



ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ενότητα 7: Συμπαγωγή
Ηλεκτρισμού & Θερμότητας (CHP)

Δρ. Γεώργιος Μητσόπουλος

Τι είναι η Συμπαραγωγή

ΤΥΠΟΙ ΣΗΘΥΑ

Αεριοστρόβιλοι
για μεγάλα φορτία.

**Μηχανές
εσωτερικής καύσης**
για μικρότερα φορτία.

Μέγιστη απόδοση με
σχεδιασμό στη βάση των
θερμικών φορτίων.



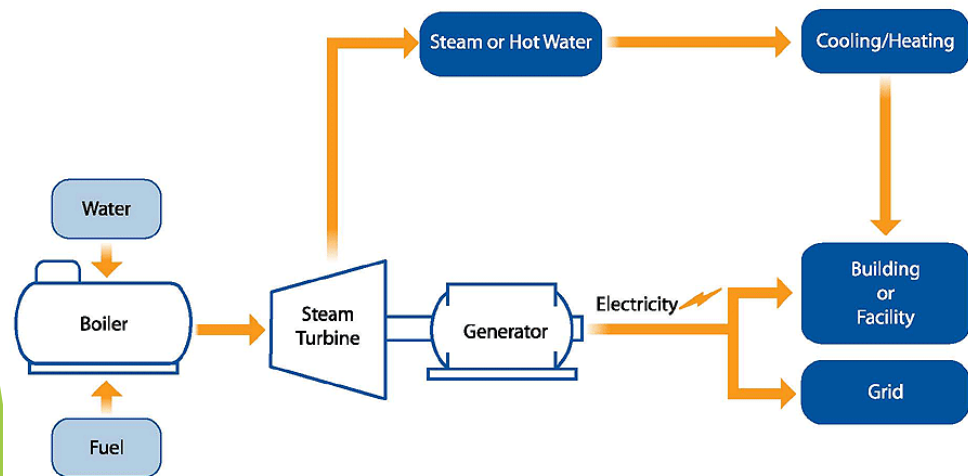
Η Συμπαραγωγή (Combined Heat and Power - CHP) είναι η **ταυτόχρονη παραγωγή**:

- ηλεκτρικής ενέργειας
- χρήσιμης θερμότητας

από μία ενιαία διεργασία μετατροπής ενέργειας (καύση, ατμός, αεριοστρόβιλος).

Αύξηση συνολικής απόδοσης από ~40% (ξεχωριστή παραγωγή) σε ~80-90%

Γιατί CHP (Combined Heat and Power);



- ▶ Μείωση πρωτογενούς ενέργειας (PES)
- ▶ Μείωση εκπομπών CO₂
- ▶ Αξιοποίηση θερμότητας που αλλιώς απορρίπτεται
- ▶ Υψηλή ηλεκτρική απόδοση
- ▶ Τηλεθέρμανση / τηλεψύξη
- ▶ Αυτοπαραγωγή σε βιομηχανίες

Εξίσωση ωφέλειας CHP

Συντελεστής συνολικής απόδοσης:

$$\eta_{CHP} = \frac{P_{el} + Q_{th}}{Q_{fuel}}$$

όπου:

- ▶ P_{el} :ηλεκτρική ισχύς
- ▶ Q_{th} :ανακτώμενη θερμότητα
- ▶ Q_{fuel} :θερμογόνο δύναμη καυσίμου

Μοντέλο Απώλειας Θερμότητας

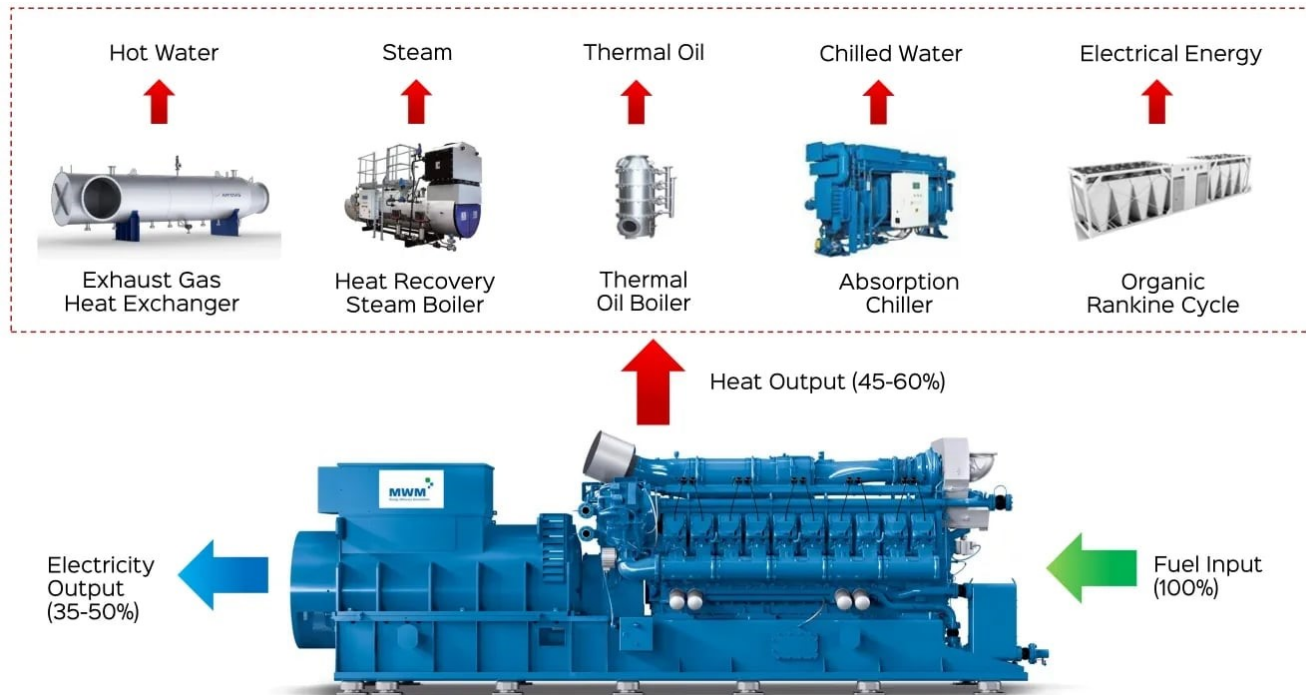
Κάθε συμβατικός σταθμός απορρίπτει:

$$Q_{loss} = Q_{fuel} - P_{el}$$

Το CHP ανακτά μέρος του Q_{loss} :

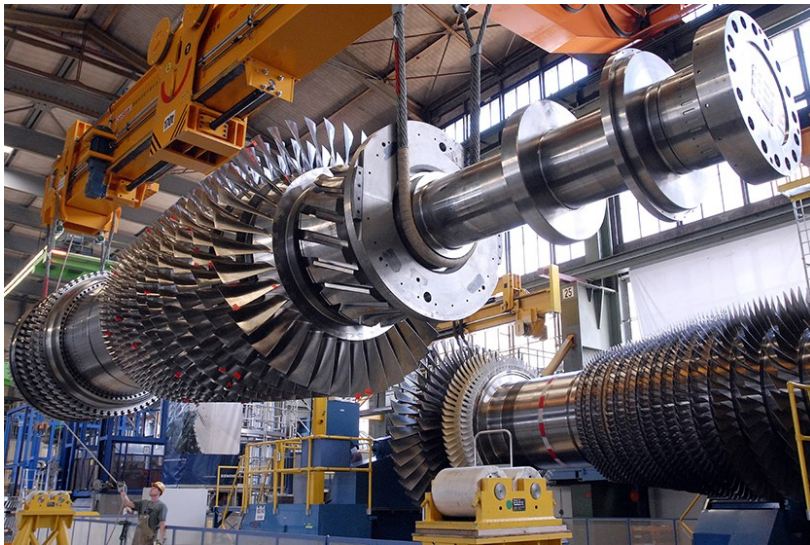
$$Q_{recover} = \eta_{th} \cdot Q_{loss}$$

Τύποι συστημάτων CHP



- ▶ Αεριοστρόβιλοι (Brayton cycle)
- ▶ Παλινδρομικοί κινητήρες (Otto/Diesel)
- ▶ Μικροστρόβιλοι
- ▶ Ατμοστρόβιλοι (Rankine CHP)
- ▶ ORC (Organic Rankine Cycle)
- ▶ Κυψέλες καυσίμου
- ▶ Βιοαέριο / Βιομάζα CHP

Αεριοστρόβιλοι (CHP)



Κύκλος Brayton με ανάκτηση θερμότητας:

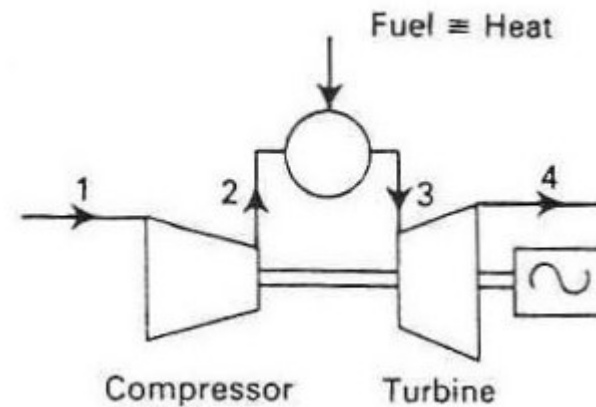
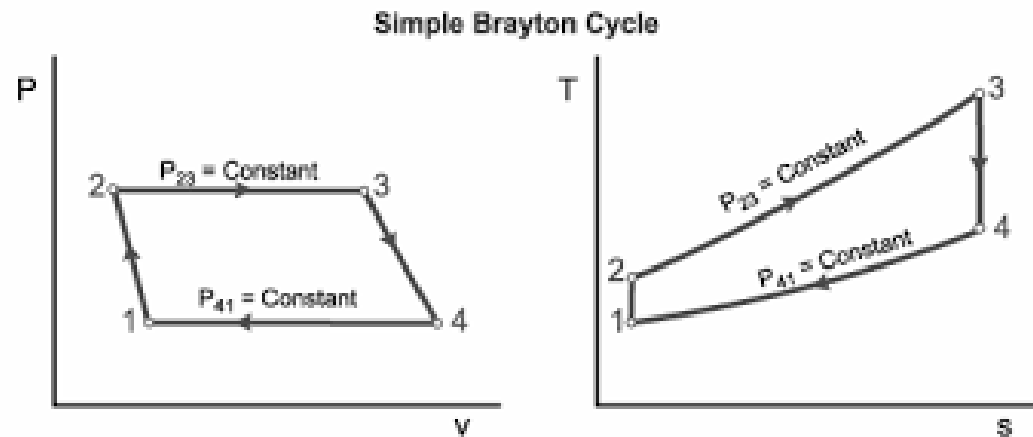
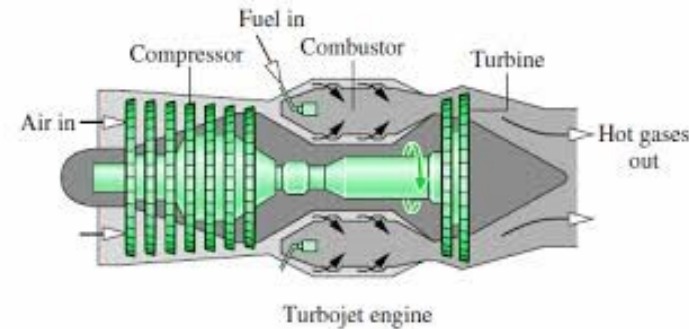
- καύση → αέρια 900-1100°C → στρόβιλος
- θερμότητα καυσαερίων ~450°C → HRSG → θερμότητα

Σχηματική εξίσωση:

$$\eta_{el} = \frac{P_{turbine} - P_{compressor}}{Q_{fuel}}$$

Θερμοδυναμικός κύκλος Brayton

- 1-2: αδιαβατική συμπίεση
- 2-3: ισοβαρής θέρμανση
- 3-4: αδιαβατική εκτόνωση
- 4-1: ισοβάρης ψύξη



Ισοεντροπικές Αποδόσεις (Isentropic Efficiencies)

Για αεριοστρόβιλο:

Στρόβιλος:

$$\eta_{t,is} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$$

Συμπιεστής:

$$\eta_{c,is} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

$h = C_p T$

Ερμηνεία:

- ▶ Όσο μεγαλύτερη η ισοεντροπική απόδοση → τόσο μικρότερες οι εντροπικές απώλειες → υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση CHP.

Τυπικές τιμές:

- ▶ Αεριοστρόβιλοι: 82-92%
- ▶ Συμπιεστές: 80-88%

Τι είναι η Exergy (Εξέργεια)

Η εξέργεια είναι το **μέγιστο χρήσιμο έργο** που μπορεί να παράγει ένα σύστημα όταν έρθει σε ισορροπία με το περιβάλλον.

Δηλαδή:

Πόση από την ενέργεια μπορεί πραγματικά να μετατραπεί σε έργο;

⚠ Η ενέργεια ποτέ δεν χάνεται (1ος νόμος), αλλά η **εξέργεια χάνεται**, επειδή η πραγματική διαδικασία έχει τριβές, απώλειες θερμότητας, μη αντιστρεπτότητες.

Παραδείγματα:

- ▶ 1 kWh ηλεκτρισμού = 1 kWh εξέργειας (100% διαθέσιμη για έργο).
- ▶ 1 kWh θερμότητας στους 50°C ≠ 1 kWh εξέργειας (είναι πολύ λιγότερη).
- ▶ 1 kWh θερμότητας στους 600°C έχει υψηλή εξέργεια.
- ▶ Καύσιμα → υψηλή εξέργεια.
- ▶ Χλιαρό νερό → πολύ χαμηλή εξέργεια.

Γιατί μας ενδιαφέρει η exergy στη Συμπαραγωγή (CHP);

- ▶ Γιατί η CHP προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την καταστροφή εξέργειας και να αξιοποιήσει θερμότητα που αλλιώς θα χάνονταν.
- ▶ Ο θάλαμος καύσης, ο εναλλάκτης θερμότητας, η HRSG, ο στρόβιλος, όλα «καταστρέφουν» μέρος της διαθέσιμης ενέργειας.

Exergy Destruction σε CHP

Η εκτενής ανάλυση διαθεσιμότητας:

$$Ex_{destroyed} = T_0 \Delta S_{gen}$$

$Ex_{destroyed}$: Καταστροφή εξέργειας, δηλαδή πόση από τη διαθέσιμη ενέργεια χάθηκε λόγω μη αντιστρεπτότητας.

T_0 : Είναι η θερμοκρασία στην οποία το σύστημα χάνει κάθε δυνατότητα να παράγει έργο.

ΔS_{gen} : Παραγόμενη εντροπία λόγω μη αντιστρεπτότητας.

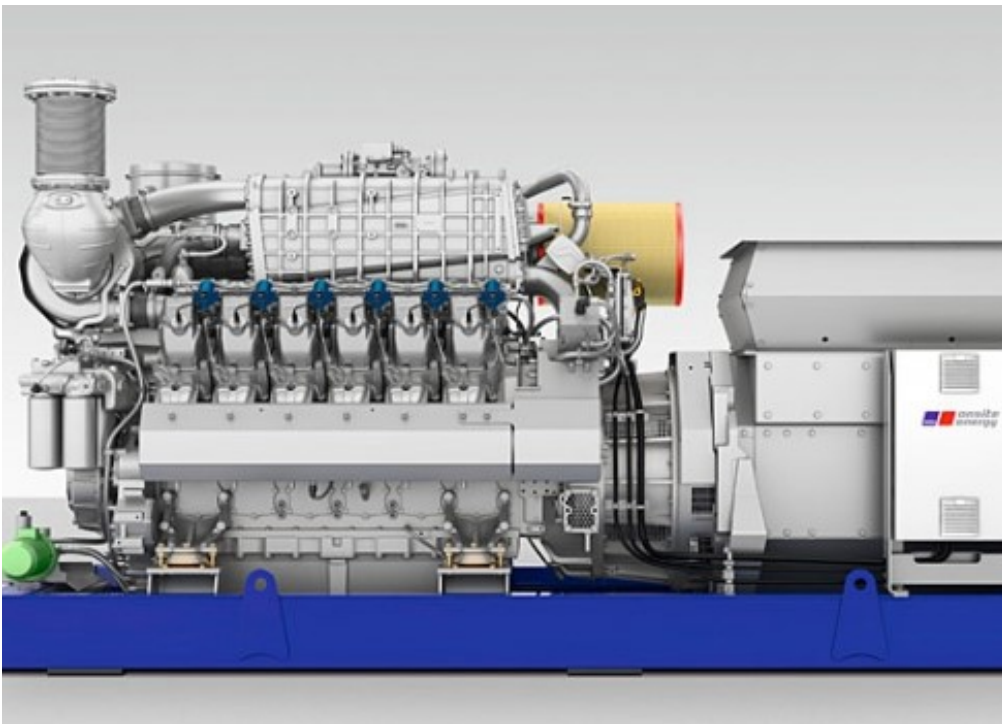
Μέρη συστήματος με υψηλές εξεργιακές απώλειες:

- ▶ Θάλαμος καύσης (μεγαλύτερη καταστροφή exergy)
- ▶ HRSG (λόγω θερμικών απωλειών και μη αντιστρεπτών μεταφορών)
- ▶ Στρόβιλος (λόγω τριβών & μη ιδανικής εκτόνωσης)
- ▶ Αγωγοί & εναλλάκτες θερμότητας

Πρακτικά:

CHP αντιστοιχεί σε «διαχείριση exergy» ώστε η θερμότητα να μην πάει χαμένη.

Παλινδρομικοί κινητήρες



- ▶ Υψηλή ηλεκτρική απόδοση (38-45%)
- ▶ Θερμότητα από:
 - ▶ νερό ψύξης
 - ▶ καυσαέρια
 - ▶ λιπαντικά
- ▶ Ισχύς: 100 kW - 10 MW

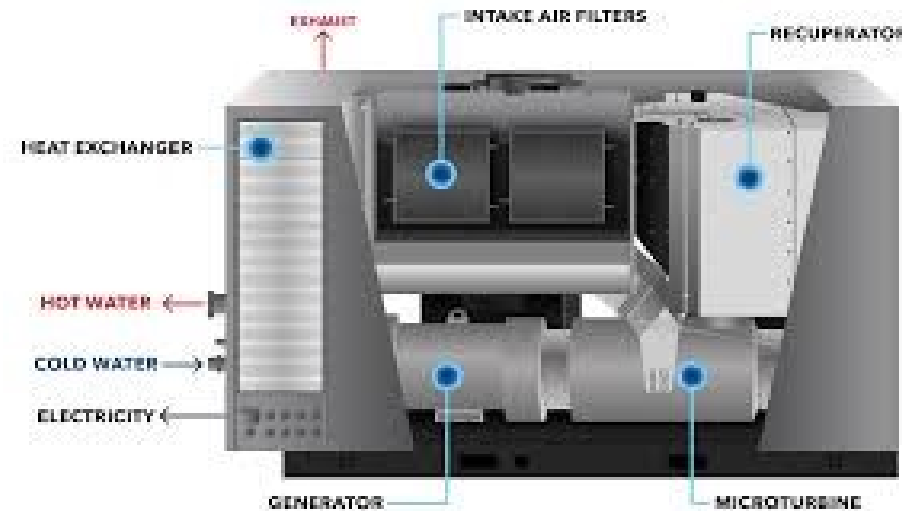
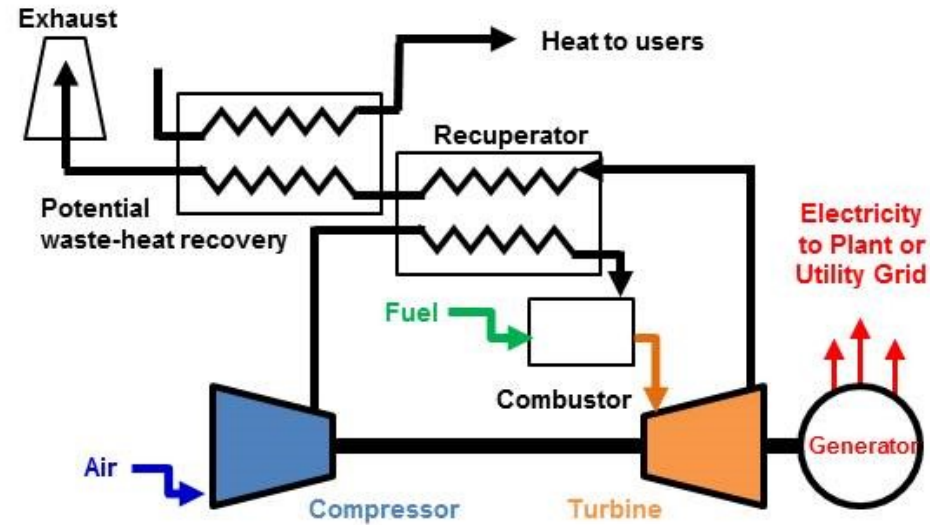
Μικροστρόβιλοι

Ισχύς: 30-500 kW

Κάυσιμα: φυσικό αέριο,
βιοαέριο

Πλεονεκτήματα:

- καθαρή καύση
- μικρή συντήρηση
- υψηλή ταχύτητα
στροφής (60.000 rpm)

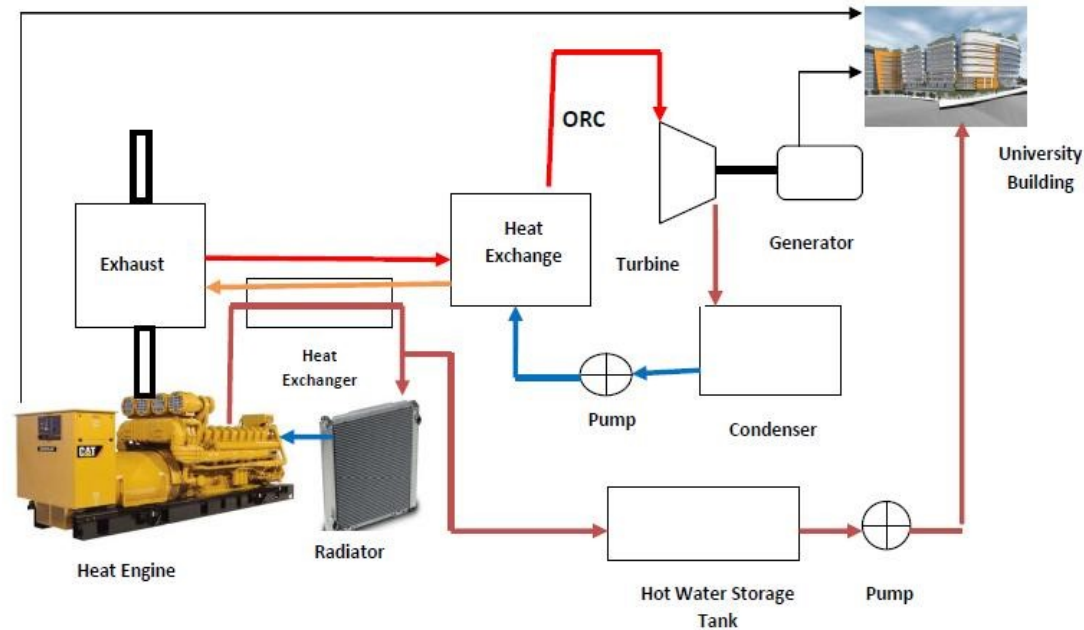


ORC Συμπαγωγή

Organic Rankine Cycle

Χρήση οργανικού ρευστού (πάνω σημείο βρασμού):

- ▶ χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου
- ▶ Βιομάζα CHP
- ▶ Βιομηχανικά απόβλητα



Organic Rankine Cycle (ORC)

Ο Οργανικός Κύκλος Rankine (Organic Rankine Cycle) είναι ένας θερμοδυναμικός κύκλος που μετατρέπει θερμική ενέργεια (από πηγές όπως η γεωθερμία, η βιομάζα, τα απόβλητα βιομηχανιών κ.λπ.) σε ηλεκτρική ενέργεια, χρησιμοποιώντας ένα οργανικό ρευστό (με χαμηλότερο σημείο βρασμού από το νερό) αντί για νερό. Η χρήση ενός τέτοιου ρευστού επιτρέπει την αξιοποίηση πηγών θερμότητας χαμηλότερων θερμοκρασιών και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πιο αποδοτικά και με λιγότερη διάβρωση στα εξαρτήματα.

Πώς λειτουργεί

Εξάτμιση: Μια πηγή θερμότητας θερμαίνει ένα οργανικό ρευστό, προκαλώντας την εξάτμισή του και τη δημιουργία ατμού υψηλής πίεσης.

Περιστροφή: Ο ατμός αυτός περνά μέσα από μια τουρμπίνα, η οποία περιστρέφεται και παράγει μηχανικό έργο, που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας γεννήτριας.

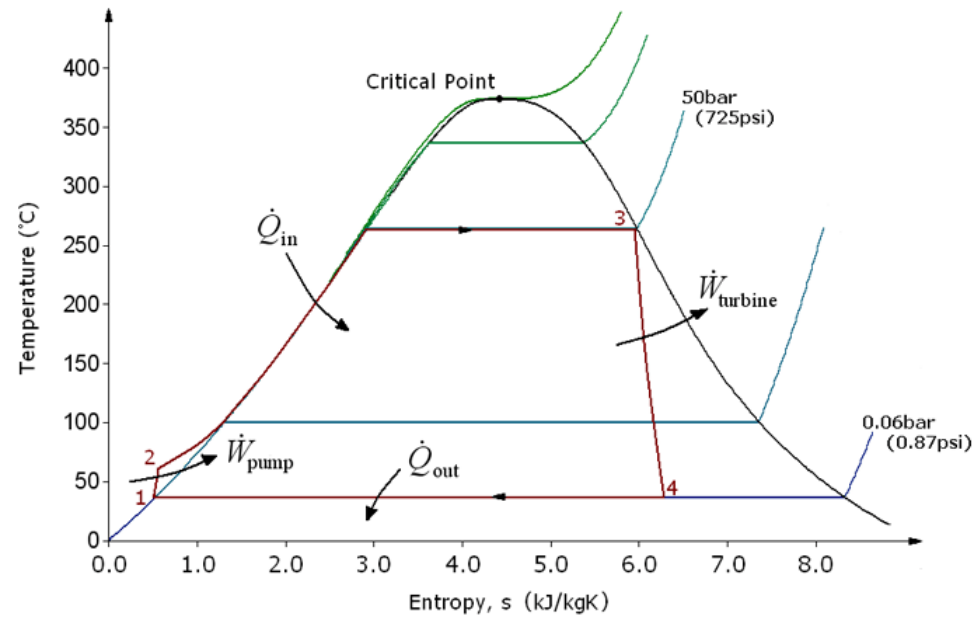
Συμπύκνωση: Μετά την έξοδό του από την τουρμπίνα, ο ατμός ψύχεται και συμπυκνώνεται ξανά σε υγρό.

Επαναφορά: Το υγρό επιστρέφει με αντλία πίσω στον εξατμιστή, ολοκληρώνοντας τον κύκλο και ξεκινώντας ξανά τη διαδικασία.

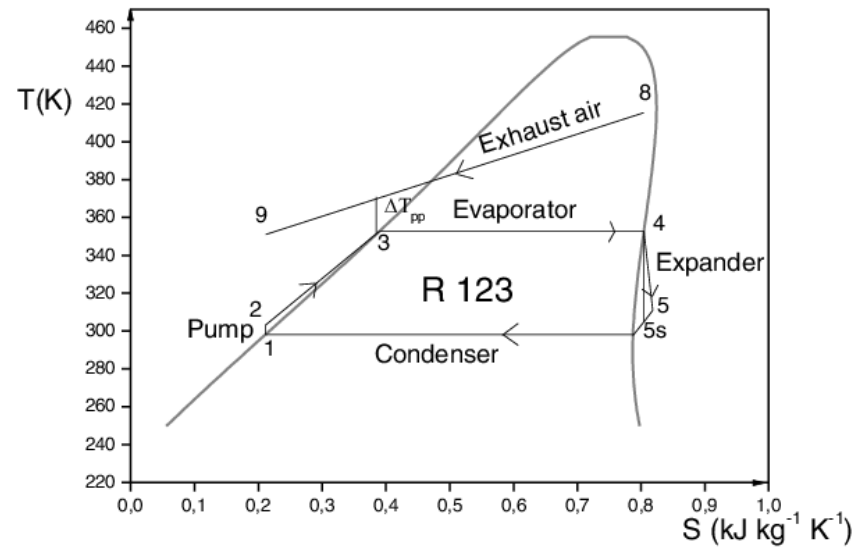
Βασικά Πλεονεκτήματα ORC

- ▶ Χαμηλές θερμοκρασίες: Μπορεί να αξιοποιήσει πηγές θερμότητας χαμηλότερων θερμοκρασιών, όπως απορριπτόμενη θερμότητα από βιομηχανίες ή γεωθερμικές πηγές.
- ▶ Μικρότερη διάβρωση: Η χρήση οργανικού ρευστού αντί για νερό αποτρέπει τη διάβρωση των εξαρτημάτων του συστήματος.
- ▶ Χαμηλότερες πιέσεις και ταχύτητες: Η τουρμπίνα λειτουργεί με χαμηλότερες πιέσεις και ταχύτητες, μειώνοντας τον θόρυβο και τις δονήσεις.
- ▶ Ευελιξία: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (γεωθερμία, βιομάζα) και η ανάκτηση θερμότητας από βιομηχανικές διεργασίες.

Διάγραμμα Rankine και ORC

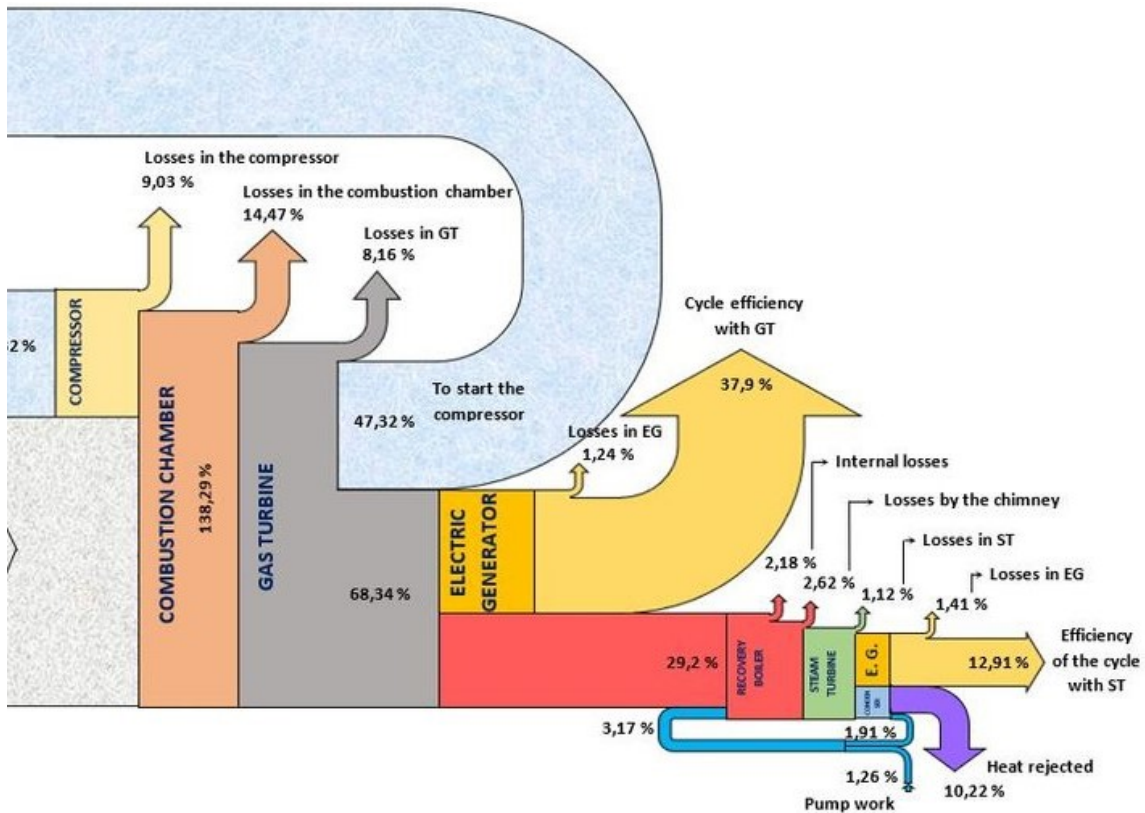


Rankine Cycle



Organic Rankine Cycle

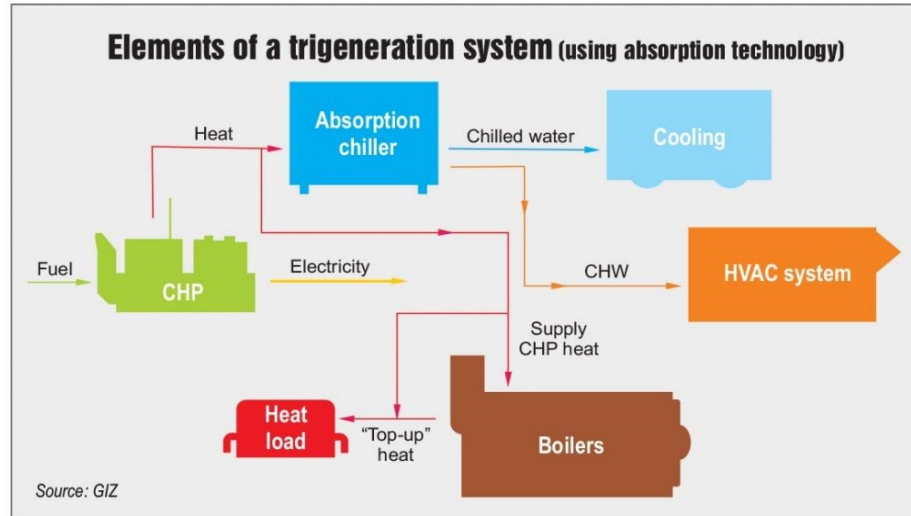
Διάγραμμα Sankey Exergy



Διανέμεται:

- Ex(fuel)
- Ex(thermal useful)
- Ex(electricity)
- Ex(losses) σε:
 - καύση
 - HRSG
 - exit stack
 - friction

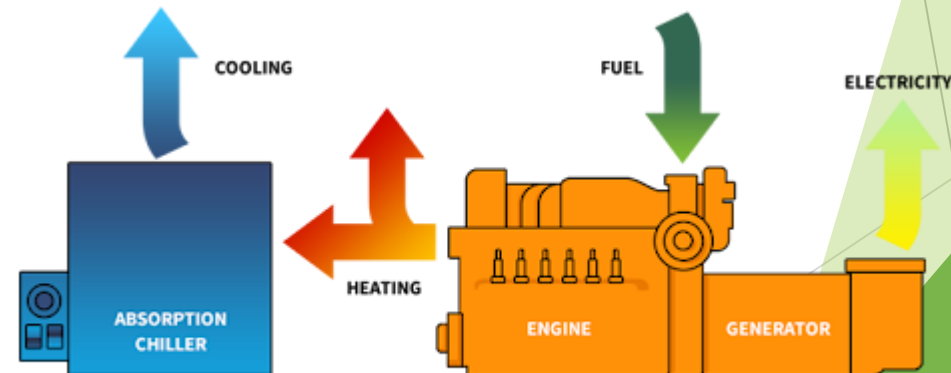
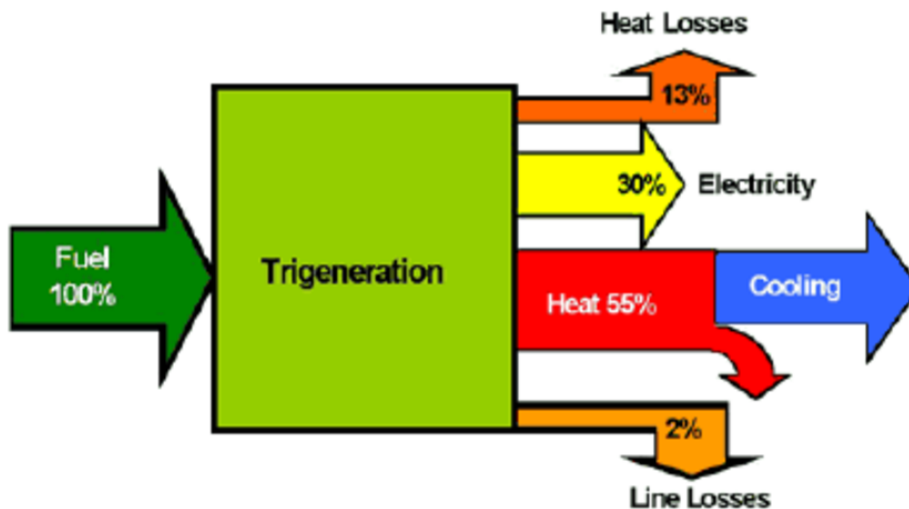
Trigeneration (ψύξη+θέρμανση+ηλεκτρισμός)



Με απορροφητικό ψύκτη LiBr:

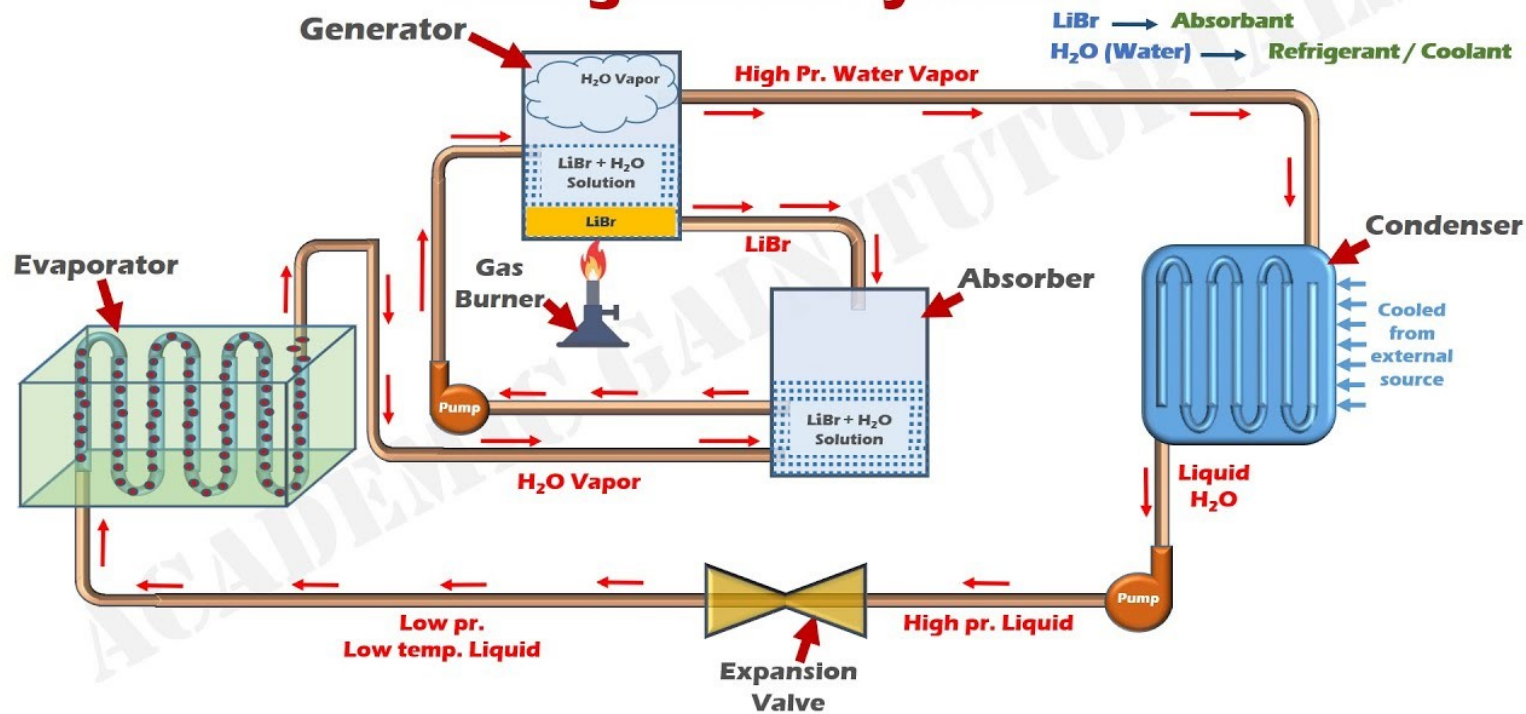
$$Q_{cool} = COP_{abs} \cdot Q_{heat}$$

► COP $\approx$ 0.7-1.2



Απορροφητικός ψύκτης LiBr

Lithium Bromide (LiBr) Absorption Refrigeration System

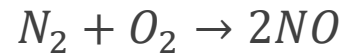


Εξήγηση:

- Γεννήτρια
- Απορροφητήρας
- Συμπυκνωτής
- Εξατμιστής

Σχηματισμός NOx σε CHP

Σχηματισμός θερμικών NOx:



Η καύση φυσικού αερίου σε υψηλές T παράγει NOx.

Ατμοσφαιρικοί ρύποι υψηλής επικινδυνότητας.

Μηχανισμοί:

- ▶ **Thermal NOx** (Zeldovich mechanism) > 1500°C
- ▶ **Prompt NOx** (Fenimore)
- ▶ **Fuel NOx** (όταν υπάρχει άζωτο στο καύσιμο → π.χ. βιομάζα)

Μέτρα μείωσης:

- ▶ Lean premix burners
- ▶ Flue gas recirculation
- ▶ Low-NOx κεφαλές
- ▶ SCR (Selective Catalytic Reduction)

Combustion Efficiency (CHP)

Η απόδοση καύσης:

$$\eta_{comb} = 1 - \frac{CO + UHC}{CO_2 + H_2O}$$

Μετράει πόσο καλά καίγεται το καύσιμο μέσα στον καυστήρα / κινητήρα / αεριοστρόβιλο.

- ▶ Αν η καύση είναι τέλεια → έχουμε μόνο CO_2 και H_2O .
- ▶ Αν η καύση είναι ατελής → εμφανίζονται CO και UHC (άκαυστοι υδρογονάνθρακες).
- ▶ Η εξίσωση συγκρίνει τα “σωστά προϊόντα” με τα “λάθος προϊόντα” και εκφράζει την απόδοση.

Παράγοντες που την επηρεάζουν:

- ▶ λ (λόγος αέρα)
- ▶ αιώρηση καυσίμου
- ▶ θερμοκρασία φλόγας
- ▶ ανάμιξη
- ▶ residence time

Κυμαίνεται μεταξύ:

- ▶ 98-99% για φυσικό αέριο
- ▶ 90-95% για diesel
- ▶ 80-90% για στερεά καύσιμα / βιομάζα

Ενεργειακό ισοζύγιο και αποδόσεις CHP

$$Q_{fuel} = P_{el} + Q_{th} + Q_{loss}$$

- ▶ Q_{fuel} : Εισροή καυσίμου (Fuel Input Energy)

πχ. Για φυσικό αέριο:

$$Q_{fuel} = \dot{m}_{fuel} \cdot LHV$$

- ▶ P_{el} : Ηλεκτρική Ισχύς (Useful Electric Power)

$$P_{el} = \eta_{el} \cdot Q_{fuel}$$

η_{el} = ηλεκτρική απόδοση της μονάδας (30-45% για αεριοστρόβιλο CHP).

- ▶ Q_{th} : Χρήσιμη Θερμότητα (Recovered Heat)

$$Q_{th} = \eta_{th} \cdot Q_{fuel}$$

η_{th} : Κυμαίνεται σε 35-55%

- ▶ Q_{loss} : Θερμικές Απώλειες (Losses)

$$Q_{loss} = 5\% - 20\% \cdot Q_{fuel}$$

Συγκριτική ανάλυση με μονοπαραγωγή

Για την ίδια παραγωγή:

- ▶ Μονοπαραγωγή: απαιτεί 100 μονάδες καυσίμου
- ▶ CHP: απαιτεί 60-70 μονάδες
→ Εξοικονόμηση 30-40%

HRSG: Pinch Point & Approach Point

HRSG είναι ο εναλλάκτης θερμότητας που ανακτά θερμότητα από τα καυσαέρια ενός αεριοστρόβιλου για να παράγει:

- ▶ ατμό υψηλής πίεσης
- ▶ ατμό χαμηλής πίεσης
- ▶ ζεστό νερό
- ▶ για τηλεθέρμανση, διεργασίες, ή τριπαραγωγή

Pinch Point

Το pinch point είναι η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα:

- ▶ στη θερμοκρασία του κορεσμένου ατμού στη drum, και
- ▶ στη θερμοκρασία των καυσαερίων στο σημείο εξόδου του evaporator.

Δηλαδή:

$$\text{Pinch Point} = T_{\text{gas,out,evaporator}} - T_{\text{steam,sat}}$$

Είναι το πιο “κρίσιμο” σημείο του HRSG.

Εκεί η μεταφορά θερμότητας είναι πιο δύσκολη.

Γιατί είναι σημαντικό;

- ▶ Μικρό pinch → ο HRSG ανακτά περισσότερη θερμότητα → υψηλότερο Q_{th} .
- ▶ Πολύ μικρό pinch → τεράστια επιφάνεια εναλλάκτη → ακριβός HRSG → ανεφάρμοστο.
- ▶ Μεγάλο pinch → μικρή ανάκτηση θερμότητας → άχρηστη θερμότητα στα καυσαέρια.

Τυπικές τιμές:

- ▶ 10-15 °C για οικονομικά συστήματα
- ▶ 8-10 °C για υψηλή ανάκτηση (πιο ακριβό)
- ▶ >15 °C → “φτωχός” HRSG

Approach Point

Το approach point είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ:

- ▶ της θερμοκρασίας του κορεσμένου νερού/ατμού στη drum, και
- ▶ της θερμοκρασίας του νερού στην έξοδο του economizer.

Δηλαδή:

$$\text{Approach Point} = T_{\text{steam,sat}} - T_{\text{water,out,economizer}}$$

Το approach point δείχνει πόσο κοντά φτάνει το εξερχόμενο νερό στην θερμοκρασία κορεσμού.

- ▶ Μικρό approach → υψηλή απόδοση economizer → μεγάλη επιφάνεια.
- ▶ Μεγάλο approach → μικρότερη ανάκτηση θερμότητας.

Τυπικές τιμές:

- ▶ 5-10 °C (συνηθισμένο)
- ▶ 3-5 °C (πολύ ακριβός HRSG)
- ▶ >12 °C (φτωχή ανάκτηση)

Πώς συνδέονται pinch & approach;

Για έναν HRSG:

- ▶ Το **pinch point** περιορίζει την ανάκτηση ατμού στο evaporator.
- ▶ Το **approach point** περιορίζει την ανάκτηση στον economizer.

Μαζί καθορίζουν:

- ▶ συνολικό Q_{th}
- ▶ συνολικό efficiency
- ▶ απαραίτητη επιφάνεια εναλλάκτη
- ▶ θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων
- ▶ κόστος HRSG

Exergy analysis CHP

Θερμοδυναμική απόδοση (2nd law):

$$\eta_{ex} = \frac{W_{useful} + Ex_{th}}{Ex_{fuel}}$$

Η **exergy efficiency** δείχνει πόσο μέρος της διαθέσιμης (υψηλής ποιότητας) ενέργειας του καυσίμου μετατρέπεται σε χρήσιμη ενέργεια, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μη αντιστρεπτότητες (irreversibilities).

Δεν εξετάζει μόνο το “πόση ενέργεια πήραμε”, αλλά πόσο “ποιοτική” είναι αυτή η ενέργεια.

Exfuel – Εξέργεια καυσίμου (Exergy input)

Είναι η μέγιστη δυνατή χρήσιμη ενέργεια που μπορεί να δώσει το καύσιμο.

Για ένα καύσιμο:

$$Ex_{fuel} \approx 1.04 \cdot LHV \text{ (για φυσικό αέριο)}$$

Προέρχεται από:

- ▶ χημική εξέργεια του φυσικού αερίου
- ▶ πολύ μικρή φυσική εξέργεια (λόγω θερμοκρασίας καυσίμου)

Η χημική εξέργεια είναι περίπου:

- ▶ **103-106% του LHV** για καθαρό CH₄
- ▶ Αυτό σημαίνει ότι το καύσιμο περιέχει περισσότερη “διαθέσιμη” ενέργεια από την απλή θερμογόνο δύναμη.

Wuseful – Χρήσιμο μηχανικό/ηλεκτρικό έργο

Είναι η ηλεκτρική ισχύς του συστήματος CHP.

Αν το CHP παράγει ηλεκτρικό έργο με στρόβιλο, κινητήρα, ORC κ.λπ., τότε:

$$W_{useful} = P_{el}$$

Η ηλεκτρική ενέργεια έχει **exergy** = 100% της ενέργειάς της, γιατί μπορεί να μετατραπεί πλήρως σε έργο.

Ex_{th} – Εξέργεια της θερμότητας (Exergy of recovered heat)

Η θερμότητα **ΔΕΝ** έχει όλη την ενέργεια της διαθέσιμη για έργο.
Το πόσο διαθέσιμο είναι εξαρτάται από το πόσο “θερμή” είναι σε σχέση με το περιβάλλον.

Η εξέργεια θερμότητας δίνεται από:

$$Ex_{th} = Q_{th} \left(1 - \frac{T_0}{T_{source}} \right)$$

όπου:

Q_{th} = λαμβανόμενη θερμότητα

T_{source} = θερμοκρασία πηγής θερμότητας

T_0 = θερμοκρασία περιβάλλοντος

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ:

Αν τηλεθέρμανση παράγει νερό στους 90°C:

$$T_{source} = 363K, T_0 = 298K$$

$$Ex_{th} = Q_{th} \cdot (1 - 298/363)$$

$$Ex_{th} = Q_{th} \cdot 0.18$$

Δηλαδή μόνο **18%** της θερμότητας έχει χρησιμότητα ως εξέργεια.

Πιθανές τιμές για ένα CHP

Σε ένα σύγχρονο CHP:

- ▶ Η ηλεκτρική απόδοση exergy είναι υψηλή (35-45% για αεριοστρόβιλο).
- ▶ Η εξέργεια θερμότητας είναι χαμηλή (10-20% ανάλογα τη θερμοκρασία).

Άρα:

- ▶ Συνολικό $\eta_{ex} \approx 45-60\%$ για αεριοστρόβιλο
- ▶ **60-75%** για κινητήρες Diesel
- ▶ **30-45%** για ORC (χαμηλές θερμοκρασίες → χαμηλή exergy th)

Η συνολική ενέργεια μπορεί να είναι **85-90%**, αλλά η εξέργεια πολύ μικρότερη.

Backpressure vs Extraction (Condensing) CHP

Backpressure:

- ▶ όλη η ατμοπαροχή → θερμικό φορτίο
- ▶ υψηλότερη θερμοαπόδοση
- ▶ χαμηλότερη ηλεκτρική απόδοση
- ▶ ιδανικό για τηλεθέρμανση

Extraction-Condensing:

- ▶ συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρισμού
- ▶ δυνατότητα μεταβολής P_{el} / Q_{th}
- ▶ κατάλληλο για βιομηχανίες

Τι είναι το Backpressure CHP

Ο ατμός εκτονώνεται από υψηλή πίεση προς μια σχετικά υψηλή πίεση εξόδου, όχι μέχρι κενό.

Δηλαδή:

$$p_{out} \text{ (backpressure)} > p_{cond}$$

Ο ατμός ΔΕΝ φτάνει ποτέ στον συμπυκνωτή.

Αντί γι' αυτό:

- ▶ Ο ατμός εξόδου χρησιμοποιείται απευθείας για θέρμανση ή διεργασίες.
- ▶ Δεν υπάρχει condensing section.
- ▶ Δεν υπάρχει ψυχρό άκρο (vacuum).

Ο ατμός εξόδου πηγαίνει:

- ▶ τηλεθέρμανση
- ▶ δίκτυα ατμού
- ▶ βιομηχανικές διεργασίες
- ▶ Η θερμότητα είναι **υψηλής ποιότητας**, άρα και η συνολική απόδοση είναι υψηλή.

Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα Backpressure

Πλεονεκτήματα:

- ▶ Υψηλή συνολική απόδοση → 80-90%
- ▶ Απλό σύστημα, χαμηλό κόστος
- ▶ Υψηλή θερμοκρασία ατμού εξόδου
- ▶ Ιδανικό για συνεχείς βιομηχανικές διεργασίες (χαρτοποιία, τρόφιμα, διύλιση)

Μειονεκτήματα Backpressure:

- ▶ Λίγος ηλεκτρισμός σε σχέση με extraction/condensing
- ▶ Εξαρτάται απόλυτα από τη ζήτηση θερμότητας
- ▶ Όταν πέσει η θερμική ζήτηση → πέφτει η ηλεκτροπαραγωγή

Τι είναι το Extraction-Condensing CHP

Ο ατμός εκτονώνεται:

- ▶ Μερικώς για παραγωγή χρήσιμης θερμότητας
- ▶ Πλήρως μέχρι κενό (condensing) για μέγιστη ηλεκτροπαραγωγή

Δηλαδή:

$$p_{out} = p_{cond} \approx 0.05-0.10 \text{ bar}$$

Ο στρόβιλος έχει στάδιο εκτροπής (extraction) στο ενδιάμεσο.

Τύποι ατμών

1) Extraction steam (μεσαία πίεση)

→ για τηλεθέρμανση ή διεργασίες

2) Condensing steam (χαμηλότερη πίεση)

→ παράγει μέγιστο έργο αλλά πολύ χαμηλής ποιότητας θερμότητα, η οποία απορρίπτεται στον συμπυκνωτή.

Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα Extraction-Condensing

Πλεονεκτήματα

- ▶ Μέγιστη ηλεκτροπαραγωγή → πολύ μεγαλύτερη από Backpressure
- ▶ Μπορεί να δουλέψει και χωρίς ζήτηση θερμότητας
- ▶ Πολύ ευέλικτο σύστημα
- ▶ Συνδυάζεται με τηλεθέρμανση (district heating)

Μειονεκτήματα Ακριβό

- ▶ Μεγάλος συμπυκνωτής → ανάγκη για νερό ψύξης
- ▶ Απώλειες θερμότητας στον συμπυκνωτή → μειώνει total CHP efficiency
- ▶ Πολυπλοκότητα στον έλεγχο

Τυπικά μεγέθη απόδοσης

Σύστημα	Ηλεκτρική απόδοση	Θερμική απόδοση	Ολική
Backpressure	15-30%	50-70%	80-90%
Extraction-Condensing	30-45%	20-40%	55-75%

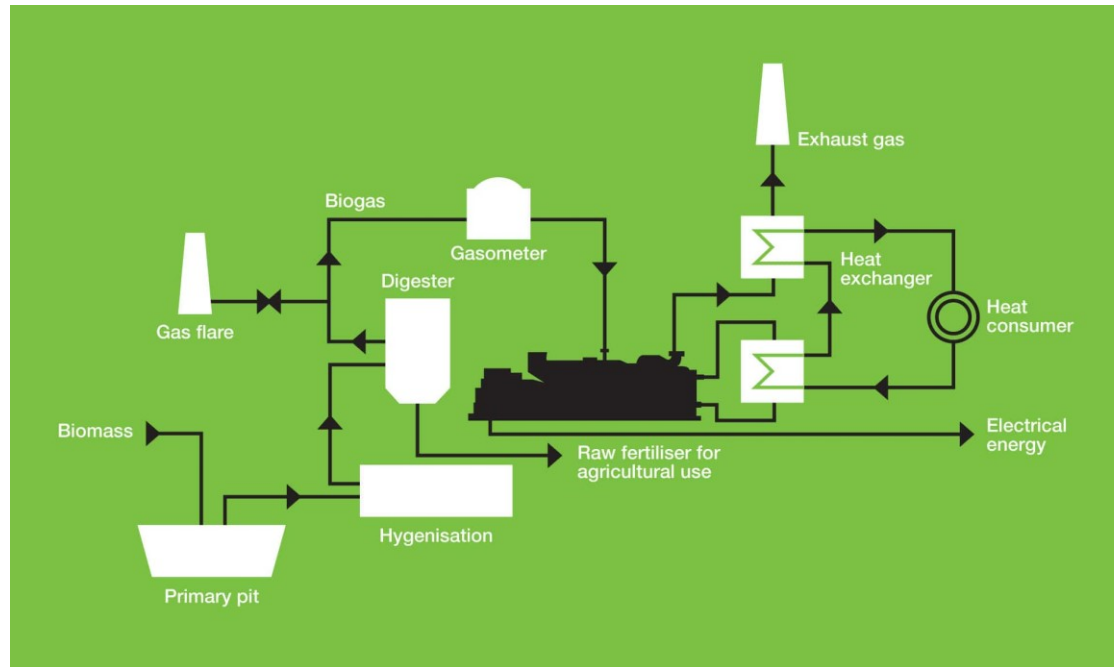
CHP με Φυσικό Αέριο στην Ελλάδα

Παραδείγματα:

- ▶ Νοσοκομεία
- ▶ Βιομηχανίες (ΓΙΟΥΛΑ, ΤΙΤΑΝ)
- ▶ Δημόσια κτίρια
- ▶ Τηλεθέρμανση

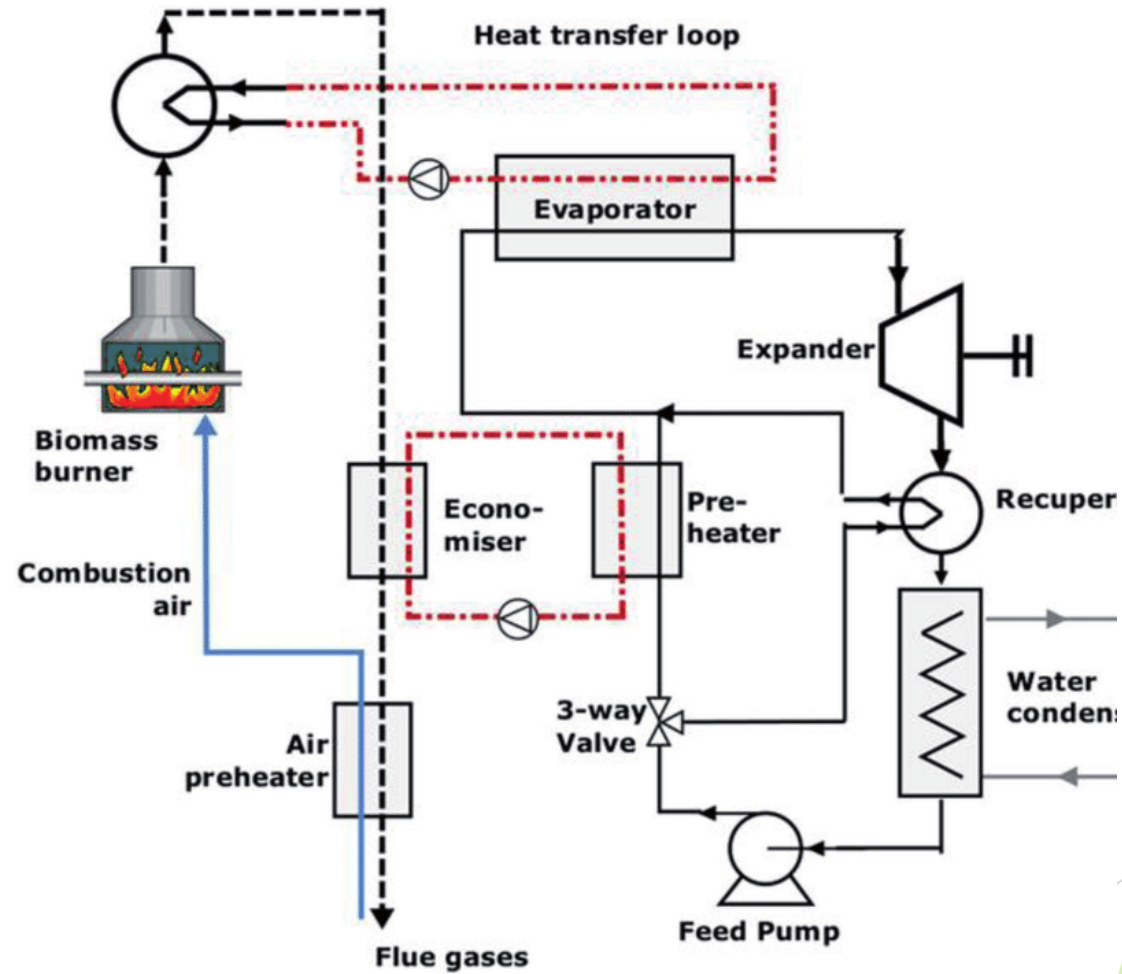
CHP με Βιοαέριο στην Ελλάδα

ΧΥΤΑ, Μονάδες
Αναερόβιας Χώνευσης
Ισχύς 0.5-2 MW ανά
μονάδα.



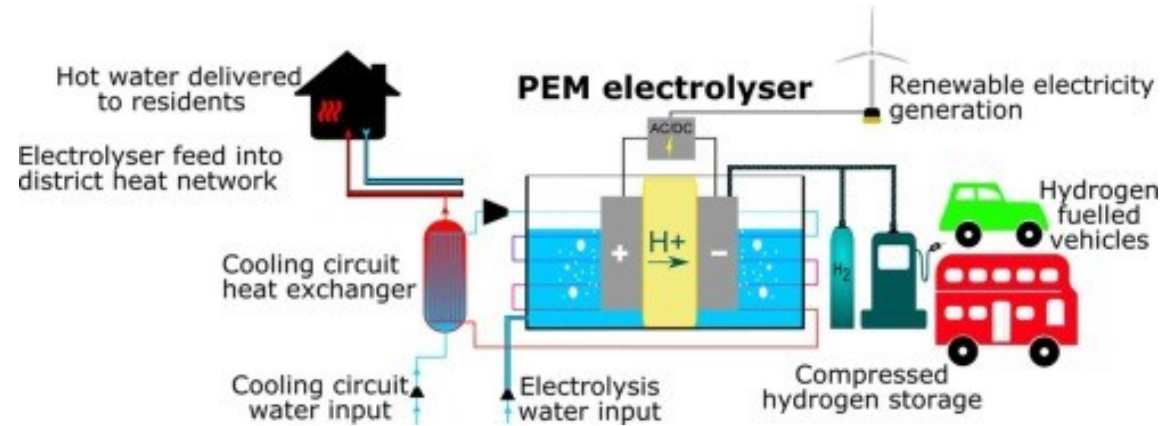
CHP με Βιομάζα

- Ξύλο, αγροτικά υπολείμματα
- ORC + λέβητας βιομάζας.

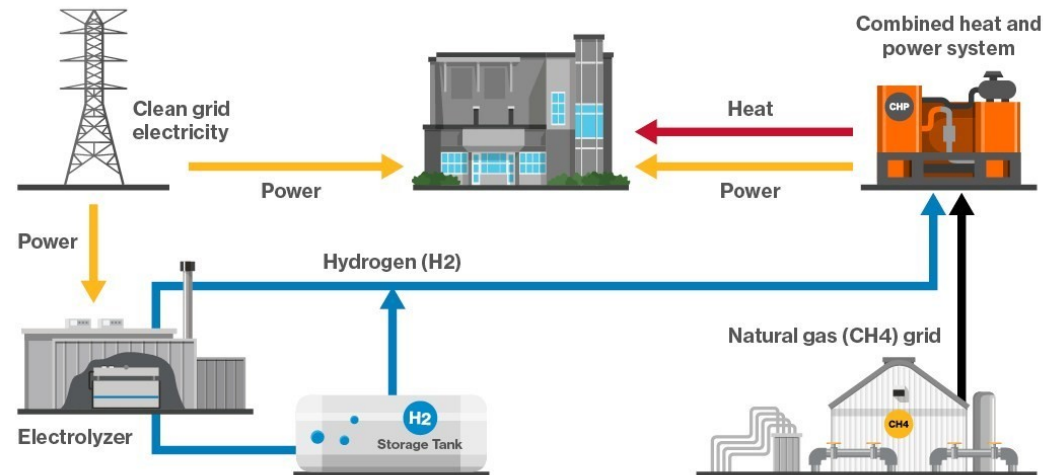


CHP με Υδρογόνο (μελλοντικό)

- Κύκλος Brayton με H_2
- Απαλλαγή CO_2
- Υψηλές φλόγες → υλικά υψηλής θερμοκρασίας.



Combined heat and power (CHP) system schematic



Οικονομική ανάλυση

- ▶ LCOE
- ▶ LCOH
- ▶ Fuel cost
- ▶ Payback period
- ▶ OPEX/CAPEX CHP

Παράδειγμα Οικονομικής Ανάλυσης

Σύστημα CHP με κινητήρα φυσικού αερίου σε Βιομηχανία ή νοσοκομείο:

Ονομαστική ηλεκτρική ισχύς:

$$P_{el} = 1 \text{ MW}$$

Ηλεκτρική απόδοση κινητήρα:

$$\eta_{el} = 38\%$$

Θερμική απόδοση (ανάκτηση θερμότητας):

$$\eta_{th} = 45\%$$

(άρα συνολική $\approx 83\%$)

Ώρες λειτουργίας:

$$h_{op} = 5,000 \text{ h/yr}$$

Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας από δίκτυο:

$$c_{el,grid} = 0,18 \text{ €/kWh}$$

Τιμή φυσικού αερίου (LHV):

$$c_{fuel} = 0,05 \text{ €/kWh}_{fuel}$$

Λέβητας αναφοράς (χωρίς CHP):

$$\eta_{boiler} = 90\%$$

Κόστος συντήρησης CHP (O&M):

$$c_{O\&M} = 0,015 \text{ €/kWh}_{el}$$

Επένδυση (engine + HRSG + βοηθητικά + εγκατάσταση):

$$I_0 = 1,500,000 \text{ €}$$

Λύση Ενεργειακά μεγέθη CHP

Κατανάλωση καυσίμου

$$P_{fuel} = \frac{P_{el}}{\eta_{el}} = \frac{1,000}{0,38} \approx 2,632 \text{ kW}_{fuel}$$

Θερμική ισχύς ανάκτησης

$$Q_{th} = \eta_{th} P_{fuel} = 0,45 \times 2,632 \approx 1,184 \text{ kW}_{th}$$

Έλεγχος συνολικής απόδοσης:

$$\eta_{tot} = \frac{P_{el} + Q_{th}}{P_{fuel}} = \frac{1,000 + 1,184}{2,632} \approx 0,83$$

Ετήσια παραγόμενη ενέργεια

Ηλεκτρική ενέργεια:

$$E_{el} = P_{el} \cdot h_{op} = 1,000 \times 5,000 = 5,000,000 \text{ kWh/yr}$$

Θερμική ενέργεια:

$$E_{th} = Q_{th} \cdot h_{op} = 1,184 \times 5,000 \approx 5,920,000 \text{ kWh/yr}$$

Καύσιμο:

$$E_{fuel} = P_{fuel} \cdot h_{op} = 2,632 \times 5,000 \approx 13,160,000 \text{ kWh/yr}$$

Λύση Κατάσταση «χωρίς CHP» (συμβατική)

Υποθέτουμε ότι η Βιομηχανία καλύπτει:

- την ίδια ηλεκτρική ζήτηση από το δίκτυο: 5 GWh/yr
- την ίδια θερμική ζήτηση με λέβητα φυσικού αερίου.

Κόστος ηλεκτρισμού από δίκτυο

$$C_{el,grid} = E_{el} \cdot c_{el,grid} = 5,000,000 \times 0,18 = 900,000 \text{ €}$$

Κατανάλωση καυσίμου λέβητα

Ο χρήσιμος θερμικός φόρτος είναι $E_{th} = 5,920,000 \text{ kWh}$.

Με $\eta_{boiler} = 0,9$:

$$E_{fuel,boiler} = \frac{E_{th}}{\eta_{boiler}} = \frac{5,920,000}{0,9} \approx 6,578,000 \text{ kWh}_{fuel}$$

Κόστος καυσίμου λέβητα:

$$C_{fuel,boiler} = E_{fuel,boiler} c_{fuel} \approx 6,578,000 \times 0,05 \approx 328,900 \text{ €}$$

Συνολικό ετήσιο ενεργειακό κόστος χωρίς CHP

$$C_{ref} = C_{el,grid} + C_{fuel,boiler} \approx 900,000 + 328,900 = 1,228,900 \text{ €}$$

Λύση Κατάσταση «με CHP»

Κόστος καυσίμου CHP

$$C_{fuel,CHP} = E_{fuel} \cdot c_{fuel} = 13,160,000 \times 0,05 \approx 658,000 \text{ €}$$

Κόστος λειτουργίας & συντήρησης

$$C_{O\&M} = E_{el} \cdot c_{O\&M} = 5,000,000 \times 0,015 = 75,000 \text{ €}$$

(Θεωρούμε ότι το CHP καλύπτει πλήρως τις ανάγκες σε ηλεκτρισμό και θερμότητα, άρα δεν υπάρχουν επιπλέον αγορές από δίκτυο ή λέβητα.)

Συνολικό ετήσιο κόστος με CHP

$$C_{CHP} = C_{fuel,CHP} + C_{O\&M} \approx 658,000 + 75,000 = 733,000 \text{ €}$$

Ετήσια οικονομική ωφέλεια

$$\Delta C = C_{ref} - C_{CHP} \approx 1,228,900 - 733,000 \approx 495,900 \text{ €/yr}$$

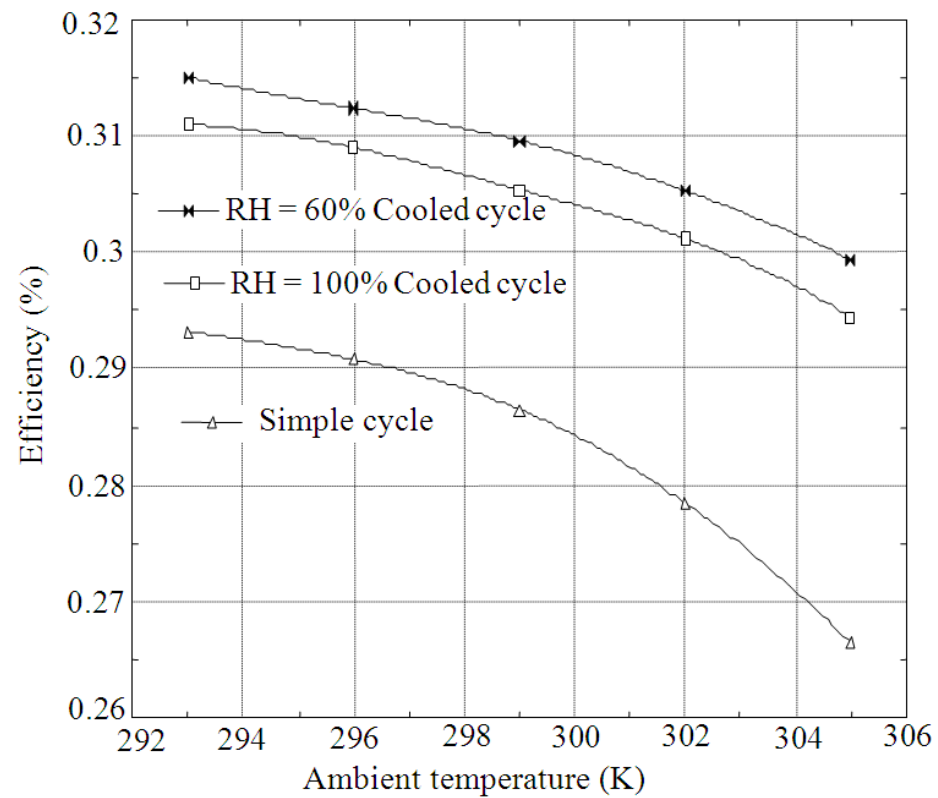
Άρα το σύστημα CHP εξοικονομεί περίπου **0,50 Μ€** τον χρόνο σε ενεργειακό κόστος.

Απλή περίοδος αποπληρωμής (Simple Payback)

$$SPB = \frac{I_0}{\Delta C} = \frac{1,500,000}{495,900} \approx 3,0 \text{ ετη}$$

Άρα η επένδυση αποπληρώνεται σε περίπου **3 χρόνια** (χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη φόρους, επιδοτήσεις κ.λπ.).

Καμπύλη επιδόσεων αεριοστρόβιλου



Πώς επηρεάζουν την ηλεκτρική απόδοση:

- θερμοκρασία περιβάλλοντος
- πίεση περιβάλλοντος
- υγρασία
- ρύποι
- μηχανική φθορά
- απόδοση συμπιεστή

Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

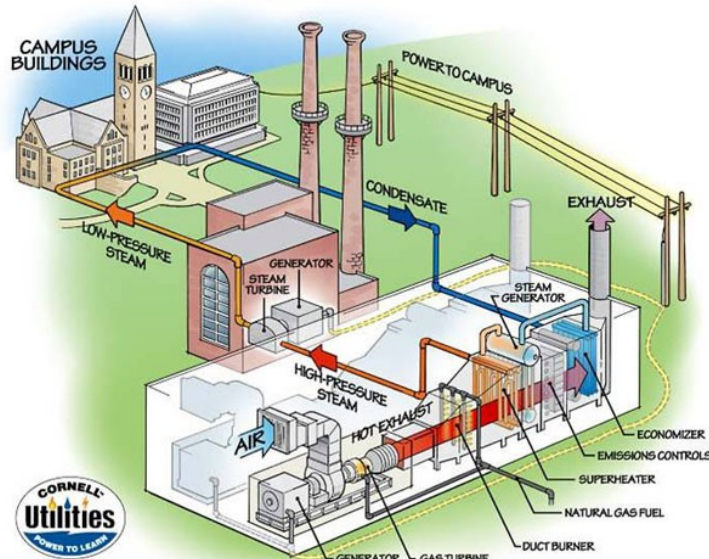
Πλεονεκτήματα:

- ▶ εξοικονόμηση ενέργειας
- ▶ αποκεντρωμένη παραγωγή
- ▶ σταθερότητα δικτύου

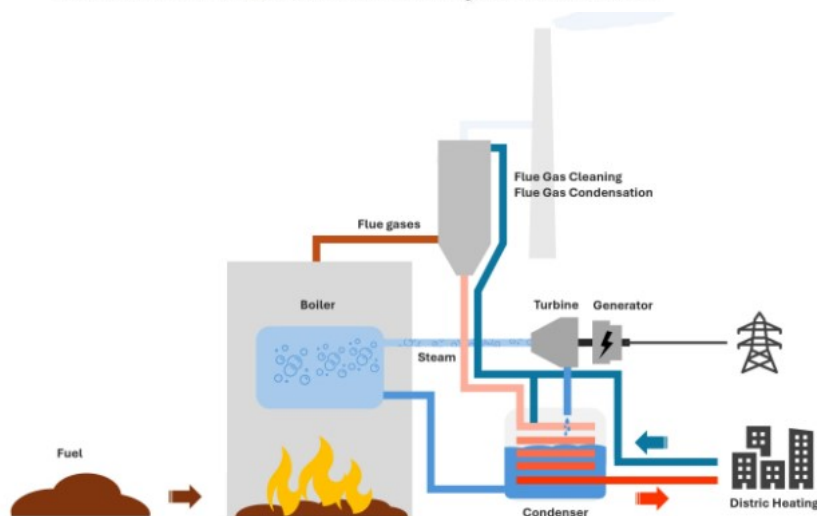
Μειονεκτήματα:

- ▶ υψηλό CAPEX
- ▶ ανάγκη για θερμικό φορτίο
- ▶ ανάγκη καυσίμου

CHP και Τηλεθέρμανση



Combustion Turbine with Heat Recovery Steam Generator



CHP → θερμότητα → δίκτυο τηλεθέρμανσης:

- ▶ 70-110 °C
- ▶ απολήψεις ατμού
- ▶ κόμβοι δικτύου

Θερμικός & Ηλεκτρικός Έλεγχος Φορτίου

Σχέση:

$$\frac{P_{el}}{Q_{th}}$$

Επηρεάζει:

- ▶ θερμοκρασία καυσαερίων
- ▶ βαθμό ανάκτησης
- ▶ COP απορροφητικού ψύκτη
- ▶ θερμικό ισοζύγιο δικτύου τηλεθέρμανσης

Ευρωπαϊκό PES (Primary Energy Saving)

Σύμφωνα με EED/EU:

$$PES = 1 - \frac{1}{\eta_{CHP}} \left(\frac{1}{\eta_{el,ref}} + \frac{1}{\eta_{th,ref}} \right)$$

συγκρίνει την πραγματική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του CHP με την θεωρητικά απαιτούμενη πρωτογενή ενέργεια για ξεχωριστή παραγωγή.

- ▶ Αν το CHP χρησιμοποιεί λιγότερη πρωτογενή ενέργεια → το PES είναι θετικό και μεγάλο.
- ▶ Αν δεν υπάρχει πραγματικό όφελος → $PES \approx 0$.
- ▶ Αν είναι χειρότερο από ξεχωριστή παραγωγή → $PES < 0$ (αποτυχία συστήματος).

Η Ε.Ε. ορίζει ότι ένα σύστημα είναι Υψηλής Απόδοσης CHP (HEC) αν:

$$PES > 10\%$$

Σημαίνει ότι:

Το σύστημα εξοικονομεί τουλάχιστον **10%** πρωτογενή ενέργεια σε σχέση με την ξεχωριστή παραγωγή.

Άσκηση

Σύστημα CHP φυσικού αερίου με:

- ▶ Παροχή καυσίμου: $\rho = 18 \text{ Nm}^3/\text{min}$
- ▶ Θερμογόνος δύναμη: 35 MJ/Nm^3
- ▶ Ηλεκτρική απόδοση: 38%
- ▶ Θερμική απόδοση: 45%
- ▶ Απαιτήσεις φορτίου:
 - ▶ ηλεκτρικό 2.5 MW
 - ▶ θερμικό 2.9 MW

Ζητούνται:

- ▶ Η ισχύς καυσίμου του CHP (kW)
- ▶ Συνολική απόδοση CHP, ηλεκτρική και θερμική ισχύ
- ▶ Καλύπτει ο CHP τις απαιτήσεις φορτίου?
- ▶ Trigeneration με απορροφητικό ψύκτη LiBr (COP = 0.8)
- ▶ Το PES σε σχέση με μονοπαραγωγή ($\eta_{el,ref} = 0.39$, $\eta_{th,ref} = 0.9$)

Λύση

1. Καύσιμο

$$Q_{fuel} = 18 \cdot 35 = 630 \text{ MJ/min} = 10.5 \text{ MW}$$

2. Ηλεκτρική ισχύς:

$$P_{el} = 0.38 \cdot 10.5 = 3.99 \text{ MW}$$

Θερμική ισχύς:

$$Q_{th} = 0.45 \cdot 10.5 = 4.73 \text{ MW}$$

Συνολική απόδοση:

$$\eta_{CHP} = \frac{3.99 + 4.73}{10.5} = 0.82 = 82\%$$

3. Ναι καλύπτει

Λύση

4. Ψυκτικό φορτίο:

$$Q_{cool} = COP \cdot Q_{th} = 0.8 \cdot 4.73 = 3.78 \text{ MW}$$

3. PES:

Χρησιμοποιώντας $\eta_{el,ref} = 0.39$, $\eta_{th,ref} = 0.9$:

$$PES = 1 - \frac{1}{0.82} \left(\frac{1}{0.39} + \frac{1}{0.9} \right) = 19.4\%$$

✓Υψηλής απόδοσης CHP, διότι PES>10%

Βιβλιογραφία

- ▶ Cengel, Y. & Boles, M. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill.
- ▶ Horlock, J.H. *Cogeneration: Combined Heat and Power (CHP)*. Krieger Publishing.
- ▶ Boyce, M. *Gas Turbine Engineering Handbook*. Elsevier.
- ▶ Kehlhofer, R. *Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants*. PennWell.
- ▶ Bejan, A. *Advanced Engineering Thermodynamics*. Wiley.
- ▶ Turns, S.R. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. McGraw-Hill.
- ▶ Dincer, I. & Rosen, M. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Elsevier.
- ▶ ASHRAE Handbook - HVAC Systems & Equipment (Absorption Chillers).
- ▶ European Commission - Energy Efficiency Directive (EED), Annex IV: High-Efficiency Cogeneration.
- ▶ Quoilin, S. et al. "Techno-economic survey of ORC systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.
- ▶ Kakaras, E., Doukelis, A. "Trigeneration with gas turbines and absorption chillers." *Energy*, 2008.