

Συμβατικοί ατμοηλεκτρικοί σταθμοί (ΣΑΗΣ) με καύσιμο άνθρακα

Δρ. Αντώνιος Τουρλιδάκης
Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Δυτικής Μακεδονίας

Κύριοι τομείς της ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα

Η αξιοποίηση μέσω της θερμοδυναμικής μετατροπής της χημικής ενέργειας των καυσίμων σε υψηλής ισχύος θερμοηλεκτρικούς σταθμούς (ΘΗΣ) απαιτεί, σε ένα πρώτο στάδιο, τη μετατροπή της σε θερμότητα μέσω της:

- α) καύσης
- β) πυρο-αεριοποίησης
- γ) αεριοποίησης (στην τελευταία περίπτωση, το καύσιμο στον κύκλο μετατροπής είναι το syngas).



ΚΑΘΑΡΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
22 - 23 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015, ΚΑΠΕ.

3

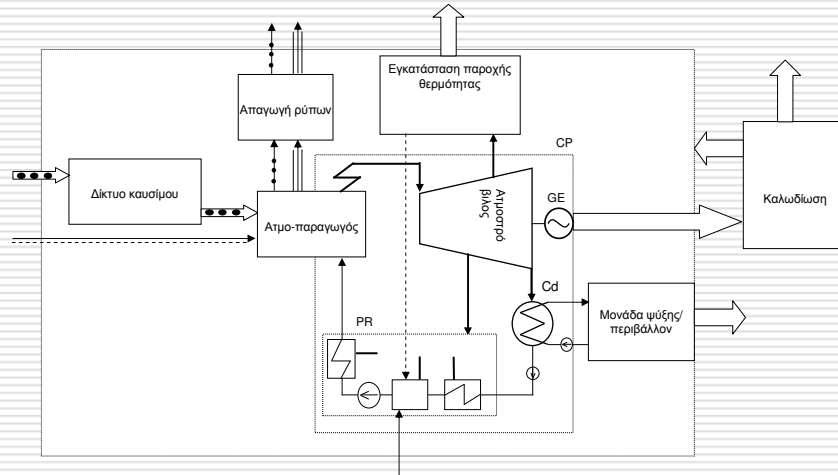
Κύριοι τομείς της ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα

- ✓ Οι περισσότεροι ΘΗΣ χρησιμοποιούν άνθρακα
- ✓ Η τεχνολογία της καύσης επιλέγεται ανάλογα με τον τύπο, τη σύνθεση και τις ιδιότητες του άνθρακα
- ✓ Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενοι κύκλοι θερμοδυναμικής μετατροπής είναι:
 - για την καύση υπό ατμοσφαιρική πίεση - οι κύκλοι των ατμοστροβιλικών μονάδων (ΑΣΜ), και
 - για την καύση του άνθρακα υπό πίεση ή για την καύση του syngas - οι COGAS.
- ✓ Εμπορικά ώριμες τεχνολογίες είναι:
 - η καύση κονιοποιημένου άνθρακα (PCC), όπου υπάρχει η τάση να εφαρμόζονται υπερκρίσιμες παράμετροι στην πλευρά του ατμού,
 - η καύση του άνθρακα σε ρευστοποιημένη κλίνη υπό ατμοσφαιρική πίεση (A FBC), με δύο παραλλαγές, τις A BFBC και A CFBC (ανάλογα του τύπου της κλίνης).

ΚΑΘΑΡΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
22 - 23 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015, ΚΑΠΕ.

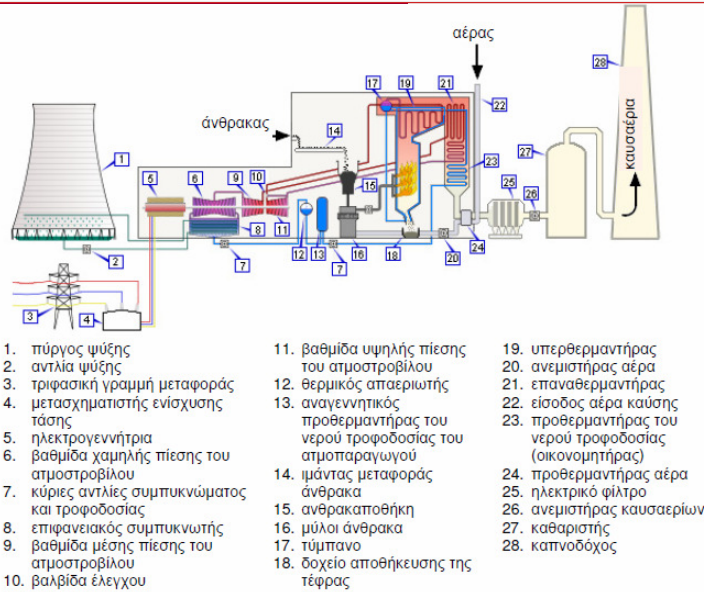
4

Γενική Διάταξη ενός ΣΑΗΣ



Αρχή λειτουργίας ενός ΣΑΗΣ

- Το καύσιμο που μεταφέρεται στο σταθμό εισέρχεται στο δίκτυο του καυσίμου, το οποίο προετοιμάζει το καύσιμο για να χρησιμοποιηθεί άμεσα ή να αποθηκευτεί.
- Μέσα στο σταθμό, η μεταφορά του καυσίμου γίνεται με ιμάντες μεταφοράς.
- Πριν από την εισοδό του στον **ατμοπαραγωγό** το καύσιμο κονιορτοποιείται σε πολύ μικρά σωματίδια.
- Ο ατμός παράγεται στον ατμοπαραγωγό (θερμή πηγή του κύκλου), με τη βοήθεια της θερμότητας που παράγεται από την καύση των ορυκτών καυσίμων.
- Στον **ατμοστρόβιλο** εκτονώνεται παράγοντας έργο, το οποίο στη συνέχεια μέσω της ηλεκτρογεννήτριας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Η καλωδίωση παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια στο σύστημα (καταναλωτές) και στις βοηθητικές ηλεκτρικές υπηρεσίες του σταθμού



ΚΑΘΑΡΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
22 – 23 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015, ΚΑΠΕ.

7

Ατμός μπορεί να εξαχθεί (απομαστευτεί) από τον στρόβιλο για τους εξής σκοπούς:

- για την αναγεννητική **προθέρμανση** του νερού τροφοδοσίας του ατμοπαραγωγού (γεννήτρια ατμού),
- για **συμπαγωγή** θερμότητας (παροχή θέρμανσης σε αστικούς ή/και βιομηχανικούς καταναλωτές),
- για βοηθητικές θερμικές υπηρεσίες.

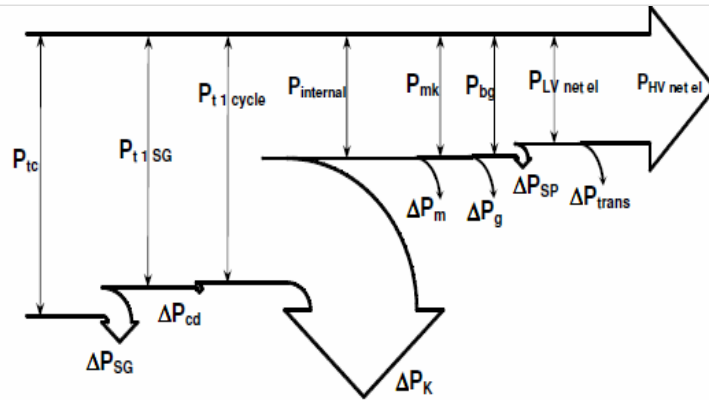
Το **σύστημα ψύξης** του σταθμού αποβάλλει θερμότητα στο περιβάλλον (ψυχρή πηγή του κύκλου).

Η **απαγωγή των ρύπων** στον αέρα πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές που προβλέπονται από την ισχύουσα περιβαλλοντική νομοθεσία. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται στο σταθμό συστήματα περιορισμού / παγίδευσης των ρύπων. Οι απόβλειες του θερμικού ρευστού στο θερμοδυναμικό κύκλο υποκαθίστανται μέσω ενός ρεύματος νερού αναπλήρωσης.

ΚΑΘΑΡΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
22 – 23 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015, ΚΑΠΕ.

8

Ενεργειακές αποδόσεις



Αποδοτικότητα ανά υποσύστημα και μετασχηματισμό

Υποσύστημα	Αποδοτικότητα	Όνομα
Ατμοπαραγωγός (SG)	$\eta_{SG} = P_{t1\ SG} / P_{tc} = 1 - \Delta P_{SG} / P_{tc}$	Αποδοτικότητα του SG
Σύστημα σωληνώσεων	$\eta_{cd} = P_{t1\ cycle} / P_{t1\ SG} = 1 - \Delta P_{cd} / P_{t1\ SG}$	Αποδοτικότητα των σωληνώσεων
Θερμικός κύκλος	$\eta_t = P_{internal} / P_{t1\ cycle} = 1 - \Delta P_K / P_{t1\ cycle}$	Θερμική αποδοτικότητα
Κύριο σώμα του ατμοστροβίλου	$\eta_m = P_{mk} / P_{internal} = 1 - \Delta P_m / P_{internal}$	Μηχανική αποδοτικότητα
Ηλεκτρογεννήτρια	$\eta_g = P_{bg} / P_{mk} = 1 - \Delta P_g / P_m$	Αποδοτικότητα ηλεκτρογεννήτριας
Καταναλώσεις ηλεκτρικών τεχνολογιών	$\eta_{SP} = P_{LV\ net\ el} / P_{bg} = 1 - \Delta P_{SP} / P_{bg} = 1 - \epsilon_{SP}$	Αποδοτικότητα των ηλεκτρικών υπηρεσιών
Μετασχηματιστής ενίσχυσης της τάσης	$\eta_{trans} = P_{HV\ net\ el} / P_{LV\ net\ el} = 1 - \Delta P_{trans} / P_{LV\ net\ el}$	Αποδοτικότητα του μετασχηματιστή

➤ Ακαθάριστη ηλεκτρική απόδοση:

$$\eta_{gross} = P_{bg} / P_{tc} = \eta_{SG} \cdot \eta_{cd} \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

➤ Ακαθάριστη ηλεκτρική ισχύς: $P_{bg} = P_{tc} \cdot \eta_{gross}$

➤ Καθαρή ηλεκτρική ισχύς: $PHV_{net\ el} = P_{tc} \cdot \eta_{net}$,

Όπου:

$$\eta_{net} = PHV_{net\ el} / P_{tc} = \eta_{SG} \cdot \eta_{cd} \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_{SP} \cdot \eta_{trans} = \eta_{gross} \cdot \eta_{SP} \cdot \eta_{trans} = \eta_{gross} \cdot (1 - \epsilon_{SP}) \cdot \eta_{trans}$$

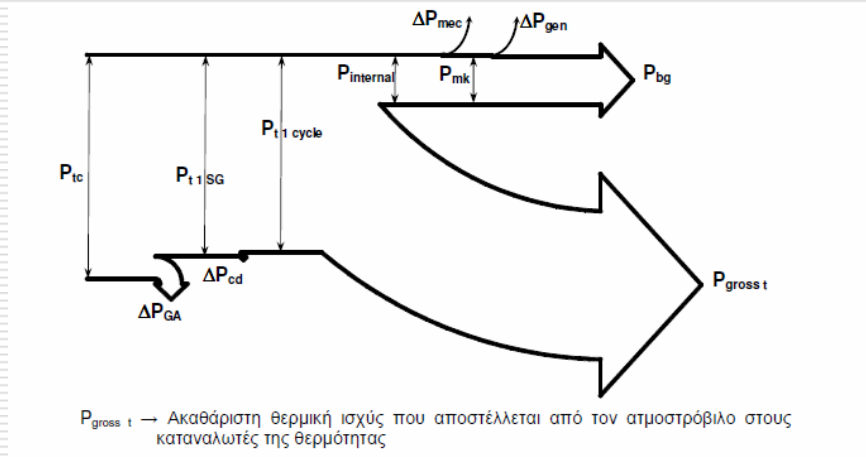
• Ο όρος ϵ_{SP} αντιπροσωπεύει το μερίδιο των βοηθητικών ηλεκτρικών υπηρεσιών του σταθμού.

• Η τιμή του κυμαίνεται γενικά μεταξύ 0,05 και 0,15, και εξαρτάται από το είδος του καυσίμου (υψηλότερη για άνθρακα) και την εγκατεστημένη ισχύ.

Κατηγορίες των απωλειών και των αποδοτικοτήτων

Είδος απωλειών	Σχήμα (σχ. 2.4)	Σχετιζόμενη αποδοτικότητα	Τυπικές τιμές αποδοτικότητας
Απώλειες ατμοπαραγωγού οφειλόμενες σε: ατελή καύση σε τεχνικό και μηχανικό επίπεδο, από την άποψη των απωλειών θερμότητας μέσω της απαγωγής στο εξωτερικό περιβάλλον των προϊόντων της καύσης (καυσαέρια, άγονα υλικά), απώλειες θερμότητας λόγω ακτινοβολίας και συναγωγής στο περιβάλλον	ΔP_{SG}	η_{SG} (απόδοση ατμοπαραγωγού)	0.85 - 0.92 (ανάλογα με το είδος του καυσίμου και το μέγεθος του λέβητα)
Απώλειες στις σωληνώσεις σύνδεσης του θερμικού κυκλώματος	ΔP_{cd}	η_{cd} (απόδοση σωληνώσεων)	0.97 - 0.99
Απώλεια που οφείλεται στη θερμότητα που αποδίδεται στην ψυχρή πηγή του θερμοδυναμικού κύκλου (συμπυκνωτής)	ΔP_K	η_t (θερμική απόδοση)	0.35 - 0.49
Απώλειες λόγω των τριβών στα έδρανα του αμμοστρόβιλου	ΔP_m	η_m (μηχανική απόδοση)	0.99 - 0.996
Απώλειες της ηλεκτρογεννήτριας. Αφορά τις μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες στον εκκινητή και στις περιελίξεις του ρότορα.	ΔP_g	η_g (απόδοση ηλεκτρογεννήτριας)	0.975 - 0.99

Διάγραμμα Sankey για ένα ΣΑΗΣ συμπαραγωγής με ΑΣΜ αντίθλιψης



Διάγραμμα Sankey για ένα ΣΑΗΣ συμπαραγωγής με ΑΣΜ αντίθλιψης

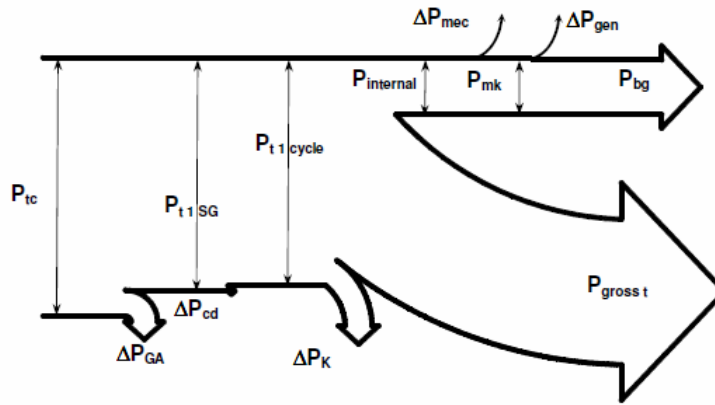
- ❑ Το επίπεδο πίεσης του συμπυκνωτή είναι περίπου 0,05 bar
- ❑ Η θερμοκρασία του νερού στην έξοδο θα πρέπει να είναι περίπου 30°C.
- Το θερμικό επίπεδο όμως που απαιτείται από τον καταναλωτή:
 - ✓ **0.7 ÷ 2.5 bar** για τους αστικούς καταναλωτές – δηλ. τα κτίρια (για θέρμανση, ζεστό νερό χρήσης)
 - ✓ **1 ÷ 40 bar** για τους βιομηχανικούς καταναλωτές – βιομηχανίες / βιοτεχνίες (ατμός ή θερμότητα που χρησιμοποιείται στις τεχνολογικές διεργασίες).

Η παραγωγή θερμότητας στη συμπαραγωγή με τη χρήση ενός ΣΑΗΣ συμπαραγωγής με ΑΣΜ αντίθλιψης έχει δυο μεγάλα μειονεκτήματα:

- η λειτουργία του σταθμού εξαρτάται κατ' αποκλειστικότητα από τους καταναλωτές της θερμότητας
- η αύξηση της πίεσης στην έξοδο του στροβίλου μειώνει την εκτόνωση του ατμού σε αυτόν και, ως εκ τούτου, μειώνει το παραγόμενο έργο (ηλεκτρισμό).

- Η μείωση της ζήτησης για θερμότητα στον καταναλωτή οδηγεί στη μείωση της παροχής του ατμού μέσα από το στρόβιλο και, ως εκ τούτου, στη μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η απουσία καταναλωτή της θερμότητας οδηγεί στην διακοπή της λειτουργίας του ΣΑΗΣ.
- Για την αποφυγή μεγάλων διακυμάνσεων φορτίου στους αστικούς καταναλωτές, συνιστάται να χρησιμοποιείται μια ΑΣΜ αντίθλιψης που να προμηθεύει ένα βιομηχανικό καταναλωτή.
- Αν υπάρχουν απαιτήσεις για ατμό σε διάφορα επίπεδα πίεσης, θα πρέπει να χρησιμοποιείται μια ΑΣΜ αντίθλιψης με ρυθμιζόμενη έξοδο.
- Συνιστάται να χρησιμοποιείται μία ΑΣΜ συμπύκνωσης με ρυθμιζόμενη έξοδο, που αυξάνει την ευελιξία λειτουργίας του ΣΑΗΣ

Διάγραμμα Sankey για ένα ΣΑΗΣ συμπαραγωγής με ΑΣΜ συμπύκνωσης ρυθμιζόμενης εξόδου



Λύσεις για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των ΣΑΗΣ

ΣΑΗΣ με καύση κονιοποιημένου άνθρακα	Πίεση ενεργού ατμού (MPa)	Θερμοκρασία ενεργού ατμού (°C)	Θερμοκρασία αναθερμασμένου ατμού (°C)	Καθαρή απόδοση (%), σε σχέση με την HHV (ασφαλιτούχος άνθρακας)
Υποκρίσιμη	< 22.1	έως 565	έως 565	33 - 39
Υπερκρίσιμη	22,1 - 25	540 - 580	540 - 580	38 - 42
Υπερ-υπερκρίσιμη	> 25	> 580	> 580	> 42

Πίεση / θερμοκρασία ατμού και απόδοση ενός ΣΑΗΣ για καύση
κονιοποιημένου άνθρακα με υποκρίσιμες, υπερκρίσιμες και
υπερ-υπερκρίσιμες παραμέτρους

Λύσεις για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των ΣΑΗΣ

Για την αύξηση της θερμικής αποδοτικότητας απαιτούνται τα εξής είδη μέτρων:

αύξηση της P_{t1} (για την ίδια $P_{t2} = \Delta PK$),
 μείωση της $P_{t2} = \Delta PK$ (για την ίδια P_{t1}),
 ή μείωση του λόγου P_{t2}/P_{t1} .

Μέθοδοι που επηρεάζουν την θερμή πηγή	- αύξηση της αρχικής πίεσης - αύξηση της αρχικής θερμοκρασίας - αναθέρμανση στην είσοδο
Μέθοδοι που επηρεάζουν την ψυχρή πηγή	- μείωση της θερμοκρασίας (ή πίεσης) συμπύκνωσης - αναγεννητική προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας - συμπαραγωγή

Κυριότερες δυνατές μέθοδοι για την αύξηση της θερμικής αποδοτικότητας

Λύσεις για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης

➤Τόσο η ψύξη του ελαίου (το οποίο θερμαίνεται λόγω των τριβών στα έδρανα του στροβίλου), όσο και της γεννήτριας και του μετασχηματιστή, είναι τεχνολογικές λειτουργίες ψύξης και είναι απαραίτητες για την επαρκή λειτουργία του εξοπλισμού. Οι αποδόσεις που σχετίζονται με αυτές τις λειτουργίες (μηχανική απόδοση, αποδόσεις γεννήτριας και μετασχηματιστή ενίσχυσης) είναι υψηλές και δεν έχουν σημαντική επίδραση στην καθαρή απόδοση.

Επιπλέον, η απόδοση των σωληνώσεων είναι επίσης υψηλή, λόγω των θερμομονώσεων που αφήνουν μόνο ένα μικρό μέρος της θερμότητας να διαφύγει στο περιβάλλον.

Πρακτικά, οι **μόνες αποδόσεις που μπορούν να τροποποιηθούν** είναι:

- η αποδοτικότητα του **ατμοπαραγωγού**, και
- η θερμική αποδοτικότητα του **θερμοδυναμικού κύκλου**.

Λύσεις για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης

➤ Η απόδοση του ατμοπαραγωγού μπορεί να βελτιωθεί μειώνοντας τις απώλειές του.

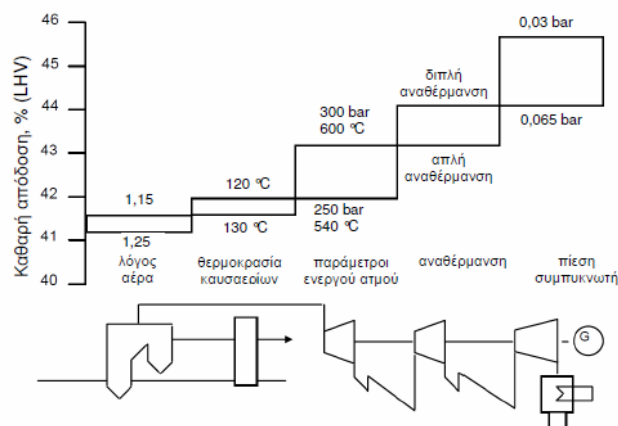
Η μεγαλύτερη απώλεια θερμότητας στον ατμοπαραγωγό συμβαίνει μέσω της αισθητής (φυσικής) **θερμότητας των καυσαερίων**, η οποία μπορεί να περιοριστεί με την αύξηση της ροής και της θερμοκρασίας των καυσαερίων.

Για μια δεδομένη ροή καυσίμου, η ροή των καυσαερίων που προκύπτουν από την καύση του ορυκτού καυσίμου μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας μια ροή του αέρα που να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην στοιχειομετρική ροή, δηλαδή μέσω ενός λόγου αέρα που να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερος στη μονάδα.

Τυχόν ανεπαρκής λόγος αέρα μπορεί να οδηγήσει σε ατελή καύση του καυσίμου και, ως εκ τούτου, στην αύξηση των άλλων απωλειών του ατμοπαραγωγού.

Η επιλογή του λόγου αέρα εξαρτάται τόσο από τον τύπο του καυσίμου όσο και από την τεχνολογία καύσης του.

Επίδραση των διαφόρων μέτρων αύξησης της απόδοσης (LHV) σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση κονιοποιημένου άνθρακα



Λύσεις για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης

➤ Η απαγωγή θερμότητας στο συμπυκνωτή μπορεί να γίνει με τους ακόλουθους τύπους κυκλώματος:
ανοικτό, με κάποιο ποτάμι ή ρεύμα θαλασσινού νερού,
κλειστό, με τη χρήση πύργων ψύξης (υγροί, ξηροί),
μικτό, με συνδυασμό των δύο προαναφερθέντων συστημάτων

Η χαμηλότερη θερμοκρασία του νερού ψύξης κατά την είσοδο του στον συμπυκνωτή επιτυγχάνεται στην περίπτωση της ψύξης με ανοικτό κύκλωμα.

Για μία δεδομένη ροή του νερού ψύξης, αυτό οδηγεί στην χαμηλότερη δυνατή πίεση στον συμπυκνωτή, και ως εκ τούτου, το συγκεκριμένο σύστημα ψύξης αποτελεί το θερμοδυναμικά βέλτιστο σύστημα.

➤ Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η θερμική ρύπανση του περιβάλλοντος λόγω της ψύξης και, ιδιαίτερα, η επίπτωση που προκαλείται από τη θέρμανση του νερού σε σχέση με τη μείωση της συγκέντρωσης του οξυγόνου του, με αρνητικές συνέπειες για την πανίδα στο αντίστοιχο περιβάλλον (ρέμα, ποτάμι, θάλασσα).

Η αύξηση της θερμοκρασίας θα πρέπει να είναι περιορισμένη, ιδιαίτερα το καλοκαίρι.

Ο περιορισμός αυτός μπορεί να οδηγήσει στη χρήση ενός μικτού συστήματος ψύξης, αυξάνοντας έτσι τη μέση θερμοκρασία του νερού κατά την είσοδο στον συμπυκνωτή και, ως εκ τούτου, την πίεση συμπύκνωσης του ατμού

➤ Η υπερβολική πτώση πίεσης στον συμπυκνωτή έχει τις ακόλουθες αρνητικές επιπτώσεις:

Σημαντική αύξηση της υγρασίας του ατμού (μείωση του κλάσματος ξηρότητας) στην τελευταία ζώνη του στροβίλου (τελευταίες βαθμίδες του στροβίλου), που μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή των πτερυγίων εκεί λόγω της διάβρωσης (εμφάνιση ολοένα και περισσότερων και μεγαλύτερων σε μέγεθος σταγόνων νερού).

Αύξηση της παροχής του ατμού στην έξοδο του στροβίλου και, ως εκ τούτου, της κινητικής του ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο ατμός φεύγει από το στρόβιλο, η ενέργεια αυτή χάνεται (δεν υπάρχουν περισσότερες βαθμίδες στο στρόβιλο για να χρησιμοποιηθεί η ενέργεια - αύξηση των υπολειμματικών απωλειών).

✓ Η υπερβολική πτώση πίεσης στον συμπυκνωτή έχει τις ακόλουθες αρνητικές επιπτώσεις:

Τροποποίηση του τριγώνου ταχύτητας σε σχέση με τη λειτουργία στο ονομαστικό φορτίο, και μείωση της εσωτερικής απόδοσης του στροβίλου.

Μείωση της ισχύος στην τελευταία ζώνη του στροβίλου, εξαιτίας της ακόλουθης αλυσίδας συμβάντων

Υπάρχει μία **βέλτιστη πίεση συμπύκνωσης** για την οποία η εσωτερική ισχύς που παράγεται από τον στρόβιλο είναι η μέγιστη και, ως εκ τούτου, η **τερματική ισχύς μεγιστοποιείται**.

Η μείωση της πίεσης στον συμπυκνωτή κάτω από τη βέλτιστη τιμή οδηγεί στη μείωση της ισχύος του στροβίλου, καθώς η σωρευτική αρνητική επίδραση των υπολειμματικών απωλειών και της μείωσης της ροής του ατμού στην τελευταία ζώνη του στροβίλου είναι περισσότερο κρίσιμη από το θετικό αποτέλεσμα που προκύπτει από την αύξηση της εκτόνωσης στο στρόβιλο μέσω της μείωσης της πίεσης στον συμπυκνωτή

• Η υγρασία του ατμού στην έξοδο του στροβίλου έχει μια οριακή τιμή περίπου **14%** (δηλ. το κλάσμα ξηρότητας είναι $\sim 0,86$) για να αποτραπούν οι αρνητικές επιπτώσεις της διάβρωσης.
Σημαντική μείωση της πίεσης στον συμπυκνωτή λαμβάνει χώρα το χειμώνα.

Για να περιοριστούν τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα που δημιουργούνται από την διάβρωση και να αποφευχθεί η μείωση της πίεσης στον συμπυκνωτή κάτω από τη βέλτιστη τιμή μπορούν να ληφθούν τα εξής μέτρα:

- Θέρμανση του νερού στην είσοδο του συμπυκνωτή, μέσω της ανάμειξης του με ένα μέρος του νερού ψύξης στην έξοδο του συμπυκνωτή
- Μείωση της παροχής του νερού ψύξης, ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του νερού ψύξης στην έξοδο του συμπυκνωτή, το οποίο οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του ατμού και, ως εκ τούτου, στην αύξηση της πίεσης του συμπυκνωτή.

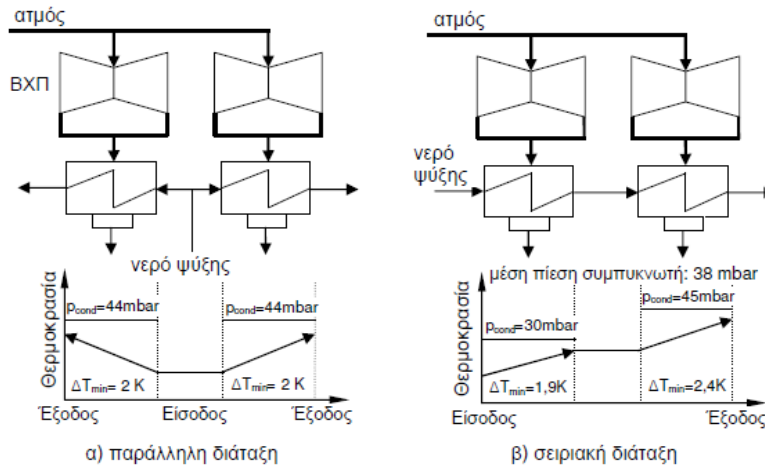
✓ Η χρήση της ψύξης **κλειστού κυκλώματος** είναι η λιγότερο αποδοτική επιλογή ψύξης από θερμοδυναμικής άποψης (σε αυτήν την επιλογή το νερό ψύξης έχει την υψηλότερη θερμοκρασία κατά την είσοδο του στον συμπυκνωτή, συνεπώς η πίεση συμπύκνωσης είναι η υψηλότερη δυνατή)

Είναι και λιγότερο αποδοτική από επενδυτικής άποψης (η επένδυση αυξάνεται λόγω των πύργων ψύξης).

Η εκδοχή αυτή επιλέγεται όταν η περιοχή που βρίσκεται ο σταθμός είναι κοντά στην είσοδο του ορυχείου ή κοντά στους θερμικούς καταναλωτές και δεν υπάρχουν σε κοντινή απόσταση πηγές νερού που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την ψύξη ανοικτού κυκλώματος.

Εάν υπάρχουν διαθέσιμες πηγές νερού για να ψύξουν ένα ανοικτό κύκλωμα, αλλά η ροή ψύξης από αυτές είναι ανεπαρκής (ανεπαρκής ροή του ποταμού ή περιβαλλοντικοί περιορισμοί), η βέλτιστη λύση θα είναι αυτή της ψύξης μέσω μικτού κυκλώματος.

Σειριακή και παράλληλη διάταξη συμπυκνωτή



Στην παράλληλη διαμόρφωση, μέσα από τους συμπυκνωτές κυκλοφορεί μόνο το ήμισυ της συνολικής ροής του νερού ψύξης (θεωρώντας ότι είναι πανομοιότυποι και στις δύο περιπτώσεις).

Στη σύνδεση σε σειρά, ολόκληρη η ροή του νερού ψύξης κυκλοφορεί μέσα από τους συμπυκνωτές, αυξάνοντας έτσι την παροχή του νερού μέσα στους σωλήνες, τις απώλειες πίεσης και την κατανάλωση ενέργειας των ψυκτικών υδάτων.

Κατά συνέπεια, η βέλτιστη διαμόρφωση θα πρέπει να επιλεγεί μετά από την εκτέλεση των κατάλληλων τεχνικών και οικονομικών υπολογισμών

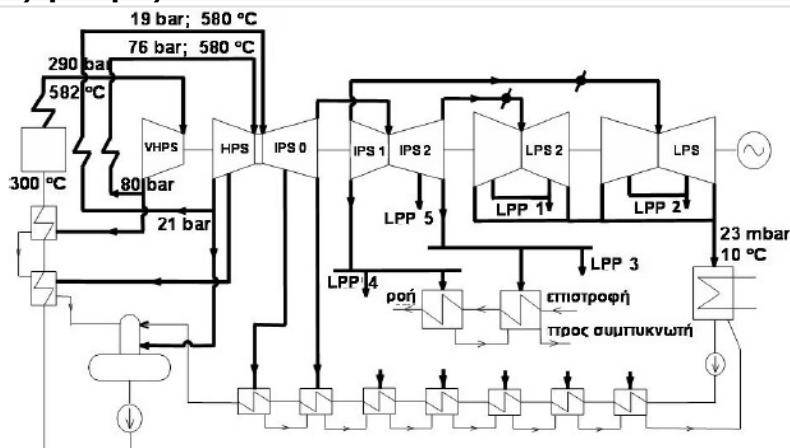
✓ Τα δεδομένα των σταθμών είναι τα εξής:

- υπερ-υπερκρίσιμες παράμετροι του ενεργού ατμού: **290 bar και 582°C**,
- διπλή αναθέρμανση: 76 bar/580 °C, αντίστοιχα 19 bar/580°C,
- χαμηλή πίεση στον συμπυκνωτή: 23 mbar,
- προηγμένη αναγεννητική προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας του ατμο-παραγωγού: 10 αναγεννητικοί προθερμαντήρες (7 LPP + απαερωτής + 2 HPP),
- συμπαραγωγή: δύο στάδια θέρμανσης του νερού.

Η χρήση πολλών αναγεννητικών προθερμαντήρων είναι δικαιολογημένη, καθώς με κάθε προθερμαντήρα αυξάνεται η θερμική αποδοτικότητα του κύκλου.

Η σχετική αύξηση της αποδοτικότητας είναι συνεχώς μικρότερη, οπότε υπάρχει ένα βέλτιστο επίπεδο από τεχνικής και οικονομικής άποψης για την επιλογή του αριθμού των προθερμαντήρων, οι οποίοι συνήθως είναι 7 ή 8, ενώ για έναν υψηλής απόδοσης ΣΑΗΣ μπορούν να φτάσουν ακόμα και τους 10

Διάταξη ενός σύγχρονου ΣΑΗΣ - ατμοστρόβιλοι συμπύκνωσης, με υψηλές παραμέτρους ενεργού ατμού, επαναλαμβανόμενη υπερθέρμανση, προηγμένη αναγεννητική προθέρμανση και ρυθμιζόμενη έξοδο δύο σταδίων



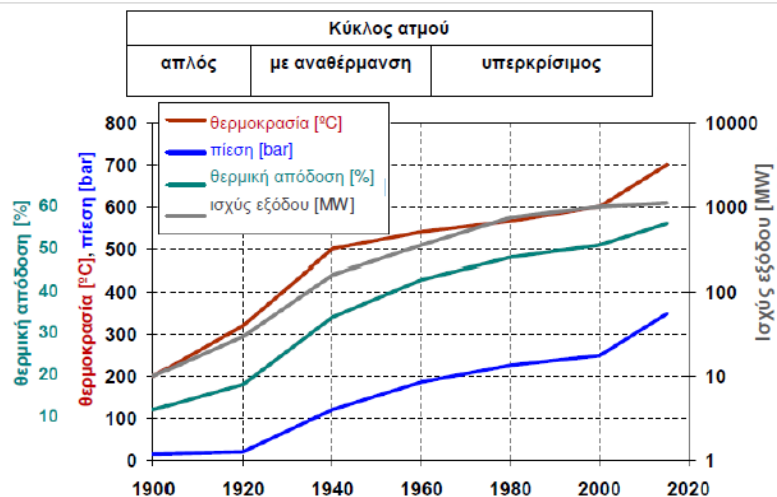
Παραδείγματα αντιπροσωπευτικών επιτευγμάτων παγκοσμίως

✓ Στο σχήμα στην επόμενη διαφάνεια παρατηρείται η συσχετισμένη αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας

Υπάρχει η τάση να χρησιμοποιούνται υπερκρίσιμες ή ακόμη και υπερ-υπερκρίσιμες πιέσεις (ξεκινώντας από το έτος 2000).

Για ένα απλό κύκλο, χωρίς ενδιάμεση υπερθέρμανση, με αρχική θερμοκρασία 570°C, η τιμή της αρχικής πίεσης έχει ανώτατο όριο τα 140 bar [4], λόγω της υγρασίας στην έξοδο του στροβίλου, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η χρήση της αναθέρμανσης του ατμού για τις σύγχρονες μονάδες.

Εξέλιξη της τεχνολογίας των ΣΑΗΣ

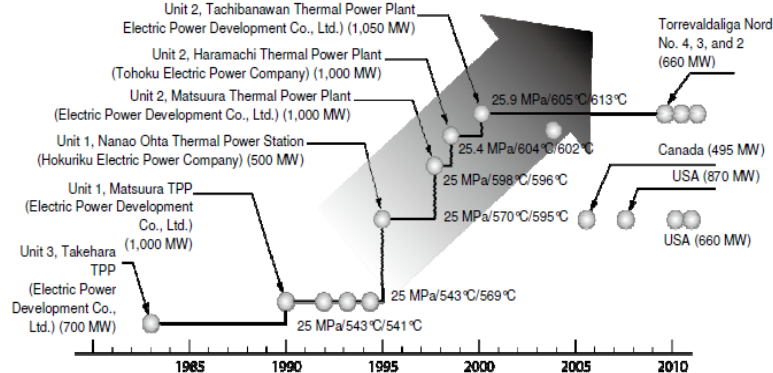


Παραδείγματα αντιπροσωπευτικών επιτευγμάτων παγκοσμίως

➤ Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η ειδική επένδυση μειώνεται μαζί με την ισχύ του σταθμού, η τάση είναι να κατασκευάζονται μονάδες με την υψηλότερη δυνατή ισχύ μονάδας, φθάνοντας για την καύση κονιοποιημένου άνθρακα περίπου τα 1000 MW ισχύος ανά μονάδα.

Επιπλέον, η αναθέρμανση, ακόμη και εάν αυξάνει την επένδυση και περιπλέκει τη συνδεσμολογία, είναι δικαιολογημένη για ισχύεις εξόδου άνω των 100 MW, με ετήσια διάρκεια χρήσης που έχει αρκούντως υψηλή εγκατεστημένη ισχύ

Η εξέλιξη των παραμέτρων του ενεργού ατμού σε ΣΑΗΣ (με υπερκρίσιμες παραμέτρους) με ατμοπαραγωγούς κατασκευής της εταιρείας Babcock-Hitachi KK



Φορολογικό έτος κατά την έναρξη της λειτουργίας σε MW-ονομαστικής ισχύος - οι παράμετροι του ατμού λαμβάνονται στην έξοδο του ατμοπαραγωγού

Δεδομένα ορισμένων σύγχρονων ΘΗΣ στην Ευρώπη και την Ιαπωνία, με ΑΣΜ – Υπερ-υπερκρισιμες παραμέτρους

Όνομα σταθμού	P _b , MW	Παράμετροι ατμού	Κ.	Έτος λειτ.	η _{ελ} , %
Matsuura 2	1000	255 bar / 598/596 °C	H	1997	-
Skærbæk 3	400	290 bar / 580/580/580 °C	NG	1997	49
Haramachi 2	1000	259 bar / 604/602 °C	H	1998	-
Nordjylland 3	400	290 bar / 580/580/580 °C	H	1998	47
Όνομα σταθμού	P _b , MW	Παράμετροι ατμού	Κ.	Έτος λειτ.	η _{ελ} , %
Nanaoota 2	700	255 bar / 597/595 °C	H	1998	-
Misumi 1	1000	259 bar / 604/602 °C	H	1998	-
Lippendorf	934	267 bar / 554/583 °C	L	1999	42.3
Boxberg	915	267 bar / 555/578 °C	L	2000	41.7
Tsuruga 2	700	255 bar / 597/595 °C	H	2000	-
Tachibanawan 2	1050	264 bar / 605/613 °C	H	2001	-
Avedore 2	400	300 bar / 580/600 °C	Mix	2001	49.7
Niederaussen	975	265 bar / 565/600 °C	L	2002	>43
Isogo 1	600	280 bar / 605/613 °C	H	2002	-

ΚΑΘΑΡΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
 22 – 23 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015, ΚΑΠΕ.

37

Παραδείγματα αντιπροσωπευτικών επιτευγμάτων παγκοσμίως

➤ Στους σταθμούς που εικονίζονται στην επόμενη διαφάνεια, γίνεται χρήση βελτιστοποιημένων τεχνολογιών.

Στους σταθμούς αυτούς παρατηρείται η απαγωγή των καυσαερίων μέσω του πύργου ψύξης. Η μέθοδος αυτή έχει μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με την καμινάδα:

- μειώνει την απαιτούμενη επένδυση στους νέους ΣΑΗΣ,
- επιτείνει την κυκλοφορία στον πύργο/καμινάδα, βελτιώνει την ψύξη του νερού και αυξάνει το ύψος ανύψωσης των καυσαερίων πάνω από τον πύργο ψύξης,
- συμβάλλει στην εξάτμιση των παρασυρόμενων σταγόνων νερού και οδηγεί στη μείωση της σχετικής υγρασίας του εξερχόμενου αέρα, λόγω της συνεισφοράς θερμότητας των καυσαερίων

ΚΑΘΑΡΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
 22 – 23 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015, ΚΑΠΕ.

38

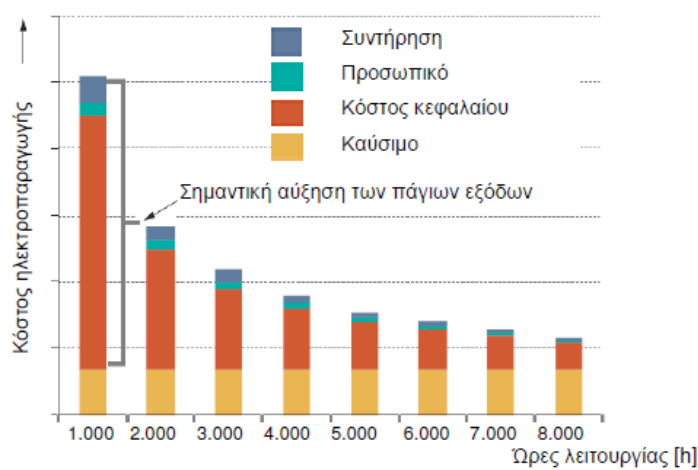


Neurath (Γερμανία), μονάδες BoA 2&3

ΚΑΘΑΡΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
22 - 23 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015, ΚΑΠΕ.

39

Δαπάνες (επένδυση, λειτουργία και συντήρηση)



Κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

ΚΑΘΑΡΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
22 - 23 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015, ΚΑΠΕ.

40

Δαπάνες (επένδυση, λειτουργία και συντήρηση)



Κόστη κεφαλαίου, Λ&Σ και καυσίμου για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα και φυσικού αέριου

Τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής κονιοποιημένου άνθρακα (PC) και ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία (CFB)

	μ.μ.	υποκρίσιμη PC		υπερκρίσιμη PC		υπέρ - υπερκρίσιμη PC		υποκρίσιμη CFB ^(e)	
		χωρίς δέσμευση	με δέσμευση	χωρίς δέσμευση	με δέσμευση	χωρίς δέσμευση	με δέσμευση	χωρίς δέσμευση	με δέσμευση
ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ									
Καθαρή απόδοση (ΑΘΔ)	%	34.29	25.09	38.47	29.16	43.30	34.12	34.78	25.46
Παροχή καυσίμου	t/h	208	284	185	243	164	209	297	406
ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΟ CO₂									
Εκπεμπόμενο CO ₂	t/h	466	63.6	415	54.5	369	46.8	517	70.7
Δεσμευόμενο CO ₂ στο 90% ⁽¹⁾	t/h	0	573	0	491	0	422	0	36
Εκπεμπόμενο CO ₂	g/kWh	932	127	830	109	738	94	1034	141

Τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής κονιοποιημένου άνθρακα (PC) και ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία (CFB)

	μ.μ.	υποκρίσιμη PC		υπερκρίσιμη PC		υπέρ - υπερκρίσιμη PC		υποκρίσιμη CFB ^(e)	
		χωρίς δέσμευση	με δέσμευση	χωρίς δέσμευση	με δέσμευση	χωρίς δέσμευση	με δέσμευση	χωρίς δέσμευση	με δέσμευση
ΔΑΠΑΝΕΣ									
Επένδυση ⁽²⁾	\$/kW _e	1280	2230	1330	2140	1360	2090	1330	2270
Κόστος κεφαλαίου @15.1% ⁽³⁾	c/kW _e h	2.60	4.52	2.7	4.34	2.76	4.24	2.70	4.60
Καύσιμο @ 0,512 c/kW _e h	c/kW _e h	1.49	2.04	1.33	1.75	1.18	1.50	0.98	1.34
Λ&Σ	c/kW _e h	0.75	1.60	0.75	1.60	0.75	1.60	1.00	1.85
Κόστος ηλεκτρισμού	c/kW _e h	4.84	8.16	4.78	7.69	4.69	7.34	4.68	7.79
Κόστος CO ₂ ⁽⁴⁾ vs ίδια τεχνολογία	\$/t	41.3		40.4		41.1		39.7	
Κόστος CO ₂ ⁽⁵⁾ vs υπερκρίσιμη	\$/t	48.2		40.4		34.8		42.8	

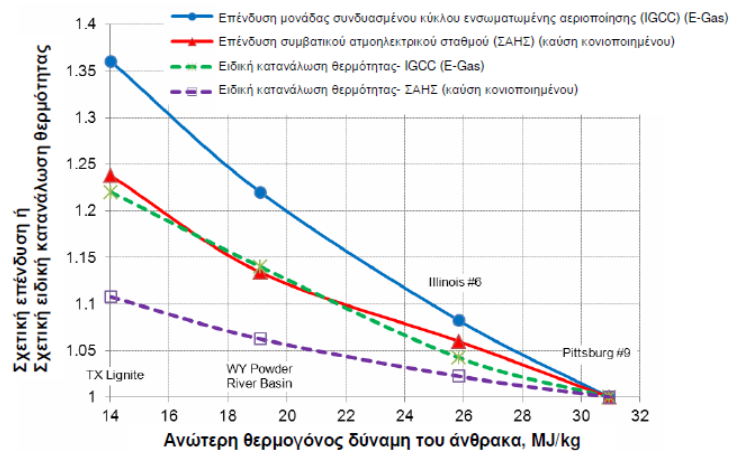
Η επίδραση της ποιότητας του καυσίμου (ανώτερη θερμογόνος δύναμη) στην επένδυση και την ειδική κατανάλωση θερμότητας

➤ Στο επόμενο σχήμα μπορεί να παρατηρηθεί το σημαντικό πλεονέκτημα της αεριοποίησης των καυσίμων με υψηλή θερμογόνο δύναμη σε σχέση με τα καύσιμα χαμηλής θερμογόνου δύναμης, καθώς και της χρήση αυτών στην καύση κονιοποιημένου καυσίμου.

Αυτό κατά κύριο λόγο οφείλεται στο γεγονός ότι για τη θερμική ισχύ που παράγεται μέσω της συνήθους καύσης, η αναγκαία ροή του καυσίμου είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την θερμογόνο δύναμή του.

Μια αυξημένη ροή του καυσίμου συνεπάγεται τη χρήση μεγάλων εγκαταστάσεων επεξεργασίας και αποθήκευσής του, καθώς και αυξημένη κατανάλωση ενέργειας για την εξόρυξη, τη μεταφορά, τον θρυμματισμό, κλπ

Η επίδραση της ποιότητας του καυσίμου (ανώτερη θερμογόνος δύναμη) στην επένδυση και την ειδική κατανάλωση θερμότητας



ΚΑΘΑΡΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
22 - 23 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015, ΚΑΠΕ.

45