

Συμβατικοί ατμοηλεκτρικοί σταθμοί (ΣΑΗΣ) με καύσιμο άνθρακα

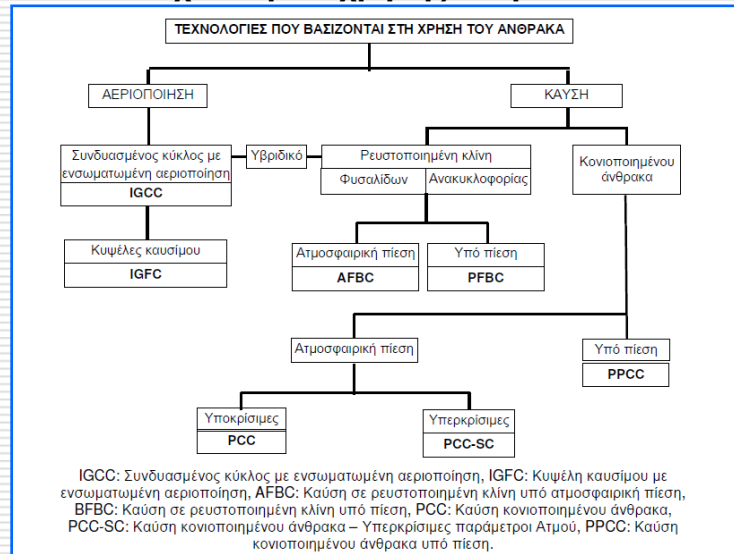
Δρ. Αντώνιος Τουρλιδάκης
Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Δυτικής Μακεδονίας

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
- γ) αεριοποίησης (στην τελευταία περίπτωση, το καύσιμο στον κύκλο μετατροπής είναι το syngas που είναι μίγμα CO και H₂).

Τύποι τεχνολογιών χρήσης άνθρακα σε ΘΗΣ



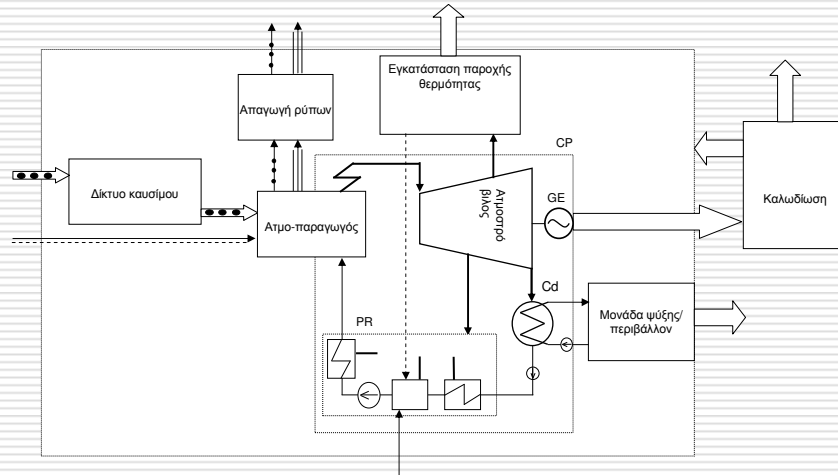
ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

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).

ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

Γενική Διάταξη ενός ΣΑΗΣ

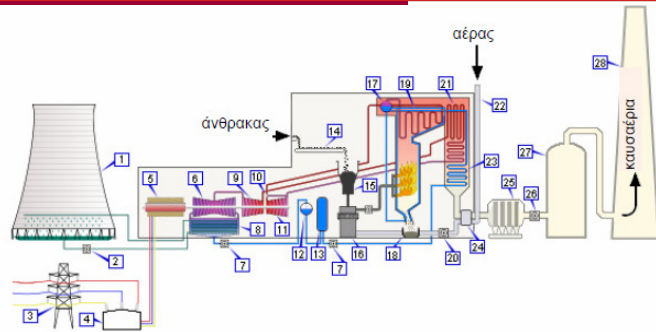


ΠΡΩΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

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

ΠΡΩΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015



- | | | |
|---|--|--|
| 1. πύργος ψύξης | 11. βαθμίδα υψηλής πίεσης του αμμοστρόβιλου | 19. υπερθερμαντήρας |
| 2. αντλία ψύξης | 12. θερμικός απαεριωτής | 20. ανεμιστήρας αέρα |
| 3. τριφασική γραμμή μεταφοράς μετασχηματιστής ενίσχυσης τάσης | 13. αναγεννητικός προθερμαντήρας του νερού τροφοδοσίας του αμμοπαραγωγού | 21. επαναθερμαντήρας |
| 4. μετασχηματιστής ενίσχυσης τάσης | 14. ιμάντας μεταφοράς άνθρακα | 22. είσοδος αέρα καύσης |
| 5. ηλεκτρογεννήτρια | 15. ανθρακαποθήκη | 23. προθερμαντήρας του νερού τροφοδοσίας (οικονομητήρας) |
| 6. βαθμίδα χαμηλής πίεσης του αμμοστρόβιλου | 16. μύλοι άνθρακα | 24. προθερμαντήρας αέρα |
| 7. κύριες αντλίες συμπυκνώματος και τροφοδοσίας | 17. τύμπανο | 25. ηλεκτρικό φίλτρο |
| 8. επιφανειακός συμπυκνωτής | 18. δοχείο αποθήκευσης της τέφρας | 26. ανεμιστήρας καυσαερίων |
| 9. βαθμίδα μέσης πίεσης του αμμοστρόβιλου | | 27. καθαριστής |
| 10. βαλβίδα έλεγχου | | 28. καπνοδόχος |

ΠΡΩΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

- Όταν η πηγή της καύσιμης ύλης είναι ο άνθρακας, αυτός μπορεί να εξαχθεί τόσο από επιφανειακά ορυχεία (υπαίθριες εκμεταλλεύσεις) ή από υπόγεια ορυχεία.



- Για ένα συγκεκριμένο σταθμό, η απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου είναι ακόμα μεγαλύτερη όταν η ποιότητά του είναι φτωχή (δηλ. έχει χαμηλή θερμιδική αξία). Προκειμένου να μειωθούν τα κόστη που σχετίζονται με τη μεταφορά των καυσίμων, συνιστάται ο σταθμός να βρίσκεται κοντά στην πηγή πρωτογενούς ενέργειας (σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής στο "στόμιο του ορυχείου"), ιδιαίτερα δε για τα καύσιμα με χαμηλό ενεργειακό δυναμικό (π.χ. άνθρακας).

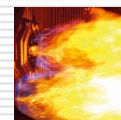
ΠΡΩΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015



- ❑ Εάν ο σταθμός δεν βρίσκεται στο "στόμιο του ορυχείου", η μεταφορά του καυσίμου μπορεί να γίνει μέσω σιδηροδρόμου, ή μέσω πλοίου (θαλάσσιες οδοί μεταφοράς)
- ❑ Εάν η μονάδα βρίσκεται κοντά στο "στόμιο του ορυχείου" η μεταφορά μπορεί να γίνει με ταινιοδρόμους. Επιπλέον, ο άνθρακας μπορεί να μεταφερθεί και υδραυλικά, μέσω σωλήνων, αναμειγνύοντάς τον με νερό ώστε να σχηματιστεί ιλύς σε αναλογία περίπου 1:1.
- ❑ Πριν από τη χρήση του ο άνθρακας ζυγίζεται, εκφορτώνεται, θρυμματίζεται και αποθηκεύεται. Εάν είναι απαραίτητο, ξηραίνεται χρησιμοποιώντας τα καυσαέρια από τον ατμοπαραγωγό (γεννήτρια ατμού), ατμό ή θερμό νερό.
- ❑ Εντός του σταθμού, ο άνθρακας, πριν την καύση του, μεταφέρεται με τη βοήθεια ταινιοδρόμων, όπου επίσης ζυγίζεται, χωρίζεται από μεταλλικά αντικείμενα με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητών και, στη συνέχεια, αλέθεται σε πολύ μικρά κομμάτια.



- ❑ Ο άνθρακας καίγεται στον ατμοπαραγωγό (ΑΠ), χρησιμοποιώντας εν γένει καυστήρες ή τεχνολογίες καύσης που μειώνουν το σχηματισμό των NOx.
- ❑ Από την καύση παράγονται τα θερμά αέρια της καύσης, τα οποία απελευθερώνουν θερμότητα και έτσι το νερό μετατρέπεται σε ατμό.
- ❑ Στο εσωτερικό του ΑΠ, το νερό διέρχεται μέσα από σωλήνες και τα καυσαέρια επάνω και γύρω από αυτούς.
- ❑ Αφού απελευθερωθεί η θερμότητα στο νερό / ατμό, τα καυσαέρια καθαρίζονται αφαιρώντας τη σκόνη (για την κατακράτηση της τέφρας) και απομακρύνοντας το θείο (κατακράτηση του SO₂), και, τέλος, απάγονται στην ατμόσφαιρα. Μέσω του συστήματος καθαρισμού των καυσαερίων, μειώνεται σημαντικά η αρνητική επίδραση των ΣΘΗΣ στο περιβάλλον και τους ανθρώπους.



- Ο υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, ατμός παροχετεύεται στον ατμοστρόβιλο όπου, λόγω της πτώσης της πίεσής του, αυξάνεται η ταχύτητα του ατμού.
- Η κινητική του ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια από τα περιστρεφόμενα πτερύγια του άξονα του ατμοστρόβιλου.
- Αυτός με τη σειρά του κινεί το ρότορα μιας ηλεκτρογεννήτριας, ο οποίος περιστρέφεται εντός του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από το στάτορα.
- Μπορεί να ενισχύεται η τάση με τη χρήση μετασχηματιστή, προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές.



- Ο ατμός που εξέρχεται από το στρόβιλο έχει χαμηλότερες παραμέτρους. Υφίσταται συμπύκνωση στο συμπυκνωτή ατμού (ψυχρή πηγή του θερμοδυναμικού κύκλου), και το συμπύκνωμα που προκύπτει αντλείται και στέλνεται πίσω στον ΑΠ για να ανατροφοδοτηθεί ο κύκλος.
- Μεταξύ του συμπυκνωτή και του ΑΠ, θερμαίνεται το νερό στο κύκλωμα προθέρμανσης από ατμό που απομαστεύεται από το στρόβιλο μέσω εναλλακτών θερμότητας.
- Στο συμπυκνωτή, ο ατμός συμπυκνώνεται λόγω της επαφής του με τις ψυχρές σωληνώσεις μέσα στις οποίες κυκλοφορεί το κρύο νερό ψύξης. Το νερό ψύξης μπορεί να ληφθεί από μία φυσική πηγή (ποτάμι, θάλασσα, κλπ.) και / ή από τον πύργο ψύξης.
- Το νερό ψύξης που προέρχεται από ποτάμι εκχύεται πίσω σ' αυτό μετά τη θέρμανσή του στο συμπυκνωτή, ενώ το νερό που προέρχεται από τον πύργο ψύξης επιστρέφει σε αυτόν, όπου ψύχεται με φυσικό ελκυσμό (ατμοσφαιρικός αέρας).





α) Υπαίθριες εκμεταλλεύσεις



β) Υπόγεια ορυχεία

Μεταφορά άνθρακα:



γ) Σιδηρόδρομος



δ) Πλοίο



ε) Ταινιοδρόμος



θ) Καπνοδόχος



Συνεχίζεται..



στ) Ατμοπαραγωγός



ζ) Απομάκρυνση σκόνης



η) Αποθείωση



μ) Μεταφορά ενέργειας

Συνεχίζεται..

...συνέχεια



ι) Ατμοστρόβιλος



κ) Ηλεκτρογεννήτρια



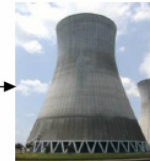
λ) Μετασχηματιστής



ξ) Κύκλωμα νερού προθέρμανσης



ν) Συμπυκνωτής ατμού



ο) Πύργος ψύξης

...συνέχεια

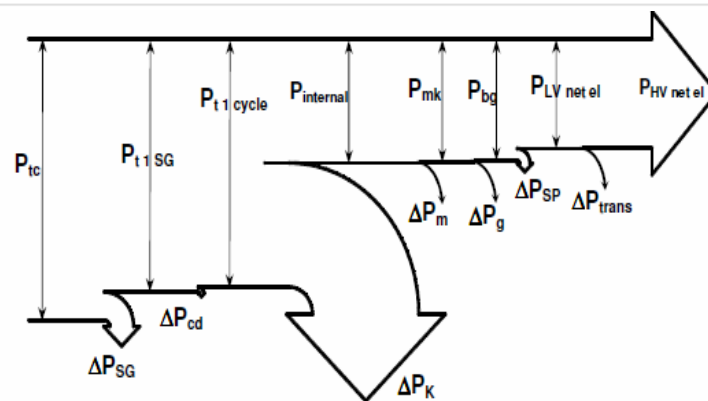
Ατμός μπορεί να εξαχθεί (απομαστευτεί) από τον στρόβιλο για τους εξής σκοπούς:

- 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 απώλειες του θερμικού ρευστού στο θερμοδυναμικό κύκλο υποκαθίστανται μέσω ενός ρεύματος νερού αναπλήρωσης.

Ενεργειακές αποδόσεις





Αποδοτικότητα ανά υποσύστημα και μετασχηματισμό

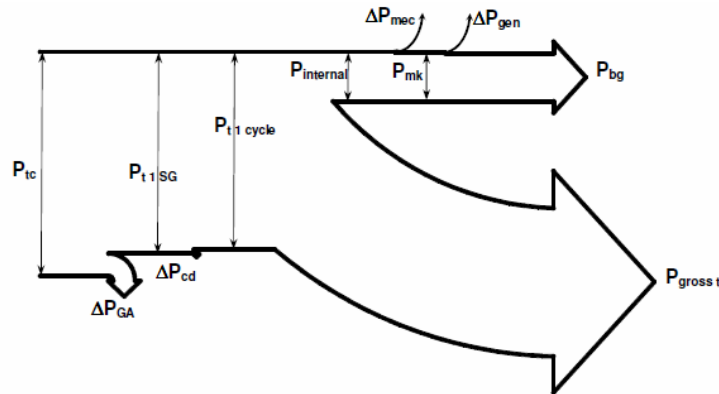
Υποσύστημα	Αποδοτικότητα	Όνομα
Ατμοπαραγωγός (SG)	$\eta_{SG} = P_{t1 SG} / P_{ic} = 1 - \Delta P_{SG} / P_{ic}$	Αποδοτικότητα του SG
Σύστημα σωληνώσεων	$\eta_{od} = P_{t1 cycle} / P_{t1 SG} = 1 - \Delta P_{od} / P_{t1 SG}$	Αποδοτικότητα των σωληνώσεων
Θερμικός κύκλος	$\eta_t = P_{internal} / P_{t1 cycle} = 1 - \Delta P_k / P_{t1 cycle}$	Θερμική αποδοτικότητα
Κύριο σώμα του αμμοστρόβιλου	$\eta_m = P_{mk} / P_{internal} = 1 - \Delta P_m / P_{internal}$	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



Κατηγορίες των απωλειών και των αποδοτικότητων

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_{od}	η_{od} (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



$P_{gross\ t}$ → Ακαθάριστη θερμική ισχύς που αποστέλλεται από τον ατμοστρόβιλο στους καταναλωτές της θερμότητας

Διάγραμμα Sankey για ένα ΣΑΗΣ συμπαραγωγής με ΑΣΜ αντίθλιψης

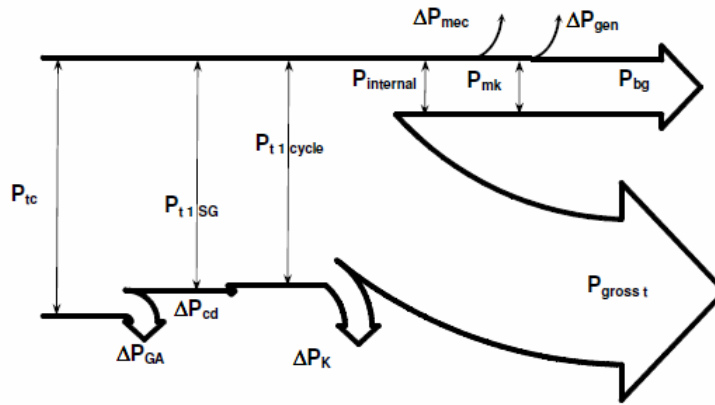
- ❑ Το επίπεδο πίεσης του συμπυκνωτή είναι περίπου 0,05 bar
- ❑ Η θερμοκρασία του νερού στην έξοδο θα πρέπει να είναι περίπου 30°C.
- Το θερμικό επίπεδο όμως που απαιτείται από τον καταναλωτή:
 - ✓ **0.7 ÷ 2.5 bar** για τους αστικούς καταναλωτές – δηλ. τα κτίρια (για θέρμανση, ζεστό νερό χρήσης)
 - ✓ **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 μία ΑΣΜ αντίθλιψης που να προμηθεύει ένα βιομηχανικό καταναλωτή.
- Αν υπάρχουν απαιτήσεις για ατμό σε διάφορα επίπεδα πίεσης, θα πρέπει να χρησιμοποιείται μία 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



ΠΡΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

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

ΠΡΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

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

➤ Η 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.

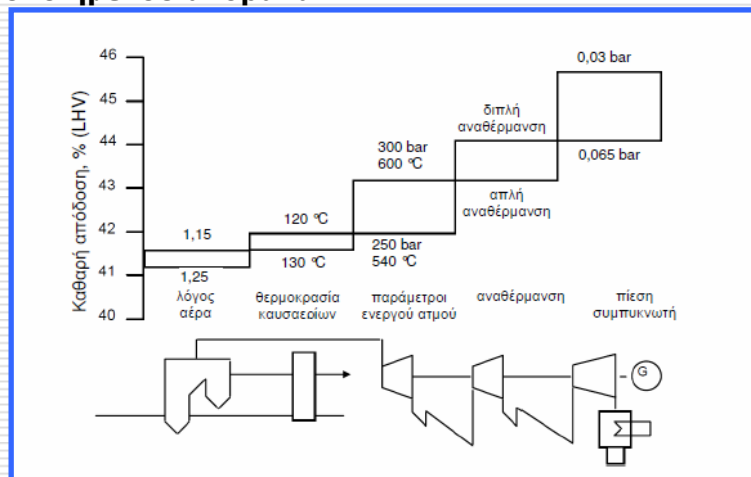
Η μεγαλύτερη απώλεια θερμότητας στον ατμοπαραγωγό συμβαίνει μέσω της αισθητής (φυσικής) **θερμότητας των καυσαερίων**, η οποία μπορεί να περιοριστεί με την αύξηση της ροής και της θερμοκρασίας των καυσαερίων.

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.

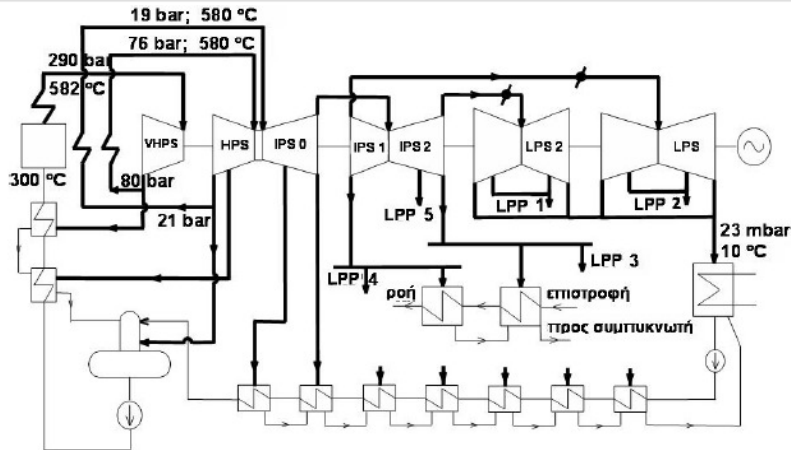
Τα δεδομένα των σταθμών είναι τα εξής:

- 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 + απαεριωτής + 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



ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

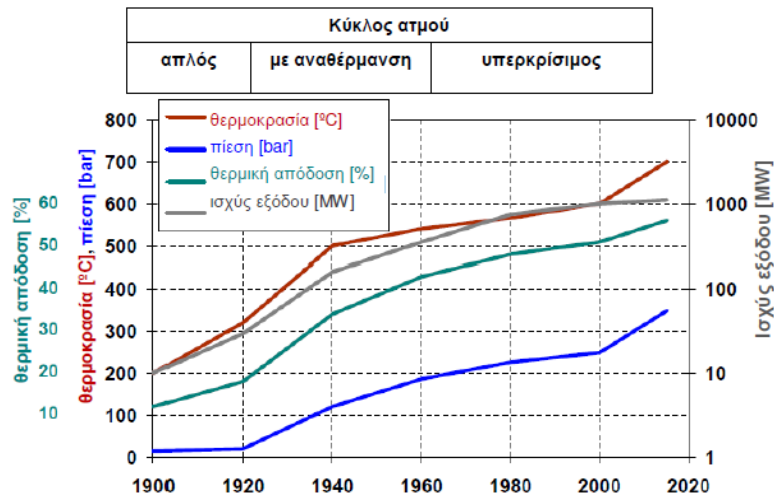
Παραδείγματα αντιπροσωπευτικών επιτευγμάτων παγκοσμίως

✓ 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



ΠΡΩΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

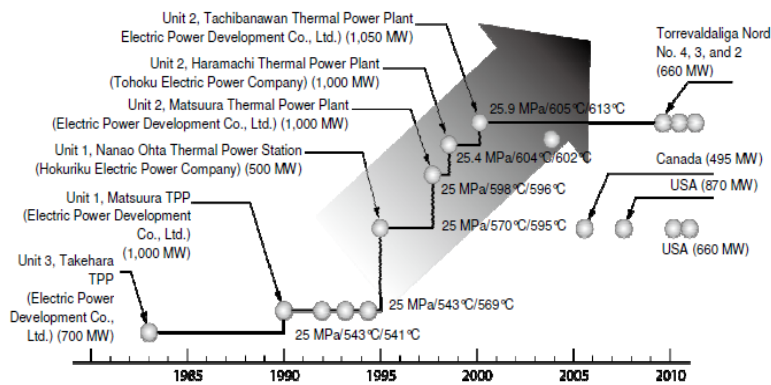
Παραδείγματα αντιπροσωπευτικών επιτευγμάτων παγκοσμίως

➤ 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 αρκούτως υψηλή εγκατεστημένη ισχύ.

ΠΡΩΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

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

ΠΡΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

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

ΠΡΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΣΑΗΣ



Boxberg - R [25]



Avedøre [26]



Lippendorf [27]



Niederaussen [28]

ΠΡΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΣΑΗΣ



Isogo [29]



Lünen-4 [30]

ΠΡΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

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

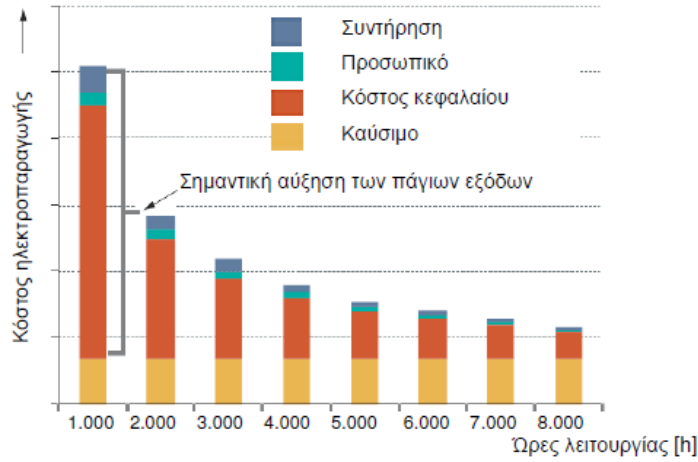
ΠΡΩΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

Neurath (Γερμανία), μονάδες ΒοΑ 2&3



ΠΡΩΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

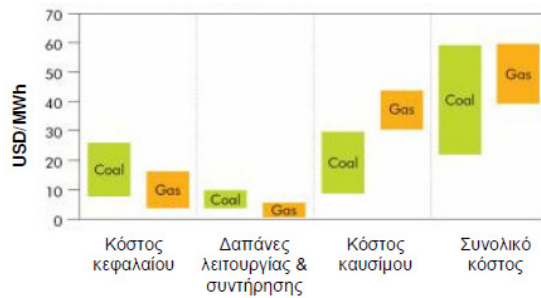
Δαπάνες (επένδυση, λειτουργία και συντήρηση)



Κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

ΠΡΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

Δαπάνες (επένδυση, λειτουργία και συντήρηση)



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

ΠΡΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015



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
	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
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/kW _e h	932	127	830	109	738	94	1034	141

ΠΡΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015



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	

ΠΡΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

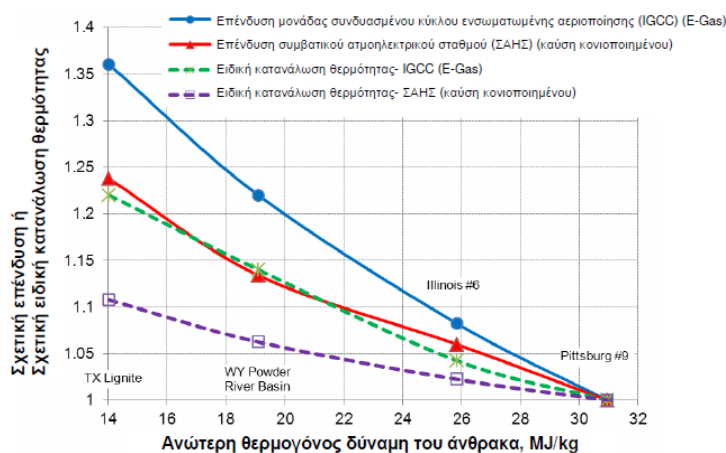
Η επίδραση της ποιότητας του καυσίμου (ανώτερη θερμογόνος δύναμη) στην επένδυση και την ειδική κατανάλωση θερμότητας

➤ 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



Πλεονεκτήματα υπερκρίσιμων μονάδων

Μειωμένη κατανάλωση καυσίμου λόγω αυξημένης απόδοσης

- Απόδοση (μικτή) ~40-41% για υπερκρίσιμες μονάδες (SC) με 24.7MPa/565°C /593°C, περίπου **2-3%** υψηλότερη αυτής αντιστοιχων *υποκρίσιμων* μονάδων (38%) με 16.7MPa/537 °C /537 °C (Δυτική Μακεδονία).
- Απόδοση (μικτή) ~ 41-42% για υπερ-υπερκρίσιμες μονάδες (USC) με 28MPa/593 °C/593 °C, περίπου **3-4%** υψηλότερη αυτής αντιστοιχων *υπερκρίσιμων* μονάδων.
- Οι πιο σύγχρονες USC μονάδες έχουν φτάσει συνολικό βαθμό απόδοσης της τάξης του 47% με 49% διεθνώς.

Σημαντική μείωση εκπεμπόμενου CO₂

Κόστος κατασκευής μονάδων αυτής της τεχνολογίας χαμηλότερο από άλλες τεχνολογίες καθαρού άνθρακα και δυνατότητα κλιμάκωσης μέχρι ~1000MWe. Πολύ χαμηλότερες εκπομπές NO_x, SO_x και σωματιδίων

Υπερ-υπερκρίσιμες Μονάδες (USC)

Μονάδες που λειτουργούν με ατμό πάνω από 275 bar πίεση και MS/RH θερμοκρασίες πάνω από 593°C

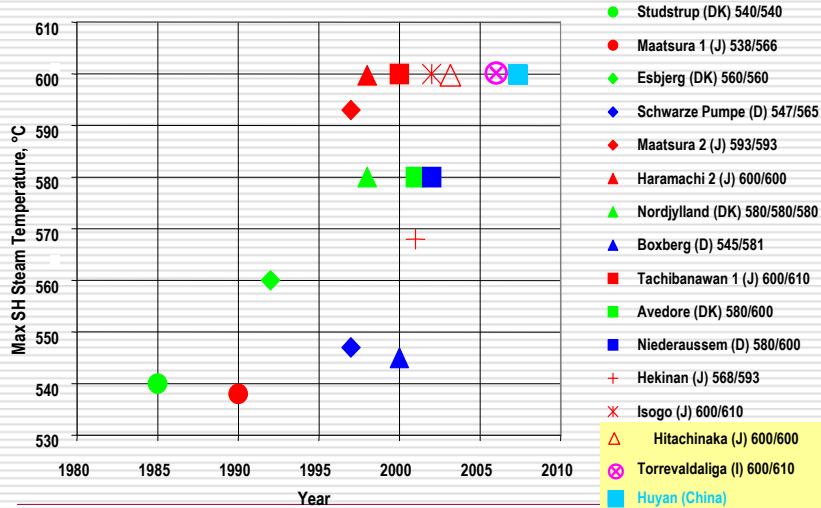
Αρκετές μονάδες USC ισχύος 350MW με 1000MW λειτουργούν ή είναι υπό κατασκευή

- Στόχοι Υπουργείου Ενέργειας ΗΠΑ (DOE) για μονάδες USC:
760 °C και 375 bar
- Στόχοι Ευρωπαϊκής Ένωσης για μονάδες USC (Thermie):
700/720 °C και 375 bar
με B.A. 52-55% /LHV

Απαραίτητη η χρήση κραμάτων νικελίου λόγω πολύ υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών

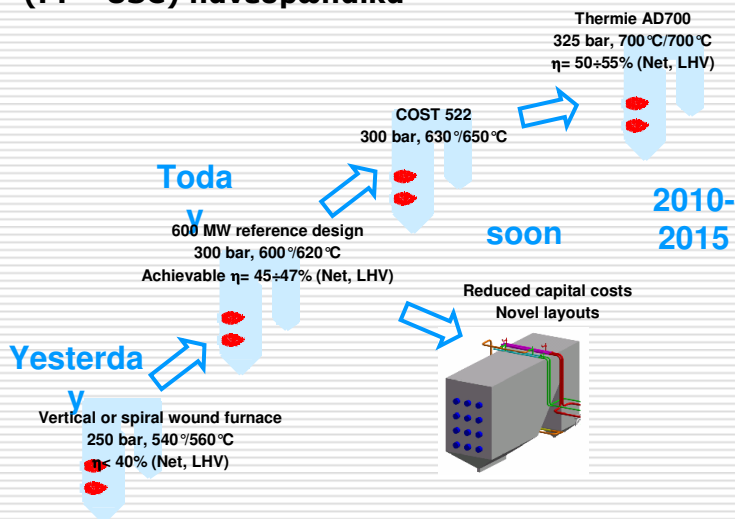
Αύξηση του μέσου B.A. παγκοσμίως από 30% σε 45% (state-of-art) μειώνει τις εκπομπές CO₂ κατά 35% (από ~1100 gr/kWh σε ~700 gr/kWh)

“State-of-the-art” Μονάδες SC και USC Βέλτιστες εγκαταστάσεις παγκοσμίως



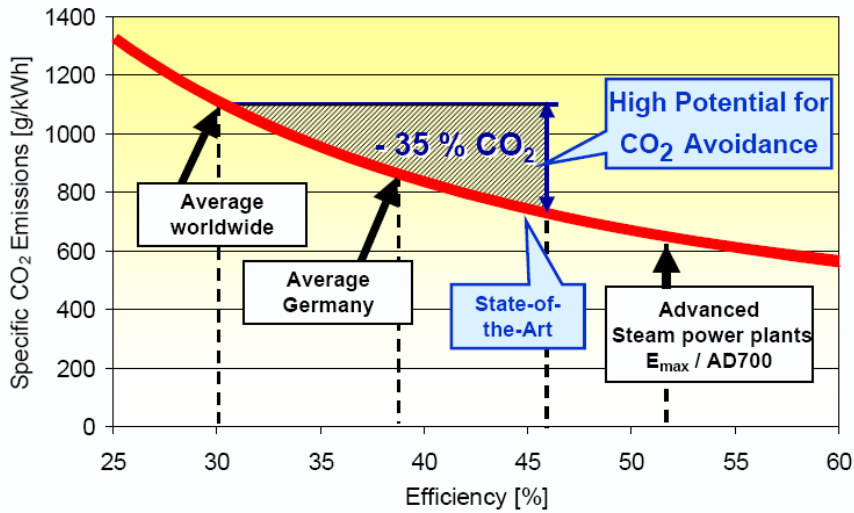
ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

Τάση βελτίωσης μονάδων κονιοποιημένου άνθρακα (PF - USC) πανευρωπαϊκά



ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
27-28 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015

Εκπομπές CO₂ και Β.Α.



Κατανάλωση καυσίμου και αύξηση χαρακτηριστικών ατμού

Λειτουργία σε υπερκρίσιμες συνθήκες → ↑ Βαθμού Απόδοσης

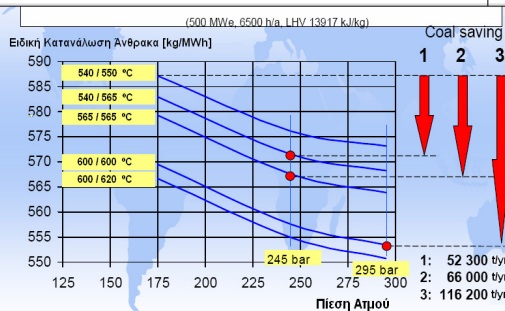
Απαιτήση:

Χρήση εξελιγμένων υλικών ανθεκτικών σε:

- Υψηλές θερμοκρασίες
- Οξειδωση (Πλευρά Ατμού)
- Διάβρωση (Πλευρά Καυσαερίων)

Υλικά συναρτήσε συνθηκών:

- Χάλυβες με Cr ≤ 12% : 300 bar / 600 °C / 620 °C
- Ωστενιτικοί χάλυβες : 315 bar / 600 °C / 620 °C
- Κράματα Νικελίου : 350 bar / 700 °C / 720 °C



Επίδραση αυξημένων χαρακτηριστικών ατμού στην κατανάλωση του άνθρακα

ΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
Υ 2015

Προκλήσεις και εξελίξεις σε SC και USC

Τεχνολογικές προκλήσεις

- Ανάπτυξη Υλικών για υψηλές θερμοκρασίες/πιέσεις
 - διάβρωση και ρωγμές σε υδροτοιχώματα
 - ρύπανση θερμαντικών επιφανειών
- Ποιότητα άνθρακα
- Υψηλό κόστος υλικών

Εξελίξεις

- Η υπερ-υπερκρίσιμη τεχνολογία αναπτύσσεται κυρίως σε Γερμανία, ΗΠΑ και Ιαπωνία για βελτίωση του B.A. και της κατανάλωσης καυσίμου
- Έρευνα κυρίως στην ανάπτυξη νέων χαλύβων και κραμάτων για τους αυλούς του λέβητα ώστε να ελαχιστοποιείται η διάβρωση και αστοχία
- Αναμένεται σημαντική αύξηση στον αριθμό SC και USC ΑΗΣ στα επόμενα χρόνια

DRAX POWER STATION

