



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

*Μελέτη μειγμάτων διοξειδίου του άνθρακα σε κλειστό κύκλο
Brayton για παραγωγή ισχύος.*



Φοιτητής: Κερασίδης Μιχαήλ

AM:04132

Επιβλέπων Καθηγητής: Σαρρής Ιωάννης

Αθήνα,
Μάρτιος 2021

Εξεταστική Επιτροπή

Ioannis Sarris Digitally signed by Ioannis Sarris
Date: 2021.03.04 18:56:26 +02'00'

Ιωάννης Σαρρής

Καθηγητής

Emmanouil Proestakis Digitally signed by Emmanouil Proestakis
Date: 2021.03.04 23:52:42 +02'00'

Εμμανουήλ Προεστάκης

Λέκτορας Εφαρμογών

Zoi Kanetaki Digitally signed by Zoi Kanetaki
Date: 2021.03.05 09:32:07 +02'00'

Ζωή Κανετάκη

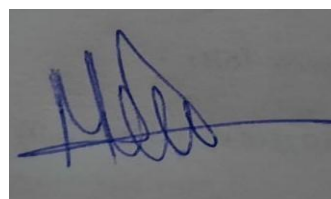
Λέκτορας Εφαρμογών

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κερασίδης Μιχαήλ του Ευάγγελου, με αριθμό μητρώου 04132 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».



Ο Δηλών

Περιεχόμενα

Λίστα εικόνων	6
Λίστα Πινάκων	7
Περίληψη	7
Κεφάλαιο 1	8
Εισαγωγή.....	8
Κεφάλαιο 2	10
2.1 CO ₂ ως ρευστόλειτουργίας.....	10
2.2 Κύκλοι ισχύος υπερκρίσιμου CO ₂	12
2.3 Κύκλοι sCO ₂ Brayton κλειστού βρόχου με έμμεση πυροδότηση	13
2.3.1. Απλός κύκλος Brayton κλειστού βρόχου	13
2.3.2 Κλειστός κύκλος Brayton με αναγέννηση.....	14
2.5 sCO ₂ σε εφαρμογές παραγωγής ενέργειας - Κύρια οφέλη	18
Κεφάλαιο 3 Τεχνικές προκλήσεις	20
3.1 Τρέχουσα ετοιμότητα τεχνολογίας	20
3.2 Ανάγκες E & A	20
3.2.1 Στροβιλομηχανές.....	20
3.3 Αναγεννητές (Recuperators)	22
3.3.1 Καυστήρας και θερμαντήρας CO ₂	23
3.4 Υλικά.....	25
3.5 Ενσωμάτωση συστήματος	27
3.6 Άλλες ανάγκες E & A	28
Κεφάλαιο 4 Μείγματα sCO ₂	30
Εισαγωγή.....	30
4.1 Εφαρμογές στην Ηλιακή ενέργεια	31
4.2 Εφαρμογές στην Πυρηνική ενέργεια	38
4.3 Εφαρμογές στη Γεωθερμία	42
4.4 Εφαρμογές παραγωγής ενέργειας μέσω άνθρακα	48
4.5 Εφαρμογές παραγωγής ενέργειας μέσω βιομάζας.....	49
Κεφάλαιο 5	52
5.1 Επίδραση των μειγμάτων στον εξοπλισμό παραγωγής ενέργειας.....	52
Κεφάλαιο 6 Έρευνα και ανάπτυξη	56
6.1 Στροβιλομηχανές.....	56
6.2 Συμπιεστής.....	58

6.3	Εναλλάκτες θερμότητας.....	59
6.3.1	Εναλλάκτης θερμότητας τυπωμένου κυκλώματος (PCHE)	59
6.3.2	Εναλλάκτης θερμότητας πλάκας (PFHE).....	62
6.3.3	Εναλλάκτες θερμότητας από χυτοσίδηρο (CMHE).....	65
6.3.4	Κεραμικοί εναλλάκτες θερμότητας μικροδιαύλων (CHE).....	66
6.4	Υλικά.....	68
6.5	Καυστήρας καυσίμου.....	70
6.6	Άλλες εξελίξεις	74
Κεφάλαιο 7	76
7.1	Συμπεράσματα.....	76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	78

Λίστα εικόνων

Εικόνα 1: Διάγραμμα Φάσης CO ₂	10
Εικόνα 2: Ανοικτός και κλειστός απλός κύκλος Brayton έμμεσης πυροδότησης [7]	14
Εικόνα 3:Κλειστός κύκλος Brayton με αναγέννηση [7]	15
Εικόνα 4: Κλειστός κύκλος Brayton αναγέννησης και επανασυμπίεσης [10].....	16
Εικόνα 5: Ημικλειστός κύκλος Brayton άμεσης πυροδότησης καύσης οξυγόνου [12]	17
Εικόνα 6: Εύρος εφαρμογής για Βασικά εξαρτήματα και χαρακτηριστικά στροβιλομηχανών κύκλου Brayton [15]	21
Εικόνα 7: Στο (a) κατασκευασμένος εναλλάκτης υποκλίμακα, (b) ωρολογιακής φοράς διάταξη εναλλάκτη (c) Είσοδοι θερμού ρευστού και ψυχρού ρευστού[16]	23
Εικόνα 8: Διάταξη καυστήρα για CO ₂ [20]	25
Εικόνα 9: Μείωση του κόστους με τη χρήση των προαναφερθέντων μειγμάτων [31]	34
Εικόνα 10: Απόδοση του κύκλου για τα διαφορετικά μείγματα.....	34
Εικόνα 11: α) οι κρίσιμες θερμοκρασίες σαν συνάρτηση του μοριακού κλάσματος των προσθέτων αερίου β) κρίσιμη πίεση σαν συνάρτηση του μοριακού κλάσματος των προσθέτων αερίου [34].	36
Εικόνα 12: Η κρίσιμη πίεση και οι κρίσιμες θερμοκρασίες και σαν συνάρτηση του μοριακού κλάσματος των προσθέτων αερίου [35].....	38
Εικόνα 13: Διακύμανση της κρίσιμης πίεσης του μίγματος έναντι του γραμμομοριακού κλάσματος των προσθέτων αερίων [36]	40
Εικόνα 14: Διακύμανση της κρίσιμης θερμοκρασίας του μίγματος έναντι του γραμμομοριακού κλάσματος των προσθέτων αερίων [36]	41
Εικόνα 15: Απλοποιημένο Εικόνα μιας πιθανής διάταξης CPG [39].....	45
Εικόνα 16: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης συμπαραγωγής ενέργειας από γεωθερμία και ηλιακή ενέργεια [40]	46
Εικόνα 17: Κύκλος S-CO ₂ με αναθέρμανση σε εργοστάσιο παραγωγής με άνθρακα. [43] ...	49
Εικόνα 18: σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης βιοαερίου sCO ₂ [44]	50
Εικόνα 19: Στροβιλομηχανές sCO ₂ εργαστηριακής κλίμακας και υποσυστήματα [47]	56
Εικόνα 20: Ο σχεδιασμός στροβίλου υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας 10 MWe αναπτύχθηκε για CSP [48]	57
Εικόνα 21 Παραδείγματα του σχεδιασμού PCHE	61
Εικόνα 22: Εξαρτήματα του εναλλάκτη θερμότητας περυγίου με συγκολλημένη πλάκα ...	63
Εικόνα 23: Συνιστώμενη σχεδίαση PFHE [54].....	64
Εικόνα 24: Σύγκριση μονάδας εναλλάκτη θερμότητας με συρματοπλεγμα και κυψέλης κυματοειδούς περυγίου με ίδια χωρητικότητα	64
Εικόνα 25: Μια αντίστροφη περιστρεφόμενη διπλή ελικοειδής γεωμετρία που προτείνεται για χρήση σε CMHE μεταξύ δύο παρόμοιων υγρών: κόκκινα κανάλια για θερμή ροή και μπλε για κρύα ροή [53]	65
Εικόνα 26: Σύγκριση των σταδίων επεξεργασίας πλακών που εμπλέκονται στην παραγωγή PFHE με χρήση πλακών συγκόλλησης ή απευθείας χύτευσης [53]	66
Εικόνα 27: Παραδείγματα διαθέσιμων χαρακτηριστικών σε σχέδια μικροδιαύλων [55]	67
Εικόνα 28: Το σύστημα δοκιμής καύσης οξυγόνου 30 MPa της Toshiba [49].....	71

Εικόνα 29: Σχεδιασμός καυστήρα Oxyfuel που αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο του Τέξας [60].....	72
Εικόνα 30: Σχεδίαση για ένα μπεκ ψεκασμού [60]	73
Εικόνα 31: Ο υπερκρίσιμος καυστήρας οξυγόνου τύπου στροβιλισμού για στερεά καύσιμα [60].....	74

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Πιθανές εφαρμογές για μετατροπή ισχύος sCO ₂ [8].....	18
Πίνακας 2: Θερμοδυναμικές ιδιότητες TiCl ₄ και N ₂ O ₄ /NO ₂	33
Πίνακας 3: Δεδομένα θερμοδυναμικών ιδιοτήτων με αναφορά στις βάσεις δεδομένων Aspen και GESTIS [32][33]	35
Πίνακας 4: Λεπτομερής σύγκριση του καθαρού κύκλου CO ₂ και του μίγματος κύκλου CO ₂ / Βουτανίου	43
Πίνακας 5: Ιδιότητες μειγμάτων He, Kr, CH ₄ και C ₂ H ₆	54

Περίληψη

Οι κλειστοί κύκλοι Brayton με εργαζόμενο ρευστό το διοξείδιο του άνθρακα αποτελούν εναλλακτική λύση για θερμικούς σταθμούς παραγωγής ισχύος. Στο πλαίσιο της εργασίας αρχικά θα παρουσιαστούν οι ανάγκες για Έρευνα & Ανάπτυξη των επιμέρους συστημάτων των θερμικών σταθμών παραγωγής ισχύος (Στροβιλομηχανές, Αναγεννητές, Εναλλάκτες κλπ). Στην συνέχεια θα επικεντρωθούμε σε μείγματα διοξειδίου του άνθρακα τα οποία όπως θα δούμε αναλυτικά παρακάτω, λόγω της αλλαγής που προκύπτει στην κρίσιμη πίεση αλλά και θερμοκρασία κυρίως, μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη-βελτιωμένη απόδοση του κύκλου. Ακόμα υπάρχει αλλαγή στο ιξώδες και στην πυκνότητα του μίγματος. Η υψηλή πυκνότητα που προκύπτει σημαίνει ότι όλα τα στοιχεία του συστήματος θα είναι πολύ μικρότερα, οδηγώντας σε μειωμένο αποτύπωμα εγκαταστάσεων και δυνητικά σε χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου. Τέλος μειώνεται σημαντικά η εκπομπή ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Από το τέλος του προηγούμενου αιώνα έχει δοθεί μεγάλη σημασία στην ελαχιστοποίηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), για τον έλεγχο της κλιματικής αλλαγής. Η συμφωνία του Παρισιού, η οποία τέθηκε σε ισχύ στις 4 Νοεμβρίου 2016, στοχεύει στο να περιορίσει την υπερθέρμανση του πλανήτη πολύ κάτω από τους 2°C (1,5°C εάν είναι δυνατόν), σε σύγκριση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα, και να φτάσει σε παγκόσμια κορυφή εκπομπών αερίων θερμοκηπίου GHG(Greenhouse Gas)το συντομότερο δυνατό. Για την επίτευξη αυτών των στόχων, κάθε μέρος της συμφωνίας πρέπει να ορίσει έναν φιλόδοξο εθνικό στόχο μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και να λάβει συγκεκριμένα μέτρα για να εξασφαλίσει την επίτευξη του στόχου.

Μια σημαντική πηγή CO₂ στην ατμόσφαιρα είναι από την καύση άνθρακα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο άνθρακας προμηθεύει σήμερα το 40% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας και θα παραμείνει μια σημαντική πηγή ενέργειας για το άμεσο μέλλον, επομένως η περαιτέρω βελτίωση της αποτελεσματικότητας, του ελέγχου των εκπομπών και του κόστους παραμένει ζωτικής σημασίας. Πρόσφατα, η ανάπτυξη τεχνολογιών παραγωγής άνθρακα υψηλής απόδοσης, χαμηλών εκπομπών σημείωσε σημαντική πρόοδο και η δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα CCS (carbon capture storage)θα μπορούσε επίσης να μειώσει σημαντικά το CO₂ στις εκπομπές. Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA, 2016) προβλέπει ότι για τον έλεγχο της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας σε λιγότερο από 2 °C, απαιτείται CCS για το 12% του παγκόσμιου αθροιστικού CO₂ και μείωση των εκπομπών έως το 2050. Η Σύμβαση-πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την αλλαγή του κλίματος εκτιμά ότι, χωρίς CCS, το κόστος επίτευξης αυτού του παγκόσμιου στόχου θα αυξηθεί κατά 138% (IPCC, 2014).

Υπήρξαν εκτεταμένες δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης για τη βελτίωση του κόστους των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και

της συνολικής αποτελεσματικότητας. Εξετάζονται επίσης εναλλακτικές διαδικασίες καύσης ή / και κύκλοι ισχύος. Για σταθμούς παραγωγής ενέργειας αυτές οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν προηγμένους στροβίλους, καύση οξυκαυσίμων, υπερκρίσιμο CO₂ (sCO₂) κύκλοι ισχύος και ανθεκτικά υλικά υψηλής θερμοκρασίας.

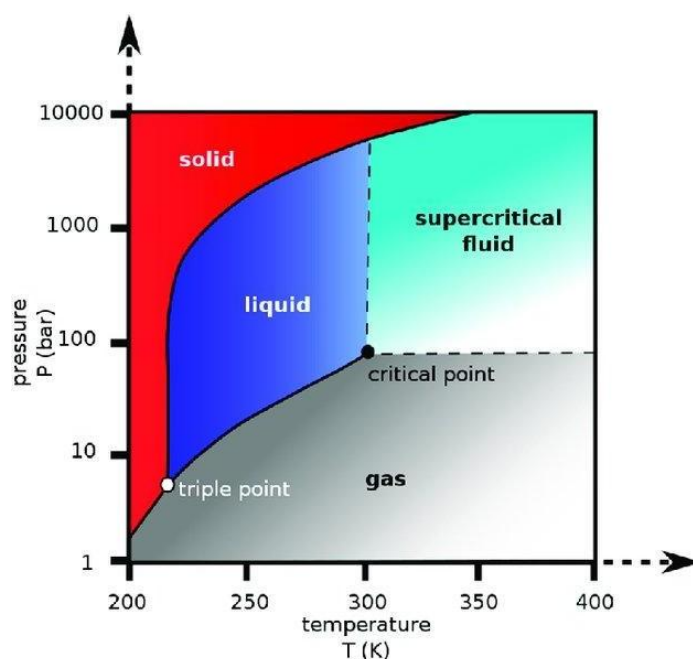
Ο κύκλος ισχύος sCO₂ χρησιμοποιεί υπερκρίσιμο CO₂ ως το εργαζόμενο ρευστό σε έναν θερμοδυναμικό κύκλο Brayton (βασικά, ο κύκλος που χρησιμοποιείται σε ένα στρόβιλο αερίου). Αποτελέσματα από διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι αυτά τα συστήματα έχουν τη δυνατότητα να επιτύχουν υψηλότερη απόδοση από τους κύκλους ατμού που λειτουργούν μεταξύ των ίδιων μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών. Η υψηλότερη απόδοση οδηγεί σε χαμηλότερες εκπομπές όλων των ρύπων, συμπεριλαμβανομένου του CO₂. Η υψηλή πυκνότητα του ρευστού εργασίας θα οδηγήσει επίσης σε μικρότερο εξοπλισμό, και έτσι θα μειώσει το κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας.

Για την ανάπτυξη κύκλων sCO₂ που είναι εμπορικά και τεχνικά βιώσιμοι και οικονομικά ανταγωνιστικοί, πρέπει να αντιμετωπιστούν ορισμένες προκλήσεις τεχνικής, μηχανικής και επιστήμης υλικών. Αυτή η εργασία διερευνά τις τρέχουσες καταστάσεις έρευνας, ανάπτυξης, για τους κύκλους sCO₂. Ξεκινά με την ανάλυση των κύκλων ισχύος υπερκρίσιμου CO₂. Στο Κεφάλαιο 3 συζητούνται οι τεχνικές προκλήσεις για τη χρήση του sCO₂ όπως π.χ. η τρέχουσα ετοιμότητα τεχνολογίας, οι ανάγκες E & A κ.λ.π. Στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται τα μείγματα sCO₂ και οι επιδράσεις τους στα διάφορα συστήματα παραγωγής ενέργειας. Στο κεφάλαιο 5 εξετάζεται η επίδραση των μειγμάτων στον εξοπλισμό παραγωγής ενέργειας Τέλος στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η έρευνα και ανάπτυξη επιμέρους τμημάτων για την παραγωγή ενέργειας με sCO

Κεφάλαιο 2

2.1 CO₂ ως ρευστό λειτουργίας

Ένα υπερκρίσιμο ρευστό περιγράφει οποιαδήποτε ουσία σε θερμοκρασία και πίεση πάνω από το κρίσιμο σημείο του, όπου οι φάσεις υγρού και αερίου δεν είναι διακριτές. Το υπερκρίσιμο CO₂ έχει πολλές ιδιότητες που το καθιστούν ιδανικό ρευστό εργασίας μιας και είναι μη εκρηκτικό, μη εύφλεκτο, μη τοξικό και άμεσα διαθέσιμο με χαμηλό κόστος. Μικρές αλλαγές στη θερμοκρασία κοντά στο κρίσιμο σημείο του προκαλούν αλλαγές στην πυκνότητα, παρόμοιες με το βρασμό όπου ένα ρευστό μετατρέπεται σε ατμό [1]. Το υπερκρίσιμο sCO₂ έχει χαμηλή κρίσιμη θερμοκρασία της τάξης των 304.2 K ενώ η κρίσιμη πίεση του είναι 7.38 MPa ή 73.8 bar όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 1.



Εικόνα 1: Διαγραμμα Φάσης CO₂

Σαν ρευστό εργασίας σε σταθμούς παραγωγής ισχύος έχει πολλά πλεονεκτήματα. Η κρίσιμη κατάσταση του είναι εύκολο να επιτευχθεί λόγω της

χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας. Έτσι το $s\text{CO}_2$ είναι ασφαλές για βιομηχανική χρήση ενώ συνάμα έχει χαμηλό κόστος. Το μεγαλύτερο όμως πλεονέκτημα του $s\text{CO}_2$ είναι ότι παρουσιάζει υψηλή πυκνότητα και χαμηλό ιξώδες, παράγοντες που οδηγούν σε μηχανολογικές διατάξεις παραγωγής ενέργειας υψηλής αποτελεσματικότητας και μικρών διαστάσεων στρόβιλων [2]. Αυτές οι ιδιότητες δημιουργούν $s\text{CO}_2$, ένα ελκυστικό ρευστό εργασίας για τους κύκλους Brayton η λειτουργία των οποίων αναλύεται παρακάτω μαζί με τα διαγράμματα τους (εικόνες 2 έως 5).

Ο κύκλος λειτουργίας του $s\text{CO}_2$ πραγματοποιείται σε μία φάση χωρίς να συμβαίνει συμπίκνωση. Η κρίσιμη θερμοκρασία είναι επίσης αρκετά υψηλή για απευθείας απόρριψη θερμότητας από τον κύκλο θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Επομένως, το σύστημα έχει μεγάλες δυνατότητες υψηλής απόδοσης, καθώς υπάρχει μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας. Το CO_2 κοντά στο κρίσιμο σημείο του γίνεται πιο ασυμπίεστο και ως εκ τούτου, η εργασία συμπίεσης μπορεί να μειωθεί σημαντικά οδηγώντας σε υψηλή απόδοση κύκλου [3]. Επίσης, στην υπερκρίσιμη του κατάσταση, το CO_2 είναι σχεδόν δυο φορές πιο συμπυκνωμένο από τον ατμό. Η υψηλή πυκνότητα και ογκομετρική θερμική ικανότητα του $s\text{CO}_2$ σε σχέση με άλλα ρευστά εργασίας το καθιστά ιδανική επιλογή, διότι το μέγεθος των περισσότερων εξαρτημάτων του συστήματος, όπως στρόβιλος και αντλία, μπορεί να μειωθεί σημαντικά, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερο αποτύπωμα εγκαταστάσεων και πιθανώς χαμηλότερο κόστος.

2.2 Κύκλοι ισχύος υπερκρίσιμου CO₂

Ενώ υπάρχει πρόσφατο αυξανόμενο ενδιαφέρον, η ιδέα της χρήσης sCO₂ σε ένα σύστημα ισχύος δεν είναι νέα. Ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μερική συμπύκνωση CO₂ σε κύκλο Brayton υποβλήθηκε από την Sulzer Bros στην Ελβετία το 1948. Η αρχή εφευρέθηκε εκ νέου δύο δεκαετίες αργότερα και αναπτύχθηκε από την εργασία του Angelino (1969) η οποία έδειξε ότι για θερμοκρασία ψύξης νερού 5°C και θερμοκρασία εισόδου στροβίλου 700°C, ήταν δυνατόν να επιτευχθεί απόδοση κύκλου περισσότερο από 50%, κάτι που ήταν καλύτερο από αυτό ενός κύκλου ατμού διπλής θέρμανσης στην ίδια μέγιστη θερμοκρασία. Ο Dostal και άλλοι ερευνητές το 2004 μελέτησαν τη χρήση του sCO₂ στους στροβίλους του κύκλου Brayton για πυρηνική ενέργεια, και αυτή η εργασία οδήγησε σε έρευνα σε παγκόσμιο επίπεδο και στην ανάπτυξη κύκλων ισχύος του sCO₂.

Πριν από περίπου 10 χρόνια, η Sandia National Laboratories (SNL) που εδρεύει στις ΗΠΑ, άρχισε να ερευνά το κύκλο ισχύος του sCO₂ ως μέρος του Προγράμματος GenIV του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE) για προηγμένους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Η SNL λειτούργησε ένα κύκλο συμπίεσης sCO₂ σε μικρή κλίμακα. Τα θετικά αποτελέσματα οδήγησαν στην κατασκευή ενός δοκιμαστικού κύκλου ισχύος 240 kWe απλού ανακτημένου κύκλου ισχύος το 2012, ενός από τους πρώτους κύκλους ισχύος sCO₂ που παράγουν ενέργεια στον κόσμο[4].

Έχουν μελετηθεί δύο βασικές προσεγγίσεις για κύκλους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση sCO₂ σαν ρευστό εργασίας: κύκλοι έμμεσης

θέρμανσης (ή έμμεσης πυροδότησης) και κύκλοι άμεσης πυροδότησης. Στη συνέχεια, υπάρχουν παραλλαγές καθεμιάς, που περιγράφονται στις ακόλουθες ενότητες.

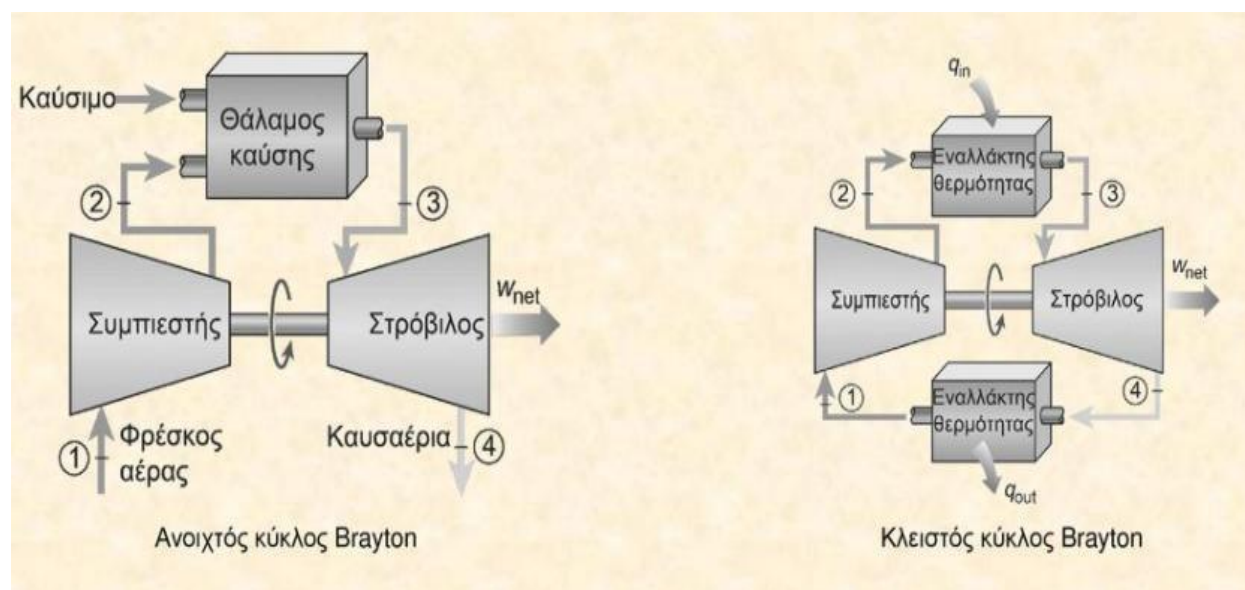
2.3 Κύκλοι sCO_2 Brayton κλειστού βρόχου με έμμεση πυροδότηση

Ο κύκλος Brayton κλειστού βρόχου με έμμεση πυροδότηση μπορεί να εφαρμοστεί στις περισσότερες πηγές θερμικής ενέργειας, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων, η πυρηνική ενέργεια, ηλιακή, η γεωθερμική και η ανάκτηση θερμότητας.

2.3.1. Απλός κύκλος Brayton κλειστού βρόχου

Στην εικόνα 1 δείχνει ένα διάγραμμα ενός απλού κύκλου Brayton ανοιχτού και κλειστού βρόχου . Στο κλειστό βρόχο το ρευστό εργασίας θερμαίνεται έμμεσα από μια πηγή θερμότητας μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας (θερμαντήρας), παρόμοιος με τον τρόπο που ο ατμός θα θερμαινόταν σε έναν συμβατικό λέβητα. Η ενέργεια εξάγεται από το CO_2 καθώς εκτονώνεται στο στρόβιλο. Έπειτα το αέριο που εξάγεται από τον στρόβιλο και ψύχεται σε ένα εναλλάκτη θερμότητας (ψύκτη) στην επιθυμητή θερμοκρασία εισόδου συμπιεστή. Μετά τη συμπίεση στην απαιτούμενη πίεση, το CO_2 αποστέλλεται πίσω στο θερμαντήρα για να ολοκληρωθεί ο κύκλος [5].

Η απόδοση κύκλου είναι συνάρτηση του λόγου της πίεσης εισόδου και εξόδου στο στρόβιλο και της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο (TIT(Temperature in Turbine)). Η απόδοση ενός κλειστού κύκλου CO₂ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αποτελεσματικότητα του CO₂. Ο κλειστός κύκλος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ελάχιστη πίεση στον κύκλο. Για μια αυθαίρετη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο (TIT) 700°C, επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση κύκλου (34,5%) έχοντας πίεση εξόδου στο στρόβιλο περίπου 8,27 MPa [6].



Εικόνα 2: Ανοικτός και κλειστός απλός κύκλος Brayton έμμεσης πυροδότησης [7]

2.3.2 Κλειστός κύκλος Brayton με αναγέννηση

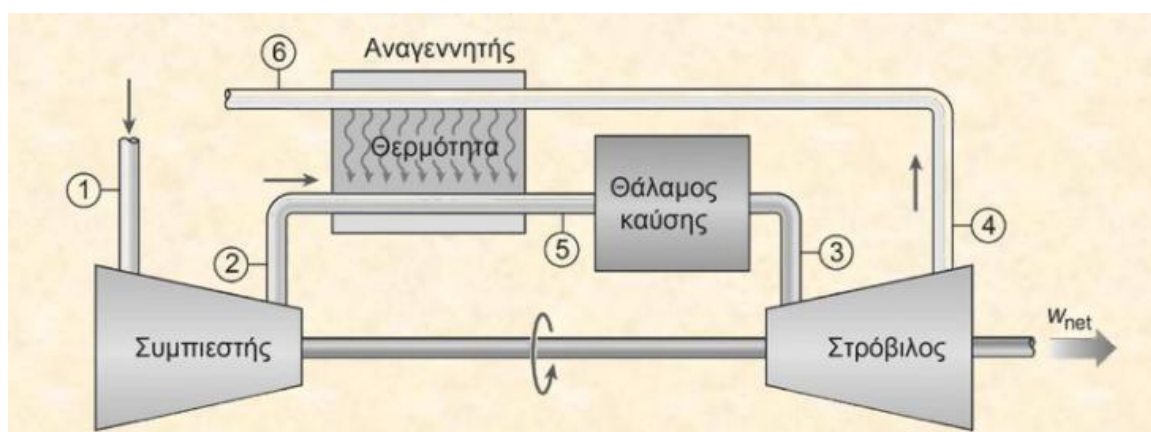
Ένας πιο αποδοτικός τρόπος λειτουργίας ενός κλειστού κύκλου Brayton με έμμεση πυροδότηση ενσωματώνει ανάκτηση θερμότητας μέσω του αναγεννητή. Αυτός τοποθετείται μεταξύ της εξόδου του στρόβιλου και της εξόδου του συμπιεστή (βλ. Εικόνα 3).

Η χρήση του αναγεννητή σε ένα κλειστό κύκλο στον οποίο μια ποσότητα θερμότητας από την απόληξη του στρόβιλου χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του υγρού εργασίας πριν από την είσοδο στην πηγή θερμότητας, βελτιώνει την απόδοση του κύκλου μειώνοντας την απώλεια θερμότητας στο ψύκτη του CO₂. Η

ανάκτηση μειώνει την ανάγκη θερμικού φορτίου υψηλής θερμοκρασίας και επιτρέπει μεγαλύτερη ροή εργαζόμενου ρευστού στον κύκλο, οδηγώντας σε υψηλότερη απόδοση από τον αντίστοιχο απλό κύκλο σε ολόκληρο το εύρος των λόγων πίεσης που μπορούν να επιτευχθούν.

Ωστόσο καθώς η θερμοχωρητικότητα του CO₂ αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης κοντά στο κρίσιμο σημείο του CO₂, η λειτουργία του κύκλου σε πιέσεις σε αυτήν την περιοχή θα προκαλέσει μείωση της απόδοσης του αναγεννητή. Αυτό συμβαίνει διότι η θερμοκρασία του CO₂ υψηλής πίεσης που τον αφήνει περιορίζεται. [7]

Ο λόγος που αυτό συμβαίνει, είναι ότι υπό αυτές τις συνθήκες, η θερμοχωρητικότητα του θερμού CO₂ στην πλευρά χαμηλής πίεσης του αναγεννητή είναι πολύ χαμηλότερη από εκείνη του ψυχρού CO₂ στην πλευρά υψηλής πίεσης. Αυτό θα μειώσει την απόδοση του κύκλου. Ένας τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα είναι η προσθήκη ενός συμπιεστή στον κύκλο.



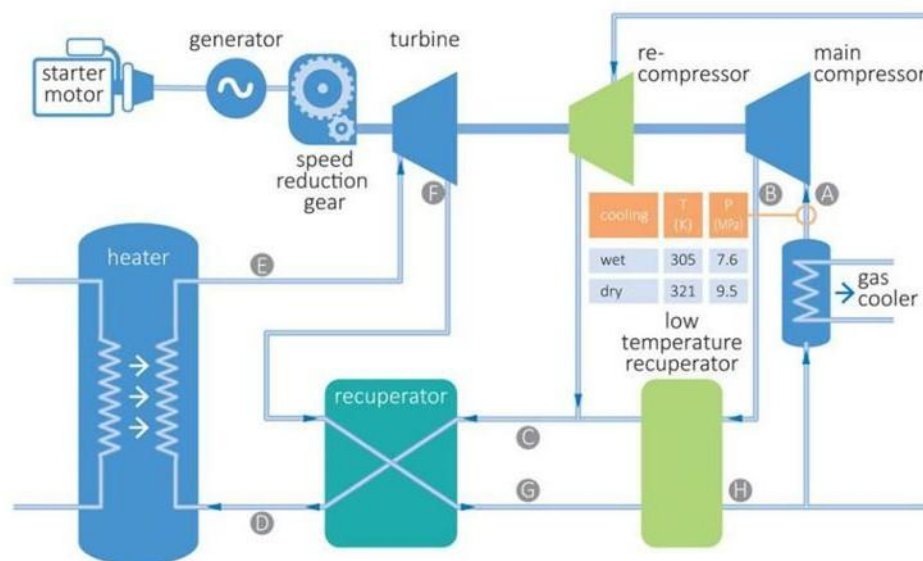
Εικόνα 3:Κλειστός κύκλος Brayton με αναγέννηση [7]

2.3.3 Κλειστός κύκλος Brayton αναγέννησης και επανασυμπίεσης

Στην εικόνα 4 δείχνει ένα διάγραμμα ενός Κλειστού κύκλου Brayton αναγέννησης και επανασυμπίεσης. Τα σημεία C – H στην εικόνα 4 είναι τα ίδια με εκείνα του κύκλου αναγέννησης που φαίνεται στην εικόνα 3. Οι διαφορές μεταξύ του κύκλου επανασυμπίεσης και του ανακτημένου κύκλου βρίσκονται κάτω από το

σημείο Η. Στη διάταξη με κύκλο επανασυμπίεσης, η ροή του CO₂ χαμηλής πίεσης που εξέρχεται από τον αναγεννητή χωρίζεται σε δύο μέρη. Το ένα μέρος της ψύχεται στον ψύκτη του CO₂ στη συνέχεια συμπιέζεται στον κύριο συμπιεστή πριν θερμανθεί στον αναγεννητή χαμηλής θερμοκρασίας. Το άλλο παρακάμπτει το ψύκτη του CO₂ και συμπιέζεται στον επανασυμπιεστή στη μέγιστη πίεση κύκλου. Στη συνέχεια αναμιγνύεται με το CO₂ που εξέρχεται από τον αναγεννητή χαμηλής θερμοκρασίας και το μείγμα περνά μέσω ενός αναγεννητή υψηλής θερμοκρασίας και του θερμαντήρα CO₂.

Μέσω αυτής της διάταξης η θερμοχωρητικότητα μεταξύ των θερμών και ψυχρών πλευρών του αναγεννητή ταιριάζει καλύτερα και ως εκ τούτου, η συνολική απόδοση του αναγεννητή βελτιώνεται. Ωστόσο, αυτή η διαμόρφωση είναι πιο περίπλοκη και μπορεί να έχει υψηλότερο κόστος λόγω της ανάγκης ενός επιπλέον συμπιεστή[8][9]. Σε αυτή τη διαμόρφωση η απόδοση του κύκλου είναι υψηλότερη αν και η συνολική ποσότητα ισχύος που απαιτείται για συμπίεση του CO₂ αυξάνεται. Με τη βέλτιστη αναλογία πίεσης ,για μέγιστη απόδοση κύκλου, η απόδοση του κύκλου επανασυμπίεσης είναι πάνω από 5% υψηλότερη από εκείνη του κύκλου με χρήση μόνο αναγέννησης.



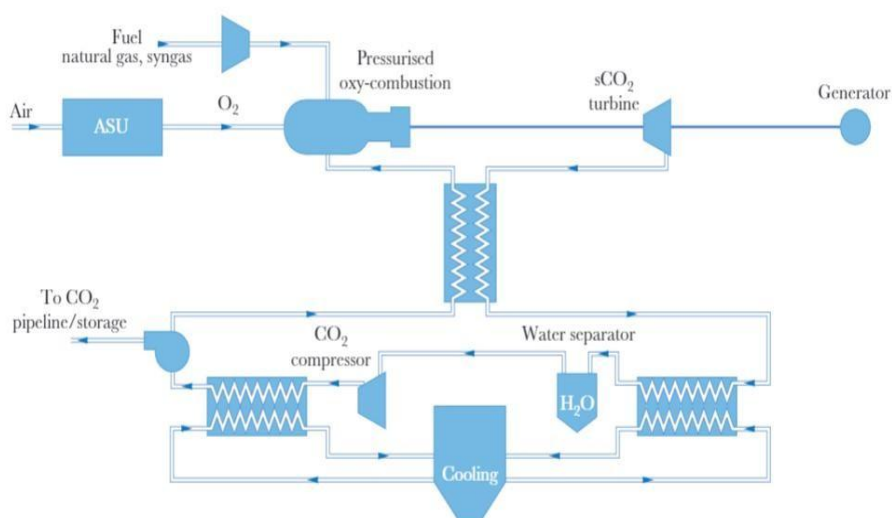
Εικόνα 4: Κλειστός κύκλος Brayton αναγέννησης και επανασυμπίεσης [10]

Υπάρχουν πολλές άλλες παραλλαγές κύκλων συμπίεσης με έμμεση καύση του sCO₂ χρησιμοποιώντας διαφορετικές διαμορφώσεις συμπίεσης, αναθέρμανσης και άλλων κύκλων, όπως προ-συμπίεση και ενδιάμεση ψύξη, για αύξηση της αποτελεσματικότητας του κύκλου ή προσαρμογή σε συγκεκριμένες εφαρμογές

ωστόσο πλέον έχει αποδειχθεί ότι ο κύκλος επανασυμπίεσης Brayton έχει την καλύτερη απόδοση. [11]

2.4 Κύκλος άμεσης καύσης, ημι-κλειστού οξυ-καυσίμου Brayton

Το διάγραμμα ενός ημικλειστού κύκλου Brayton άμεσης πυροδότησης καύσης οξυγόνου φαίνεται στην εικόνα 5. Εδώ, ο θερμαντήρας του CO₂ αντικαθίσταται με έναν καυστήρα οξυγόνου υπό πίεση. Το καύσιμο καίγεται σε σχετικά καθαρό και σχεδόν στοιχειομετρικό οξυγόνο στον καυστήρα και το προκύπτον ρεύμα, το οποίο περιέχει κυρίως CO₂ και H₂O, χρησιμοποιείται για την κίνηση του στρόβιλου. Η εναπομένουσα θερμότητα στο ρεύμα που εξέρχεται από τον στρόβιλο ανακτάται και το ρεύμα στη συνέχεια ψύχεται περαιτέρω για να συμπυκνώσει το νερό, αφήνοντας ένα ρεύμα υψηλής συγκέντρωσης CO₂. Ένα μέρος του CO₂ συμπιέζεται στην επιθυμητή πίεση. Το ψυγμένο και συμπιεσμένο CO₂ περνά μέσα από τον αναγεννητή για να προθερμανθεί και στη συνέχεια ανακυκλώνεται στον καυστήρα ως αραιωτικό. Το υπόλοιπο του CO₂ είναι έτοιμο να συμπιεστεί για αποθήκευση.



Εικόνα 5: Ημικλειστός κύκλος Brayton άμεσης πυροδότησης καύσης οξυγόνου [12]

Οι ημικλειστοί κύκλοι άμεσης πυροδότησης καύσης οξυγόνου- sCO₂ κύκλοι είναι κατάλληλοι για την καύση με οξυγόνο αερίων καυσίμων όπως το φυσικό αέριο και το syngas που προέρχεται από την αεριοποίηση του άνθρακα, ιδίως όταν

απαιτείται δέσμευση άνθρακα. Λόγω του γεγονότος ότι ένα πολύ υψηλότερο TIT (θερμοκρασίας εισόδου στροβίλου) μπορεί να επιτευχθεί σε ένα κύκλο άμεσης καύσης sCO₂ η απόδοση του κύκλου έχει τη δυνατότητα να είναι σημαντικά υψηλότερη από εκείνη των κλειστών κύκλων με έμμεση θέρμανση. Η διαμόρφωση του κύκλου μπορεί να είναι απλούστερη αφού δεν απαιτείται επανασυμπύεση και άλλα μέτρα για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του κύκλου.

2.5 sCO₂ σε εφαρμογές παραγωγής ενέργειας - Κύρια οφέλη

Ένας έμμεσα θερμαινόμενος κλειστός κύκλος Brayton μπορεί να αντικαταστήσει έναν κύκλο Rankine. Επιπλέον, η χαμηλή κρίσιμη πίεση και θερμοκρασία του σημαίνει ότι μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη θερμική αντιστοίχιση σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Οι πιο ελπιδοφόρες περιοχές εφαρμογής ημικλειστού κύκλου Brayton άμεσης πυροδότησης καύσης οξυγόνου sCO₂ είναι στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με φυσικό αέριο ή με αέριο. Στον πίνακα 1 συνοψίζει τις πιθανές περιοχές εφαρμογής και τα οφέλη αυτών των συστημάτων.

Πίνακας 1: Πιθανές εφαρμογές για μετατροπή ισχύος sCO₂ [8]

Εφαρμογή	Τύπος κύκλου	Οφέλη	Μέγεθος, Mwe	Πίεση σε MPa
Πυρηνική ενέργεια	Έμμεση πυροδότηση sCO ₂	Μέγεθος, απόδοση, μείωση κατανάλωσης νερού	350-700	20-35
	Άμεση πυροδότηση sCO ₂	Απόδοση, μείωση κατανάλωσης νερού, εγλωβισμός CO ₂	1100-1300	35
Ορυκτά καύσιμα (syngas, φυσικό αέριο)	Άμεση πυροδότηση sCO ₂	Απόδοση, μείωση κατανάλωσης νερού, εγλωβισμός CO ₂	500-700	35
Συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια	Έμμεση πυροδότηση sCO ₂	Απόδοση, μέγεθος, μείωση κατανάλωσης νερού	500-700	35
Ανάκτηση θερμότητας	Έμμεση πυροδότηση sCO ₂	Αποδοτικότητα, μέγεθος, απλοί κύκλοι	<230-650	15-35
Γεωθερμία	Έμμεση πυροδότηση sCO ₂	Αποδοτικότητα	100-300	15

Οι μελλοντικοί κύκλοι έμμεσης θέρμανσης για τον άνθρακα μπορεί να χρησιμοποιούν για καύση άνθρακα σε σκόνη (PC) ή καύση ρευστοποιημένης βάσης με ανακυκλοφορία (CFB), ενώ τα συστήματα απευθείας καύσης χρησιμοποιούν

αέριο σύνθεσης (syngas) από αεριοποίηση άνθρακα. Και οι δύο προσεγγίσεις έχουν τη δυνατότητα να αυξήσουν σημαντικά την απόδοση και να μειώσουν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας ημι-κλειστός κύκλος καύσης οξυγόνου με άμεση καύση θα επιτύχει υψηλή απόδοση των εγκαταστάσεων επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα πλήρη δέσμευση άνθρακα. Στην περίπτωση του έμμεσα θερμαινόμενου κλειστού sCO₂ κύκλου, η αύξηση της απόδοσης θα αντισταθμίσει αποτελεσματικά την απώλεια ενέργειας που χρησιμοποιείται για το CCS[13][14].

Η χρήση του sCO₂ στους στροβίλους παραγωγής ενέργειας υπήρξε ενεργός τομέας έρευνας για αρκετά χρόνια, αλλά οι προηγούμενες εργασίες ήταν κυρίως αφιερωμένες στην εφαρμογή της στην πυρηνική ενέργεια. Πλέον ο κύκλος ισχύος του sCO₂ εξετάζεται για ηλιακά, προηγμένα ορυκτά και άλλες πηγές ενέργειας. Πολλά έργα βρίσκονται σε εξέλιξη για την ανάπτυξη συστημάτων ισχύος με sCO₂ με χρήση ορυκτών καυσίμων.

Το κύριο όφελος του κύκλου ισχύος του sCO₂ είναι η υψηλή θερμική απόδοση σε μέτριες θερμοκρασίες λόγω του μικρού έργου συμπίεσης και της μεγάλης ποσότητας θερμότητας στην εξάτμιση του στροβίλου που ανακτάται και μετατρέπεται σε ισχύ. Η υψηλή πυκνότητα ισχύος του sCO₂ σημαίνει ότι όλα τα στοιχεία του συστήματος είναι πολύ μικρότερα, οδηγώντας σε μειωμένο αποτύπωμα εγκαταστάσεων και δυνητικά χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου. Ο λόγος χαμηλής πίεσης του στροβίλου μειώνει τον απαιτούμενο αριθμό σταδίων. Η επανασυμπύεση, η επέκταση και η απόρριψη θερμότητας πραγματοποιούνται σε μία φάση, μειώνοντας την πολυπλοκότητα του συστήματος. Για κύκλους λειτουργίας sCO₂ είναι εφικτό να επιτευχθεί χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης επειδή το προσωπικό των εγκαταστάσεων δεν θα είναι απαραίτητο για την επεξεργασία του νερού και τον ποιοτικό έλεγχο που συνήθως υπάρχουν σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας με ατμό. Ένα άλλο πιθανό όφελος είναι η συμβατότητα του κύκλου sCO₂ με ξηρή ψύξη λόγω της σχετικά υψηλής θερμοκρασίας απόρριψης θερμότητας, καθιστώντας τον κύκλο sCO₂ πιο πρακτικό από τον κύκλο ατμού σε περιοχές όπου το νερό είναι λιγοστό.

Κεφάλαιο 3 Τεχνικές προκλήσεις

3.1 Τρέχουσα ετοιμότητα τεχνολογίας

Σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας και βιομηχανικές διαδικασίες τα εξαρτήματα όπως η γεννήτρια, το υποσύστημα απόρριψης θερμότητας, τα συστήματα ελέγχου εγκαταστάσεων και τα όργανα είναι ώριμες τεχνολογίες, καθώς βρίσκονται ήδη σε εμπορική λειτουργία. Παρόλο που μπορεί να απαιτηθεί η ανάπτυξη μεθόδων ελέγχου και βελτιστοποίησης σχεδιασμού αυτών των εξαρτημάτων για μια δεδομένη εφαρμογή, μπορεί να υποθεθεί ότι η απόδοση, η αξιοπιστία και το κόστος αυτών των εξαρτημάτων είναι λογικά προβλέψιμα και δεν παρουσιάζουν σημαντικό κίνδυνο ή εμπόδιο στην εμπορική ανάπτυξη του κύκλου καύσης sCO_2 . Επιπλέον, εξοπλισμός για συμπίεση και άντληση sCO_2 χρησιμοποιείται ήδη στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου για άλλες εφαρμογές, και έτσι η τεχνολογία συμπίεσης που απαιτείται θεωρείται ώριμη και παρουσιάζει μικρό κίνδυνο. Ωστόσο, πολλά μέρη του κύκλου Brayton sCO_2 εξακολουθούν να απαιτούν σημαντική έρευνα και ανάπτυξη.

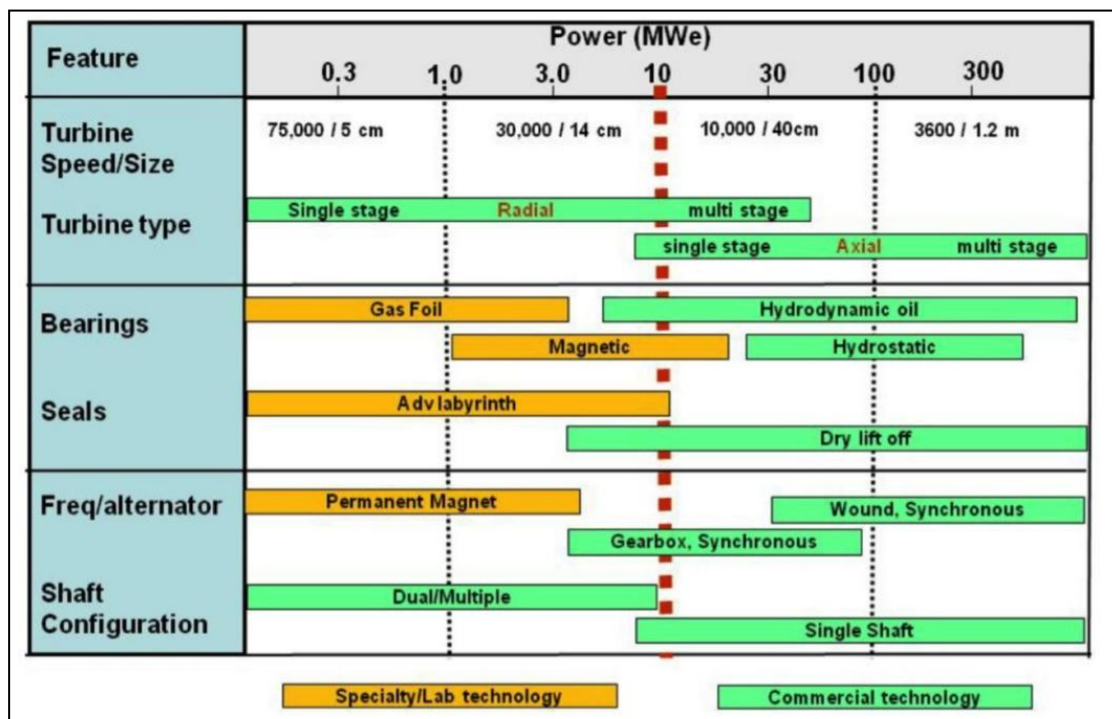
3.2 Ανάγκες E & A

3.2.1 Στροβιλομηχανές

Η τεχνολογία των συμπιεστών και στροβίλων είναι αξιόπιστη και δοκιμασμένη στους σταθμούς παραγωγής ισχύος. Ωστόσο, υπάρχει περιορισμένη εμπειρία χρήσης του sCO_2 σε στροβίλους παραγωγής ενέργειας. Εκτός από την υψηλή πυκνότητα και την υψηλή πίεση, οι ιδιότητες του CO_2 όπως η πυκνότητα και το ιξώδες αλλάζουν γρήγορα κοντά στο κρίσιμο σημείο. Ιδιαίτερες προκλήσεις περιλαμβάνουν το σχεδιασμό αξιόπιστων διατάξεων στεγανοποίησης (φλατζών) και ρουλεμάν και τον προσδιορισμό υλικών και τεχνολογιών επίστρωσης που είναι συμβατές με λειτουργία υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης σε περιβάλλον sCO_2 . Πιο αναλυτικά αυτά αναλύονται στο κεφάλαιο 5 με τις επιδράσεις και στο κεφάλαιο 6 όπου περιγράφονται οι ενέργειες E&A.

Για ημι-κλειστούς κύκλους άμεσης πυροδότησης με καύση οξυγόνου, η επίτευξη υψηλής θερμοκρασίας εισόδου στροβίλου περιορίζεται από τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία των καυσαερίων στροβίλου που ρέει απευθείας στον αναγεννητή που θα χρειαζόταν σε πρακτικά συστήματα.

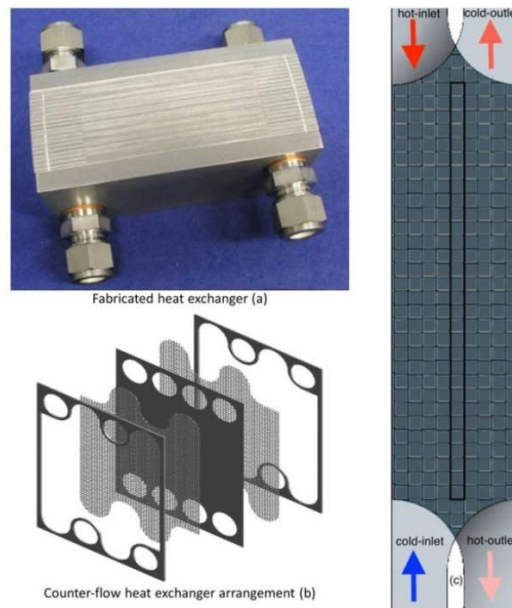
Για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση, είναι απαραίτητο να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός και η κατασκευή του στροβίλου και του συμπιεστή. Τα πρωτότυπα σχέδια πρέπει να ελεγχθούν με μηχανικές και θερμοδυναμικές αναλύσεις και πρέπει να κατασκευαστούν μικρής κλίμακας στροβίλοι και συμπιεστές για επαλήθευση. Η εικόνα απεικονίζει τα στάδια ανάπτυξης για κύρια μέρη του συστήματος σε διαφορετικές κλίμακες. Εργαστηριακές δοκιμές και δοκιμές σε πιλοτική κλίμακα κύκλου Brayton με sCO_2 με ποικίλες δυνατότητες ισχύος εξόδου στροβίλου που έχουν ήδη φτιαχτεί και χρησιμοποιούνται στην Ιαπωνία (περίπτωση της Toshiba αναφέρεται παρακάτω) τις ΗΠΑ.



Εικόνα 6: Εύρος εφαρμογής για βασικά εξαρτήματα και χαρακτηριστικά στροβιλομηχανών κύκλου Brayton [15]

3.3 Αναγεννητές (*Recuperators*)

Μία από τις σημαντικότερες τεχνικές προκλήσεις στην ανάπτυξη κύκλων ισχύος με $s\text{CO}_2$ είναι ο σχεδιασμός χαμηλού κόστους και συμπαγών σε διαστάσεις αναγεννητών. Οι αναγεννητές είναι το κλειδί για την επίτευξη υψηλότερης απόδοσης κύκλου ωστόσο εμφανίζουν μεγάλο κόστος κτήσης. Επιπλέον με τη χρήση $s\text{CO}_2$ τόσο για άμεση όσο και για έμμεση πυροδότηση κύκλου $s\text{CO}_2$, οι ανακτητές πρέπει να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 700°C) και υψηλές πιέσεις (έως 30 MPa), καθώς και με μεγάλες διαφορές πίεσης μεταξύ της κρύας και της καυτής πλευράς. Μια σημαντική πρόκληση είναι να σχεδιάσουμε έναν εναλλάκτη θερμότητας με ελάχιστη πτώση πίεσης σε όλο το σύστημα, ενώ επιδιώκουμε αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας. Το μεγάλο θερμικό φορτίο ενός αναγεννητή απαιτεί μεγάλη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Οι συμβατικοί εναλλάκτες θερμότητας κελύφους και σωλήνων δεν είναι πρακτικοί για αυτό, επειδή η σχετικά χαμηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο ($<100\text{ m}^2/\text{m}^3$) θα οδηγούσε σε τεράστιους και ακριβούς εναλλάκτες θερμότητας[16]. Οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας (CHE), όπως οι εναλλάκτες θερμότητας τυπωμένου κυκλώματος και των πτερυγίων, έχουν υψηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο (συνήθως $>700\text{ m}^2/\text{m}^3$) και είναι καλοί υποψήφιοι. Πρόσφατα έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη της τεχνολογίας CHE και ορισμένοι βρίσκονται πλέον σε εμπορική λειτουργία στη βιομηχανία χημικών και φυσικού αερίου.



Εικόνα 7: Στο (a) κατασκευασμένος εναλλάκτης υπο κλίμακα, (b) ωρολογιακής φοράς διάταξη εναλλάκτη (c) Εισοδοι θερμού ρευστού και ψυχρού ρευστού[16]

Επιπλέον, πρέπει να αναπτυχθούν καινοτόμες μεταλλουργικές και κατασκευαστικές διαδικασίες για την αντιμετώπιση τεχνικών συγκόλλησης και χύτευσης μετάλλων και για τη μείωση του κόστους. Για τους κύκλους με άμεση πυροδότηση $s\text{CO}_2$ κύκλους, θα πρέπει επίσης να αντιμετωπιστούν συγκεκριμένα ζητήματα όπως η διάβρωση λόγω της παρουσίας νερού και άλλων ρύπων που προκύπτουν από την καύση ορυκτών καυσίμων. [17] Δεδομένου ότι το κόστος ενός αναγεννητή θα μπορούσε να αποδειχθεί περιοριστικός παράγοντας στην εμπορία ενός συστήματος καύσης $s\text{CO}_2$ παραμένει πρόκληση να βρεθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός κύκλου που εξισορροπεί την αυξημένη απόδοση και το αυξημένο κόστος [18].

3.3.1 Καυστήρας και θερμαντήρας CO_2

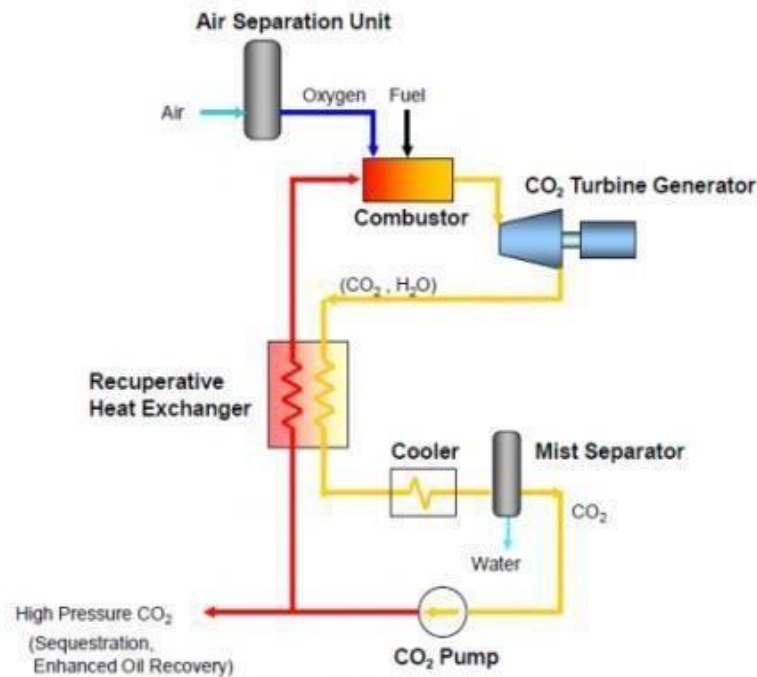
Οι δυσκολίες στο σχεδιασμό ενός θερμαντήρα $s\text{CO}_2$ για κύκλους έμμεσης θέρμανσης εξαρτάται από τη δεδομένη εφαρμογή και την πηγή θερμότητας, ιδίως από το προφίλ θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας. Οι θερμαντήρες CO_2 για έμμεση θέρμανση κύκλων $s\text{CO}_2$ παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας άνθρακα έχουν πολλές ομοιότητες με τους υφιστάμενους λέβητες ατμού, όπως εξηγείται παραπάνω. Για παράδειγμα, το ρευστό εργασίας θερμαίνεται έμμεσα σε λέβητα και κυκλοφορεί

σε κλειστό κύκλο. Ωστόσο, η ειδική θερμική ικανότητα του CO₂ είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή του νερού. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμής πλευράς και της κρύας πλευράς μπορεί επίσης να είναι πολύ χαμηλότερη. Επομένως, απαιτείται μεγαλύτερη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, κάνοντας το σχεδιασμό ενός θερμαντήρα sCO₂ αρκετά απαιτητικό. Οι προκλήσεις στο σχεδιασμό του τελικού σταδίου της θέρμανσης του CO₂ προτού εισέλθει στο στρόβιλο είναι παρόμοια με εκείνα των αναγεννητών, για παράδειγμα, ελαχιστοποιώντας την πτώση πίεσης.

Το προφίλ θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας θα είναι ευρύ με έμμεσες καύσεις ορυκτών καυσίμων. Η βέλτιστη διαμόρφωση κύκλου sCO₂ που μπορεί να ανακτήσει αποτελεσματικά την θερμότητα από τα καυσαέρια πρέπει να αναπτυχθεί για τη διατήρηση της υψηλής απόδοσης του συστήματος[19].

Μια άλλη πρόκληση είναι η ανάγκη για προθερμαντήρες αέρα με υψηλότερη είσοδο καυσαερίων και υψηλότερες θερμοκρασίες εξόδου αέρα, κάτι που είναι απαραίτητο για την επίτευξη υψηλής συνολικής θερμικής απόδοσης. Οι κύκλοι με έμμεση καύση απαιτούν προθερμαντήρες αέρα με διαφορετικές οριακές συνθήκες από εκείνους σε συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, με υψηλότερη είσοδο καυσαερίων και υψηλότερες θερμοκρασίες εξόδου αέρα απαραίτητες για την επίτευξη υψηλής συνολικής θερμικής απόδοσης. Το μεγάλο ποσό της αναγέννησης CO₂ που εισέρχεται στο καυστήρα σημαίνει ότι η θερμοκρασία του CO₂ είναι υψηλότερη από ότι το νερό τροφοδοσίας του καυστήρα άνθρακα. Συνέπεια αυτού είναι ότι η θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων ενός ρεύματος καυσαερίων από ένα sCO₂ θα είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη ενός καυστήρα άνθρακα.

Ένας καυστήρας sCO₂ άμεσης πυροδότησης μοιάζει με έναν συμβατικό καυστήρα αεριοστροβίλων. Η ανώτερη θερμοκρασία θα είναι γενικά χαμηλότερη από ό, τι στους υπάρχοντες στροβίλους αερίου, ενώ η πίεση θα είναι υψηλότερη. Με πιέσεις της τάξης των 30 MPa και υψηλή πυκνότητα ενέργειας, ζητήματα όπως η σχεδίαση εγχυτήρων, η μεταφορά θερμότητας διαμέσου των τοιχωμάτων και η δυναμική καύσης θα αποτελέσουν ένα απαιτητικό παράγοντα στη σχεδίαση καυστήρα, από την οποία υπάρχει μικρή εμπειρία.



Εικόνα 8: Διάταξη καυστήρα για CO₂ [20]

Ίσως μια πιο σημαντική πρόκληση είναι ο σχεδιασμός του καυστήρα οξυγόνου για λειτουργία υψηλής πίεσης με ελάχιστη ποσότητα περίσσειας οξυγόνου και μεγάλη ποσότητα ανακυκλωμένου CO₂ ως αραιωτικό. Η λειτουργία καυστήρα οξυγόνου σε πιέσεις υψηλότερες από 20 MPa ενέχει σημαντικό τεχνικό κίνδυνο καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες εισόδου σε ένα τέτοιου τύπου καυστήρα επιτρέπουν την αυτανάφλεξη. Ο σχεδιασμός πρέπει επίσης να αντιμετωπίσει το ζήτημα του σχηματισμού αιθάλης, ειδικά για έναν καυστήρα οξυγόνου με φυσικό αέριο με ελάχιστη περίσσεια οξυγόνου, αν και μπορεί να είναι λιγότερο πρόβλημα για την καύση οξυγόνου που προκαλείται από syngas. Η κινητική της αντίδρασης και ο μηχανισμός σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση δεν είναι κατανοητές. Απαιτούνται δοκιμές και μοντελοποίηση υπολογιστών για την ανάπτυξη σχεδίων καυστήρα οξυγόνου για φυσικό αέριο και syngas (από την αεριοποίηση άνθρακα) που εξασφαλίζουν πλήρη καύση και ελαχιστοποιούν τα καυτά σημεία και τις θερμοκρασίες των τοιχωμάτων στον καυστήρα [22]

3.4 Υλικά

Η επιλογή υλικών για εξαρτήματα όπως στρόβιλοι και εναλλάκτες θερμότητας είναι δύσκολη. Η θερμοκρασία και η πίεση μπορεί να είναι έως 760 ° C και 30 MPa, αντίστοιχα, για έμμεσα θερμαινόμενο κλειστό κύκλο ισχύος και 1150 ° C και 30 MPa για άμεση πυροδότηση, ημι-κλειστό sCO₂ κύκλο ισχύος. Οι αβεβαιότητες σχετικά με την αξιοπιστία των υλικών περιλαμβάνουν, τη διάβρωση υψηλής θερμοκρασίας, τη διάβρωση λόγω σωματιδίων, τον ερπυσμό και τη θερμική κόπωση.

Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει εσωτερική ενανθράκωση συμβατικών ωστενιτικών κραμάτων χάλυβα σε περιβάλλοντα CO₂ σε εύρος θερμοκρασίας 480-650°C. Παρόμοια ενανθράκωση των φερριτικών-μαρτενσιτικών χαλύβων είχε επίσης παρατηρηθεί στους 550-650°C. Εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν αυτοί οι λιγότερο δαπανηροί φερριτικοί-μαρτενσιτικοί και ωστενιτικοί χάλυβες, απαιτείται έρευνα για τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά ενανθράκωσης και τη μέγιστη θερμοκρασία χρήσης αυτών των κραμάτων για τον προσδιορισμό των μηχανισμών αποδόμησης και για την πρόβλεψη της ωφέλιμης ζωής[23].

Αν και το καθαρό, χωρίς υγρασία CO₂ είναι σχεδόν αδρανές σε θερμοκρασίες <500 ° C, μπορεί να συμβεί διάβρωση χάλυβα και κραμάτων νικελίου όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες (> 600 ° C), ιδιαίτερα όταν κάνουν την παρουσία μικρές ποσότητες νερού και άλλων ρύπων. Υλικά για προηγμένους υπερκρίσιμους κύκλους ατμού έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, για εφαρμογές sCO₂, η κινητική της αντίδρασης οξειδωσης και ο ρυθμός εσωτερικής ενανθράκωσης των υποψηφίων κραμάτων πάνω από 1000-5000 ώρες σε υψηλές πιέσεις (20–35 MPa) και σε υψηλές θερμοκρασίες (650-750 ° C) χρειάζονται να εγκαθιδρυθούν. Επιπλέον, πρέπει να προσδιοριστεί η μακροπρόθεσμη επίδραση σε διάφορες τεχνικές σύνδεσης, όπως η σύνδεση διάχυσης. Για το άμεσης πυροδότησης, ημι-κλειστό sCO₂ κύκλο, οι ακαθαρσίες μπορεί να επηρεάσουν τους ρυθμούς διάβρωσης, επομένως απαιτούνται δεδομένα οξειδωσης και διάβρωσης για αυτές τις συνθήκες.

Το sCO₂ είναι πιο πυκνό από τον υπερκρίσιμο ατμό υπό τις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης και ο απαιτούμενος ρυθμός ροής μάζας θα είναι πολύ μεγαλύτερος από ό, τι στα συστήματα ατμού. Ως αποτέλεσμα, οι κύκλοι sCO₂ θα βιώσουν ρυθμούς ροής υγρού υψηλής πυκνότητας σε υψηλές ταχύτητες. Επομένως, η ύπαρξη ακόμη και μιας μικρής ποσότητας σωματιδίων στο ρεύμα θα μπορούσε να προκαλέσει σημαντική διάβρωση στα υλικά του στρόβιλου. Σε δοκιμές

κλειστού κύκλου, έχει παρατηρηθεί διάβρωση που πιστεύεται ότι προκαλείται από υπολείμματα και μικρά σωματίδια που σχηματίζονται από αντιδράσεις διάβρωσης των υλικών. Για ημι-κλειστούς κύκλους σε εφαρμογές syngas, πρέπει να αντιμετωπιστεί η αποτελεσματική αφαίρεση λεπτών σωματιδίων από το syngas. Μπορεί να είναι δυνατή η επιλογή συστημάτων επικάλυψης από εκείνα που χρησιμοποιούνται για προστασία αερίου και αμμοστροβίλων, αλλά απαιτείται εργασία για να επιβεβαιωθεί αυτό[24].

Ο ερπυσμός και η κόπωση των υλικών είναι δυνητικά οι κύριοι περιορισμοί στη διάρκεια ζωής των στροβιλομηχανών sCO_2 και των εναλλακτών θερμότητας. Η έρευνα και ανάπτυξη είναι απαραίτητη για την καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών σε συνθήκες λειτουργίας του κύκλου.

Η συμπεριφορά ερπυσμού και κόπωσης των ενώσεων πρέπει επίσης να αξιολογηθεί ως μέρος της ανάπτυξης σχεδίων συμπαγών εναλλακτών θερμότητας. Επιπλέον, πρέπει να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις του περιβάλλοντος λειτουργίας, για παράδειγμα, η ενανθράκωση και η οξειδωση των κραμάτων, στον ρυθμό ερπυσμού και στην αύξηση του ρυθμού κόπωσης.

3.5 Ενσωμάτωση συστήματος

Η ολοκλήρωση του συστήματος είναι σημαντική για τη βελτιστοποίηση των κύκλων και την αντιμετώπιση ζητημάτων εκκίνησης, τερματισμού λειτουργίας, παροδικής λειτουργίας και μερικής φόρτισης. Ο σχεδιασμός του συστήματος πρέπει να επιτρέπει τον περιορισμό της πίεσης και την ελάχιστη διαρροή του συστήματος καθώς και τη μηχανική σταθερότητα. Δυναμικές διεργασίες εντός του συστήματος, όπως αύξηση πίεσης, μεταφορά θερμότητας, συνθήκες τυρβώδους ροής, κύματα πίεσης και ακουστική πρέπει να ληφθούν υπόψη για ολοκληρωμένη λειτουργία της εγκατάστασης [25]. Τα συστήματα ισχύος sCO_2 θα πρέπει να έχουν λειτουργικές ευελιξίες, όπως ευρεία γρήγορη απόκριση σε αλλαγές στη ζήτηση. Οι επιπτώσεις των ακαθαρσιών στο ρευστό εργασίας sCO_2 , για παράδειγμα, η ύπαρξη μονοξειδίου του άνθρακα CO , H_2O και ο σχηματισμός του ανθρακικού οξέος (H_2CO_3), θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη.

3.6 Άλλες ανάγκες E & A

Απαιτούνται εξειδικευμένες προσεγγίσεις για την ανάπτυξη υποσυστημάτων όπως άξονες στροβίλου και συμπιεστή, ρουλεμάν, σφραγίδες, βαλβίδες και εναλλάκτες για την επίτευξη κλιμάκωσης στροβιλομηχανών από μικρή εργαστηριακή κλίμακα σε μέγεθος πολλαπλών MW. Πολλές διαφορετικές τεχνολογίες διατίθενται στο εμπόριο και μπορεί να εξεταστούν για χρήση σε κύκλους sCO₂. Ωστόσο, πρέπει να δοκιμαστούν τα εξαρτήματα σε κανονική κλίμακα για την αξιολόγηση της απόδοσης.

Άλλες ανάγκες έρευνας και ανάπτυξης περιλαμβάνουν σχεδιασμό σωληνώσεων και νέες μεθόδους ελέγχου. Απαιτούνται επίσης βασικές μελέτες και μοντελοποίηση υπολογιστών για την κατανόηση των ιδιοτήτων του CO₂ σε σχεδόν υπερκρίσιμες συνθήκες καθώς και κινητική καύσης σε υψηλή θερμοκρασία, συνθήκες υψηλής πίεσης παρουσία CO₂ ως αραιωτικό. Υψηλής ποιότητας δεδομένα θερμο-φυσικής ιδιότητας CO₂ είναι απαραίτητα για την ακριβή προσομοίωση των κύκλων ισχύος sCO₂ και μεμονωμένων εξαρτημάτων, όπως αναγεννητές. [25]

Η μέθοδος φυσικών ιδιοτήτων REFPROP, (www.nist.gov/srd/refprop) που αναπτύχθηκε από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας των Ηνωμένων Πολιτειών έχει χρησιμοποιηθεί από τους περισσότερους ερευνητές στη μοντελοποίηση έμμεσα θερμαινόμενου κύκλου ισχύος sCO₂. Ωστόσο, για απευθείας καύση, ημι-κλειστού κύκλου καύση οξυγόνου sCO₂ κύκλους, το ρευστό εργασίας δεν είναι καθαρό CO₂. Επίσης, η σύνθεση του υγρού εργασίας αλλάζει σε διάφορα σημεία του κύκλου. Η χρήση του REFPROP σε τέτοιες ροές διαδικασίας θα δημιουργήσει σημαντικά σφάλματα. Απαιτείται περισσότερη δουλειά για την ανάπτυξη μοντέλων που μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια τις ιδιότητες ρευστού λειτουργίας για κύκλους άμεσης καύσης οξυγόνου sCO₂. Επιπλέον, απαιτούνται εκτεταμένα πειραματικά δεδομένα για επικύρωση μοντέλου. Η μοντελοποίηση και οι αναλύσεις του συστήματος είναι επίσης απαραίτητα για τον προσδιορισμό των συνθηκών του κύκλου για τη βελτιστοποιημένη απόδοση του κύκλου, το κόστος, τη λειτουργικότητα, και για τη μετάφραση των οφελών απόδοσης του κύκλου στη βελτίωση της αποδοτικότητας των εγκαταστάσεων [26].

Κεφάλαιο 4 Μείγματα sCO₂

Εισαγωγή

Μια άλλη προσέγγιση που φαίνεται πολλά υποσχόμενη είναι αυτή των μειγμάτων CO₂ για κλειστό κύκλο Brayton. Αρχικά, τα εργαλεία ανάλυσης κύκλου ισχύος επικεντρώθηκαν στο sCO₂ ως εργαζόμενο ρευστό. Σε πρώιμους υπολογισμούς, παρατηρήθηκε ότι το κρίσιμο σημείο του CO₂ θα μπορούσε να αυξηθεί ή να μειωθεί προσθέτοντας μικρές ποσότητες άλλων υγρών. Η αύξηση της κρίσιμης θερμοκρασίας βρέθηκε χρήσιμη στην αύξηση της θερμοκρασίας απόρριψης θερμότητας για συστήματα κύκλου sCO₂ Brayton. Αυτές οι πρώτες αναλύσεις έδειξαν, ότι η μείωση της αποτελεσματικότητας λόγω των θερμοκρασιών απόρριψης θερμότητας θα μπορούσε να μειωθεί κατά 3.6% χρησιμοποιώντας πρόσθετα από CO₂. [15]

Η προκύπτουσα αύξηση στην απόδοση του κύκλου οφείλεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στη μη ιδανική συμπεριφορά του υγρού κοντά στο κρίσιμο σημείο. [27] Όπως είδαμε παραπάνω, η ανάγκη βελτίωσης της απόδοσης των σταθμών παραγωγής ενέργειας δίνει έμφαση στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του εξοπλισμού τους και των συνθηκών εισαγωγής και λειτουργίας τους. Για αυτόν τον λόγο, είναι σημαντικό να αναλυθεί πώς η χρήση υγρών μιγμάτων επηρεάζει τις συνθήκες λειτουργίας - κυρίως την απόδοση των εγκαταστάσεων. Υπάρχουν διαφορετικές εξωτερικές- περιβαλλοντικές συνθήκες από την εγκατάσταση που σηματοδοτούν την ανάγκη ύπαρξης υγρού λειτουργίας που να προσαρμόζεται σε αυτά τα μεταβλητά περιβάλλοντα, τόσο για χαμηλές όσο και για υψηλές θερμοκρασίες, με στόχο την βέλτιστη λειτουργία της εγκατάστασης.

Η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των βιομηχανικών και αστικών ενεργειακών διαδικασιών μετατροπής οδήγησε τους μηχανικούς να θεωρήσουν τη χρήση μιγμάτων sCO₂ ως ρευστό λειτουργίας για θερμοδυναμικούς κύκλους ισχύος και ψύξης, τονίζοντας τον μετριασμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, την εκπομπή αερίων θερμοκηπίου και τη μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας [28].

Πολλές διαμορφώσεις του κύκλου Brayton βρίσκονται υπό μελέτη επί του παρόντος. Ένα από τα πολύ ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά αυτού του κύκλου είναι η ικανότητά του να επιτυγχάνει υψηλή απόδοση σε μια ποικιλία εφαρμογών που λειτουργούν με ενδιάμεσα επίπεδα θερμοκρασίας: συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (CSP), ανάκτηση θερμότητας σε περιπτώσεις απόρριψης, σταθμοί παραγωγής ενέργειας άνθρακα και πυρηνικοί αντιδραστήρες μεταξύ άλλων.

Η προκύπτουσα αύξηση στην απόδοση του κύκλου οφείλεται σχεδόν εξ ολοκλήρου όπως προείπαμε στη μη ιδανική συμπεριφορά του υγρού κοντά στο κρίσιμο σημείο. Αυξάνοντας την κρίσιμη θερμοκρασία, ο κύκλος ισχύος θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί τη μη ιδανική συμπεριφορά του ρευστού με αποτέλεσμα να αυξηθεί η απόδοση του [28]. Σε αυτή την εργασία, έχει μελετηθεί η επίδραση των μιγμάτων υγρών στον κύκλο επανασυμπύεσης Brayton. Αυτός ο κύκλος ισχύος είναι η εξέλιξη της προηγούμενης διαμόρφωσης που πρότεινε ο Angelino το 1969 [29]. Επιπλέον τα παραδείγματα που θα αναφερθούν κάνουν χρήση του κύκλου επανασυμπύεσης που παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με άλλες διαμορφώσεις [30].

4.1 Εφαρμογές στην Ηλιακή ενέργεια

Στην παραγωγή ηλιακής ενέργειας έχουν γίνει πειράματα για την εύρεση του καλύτερου συνδυασμού μειγμάτων CO₂. Ωστόσο υπάρχει σημαντική έλλειψη δεδομένων και απαιτούνται αρκετά ακόμα για να διερευνηθούν όλες οι δυνατότητες των μειγμάτων με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού Εξωτερικών συνθηκών – μείγματος εργασίας λαμβάνοντας πάντα υπόψη τους περιορισμούς που θέτει ο εξοπλισμός. Παρακάτω ακολουθούν δύο περιπτώσεις πειραμάτων αποκλειστικά για εφαρμογή σε μονάδες παραγωγής ενέργειας.

Το κύριο μειονέκτημα του CO₂ ως ρευστό λειτουργίας είναι η σχετικά χαμηλή κρίσιμη θερμοκρασία του (31 °C) που σημαίνει ότι τα αέρια που μπορεί να πραγματοποιηθεί η μίξη και τα επακόλουθα θερμοδυναμικά πλεονεκτήματα, μπορούν να αξιοποιηθούν πλήρως μόνο εάν υπάρξει συμπίκνωση γύρω από αυτήν τη θερμοκρασία. Αυτό δεν είναι γενικά δυνατό σε περίπτωση ηλιακών σταθμών μεγάλης ισχύος που βρίσκονται σε ερημικές περιοχές, όπου η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορεί να μετατοπίσει την ελάχιστη θερμοκρασία κύκλου πάνω από 50 °C.

Όπως προαναφέρθηκε μια πιθανότητα για την υπέρβαση αυτού του ορίου μπορεί να γίνει τροποποιώντας την κρίσιμη θερμοκρασία του CO₂ με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων άλλων υγρών με υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία. Με αυτόν τον τρόπο, ο θερμοδυναμικός κύκλος μπορεί να προσαρμοστεί στις εκάστοτε συνθήκες περιβάλλοντος .

Ωστόσο εκτός από τους περιορισμούς των παραμέτρων λειτουργίας του υπερκρίσιμου κύκλου Brayton SBC, περισσότεροι παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή μειγμάτων με βάση το CO₂, όπως υψηλή θερμοδυναμική σταθερότητα, μικρή αύξηση για την κρίσιμη πίεση του μείγματος και χαμηλή διαβρωτική ικανότητα. Ιδιαίτερα, πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή στα προβλήματα ασφάλειας και στις επιπτώσεις στο περιβάλλον

Η ιδέα της χρήσης μειγμάτων CO₂ για την τροποποίηση των κρίσιμων ιδιοτήτων του ρευστού εργασίας έχει διερευνηθεί στο παρελθόν, κυρίως από την Sandia National Labs στις Ηνωμένες Πολιτείες [15]. Αυτό το ίδρυμα επιβεβαίωσε ότι η προσθήκη ενός κλάσματος βουτανίου στο ρευστό εργασίας αυξάνει την κρίσιμη θερμοκρασία και ως εκ τούτου, την αποδοτικότητα του κύκλου, ενώ η προσθήκη εξαφθοριούχου θείου SF₆ έχει το αντίθετο αποτέλεσμα (η κρίσιμη θερμοκρασία μειώνεται).

Σε μια προηγούμενη εργασία, μετά από μια σύντομη έρευνα για μερικά πιθανά υποψήφια υγρά κατάλληλα για ανάμιξη με CO₂, οι συγγραφείς επικεντρώθηκαν στο μείγμα N₂O₄ / CO₂ (Τετροξειδίο του αζώτου και διοξείδιο του άνθρακα). Οι πιθανές επιπτώσεις από την μείωση στο κανονικοποιημένο κόστος ηλεκτρισμού (Levelized cost of Electricity) LCOE που μπορούν να επιτευχθούν με την υιοθέτηση αυτού του μείγματος σε ηλιακούς σταθμούς μεγάλης ισχύος, παρουσιάστηκαν χρησιμοποιώντας θερμοδυναμική μελέτη του κύκλου ισχύος.

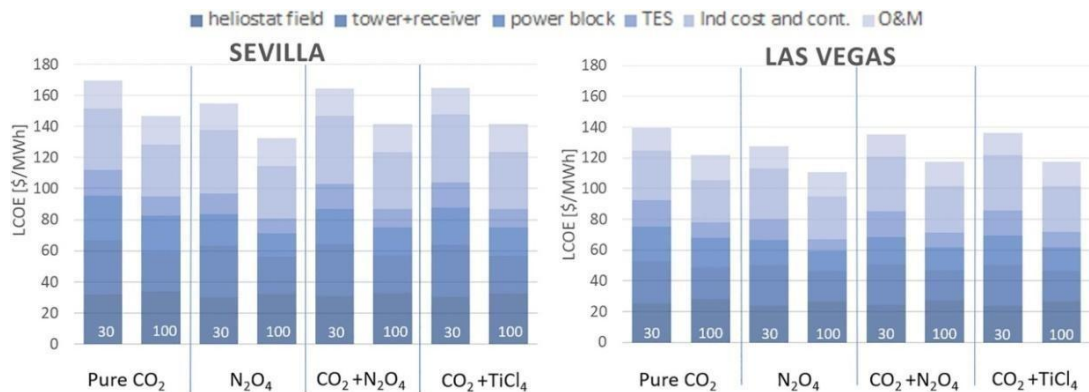
Ένα άλλο ρευστό που προηγουμένως διερευνήθηκε και αξιολογήθηκε είναι το τετραχλωριούχο τιτάνιο (TiCl₄). Χάρη στις ευνοϊκές θερμοδυναμικές ιδιότητες του, μπορεί να αναμειχθεί με CO₂ για σωστή ρύθμιση της κρίσιμης θερμοκρασίας του μείγματος CO₂-TiCl₄ που προκύπτει. Συγκρίνοντας τα μείγματα CO₂-N₂O₄ και CO₂-TiCl₄ ως καινοτόμο ρευστό εργασίας για θερμοδυναμική μετατροπή σε σταθμό παραγωγής ενέργειας ηλιακού πύργου. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2: Θερμοδυναμικές ιδιότητες $TiCl_4$ και N_2O_4/NO_2

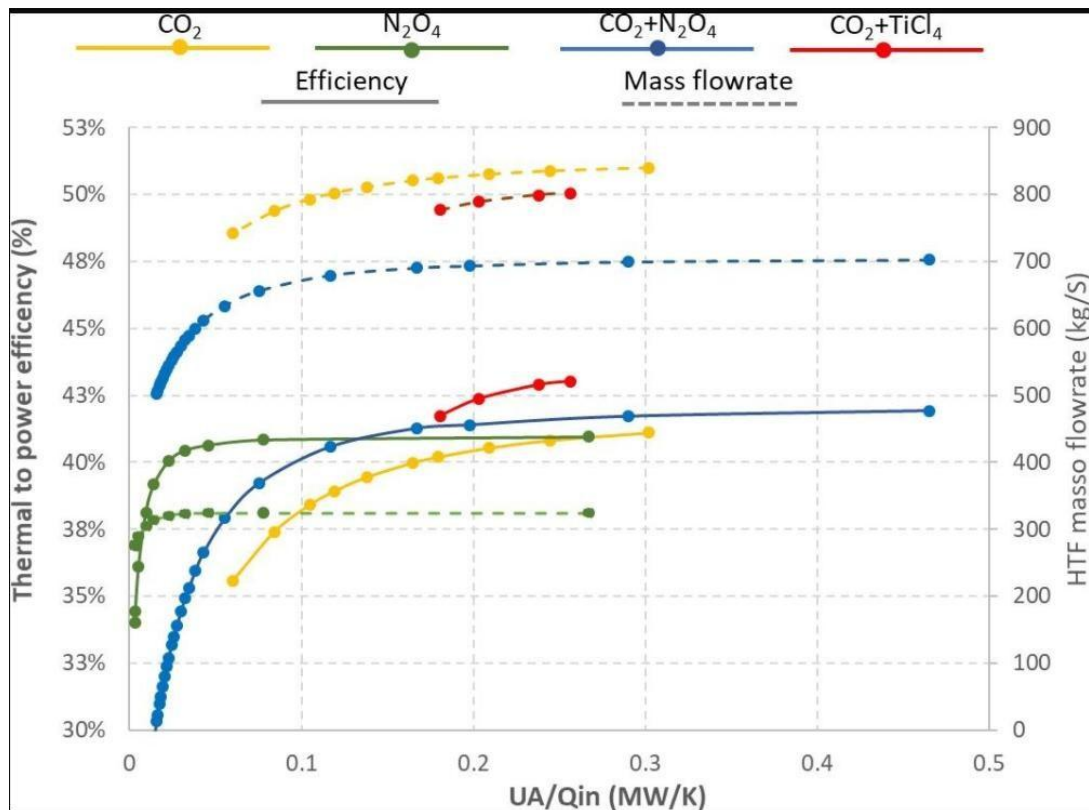
	CO_2	$TiCl_4$	N_2O_4	NO_2
Θερμοκρασία τήξης (°C)	-56,57	-24,10	-11,23	-11,25
Θερμοκρασία Βρασμού (°C)	-78,45	135,85	21,15	21,00
Κρίσιμη θερμοκρασία(°C)	31,06	364,85	158,2	158,00
Κρίσιμη πίεση (bar)	73,83	46,61	99,76	101,32
Μοριακή μάζα (g/mol)	44,01	189,69	92,01	46,01

Για μια ηλιακή θερμοηλεκτρική μονάδα, η μέγιστη θερμοκρασία στον κύκλο συμπίεσης sCO_2 μπορεί να είναι 550-700°C. Συνήθως χρησιμοποιούνται διαμορφώσεις ηλιακού πύργου χρησιμοποιώντας ρευστό νάτριο ως HTF για την αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας από 565 ° C σε 700°C παράγοντας που θεωρείται ότι αξιολογεί τη μέγιστη επίδραση θερμοκρασίας στη συνολική απόδοση της εγκατάστασης.

Το αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η απόδοση του κύκλου να αυξηθεί κατά 49% για το μείγμα CO_2 - N_2O_4 και 50% για το CO_2 - TiCl_4 που επιβεβαιώνονται και στα διαγράμματα που ακολουθούν. Ακόμη αν εφαρμοστεί μια διάταξη ενός απλού κύκλου αναγέννησης κάτι που σημαίνει πιο απλή διάταξη προκύπτει μια μείωση του κόστους της κιλοβατώρας κοντά στο 50% και στο 20% σε σύγκριση με το συμβατικό κύκλο ατμού [31].



Εικόνα 9: Μείωση του κόστους με τη χρήση των προαναφερθέντων μειγμάτων [31]



Εικόνα 10: Απόδοση του κύκλου για τα διαφορετικά μείγματα και τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας στον αναγεννητή [31].

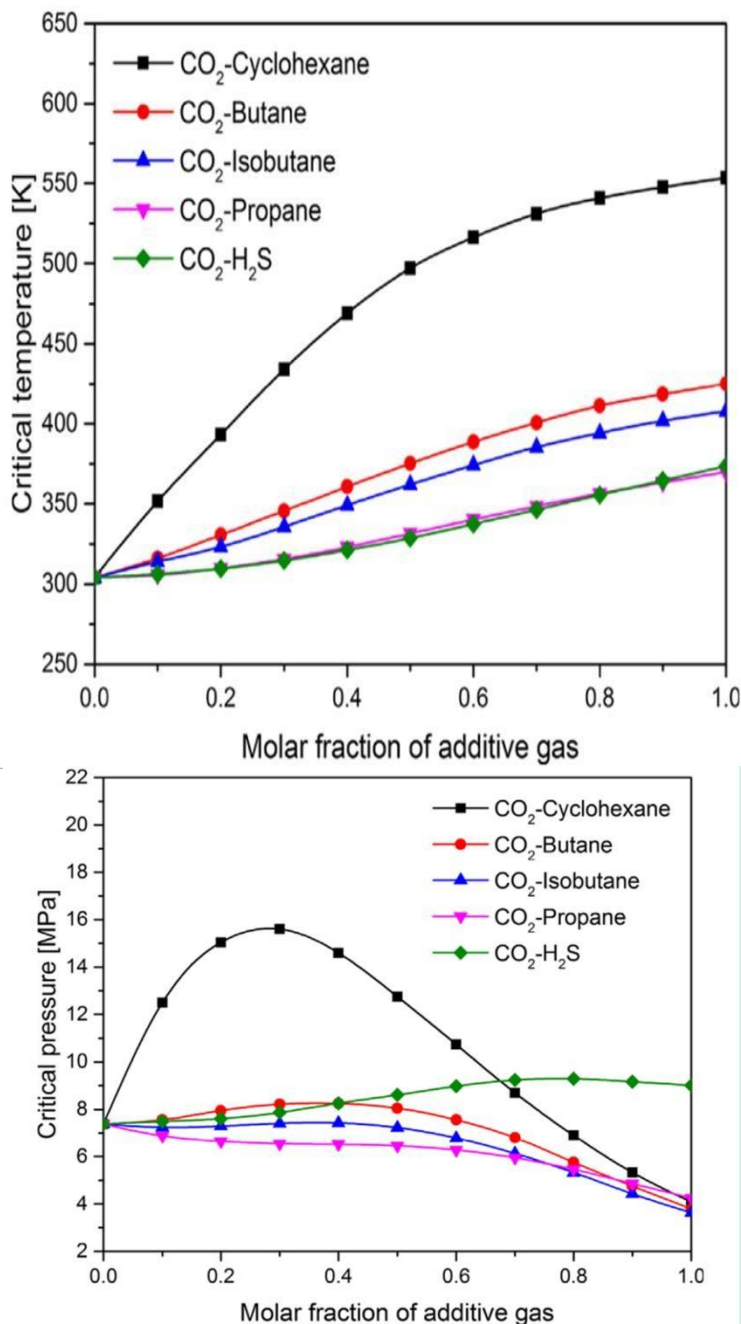
Μια άλλη μελέτη πραγματοποιήθηκε μόνο για δυαδικά μίγματα αερίων λόγω της έλλειψης πειραματικών δεδομένων σχετικών μιγμάτων αλλά κυρίως λόγω της απλότητας και της εμπορικής διαθεσιμότητας. Η θερμική σταθερότητα του μείγματος καθορίζεται από τη σταθερότητα του καθαρού πρόσθετου υπό την ίδια θερμοκρασία. Επιπλέον, λόγω της έλλειψης δεδομένων πειράματος σχετικά με τη σταθερότητα απαιτείται στοχευμένη έρευνα. Μετά την προκαταρκτική εξέταση, επιλέγονται πέντε αέρια μεταξύ των διαθέσιμων στο εμπόριο αερίων ως πιθανοί υποψήφιοι για τον κύκλο επανασυμπύεσης Brayton. Τα δεδομένα θερμοδυναμικών ιδιοτήτων παρατίθενται στον Πίνακα 3, με αναφορά στις βάσεις δεδομένων Aspen και GESTIS

Πίνακας 3: Δεδομένα θερμοδυναμικών ιδιοτήτων με αναφορά στις βάσεις δεδομένων Aspen και GESTIS[32],[33].

Φυσικά δεδομένα			
Ουσία	Μοριακή Μάζα (kg/kmol)	T _{cr} (° C)	P _{cr} (MPa)
Κυκλοεξάνιο C ₆ H ₁₂	84,16	280,4	4,05
Βουτάνιο C ₄ H ₁₀	58,12	151,9	3,79
Ισοβουτάνιο C ₄ H ₁₀	58,15	135,0	3,65
Προπάνιο C ₃ H ₈	44,10	96,8	4,25
Υδρόθειο H ₂ S	34,08	100,4	9,01

Πρέπει να σημειωθεί ότι το δυαδικό οξύ H₂S έχει υψηλότερες απαιτήσεις για στεγανοποίηση και υλικό συστατικών λόγω της τοξικότητας του και της διάβρωσης. Οι κρίσιμες θερμοκρασίες και οι κρίσιμες πιέσεις του μείγματος με βάση το CO₂ υπολογίζονται και εκφράζονται ως συνάρτηση του μοριακού κλάσματος του προστιθέμενου αερίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 11^α και 11^β. Μπορεί να φανεί ότι η

κρίσιμη θερμοκρασία θα αυξηθεί με την αύξηση του μοριακού κλάσματος των προσθέτων αερίου. Σε πέντε υποψήφιους, το Κυκλοεξάνιο δείχνει ένα καλύτερο αποτέλεσμα βελτίωσης. Σε σύγκριση με την κρίσιμη θερμοκρασία, οι κρίσιμες πιέσεις έχουν μικρή αλλαγή εντός του εύρους 0–0,5 εκτός από εκείνη του κυκλοεξανίου.



Εικόνα 11:α) οι κρίσιμες θερμοκρασίες σαν συνάρτηση του μοριακού κλάσματος των προσθέτων αερίου β) κρίσιμη πίεση σαν συνάρτηση του μοριακού κλάσματος των προσθέτων αερίου[34].

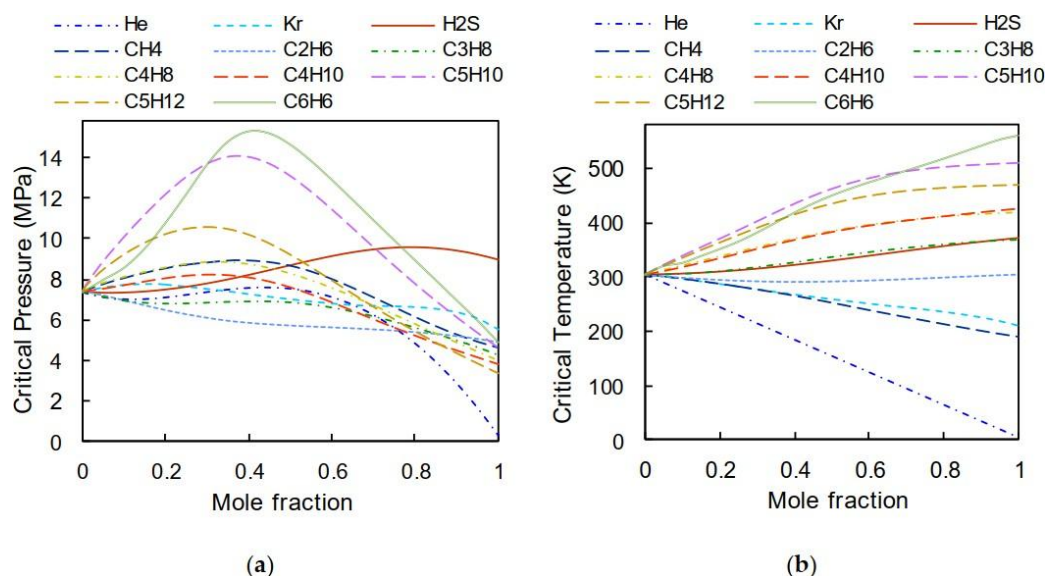
Από την μελέτη όλων των παραπάνω λαμβάνονται τα ακόλουθα συμπεράσματα

- Λόγω της τοξικότητας και της διαβρωτικότητας του, το H₂S έχει υψηλότερες απαιτήσεις για στεγανοποίηση και υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στην

εγκατάσταση και δεν είναι η πρώτη επιλογή.

- Σε σύγκριση με τον υπερκρίσιμο κύκλο Brayton με αποκλειστική χρήση διοξειδίου του άνθρακα, οι υπερκρίσιμοι κύκλοι ισχύος Brayton που χρησιμοποιούν ρευστά εργασίας μίγματος έδειξαν καλύτερη απόδοση κύκλου υπό υψηλότερες συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Ειδικά, σε υψηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, έχει σημαντικότερο δυναμικό για τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης του κύκλου. Το CO₂-H₂S SBC παρουσίασε την άριστη απόδοση και η βελτίωση της θερμικής απόδοσης του κύκλου σε σχέση με το υπερκρίσιμο κύκλο Brayton με αποκλειστική χρήση διοξειδίου του άνθρακα, ήταν τόσο υψηλό όσο το 7,35%.
- Σε σύγκριση με τον υπερκρίσιμο κύκλο Brayton με αποκλειστική χρήση διοξειδίου του άνθρακα, η απώλεια εξέργειας του προφυκτήρα στους κύκλους μιγμάτων μειώνεται σημαντικά. Ωστόσο, για τον υπερκρίσιμο κύκλο Brayton του CO₂-βουτανίου, του CO₂-ισοβουτανίου και του CO₂-προπανίου, η απώλεια ενέργειας αυξάνεται λόγω της μεγαλύτερης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των δύο πλευρών στον ανακτητή υψηλής θερμοκρασίας.
- Οι θερμικές αποδόσεις των κύκλων ισχύος Brayton που χρησιμοποιούν ρευστά εργασίας μίγματος αυξάνονται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου, αλλά ταυτόχρονα μειώνεται η βελτίωση τους σε σχέση με τον υπερκρίσιμο κύκλο Brayton με αποκλειστική χρήση διοξειδίου του άνθρακα. Όταν η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου είναι 700°C, μόνο ο κύκλος CO₂-H₂S εξακολουθεί να έχει σημαντικά πλεονεκτήματα.

Παρόμοια συμπεριφορά παρουσίασαν τα μίγματα s-CO₂/He, s-CO₂/Kr, s-CO₂/H₂S, s-CO₂/CH₄, s-CO₂/C₂H₆, s-CO₂/C₃H₈, s-CO₂/C₄H₈, s-CO₂/C₄H₁₀, s-CO₂/C₅H₁₀, s-CO₂/C₅H₁₂ και s-CO₂/C₆H₆ όπως φαίνεται από την **Εικόνα 12 [35]**.



Εικόνα 12: Η κρίσιμη πίεση και οι κρίσιμες θερμοκρασίες και σαν συνάρτηση του μοριακού κλάσματος των προσθέτων αερίου[35]

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η προσθήκη He, Kr, CH₄ και C₂H₆ μειώνει την κρίσιμη θερμοκρασία και συνεπώς αυξάνει τη θερμική απόδοση του κύκλου ισχύος. Τα μίγματα υγρών εργασίας s-CO₂ / He (90.0 / 10.0) και s-CO₂ / Kr (68.0 / 32.0) αυξάνουν την απόδοση του κύκλου ισχύος από 49,0% σε 53,0%. Επιπλέον, το κρυπτό και το ήλιο είναι αδρανή αέρια και η προσθήκη τους στο καθαρό s-CO₂ είναι πολύ ευεργετική για την αποφυγή της διάβρωσης των υλικών του. Ως αποτέλεσμα η απόδοση του σημείου σχεδιασμού του ηλιακού σταθμού βελτιώνεται κατά περίπου 3–4% κατά την προσθήκη των αναφερόμενων ουσιών σε σύγκριση με την αναφορά καθαρού s-CO₂. [36]

Αντίστοιχες μελέτες έχουν παρουσιαστεί καταλήγοντας στο καταλληλότερο μείγμα από αυτά που έχουν επιλεγεί χωρίς όμως ωστόσο να έχει καθοριστεί μια ξεκάθαρη διαδικασία για την επιλογή του καταλληλότερου μείγματος ανάλογα με τις συνθήκες. Επομένως είναι ένας παράγοντας που χρήζει ακόμα αρκετής μελέτης.

4.2 Εφαρμογές στην Πυρηνική ενέργεια

Σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση πυρηνικής ενέργειας έχουν γίνει προσομοιώσεις σε πειραματικό επίπεδο με διάφορα μίγματα που παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τα παραπάνω. Στις συγκεκριμένες εφαρμογές οι συνθήκες διαφέρουν από τους ηλιακούς σταθμούς παραγωγής

ενέργειας επειδή η παραγωγή ενέργειας είναι αρκετά μεγάλη και συνεχόμενη, γεγονός που καθιστά την αντοχή των υλικών στις θερμοκρασίες και στη διαβρωτική συμπεριφορά των μειγμάτων ιδιαίτερα σημαντική. Επιπλέον η σταθερότητα των μειγμάτων αποτελεί μείζων ζήτημα για την αποφυγή ατυχημάτων.

Από θερμοδυναμική άποψη, μια χαμηλότερη θερμοκρασία ψυχρής πηγής μπορεί να αυξήσει την απόδοση του κύκλου. Επιπλέον, υπό μια δεδομένη πίεση εξόδου συμπιεστή και όταν η πίεση εισόδου του συμπιεστή είναι σταθερή σε μια ορισμένη τιμή πάνω από την κρίσιμη πίεση των ρευστών εργασίας, η εργασία του συμπιεστή μπορεί να προσδιοριστεί από την κρίσιμη πίεση των ρευστών εργασίας, η οποία έχει μεγάλη επίδραση στην απόδοση του κύκλου. Παρακάτω μελετάται η βελτίωση στην απόδοση του κύκλου Brayton μετατοπίζοντας το κρίσιμο σημείο του υγρού εργασίας.

Όπως προαναφέρθηκε για να υπάρξει αλλαγή στην κρίσιμη θερμοκρασία του CO₂, μια αποτελεσματική μέθοδος είναι η προσθήκη ένα άλλου αερίου στο CO₂ με σκοπό τη δημιουργία ενός δυαδικού μίγματος με βάση το CO₂. Για τη δημιουργία δυαδικών μιγμάτων με βάση το CO₂, εξετάστηκαν κρίσιμα σημεία πιθανών πρόσθετων σε σχέση με τη συγκέντρωσή τους ως δυνητικά μείγματα υγρών εργασίας.

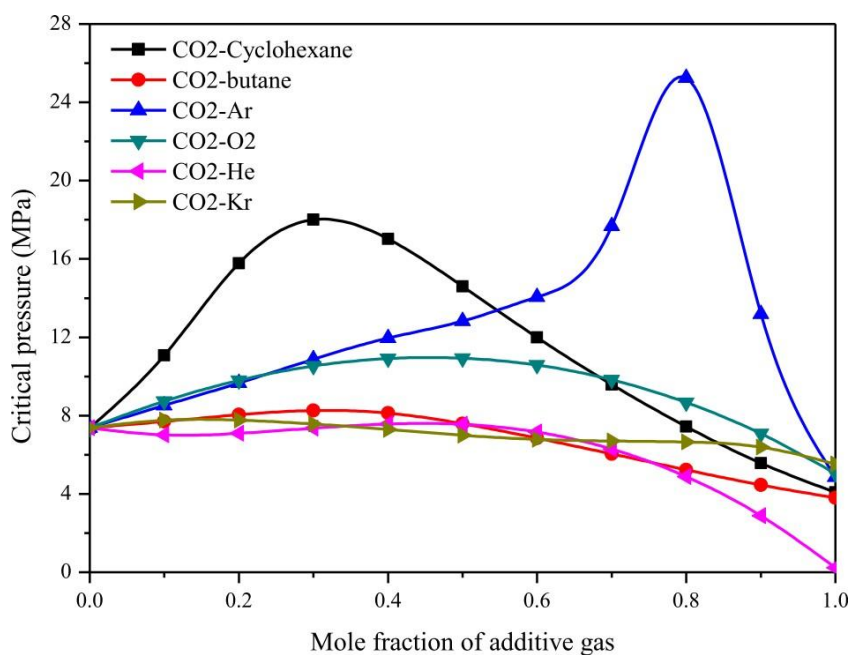
Από τη μία πλευρά, μια υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία σημαίνει χαμηλότερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας πηγής θερμότητας και της χαμηλότερης θερμοκρασίας ρευστού λειτουργίας στο σύστημα, η οποία τείνει να μειώσει την απόδοση του κύκλου σύμφωνα με την έννοια του κύκλου Carnot. Από την άλλη πλευρά, μια αυξημένη κρίσιμη θερμοκρασία των μιγμάτων αερίου θα μείωνε την ισχύ του συμπιεστή υπό δεδομένη απόδοση συμπιεστή, η οποία τείνει να αυξάνει την απόδοση του κύκλου.

Ομοίως για την κρίσιμη πίεση ενός μίγματος αερίου, μια υψηλότερη κρίσιμη πίεση σημαίνει χαμηλότερη πίεση του συμπιεστή υπό μια δεδομένη πίεση εξόδου του κύριου συμπιεστή, η οποία τείνει να αυξάνει την απόδοση του κύκλου.

Σε αυτό το άρθρο, αναλύονται τα δυαδικά μείγματα CO₂ με βάση CO₂ - O₂, CO₂ - He, CO₂ - Ar, CO₂ - Kr, CO₂ – βουτάνιο (C₄H₁₀) και CO₂ – κυκλοεξάνιο (C₆H₁₂) για την επιλογή των υγρών εργασίας για το SBC (υπερκρίσιμο αέριο Brayton κύκλος). Οι θερμο ιδιότητες και τα κρίσιμα σημεία των δυαδικών μιγμάτων με βάση

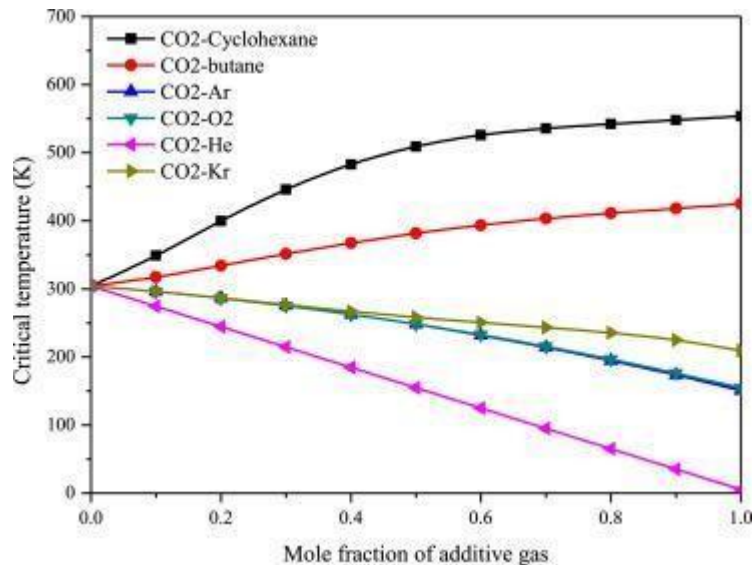
το CO₂ αξιολογήθηκαν από τη βάση δεδομένων NIST REFPROP[36]. Οι εικόνες 13 και 14 δείχνουν αντίστοιχα την κρίσιμη πίεση και θερμοκρασία του μείγματος σε σχέση με το γραμμομοριακό κλάσμα των προσθέτων αερίων.

Η εικόνα 13 δείχνει ότι η πορεία των κρίσιμων γραμμών είναι πολύ διαφορετική μεταξύ των διαφορετικών δυαδικών μιγμάτων με βάση το CO₂ και οι σχέσεις μεταξύ της κρίσιμης πίεσης και του μοριακού κλάσματος είναι μη γραμμικές. Από την εικόνα 13, με την αύξηση του γραμμομοριακού κλάσματος των προσθέτων αερίων, η κρίσιμη πίεση των μιγμάτων CO₂-Ar, CO₂-O₂ και CO₂-κυκλοεξανίου εμφανίζει μέγιστη τιμή. Για μίγματα CO₂ – Kr, CO₂ – He και CO₂ – βουτανίου, η κρίσιμη πίεση μειώνεται μονοτονικά μετά από μια σχετικά επίπεδη τάση πριν από ένα κλάσμα γραμμομορίων περίπου 0,5.



Εικόνα 13: Διακύμανση της κρίσιμης πίεσης του μείγματος έναντι του γραμμομοριακού κλάσματος των προσθέτων αερίων[36]

Για τις κρίσιμες θερμοκρασίες στην εικόνα 14 οι κρίσιμες κατανομές θερμοκρασίας είναι σχεδόν γραμμικές σε σχέση με το γραμμομοριακό κλάσμα. Οι κρίσιμες θερμοκρασίες CO₂-βουτανίου και CO₂-κυκλοεξανίου κλίνουν προς τα πάνω, ενώ οι κρίσιμες θερμοκρασίες των CO₂ – He, CO₂ – Ar, CO₂ – O₂ και CO₂ – Kr κλίνουν προς τα κάτω.



Εικόνα 14: Διακύμανση της κρίσιμης θερμοκρασίας του μίγματος έναντι του γραμμομοριακού κλάσματος των προσθέτων αερίων[36]

Επομένως, με βάση τις κρίσιμες τάσεις κατανομής θερμοκρασίας, τα δυαδικά μίγματα με βάση το CO₂ μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες:

- ο αύξουσα κρίσιμη ομάδα θερμοκρασίας, συμπεριλαμβανομένου του CO₂-βουτανίου και του CO₂-κυκλοεξανίου και
- την φθίνουσα κρίσιμη ομάδα θερμοκρασίας συμπεριλαμβανομένων των CO₂ – He, CO₂ – Kr, CO₂ – Ar και CO₂ – O₂.

Παρατηρήστε ότι τόσο η ανερχόμενη όσο και η κατηφορική είναι σχετική με το καθαρό CO₂ με την πίεση και τη θερμοκρασία του να εμφανίζονται σε κλάσμα μηδενικού γραμμομορίου.

Μπορούν να γίνουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1) Οι επιδράσεις του γραμμομοριακού κλάσματος των πρόσθετων αερίων στην κρίσιμη πίεση και τη θερμοκρασία των δυαδικών μιγμάτων με βάση το CO₂ είναι διαφορετικές για διαφορετικά πρόσθετα αέρια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικές επιδόσεις κύκλου όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικά δυαδικά μίγματα με βάση το CO₂ ως υγρά εργασίας.

2) Σύμφωνα με την επίδραση της θερμοκρασίας εξόδου του αντιδραστήρα στην απόδοση του κύκλου, διαπιστώνεται ότι μπορεί να επιτευχθεί υψηλή απόδοση κύκλου άνω του 41,5% με θερμοκρασία εξόδου αντιδραστήρα 450 °C όταν το μείγμα CO₂He ή το μείγμα CO₂ Kr χρησιμοποιείται ως ρευστό εργασίας. Επομένως, για να επιτευχθεί σημαντικά υψηλή απόδοση κύκλου, ο κύκλος Brayton με μείγμα CO₂ He ή

μείγμα CO₂ Kr μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν η ισχύς εξόδου είναι σχετικά χαμηλή σε σχετική χαμηλή θερμοκρασία εισόδου στροβίλου.

3) Σε σύγκριση με την απόδοση του κύκλου Brayton με καθαρό υπερκρίσιμο CO₂ ως ρευστό εργασίας, ο κύκλος Brayton με το μείγμα CO₂ He και το μείγμα CO₂ Kr πλεονεκτούν καθώς τα υγρά εργασίας μπορούν να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα του κύκλου και να μειώσουν τις ποσότητες μεταφοράς θερμότητας στους αναγεννητές χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας. Λόγω της χαμηλότερης κρίσιμης θερμοκρασίας σε σύγκριση με εκείνη του καθαρού CO₂, το μείγμα CO₂ He και το μείγμα CO₂ Kr μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν ο κύκλος Brayton λειτουργεί σε αρκτική περιοχή ή σε κύκλο μετατροπής ισχύος με χαμηλότερη θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας. Ωστόσο, σε υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία από εκείνη του καθαρού CO₂, τα μείγματα CO₂ κυκλοεξανίου και CO₂ βουτανίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον κύκλο Brayton που λειτουργεί σε *άνυδρη περιοχή* ή σε κύκλο μετατροπής ισχύος με υψηλότερη θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας[36]

Τέλος σαν αναφορά η ιδέα του εργαζόμενου ρευστού να είναι κάτι πέρα από τον ατμό έχει υιοθετηθεί και στους διαστημικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες για την παραγωγή ενέργειας. Το μικρό μέγεθος μιας τέτοιου τύπου μονάδας και η μεγάλη απόδοση τα καθιστούν ιδανική λύση. Εκεί ωστόσο δε χρησιμοποιείται το CO₂ σαν ρευστό εργασίας αλλά τα ευγενή αέρια με κύριο το He. Αυτό με το μικρότερο μοριακό βάρος έχει τις καλύτερες ιδιότητες για τη μεταφορά θερμότητας ωστόσο εμφανίζει και τη μεγαλύτερη τεχνική δυσκολία. Η τεχνολογία σε αυτόν τον τομέα αναμένεται να εξελιχθεί κι άλλο δίνοντας ακόμα περισσότερα στοιχεία για την χρήση αερίων σαν ρευστά εργασίας. [37]

4.3 Εφαρμογές στη Γεωθερμία

Στα συστήματα παραγωγής ενέργειας με γεωθερμία έχουν υπάρξει αρκετές μελέτες για την χρήση μειγμάτων sCO₂ με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης του κύκλου. Μια από τις σημαντικότερες ήταν αυτή της Sandia National Laboratories [28]. Σε αυτή έγινε σύγκριση των κύκλων ισχύος s-CO₂ με και χωρίς πρόσθετα για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης. Ο κύκλος είναι ένας τροποποιημένος κύκλος Brayton επανασυμπίεσης που δεν χρησιμοποιεί τον ανακτητή υψηλής θερμοκρασίας.

Ωστόσο, η ψύξη αποβλήτων χρησιμοποιεί μόνο ένα μέρος του υγρού εργασίας. Αυτός ο κύκλος καλείται μερικές φορές κύκλος διαίρεσης-ροής επειδή ένα κλάσμα του υγρού διέρχεται απευθείας μέσω ενός συμπιεστή. Στην ουσία, αυτή η ροή επανασυμπιέσης χρησιμοποιεί τον ανακτητή ως μονάδα απορρίψεως θερμότητας, αλλά σε υψηλότερη θερμοκρασία από ό, τι στο ψυγείο αερίου. Για περαιτέρω αύξηση της απόδοσης, παρέχονται τρία στάδια επαναθέρμανσης και ένα στάδιο ενδιάμεσης ψύξης.

Για αυτόν τον κύκλο, η προβλεπόμενη απόδοση κύκλου είναι 18,1% όταν χρησιμοποιείται μείγμα βουτανίου και CO₂ 10 % mole. Για σύγκριση, ο ίδιος κύκλος που χρησιμοποιεί καθαρό CO₂ λειτουργεί με απόδοση κύκλου 14,5%. Αυτή η αύξηση 3,6 εκατοσטיαίων μονάδων αντιπροσωπεύει αύξηση κατά 25% στην απόδοση του κύκλου. Αυτό δείχνει ξεκάθαρα τη βελτίωση που μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μίγματα CO₂, ή πρόσθετα στο CO₂, για την προσαρμογή του υγρού εργασίας ώστε να ταιριάζει στις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες λειτουργεί.

Μια λεπτομερής σύγκριση του καθαρού κύκλου CO₂ και του μίγματος κύκλου CO₂ / βουτανίου παρέχεται στον Πίνακα 4.

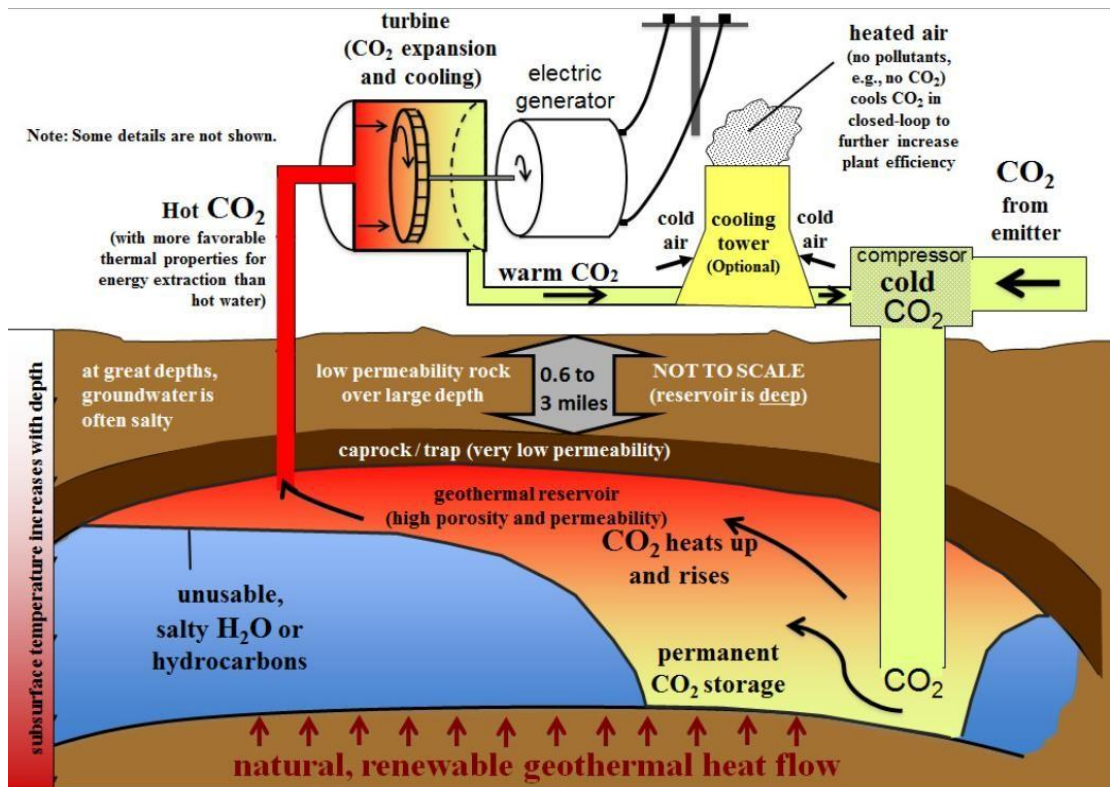
Πίνακας 4: Λεπτομερής σύγκριση του καθαρού κύκλου CO₂ και του μίγματος κύκλου CO₂ / βουτανίου

Parameter	Variable Name	CO ₂ / 10% Butane	CO ₂
Inlet Values			
Turbine Inlet T (K)	T.5	433.15	433.15
Fractional Pressure Drop	f.dp	0.0071	0.0071
Compressor Pressure Ratio	r.c	2.64	2.21
Compressor Inlet Pressure (kPa)	p.1	8500	8500
Compressor Inlet Temperature (K)	T.1	320	320
Mass Flow Rate (kg/s)	mdot	50	50
Split Flow Fraction through Chiller	f.split	0.83	0.61
Recuperator Approach Temperature (K)	dT.appr	4.00	4.00
Compressor Isentropic Efficiency	-	0.92	0.92
Recompressor Isentropic Efficiency	-	0.87	0.87
Turbine Isentropic Efficiency	-	0.97	0.97
Fraction of Carnot	-	0.69	0.56
Carnot Efficiency	-	0.26	0.26
Power (kW)			
Heat Transferred in HP Leg of LT Recuperator	-	6706.41	5234.17
Heat Transferred in LP Leg of LT Recuperator	-	6706.41	5234.17
Heat Transferred in HP Leg of HT Recuperator	-	0	0
Heat Transferred in LP Leg of HT Recuperator	-	0	0
Reactor Power (kW)			
Main Compressor Power	P.Comp	448.39	444.74
Main Compressor Power B	P.Comp.B	550.24	300.62
Recompressor Power	P.ReComp	376.16	828.52
Turbine Power	P.turb	2675.32	2369.87
Chiller Heat Transfer	Q.Chill	5904.46	4697.44
TAC Power	P.TAC	1300.53	796.00
	P.TAC-chk	1300.5	796.00
Cycle Efficiency	-	0.18	0.15

Σημειώστε ότι η απόδοση του κύκλου Carnot για αυτόν τον κύκλο είναι 26,1% και η απόδοση κύκλου CO₂ / βουτανίου λειτουργεί στο 69,1% της απόδοσης Carnot

Τα παραπάνω αποτελέσματα προσομοίωσης αποκαλύπτουν ορισμένες σημαντικές τάσεις για λειτουργία με υγρά εργασίας SF₆-CO₂. Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι η επίδραση του κλάσματος SF₆ στο ρευστό εργασίας αλλάζει ανάλογα με την πίεση και τη θερμοκρασία εισόδου της αντλίας όπως σε όλα τα μείγματα που έχουμε συναντήσει μέχρι τώρα. Με την πίεση εισόδου αντλίας υψηλότερη από την κρίσιμη, η αποτελεσματικότητα μειώνεται με την αύξηση του κλάσματος SF₆ όταν λειτουργεί με υψηλές αναλογίες πίεσης κύκλου.[38]

Ωστόσο, όταν η θερμοκρασία εισόδου της αντλίας αυξάνεται και ένας κύκλος Brayton έχει ως αποτέλεσμα, η θερμική απόδοση αυξάνεται με την αύξηση του κλάσματος SF₆. Για σχεδόν όλους τους συνδυασμούς παραμέτρων που εξετάζονται σε αυτήν τη μελέτη, ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας τόσο στον εξατμιστή όσο και στον συμπυκνωτή μειώνεται με το αυξανόμενο κλάσμα SF₆ λόγω των μεταβολών στο ιξώδες και τη θερμική αγωγιμότητα του μείγματος.



Εικόνα 15: Απλοποιημένο Εικόνα μιας πιθανής διάταξης CPG [39]

Μια άλλη προσέγγιση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της γεωθερμίας είναι η τεχνική γεωθερμικού νέφους CO₂ ή CPG που παράγει ενέργεια

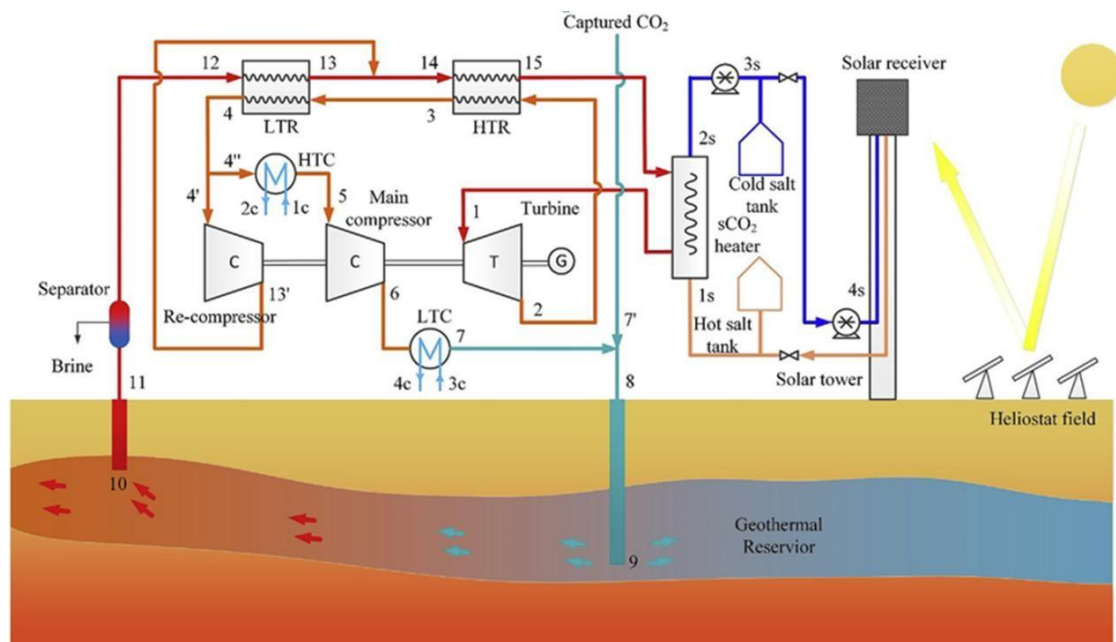
από απόβλητα CO₂ που εκπέμπεται από πηγές. Οι πηγές μπορεί να είναι ρεύμα αποβλήτων από σταθμούς παραγωγής ενέργειας όπως ο σταθμός παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, εργοστάσια αιθανόλης, βιομηχανίες τσιμέντου, βιομηχανίες χάλυβα κ.λπ. Το CO₂ συλλαμβάνεται χρησιμοποιώντας τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS) μετά τις οποίες μπορεί να μεταφερθεί μέσω αγωγών απευθείας σε γεωθερμική εγκατάσταση για άμεση χρήση. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί πρέπει να είναι διαπερατά πετρώματα και οι δεξαμενές μπορούν να αποτελούνται από ποικιλία τύπων πετρωμάτων όπως πυριγενείς πετρώματα, μεταμορφικούς βράχους, ασβεστόλιθο, ιζηματογενή πετρώματα κ.λπ. Η τεχνολογία Cpg περιλαμβάνει ψεκασμό CO₂ σε βαθιούς φυσικά πορώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς που υπάρχουν σε παγκόσμιο επίπεδο όπου το διοξείδιο αντικαθιστά τα φυσικά σχηματισμένα υγρά. Έπειτα αυτό θερμαίνεται μέσω της θερμότητας από το πυρήνα της γης και χρησιμοποιείται σαν ρευστό

εργασίας. Εκεί εκτονώνεται τροφοδοτώντας μια γεννήτρια που θα παράξει ενέργεια και έπειτα ακολουθεί μια από τις παρακάτω εκδοχές,

- στέλνεται πίσω μέσω ενός εναλλάκτη να θερμάνει ένα δεύτερο ρευστό εργασίας το οποίο είναι δυαδικό μείγμα
- παρέχει ενέργεια για απευθείας θέρμανση .

Έπειτα αυτή η ποσότητα του διοξειδίου μεταφέρεται ξανά στην υπόγεια δεξαμενή και αποθηκεύεται στους γεωλογικούς σχηματισμούς.

Πατώντας πάνω σε αυτή τη τεχνολογία έγινε πλέον μελέτη για συνδυασμό ηλιακού πύργου με σύστημα γεωθερμίας για τη κάλυψη της ζήτησης. Αυτή η εκδοχή μελετάται στην εργασία «Thermoeconomic analysis of a CO₂ plume geothermal and supercritical CO₂ Brayton combined cycle using solar energy as auxiliary heat source» και η διάταξη της παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 16: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης συμπαραγωγής ενέργειας από γεωθερμία και ηλιακή ενέργεια [40]

Πιο συγκεκριμένα:

- Ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή ενέργεια είναι υποσύστημα ηλιακού πύργου και με χρήση λιωμένων αλάτων. Στα μεγάλα

βάθη το νερό το οποίο βρίσκεται είναι κατά κύριο λόγο αλμυρό επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη διάταξη. Χρησιμοποιείται ως βοηθητική πηγή θερμότητας για περαιτέρω βελτίωση της θερμοκρασίας του υπερκρίσιμου CO₂ που παράγεται.

- Ένας κύκλος sCO₂ Brayton χρησιμοποιεί τη γεωθερμική ενέργεια και την ηλιακή ενέργεια. Ένας διαχωριστής αφαιρεί το αλατόνερο από το ρευστό για να αποφύγει τα ζητήματα διάβρωσης για τον κύκλο sCO₂. Ο σχεδιασμός του επανασυμπιεστή εξασφαλίζει μια λογική τιμή θερμοκρασίας συμπίεσης καθώς επίσης και αυξάνει τη θερμική απόδοση. Επιπλέον, χρησιμοποιείται εναλλάκτης χαμηλής θερμοκρασίας (LTC) μειώνοντας τη θερμοκρασία του υπερκρίσιμου CO₂ από τον κύριο συμπιεστή.

Αυτό το νέο σύστημα μπορεί όχι μόνο να βοηθήσει στην επίλυση του προβλήματος της αποθήκευσης CO₂ αλλά και να έχει ολοκληρωμένη αξιοποίηση της γεωθερμικής και ηλιακής ενέργειας.

Τα αποτελέσματα είναι:

- Τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης GA δείχνουν ότι το πιο αποδοτικό CPG-sCO₂O συνδυασμένος κύκλος μπορεί να επιτύχει θερμική απόδοση 19,57%, η οποία έχει αύξηση απόδοσης 5,65% και 4,07% σε σχέση με τα συστήματα CPG με έμμεσους κύκλους sCO₂ και οργανικούς κύκλους Rankine, αντίστοιχα.
- Τα οικονομικά οφέλη από το μικρότερο κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας σε σχέση με το κύκλο ατμού που θα αποκτηθούν από το συνδυασμένο κύκλο CPG-sCO₂ είναι αρκετά μεγάλα διότι εξοικονομούνται πάνω από 3178 ώρες ετησίως. [41]

Δυστυχώς δεν έχουν υπάρξει ακόμα εργασίες για την χρήση μιγμάτων διοξειδίου του άνθρακα για αυτήν την περίπτωση. Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι πολλά υποσχόμενη χάρη σχεδόν ανύπαρκτης μόλυνσης που δημιουργεί και της αυξημένης απόδοσης για αυτό και θεωρήθηκε απαραίτητη η αναφορά της στη συγκεκριμένη εργασία. Χρειάζεται ωστόσο ακόμα περισσότερη μελέτη για την ανάπτυξη της.

4.4 Εφαρμογές παραγωγής ενέργειας μέσω άνθρακα

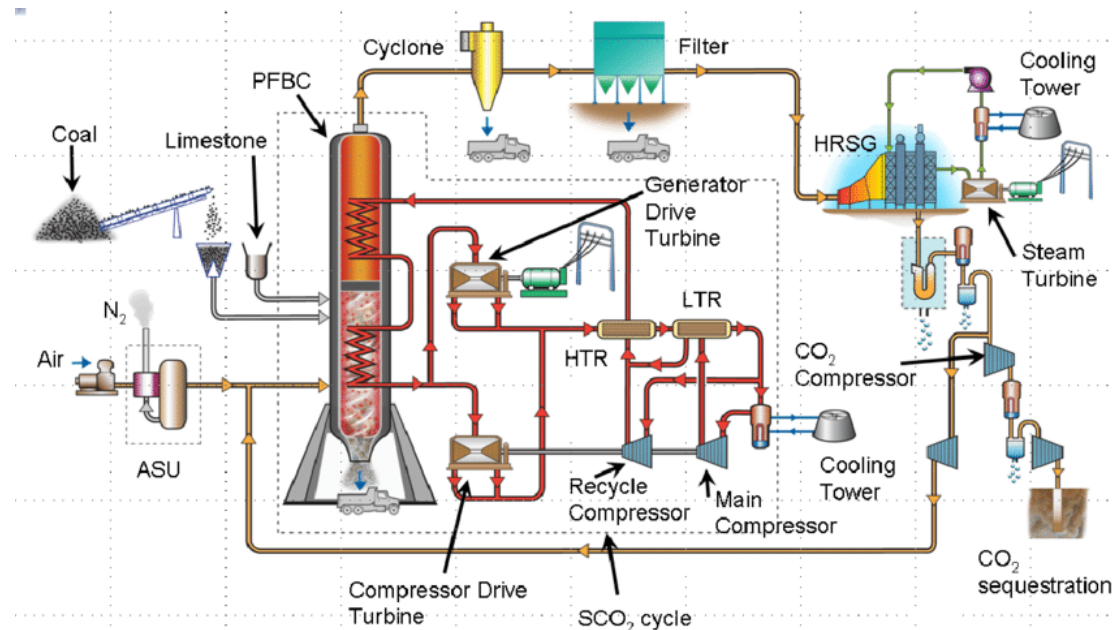
Σήμερα, μια βασική ανησυχία για τη συνεχιζόμενη χρήση ορυκτών καυσίμων όπως ο άνθρακας είναι η εκπομπή CO₂ στην ατμόσφαιρα. Ως εκ τούτου, η μείωση των εκπομπών CO₂ από την καύση άνθρακα έχει γίνει μείζων θέμα σε πολλές χώρες. Δύο επιλογές που έχουν προσδιοριστεί για τον περιορισμό των εκπομπών CO₂ από μονάδες παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα είναι η CCS (δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα) και η βελτίωση της απόδοσης. Η σύλληψη του CO₂ μετά την καύση με χημική απορρόφηση με διαλύτη είναι αυτή τη στιγμή η πιο προτιμώμενη επιλογή CCS.[42]

Η βελτίωση της απόδοσης συνήθως απαιτεί αυξημένη κύρια θερμοκρασία και πίεση ατμού. Ως εκ τούτου, η σύγχρονη τεχνολογία για την παραγωγή ενέργειας με καύση ορυκτών καυσίμων με χρήση υπερ-υπερκρίσιμου ατμού, λειτουργεί πλέον με πίεση ατμού έως 300 bar και θερμοκρασία έως 600°C με αναθέρμανση. Ωστόσο, τα συστήματα CCS και η βελτίωση της αποδοτικότητας έχουν τους περιορισμούς τους. Η ενσωμάτωση του συστήματος PCC με μονάδες παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα οδηγεί σε σημαντική μείωση απόδοσης και αυξημένο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, η έλλειψη προηγμένων υλικών για αντοχή στις σκληρές συνθήκες λειτουργίας περιορίζει την περαιτέρω βελτίωση της αποτελεσματικότητας.

Για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των σταθμών παραγωγής ενέργειας με καύση, ο κύκλος Brayton με υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα(s-CO₂) θεωρείται ως εναλλακτική λύση έναντι του συμβατικού κύκλου ατμού Rankine. Επιπλέον, η δέσμευση CO₂ διευκολύνεται με την ενσωμάτωση υδατικής μονοαιθανολαμίνης με βάση ένα σύστημα PCC με το κύκλο υπερκρίσιμου s-CO₂ στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Ο κύκλος CO₂ Brayton βρέθηκε να έχει υψηλότερη απόδοση κύκλου από τον κύκλο ατμού Rankine αλλά και από άλλους κύκλους αερίου Brayton στο εύρος θερμοκρασίας που συναντάται συνήθως σε εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας με καύση άνθρακα (450°C έως 650°C). Αλλά πιθανά οφέλη του κύκλου s-CO₂ σε σύγκριση με τον κύκλο ατμού περιλαμβάνουν:

- Μικρότερο μέγεθος των εξαρτημάτων
- Λιγότερο περίπλοκη διάταξη συστήματος

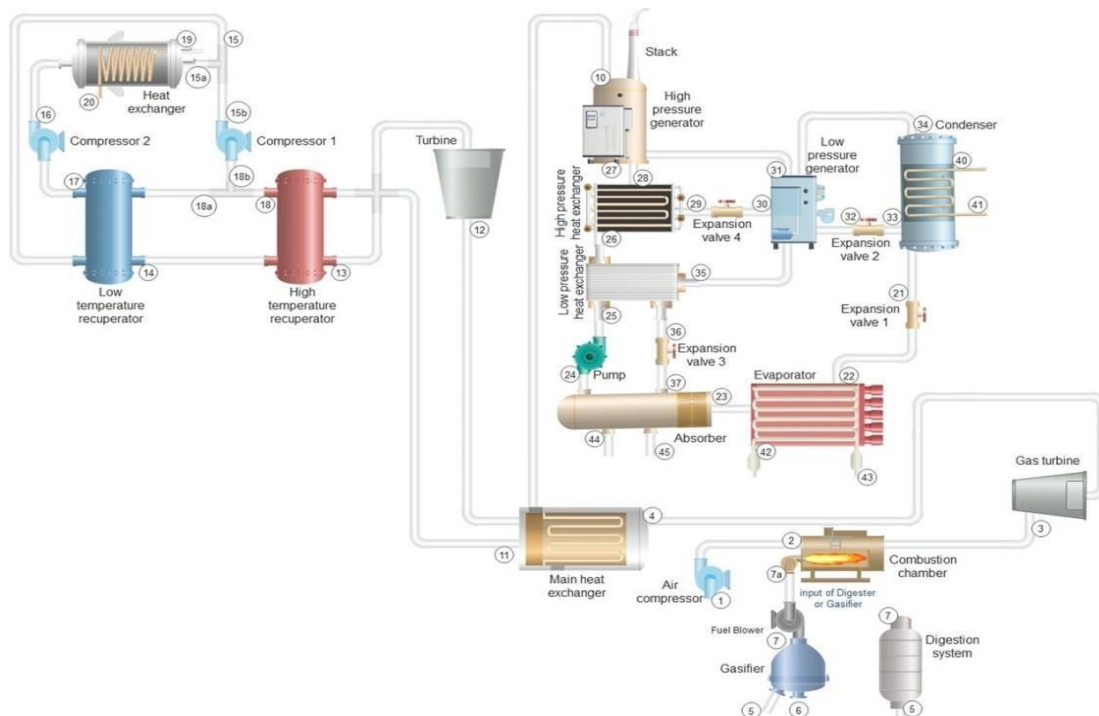
- Λιγότερο κίνδυνο από διάβρωση ενώ δεν σχηματίζονται σταγονίδια νερού που θα μπορούσαν να βλάψουν τις λεπίδες του στροβίλου.
- Μειωμένη κατανάλωση νερού γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό με την αλλαγή του κλίματος. Επιπλέον επιτρέπει την ανάπτυξη μονάδων παραγωγής ισχύος σε μέρη όπου το νερό δεν είναι εύκολα προσβάσιμο.



Εικόνα 17: Κυκλος S-CO₂ με αναθέρμανση σε εργοστάσιο παραγωγής με άνθρακα.[43]

4.5 Εφαρμογές παραγωγής ενέργειας μέσω βιομάζας

Το προτεινόμενο σύστημα CCHP, που βασίζεται είτε σε αεριοποίηση βιομάζας είτε σε χώνευση βιομάζας, απεικονίζεται στην εικόνα 18 Όπως υποδηλώνει, το σύστημα αποτελείται από τρία υποσυστήματα: τον αεριοστροβίλο που τροφοδοτείται με βιομάζα και τα συστήματα S-CO₂ και LiBr-H₂O διπλής επίδρασης.



Εικόνα 18: Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης βιοαερίου sCO₂

Στο παραπάνω σύστημα, η καθαρή ισχύς εξόδου παρέχεται από τους κύκλους αεριοστρόβιλου και S-CO₂, η έξοδος ψύξης παρέχεται από το ψυκτικό συγκρότημα απορρόφησης και η έξοδος θέρμανσης παρέχεται από οικιακό θερμοσίφωνα που λειτουργεί επίσης ως συμπιεστής προ-ψυγείο (ροή 15a – 16).

Η βιομάζα (ρεύμα 5) τροφοδοτείται στον χωνευτήρα στον οποίο παράγεται το αέριο ή το βιοαέριο μέσω διαδικασιών αεριοποίησης ή χώνευσης. Το παραγόμενο syngas ή βιοαέριο (ρεύμα 7) εισέρχεται στο θάλαμο καύσης όπου καίγεται με τον περιβαλλοντικό αέρα που εξέρχεται από τον αεροσυμπιεστή (ρεύμα 2). Τα καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας καύσης (ρεύμα 3) ρέουν στον αεριοστρόβιλο για επέκταση για παραγωγή ενέργειας. Το ρεύμα εξόδου από τον αεριοστρόβιλο (ρεύμα 4) σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία, ρέει μέσω του κύριου εναλλάκτη θερμότητας (MHX) για να τροφοδοτήσει την απαιτούμενη θερμότητα για την εκτέλεση του κύκλου S-CO₂ πριν εισέλθει στη γεννήτρια υψηλής πίεσης (HPG(High Pressure Generator)) του ψύκτη απορρόφησης (ρεύμα 10). Το θερμαινόμενο CO₂ (ρεύμα 12) διογκώνεται στο συμπιεστή και διαιρείται σε δύο ρεύματα (ρεύμα 15b και 15a) αφού περάσει από τους εναλλάκτες υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας (HTR(High) και LTR(Low)(Temperature Recuparator)). Το πρώτο (ρεύμα 15b) συμπιέζεται στον συμπιεστή 1 και το δεύτερο (ρεύμα 15a) ψύχεται στον οικιακό θερμοσίφωνα πριν εισέλθει στον συμπιεστή 2. Τα δύο συμπιεσμένα ρεύματα διοξειδίου του άνθρακα αναμειγνύονται μεταξύ τους (ρεύμα 18) και το μείγμα ρέει στην HTR προτού

καταλήξει στο (MHEX(Main Heat Exchanger)) όπου θα θερμανθεί. Η παρεχόμενη θερμότητα στην HPG του κύκλου απορρόφησης χρησιμοποιείται για την παραγωγή ψύξης στον εξατμιστή του. .

Ένα πλεονέκτημα του προτεινόμενου συστήματος σε αυτό το έργο είναι η χρήση στροβίλου αερίου εσωτερικής καύσης αντί της εξωτερικής καύσης που αποδίδει υψηλότερες τιμές παραγωγής ενέργειας. Η παραπάνω διάταξη μας οδηγεί στα γνώριμα πλέον συμπεράσματα της βελτίωσης της απόδοσης στην χρήση του sCO₂ ακόμα και σαν ρευστό σε βοηθητικό σύστημα. [13]Επιπλέον μειώθηκαν οι εκπομπές ρύπων και το κόστος της εγκατάστασης χάρη στον απλούστερο εξοπλισμό που απαιτεί η διάταξη που χρησιμοποιεί το sCO₂ σαν ρευστό εργασίας.

Πιο αναλυτικά αποτελέσματα της ανάλυσης απέδειξαν σημαντική βελτίωση της απόδοσης και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις με την εφαρμογή συστήματος CCHP αντί για συστήματα μόνο ισχύος ή CHP. Η ενεργειακή απόδοση του συστήματος CCHP με βάση την πέψη είναι υψηλότερη από εκείνη του συστήματος με βάση την αεριοποίηση κατά περισσότερο από 13%. Το συνολικό κόστος μονάδας προϊόντος για το σύστημα με βάση την πέψη είναι χαμηλότερο από αυτό για το σύστημα με βάση την αεριοποίηση κατά περίπου 7%. Το προτεινόμενο σύστημα CCHP με βάση την πέψη αποδίδει 7,0% υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και 56,5% χαμηλότερες εκπομπές CO₂ σε σύγκριση με το αντίστοιχο σύστημα παραγωγής μόνο ισχύος [44].

Δυστυχώς και σε αυτή τη περίπτωση δεν έχουν διερευνηθεί μείγματα CO₂ για την βελτίωση συνολικά του κύκλου συμπαραγωγής. Χρειάζονται επομένως πειράματα για την εύρεση των κατάλληλων μειγμάτων βελτιστοποίησης του κύκλου και μείωσης των εκπομπών.

Κεφάλαιο 5

5.1 Επίδραση των μειγμάτων στον εξοπλισμό παραγωγής ενέργειας

Ο κύκλος ισχύος του υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα (S-CO₂) είναι ένας σχετικά νέος, συμπαγής κύκλος ισχύος, με υψηλή απόδοση και θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε διάφορες μεθοδολογίες δέσμευσης άνθρακα. Οι κύκλοι S-CO₂ μπορούν να εφαρμοστούν σε συνδυασμό με διάφορους τύπους πηγών θερμότητας, όπως ηλιακούς, γεωθερμικούς, ορυκτούς, πυρηνικούς σταθμούς και συστήματα ανάκτησης θερμότητας. Οι κύκλοι ισχύος S-CO₂ είναι πολύ περίπλοκα συστήματα που έχουν πολλές προκλήσεις λόγω της παρουσίας του σημείου με την ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας στο σχεδιασμό εναλλακτών θερμότητας και στο κριτήριο εισόδου ρευστού λειτουργίας στον συμπιεστή. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν μελέτες που επιδιώκουν να διερευνήσουν τις επιδράσεις διαφόρων δυαδικών μειγμάτων που αποτελούνται από CO₂ και He, CO, O₂, N₂, H₂, CH₂ ή H₂S, τα οποία θα μπορούσαν να υπάρχουν από ακαθαρσίες στο καύσιμο.

Έγινε εντατική έρευνα μειγμάτων τα τελευταία χρόνια [10], αλλά τα ζητήματα που σχετίζονται με την επίδραση των μειγμάτων είναι περίπλοκα και απαιτούν πρόσθετη μελέτη. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη μια περιγραφή της επίδρασης κάθε πιθανής ουσίας στο μείγμα. Διαφορετικά μείγματα αραιωτικών και S-CO₂ θα έχουν επίδραση στον κύκλο ισχύος και σε όλα τα συστατικά του κύκλου. Η επίδραση των δυαδικών μιγμάτων θα μπορούσε να είναι ευεργετική ανάλογα με τη συγκεκριμένη ουσία, καθώς έχει βρεθεί ότι ορισμένες συγκεντρώσεις SO₂, H₂S και Xe μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση ενός κύκλου παραγωγής ισχύος S-CO₂. Εναλλακτικά, άλλες ουσίες είναι επιζήμιες για αυτούς τους κύκλους [12].

Τα μεγέθη του συμπιεστή και του στροβίλου περιορίζονται στην πυκνότητα υγρού λειτουργίας. Εάν αυξηθεί η πυκνότητα, τους θα ελαχιστοποιηθούν. Η μεγιστοποίηση των τιμών Cr και πυκνότητας και η ελαχιστοποίηση της τιμής του κινητικού ιξώδους μειώνουν το μέγεθος των εναλλακτών θερμότητας και, τέλος, επιλέγοντας ένα μείγμα με κρίσιμη θερμοκρασία συμβατή με το σύστημα αποθήκευσης UHS. Τα μίγματα s-CO₂ / H₂S και s-CO₂ / C₄H₁₀ έχουν υψηλότερες τιμές Cr και το μείγμα s-CO₂ / C₆H₆ έχει υψηλότερη τιμή πυκνότητας. Τα μίγματα s-

$\text{CO}_2 / \text{C}_4\text{H}_8$ και $s\text{-CO}_2 / \text{C}_4\text{H}_{10}$ έχουν χαμηλότερη τιμή κινητικού ιξώδους. Τα βέλτιστα μίγματα $s\text{-CO}_2$ θα μπορούσαν να ληφθούν με ήλιο ή αιθάνιο. Ωστόσο, ένας άλλος περιορισμός, που δεν αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας της προστιθέμενης ουσίας. Το ήλιο έχει μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας περίπου 2000 K, και η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του αιθανίου είναι περίπου 675 K [45]

Ωστόσο, καθώς η πίεση και η θερμοκρασία μετατοπίζονται μακριά από το κρίσιμο σημείο, οι παραλλαγές είναι γραμμικές όπως και στα ιδανικά αέρια .

Οι δραστικές διακυμάνσεις κοντά στο κρίσιμο σημείο παρατηρούνται επίσης σε μείγματα, αλλάζοντας δραματικά τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συμπιεστή και το υπόλοιπο του κύκλου. Η θερμοκρασία εισόδου του συμπιεστή εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας στο ψυγείο και τη θερμοκρασία του μέσου ψύξης.

Για τους εναλλάκτες θερμότητας, η προσθήκη κάποιας φάσης ακαθαρσίας μπορεί να θεωρηθεί θετική. Για τον συμπιεστή, ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει. Στην περίπτωση αλλαγών στις παραμέτρους του ψυκτικού μέσου, μπορεί να επηρεάσει τη συμπίεση επειδή το κρίσιμο σημείο είναι διαφορετικό για τα μείγματα από το καθαρό CO_2 . Για το λόγο αυτό, η βελτιστοποίηση των κύκλων ισχύος είναι πολύ σημαντική και πρέπει να ληφθούν υπόψη οι πιθανές ακαθαρσίες ή το μέσο από άλλα συστήματα με CO_2 .

Ωστόσο, το κινητικό ιξώδες και η θερμική αγωγιμότητα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό ενός εναλλάκτη θερμότητας. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη θερμότητας σχετίζονται στενά με το ιξώδες (δυναμικό και κινητικό), τη θερμική αγωγιμότητα, την πυκνότητα και την ισοβαρική θερμική ικανότητα [35]. Οι υψηλότερες τιμές C_p και πυκνότητας και η χαμηλότερη τιμή κινητικού ιξώδους ελαχιστοποιούν τις διαστάσεις του αναγεννητή χαμηλής θερμοκρασίας (LTR) και του αναγεννητή υψηλής θερμοκρασίας (HTR)).

Σημαντικό σημείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι το σύστημα θερμικής αποθήκευσης Ultimate Heat Sink (UHS). Αυτός ο σχεδιασμός συστήματος εξαρτάται από την κρίσιμη θερμοκρασία του μείγματος. Εδώ, δύο πιθανές τεχνικές λύσεις πρόκειται να μελετηθούν. Τα νυχτερινά ψυκτικά πάνελ θα μπορούσαν να προταθούν ως η πρώτη τεχνική λύση. Η χαμηλότερη θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού για αυτήν την πρόταση θα μπορούσε να είναι μεταξύ 278,15 και 298,15 K.

για αυτή τη περίπτωση, το μείγμα αιθανίου, με κρίσιμη θερμοκρασία περίπου 290,82 K, είναι η βέλτιστη λύση. Εναλλακτικά ψυκτικά μέσα θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μεταβολή του εύρους θερμοκρασίας UHS. Η ψύξη με σύστημα ψυχρής αποθήκευσης με βάση πάγο νερού θα μπορούσε να προταθεί ως η δεύτερη τεχνική λύση. Σε αυτήν την περίπτωση, το μείγμα ηλίου, με κρίσιμη θερμοκρασία περίπου 274,24 K, είναι η πιο κατάλληλη επιλογή[46].

Η υιοθέτηση κύκλων s-CO₂ είναι ιδιαίτερα ελπιδοφόρος για εγκαταστάσεις CSP μεγάλης κλίμακας και υψηλής θερμοκρασίας. Τέσσερις παράγοντες είναι σημαντικοί για την ενσωμάτωση s-CO₂ σε εγκαταστάσεις CSP: ανώτερη απόδοση έναντι κύκλων ατμού Rankine, ικανότητα ενσωμάτωσης αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, απόλυτη αποθήκευση θερμικής ενέργειας ψύκτρας και ξηρή ψύξη [41]

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση του κύκλου ισχύος είναι η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του μείγματος. Σε θερμοκρασία λειτουργίας περίπου 823,15 K στην είσοδο του στροβίλου, ενδέχεται να εμφανιστεί πυρόλυση υδρογονανθράκων ή χημική αποσύνθεση. Επίσης, η διήθηση αέρα στο ρευστό λειτουργίας του κύκλου ισχύος λόγω διαρροών θα μπορούσε να προκαλέσει αυτόματη ανάφλεξη προστιθέμενης ουσίας. Οι ουσίες του μείγματος που είναι πιο σταθερές σε αυτά τα σενάρια είναι οι κυκλικοί υδρογονάνθρακες, οι υδρογονάνθρακες βραχείας σειράς και οι υδρογονάνθρακες με διπλούς δεσμούς.

Από τη μία πλευρά, επιβεβαιώνεται ότι η προσθήκη He, Kr, CH₄ και C₂H₆ μειώνει την κρίσιμη θερμοκρασία και συνεπώς αυξάνει τη θερμική απόδοση του κύκλου ισχύος. Τα λεπτομερή αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 5 που ακολουθεί:

Πίνακας 5: Ιδιότητες μειγμάτων He, Kr, CH₄ και C₂H₆

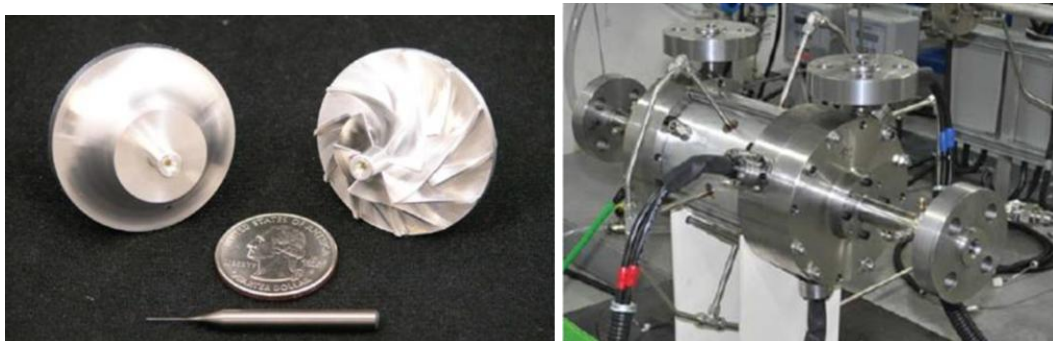
	Μοριακή μάζα (kg/mol)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Ισοβαρική θερμοχωρητικότητα (kJ/Kg * K)	Κινητικό ιξώδες (*10 ⁻⁴ cm ²)	Αριθμός Prandtl	Αποδοτικότητα εργοστασίου
sCO ₂	44,01	585,43	49,62	1,03	19,61	0,49
sCO ₂ /He	44,01	386,23	378,95	5,52	177,08	0,53
sCO ₂ /Kr	56,74	740,15	7,95	5,94	6,13	0,53
sCO ₂ /CH ₄	34,78	414,49	6,59	6,52	3,11	0,52
sCO ₂ /C ₂ H ₆	39,55	371,85	1830,20	9,13	597,86	0,52

Τα μείγματα υγρών εργασίας s-CO₂ / He (90.0 / 10.0) και s-CO₂ / Kr (68.0 / 32.0) αυξάνουν την απόδοση του κύκλου ισχύος από 49,0% σε 53,0%. Επιπλέον, το Kr και το ήλιο είναι αδρανή αέρια και η προσθήκη τους στο καθαρό s-CO₂ είναι πολύ ευεργετική για την αποφυγή της διάβρωσης των υλικών του εξοπλισμού. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου (TIT) συνεπάγεται βελτίωση της απόδοσης του κύκλου συμπίεσης Brayton. Ως αποτέλεσμα συνάγεται το συμπέρασμα ότι αυτή η επίδραση της αύξησης του TIT ισοδυναμεί με τη χρήση μειγμάτων υπερκρίσιμων υγρών στους κύκλους του Brayton.

Κεφάλαιο 6 Έρευνα και ανάπτυξη επιμέρους τμημάτων

6.1 Στροβιλομηχανές

Τις δύο τελευταίες δεκαετίες, έχουν γίνει δοκιμές και επικυρώθηκαν σχέδια και μέθοδοι κατασκευής για τις στροβιλομηχανές συμπεριλαμβανομένων ρουλεμάν, τρόπων στεγανοποίησης και εναλλακτών. Σε όλες αυτές τις δοκιμές, εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας χρησιμοποιούν ένα ακτινικό στρόβιλο ενός σταδίου. Η πυκνότητα υψηλής ενέργειας του sCO_2 ο κύκλος ισχύος υπαγορεύει ότι στα 125 kWe, κάθε τροχός στροβίλου και συμπιεστή θα είναι μόνο λίγα εκατοστά σε διάμετρο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19. Αυτό το μικρό μέγεθος οδηγεί σε υψηλές απαραίτητες ταχύτητες άξονα (περίπου 75.000 σ.α.λ.), απαιτώντας εξειδικευμένες προσεγγίσεις για ρουλεμάν, και εναλλάκτες.

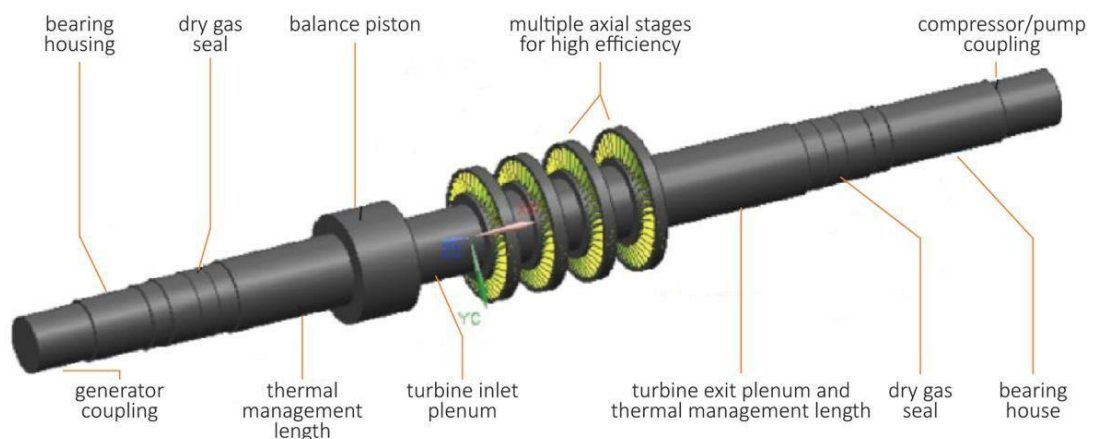


Εικόνα 19: Στροβιλομηχανές sCO_2 εργαστηριακής κλίμακας και υποσυστήματα [47]

Οι ερευνητικοί στρόβιλοι και συμπιεστές που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα έχουν αποδώσει κοντά στους σχεδιαστικούς χάρτες που δημιουργήθηκαν από τις πρώτες αρχές και λειτουργούσαν ομαλά τόσο κάτω όσο και πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία. Ως εκ τούτου, αναμένεται ότι δεν θα υπάρξει σημαντικός κίνδυνος αύξησης του σχεδιασμού στροβιλομηχανών. Ορισμένοι ερευνητές πιστεύουν ότι η ισχύς των 7-10 MWe είναι το ελάχιστο μέγεθος για έναν βιώσιμο εμπορικό σχεδιασμό, ώστε να επιτρέπεται η χρήση τυπικών βιομηχανικών εξαρτημάτων για τον μετριασμό των αρνητικών συνεπειών της ροής διαρροής και της απώλειας ρεύματος (απώλειες λόγω τριβής μεταξύ του ρότορα και του υγρού) μηχανισμοί [47].

Ενώ οι ακτινικοί στρόβιλοι έχουν δοκιμαστεί σε μικρής κλίμακας sCO₂ βρόχους δοκιμής, η τεχνολογία ακτινικών στροβίλων δεν χρησιμοποιείται συνήθως για σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (≥100 MWe). Στο πλαίσιο του προγράμματος SunShot Initiatives, το οποίο χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Ενεργειακής Απόδοσης και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας των ΗΠΑ (EERE(Energy Efficiency and Renewable Energy)) και συγχρηματοδοτήθηκε από την GE Global Research, Thar Energy και Bechtel Marine, η GE Global Research συνεργάστηκε με τη SWRI για την ανάπτυξη turbo-expander 10 MWe για εφαρμογή σε κύκλο ισχύος sCO₂ για συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (CSP).

Λεπτομερείς αναλύσεις των επιπτώσεων σε επίπεδο συστήματος κάθε διαμόρφωσης επέτρεψαν στους ερευνητές να προσδιορίσουν μια προτιμώμενη επιλογή. Οι μελέτες περιελάμβαναν λεπτομερή σχεδιαστικά στοιχεία και συνολικό κόστος για κάθε επιλογή. Επιλέχθηκε μια δεύτερη επιλογή ως εφεδρική υποστήριξη που είχε σημαντικά χαμηλότερο τεχνικό κίνδυνο αλλά πληρούσε τα κριτήρια λιγότερο προσεκτικά. Η εργασία επικεντρώθηκε σε έναν αξονικό σχεδιασμό στροβίλου με ταχύτητα άξονα, ρυθμό ροής μάζας, απαιτήσεις διαρροής και στόχους απόδοσης ως οριακές συνθήκες. Ο τελικός σχεδιασμός των 10 MWe υψηλής πίεσης, υψηλής θερμοκρασίας (TIT 715°C) sCO₂ ο στρόβιλος φαίνεται στο παρακάτω Εικόνα.



Εικόνα 20: Ο σχεδιασμός στροβίλου υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας 10 MWe αναπτύχθηκε για CSP [48]

Από το 2012, η Toshiba Corporation (Ιαπωνία) αναπτύσσει στρόβιλο και καυστήρα για το εργοστάσιο επίδειξης Allam Cycle με φυσικό αέριο 25 MWe της NET Power που είναι υπό κατασκευή στο Τέξας των ΗΠΑ (βλ. Ενότητα 5.2). Ο σχεδιασμός του στρόβιλου συνδυάζει ουσιαστικά τις τεχνολογίες αεριοστρόβιλων και αμμοστρόβιλων.[21] Η Toshiba έχει σχεδιάσει μια εμπορική κλίμακα sCO₂ στρόβιλος στο εύρος μεγέθους 250–300 MWe (500 MWth) και το μείωσε για να δημιουργήσει την έκδοση επίδειξης 25 MWe. Η πίεση εισόδου είναι 20 έως 40 MPa και η θερμοκρασία εισόδου 1100–1200 ° C. Ο λόγος πίεσης είναι μεταξύ 6 και 12 και η πίεση εξόδου είναι 3 MPa. Χρησιμοποιήθηκαν συστήματα ψύξης και θερμικές επικαλύψεις από τεχνολογία αεριοστρόβιλων. Αποδεδειγμένα υλικά αντοχής αεριοστρόβιλων χρησιμοποιήθηκαν για το μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής θερμού αερίου, καθώς οι θερμοκρασίες δεν είναι υψηλές σε σύγκριση με εκείνες σε ένα σύγχρονο αεριοστρόβιλο. Ωστόσο, χρησιμοποιείται στο κεντρικό τμήμα του ρότορα κράμα με βάση το νικέλιο για να διατηρήσει τον σχεδιασμό του ρότορα απλό, να ελαχιστοποιήσει την απαιτούμενη ροή ψύξης και να του επιτρέψει να αντιμετωπίσει μια υψηλή ροπή μεταξύ των σταδίων[49].

(Ο στρόβιλος sCO₂ έχει δομή διπλού κελύφους (ένα εξωτερικό περίβλημα και πολλά εσωτερικά περιβλήματα που περιέχουν συστήματα υψηλής πίεσης). Το υλικό με βάση το Ni χρησιμοποιείται για το μικρότερο εσωτερικό περίβλημα που περικλείει την περιοχή εξάτμισης όπου οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες από 700 ° C και εφαρμόζεται μέτρια ψύξη . Η Toshiba ανέπτυξε επίσης ένα ιδιόκτητο σύστημα ελέγχου στρόβιλων σε συνεργασία με την NET Power. Ο στρόβιλος παραδόθηκε στο εργοτάξιο του εργοστασίου επίδειξης τον Νοέμβριο του 2016.

6.2 Συμπιεστής

Η MAN Diesel & Turbo SE (Γερμανία) έχει αναπτύξει μια Ερευνητική εξέδρα CO₂ υψηλής πίεσης για υπερσύγχρονους Συμπιεστές (CORA), που περιλαμβάνουν δύο ολοκληρωμένα στάδια συμπίεσης. Κάθε στάδιο έχει το δικό του περίβλημα και, ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολλαπλή ψύξη. Οι πιέσεις εισόδου και εξόδου είναι 12 και 25 MPa, αντίστοιχα. Διαθέτει κίνηση μεταβλητής ταχύτητας και εναλλάκτη θερμότητας με κέλυφος και σωλήνα υψηλής πίεσης (HE). Έχουν διεξαχθεί δοκιμές στο σχεδιασμό εξαρτημάτων όπως φτερωτές, πτερύγια εισόδου, στεγανοποίηση άξονα και ρουλεμάν. Τα αρχικά αποτελέσματα ήταν θετικά και προγραμματίστηκαν περισσότερες δοκιμές. [50]

Ένας μικρός ακτινικός συμπίεστής με τρία διαφορετικά σχέδια πτερωτών έχει εγκατασταθεί σε κλειστό sCO₂ δοκιμαστικό βρόχο στο TITech (Ιαπωνία). Δοκιμές κοντά στο κρίσιμο σημείο του CO₂ διεξήχθησαν, για την αξιολόγηση των σημείων σχεδιασμού και παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα συμπίεσης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι όλοι οι συμπίεστες με διαφορετικά σχέδια λειτουργούσαν ομαλά και αποτελεσματικά κοντά στο κρίσιμο σημείο καθώς και σε ένα ευρύ φάσμα πιέσεων από υποκρίσιμη έως υπερκρίσιμη πίεση

6.3 Εναλλάκτες θερμότητας

Οι εναλλάκτες θερμότητας (heat exchanger HE) χρησιμοποιούνται στους κύκλους sCO₂ και πρέπει να πληρούν συνθήκες που διαφέρουν από αυτές που συνήθως συναντήθηκε σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Αυτές περιλαμβάνουν λειτουργία σε υψηλή πίεση και υψηλή θερμοκρασία καθώς και διαφορές υψηλής πίεσης. Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός των HE αντιμετωπίζει σημαντικές μηχανικές, θερμομηχανικές και θερμικές-υδραυλικές προκλήσεις. Εκτός από την παροχή ενός αρκετά υψηλού ρυθμού μεταφοράς θερμότητας σε όσο το δυνατόν μικρότερη πτώση πίεσης, άλλοι παράγοντες περιλαμβάνουν την πιθανότητα διάβρωσης. Ο τύπος, ο σχεδιασμός, η επιλογή υλικού και το κόστος του εναλλάκτη θερμότητας είναι βασικά στοιχεία στην ανάπτυξη, και οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας (compact heat exchanger CHE) αναγνωρίζονται ως οι πλέον κατάλληλοι για το σκοπό αυτό. Ωστόσο, το κόστος των εναλλακτών θερμότητας μπορεί να ανέρχεται σε ένα σημαντικό κλάσμα (30% ή περισσότερο) του συνολικού κόστους του συστήματος.

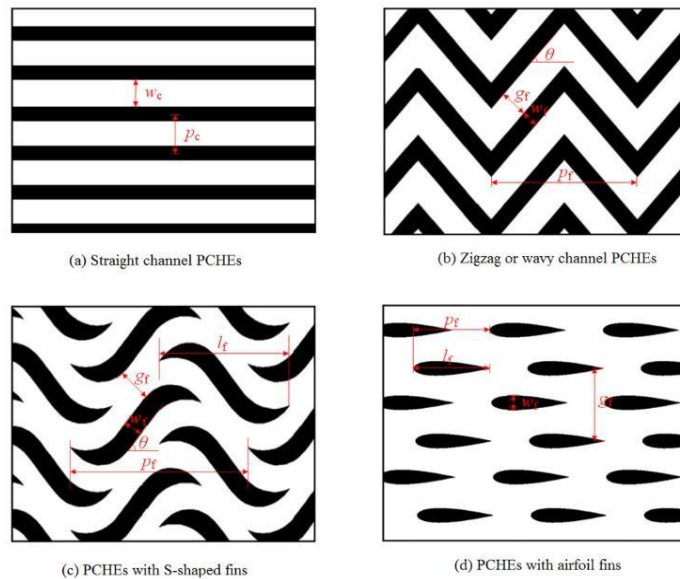
6.3.1 Εναλλάκτης θερμότητας τυπωμένου κυκλώματος (PCHE)

Ο εναλλάκτης θερμότητας τυπωμένου κυκλώματος PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger), που αναπτύχθηκε για χρήση σε πολύ υψηλή πίεση στη βιομηχανία πετρελαίου, φυσικού αερίου και χημικών, ήταν ο πιο ευρέως

χρησιμοποιούμενος τύπος ανακτητικού εναλλάκτη. Αυτό συμβαίνει επειδή υπάρχει μια καθιερωμένη μέθοδος για την κατασκευή του, είναι αποτελεσματική, στιβαρή, συμπαγής και ικανή να αντέχει σε υψηλές πιέσεις. Η ιδέα PCHE επιτρέπει τη λειτουργία σε ταυτόχρονη υψηλή θερμοκρασία και πίεση με σχετικά λεπτά τοιχώματα μεταξύ πρωτογενούς και δευτερογενούς ψύξης. Το PCHE μπορεί να αντέξει πιέσεις άνω των 60 MPa και να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από κρυογόνο έως 900 ° C με προσέγγιση κοντά στη θερμοκρασία (www.heatric.com). Χρησιμοποιούνται διάφορες διαμορφώσεις με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία.

Υπάρχουν πολλά κανάλια ροής (συνήθως με μικρή υδραυλική διάμετρο) είναι χαραγμένα χημικά σε λεπτές, επίπεδες μεταλλικές πλάκες. Οι χαραγμένες πλάκες στοιβάζονται μαζί με μια προδιαγεγραμμένη διαμόρφωση και συνδέονται με διάχυση για να δημιουργήσουν ένα συμπαγές μπλοκ υψηλής αντοχής. Τα ακροφύσια και οι φλάντζες συγκολλούνται συνήθως στο μπλοκ PCHE για να αποτελούν ολόκληρο τον εναλλάκτη θερμότητας. Τα PCHE μπορούν να υιοθετήσουν διάφορες διαμορφώσεις για μια δεδομένη εφαρμογή για να επωφεληθούν από τη διαδικασία συγκόλλησης χάραξης και διάχυσης για να δημιουργήσουν γεωμετρίες για βέλτιστη απόδοση.

Υπάρχουν πολλοί τύποι γεωμετρίας καναλιών, όπως ευθεία, κυματιστή (ζιγκ-ζαγκ), με πτερύγιο Σχήματος S και κανάλι με πτερύγια αεροτομής (βλ. Εικόνα 21). Αυτό παρέχει ευελιξία στο σχεδιασμό των διαμορφώσεων PCHE έτσι ώστε η πτώση πίεσης και η μεταφορά θερμότητας να μπορούν να βελτιστοποιηθούν για να παρέχουν υψηλή απόδοση. Έχουν διεξαχθεί μελέτες για τον προσδιορισμό του βέλτιστου σχεδιασμού καναλιών για αποδοτικό PCHE και τα σχέδια συνεχίζουν να αναπτύσσονται. [51]



Εικόνα 21 Παραδείγματα του σχεδιασμού PCHE

Η Heatric (UK) κατασκευάζει PCHE για πάνω από 30 χρόνια και περισσότερες από 1000 μονάδες έχουν πουληθεί, κυρίως στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. Οι εκτιμήσεις σχεδιασμού, η επιλογή υλικού, οι επιλογές διαμόρφωσης και οι μέθοδοι κατασκευής PCHE για πιθανή εφαρμογή στη βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας συζητούνται λεπτομερώς.

Αν και μπορούν να παραχθούν αξιόπιστοι PCHE sCO₂ για εφαρμογές ανάκτησης, αυτός ο τύπος HE είναι ακριβός λόγω του κόστους δημιουργίας των χημικά χαραγμένων καναλιών και του κόστους της διαδικασίας συγκόλλησης διάχυσης. Για να κολλήσει αποτελεσματικά μια στοίβα πλακών, η επιφάνεια όλων των πλακών πρέπει να είναι εξαιρετικά επίπεδη και καθαρή. Η στοίβα θερμαίνεται σε κλίβανο υπό πίεση περίπου 27 MPa και θερμοκρασίες που βρίσκονται κοντά στο σημείο τήξης του βασικού υλικού για αρκετές ώρες. Επίσης, έχει αναφερθεί ότι ένα τυπικό PCHE θα μπορούσε να αποτύχει εντός 300 έως 800 ολοκληρωμένων θερμικών κύκλων. Υπό σοβαρές θερμικές παροδικές συνθήκες, θα μπορούσε να αποτύχει σχεδόν σε 200 κύκλους. Οι εργασίες συνεχίζονται για να κατανοήσουμε πώς να προβλέψουμε τη θερμική κόπωση σε αυτές τις μονάδες και πώς να βελτιώσουμε τα σχέδια και τις μεθόδους κατασκευής του PCHE για τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας και τη μείωση του κόστους.[52]

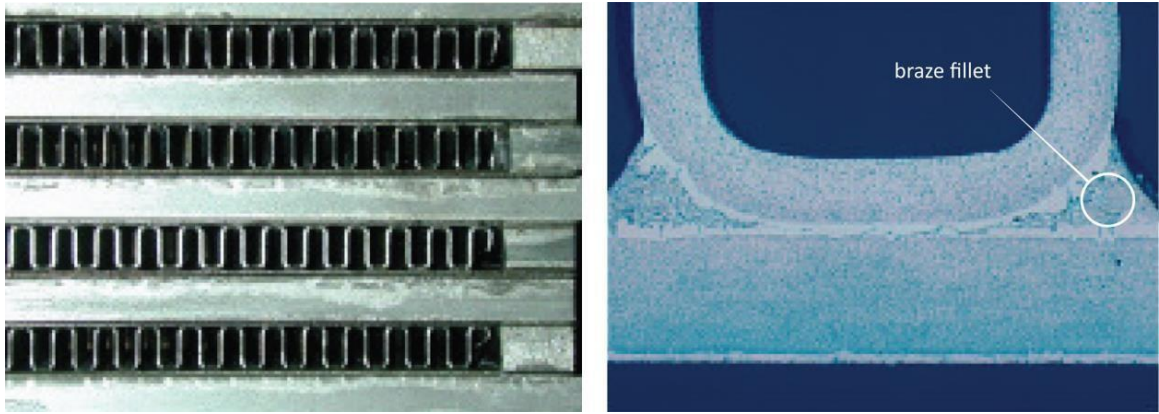
Η διαδικασία συγκόλλησης διάχυσης του PCHE απαιτεί συμπαγείς δομές στοίβας που υποστηρίζουν τα υψηλά φορτία συμπίεσης που απαιτούνται για καλή συγκόλληση διάχυσης, ώστε το προκύπτον PCHE να αντέξει πιέσεις έως 60 MPa όπως απαιτείται για εφαρμογές πετρελαίου, αερίου και χημικών. Η Altex

Technologies Corporation (ΗΠΑ) ανέπτυξε πρόσφατα ανακτητές χαμηλού κόστους υψηλής αποτελεσματικότητας (HELC) ως μονάδες δοκιμής, χρησιμοποιώντας υλικά, σχεδιασμό, κατασκευή και διαδικασίες συγκόλλησης κατάλληλες για sCO₂ εφαρμογές κύκλου ισχύος με χαμηλότερη μέγιστη πίεση περίπου 24 MPa και θερμοκρασίες έως 700 ° C. Μια διαδικασία κατασκευής χαλκοσυγκόλλησης υποβοηθούμενης από φορτίο που χρησιμοποιεί το υλικό πλήρωσης συγκόλλησης υιοθετείται για την αντιμετώπιση των ατελειών επιφανειακής επιπεδότητας και, ειδικότερα, για την ανοχή αναντιστοιχιών μεταξύ πλακών, πλαισίων και ενθέτων.

Αρκετές γεωμετρίες καναλιών όπως ορθογώνια κανάλια που έχουν υψηλότερους λόγους επιφάνειας προς όγκο από τη γεωμετρία καναλιών που χρησιμοποιείται από το συμβατικό PCHE επιλέχθηκαν και δοκιμάστηκαν για να προσδιοριστούν πιθανοί υποψήφιοι για το HELC. Οι προγραμματιστές ισχυρίζονται ότι αυτός ο σχεδιασμός μπορεί να μειώσει τον όγκο του recuperator κατά περισσότερο από 45% και το βάρος κατά περισσότερο από 54% σε σύγκριση με τις συμβατικές προσεγγίσεις PCHE για την ίδια θερμοότητα[53]. Με τη μείωση του βάρους του ανακτητή, το κόστος υλικού θα μειωθεί κατά παρόμοιο ποσοστό. Επίσης, λιγότερο ακριβά κράματα χάλυβα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή HELC. Εκτός από το μειωμένο βάρος, το κόστος υλικού και τις υψηλότερες αναλογίες επιφάνειας προς όγκο, ένα HELC έχει 78% λιγότερους συνδέσμους και εξαρτήματα ανά όγκο από τα τρέχοντα σχέδια PCHE που οδηγούν σε περαιτέρω εξοικονόμηση κόστους

6.3.2 Εναλλάκτης θερμότητας πλάκας (PFHE)

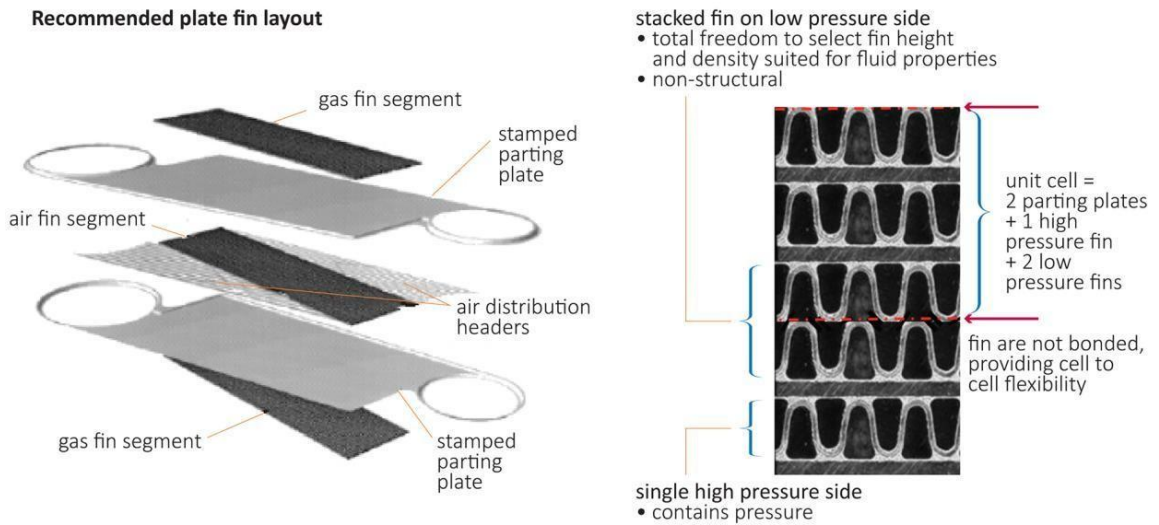
Ο εναλλάκτης θερμότητας PFHE(Plate-fin Heat Exchanger) αποτελείται από πτερύγια τα οποία συνδέονται με πλευρικές ράβδους και χωρίζονται με επίπεδα φύλλα διαχωρισμού. Αυτά τα στρώματα είναι ενσωματωμένα για να φιλοξενήσουν διάφορα σχέδια ροής, όπως ροή αντίθετου ρεύματος ή εγκάρσια ροή, ανάλογα με τις απαιτήσεις. Οι σχηματισμένες πλάκες στοιβάζονται και στη συνέχεια είτε συγκολλούνται ή συνδέονται με διάχυση για να δημιουργήσουν μια μονάδα ανταλλαγής θερμότητας. Η εικόνα 22 δείχνει τα βασικά συστατικά ενός συγκολλημένου PFHE.



Εικόνα 22: Εξαρτήματα του εναλλάκτη θερμότητας πτερυγίου με συγκολλημένη πλάκα[54]

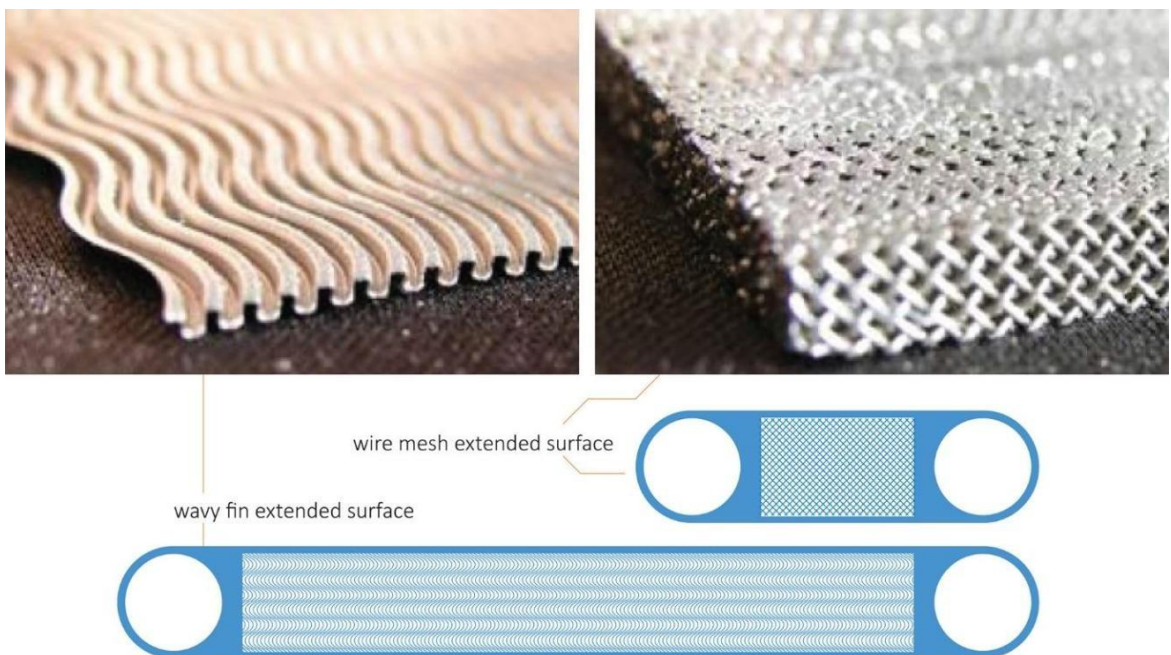
Τα PFHE έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως ως ανακτητές αεριοστροβίλων και έχουν αποδείξει την αξιοπιστία τους στο ακραίο περιβάλλον ενός στροβίλου αερίου με διαφορές υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας (υψηλότερες από αυτές του sCO₂ κύκλου), ταχείες θερμικές μεταβατικές αλλά μέτριες υψηλές πιέσεις και μέτριες διαφορές πίεσης (<1,5 MPa). Κατά την τελευταία δεκαετία, ανάπτυξη ανακτητών για προηγμένους πυρηνικούς αντιδραστήρες με χρήση sCO₂ και ο κύκλος του Brayton οδήγησε σε σχεδιασμό για υψηλότερες πιέσεις με μεγάλες διακυμάνσεις.

Μια διαφορετική προσέγγιση σχεδίασης πτερυγίων έχει υιοθετηθεί από την Ingersoll-Rand, η οποία μπορεί να χειριστεί μέτριες υψηλές θερμοκρασίες (530 °C) και πιέσεις, και μια διαφορά πίεσης 1,5MPa, και είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για απαιτητικές μεταβατικές θερμοκρασίες. Αυτά τα σχέδια μπορούν να χρησιμοποιούν μεθόδους συγκόλλησης και συγκόλλησης διάχυσης. Ο προτεινόμενος σχεδιασμός για εφαρμογή σε κύκλο sCO₂ φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα.



Εικόνα 23: Συνιστώμενη σχεδίαση PFHE [54]

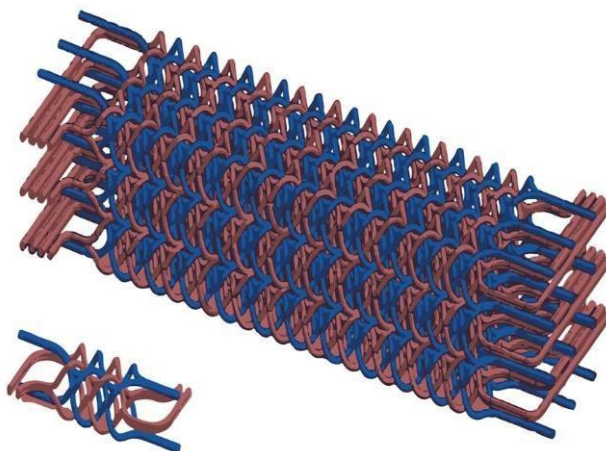
Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι γεωμετρίας πτερυγίων για την αύξηση της επιφάνειας και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Για παράδειγμα, το PFHE με συρματόπλεγμα ως επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας μπορεί να επιτύχει πυκνότητα επιφάνειας 7000-8000 m²/M³ σε σύγκριση με 4000-5000 m²/M³ για παρόμοιο PFHE με κυματιστά πτερύγια. Ως αποτέλεσμα, το HE με συρμάτινο πλέγμα είναι το πιο συμπαγές και αναμένεται να επιτύχει ακόμη υψηλότερη πυκνότητα ισχύος και την απαιτούμενη αντοχή κόπωσης με ανταγωνιστικό κόστος



Εικόνα 24: Σύγκριση μονάδας εναλλάκτη θερμότητας με συρματόπλεγμα και κυψέλης κυματοειδούς πτερυγίου με ίδια χωρητικότητα [54]

6.3.3 Εναλλάκτες θερμότητας από χυτοσίδηρο (CMHE)

Η SNL επιδιώκει έναν νέο εναλλάκτη θερμότητας από χυτοσίδηρο CMHE (Cast Metal Heat Exchanger) ως μεσοπρόθεσμη λύση. Θα μπορούσε να προσφέρει απόδοση παρόμοια ή καλύτερη από PCHE, αλλά σε λιγότερο από το ένα πέμπτο του κόστους επιτρέποντας μεγαλύτερη ευελιξία στα υλικά και στις γεωμετρίες καναλιών. Η ιδέα του CMHE βασίζεται στη διασύνδεση των καναλιών ροής που προτείνονται για προηγμένες επιφάνειες PCHE, όπως αυτά σχήματος S και αεροτομής-πτερυγίων. Η κατασκευή των πολύ διασυνδεδεμένων χώρων καναλιών αυτών των επιφανειών παράγει έναν πυρήνα χύτευσης περισσότερο σαν διάτρητη πλάκα. Ενώ μπορούν να εξομοιωθούν προηγμένες επιφάνειες PCHE που διασυνδέονται σε δύο διαστάσεις, η διασύνδεση μπορεί επίσης να εκτείνεται σε τρεις διαστάσεις όπως φαίνεται στην εικόνα 25, παρέχοντας βελτιωμένη μεταφορά θερμότητας με ελάχιστη αύξηση της πτώσης πίεσης. Ένας τέτοιος πυρήνας χύτευσης θα μπορούσε να δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές εκτύπωσης 3D σε σκόνη.



Εικόνα 25: Μια αντίστροφη περιστρεφόμενη διπλή ελικοειδής γεωμετρία που προτείνεται για χρήση σε CMHE μεταξύ δύο παρόμοιων υγρών: κόκκινα κανάλια για θερμή ροή και μπλε για κρύα ροή [53]

Η χύτευση χρησιμοποιείται εδώ και πολύ καιρό για τη μείωση του κόστους ενός εξαρτήματος μειώνοντας τον αριθμό και την πολυπλοκότητα των σχετικών σταδίων κατασκευής. Στην εικόνα 26 συγκρίνει τα στάδια επεξεργασίας πλακών που εμπλέκονται στην παραγωγή πλακών PFHE χρησιμοποιώντας συγκόλληση ή απευθείας χύτευση. Σε ένα CMHE, πολλά στοιχεία HE κατασκευάζονται σε μια

μεγαλύτερη μονάδα, μια επιλογή ιδιαίτερα ελκυστική για κράματα νικελίου υψηλής απόδοσης, όπου η κατεργασία που απαιτείται για μορφές προϊόντων πλάκας, κελύφους και σύρματος είναι δύσκολη.

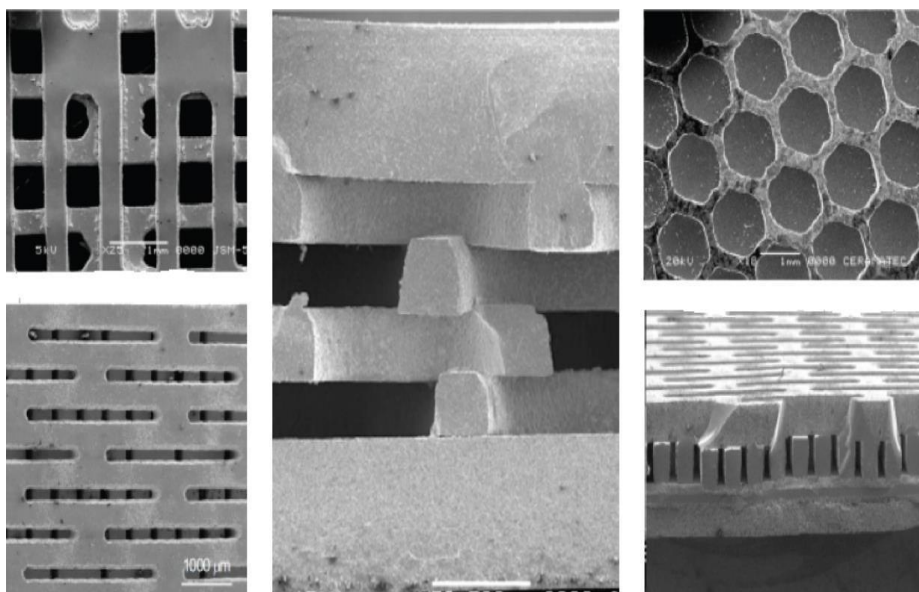


Εικόνα 26: Σύγκριση των σταδίων επεξεργασίας πλακών που εμπλέκονται στην παραγωγή PFHE με χρήση πλακών συγκόλλησης ή απευθείας χύτευσης [53][55]

Οι προγραμματιστές πιστεύουν ότι οι CMHE έχουν μεγάλες δυνατότητες μείωσης του κόστους. Ωστόσο, είναι περιορισμένη βιομηχανική εμπειρία με αυτές τις τεχνικές κατασκευής. Η πιο κρίσιμη πρόκληση θα είναι η εύρεση μεθόδων και τεχνικών για την αφαίρεση υλικού πυρήνα χύτευσης από το τελικό μπλοκ. Η δυνατότητα δοκιμής διαφόρων γεωμετρικών καναλιών HE θα είναι η επόμενη μεγάλη πρόκληση. Ενδέχεται να απαιτούνται τεχνικές φυγοκεντρικής ή χύτευσης πίεσης για στενές αποστάσεις με πολύ ιξώδη τήγματα .

6.3.4 Κεραμικοί εναλλάκτες θερμότητας μικροδιαύλων (CHE)

Τα κύρια πλεονεκτήματα των κεραμικών υλικών έναντι των παραδοσιακών μεταλλικών υλικών στην κατασκευή CHE (ceramic heat exchanger) είναι η εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία τους, το χαμηλό κόστος υλικού και η εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση και τη χημική διάβρωση. Η Ceramatec Inc (ΗΠΑ) ανέπτυξε πρόσφατα καινοτόμα σχέδια μικροδιαύλων και μεθόδους κατασκευής για την παραγωγή κλιμακωτών, οικονομικά αποδοτικών κεραμικών ανακτητών με υψηλή αξιοπιστία και υψηλή μεταφορά θερμότητας αποδοτικότητα και χαμηλή πτώση πίεσης κατάλληλη για ανάπτυξη σε εφαρμογές κύκλου ισχύος μεγάλης κλίμακας. Η κατασκευή συνίσταται στην παραγωγή πλάκων μικροδιαύλων και στη συνέχεια στη συγκόλληση τους σε στοίβες. Διάφοροι συνδυασμοί γεωμετρίας λεπίδων, ιξώδους και ξήρανσης χρησιμοποιούνται για χύτευση κυλίνδρων σε ταινία που κυμαίνονται από ένα έως αρκετές εκατοντάδες μικρόμετρα πάχους. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη ποικιλία σχεδίων μικροδιαύλων, όπως φαίνεται στη εικόνα 27. Οι πλάκες μπορούν να συναρμολογηθούν σε στοίβες χρησιμοποιώντας στεγανωτικά, συμπεριλαμβανομένων κεραμικών μελανιών, γυαλιών, χαλκοσυγκόλληση και συγκόλληση διάχυσης. Ο σχεδιασμός είναι τέτοιος ώστε η θερμοκρασία των κεραμικών με μεταλλικούς συνδέσμους να είναι σχετικά χαμηλή και, ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τυποποιημένες μέθοδοι σύνδεσης από κεραμικό σε μέταλλο όπως η συγκόλληση.[55]



Εικόνα 27: Παραδείγματα διαθέσιμων χαρακτηριστικών σε σχέδια μικροδιαύλων [55]

Χρησιμοποιώντας καθιερωμένες εμπορικές τεχνικές κατασκευής, το κόστος παραγωγής κεραμικών HE μπορεί να είναι ανταγωνιστικό. Η Ceramatec ισχυρίζεται

ότι τα κεραμικά μικροκανάλια είναι πολύ αποτελεσματικά, συμπαγή, εύκολο στην κατασκευή και έχουν εξαιρετική αντοχή στις ερπυσμοί και χαμηλό κόστος. Το μέγεθος μιας στήβας εναλλάκτη θερμότητας για ένα σύστημα ισχύος 5 MW θα είναι περίπου 0,15 m³. Επίσης, σε σύγκριση με τα υπερκράματα, τα κεραμικά ΗΕ μπορούν να αντέξουν σε θερμοκρασίες έως και 150 ° C υψηλότερες και μεγαλύτερες πιέσεις λόγω της ανώτερης αντίστασης ερπυσμού και οξειδωσης [55]. Ωστόσο, τα κεραμικά δεν αντέχουν μεγάλες θερμικές βαθμίδες και, εκτός από το καρβίδιο του πυριτίου και το νιτρίδιο του πυριτίου, είναι επιρρεπή σε αστοχία θερμικού σοκ. Οι σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται σε λιγότερο εύθραυστα κεραμικά υλικά όπως σύνθετα υλικά.

6.4 Υλικά

Οι μέγιστες συνθήκες λειτουργίας του προτεινόμενου έμμεσου και άμεσα θερμαινόμενου κύκλου sCO₂ υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις για την αντοχή των δομικών υλικών και την αντοχή στο περιβάλλον. Βασικά στοιχεία που προκαλούν ανησυχία είναι ο στρόβιλος, οι εναλλάκτες και ο καυστήρας (για ημι-κλειστό κύκλο sCO₂). Εκτεταμένες δοκιμές έχουν διεξαχθεί παγκοσμίως για τον εντοπισμό υλικών συμβατών με υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση για λειτουργία σε κύκλο sCO₂ και τις απαιτήσεις απόδοσης μεμονωμένων εξαρτημάτων. Οι απαιτήσεις που είναι μοναδικές για τους κύκλους sCO₂ και τα θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή υλικών. Τα υλικά που επιλέχθηκαν για προηγμένα υπερηχητικά συστήματα ατμού θα ήταν ένα καλό σημείο εκκίνησης και ότι τα κράματα που χρησιμοποιούνται σε συμβατικούς αεριοστρόβιλους θα μπορούσαν ενδεχομένως να είναι υποψήφια υλικά για κλειστό κύκλο sCO₂. Λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας και πίεσης, μπορεί να απαιτούνται κράματα με βάση το νικέλιο, όπως το IN738 για τον στρόβιλο στον κύκλο Allam. Επίσης ο φερριτικός χάλυβας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για ανακτητικά ΗΕ σε συστήματα κλειστού κύκλου με μέγιστη πίεση 20 MPa[56]

Σε προηγούμενες μελέτες, παρατηρήθηκε διάβρωση και ενανθράκωση μετάλλων σε υψηλή θερμοκρασία sCO₂ (> 500°C). Διατίθεται μεγάλος αριθμός μελετών σχετικά με τη συμπεριφορά ερπυσμού, διάβρωσης, οξειδωσης και εξαερισμού των κραμάτων. Αυτές οι δοκιμές διεξήχθησαν συνήθως σε καθαρό CO₂

και γενικά σε εύρος θερμοκρασίας 400-750 °C και πιέσεις έως 20-25 MPa με χρόνο έκθεσης που κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες έως 8000 ώρες. Πολλές από τις δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε κράματα με βάση σίδηρο που περιέχουν Cr, αλλά πραγματοποιήθηκαν επίσης δοκιμές σε κράματα με βάση Ni και κράματα σχηματισμού αλουμίνας με βάση Fe ή Ni. Μελέτες συγκόλλησης υπερκραμάτων και τεχνικών επίστρωσης για εφαρμογές υλικών σε sCO₂ βρίσκονται επίσης σε εξέλιξη. Τα αποτελέσματα αυτών των μελετών δείχνουν ότι γενικά:

- την αποικοδόμηση λόγω διάβρωσης, οξείδωσης και εξαερώσεως των δοκιμασμένων υλικών σε sCO₂ είναι ασήμαντη σε θερμοκρασίες κάτω των 500°C.
- ο ρυθμός διάβρωσης / οξείδωσης των υπό δοκιμή υλικών αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ το sCO₂ η πίεση έχει ελάχιστα αποτελέσματα.
- Οι υψηλές συγκεντρώσεις χρωμίου και νικελίου αυξάνουν σημαντικά την αντοχή στη διάβρωση των κραμάτων χάλυβα και τα υλικά με υψηλότερο κράμα αποδίδουν καλύτερα από τα υλικά χαμηλότερου κράματος σε υψηλή θερμοκρασία sCO₂. Ο ρυθμός διάβρωσης / οξείδωσης γενικά μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης Cr του κράματος, και οι ωστενιτικοί χάλυβες είναι πιο ανθεκτικοί στη διάβρωση που προκαλείται από sCO₂ από τους φερριτικούς-μαρτενσιτικούς χάλυβες εντός του εύρους θερμοκρασίας δοκιμής [57].

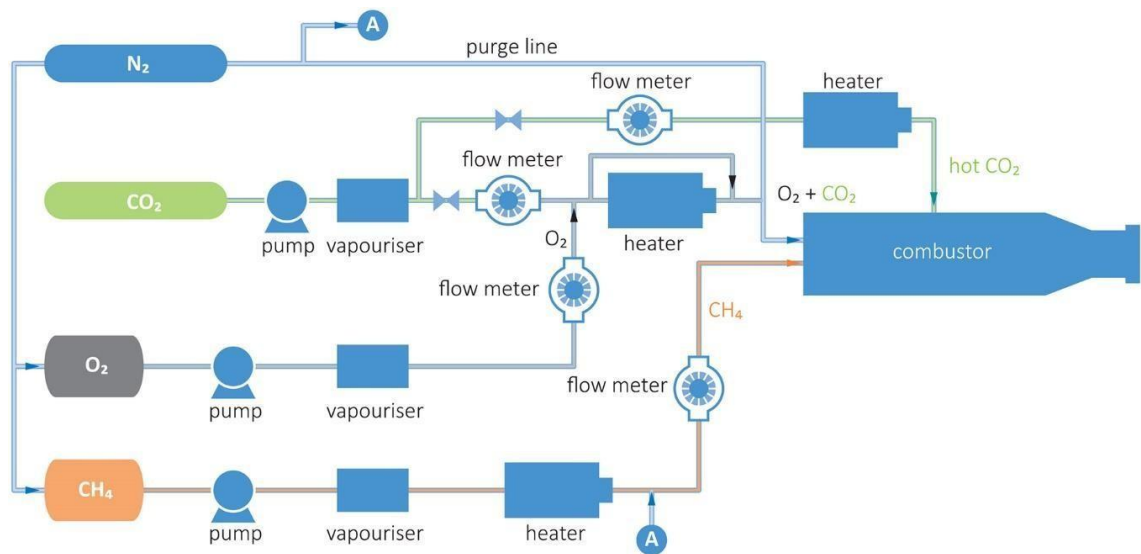
Ορισμένα αποτελέσματα δοκιμών υποδηλώνουν επίσης ότι είναι δυνατός ο σχηματισμός ενός συνεχούς επιφανειακού φιλμ χρωμίου (κράματα που περιέχουν Cr) ή αλουμίνας (κράματα που σχηματίζουν αλουμίνια) στο sCO₂ σε θερμοκρασίες <700 ° C, που εμφανίζει προστατευτική συμπεριφορά έναντι της οξείδωσης. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, μόνο κράματα με βάση το Ni σχηματίζουν ένα προστατευτικό στρώμα. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες ενδείξεις ότι η κλίμακα οξειδίου που σχηματίζεται στην επιφάνεια υπό ορισμένες συνθήκες θα μπορούσαν να προκαλέσουν διάβρωση των συστατικών του συστήματος. Ακόμη και όταν σχηματίζονται προστατευτικές κλίμακες, φαίνεται ότι η ενανθράκωση, ιδιαίτερα στους χάλυβες με χαμηλότερο κράμα, μπορεί να προκύψει από την είσοδο ειδών που περιέχουν άνθρακα μέσω της κλίμακας οξειδίου που σχηματίζεται στην επιφάνεια του κράματος .

Σε κύκλους οξυγόνου sCO₂, αναμένεται ότι ορισμένα χαμηλά επίπεδα προσμείξεων θα υπάρχουν υδρογονάνθρακες και NO_x / SO_x (ημι-κλειστοί κύκλοι με ορυκτά καύσιμα). Συνεχίζονται μελέτες για τη διερεύνηση των επιπτώσεων των

ακαθαρσιών στις ιδιότητες σταθερότητας, ερπυσμού και διάβρωσης των δομικών υλικών. Οι εργαστηριακές δοκιμές δείχνουν ότι τα δοκιμασμένα υλικά παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή στη διάβρωση όταν χαμηλά επίπεδα O₂ και H₂O είναι παρόντα σε σύγκριση με καθαρό CO₂ υπό τις ίδιες συνθήκες. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην υψηλότερη μερική πίεση οξυγόνου που προάγει το σχηματισμό προστατευτικών κλιμάκων οξειδίου. Χρειάζεται περισσότερη δουλειά για να κατανοήσουμε καλύτερα τις αλληλεπιδράσεις των υλικών με το sCO₂ υπό συνθήκες λειτουργίας και για τη δημιουργία δεδομένων που απαιτούνται για το σχεδιασμό και κατασκευή βασικών εξαρτημάτων [58].

6.5 Καυστήρας καυσίμου

Η Toshiba αναπτύσσει έναν καυστήρα οξυγόνου για τον κύκλο Allam της NET Power. Σε σύγκριση με τους τυπικούς αεριοστρόβιλους βαρέως τύπου, η διαδικασία καύσης του κύκλου χαρακτηρίζεται από τη μέτρια θερμοκρασία καύσης, την υψηλή πίεση και το διαφορετικό περιβάλλον καύσης. Απαιτεί καύση οξυκαυσίμου σε περίπου 30 MPa και 1150 ° C TIT. Εφαρμόζεται ένας μη προαναμεμιγμένος σχεδιασμός φλόγας διάχυσης με τη θερμοκρασία εισόδου πάνω από την αυτόματη ανάφλεξη για τον περιορισμό του κινδύνου αυτόματης ανάφλεξης. Δοκιμάστηκε πρώτα μια δοκιμαστική εξέδρα μικρής κλίμακας που χρησιμοποιεί μια απλή συσκευή στροβιλισμού. Ο σχηματισμός NO_x δεν προκαλεί ανησυχία, επομένως οι θερμοκρασίες φλόγας μπορούν να επιλεγούν για καλύτερη απόδοση, λειτουργικότητα και ανθεκτικότητα. Η δοκιμαστική εγκατάσταση είναι ένας καυστήρας Allam Cycle με κλίμακα 1:10 (Εικόνα 28). Οξυγόνο και CO₂ αναμειγνύονται μεταξύ 15% και 40% O₂ κατά μάζα. Οι θερμοκρασίες φλόγας είναι περίπου 2097-2207 ° C, σύμφωνα με τους συμβατικούς καυστήρες αεριοστρόβιλου διάχυσης. Το οξειδωτικό εισέρχεται στον καυστήρα αφού περάσει από ένα σετ στροβιλισμένων πτερυγίων, το οποίο οδηγεί σε ένα ρεύμα με συστατικά αξονικής και περιφερειακής ταχύτητας για τη βελτίωση της απόδοσης καύσης. Το ρεύμα οξειδωτή δημιουργεί μια σταθερή δίνη ανάλογη με τα συμβατικά συστήματα αεριοστρόβιλων. Χρησιμοποιεί αποδεδειγμένη τεχνολογία ψύξης, όπως ψύξη μεταφοράς, λόγω της μέτριας θερμοκρασίας καύσης και της υψηλής ικανότητας ψύξης CO₂.

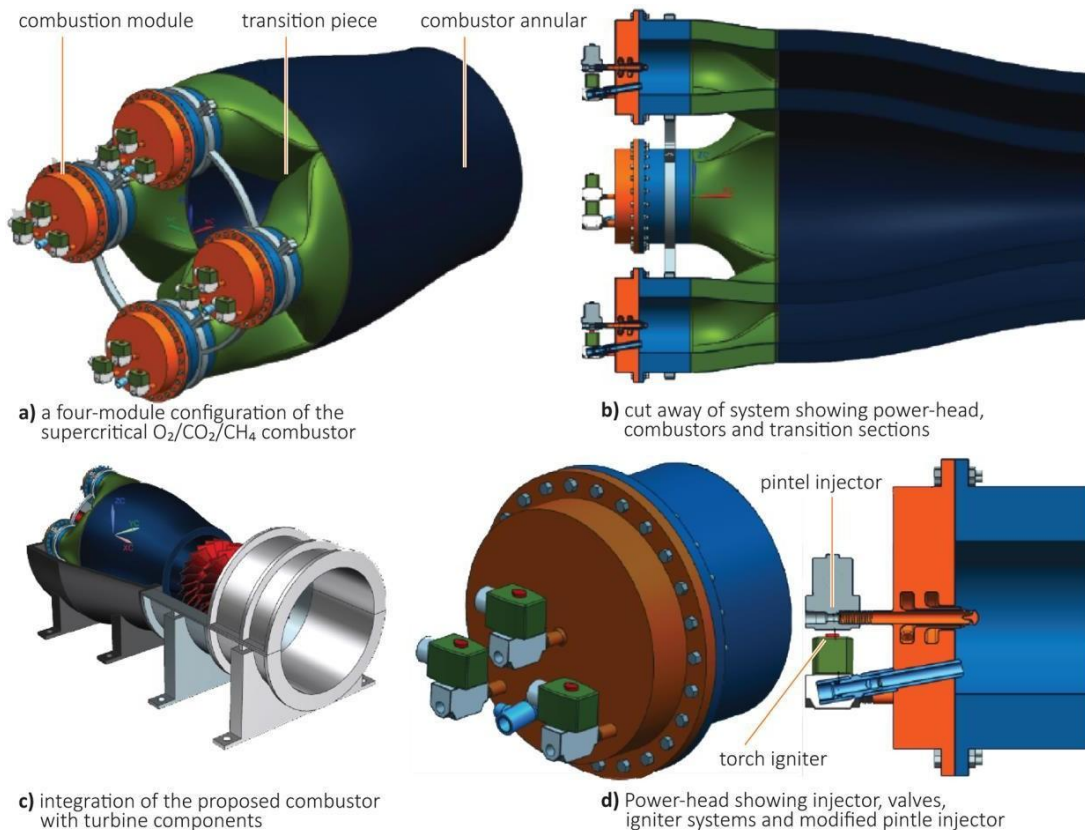


Εικόνα 28: Το σύστημα δοκιμής καύσης οξυγόνου 30 MPa της Toshiba [49]

Ο καυστήρας έχει σχεδιαστεί για πίεση αερίου 30 MPa, περισσότερο από 10 φορές την πίεση αερίου που χρησιμοποιείται σε συμβατικούς αεριοστρόβιλους. Υπολογιστικοί κώδικες και υπολογιστική δυναμική ρευστού CFD (Computational Fluid Dynamic) χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων μεταφοράς θερμότητας, ρευστού και μίγματος. Οι αρχικές δοκιμές που χρησιμοποιούν τη μονάδα 5 MWth έδειξαν καλή λειτουργικότητα σε ένα ευρύ φάσμα O_2/CO_2 αναλογίες με θερμοκρασίες μετάλλου κοντά στις προβλεπόμενες τιμές, αποδεικνύοντας τη σκοπιμότητα του σχεδιασμού. Οι δοκιμές έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση ενός ευρέος φάσματος επιχειρησιακών δεδομένων για το σχεδιασμό και την κατασκευή του καυστήρα οξυγόνου για το φυσικό αέριο που τροφοδοτείται με φυσικό αέριο, ισχύος 25 MWe sCO₂ εργοστάσιο επίδειξης [49].

Ερευνητές στο Πανεπιστήμιο του Τέξας (ΗΠΑ) έχουν αναπτύξει ένα εννοιολογικό σχέδιο για έναν καυστήρα οξυγόνου με καύσιμο φυσικό αέριο για ένα στρόβιλο 300 MWe. Ο σχεδιασμός βασίζεται σε έναν πυραυλικό κινητήρα υγρού οξυγόνου (LOX) / μεθανίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 29, και έχει δύο μεγάλα πλεονεκτήματα: 1) τη χρήση των υπάρχουσών τεχνολογιών και 2) έναν αρθρωτό σχεδιασμό που μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να είναι συμβατός με το ρεύμα ή παρόμοιες διατάξεις στροβίλων ισχύος. Η εικόνα 33α δείχνει μια διαμόρφωση τεσσάρων μονάδων του καυστήρα. [59] Διαμορφώσεις τριών και πέντε μονάδων μπορούν επίσης να ληφθούν υπόψη για την ανάλυση κλιμάκωσης. Κάθε μέρος περιλαμβάνει μια κεφαλή ισχύος, σώμα καυστήρα και ένα κομμάτι μετάβασης σε πλέγμα με τον δακτύλιο του καυστήρα (Εικόνα 29 b και 29c). Η κεφαλή ισχύος

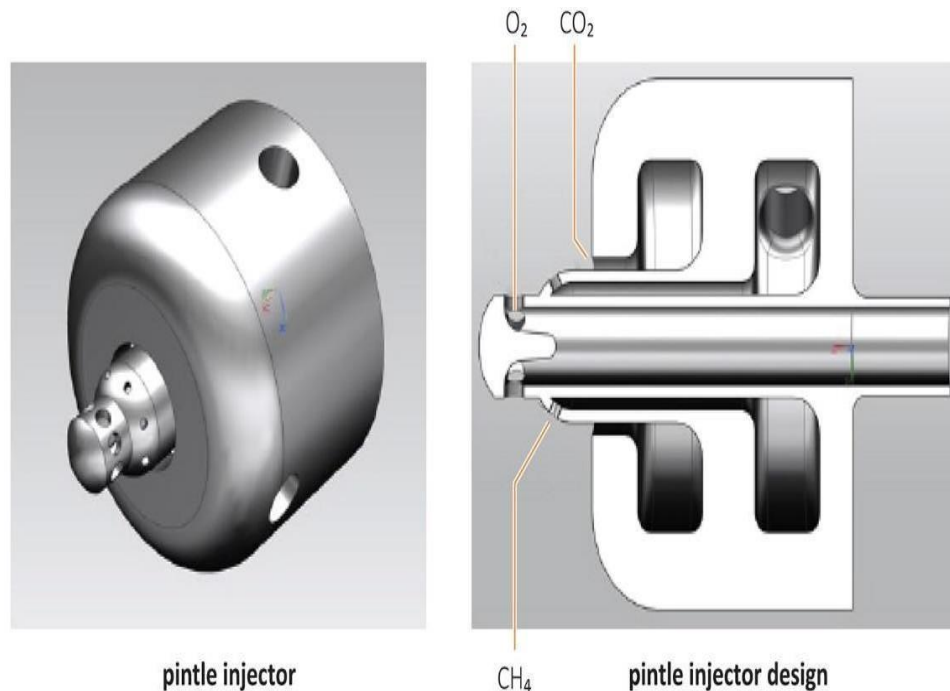
αποτελείται από στοιχεία εγχυτήρα, βαλβίδες και αναφλεκτήρα (Εικόνα 29d). Στην προτεινόμενη διαμόρφωση, τα λειτουργικά υγρά παραδίδονται από τέσσερις διαφορετικές κεφαλές ισχύος, κατανέμονται εξίσου στην είσοδο του θαλάμου καύσης και συνδέονται στον θάλαμο καύσης μέσω μιας μονάδας μετάβασης. Επιλέγεται μια γεωμετρία σχήματος καμπάνας για τον θάλαμο καύσης ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη ανάμιξη των ρευστών εργασίας από τέσσερις διαφορετικές κεφαλές ισχύος για μεγιστοποίηση της παραγωγής στροβίλου.



Εικόνα 29: Σχεδιασμός καυστήρα Οxyfuel που αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο του Τέξας [59]

Ο σχεδιασμός του μπέκ ψεκασμού υιοθετήθηκε λόγω της επεκτασιμότητας, της βελτιωμένης ανάμειξης, της υψηλής απόδοσης και της σταθερότητας καύσης καθώς και της ευκολίας κατασκευής. Έχει μακρά ιστορία χρήσης σε κινητήρες πυραύλων. Η ανάμιξη βασίζεται στη διασταύρωση της εξωτερικής αξονικής και εσωτερικής ακτινικής ροής προωθητικού στην επιφάνεια του εγχυτήρα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 29β. Ένα υπολογιστικό μοντέλο έχει αναπτυχθεί για την ανάλυση της ανάμειξης του υγρού εργασίας μέσα στο θάλαμο καύσης. Η ανάλυση έδειξε ότι ο εγχυτήρας μπορεί να επιτύχει υψηλά επίπεδα στροβιλισμού, οδηγώντας με ομοιόμορφη ανάμιξη και η γεωμετρία Εικόνας καμπάνας του θαλάμου καύσης

δρα για να διαλύσει τις αστάθειες και δημιουργεί ένα ομοιόμορφο ρεύμα ρευστού. Απαιτούνται δοκιμές για την επικύρωση του σχεδιασμού.

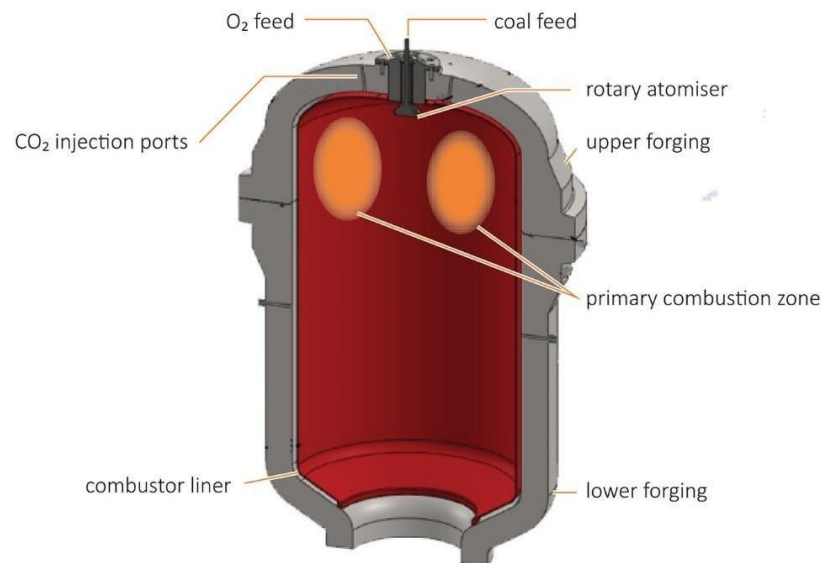


Εικόνα 30: Σχεδίαση για ένα μπεκ ψεκασμού [59]

Η SWRI (Soil and Water Resources Institute), σε συνεργασία με την Thar Energy, LLC, εργάζεται για την ανάπτυξη ενός υπερκρίσιμου καυστήρα καύσης οξυγόνου υψηλής θερμοκρασίας εισόδου κατάλληλου για ένα φυσικό αέριο ή καύσιμο με syngas. Ο κύκλος ισχύος έχει σκοπό την απόδοση της εγκατάστασης 52%. Ο σχεδιασμός του συστήματος και οι θερμοδυναμικές αναλύσεις που έχουν διεξαχθεί για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαμόρφωσης κύκλου και παραμέτρων σχεδιασμού καυστήρα, όπως θερμοκρασία εισόδου, πίεση και ροή μάζας. Έχει αναπτυχθεί ένα κινητικό μοντέλο και πραγματοποιήθηκε αρχική αξιολόγηση της κινητικής της καύσης σε συνθήκες εισόδου καυστήρα. Επίσης έχει αναπτυχθεί ένας σχεδιασμός καύσης με αυτανάφλεξη και πραγματοποιούνται δοκιμές κλίμακας πάγκου. Θα διεξαχθούν περαιτέρω μελέτες σχεδιασμού που χρησιμοποιούν παραμετρική προσομοίωση CFD, προσομοίωση ροής ψύξης και δομική προσομοίωση.

Ένας σχεδιασμός για έναν υπερκρίσιμο καυστήρα οξυγόνου τύπου στροβιλισμού για στερεό καύσιμο έχει επίσης αναπτυχθεί στο SWRI χρησιμοποιώντας μοντέλα υπολογιστών για την παροχή αρχικών εκτιμήσεων των αντιδράσεων καύσης

άνθρακα. Η προσπάθεια σχεδιασμού περιελάμβανε την αρχική μηχανική διάταξη του καυστήρα, τον αρχικό σχεδιασμό των δοχείων πίεσης και την εννοιολογική διάταξη ενός βρόχου δοκιμαστικής κλίμακας.



Εικόνα 31: Ο υπερκρίσιμος καυστήρας οξυγόνου τύπου στροβιλισμού για στερεά καύσιμα [12]

Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 31, ο καυστήρας εγχέει πολύ άνθρακα-νερού ή άνθρακα-CO₂ στην κορυφή του θαλάμου καύσης. Αυτός ο πολτός κατανέμεται ομοιόμορφα στη ζώνη καύσης χρησιμοποιώντας περιστροφικό ψεκαστήρα. Αραιωτικό CO₂ εγχέεται σε δακτύλιο που σχηματίζεται από το περίβλημα καυστήρα. Η θέση της ζώνης καύσης ελέγχεται από τη θέση του εγχυτήρα O₂ την ανάμειξη του καυσίμου και του οξειδωτή στο θάλαμο καύσης. Το καυτό καυσαέριο και τυχόν υποπροϊόντα στερεής καύσης ρέουν προς τα κάτω και εξέρχονται από τον θάλαμο καύσης για αφαίρεση σωματιδίων [60]

6.6 Άλλες εξελίξεις

Ερευνητές στο Αμερικανικό Εθνικό Εργαστήριο DOE έχουν αναπτύξει τον δυναμικό κώδικα σταθμού παραγωγής ενέργειας Plant Dynamics Code (PDC) για ανάλυση των επιπέδων του συστήματος για κύκλους sCO₂. Αυτό έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για σχεδιασμό κύκλων καθώς και για την ανάπτυξη και την βελτίωση στρατηγικών ελέγχου. Οι τρέχουσες δραστηριότητες επικεντρώνονται στη

δοκιμή και την επικύρωση του PDC χρησιμοποιώντας δεδομένα διαθέσιμα από μικρού μεγέθους δοκιμές κύκλου sCO₂. Ο δοκιμαστικός βρόχος έχει αναπτυχθεί σε κώδικα RPCSIM (Reactor Power and Control SIMulator) για την ανάλυση της απόδοσης του συστήματος. Τα συστήματα προσομοίωσης υπολογιστών χρησιμοποιούνται επίσης για λεπτομερείς αναλύσεις των λειτουργικών επιδόσεων, όπως απώλειες, διαρροές, και επιδόσεις συμπιεστή.

Ένας μεγάλος αριθμός υπολογιστικών μοντέλων έχει αναπτυχθεί σε όλο τον κόσμο για επιδόσεις και οικονομικές αναλύσεις, αξιολογήσεις της χημικής κινητικής της καύσης του sCO₂. Πρόσφατα η εταιρεία Peregrine ξεκίνησε συνεργασία με την εταιρεία SNL σε εναλλάκτη θερμότητας που μπορεί να αντιμετωπίσει τις υψηλές θερμικές τάσεις από μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας. Η εταιρεία Xdot αναπτύσσει ένα έδρανο αλουμινίου που υποστηρίζει έναν άξονα στροβίλου που περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα σε sCO₂. Η Flowserve σχεδιάζει ένα στεγανοποιητικό υψηλής αντοχής για στροβίλους ισχύος στο 700°C και 30 MPa. Αυτό έχει ένα δυναμικό παρέμβυσμα που μπορεί να ολισθαίνει και να σφραγίζει. Η SNL με τους συνεργάτες της εκτελούν δοκιμές στους κλειστούς κύκλους δοκιμών sCO₂ και για ρουλεμάν και στεγανοποιήσεις.

Η επιλογή μεγέθους σωλήνων και ο σχεδιασμός σωληνώσεων είναι σημαντικοί για τη μείωση των τάσεων διαστολής λόγω θερμότητας και για την αντιμετώπιση των επιδράσεων της στο στροβιλομηχανή, τους θερμαντήρες, τους ανακτητές και τους ψύκτες αερίου. Το κόστος των σωληνώσεων και του σχετικού εξοπλισμού εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει περίπου το 7-8% του συνολικού κόστους κατασκευής. Επομένως, ο βέλτιστος σχεδιασμός σωληνώσεων μπορεί να βελτιώσει τη συνολική απόδοση και να μειώσει το κόστος κεφαλαίου της μονάδας.

Συνοπτικά, εκτελούνται εκτεταμένες δραστηριότητες E & A για την ανάπτυξη κύκλων sCO₂ για παραγωγή ενέργειας. Σημαντική πρόοδος έχει πραγματοποιηθεί σε πολλούς τομείς όπως η ανάπτυξη του σχεδιασμού και της κατασκευής των βασικών συστατικών, ο εντοπισμός κατάλληλων υλικών και η δημιουργία μοντέλων υπολογιστών για βασικές μελέτες και αναλύσεις συστημάτων.

Κεφάλαιο 7

7.1 Συμπεράσματα

Το σύστημα μετατροπής ενέργειας κύκλου sCO_2 Brayton είναι μια καινοτόμος ιδέα που μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της χρήσης υπερκρίσιμου CO_2 ως λειτουργικού υγρού. Ο κύκλος sCO_2 μπορεί δυνητικά να επιτύχει θερμικές αποδόσεις 50% ή περισσότερο. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα του sCO_2 σημαίνει ότι τα μηχανικά μέρη είναι μικρότερα, όπως και το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα του εργοστασίου. Αυτοί οι παράγοντες σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογικές ιδιότητες θα μπορούσαν ενδεχομένως να οδηγήσουν σε χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου και καυσίμου και μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την παραγωγή ενέργειας. Έχουν αναφερθεί δύο κύριες διαμορφώσεις κύκλου ισχύος sCO_2 : ένας κύκλος Brayton κλειστής έμμεσης θέρμανσης και ένας κύκλος ημικλειστού, απευθείας πυροδότησης, καύσης οξυγόνου. Ένας κύκλος Brayton κλειστού βρόχου λειτουργεί με τρόπο παρόμοιο με τον κύκλο ατμού Rankine αλλά χρησιμοποιεί το sCO_2 ως ρευστό λειτουργίας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ουσιαστικά σε οποιαδήποτε εφαρμογή που χρησιμοποιεί επί του παρόντος έναν κύκλο Rankine, συμπεριλαμβανομένης της πυρηνικής, της ηλιακής θερμικής ενέργειας, της γεωθερμίας, και της καύσης ορυκτών καυσίμων. Οι πιο πολλά υποσχόμενες περιοχές εφαρμογής για κύκλους ημικλεισμένης, άμεσης καύσης οξυ-καύσης sCO_2 είναι στην παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, ιδίως όταν απαιτείται δέσμευση άνθρακα.

Κατά την τελευταία δεκαετία, υπήρξε εκτεταμένη E&A σε όλο τον κόσμο, ιδίως στις ΗΠΑ. Μεγάλο μέρος της προσπάθειας έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη στροβιλομηχανών sCO_2 , ιδιαίτερα στις μεθόδους σχεδιασμού και κατασκευής εναλλακτών θερμότητας και δοκιμών υλικών. Τα τελευταία χρόνια, το αμερικανικό DOE έχει επενδύσει δεκάδες εκατομμύρια δολάρια για να προωθήσει την τεχνολογία ανάπτυξης και παραγωγής τεχνολογίας κύκλου SCO_2 . Ένα εξαετές έργο για το

σχεδιασμό, την κατασκευή, και την λειτουργία μιας δοκιμαστικής εγκατάστασης 10 MWe sCO₂ έχει προγραμματιστεί και χρηματοδοτείται από το US DOE. Η E&A των κύκλων ισχύος sCO₂ για την εφαρμογή πυρηνικών, ηλιακών, ορυκτών καυσίμων και χαμηλής ποιότητας πηγές θερμότητας επιδιώκεται επίσης ενεργά στην Αυστραλία, τον Καναδά, τη Γαλλία, τη Γερμανία, τις Κάτω Χώρες, την Ισπανία, το Ηνωμένο Βασίλειο και πιο πρόσφατα, την Κίνα και την Ινδία. Αυτές οι δραστηριότητες περιορίζονται κυρίως σε δοκιμές εργαστηριακής κλίμακας και σε μοντέλα και ανάλυση υπολογιστών. Οι βασικές αρχές των εργαλείων μηχανικής για τον σχεδιασμό στροβίλου ατμού και αερίου και συμπιεστή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό και την κατασκευή της στροβιλομηχανής sCO₂. Ωστόσο, τα πρωτότυπα σχέδια στροβιλομηχανών sCO₂ πρέπει να δοκιμαστούν και να επικυρωθούν, καθώς υπάρχει έλλειψη επιχειρησιακής εμπειρίας του στροβίλου ισχύος sCO₂ και συναφών στροβιλομηχανών σε κλίμακα ή / και υπό συνθήκες σχετικές με την εμπορική λειτουργία. Αρκετοί μικροί κλειστοί βρόγχοι δοκιμής sCO₂ ποικίλου μεγέθους (100 kW έως 1 MW) έχουν συναρμολογηθεί και έχουν αναπτυχθεί και επικυρωθεί τα σχέδια και η κατασκευή στροβιλομηχανών sCO₂, συμπεριλαμβανομένων των ρουλεμάν, μερών στεγανοποίησης και του εναλλάκτη. Οι μικρής κλίμακας στρόβιλοι και οι συμπιεστές sCO₂ που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα έχουν αποδώσει κοντά στο σχεδιασμό.. Ο πρώτος εμπορικός κινητήρας 8 MWe κλειστού κύκλου sCO₂ Brayton, που αναπτύχθηκε, κυκλοφόρησε στην αγορά το 2014. Μετατρέπει την απορριπτόμενη θερμότητα από διάφορες βιομηχανικές διεργασίες σε ηλεκτρική ενέργεια και λειτουργεί σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Η συνεχιζόμενη εμπορευματοποίηση των κινητήρων θερμότητας τέτοιου τύπου δείχνει την τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα των κύκλων sCO₂ για παραγωγή ενέργειας.. Έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος μέχρι στιγμής σε πολλούς τομείς όπως η ανάπτυξη του σχεδιασμού και της κατασκευής των βασικών εξαρτημάτων, ο προσδιορισμός των υλικών που είναι κατάλληλα για εφαρμογή σε κύκλους ισχύος sCO₂, ο προσδιορισμός της βέλτιστης διαμόρφωσης κύκλου sCO₂ για παραγωγή ενέργειας, η δημιουργία μοντέλων υπολογιστών για βασικές μελέτες και αναλύσεις συστήματος. Εάν βρεθούν λύσεις για την επίλυση όλων των τεχνικών προκλήσεων στην ανάπτυξη των κύκλων ισχύος sCO₂, θα μπορούσαν να προσφέρουν σημαντικές ευκαιρίες για μελλοντική παραγωγή ενέργειας από άνθρακα σε έναν κόσμο με περιορισμό άνθρακα. **Multi-objective optimization of a tri-generation system based on biomass gasification/digestion combined with S-CO₂ cycle and absorption chiller**

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 114, October 2019, 109331
Renewable and Sustainable Energy Reviews, Carbon dioxide as geothermal working fluid: An overview Author links open overlay panel Ana Filipa Esteves Francisca Maria Santos José Carlos Magalhães Pires
- [2] Investigation into Off-Design Performance of a S-CO₂ Turbine Based on Concentrated Solar Power
- [3] Novel Cycles Using Carbon Dioxide as Working Fluid New Ways to Utilize Energy from Low- Grade Heat Sources Licentiate Thesis by Yang Chen Stockholm, May 2006 School of Industrial Engineering and Management Department of Energy Technology Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration
- [4] Article Carbon Dioxide Mixtures as Working Fluid for High-Temperature Heat Recovery: A Thermodynamic Comparison with Transcritical Organic Rankine Cycles
- [5] SCO₂ Power Cycles for Fossil Fuels Department of Energy
- [6] 4R Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle - Energy.gov
- [7] Θερμοδυναμική για μηχανικούς 8^η έκδοση Yunus A. Cengel, Michael A. Boles Εκδόσεις Τζιόλα, 2015
- [8] Innovative power generation systems using supercritical CO₂ cycles, Qian Zhu* The IEA Clean Coal Centre, 176 Upper Richmond Rd, London SW15 2SH, UK
- [9] Conceptual Designs of 50MWe and 450MWe Supercritical CO₂ Turbomachinery Trains for Power Generation from Coal. Part 1: Cycle and Turbine March 2016 Conference: The 5th International Symposium - Supercritical CO₂ Power Cycles, (March 28-31, 2016), San Antonio, Texas At: San Antonio, Texas

- [10] U.S. Department of Energy , Energy Efficient and Renewable Energy 2015 Renewable Energy Data Book
- [11] Regulatory Control of a 10 MWe Supercritical CO₂ Recompression Closed Brayton Cycle
E.A. Liese , P. Mahapatra, J.T. Albright, and S.E. Zitney National Energy Technology Laboratory 2019 Annual Review Meeting for Crosscutting, Pittsburgh, PA, April 9-11, 2019
- [12] Power generation from coal using supercritical co₂ , Dr Qian Zhu 9th international conference on IGCC&XTL technologies ,3-8 June 2018, Berlin, Germany
- [13] Circulating fluidised bed co-combustion of coal and biomass Author links open overlay panel Pilar Gayana Juan Adaneza Luis F.de Diego Francisco Garc a Labiano Andres Cabanillas Alberto Bahillo Martti Aho Kati Vei onen
- [14] A detailed study of oxy-fuel combustion of biomass in a circulating fluidized bed (CFB) combustor: Evaluation of catalytic performance of metal nanoparticles (Al, Ni) for combustion efficiency improvement
- [15] SANDIA REPORT Scaling Considerations for a Multi-Megawatt Class Supercritical CO₂Brayton Cycle and Path Forward for Commercialization Darryn Fleming, Thomas Holschuh, Tom Conboy, Gary Rochau, Robert Fuller
- [16] TESTING OF COMPACT RECUPERATORS FOR A SUPERCRITICAL CO₂ BRAYTON POWER CYCLE P. M. Fourspring Bechtel Marine Propulsion Corporation Schenectady, New York, USA J. P. Nehrbauser Bechtel Marine Propulsion Corporation Schenectady, New York, USA S. Sullivan Brayton Energy LLC Hampton, New Hampshire, USA J. Nash Brayton Energy LLC Hampton, New Hampshire, USA
- [17] Advanced Numerical Methodology to Analyze High-Temperature Wire-Net Compact Heat Exchangers For a Micro-Combined Heat and Power System Application
- [18] Optimal Design of Microtube Recuperators for an Indirect Supercritical Carbon Dioxide Recompression Closed Brayton Cycle Yuan Jiang a* , Eric Liese

a* , Stephen E. Zitney a,b , Debangsu Bhattacharyya b a) National Energy Technology Laboratory, 3610 Collins Ferry Rd, Morgantown, WV 26507, USA b) Department of Chemical and Biomedical Engineering, West Virginia University, Morgantown, WV 26506, USA

- [19] Development Approach to the Combustor of Gas Turbine for Oxy-Fuel, Supercritical CO₂ Cycle Yasunori Iwai, Masao Itoh, Yuichi Morisawa, Shinju Suzuki, David Cusano, Mark Harris
- [20] Thermal and Transport Properties for the Simulation of Direct-Fired sCO₂ Combustor
- [21] Turbomachinery magazine ,Toshiba tests combustor for CO₂
- [22] GPPS-NA-2018-0157 Exploration of Combustor Design for Direct Fired Oxy-fuel Application in a sCO₂ Power Cycle
- [23] OXIDATION/CORROSION IN MATERIALS FOR SUPERCRITICAL CO₂ POWER CYCLES
- [24] The Use of Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy to Quantify Internal Carburization in Supercritical CO₂
- [25] Energy Conversion and Management Volume 44 , Issue 17, October 2003, Pages 2699-2712
- [26] Research and development issues in CO₂ capture Axel Meisen Xiaoshan Shuai
- [27] Supercritical CO₂ Mixtures for Advanced Brayton Power Cycles in Line-Focusing Solar Power Plants
- [28] CO₂-Based Mixtures as Working Fluids for Geothermal Turbines
- [29] Angelino, G. Carbon Dioxide Condensation Cycles for Power Production. *J. Eng. Gas Turbines Power* **1968**, 90, 287.

- [30] Al-Sulaiman, F.A.; Atif, M. Performance Comparison of Different Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycles Integrated with a Solar Power Tower. *Energy* **2015**, *82*, 61–71.
- [31] CO₂ mixtures as innovative working fluid in power cycles applied to solar plants. Techno-economic assessment
- [32] Aspen Plus, AspenTech, Cambridge, MA, 2010. Google Scholar
- [33] E. Regulation, O. NoRA, GESTIS DNEL Database, Update 2015. Google Scholar
- [34] CO₂-based mixture working fluids used for the dry-cooling supercritical Brayton cycle: Thermodynamic evaluation
- [35] Supercritical CO₂ Mixtures for Advanced Brayton Power Cycles in Line-Focusing Solar Power Plants
- [36] Investigation on the performance of the supercritical Brayton cycle with CO₂-based binary mixture as working fluid for an energy transportation system of a nuclear reactor
- [37] Noble-Gas Binary Mixtures for Closed-Brayton-Cycle Space Reactor Power Systems
- [38] Thermo-economic analysis of a CO₂ plume geothermal and supercritical CO₂ Brayton combined cycle using solar energy as auxiliary heat source
- [39] CO₂-Plume Geothermal (CPG) Heat Extraction in Multi-layered Geologic Reservoirs
- [40] Carbon Dioxide Plume Geothermal (CPG) System-A New Approach for Enhancing Geothermal Energy Production and Deployment of CCUS on Large Scale in India
- [41] Thermo-economic analysis of a CO₂ plume geothermal and supercritical CO₂ Brayton combined cycle using solar energy as auxiliary heat source

- [42] Thermodynamic performance evaluation of supercritical CO₂ closed Brayton cycles for coal-fired power generation with solvent-based CO₂ capture
- [43] Closed-cycle gas turbine for power generation: A state-of-the-art review
- [44] Multi-objective optimization of a tri-generation system based on biomass gasification/digestion combined with S-CO₂ cycle and absorption chiller
- [45] Effect of Mixtures on Compressor and Cooler in Supercritical Carbon Dioxide Cycles
- [46] Effect of Impurities on Compressor and Cooler in Supercritical CO₂ Cycles
- [47] Ma Z, Turchi C S (2011) Advanced supercritical carbon dioxide power cycle configurations for use in concentrating solar power systems
- [48] Kalra C, Hofer D, Sevincer E, Moore J, Brun K (2014) Development of high efficiency hot gasturbo-expander for optimized CSP supercritical CO₂ power block operation. Paper presented at: The 4th Supercritical CO₂ Power Cycles Symposium September, Pittsburgh, PA, USA, 9-10 September 2014. San Antonio, TX, USA, Southwest Research Institute, 11 pp (2014)
- [49] Iwai Y, Itoh M, Morisawa Y, Suzuki S (2015) Development approach to the combustor of gas turbine for oxy-fuel, supercritical CO₂ cycle. In: The Proceedings of ASME 2015 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition
- [50] Design of Small Centrifugal Compressor Test Model for a Supercritical CO₂ Compressor in the Fast Reactor Power Plant
- [51] Ahn Y, Bae S J, Kim M, Cho S K, Baik S, Lee J I, Cha J E (2015) Review of supercritical CO₂ power cycle technology and current status of research and development.
- [52] A review of printed circuit heat exchangers for supercritical CO₂ and Helium Brayton cycles
- [53] Carlson M D, Kruiuzenga A K, Schalansky C, Fleming D F (2014a) Sandia progress on advanced heat exchangers for sCO₂ Brayton cycle
- [54] Plate Fin Heat Exchanger Design for the Supercritical CO₂ Cycle

- [55] Lewinsohn C A, Fellows J, N. Sullivan, Kee R J, Braun R (2016) Ceramic, Microchannel Heat Exchangers for Supercritical Carbon Dioxide Power Cycles
- [56] EFFECT OF IMPURITIES IN CO₂ AT SUPERCRITICAL PRESSURE ON ALLOY COMPATIBILITY
- [57] Nickel-Base Superalloys for Advanced Power Systems – An Alloy Producer's Perspective
- [58] THE EFFECT OF IMPURITIES ON OXIDATION IN SUPERCRITICAL CO₂ AT 750°C
- [59] Conceptual Design of a Supercritical Oxyfuel Combustor Based on LOX/Methane Rocket Engine Technologies
- [60] McClung A (2015) Oxy- Combustion integration for direct fired sCO₂ cycles.