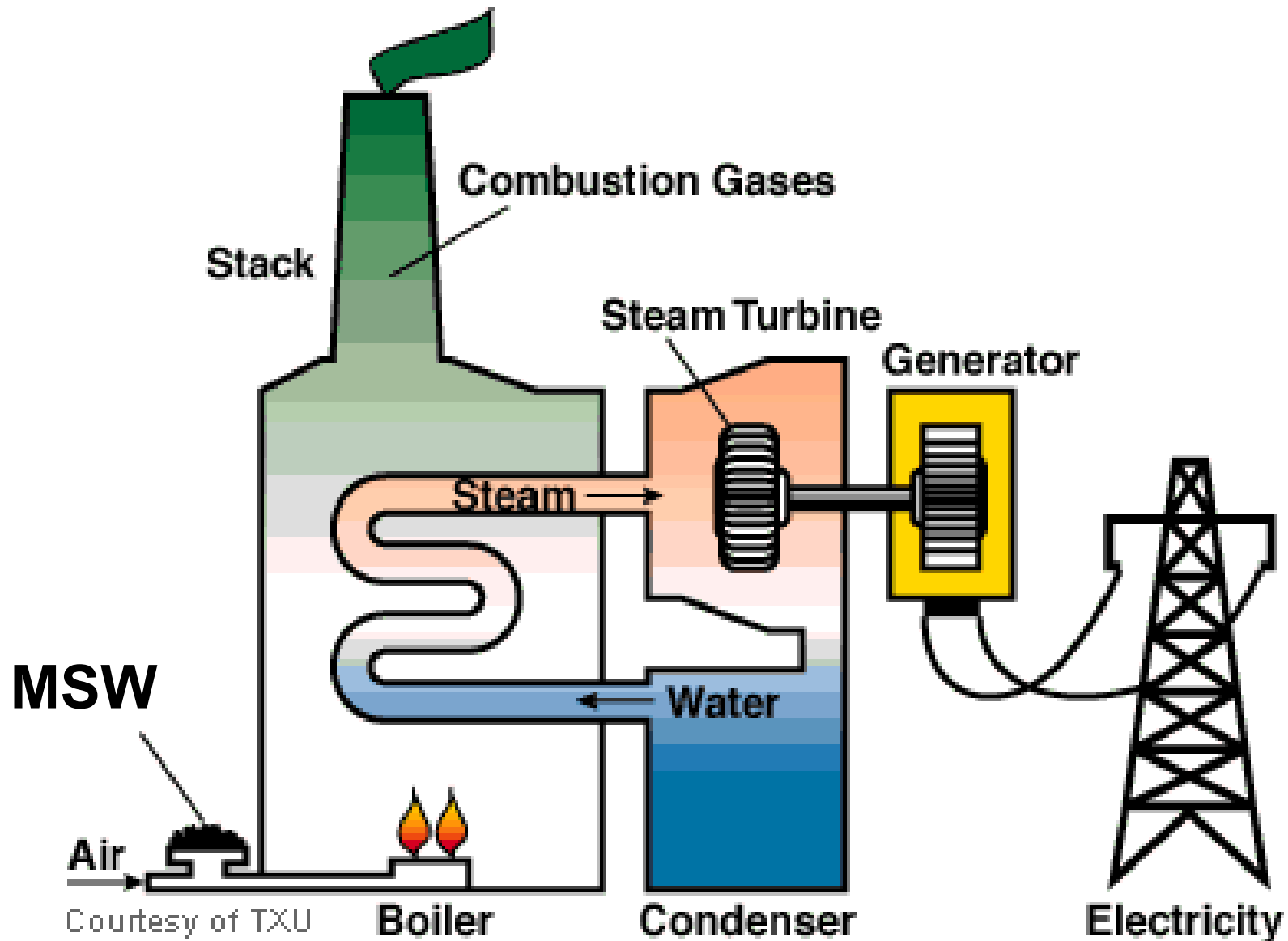


FIGURE 13-7
Section through a waterwall. (Courtesy of Combustion Engineering, Inc.)

Τουρμπίνες ατμού (steam turbines)



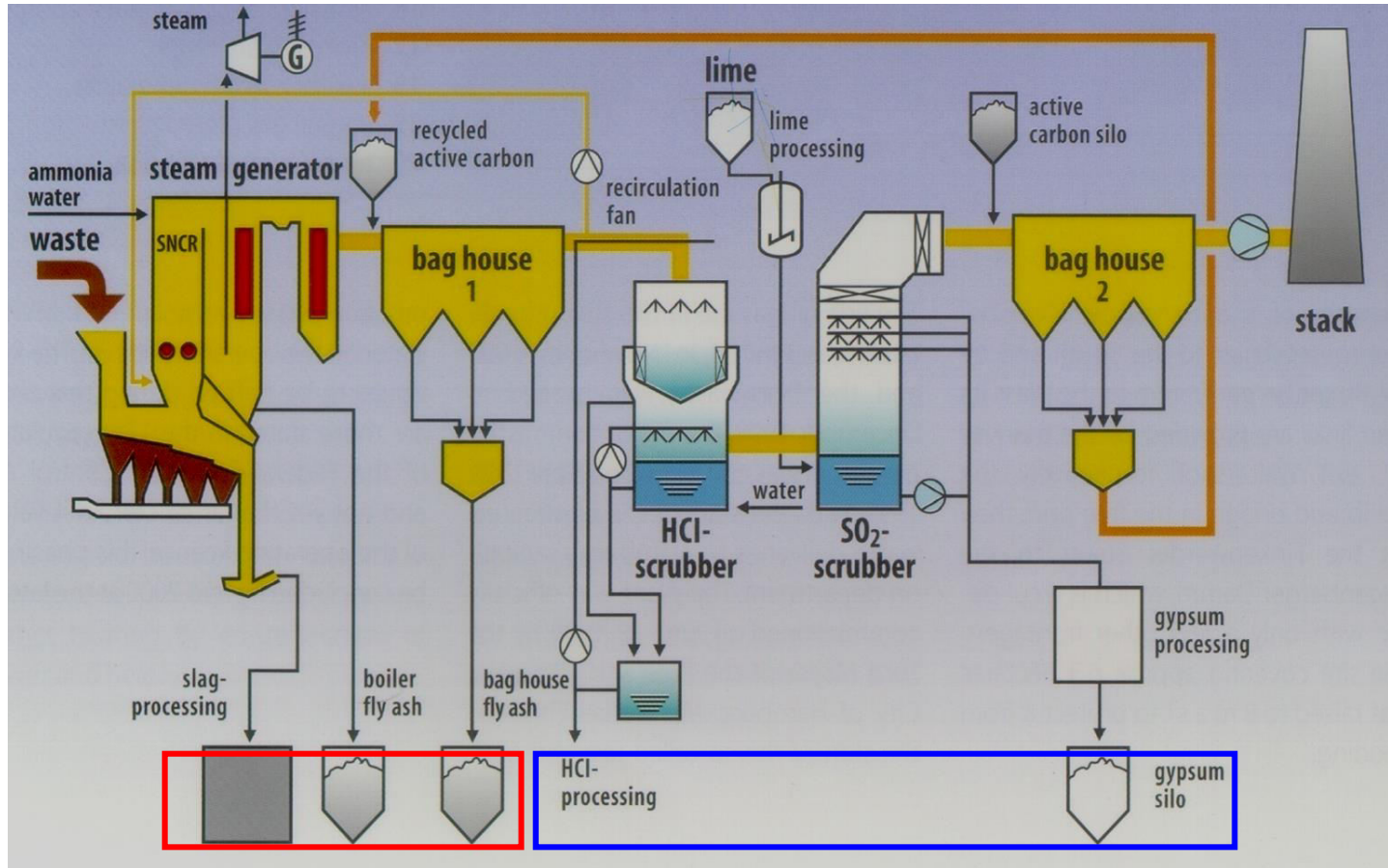
Σύστημα παραγωγή ενέργειας



Απώλειες ενέργειας κατά τη διάρκεια της αποτέφρωσης

Απαέρια από την καπνοδόχο (sensible and latent heat)	6 % to 20 %
Άκαυτα στερεά υπολείμματα (sensible heat of the slags)	0,5 % to 3,5 %
Αγωγή θερμότητας και ακτινοβολίας (radiation loss)	0,5 % to 5 %
Άκαυτα συστατικά στα απαέρια (CO, tar- and soot)	0 % to 3 %
Συνολικά	7 % to 31,5 %

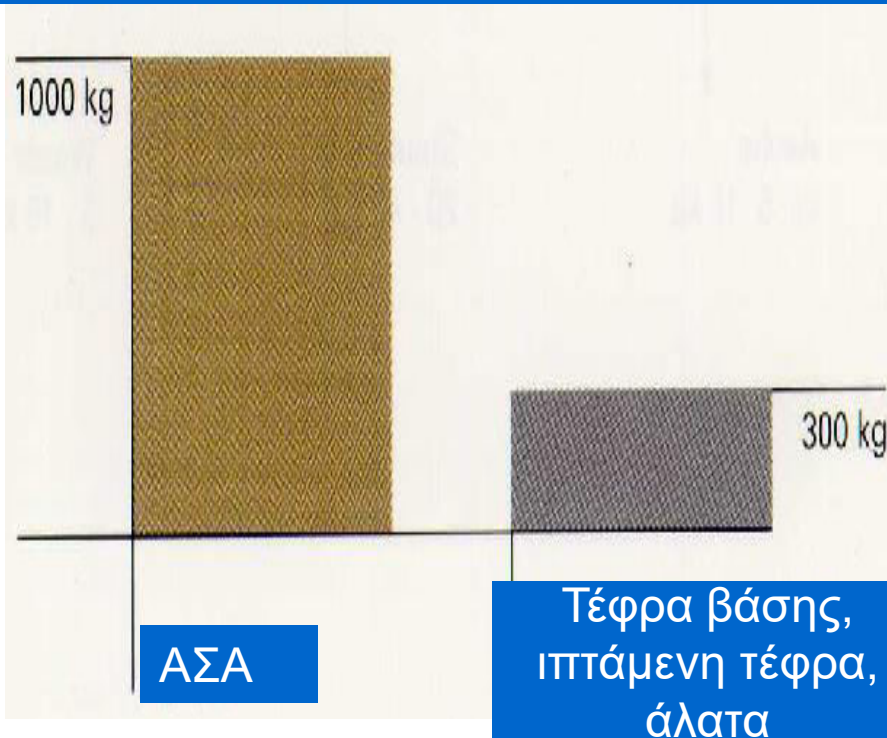
Στερεά υπολείμματα και παραπροϊόντα



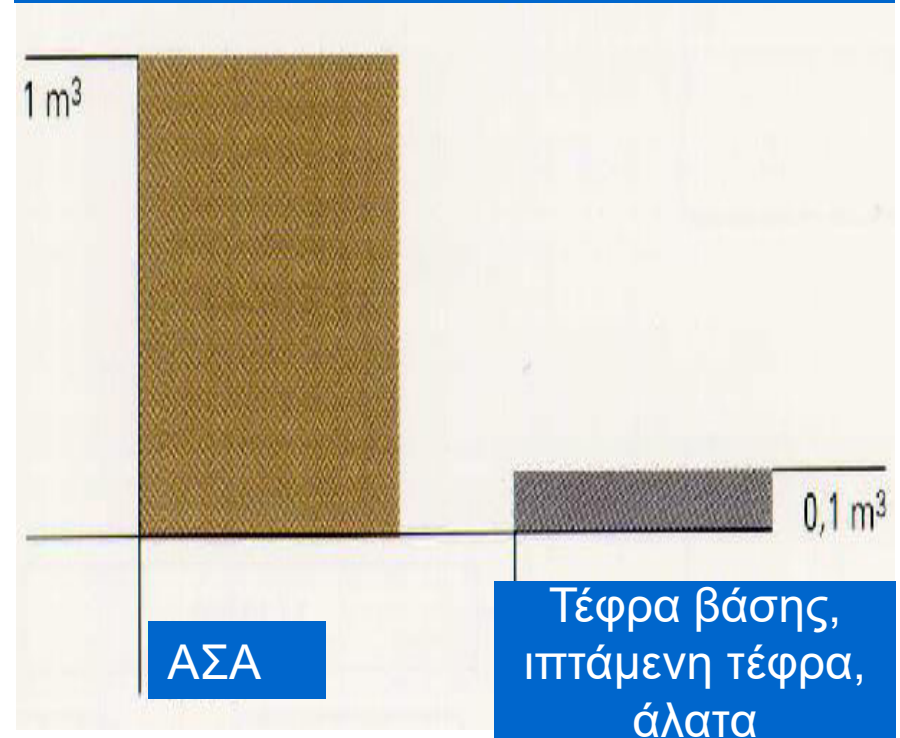
υπολείμματα Χρήσιμα παραπροϊόντα

Μείωση Μάζας και Όγκου

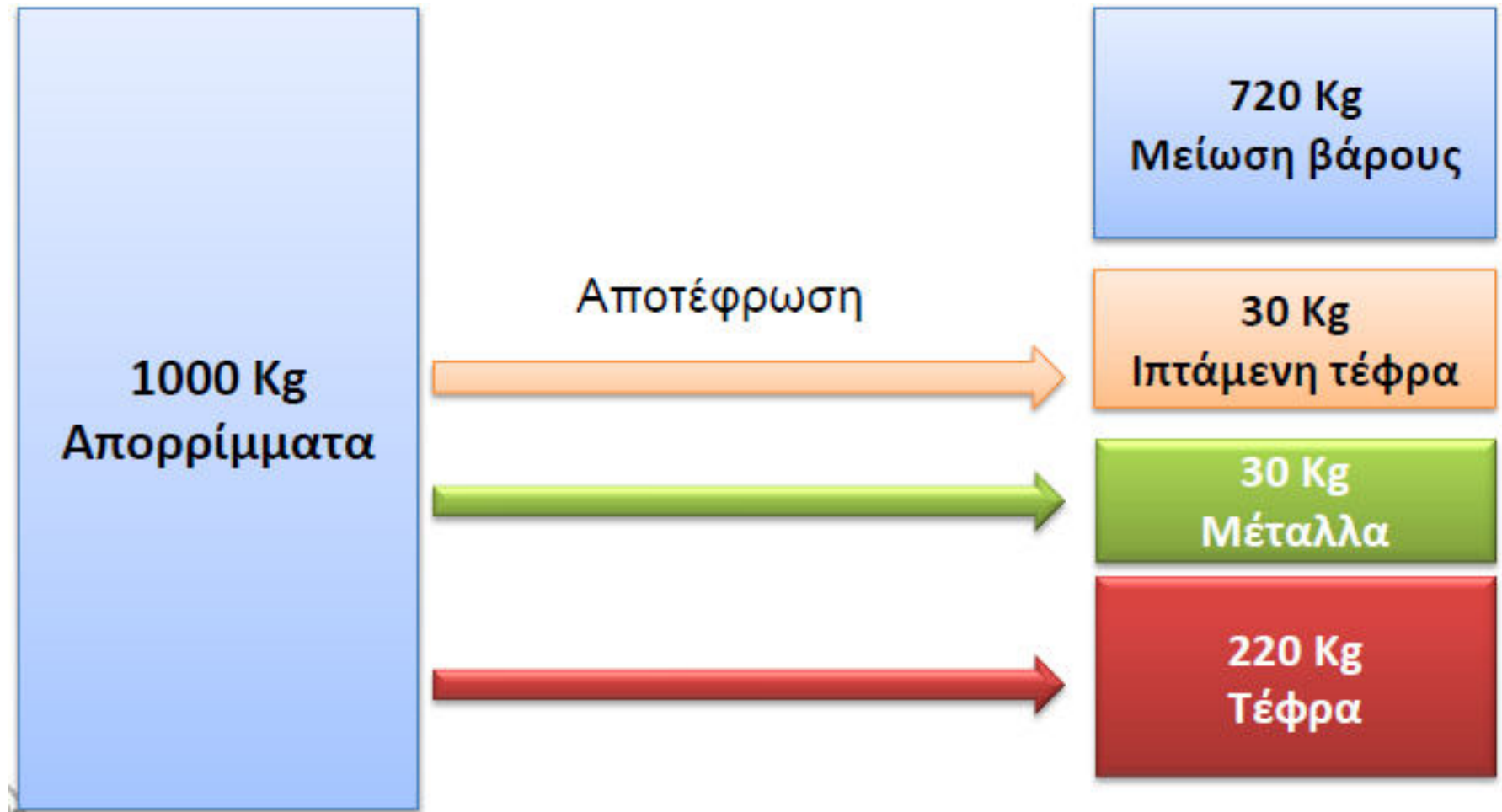
1000 kg ΑΣΑ (υγρό βάρος) παράγουν
300 kg στερεών υπολειμμάτων



1 m³ ΑΣΑ (υγρό βάρος) παράγουν
0.1 m³ στερεών υπολειμμάτων



Ισοζύγιο Μάζας



Ολοκληρωμένα Συστήματα Διαχείρισης Αποβλήτων

1. Maximise Resource Recovery

- Centralised MRF/MBT
- Material Recovery prior to WtE process
- Ash reuse technology
- Recovery of ferrous and non-ferrous metals



2. Maximise Energy Recovery

- WtE Technology that maximise energy and electricity production
- Minimum internal electricity usage
- Flexibility in design to cater for changes in NCV



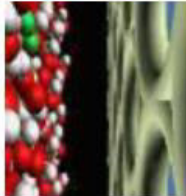
3. Minimise Environmental Impact & Land Footprint

- Technology
- Design layout
- Make use of existing facilities



4. Co-locate Desalination Plant

- Utilise waste heat & low grade steam for desalination process
- WtE supplies electricity for desalination process



5. Incorporate Waste Management Education Centre

- Raise public awareness & help shape behaviour



Πυρόλυση / Αεριοποίηση

Συστήματα πυρόλυσης

- Θερμική διεργασία απουσία μοριακού οξυγόνου.
- Τα συστήματα πυρόλυσης χρησιμοποιούν εξωτερική πηγή θέρμανσης για τις ενδόθερμες πυρολυτικές αντιδράσεις.
- Οι περισσότερες οργανικές ουσίες είναι θερμικά ασταθείς και διασπώνται μέσω ενός συνδυασμού θερμικής διάσπασης (thermal cracking) και συμπύκνωσης (condensation) σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα.

Διαδικασία της Πυρόλυσης

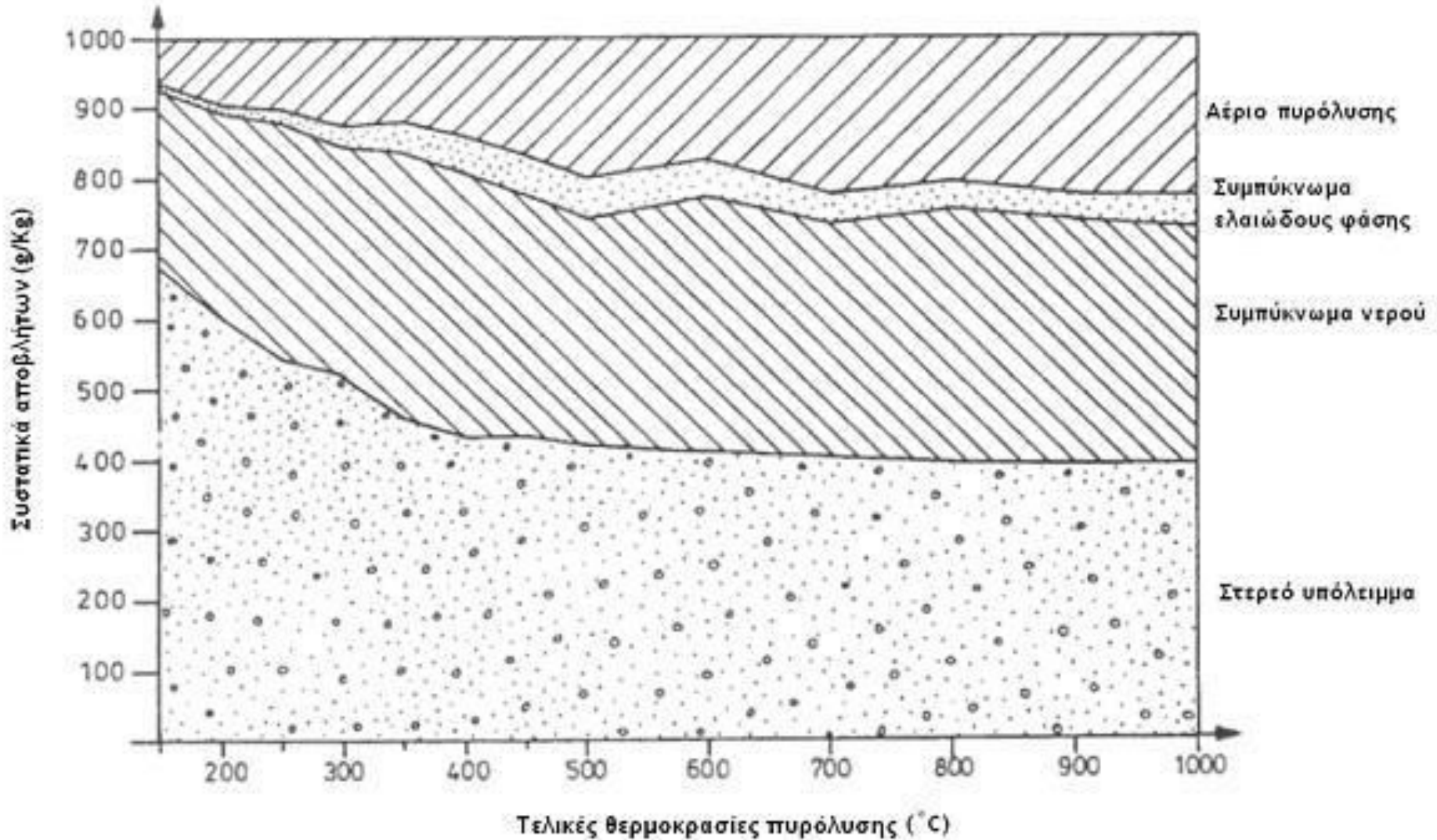
Φάσεις

- **Ξήρανση ($< 200\text{ }^{\circ}\text{C}$):**
εξάτμιση νερού
- **Σχάση και εξανθράκωση ($200 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)**
σχηματισμός αέριων, ελαιωδών οργανικών ουσιών και άνθρακα
- **Σχηματισμός αερίων ($500 - 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$)**
προϊόντα από τη διαδικασία σχάσης μετατρέπονται σε πιο σταθερά αέρια (H_2 , CO , CO_2 , και CH_4).

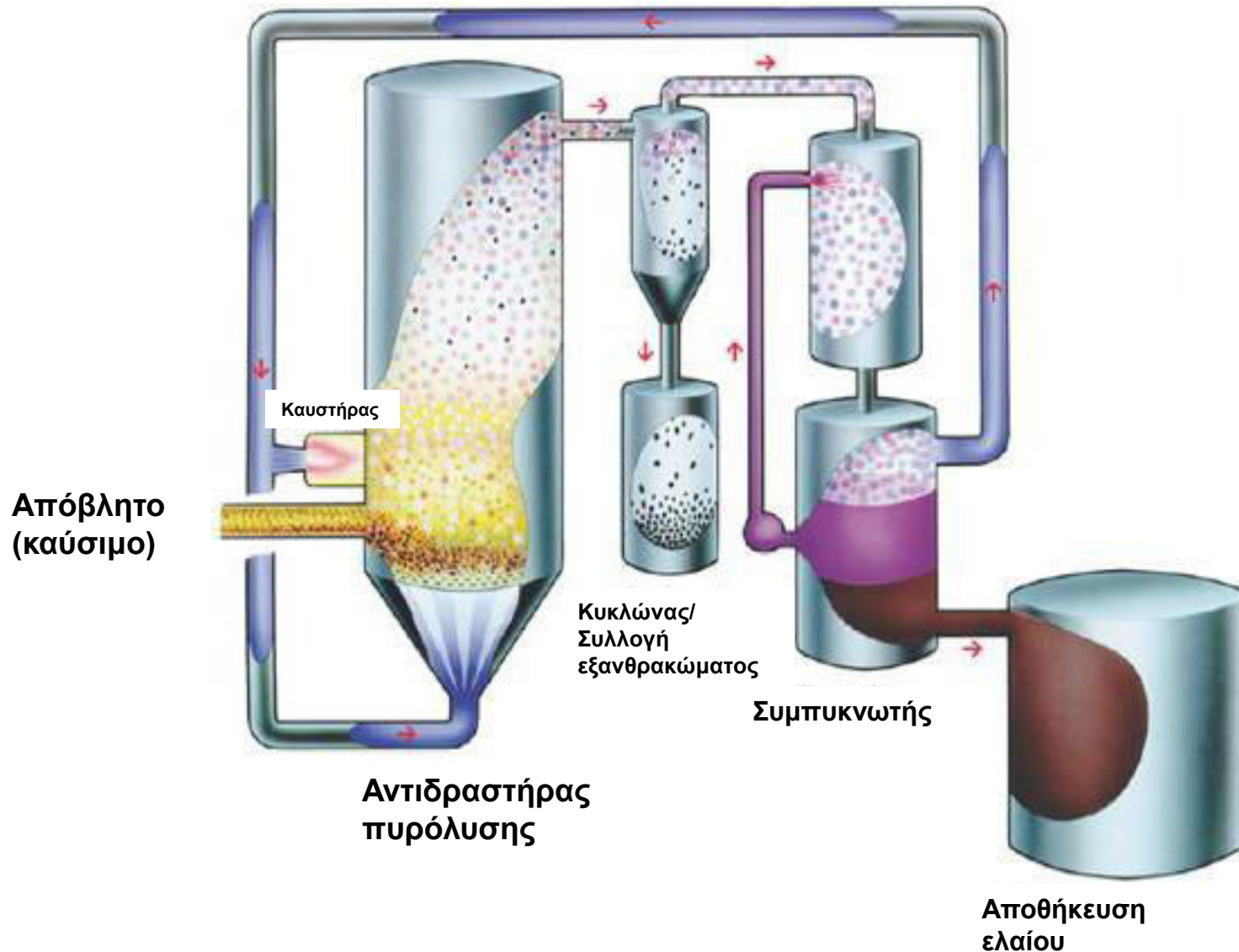
Πιθανά προϊόντα

- **Καύσιμο και πρωτογενή υλικά**
στη μορφή ελαίων, πίσσας και αέριου καύσιμου
- **Συμπύκνωμα**
με διαλυτούς ρύπους
- **Υπολείμματα**
απόβλητα κωκ, μέταλλα, γυαλί, και άμμος

Ισοζύγια μάζας συστατικών πυρόλυσης



Τυπικό σύστημα πυρόλυσης



Προϊόντα πυρόλυσης

- Αέρια: Κυρίως H_2 , CH_4 , CO , CO_2 και διάφορα άλλα αέρια, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των στερεών αποβλήτων. Η θερμογόνο δύναμη κυμαίνεται 3000-5000 kcal/Nm³.
- Υγρά: Ελαιώδες συμπύκνωμα με υψηλή πυκνότητα και ιξώδες, περιέχει απλά καρβοξυλικά οξέα (πχ. οξικό οξύ), κετόνες (πχ. ακετόνη), αλκοόλες (πχ. μεθανόλη), και σύνθετους οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες.
Με περαιτέρω (καταλυτική) επεξεργασία το υγρό κλάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνθετικό καύσιμο.
- Στερεά: Το στερεό υπόλειμμα περιέχει σχεδόν καθαρό άνθρακα και τυχόν αδρανή υλικά που υπάρχουν στα στερεά απόβλητα και προορίζεται για καύσιμο ή για να μετατραπεί σε ενεργό άνθρακα.

Προϊόντα πυρόλυσης

- Η θερμογόνο δύναμη του ελαίου πυρόλυσης ~ 5000 kcal/kg.
- Σε συνθήκες μέγιστης παραγωγής αερίου (900 °C), το ενεργειακό περιεχόμενο είναι (30-33% H₂, 10-11% CH₄, 2-3% C₂H₄ and ~1% C₂H₆) ~ 6200 kcal/m³.
- Βιομηχανική εφαρμογή της πυρόλυσης για παραγωγή κάρβουνου (charcoal) από ξύλο, και κωκ και αερίου από λιγνίτες.
- Η πυρόλυση πλαστικών έχει εφαρμοστεί σε πλήρη κλίμακα (full scale).



Pyrolyzer - Mitsui R21

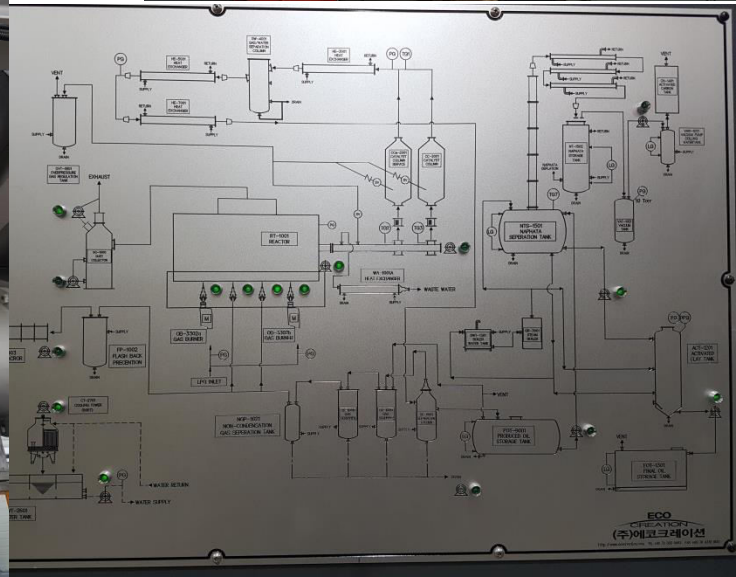
Μονάδα Πυρόλυσης για Επεξεργασία Πλαστικών



Μονάδα Πυρόλυσης για Επεξεργασία Πλαστικών



Μονάδα Πυρόλυσης για Επεξεργασία Πλαστικών



Μονάδα Πυρόλυσης για Επεξεργασία Ελαστικών



Μονάδα Πυρόλυσης για Επεξεργασία Ελαστικών



Μονάδα Πυρόλυσης για Επεξεργασία Ξύλου και Παραγωγή Κάρβουνου (charcoal)



Μονάδα Πυρόλυσης για Επεξεργασία Ξύλου και Παραγωγή Κάρβουνου (charcoal)



Μονάδα Πυρόλυσης για Επεξεργασία Ξύλου και Παραγωγή Κάρβουνου (charcoal)



Συστήματα αεριοποίησης

- Θερμική επεξεργασία των στερεών αποβλήτων με ελεγχόμενη ατελή καύση (λιγότερη από τη στοιχειομετρική ποσότητα αέρα).
- Παραγωγή καύσιμου αερίου (syngas) πλούσιο σε H_2 και κορεσμένους υδρογονάνθρακες (κυρίως CH_4).

Θεωρία αεριοποίησης

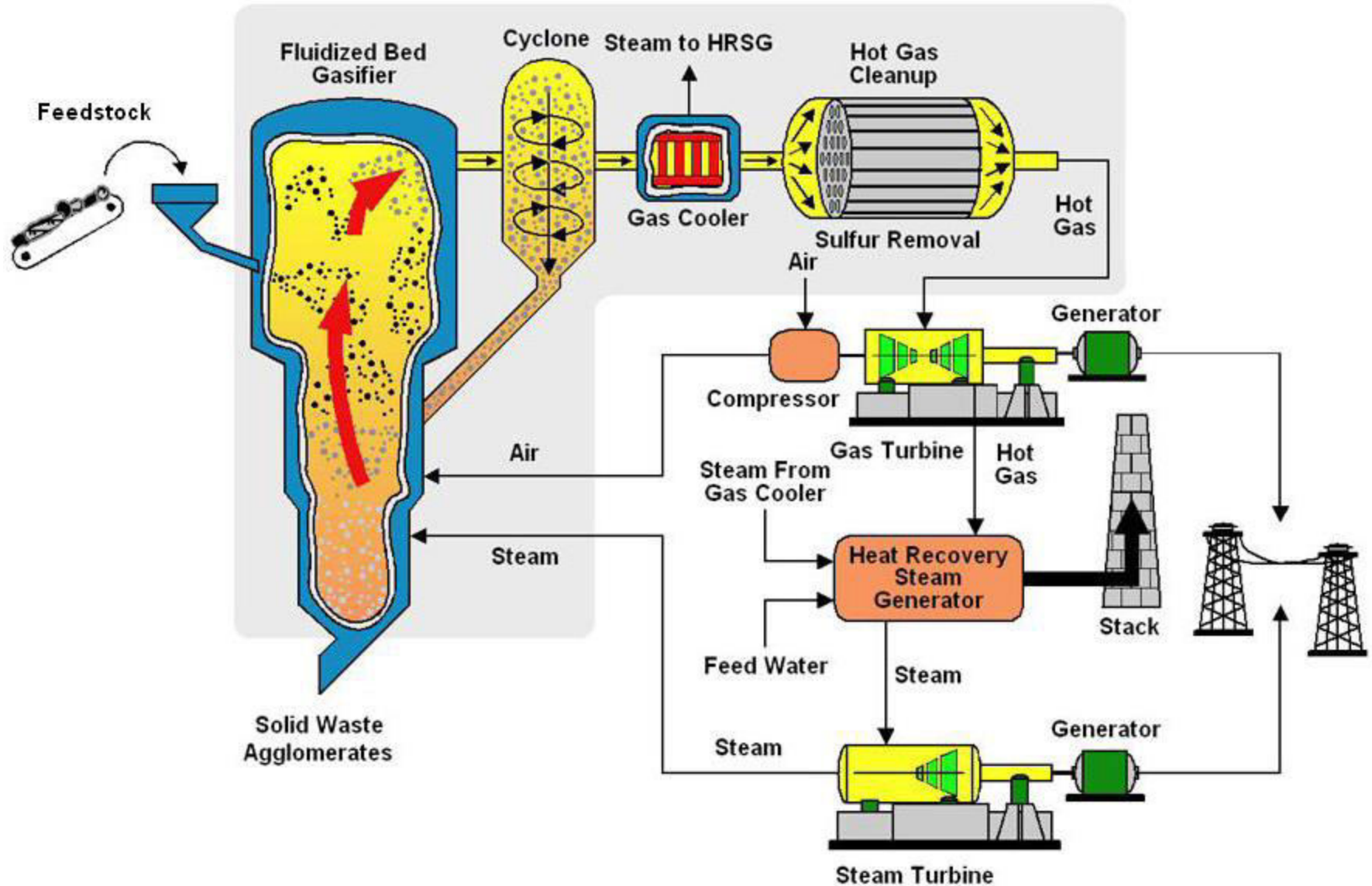
- $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ (εξώθερμη)
- $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ (ενδόθερμη)
- $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$ (ενδόθερμη - αντίδραση Boudouard)
- $\text{C} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$ (εξώθερμη)
- $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ (εξώθερμη – WGS steam reforming)

Η θερμότητα για να διατηρηθεί η διαδικασία της αεριοποίησης προέρχεται από τις εξώθερμες αντιδράσεις, ενώ τα καύσιμα συστατικά κυρίως παράγονται από τις ενδόθερμες αντιδράσεις.

Προϊόντα αεριοποίησης

- Οι αεριοποιητές που λειτουργούν σε ατμοσφαιρική πίεση με αέρα παράγουν :
 - ✓ Χαμηλή θερμογόνο δύναμη αέριο ($\sim 1300 \text{ kcal/m}^3$) που περιέχει 10% CO_2 , 20% CO , 15% H_2 and 2% CH_4 σε ισορροπία με N_2 .
 - ✓ Στερεό υπόλειμμα (char) που περιέχει άνθρακα και αδρανή που προέρχονται από τα απόβλητα.
 - ✓ Συμπυκνωμένο υγρό υπόλειμμα (παρόμοια σύσταση με το πυρολυτικό έλαιο).

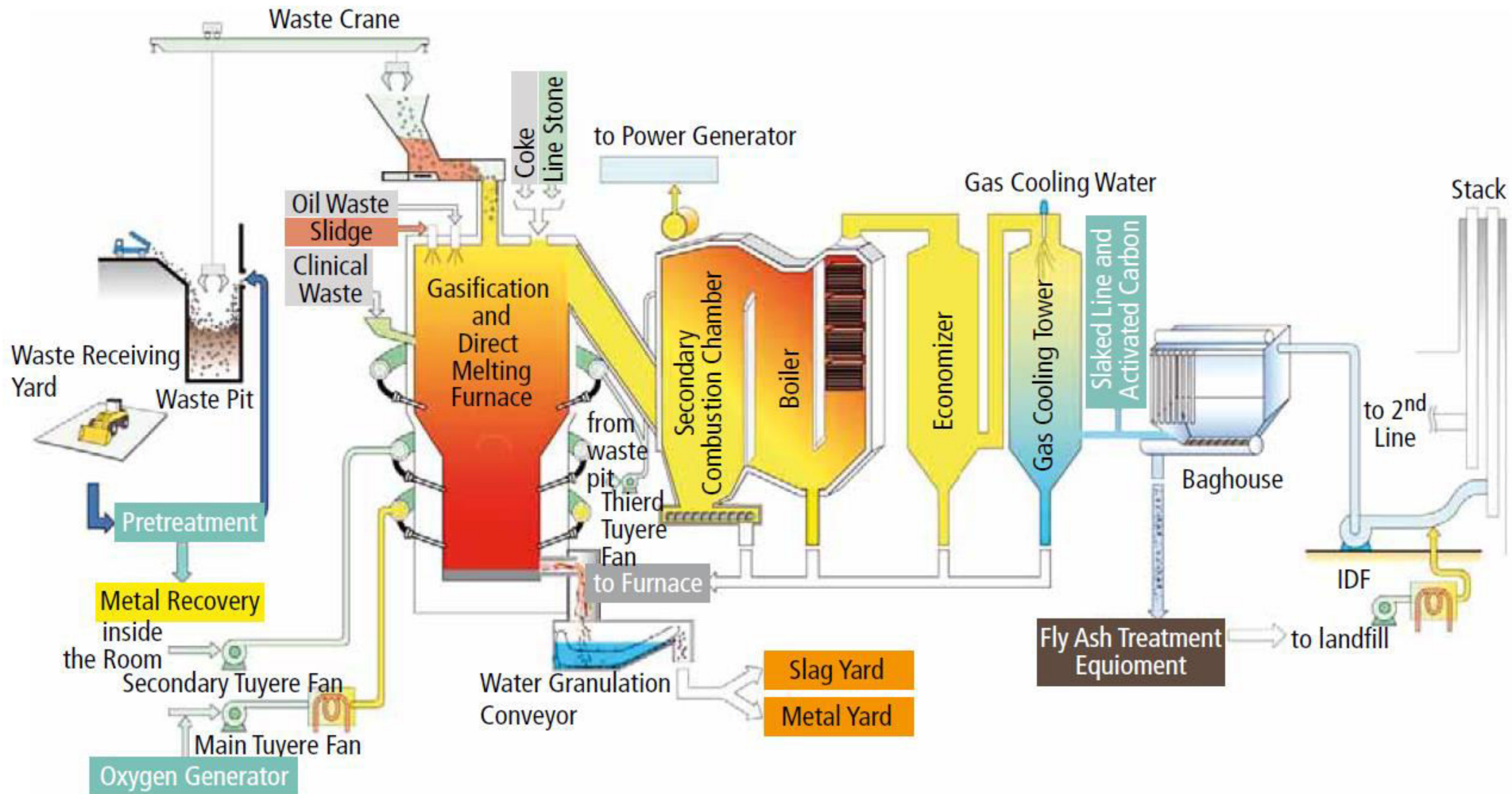
Αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης



Μονάδα αεριοποίησης (πιλοτική)



Αεριοποίηση με απευθείας λιώσιμο τέφρας



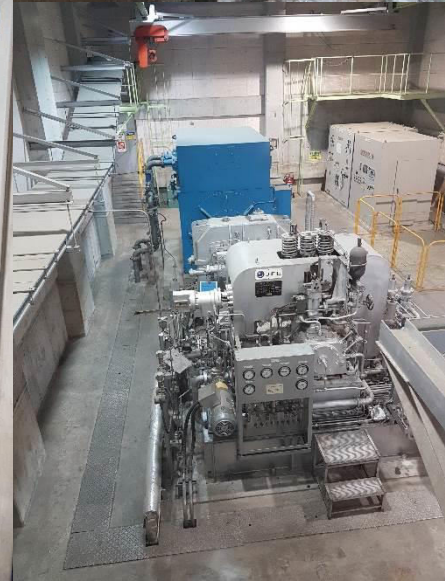
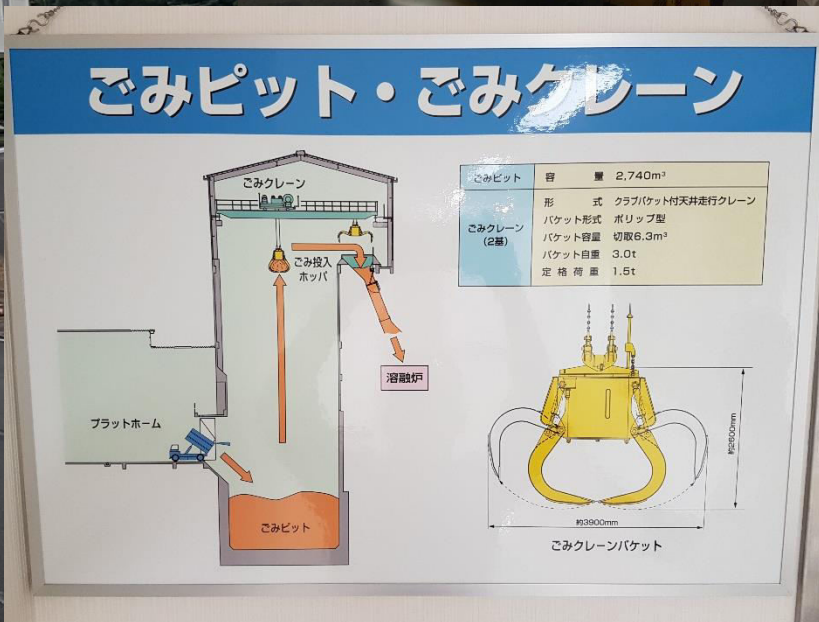
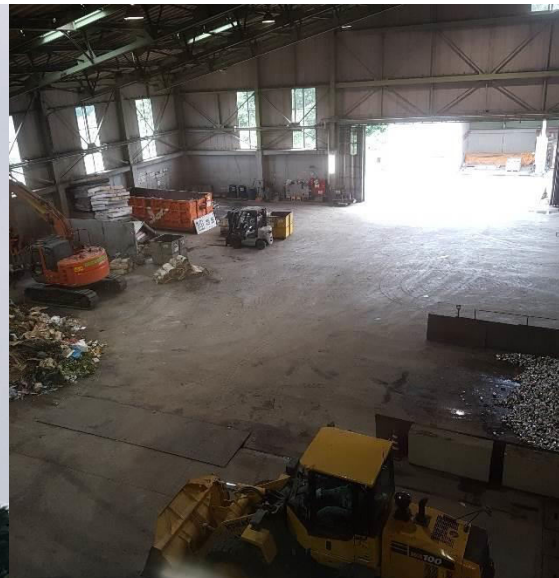
Ολοκληρωμένο σύστημα Μηχανική επεξεργασία – Αεριοποίηση (Fukuyama Gasification Plant)



Fukuyama Gasification Plant



Kasama Gasification Plant

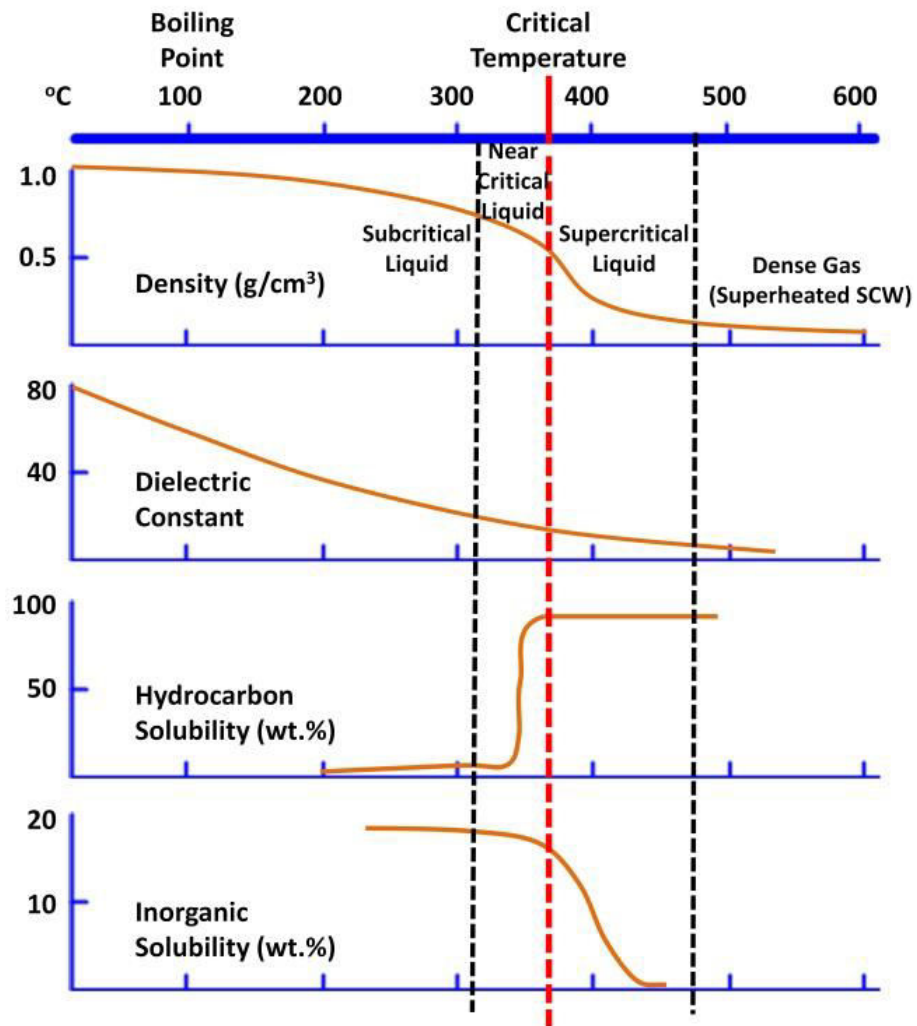
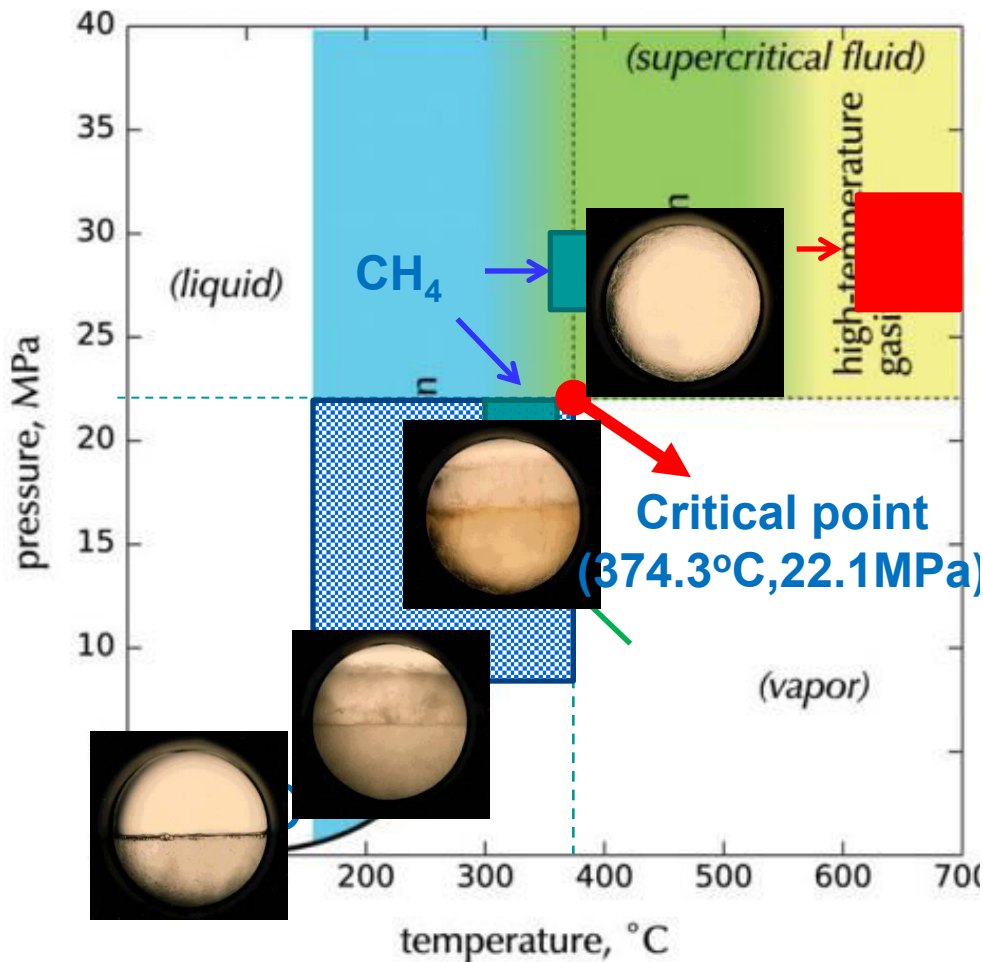


Υδροθερμική επεξεργασία

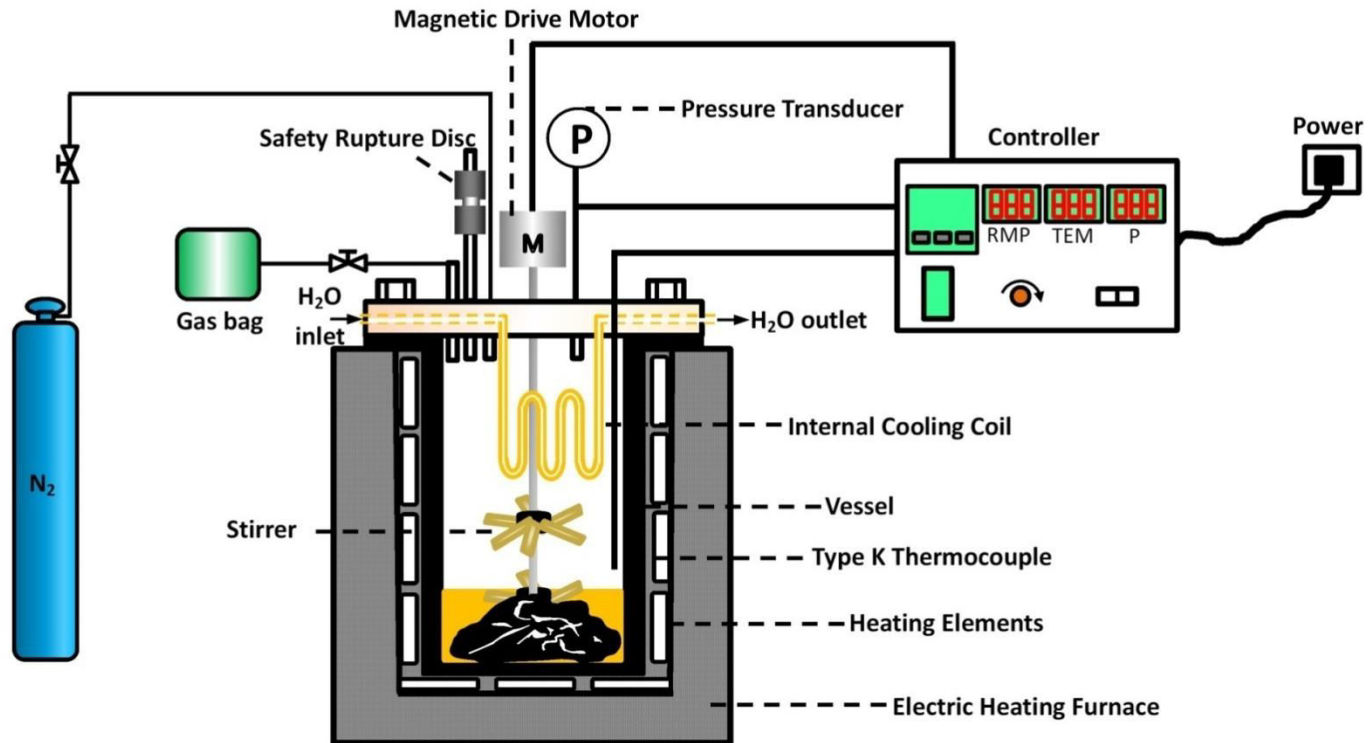
Τι είναι η υδροθερμική επεξεργασία?

- Περιλαμβάνει ένα συνδυασμό θέρμανσης και νερού (μέσο), έτσι ώστε τα απόβλητα να μετατραπούν σε πιο ομοιογενή προϊόντα (σχήμα και χαρακτηριστικά)
- Είναι ένας λειτουργικός τρόπος για ενεργές αντιδράσεις μέσω διαλυτοποίησης
- Περιλαμβάνει θέρμανση του υδαρούς υλικού σε θερμοκρασίες 180-600 °C και υψηλές πιέσεις σε διαφορετικές φάσεις του νερού

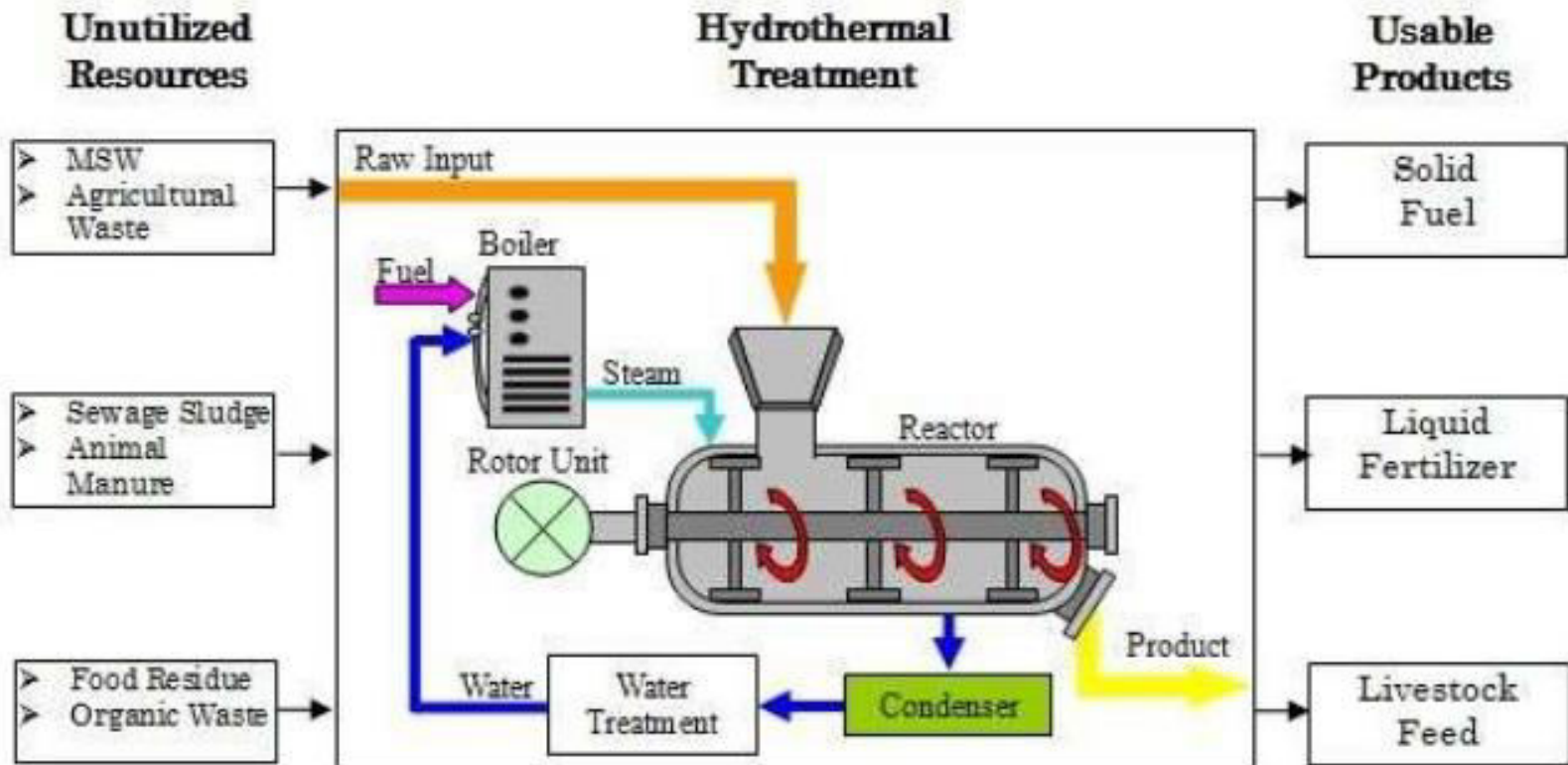
Υδροθερμικές αντιδράσεις



Τυπικός υδροθερμικός αντιδραστήρας



Υδροθερμικά προϊόντα



Υδροθερμική επεξεργασία ενεργού ιλύος



Αφυδατωμένη λάσπη



Αέρια (H_2 , CH_4)



Υγρά



Στερεά



Υδροθερμική επεξεργασία (πιλοτική)



Συστήματα ελέγχου

Περιβαλλοντικά συστήματα ελέγχου

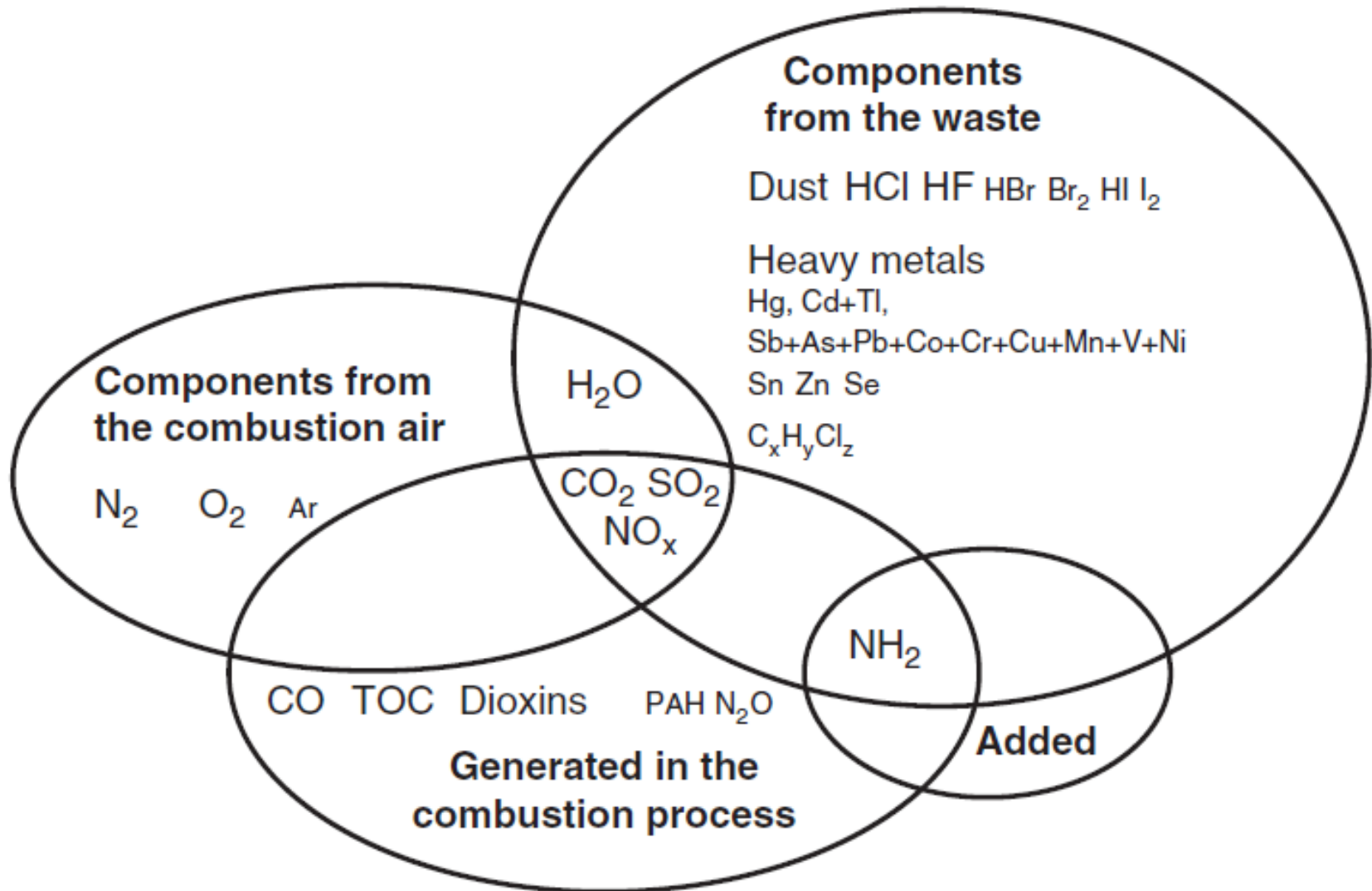
- Παρακολούθηση ατμοσφαιρικών (αέριων εκπομπών)
- Συστήματα ελέγχου ατμοσφαιρικών
- Νομοθεσία
- Στερεά υπολείμματα
- Υγρά απόβλητα

Αέρια προϊόντα καύσης

Κάποια στοιχεία μετατρέπονται σε οξείδια:

- $C \rightarrow CO_2, CO, PAH, \text{ κλπ.}$
- $S \rightarrow SO_2$
- $N \rightarrow NO + \text{μικρές ποσότητες } NO_2, N_2O; NO_x$
- $Cl, Br, F \rightarrow HCl, HBr, HF$
- Πτητικά μέταλλα (Hg, Cd, As, Sb, Zn, κ.α.) εξατμίζονται ως χλωρίδια. Hg επίσης ως Hg^0
- Όταν η θερμοκρασία μειώνεται (από $> 850^\circ C$ στους $150-180^\circ C$), τα μέταλλα συμπυκνώνονται στα σωματίδια της ιπτάμενη τέφρας (εκτός του Hg)
- Οι διοξίνες καταστρέφονται κατά τη διάρκεια της καύσης, αλλά *de-novo synthesis* λαμβάνει μέρος σε χαμηλότερες θερμοκρασίες

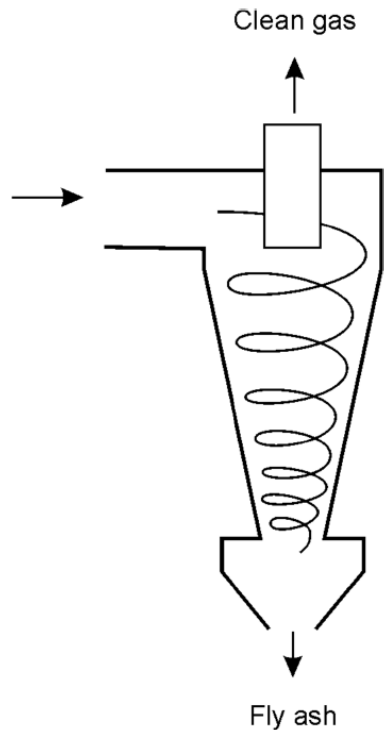
Περιπλοκότητα των ατμαερίων



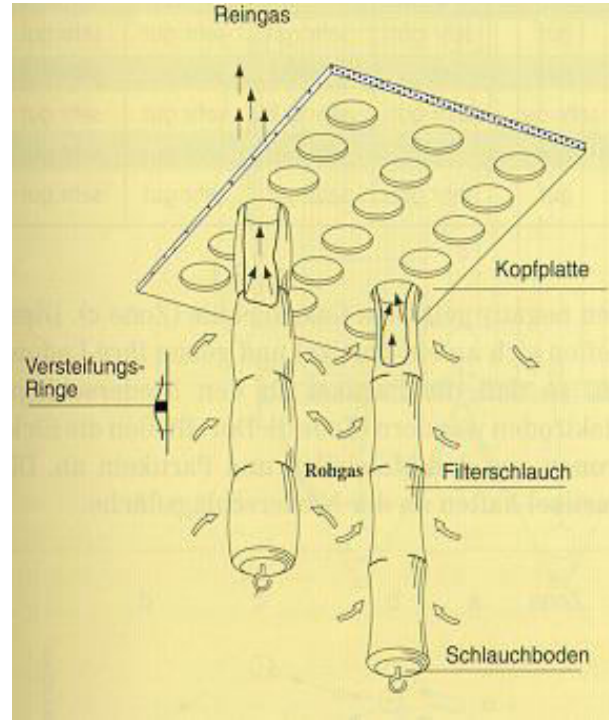
Συστήματα ελέγχου αερίων

- **Έλεγχος σωματιδιακής ύλης (PM control):**
Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές (ηλεκτρόφιλτρα), σακκόφιλτρα, κυκλώνες
- **Έλεγχος NO_x:** Διαχωρισμός στη πηγή, έλεγχος της αποτέφρωσης, επεξεργασία αερίων
- **Έλεγχος SO₂ και όξινων αερίων:** Διαχωρισμός στη πηγή, πλυντρίδες (υγρά) ή ξηρά συστήματα
- **Έλεγχος CO και HC:** Έλεγχος της αποτέφρωσης
- **Non-criteria pollutant control:** Διαχωρισμός στη πηγή, έλεγχος σωματιδιακής ύλης

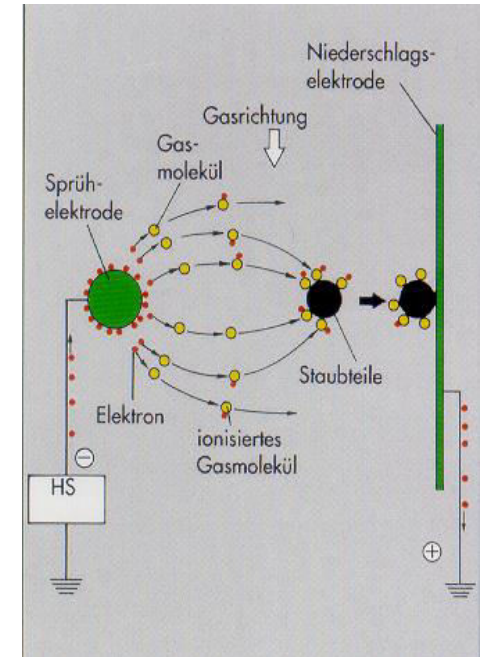
Συστήματα ελέγχου σωματιδιακής ύλης



Κυκλώνας
(2 - 1000 μm)

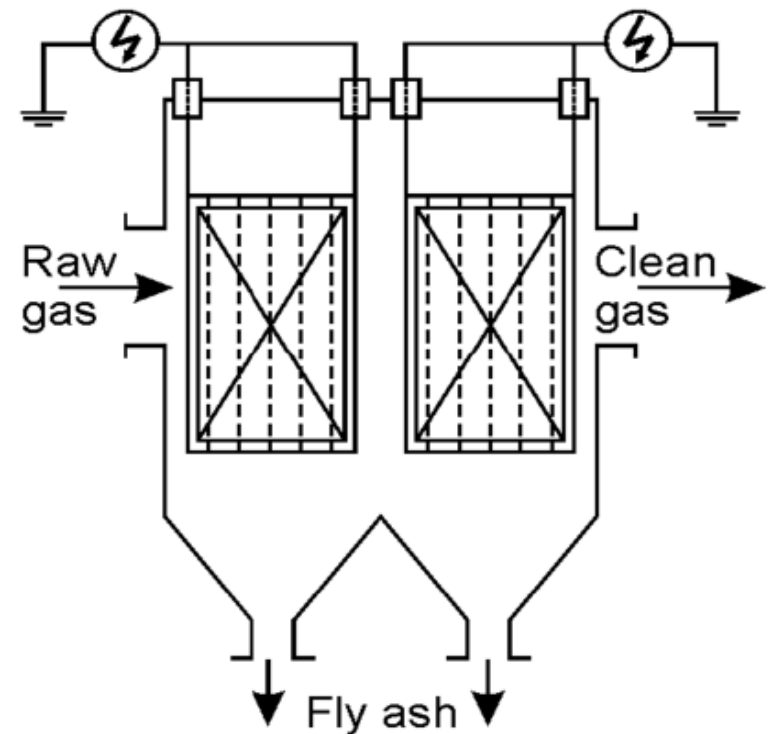
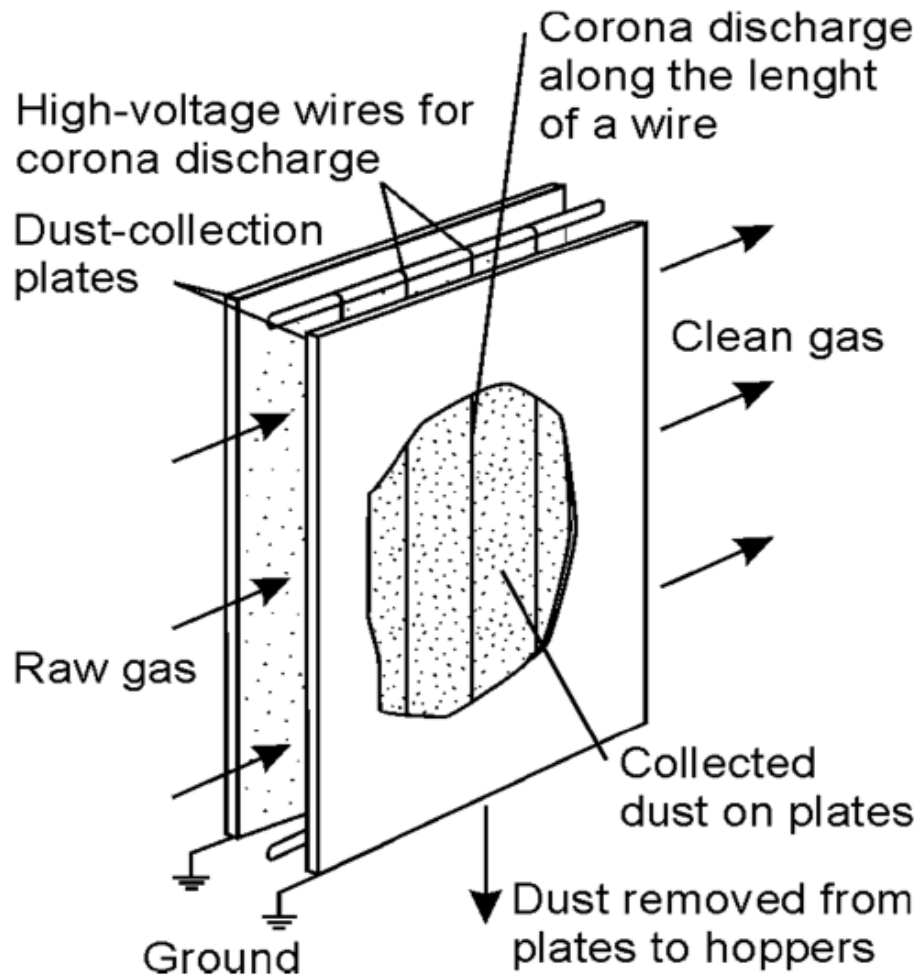


Σακκόφιλτρα
(0.1 - 10 μm)

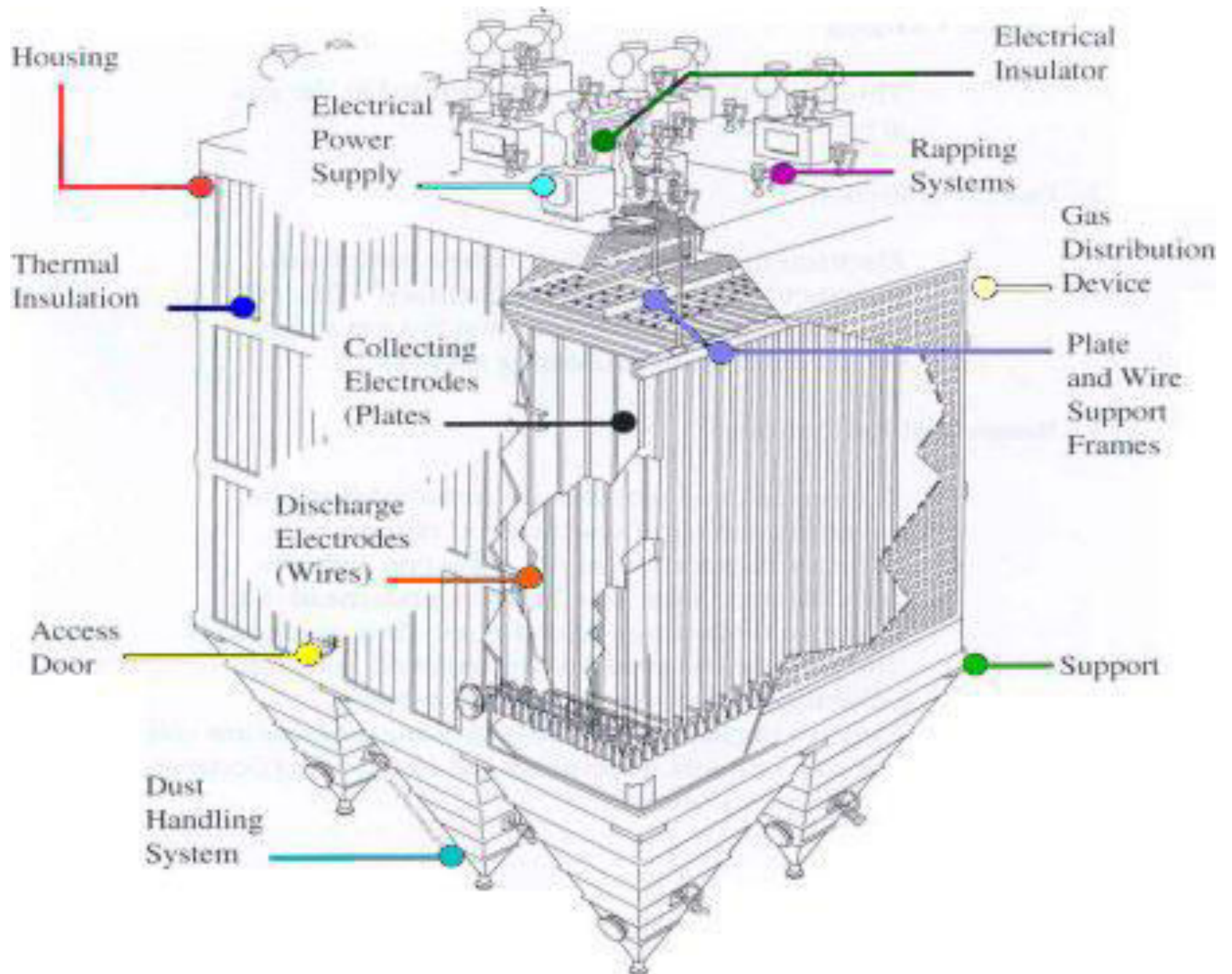


**Ηλεκτροστατικοί
κατακρημνιστές**
(0.01 - 10 μm)

Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές

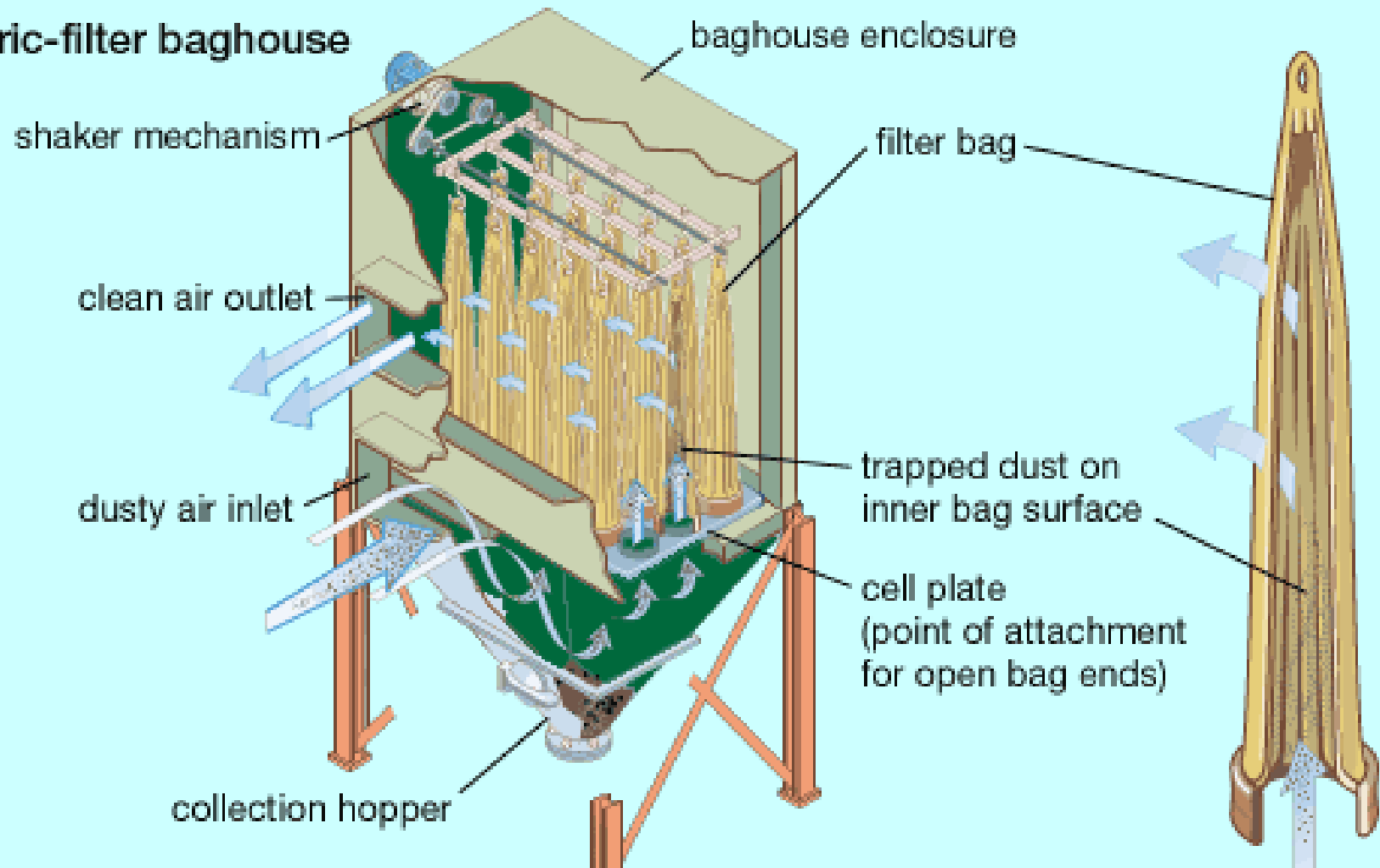


Sketches of the removal principle (left) and a full scale configuration of a two-field electrostatic precipitator (right) for fly ash removal.



Σακκόφιλτρα

Fabric-filter baghouse



DIRT BAG



**Filter bags made from DuPont fibers
can handle even the most aggressive gasses.**

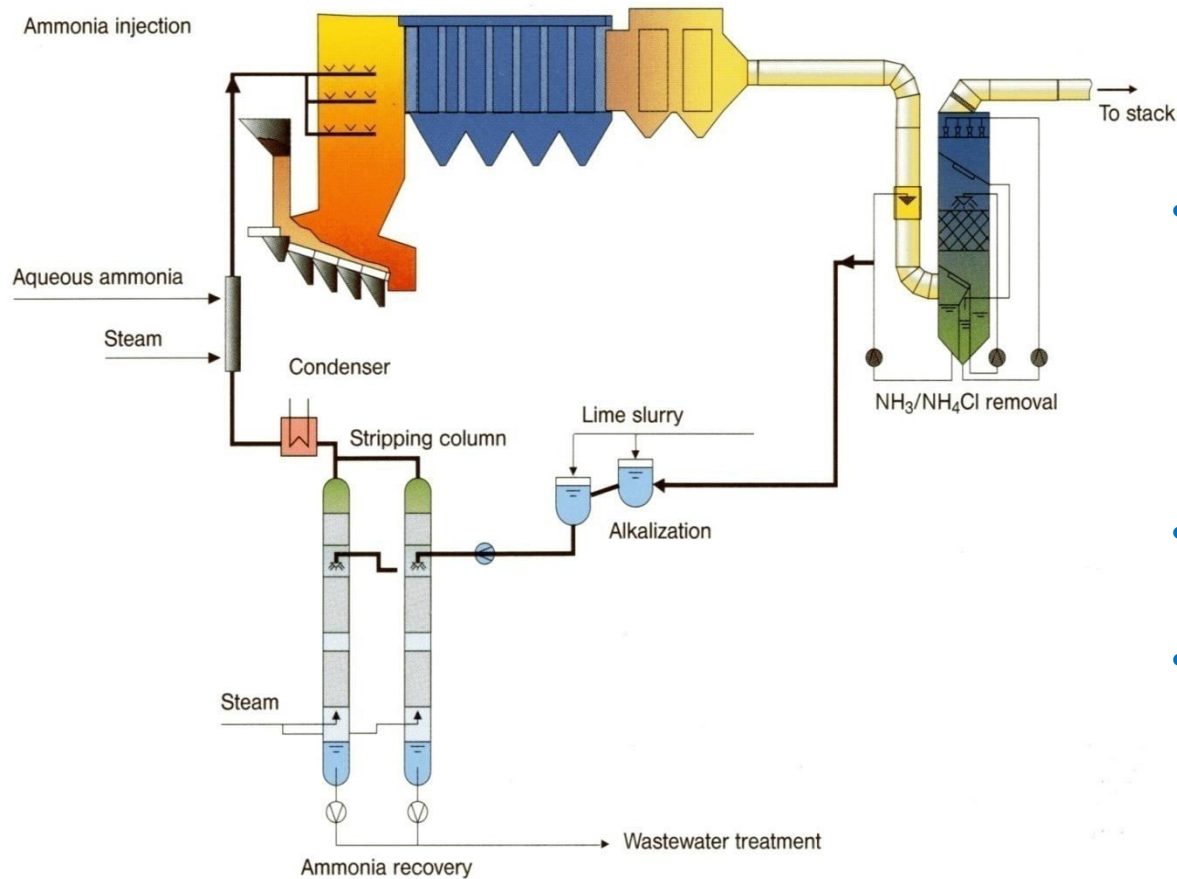
Οξειδία αζώτου (NO_x)

- NO & NO₂
- NO_x από αέρα και NO_x από τα απόβλητα
- NO_x + hydrocarbons + sunlight + O₂ →
O₃ + άλλα συστατικά που προκαλούν ερεθισμό
- Nitrate aerosols - acid fog and rain

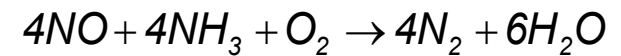
Απομάκρυνση (έλεγχος) NO_x

SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction) process

Von Roll SNCR DeNO_x process
with ammonia recovery.



- Injection of Ammonia at Temp. between **850 – 1000 °C** (post combustion chamber)



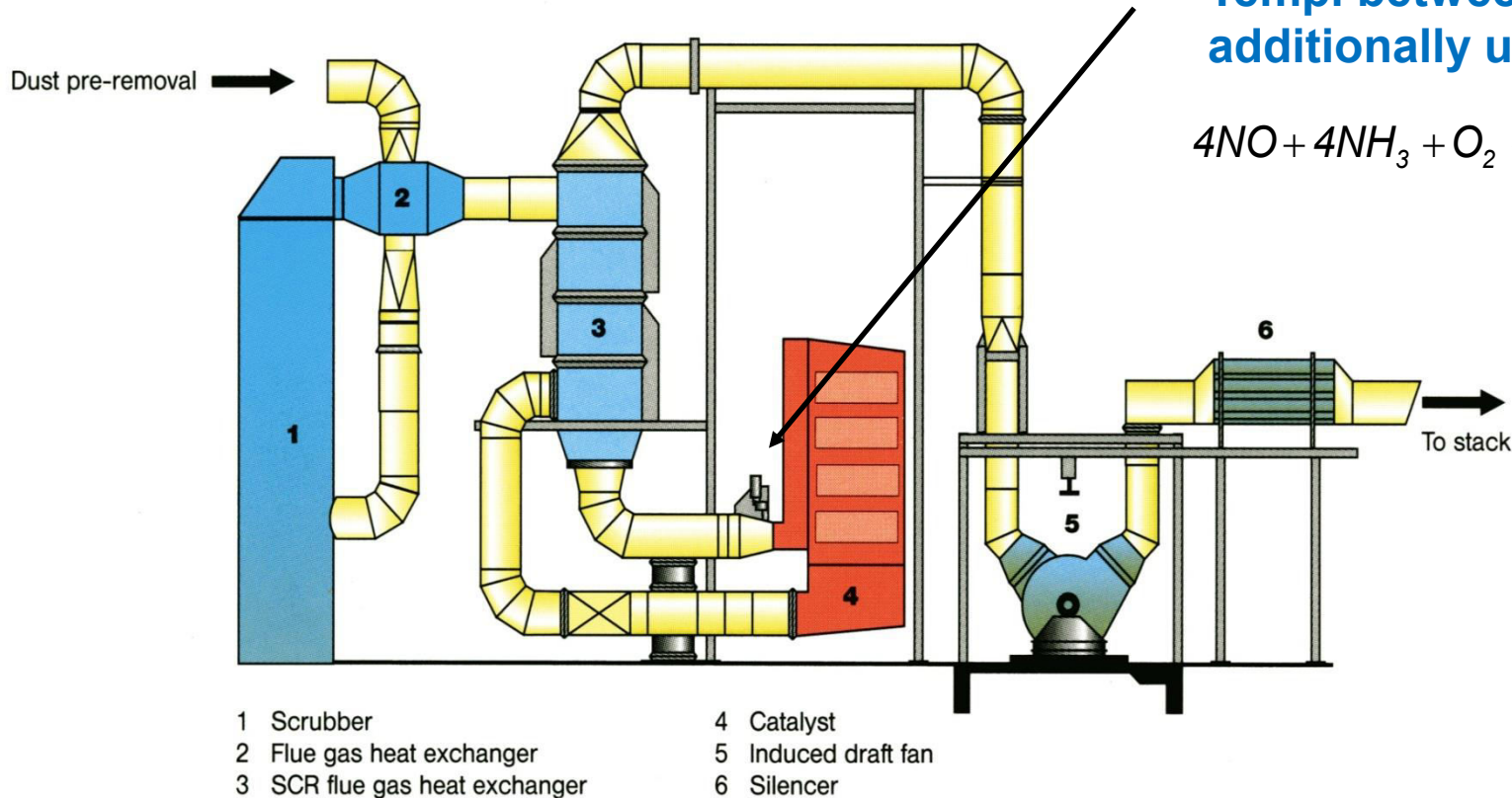
- Removal efficiency of up to 90%
- Excess of NH₃ can have negative effect on HCl removal

vonRoll inova
DeNO_x process, 4/1999

NO_x Removal

SCR (Selective Catalytic Reduction) process

Side view of SCR process downstream from flue gas scrubber.

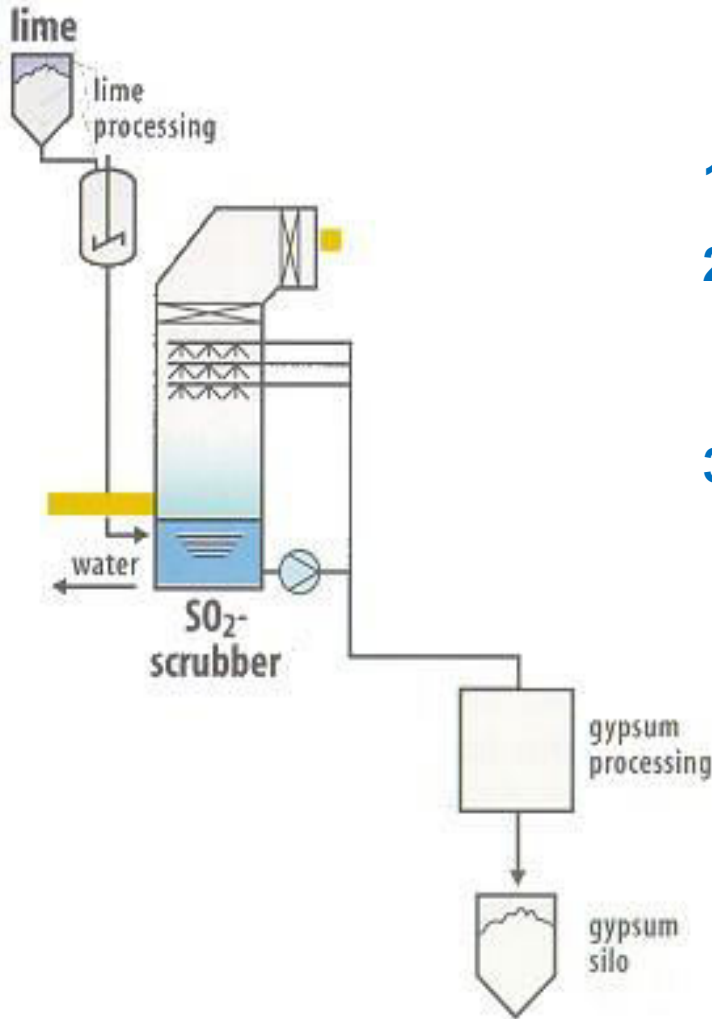


Διοξείδιο του θείου (SO₂)

- $S + O_2 \rightarrow SO_2$
- Ερεθισμός ματιών, μύτης και λάρυγγα
- Μπορεί να σκοτώσει ανθρώπους με προβλήματα στους πνεύμονες
- Όξινη βροχή

SO₂ Removal

Wet Scrubbers



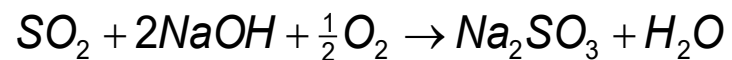
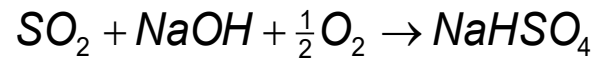
1. Addition of lime suspension into scrubber

2. Chemical reaction



3. Gypsum removal and processing

Another Option:
scrubbing with
sodium hydroxide



Όξινα αέρια

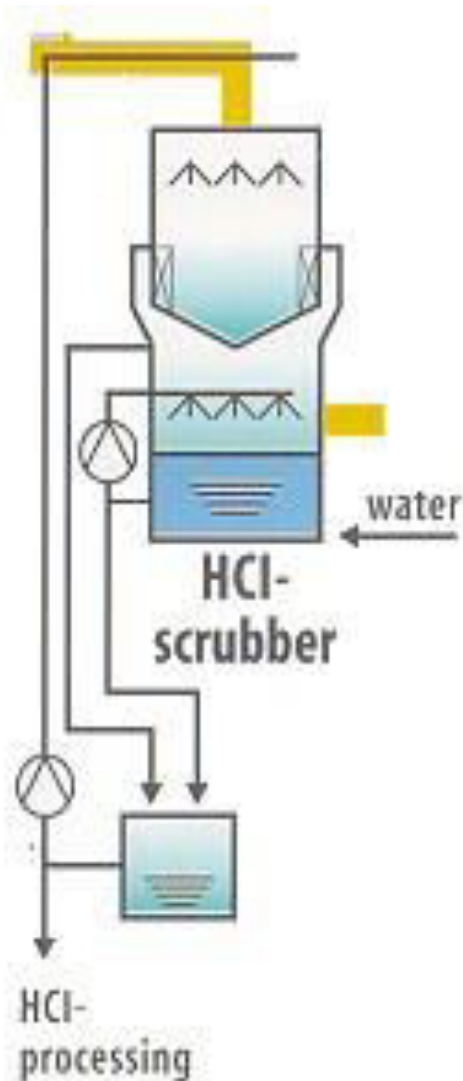
- $F, Cl \rightarrow HF, HCl$
- F βρίσκεται σε ίχνη σε πολλά προϊόντα
- Cl βρίσκεται σε πλαστικά (PVC, PS, PE)
- $SO_2 \rightarrow SO_3 \rightarrow H_2SO_4$
- $NO_2 \rightarrow HNO_3$

Έλεγχος όξινων αερίων

- HCl, HF, NO₂, και SO₂
- Διαχωρισμός στη πηγή για Cl και S (πλαστικά)
- Υγρά scrubbers (πλυντρίδες)
- Ξηρά (dry) scrubbers

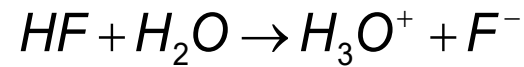
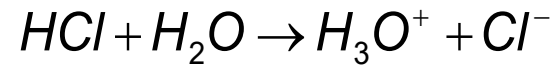
HCl, HF - Removal

Wet Scrubbers



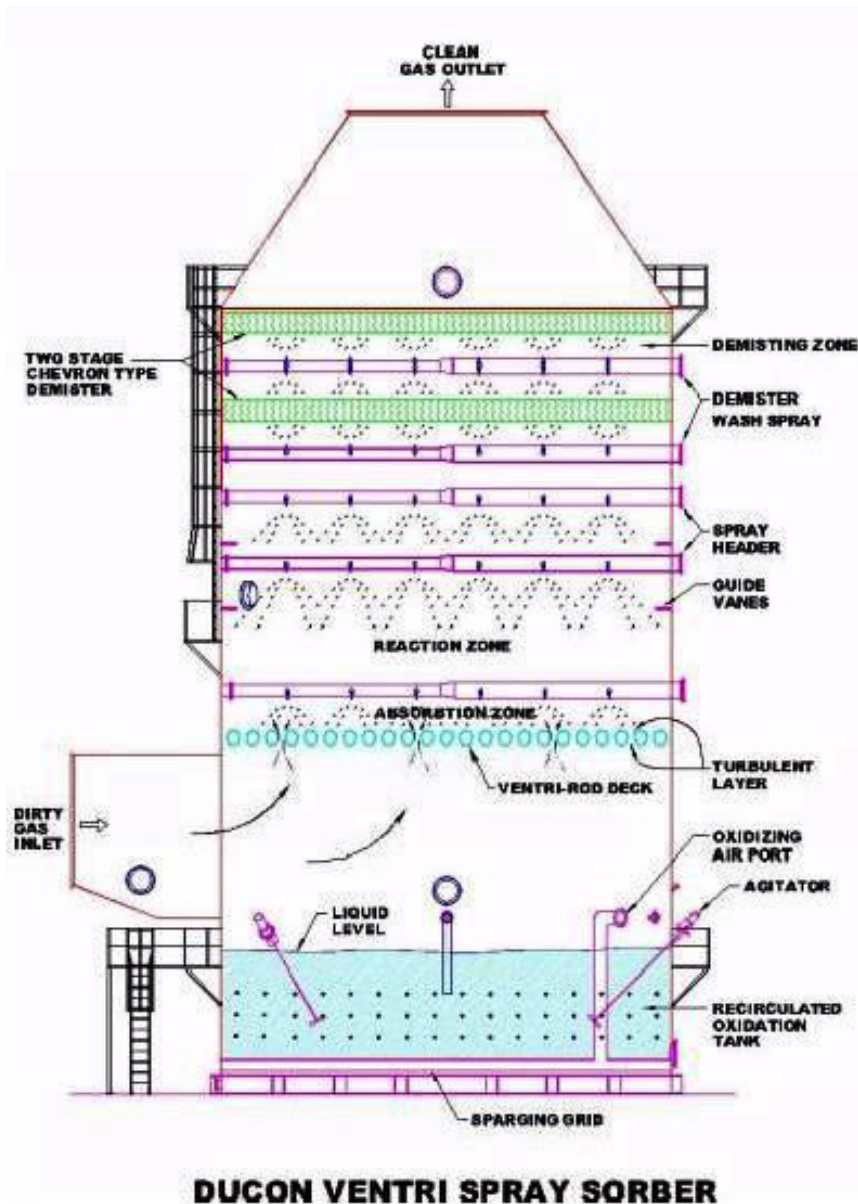
1. Scrubbing with water

2. Chemical reaction



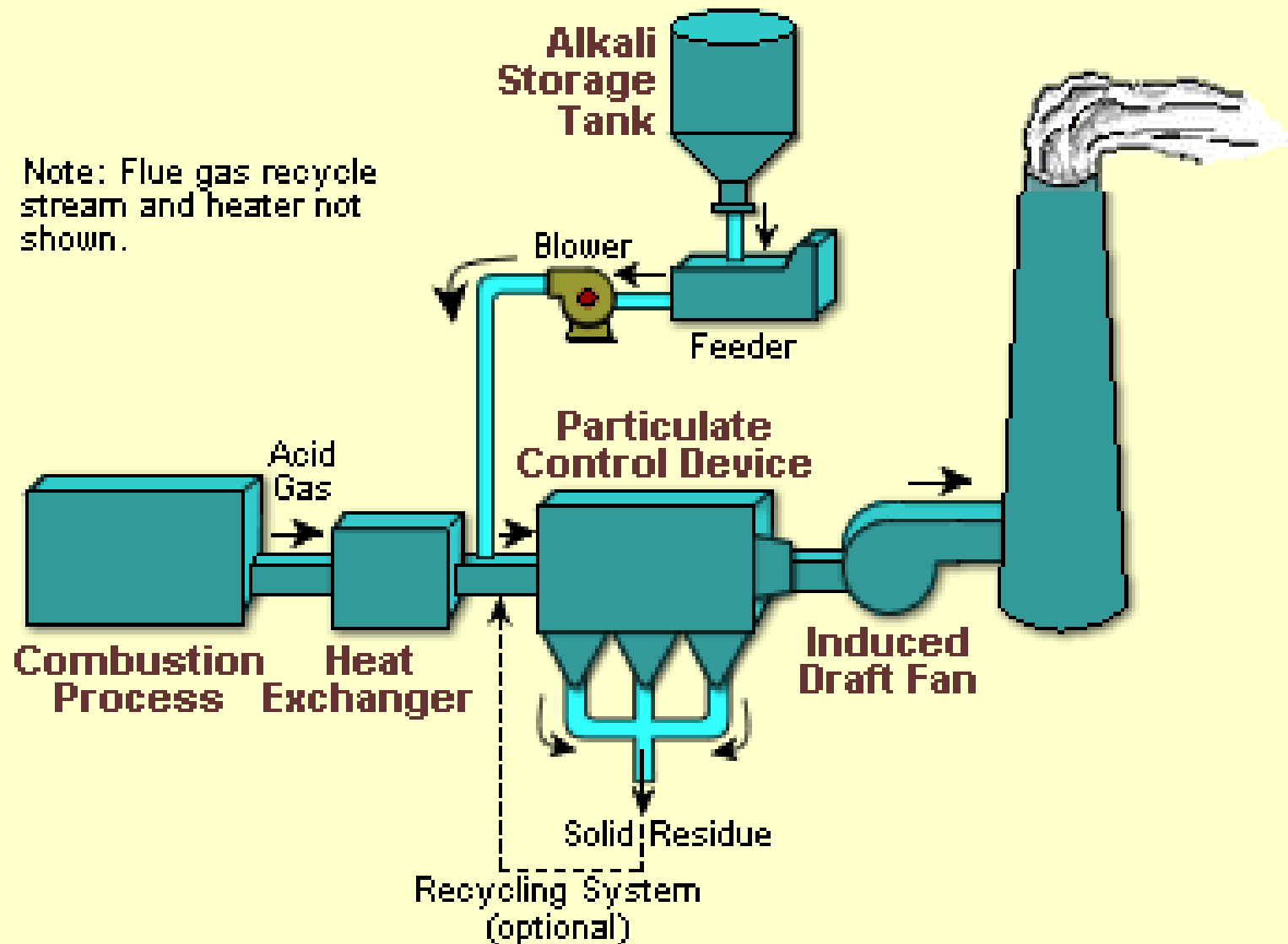
3. HCl processing

Wet scrubbing systems



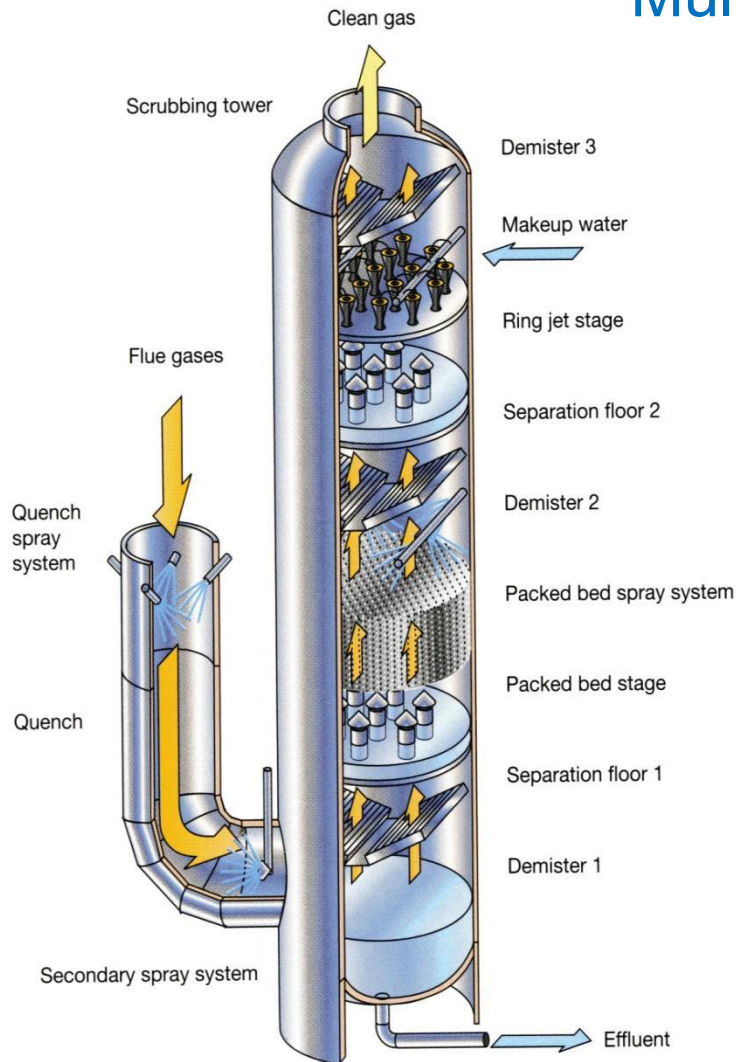
Dry-Injection-Type Dry Scrubber

Note: Flue gas recycle stream and heater not shown.



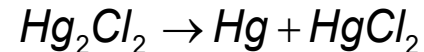
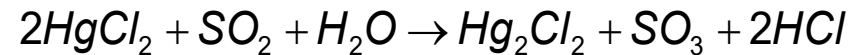
Flue Gas Scrubbers

Multistage System



1. Stage: Dust collection & quenching

- Cooling (70 °C)
- Particulate wash out
- HCl and Hg absorption



2. Stage: High-surface-area packing

- Cooling (60 °C)
- Heavy metal vapours condense to aerosols
- SO₂ - removal

3. Stage: Ring jet multiventuri system

- Aerosols and sub micron dust particles are removed

Βαρέα μέταλλα

- Τα βαρέα μέταλλα εκπέμπονται με τη σωματιδιακή ύλη (προσκολλημένα) ή εξατμίζονται στην αέρια φάση τους

Διοξίνες και φουράνια

Πηγές διοξινών και φουρανίων στις εκπομπές περιλαμβάνουν:

1. Παρουσία στα απόβλητα
2. Δημιουργία κατά τη διάρκεια τα καύσης λόγω παρουσίας χλωριωμένων οργανικών ενώσεων στα απόβλητα
3. Δημιουργία κατά τη διάρκεια της καύσης από απλούς υδρογονάνθρακες και ενώσεων χλωρίου

Έλεγχος για διοξίνες, φουράνια και μέταλλα

- Διαχωρισμός στη πηγή: μέταλλα και πλαστικά
- Έλεγχος καύσης: υψηλή θερμοκρασία και χρόνος
→ χαμηλή συγκέντρωση διοξινών και φουρανίων
- Έλεγχος της σωματιδιακής ύλης για ικανοποιητική απομάκρυνση βαρέων μετάλλων

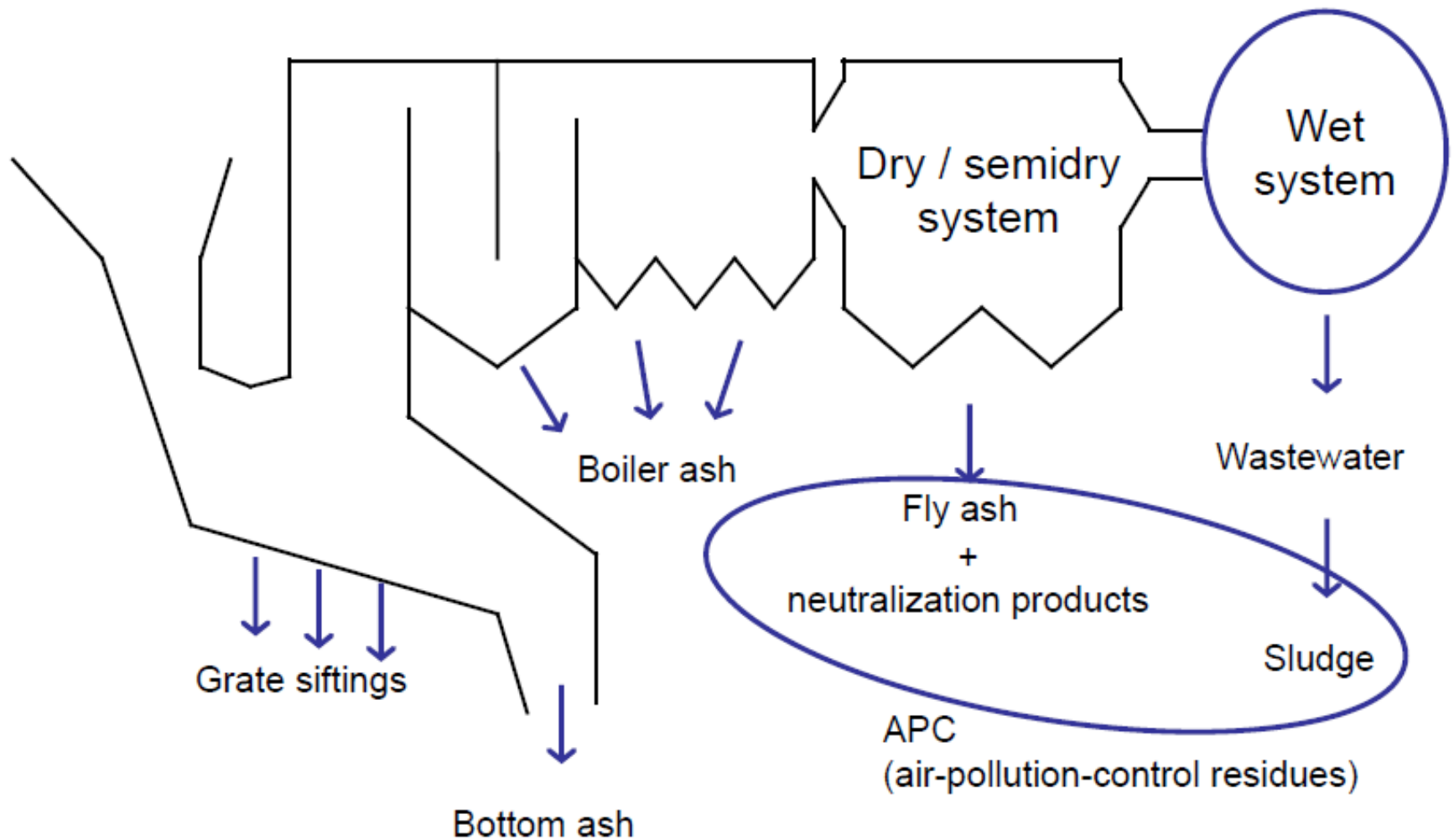
Στερεά υπολείμματα

- Τέφρα βάσης, ιπτάμενη τέφρα, και προϊόντα από διαχωριστές (scrubbers)
- Η τέφρα βάσης περιλαμβάνει άκαυτα υλικά και αδρανή υλικά στα ΑΣΑ
- Ash Burnout Index (ABI): 95 - 99%
- Μετατροπή της τέφρας βάσης σε προϊόν με υψηλή αξία

Στερεά υπολείμματα

- Προϊόντα διαχωριστών (scrubbers): λάσπη (CaSO_4), ίχνη οργανικών, και βαρέα μέταλλα
- Extraction Procedure Toxicity (EP Toxicity) Test
- Toxicity Characteristics Leaching Procedure (TCLP) Test

Στερεά υπολείμματα



Υγρά απόβλητα

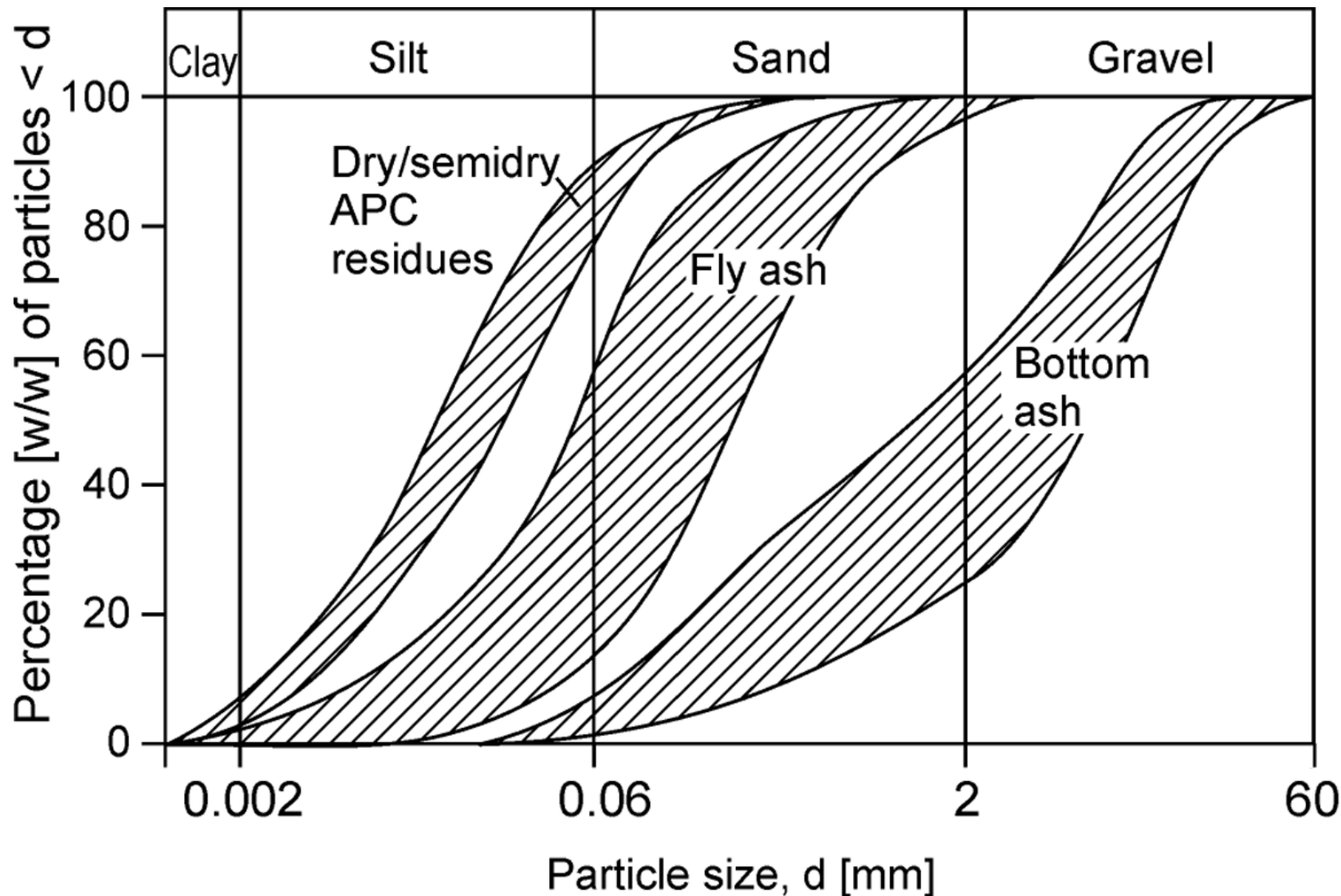
- Δεξαμενή νερού τέφρας βάσης
- Υγρός κατακρημνιστής (wet scrubber)
- Υγρά απόβλητα από καθαρισμούς
- Υγρά απόβλητα από το boiler
- Πύργους ψύξης



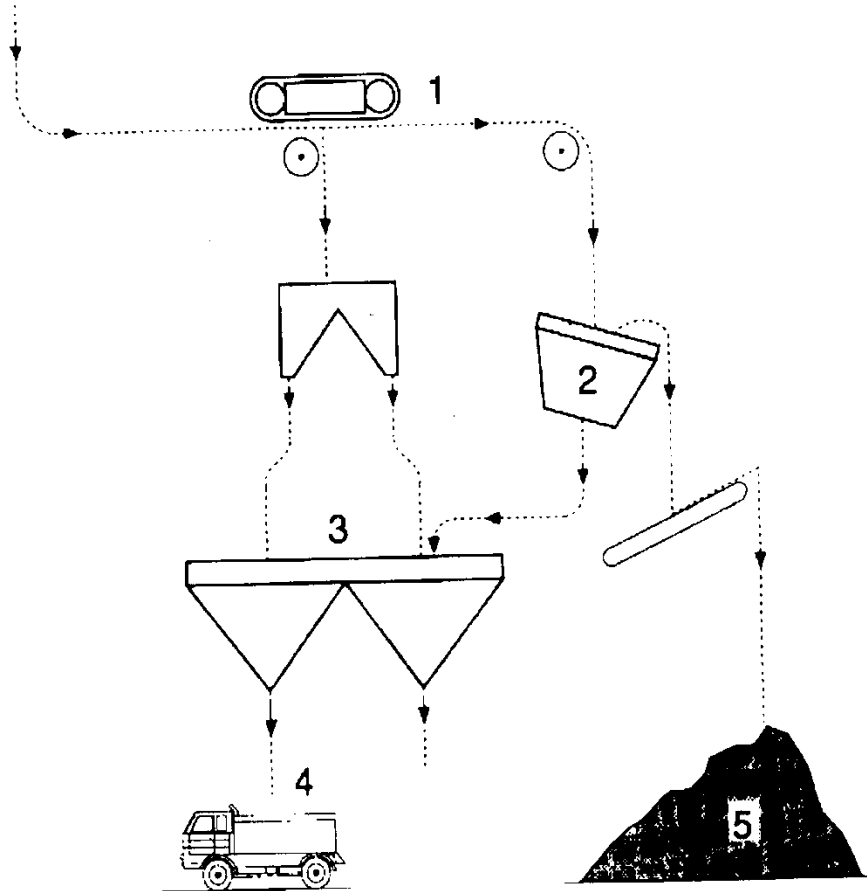




Κατανομή μεγέθους σωματιδίων (στερεών υπολειμμάτων αποτέφρωσης)



Επεξεργασία της τέφρας βάσης



1. Magnet
2. Scrap metal sieve
3. Slag bunker
4. Delivery truck
5. Scrap metal storage

Μέταλλα



Αποθήκευση της τέφρας βάσης



Αποθήκευση της τέφρας βάσης



Sorted
bottom
ash

Screened
bottom
ash

Unsorted
bottom
ash

Small
iron
Scrap

Large
iron
Scrap

Large
non-iron
scrap

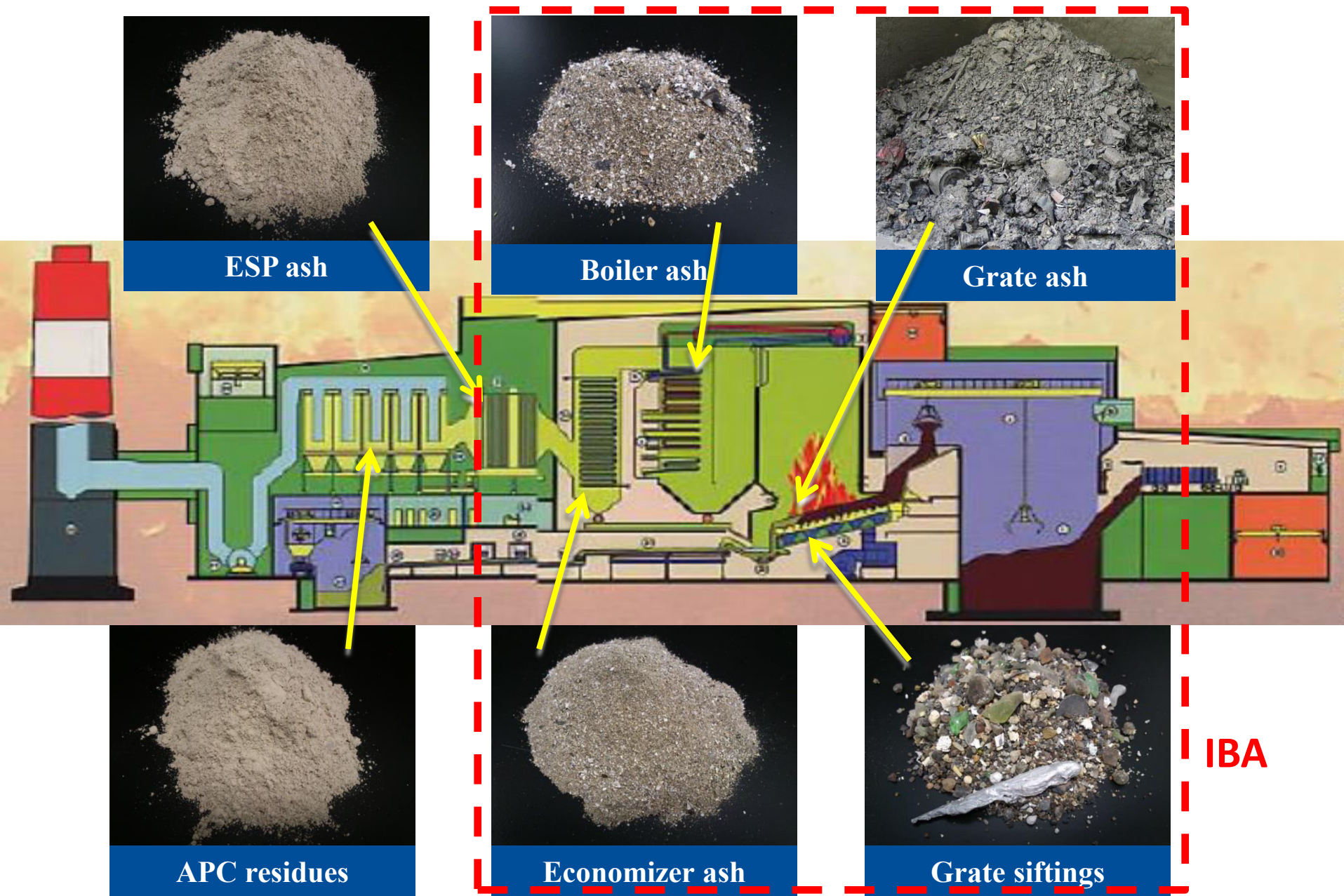


Emplacement of Stabilised Slag for Road Construction

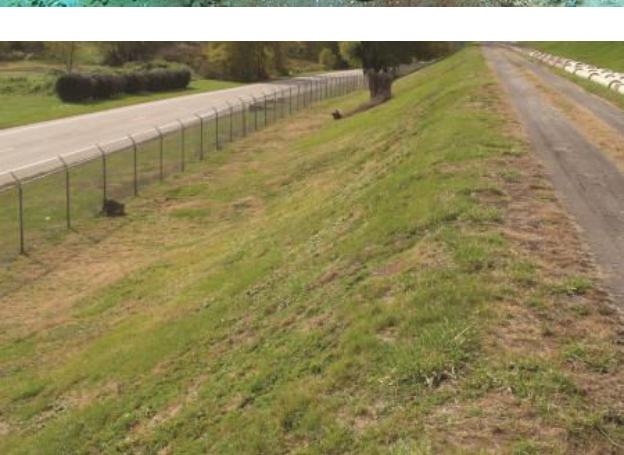


Criteria for use as construction material are met!

Incineration Ash (IA)



Country	Applications				Utilization rate (%)
	Road surface & subbase	Embankment & foundation	Concrete & cement	Land reclamation	
Netherlands	√	√	√		100
Denmark	√	√	√	√	100
Czech	√	√	√		89
France	√		√		78
Germany	√	√			65
Taiwan	√	√	√		63
UK	√	√	√		57
Norway		√			52
Italy		√	√		20
China	√	√			Unknown
Japan	√	√	√	√	Unknown
USA	√	√	√		6



Questions & Answers

