

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΤΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΛΕΒΗΤΩΝ
Δρ. Σωτήριος Καρέλλας, Αναπ. Καθηγητής ΕΜΠ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ – ΖΩΓΡΑΦΟΥ
ΗΡΩΩΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ 9, 157 80 ΑΘΗΝΑ



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
MECHANICAL ENGINEERING SCHOOL
THERMAL ENGINEERING SECTION
LABORATORY OF STEAM BOILERS AND THERMAL PLANTS
Assoc. Prof. Dr.-Ing. Sotirios Karellas
POLYTECHNIUPOLI - ZOGRAFOU
9 HEROON POLYTECHNIU, 157 80 ATHENS

☎ +30 210 772 2810
✉ **Fax:** +30 210 772 3663
e-mail: sotokar@mail.ntua.gr

**Δημόσια διαβούλευση για την τροποποίησης της απόφασης
ΡΑΕ 1599/2011 «Προδιαγραφές Μετρητών και Μετρήσεις
Μεγεθών σε απαίτηση της ΥΑ Δ6/Φ1/Οικ.8786/6-5-2010,
Εφαρμογή του Συστήματος Εγγυήσεων Προέλευσης
Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ και
μηχανισμού διασφάλισης του»**

Σ. Καρέλλας, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Α. Δουκέλης, Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός
Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ
Φορέας του Μητρώου Φορέων Πιστοποίησης, Ελέγχου και Επιθεώρησης της ΛΑΓΗΕ Α.Ε
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, ΤΚ 15780 Ζωγράφου

ΑΘΗΝΑ, 17/10/2016

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν κείμενο εκθέτει τις απόψεις του Εργαστηρίου Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, Φορέα του Μητρώου Φορέων Πιστοποίησης, Ελέγχου και Επιθεώρησης της ΛΑΓΗΕ Α.Ε., όσον αφορά την δημόσια διαβούλευση για την τροποποίηση της απόφασης ΡΑΕ 1599/2011, «Προδιαγραφές Μετρητών και Μετρήσεις Μεγεθών σε απαίτηση της ΥΑ Δ6/Φ1/Οικ.8786/6-5-2010, Εφαρμογή του Συστήματος Εγγυήσεων Προέλευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ και μηχανισμού διασφάλισης του».

Καταρχήν, εκφράζουμε την πλήρη συμφωνία μας με όλα τα σημεία της εισήγησης της ΛΑΓΗΕ Α.Ε. (5145/22.9.2016). Τονίζουμε και εμείς με την σειρά μας, όπως ήδη αναφέρεται στην εισήγηση, ότι στο Άρθρο 4 της Υ.Α. Δ6/Φ1/οικ.8786/6-5-2010 (ΦΕΚ Β' 646/14/05/2010) προβλέπεται μόνο η αρχική διαδικασία και ο χρόνος θέσπισης των προδιαγραφών και όχι η διαδικασία αναθεώρησης αυτών. Συνεπώς, για οποιαδήποτε αναθεώρηση της Απόφασης ΡΑΕ 1599/2011, απαιτείται τουλάχιστον να ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία που προηγήθηκε της θέσπισης των σχετικών προδιαγραφών, και κυρίως της διαβούλευσης.

Αναφορικά με το θέμα της διαχείριση της θερμότητας των συμπυκνωμάτων κατά τον υπολογισμό της αποδοτικότητας συμπαραγωγής για την Έγκριση Ειδικών Λειτουργικών Όρων Κατανεμόμενης Μονάδας ΣΗΘΥΑ σύμφωνα με το άρθρο 8 της υπ' αριθμ. Δ5-ΗΛ/Γ/Φ1/οικ. 15641 (ΦΕΚ Β' 1420/2009), και τις προτάσεις που αναλύονται στην υπ' αριθμ. 80/2016 απόφαση της ΡΑΕ, κρίνουμε σκόπιμο τόσο σαν ακαδημαϊκός φορέας με εγνωσμένη γνώση στο αντικείμενο όσο και λόγω του θεσμικού μας ρόλου ως Φορέας του Μητρώου Φορέων Πιστοποίησης, Ελέγχου και Επιθεώρησης της ΛΑΓΗΕ Α.Ε. να εκθέσουμε το αντικείμενο σε τεχνικό επίπεδο, ώστε να τεκμηριώσουμε την άποψή μας, όπως παρατίθεται στα επόμενα.

A) Φυσική διάσταση του θέματος, στοιχεία θερμοδυναμικής

Ο μέγιστος θεωρητικός βαθμός απόδοσης Carnot για μια μηχανή που λειτουργεί μεταξύ των θερμοκρασιακών επιπέδων θ_1 και θ_2 (σε $^{\circ}\text{C}$) είναι:

$$\eta_c = 1 - \frac{273,15 + \theta_2}{273,15 + \theta_1} \quad (1)$$

Για την περίπτωση μιας μονάδας συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας που παρέχει υπέρθερμο ατμό σε μια διεργασία χαμηλής πίεσης σε θερμοκρασία της τάξεως των 30°C υπεράνω του κορεσμού σε ένα τυπικό επίπεδο πίεσης 2-10 bar και εξέρχεται κορεσμένο συμπύκνωμα με θερμοκρασία $120-180^{\circ}\text{C}$ (μέση τιμή 6 bar/ 150°C), η ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού 6 bar/ 180°C είναι περ. 2800 kJ/kg και η ενθαλπία του κορεσμένου συμπυκνώματος 670 kJ/kg. Αν υποτεθεί τελική θερμοκρασία του συμπυκνώματος 20°C , δηλαδή ότι το θερμικό περιεχόμενο των συμπυκνωμάτων δεν αφαιρείται από την χρήσιμη θερμότητα H_{CHP} , ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης Carnot η_{c1} μεταξύ των επιπέδων 180°C και 20°C προκύπτει σύμφωνα με την σχέση (1) ίσος προς 35%, ενώ ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης Carnot η_{c2} μεταξύ των επιπέδων 150°C και 20°C είναι 31%.

Ως “εξέργεια” ορίζεται το ποσό εκείνο της θερμικής ενέργειας το οποίο δύναται να μετατραπεί σε ωφέλιμο έργο και εκφράζεται ως το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του Carnot με το ποσό θερμότητας.

Η εξέργεια του υπέρθερμου ατμού και του συμπυκνώματος, που είναι η πραγματική αξία μιας ποσότητας θερμότητας εκφρασμένη σε έργο δίνεται από τη σχέση

$$E = \eta_{ci} \cdot H_i \quad (2)$$

Συνεπώς η εξέργεια του υπέρθερμου ατμού E_1 είναι περ. 989 kJ/kg, ενώ η εξέργεια E_2 του συμπυκνώματος είναι 206 kJ/kg. Άρα η εξεργειακή καταστροφή που έχει πραγματοποιηθεί στην θερμική διεργασία ανέρχεται περίπου στο 80% της εξέργειας του υπερθέρμου ατμού, με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός ρεύματος θερμότητας χαμηλού εξεργειακού περιεχομένου.

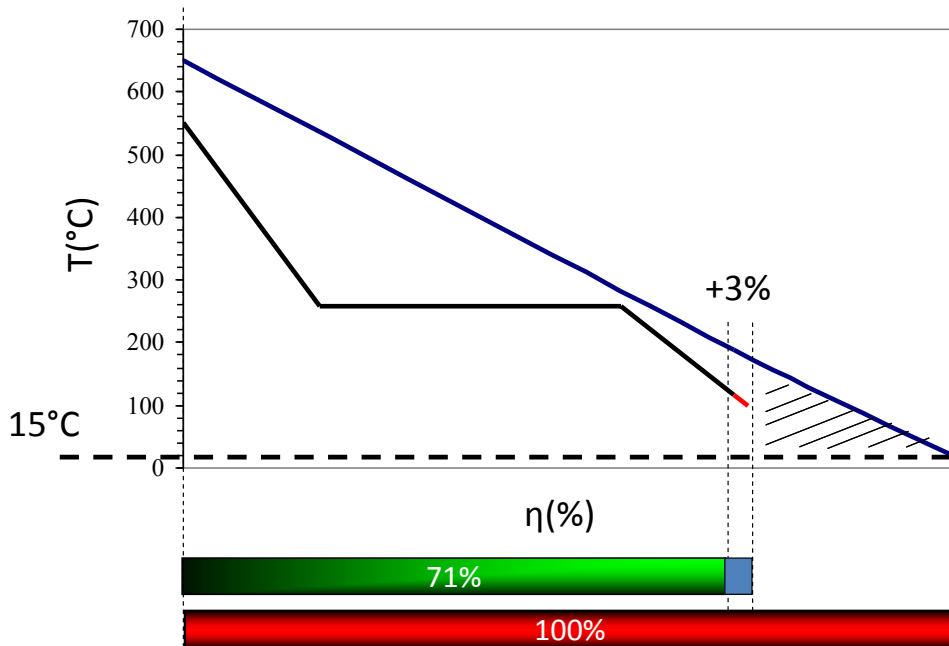
Αυτό το ποσό θερμότητας χρησιμοποιείται ώστε να συσχετισθεί με την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε κατάσταση συμπαραγωγής. Συνεπώς, το E_{CHP} που υπολογίζεται με βάση το H_{CHP} επέχει θέση «προσφερόμενης» ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας.

Σε ένα συνδυασμένο κύκλο, ορίζεται ο βαθμός απόδοσης του Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας (ΛΑΘ), ως το ποσοστό της ωφέλιμης θερμότητας του λέβητα, ως προς τη συνολική θερμική ενέργεια του καυσαερίου αν αυτό μπορούσε να ψυχθεί μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

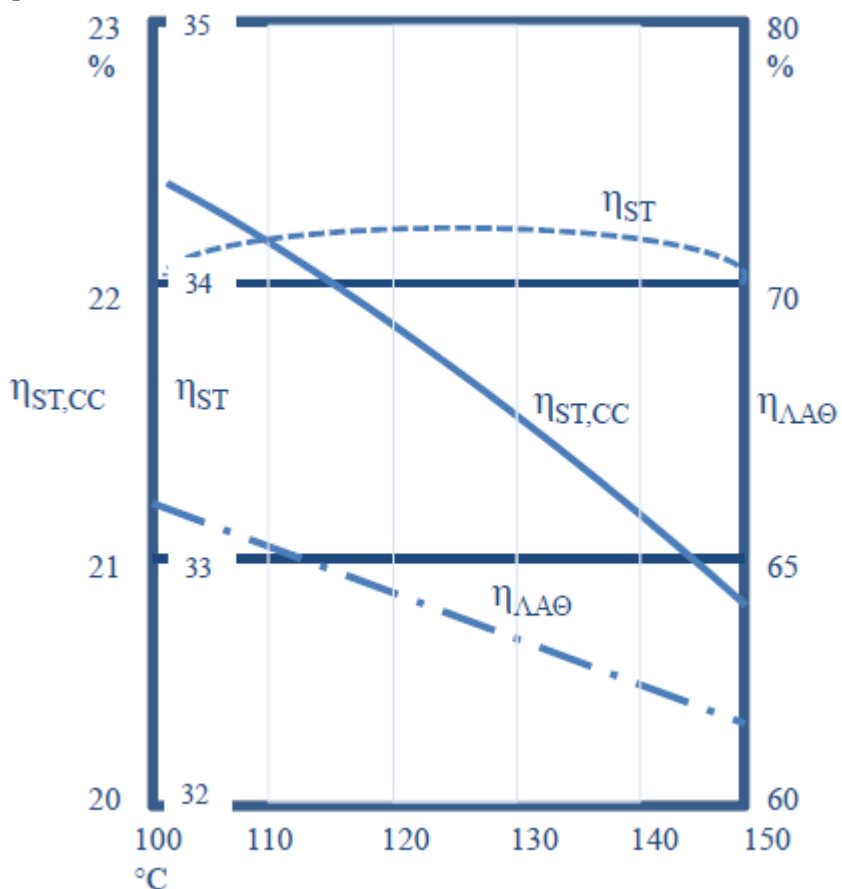
$$\eta_{\Lambda\Lambda\Theta} = \frac{\theta_{Gin} - \theta_{Gout}}{\theta_{Gin} - \theta_o}$$

Στο σχήμα 1 φαίνεται ένα τυπικό Q-T διάγραμμα ενός ΛΑΘ, όπου έχει παρασταθεί και η αύξηση της απόδοσης του ΛΑΘ όταν μειωθεί η θερμοκρασία του τροφοδοτικού νερού σε αυτό. Με τη μείωση της θερμοκρασίας του τροφοδοτικού νερού, ελαττώνονται οι απώλειες εξέργειας, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των καυσαερίων, αφού τα καυσαέρια εξέρχονται στο περιβάλλον με χαμηλότερη θερμοκρασία. Έτσι ο βαθμός αξιοποίησης της θερμότητας του καυσαερίου είναι πιο υψηλός και η όλη διεργασία λειτουργεί με καλύτερο βαθμό απόδοσης. Η εξέργεια αυτή που δεν αξιοποιείται στην περίπτωση επιστροφής των συμπυκνωμάτων είναι και αυτή η οποία αντιστοιχεί σε επιπλέον έργο το οποίο θα υπήρχε η δυνατότητα να παραχθεί, το οποίο όμως δεν παράγεται λόγω της φύσης του τροφοδοτικού νερού.

Σε μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου, η θερμοκρασία του τροφοδοτικού νερού θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό χαμηλότερη, δεδομένου ότι αυτό βελτιώνει το θερμικό βαθμό η_{ST} του κύκλου νερού-ατμού, το βαθμό απόδοση του κύκλου ατμού $\eta_{ST,CC}$ (λαμβάνοντας υπόψη και το λέβητα ανάκτησης θερμότητας - ΛΑΘ) καθώς και το βαθμό απόδοσης $\eta_{\Lambda\Lambda\Theta}$ του ΛΑΘ, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Μια αύξηση της θερμοκρασίας του τροφοδοτικού νερού κατά 10°C έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του βαθμού απόδοσης $\eta_{ST,CC}$ κατά περίπου 0.4 ποσοστιαίες μονάδες και του $\eta_{\Lambda\Lambda\Theta}$ κατά περίπου 0.25 ποσοστιαίες μονάδες. Εξάλλου στο διάγραμμα Q-T που παρατίθεται στο Σχήμα 2 φαίνεται ότι μια αύξηση της θερμοκρασίας του τροφοδοτικού νερού κατά 20°C επιφέρει μείωση του βαθμού απόδοσης κατά 3 ποσοστιαίες μονάδες.



Σχήμα 1: Αύξηση του βαθμού απόδοσης του ΛΑΘ και μείωση των εξεργειακών απωλειών λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας του τροφοδοτικού νερού. [Πηγή: Ε. Κακαράς, Σ. Καρέλλας: Διαλέξεις Ατμοπαραγωγού Ι, Θερμικοί Σταθμοί ΙΙ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο]



Σχήμα 2: Επίδραση της θερμοκρασίας του τροφοδοτικού νερού στους βαθμούς απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου [Πηγή: Ε. Κακαράς, Σ. Καρέλλας: Διαλέξεις Ατμοπαραγωγού Ι, Θερμικοί Σταθμοί ΙΙ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο]

Αυτή η μείωση του β.α. που φαίνεται στα σχήματα 1 και 2 είναι αυτή που θυσιάζεται λόγω της εφαρμογής της συμπαραγωγής και της επιστροφής συμπυκνωμάτων που έχουν σαν αποτέλεσμα την ανύψωση της θερμοκρασίας του τροφοδοτικού νερού και την αύξηση των εξεργειακών απωλειών και άρα τη μείωση της δυνατότητας παραγωγής έργου.

Σε μια διεργασία συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, όπου έχουμε δύο χρήσιμα προϊόντα, τον ηλεκτρισμό και τη θερμότητα, η ανάκτηση της θερμότητας των συμπυκνωμάτων μειώνει την απαιτούμενη κατανάλωση ενέργειας καυσίμου για την παραγωγή της χρήσιμης θερμικής ενέργειας. Αν αναφερθούμε στην ανωτέρω περίπτωση μιας τυπικής διεργασία χαμηλής πίεσης που απαιτεί ατμό χαμηλής πίεσης σε θερμοκρασία της τάξεως των 30°C υπεράνω του κορεσμού σε ένα τυπικό επίπεδο πίεσης 2-10 bar και εξέρχεται κορεσμένο συμπύκνωμα με θερμοκρασία 120-180°C, αν η θερμική αυτή κατανάλωση καλυπτόταν από ένα ξεχωριστό ατμολέβητα βαθμού απόδοσης 90%, στην περίπτωση που δεν ανακτάται το θερμικό περιεχόμενο των συμπυκνωμάτων αλλά χρησιμοποιείται νερό make-up θερμοκρασίας 20°C και ενθαλπίας 84 kJ/kg, η κατανάλωση καυσίμου ανέρχεται σε:

$$q_1 = \frac{h_{out} - h_{in}}{\eta_{\Lambda}} = \frac{2800 - 84}{0.9} = 3017.8 \text{ kJ/kg ατμού}$$

Στην περίπτωση που ανακτάται το θερμικό περιεχόμενο των συμπυκνωμάτων και η θερμική κατανάλωση καλυφθεί από ένα ξεχωριστό ατμολέβητα βαθμού απόδοσης 85%, η κατανάλωση καυσίμου ανέρχεται σε:

$$q_2 = \frac{h_{out} - h_{in}}{\eta_{\Lambda}} = \frac{2800 - 670}{0.85} = 2505.9 \text{ kJ/kg ατμού}$$

Συνεπώς, η εκμετάλλευση της θερμότητας των συμπυκνωμάτων έχει σαν αποτέλεσμα εξοικονόμηση ισοδύναμου καυσίμου για την παραγωγή της χρήσιμης θερμικής ενέργειας της τάξης του:

$$\Delta q = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{3017.8 - 2505.9}{3017.8} = 17 \%$$

Τα ανωτέρω καταδεικνύουν ότι η εκμετάλλευση της θερμότητας των συμπυκνωμάτων σε μια μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας αφενός έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής και της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, και αφετέρου την σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου για παραγωγή θερμικής ενέργειας.

Εφαρμογή σε άλλες χώρες

Στο Ηνωμένο Βασίλειο, που είναι μια χώρα με σημαντική ανάπτυξη στον τομέα της συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, υπάρχει το πρόγραμμα CHPQA - Quality Assurance for Combined Heat and Power. Το πρόγραμμα αυτό υλοποιείται για το Department of Energy and Climate Change, σε συνεργασία με τις Scottish Executive, National Assembly for Wales και Northern Ireland Department of Enterprise, Trade and Investment και έχουν εκδοθεί μια σειρά από αναλυτικές οδηγίες (guidance notes - <http://chpqa.decc.gov.uk/guidance-notes/>). Συγκεκριμένα στην GN16.2, η αγγλική εθνική νομοθεσία ορίζει ότι η θερμότητα των συμπυκνωμάτων δεν αφαιρείται από την χρήσιμη θερμότητα, δεδομένου ότι αυτό θα αποτελούσε αντικίνητρο για τον παραγωγό για να κάνει ανάκτηση θερμότητας των συμπυκνωμάτων, κάτι που αποτελεί βέλτιστη πρακτική (best practice):

«Recovery of heat from condensate, and re-use of condensate in a closed loop steam network, is obviously best practice where possible. Excluding condensate heat from the total heat supplied to the user would tend not to encourage the recovery of heat from condensate. Therefore, the heat content of condensate return is not subtracted from the useful heat figure in determining the CHP Scheme's heat outputs”

Συμπέρασμα

Τα ανωτέρω καταδεικνύουν ότι η εκμετάλλευση της θερμότητας των συμπυκνωμάτων σε μια μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας αφενός έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής και της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, και αφετέρου την σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου για παραγωγή θερμικής ενέργειας. Αν ο υπολογισμός του συμπαραγωγικού ηλεκτρισμού γίνει με αφαίρεση της θερμότητας των συμπυκνωμάτων από την ωφέλιμη θερμότητα, αυτό αποτελεί σαφές αντικίνητρο για τον παραγωγό να υιοθετήσει ανάκτηση της θερμότητας των συμπυκνωμάτων, δεδομένης της μείωσης του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης, αλλά και του χειρότερου συνολικού βαθμού απόδοσης που θα υπολογίζεται λόγω της αφαίρεσης αυτής, κάτι που οδηγεί σε σημαντική μείωση των συμπαραγωγικών MWh. Μπορεί συνεπώς να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι έχει νόημα να ζητείται από τους συμπαραγωγούς να εκμεταλλεύονται την θερμότητα των συμπυκνωμάτων, μη λαμβάνοντας υπόψη την επιστροφή συμπυκνωμάτων στον υπολογισμό της χρήσιμης θερμότητας.