



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
"ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ"

ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΗΓΜΕΝΩΝ
ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΑΛΑΤΩΝ: ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΟΜΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΓΙΑ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΛΟΙΑ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ
ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Φάκου Ουρανία

Επιβλέπων: Χρίστος Αθ. Φραγκόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΣΥΜΒΟΛΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

- 1.1 Αρχή Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου
- 1.2 Κυψέλες Καυσίμου Τηγμένων Ανθρακικών Αλάτων
- 1.3 Υβριδικά Συστήματα
- 1.4 Κυψέλες Καυσίμου Και Θαλάσσιες Εφαρμογές

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 2.1 Υβριδικό Σύστημα Μικρο-Στροβίλου Και Κυψέλης Καυσίμου Τηγμένων Ανθρακικών Αλάτων
 - 2.1.1 Λειτουργία του συστήματος
 - 2.1.2 Ανάλυση του συστήματος
 - 2.1.3 Βαθμός εκμετάλλευσης του ανακομιστή
 - 2.1.4 Λόγος ατμού/μεθανίου
 - 2.1.5 Λόγος πίεσης
 - 2.1.6 Συμπεράσματα
- 2.2 Υβριδικό Σύστημα Κυψέλης Καυσίμου Τηγμένων Ανθρακικών Αλάτων Και Αεριοστροβίλου
 - 2.2.1 Λειτουργία του συστήματος
 - 2.2.2 Γενικά χαρακτηριστικά και κριτήρια βελτιστοποίησης
 - 2.2.3 Επίδραση του ανακομιστή θερμότητας
- 2.3 Περιγραφή και Συμπεριφορά Διαφόρων Διατάξεων Κυψελών Καυσίμου Τηγμένων Ανθρακικών Αλάτων Ατμοσφαιρικής Πίεσεως Με Αεριοστρόβιλο
 - 2.3.1 Περιγραφή απλής διάταξης
 - 2.3.2 Διατάξεις των υβριδικών συστημάτων και ανάλυση αυτών
 - 2.3.3 Αποτελέσματα ανάλυσης
 - 2.3.4 Συμπεράσματα
- 2.4 Υβριδικά Συστήματα Βασιζόμενα στην Αύξηση της Πίεσης και την Ανάκτηση Θερμότητας μίας Υπάρχουσας Κυψέλης Καυσίμου Τηγμένων Ανθρακικών Αλάτων
 - 2.4.1 Σύστημα κυψέλης καυσίμου
 - 2.4.2 Αύξηση της πίεσης του συστήματος κυψέλης καυσίμου και ανάκτηση θερμότητας
 - 2.4.3 Η λειτουργία του υβριδικού συστήματος
 - 2.4.4 Συμπεράσματα

3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗΣ

- 3.1 Επιλογή Δομής Κατάλληλη για Εφαρμογή σε Πλοία
- 3.2 Αναμόρφωση του Μεθανίου
- 3.3 Ηλεκτρεγερτική Δύναμη, Τάση, και Ένταση Λειτουργίας της Κυψέλης Καυσίμου
- 3.4 Ισχύς και Βαθμός Απόδοσης της Κυψέλης Καυσίμου
- 3.5 Υπολογισμός Παροχών στα Σημεία του Υβριδικού Συστήματος
- 3.6 Θερμοδυναμική Ανάλυση του Υβριδικού Συστήματος

4 ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

- 4.1 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά για Δεδομένο Σύνολο Τιμών των Βασικών Παραμέτρων
 - 4.1.1 Συμπεριφορά της κυψέλης καυσίμου
 - 4.1.2 Χαρακτηριστικά του υβριδικού συστήματος
- 4.2 Διερεύνηση της Επίδρασης Ορισμένων Παραμέτρων στη Συμπεριφορά του Συστήματος
- 4.3 Σχόλια – Συμπεράσματα

5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

- 5.1 Γενικά Συμπεράσματα
- 5.2 Προτάσεις για Βελτίωση και Επέκταση της Εργασίας

Παράρτημα Α΄: Υπολογισμός Συνάρτησης Gibbs

Βιβλιογραφία

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΚΚ	Κυψέλη Καυσίμου
ΑΚΚ	Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου
ΚΚΠΜ	Κυψέλες Καυσίμου Πολυμερικής Μembrάνης
ΚΚΦΟ	Κυψέλες Καυσίμου Φωσφορικού Οξέως
ΚΚΤΑΑ	Κυψέλες Καυσίμου Τηγμένων Ανθρακικών Αλάτων
ΚΚΣΟ	Κυψέλες Καυσίμου Στερεού Οξειδίου
ΥΣ	Υβριδικά Συστήματα
Α/Σ	Αεριοστρόβιλος
ΘΕΣ	Θερμοκρασία Εισαγωγής Στροβίλου
ΘΕΚ	Θερμοκρασία Εισαγωγής Καθόδου
ΘΚ	Θάλαμος Καύσης
SHR	Sensible Heat Reformer - Αναμορφωτής
ECB	Exhaust Catalytic Burner - Καταλυτικός Καυστήρας Εξαγωγής
CCB	Cathode Catalytic Burner - Καταλυτικός Καυστήρας Καθόδου
HRU	Heat Recovery Unit - Μονάδα Ανάκτησης Θερμότητας

ΣΥΜΒΟΛΑ

S/C	λόγος ατμού προς άνθρακα
n	αριθμός γραμμομορίων [mol]
η	βαθμός απόδοσης
T	θερμοκρασία [K]
i	πυκνότητα ρεύματος [A/m ²]
R	γενική σταθερά αερίων [J/mol K]
n_e	αριθμός ηλεκτρονίων
F	σταθερά Faraday [C/mol]
U_f	συντελεστής χρησιμοποίησης καυσίμου
\dot{W}	ισχύς [kW]
P	πίεση [bar]
I	ένταση ηλεκτρικού ρεύματος [A]
A	εμβαδόν επιφάνειας [m ²]
r	αντίσταση [Ω m]
V	τάση [V]
$N_{\sigma T}$	αριθμός στηλών
$N_{k,\sigma T}$	αριθμός κυψελών καυσίμου ανά στήλη
E	αντιστρεπτή ηλεκτρεγερτική δύναμη [V]
ε	βαθμός εκμετάλλευσης
h	ειδική ενθαλπία [J/mol]
r_c	λόγος πίεσης
\dot{m}	παροχή μάζας [gr/s]
\dot{n}	γραμμομοριακή παροχή [mol/s]

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς υβριδικού συστήματος με κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων, κατάλληλου για εφαρμογή σε πλοία. Πιο συγκεκριμένα περιλαμβάνει μια βιβλιογραφική επισκόπηση, ανάλυση δομών, τεχνικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών συστημάτων με κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων που ήδη υπάρχουν ή έχουν μελετηθεί. Πραγματοποιείται αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της κάθε δομής, ώστε τελικά να γίνει μια επιλογή δομής που κρίνεται κατ' αρχήν κατάλληλη για εφαρμογή σε πλοία, ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης και μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας. Τελικά γίνεται εξαγωγή και παρουσίαση αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων σχετικών με τη συγκεκριμένη δομή και σύγκριση τεχνικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών.

Με τη συνεχή μείωση των ορυκτών αποθεμάτων και τη γενικότερη περιβαλλοντολογική ανησυχία τα τελευταία χρόνια, έχει προωθηθεί αρκετά η ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αποτελεί τον μεγαλύτερο και πρωταρχικό κλάδο κατανάλωσης ενέργειας. Για αυτόν τον λόγο έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αυτές παρουσιάζουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης και χαμηλή εκπομπή ρύπων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι κυψέλες καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών, καθώς υφίσταται η δυνατότητα συνδυασμού με άλλες συμβατικές μηχανές εσωτερικής (όπως για παράδειγμα έναν αεριοστρόβιλο) και εξωτερικής καύσεως (έναν ατμοστρόβιλο) για ακόμη μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Από τη στιγμή που λειτουργούν σε θερμοκρασίες που ανέρχονται στους 600-700°C, η υψηλή ενέργεια που περιέχουν τα καυσαέριά τους αποδεικνύεται πολύ χρήσιμη, ώστε να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα σε ένα υβριδικό σύστημα, ανεβάζοντας ακόμη περισσότερο τον βαθμό απόδοσης.

1. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

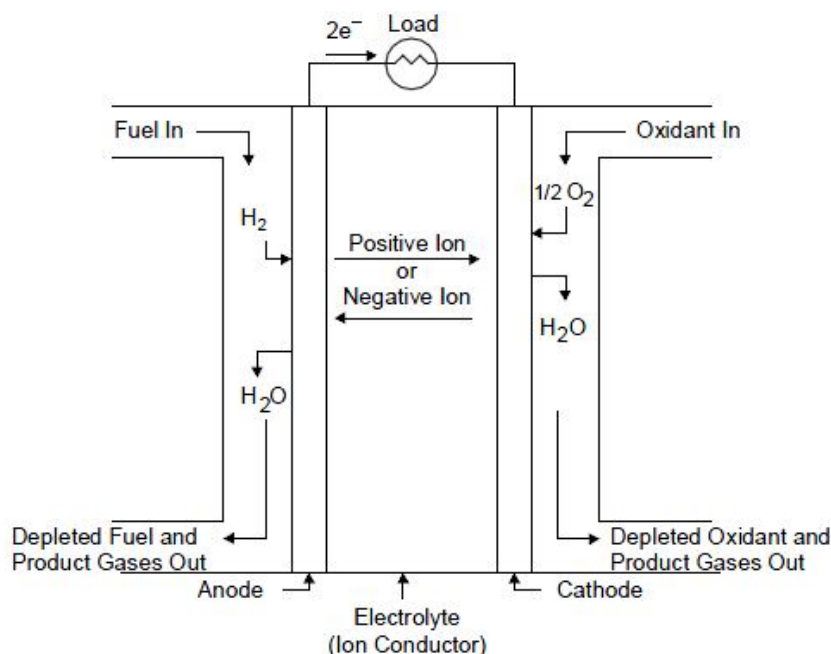
1.1 Αρχή Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου (ΚΚ) είναι μια συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια ενός καυσίμου σε ηλεκτρική μέσω μιας χημικής αντίδρασης με οξυγόνο ή κάποιον άλλο οξειδωτικό παράγοντα, χωρίς τη μεσολάβηση καύσης. Οι ΚΚ είναι κάτι τελείως διαφορετικό από τις μέχρι τώρα συμβατικές μηχανές παραγωγής μηχανικής ή ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε θερμική, κατόπιν σε μηχανική και τελικά σε ηλεκτρική.

Το υδρογόνο είναι το πιο κοινό καύσιμο που χρησιμοποιείται, αλλά επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν υδρογονάνθρακες, όπως το φυσικό αέριο, και αλκοόλες, όπως η μεθανόλη.

Η βασική αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου μπορούμε να πούμε ότι είναι το αντίθετο της ηλεκτρόλυσης. Ηλεκτρόλυση είναι η διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο, όταν μέσα σε αυτό ρέει ηλεκτρικό ρεύμα. Στις κυψέλες καυσίμου το υδρογόνο ενώνεται με το οξυγόνο παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα και θερμότητα.

Αν και υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου, όλοι αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια με επίστρωση καταλύτη, την άνοδο (αρνητική πλευρά) και την κάθοδο (θετική πλευρά), τα οποία ενώνονται μέσω εξωτερικού κυκλώματος, και έναν ηλεκτρολύτη ο οποίος επιτρέπει στα ιόντα να κινούνται μεταξύ των δύο πλευρών (Σχ. 1.1).



Σχ. 1.1 Αρχή λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου [Breeze (2005)].

Το υδρογόνο τροφοδοτείται στην άνοδο, όπου ιονίζεται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, δηλαδή παράγονται ιόντα H^+ (λέγονται και πρωτόνια) και ελευθερώνονται ηλεκτρόνια. Τα ιόντα H^+ μεταφέρονται στην κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη, ενώ τα ηλεκτρόνια κινούνται μέσα από το εξωτερικό κύκλωμα αναπτύσσοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Στην κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα H^+ και παράγεται νερό. Το φαινόμενο που παρατηρείται στην κάθοδο ονομάζεται αναγωγή του οξυγόνου.

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις οι οποίες συμβαίνουν είναι:



Το βασικό χαρακτηριστικό των ΚΚ, με βάση το οποίο γίνεται η κατάταξή τους, είναι ο χρησιμοποιούμενος ηλεκτρολύτης. Διακρίνονται οι ακόλουθοι τύποι:

- Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (ΑΚΚ)
- Κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (ΚΚΠΜ)
- Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως (ΚΚΦΟ)
- Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (ΚΚΤΑΑ)
- Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (ΚΚΣΟ).

Ορισμένα χαρακτηριστικά τους αναφέρονται στον Πίνακα 1.1.

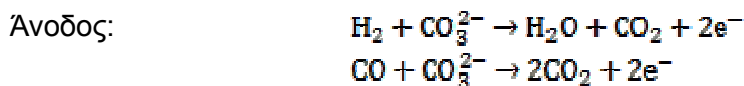
Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά Κυψελών Καυσίμου [Breeze (2005)].

Τύπος ΚΚ	Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	Καταλύτης	Βαθμός απόδοσης (%)
ΑΚΚ	150-200	Πλατίνα	70
ΚΚΠΜ	150-200	Πλατίνα	35-42
ΚΚΦΟ	80	Πλατίνα	42-60
ΚΚΤΑΑ	600-700	Δεν απαιτείται	50-60
ΚΚΣΟ	750-1000	Δεν απαιτείται	50-60

Στην επόμενη ενότητα δίνονται περισσότερα στοιχεία για τις ΚΚΤΑΑ, οι οποίες αποτελούν το αντικείμενο της εργασίας.

1.2 Κυψέλες Καυσίμου Τηγγένων Ανθρακικών Αλάτων

Οι ΚΚΤΑΑ χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη μίγμα ανθρακικών αλάτων, συνήθως ανθρακικού λιθίου Li_2CO_3 και ανθρακικού καλίου K_2CO_3 , τα οποία σε συνθήκες δωματίου είναι στερεά, ενώ στη θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης ($600\text{-}700^\circ\text{C}$) γίνονται υγρά. Ως καύσιμο χρησιμοποιείται αέριο μίγμα με κύρια συστατικά H_2 , CO και CO_2 , το οποίο μπορεί να προέρχεται από αναμόρφωση καυσίμου (συνήθως φυσικού αερίου) ακόμη και από αεριοποίηση άνθρακα. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις είναι οι εξής:



Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας έχει ορισμένες ευνοϊκές συνέπειες, όπως είναι οι ακόλουθες:

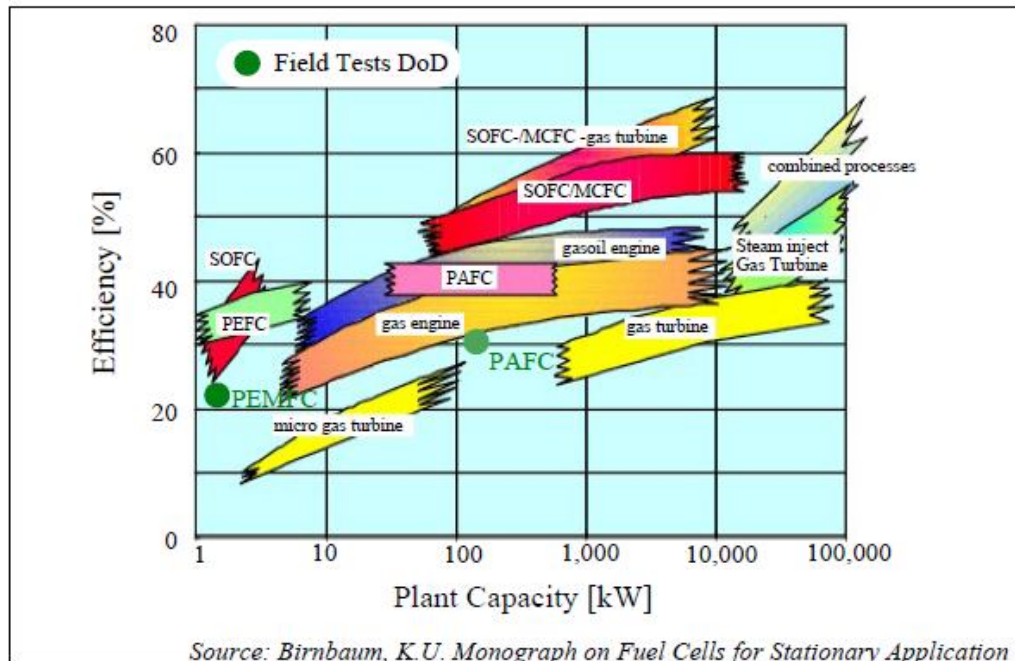
- Τα υλικά της ανόδου και της καθόδου έχουν επαρκείς καταλυτικές ιδιότητες και επομένως δεν απαιτούνται καταλύτες από πολύτιμα μέταλλα, όπως η πλατίνα.
- Είναι δυνατή η εσωτερική αναμόρφωση και, επομένως, η απευθείας χρήση ελαφρών υδρογονανθράκων (π.χ. μεθανίου, φυσικού αερίου).
- Παράγεται θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνον για την εξυπηρέτηση αναγκών θέρμανσης, αλλά και για την πρόσθετη παραγωγή ηλεκτρισμού με τη λειτουργία θερμοδυναμικού κύκλου βάσης.

1.3 Υβριδικά Συστήματα

Με τις ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις των σύγχρονων κοινωνιών, τη σταδιακή μείωση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων και τις περιβαλλοντικές εξελίξεις που σχετίζονται με τη ρύπανση και το φαινόμενο του θερμοκηπίου, έχει δοθεί μεγάλη προσοχή από την επιστημονική κοινότητα στην αύξηση του βαθμού απόδοσης και τη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων κατά τη μετατροπή ενέργειας. Μια πολλά υποσχόμενη ιδέα που βρίσκεται σε εξέλιξη και φαίνεται να επιτυγχάνει υψηλές επιδόσεις με ταυτόχρονη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων είναι τα υβριδικά συστήματα (ΥΣ) αεριοστρόβιλου (Α/Σ) σε συνδυασμό με κυψέλη καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών. Υψηλών θερμοκρασιών διότι, όπως προαναφέρθηκε, χάρη στις υψηλές θερμοκρασίες των αερίων που παράγονται, μπορούμε να έχουμε αξιοποίηση της θερμότητας αυτής.

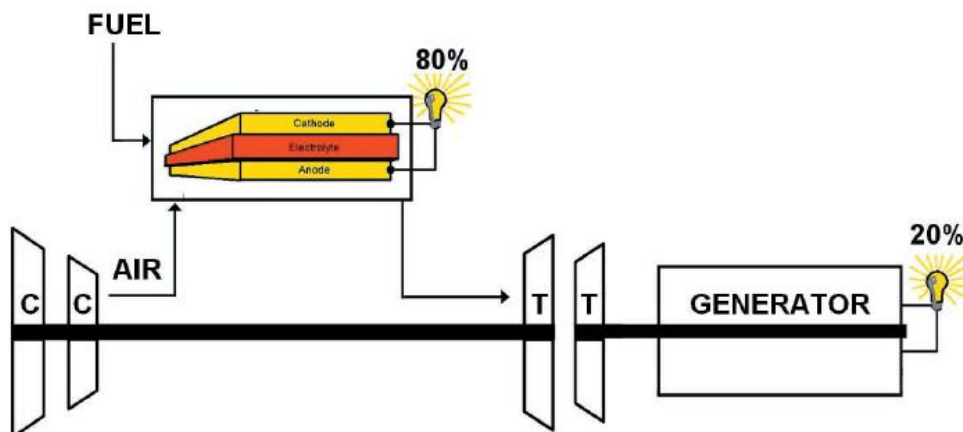
Αρκετοί πιθανοί συνδυασμοί με τους συμβατικούς κύκλους έχουν προταθεί και ερευνηθεί, χρησιμοποιώντας ως καύσιμο φυσικό αέριο, γαιάνθρακες, βιομάζα και άλλα ορυκτά καύσιμα. Τόσο οι θεωρητικές όσο και οι πρακτικές αναλύσεις τέτοιων ΥΣ έχουν δείξει ότι μπορεί να επιτευχθούν και υψηλές αποδόσεις, οι οποίες είναι συγκρίσιμες με εκείνες μεγάλων εγκαταστάσεων, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.2, και χαμηλές εκπομπές. Τα

συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ακόμη και σαν βοηθητική ισχύ ή ισχύ πρόωσης σε αεροσκάφη, διαστημόπλοια, δορυφόρους, πλοία και τρένα.



Σχ. 1.2 Σχέση μεταξύ ισχύος και απόδοσης διαφόρων διατάξεων.

Η σύλληψη της ιδέας των ΥΣ Α/Σ έγινε στα μέσα της δεκαετίας του 1970. Μέχρι το 1998 πάνω από 10 ιδέες ΥΣ έχουν επινοηθεί, με αλλαγές στον τύπο της ΚΚ, στη θέση των επιμέρους συστημάτων στην όλη διάταξη και στην πίεση λειτουργίας του συστήματος. Η βασική ιδέα φαίνεται στο Σχ. 1.3, όπου μια ΚΚ έχει αντικαταστήσει τον θάλαμο καύσης σε έναν τυπικό κύκλο Brayton (ο κύκλος του Α/Σ). Αυτό οδηγεί σε απευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το καύσιμο μέσω της ΚΚ (αντί της μετατροπής της χημικής σε θερμική ενέργεια σε έναν θάλαμο καύσης), με τα απαέρια της ΚΚ να χρησιμοποιούνται ώστε να παράγεται ισχύς για τη συμπίεση και επιπλέον ηλεκτρική ισχύς μέσω μιας στροβιλογεννήτριας. Αξίζει να σημειωθεί ότι περίπου το 80% της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από την ΚΚ ενώ το υπόλοιπο από τη στροβιλογεννήτρια.



Σχ. 1.3 Αρχή λειτουργίας Υβριδικού Συστήματος.

1.4 Κυψέλες Καυσίμου σε Θαλάσσιες Εφαρμογές

Τα τελευταία χρόνια έχει εμφανισθεί μια τάση προς τον σχεδιασμό και την εγκατάσταση ολοκληρωμένων ηλεκτρικών συστημάτων πρόωσης στα πλοία. Τα περισσότερα πλοία χρησιμοποιούν μηχανές Diesel για την πρόωση και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται προβλήματα που έχουν να κάνουν κυρίως με την προστασία του περιβάλλοντος. Για τις θαλάσσιες μεταφορές, υπολογίζεται ότι καταναλώνεται περίπου το 3% του παγκόσμιου ακάθαρτου πετρελαίου αλλά συνεισφέρουν στο 14% των εκπομπών NO_x και στο 16% των SO_x . Με την παρότρυνση εθνικών και παγκόσμιων επιτροπών, οι μεγαλύτερες ναυτιλιακές εταιρίες εξετάζουν τη χρήση ηλεκτρικών εγκαταστάσεων στα μελλοντικά πλοία. Οι απαιτήσεις αρχικά είναι χαμηλό κόστος ζωής, μείωση των επιβλαβών εκπομπών, χαμηλά επίπεδα κραδασμών και θορύβου. Οι ΚΚ προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των μηχανών Diesel, τα οποία περιλαμβάνουν υψηλή θερμική απόδοση, μια σταθερότητα απόδοσης συναρτήσεως του φορτίου, χαμηλότερα επίπεδα εκπομπών, κραδασμών και θορύβου, καθώς τα κινούμενα μηχανικά μέρη είναι ελάχιστα. Ωστόσο, προς το παρόν, το αρχικό κόστος των ΚΚ είναι σημαντικά υψηλότερο από αυτό των μηχανών Diesel. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η χαμηλή του μάζα σε σύγκριση με τους υπάρχοντες υδρογονάνθρακες μπορεί να αυξήσει το ωφέλιμο φορτίο του πλοίου, αλλά η χαμηλή ενέργεια που παράγεται ανά μονάδα όγκου μπορεί να είναι ανασταλτικός παράγοντας για τα πλοία, ιδιαίτερα δε για τα μεγαλύτερα, όπως τα υψηλής ταχύτητας με μεγάλες απαιτήσεις φορτίου. Δεδομένης της υπάρχουσας υποδομής στην τροφοδοσία των καυσίμων για θαλάσσιες μεταφορές και τους σχετικά υψηλούς περιορισμούς στα πλοία, ο συνδυασμός αναμόρφωσης καυσίμου και της τεχνολογίας των ΚΚ είναι μια ελκυστική επιλογή για τα συστήματα ισχύος των πλοίων.

Κάποια οφέλη των ΚΚ μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν και στο θαλάσσιο περιβάλλον. Το κυριότερο είναι η υψηλή απόδοση των ΚΚ από τη στιγμή που αυτό μπορεί να μεταφραστεί σε εξοικονόμηση καυσίμου. Η απόδοση της ΚΚ είναι σχετικά σταθερή σε ένα μεγάλο εύρος ισχύος, χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να είναι αρκετά αποτελεσματικό σε πλοία στα οποία η ισχύς μεταβάλλεται συχνά, όπως για παράδειγμα στα ρυμουλκά, στα

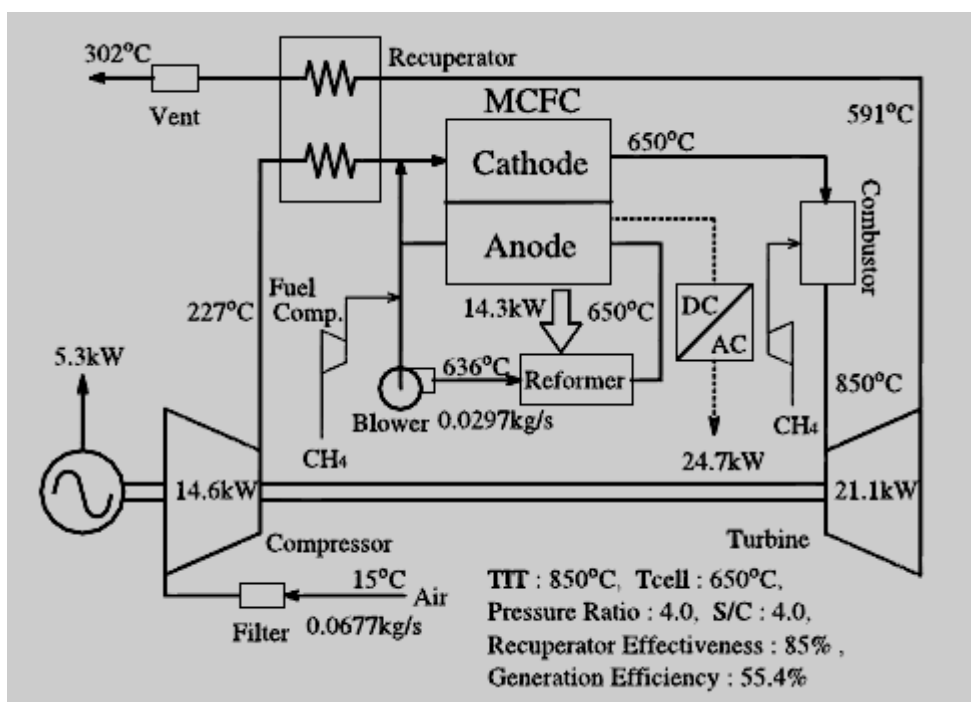
επιβατηγά-οχηματαγωγά ή στα παγοθραυστικά. επίσης, οι ΚΚ έχουν λίγα κινούμενα μέρη, πράγμα που σημαίνει λιγότερες απαιτήσεις επάνδρωσης αλλά και πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό για πλοία όπως τα πολεμικά, τα σεισμικά σκάφη καθώς και τα σκάφη αναψυχής.

Για ναυτικές εφαρμογές, οι ΚΚΤΑΑ φαίνονται πως είναι πολύ καλές “υποψήφιοι”. Οι ΚΚΤΑΑ έχουν αρκετά υψηλή απόδοση και χάρη στην υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας δεν απαιτούνται ευγενή μέταλλα σαν καταλύτες. Επίσης οι θερμοκρασίες λειτουργίας είναι ιδανικές ώστε η αναμόρφωση του καυσίμου να γίνει εσωτερικά στην ΚΚ στην περίπτωση που ως καύσιμο χρησιμοποιηθούν ελαφροί υδρογονάνθρακες, όπως π.χ. CH_4 . Κατά συνέπεια ένα μέρος από τη θερμότητα που παράγεται αξιοποιείται από την ίδια την ΚΚ, ενώ συνήθως εξακολουθεί να υπάρχει περίσσεια θερμότητας, χαμηλότερης θερμοκρασίας, που μπορεί να ανακτηθεί και χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη θερμικών αναγκών, μετατρέποντας έτσι το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής σε σύστημα συμπαραγωγής (ηλεκτρισμού και θερμότητας).

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

2.1 Υβριδικό Σύστημα Μικρο-στροβίλου και Κυψέλης Καυσίμου Τηγμένων Ανθρακικών Αλάτων

Η βασική διάταξη του συστήματος αποτελείται από έναν αναγεννητικό κύκλο αεριοστροβίλου και μία κυψέλη καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων, η οποία τοποθετείται μετά τον συμπιεστή. Στο Σχ. 2.1 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του ΥΣ.



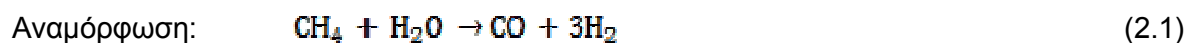
Σχ. 2.1 Σχηματική απεικόνιση του Υβριδικού Συστήματος [Kimijita and Kasagi (2005)].

2.1.1 Λειτουργία του συστήματος

Το σύστημα αυτό λειτουργεί χρησιμοποιώντας ως καύσιμο το μεθάνιο σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία και πίεση (15°C και 101.325 kPa). Ο συμπιεσμένος αέρας που εξέρχεται από τον συμπιεστή θερμαίνεται στον ανακομιστή θερμότητας (recuperator) χρησιμοποιώντας τα καυσαέρια του στροβίλου και ακολούθως εισέρχεται στην κάθοδο της ΚΚ. Στο συγκεκριμένο σύστημα λαμβάνεται υπόψη η διαδρομή της επανακυκλοφορίας, κατά την οποία απαέρια της ανόδου, τα οποία περιέχουν κατάλοιπα H₂, CO και CH₄, αναμιγνύονται με τον αέρα εισαγωγής της καθόδου. Μετά την έξοδό τους από την κάθοδο οξειδώνονται πλήρως στον καυστήρα που υπάρχει στην έξοδό της. Τα υψηλής θερμοκρασίας καυσαέρια από τον θάλαμο καύσης εκτονώνονται στον στρόβιλο, ο οποίος παράγει μηχανική ισχύ, και κατόπιν εισέρχονται στον ανακομιστή ώστε να θερμάνουν τον συμπιεσμένο αέρα του συμπιεστή, όπως προαναφέρθηκε. Όσον αφορά στην αναμόρφωση του καυσίμου, χρησιμοποιείται εσωτερική αναμόρφωση, ώστε ο

απαιτούμενος ατμός να παρέχεται μέσω της κυκλοφορίας των καυσαερίων της ανόδου. Γενικά, τα ιόντα του υδρογονάνθρακα διέρχονται μέσω του ηλεκτρολύτη της ΚΚΤΑΑ. Για να λειτουργήσει η ΚΚ θα πρέπει να παρέχεται στην κάθοδο CO_2 . Στο συγκεκριμένο σύστημα λαμβάνεται υπόψη η διαδρομή της επανακυκλοφορίας, κατά την οποία απαέρια της ανόδου αναμιγνύονται με τον αέρα εισαγωγής της καθόδου. Τα αριθμητικά δεδομένα στο Σχ. 2.1 δηλώνουν ένα τυπικό παράδειγμα λειτουργικών παραμέτρων του κύκλου, που βασίζεται σε καθορισμένες συνθήκες σχεδιασμού. Θεωρώντας ότι η ισχύς εξόδου είναι 30 kW, η απόδοση του συστήματος ανέρχεται περίπου στο 55%.

Οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στον αναμορφωτή είναι οι εξής:



Οι αντιδράσεις της αναμόρφωσης και της μετατροπής είναι ενδόθερμη και εξώθερμη, αντίστοιχα. Η συνεισφορά της αναμόρφωσης είναι μεγαλύτερη από αυτή της μετατροπής, άρα ολόκληρη η διαδικασία της αναμόρφωσης είναι ενδόθερμη.

Η επανακυκλοφορία των απαερίων της ανόδου παρέχει τον απαιτούμενο ατμό στη διαδικασία της αναμόρφωσης. Ο λόγος ατμού προς άνθρακα (S/C) ορίζεται από τη σχέση

$$S/C = n_{\text{an,H}_2\text{O}}/n_{\text{CH}_4} \quad \text{Εξ. (2.3)}$$

όπου $n_{\text{an,H}_2\text{O}}$ ο αριθμός γραμμομορίων του ατμού και n_{CH_4} ο αριθμός γραμμομορίων του μεθανίου.

Οι αντιδράσεις που συμβαίνουν στην ΚΚ είναι οι ακόλουθες:



2.1.2 Ανάλυση του συστήματος

Προκειμένου να εκτιμηθούν τα χαρακτηριστικά του συστήματος και να μελετηθεί η θεωρητική συμπεριφορά των ΥΣ, γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές, ώστε να απλοποιηθεί η ανάλυση του κύκλου:

- (1) Δεν υπάρχουν διαρροές των εργαζόμενων μέσω
- (2) Οι απώλειες θερμότητας είναι αμελητέες
- (3) Οι χημικές αντιδράσεις καταλήγουν σε καταστάσεις ισορροπίας
- (4) Οι θερμοκρασίες ανόδου, καθόδου και αναμορφωτή είναι όμοιες με τις θερμοκρασίες λειτουργίας της ΚΚ
- (5) Η άκαυστη καύσιμη ύλη που περιέχεται στα απαέρια της ανόδου όπως υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα και επιπλέον καύσιμο (μεθάνιο) αναμιγνύεται με τον αέρα εισαγωγής της καθόδου και εν συνεχεία οξειδώνονται στον καυστήρα.

Ως σταθερά δεδομένα θεωρούνται οι τιμές που δίνονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Σταθερά δεδομένα υπολογισμών [Kimijita and Kasagi (2005)].

Ισχύς (kW)	30
Βαθμός εκμετάλλευσης του ανακομιστή (%)	85
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή (%)	73
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου (%)	80
Μηχανικός βαθμός απόδοσης Α/Σ (%)	95
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ανεμιστήρα (%)	70
Μηχανικός βαθμός απόδοσης ανεμιστήρα (%)	90
Λόγος ατμού προς μεθάνιο (-)	3
Πυκνότητα ρεύματος (A/m ²)	1500
Συντελεστής χρησιμοποίησης H ₂ (%)	80
Πτώση πίεσης ΚΚΤΑΑ (%)	5
Πτώση πίεσης αναμορφωτή (%)	4
Πτώση πίεσης στο φίλτρο (%)	0.5
Πτώση πίεσης στην εξαγωγή (%)	0.5
Πτώση πίεσης στον ανακομιστή (πλευρά αέρα) (%)	3
Πτώση πίεσης στον ανακομιστή (πλευρά καυσαερίων) (%)	2
Ατμοσφαιρική θερμοκρασία (°C)	15
Βαθμός απόδοσης γεννήτριας (%)	98
Βαθμός απόδοσης ανορθωτή (%)	93

Βασιζόμενοι στα δεδομένα του Πίνακα 2.1 και σε ένα λόγο πίεσης 5.0, η ανάλυση του κύκλου εκτελείται σε ένα εύρος θερμοκρασιών της ΚΚ από 550°C έως 750°C με θερμοκρασία εισαγωγής 50°C και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχ. 2.2.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 2.2(a), απόδοση 55% επιτυγχάνεται με θερμοκρασία ΚΚ 650°C και θερμοκρασία εισαγωγής του στροβίλου (ΘΕΣ) 900°C. Στην περίπτωση που η θερμοκρασία στην ΚΚ είναι 700°C και η ΘΕΣ 950°C τότε η απόδοση ξεπερνά το 60%. Για σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας της ΚΚ, μείωση της ΘΕΣ προκαλεί μείωση στην απόδοση του συστήματος. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.2(b), υψηλή ΘΕΣ μειώνει την εισερχόμενη θερμότητα στην ΚΚ, πράγμα το οποίο 'μεταφράζεται' σε μείωση της παροχής του καυσίμου στην ΚΚ, άρα και αύξηση της παροχής του καυσίμου στον καυστήρα. Μείωση της κατανάλωσης καυσίμου στον καυστήρα και μείωση της ΘΕΣ επιφέρει θετικά αποτελέσματα στην απόδοση του συστήματος, Σχ. 2.2(a). Για σταθερή ΘΕΣ, υψηλότερη θερμοκρασία στην ΚΚ οδηγεί σε υψηλότερη απόδοση, καθώς η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας της ΚΚ έχει θετική επίδραση τόσο στη λειτουργία της ΚΚ όσο και στην εσωτερική αναμόρφωση. Η σωστή θερμοκρασία λειτουργίας της ΚΚ είναι ουσιαστικός παράγοντας, προκειμένου να αποφευχθούν άλλα προβλήματα, όπως για παράδειγμα οι διαρροές του ηλεκτρολύτη και η μείωση της διάρκειας ζωής που ενδεχομένως να συμβούν σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 700°C.

Στο Σχ. 2.2(c) φαίνεται ο λόγος της ισχύος της ΚΚ προς την ολική ισχύ του ΥΣ. Μια υψηλή αναλογία της ισχύος της ΚΚ βελτιώνει τη συμπεριφορά του συστήματος. Γύρω από

τα σημεία στα οποία οι τιμές της απόδοσης μεγιστοποιούνται σε κάθε θερμοκρασία της ΚΚ, το ποσοστό ισχύος της ΚΚ κυμαίνεται μεταξύ 80% και 85%.

Στο Σχ. 2.2(d) φαίνεται η θερμοκρασία του αέρα στην εισαγωγή της καθόδου. Στις ΚΚΤΑΑ ο εισερχόμενος αέρας θα πρέπει να θερμαίνεται σε θερμοκρασία υψηλότερη από το σημείο τήξης των ανθρακικών αλάτων, περίπου 490°C για $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{K}_2\text{CO}_3$. Στο συγκεκριμένο σύστημα η θερμοκρασία εισαγωγής της καθόδου είναι 550°C με θερμοκρασία κυψέλης 650°C, ως εκ τούτου θεωρείται ότι το σύστημα μπορεί να λειτουργεί χωρίς προβλήματα.

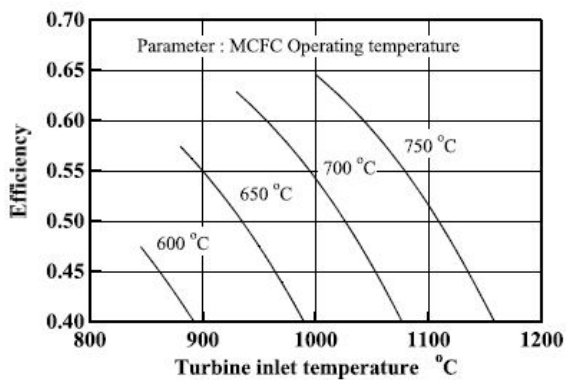
2.1.3 Βαθμός εκμετάλλευσης του ανακομιστή

Στο Σχ. 2.3 φαίνεται η σχέση μεταξύ της ΘΕΣ και της απόδοσης. Κάθε καμπύλη αντιπροσωπεύει και έναν διαφορετικό βαθμό εκμετάλλευσης του ανακομιστή από το 0.7 έως το 0.95 με βήμα 0.05. Στην ίδια ΘΕΣ, ένας υψηλός βαθμός εκμετάλλευσης μειώνει την απόδοση του ΥΣ. Αυξάνοντας τον βαθμό εκμετάλλευσης αυξάνεται και η θερμοκρασία εισαγωγής της καθόδου οπότε το εύρος θερμοκρασιών στην κυψέλη μειώνεται. Μια μείωση στη θερμότητα που ελευθερώνεται από την κυψέλη είναι απαραίτητη, προκειμένου η θερμοκρασία της να παραμείνει σταθερή, και η εισαγωγή του καυσίμου στην ΚΚ θα πρέπει να μειωθεί. Το απαιτούμενο καύσιμο στον καυστήρα αυξάνεται προκειμένου να οδηγήσει τα απαέρια της ΚΚ στην απαιτούμενη ΘΕΣ, οπότε η απόδοση μειώνεται. Ωστόσο αύξηση του βαθμού εκμετάλλευσης μειώνει την απαιτούμενη ΘΕΣ προκειμένου να διατηρηθεί η απόδοση του συστήματος πράγμα που συνεισφέρει στη θερμική ανθεκτικότητα των υλικών του στροβίλου.

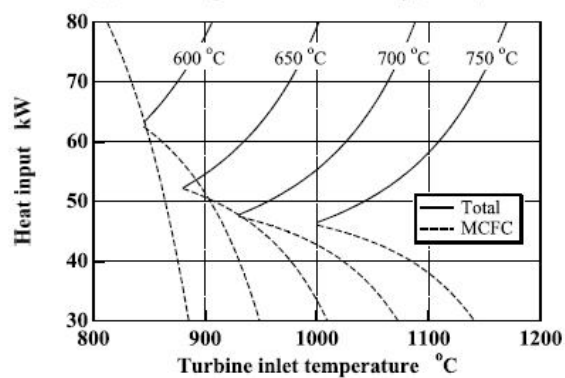
2.1.4 Λόγος ατμού/μεθανίου

Το Σχ. 2.4 δείχνει την επίδραση που έχει στον βαθμό απόδοσης και στην τάση ο λόγος S/C με τιμές από το 2.0 έως το 5.0 και βήμα 0.5, για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισαγωγής του στροβίλου. Φαίνεται ότι υψηλός λόγος S/C υποβαθμίζει τη λειτουργία του συστήματος. Υψηλός λόγος S/C επιταχύνει την αναμόρφωση του καυσίμου και η αναλογία των mol του μεθανίου στην εισαγωγή της ανόδου μειώνεται. Η μερική πίεση του υδρογόνου μειώνεται ταυτόχρονα αυξάνοντας την επανακυκλοφορία των καυσαερίων της ανόδου. Από εδώ και πέρα η τάση της ΚΚ μειώνεται όπως φαίνεται στο Σχ. 2.4(b).

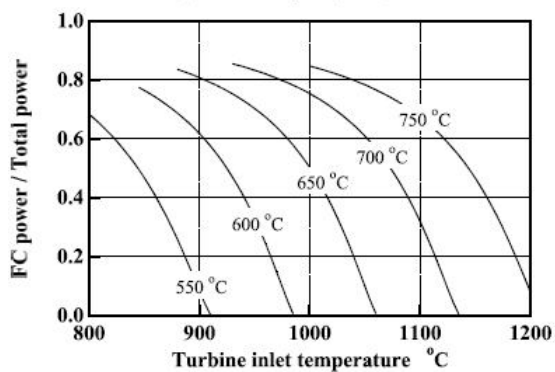
Ωστόσο, με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται και στην προηγούμενη παράγραφο υψηλός λόγος S/C μειώνει την απαιτούμενη ΘΕΣ για δεδομένη απόδοση, άρα μειώνεται και η θερμική καταπόνηση του στροβίλου. Πράγματι για υψηλό λόγο S/C, η οξειδωση του νικελίου, που είναι βασικό συστατικό των ηλεκτροδίων, γίνεται ένα σημαντικό θέμα. Επιπλέον η κατανάλωση ισχύος του ανεμιστήρα της ανόδου αυξάνεται μαζί με την αύξηση της παροχής. Με βάση λοιπόν τα ανωτέρω θα πρέπει να γίνει μια σωστή επιλογή της τιμής του λόγου αυτού στη σχεδίαση του συστήματος.



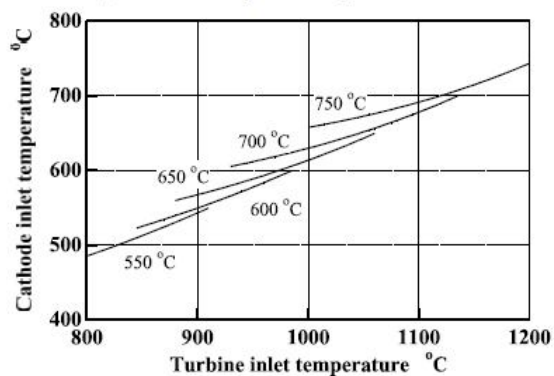
(a) Power generation efficiency (LHV)



(b) Heat input (LHV)

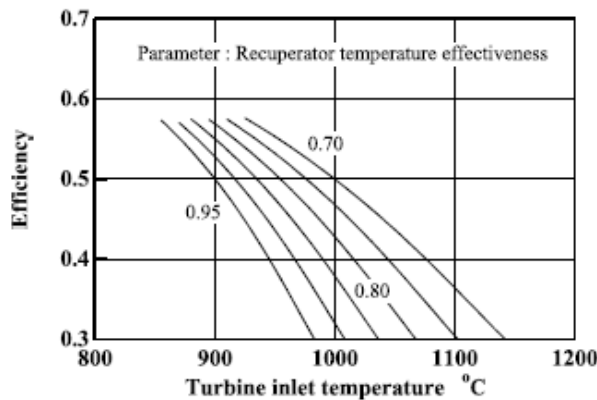


(c) Fractional power output of MCFC

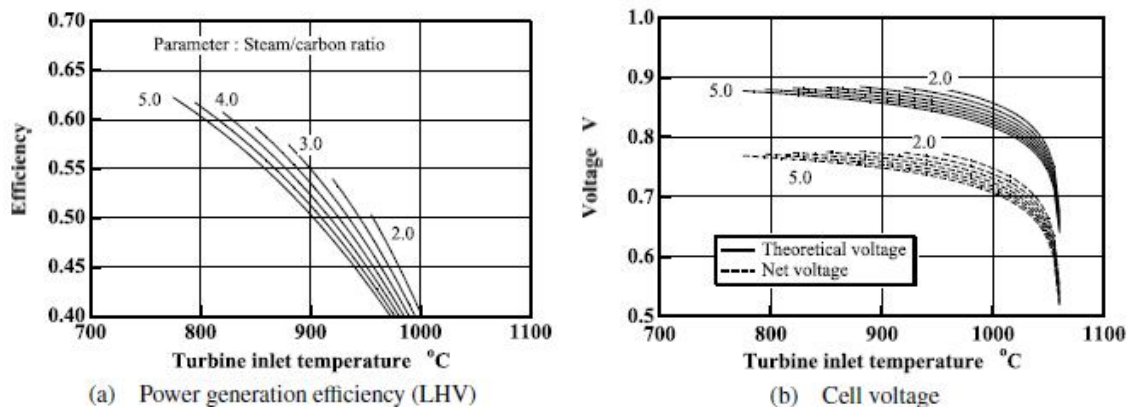


(d) Cathode inlet temperature

Σχ. 2.2 Επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας της ΚΚ και της ΘΕΣ στα χαρακτηριστικά του συστήματος [Kimijita and Kasagi (2005)].



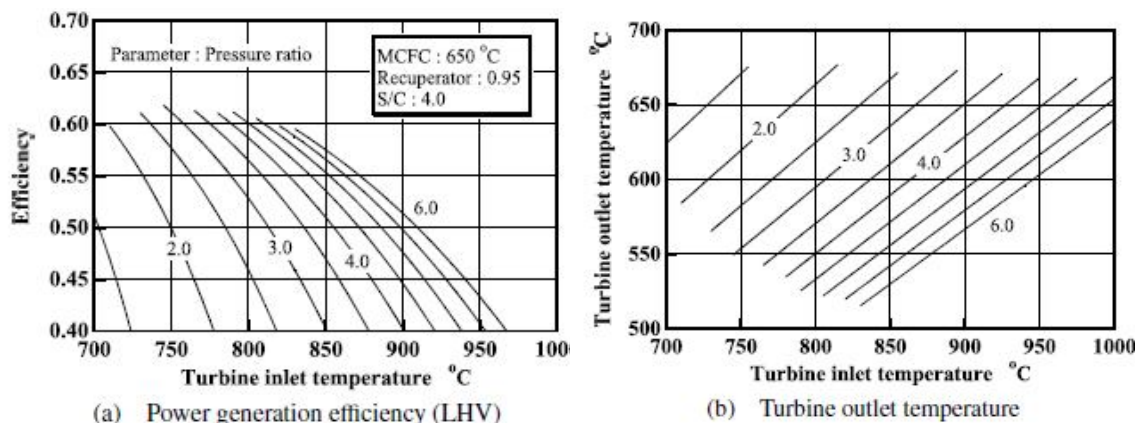
Σχ. 2.3 Επίδραση του βαθμού εκμετάλλευσης του ανακομιστή στον βαθμό απόδοσης [Kimijita and Kasagi (2005)].



Σχ. 2.4 Επίδραση του λόγου S/C [Kimijita and Kasagi (2005)].

2.1.5 Λόγος πίεσης

Στο Σχ. 2.5 φαίνεται η επίδραση του λόγου πίεσης σε εύρος από 2.0 έως 6.0 με προσαύξηση 0.5. Για τα αποτελέσματα αυτά, ο βαθμός εκμετάλλευσης θεωρήθηκε 0.95 και ο λόγος S/C θεωρήθηκε 4.0. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.5(a), ένας υψηλός λόγος πίεσης έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση του βαθμού απόδοσης για την ίδια ΘΕΣ. Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων του στροβίλου και η θερμοκρασία εισαγωγής του αέρα της καθόδου μειώνονται με την αύξηση του λόγου πίεσης. Η παροχή του καυσίμου στην κυψέλη και η ποσότητα των υπολοίπων συστατικών στα απαέρια της ανόδου αυξάνονται ταυτόχρονα. Με αυτόν τον τρόπο αύξηση του λόγου πίεσης προκαλεί αύξηση της ΘΕΣ. Ωστόσο, αύξηση του λόγου πίεσης αυξάνει την ταχύτητα του στροβίλου, οπότε αυξάνονται και οι απαιτήσεις σε μηχανική αντοχή των υλικών του. Κατά συνέπεια μια εκτεταμένη αύξηση του λόγου πίεσης δεν είναι επιθυμητή.

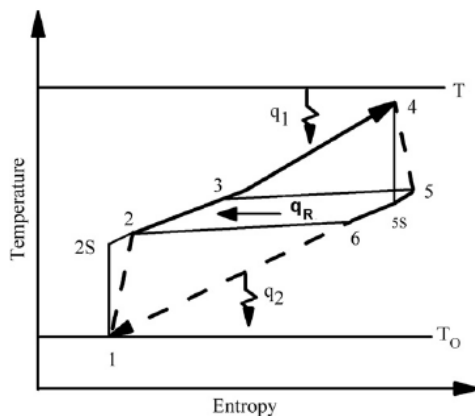


Σχ. 2.5 Επίδραση του λόγου πίεσης [Kimijita and Kasagi (2005)].

2.1.6 Συμπεράσματα

- 1) Υπό ορισμένες συνθήκες, το ΥΣ δύναται να έχει απόδοση και πάνω από 55% (LHV).
- 2) Βελτιώνοντας τον βαθμό εκμετάλλευσης του ανακομιστή και ταυτόχρονα μειώνοντας την ΤΙΤ, η απόδοση μπορεί να αυξηθεί και η θερμική καταπόνηση του στροβίλου να είναι σε κανονικά επίπεδα.
- 3) Προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση, η κατανάλωση καυσίμου στον καυστήρα μετά την ΚΚ, θα πρέπει να μειωθεί.
- 4) Ένας υψηλός λόγος S/C περιορίζει τη θερμική καταπόνηση του στροβίλου και βελτιώνει την συμπεριφορά του συστήματος.
- 5) Η απόδοση του συστήματος, το θερμοκρασιακό όριο και η ταχύτητα του στροβίλου είναι σημαντικά στον καθορισμό του λόγου πίεσης.

από την ΚΚ στον εργαζόμενο αέρα (HEX1) και από τον εργαζόμενο αέρα θερμοκρασίας T_6 προς το περιβάλλον θερμοκρασίας T_o .



Σχ. 2.7 Διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας κύκλου Brayton [Χιουqin et al. (2012)].

Οι δείκτες 1, 2, 3, 4, 5, 6 αντιστοιχούν στα σημεία του κύκλου του Σχ. 2.6. Στον κύκλο Brayton ορίζουμε τους ισεντροπικούς βαθμούς απόδοσης του συμπιεστή και του στροβίλου ως εξής:

$$\eta_C = \frac{T_{2s} - T_o}{T_2 - T_o} \quad (2.7)$$

και

$$\eta_T = \frac{T_4 - T_s}{T_4 - T_{5s}} \quad (2.8)$$

Επίσης κατά την ισοβαρή διαδικασία 2s-4 και 5-1 ισχύει η σχέση:

$$\frac{T_{2s}}{T_o} = \frac{T_4}{T_{5s}} r_p^{1-1/\gamma}, \quad (2.9)$$

όπου γ ο λόγος ειδικών θερμοχωρητικοτήτων c_p/c_v του εργαζόμενου μέσου και r_p ο λόγος πίεσης.

2.2.2 Γενικά χαρακτηριστικά και κριτήρια βελτιστοποίησης

Οι αριθμητικές παράμετροι, οι οποίες χρησιμοποιούνται προκειμένου να διεξαχθούν οι αριθμητικοί υπολογισμοί, φαίνονται στον Πίνακα 2.2.

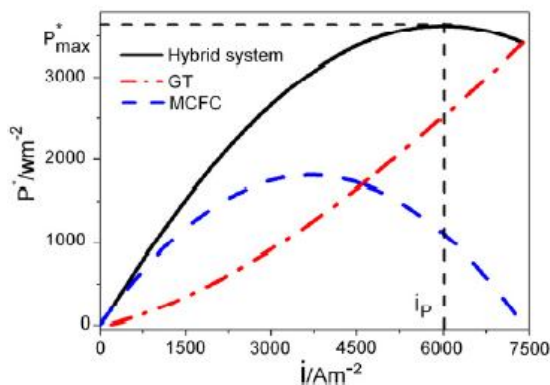
Στα Σχ. 2.8 και 2.9 απεικονίζονται οι καμπύλες της πυκνότητας ισχύος και της απόδοσης, αντίστοιχα, του ΥΣ συναρτήσει της πυκνότητας του ρεύματος της ΚΚ.

Όπως φαίνεται και στα σχήματα, η συμπεριφορά του ΥΣ είναι πολύ καλύτερη από ό,τι αυτή της ΚΚ και του Α/Σ ξεχωριστά. Η μέγιστη πυκνότητα ισχύος του ΥΣ είναι διπλάσια εκείνης της ΚΚ. Επίσης, φαίνεται ότι υπάρχει μέγιστη πυκνότητα ισχύος και απόδοση σε πυκνότητες ηλεκτρικού ρεύματος, i_p και i_η , αντίστοιχα. Όταν $i < i_p$ και η

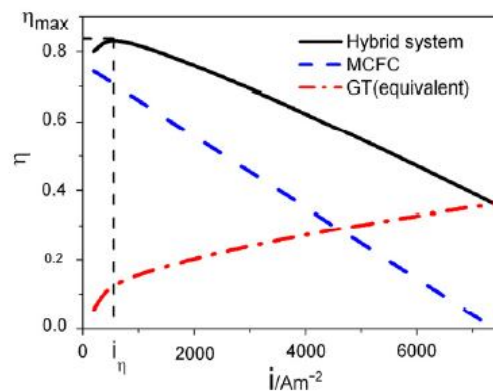
πυκνότητα ισχύος και η απόδοση μειώνεται καθώς μειώνεται το ρεύμα. Ενώ όταν $i > i_p$ τότε και τα δύο αυτά μεγέθη μειώνονται καθώς αυξάνεται το ρεύμα. Αυτό δείχνει ότι η βέλτιστη περιοχή λειτουργίας του συστήματος είναι όταν $i_\eta < i < i_p$. Όταν το σύστημα λειτουργεί στην περιοχή αυτή, η πυκνότητα ισχύος αυξάνεται, ενώ η απόδοση μειώνεται, και το αντίστροφο, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.10, όπου P_η^* είναι η πυκνότητα ισχύος σε μέγιστη απόδοση και η_p η απόδοση σε μέγιστη πυκνότητα ισχύος. Άρα η βέλτιστη περιοχή λειτουργίας για τις δύο αυτές παραμέτρους είναι όταν $P_{max}^* < P^* < P_\eta^*$ και $\eta_p < \eta < \eta_{max}$, αντίστοιχα. Κατά συνέπεια οι παράμετροι i_p , i_η , P_η^* , P_{max}^* , η_p , η_{max} είναι πολύ σημαντικές για το ΥΣ, καθώς καθορίζουν τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια των βέλτιστων τιμών της πυκνότητας του ρεύματος, της πυκνότητας ισχύος και της απόδοσης.

Πίνακας 2.2 Αριθμητικές παράμετροι της ΚΚΤΑΑ [Χιουqin et al. (2012)].

Παράμετρος	Τιμή
Σταθερά Faraday, F ($C \text{ mol}^{-1}$)	96485
Αριθμός ηλεκτρονίων, n_e	2
Γενική σταθερά αερίων, R ($J \text{ mol}^{-1} K^{-1}$)	8,314
Πίεση λειτουργίας, p (atm)	1
Μερική πίεση H_2 στην άνοδο (atm)	0.60
Μερική πίεση CO_2 στην άνοδο (atm)	0.15
Μερική πίεση H_2O στην άνοδο (atm)	0.25
Μερική πίεση O_2 στην κάθοδο (atm)	0.08
Μερική πίεση CO_2 στην κάθοδο (atm)	0.08



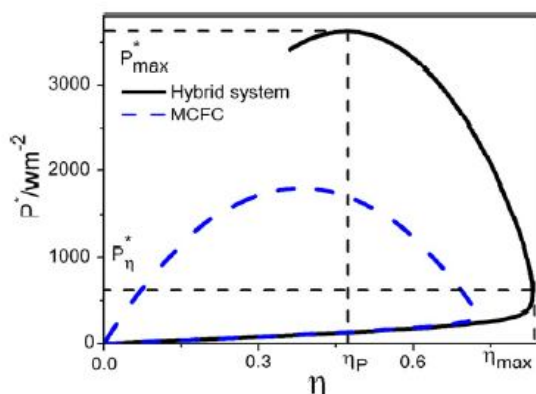
Σχ. 2.8 Καμπύλες πυκνότητας ισχύος συναρτήσει της πυκνότητας του ρεύματος για $\eta_C = \eta_T = 0.9$, $T=923 \text{ K}$, $T_0=300 \text{ K}$ [Χιουqin et al. (2012)].



Σχ. 2.9 Καμπύλες απόδοσης συναρτήσει της πυκνότητας του ρεύματος [Χιουqin et al. (2012)].

Στον Πίνακα 2.3 φαίνονται οι τιμές των λόγων πίεσης για μέγιστη απόδοση και μέγιστη πυκνότητα ισχύος σε διαφορετικές τιμές απόδοσης συμπιεστή και στροβίλου. Η

βέλτιστη περιοχή λειτουργίας του λόγου πίεσης του Α/Σ είναι μεταξύ των δύο αυτών τιμών.



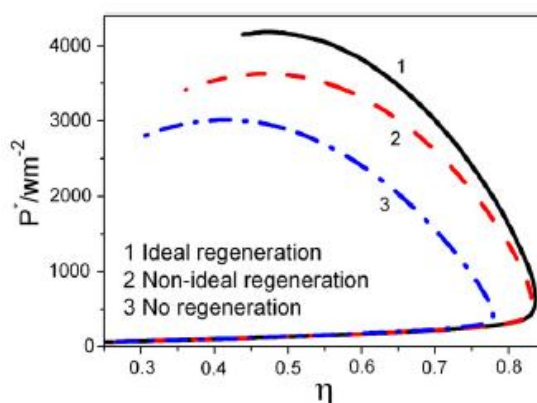
Σχ. 2.10 Καμπύλη πυκνότητας ισχύος συναρτήσει απόδοσης [Χιουqin et al. (2012)].

Πίνακας 2.3 Τιμές λόγου πίεσης σε μέγιστη απόδοση και πυκνότητα ισχύος [Χιουqin et al. (2012)].

$\eta_C = \eta_T$	$i_n (Am^{-2})$	$r_{p,max}$	$i_p (Am^{-2})$	$r_{p,max}$
0.95	600	1.51	6600	3.21
0.90	600	1.49	6000	2.90
0.85	400	1.37	5400	2.57

2.2.3 Επίδραση του ανακομιστή θερμότητας

Στο Σχ. 2.11 φαίνεται η επίδραση του ανακομιστή θερμότητας (HEX3) του Α/Σ στην πυκνότητα ισχύος και την απόδοση του ΥΣ. Η καμπύλη (1) απεικονίζει την περίπτωση όπου ο ανακομιστής θερμότητας είναι ιδανικός (δηλ. $T_5 = T_3$ και $T_2 = T_6$) ενώ στις καμπύλες (2) και (3) απεικονίζονται οι περιπτώσεις όπου ο αναγεννητικός κύκλος είναι πραγματικός και δεν υπάρχει, αντίστοιχα. Είναι εμφανές ότι η αναγεννητική διαδικασία στον Α/Σ επιδρά θετικά στην συμπεριφορά του συστήματος και προκαλεί αύξηση της πυκνότητας ισχύος και της απόδοσης κατά 17% και 6%, αντίστοιχα.



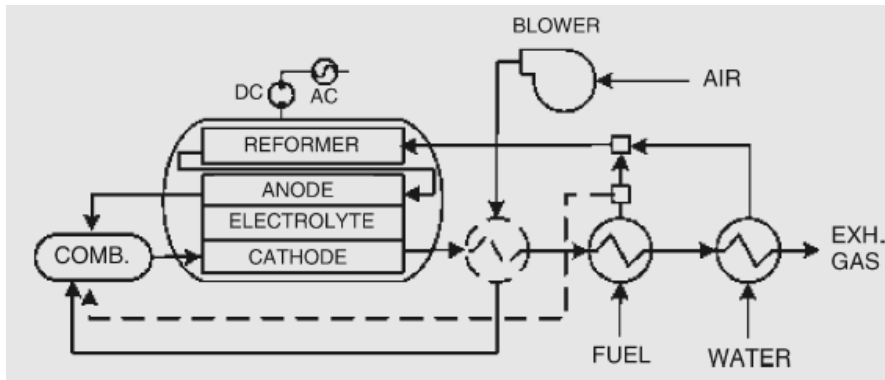
Σχ. 2.11 Καμπύλες πυκνότητας ισχύος συναρτήσει της απόδοσης υπό διαφορετικές αναγεννητικές διαδικασίες του Α/Σ [Χιουqin et al.(2012)].

2.3 Περιγραφή και Συμπεριφορά Διαφόρων Διατάξεων Κυψελών Καυσίμου Τηγμένων Ανθρακικών Αλάτων Ατμοσφαιρικής Πίεσεως με Αεριοστρόβιλο

Στην παρούσα ενότητα αναλύονται ΥΣ που αποτελούνται από μια ΚΚΤΑΑ ατμοσφαιρικής πίεσεως σε συνδυασμό με Α/Σ. Θα εξεταστούν διάφορες πιθανές διατάξεις με κύρια διαφορά μεταξύ τους τη μέθοδο θέρμανσης των αερίων εισαγωγής του στροβίλου.

2.3.1 Περιγραφή απλής διάταξης

Η βασική διάταξη της ΚΚ που χρησιμοποιείται απεικονίζεται στο Σχ. 2.12. Έχουμε εσωτερική αναμόρφωση που επιτρέπει καλύτερη συμπεριφορά του συστήματος από ό,τι αν είχε εξωτερική. Ο ατμός που απαιτείται για την αναμόρφωση παρέχεται εξωτερικά. Καύσιμο και νερό προθερμαίνονται στη μονάδα ανάκτησης θερμότητας και παρέχονται στον αναμορφωτή. Ένα μέρος του εισερχόμενου αέρα καίγεται με την περίσσεια του καυσίμου στην έξοδο της ανόδου. Ως καύσιμο χρησιμοποιείται το μεθάνιο και οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στον αναμορφωτή είναι όμοιες με τις Εξ. (2.1) και (2.2). Η ποσότητα του ατμού που παρέχεται καθορίζεται μέσω του λόγου S/C όπως και στην Εξ. (2.3). Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στην ΚΚ είναι όμοιες με τις Εξ. (2.4)-(2.6).



Σχ.2.12 Διάταξη της ΚΚΤΑΑ [Oh and Kim (2006)].

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης του καυσίμου καθορίζεται από τον λόγο μεταξύ αντιδρώντος και παρεχόμενου καυσίμου:

$$U_f = \frac{(n_{H_2} + n_{CO})_{reacted}}{(n_{H_2} + n_{CO})_{supplied}} \quad (2.10)$$

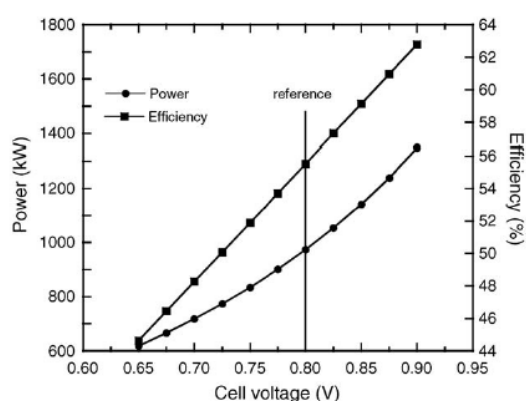
Η τελική ισχύς εναλλασσόμενου ρεύματος υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες μετατροπής του συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα:

$$W_{FC,AC} = W_{FC,DC} * \eta_{conv} \quad (2.11)$$

Από τις σημαντικότερες παραμέτρους που πρέπει να καθοριστούν είναι η τάση και η θερμοκρασία λειτουργίας της ΚΚ. Η τάση λειτουργίας των ΚΚΤΑΑ κυμαίνεται μεταξύ 0.7 και 0.85 V, ενώ η θερμοκρασία μεταξύ 600 και 700°C. Στον Πίνακα 2.4 φαίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές των παραμέτρων της ΚΚ.

Πίνακας 2.4 Παράμετροι αναφοράς της ΚΚ [Oh and Kim (2006)].

Θερμοκρασία Κυψέλης (°C)	650
Τάση Κυψέλης (V)	0.8
S/C	2.5
U_f	0.78
η_{conv}	0.96



Σχ. 2.13 Ισχύς και απόδοση της ΚΚ [Oh and Kim (2006)].

Στο Σχ. 2.13 απεικονίζεται η ισχύς και η απόδοση για διαφορετικές τάσεις κυψελών. Όλες οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές, ενώ η ροή του αέρα είναι 1.0 kg/s. Στο σημείο αναφοράς των 0.8 V η απόδοση είναι 55% ενώ η θερμοκρασία εισαγωγής της καθόδου υπολογίζεται στους 554°C, η οποία είναι 100°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία λειτουργίας της ΚΚ. Αν η θερμοκρασία αυτή φαίνεται αρκετά χαμηλή (κατά συνέπεια η διαφορά θερμοκρασιών εισαγωγής και εξαγωγής είναι υπερβολικά μεγάλη) από άποψη χημικής σταθερότητας και μηχανικής ακαμψίας, υπάρχουν πιθανότητες να αυξηθεί η θερμοκρασία εισαγωγής. Η πιο απλή μέθοδος για να αυξήσουμε την θερμοκρασία αυτή είναι να κάψουμε επιπλέον καύσιμο μπροστά στην ΚΚ ή εναλλακτικά να μειώσουμε τον λόγο αντίδρασης του καυσίμου, ώστε να αυξηθεί η άκαυστη ύλη που εισέρχεται στον θάλαμο καύσης (ΘΚ). Μια άλλη μέθοδος είναι να προσθέσουμε έναν ανακομιστή θερμότητας μεταξύ εξόδου της καθόδου και της εισαγωγής των αερίων. Οι αλλαγές αυτές – εκτός από την 2^η περίπτωση – φαίνονται με τις διακεκομμένες γραμμές στο Σχ. 2.13. Η επίδραση των τριών αυτών αλλαγών φαίνεται στον Πίνακα 2.5. Η απόδοση μεταβάλλεται με την εφαρμογή των διαφόρων μεθόδων. Στην περίπτωση παροχής επιπλέον καυσίμου

έχουμε τη χαμηλότερη απόδοση. Επίσης μείωση του συντελεστή χρησιμοποίησης του καυσίμου προκαλεί σημαντική μείωση στην απόδοση. Ωστόσο η διάταξη με εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιεί την ενέργεια των καυσαερίων έχει σχεδόν ίδια απόδοση με την αρχική διάταξη.

Πίνακας 2.5 Επίδραση αύξησης της θερμοκρασίας εισαγωγής της καθόδου στην συμπεριφορά της ΚΚΤΑΑ [K.S.Oh and T.S.Kim (2006)].

Μέθοδος	Θερμοκρασία εισαγωγής καθόδου (°C)	Απόδοση (%)	Ισχύς (kW)
Απλή διάταξη	554	55.52	955.5
Επιπλέον καύσιμο στον καυστήρα	600	39.26	476.7
Μείωση του συντελεστή χρησιμοποίησης του καυσίμου	600	49.27	730.4
Ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ εισαγωγής-εξαγωγής της καθόδου	600	55.02	624.4

2.3.2 Διατάξεις των υβριδικών συστημάτων και ανάλυση αυτών

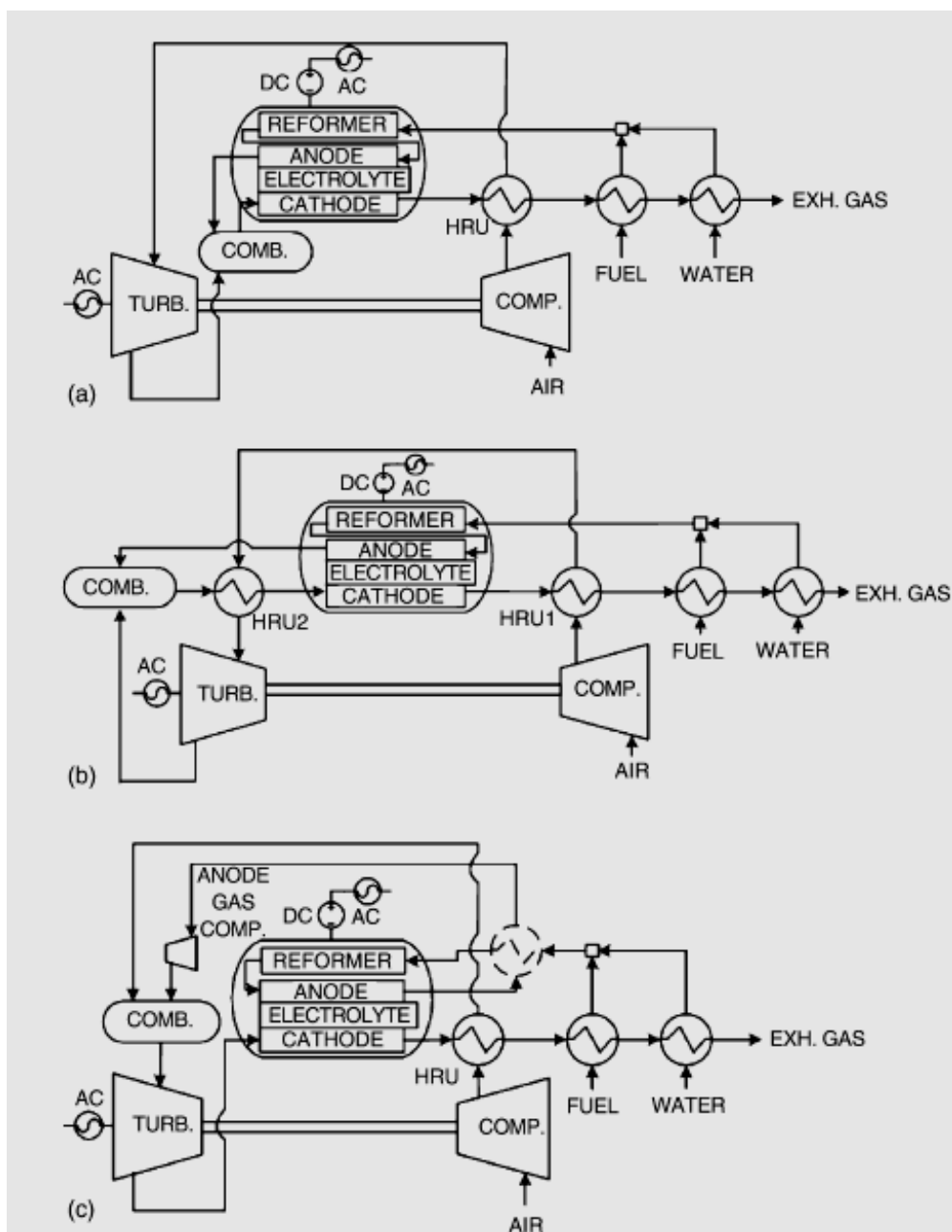
Οι διατάξεις των διαφόρων υβριδικών συστημάτων φαίνονται στο Σχ. 2.14. Σε όλες τις περιπτώσεις ο ατμοσφαιρικός αέρας πρώτα συμπιέζεται και ύστερα θερμαίνεται στην μονάδα ανάκτησης θερμότητας (Heat Recovery Unit). Το καύσιμο αντιδρά στην ΚΚ, ενώ το υπόλοιπο καύσιμο (άκαυστη ύλη) παρέχεται στον καυστήρα, η θέση του οποίου εξαρτάται από την εκάστοτε διάταξη.

Στη διάταξη Α ο θερμός αέρας εισέρχεται απευθείας στον στρόβιλο, μετά την έξοδο του οποίου έρχεται στον θάλαμο καύσης για την καύση του υπόλοιπου καυσίμου που δεν έχει αντιδράσει στην ΚΚ. Συνεπώς, ο καυστήρας βρίσκεται στην έξοδο του στροβίλου. Η διάταξη Β βασίζεται στην Α, ωστόσο το καυσαέριο από τον ΘΚ δεν εισέρχεται αμέσως στην κάθοδο αλλά θερμαίνει πρώτα τον εισερχόμενο στον στρόβιλο αέρα. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να ονομαστούν *έμμεσα* συστήματα καύσεως από την στιγμή που η υψηλή θερμοκρασία εισαγωγής του στροβίλου δεν πετυχαίνεται με καύση αλλά με θέρμανση.

Αντιθέτως ο συμπιεσμένος αέρας της διάταξης C έρχεται πρώτα στον ΘΚ, το καυσαέριο του οποίου εκτονώνεται στον στρόβιλο. Γι' αυτό το λόγο αυτό ονομάζεται *άμεσα* σύστημα καύσεως. Το καύσιμο για τον καυστήρα παρέχεται από την έξοδο της ανόδου. Ένας επιπλέον συμπιεστής, που ονομάζεται συμπιεστής ανόδου, απαιτείται για να αυξήσει την πίεση των αερίων στην έξοδο της ανόδου προς τον θάλαμο καύσης. Στη

βασική διάταξη (C1) μπορεί να υπάρχει πρακτική δυσκολία στην κατασκευή του συμπιεστή ανόδου για λειτουργία σε τόσο υψηλή θερμοκρασία, καθώς η θερμοκρασία εισόδου του συμπιεστή είναι αρκετά υψηλή (περίπου 650°C-η θερμοκρασία εξόδου της ΚΚ), άρα και η θερμοκρασία εξόδου θα είναι πολύ υψηλή ανάλογα με τον λόγο πίεσης. Προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα αυτό, τοποθετούμε έναν εναλλάκτη θερμότητας (διακεκομμένες γραμμές στο Σχ. 2.14(c)) ώστε να μειωθεί η θερμοκρασία των αερίων εξόδου της ανόδου χρησιμοποιώντας σαν ψυκτικό μέσο το μίγμα καυσίμου-ατμού.

Στον Πίνακα 2.6 φαίνονται οι κυριότερες παράμετροι για τον Α/Σ και τα άλλα στοιχεία του ΥΣ. Οι παράμετροι της ΚΚ είναι ίδιες με εκείνες του Πίνακα 2.4.



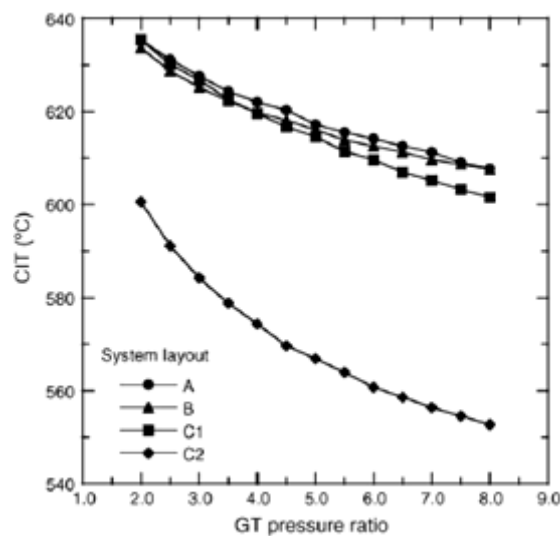
Σχ. 2.14 Διατάξεις ΥΣ (a) Διάταξη A, (b) Διάταξη B, (c) Διάταξη C1 και C2 (η C2 περιλαμβάνει τον εναλλάκτη που απεικονίζεται με διακεκομμένες γραμμές) [Oh and Kim (2006)].

Πίνακας 2.6 Παράμετροι αναφοράς για τον Α/Σ και άλλα στοιχεία του ΥΣ [Oh and Kim (2006)].

Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.90
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή	0.85
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή ανόδου	0.75
Βαθμός εκμετάλλευσης HRU (καυσίμου και νερού)	0.78
Βαθμός εκμετάλλευσης HRU (αέρα)	0.78
Βαθμός εκμετάλλευσης HRU2 (υψηλής θερμοκρασίας αέρα)	0.89

2.3.3 Αποτελέσματα ανάλυσης

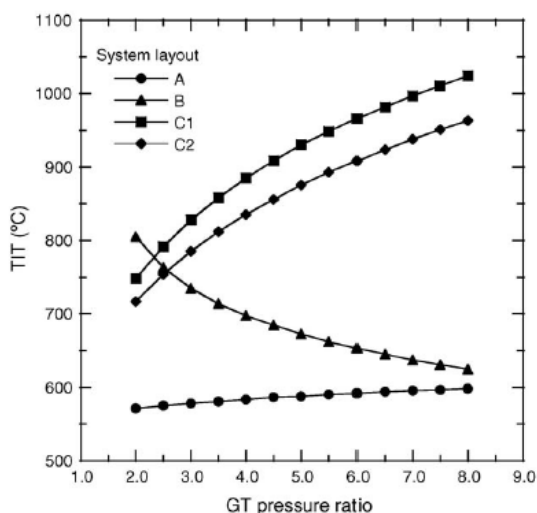
Στο Σχ. 2.15 φαίνονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας εισόδου στην κάθοδο (ΘΕΚ) συναρτήσει του λόγου πίεσης του στροβίλου. Όσο αυξάνεται ο λόγος πίεσης του στροβίλου τόσο μειώνεται η ΘΕΚ εξαιτίας της μεγαλύτερης θερμοκρασιακής πτώσης στον στρόβιλο που βρίσκεται πριν από την ΚΚ. Οι διατάξεις Α, Β και C1 έχουν περίπου ίδιες θερμοκρασίες ενώ η C2 έχει αρκετά χαμηλότερες. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με την απλή διάταξη της ΚΚ παρατηρούμε ότι η ΘΕΚ είναι πολύ υψηλότερη στα ΥΣ. Για λόγο πίεσης περίπου 8 η θερμοκρασία στις διατάξεις Α, Β, C1 είναι περίπου 600°C. Ακόμη και για τη διάταξη C2 η ΘΕΚ είναι υψηλότερη από αυτή της απλής ΚΚ (554°C) σε όλο το εύρος των λόγων πίεσεως που εξετάζουμε. Αυτό συμβαίνει διότι τα ΥΣ είναι εφοδιασμένα με εναλλάκτες θερμότητας, οπότε έχουμε ανάκτηση μεγάλου μέρους της θερμότητας των καυσαερίων.



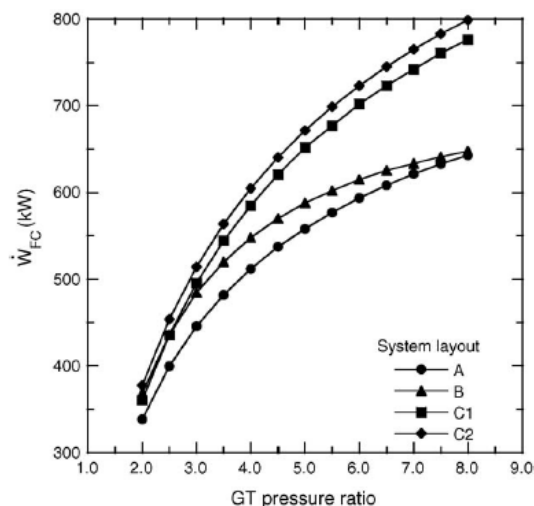
Σχ.2.15 Μεταβολή της θερμοκρασίας εισαγωγής της καθόδου συναρτήσει του λόγου πίεσης [Oh and Kim (2006)].

Μια άλλη σημαντική παράμετρος των ΥΣ είναι η θερμοκρασία εισαγωγής του στροβίλου, της οποίας οι μεταβολές φαίνονται στο Σχ. 2.16. Στις διατάξεις C1 και C2 όπως και στην A, αύξηση του λόγου πίεσης οδηγεί σε αύξηση της ΘΕΣ και αυτό γιατί η θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή επηρεάζει άμεσα τη θερμοκρασία εισαγωγής του στροβίλου. Κατά συνέπεια, μεγαλύτερος λόγος πίεσης οδηγεί σε υψηλότερη θερμοκρασία εξόδου από τον συμπιεστή, άρα και σε υψηλότερη θερμοκρασία εισαγωγής στον στρόβιλο. Στη διάταξη B, μεγαλύτερος λόγος εκτόνωσης στον στρόβιλο προκαλεί χαμηλότερη θερμοκρασία εισαγωγής στον εναλλάκτη θερμότητας (HRU2), άρα και χαμηλότερη θερμοκρασία εισαγωγής του στροβίλου, καθώς τα αέρια αυτά θερμαίνονται από τον συγκεκριμένο εναλλάκτη. Από όλες τις διατάξεις η A είναι αυτή που έχει τη χαμηλότερη ΘΕΣ από την στιγμή που υπάρχει μόνο ένας εναλλάκτης (HRU) πριν τον στρόβιλο. Η C2 παρουσιάζει μια ελαφρά μείωση της ΘΕΣ συγκριτικά με την C1 εξαιτίας της χαμηλότερης θερμοκρασίας εξόδου του βοηθητικού συμπιεστή που μεταφέρει την άκαυστη ύλη από την έξοδο της ΚΚ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας εισαγωγής της καθόδου, όπως φαίνεται άλλωστε και στο Σχ. 2.15.

Οι ισχύες των ΚΚ φαίνονται στο Σχ. 2.17. Σε όλες τις διατάξεις αυξάνοντας τον λόγο πίεσης έχουμε αύξηση στη διαφορά θερμοκρασίας στην ΚΚ (χαμηλότερη θερμοκρασία εισαγωγής). Αυτό με τη σειρά του απαιτεί μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου, οπότε έχουμε και μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος. Τα συστήματα C1 και C2 παρατηρούμε ότι έχουν μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος. Αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με αυτά του Σχ. 2.13 παρατηρούμε ότι η ισχύς των ΚΚ των ΥΣ είναι μικρότερη από αυτή της απλής διάταξης στην ίδια τάση λειτουργίας (σημείο αναφοράς του Σχ.2.13) και για την ίδια ροή αέρα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μικρότερης θερμοκρασιακής διαφοράς στην ΚΚ (υψηλότερη θερμοκρασία εισαγωγής στην κάθοδο) όπως φαίνεται στο Σχ. 2.15.

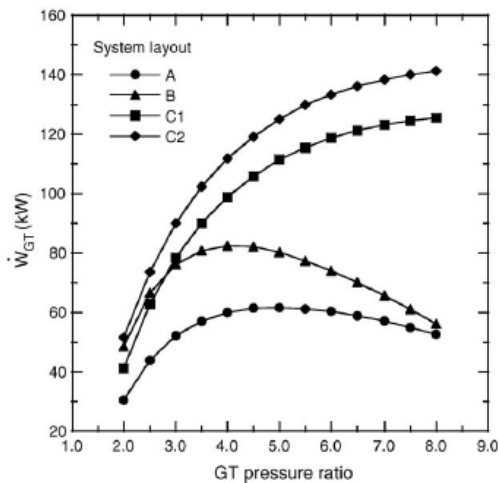


Σχ. 2.16 Μεταβολή της θερμοκρασίας εισαγωγής του στροβίλου συναρτήσει του λόγου πίεσης [Oh and Kim (2006)].

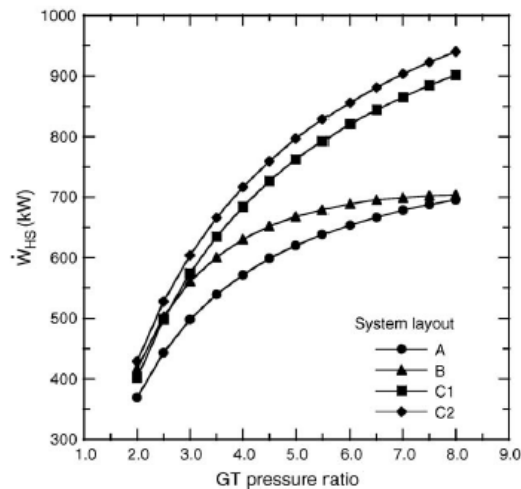


Σχ.2. 17 Μεταβολή της ισχύος των ΚΚ συναρτήσει του λόγου πίεσης [Oh and Kim (2006)].

Η ισχύς του στροβίλου απεικονίζεται στο Σχ. 2.18. Τα συστήματα C1 και C2 είναι ικανά να παράγουν υψηλή ισχύ, εκτός από την περίπτωση του πολύ χαμηλού λόγου πίεσης. Η υψηλότερη θερμοκρασία εισαγωγής στον στρόβιλο στο Σχ. 2.16 εξηγεί το αποτέλεσμα αυτό. Η χαμηλότερη TIT στη διάταξη A οδηγεί σε χαμηλότερη ισχύ του στροβίλου. Στη διάταξη A όπως και στη B έχουμε τη μέγιστη ισχύ στροβίλου σε λόγο πίεσης πολύ χαμηλότερο από τα C1 και C2, από τη στιγμή που η ΘΕΣ παραμένει σχεδόν σταθερή (A) ή μειώνεται με τον λόγο πίεσης (B). Από την άλλη πλευρά στις άλλες δύο διατάξεις αυξάνεται από τη στιγμή που έχουμε σταθερή αύξηση της ΘΕΣ. Η ισχύς της C2 είναι μεγαλύτερη, παρόλο που έχει μικρότερες ΘΕΣ από την C1. Αυτό συμβαίνει διότι η ψύξη των αερίων στην εισαγωγή του συμπιεστή της ανόδου μειώνει την απαιτούμενη ισχύ του συμπιεστή.



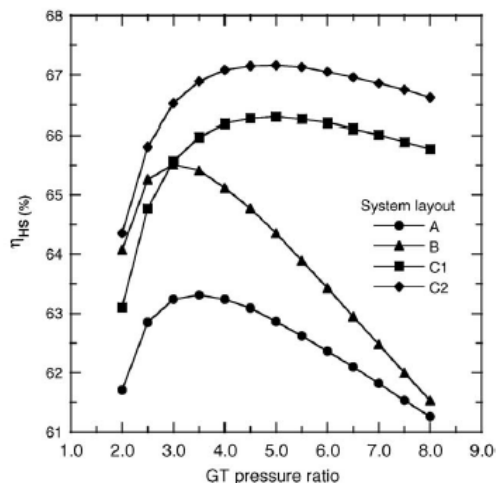
Σχ. 2.18 Μεταβολή της ισχύος του στροβίλου συναρτήσει του λόγου πίεσης [Oh and Kim (2006)].



Σχ. 2.19 Μεταβολή της ισχύος των ΥΣ συναρτήσει του λόγου πίεσης [Oh and Kim (2006)].

Στο Σχ. 2.19 φαίνεται η ισχύς που παράγουν τα ΥΣ. Εφόσον η ισχύς της ΚΚ είναι σημαντικά υψηλότερη από την ισχύ του στροβίλου (Σχ. 2.17 και 2.18), η ολική ισχύς μεταβάλλεται με τρόπο όμοιο εκείνου της ΚΚ.

Στο Σχ. 2.20 φαίνεται η απόδοση των ΥΣ. Σε όλες τις διατάξεις, η παροχή του καυσίμου αυξάνεται με την αύξηση του λόγου πίεσης, κατά συνέπεια αυξάνεται και η ισχύς της ΚΚ άρα και η ολική ισχύς. Ωστόσο ο ρυθμός αύξησης της ισχύος συνεχίζει να μειώνεται με τον λόγο πίεσης εξαιτίας της συμπεριφοράς του στροβίλου (Σχ. 2.18). Η απόδοση των Υ.Σ. μειώνεται πέρα από κάποιο λόγο πίεσης. Η βέλτιστη απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 63 και 67%, κάτι που εξαρτάται βέβαια και από το σύστημα. Η μικρότερη ισχύς των συστημάτων A και B έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερο βέλτιστο λόγο πίεσης (περίπου 3 και 3.5 για τα A και B, αντίστοιχα). Η σταθερή αύξηση της ισχύος του στροβίλου στα άλλα δύο συστήματα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του βέλτιστου λόγου πίεσης σε μεγαλύτερη τιμή (περίπου 5) άρα και σε μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης.

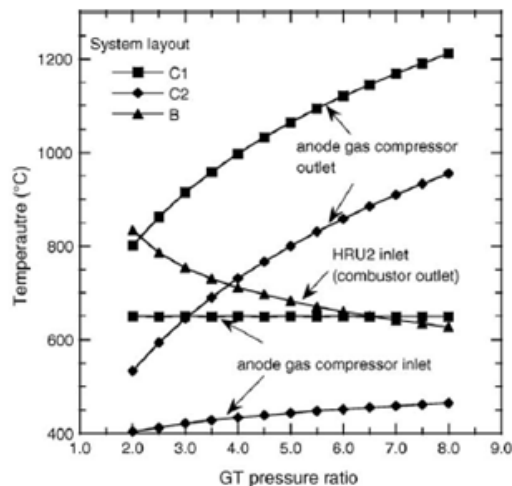


Σχ. 2.20 Απόδοση των ΥΣ [Oh and Kim (2006)].

Εκτός από την υψηλή απόδοση, τα άμεσα συστήματα (C1 και C2) έχουν επιπλέον πλεονεκτήματα. Η απόδοσή τους για ένα μεγάλο εύρος λόγων πίεσεως είναι περίπου σταθερή. Κατά συνέπεια ο λόγος πίεσης λειτουργίας μπορεί να επιλεγεί να είναι μεγαλύτερος από τον βέλτιστο οπότε θα έχουμε πολύ μεγαλύτερη ισχύ. Για παράδειγμα 40% μεγαλύτερη ισχύς μπορεί να επιτευχθεί με λόγο πίεσης 7 αντί για 3.5, ενώ η απόδοση μειώνεται μόνο κατά 0.5%. Δεύτερον, τα συστήματα αυτά είναι πρακτικά πιο εύκολα να κατασκευαστούν. Μέχρι τώρα οι μελετητές στοχεύουν στην ανάπτυξη μικρών ΥΣ (200 – 300 KW), υιοθετώντας μικρο-Α/Σ των 10 KW, οι οποίοι έχουν ΘΕΣ σχεδιασμού 850 - 900°C., η οποία δεν καθιστά αναγκαία την ψύξη του στροβίλου. Η διάταξη B δεν μπορεί να συνεργαστεί με έναν τέτοιο μικρο-Α/Σ από τη στιγμή που απαιτεί χαμηλότερη ΘΕΣ (λιγότερο από 750°C σε λόγο πίεσης 3). Από την άλλη πλευρά, τα άμεσα συστήματα μπορούν να δεχθούν την ΘΕΣ των μικρο-Α/Σ. Επιπλέον η διάταξη B δεν είναι κατάλληλη για μεγαλύτερα ΥΣ. Βασικός στόχος είναι η κατασκευή ΥΣ μερικών δεκάδων MW ή και μεγαλύτερων. Τότε και το μέγεθος του Α/Σ θα πρέπει να είναι της τάξεως μερικών MW. Σε τέτοιους μεγάλους Α/Σ, η θερμοκρασία εισαγωγής του στροβίλου και ο λόγος πίεσεως είναι πολύ μεγαλύτερα από αυτά των μικρο-Α/Σ.

Επιπλέον της ΤΙΤ θα αναφερθούν και άλλες σημαντικές θερμοκρασίες, ώστε να ελέγξουμε αν υπάρχουν πρακτικές δυσκολίες. Στη διάταξη B η υψηλότερη θερμοκρασία παρουσιάζεται στην έξοδο του καυστήρα. Από τη στιγμή που το αέριο από τον καυστήρα εισάγεται στον εναλλάκτη (HRU2), η θερμοκρασία του επηρεάζει τον σχεδιασμό του εναλλάκτη, ιδιαίτερα δε το υλικό κατασκευής του. Στα άμεσα συστήματα C1 και C2, ο σχεδιασμός του συμπιεστή της ανόδου παίζει σημαντικό ρόλο από τη στιγμή που η θερμοκρασία εξόδου μπορεί να είναι πολύ υψηλή. Στο Σχ 2.21 απεικονίζεται η εξάρτηση αυτών των παραμέτρων (θερμοκρασία εξόδου του καυστήρα για τη B, και θερμοκρασία εισόδου και εξόδου για την άνοδο των C1 και C2) σε συνάρτηση με τον λόγο πίεσης. Στη διάταξη B η θερμοκρασία εισαγωγής του HRU2 κυμαίνεται μεταξύ 600-800°C, ενώ στο βέλτιστο σημείο σχεδιασμού (για λόγο πίεσης 3 όπου έχει την μέγιστη απόδοση) η θερμοκρασία είναι 750°C. Αυτή η θερμοκρασία ξεπερνά την επιτρεπόμενη θερμοκρασία σχεδιασμού ενός κοινού εναλλάκτη κατασκευασμένου από χάλυβα. Μόνον ένα κράμα

υψηλών θερμοκρασιών μπορεί να ανθέξει τέτοιες θερμοκρασίες. Στη διάταξη C1 η θερμοκρασία εξόδου της ανόδου είναι πολύ υψηλή, για λόγο πίεσης 5 φτάνει τους 1000°C , η οποία φαίνεται ότι είναι πολύ υψηλή για τους απλούς στροβίλους χωρίς ψύξη, που κατασκευάζονται για θερμοκρασίες μικρότερες των 950°C . Για τον λόγο αυτόν, είναι πιο πρακτικό να κατασκευαστεί ένα σύστημα με χαμηλότερη θερμοκρασία εισόδου στον συμπιεστή, πράγμα που γίνεται στη διάταξη C2, όπου τα αέρια της ανόδου ψύχονται πριν από την είσοδό τους στον συμπιεστή, όπως προαναφέρθηκε. Η ψύξη επιτρέπει στη θερμοκρασία εισαγωγής να παραμείνει στους 400°C , οπότε και η θερμοκρασία εξαγωγής είναι πολύ μικρότερη από αυτή της C1. Για βέλτιστο λόγο πίεσης 5.0, η θερμοκρασία εξόδου παραμένει περίπου 800°C . Η θερμοκρασία αυτή δεν ξεπερνά τους 900°C ακόμη και για υψηλότερο λόγο πίεσης 7.0. Συμπερασματικά, οι διατάξεις B και C2 απαιτούν έναν εναλλάκτη υψηλής θερμοκρασίας και έναν συμπιεστή που να λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες, αντίστοιχα, εξαρτήματα τα οποία θα πρέπει να κατασκευαστούν από κράματα υψηλών θερμοκρασιών.



Σχ. 2.21 Μεταβολές σημαντικών θερμοκρασιών για τις διατάξεις B και C [Oh and Kim (2006)].

2.3.4 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της προηγούμενης ανάλυσης συνοψίζονται ως εξής:

- Στα ΥΣ έχουμε υψηλότερη θερμοκρασία εισαγωγής στην κάθοδο, κατά συνέπεια μικρότερη ισχύ στην ΚΚ από ό,τι στην απλή διάταξη. Αυξάνοντας τον λόγο πίεσης μειώνεται η θερμοκρασία εισαγωγής της καθόδου, αυξάνοντας έτσι την ισχύ της ΚΚ.
- Η θερμοκρασία εισαγωγής του στροβίλου στα άμεσα συστήματα καύσεως αυξάνεται όσο αυξάνεται και ο λόγος πίεσης, ενώ στα έμμεσα είναι σχεδόν σταθερή ή μειώνεται. Η σχετικά υψηλότερη ΘΕΣ στα πρώτα έχει σαν αποτέλεσμα την υψηλότερη ισχύ του στροβίλου, που συμβάλλει στην αύξηση της ισχύος του συστήματος.
- Ο βέλτιστος λόγος πίεσης στα άμεσα συστήματα καύσεως είναι υψηλότερος (μεγαλύτερος του 5) από ό,τι στα έμμεσα (περίπου 3). Τα ΥΣ έχουν 8-12% υψηλότερο βαθμό απόδοσης από ό,τι η ΚΚ μόνη της. Από τα ΥΣ τα άμεσα έχουν υψηλότερη

απόδοση από τα έμμεσα. Επιπλέον η απόδοση των πρώτων είναι σχετικά ανεξάρτητη από τον λόγο πίεσης, οπότε ο σχεδιαστής έχει την ευχέρεια να επιλέξει τον λόγο πίεσης σχεδιασμού του Α/Σ.

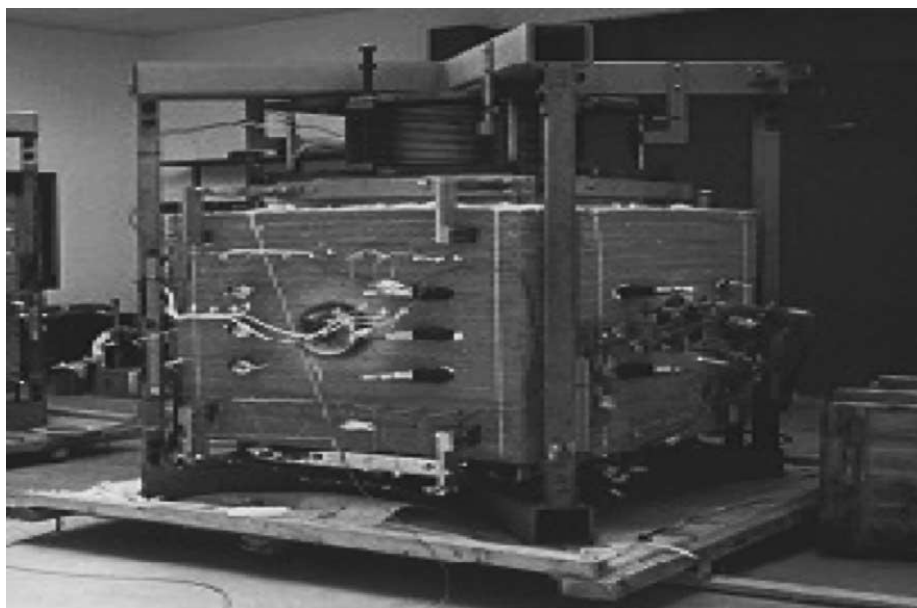
- Τα άμεσα συστήματα μπορούν πιο εύκολα να συνεργαστούν με τους εξελιγμένους Α/Σ από τη στιγμή που αυτά βελτιστοποιούνται σε υψηλότερη θερμοκρασία και λόγο πίεσης από ό,τι τα έμμεσα.

2.4 Υβριδικά Συστήματα βασιζόμενα στην Αύξηση της Πίεσης και την Ανάκτηση Θερμότητας μιας Υπάρχουσας Κυψέλης Καυσίμου Τηγμένων Ανθρακικών Αλάτων

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει ανάλυση των διαφόρων τεχνικών αύξησης της πίεσης και ανάκτησης θερμότητας για μια υπάρχουσα ΚΚΤΑΑ ισχύος 100 kW, πάνω στην οποία εφαρμόζονται και αναλύονται ηλεκτρικά κινούμενοι συμπιεστές στην άνοδο και την κάθοδο, στροβιλοσυμπιεστής, απλός κύκλος Α/Σ και αναγεννητικός κύκλος Α/Σ [Grillo et al. (2003)].

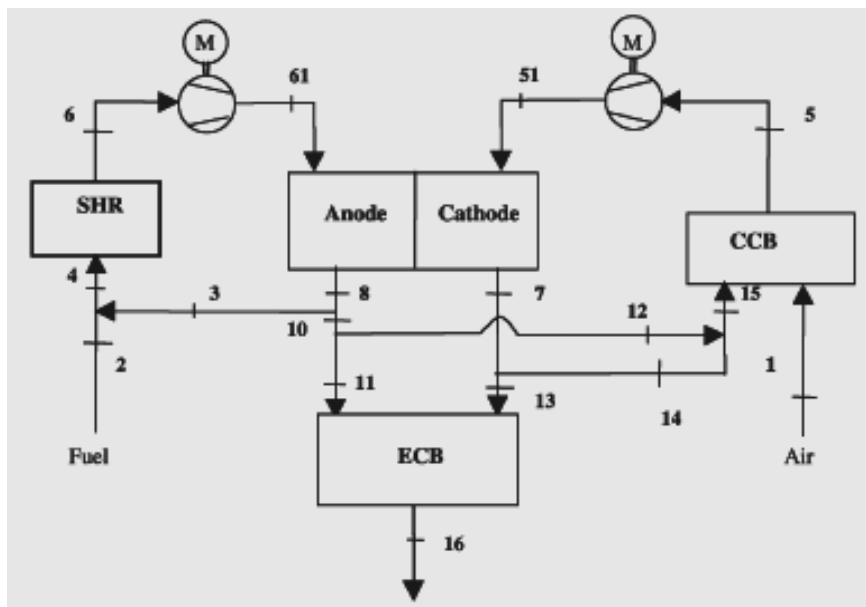
2.4.1 Σύστημα κυψέλης καυσίμου

Το σύστημα της ΚΚ βασίζεται σε μια διάταξη ΚΚΤΑΑ που αποτελείται από δύο συστοιχίες των 75 κυψελών, συνολικής επιφάνειας 100.32 m² (Εικόνα 2.1). Το σύστημα κυψελών καυσίμου λειτουργεί σε συγκεκριμένες καταστάσεις θερμοκρασίας και πίεσης. Συγκεκριμένα, οι περιορισμοί για ελάχιστη θερμοκρασία είναι 580°C ενώ η πίεση λειτουργίας είναι σταθερή στα 0.35 MPa, ώστε να έχουμε απόδοση της συστοιχίας πάνω από 50% και ηλεκτρική ισχύ περίπου 100 kW.



Εικόνα 2.1 Σειρά Κυψελών Καυσίμου Τηγμένων Ανθρακικών Αλάτων [Grillo et al. (2003)].

Ολόκληρη η διάταξη φαίνεται στο Σχ. 2.22. Προκειμένου να ολοκληρωθεί το σύστημα, προστίθεται στη συστοιχία της Εικόνας 2.1 ένας αναμορφωτής (SHR-sensible heat reformer), ένας καταλυτικός καυστήρας στην εξαγωγή (ECB-exhaust catalytic burner) ένας καταλυτικός καυστήρας στην ανακυκλοφορία από άνοδο προς κάθοδο (CCB-cathode catalytic burner), και δύο ανεμιστήρες ανακυκλοφορίας (στην άνοδο και στην κάθοδο). Ο αναμορφωτής είναι ένας καταλύτης, του οποίου η λειτουργία είναι να μετατρέπει το μεθάνιο σε ένα πλουσιότερο μίγμα υδρογόνου. Χάρη στην ανακύκλωση των απαερίων της ανόδου παρέχεται θερμότητα, η οποία δίνει την απαιτούμενη ενέργεια ώστε να γίνει η αντίδραση της αναμόρφωσης (ενδόθερμη αντίδραση). Η συστοιχία τροφοδοτείται με μίγμα H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , H_2O στην άνοδο και αέρα και CO_2 στην κάθοδο. Τα προϊόντα όλων των αντιδράσεων είναι ηλεκτρική ισχύς, θερμότητα, ατμός και η μεταφορά CO_2 (σε μορφή ιόντων CO_3^{2-}) από την κάθοδο στην άνοδο μέσω του ηλεκτρολύτη. Οι ανεμιστήρες είναι απαραίτητοι για τη ροή των αερίων στην άνοδο και την κάθοδο και την ανάκτηση των απωλειών πίεσως μέσα στη συστοιχία. Πολλές εσωτερικές ανακυκλώσεις χαρακτηρίζουν τη διάταξη. Στην πλευρά της ανόδου, ένα σημαντικό κλάσμα των καυσαερίων (89%) ανακυκλώνεται σαν καύσιμο (H_2 και CH_4) και για ανάκτηση ενέργειας. Η διάταξη αυτή χάρη στην ανακύκλωση στην άνοδο επιτρέπει την αξιοποίηση του 90% του εισερχομένου καυσίμου. Ένα μέρος των απαερίων της ανόδου ανακυκλώνεται στην είσοδο της καθόδου, ώστε να εξασφαλιστεί ένα ελάχιστο ποσοστό CO_2 . Τα απαέρια της καθόδου ανακυκλώνονται στην είσοδο του ηλεκτροδίου για περαιτέρω αξιοποίηση της ενέργειας του καυσίμου. Ο Πίνακας 2.7 δείχνει τα δεδομένα στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της ΚΚ, ενώ στον Πίνακα 2.8 φαίνονται τα θερμοδυναμικά δεδομένα των διαφόρων σημείων που αναφέρονται στο Σχ. 2.22.



Σχ. 2.22 Διάταξη συστήματος κυψέλης καυσίμου, (SHR, Sensible Heat Reformer, ECB: Exhaust Catalytic Burner, CCB: Cathode Catalytic Burner) [Grillo et al. (2003)].

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για τα δεδομένα της συστοιχίας που φαίνονται στον Πίνακα 2.7 δεν λαμβάνεται υπόψη η ισχύς που απαιτείται για την αύξηση της πίεσης στη συστοιχία.

Πίνακας 2.7 Συμπεριφορά του συστήματος ΚΚ στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας [Grillo et al. (2003)].

Βαθμός απόδοσης (%)	Ισχύς (kW)	Τάση ΚΚ (V)	Θερμοκρασία Συστοιχίας (K)	Λόγος ηλεκτρισμού/θερμότητα	Συντελεστής χρησιμοποίησης καυσίμου
50.13	100.4	0.6528	922	0.9933	0.4068 (Single Pass) 0.9377 (Total)

Πίνακας 2.8 Θερμοκρασίες και σύσταση στα σημεία του συστήματος [Grillo et al. (2003)].

Σημείο του συστήματος	T (K)	Μοριακή αναλογία (%)						
		H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
4 (εισαγωγή αναμορφωτή)	948	4.136	2.584	4.254	61.85	27.17	0	0
61 (εισαγωγή ανόδου)	856	8.37	0.743	6.729	58.81	25.34	0	0
8 (εξαγωγή ανόδου)	967	4.092	0.7001	4.346	63.19	27.67	0	0
51 (εισαγωγή καθόδου)	904	0	0	0	8.175	9.087	11.1	71.6
7 (εξαγωγή καθόδου)	962	0	0	0	3.855	9.758	9.461	76.89
15 (CCB εισαγωγή)	959	0.464	0.110	0.493	10.58	11.79	8.388	68.17
16 (απαέρια)	976	0	0	0	4.806	10.16	9.184	75.85

Προκειμένου να αυξηθεί η πίεση στη συστοιχία, χρησιμοποιούνται δύο συμπιεστές ηλεκτρικά κινούμενοι, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.23. Στη διάταξη αυτή δεν έχουμε ανάκτηση θερμότητας από την ενέργεια των απαερίων στην έξοδο της συστοιχίας. Το καύσιμο τροφοδοτεί την άνοδο (σημείο 29), το οποίο συμπιέζεται σε πίεση 0.35 MPa από τον συμπιεστή ο οποίος χρησιμοποιεί το 1.5 % της ισχύος της διάταξης, εξαιτίας της μικρής παροχής καυσίμου (4.97 g/s), ενώ ο συμπιεστής του αέρα (σημείο 19) χρησιμοποιεί περίπου το 22% της ισχύος της διάταξης εξαιτίας της υψηλής παροχής του αέρα (139.3 g/s).

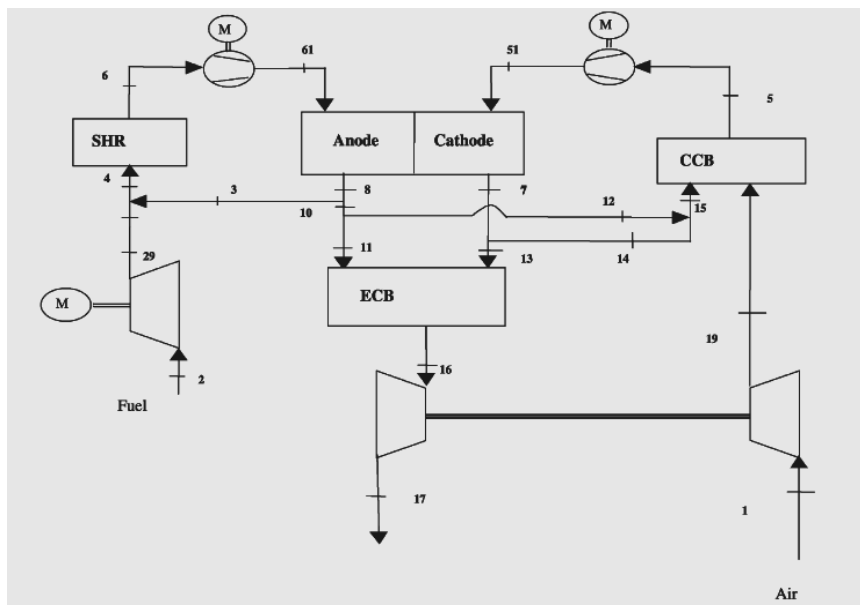
Λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ των δύο συμπιεστών, η απόδοση της συστοιχίας μειώνεται στο 40.08% (από το 50.13%), καθώς η ισχύς που απαιτείται για την αύξηση της πίεσης (συμπιεστές και ανεμιστήρες) φτάνει σχεδόν το 30% της ισχύος της συστοιχίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή η πίεση των απαερίων είναι περίπου 0.35 MPa και η θερμοκρασία 700°C. Συνεπώς γίνεται αντιληπτό ότι η ενθαλπία των απαερίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της πίεσης της συστοιχίας και για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Συγκεκριμένα η θερμότητα που μπορεί να ανακτηθεί μεταξύ της θερμοκρασίας απαερίων της συστοιχίας και των 90°C είναι 100 kW. Επιπλέον, ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι περίπου 0.76.

2.4.2 Αύξηση της πίεσης του συστήματος κυψέλης καυσίμου και ανάκτηση θερμότητας

Η αξιοποίηση της ενθαλπίας των απαερίων για την αύξηση της πίεσης και της απόδοσης της συστοιχίας μπορεί να γίνει με διαφορετικούς τρόπους, οι οποίοι παρατίθενται στη συνέχεια.

Στην πρώτη περίπτωση γίνεται χρήση ενός στροβιλοσυμπιεστή (Σχ. 2.23), με τον οποίο επιτυγχάνεται μερική ανάκτηση της θερμότητας από τα απαέρια των κυψελών ($T_{ex} > 690^{\circ}\text{C}$ Σημείο 16). Στην πλευρά της ανόδου έχουμε έναν ηλεκτροκίνητο συμπιεστή (σημείο 29) ενώ η κατάλληλη πίεση του αέρα στην πλευρά της καθόδου αποδίδεται από τον στροβιλοσυμπιεστή (σημείο 19). Η ολική καθαρή ισχύς του συστήματος αυξάνεται, καθώς μόνον οι ανεμιστήρες και ο συμπιεστής του καυσίμου χρησιμοποιούν την ισχύ της συστοιχίας. Επομένως, αυξάνεται και η απόδοση χάρη στην αύξηση της ισχύος που παρέχεται με την ίδια παροχή καυσίμου.

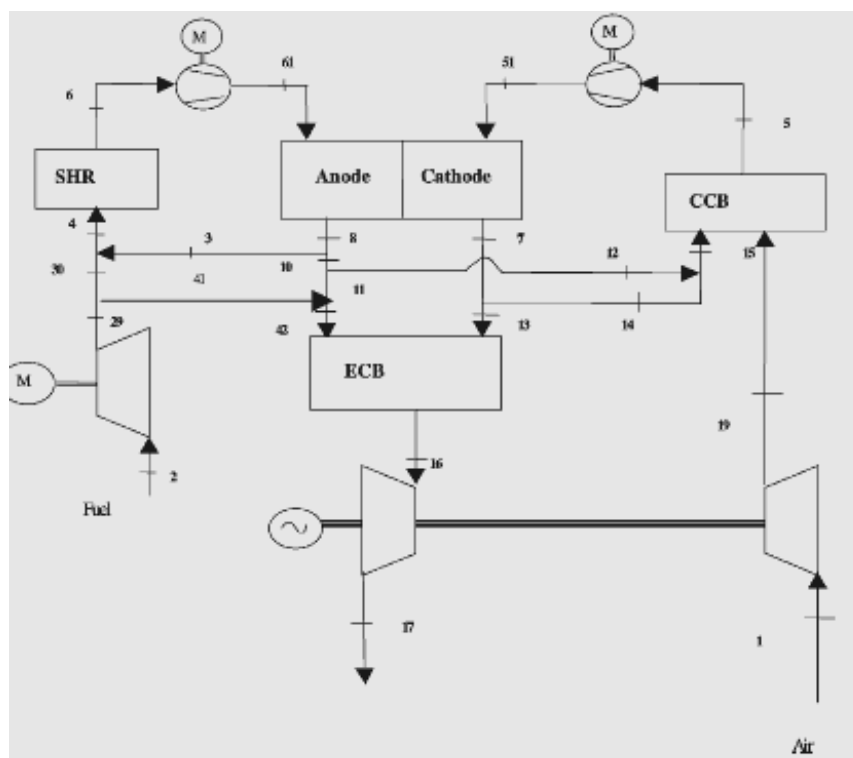


Σχ. 2.23 Σύστημα κυψέλης καυσίμου με στροβιλοσυμπιεστή [Grillo et al. (2003)].

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία των απαερίων στην έξοδο της συστοιχίας ταιριάζει με τη θερμοκρασία που χρησιμοποιείται στον στροβιλοσυμπιεστή στην περίπτωση μηχανής εσωτερικής καύσης (600 - 700°C), και επίσης ο λόγος εκτόνωσης είναι συμβατός με τον λόγο των υπαρχόντων στροβιλοσυμπιεστών. Η θερμοκρασία εξόδου του στροβίλου (594°C) επιτρέπει την επιπλέον ανάκτηση θερμότητας για θερμικές χρήσεις. Συγκεκριμένα η θερμότητα που μπορεί να ανακτηθεί με μείωση της θερμοκρασίας του καυσαερίου από τη θερμοκρασία εξαγωγής μέχρι τους 90°C είναι περίπου 82 kW και ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι 1.23.

Μια δεύτερη περίπτωση είναι η “συνεργασία” της συστοιχίας με έναν απλό κύκλο Α/Σ όπως φαίνεται στο Σχ. 2.24, όπου ο στρόβιλος παράγει και τη μηχανική ισχύ για τον συμπιεστή του αέρα και επιπλέον ηλεκτρική ισχύ. Για το συγκεκριμένο μέγεθος της συστοιχίας και της ροής του αέρα, η ισχύς του αεριοστρόβιλου κυμαίνεται στην περιοχή των 15-30 kW.

Τα απαέρια της κυψέλης εισέρχονται στον στρόβιλο σε πίεση 0.35 MPa και θερμοκρασία 700°C. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη από αυτή που χρησιμοποιείται σε μικρό-αεριοστρόβιλο (900-950°C). Ωστόσο, αν στον καταλυτικό καυστήρα εξαγωγής (ECB) παρέχεται καύσιμο απευθείας από τον συμπιεστή του καυσίμου-φαινόμενο που αναφέρεται ως post combustion (σημείο 41), τότε ο Α/Σ μπορεί να τροφοδοτηθεί με αέριο θερμοκρασίας 900°C αυξάνοντας έτσι την ισχύ του κατά έναν πολύ σημαντικό βαθμό.

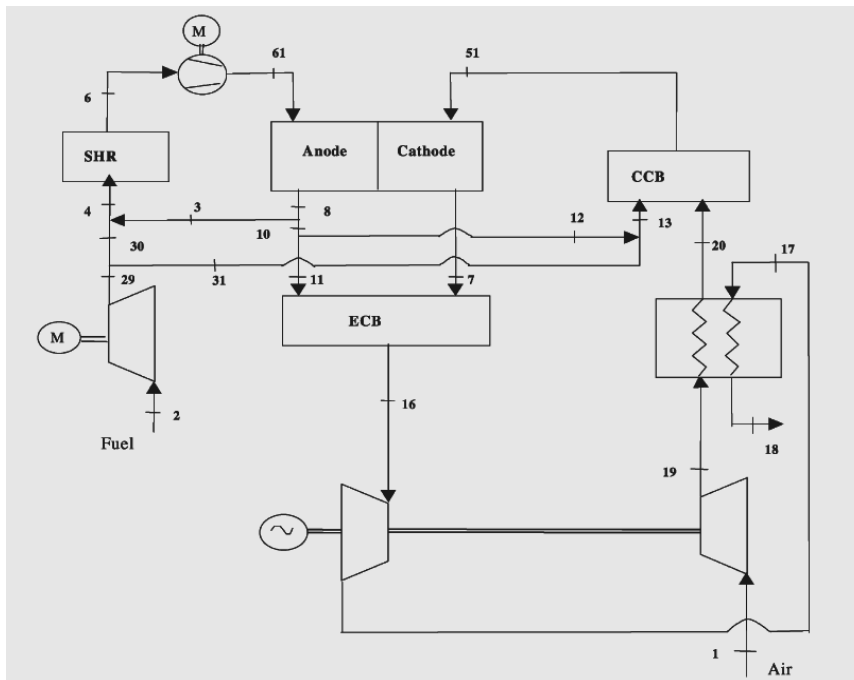


Σχ. 2.24 Υβριδικό Σύστημα ΚΚ-Α/Σ [Grillo et al. (2003)].

Επιπλέον, η ηλεκτρική ισχύς του ΥΣ αυξάνεται συγκρίνοντας με την αρχική συστοιχία, και η απόδοση το ίδιο από την στιγμή που η παροχή του καυσίμου παραμένει σταθερή (στην περίπτωση που δεν παρέχεται καύσιμο από τον συμπιεστή-σημείο 41). Στην περίπτωση που έχουμε παροχή καυσίμου από τον συμπιεστή, ο στρόβιλος αυξάνει την ηλεκτρική ισχύ του αλλά επίσης αυξάνεται και η παροχή του καυσίμου.

Μία τρίτη περίπτωση είναι η συνεργασία του συστήματος καυσίμου με αναγεννητικό μικρο-Α/Σ, η οποία είναι πολύ απλή, καθώς ο τελευταίος λειτουργεί για μέγεθος μικρότερο των 50 kW σε λόγο πίεσης 3-4 και δεν απαιτούνται αλλαγές. Ωστόσο, η συνεργασία αυτή απαιτεί κάποιες σημαντικές τροποποιήσεις στη διάταξη της συστοιχίας: η πιο σημαντική είναι η εξάλειψη της ανακύκλωσης του καυσαερίου στην κάθοδο, καθώς τον ρόλο αυτό πλέον διαδραματίζει ο ανακομιστής θερμότητας του στρόβιλου, ο οποίος χρησιμοποιεί την ενθαλπία των καυσαερίων του στρόβιλου απλοποιώντας έτσι την εγκατάσταση. Αντίθετα οι ανακυκλώσεις της ανόδου (άνοδος-άνοδος και άνοδος-κάθοδος) συνδέονται με τη λειτουργία του συστήματος. Μια εξάλειψη της ανακύκλωσης από άνοδο προς άνοδο θα προκαλούσε ανασχεδιασμό του αναμορφωτή καθώς, όπως προαναφέρθηκε, η ενθαλπία των καυσαερίων παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για την αντίδραση της αναμόρφωσης (ενδόθερμη αντίδραση).

Η ανακύκλωση από την άνοδο προς την κάθοδο είναι απαραίτητη, καθώς εξασφαλίζει ένα ελάχιστο ποσοστό CO₂ στην είσοδο της καθόδου (περίπου 9% της συνολικής ροής μάζας). Παρά τη διαδικασία προθέρμανσης του αέρα στην είσοδο της καθόδου, η θερμοκρασία του δεν είναι ικανοποιητική, καθώς απαιτείται επιπλέον ροή ώστε να αντισταθμίζεται η εξάλειψη της ανακύκλωσης. Ο καυστήρας της καθόδου χρειάζεται επιπλέον καύσιμο, ώστε να κρατήσει το σωστό επίπεδο θερμοκρασίας στην είσοδο του ηλεκτροδίου.

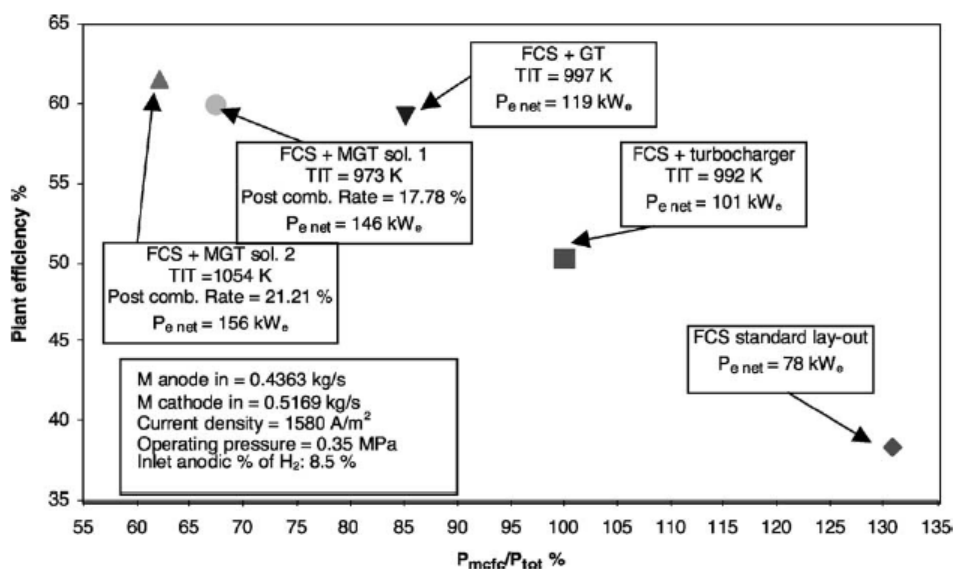


Σχ. 2.25 Υβριδικό σύστημα ΚΚ-Μικρο Α/Σ (1^η περίπτωση)
[Grillo et al. (2003)].

όπου η ενθαλπία των καυσαερίων αξιοποιείται για τη συμπίεση του αέρα, η απόδοση αυξάνεται πάνω από το 50%, καθώς μόνο το 2% της ισχύος της συστοιχίας είναι απαραίτητο για τα βοηθητικά μηχανήματα (ανεμιστήρες και συμπίεση καυσίμου).

Ο συνδυασμός ΚΚ-Α/Σ παρατηρούμαι ότι επιτρέπει μεγαλύτερη απόδοση, περίπου 59%. Ο στρόβιλος παρέχει την απαραίτητη ισχύ για αύξηση της πίεσης (περίπου 23 kW) και μια επιπλέον συνεισφορά στο δίκτυο (περίπου 17 kW). Ολόκληρη η ισχύς του συστήματος είναι περίπου 120 kW, από την οποία περίπου 84% παράγεται από την ΚΚ ενώ το 16% από τον στρόβιλο, ενώ η απόδοσή του φτάνει το 58%.

Στις διατάξεις των αναγεννητικών κύκλων, παρά τη διεργασία της συμπληρωματικής καύσης (post-combustion), που είναι απαραίτητη ώστε να επιτυγχάνονται τα θερμοκρασιακά όρια, έχουμε αύξηση στην απόδοση (πάνω από 60%) και μείωση της συμβολής της ΚΚ στην ισχύ του όλου συστήματος (περίπου 60%).



Σχ. 2.27 Σύγκριση μεταξύ των διατάξεων [Grillo et al. (2003)].

Ο ανακομιστής θερμότητας ανεβάζει τη θερμοκρασία του αέρα στους 500°C. Έτσι η κάθοδος τροφοδοτείται σε θερμοκρασία 615°C έναντι 650°C στην περίπτωση ΚΚΤΑΑ-Α/Σ (όπου η ενθαλπία των καυσαερίων της καθόδου ανακτάται από εσωτερική ανακύκλωση). Η μείωση αυτή της θερμοκρασίας έχει αρνητικά αποτελέσματα, καθώς προκαλεί μείωση της τάσης στην ΚΚ λόγω ωμικών απωλειών, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.9. Η ισχύς που παρέχεται από τη διάταξη είναι 146 kW για την πρώτη περίπτωση και 156 kW για τη δεύτερη. Στη δεύτερη περίπτωση (post-combustion) αυξάνεται η τιμή της ΘΕΣ στους 780°C, έναντι 700°C της πρώτης (όπου έχουμε εισαγωγή επιπλέον καυσίμου στον καταλυτικό καυστήρα της καθόδου, CCB). Η ισχύς που παρέχεται από τον στρόβιλο είναι 137 kW έναντι 126 kW της πρώτης περίπτωσης, ενώ αυτή που απαιτείται για αύξηση της πίεσης στην κάθοδο είναι 79 kW. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η αύξηση της ισχύος που απαιτείται για αύξηση της πίεσης (79 αντί 23 kW στη διάταξη ΚΚ-Α/Σ) οφείλεται στην εξάλειψη της ανακύκλωσης στην κάθοδο.

Ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα ορίζεται ως ο λόγος της ολικής καθαρής ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από το σύστημα προς τη θερμότητα που ανακτάται από

τα απαέρια. Σημειώνεται ότι η θερμότητα αυτή είναι διαθέσιμη σε διαφορετικά σημεία στις διατάξεις:

- Στον καυστήρα των καυσαερίων (ECB) στην αρχική διάταξη
- Στην έξοδο του στροβίλου στις διατάξεις του στροβιλοσυμπιεστή και A/Σ
- Στην έξοδο του ανακομιστή στις τελευταίες διατάξεις.

Οι τελευταίες διατάξεις (ΚΚ-Μικρο-A/Σ) χαρακτηρίζονται από υψηλό λόγο ηλεκτρισμού προς θερμότητα, καθώς η θερμότητα των καυσαερίων αξιοποιείται προκειμένου να αυξηθεί η τιμή της ενθαλπίας του στροβίλου.

Πίνακας 2.9 Σύγκριση μεταξύ των ΥΣ (σημείο σχεδιασμού) [Grillo et al. (2003)].

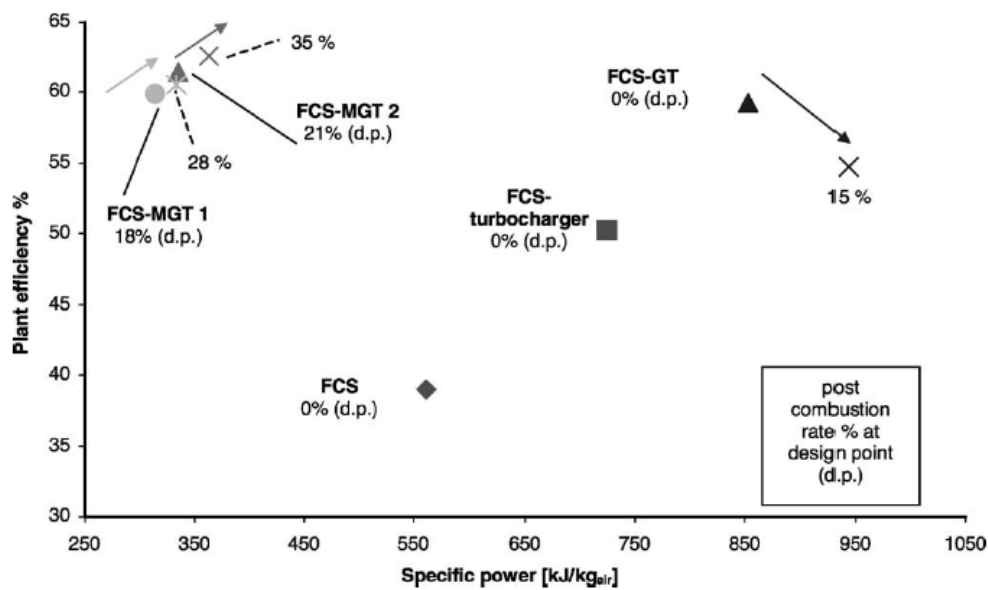
Διάταξη	Τάση ΚΚ (V)	Βαθμός απόδοσης συστοιχίας (%)	Λόγος ηλεκτρισμού/θερμότητα	T_{ex} (K)	Q ανάκτησης (kW)
Αρχική διάταξη	0.6617	38.98	0.761	985	102.5
FCS-στροβιλοσυμπιεστή	0.6643	50.30	1.233	866	81.8
FCS-A/Σ	0.6669	50.49	1.861	760	63.8
FCS-MGT (1 st λύση)	0.6488	49.19	2.170	450	67.2
FCS-MGT (2 st λύση)	0.6410	48.57	2.186	508	71.5

2.4.4 Συμπεράσματα

Όσον αφορά στην απόδοση σε σύγκριση με την αρχική διάταξη της ΚΚ, τα ΥΣ παρουσιάζουν χαρακτηριστική αύξηση, καθώς επιτυγχάνουν ανάκτηση της ενέργειας των απαερίων. Συγκεκριμένα, ΚΚ-στροβιλοσυμπιεστής είναι επικερδής από τη στιγμή που τα απαέρια της συστοιχίας αξιοποιούνται για την αύξηση της πίεσης, αλλά δεν παρέχεται ισχύς στο κύκλωμα. ΚΚ-A/Σ επιτρέπει μια επιπλέον αύξηση της ισχύος κατά περίπου 18 kW. Η καλύτερη λύση είναι αυτή των αναγεννητικών κύκλων με μικρο-A/Σ. Η απόδοση αυξάνεται περίπου στο 61% και είναι αξιοσημείωτο ότι η συμπληρωματική καύση (post-combustion) επιτρέπει καλύτερη συμπεριφορά της διάταξης χάρη στην καλή συμπεριφορά της συστοιχίας που συνδέεται με την υψηλή θερμοκρασία. Από την άποψη της απόδοσης, αύξηση της πίεσης είναι επικερδής για όλες τις διατάξεις των ΥΣ.

Όσον αφορά στην ειδική ισχύ (καθαρή ισχύς συστήματος ανά μονάδα παροχής μάζας αέρα), η διάταξη ΚΚ-A/Σ χαρακτηρίζεται από την καλύτερη τιμή. Η επίδραση της συμπληρωματικής καύσης έχει εκτιμηθεί ως εξής: αυξανόμενη από 0% σε 15%, η ειδική ισχύς αυξάνεται περίπου κατά 90 kJ/kg αέρα, ενώ η απόδοση μειώνεται, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.28. Μικρότερες τιμές ειδικής ισχύος χαρακτηρίζουν τη διάταξη ΚΚ-μικρο A/Σ από τη στιγμή που απαιτείται μεγαλύτερη ροή αέρα, ώστε να αναπληρωθεί η ανακύκλωση στην κάθοδο. Ωστόσο οι διατάξεις αυτές δείχνουν μια αντίθετη συμπεριφορά όσον αφορά στη

συμπληρωματική καύση: αύξηση του καυσίμου προκαλεί αύξηση τόσο της απόδοσης όσο και της ειδικής ισχύος.



Σχ. 2.28 Επίδραση της συμπληρωματικής καύσης στην απόδοση και την ειδική ισχύ [Grillo et al. (2003)].

Από άποψη πολυπλοκότητας, η διάταξη ΚΚ-στροβιλοσυμπιεστή είναι η πιο απλή. Αν συγκριθεί με την ΚΚ-Α/Σ, δεν απαιτείται επιπλέον σύστημα ελέγχου, από τη στιγμή που δεν παράγεται καθαρή ισχύς από τον στρόβιλο. Η διάταξη ΚΚ-μικρο-Α/Σ έχει προβλήματα όσον αφορά την αξιοπιστία του ανακομιστή θερμότητας. Απαιτείται επιπλέον ένα κατάλληλο σύστημα ελέγχου για την παροχή καθαρής ισχύος από τον στρόβιλο. Από την άλλη όμως πλευρά, η εξάλειψη της καθοδικής ανακύκλωσης απλουστεύει τη διάταξη της συστοιχίας.

Από άποψη τεχνολογικών δυσκολιών, η θερμοκρασία λειτουργίας του στροβιλοσυμπιεστή περιορίζει τη λειτουργία των ΥΣ από την στιγμή που δεν μπορεί να υιοθετηθεί η συμπληρωματική καύση. Εξαιτίας της επιπλέον ισχύος που παρέχεται από την ΚΚ και θεωρώντας το μικρό μέγεθος των συστημάτων, τα συστήματα ελέγχου παρουσιάζουν μεγαλύτερα προβλήματα για ΚΚ-Α/Σ και ΚΚ-μικρο-Α/Σ.

Συγκρίνοντας τις διατάξεις, η ΚΚ-Α/Σ χαρακτηρίζεται από μια υψηλότερη τιμή λόγου ισχύος ΚΚ προς την καθαρή ολική ισχύ του ΥΣ (83%) όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.27. Με τη συμπληρωματική καύση στους αναγεννητικούς κύκλους η συνεισφορά του στροβίλου αυξάνεται (περίπου 35-40% της ολικής ισχύος).

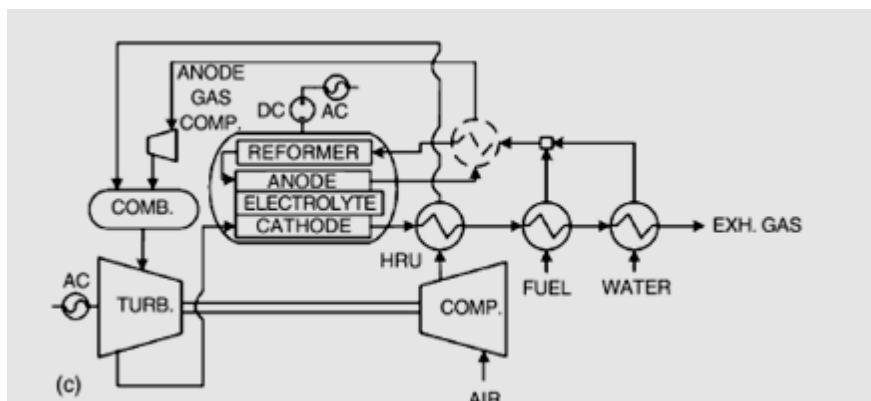
3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

3.1 Επιλογή Δομής Κατάλληλη για Εφαρμογή σε Πλοία

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει μια προσπάθεια επιλογής της δομής που κρίνεται κατ' αρχήν κατάλληλη για εφαρμογή στα πλοία. Αρκετά είναι τα κριτήρια που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην επιλογή της καταλληλότερης διάταξης για εφαρμογή σε ένα πλοίο, με κυριότερα τον βαθμό απόδοσης, την ειδική ισχύ και το κόστος εγκατάστασης.

Όσον αφορά στο κόστος των υβριδικών συστημάτων, καθώς η μελέτη της τεχνολογίας αυτής βρίσκεται, γενικά, σε αρχικό στάδιο δεν βρέθηκαν ακριβή στοιχεία που να μπορούν να αποτελέσουν μέτρο σύγκρισης. Εκ των πραγμάτων, γενικά, οι κυψέλες καυσίμου έχουν μεγαλύτερο αρχικό κόστος από ό,τι οι συμβατικές θερμικές μηχανές.

Ο βαθμός απόδοσης των διαφόρων διατάξεων μπορεί να συγκριθεί, και με βάση αυτόν να γίνει η επιλογή της διάταξης. Ο υψηλός βαθμός απόδοσης των υβριδικών συστημάτων αποτελεί ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα εν συγκρίσει με τα συμβατικά μηχανικά συστήματα. Μελετώντας το προηγούμενο κεφάλαιο, βλέπουμε ότι ο βαθμός απόδοσης της τελευταίας παραλλαγής της τρίτης διάταξης (Σχ. 2.14 (c)-C2) ξεπερνά το 67% (Σχ. 2.20), οπότε θα μπορεί να αποτελέσει μια καλή επιλογή μελέτης και εφαρμογής σε πλοίο για την παραγωγή και διανομή ηλεκτρικής ισχύος.



Σχ. 2.14 (c) Διάταξη C2. Περιλαμβάνει τον εναλλάκτη που απεικονίζεται με διακεκομμένες γραμμές [Oh and Kim (2006)].

Ακολουθεί περιγραφή της λειτουργίας της διάταξης που επιλέχθηκε. Ο ατμοσφαιρικός αέρας συμπιέζεται μέσω του συμπιεστή (COMP) και ύστερα θερμαίνεται στη μονάδα ανάκτησης θερμότητας (HRU). Κατόπιν ο συμπιεσμένος αέρας εισέρχεται στον θάλαμο καύσης (ΘΚ), (COMB), τα καυσαέρια του οποίου εκτονώνονται στον στρόβιλο (άμεσο σύστημα καύσεως). Το καύσιμο για τον ΘΚ παρέχεται από την έξοδο της ανόδου (H_2O , CO_2 και περίσσεια H_2). Σημειώνεται ότι στην έξοδο της ανόδου έχουμε περίσσεια H_2 , καθώς αυτό δεν εξαντλείται με τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που γίνονται

στην άνοδο. Ο συμπιεστής άνόδου (anode gas comp) χρησιμοποιείται για την αύξηση της πίεσης των αερίων στην έξοδο της άνόδου προς τον ΘΚ. Προκειμένου να αποφευχθούν υψηλές θερμοκρασίες στην εισαγωγή του στροβίλου (η θερμοκρασία της ΚΚ είναι ήδη 650°C) τοποθετείται ένας επιπλέον εναλλάκτης θερμότητας (διακεκομμένες γραμμές), ώστε αφενός μεν να μειωθεί η θερμοκρασία των αερίων εξόδου της άνόδου χρησιμοποιώντας σαν ψυκτικό μέσο το μίγμα καυσίμου-ατμού, αφετέρου δε να έχουμε προθέρμανση του καυσίμου. Στις επόμενες ενότητες ακολουθεί άναλυση του συστήματος.

3.2 Αναμόρφωση του Μεθανίου

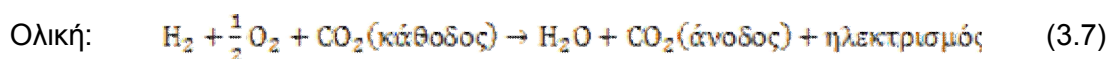
Ως καύσιμο χρησιμοποιείται το μεθάνιο (CH_4) και οι αντιδράσεις που συμβαίνουν στον αναμορφωτή είναι οι εξής:



Η ποσότητα του ατμού που απαιτείται για την αναμόρφωση, καθορίζεται από τον λόγο ατμού/μεθανίου:

$$S/C = \frac{\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}}}{\dot{n}_{\text{CH}_4}} \quad (3.4)$$

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στην ΚΚ περιγράφονται ως εξής:



Στην είσοδο της άνόδου, η παρουσία του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) οφείλεται στην ημιτελή μετατροπή του μεθανίου σε υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα στον αναμορφωτή. Το μονοξείδιο του άνθρακα επίσης παράγει την ίδια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος ανά γραμμομόριο όπως το υδρογόνο (Εξ. (3.5)-(3.7) με αντικατάσταση του H_2 με CO). Στην παρούσα μελέτη θα κάνουμε την παραδοχή ότι έχουμε τέλεια μετατροπή του μεθανίου σε υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα στον αναμορφωτή.

3.3 Ηλεκτρεγερτική Δύναμη, Τάση και Ένταση Λειτουργίας της ΚΚ

Μία συστοιχία ΚΚΤΑΑ αποτελείται από έναν αριθμό στηλών ($N_{\text{στ}}$), ενώ κάθε στήλη αποτελείται από έναν αριθμό κυψελών καυσίμου ($N_{\text{κ,στ}}$). Η αντιστρεπτή ηλεκτρεγερτική δύναμη, E_{rev} (ή θεωρητική τάση) που παράγεται από μία ΚΚ δίνεται από την εξίσωση, γνωστή και ως εξίσωση Nernst [Blomen and Mugerwa (1993)]:

$$E_{rev} = \frac{-\Delta\hat{g}(P^0, T)}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{\frac{P_{H_2}}{P^0} \left(\frac{P_{O_2}}{P^0}\right)^{0.5} \frac{P_{CO_2,C}}{P^0}}{\frac{P_{H_2O}}{P^0} \frac{P_{CO_2,A}}{P^0}} \quad (3.8)$$

όπου

P^0 η πρότυπη πίεση αναφοράς: $P^0=1\text{atm}=1.01325\text{ bar}$

P η πίεση λειτουργίας της ΚΚ

P_x η μερική πίεση του κάθε αερίου.

Αντικαθιστώντας στην προηγούμενη εξίσωση τις μερικές πιέσεις με τους όρους

$$P_x = y_x P \quad (3.9)$$

όπου y_x είναι η γραμμομοριακή περιεκτικότητα του συστατικού x στο μίγμα, η Εξ. (3.8) γράφεται

$$E_{rev} = \frac{-\Delta\hat{g}(P^0, T)}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{y_{H_2} y_{O_2}^{0.5} y_{CO_2,C}}{y_{H_2O} y_{CO_2,A}} + \frac{RT}{4F} \ln \frac{P}{P^0} \quad (3.10)$$

όπου

y_{H_2} περιεκτικότητα του H_2 στην είσοδο της ανόδου

y_{O_2} περιεκτικότητα του O_2 στην είσοδο της καθόδου

y_{H_2O} περιεκτικότητα του H_2O στην έξοδο της ανόδου

$y_{CO_2,C}$ περιεκτικότητα του CO_2 στην είσοδο της καθόδου

$y_{CO_2,A}$ περιεκτικότητα του CO_2 στην είσοδο της ανόδου.

Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος μίας ΚΚ (είναι η ίδια σε κάθε στήλη) δίνεται από τη σχέση:

$$I_1 = i A_c \quad (3.11)$$

όπου

i η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος στην ΚΚ (ένταση ανά μονάδα επιφάνειας)

A_c το εμβαδόν της επιφάνειας μίας ΚΚ.

Η ολική ένταση λειτουργίας της συστοιχίας δίνεται από την σχέση:

$$I_{ολ} = N_{στ} I_1 \quad (3.12)$$

Η πραγματική τάση που αναπτύσσεται κατά τη λειτουργία μιας ΚΚ είναι μικρότερη από την αντιστρεπτή ηλεκτρεγερτική δύναμη εξαιτίας ορισμένων παραγόντων, όπως η ιοντική αντίσταση, η ηλεκτρική αντίσταση και η αντίσταση της χημικής αντίδρασης που προκαλείται από την ενέργεια ενεργοποίησης. Η τελευταία οφείλεται στη βραδύτητα των αντιδράσεων που γίνονται στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Ένα μέρος της

αναπτυσσόμενης τάσης καταναλίσκεται για τη διατήρηση της ηλεκτροχημικής αντίδρασης που μεταφέρει ηλεκτρόνια προς ή από το ηλεκτρόδιο. Είναι δύσκολο να εκτιμηθούν ακριβώς οι επιδράσεις των παραγόντων αυτών σε συνδυασμό με τη μεταφορά θερμότητας/μάζας και τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις κατά τη λειτουργία της κυψέλης. Στην παρούσα μελέτη οι εσωτερικές αντιστάσεις της ΚΚ εκτιμώνται χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες ημιεμπειρικές σχέσεις [Kimijita and Kasagi (2005)]:

$$r_{ohm} = 0.5 \cdot 10^{-4} \exp \left[3016 \left(\frac{1}{T_{cell}} - \frac{1}{923} \right) \right] \quad (3.13)$$

$$r_{an} = 2.27 \cdot 10^{-9} \exp \left(\frac{6435}{T_{cell}} \right) p_{an,H_2}^{-0.42} p_{an,CO_2}^{-0.17} p_{an,H_2O}^{-1.0} \quad (3.14)$$

$$r_{ca} = 7.505 \cdot 10^{-10} \exp \left(\frac{9298}{T_{cell}} \right) p_{ca,O_2}^{-0.43} p_{ca,CO_2}^{-0.09} \quad (3.15)$$

Στην ωμική αντίσταση r_{ohm} περιλαμβάνονται η ιοντική και η ηλεκτρική αντίσταση, ενώ η αντίσταση ανόδου r_{an} και καθόδου r_{ca} εκφράζονται ως συναρτήσεις της θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης και των μερικών πιέσεων των αερίων.

Η πραγματική τάση που αναπτύσσεται στην κυψέλη καυσίμου μπορεί να υπολογιστεί με τη σχέση:

$$V_1 = E_{rev} - i(r_{ohm} + r_{an} + r_{ca}) \quad (3.16)$$

Η ολική τάση λειτουργίας της συστοιχίας δίνεται από τη σχέση:

$$V_{ολ} = N_{κ,στ} V_1 \quad (3.17)$$

3.4 Ισχύς και Βαθμός Απόδοσης της ΚΚ

Για διευκόλυνση στην εφαρμογή των εξισώσεων γίνεται αρίθμηση των διαφόρων σημείων της διάταξης του Σχ. 2.14(c), όπως δίνει το Σχ. 3.1.

Η ισχύς μίας ΚΚ δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{W}_1 = I_1 V_1 \quad (3.18)$$

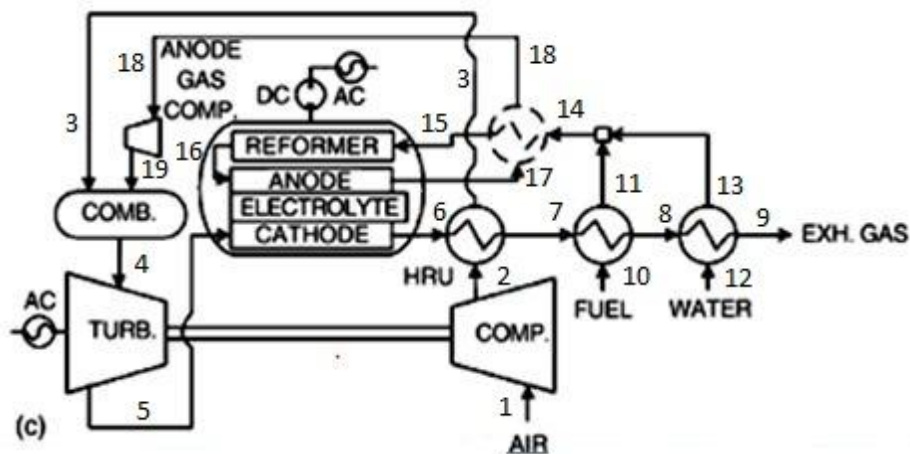
Η ολική ισχύς λειτουργίας της συστοιχίας δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{W}_{MCFC} = I_{ολ} V_{ολ} \quad (3.19)$$

Η τελική ισχύς εναλλασσόμενου ρεύματος από τη συστοιχία της κυψέλης υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες μετατροπής του συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα:

$$\dot{W}_{MCFC,AC} = \dot{W}_{MCFC} \eta_{conv} \quad (3.20)$$

όπου η_{conv} ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα του συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα.



Σχ. 3.1 Διάταξη C2 περιλαμβάνει τον εναλλάκτη που απεικονίζεται με διακεκομμένες γραμμές [Oh and Kim (2006)].

Η γραμμομοριακή κατανάλωση του υδρογόνου σε μία ΚΚ δίνεται από τη σχέση [Milewski J. et al. (2012)]

$$\dot{n}_{H_2,k1} = \frac{i_{AC}}{2F} \quad (3.21)$$

ενώ η γραμμομοριακή παροχή του υδρογόνου σε μία ΚΚ δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{n}_{H_2,in1} = \frac{i_{AC}}{2F U_f} \quad (3.22)$$

όπου U_f ο συντελεστής χρησιμοποίησης του καυσίμου, που ορίζεται από τη σχέση [Ohm and Kim (2006)]:

$$U_f = \frac{(n_{H_2} + n_{CO})_{reacted}}{(n_{H_2} + n_{CO})_{supplied}} \quad (3.23)$$

Άρα η συνολική γραμμομοριακή παροχή και κατανάλωση του υδρογόνου στη συστοιχία ορίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\dot{n}_{H_2(16)} = N_{k,στ} N_{στ} \dot{n}_{H_2,in1} \quad (3.24)$$

$$\dot{n}_{MCFC,H_2,k} = N_{k,στ} N_{στ} \dot{n}_{H_2,k1} = \dot{n}_{H_2(16)} U_f \quad (3.25)$$

Η ποσότητα του H_2 στην έξοδο της ανόδου που δεν αντέδρασε είναι η διαφορά των ανωτέρω εξισώσεων:

$$\dot{n}_{H_2(17)} = \dot{n}_{H_2(16)} - \dot{n}_{MCFCH_2,k} \quad (3.26)$$

Μέσω της αντίδρασης (3.3) και των γραμμομοριακών αναλογιών μπορούμε να υπολογίσουμε τη γραμμομοριακή παροχή του μεθανίου $\dot{n}_{CH_4,in}$, η οποία θα είναι το $\frac{1}{4}$ της υπολογιζόμενης παροχής υδρογόνου της συστοιχίας από την Εξ. (3.24):

$$\dot{n}_{CH_4(10)} = \frac{1}{4} \dot{n}_{H_2(16)} \quad (3.27)$$

Ορίζονται οι ακόλουθοι βαθμοί απόδοσης.

Β.α. της συστοιχίας ως προς την καταναλισκόμενη ποσότητα του υδρογόνου:

$$\eta_{MCFCH_2,k1} = \frac{\dot{W}_{MCFCH_2,k1}}{N_{k,στ} N_{στ} \dot{n}_{H_2,in,k1} H_{u,H_2}} \quad (3.28)$$

Β.α. της συστοιχίας ως προς την ολική παροχή υδρογόνου:

$$\eta_{MCFCH_2,in} = \frac{\dot{W}_{MCFCH_2,k1}}{N_{k,στ} N_{στ} \dot{n}_{H_2,in1} H_{u,H_2}} \quad (3.29)$$

Β.α. της συστοιχίας ως προς την παροχή μεθανίου:

$$\eta_{MCFCH_4} = \frac{\dot{W}_{MCFCH_2,k1}}{\dot{n}_{CH_4,in} H_{u,CH_4}} \quad (3.30)$$

Β.α. του ζεύγους συστοιχίας – μετατροπέα ως προς την παροχή μεθανίου:

$$\eta_{MCFCH_4C} = \frac{\dot{W}_{MCFCH_2,k1}}{\dot{n}_{CH_4,in} H_{u,CH_4}} \quad (3.31)$$

3.5 Υπολογισμός Μαζών στα Σημεία του Υβριδικού Συστήματος

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί η διαδικασία υπολογισμού των παροχών στα διάφορα σημεία του ΥΣ. Η παροχή του μεθανίου στο σημείο 10 δίνεται από την Εξ. (3.27) μέσω της παροχής του υδρογόνου. Ο ατμός που απαιτείται για την αναμόρφωση δίνεται μέσω της Εξ. (3.4):

$$\dot{n}_{H_2O(12)} = S/C \dot{n}_{CH_4(10)} \quad (3.32)$$

Στην έξοδο του αναμορφωτή (σημείο 16) έχουμε τα προϊόντα της αντίδρασης της αναμόρφωσης



Η παροχή του H_2 δίνεται από την Εξ. (3.24), ενώ η παροχή του CO_2 υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\dot{n}_{CO_2(16)} = \dot{n}_{CH_4(10)} \quad (3.33)$$

και η περίσσεια του ατμού από την εξίσωση

$$\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}(16)} = (2 - S/C) \dot{n}_{\text{CH}_4(10)} \quad (3.34)$$

Η αντίδραση της ανόδου είναι



οπότε στην έξοδο της ανόδου (σημείο 17) έχουμε τα προϊόντα της αντίδρασης (H_2O , CO_2) συν τις ποσότητες των Εξ. (3.34) και (3.33)

$$\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}(17)} = \dot{n}_{\text{MCFCH}_2, k} + \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}(16)} \quad (3.35)$$

$$\dot{n}_{\text{CO}_2(17)} = \dot{n}_{\text{MCFCH}_2, k} + \dot{n}_{\text{CO}_2(16)} \quad (3.36)$$

και επιπλέον την περίσσεια του H_2 που δεν αντέδρασε στην άνοδο, Εξ. (3.26).

Για τον υπολογισμό της παροχής του αέρα (σημείο 3) πρέπει να ληφθεί υπόψη η αντίδραση της καύσης και η αντίδραση της καθόδου με περίσσεια του O_2 .

Στοιχειομετρική αντίδραση καύσης: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3.76\text{N}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 3.76\text{N}_2$

$$\dot{n}_{\text{O}_2(\text{ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΚΑΥΣΗΣ})} = \frac{1}{2} \dot{n}_{\text{H}_2(17)} \quad (3.37)$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}(\text{ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΚΑΥΣΗΣ})} = \dot{n}_{\text{H}_2(17)} \quad (3.38)$$

Αντίδραση καθόδου: $\text{O}_2 + 2\text{CO}_2 + 4e^- \rightarrow 2\text{CO}_3^{2-}$. Για την αντίδραση της ανόδου απαιτείται ποσότητα ανθρακικών ιόντων

$$\dot{n}_{\text{CO}_3^{2-}} = \dot{n}_{\text{MCFCH}_2, k}$$

η οποία παρέχεται από το CO_2 που έρχεται από το σημείο 17. Άρα απαιτούνται

$$\dot{n}_{\text{O}_2(\text{ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΚΑΘΟΔΟΥ})} = \frac{1}{2} \dot{n}_{\text{MCFCH}_2, k}$$

Καθώς θεωρώ έναν συντελεστή χρησιμοποίησης του O_2 , U_{f, O_2} τελικά ισχύει:

$$\dot{n}_{\text{O}_2(\text{ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΚΑΘΟΔΟΥ})} = \frac{1}{2U_{f, \text{O}_2}} \dot{n}_{\text{MCFCH}_2, k} \quad (3.39)$$

Τελικά:
$$\dot{n}_{\text{O}_2(3)} = \dot{n}_{\text{O}_2(\text{ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΚΑΥΣΗΣ})} + \dot{n}_{\text{O}_2(\text{ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΚΑΘΟΔΟΥ})} \quad (3.40)$$

$$\dot{n}_{\text{N}_2(3)} = 3.76 \dot{n}_{\text{O}_2(3)} \quad (3.41)$$

Στο σημείο 4: $\dot{n}_{\text{CO}_2(4)} = \dot{n}_{\text{CO}_2(17)}$ (3.42)

$$\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}(4)} = \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}(17)} + \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}(\text{ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΚΑΥΣΗΣ})}$$
 (3.43)

$$\dot{n}_{\text{O}_2(4)} = \dot{n}_{\text{O}_2(\text{ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΚΑΘΟΔΟΥ})}$$
 (3.44)

$$\dot{n}_{\text{N}_2(4)} = \dot{n}_{\text{N}_2(3)}$$
 (3.45)

Στο σημείο 6 έχουμε άζωτο ($\dot{n}_{\text{N}_2(3)}$), νερό ($\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}(4)}$) και την περίσσεια των O_2 και CO_2 από την αντίδραση της καθόδου:

$$\dot{n}_{\text{CO}_2(6)} = \dot{n}_{\text{CO}_2(17)} - \dot{n}_{\text{MFCFC}_k}$$
 (3.46)

$$\dot{n}_{\text{O}_2(6)} = (1 - U_{\text{fO}_2}) \dot{n}_{\text{O}_2(4)}$$
 (3.47)

3.6 Θερμοδυναμική Ανάλυση του Υβριδικού Συστήματος

Για τον συμπιεστή ισχύουν οι σχέσεις του λόγου πίεσεως και θερμοκρασιών ως ακολούθως:

$$r_c = \frac{p_2}{p_1}$$
 (3.48)

$$T_2 = T_1 \left[1 + \frac{r_c^{k_c} - 1}{\eta_c} \right]$$
 (3.49)

Για τον εναλλάκτη HRU ισχύει η σχέση του βαθμού εκμετάλλευσης:

$$\varepsilon_{HRU} = \frac{T_5 - T_2}{T_6 - T_2}$$
 (3.50)

Ο ισολογισμός ενέργειας στον εναλλάκτη εφαρμόζεται ως εξής:

$$\dot{m}_2 (h_3 - h_2) = \dot{m}_6 (h_6 - h_7)$$
 (3.51)

που μπορεί προσεγγιστικά να γραφεί ως εξής:

$$\dot{m}_2 c_{p_2} (T_3 - T_2) = \dot{m}_6 c_{p_6} (T_6 - T_7)$$
 (3.52)

$$\text{όπου } c_{p_6} = Y_{\text{H}_2\text{O},6} c_{p_{\text{H}_2\text{O},6}} + Y_{\text{CO}_2,6} c_{p_{\text{CO}_2,6}} + Y_{\text{O}_2,6} c_{p_{\text{O}_2,6}} + Y_{\text{N}_2,6} c_{p_{\text{N}_2,6}}, Y_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{\text{O}_2}}$$
 (3.53)

Για τους βαθμούς εκμετάλλευσης των εναλλακτών θερμότητας του καυσίμου και του νερού, αντίστοιχα, ισχύουν οι σχέσεις:

$$\varepsilon_F = \frac{T_{21} - T_{20}}{T_7 - T_{20}}$$
 (3.54)

$$\varepsilon_{W} = \frac{T_{25} - T_{22}}{T_8 - T_{22}} \quad (3.55)$$

Πίνακας 3.1 Υπολογισμός των c_p σε kJ/kmol K, όπου $\theta = T(\text{Kelvin})/100$
[Van Wylen, and Sonntag (1978)].

c_{pH_2O}	$143,05 - 183,54 \theta^{0,25} + 82,751 \theta^{0,5} - 3,6989 \theta$
c_{pCO_2}	$-3,7357 + 30,529 \theta^{0,5} - 4,1034 \theta + 0,024198 \theta^2$
c_{pO_2}	$37,432 + 0,020102 \theta^{1,5} - 178,57 \theta^{-1,5} + 236,88 \theta^{-2}$
c_{pN_2}	$39,060 - 512,79 \theta^{-1,5} + 1072,7 \theta^{-2} - 820,4 \theta^{-3}$
c_{pH_2}	$56,505 - 702,74 \theta^{-0,75} + 1165 \theta^{-1} - 560,7 \theta^{-1,5}$
c_{pCH_4}	$-672,87 + 439,74 \theta^{0,25} - 24,875 \theta^{0,75} + 323,88 \theta^{0,5}$

Ο ισολογισμός ενέργειας στον εναλλάκτη του καυσίμου εφαρμόζεται ως εξής:

$$\dot{m}_{11}(h_{11} - h_{10}) = \dot{m}_6(h_7 - h_8) \quad (3.56)$$

που μπορεί προσεγγιστικά να γραφεί ως εξής:

$$\dot{m}_{11}c_{p11}(T_{11} - T_{10}) = \dot{m}_6c_{p678}(T_7 - T_8) \quad (3.57)$$

$$\text{όπου} \quad c_{p678} = Y_{H_2O,7}c_{pH_2O,7} + Y_{CO_2,7}c_{pCO_2,7} + Y_{O_2,7}c_{pO_2,7} + Y_{N_2,7}c_{pN_2,7} \quad (3.58)$$

ενώ ο ισολογισμός ενέργειας στον εναλλάκτη του νερού γράφεται:

$$\dot{m}_8(h_8 - h_9) = \dot{m}_{13}(h_{13} - h_{12}) \quad (3.59)$$

$$\dot{m}_8c_{p88}(T_8 - T_9) = \dot{m}_{13}(h_{13} - h_{12}) \quad (3.60)$$

Ισολογισμός ενέργειας στον κόμβο 14:

$$\dot{m}_{14}h_{14} = \dot{m}_{11}h_{11} + \dot{m}_{13}h_{13}$$

$$\dot{m}_{11}c_{p11}(T_{11} - T_0) + \dot{m}_{13}h_{13} = \dot{m}_{11}c_{p11}(T_{14} - T_0) + \dot{m}_{13}h_{14} \quad (3.61)$$

Στον εναλλάκτη θερμότητας της ανόδου ισχύει η σχέση:

$$\varepsilon_a = \frac{T_{25} - T_{24}}{T_{27} - T_{24}} \quad (3.62)$$

και ο ισολογισμός θερμότητας:

$$\dot{m}_{11} (c_{P_{CH_4,15}} T_{15} - c_{P_{CH_4,14}} T_{14}) = \dot{m}_{17} c_{P_{17}} (T_{17} - T_{18}) \quad (3.63)$$

όπου

$$c_{P_{17}} = Y_{H_2O,17} c_{P_{H_2O,17}} + Y_{CO_2,17} c_{P_{CO_2,17}} + Y_{H_2,17} c_{P_{H_2,17}} \quad (3.64)$$

Στον συμπιεστή της καθόδου ισχύουν οι σχέσεις:

$$r_C = \frac{P_{18}}{P_{15}} \quad (3.65)$$

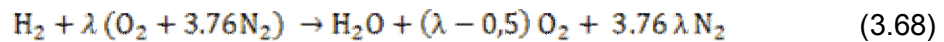
$$T_{19} = T_{18} \left[1 + \frac{r_{C,AM} k_{μικματος} - 1}{\eta_{C,AM}} \right] \quad (3.66)$$

Ισολογισμός ενέργειας στον θάλαμο καύσης:

$$\dot{m}_{H_2,19} H_u \eta_B + \dot{m}_{19} c_{P_{19}} (T_{19} - T_0) + \dot{m}_3 c_{P_3} (T_3 - T_0) = \dot{m}_4 c_{P_4} (T_4 - T_0) \quad (3.67)$$

όπου T_0 η θερμοκρασία αναφοράς.

Στον θάλαμο καύσης γίνεται η εξής αντίδραση:



Για τον στρόβιλο ισχύουν οι σχέσεις:

$$r_T = \frac{P_4}{P_3} \quad (3.69)$$

$$T_3 = T_4 [1 - \eta_T (1 - r_T^{-k_B})] \quad (3.70)$$

Για τον προσδιορισμό του k ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

$$MB_{μικματος} = \sum \frac{n_i}{n_{αλ}} M_i \quad (3.71)$$

$$C_V = C_p - R \quad (3.72)$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (3.73)$$

$$k = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \quad (3.74)$$

Ισχύς στον άξονα του συμπιεστή αέρα:

$$\dot{W}_{Ca} = \frac{\dot{m}_a}{\eta_{mCa}} (h_2 - h_1) = \frac{\dot{m}_a}{\eta_{mCa}} \int_{T_1}^{T_2} c_{pa} dT \approx \frac{\dot{m}_a}{\eta_{mCa}} \bar{c}_{p1,2} (T_2 - T_1) \quad (3.75)$$

όπου $\bar{c}_{p1,2}$ η μέση ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα μεταξύ των θερμοκρασιών T_1 και T_2 , που ορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{c}_{p1,2} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} c_{pa} dT \quad (3.76)$$

Τα πολυώνυμα του Πίνακα 3.1 δίνουν το c_p σε δεδομένη θερμοκρασία T . Εάν δεν χρησιμοποιήσουμε την Εξ. (3.52) για τον ακριβή προσδιορισμό, είναι ικανοποιητική προσέγγιση για το $\bar{c}_{p1,2}$ η τιμή που δίνουν τα πολυώνυμα για τη μέση θερμοκρασία

$$\bar{T}_{1,2} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (3.77)$$

Ομοίως για τον συμπιεστή της ανόδου ισχύει η σχέση:

$$\dot{W}_{Can} = \frac{\dot{m}_{18}}{\eta_{m,Can}} \bar{c}_{p18,19} (T_{19} - T_{18}) \quad (3.78)$$

Ισχύς στροβίλου:

$$\dot{W}_T = \dot{m}_g \eta_{mT} (h_4 - h_5) = \dot{m}_g \eta_{mT} \int_{T_4}^{T_5} c_p dT \approx \dot{m}_g \eta_{mT} \bar{c}_{p4,5} (T_4 - T_5) \quad (3.79)$$

Για το $\bar{c}_{p4,5}$ ισχύουν όσα αναφέρθηκαν για το $\bar{c}_{p1,2}$.

Εάν θεωρήσουμε ότι και οι δύο συμπιεστές κινούνται από τον στρόβιλο, τότε η ισχύς της γεννήτριας δίνεται από τη σχέση

$$\dot{W}_{GT,AC} = (\dot{W}_T - \dot{W}_{Ca} - \dot{W}_{Can}) \eta_{gen} \quad (3.80)$$

Βαθμοί απόδοσης ως προς την ενέργεια του καυσίμου:

Βαθμός απόδοσης στροβιλογεννήτριας:

$$\eta_{GT,AC} = \frac{\dot{W}_{GT,AC}}{\dot{m}_{CH_4} H_{u,CH_4}} \quad (3.81)$$

Ολικός βαθμός απόδοσης του υβριδικού συστήματος:

$$\eta_{HS} = \eta_{MCFC,AC} + \eta_{GT,AC} \quad (3.82)$$

4. ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

4.1 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά για Δεδομένο Σύνολο Τιμών των Βασικών Παραμέτρων

Προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά του ΥΣ αναπτύχθηκαν δύο (2) προγράμματα σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran, ένα για την ΚΚ και ένα για τον Α/Σ, όπου έγινε εφαρμογή των εξισώσεων του 3^{ου} Κεφαλαίου.

4.1.1 Συμπεριφορά της κυψέλης καυσίμου

Μία σημαντική παράμετρος σχεδιασμού της ΚΚ που πρέπει να ορίσουμε προκειμένου να γίνει η ανάλυση, είναι η θερμοκρασία και η τάση λειτουργίας της ΚΚ. Συνήθως η πρώτη κυμαίνεται μεταξύ 600 και 700 °C ενώ η δεύτερη μεταξύ 0.7 και 0.85 V. Στην παρούσα ανάλυση επιλέγεται σαν αντιπροσωπευτική τιμή η θερμοκρασία των 650°C, ενώ η τάση λειτουργίας υπολογίζεται με τη διαδικασία που περιγράφεται στην Ενότητα 3.3. Το αποτέλεσμα δίνεται στον Πίνακα 4.2. Για τη θερμοκρασία αυτή προκειμένου να υπολογιστεί η ηλεκτρεγερτική τάση που αναπτύσσεται στην ΚΚ (Σχ. 3.8), πρέπει να υπολογιστεί η συνάρτηση Gibbs $-\Delta g(P^\circ, T)$. Η διαδικασία υπολογισμού της περιγράφεται στο Παράρτημα Α. Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι τιμές των παραμέτρων σχεδιάσεως για την ΚΚ. Σημειώνεται ότι αρχικά γίνεται υπόθεση ότι η ολική ισχύς λειτουργίας της συστοιχίας είναι 220 kW και η ολική τάση λειτουργίας 220 V, ώστε να υπολογιστούν ο αριθμός των στηλών της συστοιχίας και ο αριθμός των κυψελών κάθε συστοιχίας. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.1 Τιμές παραμέτρων (δεδομένα) για την ΚΚ.

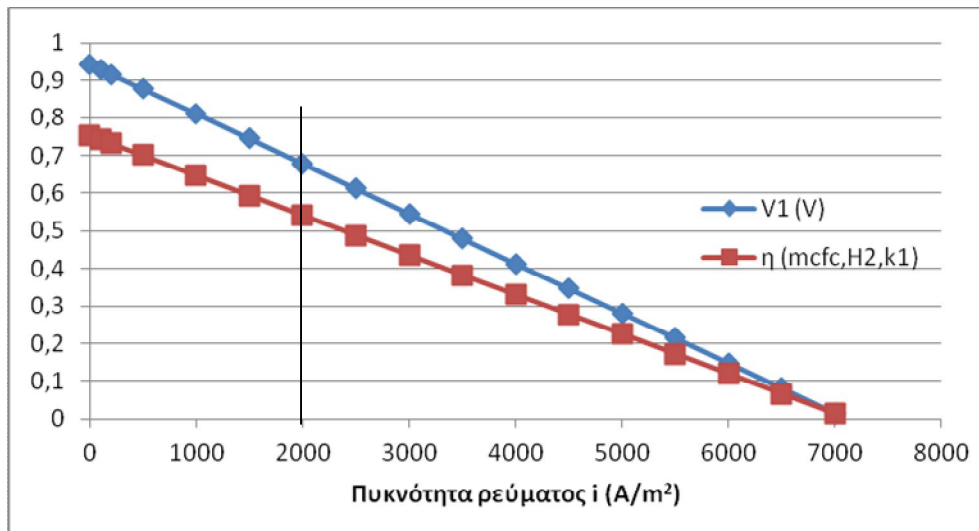
P° (atm)	1
T° (°C)	25
P_{cell} (atm)	1
T_{cell} (°C)	650
Μερική πίεση H_2 στην άνοδο (atm)	0.60
Μερική πίεση CO_2 στην άνοδο (atm)	0.15
Μερική πίεση H_2O στην άνοδο (atm)	0.25
Μερική πίεση O_2 στην κάθοδο (atm)	0.08
Μερική πίεση CO_2 στην κάθοδο (atm)	0.08
i (A/m^2)	2000
A_c (m^2)	0.04
\dot{W}_{MCFC} (kW)	200
$V_{\text{ολ}}$ (V)	220
S/C	2.5
U_f	0.78
η_{conv}	0.96

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα για την ΚΚ.

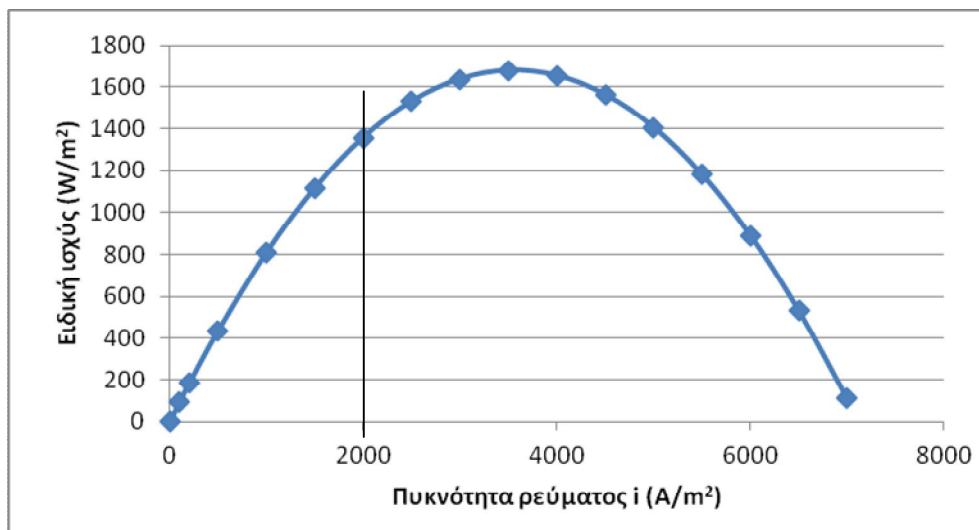
E_{rev} (V)	0,98
V_1 (V)	0,71
I_1 (A)	80
\dot{W}_1 (W)	57,19
$N_{κ,στ}$	308
$N_{στ}$	12
$V_{ολ}$ (V)	220,16
$I_{ολ}$ (A)	960
\dot{W}_{MCFC} (kW)	211,35
$\dot{W}_{MCFC,AC}$ (kW)	202,90
$\dot{n}_{H_2,k1}$ (mol/s)	0,000414572
$\dot{n}_{H_2,in1}$ (mol/s)	0,000531503
$\dot{n}_{MCFC,H_2,k}$ (mol/s)	1,5323
$\dot{n}_{H_2(1g)}$ (mol/s)	1,9644
\dot{n}_{CH_4} (mol/s)	0,4911
$\Pi_{MCFC,H_2,k}$	0,5702
$\Pi_{MCFC,H_2,in}$	0,4447
Π_{MCFC,CH_4}	0,5364
$\Pi_{MCFC,AC}$	0,5149

Για να πετύχουμε μια ικανοποιητική τιμή της τάσης λειτουργίας της ΚΚ (~ 0.7 V) επιλέγουμε πυκνότητα ρεύματος $i = 2000$ (A/m^2). Για αυτή την τιμή η απόδοσή της ως προς την καταναλισκόμενη ποσότητα του H_2 υπολογίζεται στο 0.57. Στο Σχ. 4.1 εξετάζεται η μεταβολή της τάσης λειτουργίας και η απόδοση της ΚΚ συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος, διατηρώντας τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.1, για να επιτευχθούν τιμές τάσεων 0.7 – 0.85 V, η πυκνότητα ρεύματος πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 1000 και 2000 A/m^2 , ενώ στις περιπτώσεις αυτές το εύρος τιμών του βαθμού απόδοσης υπολογίζεται περίπου 0.57 – 0.67. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τάση και ο βαθμός απόδοσης προκύπτουν γραμμικές συναρτήσεις της πυκνότητας ρεύματος, διότι οι εξισώσεις των αντιστάσεων που έχουμε από τη βιβλιογραφία (Εξ. 3.13, 14, 15) αφορούν μόνον τις ωμικές αντιστάσεις, αμελώντας τις απώλειες λόγω ενεργοποίησης (αρχή του διαγράμματος) και λόγω συγκέντρωσης (τέλος του διαγράμματος).

Στο Σχ. 4.2 φαίνεται η ειδική ισχύς μιας ΚΚ συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος. Για $i = 2000$ A/m^2 υπολογίζεται ότι είναι περίπου $\dot{w} = 1,4$ kW/m^2 . Για εύρος τιμών πυκνότητας ρεύματος μεταξύ 1000 και 2000 A/m^2 η τιμή της ειδικής ισχύος κυμαίνεται μεταξύ 0.8 και 1.4 kW/m^2 , ενώ παρουσιάζει μέγιστο για μια περιοχή της πυκνότητας ρεύματος γύρω από το 4000 A/m^2 .



Σχ. 4.1 Τάση λειτουργίας και απόδοση της ΚΚ συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος.



Σχ. 4.2 Ειδική ισχύς \dot{w} (W/m^2) της ΚΚ συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος.

4.1.2 Χαρακτηριστικά του υβριδικού συστήματος

Αντίστοιχα με την ΚΚ στον πίνακα 4.3 φαίνονται οι τιμές των κυρίων παραμέτρων του Α/Σ και των εξαρτημάτων του ΥΣ που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση.

Με δεδομένα όλα όσα προαναφέρθηκαν για την ΚΚ και τα δεδομένα του Πίνακα 4.3, υπολογίζονται μέσω του δεύτερου προγράμματος Fortran οι τιμές των παροχών μαζών σε gr/s (Πίνακας 4.4) και σε mol/s (Πίνακας 4.5) .

Πίνακας 4.3 Παράμετροι αναφοράς για τον Α/Σ και άλλα εξαρτήματα του ΥΣ.

Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.90
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή	0.85
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή ανόδου	0.75
Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.98
Μηχανικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή	0.98
Μηχανικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή ανόδου	0.98
Βαθμός εκμετάλλευσης προθερμαντήρα καυσίμου	0.78
Βαθμός εκμετάλλευσης προθερμαντήρα νερού	0.78
Βαθμός εκμετάλλευσης προθερμαντήρα αέρα	0.78
Συντελεστής χρησιμοποίησης O ₂	0.25
Βαθμός απόδοσης θαλάμου καύσης	0.98
Βαθμός απόδοσης γεννήτριας	0.96

Πίνακας 4.4 Παροχή μαζών στα σημεία του συστήματος σε gr/s.

Σημείο	H ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	CH ₄	Ολική Παροχή
1	0	0	0	104,979	345,578	0	450,556
2	0	0	0	104,979	345,578	0	450,556
3	0	0	0	104,979	345,578	0	450,556
4	0	89,028	39,78	98,064	345,578	0	572,449
5	0	89,028	39,78	98,064	345,578	0	572,449
6	0	21,609	39,78	73,548	345,578	0	480,514
7	0	21,609	39,78	73,548	345,578	0	480,514
8	0	21,609	39,78	73,548	345,578	0	480,514
9	0	21,609	39,78	73,548	345,578	0	480,514
10	0	0	0	0	0	7,858	7,858
11	0	0	0	0	0	7,858	7,858
12	0	0	22,1	0	0	0	22,1
13	0	0	22,1	0	0	0	22,1
14	0	0	22,1	0	0	7,858	29,957
15	0	0	22,1	0	0	7,858	29,957
16	3,929	21,609	4,42	0	0	0	29,957
17	0,864	89,028	32	0	0	0	121,893
18	0,864	89,028	32	0	0	0	121,893
19	0,864	89,028	32	0	0	0	121,893

Προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία στην κάθοδο της ΚΚ, μεταβάλλουμε τον βαθμό εκμετάλλευσης του προθερμαντήρα της ανόδου και τον λόγο πίεσης. Τελικά επιλέγονται οι τιμές $\varepsilon_{an} = 0,54$ και $r_c = 3$. Στον Πίνακα 4.6 δίνονται οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις στα διάφορα σημεία του ΥΣ, ενώ στον πίνακα 4.7 δίνονται οι ισχύες των συμπιεστών και του στροβίλου και η απόδοση του ΥΣ. Ο βαθμός απόδοσης του ΥΣ βλέπουμε ότι φτάνει στο 60%. Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων (σημείο 9) είναι 220°C, αρκετά υψηλή ώστε να μπορεί να γίνει περαιτέρω εκμετάλλευση της θερμότητας αυτής για ανάγκες θέρμανσης.

Πίνακας 4.5 Παροχή γραμμομορίων στα σημεία του συστήματος σε mol/s.

Σημείο	H ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	CH ₄
1	0	0	0	3,28059	12,33501	0
2	0	0	0	3,28059	12,33501	0
3	0	0	0	3,28059	12,33501	0
4	0	2,02336	2,20998	3,0645	12,33501	0
5	0	2,02336	2,20998	3,0645	12,33501	0
6	0	0,49111	2,20998	2,29838	12,33501	0
7	0	0,49111	2,20998	2,29838	12,33501	0
8	0	0,49111	2,20998	2,29838	12,33501	0
9	0	0,49111	2,20998	2,29838	12,33501	0
10	0	0	0	0	0	0,49111
11	0	0	0	0	0	0,49111
12	0	0	1,22776	0	0	0
13	0	0	1,22776	0	0	0
14	0	0	1,22776	0	0	0,49111
15	0	0	1,22776	0	0	0,49111
16	1,96442	0,49111	0,24555	0	0	0
17	0,43217	2,02336	1,7778	0	0	0
18	0,43217	2,02336	1,7778	0	0	0
19	0,43217	2,02336	1,7778	0	0	0

Πίνακας 4.6 Θερμοκρασίες και πιέσεις στα σημεία του ΥΣ για $\varepsilon_{an} = 0,54$ και $r_c = 3$.

ΣΗΜΕΙΟ	T (°C)	T (K)	P (bar)
1	25	298,15	1,01325
2	153,31	426,46	3,03975
3	540,73	813,88	3,03975
4	748,36	1021,51	3,03975
5	540,41	813,56	1,01325
6	650,00	923,15	1,01325
7	335,84	608,99	1,01325
8	323,86	597,01	1,01325
9	220,99	494,14	1,01325
10	25,00	298,15	1,01325
11	267,46	540,61	1,01325
12	25,00	298,15	1,01325
13	258,11	531,26	1,01325
14	262,48	535,63	1,01325
15	471,74	744,89	1,01325
16	650,00	923,15	1,01325
17	650,00	923,15	1,01325
18	578,11	851,26	1,01325
19	804,53	1077,68	3,03975

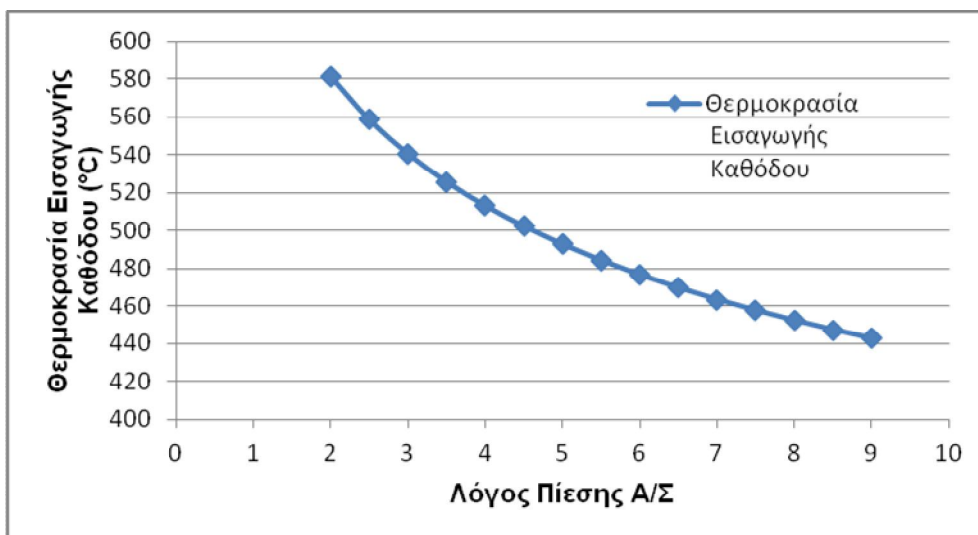
Πίνακας 4.7 Ισχύες συμπιεστών, στροβίλου και βαθμοί απόδοσης A/Σ και ΥΣ.

W_{ca} (kW)	59,87779
W_{can} (kW)	44,94673
W_T (kW)	142,7064
$W_{GT,AC}$ (kW)	36,36665
$\eta_{GT,AC}$	0,0923
$\eta_{HS,AC}$	0,6072

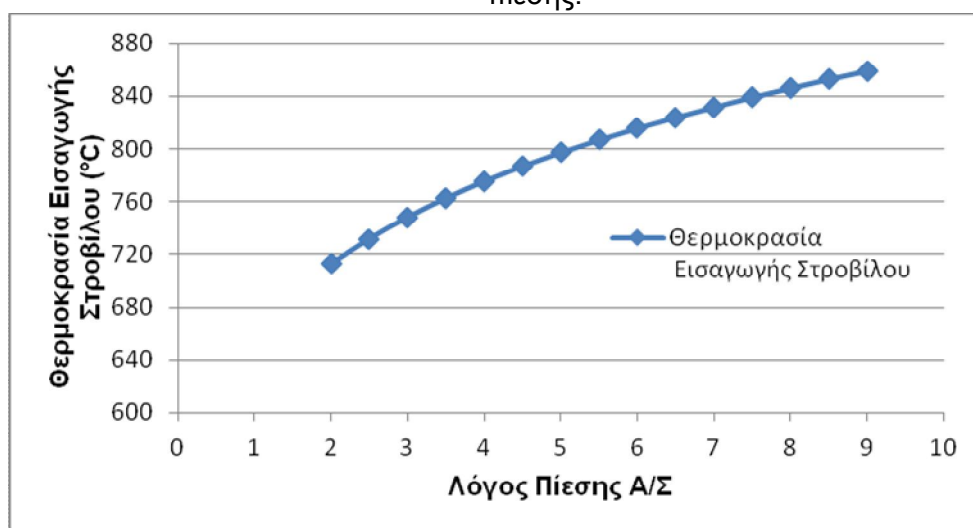
4.2 Διερεύνηση της Επίδρασης Ορισμένων Παραμέτρων στη Συμπεριφορά του Συστήματος

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει ανάλυση ορισμένων παραμέτρων στην συμπεριφορά του ΥΣ. Πρώτα εξετάζεται μια σειρά από σημαντικές θερμοκρασίες. Στο Σχ.4.3 φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας εισαγωγής στην κάθοδο συναρτήσει του λόγου πίεσης. Όσο αυξάνεται ο λόγος πίεσης, η ΘΕΚ μειώνεται εξαιτίας της εκτόνωσης που λαμβάνει χώρα στον στρόβιλο. Όσο αυξάνεται ο λόγος πίεσης τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασιακή πτώση μετά τον στρόβιλο. Όπως φαίνεται και στο Σχ.4.3, για ένα μικρό εύρος λόγων πιέσεων (γύρω στο 3) επιτυγχάνεται η θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί η ΚΚ (540°C).

Μία άλλη σημαντική παράμετρος του ΥΣ, είναι η θερμοκρασία εισαγωγής του στροβίλου, η μεταβολή της οποίας φαίνεται στο Σχ.4.4. Αυξάνοντας τον λόγο πίεσης, αυξάνεται και η ΘΕΣ, και αυτό γιατί η θερμοκρασία εξαγωγής του συμπιεστή επηρεάζει άμεσα την ΘΕΣ. Υψηλότερος λόγος πίεσης έχει σαν αποτέλεσμα υψηλότερη θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή, άρα και υψηλότερη θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου.

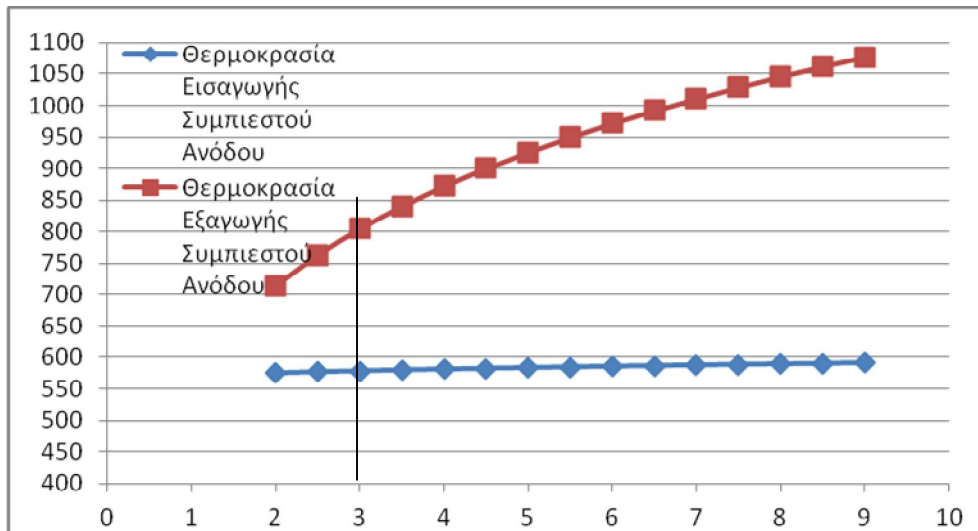


Σχ.4.3 Μεταβολή της θερμοκρασίας εισαγωγής της καθόδου συναρτήσει του λόγου πίεσης.



Σχ.4.4 Μεταβολή της θερμοκρασίας εισαγωγής του στροβίλου συναρτήσει του λόγου πίεσης.

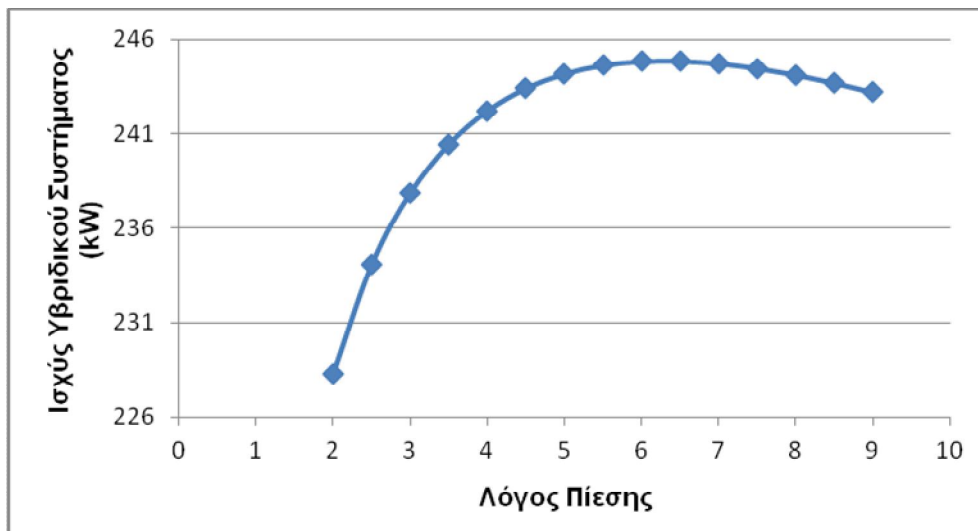
Αρκετά σημαντική είναι η σχεδίαση του συμπιεστή της ανόδου καθώς η θερμοκρασία εξαγωγής του είναι η υψηλότερη που αναπτύσσεται στην διάταξη. Στο Σχ.4.5 φαίνεται η εξάρτηση των θερμοκρασιών εισαγωγής και εξαγωγής του συμπιεστού ανόδου συναρτήσει του λόγου πίεσης. Η θερμοκρασία εισαγωγής βλέπουμε ότι διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα (τιμές μεταξύ 520-600°C) και αυτό χάρη στον εναλλάκτη θερμότητας που έχει τοποθετηθεί στην έξοδο της ανόδου, διαφορετικά τα απαέρια της ανόδου θα εισέρχονταν κατευθείαν στον συμπιεστή της ανόδου σε θερμοκρασία 650°C, όσο και η θερμοκρασία λειτουργίας της ΚΚ. Από την άλλη η θερμοκρασία εξαγωγής του συμπιεστή είναι λογικό να αυξάνεται αναλογικά με τον λόγο πίεσης. Για λόγο πίεσης 3 η θερμοκρασία εξαγωγής του συμπιεστή φτάνει τους 800°C, ενώ για μεγαλύτερους λόγους πίεσεως ξεπερνάει τους 1000°C. Οπότε απαιτείται ένας βοηθητικός συμπιεστής που να λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες, το υλικό του οποίου θα πρέπει να βασίζεται σε κράματα υψηλών θερμοκρασιών



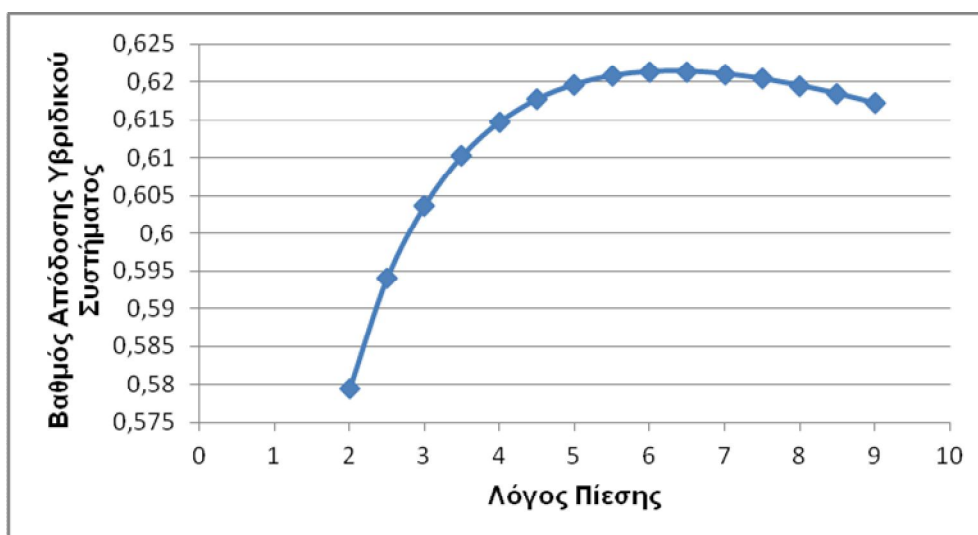
Σχ.4.5 Μεταβολή της θερμοκρασίας εισαγωγής και εξαγωγής συμπιεστού ανόδου συναρτήσει του λόγου πίεσης

Στα Σχ.4.6 και 4.7 φαίνονται οι μεταβολές της ισχύος και του βαθμού απόδοσης του υβριδικού συστήματος συναρτήσει του λόγου πίεσης. Τόσο ο βαθμός απόδοσης όσο και η ισχύς του στροβίλου αυξάνονται με την αύξηση του λόγου πίεσης, αρχικά με αυξανόμενο ρυθμό, κατόπιν σταθεροποιείται και για μεγάλους λόγους πίεσεως αρχίζει να μειώνεται. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος μπορεί να φτάσει ακόμη και το 63% για ένα σχετικά μεγάλο εύρος λόγων πίεσεως (5-7). Για λόγο πίεσεως 3, όπου επιτυγχάνεται η επιθυμητή θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί η ΚΚ όπως προαναφέρθηκε, έχουμε απόδοση περίπου 60% και ισχύ εξόδου 235 kW. Η ισχύς αυτή μπορεί να καλύψει τις ανάγκες παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος σε ένα πολεμικό πλοίο οι οποίες βέβαια ποικίλουν ανάλογα με το είδος του πλοίου και την επιχειρησιακή του κατάσταση. Για παράδειγμα, σε ένα αρματαγωγό τ.ΣΑΜΟΣ, που διαθέτει το Πολεμικό Ναυτικό σήμερα, οι ανάγκες ηλεκτρικής ισχύος κατά τον συνήθη πλου είναι περίπου 120 kW, κατά την προσγίαση, την άπαρση

και την παραβολή ανέρχεται στα 150 kW ενώ σε κατάσταση γενικού συναγερμού (εν καιρώ πολέμου) ανέρχεται στα 180 kW.



Σχ. 4.6 Μεταβολή της ισχύος του ΥΣ συναρτήσει του λόγου πίεσης



Σχ. 4.7 Μεταβολή του βαθμού απόδοσης του ΥΣ συναρτήσει του λόγου πίεσης

4.3 Σχόλια – Συμπεράσματα

Στην παρούσα ανάλυση μελετήθηκε ένα ΥΣ που αποτελείται από μια ΚΚΤΑΑ και έναν Α/Σ. Η συγκεκριμένη δομή επιλέχθηκε λόγω του υψηλού βαθμού απόδοσης, σύμφωνα με δημοσιευμένα άρθρα. Ακολούθησε λεπτομερής καταγραφή των εξισώσεων που περιγράφουν τη λειτουργία του συστήματος καθώς και τη διαδικασία υπολογισμού των παροχών και των θερμοκρασιών στα διάφορα σημεία του συστήματος. Με βάση τα δεδομένα αυτά, αναπτύχθηκαν δύο προγράμματα σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Το πρώτο υπολογίζει τις τιμές παραμέτρων της ΚΚ, καθώς και την παροχή του μεθανίου που απαιτείται, έχοντας ως δεδομένα τα περιεχόμενα του Πίνακα 4.1. Το δεύτερο πρόγραμμα υπολογίζει τις τιμές των παραμέτρων του Α/Σ και των παροχών και

θερμοκρασιών στα διάφορα σημεία του συστήματος, έχοντας ως είσοδο την παροχή του μεθανίου από το προηγούμενο πρόγραμμα και τα δεδομένα του Πίνακα 4.3. Συνοψίζοντας έχουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Αυξάνοντας τον λόγο πίεσης, η θερμοκρασία εισαγωγής της καθόδου μειώνεται, ενώ η θερμοκρασία εισαγωγής του στροβίλου αυξάνεται.
- Η θερμοκρασία εισαγωγής του συμπιεστού της ανόδου παραμένει σταθερή αυξάνοντας τον λόγο πίεσης, ενώ η θερμοκρασία της εξαγωγής του αυξάνεται.
- Για $r_c=3$ ο βαθμός απόδοσης ανέρχεται περίπου στο 60%, ενώ η ισχύς εξόδου του συστήματος είναι 236 kW, τιμές οι οποίες είναι δυνατόν να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες ηλεκτρικής ισχύος σε πλοία.

5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Γενικά Συμπεράσματα

Από την αναζήτηση που έγινε στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, μπορούμε να πούμε ότι υπάρχουν πολλές τέτοιου είδους υβριδικές διατάξεις που συνδυάζουν Α/Σ με ΚΚ είτε τηγμένων ανθρακικών αλάτων είτε στερεού οξειδίου που έχουν εφαρμοστεί κυρίως σε κτίρια μικρού μεγέθους. Αν σκεφτεί κανείς τη θερμοκρασία λειτουργίας του Α/Σ και των συγκεκριμένων ΚΚ, γίνεται αντιληπτό ότι μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους. Έχει διασαφηνιστεί ότι η απόδοση τέτοιου είδους διατάξεων μπορεί να φτάσει ή και να ξεπεράσει ακόμη και το 60%. Χάρη στις υψηλές αυτές αποδόσεις και τις χαμηλές εκπομπές ρύπων, η εξέλιξη της τεχνολογίας αυτής έχει τραβήξει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Παρόλο το κόστος που παρουσιάζουν τα συστήματα αυτά, όπως το κόστος εγκατάστασης, το υψηλό κόστος των μικρο-Α/Σ που χρησιμοποιείται σε μερικά από αυτά αλλά και των ιδιαίτερων υλικών που απαιτούνται λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών, γίνεται περαιτέρω έρευνα για την εφαρμογή τους.

5.2 Προτάσεις για Βελτίωση και Επέκταση της Εργασίας

Λόγω έλλειψης χρόνου, χρειάστηκε να γίνουν ορισμένες παραδοχές προκειμένου να ολοκληρωθεί η εργασία, οι οποίες είχαν ως συνέπεια τις αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν εδώ και εκείνων της βιβλιογραφίας. Ακολουθούν ορισμένες προτάσεις για βελτίωση και περαιτέρω επέκταση της εργασίας.

- Κύρια αιτία των αποκλίσεων ήταν το απλοποιημένο μοντέλο προσομοίωσης της ΚΚ, συμπεριλαμβανομένου του αναμορφωτή. Η ανάπτυξη λεπτομερέστερου μοντέλου είναι μία από τις σημαντικότερες βελτιώσεις.
- Κατά την ανάλυση η θερμοκρασία εισαγωγής της ΚΚ θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 540°C. Στην πραγματικότητα αυξάνοντας τον λόγο πίεσης η θερμοκρασιακή διαφορά στην κυψέλη γίνεται μεγαλύτερη. Αυτό εξηγείται ως εξής: θεωρώντας τη θερμοκρασία στην έξοδο της κυψέλης (σημείο 6 του Σχ. 3.1) και στην έξοδο του θαλάμου καύσεως (σημείο 5) σταθερή, αυξάνοντας τον λόγο πίεσης μειώνεται η θερμοκρασία εξαγωγής του στροβίλου (σημείο 5) όπως προαναφέρθηκε στο διάγραμμα του Σχ. 4.3, άρα αυξάνεται και η θερμοκρασιακή διαφορά της κυψέλης, καθώς η θερμοκρασία λειτουργίας της είναι σταθερή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη απαίτηση σε καύσιμο άρα και παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος από την ΚΚ. Με την ανάπτυξη λεπτομερέστερου μοντέλου προσομοίωσης, η παραδοχή αυτή μπορεί να αναιρεθεί.
- Αν και στην παρούσα εργασία αντικείμενο μελέτης αποτέλεσε σύστημα που προτάθηκε σε συγκεκριμένο άρθρο, τέθηκαν από την αρχή διαφορετικοί στόχοι (διαφορετικά δεδομένα και ζητούμενα). Όταν είναι διαθέσιμο ένα λεπτομερέστερο μοντέλο προσομοίωσης για την ΚΚ, είναι σκόπιμο να μελετηθεί πρώτα το πρόβλημα όπως τίθεται στο άρθρο, ώστε να μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα, και μετά να μελετηθούν παραλλαγές του.

- Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων στην έξοδο του συστήματος (σημείο 9 του Σχ. 3.1) ανέρχεται στους 220°C, θερμοκρασία αρκετά υψηλή ώστε να μπορεί να γίνει περαιτέρω εκμετάλλευση της θερμότητας αυτής για κάλυψη αναγκών θέρμανσης.
- Λεπτομερέστερο μοντέλο προσομοίωσης μπορεί επίσης να αναπτυχθεί και για το ζεύγος συμπιεστή-στροβίλου, αν και αυτό δεν φαίνεται να είναι τόσο κρίσιμης σημασίας για τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος, όσο το μοντέλο της ΚΚ και του αναμορφωτή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ GIBBS

Στο παράρτημα αυτό υπολογίζεται η συνάρτηση Gibbs για την αντίδραση Α.1 στους $650^{\circ}\text{C} = 923,15 \text{ K}$.



Η συνάρτηση Gibbs δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και τη φάση (υγρή ή αέρια), και καθορίζεται από την εντροπία και την ενθαλπία σύμφωνα με τη σχέση

$$G = H - TS \quad (\text{A.2})$$

ενώ η γραμμομοριακή συνάρτηση δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{g} = \bar{h} - T\bar{s} \quad (\text{A.3})$$

Η μεταβολή της συνάρτησης Gibbs από τα αντιδρώντα σώματα στο προϊόν της αντίδρασης γράφεται:

$$\Delta\bar{g} = \Delta\bar{h} - T\Delta\bar{s} \quad (\text{A.4})$$

Η τιμή του $\Delta\bar{h}$ είναι η διαφορά μεταξύ της ενθαλπίας των προϊόντων και της ενθαλπίας των αντιδρώντων. Έτσι για την Εξ. (Α.1) έχουμε:

$$\Delta\bar{h} = (\bar{h})_{\text{H}_2\text{O}} - (\bar{h})_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(\bar{h})_{\text{O}_2} \quad (\text{A.5})$$

Ομοίως η τιμή του $\Delta\bar{s}$ είναι η διαφορά της εντροπίας των προϊόντων και των αντιδρώντων. Έτσι έχουμε:

$$\Delta\bar{s} = (\bar{s})_{\text{H}_2\text{O}} - (\bar{s})_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(\bar{s})_{\text{O}_2} \quad (\text{A.6})$$

Η γραμμομοριακή ενθαλπία σε θερμοκρασία T δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{h}_T = \bar{h}_{T_0} + \int_{T_0}^T \bar{c}_p dT \quad (\text{A.7})$$

ενώ η γραμμομοριακή εντροπία από τη σχέση:

$$\bar{s}_T = \bar{s}_{T_0} + \int_{T_0}^T \frac{1}{T} \bar{c}_p dT \quad (\text{A.8})$$

όπου T_0 θερμοκρασία αναφοράς: $T_0 = 298.15 \text{ K}$,
 \bar{h}_{T_0} ενθαλπία σχηματισμού στη θερμοκρασία T_0 .

Οι τιμές της γραμμομοριακής ενθαλπίας σχηματισμού και της εντροπίας στη θερμοκρασία των 298.15 K περιέχονται στον Πίνακα Α.1 και είναι για σταθερή πίεση.

Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι Εξ. (Α.7 και Α.8), πρέπει να γνωρίζουμε την τιμή της γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας \bar{c}_p σε σταθερή πίεση. Για διευκόλυνση, γράφονται και εδώ οι εξισώσεις που δίνονται στον Πίνακα 3.1, οι οποίες έχουν ακρίβεια 0.4 - 0.6% για ένα εύρος θερμοκρασιών 300 - 3500 K.

Για τον ατμό ισχύει:

$$\bar{c}_p = 143.05 - 183.54 \theta^{0.25} + 82.751 \theta^{0.5} - 3.6989 \theta \quad (\text{A.9})$$

Για το υδρογόνο, H₂:

$$\bar{c}_p = 56.505 - 702.74 \theta^{-0.75} + 1165 \theta^{-1} - 560.7 \theta^{-1.5} \quad (\text{A.10})$$

Για το οξυγόνο, O₂

$$\bar{c}_p = 37.432 + 0.020102 \theta^{1.5} - 178.57 \theta^{-1.5} + 236.88 \theta^{-2} \quad (\text{A.11})$$

όπου $\theta = T(\text{Kelvin})/100$.

Πίνακας Α.1 Τιμές του \bar{h}_T σε J mol⁻¹ και του \bar{s}_T σε J mol⁻¹ K⁻¹, σε θερμοκρασία 298.15 K, για την ΚΚ [Blomen and Mugerwa (1993)].

	\bar{h}_T	\bar{s}_T
H ₂ O (ατμός)	-241.838	188.83
H ₂	0	130.59
O ₂	0	205.14

Ολοκληρώνοντας τις Εξ. (Α.7) και (Α.8) μέχρι τη θερμοκρασία λειτουργίας της ΚΚ (923.15 K) για κάθε ένα συστατικό ξεχωριστά, έχουμε τα αποτελέσματα του Πίνακα Α.2.

Πίνακας Α.2 Τιμές του \bar{h}_T σε J mol⁻¹ και του \bar{s}_T σε J mol⁻¹ K⁻¹, σε θερμοκρασία 923.15 K, για την ΚΚ.

	\bar{h}_T	\bar{s}_T
H ₂ O (ατμός)	-218947.20	229.4812
H ₂	18344.85	163.6762
O ₂	20040.95	240.8066

Εφαρμόζοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα Α.2 στις Εξ. (Α.5) και (Α.6) έχουμε:

$$\Delta \bar{h} = -247312.53 \text{ J/mol}$$

$$\Delta \bar{s} = -54.5984 \text{ J/mol K}$$

Εφαρμόζοντας τελικά τα αποτελέσματα αυτά στην Εξ. (A.4) υπολογίζεται η γραμμομοριακή συνάρτηση Gibbs στη θερμοκρασία 923.15 K για την αντίδραση (A.1):

$$\Delta \bar{g}_i = -196910.0313 \text{ J/mol}$$

Βιβλιογραφία

Arato E. et al. (2001), *"Preliminary experimental and theoretical analysis of limit performance of molten carbonate fuel cells"*, Journal of Power Sources, Vol. 102, pp 74-81.

Bensai S. et al. (2009), *"MCFC-based marine APU: Comparison between conventional ATR and cracking coupled with SR integrated inside the stack pressurized vessel"*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp 2026-2042.

Blomen and Mugerwa (1993), *"Fuel Cell Systems"*, Plenum Press, New York

Breeze P. (2005), *"Power Generation Technologies"*, Newnes

Grillo O., Magistri L., Massardo A.F. (2003), *"Hybrid systems for distributed power generation based on pressurization and heat recovering of an existing 100 kW molten carbonate fuel cell"*, Journal of Power Sources, Vol. 115, pp 252-267

Kimijita S. and Kasagi N. (2005), *"Cycle Analysis of Micro Gas Turbine-Molten Carbonate Fuel Cell Hybrid System"*, JSME International Journal, Series B, Vol. 48, No1, pp 65-71.

Milewski J., Bernat R. and Lewandowski J., (2012), *"Reducing CO₂ Emissions from a Gas Turbine Power Plant by using a Molten Carbonate Fuel Cell"*, Proceedings of the World Congress on Engineering 2012, Vol. III, July 4-6, London, U.K.

Oh K.S. and Kim T.S. (2006), *"Performance analysis on various layouts for the combination of an ambient pressure molten carbonate fuel cell and a gas turbine"*, Journal of Power Sources, Vol. 158, pp 455-463.

Xiuqin Zhang, Juncheng Guo, Jincan Chen (2012), *"Influence of multiple irreversible losses on the performance of a molten carbonate fuel cell-gas turbine hybrid system"*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 27, pp 8664-8671.

Van Wylen G. J., and Sonntag R. E. (1978), *"Fundamentals of Classical Thermodynamics"*, 2nd. ed., J. Wiley & Sons, New York

Φραγκόπουλος Χ.Α. (2006), *"Προηγμένα Ναυτικά και Θαλάσσια Ενεργειακά Συστήματα"*, ΕΜΠ, Αθήνα.

